

ANALISIS DE ESTABILIDAD DE MUROS ANTE CARGAS SISMICAS

**ASTRID VANNESSA MARTÍNEZ NIÑO
DIEGO EDUARDO CAMACHO PINZÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

ANALISIS DE ESTABILIDAD DE MUROS ANTE CARGAS SISMICAS

**ASTRID VANNESSA MARTÍNEZ NIÑO
DIEGO EDUARDO CAMACHO PINZÓN**

**Trabajo de Grado modalidad Investigación para optar al título de:
Ingeniero Civil**

**Director:
WILFREDO DEL TORO RODRIGUEZ
ING. CIVIL M. Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer especialmente al ingeniero, Wilfredo Del Toro Rodríguez, por haberse hecho cargo de la dirección del proyecto en el momento que más indispensable fue su asesoría.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER por albergarnos en su regazo durante este tiempo e impulsarnos a ser profesionales idóneos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
2. ANALISIS DEL PROYECTO.....	16
3. ANALISIS DINAMICO	17
3.1 MÉTODO DE MONONOBE – OKABE (1929).....	17
3.1.1 Ecuaciones a Utilizar.	18
3.1.2 Pre-dimensionamiento del muro Cantiléver	19
4. CALCULOS DEL PROBLEMA.	22
4.1 CÁLCULOS POR MEDIO DEL MÉTODO MONONOBE – OKABE.....	22
5. MODELO ESTÁNDAR	29
5.1 Análisis Dinámico de estabilidad del muro con PLAXIS 2D “versión 8.5”	29
6. ANALISIS DE RESULTADOS	33
6.1 Análisis de los métodos utilizados	33
7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	37
8. BIBLIOGRAFIA	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Hipótesis método de Mononobe y Okabe.	17
Tabla 2. Propiedades de los suelos granulares. Fuente: www.ingenieriarural.com	22
Tabla 2.1 Propiedades de los materiales.	22
Tabla 3. Datos de Ka, Ea y punto de Aplicación.....	23
Tabla 4. Datos para calcular Eda.	23
Tabla 5. Valores de Kad y Ead obtenidos por medio de las formulas del Método (MOC).....	25
Tabla 6. Resultados de la Ec. (7)	25
Tabla 7. Resultados de la sumatoria de Momento por sobrecarga y el Momento resultante.....	27
Tabla 8. Parámetros del Suelo para las propiedades del programa Plaxis.	29
Tabla 9. Esfuerzos efectivos del modelo. Fuente: Plaxis 2D.....	32
Tabla 10. Comparación Factores de Seguridad.....	35
Tabla 11. Comparación de desplazamiento del muro ante un sismo.....	36

LISTA DE GRAFICAS

FIGURA 1. Fuerzas actuando sobre la cuña activa y el Polígono de fuerzas. Fuente: Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 – Número 20 – 2012.	18
FIGURA 2. Dimensiones para el pre-diseño de un muro Cantiléver. Fuente: DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN. Dr. Jorge E. Alva Hurtado, año 2008	20
FIGURA 3. Pre-dimensionamiento del muro Cantiléver.....	20
FIGURA 4. Dimensiones del muro Cantiléver.....	21
FIGURA 5. Diagrama para el cálculo de h_v y β	24
FIGURA 6. Esquema de la distribución de cargas debidas a los pesos de los materiales.	27
FIGURA 7. Geometría del modelo en elementos finitos. Fuente: Plaxis 2D.....	30
FIGURA 8. Posición de los nodos. Fuente: Manual de Referencia, Plaxis 2D. Versión 8.5, año 2004	31
FIGURA 9. Distribución de esfuerzos. Fuente: Plaxis 2D	31
FIGURA 10. Distribución de esfuerzos para el corte A- A'. Fuente: Plaxis 2D.....	31
FIGURA 11. Comparación del Empuje Activo Dinámico (Ead) Calculado por M-O y Método de los elementos finitos).	33
FIGURA 12. Ancho de muro Vs. Sobrecargas.	34
FIGURA 13. Ancho de muro Vs. Profundidad de empotramiento.	35

RESUMEN

TITULO: ANALISIS DE ESTABILIDAD DE MUROS ANTE CARGAS SISMICAS*

AUTORES: Astrid Vannessa Martínez Niño
Diego Eduardo Camacho Pinzón†

PALABRAS CLAVE: Muro cantiléver, Análisis pseudo-estático, efectos sísmicos, elementos finitos.

CONTENIDO:

En este artículo el propósito del tema de investigación se centrara en un análisis comparativo entre métodos de análisis convencionales y el desarrollo de métodos numéricos, en donde se realizara un análisis de estabilidad ante cargas sísmicas en muros contención. 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, la distribución de las presiones laterales o de empuje y la magnitud de las mismas, por lo tanto existe la necesidad de desarrollar un análisis para la estabilidad de muros de contención cantiléver teniendo en cuenta los efectos de un evento sísmico. El método escogido para hacer este análisis sísmico es el método simplificado de Mononobe-Okabe (1929), similar a la teoría estática de Coulomb, sin embargo, toma en cuenta dos acciones adicionales, que son las componentes vertical y horizontal producidas por un sismo, de igual manera se plantea el modelo del muro en el programa computacional PLAXIS 2D, paquete de elementos finitos diseñado para hacer un análisis bidimensional de deformación y estabilidad en ingeniería geotécnica. El documento de la investigación ilustrara el comportamiento dinámico del sistema suelo-muro.

* Trabajo de grado

† Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ing. M.Sc Wilfredo del Toro Rodríguez.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS STABILITY OF WALLS TO SEISMIC LOADS[‡]

AUTHORS: Astrid Vannessa Martínez Niño
Diego Eduardo Camacho Pinzón[§]

KEYWORD: Cantilever wall, pseudo-static-analysis, seismic effects, finite elements.

CONTENT:

In this article the purpose of the investigation topic will be based in a comparative analysis between conventional methods of analysis and the development of numeric methods, where will be realized a stability analysis to seismic loads in retaining walls. During a seismic event the retaining walls generally undergo to higher stresses of load compared with those walls established during the design because many times the possible dynamic loads are not calculated adequately, the distribution of lateral pressures or boost pressures and the magnitude of the same, therefore there is a need to develop an analysis for the stability of retaining walls taking into account the effect of a seismic event. The chosen method to do this seismic analysis is the simplified method of Mononobe-Okabe (1929), similar to the static theory of Coulomb, all the same, are taking into account two additional actions, which are the horizontal and vertical components produced by a seism, similarly is posed the model of the wall in the computational program PLAXIS 2D, package of finite elements which is programmed to do a two-dimensional analysis of deformation and stability of geocentric engineering. The document of the investigation will illustrate the dynamic behavior of ground-wall system.

[‡] Degree work

[§] Faculty of physical –Mechanical. Civil Engineering School. Director: Ing. M.Sc. Wilfredo Del Toro Rodríguez.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo consiste en el análisis de estabilidad de muros de contención ante cargas sísmicas, área regularmente abordada en las investigaciones realizadas hasta ahora dentro de la ingeniería civil. Los muros de contención son obras destinadas a la contención de tierras en general, tienen como finalidad en lidiar con la magnitud y la distribución de las presiones laterales o empuje producido por el material retenido 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, su estabilidad depende fundamentalmente del peso propio y del peso del material que esta sobre su fundación. Para proyectar estos muros de contención es necesario determinar la magnitud, dirección y punto de aplicación de las presiones que el suelo ejercerá sobre el mismo.

El análisis del muro contempla la determinación de las fuerzas tales como; empuje de tierras, peso propio, peso de la tierra, cargas laterales y sobrecargas con la finalidad de estudiar la estabilidad al volcamiento, deslizamiento, presiones de contacto suelo-muro, resistencia mínima requerida por los elementos que conforman el muro, 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 pseudo-estático (porque no se estaría teniendo en cuenta la carga dinámica) y se estaría subestimando el diseño.

Es preciso mencionar 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, nace la necesidad de implementar metodologías que reúnan los procedimientos adecuados, que tengan en cuenta las variables más críticas de un modelo pseudo-estático 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 se han propuesto modelos matemáticos que de forma aproximada muestran algunos resultados; uno de ellos que últimamente ha tomado mayor fuerza para este tipo de estudio, es el método de las diferencias finitas, método que es aplicado en reconocidos software como PLAXIS 2D (Programa con el que se trabajó en este proyecto), herramienta computacional que mediante métodos numéricos resuelve problemas complejos en el área de la geotecnia, arrojando respuestas como deformaciones y factores de seguridad, entre otros.

En este trabajo se estudian las diferentes variables que pueden afectar la estabilidad del muro teniendo en cuenta los efectos de evento sísmico, pero en primer lugar se quiso hacer, un pequeño estudio del diseño de un muro de contención cantiléver, estos muros deben ser diseñados para resistir fuerzas de volteo, deslizamiento y ser adecuados estructuralmente.

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 trabajó con el modelo matemático Mononobe-Okabe (1929), método de relativa facilidad para el análisis de estabilidad ante cargas sísmicas para muros cantiléver y después se hace una análisis comparativo de resultados con un programa de elementos finitos en PLAXIS 2D.

La idea de evaluar técnicamente este tipo de muros de contención en concreto reforzado y su relación de estabilidad ante cargas sísmicas del suelo, nace para obtener una herramienta práctica, fácil y confiable que ayude en la selección, diseño y construcción de estos muros, uno de los sistemas más usados en el medio para el sostenimiento de terrenos naturales, rellenos artificiales o materiales seleccionados.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar las metodologías convencionales para el análisis de estabilidad ante cargas sísmicas en muros cantiléver y compararlos con el análisis dinámico mediante un programa de elementos finitos.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Estudiar las diferentes metodologías para tener en cuenta las cargas sísmicas dentro del análisis de estabilidad (deslizamiento, volcamiento y capacidad portante).
- ✓ Realizar un estudio comparativo entre las metodologías convencionales y los resultados de los análisis por elementos finitos.

2. ANALISIS DEL PROYECTO

El modo en que se orientó el avance de este proyecto, estuvo encaminado hacia el desarrollo de un método adecuado para el análisis pseudo-estático para evaluar las presiones sísmicas que desarrollan los suelos sobre los muros de contención. La teoría que se utilizó para el estudio de la estabilidad ante sismos fue la del método de elementos finitos por medio del software PLAXIS 2D versión 8,5 y la teoría de Mononobe-Okabe, la cual es muy similar a la teoría estática de Coulomb, sin embargo, toma en cuenta dos acciones adicionales: las componentes vertical y horizontal producidas por el sismo. Esta teoría modela el comportamiento de una cuña que se desliza sobre un plano de falla, actuando sobre un muro de contención. Terminado el análisis del modelo matemático, se realizaron varios análisis de sensibilidad con el fin de determinar qué variables y que situaciones se podrían presentar con algunos cambios en los valores, como en las dimensiones del muro (H, L) y en las propiedades de los materiales.

3. ANALISIS DINAMICO

La respuesta dinámica en presencia de un sismo es complicada en las estructuras de contención, debido a que los esfuerzos y desplazamientos, dependen del estrato de cimentación, de las fuerzas inerciales, la rigidez de la estructura, del comportamiento del suelo retenido y de las características del sismo. Debido a estos parámetros, se conocen tres tipos de soluciones para el comportamiento dinámico de las estructuras de contención; el método rígido-plástico o pseudo estático, el método elástico y el método elastoplástico, en donde estos métodos adoptan hipótesis simplificadoras para la construcción de modelos matemáticos que permitan el estudio de estos fenómenos. De los tres, se ha escogido para el estudio el primero de los mencionados.

3.1 MÉTODO DE MONONOBE – OKABE (1929).

Es un método pseudo-estático, que está basado en el equilibrio de fuerzas estáticas y dinámicas, con el cual se pueden determinar los empujes que se ejercen sobre el muro y sus puntos de concentración, con fines de determinar los factores de seguridad al desplazamiento, vuelco y giro en la base. Este método consiste en determinar el Empuje Activo Dinámico (Kad) del suelo, el cual requiere de un análisis complejo que considere la interacción Suelo-Estructura. Esta teoría consiste en definir unas fuerzas inerciales generadas por la cuña de suelo deslizante con una serie de hipótesis ver (Tabla 1).

Tabla 1. Hipótesis método de Mononobe y Okabe.

CARACTERÍSTICA	HIPÓTESIS
Desplazamiento del estribo	1/1.000 a 1/500 de la altura
Tipo de suelo	Granular, no saturado
Cuña de suelo	Comportamiento rígido - plástico
Superficie de falla	La superficie de falla del suelo de relleno es plana y pasa por el pie del muro.
Efectos de borde	El muro es lo suficientemente largo para considerar despreciables los efectos de borde.
Aceleración	Uniforme en toda la cuña deslizante

Fuente: Rev. Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 4(2) 153

Estas hipótesis (**Tabla 1.**) establecidas por Okabe (1926) y luego por Mononobe (1929), ayudaron a que formularan una teoría sobre el comportamiento de una cuña que se desliza sobre un plano de falla actuando sobre un muro de contención (Coulomb, 1776). **Fuente:** Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 – Número 20 – 2012. Las fuerzas dinámicas que actúan en la cuña de falla producidas por las aceleraciones pseudo estáticas $a_h = k_h g$, y $a_v = k_v g$, donde k_h y k_v son las llamadas aceleraciones sísmicas horizontales y verticales utilizadas en el empuje activo dinámico;

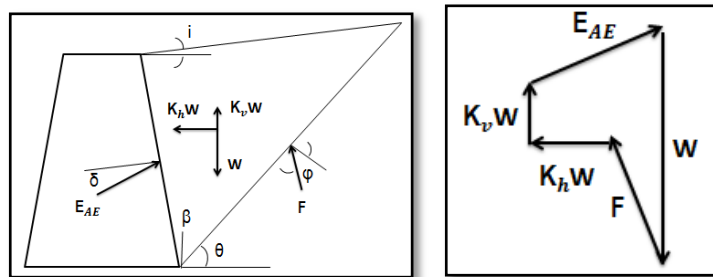


FIGURA 1. Fuerzas actuando sobre la cuña activa y el Polígono de fuerzas. Fuente: Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 – Número 20 – 2012.

3.1.1 Ecuaciones a Utilizar.

✓ Empuje activo Dinámico (E_{ad}).

$$E_{ad} = \frac{1}{2} \gamma * H^2 (1 - K_v) K_{ad} \quad (1)$$

Donde;

- γ es el peso unitario del suelo.
- H la altura del muro de contención.
- K_v es el coeficiente sísmico horizontal
- K_{ad} es el coeficiente de empuje activo dinámico

✓ Coeficiente dinámico de presión de suelo activo (K_{ad})

$$K_{ad} = \frac{\cos^2 \phi - \theta - \beta}{\cos \theta * \cos^2 \beta * \cos \delta + \beta + \theta * 1 + \frac{\sin \phi + \delta * \sin(\phi - \theta - i)}{\cos \delta + \beta + \theta * \cos i - \beta}} \quad (2)$$

Donde;

- ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.
- δ es el ángulo de fricción entre muro y suelo.
- i es el ángulo de inclinación del relleno.
- β es el ángulo de la cara interna del muro con la horizontal.
- θ se obtiene como; $\theta = \arctg \frac{K_h}{1-K_v}$ (3)

✓ Empuje activo Estático (E_a) por el método de Mohr-Coulomb.

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma * H^2 K_a \quad (4)$$

Donde; K_a es el coeficiente de empuje activo

$$K_a = \frac{\cos^2 \phi - \beta}{\cos^2 \beta * \cos \delta + \beta * 1 + \frac{\sin \phi + \delta * \sin(\phi - i)}{\cos \delta + \beta * \cos i - \beta}} \quad (5)$$

“Fuente: Estas fórmulas fueron tomadas del manual de diseño de puentes D.G.C.F. del Perú Apéndice C, año 2003”

El procedimiento para el diseño y verificación de los muros cantiléver mediante el método de Mononobe – Okabe se puede simplificar así:

- Determinar el empuje activo en condiciones estáticas. (E_a)
- Calcular el empuje activo dinámico. (E_{ad})
- Obtener el incremento dinámico de empuje ΔE_{ad} .

3.1.2 Pre-dimensionamiento del muro Cantiléver

Los muros de contención tienen como finalidad resistir las presiones laterales o empuje producido por el material retenido detrás de ellos, su estabilidad la deben fundamentalmente al peso propio y al peso del material que esta sobre su fundación, elementos que se deben tener en cuenta para un diseño apropiado del muro.

Se lleva a cabo un procedimiento para el diseño:

- 1- Pre-dimensionamiento del muro (Ver Figura 2).
- 2- Calculo de presiones sobre el muro.
- 3- Análisis de estabilidad del muro ante frente a las fuerzas que lo solicitan. En caso que el diseño no sea satisfactorio, se modificaran las dimensiones y

se efectuaran nuevos cálculos hasta lograr la estabilidad y resistencia según las condiciones mínimas establecidas.

4- Diseño estructural de los elementos y partes del muro.

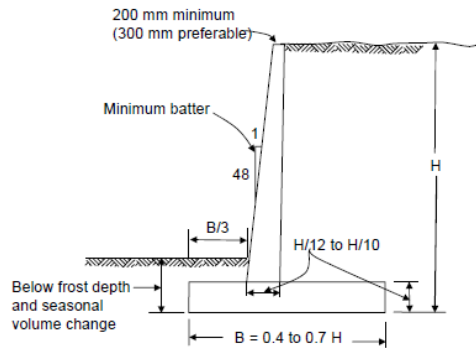


FIGURA 2. Dimensiones para el pre-diseño de un muro Cantiléver. Fuente: DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN. Dr. Jorge E. Alva Hurtado, año 2008

Se debe contemplar un análisis de la estructura diseñada, de las fuerzas que actúan sobre la base de fundación tales como el empuje de tierras, peso propio, peso de la tierra, cargas y sobrecargas para el estudio de estabilidad al volcamiento, deslizamiento, presiones de contacto suelo-muro y resistencia mínima requerida por los elementos que conforman el muro.

Lo primero que se procedió a realizar, fue el pre-dimensionamiento del muro para así seguir con la modelación de las iteraciones con el Método M-O y por medio de variables finitas.

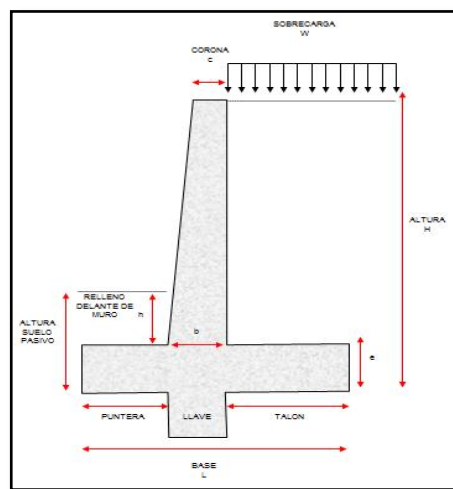


FIGURA 3. Pre-dimensionamiento del muro Cantiléver.

El valor de la altura del muro que se toma a modo de ejemplo para este proyecto y simulación es de H: 5.00 m, la cual nos permite realizar los cálculos de las demás variables como son la Base (L), el espesor (e), la puntera, la Corona (c) y otras dimensiones del muro. De acuerdo a las ecuaciones de la **Fig. 2** y al valor de H se generan los siguientes valores del dimensionamiento:

- H (altura) = 5,00 m.
- L (base) = 3,40 m.
- C (corona) = 0,25 m.
- Puntera = 1,10 m.
- Talón = 1,80 m
- h (relleno delante del muro) = 1,20 m.
- e (espesor Zapata) = 0,50 m.
- W (sobrecarga) = 1,00 Ton / m²
- μ (relación de Poisson) = 0,30

Estas son las dimensiones que se calculan por medio de las fórmulas de pre-dimensionamiento de muros (**Ver Figura 2 y 3**), donde se presenta la forma como calcular las dimensiones tentativas para el diseño de un muro de contención Cantiléver.

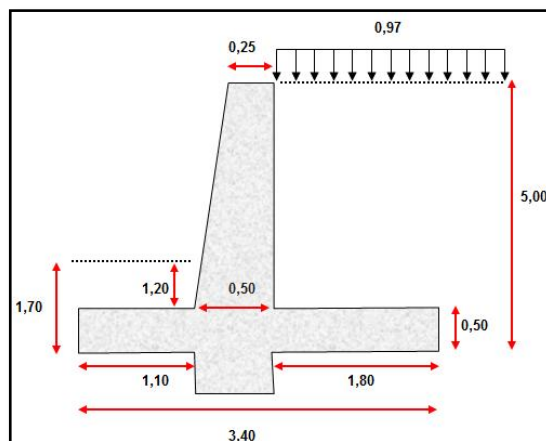


FIGURA 4. Dimensiones del muro Cantiléver.

4. CALCULOS DEL PROBLEMA.

Este proceso se realizara con las condiciones de la **Figura 4**, la sobrecarga en forma horizontal y los valores de los parámetros como se muestra en la **Tabla 2.1**.

El suelo de cimentación que se tuvo en cuenta para el análisis era un suelo con un ángulo de resistencia interna de $\phi = 34^\circ$, y una densidad seca $\gamma = 2 \text{ Tn/m}^3$. Ver las propiedades en la siguiente tabla de propiedades del suelos granulares

Densidades secas y ángulos de rozamiento interno de suelos granulares.		
Clase de terreno	Densidad seca γ (kN/m^3)	Angulo de rozamiento interno ϕ
Grava arenosa	20	34 – 45 °
Arena compacta	20	34 – 45 °
Arena suelta	17	30 – 35 °
Pedraplén	18	35 – 45 °

Tabla 2. Propiedades de los suelos granulares. Fuente: www.ingenieriarural.com

PROPIEDADES MAT.		
Fc	210,00	Kg/cm2
Fy	4200,00	Kg/cm2
ϕ	34,00	grados
μ	0,30	
γ	2,00	Tn/m3

Tabla 2.1 Propiedades de los materiales.

4.1 CÁLCULOS POR MEDIO DEL MÉTODO MONONOBE – OKABE.

- **Cálculos del empuje activo en condiciones estáticas. (Ea).**

Calculamos por medio del método de Mohr-Coulomb, el valor de K_a (5) coeficiente de empuje activo para el cálculo de E_a (4).

EMPUJE ACTIVO		
\emptyset	34	grados
\emptyset	0,593	radianes
Ka	0,304	
Ea	7,611	Ton/m
Pto. Aplicación	1,667	M

Tabla 3. Datos de Ka, Ea y punto de Aplicación.

El punto de aplicación de este empuje activo se encuentra a 1/3 H “medidos desde la base”

▪ **Cálculos del empuje activo dinámico. (Ead)**

Este empuje se calculó por medio del Método de Mononobe – Okabe.

DATOS PARA CALCULAR M-O			
Hv	4,5		
D	0,25		
I	0		
delta (δ)	0		
phi (\emptyset)	34	0,593	Rad
Aa	0,25		
Kh	0,125		
Kv	0		
teta (θ)	0,124	7,13	grados
beta (β)	0,0555	3,18	grados
Cos2(phi-teta-beta)	0,875		
Cos(delta+beta+teta)	0,984		
Sen(phi+delta)	0,515		
Sen(phi-teta-i)	0,405		
Cos(i-beta)	0,998		
Cos(teta)	0,992		
Cos2(beta)	0,997		

Tabla 4. Datos para calcular Ead.

- **hv** = H – e, Altura total menos el espesor
- **d** = b – c
- **Aa** es el coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva para diseño que se obtuvo en la norma NSR-10 “Tomo A” para un promedio

Nacional de las zonas de amenazas sísmicas Altas cuyo valor se encuentra en la **Tabla 4**.

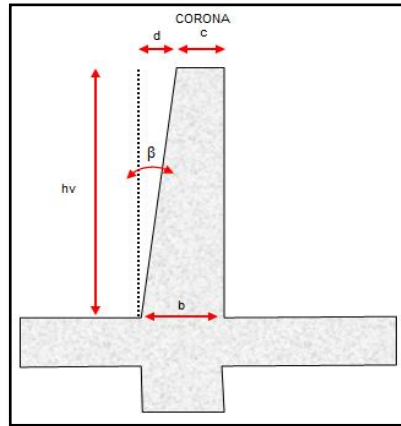


FIGURA 5. Diagrama para el cálculo de h_v y β .

Los valores de h_v y d me permiten calcular el valor de β por medio de la siguiente formula;

$$\tan \beta = \frac{d}{h_v} \quad (6)$$

Con estos datos ya obtenidos procedemos a calcular los valores de K_{ad} , E_{ad} y el punto de aplicación. Con la siguientes formula **(1)**, **(2)**.

$$K_{ad} = \frac{\cos^2 \phi - \theta - \beta}{\cos \theta * \cos^2 \beta * \cos \delta + \beta + \theta * 1 + \frac{\sin \phi + \delta * \sin(\phi - \theta - i)}{\cos \delta + \beta + \theta * \cos i - \beta}}^2$$

$$\frac{\sin \phi + \delta * \sin \phi - \theta - i}{\cos \delta + \beta + \theta * \cos i - \beta} = 0,461$$

$$1 + \frac{\sin \phi + \delta * \sin(\phi - \theta - i)}{\cos \delta + \beta + \theta * \cos i - \beta}^2 = 2,134$$

Con estos valores, se complementa el resto de la ecuación para calcular el valor de K_{ad} , se muestra el resultado en la siguiente **tabla 5**.

RESULTADOS		
K ad	0,379	
Ead	9,480	Empuje activo dinámico (Ton/m)

Tabla 5. Valores de K_{ad} y E_{ad} obtenidos por medio de las formulas del Método (MOC).

- **Obtener el incremento dinámico de empuje ΔE_{ad} .**

$$\Delta E_{ad} = E_{ad} - E_a \quad (7)$$

DIFERENCIA DE EMPUJES		
ΔE_{ad}	1,87	Ton/m
Pto. Aplicación	3,00	M

Tabla 6. Resultados de la **Ec. (7)**.

El punto de aplicación de este empuje está a $0,6 * H$ “medidos desde la base”.

- **Momento Volcante sísmico.**

$$M = E_a * \frac{H}{3} + \Delta E_{ad}(0,6H) \quad (8)$$

$$M = 18,295 \text{ Ton} * \text{m}$$

Este valor del momento, es el que actúa sobre el muro al momento del sismo lo cual nos brinda información de la magnitud de la rotación a la cual está sometido el muro con respecto al suelo.

Para efectos de diseño el valor más importante es el del cortante en la base Q_b que vale. “**Fuente:** las ecuaciones (8 y 9) fueron tomadas de una tesis Doctoral de la Universidad Politecnica de Madrid C.J.C, año 2005”;

$$Q_b = E_{ad} \cos \delta \rightarrow \frac{1}{2} \gamma * H^2 K_{ad} \cos \delta \quad (9)$$

$$Q_b = \frac{1}{2} * 2 * 5^2 * 0,379 * \cos 0$$

$$Q_b = 9,475 \text{ Ton}$$

Y como el valor del cortante estático en la base (Q_b)_{est} vale;

$$Q_b = \frac{1}{2} \gamma * H^2 K_a \cos \delta \quad (10)$$

$$Q_b = \frac{1}{2} * 2 * 5^2 * 0,304 * \cos 0$$

$$Q_b = 7,60 \text{ Ton}$$

El incremento dinámico del cortante en la base resulta;

$$\Delta Q_b = \frac{1}{2} * \gamma * H^2 (K_{ad} - K_a) * \cos \delta \quad (11)$$

$$\Delta Q_b = \frac{1}{2} * 2 * 5^2 * (0,421 - 0,320) * \cos 0$$

$$\Delta Q_b = 2,525 \text{ Ton}$$

Esto nos muestra que la fuerza ejercida por el sismo en la base incrementa el cortante de una manera importante, y esto lleva a que la estructura colapse.

➤ **Coefficientes de seguridad sísmicos del muro.**

El coeficiente de seguridad al deslizamiento (FDS) y al vuelco rígido (FSV) en condiciones de sismo deben cumplir los siguientes requisitos:

“**Fuente:** las ecuaciones (12 y 13) fueron tomadas de una tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Madrid C.J.C, año 2005”;

$$FDS = \frac{F_E}{F_D} \geq 1,1 \quad (12)$$

$$FSV = \frac{M_E}{M_V} \geq 1,5 \quad (13)$$

Donde;

- F_E : Fuerza resultante
- M_E : Momento resultante estabilizador
- F_D : Fuerza resultante deslizadora.
- M_V : Momento resultante volcador.

Se realizó un análisis de estabilidad del muro como se muestra en la figura siguiente (**Fig. 6**)

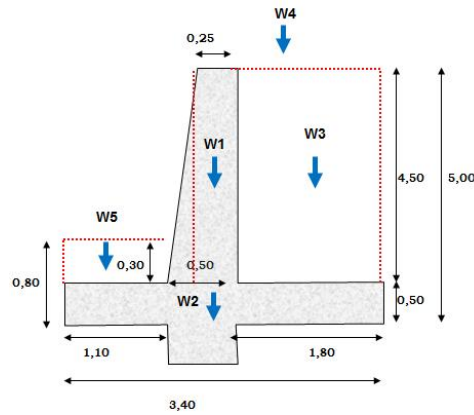


FIGURA 6. Esquema de la distribución de cargas debidas a los pesos de los materiales.

Pesos Componentes	W		X		ME	
	Ton	M	M	M	Ton-m	
w1:	4,50	0,50	2,4	5,40	1,35	7,29
w2:	3,40	0,50	2,4	4,08	1,7	6,94
w3:	0,50	0,25	2,4	0,30	1,35	0,41
w4:	1,10	0,30	1,0	0,33	0,55	0,18
w5:	4,50	1,80	1,0	8,10	2,5	20,25
Total			ΣW	18,21	ΣME	35,06

Tabla 7. Resultados de la sumatoria de Momento por sobrecarga y el Momento resultante.

$$M_V = 18,295 \text{ Ton} \cdot \text{m}$$

La resultante del brazo del momento;

$$a = \frac{M - M_V}{M} = 0,9 \text{ m}$$

Factor de seguridad contra volcamiento:

$$FSV = \frac{35,06}{18,295} = 1,92 \geq 1,5 \text{ CUMPLE}$$

Y el coeficiente de seguridad resulta del análisis de las fuerzas por medio de las siguientes ecuaciones:

$$F_d = \frac{1}{2} K_a w h (h + 2h') \quad (14)$$

$$F_D = \frac{1}{2} * 0,304 * 1 * 5 * (5 + 2 * 0,44)$$

$$F_D = 4,469 \text{ Ton}$$

El valor de F_E resulta del análisis de empujes pasivos dinámico y estático y da el siguiente valor que se obtiene realizando un análisis de presión total del suelo.

$$F_E = \sum W * \mu + E_p$$

$$E_p = \frac{1}{2} * \gamma * (h_f + h_c)^2 - h_f^2 * \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

Donde;

h_f es la altura del suelo pasivo $h_f=0,80 \text{ m}$.

h_c es la altura del Tacón $h_c=0,50 \text{ m}$.

$$F_E = 9,17 \text{ Ton}$$

Entonces el valor del coeficiente de Deslizamiento da el siguiente valor;

$$FDS = \frac{9,17}{4,469} = 2,05 \geq 1,1 \text{ CUMPLE}$$

Estos resultados muestran que el muro va a resistir los efectos de falla por deslizamiento y volcamiento debido a las fuerzas y empujes que están actuando en este.

5. MODELO ESTÁNDAR

Este fue el modelo en el que se basó todo el proyecto, debido a que sirvió de patrón de comparación de los demás modelos, sus propiedades están mostradas en la tabla 1. Los casos planteados en este trabajo fueron modelados en el programa PLAXIS.

El programa computacional PLAXIS realiza, un análisis por medio del método de elementos finitos, que consiste en dividir un problema (un medio continuo) en una serie de subdominios denominados elementos finitos, donde cada uno de estos elementos está definido a su vez por una serie de puntos llamados nodos. Un nodo puede pertenecer a uno o más elementos finitos y su función es describir la distribución de incógnitas dentro del elemento y conectar o unir todos los elementos dentro de un dominio, así como asegurar la compatibilidad de éstos. Al conjunto de nodos y elementos se le conoce como malla de elementos finitos.

5.1 Análisis Dinámico de estabilidad del muro con PLAXIS 2D “versión 8.5”

Un análisis de elementos finitos se basa en tres aspectos fundamentales, la discretización de los elementos, la definición de las propiedades de los materiales y la asignación de condiciones de frontera. La discretización se encarga de definir la geometría, áreas y volúmenes, además de construir la malla de elementos finitos.

El muro de contención fue modelado como un material isotrópico y linealmente elástico (E_c , módulo de elasticidad lineal del concreto, ν coeficiente de Poisson, G_c módulo a corte del concreto, f'_c resistencia a la compresión, γ_c densidad del concreto). En la Tabla 8 se muestran los parámetros del suelo de cimentación y de relleno para el problema que se planteó.

Suelo de Relleno		Suelo de Cimentación	
ϕ°	34	ϕ°	30
δ°	0	δ°	0
c (kPa)	1	c (kPa)	1
S_u (kPa)	70	S_u (kPa)	70
G (KN/m ³)	17	G (KN/m ³)	16

Tabla 8. Parámetros del Suelo para las propiedades del programa Plaxis.

El análisis pseudo-estático fue realizado mediante una simulación por elementos finitos aplicando una fuerza en todos los elementos de la malla, de valor igual a una aceleración horizontal normalizada constante ($kh = a_h / g$) por el peso de la cuña de falla (dinámica) dividida en la altura del vástago para tener una carga uniformemente distribuida debido al empuje pseudo-estático del material retenido. El coeficiente activo dinámico, K_{AE} , depende principalmente del ángulo de fricción interna Φ pues en la medida que disminuye Φ , aumenta K_{AE} especialmente cuando $\Phi = 30^\circ$.

Para hacer el análisis sísmico que buscamos en PLAXIS 2D, el programa lo permite llevar a cabo por medio de cálculos dinámicos, esto resultados el programa los arroja como deformaciones que permiten analizar la interacción suelo muro. El programa contiene diferentes opciones de visualización de las deformaciones del modelo de elementos finitos que se genera, el programa las muestra como graficas a través de sus fases de cálculo.

El programa proporciona los valores de los desplazamientos en cada uno de los nodos del suelo y la estructura.

Las cargas dinámicas transmitidas por el sismo son introducidas al modelo como cargas distribuidas. Por lo tanto, el valor de las mismas es constante en cualquier plano del sistema y por ende validos en un modelo bidimensional como el considerado.

Este paquete de elementos finitos, está equipado con funciones para hacer frente a diversos aspectos de la complejidad de la estructura geotécnica analizada, como la entrada grafica que permite una modelación detallada de la geometría del muro incluida las propiedades del suelo y la estructura.

A partir de modelo geométrico se genera una malla automática de elementos finitos en 2D.

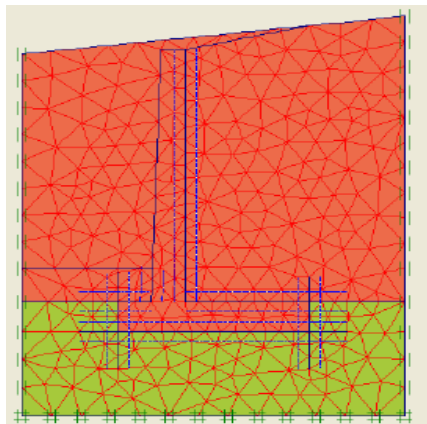


FIGURA 7. Geometría del modelo en elementos finitos. Fuente: Plaxis 2D

Durante la generación de la malla los materiales que contengan iguales propiedades son divididos en elementos triangulares, cada elemento consisten en un numero de nodos y estos a su vez poseen determinados grados de libertad, estos grados de libertad representan los componentes de los desplazamientos en cada nodo. Los elementos adyacentes son unidos por sus nodos comunes.

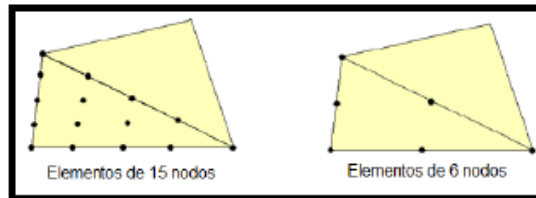


FIGURA 8. Posición de los nodos. Fuente: Manual de Referencia, Plaxis 2D. Versión 8.5, año 2004

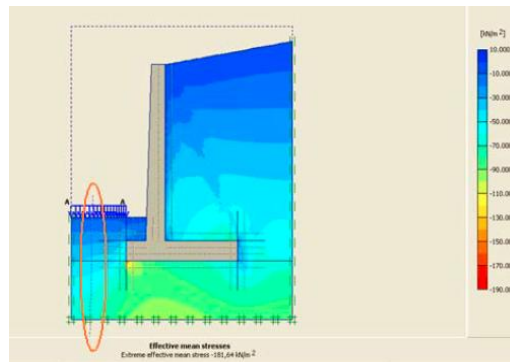


FIGURA 9. Distribución de esfuerzos. Fuente: Plaxis 2D

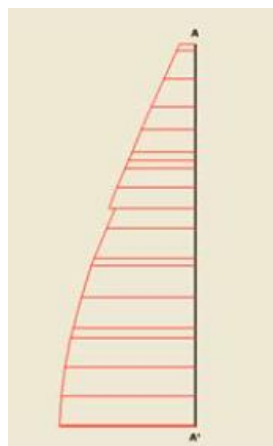


FIGURA 10. Distribución de esfuerzos para el corte A- A'. Fuente: Plaxis 2D

X [10 ⁻³ m]	Y [m]	p' [kN/m ²]
627,027	2,000	-39,152
627,027	1,813	-43,463
627,027	1,813	-43,487
627,027	1,541	-49,408
627,027	1,541	-49,378
627,027	1,473	-50,734
627,027	1,473	-50,758
627,027	1,188	-55,743
627,027	0,904	-59,879
627,027	0,904	-59,872
627,027	0,815	-60,936
627,027	0,815	-60,989
627,027	0,548	-63,509
627,027	0,282	-65,249
627,027	0,015	-66,246
627,027	0,015	-66,097

Tabla 9. Esfuerzos efectivos del modelo. **Fuente:** Plaxis 2D

Para éste análisis específicamente se obtuvieron resultados con un factor de seguridad global de FS=1.722.

Los resultados arrojados por programa fueron comparados con los resultados que nos proporciona el método de Mononobe - Okabe, para de esta manera tener un mejor panorama del comportamiento real de la estructura.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Análisis de los métodos utilizados

Del estudio realizado se hizo un análisis de sensibilidad, el cual se discutirá a continuación.

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. 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, 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 de este, que es el punto más crítico en cuanto a volcamiento y deslizamiento.

Se realizó una comparación entre los Coeficientes dinámicos de presión del suelo activo "**Kad**" determinados por el método de Mononobe-Okabe "**M-O**" y por el método de elementos finitos (simulación pseudo-estática) por medio del programa Plaxis 2D "**versión 8.5**", esto nos muestra lo cercano que están los valores uno del otro y llegando a la conclusión que tiene que ver mucho con los parámetros que se adoptan por medio del método de elementos finitos en la elaboración de la malla, donde se puede realizar con más puntos y llevarla a ser lo más precisa posible y no tomando la que el programa nos arroja, esto nos podría llevar a tener los valores de Kad reales del suelo.

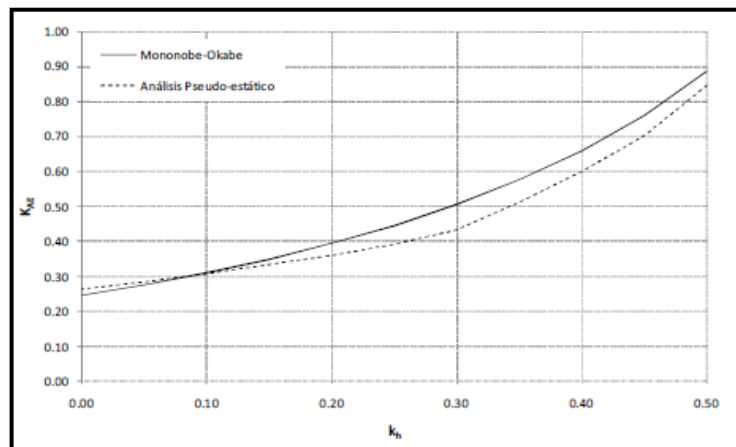


FIGURA 11. Comparación del Empuje Activo Dinámico (E_{ad}) Calculado por M-O y Método de los elementos finitos).

A medida que se aumenta el ancho del muro son mayores las sobrecargas, especialmente en las sobrecargas localizadas, las cuales a medida que se alejan del muro, su resultante genera un mayor brazo resistente, datos que afectan directamente la estabilidad del muro de contención.

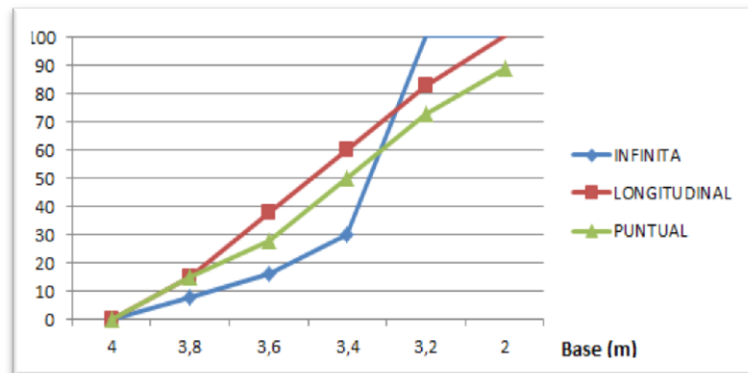


FIGURA 12. Ancho de muro Vs. Sobrecargas.

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. El suelo de cimentación que se tuvo en cuenta para el análisis era un suelo con un ángulo de fricción interna de $f = 30^\circ$, y se encontró que los menores valores de la base del muro se presentan cuando el terreno está inclinado aproximadamente a $\beta = 15^\circ$. Esto podría indicar que tener una pendiente en el relleno cercana al valor de $\beta = 15^\circ$, 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.

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 f 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. No es recomendable un muro 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. Es importante también tener en cuenta que la NSR-10 limita el uso de la presión pasiva para la condición de deslizamiento del muro y por lo tanto es necesario establecer esto previo al diseño.

En cuarto lugar, cabe recordar la importancia de tener en cuenta en el análisis de estabilidad, la posición del nivel freático y la condición de sismo como tal.

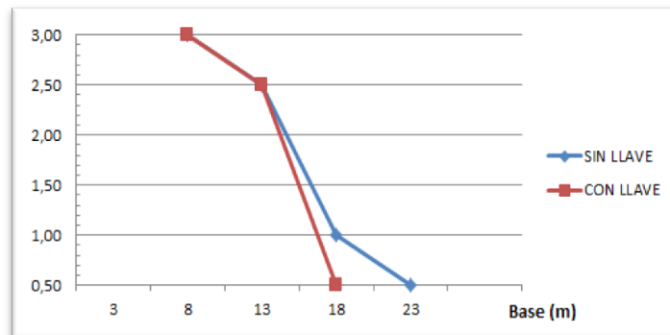


FIGURA 13. Ancho de muro Vs. Profundidad de empotramiento.

Además que el muro en cantiléver necesita mucho más suelo de relleno compactado lo cual también puede tener una influencia económica en el diseño.

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 f/c. Para éste análisis específicamente se obtuvieron resultados favorables con un factor de seguridad global de $FS=1.722$.

Al hacer una comparación de los factores de seguridad por volcamiento y deslizamiento por los dos métodos, con base a los criterios de diseño que exige la NSR -10, se observa lo siguiente: (Los valores para la comparación se toman de la Tabla H.6.9-1; Capítulo H-6 Estructuras de Contención)

<i>F.S</i>	<i>M-O</i>	<i>PLAXIS 2D</i>	<i>NSR-10</i>
<i>FDV</i>	1,86	2,03	2
<i>FDS</i>	1,788	1,66	1,05

Tabla 10. Comparación Factores de Seguridad.

Tanto para volcamiento como deslizamiento se encuentra que son más cercanos los valores por el método de elementos finitos a los de la NSR-10.

De los resultados del análisis numérico por el método de los elementos finitos, realizado con el programa Plaxis 2D, es posible estimar los desplazamientos

permanentes del muro, para el análisis comparativo que se muestra en la Tabla 11 se hace con una aceleración máxima de 0,5g.

METODO	Desplazamiento (m)	
	<i>R_{inter}=0,81</i>	<i>R_{inter}=0,48</i>
Mononobe Okabe	0,3	1,18
PLAXIS 2D	1,25	2,4

Tabla 11. Comparación de desplazamiento del muro ante un sismo.

Se utiliza un factor de reducción de la resistencia de interfaces dentro del contexto de la modelización de la interacción suelo-estructura. Este factor relaciona la resistencia de la interfaz (fricción y adherencia del muro) con la resistencia del suelo (ángulo de fricción y cohesión), en el que pueden producirse pequeños desplazamientos dentro de la interfaz, que puede dar lugar a un deslizamiento permanente.

Se considera que esta herramienta de elementos finitos Plaxis es más precisa debido a que todas las variables y efectos que puede llegar a manejar en sus cálculos nos dan un resultado más favorable, y esto lleva a que más de la mitad de los criterios de diseño se cumplen.

7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

A partir del trabajo que se presenta en este artículo se encontró de vital importancia tener en cuenta los efectos sísmicos para el diseño de un muro. Se debe tener en cuenta a partir de la amenaza sísmica del lugar los coeficientes de aceleración horizontal y vertical y eso será suficiente para asegurar que se estará diseñando para la situación más crítica. Las propuestas para el pre-dimensionamiento que se encuentran en libros de diseño de muros de contención, no son dimensiones definitivas que un muro necesitaría para soportar cargas dinámicas, por lo tanto éstas deben ser ajustadas hasta cumplir los factores de seguridad mínimos.

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 que se propuso y que la herramienta computacional calcula, se garantiza que el muro cumplirá con los desplazamientos admisibles que exige la NSR-10.

El análisis dinámico por elementos finitos, y la posterior comparación entre equilibrio límite y deformaciones fue favorable en términos generales. Sin embargo, se debe tener mucho cuidado con la definición de las condiciones fronteras del modelo, sobre todo aquellas que corresponden al análisis dinámico.

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 mismo los resultados obtenidos durante la fase de elaboración del proyecto en los dos métodos se encontraban un poco alejados de la realidad, motivo que nos hizo redimensionar el muro en varias ocasiones para los diversos análisis de sensibilidad que se realizaron para revisar las variables más importantes en estudio

Los resultados del método Mononobe - Okabe pese a que su planteo parece muy general, al considerar tantas variables genera ciertas limitaciones debido a las hipótesis planteadas por los autores (**Ver Tabla 1**), como es el tipo y las propiedades del suelo, además que las variables no son independientes entre sí y en la práctica toman valores bastante definidos.

PLAXIS 2D es una herramienta computacional muy completa pero al momento de modelar el muro cantiléver en el programa nos encontramos con que se debe

hacer una serie de suposiciones debido a que el programa no cuenta con una herramienta específica para este tipo de estructura y genera cierta incertidumbre en los resultados obtenidos.

8. BIBLIOGRAFIA

- i. Torres, R. 2003. "ANÁLISIS Y DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN DE CONCRETO ARMADO" (Método Mononobe-Okabe). Mérida Venezuela. Universidad de los Andes Mérida-Venezuela
- ii. Bowles, J.1988. "FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN". New York USA. Cuarta Edition. McGraw-Hill Book Company,
- iii. Jara, A. 2001. "ESTUDIO DE LA APLICABILIDAD DE MATERIALES COMPUESTOS AL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN DE TIERRAS Y SU INTERACCIÓN CON EL TERRENO, PASA SU EMPLEO EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DIARIA" Tesis Doctoral. Madrid España. Universidad Politécnica De Madrid.
- iv. Herrera, J. 2009. "IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA PARA DISEÑO DE MUROS DE CONTENCIÓN CON CONTRAFUERTE Y DE TIERRA ARMADA PARA EL LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA" Tesis de Grado. Loja Ecuador. Universidad Técnica Particular de Loja-Ecuador.
- v. Braja M. Das, G. R. (2011). Principles of Soil Dynamics Second Edition. Cengage Learning.
- vi. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (**ASIS**). 2010. NSR-10, Título A "REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO Y CONTRUCCION SISMO RESISTENTE", Título B "CARGAS", Títulos C-14 "MUROS". Título H "ESTUDIOS GEOTÉCNICOS" Título H-6 Estructuras de contención". Bogotá D.C. Colombia
- vii. PLAXIS 2D "**Versión 8.5**".2004. General Information.
- viii. PLAXIS 2D "**Versión 8.5**". 2004. Reference Manual.
- ix. PLAXIS 2D "**Versión 8.5**".2004. Tutorial Manual.
- x. VADILLO, FERNANDO. 2006 Una Introducción al Método de los Elementos Finitos.
- xi. Calavera, J. (2002-2003). MUROS DE CONTENCIÓN Y MUROS DE SOTANO, GUIA DOCENTE. Barcelona España. ESCUELA UNIVERSITARIA POLITECNICA DE BARCELONA

- xii.** Dimensionamiento de un muro Cantiléver, fecha de acceso el día 13 de
Noviembre de 2013,
<http://www.jorgealvahurtado.com/files/Diseno%20de%20Muros%20de%20Contencion.pdf>