

Análisis Sísmico en Muros de Contención: Métodos Pseudo-Estáticos Vs Método Dinámico

Julian Andrés Gómez Ruíz

Trabajo de Grado para Optar al título de Ingeniero Civil

Director

Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Ph. D en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A mi padre Carlos Roberto Gómez, espero algún día ser para mi hijo todo lo que tú eres para mis hermanos y para mi. Gracias porque siempre serás la prueba más grande de que TODO ES POSIBLE, gracias por demostrar lo que realmente es luchar por aquello que se ama, gracias por luchar cada minuto por tus hijos, tu esposa y tu familia, porque aunque se presenten mil obstáculos en el camino, Dios jamás nos da cargas las cuales no podamos soportar, y cuando terminan nuestras fuerzas justo ahí comienzan las tuyas.

A mi madre María Patricia Ruíz, por su infinito amor y dedicación, por estar presente en cada momento de mi vida, gracias por tanto esfuerzo y sacrificio; espero cada día de mi vida hacerlos sentir tan orgullosos de mi, como yo lo estoy de que ustedes dos sean mis padres, porque todo lo que soy se los debo a ustedes.

A mis hermanos Johan y Leo, por todo su cariño y apoyo en todo momento, son un gran orgullo para mi y todo un ejemplo a seguir.

A mi esposa Jurley por todo su amor, por brindarme la oportunidad de construir una vida juntos y edificar un hogar con nuestro hijo.

A mi hijo Alejandro, porque sin duda alguna, tú te convertiste en mi principal motivación, porque cada vez que llegue a sentirme agotado, tú me dabas fuerzas para luchar, porque cada segundo de sacrificio y dedicación en mi vida, valió y valdrá la pena por ti. TE AMO ♥

JULIAN GÓMEZ

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al profesor Jorge Alejandro Mendoza, por su apoyo y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto, y más aún por su gran amistad, porque la vida nos cruza con gente muy valiosa y ¡¡vos, sin duda alguna, sos una de esas personas mijo!!.

Mi total admiración y respeto para él, porque como profesional es simplemente brillante y como ser humano una de las mejores personas que he tenido la suerte de conocer.

Muchas gracias no solo por su ayuda en este proyecto profe, gracias por todo!!

JULIAN GÓMEZ

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2. Marco teórico	16
2.1 Muros de contención	17
2.1.1 Tipos de muros de contención.	17
2.2 Tipos de fallas en muros de contención	18
2.2.1 Falla por deslizamiento	19
2.2.2 Falla por volcamiento	19
2.2.3 Falla por perdida de la capacidad portante del suelo	20
2.3 Factores de seguridad	20
2.3.1 Factor de seguridad por deslizamiento.	20
2.3.2 Factor de seguridad por volcamiento.	21
2.3.3 Factor de seguridad por capacidad portante del suelo.....	21
2.4. Teorías de presión lateral de tierras	21
2.4.1 Presión en reposo	22
2.4.2 Presión activa.....	22
2.4.3 Presión pasiva	22
2.5. Análisis sísmico en muros de contención	22
2.5.1 Métodos de análisis sísmico en muros de contención	23

3. Metodología	28
3.1 Especificaciones de los muros sometidos al análisis sísmico y sus respectivos suelos de relleno.	28
3.1.1 Muro rígido.....	29
3.1.2 Muro flexible	31
3.2 Análisis sísmico en un muro rígido.....	32
3.2.1 Método de Coulomb	33
3.2.2 Método de Monobe-Okabe	43
3.2.3 PLAXIS 2D (módulo dinámico).....	44
3.3 Análisis sísmico en un muro flexible.....	48
3.3.1 Método de Coulomb	49
3.3.2 Método de Monobe-Okabe	52
3.3.3 PLAXIS 2D (módulo dinámico).....	52
4. Resultados	55
5. Conclusiones	56
Bibliografía	58
Apéndices.....	60

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Datos iniciales del muro rígido.....	29
Tabla 2. Coeficientes de aceleración sísmica muro rígido.....	30
Tabla 3. Datos iniciales suelo del relleno muro rígido.....	30
Tabla 4. Datos iniciales del muro flexible.....	31
Tabla 5. Datos iniciales del relleno muro flexible.....	32
Tabla 6. Coeficientes de aceleración sísmica muro flexible.....	32
Tabla 7. Procedimiento para calcular $\sum M_R$	35
Tabla 8. Factores de la ecuación de Meyerhof.....	42
Tabla 9. Resumen de resultados: análisis sísmico muro rígido.....	55
Tabla 10. Resumen de resultados: análisis sísmico muro flexible.....	55
Tabla 11. Información general acelerograma sísmico: 10/03/2015, Los Santos, Santander.....	65
Tabla 12. Valores del acelerograma sísmico ingresados en PLAXIS 2D.....	67

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Sección transversal muro rígido.....	17
Figura 2. Sección transversal muro flexible.....	18
Figura 3. Falla por deslizamiento.....	19
Figura 4. Falla por volcamiento.....	19
Figura 5. Falla por capacidad de carga portante.....	20
Figura 6. Presión activa de Coulomb.....	23
Figura 7. Presión de tierras Monobe-Okabe.....	26
Figura 8. Muro rígido sometido al análisis sísmico.....	29
Figura 9. Muro flexible sometido al análisis sísmico.....	31
Figura 10. Geometría del muro rígido en el software PLAXIS 2D.....	46
Figura 11. Presión de tierras muro rígido para un tiempo = 0 [s]	46
Figura 12. Presión de tierras muro rígido para un tiempo = 0.16 [s].....	47
Figura 13. Presión de tierras muro rígido para un tiempo = 5 [s].....	47
Figura 14. Geometría del muro flexible.....	53
Figura 15. Presion de tierras muro flexible para un tiempo = 0 [s].....	53
Figura 16. Presión de tierras muro flexible para un tiempo = 5 [s].....	54
Figura 17. Configuración inicial PLAXIS 2D.....	60
Figura 18. Congiguración inicial PLAXIS 2D.....	61
Figura 19. Esquema del modelo del muro rígido en PLAXIS 2D.....	62
Figura 20. Propiedades del suelo de relleno en PLAXIS 2D.....	63
Figura 21. Propiedades del suelo de relleno en PLAXIS 2D.....	64

Figura 22. Propiedades del concreto del muro rígido en PLAXIS 2D	64
Figura 23. Acelerograma sísmico en dirección X ingresado en PLAXIS 2D	66
Figura 24. Acelerograma sísmico en dirección Y ingresado en PLAXIS 2D.....	66
Figura 25. Malla de elementos finitos generada para el muro rígido en PLAXIS 2D.....	68
Figura 26. Construcción por etapas software PLAXIS 2D.....	69
Figura 27. Ejecución del programa de cálculos en PLAXIS 2D.....	70
Figura 28. Propiedades del muro flexible en PLAXIS 2D.....	71
Figura 29. Malla de elementos finitos generada para el muro flexible en PLAXIS 2D.....	72

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Configuración inicial software PLAXIS 2D.....	60 - 61
Apéndice B. Esquema del modelo del muro rígido en PLAXIS 2D.....	62
Apéndice C. Creación de los materiales del suelo y muro rígido en PLAXIS 2D.....	63 - 64
Apéndice D. Información general acelerograma sísmico 10/03/2015 Los Santos, Santander....	65
Apéndice E. Datos del acelerograma sísmico luego de realizar filtros.....	66 - 67
Apéndice F. Generación de la malla de elementos finitos muro rígido.....	68
Apéndice G. Configuración de la pestaña de construcción por etapas.....	69
Apéndice H. Ejecución del programa de cálculos del software PLAXIS 2D.....	70
Apéndice I. Propiedades del material del muro tablestaca en PLAXIS 2D.....	71
Apéndice J. Generación de la malla de elementos finitos muro flexible.....	72

RESUMEN.

TÍTULO: ANÁLISIS SÍSMICO EN MUROS DE CONTENCIÓN: MÉTODOS PSEUDO-ESTÁTICOS VS MÉTODO DINÁMICO.*

AUTOR: JULIAN ANDRÉS GÓMEZ RUÍZ.**

PALABRAS CLAVE: ANÁLISIS SÍSMICO, MUROS FLEXIBLES, MUROS RÍGIDOS, MÉTODO DE MOHR COULOMB, MÉTODO DE MONOBE-OKABE, PLAXIS 2D, MÓDULO DINÁMICO PLAXIS 2D.

DESCRIPCIÓN:

Sin duda alguna, uno de los mayores retos al se enfrenta en la actualidad el campo de la ingeniería civil, es la acción generada por las cargas que son transmitidas a través del suelo a las estructuras durante eventos sísmicos, ya que aunque estos sucesos pueden ser monitoreados gracias a los avances tecnológicos con los cuales cuentan algunas estaciones sismológicas, son eventos de la naturaleza imposibles de evitar, los cuales pueden llegar a convertirse en grandes desastres, causando grandes daños no solo a la infraestructura de un lugar, si no también llegando a cobrar las vidas de sus habitantes.

El presente trabajo de investigación, pretende realizar un análisis comparativo entre métodos pseudo-estáticos tradicionales (método de Coulomb, método de Monobe-Okabe) utilizados en el estudio de efectos sísmicos sobre diferentes tipos de muros de contención, frente a un método dinámico mediante el modelamiento en el software PLAXIS 2D (módulo dinámico); para ello serán seleccionados los muros sometidos a estudio al igual que sus respectivos rellenos de contención, posteriormente se calcularán los coeficientes de presión lateral de tierras aplicando cada uno de los respectivos métodos de análisis sísmico, datos con los cuales se determinaran las presiones de tierras ejercidas sobre cada muro, las cuales a su vez permitirán realizar los respectivos análisis de estabilidad de cada muro, para finalmente llegar a los factores de seguridad que ofrece cada método de análisis sísmico y evidenciar las ventajas y desventajas de aplicar cada uno de ellos.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo, PhD.

ABSTRACT

TITLE: SEISMIC ANALYSIS IN CONTAINING WALLS: PSEUDO-STATIC METHODS VS DYNAMIC METHOD.*

AUTHOR: JULIAN ANDRÉS GÓMEZ RUÍZ.**

KEYWORDS: SEISMIC ANALYSIS, FLEXIBLE WALLS, RIGID WALLS, MOHR COULOMB METHOD, MONOBE-OKABE METHOD, PLAXIS 2D, PLAXIS 2D DYNAMIC MODULE.

DESCRIPTION:

Undoubtedly, one of the biggest challenges facing the civil engineering field today is the action generated by the loads that are transmitted through the ground to structures during seismic events, since although these events can be monitored thanks to the technological advances that some seismological stations have, they are events of nature impossible to avoid, which can become major disasters, causing great damage not only to the infrastructure of a place, but also reaching collect the lives of its inhabitants.

This research work aims to perform a comparative analysis between traditional pseudo-static methods (Coulomb method, Monobe-Okabe method) used in the study of seismic effects on different types of retaining walls, compared to a dynamic method through modeling in the 2D PLAXIS software (dynamic module); For this, the walls under study will be selected as well as their respective containment fillings, then the lateral earth pressure coefficients will be calculated by applying each of the respective seismic analysis methods, data with which the pressures of exerted lands will be determined on each wall, which in turn will allow to perform the respective stability analysis of each wall, to finally reach the safety factors offered by each seismic analysis method and demonstrate the advantages and disadvantages of applying each of them.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo, PhD.

Introducción

Colombia es una nación cuya ubicación geográfica la convierte en un territorio de constante actividad sísmica, producto del movimiento de las placas, en el que interactúan las del Caribe-Nazca y Sur América. La mayor parte de estos eventos sísmicos, tienen su origen en el departamento de Santander, debido a que en éste se encuentra una de las zonas más sísmicamente activas del mundo, conocido como el “Enjambre sísmico de Bucaramanga”, localizado en el municipio de Los Santos, convirtiendo al departamento en una zona de alta amenaza sísmica (GÓMEZ-P, 1980) (Ramirez, 1975).

Aunque estos eventos pueden ser monitoreados gracias a los avances tecnológicos con los que cuentan estaciones sismológicas (Ramirez, 1975), son episodios de la naturaleza imposibles de evitar; no obstante, es posible desarrollar medidas preventivas, para evitar que estos sucesos terminen convirtiéndose en grandes desastres, llegando a cobrar no solo incalculables daños materiales en la infraestructura del país, si no las vidas de sus habitantes.

Sin duda alguna, uno de los principales factores que contribuyen a que un evento sísmico termine convirtiéndose en tragedia es el colapso de obras civiles (e.g., edificios, puentes, muros de contención, casas, etc.), generalmente ocasionado por un inadecuado proceso de análisis y diseño; como sucedió durante el temblor del 10 de Marzo del 2015, cuyo epicentro fue en el municipio de Los Santos, con una magnitud de 6.6 grados en la escala de Richter, que con una duración de 30 segundos causó daños estructurales en 130 edificaciones del municipio de Betulia y varias personas heridas, 30 edificaciones en el municipio de Rionegro, además de daños en

algunas estructuras importantes del área metropolitana de Bucaramanga, como el Coliseo Bicentenario Alejandro Galvis Ramírez (*Vanguardia Liberal*, 2015).

En general, en nuestro país, los efectos que generan las cargas sísmicas transmitidas del suelo a las estructuras son tomados de una manera muy simplista, ya que las aceleraciones generadas por el evento sísmico sobre el suelo son consideradas como cargas verticales y horizontales constantes (e.g., análisis pseudo-estáticos) (*Kramer, 1996*), las cuales se calculan mediante coeficientes estipulados en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) y que toman diferentes valores dependiendo de la zona de amenaza sísmica en la cual se encuentre ubicada cada ciudad (*AIS, 2010*). Esta metodología debería de ser mejorada, y en toda estructura se deberían realizar análisis sísmicos complementarios a los ya existentes en la norma, brindando así, una disminución de riesgo.

El presente trabajo, pretende realizar un análisis sísmico en diferentes tipos de muros de contención (muros rígidos y muros flexibles) (*Das, 2012*) (*Bowles, 1997*), aplicando para ello métodos pseudo-estáticos tradicionales (*Coulomb, Monobe-Okabe*) (*Bowles, 1997*) (*Camargo García & Gonzalez Escamilla, 2011*) y un método dinámico mediante el modelamiento en el software PLAXIS 2D (módulo dinámico) (*2D, 2017*) (*Díaz Díaz & López Alvarado, 2008*) (*Camargo García & Gonzalez Escamilla, 2011*), para luego comparar los resultados obtenidos en los dos métodos, evidenciando así, las diferencias, ventajas y desventajas de utilizar los dos métodos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un análisis comparativo entre métodos pseudo-estáticos tradicionales (método de Coulomb, método de Monobe-Okabe) utilizados en el estudio de efectos sísmicos sobre diferentes tipos de muros de contención, frente a un método dinámico mediante el modelamiento en el software PLAXIS 2D (módulo dinámico).

1.2 Objetivos Específicos

- Definir los tipos de muros y sus rellenos de contención sobre los cuales se realizarán los respectivos análisis sísmicos en el desarrollo del proyecto.
- Realizar un análisis sísmico en algunos tipos de muros de contención mediante métodos pseudo-estáticos (método de Coulomb, método de Monobe-Okabe).
- Modelar en el software PLAXIS 2D (módulo dinámico) los tipos de muro de contención ya definidos para el estudio de éste proyecto, con la finalidad de obtener un análisis sísmico mediante un método dinámico.
- Comparar los resultados obtenidos mediante los métodos pseudo-estáticos y el método dinámico, evidenciando así, las diferencias, ventajas y desventajas de aplicar cada método durante un análisis sísmico en muros de contención.

2. Marco Teórico

2.1 Muros de contención

Los muros de contención son estructuras que tienen como función contener masas de suelo, las cuales pueden ser de terreno natural o relleno artificial.

2.1.1 Tipos de muros de contención. Existen dos grandes tipos de muros de contención según su material de fabricación: muros rígidos y muros flexibles; los cuales, aunque tienen una misma función, presentan algunas características diferentes, que permiten determinar cuál de los dos será el más eficiente, dependiendo de las necesidades de cada proyecto (Kramer, 1996).

2.1.1.1 Muros rígidos. Son estructuras de contención generalmente de concreto que no permiten deformaciones importantes sin romperse. Se apoyan sobre suelos competentes para transmitir fuerzas de su cimentación al cuerpo del muro y de esta forma generar fuerzas de contención. Los muros rígidos actúan como una masa relativamente concentrada que sirve de elemento contenedor de la masa inestable (Kramer, 1996). Ej: Muro de gravedad en voladizo.

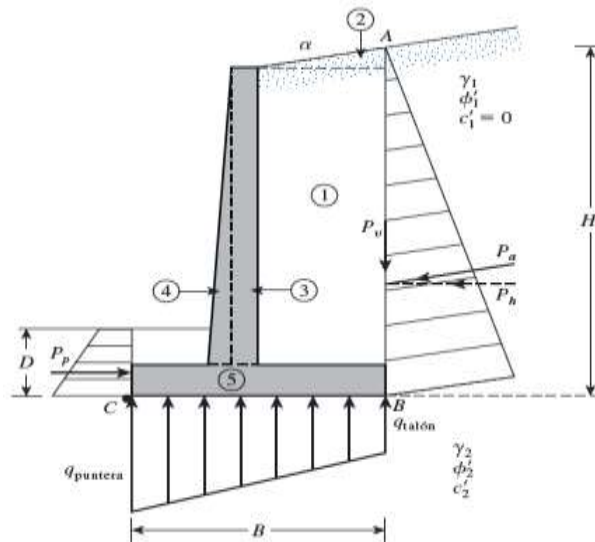


Figura 1. Sección transversal muro rígido (muro de gravedad).

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones; Brajas M. Das.

2.1.1.2 Muros flexibles. Son aquellas estructuras de contención en las que los movimientos de sólido rígido, y los movimientos debidos a la flexión de la propia estructura, se producen en porcentajes similares. La propia deformación hace que el movimiento de la estructura influya tanto en el valor, como en la forma de la ley de empujes sobre la estructura (Kramer, 1996). Ej: Tablestacas.

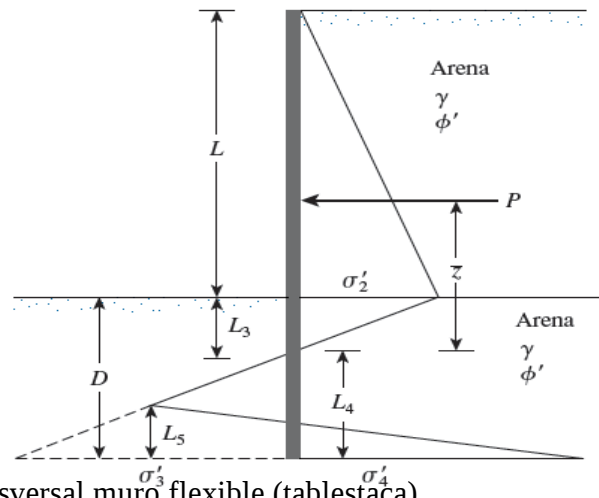


Figura 2. Sección transversal muro flexible (tablestaca).

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones; Brajas M. Das.

2.2 Tipos de fallas en muros de contención

Un muro de contención puede verse afectado a causa de las presiones y cargas a la cuales son sometidas la estructura y el suelo, generando tres posibles tipos de fallas: falla por deslizamiento, falla por volcamiento y falla por capacidad portante del suelo (Das, 2012).

2.2.1 Falla por deslizamiento. Se produce cuando la fuerza de deslizamiento o corte es mayor que la fuerza de fricción entre el muro y el suelo (Das, 2012).

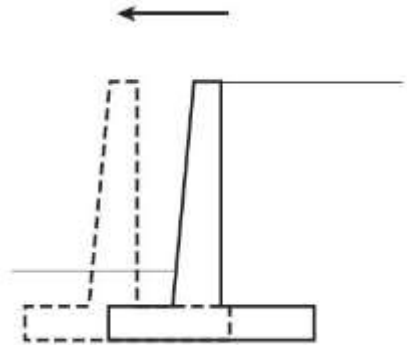


Figura 3. Falla por deslizamiento.

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones; Brajas M. Das.

2.2.2 Falla por volcamiento. Se produce cuando el momento de volcamiento, debido al empuje, es mayor que el momento resistente, que se obtiene con el peso del muro y del relleno colaborante (Das, 2012)

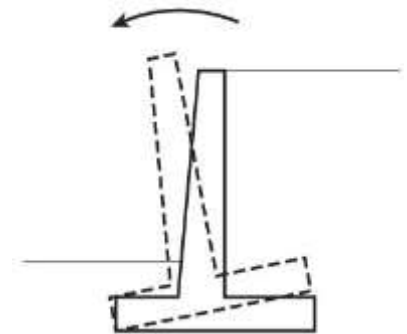


Figura 4. Falla por volcamiento.

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones; Brajas M. Das.

2.2.3 Falla por pérdida de la capacidad portante del suelo. Se debe a posibles asentamientos diferenciales por ser la presión actuante sobre el suelo de la cimentación, superior a su capacidad resistente (Das, 2012).

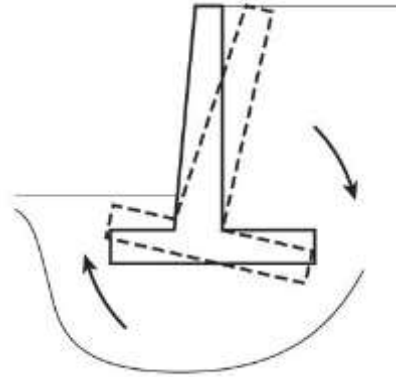


Figura 5. Falla por capacidad de carga portante.

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones; Brajas M. Das.

2.3 Factores de seguridad

Son el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real a que se verá sometida la estructura. Tienen como función garantizar que bajo desviaciones aleatorias a los requerimientos previstos, exista un margen extra de funcionalidad de la estructura por encima de las mínimas estrictamente necesarias (Bowles, 1997).

2.3.1 Factor de seguridad por deslizamiento. Se obtiene estableciendo la relación entre la sumatoria de las fuerzas horizontales resistentes al deslizamiento del muro y la sumatoria de las fuerzas horizontales de empuje sobre la estructura (Bowles, 1997).

$$FS_{(\text{deslizamiento})} = \frac{\sum F_R}{\sum F_d}$$

2.3.2 Factor de seguridad por volcamiento. Se obtiene estableciendo la relación entre la sumatoria de los momentos generados por las fuerzas que tienden a volcar el muro y la sumatoria de los momentos de las fuerzas que tienden a resistir el volcamiento de la estructura (Bowles, 1997).

$$FS_{(\text{volcamiento})} = \frac{\sum M_R}{\sum M_o}$$

2.3.3 Factor de seguridad por capacidad portante del suelo. Se produce cuando la fuerza de deslizamiento o corte es mayor que la fuerza de fricción entre el muro y el suelo (Bowles, 1997)

$$FS_{(\text{capacidad carga suelo})} = \frac{q_u}{q_{\max}}$$

2.4. Teorías de presión lateral de tierras

Uno de los principios básicos que es necesario tener con total claridad al momento de realizar estudios en muros de contención, es la teoría de *Presión Lateral de tierras*, que ha sido formulada por diferentes autores con algunas variaciones, pero la cual en general establece que la presión lateral que actúa sobre un muro en condiciones de talud estable, es una función de los materiales, las sobrecargas que la estructura soporta, el nivel de agua freática, las condiciones de cimentación, la magnitud y modo del movimiento relativo del muro. Existen tres tipos de presión de tierras de acuerdo a las características de deformación supuestas en la interacción suelo-estructura (Das, 2012) (Bowles, 1997)

2.4.1 Presión en reposo. En esta condición el suelo no ha soportado ninguna deformación lateral; se presenta cuando el suelo no se ha movido detrás del muro y se le ha prevenido de expandirse o contraerse (Bowles, 1997)

2.4.2 Presión activa. Es la presión lateral ejercida por el suelo detrás de la estructura cuando la pared se mueve lo suficiente hacia afuera para alcanzar un valor mínimo (Bowles, 1997).

2.4.3 Presión pasiva. Es la presión lateral ejercida sobre la pared cuando el muro se mueve lo suficiente hacia el suelo hasta que la presión alcanza un valor máximo (Bowles, 1997).

2.5. Análisis sísmico en muros de contención

Las masas de suelos en muros de contención suelen estar sometidas a cargas constantes, sin embargo, estas pueden presentar cambios durante un evento sísmico, debido a las condiciones dinámicas que son transmitidas al suelo y la estructura. Es por esto que se hace indispensable realizar un análisis sísmico en este tipo de obras, teniendo en cuenta los efectos dinámicos generados por el movimiento telúrico, que permitan apreciar con mayor exactitud los posibles resultados del mismo y generando así una disminución de riesgo (Kramer, 1996)

2.5.1 Métodos de análisis sísmico en muros de contención. Existen diferentes métodos empleados para realizar estudios sísmicos en muros de contención, los cuales tienen algunas variaciones según cada teoría en la cual se fundamentan, y que a su vez afectan los resultados obtenidos en cada análisis. Entre estos métodos encontramos algunos bastante simples como los estáticos, otros como los pseudo-estáticos generan una mayor confiabilidad, y algunos más avanzados se pueden realizar por medio de herramientas computacionales (Das, 2012).

2.5.1.1 Método de Coulomb. Coulomb asume en su teoría que la fuerza actuante en la espalda del muro es el resultado del peso de la cuña de suelo sobre una superficie plana de falla y que es una carga constante en el tiempo, ignorando las condiciones dinámicas que pueden ser generadas en el suelo durante un evento sísmico (Das, 2012). Para ello Coulomb plantea el cálculo de la presión activa y presión pasiva mediante las siguientes ecuaciones:

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot K_A \cdot \gamma \cdot H^2 \quad P_P = \frac{1}{2} \cdot K_P \cdot \gamma \cdot H^2$$

Figura 6. Presión activa de Coulomb.

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones; Brajas M. Das.

Siendo:

P_A = Presión activa

P_p = Presión pasiva

γ = Peso específico del suelo

H = Altura del muro de contención

K_A = Coeficiente de presión activa

K_p = Coeficiente de presión pasiva

Donde:

$$K_A = \frac{\sin^2 (\beta + \Phi')}{\sin^2 (\beta) \cdot \sin (\beta - \Phi') \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin (\Phi' + \delta') \cdot \sin (\Phi' - \alpha)}{\sin (\beta - \delta') \cdot \sin (\beta + \alpha)}} \right]^2} \quad (1)$$

$$K_p = \frac{\sin^2 (\beta - \Phi')}{\sin^2 (\beta) \cdot \sin (\beta + \Phi') \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin (\Phi' + \delta') \cdot \sin (\Phi' + \alpha)}{\sin (\beta + \delta') \cdot \sin (\beta + \alpha)}} \right]^2} \quad (2)$$

β = Ángulo de inclinación del muro

Φ' = Ángulo de fricción del suelo

α = Ángulo inclinación del relleno

δ' = Ángulo fricción suelo/muro

2.5.1.2 Método de Monobe-Okabe. Es considerado un método pseudo-estático, y el de mayor frecuencia en el diseño y análisis de muros de contención. Esta teoría está fundamentada en los planteamientos de Coulomb, siendo ampliada para tomar en cuenta las variaciones dinámicas que sufren el suelo y la estructura durante un evento sísmico, introduciendo coeficientes de aceleraciones horizontales (K_h) y verticales (K_v) del sismo, los cuales afectan directamente el ángulo de la falla del suelo y las presiones laterales de tierras (Das, 2012), los cuales se pueden definir como:

$$K_v = \frac{\text{Componente vertical de la aceleración del sismo}}{\text{Aceleración debida a la gravedad}}$$

$$K_h = \frac{\text{Componente horizontal de la aceleración del sismo}}{\text{Aceleración debida a la gravedad}}$$

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot K_A \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot (1 - K_v)$$

$$P_P = \frac{1}{2} \cdot K_P \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot (1 - K_v)$$

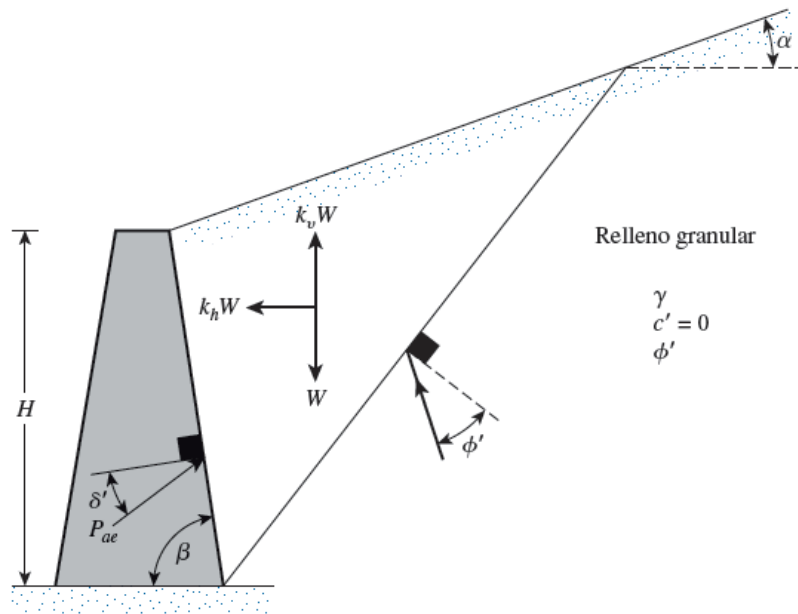


Figura 7. Presión de tierras Monobe-Okabe.

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones; Brajas M. Das.

Siendo:

P_A = Presión activa

P_P = Presión pasiva

γ = Peso específico del suelo

H = Altura del muro de contención

K_A = Coeficiente de presión activa

K_P = Coeficiente de presión pasiva

Donde:

$$K_A = \frac{\sin^2 (\beta + \Phi' - \theta')}{\cos (\theta') \cdot \sin^2 (\beta) \cdot \sin (\beta - \theta' + \delta') \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin (\Phi' + \delta') \cdot \sin (\Phi' - \alpha - \theta')}{\sin (\beta - \delta' - \theta') \cdot \sin (\beta + \alpha)}} \right]^2} \quad (3)$$

$$K_P = \frac{\sin^2 (\beta - \Phi' - \theta')}{\cos (\theta') \cdot \sin^2 (\beta) \cdot \sin (\beta - \theta' - \delta') \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin (\Phi' + \delta') \cdot \sin (\Phi' + \alpha - \theta')}{\sin (\beta + \delta' - \theta') \cdot \sin (\beta + \alpha)}} \right]^2} \quad (4)$$

$$\theta' = \tan^{-1} \left[\frac{K_H}{1 - K_V} \right]$$

β = Ángulo de inclinación del muro

Φ' = Ángulo de fricción del suelo

α = Ángulo inclinación del relleno

δ' = Ángulo fricción suelo/muro

2.5.1.3 Método mediante el modelamiento en PLAXIS 2D (módulo dinámico). PLAXIS 2D es un software computacional, el cual se basa en el método matemático de elementos finitos para dar solución a los modelamientos realizados, destinado al análisis bidimensional de la deformación y estabilidad en ingeniería geotécnica y mecánica de rocas (2D, 2017).

En métodos tradicionales de análisis en muros de contención, las cargas generadas durante un sismo simplemente son ignoradas o establecidas como cargas constantes, generando resultados no tan precisos; ante esto, el software de PLAXIS 2D brinda una solución con su módulo dinámico, el cual permite ingresar los datos correspondientes a las cargas dinámicas originadas durante el evento sísmico, llevando a un análisis más cercano a la realidad y brindando mayor exactitud en los procesos de análisis (2D, 2017) (Díaz Díaz & López Alvarado, 2008) (Camargo García & Gonzalez Escamilla, 2011)

3. Metodología

El presente trabajo de investigación, pretende realizar un análisis comparativo entre métodos pseudo—estáticos tradicionales (método de Coulomb, método de Monobe-Okabe) utilizados en el estudio de efectos sísmicos sobre diferentes tipos de muros de contención, frente a un método dinámico mediante el modelamiento en el software PLAXIS 2D (módulo dinámico).

3.1 Especificaciones de los muros sometidos al análisis sísmico y sus respectivos suelos de relleno.

Para la realización del análisis sísmico comparativo entre métodos pseudo-estáticos y el método dinámico, se hace necesario definir los tipos de muro y sus respectivos rellenos, sobre los cuales

se aplicarán cada uno de los métodos, generando así resultados que permitan evidenciar las diferencias ventajas y desventajas de aplicar cada uno de ellos.

En el presente proyecto de investigación, serán sometidos a estudio dos tipos de muros: un muro rígido y un muro flexible, los cuales contarán con sus respectivas dimensiones y especificaciones, asumiendo que estas ya cumplen con los requerimientos de diseño, dado que el objetivo de este proyecto no es diseñar, si no analizar los efectos sísmicos en la estructura.

3.1.1 Muro rígido

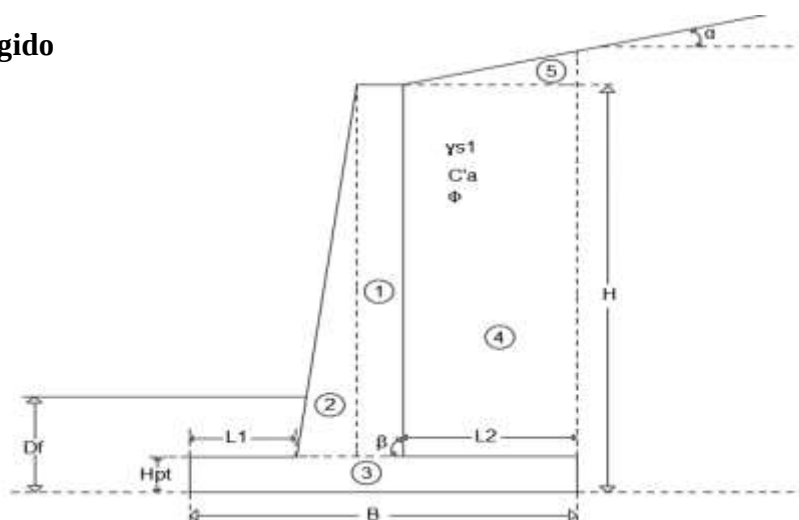


Figura 8. Muro rígido sometido al análisis sísmico.

Tabla 1. Datos iniciales del muro rígido.

DATOS INICIALES DEL MURO			
Concepto	Nomenclatura	Unidad de medida	Valor
Altura del muro	H	m	6,1
Base del muro	B	m	4
Puntera	L ₁	m	0,7
Talón	L ₂	m	2,6
Peso específico concreto	γ _c	kN/m ³	23,58
Profundidad cimentación	D _f	m	1,5
Altura de la puntera y talón	H _{pt}	m	0,7
Coronación	Cor	m	0,5
Longitud de la cimentación	L	m	5
F'c del concreto	f _c	MPa	21

Tabla 2. Coeficientes de aceleración sísmica muro rígido.

PARA APLICAR MONOBE-OKABE			
Coeficiente componente horizontal aceleracion sismo	K_h	No aplica	0,25
Coeficiente componente vertical aceleracion sismo	K_v	No aplica	0

Tabla 3. Datos iniciales suelo del relleno muro rígido.

DATOS INICIALES DEL SUELO			
Concepto	Nomenclatura	Unidad de medida	Valor
Peso específico relleno del muro	γ_{s1}	kN/m ³	18
Peso específico del suelo bajo la cimentación	γ_{s2}	kN/m ³	18
Adhesión entre el suelo y el muro	C'_{a1}	kN/m ³	0
Ángulo de fricción del suelo relleno	Φ_1	Grados	30
Ángulo de inclinación del muro con la horizontal	β	Grados	90
Ángulo inclinación del relleno respecto a la horizontal	α	Grados	5
Adhesión entre el suelo y la cimentación	C'_{a2}	kN/m ²	20
Ángulo de fricción del suelo bajo la cimentación	Φ_2	Grados	30

3.1.2 Muro flexible

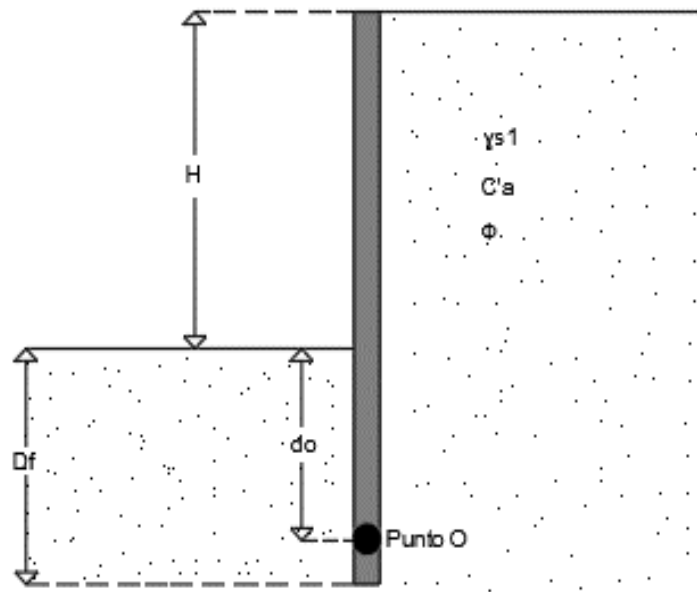


Figura 9. Muro flexible sometido al análisis sísmico.

Tabla 4. Datos iniciales del muro flexible.

DATOS INICIALES DEL MURO			
Concepto	Nomenclatura	Unidad de medida	Valor
Altura tablestaca por encima del terreno	H	m	2,5
Profundidad cimentación	D _f	m	3
Profundidad de penetración teorica	d _o	m	2,5

Tabla 5. Datos iniciales suelo del relleno muro flexible.

DATOS INICIALES DEL SUELO			
Concepto	Nomenclatura	Unidad de medida	Valor
Peso específico relleno del muro	γ_{s1}	kN/m ³	18
Peso específico saturado relleno del muro	γ_{s1sat}	kN/m ³	20
Peso específico del suelo bajo la cimentación	γ_{s2}	kN/m ³	16
Adhesión entre el suelo y el muro	C'_{a1}	Kn/m ²	0
Ángulo de fricción del suelo relleno	Φ_1	Grados	30
Ángulo de inclinación del muro con la horizontal	β	Grados	90
Ángulo inclinación del relleno respecto a la horizontal	α	Grados	5
Adhesión entre el suelo y la cimentación	C'_{a2}	kN/m ²	20
Ángulo de fricción del suelo bajo la cimentación	Φ_2	Grados	30

Tabla 6. Coeficientes de aceleración sísmica muro flexible.

PARA APLICAR MONOBE-OKABE			
Coeficiente componente horizontal aceleracion sismo	K_h	No aplica	0,25
Coeficiente componente vertical aceleracion sismo	K_v	No aplica	0

3.2 Análisis sísmico en un muro rígido.

Una vez definidas las dimensiones y especificaciones del muro y suelo, se procede la realización de cada uno de los métodos de análisis sísmico a la estructura: método de Coulomb, método de Monobe-Okabe y método mediante el modelamiento en el software PLAXIS 2D (módulo dinámico).

3.2.1 Método de Coulomb. Aplicando la teoría de Coulomb (1), (2), se calculan los respectivos coeficientes de presión de tierras K_a y K_p , con los datos iniciales de la estructura y el suelo, obteniendo como resultado:

$$K_a = 0.316$$

$$K_p = 6.311$$

Una vez determinados los coeficientes de presión lateral de tierras, se calculan la presión activa y la presión pasiva:

$$P_a = 105.982 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

$$P_p = 127.785 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

Se determinan los puntos de aplicación de las presiones:

$$Z_a = 2.033 \text{ [m]}$$

$$Z_p = 0.5 \text{ [m]}$$

Finalmente se realizan los respectivos análisis de estabilidad del muro, determinando sus respectivos factores de seguridad.

3.2.1.1 Análisis por volcamiento. Se realiza el respectivo análisis por volcamiento del muro, para el cual:

$$FS_{(\text{volcamiento})} = \frac{\sum M_R}{\sum M_o}$$

Donde:

$\sum M_o$ = Sumatoria de momentos que tienden a volcar el muro.

$\sum M_R$ = Sumatoria de momentos que tienden a resistir el volcamiento del muro

Para el cálculo de $\sum M_o$, se emplea la siguiente ecuación:

$$\sum M_o = P_h \cdot \left(\frac{H'}{3} \right)$$

$$P_h = P_A \cdot \cos \alpha$$

$$P_h = 105.579 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

$$H' = H + t \cdot \tan \alpha$$

$$H' = 6.327 [\text{m}]$$

Remplazando:

$$\sum M_o = 105.57 \cdot \left(\frac{6.3}{3}\right)$$

$$\sum M_o = 222.68 \left[\frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}\right]$$

Para el cálculo de la sumatoria de los momentos que tienden a resistir el volcamiento del muro $\sum MR$, se puede elaborar la siguiente tabla, en la cual se divide el muro y el suelo en secciones, que facilitan el procedimiento a realizar, determinando así, para cada una de las secciones su respectiva área, peso unitario, brazo del momento medido desde el punto C y momento respecto al punto C. Considerando el punto C como la esquina inferior de la puntera del muro.

Tabla 7. Procedimiento para calcular $\sum MR$.

PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR $\sum MR$				
SECCIÓN	ÁREA [m ²]	PESO/LONGITUD UNITARIA DEL MURO [kN/m]	BRAZO DE MOMENTO MEDIDO DESDE	Momento respecto al punto C [Kn-m/m]
1	2,70	63,67	1,15	73,22
2	0,54	12,73	0,83	10,61
3	2,80	66,02	2,00	132,05
4	14,04	252,72	2,70	682,34
5	0,30	5,32	3,13	16,68
PV		9,24	4,00	36,95

Siendo:

PV = Componente vertical de la presión activa.

$$P_v = P_A \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

$$P_v = 9.237 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

Se obtiene:

$$\sum M_R = 951.84 \left[\frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \right]$$

Calculando el factor de seguridad:

$$FS_{(\text{volcamiento})} = \frac{\sum M_R}{\sum M_o}$$

$$FS_{(\text{volcamiento})} = \frac{951.845}{222.683}$$

$$FS_{(\text{volcamiento})} = 4.3$$

3.2.1.2 Análisis por deslizamiento. Se realiza el respectivo análisis por volcamiento del muro, para el cual:

$$FS_{(\text{deslizamiento})} = \frac{\sum F_R}{\sum F_d}$$

Donde:

$\sum F_R$ = Sumatoria de fuerzas horizontales resistentes.

$\sum F_d$ = Sumatoria de fuerzas horizontales de empuje.

Para el cálculo de $\sum F_d$, se emplea la siguiente ecuación:

$$\sum F_d = P_A \cdot \cos \alpha$$

$$\sum F_d = 105.982 \cdot \cos 5$$

$$\sum F_d = 105.57 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

Para el cálculo de $\sum F_R$, se emplea la siguiente ecuación:

$$\sum F_R = \left(\sum V \right) \cdot \tan \delta' + B \cdot C' + P_p$$

Donde:

$$B = \text{Base del muro}$$

$$C' = \text{Adhesión entre suelo y muro}$$

$$P_p = \text{Presión pasiva}$$

$$\sum V = \text{Sumatoria fuerzas verticales}$$

$$\sum V = 63.66 + 12.73 + 66.02 + 252.72 + 5.32 + 9.24$$

$$\sum V = 409.703 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

Remplazando valores:

$$\sum F_R = 409.7 \cdot \tan(20) + 4 \cdot 0 + 127.7$$

$$\sum F_R = 276.91 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

Calculando el factor de seguridad:

$$FS_{(\text{deslizamiento})} = \frac{\sum F_R}{\sum F_d}$$

$$FS_{(\text{deslizamiento})} = \frac{276.91}{105.57}$$

$$FS_{(\text{deslizamiento})} = 2.6$$

3.2.1.3 Análisis por capacidad de carga portante del suelo. Se realiza el respectivo análisis por capacidad de carga portante [6], para el cual:

$$FS_{(\text{capacidad carga suelo})} = \frac{q_u}{q_{\max}}$$

Donde:

q_u = Carga última que soporta el suelo, calculada mediante algún método de capacidad portante (Meyerhof)

$q_{\max}$ = Carga máxima que ocurre en la cimentación de la estructura (puntera)

Para el cálculo de $q_{\max}$, se emplea la siguiente ecuación:

$$q_{\max} = q_{\text{puntera}} = \frac{\sum V}{B} + \frac{e \cdot (\sum V) \cdot \frac{B}{2}}{\left(\frac{1}{12}\right) \cdot (B^3)}$$

$$q_{m \pm x} = \frac{\sum V}{B} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot e}{B}\right)$$

Donde:

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\sum M_R - \sum M_O}{\sum V}$$

$$e = \frac{4}{2} - \frac{951.8 - 222.68}{409.7}$$

$$e = 0.22 \text{ [m]}$$

Remplazando valores:

$$q_{m \pm x} = \frac{409.7}{4} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot 0.22}{4}\right)$$

$$q_{m \pm x} = 136.26 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$$

Para el cálculo de la carga última soportada por el suelo bajo la estructura (q_u), se utiliza alguno de los métodos existentes para determinar esta carga, en este caso son empleadas las ecuaciones de Meyerhof, las cuales se presentan a continuación:

$$q_u = C N_c S_c d_c i_c + q N_q S_q d_q i_q + 0.5 \gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma$$

Donde:

C = Cohesión

N_c, N_q, N_γ = Factores de carga de Meyerhof

S_c, S_q, S_γ = Factores de forma de Meyerhof

d_c, d_q, d_γ = Factores profundidad Meyerhof

i_c, i_q, i_γ = Factores inclinación Meyerhof

Aplicando el método de Meyerhof se obtiene:

Tabla 8. Factores de la ecuación de Meyerhof.

FACTORES DE MEYERHOF	
FACTORES DE CAPACIDAD DE CARGA	
N_c	30,14
N_q	18,40
N_g	15,67
COEFICIENTE DE PRESIÓN PASIVA	
K_p	3,00
FACTORES DE FORMA	
S_c	1,48
S_q	1,24
S_g	1,24
FACTORES DE PROFUNDIDAD	
d_c	1,13
d_q	1,06
d_g	1,06

Remplazando los valores de los factores de Meyerhof en la ecuación para calcular q_u , se obtiene:

$$q_u = 1111.55 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$$

Calculando el factor de seguridad:

$$FS_{(\text{capacidad carga suelo})} = \frac{q_u}{q_{\max}}$$

$$FS_{(\text{capacidad carga suelo})} = \frac{1111.55}{136.26}$$

$$FS_{(\text{capacidad carga suelo})} = 8.2$$

3.2.2 Método de Monobe-Okabe. Aplicando la teoría de Monobe-Okabe (3), (4), se calculan los respectivos coeficientes de presión de tierras K_a y K_p , con los datos iniciales de la estructura y el suelo, obteniendo como resultado:

$$K_A = 0.57$$

$$K_P = 5.12$$

Una vez determinados los coeficientes de presión lateral de tierras, se calculan la presión activa y la presión pasiva:

$$P_A = 190.93 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

$$P_P = 103.81 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

Se determinan los puntos de aplicación de las presiones:

$$Z_A = 2.75 [\text{m}]$$

$$Z_P = 0.4 [\text{m}]$$

Finalmente se realizan los respectivos análisis de estabilidad del muro rígido, para lo cual se realiza el mismo procedimiento de los numerales 7.2.1.1, 7.2.1.2 y 7.2.1.3; obteniendo como resultado:

$$FS_{(\text{volcamiento})}=2.4$$

$$FS_{(\text{deslizamiento})}=1.3$$

$$FS_{(\text{capacidad carga suelo})}=5.5$$

3.2.3 PLAXIS 2D (módulo dinámico). Utilizando el software computacional de PLAXIS 2D, se procede a realizar un análisis dinámico de las presiones laterales de tierras ejercidas en el muro de contención, para posteriormente con los resultados obtenidos del programa, realizar los respectivos análisis de estabilidad del muro (2D, 2017).

3.2.3.1 Procedimiento realizado en el software de PLAXIS 2D.

- Inicializar el programa.
- Definir la configuración inicial de las propiedades generales del proyecto (nombre del archivo, unidades, condiciones de contorno) [Apéndice A]
- Realizar el esquema del modelo (geometría del muro y suelo) [Apéndice B].
- Crear y asignar materiales junto con sus respectivas propiedades [Apéndice C].

- Crear un punto de carga en el suelo; posteriormente, utilizar el módulo dinámico de PLAXIS 2D, el cual permite ingresar a dicha carga multiplicadores dinámicos, los cuales para este caso son datos reales de un sismo que afectó a la ciudad de Bucaramanga el 10 de Marzo de 2015 y cuyo origen fue el municipio de Los Santos, Santander (Vanguardia Liberal, 2015) [Apéndice D].
- Con la finalidad de facilitar el proceso de cálculo del software, no se ingresa la totalidad del acelerograma; en su lugar, se ingresa solo una pequeña fracción del mismo, para lo cual primero son localizadas las ondas S (ondas de corte), y posteriormente se realiza un filtrado de los valores localizados en estas [Apéndice E]
- Generar una malla de elementos finitos, la cual sub-divide el modelo en elementos más pequeños, los cuales permiten al software realizar el análisis y procesamiento del modelo diseñado [Apéndice F].
- Configurar la pestaña de construcción por etapas, con las respectivas fases de cálculo que se desean ejecutar. Para este caso son definidas dos fases: una fase inicial, en la cual se realiza un análisis en condiciones estáticas, y una segunda fase en la cual la carga dinámica transmitida por el sismo al suelo es considerada en el proceso de análisis, cálculos y resultados [Apéndice G].
- Ejecutar el proceso de cálculo del programa [Apéndice H].
- Recolectar los valores máximos para realizar los análisis de estabilidad del muro (Pa, Pp)

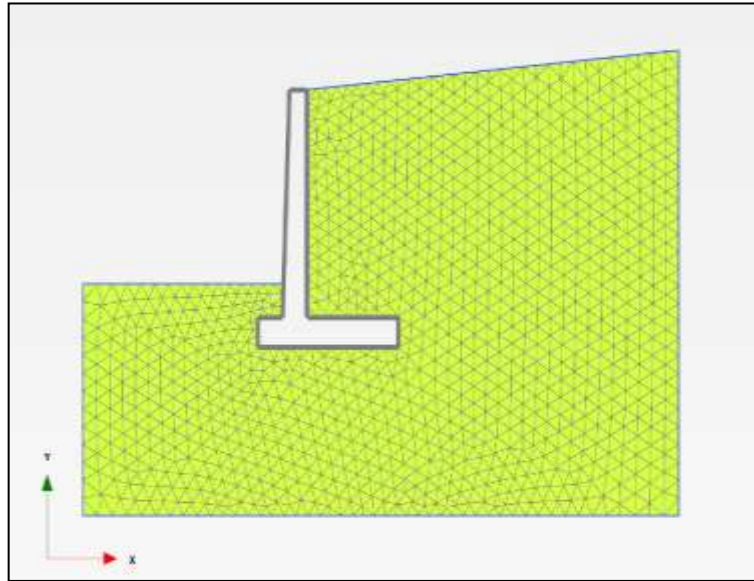


Figura 10. Geometría del muro rígido en el software de PLAXIS 2D en condiciones estáticas.

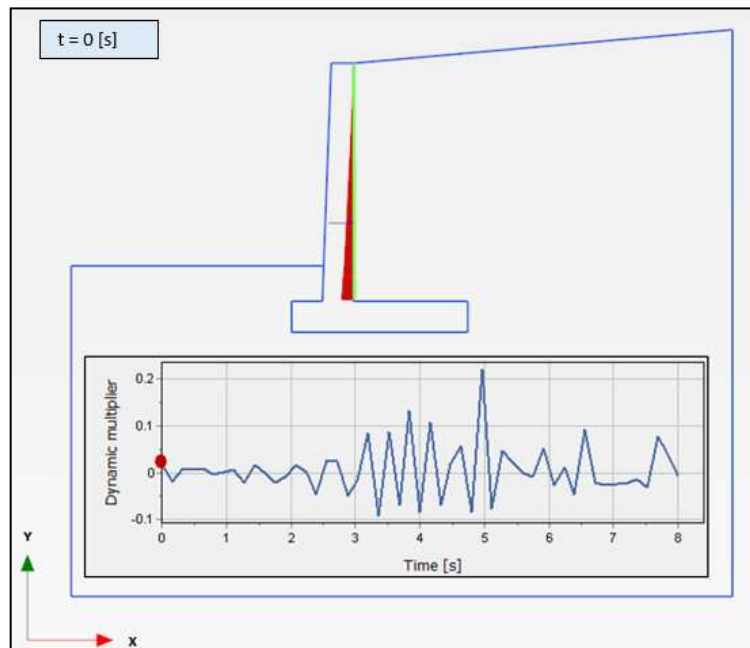


Figura 11. Presión de tierras para el modelo del muro rígido en el software de PLAXIS 2D.

Tiempo = 0 [s] (condiciones estáticas)

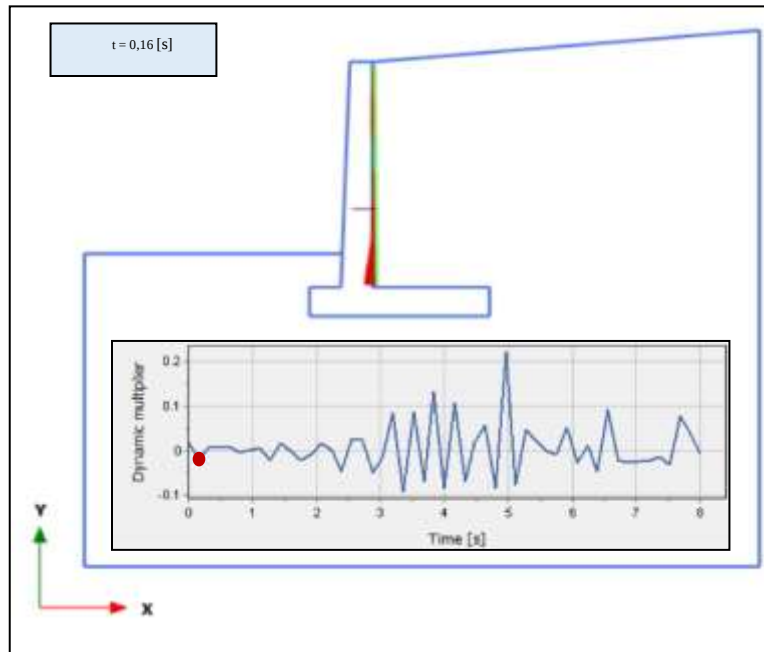


Figura 12. Presión de tierras para el modelo del muro rígido en el software de PLAXIS 2D.

Tiempo = 0.16 [s] (condiciones dinámicas)

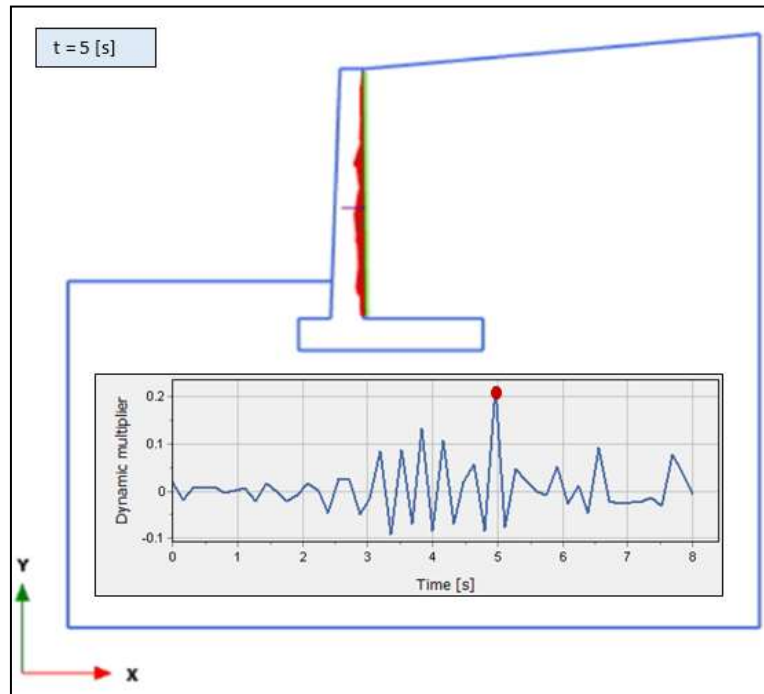


Figura 13. Presión de tierras para el modelo del muro rígido en el software de PLAXIS 2D.

Tiempo = 5 [s] (condiciones dinámicas)

$$P_A = 234.45 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

$$P_P = 97.82 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

Luego de obtener los valores máximos de las presiones laterales de tierras (P_A , P_P) en condiciones dinámicas, se realizan los respectivos análisis de estabilidad del muro, para lo cual se realiza nuevamente el procedimiento de los numerales 7.2.1.1 , 7.2.1.2 y 7.2.1.3; obteniendo como resultado:

$$FS_{(\text{volcamiento})} = 2$$

$$FS_{(\text{deslizamiento})} = 1$$

$$FS_{(\text{capacidad carga suelo})} = 4.7$$

3.3 Análisis sísmico en un muro flexible.

Una vez definidas las dimensiones y especificaciones del muro y suelo, se emplea cada uno de los métodos de análisis sísmico a la estructura: método de Coulomb, método de Monobe-Okabe y método mediante el modelamiento en el software PLAXIS 2D (módulo dinámico).

3.3.1 Método de Coulomb. Aplicando la teoría de Coulomb (1), (2), se calculan los respectivos coeficientes de presión de tierras K_a y K_p , con los datos iniciales de la estructura y el suelo, teniendo en cuenta que estos valores varían para cada método de análisis de estabilidad del muro flexible:

Método del momento factorado (FSM)

$$K_A = 0.403$$

$$K_P = 4.04$$

Método de presión pasiva neta (NPPM)

$$K_A = 0.316$$

$$K_P = 6.311$$

Una vez determinados los coeficientes de presión lateral de tierras, se calculan la presión activa y la presión pasiva:

Método del momento factorado (FSM)

$$P_A = 90.71 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

$$P_P = 227.58 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

Método de presión pasiva neta (NPPM)

$$P_A = 71.20 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

$$P_P = 354.95 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

Se determinan los puntos de aplicación de las presiones:

Método del momento factorado (FSM)

$$Z_A = 1.66 \text{ [m]}$$

$$Z_P = 0.83 \text{ [m]}$$

Método de presión pasiva neta (NPPM)

$$Z_{A1} = 3.33 \text{ [m]}$$

$$Z_{A2} = 1.25 \text{ [m]}$$

$$Z_P = 0.83 \text{ [m]}$$

Se calculan los momentos generados por la presión de tierra en condiciones activa y pasiva, donde:

M_P = Momento generado debido a la presión pasiva

M_A = Momento generado debido a la presión activa

Método del momento factorado (FSM)

$$M_A = 151.18 \text{ [kN-m]}$$

$$M_P = 189.65 \text{ [kN-m]}$$

Método de presión pasiva neta (NPPM)

$$M_A = 103.84 \text{ [kN-m]}$$

$$M_P = 280.95 \text{ [kN-m]}$$

Finalmente se realizan los respectivos análisis de estabilidad de la tablestaca, determinando sus factores de seguridad.

$$FS = \frac{M_P}{M_A}$$

Método del momento factorado (FSM)

$$FS = \frac{189.65}{151.18}$$

$$FS = 1.25$$

Método de presión pasiva neta (NPPM)

$$FS = \frac{280.95}{103.84}$$

$$FS = 2.7$$

3.3.2 Método de Monobe-Okabe. Aplicando la teoría de Monobe-Okabe (3), (4), se realiza el mismo procedimiento del numeral 7.3.1, para determinar los respectivos factores de seguridad del muro tablestaca, obteniendo como resultado:

Método del momento factorado (FSM)

$$FS = 0.54$$

Método de presión pasiva neta (NPPM)

$$FS = 1.14$$

3.3.3 PLAXIS 2D (módulo dinámico). Se realiza el modelamiento del tablestaca propuesto en el software de PLAXIS 2D, siguiendo para ello el procedimiento realizado en el numeral 7.2.3.1. [Apéndices I, J] y recolectando los datos necesarios para realizar el análisis de estabilidad del muro:

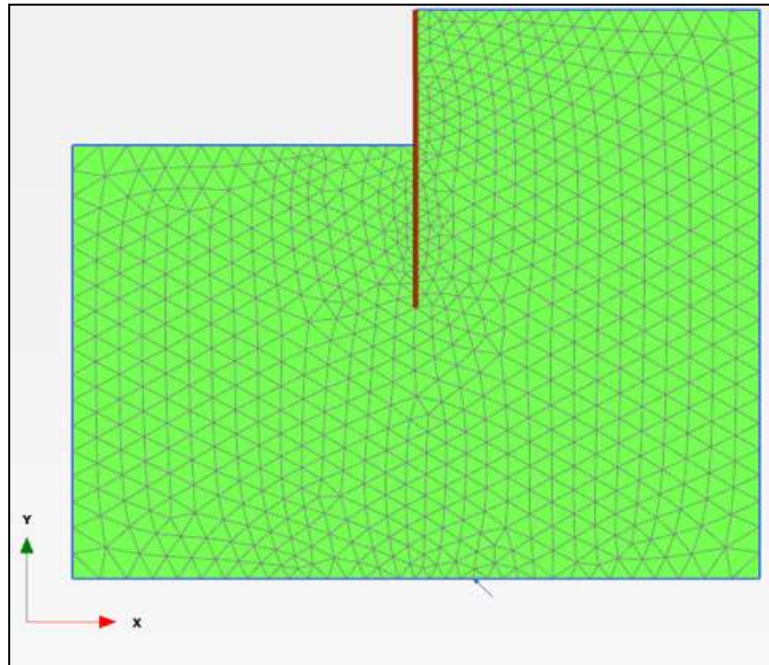


Figura 14. Geometría del muro flexible en el software de PLAXIS 2D en condiciones estáticas.

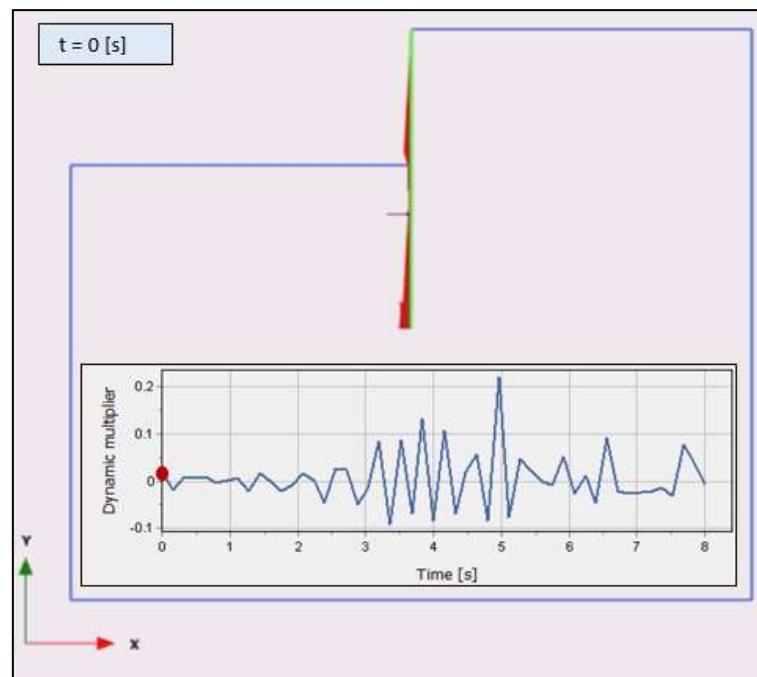


Figura 15. Presión de tierras para el modelo del muro flexible en el software de PLAXIS 2D.

Tiempo = 0 [s] (condiciones estáticas)

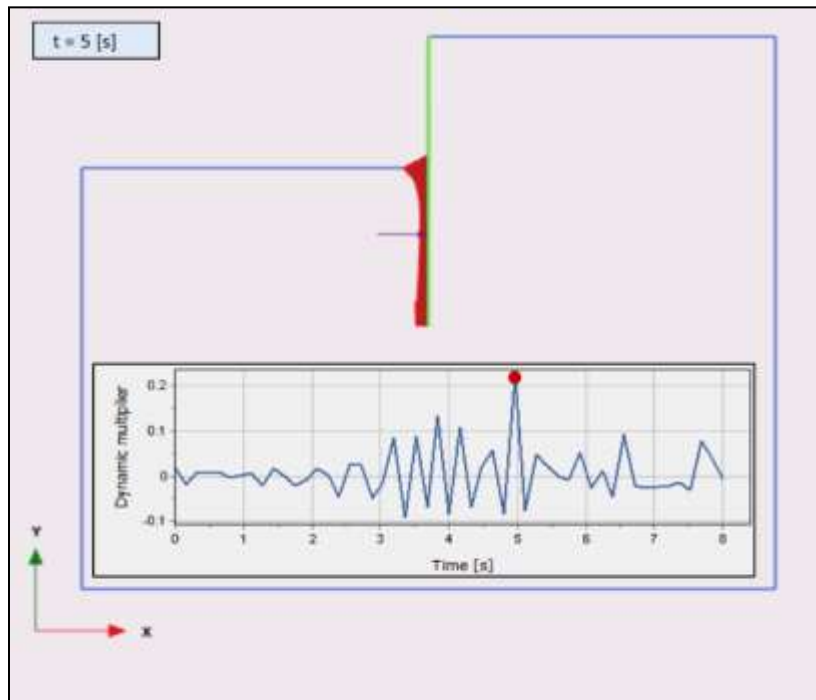


Figura 16. Presión de tierras para el modelo del muro flexible en el software de PLAXIS 2D.

Tiempo = 5 [s] (condiciones dinámicas)

$$M_A = 358.87 \text{ [kN-m]}$$

$$M_F = 125.38 \text{ [kN-m]}$$

$$FS = \frac{M_P}{M_A}$$

$$FS = \frac{125.38}{358.87}$$

$$FS = 0.3$$

4. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los muros de contención (muro rígido, muro flexible) , aplicando cada uno de los métodos de análisis sísmico (Coulomb, Monobe-Okabe, PLAXIS 2D):

Tabla 9. Resumen de resultados: análisis sísmico muro rígido.

DATO ANÁLIZADO	MÉTODO EMPLEADO		
	MOHR COULOMB	MONOBE-OKABE	PLAXIS 2D
P_a	105,98	190,93	234,45
P_p	127,79	103,81	97,82
$FS_{(Volcamiento)}$	4,27	2,45	2,00
$FS_{(Deslizamiento)}$	2,62	1,34	1,07
$FS_{(Carga portante)}$	8,16	5,57	4,78

Tabla 10. Resumen de resultados: análisis sísmico muro flexible.

DATO ANÁLIZADO	MÉTODO EMPLEADO		
	MOHR COULOMB	MONOBE-OKABE	PLAXIS 2D
P_a	90,71	165,28	215,32
P_p	227,58	180,91	150,36
FS	1,25	0,55	0,30

Introduciendo un coeficiente de aceleración sísmica horizontal de 2.5 en el método de Monobe-Okabe, el coeficiente de presión de tierras en condición activa (K_a) aumenta en relación al valor obtenido mediante el método de Coulomb, y por consiguiente también se eleva la presión activa (P_a) ejercida por el suelo sobre el muro.

Los factores de seguridad calculados por el método de Monobe-Okabe son menores que los del método de Coulomb, pero mayores que los del software PLAXIS 2D; mostrando la importancia que tiene considerar todo el registro sísmico en un análisis dinámico.

En los tres métodos de análisis sísmico (método de Coulomb, método de Monobe-Okabe, PLAXIS 2D), los factores de seguridad mayores se presentaron en el factor de seguridad por capacidad de carga portante del suelo; mientras que los factores de seguridad por deslizamiento fueron los menores.

Realizando un análisis comparativo, se puede apreciar que los resultados obtenidos por el método de Coulomb, difieren considerablemente en relación a los valores de los otros dos métodos (Monobe-Okabe, PLAXIS 2D), los cuales presentan mayor semejanza entre sí.

5. Conclusiones

Los coeficientes de presión lateral de tierras en estado activo y pasivo (K_a , K_p), son los principales parámetros afectados por la manera en que sean asumidas las aceleraciones sísmicas en el suelo, ya sean como fuerzas constantes o dinámicas; es por esto, que en el desarrollo de este proyecto se pudo evidenciar las variaciones de estos, dependiendo de cada uno de los métodos de análisis sísmico empleados (método de Coulomb, método de Monobe-Okabe, PLAXIS 2D módulo dinámico).

Aunque el método de análisis en muros de contención de Monobe-Okabe, considera coeficientes de aceleración sísmica (K_v , K_h), los cuales ofrecen resultados más confiables que

los obtenidos por el método de Coulomb, sigue siendo un tipo de análisis que se aleja de la realidad, al no considerar los efectos dinámicos de las cargas sísmicas, razón por la cual PLAXIS 2D con su módulo dinámico permite realizar un modelo de análisis de mayor similitud a la realidad.

El desarrollo de este proyecto permitió evidenciar las ventajas que brinda un análisis dinámico en muros de contención; ya que aumenta la confiabilidad de los resultados obtenidos, ofreciendo factores de seguridad que disminuyen riesgos estructurales y posibles tragedias que estos implican.

En Colombia, la mayoría de análisis sísmicos en muros de contención son realizados por métodos estáticos ó pseudo-estáticos, según lo establecido en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) [5]; sin embargo, estos, generalmente carecen de precisión debido a los métodos de cálculo que emplean (método de Coulomb, método de Monobe-Okabe) para determinar las presiones del suelo que son transmitidas a la estructura.

En lugares sísmicamente activos, como lo es nuestro país, sería recomendable introducir análisis en muros de contención un poco más avanzados que los convencionales, los cuales deben tener presente efectos dinámicos de las aceleraciones sísmicas transmitidas del suelo a la estructura, tipo de análisis que puede ser ejecutado mediante diferentes ayudas tecnológicas, como la que ofrece el software de PLAXIS 2D con su módulo dinámico.

Bibliografía

2D, P. (2017). TUTORIAL MANUAL.

AIS, A. C. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Bogotá.

Bowles, J. E. (1997). Foundation Analysis and Design. Peoria, Illinois: McGraw-Hill.

Camargo García, C. A., & Gonzalez Escamilla, A. L. (2011). Modelamiento de problemas de estructuras de contención lateral mediante programa de elementos finitos. Bucaramanga.

Das, B. M. (2012). Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones. Cengage Learning Editores, S.A de C.V.

Díaz Díaz, Y. A., & López Alvarado, E. F. (2008). Plaxis como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arenas. Punta Arenas.

GÓMEZ-P, J. A. (1980). Actividad Sísmica en el Departamento de Santander. Boletín de geología, Revista UIS, 21.

Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. New Yersey: Prentice-Hall Inc.

Martinez, R., & Barrera, S. (2011). Introducción chilena para seleccionar análisis de estabilidad estática de taludes práctica el coeficiente sísmico aplicando equilibrio límite.

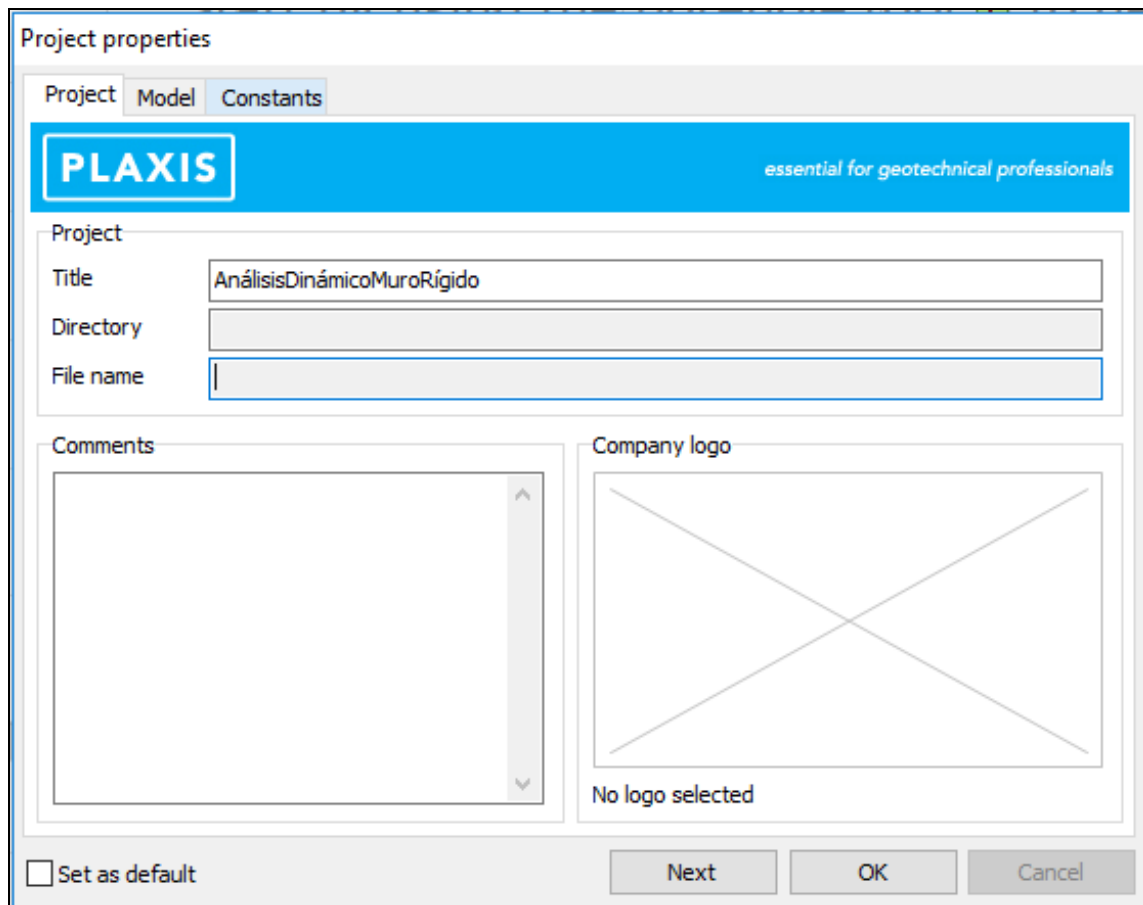
Ramirez, J. E. (1975). Historia de los terremotos en Colombia (Segunda ed.). Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Servicio Geológico Colombiano. (15 de Febrero de 2018). Servicio Geológico Colombiano. Obtenido de <https://www.sgc.gov.co/>

Vanguardia Liberal. (11 de Marzo de 2015). Temblor de ayer fue el más fuerte en 50 años. Obtenido de Vanguardia Liberal: <http://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/302761-temblor-de-ayer-fue-el-mas-fuerte-en-50-anos>

Apéndices

Apéndice A: Configuración inicial en el software de PLAXIS 2D, de las propiedades generales del proyecto (nombre del proyecto, unidades, condiciones de contorno del modelo)



The image shows the 'Project properties' dialog box in PLAXIS 2D. The 'Project' tab is selected. The dialog has a blue header with the PLAXIS logo and the tagline 'essential for geotechnical professionals'. Below the header, there are three tabs: 'Project', 'Model', and 'Constants'. The 'Project' tab contains the following fields:

- Title:** An input field containing the text 'AnálisisDinámicoMuroRígido'.
- Directory:** An empty input field.
- File name:** An empty input field.
- Comments:** A large text area with a vertical scrollbar, currently empty.
- Company logo:** A rectangular area with a large 'X' drawn across it, indicating no logo is selected. Below this area, the text 'No logo selected' is displayed.

At the bottom of the dialog, there is a checkbox labeled 'Set as default' which is currently unchecked. To the right of the checkbox are three buttons: 'Next', 'OK', and 'Cancel'.

Figura 17: Configuración inicial PLAXIS 2D.

Fuente: PLAXIS 2D

Project properties

Project Model Constants

Type

Model Plane strain

Elements 15-Noded

Units

Length m

Force kN

Time day

Mass t

Temperature K

Energy kJ

Power kW

Stress kN/m²

Weight kN/m³

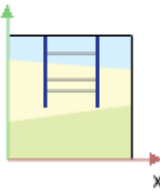
Contour

x_{min} 0.000 m

x_{max} 20.00 m

y_{min} 0.000 m

y_{max} 20.00 m



☐ Set as default

Next OK Cancel

Figura 18: Configuración inicial PLAXIS 2D.

Fuente: PLAXIS 2D

Apéndice B: Esquema del modelo del muro rígido en el software de PLAXIS 2D (geometría del suelo y muro)

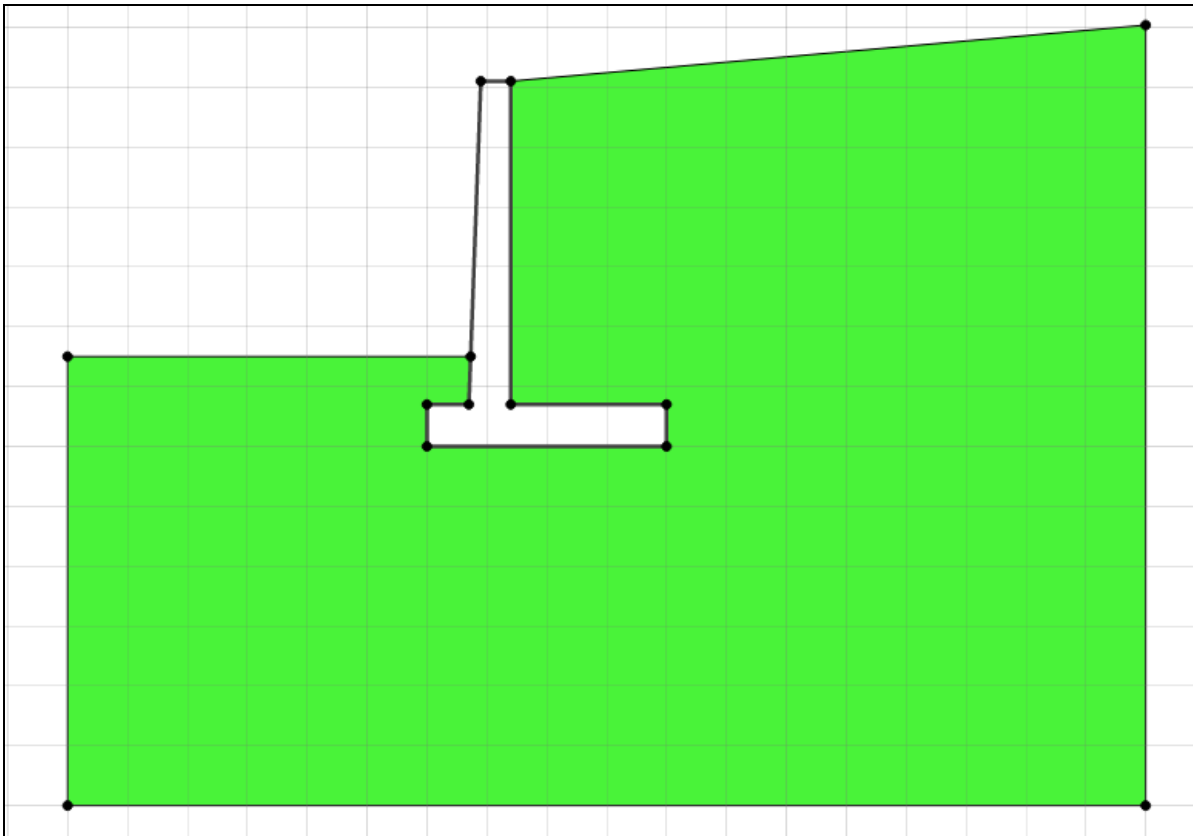


Figura 19: Esquema del modelo del muro rígido en PLAXIS 2D .

Fuente: PLAXIS 2D

Apéndice C: Creación de los materiales del suelo y el muro rígido en el software de PLAXIS 2D.

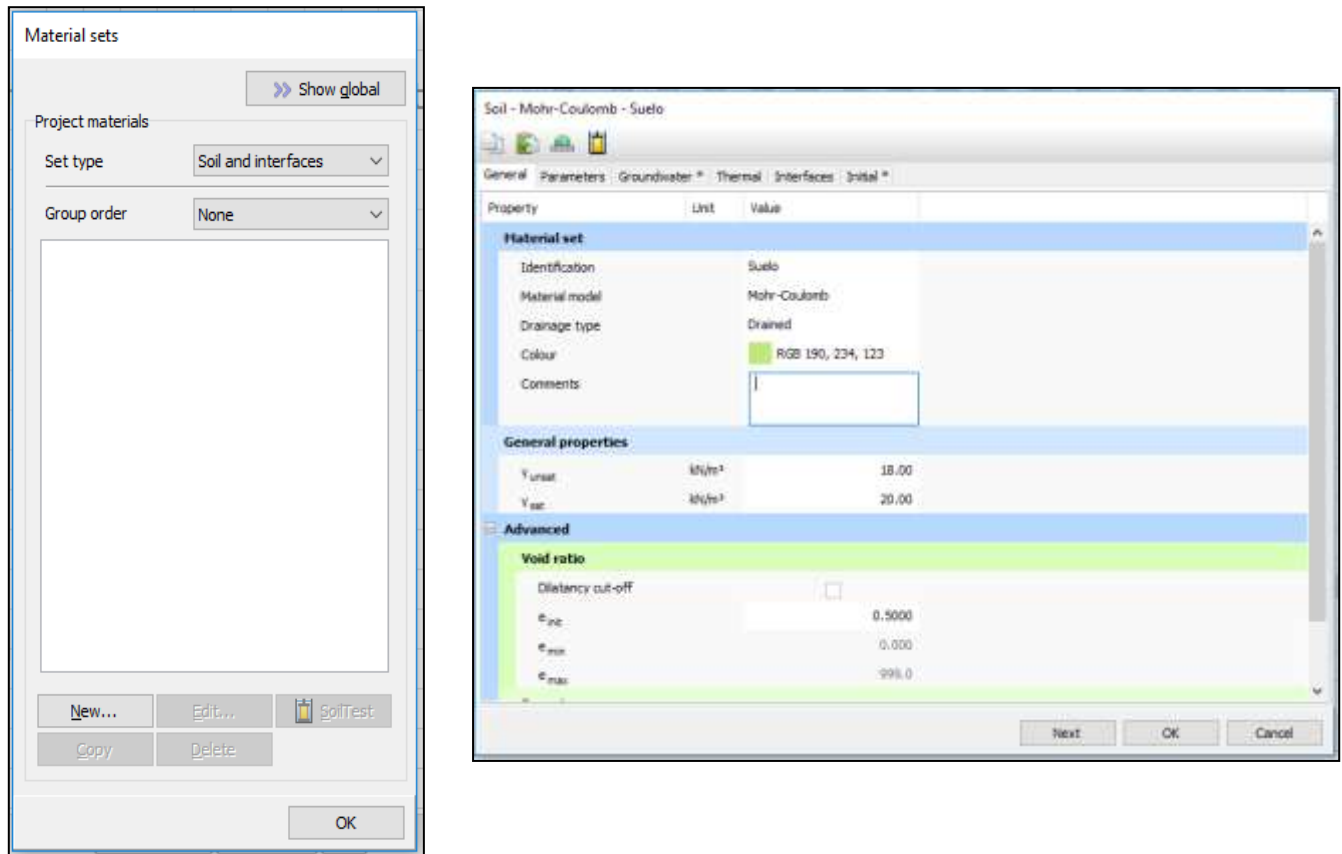


Figura 20: Propiedades del suelo de relleno en PLAXIS 2D.

Fuente: PLAXIS 2D

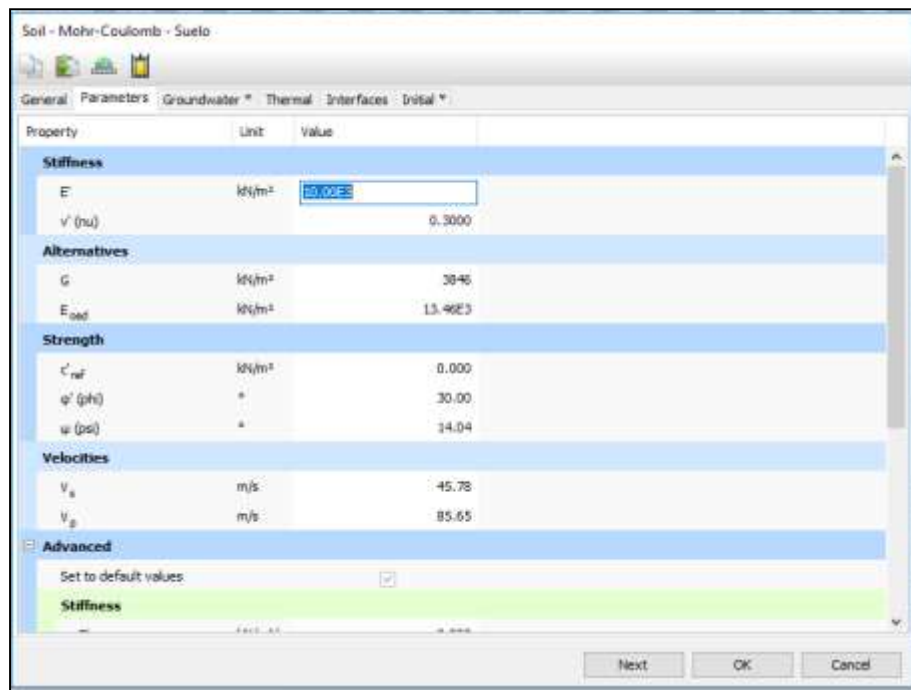


Figura 21: Propiedades del suelo de relleno en PLAXIS 2D.

Fuente: PLAXIS 2D

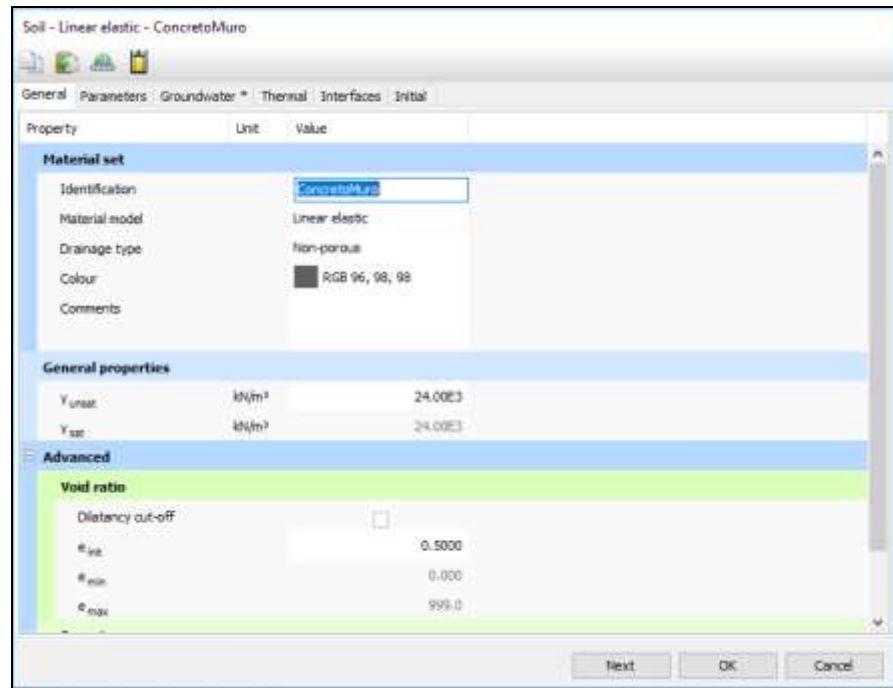


Figura 22: Propiedades del concreto de muro rígido en PLAXIS 2D.

Fuente: PLAXIS 2D

Apéndice D: Información general del acelerograma sísmico utilizado para realizar el análisis dinámico en el software de PLAXIS 2D, haciendo uso del módulo dinámico.

Tabla 11. Información general acelerograma sísmico: Marzo 10 de 2015, Los Santos, Santander.

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO- RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS DE COLOMBIA
SISMO DE LOS SANTOS (SANTANDER) 2015/03/10 20:55:44 MW=6.4
LATITUD DEL EVENTO(GRADOS): 6.83
LONGITUD DEL EVENTO(GRADOS): -73.136
PROFUNDIDAD DEL EVENTO (Km): 160
CODIGO DE LA ESTACION: CGIR2
Estacion:GIRON, VEREDA ACAPULCO Geol:ROCA Topo:PLANA
LATITUD DE LA ESTACION (GRADOS): 7.01815
LONGITUD DE LA ESTACION (GRADOS): -73.13412
DISTANCIA EPICENTRAL: 20.886 km
DISTANCIA HIPOCENTRAL: 161.357 km
INTERVALO DE MUESTREO (SEGUNDOS): 0.005
NUMERO DE DATOS: 22400
DURACION (SEGUNDOS): 112
UNIDADES: cm/s ²
TIPO DE EQUIPO: ETNA
ESCALA MAXIMA (G): 2
CORRECCION DE LINEA BASE: LINEA BASE NO REMOVIDA

Apéndice E: Datos del acelerograma sísmico luego de realizar los filtros. Valores ingresados en el módulo dinámico del software PLAXIS 2D, por medio de la herramienta *multiplicadores dinámicos*.

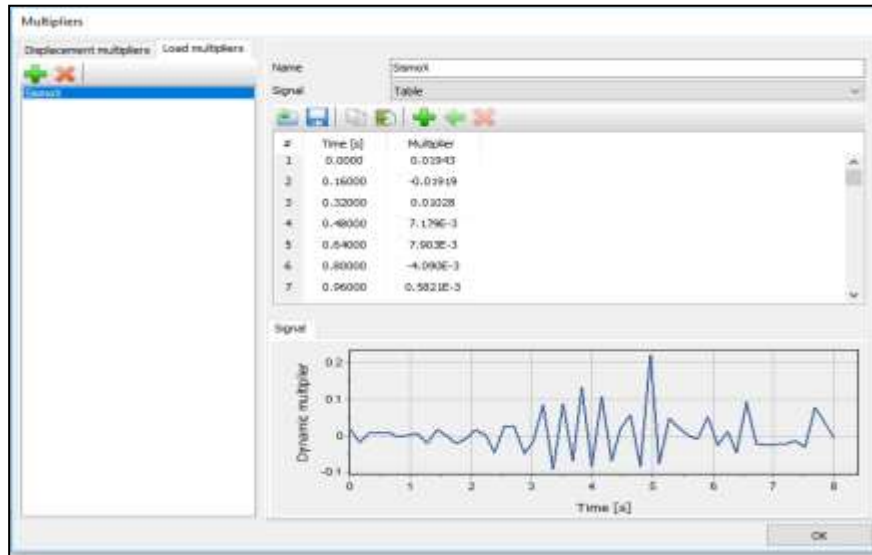


Figura 23: Acelerograma sísmico en dirección X ingresado en PLAXIS 2D.

Fuente: PLAXIS 2D

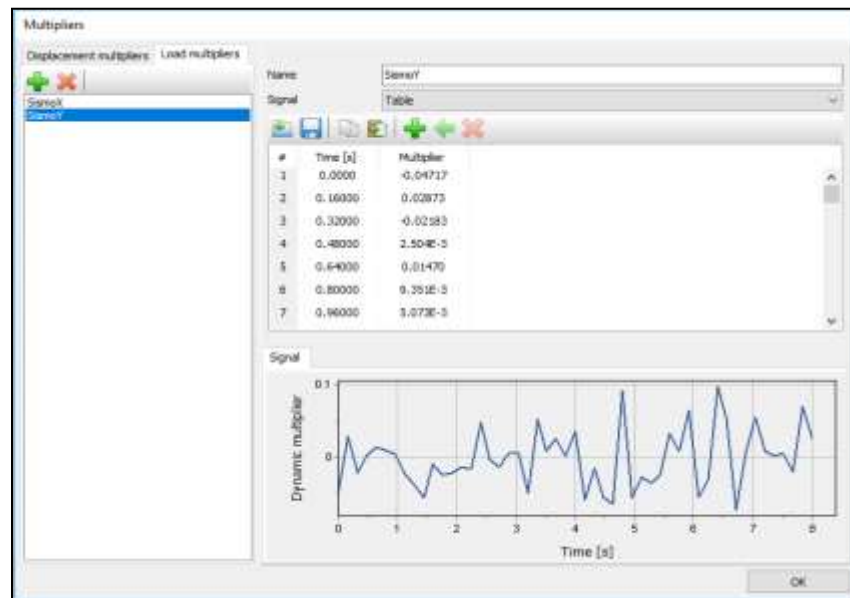


Figura 24: Acelerograma sísmico en dirección Y ingresado en PLAXIS 2D.

Fuente: PLAXIS 2D

Tabla 12. Valores del acelerograma sísmico ingresados en PLAXIS 2D.

Tiempo	EW [g]	Tiempo	VER [g]
0	0,0194341	0	-0,04716819
0,16	-0,01918949	0,16	0,02873143
0,32	0,01028117	0,32	-0,02182584
0,48	0,00717899	0,48	0,00250392
0,64	0,00790334	0,64	0,01470325
0,8	-0,00409009	0,8	0,00935098
0,96	0,00058213	0,96	0,00507329
1,12	0,00638638	1,12	-0,02254223
1,28	-0,02068369	1,28	-0,03846128
1,44	0,01648931	1,44	-0,05612653
1,6	-0,00136526	1,6	-0,00873102
1,76	-0,0203784	1,76	-0,0242781
1,92	-0,00893487	1,92	-0,02157441
2,08	0,01746585	2,08	-0,01330491
2,24	0,00142025	2,24	-0,01548852
2,4	-0,0463942	2,4	0,04847698
2,56	0,02754602	2,56	-0,00223184
2,72	0,02354694	2,72	-0,0126574
2,88	-0,04950016	2,88	0,00537638
3,04	-0,0168439	3,04	0,006017
3,2	0,08450202	3,2	-0,04822556
3,36	-0,09127144	3,36	0,05302675
3,52	0,0874032	3,52	0,00847271
3,68	-0,06805253	3,68	0,02683024
3,84	0,13168314	3,84	0,00185297
4	-0,08533635	4	0,03541316
4,16	0,10655477	4,16	-0,05801739
4,32	-0,06913716	4,32	-0,0148238
4,48	0,0197337	4,48	-0,05390847
4,64	0,05705839	4,64	-0,06366586
4,8	-0,08452667	4,8	0,09269694
4,96	0,22057864	4,96	-0,05567189
5,12	-0,07604499	5,12	-0,02672003
5,28	0,04666914	5,28	-0,03532362
5,44	0,02241681	5,44	-0,0235066
5,6	-0,00106756	5,6	0,03304356
5,76	-0,00952459	5,76	0,00848993
5,92	0,05147221	5,92	0,06533285
6,08	-0,02718385	6,08	-0,05451809
6,24	0,01244662	6,24	-0,03149368
6,4	-0,04549161	6,4	0,09731904
6,56	0,09172463	6,56	0,05419433
6,72	-0,02070265	6,72	-0,0718217
6,88	-0,02681219	6,88	0,00589301
7,04	-0,02299895	7,04	0,05537224
7,2	-0,0225249	7,2	0,00857947
7,36	-0,01317666	7,36	0,00203207
7,52	-0,03134031	7,52	0,00598255
7,68	0,07773261	7,68	-0,01990398
7,84	0,04109054	7,84	0,06980685
8	-0,00514627	8	0,02695423

Apéndice F: Generación de la malla de elementos finitos en el software de PLAXIS 2D para el modelo de un muro rígido.

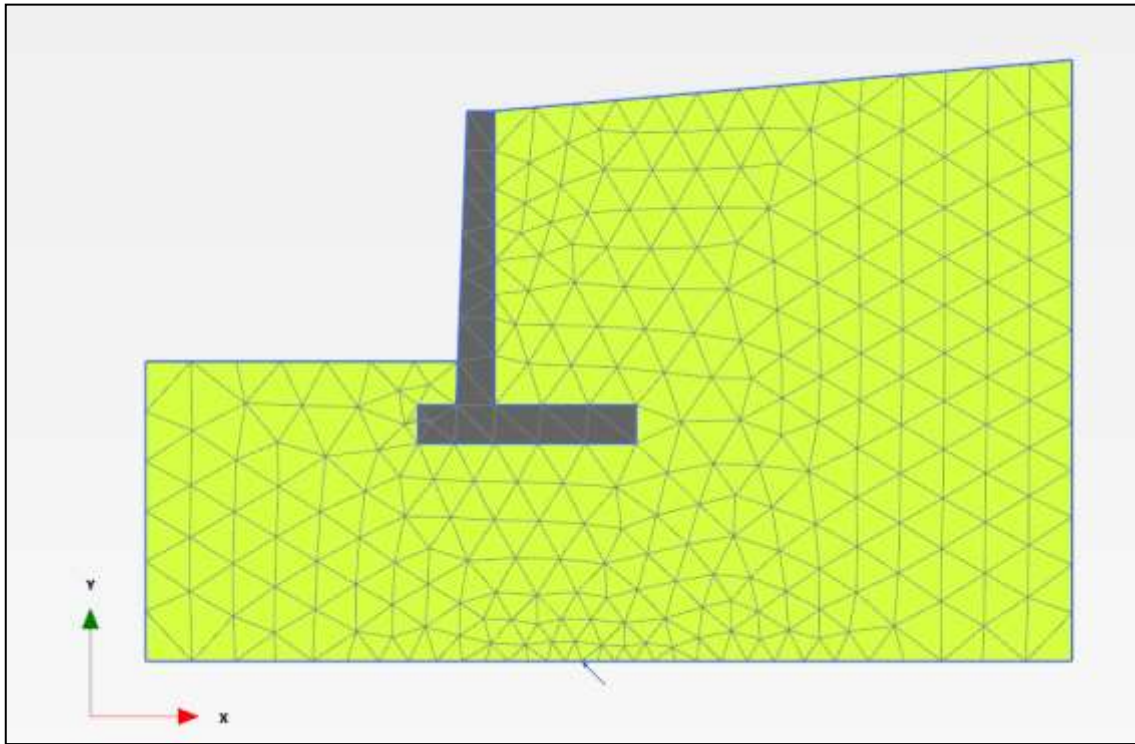


Figura 25: Malla de elementos finitos generada para el modelo muro rígido en PLAXIS 2D.

Fuente: PLAXIS 2D

Apéndice G: Configuración de la pestaña de construcción por etapas del software PLAXIS 2D, definiendo las etapas de calculo e indicando los parámetros y condiciones de cálculo de cada etapa.

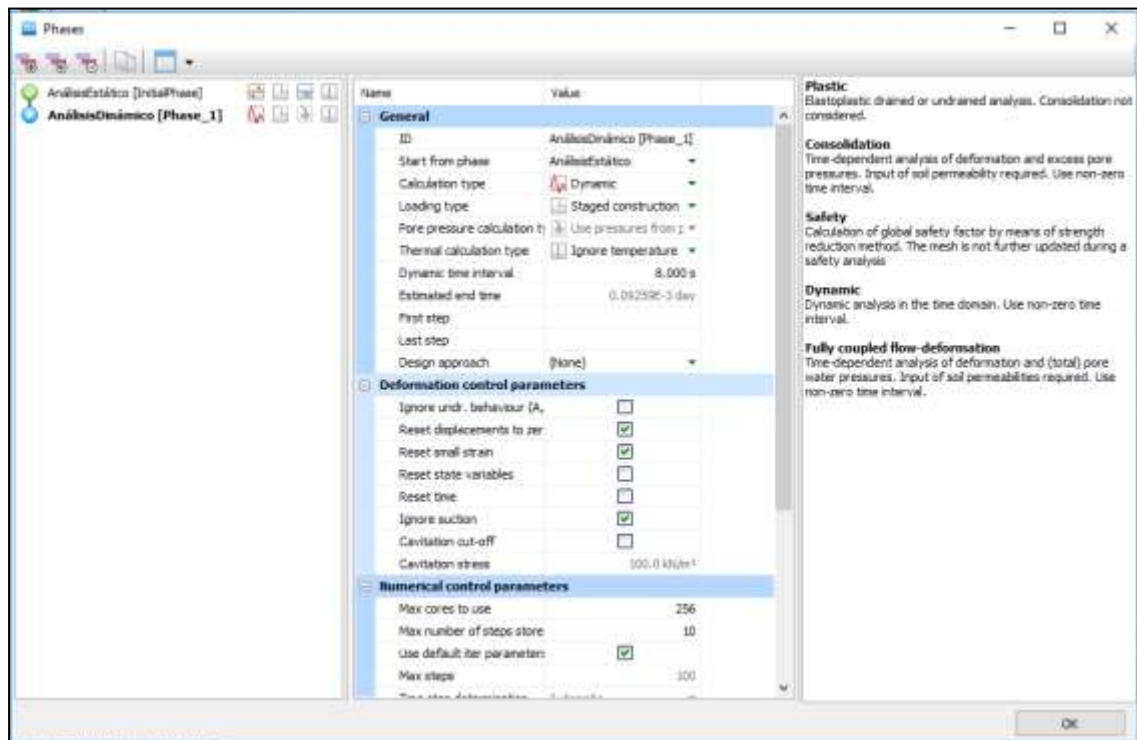


Figura 26: Construcción por etapas software PLAXIS 2D.

Fuente: PLAXIS 2D

Apéndice H: Ejecución del programa de cálculos del software PLAXIS 2D, una vez finalizado el modelamiento del muro rígido, con sus respectivas condiciones y parámetros de análisis.

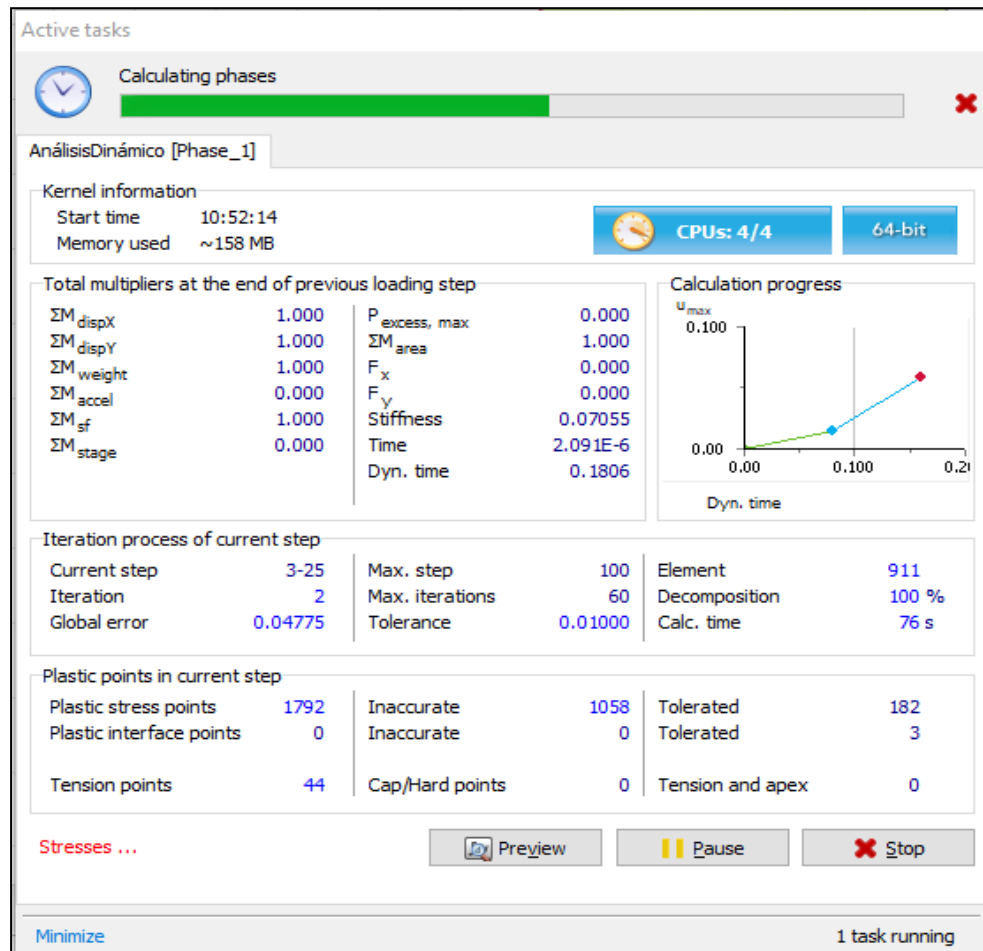


Figura 27: Ejecución del programa de cálculos en PLAXIS 2D.

Fuente: PLAXIS 2D

Apéndice I: Propiedades del material del muro flexible tablestaca, ingresadas en el software de PLAXIS 2D.

The screenshot shows the 'Plate - Tablestaca' dialog box in PLAXIS 2D. It has two tabs: 'Mechanical' and 'Thermal'. The 'Mechanical' tab is active, displaying a table of material properties. The 'Material set' section includes 'Identification' (Tablestaca), 'Comments' (empty), 'Colour' (RGB 187, 22, 36), and 'Material type' (Elastic). The 'Properties' section lists various mechanical parameters with their units and values.

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Tablestaca
Comments		
Colour		RGB 187, 22, 36
Material type		Elastic
Properties		
Isotropic		☒
End bearing		☐
EA ₁	kN/m	39.82E3
EA ₂	kN/m	39.82E3
EI	kN m ² /m	793.8
d	m	0.4891
w	kN/m/m	8.025
v (nu)		0.2000
Rayleigh α		0.000

Figura 28: Propiedades del muro flexible en PLAXIS 2D.

Fuente: PLAXIS 2D

Apéndice J: Generación de la malla de elementos finitos en el software de PLAXIS 2D para el modelo de un muro tablestaca.

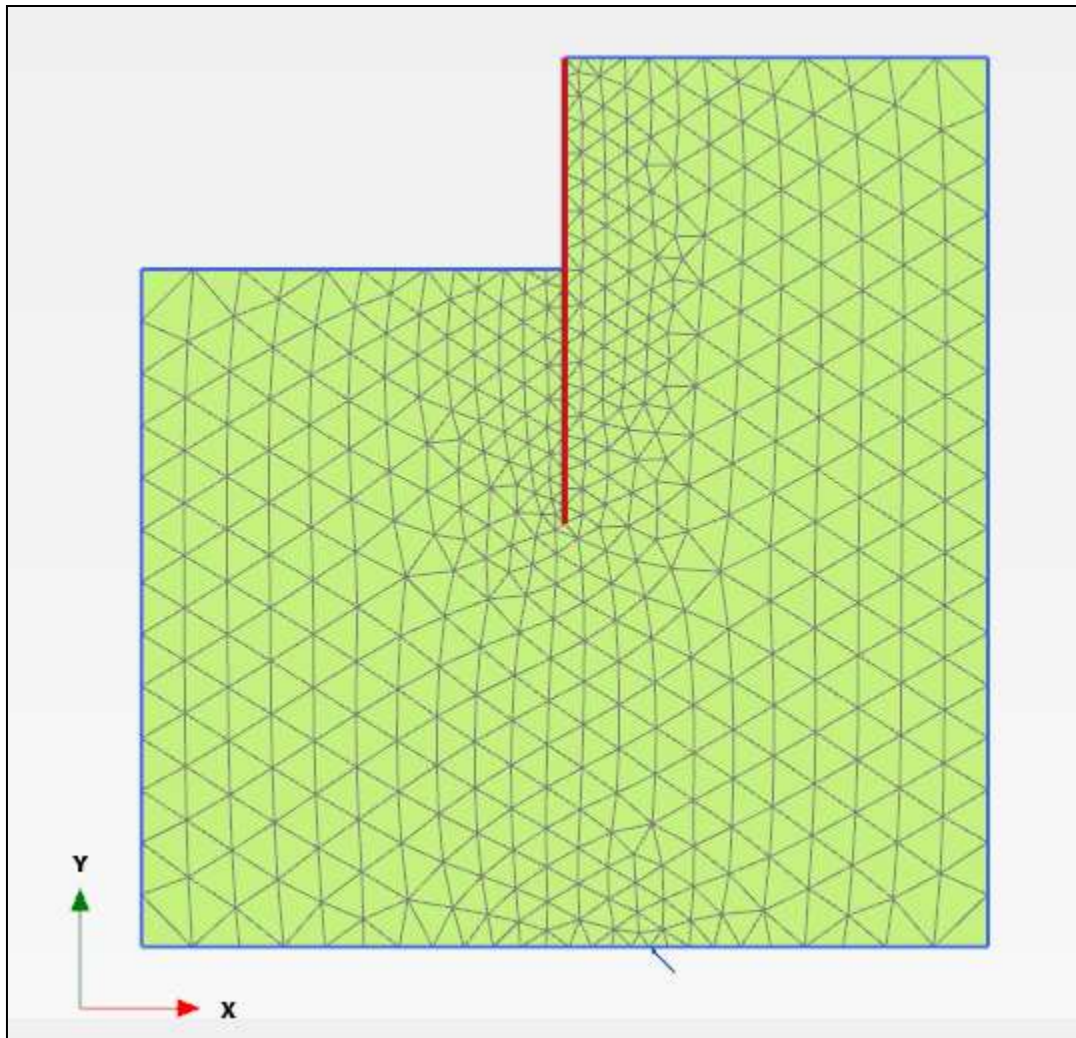


Figura 29: Malla de elementos finitos generada en PLAXIS 2D para el muro tablestaca.

Fuente: PLAXIS 2D