

Elementos Finitos Aplicados al Análisis de Estabilidad de un Muro de Contención en Voladizo para Vías Urbanas

Finite Element Analysis Applied to the Stability Evaluation of a Cantilever Retaining Wall for Urban Roads

Betzy Reyes Belduma¹, Elsi Romero Valdiviezo², Leyden Carrión Romero³, Gilbert Añazco Campoverde⁴, Jorge Cabrera Gordillo⁵, José Ordoñez Fernández¹.

¹Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala: breyes5@utmachala.edu.ec

²Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala: eromero@utmachala.edu.ec

³Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala: locarrion@utmachala.edu.ec

⁴Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala: ganazco@utmachala.edu.ec

⁵Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala: jcabrera@utmachala.edu.ec

⁶Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala: jlordonez@utmachala.edu.ec

Resumen

Un muro de contención en voladizo es una estructura de concreto armado compuesta por un muro vertical unido monolíticamente a una zapata, con talón y puntera, diseñada para resistir el empuje lateral del terreno. Este tipo de solución es común en zonas urbanas donde se requiere estabilizar taludes y proteger infraestructuras viales. En esta investigación se evaluó un muro de 4 metros de altura proyectado para la protección de la vía El Limón, cantón Machala, Provincia de El Oro, Ecuador. El objetivo principal fue analizar su comportamiento estructural y geotécnico mediante dos metodologías: el enfoque analítico basado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC–2015 y el modelado numérico con elementos finitos a través del software Plaxis 3D, bajo condiciones estáticas y sísmicas. Se realizaron estudios de campo y laboratorio para caracterizar el suelo y definir parámetros clave como cohesión, fricción interna y nivel freático. Se evaluaron los factores de seguridad frente a los modos de falla más relevantes: volteo, deslizamiento y capacidad portante. Los resultados indicaron que el muro cumple con los valores mínimos normativos en ambos escenarios. El modelado numérico permitió visualizar de forma más detallada los desplazamientos y la interacción suelo-estructura. Como conclusión, se confirma que el uso combinado del análisis tradicional y las herramientas numéricas fortalece el diseño estructural, mejora la confiabilidad del sistema y ofrece una base técnica más completa para obras de contención en entornos urbanos.

Palabras clave: estabilidad, elementos finitos, muro de contención en voladizo, Plaxis 3D.

Abstract

A cantilever retaining wall is a reinforced concrete structure composed of a vertical stem monolithically connected to a footing with a heel and toe, designed to resist lateral earth pressure. This type of solution is commonly used in urban areas where slope stabilization and protection of road infrastructure are required. This study evaluates a 4-meter-high cantilever wall designed for the protection of El Limón road, located in the canton of Machala, El Oro Province, Ecuador. The main objective was to analyze its structural and geotechnical behavior through two methodologies: the analytical approach based on the Ecuadorian Construction Standard (NEC–2015), and

numerical modeling using the finite element method with Plaxis 3D software, under both static and seismic conditions.

Field and laboratory studies were conducted to characterize the soil and determine key parameters such as cohesion, internal friction angle, and groundwater level. Safety factors against the most critical failure modes—overturning, sliding, and bearing capacity—were evaluated. The results indicated that the wall meets the minimum regulatory requirements in both conditions. Numerical modeling allowed a more detailed visualization of displacements and the soil–structure interaction. In conclusion, the combined use of traditional analysis and numerical tools enhances structural design, improves system reliability, and provides a more comprehensive technical basis for retaining structures in urban environments.

Keywords: stability, finite elements, cantilever retaining wall, Plaxis 3D.

1. Introducción

Las vías urbanas son infraestructuras indispensables para la libre circulación de vehículos y peatones, por lo tanto, deben permanecer en buen estado para garantizar la eficiencia de la misma, proporcionando así una manera segura y eficaz para que los bienes y población se puedan movilizar.[1]

La ciudad de Machala perteneciente a la provincia de El Oro, Ecuador es un sector que se encuentra en constante crecimiento por lo tanto la demanda de infraestructuras viales de buena calidad es extensa debido al desarrollo demográfico, de esta manera hay sectores en la ciudad que presentan infraestructuras viales de mala calidad debido a la inestabilidad de los taludes en vías urbanas.[2]

Los muros de contención son alternativas eficientes para garantizar la estabilidad en carreteras además de proteger las áreas urbanas ya que las mismas son altamente transitadas por usuarios del sector o sitios aledaños.[3]

El comportamiento sísmico de los muros de contención es importante para garantizar un diseño seguro y comprender cómo la respuesta del suelo afecta el movimiento de la estructura. Los muros de contención, siendo estructuras relativamente rígidas, se emplean para resistir lateralmente la presión del suelo.[4]

El diseño de muros en voladizo puede optimizarse significativamente mediante herramientas computacionales. El uso del método de elementos finitos ayuda a lograr estructuras más eficientes, seguras y económicas desde las primeras fases del proyecto.[5]

La mejora del método de reducción de resistencia al corte aporta mayor precisión al cálculo del factor de seguridad. Esta herramienta es clave para modelaciones numéricas confiables en estructuras que interactúan con el terreno, como los muros de contención.[6]

Pequeñas variaciones geométricas en el diseño de muros pueden tener un impacto notable en su estabilidad. Evaluar diferentes configuraciones resulta fundamental en zonas urbanas con restricciones de espacio o condiciones geotécnicas exigentes.[7]

El empuje activo del suelo varía según el tipo de relleno y los movimientos del muro. En suelos densos, la distribución de presiones no es lineal, lo que revela la importancia de considerar traslaciones y rotaciones en el análisis estructural.[8]

La caracterización geotécnica a escala reducida permite definir con mayor precisión las condiciones de contorno en análisis numéricos. Esta información mejora la calidad del modelado en proyectos de estabilización de taludes o muros de contención.[9]

La dinámica de terraplenes sobre muros de contención resalta la importancia de considerar cargas sísmicas en el diseño. Evaluar la respuesta estructural ante eventos dinámicos aporta mayor seguridad a las infraestructuras urbanas.[10]

El análisis numérico aplicado a muros ciclópeos y en voladizo permite evaluar con mayor detalle su comportamiento frente a cargas estáticas y dinámicas. Este enfoque complementa los métodos tradicionales, aportando mayor confiabilidad al diseño.[11]

El modelado en 3D permite observar con mayor detalle la distribución de esfuerzos y deformaciones en muros con geometrías complejas. Esta herramienta mejora la comprensión del comportamiento estructural frente a cargas reales.[12]

El análisis tridimensional requiere más tiempo y recursos computacionales, resulta crucial para optimizar el diseño y establecer con mayor detalle desplazamientos y esfuerzos en diferentes etapas constructivas. De este modo, PLAXIS 3D permite evaluar de manera integral la estabilidad del talud y seleccionar refuerzos más eficientes, logrando un diseño estructural más confiable en obras civiles.

Este análisis de estabilidad de un muro de contención en voladizo es importante porque permite entender mejor cómo se comportan los muros de contención en voladizo frente a diferentes condiciones del suelo y posibles eventos sísmicos. Usar el modelado por elementos finitos ayuda a identificar fallas potenciales y a mejorar el diseño estructural, lo que se traduce en construcciones más seguras y eficientes, especialmente en zonas urbanas con alto riesgo.

El objetivo es analizar la estabilidad de un muro de contención en voladizo sometido a cargas estáticas y dinámicas, combinando el análisis tradicional basado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) con un modelo numérico desarrollado en Plaxis 3D, que permite representar las condiciones del terreno y la interacción entre el suelo y la estructura. El estudio se centra en determinar el factor de seguridad frente al volcamiento y deslizamiento, considerando tanto las características geotécnicas del sitio como las cargas a las que estará expuesto el muro.

2. Materiales y Métodos

La investigación analiza la estabilidad de un muro de contención en voladizo de 4 metros de altura destinado a infraestructuras viales urbanas, considerando escenarios de carga estática y dinámica. Para ello, se combinaron dos enfoques complementarios: el método analítico, siguiendo los lineamientos de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), y el modelado numérico por elementos finitos, utilizando el software especializado Plaxis 3D.

Se utilizó la metodología inductiva, deductiva, de campo y aplicativa, con el propósito de obtener una visión integral, específicamente en relación con la estabilidad del talud como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Metodología del proceso de desarrollo de la investigación

METODOLOGIA	DESCRIPCIÓN
Inductiva	Observación directa del terreno
	Revisar la norma ecuatoriana de construcción (NEC 2015) para muros de contención en voladizo.
	Recopilación de datos mediante la revisión de artículos científicos, revistas técnicas, libros, tesis de maestría y normativas vigentes.
Deductiva	Realización de cálculos estructurales específicos, como dimensionamiento del muro de contención en voladizo, presión lateral del suelo y evaluación de estabilidad del talud.
De campo	Recopilación de datos mediante ensayos de Laboratorio de Suelo.
Aplicativa	Modelamiento del muro de contención en voladizo mediante el uso del software PLAXIS 3D.

Se recopilaron propiedades geotécnicas representativas de suelos, tales como peso unitario, cohesión, ángulo de fricción interna y módulo de elasticidad. Estos parámetros fueron utilizados como base para el diseño estructural y la simulación computacional.

El método de Terzaghi es una de las técnicas más usadas en geotecnia para poder calcular la capacidad de carga de los suelos bajo cimientos superficiales, este método considera diferentes tipos de fallos del

suelo, como el deslizamiento y asentamiento, así mismo evalúa la capacidad de carga basándose en tres factores clave: la cohesión del suelo, su peso unitario y la profundidad y forma de la cimentación.[13]

El análisis de la granulometría del suelo permite conocer cómo se distribuyen sus partículas, lo cual resulta fundamental para entender cómo se va a comportar en obras como cimentaciones, terraplenes o pavimentos.[14]

Las propiedades del suelo se incorporaron al modelo numérico utilizando el criterio de Mohr-Coulomb, un enfoque común en análisis geotécnicos por su simplicidad y porque permite representar de forma razonable el comportamiento plástico inicial del terreno.[15]

Se desarrolló el diseño del muro utilizando el método analítico, aplicando las teorías de empuje activo para condiciones tanto estáticas como dinámicas. Se evaluaron aspectos clave como la estabilidad frente al volcamiento, el deslizamiento y la presión sobre la base, determinando los factores de seguridad respectivos con base en los lineamientos de la Norma ecuatoriana de la Construcción NEC y geotécnicas de Braja M. Das como se muestran en la Figura 1 y Tabla 2.

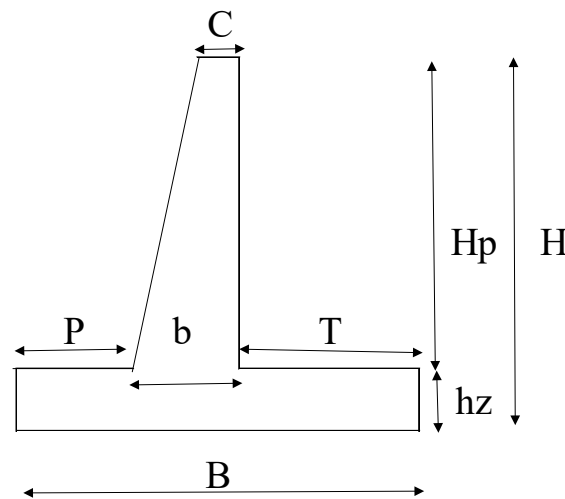


Fig.1 Simbología de un muro de contención en voladizo

Tabla 2. Valores sugeridos según guías de diseño estructural.

DESCRIPCION	BASE (B)	BASE CENTRAL (b)	CORONA DEL MURO (C)	PUNTA DEL MURO (P)	TALON DEL MURO (T)	ALTURA DE ZAPATA (hz)	ALTURA DE PANTALLA (Hp)	ALTURA TOTAL (H)
CONDICIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO	0.5 H a 0.7 H	0.1*H min	≥0.30 min	0.1*H min		H/6 - H/8		

Garantizar un factor de seguridad es fundamental para prevenir fallas por deslizamiento y asegurar el desempeño estructural a largo plazo. En la Tabla 3 se muestran los Factores de seguridad de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC.

Tabla 3. Factores de seguridad indirectos mínimos, NEC-2015

CONDICIÓN	F.S.I.M ADMISIBLE
Carga Muerta + Carga Viva Normal	3.0
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	2.5
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño pseudo estático	1.5

Las expresiones matemáticas aplicadas para el análisis en condiciones estáticas y dinámicas fueron las que se detallan a continuación.

Para analizar la presión ejercida por el suelo sobre el muro de contención, se utilizó el método de Mohr-Coulomb, ampliamente aceptado en la ingeniería geotécnica. Este enfoque permite calcular el empuje activo K_a que actúa sobre la estructura considerando las propiedades del terreno, como el ángulo de fricción y la cohesión. Su fórmula se presenta en la ecuación 1.

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\left[1 + \frac{\sin(\delta + \phi) \cdot \sin(\phi - \alpha)}{\cos(\delta + \phi) \cdot \cos(\phi - \alpha)} \right]^2}$$

(1)

El empuje pasivo K_p se consideró como una resistencia que el suelo puede ofrecer ante el desplazamiento del muro, especialmente en la base, como se muestra en la ecuación 2

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \theta)}{\cos^2 \theta * \cos(\delta - \theta) * \left[1 + \frac{\sin(\delta - \phi) * \sin(\phi + \alpha)}{\cos^2 \theta} \right]^2} \quad (2)$$

Dónde:

δ = Ángulo fricción suelo muro = $(2/3 * \phi/2)$, según Terzaghi

ϕ = Ángulo de fricción interna del relleno

θ = Ángulo de la cara interna del muro con la horizontal

α = Ángulo del talud de terreno del relleno con la horizontal

El empuje activo del suelo E_a se calcula por metro lineal del muro, considerando las propiedades del terreno y su geometría. Este valor representa la presión lateral que actúa sobre la estructura. Se determina con una expresión práctica mostrada en la ecuación 3.

$$E_a = \left(\frac{1}{2} * \gamma_2 * H^2 \right) \quad (3)$$

Dónde:

H = Altura total del muro (m)

γ_2 = Peso específico del suelo de relleno (Tn/m^3)

La estabilidad frente al volcamiento F_s se verifica analizando el equilibrio de momentos respecto a la punta de la base, considerando las cargas actuantes y la geometría del muro. El factor de seguridad se obtiene como relación entre momentos estabilizadores y desestabilizadores, según lo expresado en la ecuación 4.

$$\frac{F_s(\text{volteo})}{\sum M_R} \quad (4)$$

Dónde:

$\sum M_R$ = Sumatoria de los momentos de las fuerzas que tienden a resistir el volteo.

$\sum M_0$ = Sumatoria de los momentos de las fuerzas que tienen a voltear el muro.

Los deslizamientos de tierra son fenómenos geológicos altamente destructivos que cada año provocan pérdidas humanas y daños materiales considerables. A pesar de su gravedad, muchas personas aún no son plenamente conscientes del riesgo que representan ni de la necesidad de prevenirlos.[16]

Los deslizamientos suelen ocurrir cuando el suelo se encuentra altamente saturado de agua, especialmente en zonas con baja cohesión y alta porosidad. En estos eventos intervienen mecanismos físicos como la gravedad, la fricción y el rodamiento de los materiales, que ceden al ser sometidos a fuerzas externas que superan su resistencia.[17]

La estabilidad frente al deslizamiento F_s se verifico analizando el equilibrio entre el empuje del suelo y la resistencia por fricción en la base. El factor de seguridad se determina con la ecuación 5, considerando las fuerzas actuantes y las propiedades del contacto suelo–estructura.

$$\frac{F_s(\text{deslizamiento})}{\sum F_R} \quad (5)$$

Dónde:

$\sum F_R$ = Suma de las fuerzas horizontales resistentes

$\sum F_d$ = Suma de las fuerzas horizontales de empuje

Para conocer el coeficiente de presión dinámica activa K_{ae} , se recurre a la ecuación 6, que permite estimar este valor en función del comportamiento dinámico del terreno.

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \eta)}{\cos \eta * \cos^2 \theta * \cos(\delta + \theta + \eta) * \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) * \sin(\phi - \alpha - \eta)}{\cos(\delta + \theta + \eta) * \cos(\alpha - \theta)}} \right]^2} \quad (6)$$

En donde

ϕ = Ángulo de fricción interna (del relleno)

α = Ángulo del talud de terreno del relleno con la horizontal

θ = Ángulo de la cara interna del muro con la horizontal

δ = Ángulo de fricción suelo muro

η = Coeficiente Eta

El coeficiente de empuje pasivo (K_p) se estima mediante la ecuación 7, a fin de conocer la resistencia del suelo ante desplazamientos estructurales, considerando sus características y las condiciones geométricas del sistema.

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \theta)}{\cos^2 \theta * \cos(\delta - \theta) * \left[1 - \sqrt{\sin(\delta - \phi) * \sin(\phi + \alpha)} \right]^2} \quad (7)$$

En donde

ϕ = Ángulo de fricción interna (del suelo de fundación)

α = Ángulo del talud de terreno del relleno con la horizontal

θ = Ángulo de la cara interna del muro con la horizontal

ϕ = Ángulo de fricción interna (del suelo de fundación)

α = Ángulo del talud de terreno del relleno con la horizontal

δ = Ángulo de fricción suelo muro

El empuje activo del suelo (E_a) se determina aplicando la ecuación 8, la cual permite estimar la fuerza ejercida por el terreno sobre la estructura en condiciones de equilibrio activo.

$$E_a = \left(\frac{1}{2} * \gamma * H^2 \right) \quad (8)$$

Yuchi et al. presentan un método que optimiza simulaciones por elementos finitos usando mallas de diferentes fidelidades, seleccionadas de forma continua. Su enfoque mejora la precisión sin incrementar el costo computacional. Este avance resulta útil en análisis estructurales complejos. Es aplicable al modelamiento eficiente de muros de contención.[18]

Akbar et al. (2024) analizaron el desempeño sísmico de muros de contención reforzados con celdas mediante modelos 3D de elementos finitos. Al comparar diferentes sistemas, observaron que los paneles prefabricados huecos ofrecían mayor estabilidad ante sismos. Sus hallazgos respaldan el uso del análisis numérico para mejorar el diseño estructural en contextos urbanos.[19]

Para simular el comportamiento del muro de contención mediante el método de elementos finitos, se utilizó el software Plaxis 3D. El modelo consideró las propiedades del suelo, como la cohesión y el ángulo de fricción interna, se aplicaron cargas de forma progresiva hasta alcanzar un punto de inestabilidad o colapso del muro.

Caso de estudio

La investigación se desarrolló en la vía El Limón, cantón Machala, Provincia de El Oro, Ecuador como se muestra en la Figura 2, este estudio analiza el comportamiento de un muro de contención en voladizo de 4 metros de altura, diseñado para resistir las presiones laterales del suelo en una vía urbana.



Fig.2 Zona de estudio del muro de contención en voladizo vía El Limón

La vía Limón, presenta un alto volumen de tránsito vehicular y peatonal debido a las características socioeconómicas y funcionales del sector. En la figura 3 se muestra una vista de la vía El Limón.

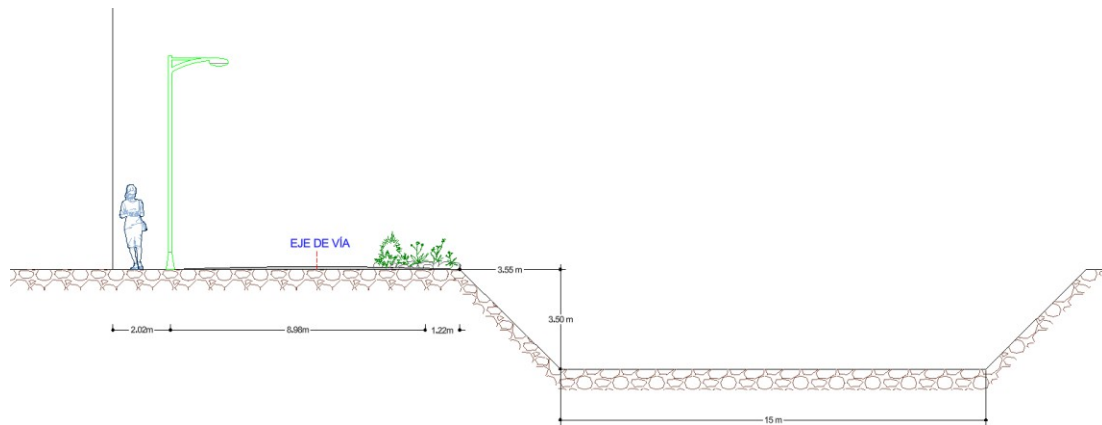


Fig.3 Vista de la vía El Limón

3. Resultados y Discusión

Los resultados geotécnicos obtenidos a partir de los datos del suelo indican un comportamiento típico de suelos cohesivos con buena resistencia al corte, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados geotécnicos obtenidos

RESULTADOS DEL SUELO DE FUNDACIÓN		
Capacidad portante del suelo (kg/cm ²)	σ	1,40
Ángulo de fricción interna del suelo (grados)	$\phi 1$	30,00
Peso específico del suelo (Tn/m ³)	$\gamma 1$	1,76
Cohesión del suelo de fundación (Tn/m ²)	$C1$	0,54
Profundidad de Desplante (m)	Df	3,00
Coefficiente de fricción del suelo	f	0,80
(A falta del dato $f = \tan \phi 1$)	f	0,58
RESULTADOS DEL SUELO DE RELLENO		
Ángulo de fricción interna del suelo (grados)	$\phi 2$	25,00
Peso Especifico del suelo de relleno (Tn/m ³)	$\gamma 2$	2,00
Cohesión del suelo de relleno (Tn/m ²)	$C2$	1,00

El muro de contención, tiene una altura total de 4 metros, de los cuales 3.5 metros están expuestos y 0.5 metros se encuentran empotrados en el terreno. La parte superior del muro (corona) tiene un espesor de 0.30 metros, que aumenta gradualmente hasta 0.60 metros en la base, dándole una forma trapezoidal. La zapata se extiende 2.80 metros en total, con una distribución de 0.70 metros hacia el talón, 0.60 metros bajo la pantalla y 1.50 metros hacia la proyección frontal. Los resultados de las dimensiones del muro de contención se muestran en la figura 4.

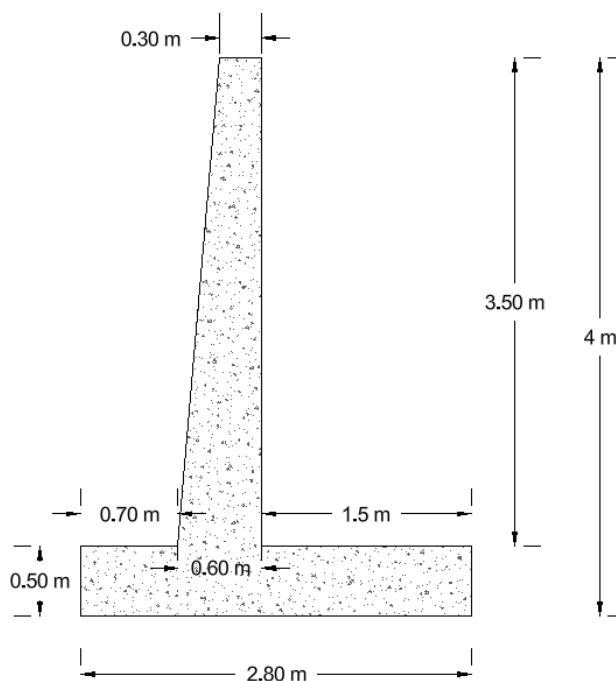


Fig.4 Dimensiones de muro de contención en voladizo de altura de 4 metros.

El método analítico en condición estática y dinámica permitió analizar la respuesta del muro ante volcamiento, deslizamiento y capacidad portante. Se comprobó que el factor de seguridad frente al volcamiento fue satisfactorio gracias a su forma estructural y dimensiones. En cuanto al deslizamiento, la fricción en la base resultó suficiente para equilibrar las cargas laterales. Los resultados se muestran en la tabla 5 y 6.

Tabla 5. Resultados obtenidos del empuje de tierra en condición estática

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL MURO (4m)	
EMPUJE ACTIVO	
Coeficiente activo (K_a)	0,361
Empuje activo (E_{ah})	5,773 ton/m
Momento empuje activo (M_a)	7,697 ton-m/m
Empuje por sobrecarga (E_s)	2,886 ton/m
Momento empuje por sobrecarga (M_s)	5,773 ton-m/m
Empuje total (E_t)	8,659 ton/m
Momentos actuantes del suelo (M_{as})	13,470 ton/m
FUERZAS VERTICALES ACTUANTES	
Ppmuro de concreto	7,14 ton/m
Momento de peso del muro en x (M_{ppx})	8,736 ton-m/m

Momento de peso del muro en y (Mppy)	8,610 ton-m/m
Peso de sobrecarga (Ws)	3 ton/m
Momento por la sobrecarga (Ms)	6,150 ton-m/m
Peso del relleno (Wr)	10,50 ton/m
Momento del relleno (Mr)	21,525 ton-m/m
Resultantes de la fuerza vertical (Rv)	20,640 ton/m
Momento estabilizante (Me)	36,411 ton-m/m

Tabla 6. Resultados obtenidos del empuje de tierra en condición dinámica

ANÁLISIS CON SISMO DE MURO (4m)	
EMPUJE ACTIVO	
Fuerza sísmica del peso propio (Fsp)	2,285 ton/m
Momento de la fuerza sísmica (Mspp)	2,755 ton-m/m
Coeficiente de presión dinámica (kae)	0,949
Incremento dinámico del empuje activo (ΔDea)	6,176 ton/m
Momento del incremento dinámico (Msis)	16,469 ton-m/m
Empuje total (Et)	13,656 ton/m
Resultantes de la fuerza vertical (Rv)	17,640 ton/m
Momentos actuantes del suelo (Mas)	26,152 ton-m/m

Al comparar los resultados en condición estática y dinámica, se identifican diferencias en el comportamiento del muro ante las condiciones de carga. Los factores de seguridad fueron mayores en el análisis estático, mientras que en condición sísmica se redujeron levemente, en especial ante volcamiento, sin comprometer la estabilidad general, como se muestra en la Figura 5 y Tabla 7.

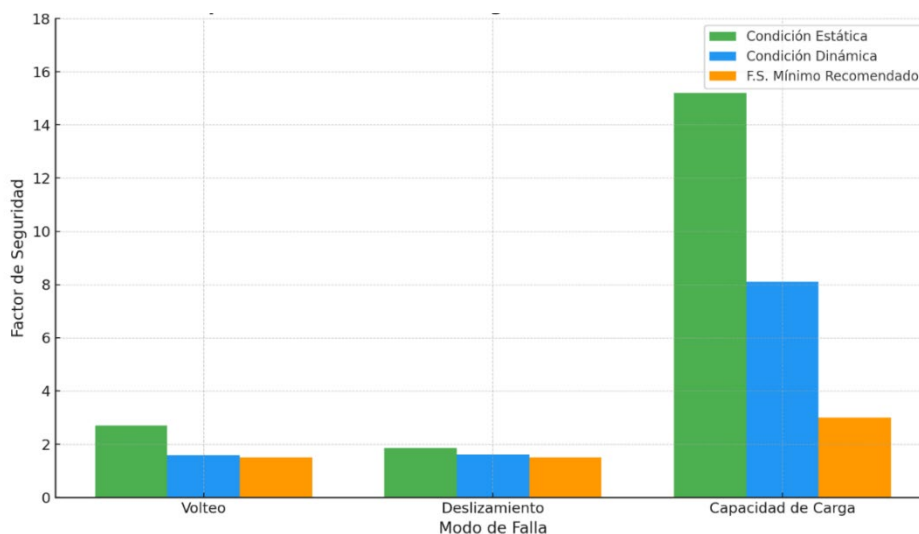


Fig.5 Factores de seguridad asociados a los modos de falla por volteo, deslizamiento y capacidad portante en un muro de contención en voladizo.

Tabla 7. Factores de seguridad en condición estática y dinámica

ESTABILIDAD DEL MURO	CONDICION ESTATICA	F.S. min	CONDICION DINAMICA	F.S. general
Factor de seguridad contra el volteo	2.703	2 a 3	1.592	1.50
Factor de seguridad contra deslizamiento	1.864	1.50	1,607	1.50
Factor de seguridad contra capacidad de carga	15.209	3.00	8.102	1.50

Para el modelado por elementos finitos con Plaxis 3D, la Figura 6 muestra la representación tridimensional del muro en voladizo dentro de un dominio de cálculo que define el espacio de

interacción entre el suelo y la estructura, limitado en los tres ejes (X, Y y Z), lo que permitió evaluar deformaciones, esfuerzos y factores de seguridad en condiciones estáticas o dinámicas.

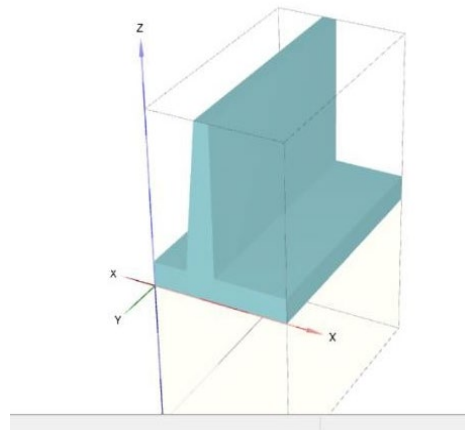


Fig.6 Fuente Plaxis 3D, representación tridimensional del muro de contención en voladizo

La Figura 7 muestra el mallado tridimensional del muro de contención y el terreno que lo rodea, generado en Plaxis 3D, discretizado mediante una malla de elementos finitos tipo tetraedro, ideales para representar formas complejas y simular con precisión la interacción entre el suelo y la estructura

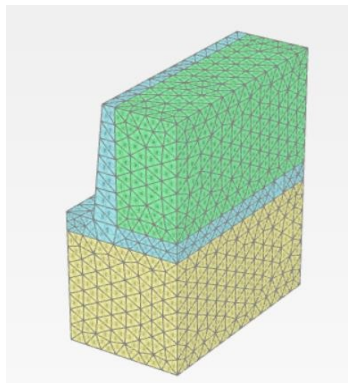
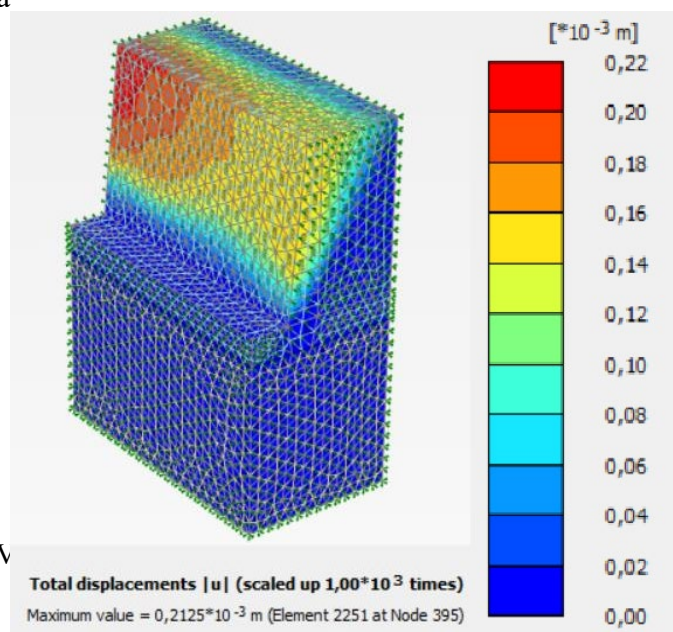


Fig.7 Fuente Plaxis 3D, mallado tridimensional del muro de contención en voladizo

Distribución del desplazamiento total (u) del muro, el valor máximo registrado fue de $0,2125 \times 10^{-3}$ m, localizado en la parte superior de la pantalla, donde el empuje lateral del suelo es más significativo. Hacia la base, las deformaciones son prácticamente nulas, lo que indica un buen anclaje estructural. Como se muestra en la Figura 8.



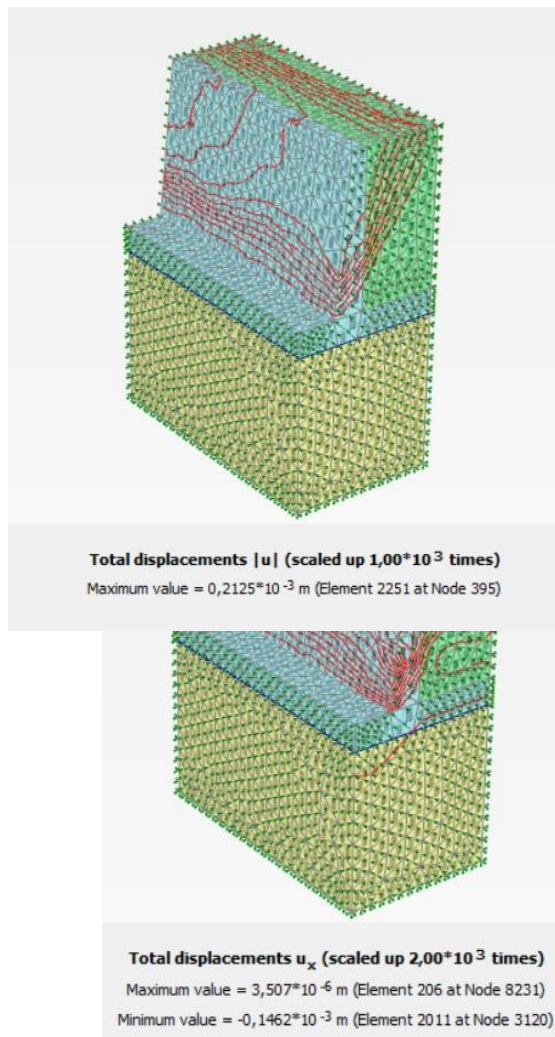


Fig.8 Fuente Plaxis 3D, desplazamiento total (u) del muro en voladizo

El análisis numérico evidenció un desplazamiento horizontal (u_x) máximo de $3,507 \times 10^{-6}$ m en la parte superior del muro y un mínimo de $-0,1462 \times 10^{-3}$ m en la base. Estas deformaciones, propias del empuje lateral del suelo, se mantienen dentro de los límites admisibles y no comprometen la estabilidad estructural del sistema. Como se muestra en la Figura 9.

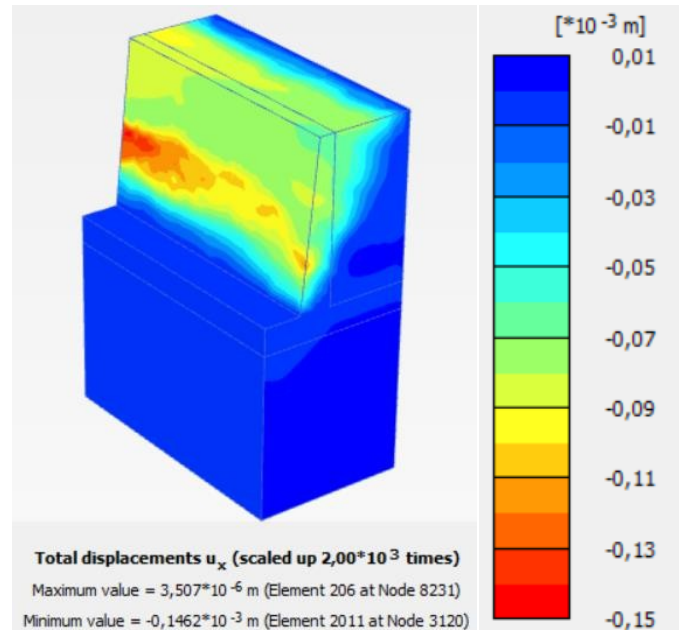


Fig.9 Fuente Plaxis 3D, desplazamiento total u_x

La Figura 10 muestra la distribución de desplazamientos verticales (u_y), bajo condiciones de carga lateral. El desplazamiento vertical máximo registrado fue de $0,01527 \times 10^{-3}$ m correspondiente a la parte superior de la pantalla, el valor mínimo fue de $-0,01040 \times 10^{-3}$ m concentrado en la base del sistema estructural, sin evidenciar fallas por hundimiento o asentamiento.

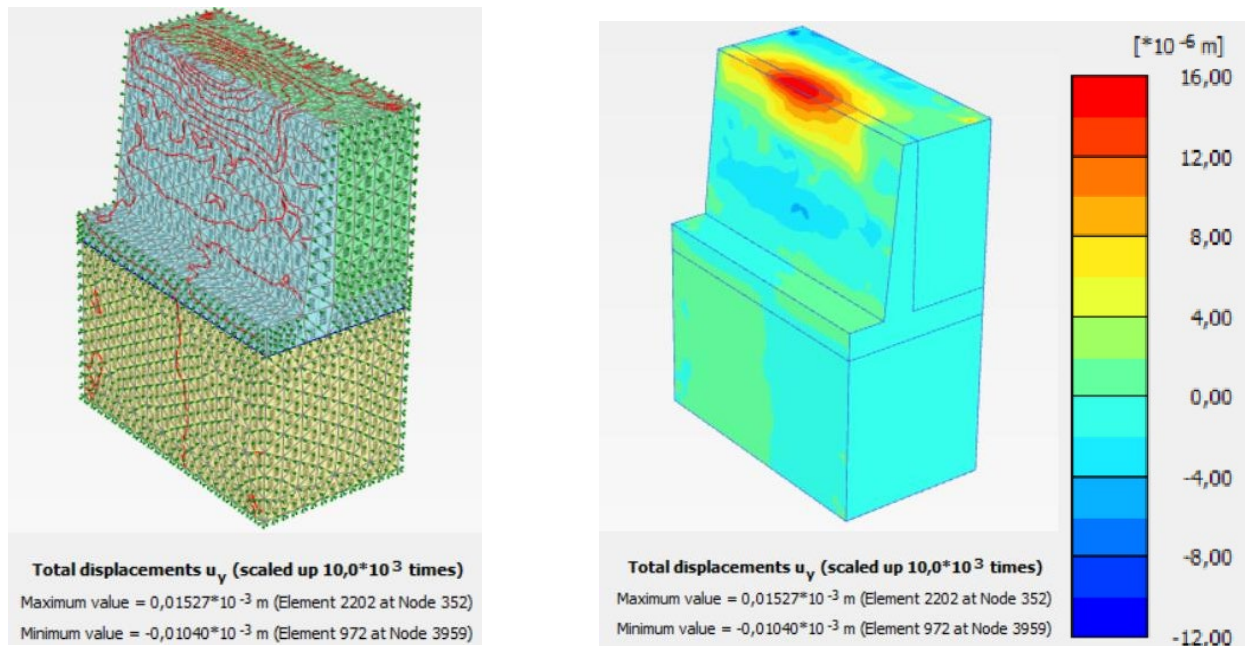


Fig.10 Fuente Plaxis 3D, desplazamiento total u_y

La Figura 11 muestra los desplazamientos en dirección longitudinal (u_z), el mayor valor fue de $5,407 \times 10^{-6}$ m, concentrado en la parte superior, mientras que el mínimo alcanzó $-0,1950 \times 10^{-3}$ m en la base. Los desplazamientos reflejan el efecto del empuje lateral del suelo y se mantienen dentro de límites estructuralmente aceptables.

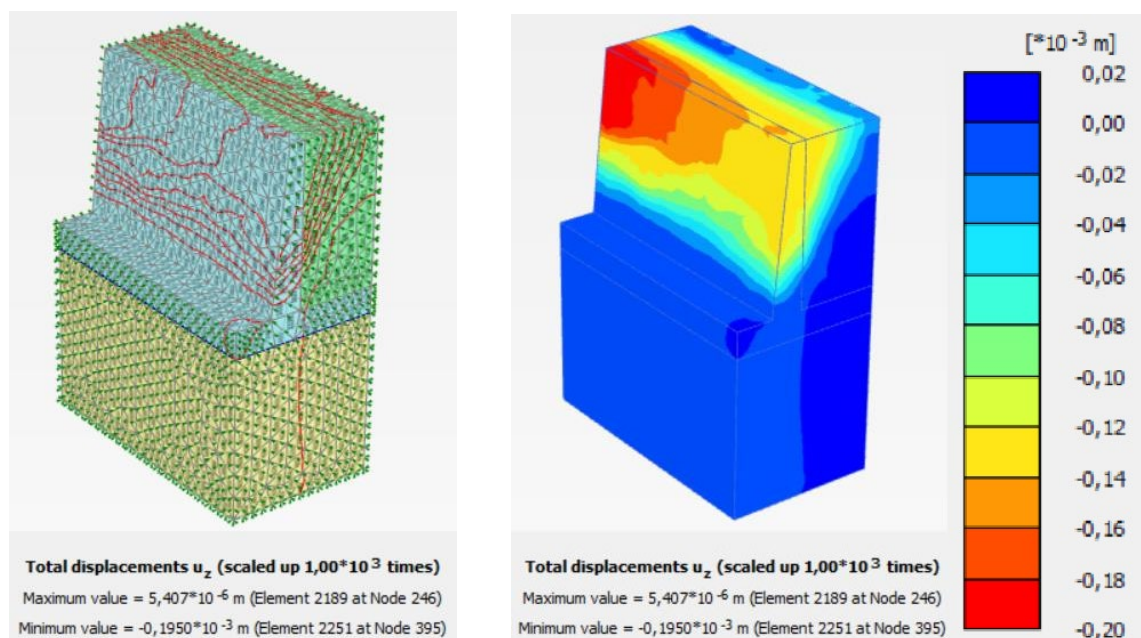


Fig.11 Fuente Plaxis 3D, desplazamiento total u_z

La comparación entre el diseño analítico y el modelado en Plaxis 3D evidenció que ambos métodos se complementan eficazmente en el análisis de estabilidad de muros en voladizo para vías urbanas. Mientras el enfoque analítico permite verificar de forma rápida el cumplimiento de los factores de seguridad mínimos, el análisis numérico ofrece una visión más completa del comportamiento real del sistema, al simular con mayor precisión la interacción suelo-estructura bajo cargas estáticas y sísmicas.

4. Conclusiones

El análisis de estabilidad permitió determinar el comportamiento de un muro de contención en voladizo de 4 metros de altura para vías urbanas, analizado con el método analítico tradicional y modelado numérico con elementos finitos a través de Plaxis 3D. Si bien el método analítico sigue siendo útil y práctico en fases de diseño inicial, el análisis numérico demostró ser más completo al reflejar mejor la interacción entre el suelo y la estructura, especialmente ante escenarios sísmicos.

Los resultados obtenidos mediante el enfoque convencional indicaron que el muro cumple con los criterios mínimos de seguridad frente al volcamiento, deslizamiento y capacidad portante. Sin embargo, el modelo numérico permitió identificar zonas con mayores concentraciones de esfuerzo y desplazamientos, lo que brinda información clave para tomar decisiones de diseño más precisas y adaptadas a las condiciones reales del terreno.

Finalmente, el uso de simulaciones en Plaxis 3D hizo evidente cómo las propiedades del suelo y la acción sísmica pueden influir de manera significativa en el desempeño estructural del muro. Por eso, se recomienda complementar el análisis clásico con herramientas numéricas en proyectos ubicados en zonas urbanas o con suelos que presenten mayor complejidad.

Referencias

- [1] Y. Liu, Z. Yao, M. Shao, H. Liu, y Y. Zhao, «Mechanical Behavior of the Reinforced Retaining Wall under Vehicle Load», *Math. Probl. Eng.*, vol. 2021, pp. 1-15, jul. 2021, doi: 10.1155/2021/2197572.
- [2] H. Arqueñiva y R. Romero, «Estudio y evaluación comparativa entre suelos reforzados con geomalla y muros de concreto armado para la estabilización de taludes de carreteras», *Rev. Científica Cienc. Ing.*, vol. 1, n.º 1, pp. 20-32, jul. 2021, doi: 10.54943/ricci.v1i1.202.
- [3] W. Chen, D. Li, T. Ma, H. Fu, y Y. Du, «Stability Analysis of a Slope considering Two Reinforcement Processes», *Geofluids*, vol. 2020, pp. 1-13, nov. 2020, doi: 10.1155/2020/8828747.
- [4] P. Patil y M. V. Waghmare, «Dynamic Analysis of Cantilever Retaining Wall», *SAMRIDDHI J. Phys. Sci. Eng. Technol.*, vol. 14, n.º Spl-2 issu, pp. 207-212, jun. 2022, doi: 10.18090/samriddhi.v14spli02.1.
- [5] M. Shakeel, R. Azam, M. R. Riaz, y A. Shihata, «Design Optimization of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Walls: A State-of-the-Art Review», *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2022, n.º 1, p. 4760175, ene. 2022, doi: 10.1155/2022/4760175.
- [6] S. Sysala, E. Hrušková, Z. Michalec, y F. Tschuchnigg, «Optimization and variational principles for the shear strength reduction method», 2021, *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.2101.01005.
- [7] U. C. Sari, M. N. Sholeh, y I. Hermanto, «The stability analysis study of conventional retaining walls variation design in vertical slope», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1444, n.º 1, p. 012053, ene. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1444/1/012053.
- [8] Jerson Andre, Cahuana Ayala, Calixtro, y Yanqui Murillo, «Determinación experimental del empuje activo contra muros de contención que sufren traslación y rotación respecto al tope experimental», 2019, *Unpublished*. doi: 10.13140/RG.2.2.29172.71043.
- [9] J. W. Blas Cano y E. A. Milla Vergara, «Caracterización geotécnica para determinar el modelo de estabilización del talud a escala reducida», *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geográficas*, vol. 26, n.º 51, p. e24403, jun. 2023, doi: 10.15381/iigeo.v26i51.24403.
- [10] G. Feng, Q. Luo, P. Lyu, D. P. Connolly, y T. Wang, «An Analysis of Dynamics of Retaining Wall Supported Embankments: Towards More Sustainable Railway Designs», *Sustainability*, vol. 15, n.º 10, p. 7984, may 2023, doi: 10.3390/su15107984.
- [11] J. E. Briceño Balza, Y. D. C. Matos Barrios, N. Belandria-Rodríguez, y F. León Oviedo, «Evaluación de la estabilidad en muros utilizando modelos numéricos», *Rev. Ing. UC*, vol. 29, n.º 1, pp. 96-103, abr. 2022, doi: 10.54139/revinguc.v29i1.53.

- [12] L. Bondareva, V. Nosenko, y A. Malaman, «Use of 2D and 3D modeling to assess the stress-strain state of retaining walls of complex configurations», *Bases Found.*, n.º 45, pp. 9-21, dic. 2022, doi: 10.32347/0475-1132.45.2022.9-21.
- [13] G. Juneja y R. Sharma, «Numerical Analysis of Square and Circular Skirted Footings Placed on Sand using PLAXIS 3D Software», *J. Min. Environ.*, vol. 13, n.º 4, oct. 2022, doi: 10.22044/jme.2022.12458.2261.
- [14] W. Á. Gutiérrez Rodríguez, «Ensayo granulométrico de los suelos mediante el método del tamizado», *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.*, vol. 7, n.º 2, pp. 6908-6927, may 2023, doi: 10.37811/cl_rcm.v7i2.5834.
- [15] S. Harabinova y E. Panulinova, «Numerical analysis of slope stability», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1252, n.º 1, p. 012084, sep. 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1252/1/012084.
- [16] J. Briones-Bitar, F. Morante-Carballo, M. Á. Chávez-Moncayo, R. Blanco-Torrens, y P. Carrión-Mero, «Engineering Solutions for the Stabilisation of a Hill Located in an Urban Area. Case Study: Las Cabras Hill, Duran-Ecuador», *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 17, n.º 3, pp. 823-832, jun. 2022, doi: 10.18280/ijstdp.170312.
- [17] C. J. Vega Laguna y G. D. L. Á. Velásquez Espinoza, «Análisis de inestabilidad del talud tramo NIC-7 (km 177-178) Santo Tomás, departamento de Chontales», *Rev. Científica FAREM-Esteli*, n.º 34, pp. 169-179, jul. 2020, doi: 10.5377/farem.v0i34.10016.
- [18] H. Shaowu Yuchi, V. Roshan Joseph, y C. F. Jeff Wu, «Design and Analysis of Multifidelity Finite Element Simulations», *J. Mech. Des.*, vol. 145, n.º 6, p. 061703, jun. 2023, doi: 10.1115/1.4056874.
- [19] M. Akbar, P. Huali, O. Guoqiang, M. U. Arshid, B. Ahmed, y T. Umar, «Investigation of the displacement-based seismic performance of geogrid earth-retaining walls using three-dimensional finite element modeling», *Results Eng.*, vol. 21, p. 101802, mar. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101802.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Ana Karina Sánchez Rueda. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7571-830X>

Participó activamente en todas las etapas del desarrollo del artículo. Su aporte incluyó la conceptualización del tema y la organización de las ideas principales, el desarrollo del marco teórico, la recopilación y análisis de datos.

Elsi América Romero Valdiviezo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-7324>

Colaboró en la formulación de la metodología, el diseño del modelo numérico en Plaxis 3D y la interpretación de los resultados obtenidos. También participó en la validación de datos, revisión crítica del contenido técnico y en la mejora del manuscrito final, así como la redacción de las conclusiones antes de su envío para revisión editorial.

Leyden Oswaldo Carrión Romero. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1627-7306>

Participó en la elaboración del marco teórico, el análisis estructural del muro y la organización técnica del contenido redactado.

Gilbert Adrián Añazco Campoverde. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9071-1601>

Colaboró en el análisis estructural del muro, así como en la edición final del artículo.

Jorge Paul Cabrera Gordillo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2065-7109>

Aportó en la revisión de parámetros geotécnicos.

 Reyes Belduma et al.

José Ordoñez Fernández. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4314-1319>

Participó en el análisis estructural del muro.