

Evaluación De Un Muro De Contención En Voladizo Aplicando Elementos Finitos Para El Análisis De Estabilidad

Evaluation Of A Cantilever Retaining Wall Using Finite Elements For Stability Analysis

Autores

Ana Karina Sánchez Rueda

Ing. Civil , Universidad Técnica de Machala, Ecuador

asanchez12@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-7571-830X>

Elsi América Romero Valdiviezo

Ing. Civil , Universidad Técnica de Machala, Ecuador

eromero@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-7482-7324>

Leyden Oswaldo Carrión Romero

Ing. Civil , Universidad Técnica de Machala, Ecuador

locarrion@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1627-7306>

Gilbert Adrián Añazco Campoverde

Ing. Civil , Universidad Técnica de Machala, Ecuador

ganazco@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-9071-1601>

Jorge Paul Cabrera Gordillo

Ing. Civil , Universidad Técnica de Machala, Ecuador

jcabrera@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2065-7109>

Paul André Añazco Campoverde

Ing. Civil , Universidad Técnica de Machala, Ecuador

panazco@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8981-3769>

5

Evaluación De Un Muro De Contención En Voladizo Aplicando Elementos Finitos Para El Análisis De Estabilidad

RESUMEN

Un muro de contención en voladizo es una estructura diseñada para resistir el empuje lateral del terreno, conformada generalmente por un muro vertical y una zapata que actúa como base, evitando deslizamientos y aportando estabilidad. Esta investigación tiene como objetivo evaluar el desempeño estructural y geotécnico de un muro de contención en voladizo de 6 metros de altura, ubicado en el cantón Santa Rosa, provincia de El Oro (Ecuador), utilizando tanto el enfoque analítico como el modelado numérico. El análisis se desarrolló mediante el método tradicional de diseño, siguiendo los criterios de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015), y mediante simulaciones por elementos finitos con el software Plaxis 3D, bajo condiciones estáticas y sísmicas. Se evaluaron los factores de seguridad frente a los modos de falla más comunes: volteo, deslizamiento y capacidad portante. Los resultados evidenciaron que el diseño cumple con las exigencias normativas, mientras que el modelado numérico permitió visualizar con mayor precisión la distribución de esfuerzos, desplazamientos y la interacción suelo-estructura. Se concluye que la combinación de ambos métodos proporciona una visión más integral para optimizar la seguridad y eficiencia en el diseño de muros de contención.

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

ABSTRACT

A cantilever retaining wall is a structure designed to resist the lateral pressure of soil, typically composed of a vertical stem and a base footing, providing slope stability and preventing soil displacement. This study aims to evaluate the structural and geotechnical performance of a 6-meter-high cantilever retaining wall located in Santa Rosa, El Oro Province (Ecuador), using both analytical and numerical approaches. The analysis was carried out following the traditional design method based on the Ecuadorian Construction Code (NEC-2015), and through finite element simulations using Plaxis 3D under both static and seismic conditions. Safety factors were assessed for the most common failure modes: overturning, sliding, and bearing capacity. The results confirmed compliance with regulatory requirements, while the numerical modeling provided greater insight into the stress distribution, displacements, and soil-structure interaction. It is concluded that combining both approaches offers a more comprehensive basis for optimizing the safety and efficiency of retaining wall designs.

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

1. INTRODUCCIÓN

La función más importante de los muros es servir de elemento o estructura de contención ya sea de agua o de tierra, estas previenen que se desborde el material del que están siendo barrera. Además, son estructuras que están en constante empuje ya sea temporal o permanente del suelo. Son construidos de hormigón armado y tienen una base sólida y rígida.

La función principal de los muros de contención es proteger y retener los suelos de edificios o de otras estructuras, evitar el movimiento descendente del suelo o también resistir la presión lateral que existe de la tierra [1].

Estas estructuras rígidas cumplen un papel esencial al retener el suelo y permitir que se mantenga a distintos niveles a cada lado, especialmente en terrenos con pendientes pronunciadas. Su función es clave cuando se requiere un cambio abrupto en la topografía o cuando es necesario estabilizar y proteger taludes naturales propensos a deslizamientos o inestabilidad del terreno [2].

Los muros de contención son estructuras muy eficientes, que en la actualidad son usadas para mitigar el impacto de los desastres naturales y con la construcción de ellos han ofrecido muchos beneficios a las poblaciones. Según H.M. Arévalo Algarra [3] los eventos de inundación en áreas urbanas como Tunja muestran la importancia de estructuras de contención bien diseñadas frente a condiciones geotécnicas extremas. Este tipo de riesgos naturales destaca la necesidad de muros con capacidad estructural y estabilidad comprobada en zonas vulnerables.

Los muros en voladizo son aplicados comúnmente en construcciones de carreteras, puentes y ferrocarriles y se formulan con la ayuda de variables de diseño seleccionadas y se restringe en función de factores de seguridad contra los modos de falla ya sea por deslizamiento, vuelco y tensión de soporte [4].

En South Gippsland, Australia, se utilizaron muros de contención con mallas de geomembrana y pilotes para mitigar problemas de estabilidad de pendientes y proteger la infraestructura. Se obtuvo como resultados que los muros de contención optimizados con pilotes pueden estabilizar la carretera y la pendiente de manera económica sin perder el margen de seguridad [5].

En zonas ribereñas como Kuin, el diseño de muros de contención fue esencial para proteger márgenes de ríos. La implementación de diseños adecuados ante condiciones hidráulicas apoya el análisis de estabilidad mediante herramientas como Plaxis 3D [6].

Comparando costos y estabilidad de diferentes tipos de muros, se concluyó que los muros en voladizo son más económicos que los de tablestacas en alturas medias, lo que respalda su elección para proyectos civiles [7].

Las inestabilidades en los taludes se relacionan con alteraciones en la topografía, el movimiento de agua, la disminución de la resistencia del suelo y las variaciones en los estados de esfuerzo. Estos factores pueden generar interrupciones en vías de comunicación y colapsos de estructuras.

El análisis dinámico de muros de contención en sistemas ferroviarios muestra que el comportamiento bajo cargas repetidas puede evaluarse eficazmente con modelos numéricos. Esto refuerza la aplicabilidad del modelo de elementos finitos para verificar seguridad y sostenibilidad en obras civiles [8].

El análisis sísmico numérico de muros de concreto demostró que es crucial modelar correctamente las interacciones dinámicas para garantizar el desempeño estructural. Esto se alinea con la evaluación de estabilidad usando elementos finitos [9].

El estudio del comportamiento sísmico del muro de contención es importante para un diseño seguro y para conocer el comportamiento de cómo la respuesta del suelo influye en el movimiento de la estructura [10].

El análisis por elementos finitos se ha posicionado como una herramienta precisa para evaluar la estabilidad estructural de muros de contención, permitiendo simular la interacción suelo-estructura de forma más realista [11].

El objetivo de esta investigación es evaluar la estabilidad de un muro de contención en voladizo en condiciones estáticas y sísmicas, mediante el método analítico utilizando la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) y modelo numérico basado en elementos finitos con el software Plaxis 3D el cual permite simular con alta precisión las condiciones del terreno y la interacción suelo-estructuras. El alcance incluye determinar el factor de seguridad al volcamiento y deslizamiento considerando las condiciones y características del terreno y las cargas esperadas.

2. METODOLOGÍA

La investigación se basa en el análisis geotécnico-estructural de un muro de contención en voladizo con una altura $H = 6$ m, considerando tanto condiciones estáticas como sísmicas, utilizando datos del terreno y simulaciones de cargas y esfuerzos.

Se realizaron estudios de campo y laboratorio que permitieron determinar las propiedades del suelo predominante: Tipo de suelo, peso específico seco (γ), Cohesión (c), ángulo de fricción interna (ϕ), módulo de elasticidad (E), relación de Poisson (ν), nivel freático.

El método propuesto por Terzaghi es una de las herramientas más empleadas en la geotecnia para determinar la capacidad portante de los suelos que soportan cimentaciones superficiales. Esta metodología toma en cuenta distintos modos de falla del terreno, como el gradual y el asentamiento. Además, analiza la capacidad de carga considerando tres aspectos fundamentales: la cohesión del terreno, su peso específico y tanto la profundidad como la geometría de la cimentación [12].

El análisis granulométrico proporciona información valiosa sobre la distribución de tamaños de partículas y sus propiedades mecánicas, permitiendo evaluar el comportamiento del suelo en diversas aplicaciones, como cimentaciones, pavimentos y terraplenes [13].

Estas propiedades sirvieron como insumo para el modelo numérico, empleando el criterio de Mohr-Coulomb como modelo constitutivo del suelo, ampliamente utilizado en análisis geotécnicos por su simplicidad y buena representación del comportamiento plástico inicial [14].

Las fallas que afectan la estabilidad de taludes están asociadas con las modificaciones de la topografía, flujos de agua, pérdida de resistencia y cambios en los estados de esfuerzo, que pueden provocar interrupciones en caminos, derrumbes de construcciones y hasta la pérdida de vidas humanas [15].

Un muro de contención, puede fallar por volcamiento, deslizamiento, capacidad de carga, por falla cortante o por asentamiento profundo de un suelo débil [16].

El tramo analizado tiene una longitud total de 800 m, se dividió la longitud total por módulos de 5.00 m. Las dimensiones se definieron siguiendo rangos recomendados en manuales de diseño estructural NEC 2015 y referencias geotécnicas como Braja M. Das como se muestran en la Fig. 1 y Tabla 1.

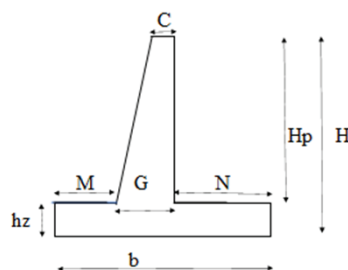


Fig. 1- Esquema del muro de contención

Tabla 1- Rangos recomendados en manuales de diseño estructural.

Descripción	Nomenclatura	Condiciones para el dimensionamiento
Base	b	$0.5 H - 0.7 H$
Base central	G	$0.1 * H \text{ min}$
Corona de muro	C	≥ 0.30
Punta del muro	M	$0.1 * H \text{ min}$
Talón del muro	N	
Altura de zapata	hz	$H/6 - H/8$
Altura de pantalla	Hp	
Altura total	H	

La base del muro se definió con el 70 % de su altura que en este caso se considera H de 6m, permitiendo equilibrio frente a posibles deslizamientos o volcamiento, ancho de la base central $0.1 * H \text{ min}$, la corona del muro se estableció en ≥ 0.30 , la punta del muro $0.1 * H \text{ min}$ y la altura de zapata $H/6$, cumpliendo con los mínimos estructurales necesarios para resistir los esfuerzos a lo largo de su altura.

El factor de seguridad depende en gran medida de las propiedades del suelo, como la cohesión y el ángulo de fricción. Esto aplica al diseño de muros en voladizo, donde asegurar un valor adecuado del factor de seguridad es clave para evitar deslizamientos. En la Tabla 2 se presentan los factores de seguridad de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC.

Tabla 2- Factores de seguridad normativos (NEC)

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 representaciones matemáticas utilizadas para el cálculo en condición estática y con sismo fueron las siguientes:

Condición estática:

Cálculo del empuje en condición activa por el método de Mohr Coulomb, presión que el suelo ejerce sobre la estructura, como se muestra en la ecuación 1.

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

El coeficiente de empuje Pasivo K_p , como se muestra en la ecuación 2.

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

Donde:

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

ϕ =Ángulo de fricción interna del relleno

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

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

El cálculo del empuje activo E_a del suelo por unidad de longitud del muro, como se muestra en la ecuación 3.

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

Donde:

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

H = Altura total del muro (m)

El factor de seguridad contra volteo respecto a la punta del muro de contención, se muestra en la ecuación 4.

$$Fs(\text{volteo}) = \frac{\sum M_R}{\sum M_0} \quad (4)$$

Donde:

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

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

Los deslizamientos de tierra son uno de los procesos geológicos más destructivos que llegan afectar a personas, causando miles de muertes y daños materiales cada año, sin embargo, hay muchas personas que aún no están conscientes de la importancia que tiene.[17]

Los deslizamientos son provocados por un alto grado de saturación de agua, es por ello que ocurre en las superficies donde el suelo tiene baja cohesión y posee alto grado de porosidad, en estos fenómenos se involucran mecanismos físicos ya sea: la gravedad, la fricción y rodamiento que sufren los materiales al someterse a una fuerza.[18]

El deslizamiento de tierra es uno de los desastres naturales que ocurren con frecuencia en pendientes que son naturales y en pendientes artificiales, esto debido al desequilibrio de fuerzas que actúan sobre la pendiente.[19]

El factor de seguridad por deslizamiento se calcula acorde a la ecuación 5.

$$Fs(\text{deslizamiento}) = \frac{\sum F_R}{\sum F_d} \quad (5)$$

Donde:

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

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

Con sismo:]

Cálculo del coeficiente de presión dinámica activa K_{ae} se calcula acorde a la ecuación 6.

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

En donde

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

ϕ = Ángulo de fricción interna (del relleno)

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

δ = Ángulo de fricción suelo muro

η = Coeficiente Eta

Cálculo del coeficiente de empuje pasivo k_p , acorde a la ecuación 7.

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

En donde

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

Cálculo del empuje activo E_a del suelo se calcula acorde a la ecuación 8.

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

En donde

γ = Peso Específico del suelo de relleno (Tn/m^3)

H = Altura total del muro (m)

La precisión numérica del análisis de elementos finitos (FEA) depende de la cantidad de elementos finitos que sean utilizados en la discretización del espacio, este puede variar dependiendo del tamaño de la malla. Cuanto mayor sea la cantidad de elementos, más precisos serán los resultados.[20]

Los elementos finitos (EF) fueron utilizados para analizar el comportamiento pasivo de un muro de contención de hormigón diseñado para resistir las fuerzas de gravedad.[21]

Para analizar el comportamiento de los muros en voladizo, se utilizó el software Plaxis 3D, que permite simular cómo se deforma y resiste una estructura según sus características reales. Este procedimiento consiste en reducir progresivamente los parámetros de resistencia del suelo, es decir, la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ), hasta que el modelo alcanza un estado de inestabilidad o colapso global.

3. ESTUDIO DE CASO

En este estudio se evalúa cómo se comporta tanto estructural como geotécnicamente un muro de contención en voladizo, empleando el método analítico utilizando la Norma Ecuatoriana de Construcción y simular las condiciones del muro bajo los parámetros del suelo por el método de elementos finitos a través del software Plaxis 3D. El análisis se realiza bajo condiciones estáticas y sísmicas, para determinar el factor de seguridad por volteo, deslizamiento y capacidad portante del suelo. La investigación se desarrolla en el cantón Santa Rosa, parroquia Victoria, Provincia de El Oro, en el río Buenavista, como se muestra en la Fig. 2.



Fig. 2- Ubicación del proyecto

4. RESULTADOS

El dimensionamiento se determinó verificando que los factores de seguridad y las condiciones de estabilidad se cumplan. Como se muestra en la Fig. 3.

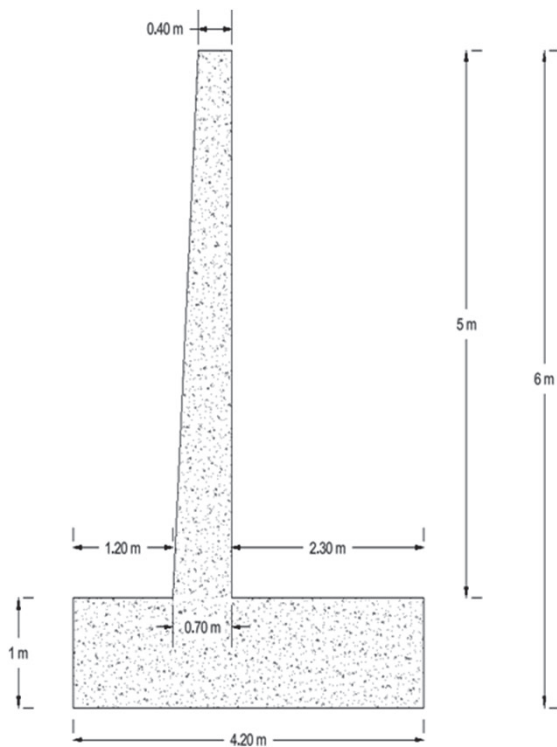


Fig. 3- Dimensiones de muro de contención en voladizo

La altura del muro $H= 6\text{m}$, la base $b= 4.20\text{m}$, la base central $G= 0.70\text{m}$, corona del muro $C= 0.40\text{m}$, punta del muro $M= 1.20\text{m}$, talón del muro $N= 2.30\text{m}$, altura de zapata $h_z= 1.00\text{m}$, altura de pantalla= 5.00m .

Con las dimensiones establecidas, se revisaron los factores de seguridad aplicando un enfoque analítico estático y con sismo. Se analizaron aspectos clave como el riesgo de volcamiento, el deslizamiento y la capacidad del terreno para soportar cargas, comprobando que el diseño propuesto cumple con los requisitos mínimos establecidos por la normativa ecuatoriana vigente (NEC). Los resultados se muestran en las tablas 3, 4 y 5.

Tabla 3- Resultados del análisis del empuje de tierra

Coeficiente activo (K_a)	0.361
Coeficiente pasivo (K_p)	2.427
Empuje activo (E_a)	12.989 ton/m
Momento empuje activo (M_a)	25.978 ton-m/m
Momento empuje por sobrecarga (M_s)	12.989 ton-m/m
Empuje total (E_t)	17.319 ton/m
Cálculo del empuje pasivo (E_p)	19.226 ton/m

Tabla 4- Resultados de las Fuerzas verticales actuantes

Ppmuro de concreto	16.68 ton/m
Momento de peso del muro en x (M_{ppx})	31.848 ton-m/m
Momento de peso del muro en y (M_{ppy})	26.640 ton-m/m
Peso de sobrecarga (W_s)	4.60 ton/m
Momento por la sobrecarga (M_s)	14.030 ton-m/m
Peso del relleno (W_r)	23 ton/m
Momento del relleno (M_r)	70.150 ton-m/m
Resultantes de la fuerza vertical (R_v)	44.280 ton/m
Momento estabilizante (M_e)	116.028 ton-m

Tabla 5- Resultados del análisis del empuje de tierra con sismo

Fuerza sísmica del peso propio (F_{spp})	5.338 ton/m
Momento de la fuerza sísmica (M_{spp})	8.525 ton-m/m
Coeficiente de presión dinámica (k_{ae})	0.949
Incremento dinámico del empuje activo (ΔDe_a)	13.896 ton/m
Momento del incremento dinámico (M_{sis})	55.584 ton-m/m
Empuje total (E_t)	25.728 ton/m
Resultantes de la fuerza vertical (R_v)	39.68 ton/m
Momentos actuantes del suelo (M_{as})	77.098 ton-m/m

La Fig. # 4 muestra la representación gráfica y tabla # 6 los valores obtenidos para factores de seguridad por volteo, deslizamiento y capacidad de carga del muro en voladizo en condición estática y sísmica.

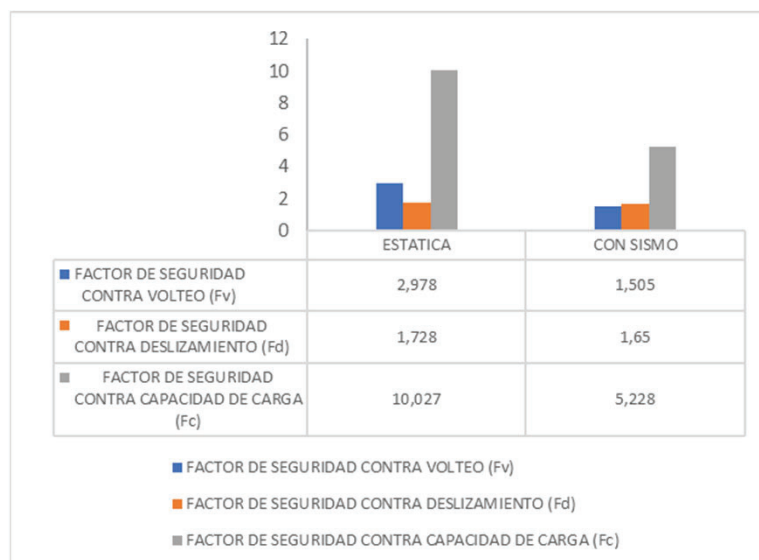


Fig. 4- Factor de seguridad por volteo, deslizamiento y capacidad de carga en el muro en voladizo.

Tabla 6- Resultados de los factores de seguridad en condición estática, con sismo y factores de seguridad mínimos.

ESTABILIDAD DEL MURO	ESTÁTICA	CON SISMO	F.S. min
F.S contra el volteo	2.978	1.505	1.50
F.S contra deslizamiento	1.728	1.65	1.50
F.S contra capacidad de carga	10.027	5.228	3.00

El factor de seguridad contra el volteo en condición sísmica $1.505 \approx 1.50$, es un diseño ajustado pero aceptable. El deslizamiento, los resultados cumplen el mínimo exigido 1.728 y 1.65, garantizando estabilidad frente al empuje del terreno. La capacidad portante, los resultados son superiores al mínimo 10.027 y 5.228, lo que demuestra una excelente distribución de cargas sobre el terreno y baja probabilidad de hundimiento.

Para el análisis del modelo estructural en Plaxis 3D, la Fig. 5 muestra un modelo tridimensional mallado, del muro de contención y el suelo de fundación, que fueron discretizados utilizando elementos finitos tetraédricos de 15 nodos, lo que permite la interpolación de esfuerzos y deformaciones internas.

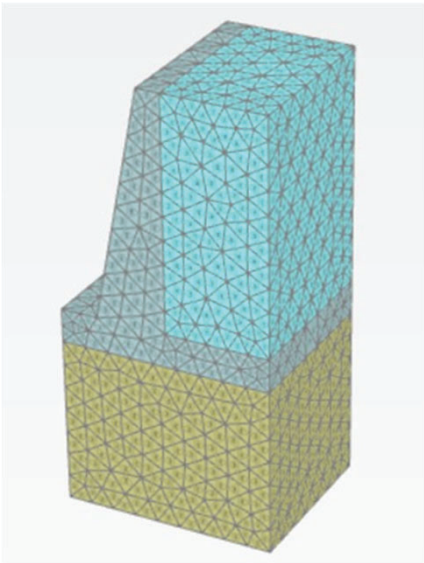


Fig. 5- Fuente Plaxis 3D, Modelo tridimensional mallado

La Fig. 6 refleja una interacción suelo-estructura bien equilibrada, sin zonas críticas que indiquen posibles fallas, la deformación horizontal máxima, no supera los 0.5 mm, se mantiene dentro de los valores aceptables para estructuras de este tipo, lo cual indica un buen desempeño.

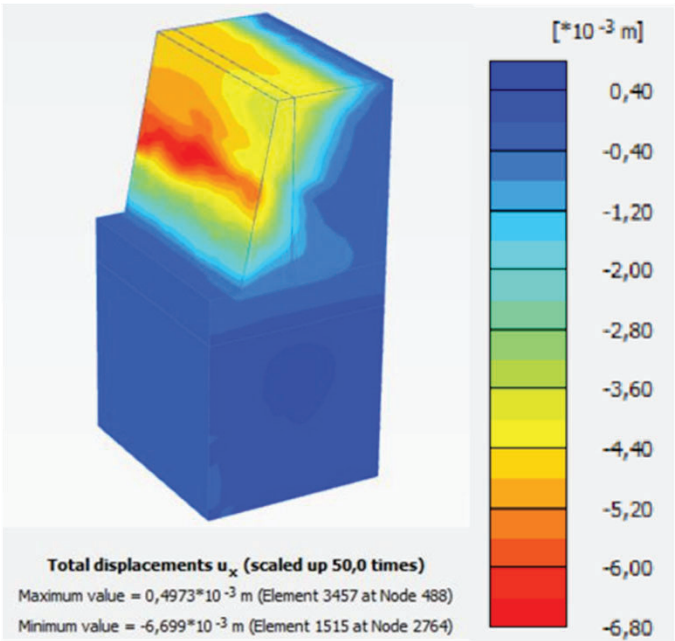


Fig. 6- Fuente Plaxis 3D, Desplazamientos horizontales u_x

Los desplazamientos verticales son mínimos $< \pm 0.35$ mm y mecánicamente aceptables para una estructura rígida de contención, la interacción entre el muro y el suelo se mantiene dentro de límites de seguridad, validando así el diseño estructural propuesto, el muro no presenta problemas de hundimiento ni levantamientos excesivos, como se muestra en la Fig. 7.

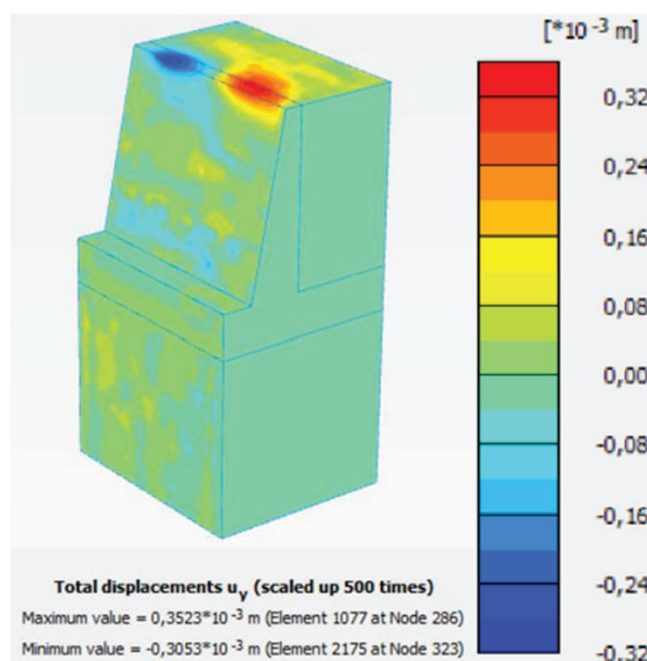


Fig. 7- Fuente Plaxis 3D, Desplazamientos verticales u_y

En la Fig. 8, muestra la distribución de desplazamientos en dirección longitudinal (eje Z) del muro de contención en voladizo, se observa un desplazamiento positivo máximo de +0.985 mm, indicando un ligero avance o empuje hacia adelante del muro y un desplazamiento negativo mínimo de -8.512 mm, principalmente en el terreno bajo el talón del muro. La magnitud del desplazamiento no compromete la estabilidad general del sistema, lo que valida el diseño adoptado y la adecuada rigidez del conjunto muro-zapata.

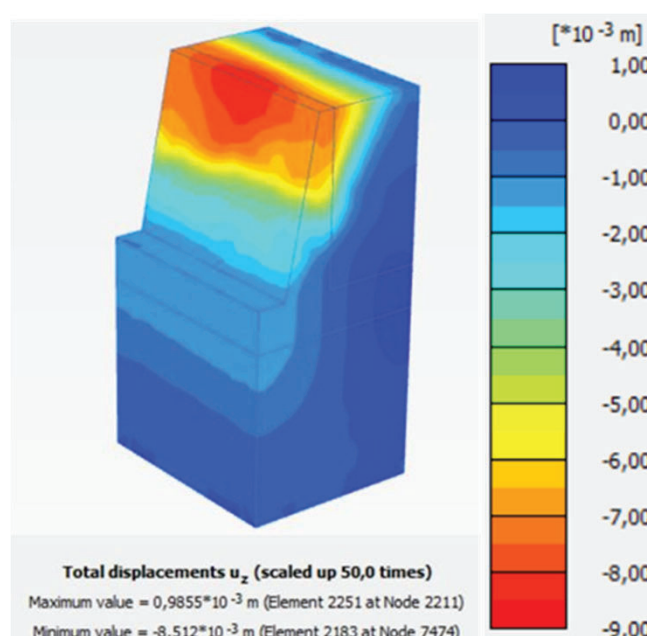


Fig. 8- Fuente Plaxis 3D, Desplazamientos longitudinales u_z

El diseño analítico tradicional con el modelado numérico en Plaxis 3D permitió observar cómo ambos enfoques se complementan en el análisis de muros de contención en voladizo. El método analítico sigue siendo una herramienta útil para validar rápidamente si un diseño cumple con los factores de seguridad mínimos exigidos. Sin embargo, al usar Plaxis 3D se logró ir más allá, simulando de forma detallada cómo interactúan el suelo y la estructura bajo diferentes condiciones de carga, tanto estáticas como sísmicas.

4. CONCLUSIONES

La evaluación de la estabilidad del muro de contención en voladizo se llevó a cabo a través del cálculo de factores de seguridad bajo condiciones estáticas y sísmicas, considerando tres posibles modos de falla: volteo, deslizamiento y capacidad portante del terreno. Los valores obtenidos fueron comparados con los mínimos exigidos por la normativa ecuatoriana de construcción, el Factor de seguridad calculado fue superior a 1.5, lo que indica un diseño seguro.

El análisis numérico realizado en Plaxis 3D permitió evaluar con precisión el comportamiento estructural y geotécnico de un muro de contención en voladizo. Los desplazamientos obtenidos fueron bajos y distribuidos de forma regular, lo que indica una buena interacción suelo-estructura. Los factores de seguridad alcanzados en todos los modos de falla analizados cumplen ampliamente con los requisitos normativos. Por lo tanto, se concluye que el diseño adoptado es técnicamente viable y seguro frente a condiciones estáticas y sísmicas.

Este tipo de modelado permitió visualizar cómo se distribuyen los esfuerzos, hacia donde se desplaza el muro y qué zonas podrían estar más comprometidas. Gracias a eso, se pudo confirmar que el diseño propuesto no solo es estable, sino también eficiente. En resumen, si bien los métodos clásicos siguen siendo necesarios, los análisis numéricos enriquecen el proceso de diseño y aportan mayor seguridad.

1. A. Udomchai, M. Hoy, S. Horpibulsuk, A. Chinkulkijniwat, y A. Arulrajah, «Failure of riverbank protection structure and remedial approach: A case study in Suraburi province, Thailand», *Engineering Failure Analysis*, vol. 91, pp. 243-254, sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.040>
2. Civil Engineer T.E. (Technological Educational Institute of Thessaly et al., «Construction Cost Analysis of Retaining Walls», *IJEAT*, vol. 9, n.o 4, pp. 1909-1914, abr. 2020, doi: <https://doi.org/10.35940/ijeat.D8929.049420>
3. H. M. Arevalo Algarra, N. R. Perico Granados, C. A. Reyes Rodríguez, M. C. Vera, J. Monroy, y C. Perico Martínez, «Sitios de inundaciones causadas por los ríos La Vega y Jordán, Tunja (Boyacá).», *Tecnura*, vol. 25, n.o 67, pp. 86-101, ene. 2021, doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.15248>
4. E. N. Kalemci, S. B. İkizler, T. Dede, y Z. Angın, «Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm», *Structures*, vol. 23, pp. 245-253, feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.013>
5. Y. Wang, J. V. Smith, y M. Nazem, «Optimisation of a Slope-Stabilisation System Combining Gabion-Faced Geogrid-Reinforced Retaining Wall with Embedded Piles», *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 25, n.o 12, pp. 4535-4551, dic. 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1300-6>
6. A. Yasrifullah y A. Adriani, «The Desig of the Construction of Retaining Walls on the River Slopes of Kuin», *CERUCUK*, vol. 4, n.o 1, p. 83, jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.20527/crc.v4i1.3580>
7. F. Bari, «Optimal Cost of Slope Stabilization with Retaining Wall», *GEOMATE*, vol. 22, n.o 93, may 2022, doi: <https://doi.org/10.21660/2022.93.3129>
8. 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: <https://doi.org/10.3390/su15107984>
9. E. A. Cuesvas Rosero, R. Ortega Caraballo, P. S. Torres Arbeláez, J. Marulanda Casas, y P. Thomson Roach, «Simulación numérica del comportamiento sísmico de muros de concreto reforzado», *hya*, dic. 2020, doi: <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2865>
10. P. Patil y M. V. Waghmare, «Dynamic Analysis of Cantilever Retaining Wall», *SMSJ*, vol. 14, n.o Spl-2 issu, pp. 207-212, jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.18090/samriddhi.v14spli02.1>
11. A. K. Tiwary et al., «Performance Comparison and Critical Finite Element Based Experimental Analysis of Various Forms of Reinforcement Retaining Structural System», *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, pp. 1-13, feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/4434679>
12. G. Juneja y R. Sharma, «Numerical Analysis of Square and Circular Skirted Footings Placed on Sand using PLAXIS 3D Software», *Journal of Mining and Environment*, vol. 13, n.o 4, oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.22044/jme.2022.12458.2261>
13. W. Á. Gutiérrez Rodríguez, «Ensayo granulométrico de los suelos mediante el método del tamizado», *Ciencia Latina*, vol. 7, n.o 2, pp. 6908-6927, may 2023, doi: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5834
14. 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: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1252/1/012084>

15. L. A. Figueroa Cardozo, M. F. Porras Forero, y N. I. Rojas Gamba, «Análisis de estabilidad del talud km 8 + 200 vía Soracá (Boyacá), usando diferentes métodos», Revista Agunkuyâa, vol. 11, n.o 1, pp. 42-58, ene. 2021, doi: <https://doi.org/10.33132/27114260.1985>
16. Braja M. Das, Fundamentos de Ingenieria Cimentaciones, Septima Edicion. [En línea]. Disponible en: <https://latinoamerica.cengage.com>
17. 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», IJSDP, vol. 17, n.o 3, pp. 823-832, jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.18280/ijstdp.170312>
18. 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-Estelí, n.o 34, pp. 169-179, jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.5377/farem.v0i34.10016>
19. A. Ilham, T. Trides, H. Hasan, R. Oktaviani, y A. J. Pontus, «The Analysis of Slope Stability using The Simplified Bishop Method and Geometry of Retaining Walls in Palaran District, Samarinda City, East Kalimantan Province», NuCE, vol. 2, n.o 1, pp. 43-52, ene. 2023, doi: <https://doi.org/10.32487/nuce.v2i1.450>
20. H. Shaowu Yuchi, V. Roshan Joseph, y C. F. Jeff Wu, «Design and Analysis of Multifidelity Finite Element Simulations», Journal of Mechanical Design, vol. 145, n.o 6, p. 061703, jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4056874>
21. 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 in Engineering, vol. 21, p. 101802, mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101802>