

Diseño de muros de contención bajo carga sísmica en suelos homogéneos cohesivos y friccionantes mediante un aplicativo computacional

Design of Retaining Walls under Seismic Loading in Homogeneous Cohesive and Granular Soils with a Computational Tool

Juan Sebastián Gutiérrez Gómez *
Carlos Eduardo Rodríguez Pineda**

Resumen

Durante un evento sísmico los muros de contención generalmente se ven sometidos a mayores solicitaciones de carga en comparación con las que se establecen durante el diseño debido a que muchas veces no se calculan adecuadamente las posibles cargas dinámicas, y por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar una herramienta computacional para el dimensionamiento adecuado de muros de contención de gravedad y en cantiléver teniendo en cuenta los efectos de un evento sísmico. Este artículo presenta los resultados obtenidos a partir de un problema que se planteó y se resolvió con la teoría de equilibrio límite, haciendo uso de un aplicativo computacional desarrollado en MATLAB; el mismo problema se reprodujo en un modelo de elementos finitos usando PLAXIS V8.2, y se hizo una comparación entre ambos métodos para dar validez al aplicativo desarrollado. El tipo de muro de contención, la condición de drenaje, los tipos de sobrecargas, los efectos del agua y especialmente los efectos sísmicos, siempre deben tenerse en cuenta durante el diseño de un muro de contención con el fin de obtener el dimensionamiento adecuado para poder soportar las cargas estáticas y dinámicas y para cumplir con todos los criterios de diseño que exige la NSR-10. El aplicativo desarrollado permite obtener una buena estimación de éste dimensionamiento.

Abstract

During a seismic event retaining walls generally are subjected to higher load stresses compared with those that are set during the design because it is often performed inadequate calculation of dynamic loads, and therefore there is a need to develop a computational tool to obtain proper sizing of gravity and cantilever retaining walls taking into account the effects of a seismic event. This paper presents the results from a problem that was proposed and resolved with limit equilibrium theory, using the developed computational tool in MATLAB; the same problem was reproduced in a finite element model using PLAXIS V8.2, and a comparison was made between the two methods to validate the developed tool. The type of wall, the drainage condition, the types of overload, the effects of water and especially the seismic effects should always be taken into account during the design of a retaining wall in order to get the proper sizing to support all dynamic and static loads and to achieve all the design criteria required by the NSR-10. The developed tool allows getting a good approximation of this sizing

Keywords

computational tool, design, finite elements, retaining walls, seismic effects, sizing

* Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Ingeniero Civil Profesional, Civil & Tech Ingenieros S.A.S. jgutierrezg@javeriana.edu.co

** Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Profesor Asociado Pontificia Universidad Javeriana, Profesor Asistente Universidad Nacional de Colombia, Profesor Asociado Cátedra Escuela Colombiana de Ingeniería, Director Técnico Civil & Tech Ingenieros S.A.S. crodriguezp@javeriana.edu.co

Palabras clave

aplicativo computacional, dimensionamiento
diseño, elementos finitos, efectos sísmicos, muros
de contención

I. INTRODUCCIÓN

Los muros de contención se caracterizan por tener como principal propósito resistir las presiones de una porción de tierra u otros materiales. La filosofía de su diseño consiste en lidiar con la magnitud y la distribución de las presiones laterales de tierra entre la masa de suelo y el sistema de contención. Esto implica hacer la predicción de las presiones laterales y de las deformaciones considerando el estado inicial de esfuerzos del suelo. Las presiones de tierra no son una propiedad única del suelo o de la roca, pero sí son una función del material que la estructura debe soportar, de las cargas que el suelo ejerce contra el muro, de la posición del nivel freático, de los desplazamientos que sufrirá la estructura en el tiempo y del comportamiento de la misma bajo efectos de cargas sísmicas.

Durante un evento sísmico los muros de contención presentan mayores solicitaciones de carga a las que se establecen durante el diseño debido a que muchas veces no se calculan adecuadamente las posibles cargas dinámicas que van a actuar sobre la estructura o porque se usan métodos simplificados en los cuales se supone que su desplazamiento es nulo. Esto podría llegar a poner en riesgo la estabilidad de los muros ya que no se estaría haciendo un análisis seudoestático (porque no se estaría teniendo en cuenta la carga dinámica) y se estaría subestimando el diseño. Según Terzariol (2004) el número considerable de daños parciales y totales sufridos por estribos de puentes y muros de contención durante terremotos pone de manifiesto la necesidad de diseñar estas obras aplicando procedimientos y criterios que permitan establecer un adecuado nivel de seguridad.

Asimismo Terzariol (2004) añade que generalmente en estructuras de contención como los muros y estribos en los cuales se soportan los puentes los daños y fallas se asocian con asentamientos de terraplenes, rellenos, desplazamientos, rotaciones o vuelcos de las estructuras, empujes y choques debido a fuerzas inerciales de la superestructura contra los estribos, pérdida de apoyo de la superestructura, rotura de las losas de aproximación y capas de rodamiento, licuación del suelo de relleno y/o de fundación. Es preciso llamar la atención en el hecho de que los métodos que se usan convencionalmente son de equilibrio y no hacen un análisis dinámico de la respuesta de la estructura y tampoco se toma en cuenta la interacción suelo estructura por lo cual es de esperarse que estos análisis no sean confiables.

A partir de lo anterior, queda como evidencia, que existen falencias a la hora de diseñar muros de contención, especialmente, cuando éstos se ven sometidos a cargas dinámicas ya que no se usan los métodos correctamente o porque los efectos sísmicos muchas veces se simplifican. Existe la necesidad de desarrollar e implementar una metodología de diseño que reúna los procedimientos adecuados que tengan en cuenta las variables más críticas de un modelo seudoestático definido, con el fin de obtener como resultado el dimensionamiento eficiente de los muros para condiciones extremas de carga y así lograr disminuir su probabilidad de falla.

Por lo tanto el objetivo del trabajo presentado en este artículo consiste en diseñar un aplicativo computacional para el dimensionamiento de muros de gravedad y en cantiléver cimentados superficialmente teniendo en cuenta los efectos de un evento sísmico.

Para ellos fue necesario hacer una recopilación bibliográfica para determinar las cargas estáticas y dinámicas, para definir los criterios del pre dimensionamiento de los muros y para realizar el análisis de estabilidad estático y dinámico de los muros al volcamiento, al deslizamiento y por capacidad portante. Una vez terminada la recopilación bibliográfica se programó el aplicativo computacional en MATLAB y después se compararon los resultados con un programa de elementos finitos en PLAXIS V8.2.

El impacto que tiene la investigación realizada se encuentra en el aplicativo desarrollado; con dicho aplicativo se reúne una metodología de diseño apropiada para muros de contención bajo el efecto de cargas sísmicas. El aplicativo no solo permite tener en cuenta los efectos dinámicos para el diseño, éste además permite hacer un análisis estático para muros de gravedad y muros en cantiléver, permite escoger si se quiere hacer un análisis en condición drenada o condición no drenada y permite aplicar diferentes sobrecargas con diferente configuración cada una. El aplicativo además permite escoger entre diferentes metodologías para el cálculo de presión de tierras (Rankine y Coulomb) y para el cálculo de presiones dinámicas (Mononobe-Okabe y Arrango). Adicional a esto, se tuvo en cuenta la metodología de Richards-Elms, la cual consiste en definir el peso mínimo del muro para evitar que tenga un desplazamiento mayor al admisible.

Asimismo en la investigación realizada se hizo una adaptación para la determinación de los desplazamientos admisibles con base en el Eurocódigo. Para esto el programa le permite al

usuario escoger las ciudades capitales de departamento con el fin de tomar los valores de aceleración y velocidad pico del espectro y permite escoger un tipo de perfil de suelo según la clasificación de la NSR-10. La fórmula para el cálculo de dichos desplazamientos admisibles se adaptó a la NSR-10, teniendo en cuenta los coeficientes de amplificación del suelo y la zona de periodos cortos e intermedios del espectro respectivamente. El aplicativo desarrollado es una herramienta que facilita el diseño de muros de contención optimizando las dimensiones del mismo; los criterios de diseño están basados en los factores de seguridad que exige la NSR-10.

II. MÉTODOS

La recopilación bibliográfica consistió en la reunión de todas las ecuaciones y procedimientos necesarios para el cálculo de las cargas estáticas y dinámicas que actuarían sobre el muro.

Para las presiones de tierra estáticas se revisó la teoría de Coulomb y de Rankine. Asimismo se encontraron ecuaciones para el cálculo del aumento de presiones de tierra debido a diferentes

configuraciones de sobrecargas. Las sobrecargas que se tuvieron en cuenta fueron sobrecargas infinitas, puntuales, longitudinales y localizadas.

Para las presiones de tierra dinámicas se tuvo en cuenta la teoría de MononobeOkabe y de Arrango. Además de esto, se implementó la metodología de RichardsElms y se encontraron ecuaciones para el efecto hidrodinámico del agua según la solución de Westergaard.

Para los pre-dimensionamientos de los muros se revisaron las sugerencias de Das y Bowles. Estos mismos autores fueron consultados para obtener los procedimientos para el análisis de estabilidad por deslizamiento, volcamiento y capacidad portante. También se revisó la NSR-10 para establecer los factores de seguridad y así definirlos como criterios de diseño en el aplicativo computacional.

Una vez terminada la recopilación bibliográfica se programó en MATLAB el aplicativo para el dimensionamiento de los muros. La Figura 1 muestra la interfaz del programa con datos ingresados.



Figura 1. Aplicativo en MATLAB

Una vez terminado el aplicativo en MATLAB se planteó un problema donde un muro de contención era la solución. La configuración inicial de este problema fue la siguiente:



Figura 2. Configuración geométrica inicial del problema

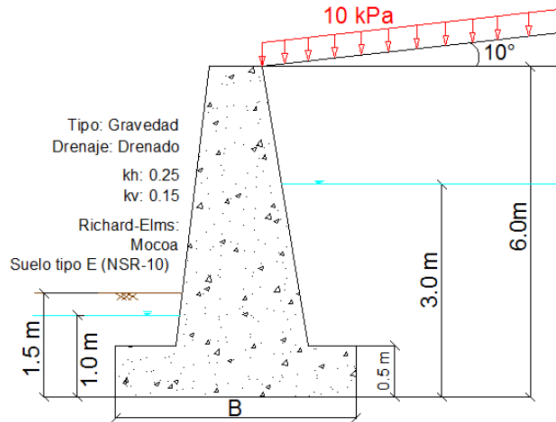


Figura 3. Configuración del problema con valores constantes previos a su modificación

En la Tabla 1 se muestran los parámetros del suelo de cimentación y de relleno para el problema que se planteó.

Tabla 1. Parámetros del suelo de relleno y cimentación

Suelo de Relleno		Suelo de Cimentación	
ϕ (°)	34	ϕ_2 (°)	30
δ (°)	20	δ_2 (°)	20
c (kPa)	1	c_2 (kPa)	1
S_u (kPa)	70	S_{u2} (kPa)	70
G (kN/m ³)	17	G_2 (kN/m ³)	16
G_{sat} (kN/m ³)	20	G_{2sat} (kN/m ³)	20

A partir de este problema, se hizo un análisis de sensibilidad de las diferentes variables que gobiernan el diseño de los muros de contención.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 muestra el dimensionamiento obtenido para el problema que se planteó. Este

dimensionamiento se obtuvo a partir del uso de aplicativo que se programó en MATLAB.

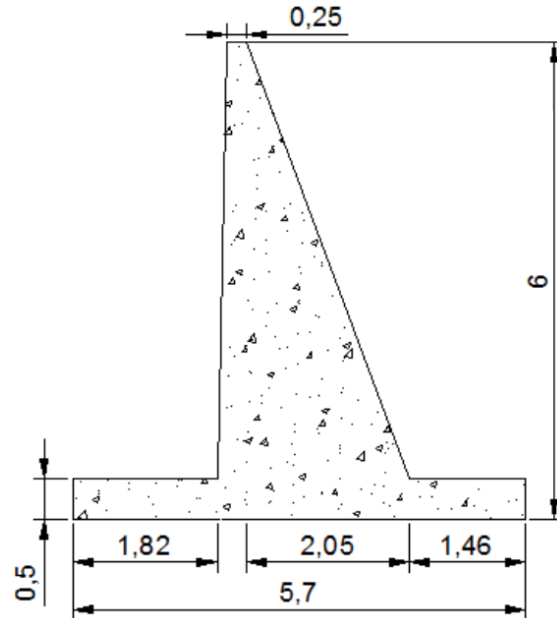


Figura 4. Dimensionamiento del muro para el análisis por elementos finitos.

Previo al resultado mostrado en la Figura 4 se hizo un análisis de sensibilidad, el cual se discutirá a continuación.

El trabajo que se presenta en este artículo estuvo encaminado hacia el desarrollo de una herramienta computacional para el dimensionamiento adecuado de muros de contención de gravedad y en cantiléver los cuales no solo están bajo presiones de tierra estáticas sino que también están bajo la influencia de los efectos dinámicos de un evento sísmico. Terminada la herramienta computacional se pudo hacer un análisis de sensibilidad con el fin de determinar qué variables gobiernan los diseños de los muros de contención.

En primer lugar, las sobrecargas presentes en el relleno, las cuales un muro de contención debe resistir, son de gran importancia y es indispensable tenerlas siempre en cuenta. La aplicación de una sobrecarga en el suelo de relleno disminuye la base del muro. Es cierto que las sobrecargas (tanto puntuales, longitudinales, localizadas e infinitas) generan un aumento en la presión de tierra activa

pero éstas en realidad le significan un peso adicional al muro, o por lo menos al suelo en donde están siendo aplicadas, esto quiere decir que van a ayudar a resistir las presiones de tierra estáticas y dinámicas que son las que tienden a fallar el muro. con respecto al pie del muro, que es el punto más crítico en cuanto a volcamiento y deslizamiento. Sin embargo, las sobrecargas no necesariamente son permanentes, por lo tanto la condición más crítica

A medida que las sobrecarga son mayores se presentan menores anchos de muros, especialmente en las sobrecargas localizadas, las cuales a medida que se alejan del muro, su resultante genera un mayor brazo resistente en el diseño de un muro de contención sería evaluarlo sin sobrecargas, a no ser, que sean sobrecargas permanentes durante la vida útil del muro.

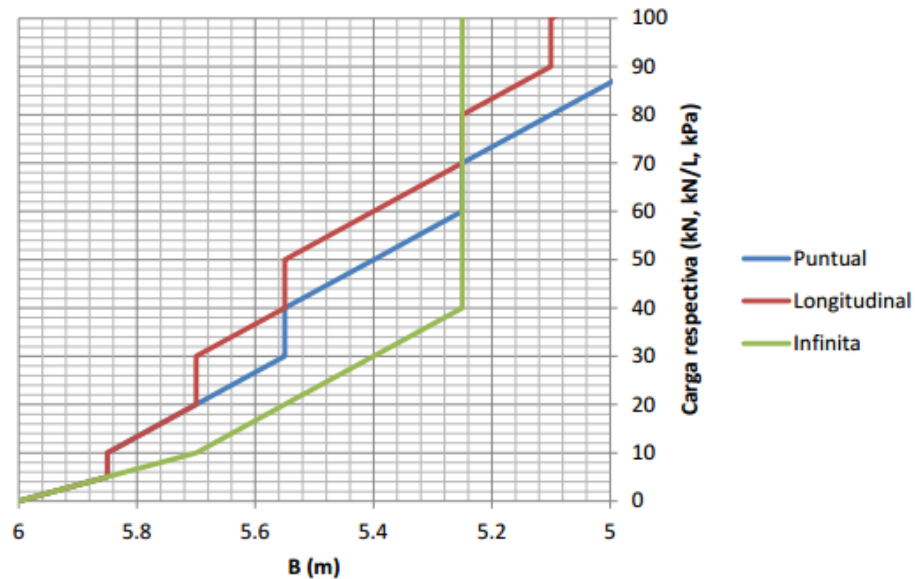


Figura 5. Ancho de muro de gravedad vs tipos de sobrecarga

En segundo lugar, la pendiente del relleno que un muro de contención debe resistir también es de gran importancia y en ningún momento debería despreciarse. A medida que se varía la pendiente del relleno se encontró que, el hecho de tener una pendiente en el relleno a diferencia de tener un relleno horizontal puede llegar a ser favorable para el dimensionamiento del muro. El suelo de cimentación que se tuvo en cuenta para el análisis era un suelo con un ángulo de resistencia interna de

$\varphi=30^\circ$, y se encontró que los menores anchos de muro se presentan cuando el terreno está inclinado aproximadamente a $\beta=15^\circ$. Esto podría indicar que tener una pendiente en el relleno cercana a puede significar un aumento en el peso del suelo de relleno (que actúa como fuerza resistente) tal, que su aumento en la presión activa no es tan importante y de hecho contribuye de manera favorable en el diseño.

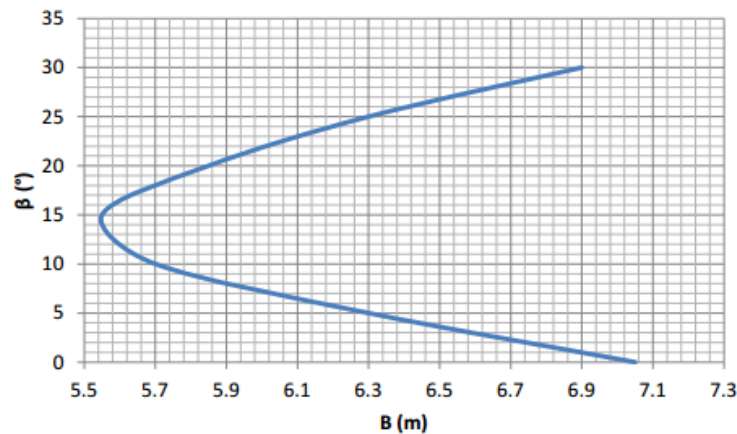


Figura 6. Ancho de muro de gravedad vs tipos de sobrecarga.

Cabe resaltar, que a medida que la inclinación del relleno aumenta, la presión activa neta aumenta, en especial la presión dinámica. De hecho ésta inclinación es de especial cuidado sobre todo cuando se tienen inclinaciones cercanas al valor de φ ya que por definición la ecuación de Mononobe-Okabe tiende a indeterminarse pues se van a presentar esfuerzos que están por fuera de la falla a partir del círculo de Mohr.

En tercer lugar, otra de las variables que se analizó fue la profundidad de empotramiento o profundidad de cimentación. Como era de esperarse, a medida que la profundidad de cimentación es mayor, la presión pasiva aumenta considerablemente y se obtienen anchos de muro menores. Esto es importante a la hora de evaluar en el diseño como tal qué tanto se puede excavar y qué sí se quiere

salvar una altura fija, cimentar el muro más profundo va a significar más concreto, pues se necesitará más material. Asimismo, no es recomendable diseñar un muro para que no esté empotrado en el suelo una parte de su estructura, ya que el muro tendría que ser demasiado grande para que por simple peso, ayude a resistir las presiones que lo intentan volcar o deslizar. Cuando empotrar todo el muro cierta profundidad no se desea o no es posible es recomendable usar una llave contra deslizamiento que le va a permitir tener presiones pasivas que ayudan al muro a resistir y así obtener muros menos robustos. Es importante también tener en cuenta que la NSR-10 lo limita a uno en el uso de la presión pasiva para la condición de deslizamiento del muro y por lo tanto es necesario establecer esto previo al diseño.

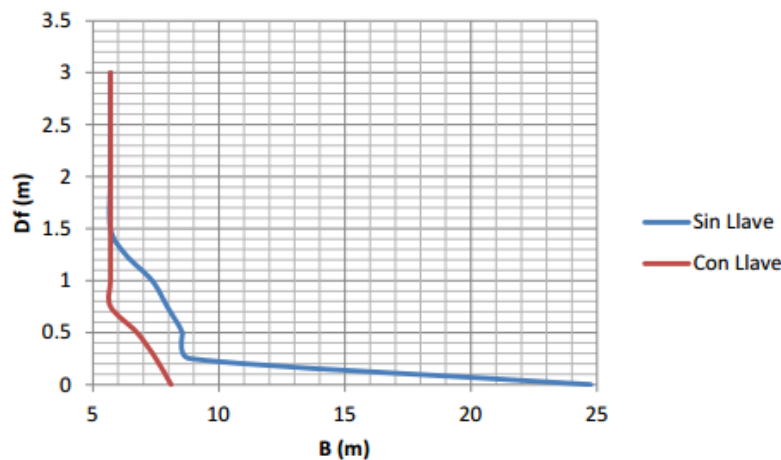


Figura 7. Ancho de muro vs profundidad de empotramiento

En cuarto lugar, cabe recordar la importancia de tener en cuenta el tipo de muro que se va a diseñar,

la posición del nivel freático y la condición de sismo como tal. Se encontró que para muros de

gravedad y cantiléver, bajo un mismo escenario, el muro en cantiléver es más favorable ya que se obtienen menores anchos de muro y también menos concreto. Los muros de gravedad son muros mucho más robustos y necesitan más concreto, además, el hecho de tener un espaldar inclinado tiene una influencia importante en las presiones dinámicas y estáticas. Cabe recordar que el muro en cantiléver necesita mucho más suelo de relleno compactado lo cual también puede tener una influencia económica en el diseño.

Es importante siempre tener en cuenta la posición del nivel freático y especificar la condición de drenaje para el diseño. Los resultados de un diseño bajo condición no drenada son desfavorables y la norma no lo permite, esto porque un análisis no drenado es un análisis a corto plazo, en cambio, un análisis dinámico o pseudoestático es un análisis a

largo plazo. Es conveniente hacer un análisis no drenado cuando se quiere diseñar un muro bajo condición estática y a corto plazo. Por otro lado, con presencia de agua los muros tienden a ser más robustos ya que no solo la presión hidrostática estará presente pero ante un eventual sismo habrá también una presión hidrodinámica actuando.

En quinto lugar, se encontró que es de gran importancia el análisis de un muro de contención a partir de un método por elementos finitos. En especial por el hecho de que se pueda hacer un análisis a lo largo del proceso constructivo y un análisis dinámico para una señal sísmica dada. Un análisis de éste tipo también permite revisar la estabilidad del problema globalmente a partir de la metodología de reducción φ/c . Para éste análisis específicamente se obtuvieron resultados favorables con un factor de seguridad global de $FS=1.722$.

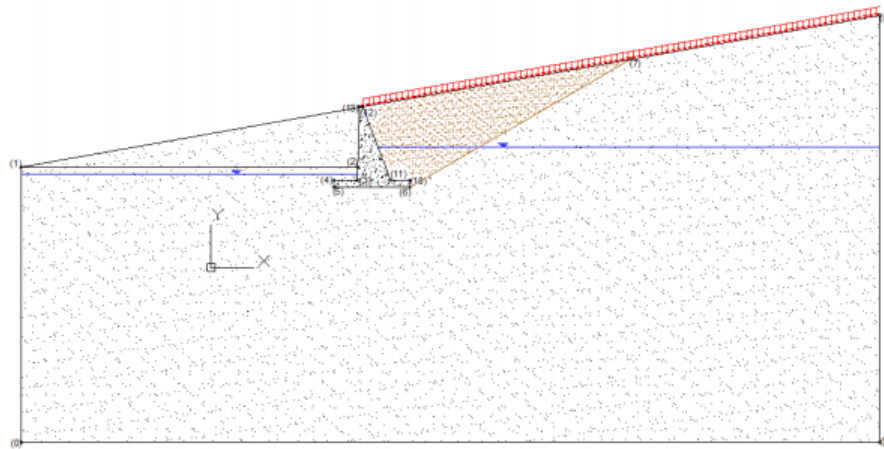


Figura 8. Geometría del modelo en elementos finitos

Al momento de comparar la diferencia en los factores de seguridad por volcamiento, deslizamiento y capacidad portante se obtuvo un error de 24.15%, 23.89% y 44.14% respectivamente. El criterio de diseño por volcamiento fue el único que no se cumplió en este caso con respecto al análisis por equilibrio límite, mientras que por capacidad portante y

deslizamiento (aunque también existe un error), se sigue cumpliendo con los criterios de diseño que exige la NSR -10. Se considera que debido a todos los efectos que un programa tan completo como PLAXIS puede llegar a manejar y tener en cuenta en sus cálculos es un resultado favorable sobre todo que más de la mitad de los criterios de diseño se cumplen.

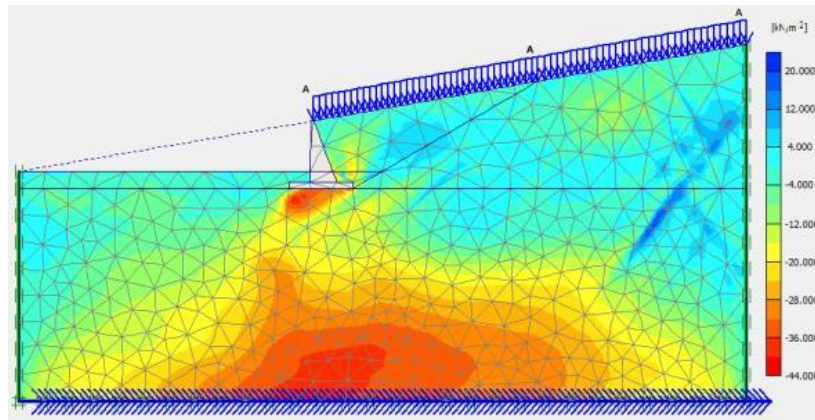


Figura 9. Distribución de esfuerzos cortantes durante el análisis dinámico.

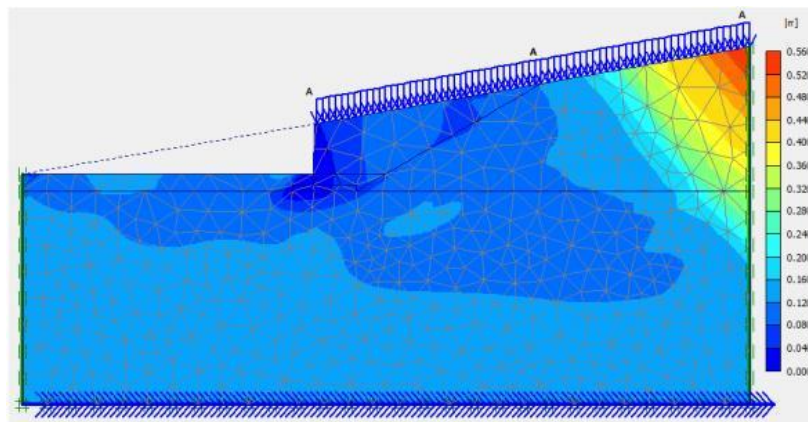


Figura 10. Desplazamientos totales durante el análisis dinámico.

IV. CONCLUSIONES

A partir del trabajo que se presenta en este artículo se encontró de vital y gran importancia siempre tener en cuenta los efectos sísmicos a la hora de diseñar un muro. El diseñador debe tener en cuenta a partir de la amenaza sísmica del lugar los coeficientes de aceleración horizontal y vertical de diseño y eso será suficiente para asegurar que se estará diseñando para la situación más crítica. Los pre dimensionamientos que los autores reflejan en sus libros, no son dimensiones que un muro necesitaría para soportar cargas dinámicas, por eso es importante no guiarse por esos valores y entender que un muro, el cual se diseña con efectos sísmicos va a ser mucho más grande por el aumento de las presiones y por los desplazamientos que se van a presentar.

El análisis por elementos finitos no solo permite ver una distribución de esfuerzos a través de las etapas de construcción sino también de los desplazamientos en el suelo y en el muro como tal. Los resultados en términos de desplazamientos para el problema en general, y en especial para el análisis

dinámico fueron favorables ya que a partir de la metodología (por equilibrio límite) que se propuso y que la herramienta computacional calcula, se garantiza que el muro cumplirá con los desplazamientos admisibles que exige la NSR-10. Cabe resaltar que la metodología de Richard-Elms en ningún momento gobierna el diseño del muro, simplemente que lo que propone Richard-Elms se cumple fácilmente, como ya se había mencionado los muros bajo efecto sísmico van a ser mucho más robustos, y Richard-Elms exige un peso mínimo para el muro con el fin de evitar un cierto desplazamiento, pero usando de manera correcta la ecuación de Mononobe-Okabe y asegurando que el muro es lo suficientemente grande para soportar dichas presiones dinámicas, el criterio de Richard-Elms se cumple sin mayor dificultad.

Por último el análisis dinámico por elementos finitos, y la posterior comparación entre equilibrio límite y deformaciones fue favorable en términos generales. Antes, es de gran importancia aclarar que se debe tener mucho cuidado con la definición de las condiciones fronteras del modelo, sobre todo aquellas que corresponden al análisis dinámico

como tal. Es importante que el modelo sea lo suficientemente grande para simular una situación real y concentrarse en los resultados en el lugar de estudio y no en los puntos donde se presentan resultados que no tienen un significado real.

Por lo tanto se llega a una conclusión general, de que la herramienta desarrollada que hace parte del objetivo principal del trabajo de grado es una herramienta que puede ser usada para el dimensionamiento de muros de contención bajo efectos sísmicos. El programa debe manejarse con mucho cuidado pero puede llegar a dar una buena aproximación de las presiones estáticas, dinámicas, sus puntos de aplicación, los desplazamientos admisibles para un muro que se quiera diseñar y las dimensiones recomendadas para cumplir con los criterios de diseño, es decir, puede ser utilizado durante la etapa preliminar de un diseño. Con el uso adecuado del mismo, puede ser aprovechado por ingenieros, profesores y estudiantes para problemas en condición estática o pseudoestática.

REFERENCIAS

- [1] Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes. (1995). (CCDSP-95). Bogotá D.C., Colombia.
- [2] Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design*, Fifth Edition. McGraw- Hill.
- [3] Braja M. Das, G. R. (2011). *Principles of Soil Dynamics* Second Edition. Cengage Learning.
- [4] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. (Diciembre de 2004). European Standard EN 1998-1. Brussels: European Committee for Standardization.
- [5] Fine Civil Engineering Software. (s.f.). Recuperado el 11 de Septiembre de 2012, de <http://www.finesoftware.es/software-geotecnico/ayuda/comprobacion-demuros/teoria-de-arrango/>
- [6] PLAXIS. (09 de Julio de 2012). Safety Analysis and Displacements. Recuperado el 01 de Noviembre de 2012, de <http://kb.plaxis.nl/tips-and-tricks/safety-analysis-anddisplacements>
- [7] Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Version 8.2. (2005).
- [8] Potts, D. M., & Zdrakovic, L. (2001). *Finite element analysis in geotechnical engineering, Application*. London: Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- [9] Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. (Enero de 2012). NSR-10. Bogotá D.C., Colombia.
- [10] Terzariol, R. E. (2004). Seismic Design of Retaining Structures in Granular Soils. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 4(2), 166.
- [11] Whitman, R. V., & Liao, S. (1985). *Seismic Design of Gravity Retaining Walss*. Department of Civil Engineering Massachusetts Institute of Technology