

Estabilidad externa en muros de concreto armado y ciclópeo utilizando modelos numéricos

External stability in reinforced concrete and cyclopean walls using numerical models

Briceño, Johannes^{1,2*}; Muños, Yaine¹; Zea, Glemnys¹; Belandria, Norly^{2,3}; León, Francisco⁴; Verjel, Víctor⁵

¹Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

²Postgrado de Ingeniería Vial, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

³Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA), Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

⁴Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

⁵Programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.

*ingjebb@gmail.com

Resumen

Durante décadas se ha generado cierta incertidumbre sobre la estabilidad de las estructuras de contención realizadas por los ingenieros y lo fiables que son los métodos usados por éstos para su diseño; es por ello que en la presente investigación se realizó una comparación de la estabilidad externa evaluando el factor de seguridad al volcamiento y al deslizamiento de muros en voladizo y ciclópeo, entre el método analítico tradicional aplicado por (Suarez 2002, Torres 2008, Sáenz 2010, López 2011) y los modelos numéricos por simulación basado en el análisis de elementos finitos con el uso del programa de aplicación geotécnica Plaxis (Quezada 2014, Peña y col., 2017, Martínez 2018, Azuaje y col., 2018, Briceño y col., 2019). Se estudiaron ocho casos de muros, variando su altura y considerando o no la cohesión del relleno, determinando de esta forma el factor de seguridad y los desplazamientos. En los resultados obtenidos se observó que el método analítico tradicional es más conservador que los modelos numéricos; sin embargo, el modelo numérico arroja resultados aceptables de confiabilidad, por lo tanto, se concluye que es viable utilizarlo de manera complementaria o sustitutiva según el caso, además, brinda un considerable ahorro de tiempo de análisis.

Palabras claves: Muro de contención, Estabilidad externa, Factor de seguridad, Modelos numéricos, Elementos Finitos.

Abstract

For decades, certain uncertainty has been generated about the stability of containment structures made by engineers and how reliable the methods used by them for their design are; That is why in the present investigation a comparison of external stability was carried out, evaluating the safety factor for overturning and sliding of cantilever and cyclopean walls, between the traditional analytical method applied by (Suarez 2002, Torres 2008, Sáenz 2010, López 2011) and numerical simulation models based on finite element analysis with the use of the Plaxis geotechnical application program (Quezada 2014, Peña y col., 2017, Martínez 2018, Azuaje y col., 2018, Briceño y col., 2019). Eight cases of walls were studied, varying their height and considering or not the cohesion of the fill, thus determining the safety factor and the displacements. In the results obtained, it was observed that the traditional analytical method is more conservative than the numerical models; However, the numerical model yields acceptable reliability results, therefore, it is concluded that it is feasible to use it in a complementary or substitute way depending on the case, in addition, it offers considerable savings in analysis time.

Keywords: Retaining wall, External stability, Safety factor, Numerical models, Finite elements.

1 Introducción.

Entre la comunidad de ingenieros civiles cada vez se ha hecho más común el deseo de reproducir con mayor exactitud el posible comportamiento geotécnico presentado por las estructuras, así como, conocer el margen de seguridad que brindan los métodos que son empleados en el diseño de las mismas. Para lograr este fin, es importante considerar una amplia gama de factores involucrados en el proyecto, tales como, la geometría, los parámetros mecánicos y elásticos del suelo adyacente a la estructura, las cargas aplicadas, la hidrología, la geología, entre otros.

Una de las estructuras de carácter geotécnico más usadas son los muros de contención, los cuales se definen como elementos constructivos cuya principal función es servir como mecanismo de sostenimiento de un terreno, resistiendo a su vez, las presiones laterales producidas por el material que ellos retienen; su estabilidad se debe fundamentalmente a su peso propio y al peso del material ubicado sobre su fundación (Torres 2008).

El suelo que se encuentra adyacente a la estructura de contención, ejerce sobre ella una fuerza que tiende a volcarlo o a deslizarlo, denominada "Empuje", dicha fuerza pone en riesgo la estabilidad de la estructura, reduciendo su factor de seguridad (FS) y generando graves riesgos, tanto para la estructura misma como para las cercanas a ella. Es por ello, que llevar a cabo un análisis eficiente de dos de las sollicitaciones fundamentales del empuje, fallas al deslizamiento y fallas al volcamiento, resulta vital y en algunos casos se convierte en un proceso iterativo y tedioso, el cuál puede requerir de mucho tiempo de análisis y esfuerzo.

Los métodos de análisis que existen desde los más simples hasta los más complejos, comprenden un gran número de procedimientos basados en diversas hipótesis y teorías que permiten dar una solución más o menos compleja al problema planteado. Dichos métodos pueden clasificarse, a grandes rasgos en analíticos tradicionales (MAT) o usando modelos numéricos; estos se fundamentan en un planteamiento físico-matemático en el que se comparan las fuerzas que generan estabilidad a la estructura contra aquellas que son desestabilizantes, utilizando el criterio de falla de Mohr-Coulomb, proporcionando de esta forma un FS para una determinada condición de carga y condiciones específicas de los materiales.

Existen un sinnúmero de herramientas y software que facilitan de forma eficiente la ejecución del trabajo descrito anteriormente; por ello, es oportuno evaluar a fondo nuevas tecnologías que ofrezcan

información con un grado de precisión y veracidad igual o superior a las ya conocidas. Una herramienta poderosa son los modelos numéricos, mediante software de aplicación geotécnica, basados en el método de análisis de elementos finitos (MEF) utilizado por muchos investigadores en los que se tiene a (Quezada 2014, Peña y col., 2017, Martínez 2018, Azuaje y col., 2018, Briceño y col., 2019, Briceño y col., 2020, Briceño y col., 2020, Briceño y col., 2021).

El empleo de estos programas ofrece la posibilidad de comparar los resultados de FS en el diseño de la estabilidad externa de un muro, determinados tanto por los MAT como lo hicieron (Suarez 2002, Torres 2008, Sáenz 2010, López 2011), como por modelos numéricos, logrando establecer recomendaciones para las diferentes condiciones propuestas.

En la presente investigación se muestra una propuesta metodológica que permite evaluar la estabilidad externa de diferentes casos de muros de contención tipo voladizo (cantilever) y ciclópeo, frente a las fuerzas que lo solicitan. En caso que la estructura seleccionada no cumpla con las recomendaciones, se modificará su geometría y se efectuará un nuevo análisis hasta lograr la estabilidad deseada.

El objetivo principal de esta investigación es la realización de un análisis comparativo del comportamiento de la estabilidad externa de los muros de contención en voladizo y ciclópeo, mediante el uso del programa de simulación Plaxis basado en el análisis por el MEF y los MAT (Método de esfuerzos admisibles), en este análisis se variarán algunas condiciones del suelo de relleno y la geometría del muro, obteniendo como resultado el FS al volcamiento y al deslizamiento. Dichos resultados permitirán establecer las conclusiones y recomendaciones necesarias.

2 Marco metodológico.

En el desarrollo de la presente investigación se analizaron varios casos, variando la altura del muro, donde no se consideró el empuje pasivo ($E_p=0$) producido por el suelo delante del muro y en alguno de ellos no se consideró la cohesión ($C=0$) del suelo de relleno. Los casos analizados son los siguientes:

- a) Muro ciclópeo. Con altura $H=4$ m. Caso 1 y 2.
 - Caso 1, sin considerar la cohesión del suelo de relleno ($C=0$).
 - Caso 2, considerando la cohesión del suelo de relleno ($C\neq 0$).

- b) Muro ciclópeo. Con altura $H=6$ m. Caso 3 y 4.
 - Caso 3, $C=0$.
 - Caso 4, $C \neq 0$.
- c) Muro en voladizo o cantilever. Con altura $H=4$ m. Caso 1 y 2.
 - Caso 1, $C=0$.
 - Caso 2, $C \neq 0$.
- d) Muro en voladizo o cantilever. Con altura $H=6$ m. Caso 3 y 4.
 - Caso 3, $C=0$.
 - Caso 4, $C \neq 0$.

En la Tabla 1 se muestran los casos de análisis.

Tabla 1. Casos de análisis.

Casos	Tipos de muro	
	Ciclópeo ($E_p=0$)	Voladizo ($E_p=0$)
1	$H=4\text{m}, C=0$	$H=4\text{m}, C=0$
2	$H=4\text{m}, C \neq 0$	$H=4\text{m}, C \neq 0$
3	$H=6\text{m}, C=0$	$H=6\text{m}, C=0$
4	$H=6\text{m}, C \neq 0$	$H=6\text{m}, C \neq 0$

H , es la altura del muro, C , representa la cohesión del suelo de relleno, E_p , corresponde al empuje pasivo.

La investigación se desarrolló siguiendo una metodología que comprende cuatro (4) etapas mediante las cuales fue posible lograr el objetivo. Estas etapas fueron: Determinar el factor de seguridad al volcamiento y deslizamiento, a través de métodos tradicionales en muros de concreto armado y ciclópeo, considerando diferentes condiciones del suelo de relleno, luego; Simular las condiciones de borde en muros de concreto armado y ciclópeo bajo diferentes parámetros del suelo de relleno, utilizando modelos numéricos basados en el método de elementos finitos, posteriormente; Comparar resultados obtenidos bajo las distintas condiciones, tanto por MAT como por modelos numéricos, finalmente; Presentar recomendaciones sobre los casos y condiciones evaluadas.

A continuación se describen cada una de las etapas con el fin de lograr los objetivos planteados.

2.1 Determinar el factor de seguridad al volcamiento y deslizamiento, a través de métodos analíticos tradicionales en muros de concreto armado y ciclópeo, considerando diferentes condiciones del suelo de relleno.

El MAT utilizado para el análisis de la estabilidad externa de estructuras de contención de tierra, está basado en la teoría de Rankine para la determinación de las fuerzas de empuje de tierra, así como el criterio de Mohr-Coulomb para halla el

factor de seguridad al deslizamiento (FSd) y factor de seguridad al volcamiento (FSv) a través de la relación entre las fuerzas desestabilizantes y resistentes.

La Tabla 2 muestra las propiedades mecánicas y elásticas del suelo de relleno.

Tabla 2. Propiedades mecánicas y elásticas del suelo de relleno.

C (kN/m^2)	γ_h (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	\emptyset ($^\circ$)	i ($^\circ$)	K_a Rankine
60	17	20	32	0	0.307

C , representa la cohesión, γ_h , define el peso específico húmedo, γ_{sat} , es el peso específico saturado, \emptyset , representa el ángulo de fricción interna del suelo, i , es la inclinación del suelo de relleno, K_a , corresponde al coeficiente de empuje activo de Rankine.

Asimismo, en la Tabla 3 se muestran las propiedades mecánicas y elásticas del suelo de fundación o base.

Tabla 3. Propiedades mecánicas y elásticas del suelo de fundación.

C (kN/m^2)	γ_h (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	\emptyset ($^\circ$)	Qult (kN/m^2)
0	16	17	25	600

C , representa la cohesión, γ_h , define el peso específico húmedo, γ_{sat} , es el peso específico saturado, \emptyset , representa el ángulo de fricción interna del suelo, qult, es la capacidad ultima de carga del suelo de fundación.

En la Tabla 4, se muestra el predimensionado del muro en voladizo, tomando como referencia las recomendaciones dadas por (Ayuso 1984) y mostradas en la Figura 1.

Tabla 4. Predimensionado muro en voladizo. Caso 1.

H (m)	B (m)	c (m)	b (m)	e (m)	a (m)	d (m)
4.00	2.80	0.93	0.40	1.17	0.20	0.70

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

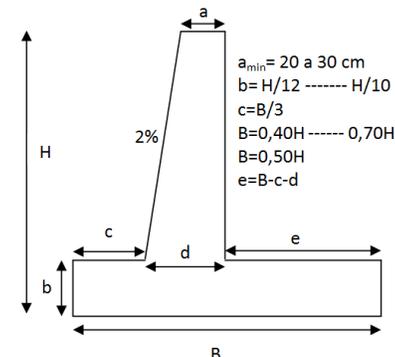


Fig. 1. Predimensionado recomendado para muros de contención en voladizo (Ayuso 1984).

El siguiente paso para determinar la estabilidad externa del muro es calcular el empuje y la ubicación del mismo, resultados mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Determinación del empuje y su ubicación. Muro en voladizo. Caso 1.

Fuerza	Fuerza (kN/m)	Brazo "X" (m)	Brazo "Y" (m)	Momento "X" (kN.m/m)	Momento "Y" (kN.m/m)
Vp (Peso propio del muro)	65.76	1.39		91.49	
Vs (Peso del suelo de relleno)	71.40	2.22		158.27	
Ea (Empuje activo)	41.79		1.33		55.72
Fuerzas estabilizantes	137.16 kN/m				
Fuerzas volcantes	41.79 kN/m				
Momentos estabilizantes	249.76 kN.m/m				
Momentos volcantes	55.72 kN.m/m				
Ubicación (y) (m)	1.33 m				

Finalmente, en la Tabla 6 se presentan los valores obtenidos para el FSv, FSd y FS mínimo (FS_{min}) para diseño.

Tabla 6. Factores de seguridad al volcamiento y deslizamiento. Muro en voladizo. Caso 1.

Factor de seguridad al volcamiento (FSv)	al	4.48	FS _{min} =1.50
Factor de seguridad al deslizamiento (FSd)	al	1.53	FS _{min} =1.50

El siguiente paso para obtener la estabilidad externa del muro es encontrar la presión de contacto en la base de mismo y el FS máximo y mínimo por capacidad de carga; estos resultados se muestran en la Tabla 7, en la cual se puede observar que la resultante de fuerzas se encuentra en el tercio central de la base, condición que garantiza que las cargas se transmitan al suelo como un esfuerzo a compresión.

Tabla 7. Presión en la base y factor de seguridad. Muro en voladizo. Caso 1.

Presión en la base	
e _x (m)	-0.01
B/6 (m)	0.47
e _x < B/6	✓
q _{max} (kN/m ²)	47.44
q _{min} (kN/m ²)	50.52
q _{min} > 0	✓
FSq _{max}	12.64 ≥ 3
FSq _{min}	11.87 ≥ 3

e_x, representa la excentricidad de la resultante de cargas en la base del muro, B, es el ancho de la base del muro, q_{max}, corresponde a la presión máxima de contacto en la base, q_{min}, representa a la presión mínima de contacto en la base, FSq_{max}, representa el factor de seguridad máximo de capacidad de carga en la base, FSq_{min}, representa el factor de seguridad mínimo de capacidad de carga en la base.

Una vez hallado el FSv y FSd, otro de los parámetros importantes a calcular para lograr los objetivos de esta investigación es el desplazamiento total, dicho valor se obtiene en función del desplazamiento y la rotación del muro. Para ello, es necesario conocer un parámetro denominado el factor del suelo (Fsuelo) en estado activo, dicho factor depende del tipo de material en contacto con la base, procedimiento propuesto por el Ing. Pedro Ortigosa (citado por Díaz y López 2008). La Tabla 8 muestra los valores para los distintos tipos de material.

Tabla 8. Factor del suelo (Fsuelo), estado activo. Tipo de suelo. Ing. Pedro Ortigosa (citado por Díaz y López 2008).

Tipo de suelo	Estado activo (Fsuelo)
Granular denso	1.00E-03
Granular suelto	4.00E-03
Cohesivo duro	1.00E-03
Cohesivo blando	2.00E-03

La Ecuación 1 muestra la forma de hallar el desplazamiento rotacional, resultado que se obtiene en base a la altura del muro y al tipo de suelo de relleno en contacto con el mismo. En la Tabla 9 se presenta el resultado obtenido del desplazamiento rotacional del muro.

$$\Delta r = F_{suelo} * H \dots \dots \dots \text{Ecuación (1)}$$

Tabla 9. Rotación muro en voladizo. Caso 1.

H (m)	Δr (m)
4	1.60E-02

Asimismo, el Ing. Pedro Ortigosa (citado por Díaz y López 2008), expone la Ecuación 2, la cual permite calcular el desplazamiento teniendo como variable dependiente la Jsuelo, factor que depende de la altura del muro y del suelo detrás del mismo. A través de dicha ecuación se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 10.

$$\Delta d = J_{suelo} * H \dots \dots \dots \text{Ecuación (2)}$$

Jsuelo=7.00E-04 (Ing. Pedro Ortigosa (citado por Díaz y López 2008)).

Tabla 10. Desplazamiento muro en voladizo. Caso 1.

H (m)	Δd (m)
4	2.80E-03

Finalmente, mediante la suma de los desplazamientos hallados en los cálculos anteriores, se obtiene el desplazamiento total del muro (Ecuación 3), mostrado en la Tabla 11.

Desplazamiento Total

$$\Delta T = \Delta r + \Delta d \dots \dots \dots \text{Ecuación (3)}.$$

Tabla 11. Desplazamiento total muro en voladizo. Caso 1.

H (m)	ΔT (m)
4	1.88E-02

2.2 Simular las condiciones de borde en muros de concreto armado y ciclópeo bajo diferentes parámetros del suelo de relleno, utilizando modelos numéricos basados en el método de elementos finitos.

El modelado de los muros en voladizo y ciclópeo se lleva a cabo por medio del MEF. Este método efectúa un análisis capaz de proveer los esfuerzos o deformaciones de cada muro, partiendo de sus características físicas y propiedades resistentes. El proceso de modelado será ejecutado a través de la herramienta computacional Plaxis 8.2 professional version, este programa computacional utiliza el MEF para el cálculo por simulación de deformaciones, esfuerzos y estabilidad de diferentes casos de aplicación geotécnica; el programa tienen como limitante que el MEF que usa es para modelación de problemas con deformaciones planas (plane strain), 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, con una análisis paramétrico (cambio de una variable por vez). 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, en un espacio bidimensional (2D). El modelo desarrollado corresponde a elementos conformados por 15 nodos, que proporcionan doce puntos de evaluación de tensiones (puntos de gauss), debido a que este genera exactitud en los resultados de problemas geotécnicos.

El software Plaxis evalúa la estabilidad a través del FS, utilizando el método que se conoce como reducción de resistencia al cortante, basado en el criterio de Mohr-Coulomb se reduce gradualmente los parámetros de resistencia al corte (cohesión (C) y ángulo de fricción interna del suelo (ϕ)) provocando la rotura inicial y finalmente la rotura global.

El modelado es la fase inicial del proceso de simulación; en ella se define, diseña y dibuja la geometría de los muros en estudio mediante el uso de un sistema de coordenadas. El terreno es representado mediante un conjunto de líneas formando un polígono cerrado, conformado por dominios independientes, a los cuales se les puede asignar una serie diferente de datos para poder realizar la simulación.

El diseño geométrico del muro ciclópeo y en voladizo o cantilever fue hecho a través del predimensionado recomendado por (Ayuso 1984).

De igual forma, en la Figura 2 se presenta la primera parte del modelado realizado en el programa de simulación Plaxis, en la cual se observan las condiciones geométricas del muro en voladizo, identificándose el suelo de relleno y el suelo de fundación.

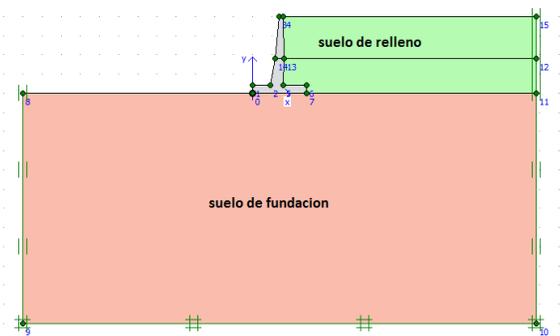


Fig. 2. Imagen Plaxis. Condiciones geométricas. Muro en voladizo.

Una vez realizada la geometría requerida para la simulación del muro de contención, el siguiente paso fue la definición y asignación de las propiedades mecánicas y elásticas de los materiales en los diferentes estratos que conforman el modelo geométrico. En esta investigación se considera como material de fundación un suelo arcilloso y el material de relleno es un suelo granular, ambos en condición drenada, tomados de la base de datos de Plaxis los cuales se usan como referencia y se consideran adecuados, aunque se recomienda para cada caso práctico en particular determinar las propiedades mecánicas y elásticas del material, ya que el material suelo es muy variable en sus propiedades dependiendo de su origen y condiciones a la que esté sometido.

En el análisis se consideró para el comportamiento del suelo el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, el cual se considera como una aproximación de primer orden al comportamiento real del suelo. Se trata de un modelo elastoplástico perfecto (isotrópico) desarrollado a partir de la composición de la ley de Hooke. La forma generaliza el criterio de rotura Mohr-Coulomb y puede simular el comportamiento de suelos granulares sueltos o finos normalmente consolidados, se debe tener en cuenta que no representa el comportamiento elastoplástico progresivo, sino que, es un modelo elástico y luego plástico perfecto. Su formulación involucra dos elementos generales: la elasticidad perfecta y la plasticidad asociada al desarrollo de deformación plásticas o irreversibles (Quezada 2014).

En esta investigación se utilizó condiciones de borde, contorno o de frontera (fronteras absorbentes), las cuales son capaces de impedir movimientos libres por parte del cuerpo, restringiendo los desplazamientos y rotaciones garantizando la continuidad lateral y longitudinal del modelo. En este punto, se establecieron las interacciones de los cuerpos modelados con su entorno, teniendo en consideración que estos forman parte de un desarrollo continuo. Se delimitó el área de estudio y se fijaron las condiciones de contorno con una separación desde el muro igual a $3H$, tanto en sentido vertical como en sentido horizontal, con la finalidad de evitar influencia de los bordes en la cercanía del área de estudio afectando el modelo. Estas condiciones de contorno y separación del modelo obedece a parámetros de amortiguamiento o disipación de la energía, en el software Plaxis para esta disipación se tienen como opciones tres maneras: amortiguamiento de los materiales, disipación por modelos de integración y condiciones de borde o contorno (fronteras absorbentes).

Plaxis posee un generador de malla o discretización automático, basado en un procedimiento de triangulación, el cual da como resultado mallas no estructurales. Estas mallas tienen un rendimiento numérico, por lo general, mejor que el de las mallas regulares, a pesar de parecer no estar ordenadas (Ogaya 2010).

Posterior a la creación de la geometría y a la asignación de materiales para cada uno de los suelos, se procede a la generación de la malla mostrada en la Figura 3, en este caso se utilizó una malla muy refinada con el fin de obtener más puntos de evaluación de desplazamientos y tensiones que permitan realizar los cálculos con resultados más óptimos. El factor negativo de este refinamiento es que se necesita más tiempo para realizar el cálculo y mayores recursos de procesamiento.

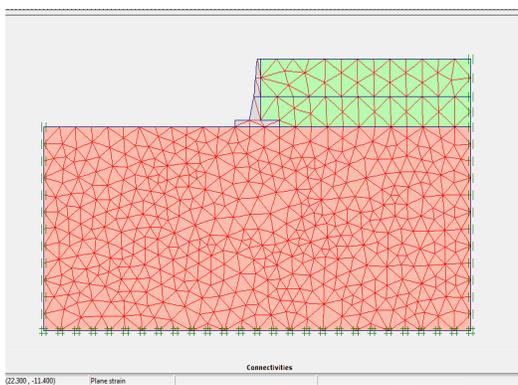


Fig. 3. Imagen Plaxis. Discretización, mallado.

Una vez creado el modelo geométrico y generado la malla de elementos finitos, es necesario

establecer las condiciones iniciales del problema, en donde se especifican las presiones hidrostáticas iniciales y las tensiones efectivas, para el análisis de simulación.

Como se mencionó anteriormente se tomó en consideración la condición drenada, por lo que se ubica el nivel freático por debajo del modelo, pues al realizar la construcción de cualquier muro de contención uno de los principales requerimientos es colocar sistemas de drenajes, los cuales garantizan el desalojo efectivo del agua con la finalidad de evitar que se produzca empuje hidrostático que perjudique la estabilidad del muro.

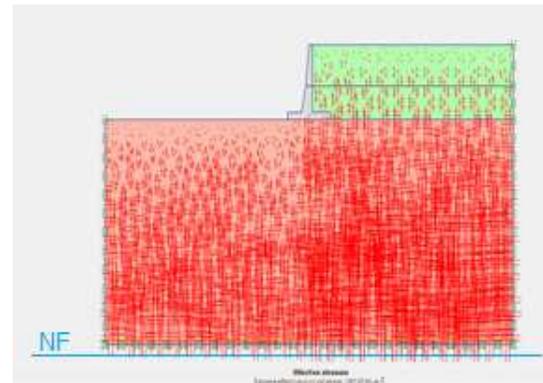


Fig. 4. Imagen Plaxis. Ubicación del nivel freático y presión efectiva inicial.

Para comenzar con el procesamiento de datos se debe establecer las etapas que intervienen en los cálculos del modelo en estudio. Para las cuales se definen las cuatro primeras etapas como un comportamiento plástico (*Plastic*), pues este modelo permite llevar a cabo un análisis de deformación elástico-plástico; seguida de la quinta etapa de reducción del ángulo de fricción del suelo y la cohesión (*Phi/c reduction*), el cual calcula el valor de FS en modelos bajo condiciones estáticas, mostrados en la Figura 5.

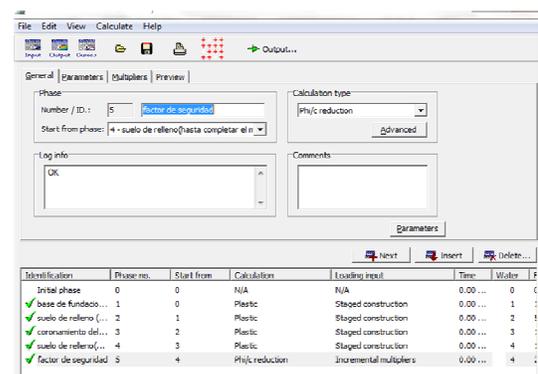


Fig. 5. Imagen Plaxis. Análisis por etapas.

A continuación, se describe detalladamente el análisis por etapas:

- *Etapa I: Base de fundación.* Establecida para el vaciado del concreto de la base del muro hasta la mitad de la altura de la pantalla, aproximadamente.
- *Etapa II: Suelo de relleno.* Colocación del material de relleno, en este caso suelo granular desde el suelo de fundación hasta la misma altura de vaciado de la pantalla en la etapa I.
- *Etapa III: Coronamiento del muro.* Vaciado del muro desde la mitad de la pantalla (Etapa I) hasta la corona.
- *Etapa IV: Suelo de relleno final.* Colocación de la última fase del material de relleno.
- *Etapa V: Factor de seguridad.* Cálculo del FS.

Mediante el análisis se obtienen los desplazamientos o deformación por cortante en los nodos, las tensiones y esfuerzos estructurales en elementos.

El primer resultado obtenido es el gráfico de la malla de elementos finitos una vez deformada, presentando el valor de la deformación máxima del suelo, mostrado en la Figura 6.

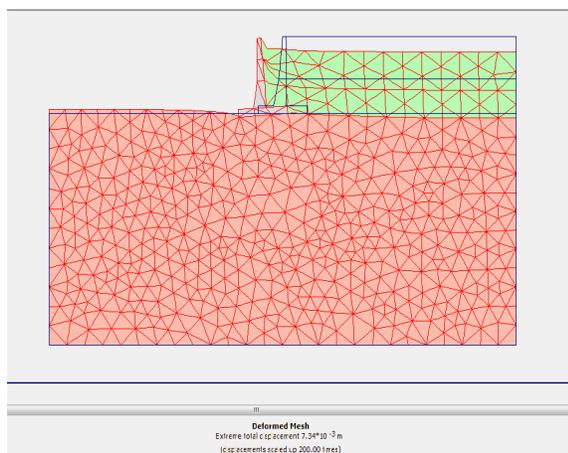


Fig. 6. Imagen Plaxis. Malla deformada.

Como se muestra en la Figura 7, los desplazamientos totales por cortante más importantes se producen en el coronamiento del muro. Cabe mencionar que los desplazamientos totales son obtenidos a partir de las componentes de desplazamiento horizontal (x) y vertical (y) en todos los nodos al final del cálculo.

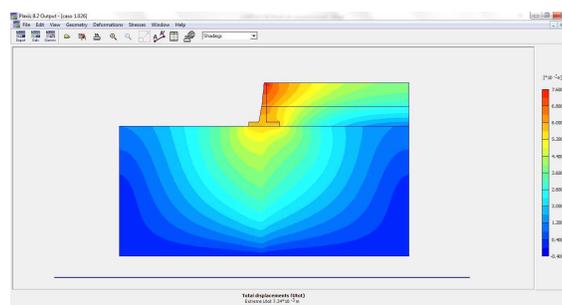


Fig. 7. Imagen Plaxis. Desplazamientos totales por cortante.

De igual forma, la Figura 8 muestra la curva FS vs. Desplazamiento generada por Plaxis donde se determina el valor de FS.

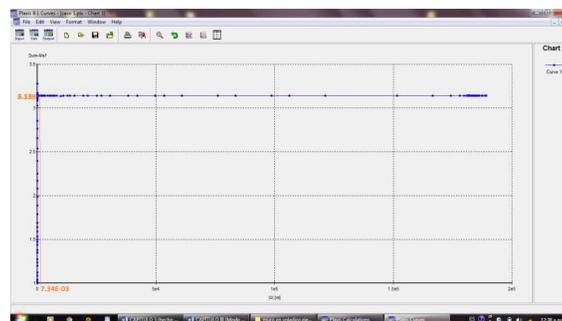


Fig. 8. Imagen Plaxis. FS vs. Desplazamiento.

3 Análisis de resultados.

A continuación la Tabla 12 muestra los resultados de FSv, FSd y el desplazamiento total del muro (ΔT). Para muros en voladizo y ciclópeo obtenidos por el MAT, así como también los resultados de FSd y ΔT determinados por modelos numéricos a través del MEF, para los diferentes casos en estudio, comparando de esta forma los resultados obtenidos para cada caso.

Tabla 12. Factor de seguridad y desplazamiento total.

Tipo de Muro	Caso	Altura (H) (m)	Condiciones Cohesión del suelo de relleno (kN/m ²)	Método tradicional analítico			Modelo numérico (MEF)	
				FSv	FSd	$\Delta T \times 10^3$ (m)	FSd	$\Delta T \times 10^3$ (m)
Voladizo	1	4	0	4.5	1.5	1.88	3.1	7.34
	2		4.5	4.2	1.88	3.7	7.17	
	3	6	0	4.5	1.5	2.82	2.5	15.92
	4		4.5	1.8	2.82	2.9	17.21	
Ciclópeo	1	4	0	5.0	1.7	1.88	3.2	7.04
	2		4.8	3.9	1.88	3.7	6.74	
	3	6	0	4.8	1.6	2.82	2.6	15.92
	4		4.9	3.4	2.82	2.9	16.48	

Luego de haber aplicado la metodología descrita, se procede a analizar e interpretar cada uno de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

3.1 Factor de seguridad de muro en voladizo.

La Figura 9 muestra la representación gráfica de Fsd y FSv hallados por las diferentes metodologías analizadas.

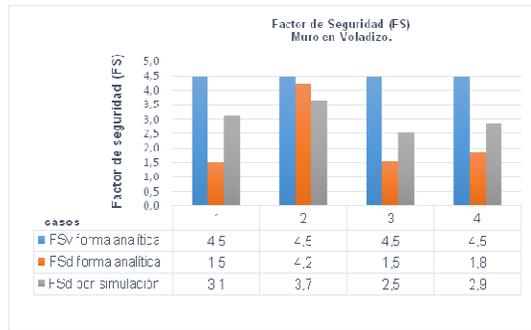


Fig. 9. Factor de seguridad al deslizamiento y volcamiento en muro en voladizo.

En la Figura 9, se aprecia que en los casos 1 y 3 (donde no se consideró la cohesión del suelo de relleno, C=0) los valores de FSD obtenidos por el MAT, son del orden de 1.5. Por su parte, en los casos 2 y 4 (donde si se consideró la cohesión del suelo de relleno, C≠0) el FSD por el MAT empieza a aumentar con valores superiores a 1.5, valor mínimo de diseño para muros. En los donde C≠0 se produce un aumento en el FS en comparación con los casos donde C=0, esto debido al aporte de la cohesión a la estabilidad, ya que es un parametro de resistencia del suelo.

Cabe destacar, que el FSD determinado por modelos numéricos con el MEF es mayor al FSD hallado por el MAT en un 77% en promedio, salvo en el caso 2, donde el FSD analítico es mayor que por modelos numéricos en un 14%.

En este sentido, es válido acotar que el FSv muestra valores superiores al mínimo establecido para diseño (FS_{min}=1.5) en todos los casos bajo estudio del muro en voladizo.

3.2 Factor de seguridad de muro ciclópeo.

La Figura 10 se muestra la representación gráfica de Fsd y FSv hallados por las diferentes metodologías analizadas.

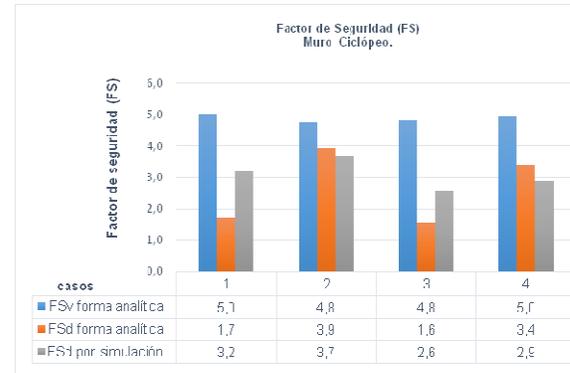


Fig. 10. Factor de seguridad al deslizamiento y volcamiento en muro ciclópeo.

De la Figura 10, se puede decir que para los casos 1 y 3 (C=0), los valores de FSD por el MAT se mantienen cercanos a 1.5 y en los casos 2 y 4 (C≠0) superiores el valor de 3. En los casos donde si se considera la cohesión del suelo de relleno (C≠0) se produce un aumento en el FS en comparación con los casos donde C=0, esto debido al aporte de la cohesión a la estabilidad, ya que es un parametro de resistencia del suelo.

Para el FSD hallados mediante modelos numéricos, en todos los casos se produjeron valores superiores al FS mínimo establecido para diseño.

En este mismo orden de ideas, se comparó el MAT con el modelo numérico, resultando los valores obtenidos en el método numérico mayores a los obtenidos por el MAT para los casos 1 y 3 en un promedio de 75%; mientras que en los casos 2 y 4, el MAT arrojó resultados mayores al modelo numérico en un 11% en promedio.

Asimismo, es importante resaltar que el FSv por el MAT en todos los casos da valores superiores al mínimo exigido para diseño.

3.3 Desplazamiento.

La Figura 11 muestra la representación gráfica del desplazamiento total de un muro en voladizo.



Fig. 11. Desplazamiento total muro en voladizo.

En la Figura 11 se nota que los resultados obtenidos por el MAT son mayores a los valores conseguidos por el modelo numérico con el programa de aplicación geotécnica Plaxis, en un

promedio del 98%. Es importante resaltar que los resultados obtenidos por el modelo numérico son menos conservadores.

A pesar de que el único parámetro del suelo que se está variando es la cohesión del relleno, los desplazamientos son aproximadamente iguales en todos los casos. Para el muro en voladizo con altura igual a 4 m, correspondiente a los casos 1 y 2, los valores obtenidos por el MAT no varían, al igual que para los casos 3 y 4 con altura igual a 6 m

Ahora bien, se observa que por el modelo numérico se presentan valores de desplazamiento mucho más pequeños que por el MAT, siendo el MAT más conservador.

De igual forma, la Figura 12 muestra los resultados para muro ciclópeo, donde se notan valores superiores en un promedio del 200% para el MAT, en comparación a los hallados por el modelo numérico. Evidenciando que el MAT es más conservador.

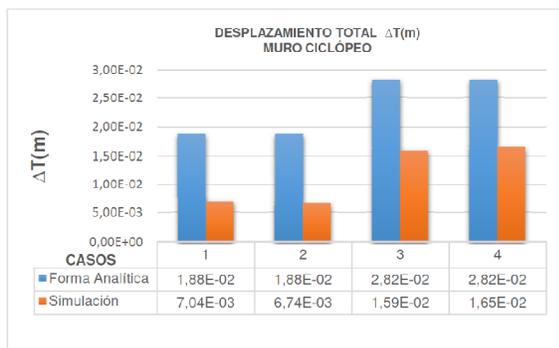


Fig. 12. Desplazamiento total muro ciclópeo.

Por otra parte, las Figuras 13 y 14 muestran los desplazamientos en la base del muro en voladizo y ciclópeo, respectivamente, hallados por el modelo numérico. Donde se nota que aunque se considere la cohesión del suelo de relleno o no, para muros con la misma altura los desplazamientos pueden llegar a ser muy similares. Por lo que, la cohesión del suelo de relleno no influye en alto grado en el desplazamiento.



Fig. 13. Desplazamiento en la base del muro en voladizo.



Fig. 14. Desplazamiento en la base del muro ciclópeo.

4 Conclusiones.

Una vez finalizado el proceso de análisis de resultados de los casos estudiados para muros en voladizo y muros ciclópeos, obtenidos mediante la utilización de el MAT y modelos numéricos con el uso del MEF mediante el programa Plaxis, considerando o no la cohesión del suelo de relleno y no tomando en cuenta el empuje pasivo del suelo por delante del muro, se llega a las siguientes conclusiones:

4.1 Muro en voladizo.

En el cálculo de FSd, se concluye que el MAT es más conservador que el modelo numérico para los casos 1, 3 y 4, mientras que para el caso 2, el MAT es menos conservador pues presenta un resultado mayor al obtenido por el modelo numérico. El comportamiento que presenta el muro en voladizo de 4m y 6m de altura con geometría recomendada, considerando o no la cohesión del suelo de relleno y con empuje pasivo igual a cero, permite determinar que el mismo es estable para todos los métodos de análisis, ya que, presentan un FS promedio mayor al FS de diseño ($FS_{diseño}=1.50$), lo que lleva a concluir que el modelo numérico se puede utilizar de manera alternativa de forma complementaria o sustitutiva (con las previsiones del caso), dando resultados tan válidos o efectivos como el MAT.

Del mismo modo, en cuanto a los desplazamientos totales de la estructura se deduce que el MAT es más conservador que el modelo numérico.

4.2 Muro ciclópeo.

Los valores de FSd para muros ciclópeos apuntan que el MAT ofrece resultados más cercanos al valor de seguridad permitido en la construcción de obras de retención, esto se comprueba en los casos 1 y 3, donde la cohesión del suelo de relleno no es considerada, pues los valores obtenidos en el modelo numérico son mayores a los derivados del MAT. Para los casos 2 y 4, donde se considera la cohesión del suelo de relleno, los valores obtenidos mediante el MAT resultan mayores a los encontrados empleando modelos numéricos con el uso de Plaxis,

comprobando así, que la utilización de este último método es igual de válida y eficaz que el MAT.

Por su parte, para el cálculo de los desplazamientos totales se pudo observar que el MAT brinda resultados mayores a los obtenidos mediante modelos numéricos por el MEF, de lo cual se deduce, que el MAT es más conservador.

En la presente investigación se tomaron en cuenta dos aspectos importantes que influyen en la estabilidad, uno de ellos es el no considerar el empuje pasivo producido por el suelo de relleno delante del muro, ya que este proporciona estabilidad y en algunas ocasiones por desconocimiento este material delante del muro puede ser excavado y removido. El no considerar este aspecto representa un diseño más desfavorable.

Asimismo, se analizó la estabilidad externa considerando en algunos casos la cohesión del suelo de relleno y en otros no. Se pudo notar que es más desfavorable el no considerar esta cohesión, ya que la misma por ser un parámetro de resistencia contribuye con la estabilidad.

Para finalizar, se concluye que, en el cálculo de la estabilidad externa de muros, el modelo numérico es tan bueno como el MAT, ya que el mismo proporciona resultados tan válidos con un alto porcentaje de seguridad, observándose en todos los casos estudiados que ambos métodos superan el factor mínimo de seguridad para diseño. La diferencia entre las dos formas de análisis radica en la rapidez con que el modelo numérico procesa los resultados. Sin embargo, es importante resaltar que el uso de esta herramienta es complementario, pues para emplearla se debe conocer a fondo el correcto manejo del software, clara comprensión de los conceptos teóricos y la adecuada interpretación de los resultados para evitar posibles errores.

Recomendaciones:

Dentro de las recomendaciones consideradas, teniendo como base el desarrollo de esta investigación pueden señalarse las siguientes:

- Efectuar estudios con otra geometría de los muros y donde se consideren las fuerzas externas horizontales, condiciones de carga, así como otros parámetros del suelo de relleno y de fundación, que no fueron tomados en cuenta en el desarrollo de esta investigación, ya que estos factores pudieran influir de forma negativa en la estabilidad externa del muro.
- No considerar el empuje pasivo.
- No considerar la cohesión del suelo de relleno.
- Emplear otros programas de simulación, a modo de comparación.
- Se recomienda a la comunidad de ingenieros geotecnistas, el empleo de modelos numéricos con análisis por el MEF como una herramienta complementaria o alternativa para determinar la estabilidad externa de muros de contención.
- Ampliar la presente investigación estudiando la estabilidad interna para los mismos casos de muros en voladizo y ciclópeo.

Referencias

- Ayuso J, 1984, Estructuras de hormigón para sostenimiento de tierras. ETSIA. Córdoba.
- Azuaje J, Méndez O, 2018, Estudio probabilístico de la estabilidad del talud en el sector comprendido entre la Facultad de Medicina y la Facultad de Farmacia y Bioanálisis de la Universidad de Los Andes. Universidad de los Andes, Trabajo final de grado. Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.
- Briceño J, Matos Y, 2019, Evaluación de la estabilidad externa en muros de concreto utilizando simulación basada en análisis de elementos finitos. Universidad de los Andes, Trabajo final de grado de Magister en Ingeniería Vial. Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.
- Briceño J, Villa J, Gómez C, Verjel V, 2021, Análisis comparativo de estabilidad en taludes utilizando métodos comprobados y modelos numéricos de simulación. Artículo de Investigación. Revista Ciencias e Ingeniería, Vol. 42, N° 1. Universidad de Los Andes, Venezuela, 63-70, ISSN 1316-7081, ISSN Elect. 2244-8780.
- Briceño J, Guillén M, 2020, Análisis de estabilidad de taludes de secciones típicas en la construcción de carreteras a través de modelos numéricos. Universidad de los Andes, Trabajo final de grado de Magister en Ingeniería Vial. Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.
- Briceño J, Uzcategui A, Belandria N, León F, Verjel V, 2020, Asentamientos en fundaciones continuas con modelos numéricos de simulación con elementos finitos. Artículo de Investigación. Revista Ciencias e Ingeniería, Vol. 41, N° 2. Universidad de Los Andes, Venezuela, 157-166, ISSN 1316-7081, ISSN Elect. 2244-8780.
- Briceño A, Carreras N, 2013, Análisis y diseño de muros estructurales de concreto, considerando las experiencias de los terremotos de Chile 2010 y Nueva Zelanda 2011. Universidad Católica Andrés Bello, Trabajo final de grado. Facultad de Ingeniería, Caracas, Venezuela.
- Criterio y Acciones Mínimas para el Proyecto de Edificaciones, 1988, Norma COVENIN-MINDUR 2002-88. Ministerio de Desarrollo Urbano. Caracas, Venezuela.

Díaz Y, López E, 2008, Plaxis como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arena. Universidad de Magallanes Punta Arenas, Chile. en: https://www.unipamplano.edu.co/unipamplona/porta lig/home_40/recursos/04.../14.pdf. [Consulta: 2019, diciembre].

López J, 2011, Muros de Contención. Disponible en: <https://previa.uclm.es> > área > ing_rural > Hormigón > Temas > Muros2011. [Consulta: 2018, octubre].

Martínez C, 2018, Análisis de la estabilidad del talud de la ciudad de Mérida sector Facultad de Medicina – ULA, Mérida, Venezuela. Universidad de los Andes, Trabajo final de grado. Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.

Ogaya N, 2010, Simulación geomecánica mediante el método de elementos finitos de taludes del complejo Hidroeléctrico José Antonio Páez. Tesis de Grado. Mérida, Venezuela.

Peña G, Rosales A, 2017, Estudio probabilístico de la estabilidad del talud de la terraza de Mérida desde el sector Belén hasta la Facultad de Medicina – Venezuela. Universidad de los Andes, Trabajo final de grado. Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.

Programa computacional Plaxis V.8.2 bidimensional, editado por R.B.J Brinkgreve Delft University of Technology & Plaxis b.v The Netherlands.

Quezada M, 2014, Análisis comparativo de excavaciones con muros pantallas diseñados con el método de elementos finitos utilizando diferentes modelos constitutivos. Universidad Politécnica de Catalunya, España. Trabajo final de Máster en Ingeniería Geotécnica.

Rodríguez L, Rubén M, 2016, La simulación computarizada como herramienta didáctica de amplias posibilidades. Disponible en: https://rcim.sld.cu/revista_18/articulos_htm/simulacioncomputarizada.htm. [Consulta: 2018, noviembre].

Sáenz E, 2010, Fundamentos de Geotecnia ICE-1603. Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica .Chile.

Suarez J, 2002, Metodología de análisis. Estructuras de contención o anclaje. Disponible en: <https://es.slideshared.net/mobile/ssbbooss/estructuras-de-contencion-y-anclaje>. [Consulta: 2018, septiembre].

Torres R, 2008, Análisis y Diseño de Muros de Contención de Concreto Armado (segunda impresión adaptada a la Norma Venezolana 1753-2006). Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela.

Recibido: 15 de marzo de 2021

Aceptado: 07 de junio de 2021

Johannes Enrique Briceño Balza: Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Vial. Jefe del laboratorio de suelos y pavimentos. Profesor Asistente investigador de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela, Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Mérida Venezuela.

Yaine Katherine Muñoz Gutiérrez: Ingeniero Civil, Egresada de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: yainemunos@gmail.com.

Glemnys Yorlett Zea Pérez: Ingeniero Civil, Egresada de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: glemzeaperez@gmail.com.

Norly Belandria: Ingeniero Geólogo. Magister en Matemática aplicada a la ingeniería. Doctora en Ciencias Aplicadas. Coordinadora del grupo de investigación en Geología Aplicada (GIGA). Profesor agregado e investigadora de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: norlyb@gmail.com

Francisco León Oviedo: Ingeniero Mecánico, ULA. PhD in Mechanical Engineering University of South Florida (USF), Tampa, FL, USA. Investigador y Profesor de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: fleon@ula.ve

Víctor Hugo Verjel Tarazona: Ingeniero Civil, Magister en Gestión de Proyectos. Profesor programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona, República de Colombia. Correo electrónico: victor.verjel@unipamplona.edu.co

