

## Tech Note. Evaluation of the stability in cyclopean wall and cantilever using numerical models

Johannes Briceño-Balza <sup>\*,a,b</sup> , Yaligne Matos-Barrios <sup>c</sup>, Norly Belandria-Rodríguez <sup>b,d</sup>, Francisco León-Oviedo <sup>e</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

<sup>b</sup>Postgrado de Ingeniería Vial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

<sup>c</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Área Vialidad, Universidad Politécnica Territorial del Estado Trujillo. Valera, Venezuela.

<sup>d</sup>Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA), Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

<sup>e</sup>Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i1.53>

**Abstract.-** The development of computational tools has aroused interest in the management of modeling programs with application in geotechnics, which use numerical methods such as the finite element method for analysis. The objective of this research is to evaluate the external stability of a simulated retaining wall, through numerical methods based on finite element analysis, using the Plaxis V8.2 software. For this, two types of walls were evaluated (cyclopean and cantilevered, with and without seismic analysis), with two different heights and considering in some cases the cohesion of the fill soil and the passive pressure provided by the soil in front of the wall. The safety factor for sliding, overturning and the total displacement of the wall was determined; in order to establish some recommendations for the proposed wall models, when analyzing external stability.

**Keywords:** Retaining wall; External stability; Safety factor; Numerical methods.

## Nota Técnica. Evaluación de la estabilidad en muro ciclópeo y voladizo utilizando modelos numéricos

**Resumen.-** El desarrollo de las herramientas computacionales ha despertado el interés por el manejo de programas de modelación con aplicación en la geotecnia, que utilizan los métodos numéricos como el método de elementos finitos para el análisis. El objetivo de esta investigación es evaluar la estabilidad externa de un muro de contención simulado, a través de métodos numéricos basados en el análisis de elementos finitos, utilizando el software Plaxis V8.2. Para ello se evaluaron dos tipos de muros (ciclópeo y en voladizo, con y sin análisis sísmico), con dos diferentes alturas y considerando en algunos casos la cohesión del suelo de relleno y el empuje pasivo aportado por el suelo delante del muro. Se determinó el factor de seguridad al deslizamiento, al volcamiento y el desplazamiento total del muro; con la finalidad de establecer algunas recomendaciones para los modelos de muros planteados, al analizar la estabilidad externa.

**Palabras clave:** Muro de contención; Estabilidad externa; Factor de seguridad; Métodos numéricos.

Recibido: 02 de enero, 2022.

Aceptado: 25 de marzo, 2022.

### 1. Introducción

La función más importante de los muros es la de servir de elemento o estructura de contención de un terreno, que en unas ocasiones y según las

circunstancias es un terreno natural y en otras un relleno artificial, para Rankine [1], tienen como finalidad resistir las presiones laterales o empujes, producidos por el material retenido detrás de ellos. Su estabilidad se debe fundamentalmente al peso propio y al peso del material que está sobre su fundación, por lo que los muros de contención se comportan básicamente como voladizos empotrados en su base.

Se denomina, según Rankine [1], con el nombre de empuje, a las acciones realizadas por las masas

\* Autor para correspondencia:

Correo-e: [ingjebb@gmail.com](mailto:ingjebb@gmail.com) (J. Briceño-Balza)

que se consideran carentes de cohesión, tales como arenas, gravas, entre otros. Es por ello, que es frecuente que los empujes sean producidos por terrenos naturales, rellenos artificiales o materiales aglomerados. De igual manera, los muros funcionan esencialmente a flexión y a compresión vertical, debido a que su propio peso es un factor estabilizante. En algunas circunstancias, el muro desempeña una segunda tarea que es la de transmitir cargas verticales al terreno y así de esta manera formar una base estable.

En la actualidad se utilizan los modelos o métodos numéricos (MN) para el análisis de diferentes problemas geotécnicos (Abdollahi *et. al* [2], Belandria [3], Briceño *et. al* [4], Chen *et. al* [5], Dyson y Tolooiyan [6], Lianheng *et. al* [7], Mehdipour *et. al* [8], Sengani y Mulenga [9], Shariati y Fereidooni [10], Shuwei [11], Wei *et. al* [12], Zhang *et. al* [13]) y particularmente en la estabilidad de estructuras de contención (Cuesvas *et. al* [14], Cano *et. al* [15], Sarmiento *et. al* [16]).

Esta investigación se basa en el análisis de la estabilidad externa de diferentes casos de muros de concreto simulados (ciclópeo y en voladizo), considerando la cohesión ( $C$ ) del suelo de relleno, el empuje pasivo ( $E_p$ ) generado por el suelo delante del muro, análisis sísmico ( $S$ ), las condiciones de contorno, sobrecarga vehicular y geometría de los muros; lo que genera diferentes casos de análisis. Estos casos de análisis se generan al considerar o no la  $C$ ,  $E_p$  y  $S$ .

Para el análisis se utilizó el software de aplicación geotécnica, Plaxis V8.2, basado en el método de elementos finitos (MEF), además, se aplica como apoyo complementario el métodos analítico (MA) de cálculo para estudiar el comportamiento de la estabilidad externa de los diferentes muros considerados en la investigación. Se determinó el factor de seguridad al deslizamiento ( $FS_d$ ), volcamiento ( $FS_v$ ) y el desplazamiento total del muro ( $\Delta T$ ), con la finalidad de establecer algunas recomendaciones para los modelos de muros planteados al analizar la estabilidad considerando o no la  $C$ ,  $E_p$  y  $S$ .

## 2. Metodología

La metodología de la presente investigación comprende las siguientes etapas: Se comienza por plantear condiciones geométricas en muros simulados, propiedades elásticas y mecánicas del suelo y condiciones de borde del problema. Luego, se determina el factor de seguridad (FS) asociado a la estabilidad externa, utilizando MA. Aplicando los MN se simulan las mismas condiciones, propiedades del suelo tomadas de la base de datos del software y condiciones de borde, utilizando el software de aplicación en geotecnia, Plaxis. Después, se evalúa a través de FS, casos particulares que afectan la estabilidad externa, como lo es considerar o no la  $C$ , al igual que considerar o no el  $E_p$  producido por el suelo en la parte delantera del muro. Todo con la finalidad de presentar recomendaciones sobre los casos considerados a la hora de analizar la estabilidad externa.

Este programa utiliza el MEF para el cálculo por simulación de deformaciones, esfuerzos y estabilidad de diferentes casos de aplicación geotécnica; el programa tiene como limitante que el MEF que usa es para modelación de problemas con deformaciones planas, en geometrías con sección transversal uniforme donde se pueda suponer que los estados tensionales y de carga son uniformes a lo largo de la dirección perpendicular a la sección transversal. Una ventaja importante que presenta el software es la utilización de una interfaz gráfica (Sistema CAD) que permite generar un modelo geométrico de forma rápida y sencilla. Evalúa la estabilidad a través de FS, utilizando el método que se conoce como reducción de resistencia al cortante o método de reducción  $\phi$ - $c$ , basado en el criterio de Mohr-Coulomb, donde los parámetros de resistencia del suelo originales, cohesión ( $C_o$ ) y ángulo de fricción interna ( $\phi_o$ ) generan la envolvente inicial que no causará la falla, estos valores de  $C_o$  y  $\phi_o$  son afectados por un factor de reducción, comenzando con el aumento de este factor en valores modestos reduciendo así  $C$  y  $\phi$  hasta generar la envolvente de falla que se intercepta con la envolvente inicial obteniendo así  $C_f$  y  $\phi_f$ , cuando esto sucede, el FS final es determinado por

el factor de reducción (Dyson [17]).

*Casos de análisis considerados*

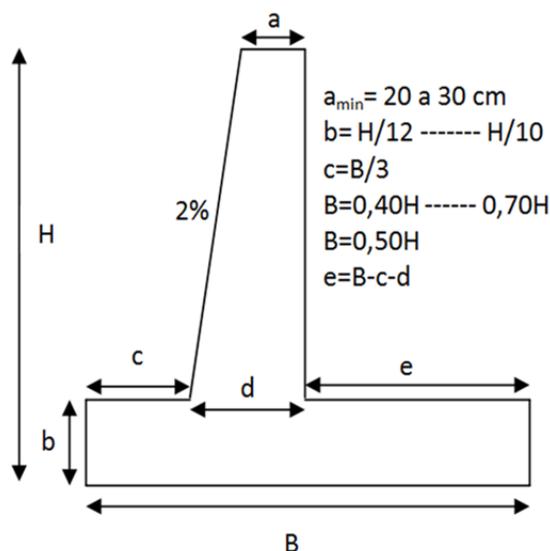
Para los distintos casos de análisis se utilizaron dos modelos de muros, ciclópeo y en voladizo (con y sin análisis sísmico), con dos alturas ( $H$ ), 3 y 5 m, mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Casos de análisis planteados

Caso	Altura ( $H$ ) (m)	Cohesión ( $C$ ) del suelo de relleno ( $\text{kN/m}^2$ )	Empuje pasivo ( $E_p$ ), suelo delante del muro ( $\text{kN/m}^2$ )
1 y 5	3 m y 5 m	$C = 0$	$E_p = 0$
2 y 6	3 m y 5 m	$C \neq 0$	$E_p = 0$
3 y 7	3 m y 5 m	$C = 0$	$E_p \neq 0$
4 y 8	3 m y 5 m	$C \neq 0$	$E_p \neq 0$

*Planteamiento de condiciones geométricas del muro*

La Figura 1 y la Tabla 2, muestran el predimensionado en función de  $H$  recomendado por Ayuso [18] para un muro en voladizo y ciclópeo, respectivamente.



$a$ : define el ancho de la corona de la pantalla,  $b$ : es la altura de la base,  $B$ : representa el ancho de la base,  $c$ : corresponde a la longitud del pie,  $d$ : es el ancho de la base de la pantalla,  $e$ : define la longitud del talón,  $H$ : representa la altura del muro.

Figura 1: Predimensionado. Muro en voladizo. Ayuso [18]

Tabla 2: Predimensionado recomendado. Muro ciclópeo. Ayuso [18]

B (m)	b (m)	$a_{\min}$ (m)
0.4H a 0.7H	H/8 a H/6	0,30 a H/12

Cabe destacar que, para todos los casos analizados se varió el ancho de la base ( $B$ ) del muro, con la finalidad de lograr estabilidad externa por el MA y de este modo analizar muros que sean de principio estables.

En la Tabla 3 se muestra el predimensionado del muro ciclópeo de altura 5 m.

Tabla 3: Predimensionado recomendado. Muro ciclópeo

H (m)	B (m)	c (m)	b (m)	e (m)	a (m)	d (m)	Df (m)	$i$ ( $^\circ$ )
5,00	2,50	0,83	0,71	1,07	0,40	0,60	1,20	10,00

$i$ : es la inclinación del relleno y Df: corresponde a la cota de fundación.

*Propiedades elásticas y mecánicas del suelo*

En esta investigación se consideró un material de suelo de fundación y uno de relleno, en la Tabla 4 se muestran las propiedades elásticas y mecánicas de los mismos.

Con el establecimiento de los parámetros del suelo, entre ellos el peso específico, que se traduce en peso de material generando el empuje activo ( $E_a$ ) y el empuje pasivo ( $E_p$ ) de terreno para el análisis de estabilidad, no es necesario introducir dicho empuje como una carga adicional en el programa.

*Condiciones de borde*

Para reducir la influencia de las condiciones de contorno al mínimo, se establecieron límites geométricos suficientemente grandes o lejanos al modelo, con la finalidad de disipar los componentes normal y cortante de las ondas sísmicas y evitar que se produzca rebote de las mismas. Se delimitó el área de estudio con una separación desde el muro de  $5H$  en sentido horizontal y  $H$  en sentido vertical, con la finalidad de evitar que las restricciones de

Tabla 4: Propiedades elásticas y mecánicas del material de suelo de fundación y del material de suelo de relleno (Tomadas del manual de Plaxis V8.2)

Descripción	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	C (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	N	$K_x = K_y$ (m/día)
Suelo de fundación	16	17	25	60	$4,80 \times 10^4$	0,35	$1,30 \times 10^5$
Material de relleno	17	20	32	10	$4,00 \times 10^4$	0,35	1,00

movimiento y rotación en el borde del área afecten el comportamiento del modelo.

Para la discretización o mallado del modelo se utilizó un mallado fino triangular recomendado por el programa.

La Figura 2, muestra el modelo con sus condiciones geométricas, de suelo y de borde, para el caso de muro ciclópeo.

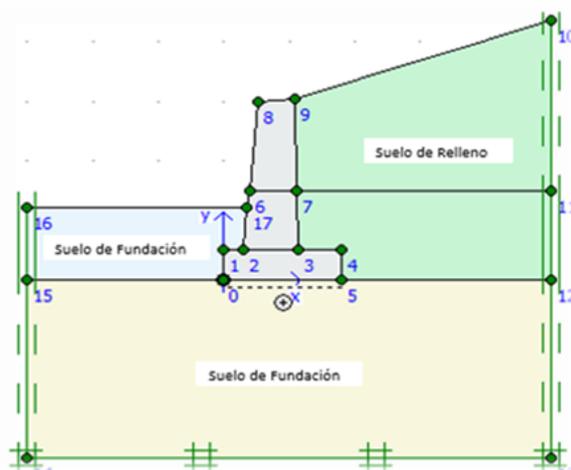


Figura 2: Condiciones geométricas y de borde del modelo. Muro ciclópeo. Imagen de Plaxis.

### Condiciones iniciales

Es necesario establecer las condiciones iniciales para el análisis. Comenzando por la ubicación del nivel freático, en esta investigación se consideró la condición drenada, debido a que a la hora de construir una estructura de retención se debe garantizar el desalojo del agua que se pudiera acumular detrás de la estructura, la cual generaría un empuje hidrostático adicional, esto obligaría a un diseño de dimensiones, secciones de concreto y cuantías de acero muy grandes; lo que haría inviable económicamente su construcción. Además, se calcula la presión de poros y efectiva inicial.

### 2.1. Análisis por etapas

Se consideró un análisis por etapas según las etapas de construcción del muro, donde se van activando capas de suelo, capas del muro y cargas, progresivamente:

- I. Base de fundación. Comprende el vaciado del concreto de la base del muro y aproximadamente la mitad de la altura de la pantalla.
- II. Relleno. Se refiere a la colocación del material de relleno hasta la misma altura de vaciado de la pantalla alcanzado en la etapa I.
- III. Coronamiento. Corresponde al vaciado del concreto del resto de la pantalla.
- IV. Relleno final. Se refiere a la colocación del resto del material de relleno.
- V. Corresponde a la aplicación de la sobre carga vehicular.
- VI. Análisis sísmico.
- VII. Determinación de FS y  $\Delta T$ .

Cabe destacar que aunque es posible hacer un análisis por fases (construcción por etapas) y buscar un FS para cada etapa analizada, en esta investigación el FS se está evaluando sólo para la etapa final, porque la construcción es rápida y no interesa la consolidación del material de relleno.

En la etapa VI, análisis sísmico, se realizó un análisis dinámico en dos dimensiones y se utilizó la teoría de elasticidad. En el estudio dinámico es importante los parámetros de amortiguamiento o disipación de la energía sísmica, en el software para esta disipación se tienen como opciones tres maneras: amortiguamiento de los materiales, disipación por modelos de integración y condiciones de contorno (fronteras absorbentes).

En esta investigación se utilizó para disipar las ondas de tensión la opción de condiciones de contorno con el criterio de falla Mohr-Coulomb, los valores de coeficientes de relajación para absorción de ondas se tomaron de las recomendaciones del programa,  $C_1 = 1$  y  $C_2 = 0,25$ .

La velocidad de onda primaria o de presión ( $V_p$ ) y secundaria o de corte ( $V_s$ ) son determinadas y establecidas por el programa, utilizando los parámetros del suelo ( $E, \nu$  y  $\gamma$ ).

La carga dinámica oscilatoria (cíclica) se introdujo al programa de forma pseudo-estática, como componentes de aceleración  $x$  y  $y$  expresados en términos de la aceleración normal de la gravedad  $g$ , controlada por los multiplicadores de carga del programa, en intervalos de aplicación de 0,1 s. Para los casos de estudio, estos componentes pseudo-estáticos tienen un coeficiente de aceleración horizontal de 0,30g y un coeficiente de aceleración vertical de 0,21g.

#### *Factor de seguridad asociados a la estabilidad externa en muros*

Se determinaron los FSd, FSv, de capacidad de carga (FSq) y  $\Delta T$  a través del MA; de igual manera, a través del programa se determinó el FS global ( $FSg_{(MN)}$ ) y  $\Delta T$ . En la Figura 3 se muestra la deformación resultante de la malla, la Figura 4 el análisis por etapas y en la Figura 5 el  $\Delta T$ .

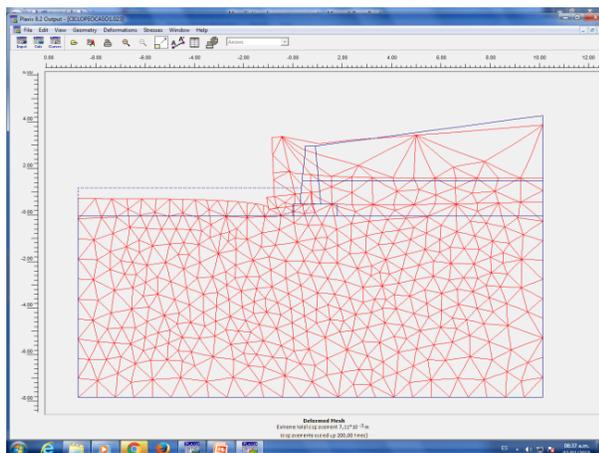


Figura 3: Deformación resultante de la malla. Muro ciclópeo. Caso 1. Imagen de Plaxis

### 3. Análisis y discusión de resultados

Seguidamente se detalla en las Tablas 5 y 6, los resultados obtenidos de FS tanto por el MA como por el MN, para los diferentes tipos de muro y casos analizados. De igual forma, se representan en la Figuras 6 y 7.

La Figura 8 muestra el desplazamiento total, tanto por el MA como por MN, para los diferentes tipos de muro y casos analizados.

Para los dos tipos de muro analizados, en los casos 1 y 5 ( $C = 0$  y  $E_p = 0$ ) el FSv, FSd y FSg, tanto por el MA,  $MA_{(S)}$ , MN y  $MN_{(S)}$  son menores que para otros casos con igual altura. En los casos 4 y 8 ( $C \neq 0$  y  $E_p \neq 0$ ) el FSv, FSd y FSg, tanto por el MA,  $MA_{(S)}$ , MN y  $MN_{(S)}$  son mayores que para otros casos con igual altura.

El análisis sísmico afecta el FS, el mismo disminuye ante la presencia de sismo.

En general, los resultados de factor de seguridad para todos los muros y casos analizados, comparando estos con el mínimo factor de seguridad ( $FS_{min} = 1,50$ ) usado para diseño, se puede apreciar que por cualquiera de los métodos de análisis estos factores son mucho mayores que el mínimo, incluyendo el análisis sísmico.

Cuando se revisa el desplazamiento total de los muros analizados, los casos 1 y 5 muestran los mayores valores, comparados con otros casos de igual altura. En los casos 4 y 8 son menores que para los otros casos con igual altura.

### 4. Conclusiones

Culminado el proceso de análisis de los resultados, para los diferentes casos considerando la cohesión o no del suelo de relleno, al igual que el empuje pasivo generado por el suelo delante del muro, las condiciones de contorno, carga y geometría de los muros; se llega a las siguientes conclusiones.

En todos los casos y tipos de muro analizados, el FS superan ampliamente el mínimo requerido para diseño ( $FS_{min}=1,50$ ), lo que permite replantear el predimensionado del muro en otras de sus dimensiones y no sólo en su base como en esta investigación, con la finalidad de reducir

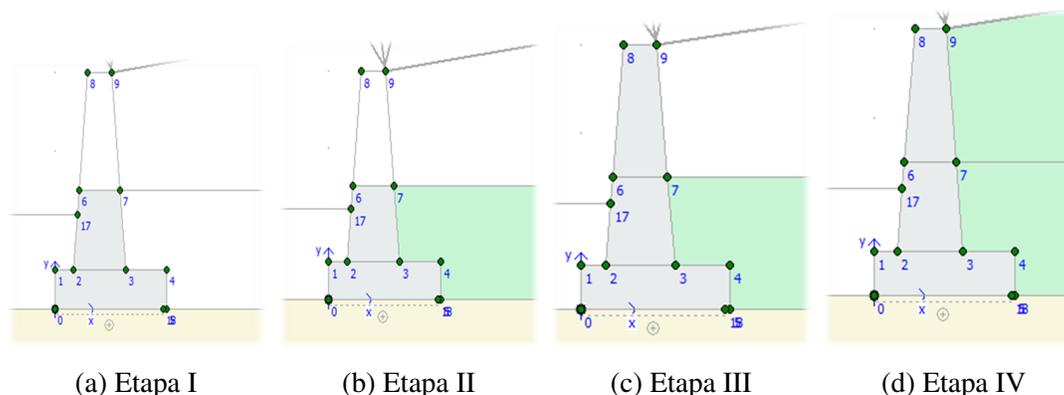


Figura 4: Análisis por etapas. Muro ciclópeo. Imagen de Plaxis

Tabla 5: Resultados de factor de seguridad. Método analítico y por método numérico. Muro ciclópeo

Caso	Altura (H) (m)	Método analítico (MA)					Método numérico (MN)	
		FSv	FSD	FSq <sub>max</sub>	FSq <sub>min</sub>	ΔT (m)	FSg	ΔT (m)
1	3	2,7	3,5	5,56	34,16	$1,41 \times 10^{-2}$	2,43	$9,11 \times 10^{-3}$
2		7,2	3,52	3,76	15,67	$1,41 \times 10^{-2}$	2,72	$8,49 \times 10^{-3}$
3		2,96	4,3	3,82	147,2	$1,41 \times 10^{-2}$	4,6	$7,08 \times 10^{-3}$
4		10,41	4,51	3,01	16,81	$1,41 \times 10^{-2}$	4,93	$4,75 \times 10^{-3}$
5	5	2,5	2,2	3,25	39,04	$2,35 \times 10^{-2}$	2,04	$2,66 \times 10^{-2}$
6		9,65	2,56	3,24	6,82	$2,35 \times 10^{-2}$	2,16	$2,53 \times 10^{-2}$
7		2,98	2,38	3,01	28,28	$2,35 \times 10^{-2}$	3,04	$1,55 \times 10^{-2}$
8		14,32	3,21	3,13	7,39	$2,35 \times 10^{-2}$	3,34	$1,50 \times 10^{-2}$
Con análisis sísmico								
1	3	2,35	3,1	8,31	22,55	1,41E-02	1,87	2,05E-02
2		3,35	3,41	120,6	7,23	1,41E-02	1,79	1,90E-02
3		2,6	3,85	4,75	160,54	1,41E-02	3,25	1,87E-02
4		3,5	4,02	4,96	4,87	1,41E-02	3,88	1,70E-02
5	5	2,23	1,75	5,01	165,17	2,35E-02	1,68	3,66E-02
6		2,3	2,04	4,87	9,25	2,35E-02	1,77	3,10E-02
7		2,45	2,18	4,5	19,64	2,35E-02	2,25	3,12E-02
8		2,55	2,19	5,65	11,47	2,35E-02	2,4	2,80E-02

FSv: es el factor de seguridad al volcamiento, FSD: representa el factor de seguridad al deslizamiento, FSq: corresponde al factor de seguridad a la capacidad de carga del suelo, ΔT: es el desplazamiento total del muro, FSg: es el factor de seguridad global.

dimensiones, ahorrar en material y por tanto reducir costos de construcción.

Para el ΔT, en todos los tipos de muros y casos analizados, los resultados indican valores muy bajos que no superan en ningún caso los 6 cm, lo que representa un máximo del 1,20 % de la altura del muro. Por tanto, no representa un riesgo para la estabilidad.

Los resultados demuestran que a la hora de diseñar un muro la condición más desfavorable es el no considerar ni la cohesión del suelo de relleno (C=0) ni el empuje pasivo (Ep=0) producido por el suelo delante del muro, casos 1 y 5 donde el FS es más bajo. Tomar estas condiciones en conjunto o

por separado contribuyen a la estabilidad del muro. Lo ideal es que el material de relleno sea granular para garantizar el drenaje y por tanto tenga una cohesión nula o muy baja, para el Ep se corre el riesgo que el material por delante del muro que lo genera pueda ser posteriormente removido por causas naturales o humanas y esto desestabilice el muro si es que este empuje se consideró en el diseño. Caso contrario, la condición más riesgosa para la estabilidad externa es considerar estas fuerzas estabilizantes ya sea en conjunto o por separado ( $C \neq 0$  y/o  $Ep \neq 0$ ), porque generan el FS más alto.

Finalmente, se concluye que, la estabilidad

Tabla 6: Resultados de factor de seguridad. Método analítico y por método numérico. Muro en voladizo

Caso	Altura (H) (m)	Método analítico (MA)					Método numérico (MN)	
		FSv	FSd	FSq <sub>max</sub>	FSq <sub>min</sub>	ΔT (m)	FSg	ΔT (m)
1	3	2,14	2,99	6,49	112,35	$1,41 \times 10^{-2}$	2,4	$1,81 \times 10^{-2}$
2		6,23	3,3	4,96	18,94	$1,41 \times 10^{-2}$	2,98	$8,94 \times 10^{-3}$
3		2,83	3,72	4,38	272,74	$1,41 \times 10^{-2}$	4,58	$5,08 \times 10^{-3}$
4		7,23	3,79	3,3	31,57	$1,41 \times 10^{-2}$	5,06	$4,88 \times 10^{-3}$
5	5	2,32	2,41	4,43	31,71	$2,35 \times 10^{-2}$	2,05	$2,35 \times 10^{-2}$
6		11,16	2,58	5,93	5,6	$2,35 \times 10^{-2}$	2,38	$2,32 \times 10^{-2}$
7		2,41	2,62	3,34	180,85	$2,35 \times 10^{-2}$	2,83	$1,93 \times 10^{-2}$
8		12,1	2,78	4,06	6,56	$2,35 \times 10^{-2}$	2,96	$1,63 \times 10^{-2}$
Con análisis sísmico								
1	3	2,1	2,31	7,51	77,78	$1,41 \times 10^{-2}$	1,6	$1,81 \times 10^{-2}$
2		3,6	3,06	137,8	6,4	$1,41 \times 10^{-2}$	2,59	$1,81 \times 10^{-2}$
3		2,61	2,94	4,97	418,28	$1,41 \times 10^{-2}$	2,8	$1,79 \times 10^{-2}$
4		2,7	3,3	10,03	6,87	$1,41 \times 10^{-2}$	4,31	$1,70 \times 10^{-2}$
5	5	2,1	1,7	4,3	185,47	$2,35 \times 10^{-2}$	1,71	$5,16 \times 10^{-2}$
6		2,2	2,11	7,2	8,26	$2,35 \times 10^{-2}$	1,87	$4,16 \times 10^{-2}$
7		2,08	1,74	3,75	97,9	$2,35 \times 10^{-2}$	1,87	$4,12 \times 10^{-2}$
8		2,3	2,3	4,71	10,55	$2,35 \times 10^{-2}$	2,5	$4,05 \times 10^{-2}$

FSv: es el factor de seguridad al volcamiento, FSd: representa el factor de seguridad al deslizamiento, FSq: corresponde al factor de seguridad a la capacidad de carga del suelo, ΔT: es el desplazamiento total del muro, FSg: es el factor de seguridad global.

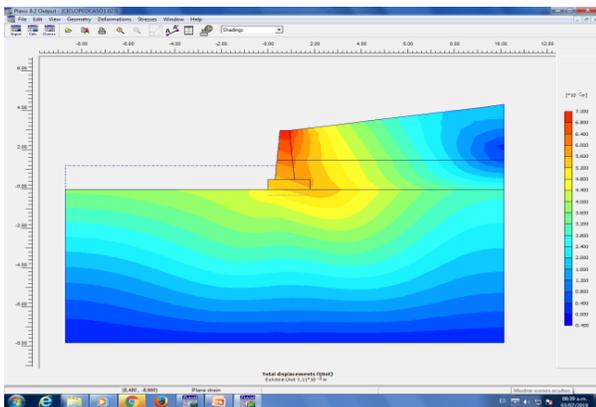


Figura 5: Desplazamiento total. Muro ciclópeo. Caso 1. Imagen de Plaxis

externa puede ser analizada con el uso de MN basados en el MEF, como herramienta complementaria al MA con amplio margen de seguridad. En cuanto al tiempo invertido para el análisis, se puede concluir que es mucho más bajo cuando el análisis se hace por MN, con la excepción de los análisis con sismo que requieren de un tiempo de análisis mucho mayor, debido a los requerimientos computacionales necesarios, lo que limita su utilización según el equipo computacional con que se cuenta.

De igual forma, el MN tiene una ventaja notoria

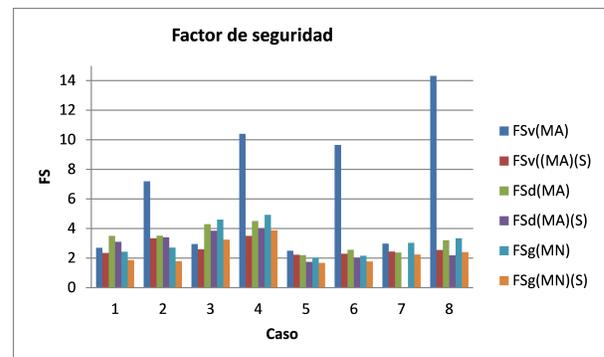


Figura 6: Factor de seguridad. Método analítico y por método numérico. Muro ciclópeo

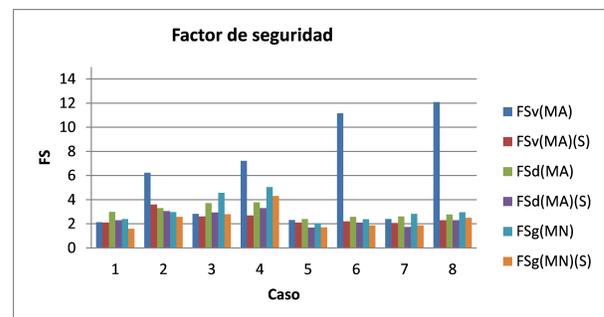


Figura 7: Factor de seguridad. Método analítico y por método numérico. Muro en voladizo

ante los MA, ya que se puede analizar simultánea-

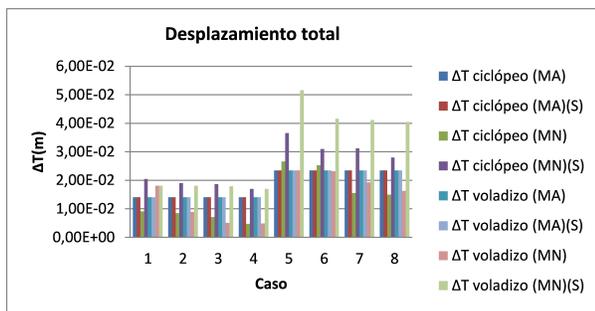


Figura 8: Desplazamiento total. Método analítico y por método numérico

mente deformaciones y desplazamientos, lo que da un aporte en ganancia de tiempo. Además, se pueden variar condiciones de contorno, parámetros de material, entre otros; sin necesidad de cambiar toda la configuración del problema planteado.

## 5. Referencias

- [1] W. Rankine, "On the stability of loose earth," *Philosophical transactions of the Royal Society London*, vol. 147, pp. 9–27, 1857. <https://doi.org/10.1098/rstl.1857.0003>
- [2] M. Abdollahi, F. Vahedifard, and M. Abed, "Effect of tension crack formation on active earth pressure encountered in unsaturated retaining wall backfills," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 147, no. 2, 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002434](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002434)
- [3] N. Belandria, "Desarrollo de un método para el cálculo generalizado de estabilidad de taludes, basado en técnicas innovadoras del cálculo matemático y computacional," Tesis Doctoral, Universidad de los Andes, Venezuela, 2015.
- [4] J. Briceño, A. Uzcatogui, N. Belandria, F. León, y V. Verjel, "Asentamientos en fundaciones continuas con modelos numéricos de simulación con elementos finitos," *Revista Ciencias e Ingeniería*, vol. 41, no. 2, pp. 157–166, 2020.
- [5] G. Chen, P. Tang, and R. Huang, "Critical tension crack depth in rockslides that conform to the three-section mechanism," *Landslides*, vol. 18, no. 1, pp. 79–88, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01471-x>
- [6] A. P. Dyson and A. Tolooiyan, "Optimisation of strength reduction finite element method codes for slope stability analysis," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 3, p. 38, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0148-1>
- [7] Z. Lianheng, C. Xiao, Z. Yingbin, L. Liang, and L. De-Jian, "Stability analysis of seismic slopes with cracks," *Computers and Geotechnics*, vol. 77, pp. 77–90, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.04.007>
- [8] I. Mehdipour, M. Ghazavi, and R. Moayed, "Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 37, no. 4, pp. 23–34, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.01.001>
- [9] F. Sengani and F. Mulenga, "Application of limit equilibrium analysis and numerical modeling in a case of slope instability," *Sustainability*, vol. 12, no. 21, p. 8870, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12218870>
- [10] M. Shariati and D. Fereidooni, "Rock slope stability evaluation using kinematic and kinetic methods along the Kamyaran-Marivan road, west of Iran," *Journal of Mountain Science*, vol. 18, pp. 779–793, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6438-z>
- [11] Z. Shuwei and Z. Xiaoying, "Adaptive phase field simulation of quasi-static crack propagation in rocks," *Underground Space*, vol. 3, no. 3, pp. 190–205, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.04.006>
- [12] G. Wei, D. Shuang, X. Ting, and H. Tianyang, "Failure process of rock slopes with cracks based on the fracture mechanics method," *Engineering Geology*, vol. 231, pp. 190–199, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.10.020>
- [13] L. Zhang, X. Wang, T. Xia, B. Yang, and B. Yu, "Deformation characteristics of Tianjiaba Landslide induced by surcharge," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 10, no. 4, p. 221, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040221>
- [14] E. Cuesvas, R. Ortega, P. Torres, J. Marulanda, y P. Thomson, "Simulación numérica del comportamiento sísmico de muros de concreto reforzado," in *VIII Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural. Hormigón y Acero*, España, 2020. <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2865>
- [15] M. Cano, J. Pastor, T. Miranda, y R. Tomás, "Procedimiento constructivo de muros de sótano mediante batches con juntas de conexión. Estudio del ancho óptimo de excavación en suelos mixtos," *Informes de la Construcción*, vol. 72, no. 558, p. e344, 2020. <https://doi.org/10.3989/ic.66913>
- [16] R. Sarmiento y B. Velarde, "Propuesta de diseño de muro de suelo reforzado como estribo de puente por el método lrfd y verificación de deformaciones mediante el análisis de elementos finitos para altas solicitaciones en la mina cuajone –perú," Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Perú, 2021.
- [17] A. P. Dyson and A. Tolooiyan, "Optimization of strength reduction finite element method codes for slope stability analysis," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 3, no. 1, p. 38, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0148-1>
- [18] J. Ayuso, *Estructuras de hormigón para sostenimiento de tierras*. Córdoba, España: Escuela técnica superior de ingeniería agrónoma, 1985.