

## Estabilidad pseudoestática de muros escalonados de suelo reforzado: disociación global-interna por longitud de refuerzo

### Pseudo-static stability of stepped reinforced soil walls: global–internal stability dissociation due to reinforcement length

### Estabilidade pseudoestática de muros escalonados de solo reforçado: dissociação global-interna devido ao comprimento do reforço

Molina Torres Carlos Rafael<sup>1</sup>  
Universidad Técnica de Manabí

[rafamolina2820@gmail.com](mailto:rafamolina2820@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0003-6728-7181>



Hualpa Muñoz José Washington<sup>2</sup>  
Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí

[josew.hualpa@uleam.edu.ec](mailto:josew.hualpa@uleam.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0007-2310-0185>



 DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v7/nE1/1449>

#### Como citar:

Molina Torres, C, R. Hualpa, Muñoz J, W. (2026). Estabilidad pseudoestática de muros escalonados de suelo reforzado: disociación global-interna por longitud de refuerzo. Código Científico Revista de Investigación, 7(E1), 3179-3203.

**Recibido:** 07/02/2026

**Aceptado:** 05/03/2026

**Publicado:** 31/03/2026

## Resumen

La reducción de la longitud del refuerzo en muros escalonados de suelo reforzado representa un riesgo poco estudiado en zonas sísmicas, especialmente cuando la estabilidad global permanece satisfactoria mientras la estabilidad interna por arrancamiento ya ha fallado de forma localizada. Para identificar umbrales críticos y caracterizar la respuesta diferenciada por nivel del muro, se desarrolló un análisis numérico paramétrico sobre una sección representativa bajo condición pseudoestática, variando sistemáticamente la longitud del refuerzo en nueve configuraciones mientras se mantuvieron constantes la geometría, las propiedades del suelo y las condiciones de carga. La estabilidad global resultó prácticamente inalterada por la reducción del refuerzo, mientras que la estabilidad interna por arrancamiento se degradó de forma progresiva y diferenciada, el bloque de base falló primero por alta demanda dinámica, el de coronación por bajo confinamiento vertical, y el nivel medio resultó el más resiliente. Estos hallazgos evidencian una disociación entre ambos indicadores que las verificaciones globales no permiten detectar. Las longitudes del diseño base representan un mínimo funcional que no admite reducción sin comprometer la seguridad interna del sistema, por lo que la verificación por niveles de la estabilidad interna debe priorizarse en el dimensionamiento de este tipo de estructuras en zonas sísmicas.

**Palabras clave:** suelo reforzado, muros escalonados, análisis pseudoestático, estabilidad interna, arrancamiento.

## Abstract

Reinforcement length reduction in stepped reinforced soil walls poses an underexplored risk in seismic zones, particularly when global stability remains adequate while internal pullout stability has already failed locally. To identify critical reduction thresholds and characterize the differential response across wall levels, a numerical parametric analysis was conducted on a representative cross-section under pseudo-static loading. Reinforcement length was systematically varied across nine configurations while geometry, soil properties, and loading conditions were held constant. Global stability proved largely unaffected by reinforcement shortening, whereas internal pullout stability degraded progressively and unevenly: the base block failed first due to high dynamic demand, the crown block followed due to low vertical confinement, and the mid-level block proved the most resilient. These findings reveal a dissociation between global and internal indicators that conventional global-only assessments cannot capture. The base design reinforcement lengths represent a functional minimum, any reduction compromises internal safety. Level-by-level internal stability verification should therefore be prioritized when designing this type of structure in seismic zones.

**Keywords:** reinforced soil, stepped retaining walls, pseudo-static analysis, internal stability, pullout.

## Resumo

A redução do comprimento do reforço em muros escalonados de solo reforçado representa um risco pouco explorado em zonas sísmicas, sobretudo quando a estabilidade global se mantém satisfatória enquanto a estabilidade interna ao arrancamento já foi comprometida localmente. Para identificar limiares críticos de redução e caracterizar a resposta diferenciada por nível do muro, desenvolveu-se uma análise numérica paramétrica sobre uma seção representativa sob

condição pseudoestática, variando sistematicamente o comprimento do reforço em nove configurações, com geometria, propriedades do solo e condições de carregamento mantidas constantes. A estabilidade global mostrou-se praticamente insensível à redução do reforço, ao passo que a estabilidade interna ao arrancamento degradou-se de forma progressiva e diferenciada: o bloco de base foi o primeiro a falhar, pela alta demanda dinâmica que recebe; o de coroamento seguiu, pelo baixo confinamento vertical; e o nível intermediário revelou-se o mais resiliente. Esses resultados evidenciam uma dissociação entre ambos os indicadores que verificações globais isoladas não permitem detectar. Os comprimentos do projeto base representam um mínimo funcional que não admite redução sem comprometer a segurança interna do sistema, razão pela qual a verificação por níveis da estabilidade interna deve ser priorizada no dimensionamento desse tipo de estrutura em zonas sísmicas.

**Palavras-chave:** solo reforçado, muros escalonados, análise pseudoestática, estabilidade interna, arrancamento.

## Introducción

Los muros de suelo reforzado con geomallas constituyen una alternativa técnica y económicamente ventajosa para la estabilización de taludes y la conformación de plataformas en proyectos de ingeniería civil, particularmente en situaciones donde se requiere contener rellenos sobre terrenos con restricciones geométricas o geotécnicas. Arqueñiva y Romero (2021) evidenciaron que los muros de suelo mecánicamente estabilizados con geomalla presentan mayores factores de seguridad frente al volteo, tanto en condición estática como sísmica, en comparación con muros de concreto armado convencionales, lo que resalta su ventaja técnica derivada principalmente de la flexibilidad inherente del sistema y su capacidad de acompañar asentamientos diferenciales de la fundación. Esta flexibilidad estructural, junto con el aprovechamiento del efecto de trabazón entre el suelo granular y la geomalla, permite movilizar esfuerzos de tracción en el refuerzo que incrementan la resistencia interna del macizo (Arqueñiva y Romero, 2021). La conformación escalonada o en múltiples niveles de este tipo de estructuras responde con frecuencia a condicionantes geométricos del terreno y al requerimiento de optimizar el volumen de relleno, lo que introduce complejidades adicionales en la distribución de esfuerzos y en los mecanismos de estabilidad del sistema (Gao et al., 2022, 2024; López, 2024). Xu et al. (2024) demostraron que configuraciones de refuerzo escalonado

con geometría trapezoidal de la zona reforzada pueden comprometer la estabilidad al deslizamiento respecto a configuraciones con longitud de refuerzo uniforme, evidenciando que la distribución geométrica del refuerzo incide directamente en el modo de falla gobernante.

En zonas sísmicas, la acción inercial puede alterar de manera considerable tanto los factores de seguridad como los mecanismos de falla en muros de suelo reforzado, lo que hace que su evaluación de desempeño cobre especial relevancia. Un ejemplo concreto lo aportan González et al. (2018), quienes estudiaron el comportamiento estático y sísmico de un muro de suelo reforzado con geomalla utilizado como estribo de puente en Chile, expuesto al terremoto del 27 de febrero de 2010. Sus resultados confirmaron que el diseño resistió adecuadamente tanto en términos de estabilidad interna como externa, valiéndose del equilibrio límite y del enfoque pseudoestático bajo los lineamientos de la FHWA. Dicho enfoque traduce la acción sísmica en una fuerza estática equivalente proporcional al peso del sistema, lo que hace posible estimar el desempeño global e interno del muro de forma directa, sin recurrir a modelaciones dinámicas más complejas (González et al., 2018). Por ello, resulta particularmente útil en análisis paramétricos donde interesa cuantificar la sensibilidad del sistema ante cambios controlados en una sola variable, sin que otras condiciones de carga varíen entre modelos.

La longitud del refuerzo es una de las variables de mayor incidencia en la estabilidad de este tipo de sistemas. López (2024) señaló que su optimización por tramo es fundamental para garantizar simultáneamente la estabilidad global, externa e interna; en la misma línea, Xu et al. (2023) confirmaron que la configuración del refuerzo determina el modo de falla gobernante y los factores de seguridad resultantes en muros MSE bajo carga sísmica. Sin embargo, la literatura no ofrece evidencia paramétrica suficiente para trazar umbrales claros de reducción bajo condición pseudoestática en configuraciones escalonadas, ni estudios sistemáticos que demuestren cómo la estabilidad global puede mantenerse satisfactoria

mientras el arrancamiento ya ha fallado de forma localizada, disociación que puede conducir a interpretaciones incompletas del desempeño real de la estructura bajo acción sísmica.

Frente a este escenario, el presente estudio plantea un análisis numérico paramétrico que examina cómo varía la estabilidad pseudoestática de muros escalonados de suelo reforzado cuando se acorta progresivamente la longitud del refuerzo. La reducción se articula mediante un factor adimensional  $\alpha$  aplicado de forma proporcional a todas las capas del sistema, de modo que la geometría global, las propiedades del suelo, las cargas y la tipología del refuerzo se conservan sin cambios entre modelos. El propósito es determinar en qué punto la disminución de  $\alpha$  genera transiciones entre distintos dominios de estabilidad, y si esa transición ocurre de manera uniforme en toda la altura del muro o de forma diferenciada por nivel.

El hallazgo que articula todo el estudio puede enunciarse tal que, en un muro escalonado de suelo reforzado bajo carga pseudoestática, la estabilidad global puede mantenerse satisfactoria mientras el arrancamiento ya ha comprometido bloques específicos. Esta disociación no es una curiosidad numérica, sino un riesgo concreto de diseño, lleva a que verificaciones centradas exclusivamente en la estabilidad global pasen por alto fallas internas localizadas. Por eso, el trabajo propone que en zonas de alta sismicidad las verificaciones de estabilidad interna por nivel deben recibir atención prioritaria en el proceso de dimensionamiento.

## Metodología

El presente estudio adopta un enfoque numérico-paramétrico orientado a examinar cómo la longitud del refuerzo influye en la estabilidad pseudoestática de muros escalonados de suelo reforzado. Todas las variables geométricas y mecánicas distintas a la longitud del refuerzo se mantienen constantes en todos los modelos, de modo que el efecto del parámetro analizado pueda identificarse de forma directa, sin interferencia de factores secundarios. Los

resultados se interpretan en términos comparativos, priorizando la coherencia mecánica del análisis.

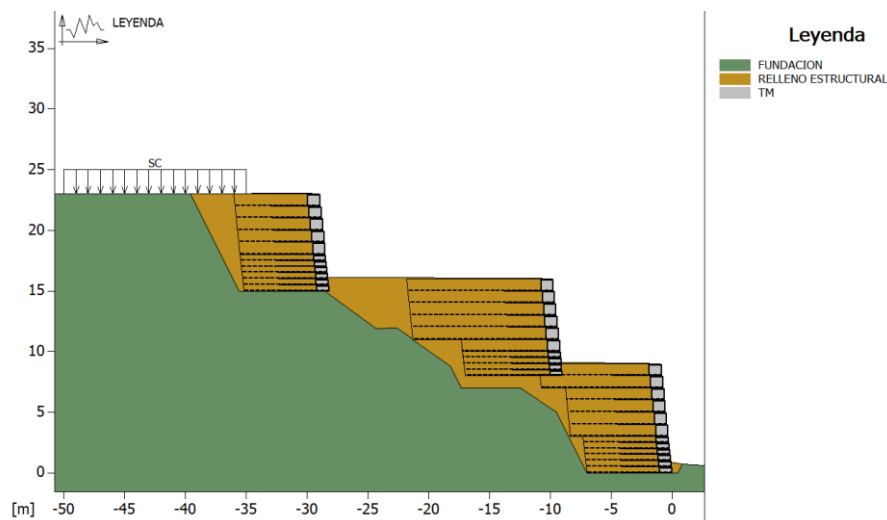
La investigación correspondió a un estudio cuantitativo, de alcance explicativo y enfoque numérico-paramétrico. El diseño fue no experimental y transversal, basado en simulación computacional mediante el método de equilibrio límite implementado en el software MACSTARS.

**Modelo base y sección representativa**

El estudio toma como punto de partida una sección transversal representativa correspondiente a un relleno estabilizado mediante un muro escalonado de suelo reforzado. La geometría incorpora varios niveles escalonados y una disposición regular del refuerzo, sin vincularse a un proyecto específico, con el fin de favorecer una interpretación amplia de los resultados. Esta decisión metodológica responde al criterio de aislar el efecto del parámetro de interés sobre los mecanismos de estabilidad, evitando condicionamientos propios de un caso particular, tal como se ha procedido en estudios numéricos paramétricos previos sobre muros de suelo reforzado (Arqueñiva y Romero, 2021)

**Figura 1**

*Sección transversal representativa empleada como modelo base para el análisis paramétrico*



Sobre la sección transversal observada en la Figura 1 se construye el modelo base, que representa el sistema suelo–refuerzo en su configuración de diseño original. En él se fijaron la geometría global, la separación vertical entre capas de refuerzo, la inclinación del paramento y las condiciones externas de análisis, de modo que ninguna de estas variables interfiera con la interpretación de los resultados.

En el modelo base, cada capa de refuerzo presenta una longitud determinada por la geometría del sistema; por consiguiente, las longitudes no son necesariamente iguales entre sí. Sobre esta configuración inicial se construyen los modelos paramétricos mediante la reducción sistemática y proporcional de las longitudes de refuerzo, introduciendo un factor adimensional  $\alpha$  que se describe en la sección siguiente. Esta estrategia asegura que las relaciones relativas entre las distintas longitudes de refuerzo se conserven a lo largo del análisis, en concordancia con el procedimiento empleado por López (2024) para la modelación de muros de doble segmento con MACSTARS.

### **Análisis paramétrico y definición de los modelos**

El análisis paramétrico se basa en la variación controlada de la longitud del refuerzo, adoptada como la única variable independiente del estudio. Para este propósito se emplea el factor adimensional  $\alpha$ , definido como la relación entre la longitud del refuerzo de cada modelo y la correspondiente al modelo base:

$$L = \alpha \cdot L_{base}$$

El valor  $\alpha = 1.0$  identifica el modelo base, mientras que valores menores representan reducciones proporcionales de la longitud del refuerzo. A partir del modelo base se generan ocho configuraciones adicionales mediante la disminución progresiva del valor de  $\alpha$ , abarcando un rango de 1.00 a 0.60. En todos los modelos, la longitud de cada capa resulta de multiplicar su longitud base por el mismo factor  $\alpha$ , sin alterar la geometría global del sistema,

la disposición relativa de las capas, las propiedades mecánicas del suelo ni la tipología del refuerzo.

La adopción de este enfoque paramétrico es coherente con la práctica habitual en estudios numéricos de muros de suelo reforzado, en los que la variación controlada de una sola variable permite identificar tendencias de comportamiento sin la interferencia de efectos combinados (Abrego y Barrientos, 2025). En total se generaron nueve configuraciones con valores de  $\alpha$  de 1.00 a 0.60, reduciendo el factor en decrementos de 0.05 entre modelos consecutivos, denominados M1 a M9 respectivamente.

### **Indicadores de estabilidad considerados**

La evaluación del comportamiento del sistema suelo–refuerzo se realiza mediante indicadores de estabilidad asociados a mecanismos globales e internos. El análisis se centra exclusivamente en aquellos mecanismos que dependen directamente de la interacción suelo–refuerzo y de la capacidad de anclaje del sistema, excluyendo verificaciones externas típicas de muros rígidos, como deslizamiento, volcamiento o capacidad portante, dado que el objetivo es caracterizar el comportamiento mecánico del relleno reforzado y no evaluar el cumplimiento de requisitos normativos de diseño.

La estabilidad global se evalúa mediante el factor de seguridad ( $FS_G$ ), asociado a superficies de falla profundas que involucran el relleno reforzado y el terreno de fundación. Este indicador refleja la capacidad del sistema para mantener el equilibrio global bajo la acción combinada de cargas gravitacionales y pseudoestáticas. González et al. (2018) y Bandyopadhyay et al. (2025) determinaron que la evaluación simultánea de la estabilidad global e interna es indispensable para caracterizar de forma integral el desempeño de muros de suelo reforzado bajo condición sísmica.

La estabilidad interna se evalúa a través de dos indicadores complementarios. El primero corresponde al factor de seguridad frente al arrancamiento del refuerzo ( $FS_P$ ),

relacionado con la capacidad de anclaje desarrollada por interacción entre el suelo y el refuerzo más allá de la superficie de falla. La resistencia al arrancamiento constituye uno de los indicadores más sensibles ante variaciones en los parámetros de diseño del refuerzo, como la longitud de anclaje disponible más allá de la superficie de falla (Chen et al., 2025; Li et al., 2025).

El segundo corresponde al factor de seguridad frente a la rotura por tracción del refuerzo ( $FS_T$ ), asociado a la relación entre la demanda de tracción inducida en el refuerzo y su resistencia disponible. Abrego y Barrientos (2025) verificaron estos mismos indicadores de estabilidad interna en muros de suelo reforzado analizados con MACSTAR2000 bajo condición pseudoestática, confirmando que la reducción del coeficiente sísmico horizontal afecta de forma diferenciada al  $FS_P$  y al  $FS_T$ , lo que justifica su evaluación separada.

El factor de seguridad a tracción ( $FS_T$ ) se calcula como la relación entre la resistencia nominal del refuerzo ( $T_b$ ) y la fuerza agente por capa ( $T_d$ ). En el presente análisis, el valor de  $T_d$  resultó constante en las capas de geomalla uniaxial a lo largo de todos los bloques evaluados, como consecuencia del Método Rígido implementado en MACSTARS; este valor debe interpretarse dentro del marco del método de cálculo empleado.

Los umbrales mínimos de factor de seguridad adoptados para la evaluación del cumplimiento normativo corresponden a los establecidos por la FHWA para muros mecánicamente estabilizados bajo condición pseudoestática, conforme a la filosofía de Diseño por Esfuerzos Permisibles (ASD). Bajo este enfoque, los valores mínimos para condición sísmica equivalen al 75% de los factores estáticos de referencia, resultando en  $FS_{min} = 1.125$  para los mecanismos de arrancamiento y tracción, y  $FS_{min} = 1.10$  para la estabilidad global (Federal Highway Administration, 2009). Estos umbrales se emplean de forma consistente a lo largo del análisis comparativo.

### Condición pseudoestática y parámetros de análisis

El análisis del sistema se desarrolla bajo una condición pseudoestática, incorporada con el propósito de representar de forma simplificada los efectos de la acción sísmica sobre la estabilidad del muro escalonado de suelo reforzado. Esta aproximación modela la carga sísmica como una fuerza estática equivalente a un porcentaje de la masa involucrada, expresada mediante un coeficiente sísmico horizontal constante aplicado uniformemente sobre la masa del sistema. La principal ventaja del método radica en que convierte el problema dinámico en uno de equilibrio estático, lo que permite evaluar la respuesta global e interna sin recurrir a análisis dinámicos explícitos, siendo especialmente adecuado para estudios paramétricos comparativos (González et al., 2018; Patra & Shahu, 2020).

El valor del coeficiente pseudoestático horizontal ( $k_h$ ) se mantiene constante en todos los modelos analizados, de modo que las variaciones observadas en los indicadores de estabilidad se atribuyan únicamente a los cambios introducidos mediante el factor  $\alpha$ . Adicionalmente, la sobrecarga superficial aplicada en la coronación se mantiene constante en todos los modelos.

### Parámetros constantes del modelo

El análisis paramétrico se desarrolla a partir de un conjunto de parámetros geotécnicos, de carga y de refuerzo que se adoptan como constantes en todos los modelos, con el objetivo de aislar la influencia de la longitud del refuerzo. En todos los casos, los materiales se modelan bajo condiciones drenadas y con comportamiento friccional predominante. La cohesión del relleno estructural y del material de relleno de gavión (TM) se considera nula, característica propia de suelos granulares aptos para el refuerzo con geosintéticos (Arqueñiva y Romero, 2021). Las propiedades geotécnicas de los materiales considerados se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1***Propiedades geotécnicas de los materiales considerados.*

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\varphi$ (°)	$c$ (kPa)
Suelo de fundación	20.40	35.52	199.91
Relleno estructural	19.00	34.00	0.00
TM – relleno de gavión (piedra bola)	18.00	40.00	0.00

La sobrecarga superficial adoptada fue de 21 kN/m<sup>2</sup>. El coeficiente pseudoestático horizontal se determinó conforme a la NEC-SE-GC (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015b), que establece  $k_h = 0.6 \cdot Z \cdot Fa$ , donde  $Z = 0.50$  corresponde a la zona sísmica de alta amenaza del emplazamiento y  $Fa = 1.12$  es el coeficiente de amplificación para perfil de suelo tipo D según la NEC-SE-DS (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015a), resultando  $k_h = 0.336$ . La componente vertical del coeficiente sísmico se asumió igual a cero ( $k_v = 0$ ), criterio ampliamente adoptado en análisis pseudoestáticos de muros de suelo reforzado (González et al., 2018; Sharma & Prashant, 2023).

El sistema de refuerzo empleado corresponde a la geomalla uniaxial, con una resistencia nominal a la tracción de 210 kN/m y una separación vertical constante entre capas de 0.50 m. La interacción suelo–geomalla se caracteriza mediante factores de interacción predefinidos en la base de datos de MACSTARS para el producto seleccionado, siendo el factor de interacción refuerzo/arena  $C_i = 0.80$ , valor representativo del relleno estructural empleado.

El sistema cuenta con ocho bloques de refuerzo con alturas individuales que varían entre 1.00 m y 5.00 m, y longitudes de refuerzo en el modelo base que oscilan entre 7.00 m y 12.00 m según el bloque, siendo TM-05'1 el de mayor longitud con 12.00 m y los bloques TM-01, TM-06 y TM-07 los de menor longitud con 7.00 m cada uno. La suma de alturas individuales de los ocho bloques asciende a 25.00 m; sin embargo, dado que los bloques se disponen de forma escalonada horizontalmente y no apilados en vertical, como se observa en

la Figura 1, la altura máxima del sistema medida desde la base de  $TM - 01$  hasta la plataforma superior es de 23 m.

La sobrecarga superficial “SC” de 21 kPa se aplica con ángulo de incidencia vertical ( $0^\circ$ ) sobre la plataforma superior del sistema, en el tramo comprendido entre  $x = -50$  m y  $x = -35$  m, actuando directamente sobre el bloque  $TM - 07$ . Esta carga se mantiene constante en todos los modelos analizados.

Para el análisis paramétrico de estabilidad interna se seleccionaron los bloques  $TM - 01$ ,  $TM - 04$  y  $TM - 06$  como representativos de los niveles base, medio y superior del sistema respectivamente. Si bien  $TM - 07$  constituye el bloque de mayor cota en el modelo,  $TM - 06$  fue seleccionado como representativo del nivel superior dado que  $TM - 07$  opera bajo condiciones particulares de carga por la sobrecarga superficial aplicada directamente sobre su coronación, lo que introduciría efectos específicos que escapan al objetivo del análisis paramétrico centrado en la variación de la longitud del refuerzo.

### Software y procedimiento de cálculo

El análisis de estabilidad se llevó a cabo mediante el software MACSTARS (Maccaferri Stability Analysis of Reinforced Soils), desarrollado por Maccaferri a finales de los años noventa (Claret y Portela, 2017). El programa implementa el método de equilibrio límite, fundamentado en el análisis de círculos de deslizamiento con distintos centros y radios, determinando mediante iteración el factor de seguridad mínimo que satisface las condiciones de estabilidad del sistema (López, 2024). El método supone que la resistencia al corte del suelo se moviliza en su totalidad a lo largo de la superficie de falla potencial, e incorpora la contribución del refuerzo a través de la tensión movilizada en cada capa en la intersección con dicha superficie.

MACSTARS permite modelar la estabilidad global, la estabilidad interna, el deslizamiento y el vuelco en estructuras de terreno reforzado que integran simultáneamente

paramentos de malla metálica de doble torsión (Terramesh) y geomallas uniaxiales de poliéster como refuerzo primario (Claret y Portela, 2017). La condición pseudoestática se incorpora al modelo mediante la introducción del coeficiente sísmico horizontal  $k_h$  como fuerza inercial equivalente aplicada uniformemente a la masa del sistema, procedimiento consistente con el utilizado por Abrego y Barrientos (2025) en el análisis de muros de suelo reforzado en zonas de alta sismicidad con MACSTAR2000.

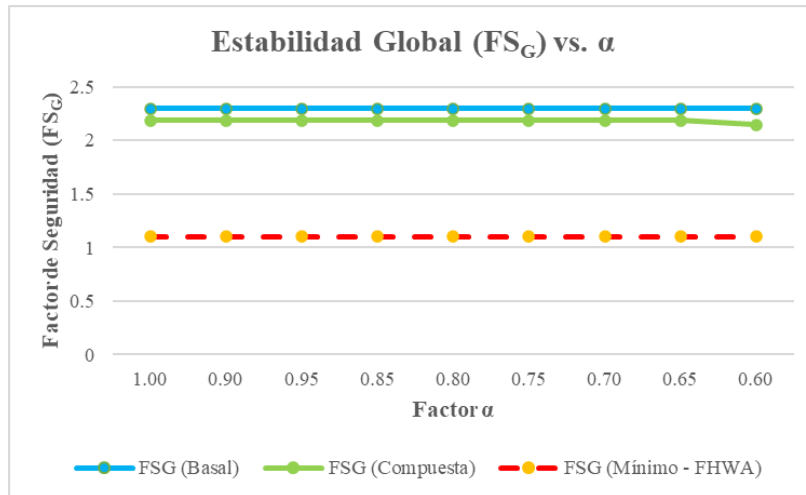
El procedimiento de cálculo se inició con la definición de la geometría del sistema y las propiedades geotécnicas de los materiales en el modelo base ( $\alpha = 1.0$ ), a partir del cual se generaron los modelos paramétricos M2 a M9 mediante la aplicación proporcional del factor  $\alpha$  sobre las longitudes de refuerzo de todas las capas. Posteriormente, se ejecutó el análisis de estabilidad para cada modelo bajo la condición pseudoestática definida y, finalmente, se registraron los valores de  $FS_G$ ,  $FS_P$  y  $FS_T$  para cada configuración, con el fin de analizar la evolución de estos indicadores en función de la variación de  $\alpha$ .

## Resultados

### Estabilidad Global ( $FS_G$ vs $\alpha$ )

Los resultados de estabilidad global obtenidos para los nueve modelos analizados se presentan en la Figura 2, diferenciando entre el mecanismo de falla basal y el mecanismo compuesto. La representación gráfica evidencia que ambas curvas permanecen prácticamente horizontales a lo largo del rango paramétrico analizado, con una leve inflexión del  $FS_G$  compuesto únicamente en M9. Ambas curvas se mantienen en todo momento muy por encima del umbral mínimo establecido por la FHWA para condición pseudoestática ( $FS_{mín} = 1.10$ ), confirmando que la estabilidad global no constituye el mecanismo crítico del sistema ante la reducción de la longitud del refuerzo.

**Figura 2**  
Estabilidad Global ( $FS_G$ ) vs.  $\alpha$



Los valores numéricos correspondientes a cada modelo se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2**  
Factores de seguridad de estabilidad global para los modelos M1–M9

Modelo	$\alpha$	$FS_G$ (Basal)	$FS_G$ (Compuesto)
M1	1.00	2.299	2.186
M2	0.95	2.299	2.186
M3	0.90	2.299	2.186
M4	0.85	2.299	2.186
M5	0.80	2.299	2.186
M6	0.75	2.299	2.186
M7	0.70	2.299	2.186
M8	0.65	2.299	2.186
M9	0.60	2.299	2.148

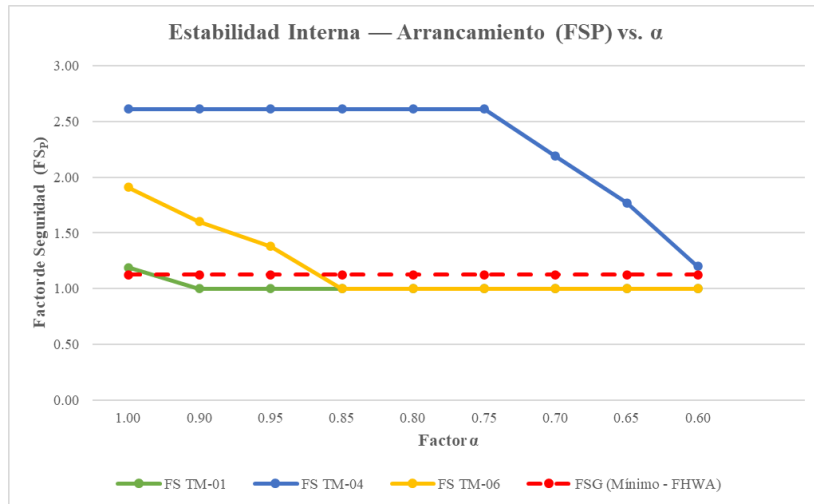
El factor de seguridad global basal ( $FS_G$  Basal) permanece completamente invariante en 2.299 para todos los modelos analizados, independientemente de la reducción aplicada mediante el factor  $\alpha$ . Este resultado es mecánicamente coherente: la superficie de falla basal involucra exclusivamente al suelo de fundación y a la masa global del relleno como cuerpo rígido, por lo que su resistencia no depende de la longitud de anclaje de las capas de refuerzo individuales, sino de los parámetros geotécnicos del suelo de fundación y del peso total del sistema, ambos invariantes en el análisis.

El factor de seguridad global compuesto ( $FS_G$  Compuesto) se mantiene igualmente estable en 2.186 desde M1 hasta M8, registrando una reducción marginal a 2.148 únicamente en M9 ( $\alpha = 0.60$ ). Esta leve caída, del orden del 1.7% respecto al modelo base, indica que la falla compuesta, cuya superficie atraviesa parte del sistema reforzado, comienza a sensibilizarse ante reducciones extremas de la longitud del refuerzo, aunque en ningún caso se aproxima a valores críticos. En todos los modelos evaluados, ambos indicadores de estabilidad global superan ampliamente los umbrales mínimos establecidos por la normativa FHWA para condición pseudoestática.

### **Análisis detallado de Estabilidad Interna por bloques**

Los resultados de estabilidad interna se presentan desagregados por bloque estructural en la Figura 3, correspondiendo TM-01 al nivel base del sistema, TM-04 al nivel medio y TM-06 al nivel superior o de coronación. Esta selección permite caracterizar la respuesta del refuerzo a lo largo de la altura del muro bajo distintos regímenes de confinamiento y empuje dinámico. Se identifican claramente tres patrones de comportamiento diferenciados: TM-01 experimenta una caída abrupta desde M1 a M2 y se estabiliza en el piso de reporte del software para el resto del rango; TM-06 muestra una degradación progresiva entre M1 y M4, momento en el que también alcanza el piso de reporte; TM-04 mantiene su valor durante los primeros seis modelos y registra una caída gradual únicamente a partir de M7, sin alcanzar en ningún caso el umbral normativo de 1.125. La línea de umbral FHWA permite identificar visualmente los modelos en condición de falla técnica para cada bloque.

**Figura 3**  
Estabilidad Interna — Arrancamiento ( $FS_p$ ) vs.  $\alpha$



Los valores numéricos correspondientes a cada modelo y bloque se detallan en la Tabla

3. El análisis detallado por nivel se desarrolla en las subsecciones siguientes.

**Tabla 3**  
Factores de seguridad de estabilidad interna por bloque para los modelos M1–M9

Modelo	$\alpha$	Bloque	$FS_p$	$FS_T$	Modelo	$\alpha$	Bloque	$FS_p$	$FS_T$
M1	1.00	TM-01	1.19	1.94	M6	0.75	TM-06	1.00	1.94
		TM-04	2.61	1.94			TM-01	1.00	1.94
		TM-06	1.91	1.94			TM-04	2.61	1.94
M2	0.95	TM-01	1.00	1.94	M7	0.70	TM-06	1.00	1.94
		TM-04	2.61	1.94			TM-01	1.00	1.94
		TM-06	1.60	1.94			TM-04	2.19	1.94
M3	0.90	TM-01	1.00	1.94	M8	0.65	TM-06	1.00	1.94
		TM-04	2.61	1.94			TM-01	1.00	1.94
		TM-06	1.38	1.94			TM-04	1.77	1.94
M4	0.85	TM-01	1.00	1.94	M9	0.60	TM-06	1.00	1.94
		TM-04	2.61	1.94			TM-01	1.00	1.94
		TM-06	1.00	1.94			TM-04	1.20	1.94
M5	0.80	TM-01	1.00	1.94			TM-06	1.00	1.94
		TM-04	2.61	1.94					

**Bloque TM-01 (Nivel Base)**

El bloque de nivel base registra el comportamiento más crítico del conjunto. En M1 ( $\alpha = 1.00$ ), el FSP de TM-01 asciende a 1.19, superando apenas el umbral de 1.125 con una reserva de solo 0.065 unidades. Desde M2 ( $\alpha = 0.95$ ) en adelante, el  $FS_p$  cae al piso de

reporte del software y no se recupera, indicando que la longitud de anclaje disponible es insuficiente para movilizar la fricción requerida. Todo modelo con  $\alpha \leq 0.95$  presenta falla técnica por arrancamiento en este bloque bajo condición pseudoestática.

#### **Bloque TM-04 (Nivel Medio)**

El bloque de nivel medio exhibe el comportamiento más resiliente del sistema. Su  $FS_p$  se mantiene en 2.61 desde M1 hasta M6, comenzando a descender a partir de M7; 2.19 en M7, 1.77 en M8 y 1.20 en M9. En ningún caso desciende por debajo del umbral de 1.125, siendo el único bloque que no registra falla técnica en todo el rango analizado.

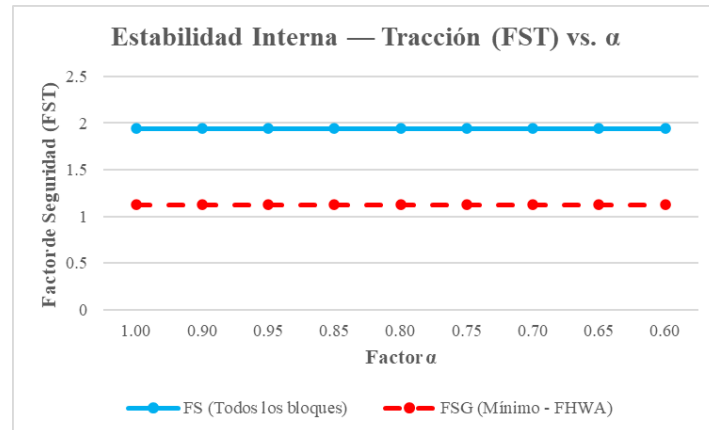
#### **Bloque TM-06 (Nivel Superior)**

El bloque de nivel superior presenta una degradación progresiva del  $FS_p$ ; 1.91 en M1, 1.60 en M2, 1.38 en M3, alcanzando 1.00 a partir de M4 ( $\alpha = 0.85$ ) y manteniéndose en ese valor hasta M9. La caída continua entre M1 y M4 refleja la sensibilidad de los bloques de coronación ante la pérdida de longitud de anclaje bajo bajos esfuerzos de confinamiento. La falla técnica por arrancamiento se produce en M4 ( $\alpha = 0.85$ ).

#### **Síntesis y comparativa de modelos**

El análisis conjunto de los indicadores de estabilidad interna permite identificar dos hallazgos de carácter sistemático que atraviesan todos los modelos evaluados. El primero concierne a la invariabilidad absoluta del  $FS_T$ , cuya evolución en función de  $\alpha$  se presenta en la Figura 4. La curva es completamente horizontal en todos los modelos, con un valor constante de 1.94 independientemente del bloque analizado y de la reducción aplicada sobre la longitud del refuerzo, manteniéndose en todo momento por encima del umbral normativo de 1.125.

**Figura 4**  
*Estabilidad Interna — Tracción ( $FS_T$ ) vs.  $\alpha$*



Que el  $FS_T$  se mantenga constante a lo largo de todo el rango paramétrico confirma que la rotura por tracción no representa el modo de falla crítico en ninguno de los escenarios evaluados. Esto tiene una explicación directa, la tracción depende de las propiedades mecánicas de la geomalla, que no cambian entre modelos, y no de cuánto mide la cola de anclaje. Al no variar la resistencia del material ni la demanda de tracción con  $\alpha$ , el indicador permanece inalterado.

El segundo hallazgo es la vulnerabilidad diferencial por nivel. Los bloques de los extremos, base ( $TM - 01$ ) y coronación ( $TM - 06$ ), alcanzan la condición de falla técnica por arrancamiento con reducciones de  $\alpha$  significativamente menores que el bloque de nivel medio ( $TM - 04$ ).  $TM - 01$  falla a partir de  $\alpha = 0.95$ ,  $TM - 06$  a partir de  $\alpha = 0.85$ , mientras que  $TM - 04$  no registra falla en todo el rango analizado. La Tabla 4 resume los umbrales críticos de  $\alpha$  por bloque.

**Tabla 4**  
*Umbrales críticos de  $\alpha$  por bloque y mecanismo de falla técnica*

Bloque	Nivel	$\alpha$ crítico	$FS_p$ en M1
TM-01	Base	$\alpha \leq 0.95$	1.19
TM-04	Medio	No alcanza falla	2.61
TM-06	Superior	$\alpha \leq 0.85$	1.91

## Discusión

### Transición progresiva de los modos de falla

A diferencia de los estudios centrados en la estabilidad global de muros de suelo reforzado, en los que la longitud del refuerzo incide directamente sobre el factor de seguridad frente a fallas profundas (González et al., 2018), los resultados del presente estudio muestran que la reducción de la longitud del refuerzo activa primero mecanismos internos localizados, particularmente el arrancamiento en el bloque base y en la coronación, mientras la estabilidad global permanece prácticamente inalterada. Esta disociación constituye el hallazgo central del análisis y revela que la verificación exclusiva de la estabilidad global resulta insuficiente para caracterizar el desempeño real del sistema bajo condición pseudoestática.

Esta secuencia de falla es consistente con lo reportado por López (2024), quien encontró que la estabilidad global e interna responden a variables de diseño distintas y pueden evolucionar de forma independiente.

### Vulnerabilidad diferencial del refuerzo primario

La vulnerabilidad diferencial observada entre bloques responde a dos mecanismos físicos distintos que operan simultáneamente en los extremos del muro.

En el nivel base ( $TM - 01$ ), la vulnerabilidad temprana está asociada al efecto combinado del alto empuje dinámico y la geometría escalonada del sistema. El bloque de nivel base recibe la mayor demanda de tracción inducida por la presión lateral sísmica, ya que concentra el mayor empuje activo equivalente de la masa de suelo suprayacente. Al mismo tiempo, en un muro escalonado, la longitud de refuerzo del nivel base está condicionada por la geometría del escalonamiento, lo que puede resultar en longitudes de anclaje efectivo menores de lo que sugeriría un análisis de muro continuo convencional. Abrego y Barrientos (2025) observaron que el coeficiente sísmico horizontal tiene mayor incidencia sobre los factores de seguridad de los bloques inferiores, precisamente porque la demanda de tracción en el refuerzo

crece con la profundidad bajo condición pseudoestática. La interacción entre el suelo y el refuerzo en la zona de anclaje es el mecanismo que determina la capacidad de pullout disponible, siendo esta interacción altamente sensible a las condiciones de confinamiento y a la longitud efectiva de anclaje (Damians et al., 2024; Kim et al., 2021).

*TM – 06* opera en condiciones opuestas a las del bloque base. Al estar en la coronación del sistema, la altura de relleno suprayacente es reducida, lo que se traduce en una presión de confinamiento vertical baja. Esta limitación acota la fricción movilizable entre el suelo y la geomalla con independencia de cuánto mida la cola de anclaje. Cuando  $\alpha$  disminuye y la longitud de anclaje efectivo se acorta proporcionalmente, la ya escasa capacidad friccional del bloque se agota con rapidez, lo que explica su vulnerabilidad temprana.

*TM – 04*, por su parte, reúne condiciones más favorables. El confinamiento disponible en ese nivel es suficiente para desarrollar una fricción considerable, y las longitudes de anclaje, aunque se reducen con  $\alpha$ , se mantienen operativas a lo largo de todo el rango analizado. El  $FS_p$  de 2.61 en M1 refleja esa holgura, la reserva es amplia y solo empieza a reducirse de forma perceptible a partir de M7, cuando el acortamiento acumulado del refuerzo ya alcanza el 30% respecto al modelo base. Este comportamiento es coherente con lo reportado por Hulagabali et al. (2024), quienes encontraron que la resistencia al arrancamiento de geomallas bajo condición sísmica es mayor con menor espaciado vertical entre capas, condición que contribuye al mayor confinamiento acumulado característico de los niveles intermedios del sistema.

### **Cumplimiento normativo en escenarios sísmicos**

Respecto al cumplimiento de la FHWA, la estabilidad global no se vio comprometida en ningún modelo: el  $FS_G$  basal se mantuvo en 2.299 en todos los casos, y el compuesto no bajó de 2.148 ni en el modelo más reducido (M9). Esos valores, holgadamente superiores al

mínimo exigido, indican que recortar la longitud del refuerzo dentro del rango paramétrico explorado no pone en riesgo la integridad global del sistema.

Respecto a la estabilidad interna por tracción, el  $FS_T$  permanece en 1.94 en todos los bloques y modelos, superando el umbral de 1.125, confirmando que la rotura por tracción no constituye el modo de falla crítico en ningún escenario.

El arrancamiento es, con diferencia, el aspecto más exigente del análisis en términos normativos. La Tabla 5 recoge, bloque a bloque y modelo a modelo, si el  $FS_p$  supera o no el umbral de 1.125 establecido por la FHWA.

**Tabla 5**

*Estado de cumplimiento normativo de  $FS_p$  respecto al umbral FHWA ( $FS_{min}=1.125$ ) para condición pseudoestática.*

Modelo	$\alpha$	TM-01	TM-04	TM-06	Modelo	$\alpha$	TM-01	TM-04	TM-06
M1	1.00	1.19 (Cumple)	2.61 (Cumple)	1.91 (Cumple)	M6	0.75	1.00 (No cumple)	2.61 (Cumple)	1.00 (No cumple)
M2	0.95	1.00 (No cumple)	2.61 (Cumple)	1.60 (Cumple)	M7	0.70	1.00 (No cumple)	2.19 (Cumple)	1.00 (No cumple)
M3	0.90	1.00 (No cumple)	2.61 (Cumple)	1.38 (Cumple)	M8	0.65	1.00 (No cumple)	1.77 (Cumple)	1.00 (No cumple)
M4	0.85	1.00 (No cumple)	2.61 (Cumple)	1.00 (No cumple)	M9	0.60	1.00 (No cumple)	1.20 (Cumple)	1.00 (No cumple)
M5	0.80	1.00 (No cumple)	2.61 (Cumple)	1.00 (No cumple)					

El único modelo que satisface simultáneamente el criterio normativo en los tres bloques evaluados es M1 ( $\alpha = 1.00$ ). A partir de M2, el bloque  $TM - 01$  entra en incumplimiento, y a partir de M4, también  $TM - 06$ . El bloque  $TM - 04$  cumple en todo el rango, aunque con margen decreciente desde M7.

La consecuencia práctica de este resultado es directa, en zonas donde el coeficiente pseudoestático ronda el valor empleado en este estudio ( $k_h = 0.336$ ), cualquier recorte en la

longitud del refuerzo, incluso uno tan pequeño como el 5%, es suficiente para que el bloque base deje de cumplir el criterio normativo de arrancamiento. Bajo esas condiciones sísmicas, las longitudes del modelo base no ofrecen margen para optimización volumétrica; reducirlas implica sacrificar la seguridad interna del sistema. Cabe destacar que estos resultados corresponden al escenario pseudoestático adoptado y no deben extrapolarse directamente a otras condiciones sísmicas o perfiles geotécnicos sin verificación adicional.

## Conclusiones

El análisis numérico paramétrico desarrollado permite formular las siguientes conclusiones respecto a la influencia de la longitud del refuerzo en la estabilidad pseudoestática de muros escalonados de suelo reforzado.

Frente a la reducción de  $\alpha$ , la estabilidad global mostró una insensibilidad notable. El  $FS_G$  basal se mantuvo en 2.299 en todos los modelos sin excepción, y el compuesto apenas cedió un 1.7% en M9, su valor más bajo. Esto obedece a que la falla profunda está condicionada por los parámetros del suelo de fundación y el peso total del sistema, ninguno de los cuales varía entre modelos.

El arrancamiento, y no la tracción, resultó ser el mecanismo que rige el comportamiento interno del sistema bajo carga pseudoestática. El  $FS_T$  se mantuvo en 1.94 de forma constante en todos los bloques y modelos; sin embargo, ese valor debe leerse con cautela, ya que el Método Rígido de MACSTARS no captura la variación de demanda de tracción entre bloques a distintas cotas.

La pérdida de capacidad de anclaje no ocurrió de forma uniforme a lo largo del muro.  $TM - 01$ , el bloque de base, fue el más temprano en incumplir, con apenas una reducción del 5% en la longitud del refuerzo, la alta demanda dinámica que concentra este nivel superó su capacidad de anclaje disponible.  $TM - 06$ , en el extremo opuesto, cedió por una razón distinta, el bajo confinamiento vertical de la coronación deja poco margen friccional, por lo que

reducciones moderadas bastan para agotar su resistencia. *TM – 04*, ubicado en el nivel medio, no registró incumplimiento en ningún modelo, respaldado por una combinación más equilibrada de confinamiento y longitud de anclaje.

De los nueve modelos analizados, solo M1 ( $\alpha = 1.00$ ) cumplió simultáneamente con los criterios normativos de la FHWA en los tres bloques. Dentro del escenario pseudoestático evaluado, las longitudes del diseño base constituyeron el límite inferior funcional; cualquier reducción, por pequeña que sea, compromete la seguridad interna del sistema bajo las condiciones sísmicas analizadas.

La disociación observada entre la respuesta global e interna constituye el aporte central del estudio; mientras la estabilidad global permanece robusta ante la variación de  $\alpha$ , la estabilidad interna por arrancamiento se degrada de forma progresiva y localizada siguiendo la secuencia base–coronación–núcleo, donde los bloques extremos fallan por mecanismos opuestos, alta demanda en la base y bajo confinamiento en la coronación, antes de que el nivel medio acuse deterioro. Este patrón demuestra que un muro escalonado puede exhibir factores de seguridad globales ampliamente satisfactorios mientras presenta falla técnica interna localizada, lo que subraya la necesidad de priorizar las verificaciones de estabilidad interna por nivel en el diseño de este tipo de sistemas en zonas de alta sismicidad.

Para investigaciones futuras, se recomienda contrastar estos resultados con modelación de esfuerzo-deformación, que permita superar las limitaciones del equilibrio límite y representar con mayor resolución la distribución real de tensiones internas y deformaciones del paramento en sistemas escalonados complejos.

### Referencias Bibliográficas

Abrego, G., & Barrientos, E. (2025). *Análisis numérico de los muros de suelo reforzado sometidas a cargas sísmicas – almacén Logismins – Ventanilla – Callao*. Repositorio Académico UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/entities/publication/db7c75d7-83e8-5abc-bb7b-e95dbce2fcdb>

- Arqueñiva, H., & Romero, R. (2021). Estudio y evaluación comparativa entre suelos reforzados con geomalla y muros de concreto armado para la estabilización de taludes de carreteras. *Revista Científica Ciencias Ingenieriles*, 1(1), 20-32. <https://doi.org/10.54943/ricci.v1i1.202>
- Bandyopadhyay, T. S., Chakraborty, P., & Hegde, A. (2025). Seismic stability analysis of geosynthetic reinforced MSE walls using simplified pseudo-static approach. *Indian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1007/s40098-025-01259-7>
- Chen, X., Zhou, Z., Zhu, Y., Pu, S., Zhang, D., & Li, E. (2025). Evaluating seismic stability of reinforced soil slopes using the limit equilibrium method: influence of geosynthetic strength indicators. *Frontiers in Physics*, 12, 1526223. <https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1526223>
- Claret, N., & Portela, J. (2017). 20 años de cálculo de estructuras de terreno reforzado: MACSTARS. *INGEOPRES*, 34-39. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5898453>
- Damians, I., Moncada, A., Olivella, S., Lloret, A., & Josa, A. (2024). Physical and 3D numerical modelling of reinforcements pullout test. *Scientific Reports*, 14, 7503. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57893-3>
- Federal Highway Administration. (2009). *Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes* (Número FHWA-NHI-10-024). <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi10024/nhi10024.pdf>
- Gao, S., Xiao, C., Han, J., & Wang, Z. (2022). Lateral displacements of geosynthetic-reinforced soil walls in a tiered configuration. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002853](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002853)
- Gao, S., Xiao, C., Meng, X., & Cai, X. (2024). Experimental study on long-term performance of tiered geogrid-reinforced soil walls under sustained loading. *International Journal of Geomechanics*, 24(9), 4024196. <https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-9565>
- González, M., Villalobos, F., Méndez, A., & Carrillo, P. (2018). Estudio de la respuesta estática y sísmica de un muro de suelo reforzado con geomalla como estribo de puente en Concepción. *Obras y Proyectos*, (24), 41-52. <https://www.scielo.cl/pdf/oyp/n24/0718-2813-oyp-24-0041.pdf>
- Hulagabali, A. M., Solanki, C. H., Thrupthi, C., Sushma, N., Suokhrie, R., & Sudarshan, S. (2024). Pull-out and rupture behavior of geogrid reinforcements in MSE wall subjected to seismic conditions. En D. Patel, B. Kim, & D. Han (Eds.), *Innovation in Smart and*

- Sustainable Infrastructure* (Vol. 364). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-3557-4\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-99-3557-4_19)
- Kim, I.-H., Kim, J., & Lee, K.-W. (2021). The determination of pullout parameters for sand with a geogrid. *Applied Sciences*, *11*(1), 355. <https://doi.org/10.3390/app11010355>
- Li, L., Li, H., & Cao, W. (2025). Experimental study on pullout behavior of coir geotextiles based on transparent soil. *Applied Sciences*, *15*(1), 488. <https://doi.org/10.3390/app15010488>
- López, J. (2024). Modelación numérica en dos dimensiones para análisis de muros mecánicamente estabilizados utilizando MACSTARS. *International Journal of Advanced Research*, *12*(8), 1487-1490. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/19394>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015a). *NEC-SE-DS: Peligro sísmico. Diseño sísmico resistente*. [https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/04/MTOP\\_NEC-SE-DS.pdf](https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/04/MTOP_NEC-SE-DS.pdf)
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015b). *NEC-SE-GC: Geotecnia y cimentaciones*. <https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2026/03/4.-NEC-SE-GC-Geotecnia-y-Cimentaciones.pdf>
- Patra, S., & Shahu, J. T. (2020). Pseudo-static analysis of reinforced soil wall based on pasternak model. *Indian Geotechnical Journal*, *50*(2), 252-260. <https://doi.org/10.1007/s40098-019-00400-7>
- Sharma, S., & Prashant, A. (2023). Seismic coefficients for pseudo-static analysis of wrap-faced GRS walls with nonlinear soil fills. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *171*, 107960. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107960>
- Xu, P., Meng, Y., Zhong, Y., Hatami, K., Li, T., Yang, G., & Liang, X. (2024). Stability analysis of MSE walls with stepped reinforcement design. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, *10*, 71. <https://doi.org/10.1007/s40891-024-00581-z>
- Xu, P., Zhong, Y., Hatami, K., Yang, G., Liu, W., & Jiang, G. (2023). Influence of reinforcement design on seismic stability of full-height panel MSE walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *165*, 107722. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107722>