

Análisis sísmico en muros rígidos de gravedad: métodos teóricos vs elementos finitos

Oscar Javier Jaime Galvis

Santiago Beltrán Martínez

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Civil

Director

Jorge Alejandro Mendoza Rizo

PhD. en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingeniarías Físico-Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil  
Bucaramanga

2020

**Dedicatoria**

*Los autores le queremos agradecer primeramente a Dios por permitirnos culminar este proyecto, a nuestros padres, porque por su cuidado y apoyo incondicional es que esto fue posible.*

*Este proyecto fue una experiencia enriquecedora para nuestra vida profesional y para la vida en general.*

*Seguiremos aprendiendo...*

***Oscar Javier Jaime Galvis***

***Santiago Beltrán Martínez***

### **Agradecimientos**

*Gracias a nuestro director Jorge Alejandro Mendoza Rizo, por su calidad de persona, dirección, atención y observaciones, siempre presto para cualquier inquietud.*

*Oscar Javier Jaime Galvis*

*Santiago Beltrán Martínez*

**Tabla de Contenido**

	Pág.
Introducción.....	14
1. Objetivos .....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco teórico.....	16
2.1 Método de Richards-Elms.....	16
2.2 Método de Whitman-Liao.....	19
2.3 PLAXIS 2D.....	20
3. Modelo de análisis .....	21
3.1 Descripción del problema.....	21
3.2. Análisis Teórico.....	22
3.3 Análisis por PLAXIS 2D (elementos finitos).....	25
3.3.1 Etapa “Soil”.....	26
3.3.2 Etapa “Structure”.....	26
3.3.3 Etapa “Mesh”.....	29
3.3.4 Etapa “Flow Conditions”.....	31
3.3.5 Etapa “Staged Construction”.....	32
3.3.5.1 Fase geostática “Initial Phase”.....	32
3.3.5.2 Fase estática con muro y relleno “2nd Phase”.....	33
3.3.5.3 Fase dinámica “3rd Phase”.....	34

4. Resultados y discusión .....	35
5. Conclusiones.....	41
6. Recomendaciones .....	43
Referencias Bibliográficas .....	44
Apéndices .....	47

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1.</b> Parámetros de diseño .....	21
<b>Tabla 2.</b> Calculo del coeficiente N.....	23
<b>Tabla 3.</b> Otros parámetros usados en el modelo .....	27
<b>Tabla 4.</b> Resultados métodos teóricos .....	36
<b>Tabla 5.</b> Resultados de esfuerzos horizontales .....	37
<b>Tabla 6.</b> Resultados de desplazamientos horizontales.....	41

**Lista de Figuras**

<b>Figura 1.</b> Dimensiones del muro .....	19
<b>Figura 2.</b> Registro de aceleraciones del Sismo "El Centro".....	22
<b>Figura 3.</b> Regresiones para la estimación del coeficiente de aceleración máxima transmisible entre suelo y muro (N) por método gráfico. ....	25
<b>Figura 4.</b> Geometría del suelo y del muro y la Línea de desplazamiento.....	26
<b>Figura 5.</b> Condiciones de contorno.....	29
<b>Figura 6.</b> Refinamiento local del modelo.....	30
<b>Figura 7.</b> Malla del modelo con los puntos de análisis.....	31
<b>Figura 8.</b> Condiciones del flujo subsuperficial.....	32
<b>Figura 9.</b> Configuración de la fase geo-estática. ....	33
<b>Figura 10.</b> Configuración de la segunda fase .....	34
<b>Figura 11.</b> Configuración de la tercera fase. ....	35
<b>Figura 12.</b> Deformaciones del muro después del sismo .....	38
<b>Figura 13.</b> Esfuerzos horizontales dinámicos en el muro .....	38
<b>Figura 14.</b> Esfuerzos horizontales dinámicos obtenido por métodos teóricos .....	39
<b>Figura 15.</b> Gráfica de aceleraciones registradas en la base del modelo, la corona y base del muro.....	39
<b>Figura 16.</b> Gráfica de los desplazamientos horizontales de la corona del muro, base del muro y base del modelo en el tiempo. ....	40

**Lista de Apéndices**

<b>Apéndice A.</b> Configuración inicial de las propiedades generales del modelo en el software PLAXIS 2D .....	47
<b>Apéndice B.</b> Configuración del contorno general del suelo en el software PLAXIS 2D .....	48
<b>Apéndice C.</b> Configuración de las propiedades generales de los materiales en el software PLAXIS 2D .....	48
<b>Apéndice D.</b> Configuración de los parámetros de los materiales en el software PLAXIS 2D .....	49
<b>Apéndice E.</b> Creación de secciones, geometría de muro, relleno del muro e interfaces en el software .....	49
<b>Apéndice F.</b> Configuración de la línea de desplazamiento del modelo en el software PLAXIS 2D .....	50
<b>Apéndice G.</b> Configuración del refinamiento del modelo en el software PLAXIS 2D.....	50
<b>Apéndice H.</b> Visualización de la malla del modelo en el software PLAXIS 2D .....	51
<b>Apéndice I.</b> Configuración de las condiciones de flujo del modelo en el software PLAXIS 2D .....	51
<b>Apéndice J.</b> Configuración general de la fase “Suelo original” en el Software PLAXIS 2D....	52
<b>Apéndice K.</b> Configuración general de la fase “Muro estático” en el software PLAXIS 2D.....	52
<b>Apéndice L.</b> Configuración general de la fase “Muro dinámico” en el software PLAXIS 2D...	53
<b>Apéndice M.</b> Visualización de los puntos de análisis del modelo en el software PLAXIS 2D ..	53
<b>Apéndice N.</b> Modelo en el software PLAXIS 2D.....	54

**RESUMEN**

**TÍTULO:** ANÁLISIS SÍSMICO EN MUROS RÍGIDOS DE GRAVEDAD: MÉTODOS TEÓRICOS VS ELEMENTOS TEÓRICOS\*

**AUTORES:** OSCAR JAVIER JAIME GALVIS\*\*

SANTIAGO BELTRÁN MARTÍNEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** MURO DE CONTENCIÓN, RICHARDS-ELMS, WHITMAN Y LIAO, SISMO EL CENTRO, DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES, ELEMENTOS FINITOS.

**DESCRIPCIÓN:**

El diseño sísmico para la mayoría de los muros de contención se realiza por medio de métodos pseudo-estáticos (Mononobe-Okabe), los cuales consideran coeficientes sísmicos en función de la aceleración y amplifican las cargas estáticas debido a las presiones del suelo, obteniendo como resultado final un factor de seguridad, el cual debe cumplir con los requerimientos de norma para cada país, estado o provincia. Sin embargo, dichos métodos no describen la deformación que podría experimentar el muro ya que estos métodos consideran en su hipótesis desplazamientos restringidos. Por esto, posteriormente varios autores han establecido métodos para determinar los desplazamientos horizontales en muros de contención debido a eventos sísmicos; entre los primeros métodos están los desarrollados por Richards y Elms (1979). Más tarde, Whitman y Liao (1985) continuarían con un nuevo aporte en este aspecto añadiendo algunas asunciones necesarias para el cálculo de dichos desplazamientos. En la presente investigación se determinaron los desplazamientos horizontales en la corona de un muro de contención de gravedad, usando dichos métodos y posteriormente se realizó una comparación con los resultados obtenidos de un modelo en un software de elementos finitos (PLAXIS 2D V.18), obteniendo resultados notablemente diferentes en este último, resaltando la importancia de evaluar diferentes herramientas a la hora de tener en cuenta las condiciones más críticas para el diseño de estructuras considerando los efectos sísmicos.

---

\*Trabajo de grado

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

**ABSTRACT**

**TITLE:** SEISMIC ANALYSIS IN CRRIAL GRAVITY WALLS: THEORICAL METHODS VS. FINITE ELEMENTS\*

**AUTHORS:** OSCAR JAVIER JAIME GALVIS\*\*

SANTIAGO BELTRÁN MARTÍNEZ\*\*

**KEYWORDS:** retaining wall, Richards-Elms, Whitman and Liao, earthquake El Centro, horizontal displacements

**DESCRIPTION:**

The seismic design for most retaining walls is done via pseudo-static methods (Mononobe-Okabe), which consider seismic coefficients based on the acceleration by amplifying static loads due to soil pressure, obtaining as a final result a safety factor, which must comply with the requirements of the norm for each country, state or province. However, this method does not consider the deformation the wall may experience since these methods consider restricted displacements in their hypothesis. Therefore, several authors have established methods to determine horizontal displacements in retaining walls due to seismic events. The first method was developed by Richards and Elms (1979). Later Whitman and Liao (1985) added a new contribution to the field of seismic slope stability, by adding some assumptions, necessary for the calculation of such displacements. The present study aims to determine the horizontal displacements on the top of a gravity retaining wall, using the methods mentioned above, and subsequently, the displacements are compared to the results of a numerical model in a finite element method software (PLAXIS 2D V.18), in which the results obtained were noticeably different, highlighting the importance of assessing different tools when considering the most critical conditions for the design of structures under seismic effects.

---

\*Bachelor Thesis

\*\*Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo, MSc, PhD.

## Introducción

La periodicidad de los eventos sísmicos de gran y mediana magnitud en Colombia no solo se ha constituido como un problema de gran relevancia en cuanto a la integridad de estructuras como edificaciones de tipo residenciales, comerciales e industriales; sino que también es fundamental conservar el estado y condiciones óptimas de servicio de las estructuras de contención de suelos antes, durante y después de dichos eventos, para así garantizar la seguridad de los usuarios.

En lo que a los eventos sísmicos respecta, estos provocan en las estructuras de contención un aumento significativo en las sollicitaciones de carga, lo cual puede poner en riesgo su estabilidad ante efectos adversos (desplazamientos horizontales excesivos). A esto también se le adiciona la incertidumbre sobre la interacción entre el suelo y la estructura presentada en los métodos clásicos de evaluación de empujes sísmicos. Tal es el caso de la solución pseudo-estática de Mononobe Okabe (1929) la cual considera que además de que las cargas sísmicas son generadas por una aceleración constante en el suelo de relleno, el material es perfectamente plástico y falla a lo largo de una superficie plana (Mylonakis, Kloukinas y Papantonopoulos,2007); asimismo el método permite determinar un coeficiente sísmico de diseño  $N_h$ , con el cual posteriormente se determinan los coeficientes de presión lateral de tierra y los puntos de aplicación de estas cargas pseudo-estáticas; y así finalmente se determina su estabilidad por el factor de seguridad obtenido (Báez y Echeverri,2015). Es decir, este primer procedimiento de diseño sísmico de muros realmente es una extensión de los procedimientos utilizados para el diseño estático que no considera las cargas inerciales complejas y transitorias inducidas por los sismos (Kramer,2014).

Cabe destacar, que obtener aproximaciones certeras de los desplazamientos de los muros de contención es de vital importancia ya que aparte de ser un indicador de seguridad, también se constituyen como una buena medida de su desempeño. Como se mencionó anteriormente, las respuestas dinámicas de las estructuras de contención son inciertas dado a la naturaleza del comportamiento de la estructura interna de los suelos, la cual depende en gran medida de sus esfuerzos internos, su estratificación y composición; de igual forma dependen de la rigidez de la estructura y de las características del sismo (Báez y Echeverri,2015). Si bien las soluciones de los análisis sísmicos efectuados por los autores (Mononobe Okabe, 1929; Richards y Elms, 1979; Whitman y Liao, 1985) presentaron un atractivo práctico a su fecha, sus predicciones son poco precisas, aunque su uso todavía esté vigente. Por estas razones, en la actualidad resulta favorable complementar estos métodos con la implementación de análisis de estructuras de contención mediante modelos de elementos finitos, que permitan discretizar los escenarios en cuestión, y tener en consideración las variables y casos que son simplificados por los modelos clásicos; obteniendo así resultados más realistas en cuanto a la evolución de las deformaciones y su ubicación.

En el presente trabajo se estudió el comportamiento de un muro de contención de gravedad de concreto localizado por encima del nivel freático que confina un suelo de relleno granular, el cual está sometido al registro de aceleraciones del sismo “El Centro”, comparando los desplazamientos en dirección horizontal determinados mediante los métodos analíticos, con los obtenidos mediante un modelo de elementos finitos en el software PLAXIS 2D.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Determinar los desplazamientos horizontales de un muro rígido de gravedad debido a un sismo por métodos teóricos y compararlo con modelos de elementos finitos.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Realizar el cálculo del desplazamiento horizontal acumulado por medio de dos análisis teóricos.
- Realizar el cálculo del desplazamiento horizontal acumulado utilizando un software basado en elementos finitos (PLAXIS 2D).
- Comparar los resultados obtenidos entre los métodos de cálculo teóricos y los resultados proporcionados por el software de análisis (PLAXIS 2D).

## 2. Marco teórico

Por lo general en el diseño se puede elegir entre un método de equilibrio límite basado en el análisis pseudo-estático (Mononobe y Matsuo, 1929; Okabe, 1926; entre otros) o métodos basados en desplazamientos horizontales admisibles (Richards y Elms, 1979; Nadim y Whitman, 1983; entre otros). (Afanador, Sanjuán y Medina, 2012).

### 2.1 Método de Richards-Elms.

Este método calcula desplazamiento de manera análoga al bloque deslizante de Newmark (1965).

Las hipótesis del método son:

- El muro es rígido.
- Se incluyen las fuerzas de inercia debido a la masa del muro.
- Solo se considera el desplazamiento del muro.
- El terreno del trasdós está seco.

Para aplicar el método se requiere determinar el coeficiente de aceleración máxima transmisible suelo-muro ( $N$ ):

$$N = \tan \varphi_b - \frac{P_{AE} \cos(\theta + \delta) - P_{AE} \sin(\theta + \delta) \tan \varphi_b}{W} \quad (\text{Ec. 1})$$

Siendo:

$W$  : peso del muro.

$\theta$  : Ángulo de inclinación del relleno.

$\varphi_b$  : Ángulo de fricción de la base.

$\delta$  : Fricción entre el muro y el suelo.

$P_{AE}$  : Presión activa ejercida por el relleno calculada con ecuación de Mononobe-Okabe. [6]

$$P_{AE} = 0.5\gamma H^2(1 - N_V)K_{AE} \quad (\text{Ec. 2-a})$$

Donde:

$P_{AE}$  : Empuje lateral de tierra activo debido al sismo.

$H$  : Altura del muro.

$\gamma$  : Peso específico del suelo de relleno.

$N_v$  : Coeficiente de aceleración vertical.

$\varphi$  : Ángulo de fricción del suelo del relleno.

$\delta$  : Ángulo de fricción entre la estructura y el suelo.

$K_{AE}$  : Coeficiente de presión lateral debido al sismo. [9]

$$K_{AE} = \frac{\cos(\varphi - \theta - \psi)}{\cos\psi \cos^2 \theta \cos(\delta + \theta + \psi) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\delta + \varphi) \text{sen}(\varphi - \beta - \psi)}{\cos(\delta + \theta + \psi) \cos(\beta - \theta)}} \right]^2} \quad (\text{Ec. 2-b})$$

Donde el ángulo de inercia sísmico está definido como [11]:

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{N_h}{1 - N_v} \right) \quad (\text{Ec. 2-c})$$

\*Véase la figura 1 para referenciar los ángulos.

Siendo:

$N_v$  : Coeficiente sísmico vertical.

$N_h$  : Coeficiente sísmico horizontal.

Luego para calcular el desplazamiento permanente se utiliza la siguiente ecuación:

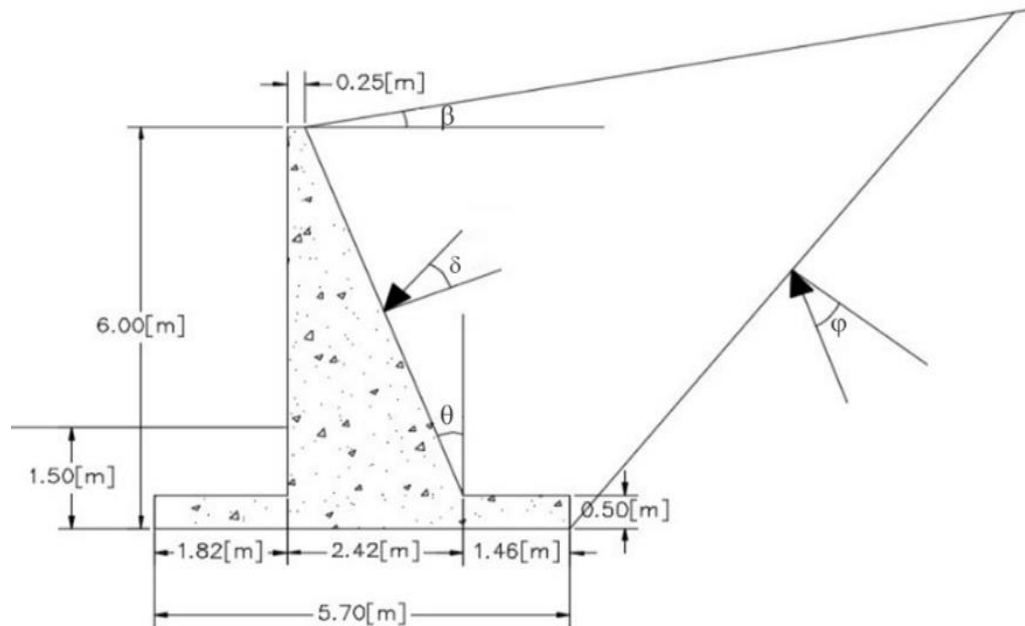
$$d_{perm} = 0.087 \frac{V_{max}^2 * A_{max}^3}{Ay^4} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$V_{max}$  : Velocidad máxima del sismo en m/s.

$A_{max}$  : Aceleración máxima del sismo en m/s<sup>2</sup>.

$A_y = N * g$ : Aceleración crítica del muro en  $m/s^2$ . [2]



**Figura 1.** Dimensiones del muro

## 2.2 Método de Whitman-Liao.

En 1985, Whitman y Liao encontraron inconsistencias provenientes de adoptar las simplificaciones expuestas en las hipótesis de Richards-Elms, que no consideraban la respuesta dinámica del terreno (deformidad del relleno y la falla por giro), las aceleraciones verticales producidas por el sismo y los mecanismos que combinan movimientos de rotación y traslación (Bustamante y Romanel,2011). Propusieron la siguiente correlación para estimar los desplazamientos permanentes del muro de gravedad:

$$\bar{d}_{perm} = \frac{37V_{max}^2}{A_{max}} e^{-9.4A_y/A_{max}} \quad \text{(Ec. 4)}$$

Esta ecuación maneja la misma anotación que la de Richards-Elms, Universidad de California (UC Berkeley, s.f.)

### 2.3 PLAXIS 2D.

Es un software de elementos finitos orientado a las aplicaciones en ingeniería civil, creado en la Delft University of Technology (Delft, Holanda) en el año 1987. PLAXIS 2D incluye un entorno completo de desarrollo, donde se establecen: los parámetros del suelo, la geometría del modelo, la malla de elementos finitos, los niveles freáticos, los puntos de control y las fases de análisis. Posterior a esto, se realizan los cálculos de las fases previamente mencionadas (*Calculations*), y finalmente, en la etapa de postprocesamiento (*Output, Curves*), se accede a los resultados del análisis, permitiendo también generar tablas de las variables calculadas (esfuerzo, deformación, aceleración, velocidad, etc.) y gráficos respecto a los puntos de control para dichas variables según se desee.

Dentro de las características más importantes de este programa, están:

- El modelado de los suelos puede efectuarse bidimensionalmente con una malla de elementos triangulares de 6 o 15 nodos.
- El comportamiento de los materiales puede representarse por medio de diferentes modelos constitutivos, entre los que se encuentran: *Linear Elastic, Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Jointed Rock, Soft Soil Creep, Hardening Soil with small strain stiffness, Soft Soil, Modified Cam-Clay*, entre otros.
- Para el análisis dinámico, se dispone de bordes absorbentes de acuerdo con la formulación de Lysmer y Kuhlemeyer (1969). Además, para el caso de análisis sísmico, se puede definir la

excitación total basal en forma de aceleraciones, velocidades o desplazamientos, a través de archivos de texto (Tiznado, 2010).

### 3. Modelo de análisis

Los métodos teóricos utilizados fueron los descritos en el marco teórico (véase sección 2.1 y 2.2), para los cuales se requirió de la utilización del software Microsoft Excel. Para el análisis por medio de elementos finitos se utilizó el software PLAXIS 2D.

#### 3.1 Descripción del problema

Las dimensiones y parámetros del muro a analizar fueron adaptadas de las obtenidas de la investigación de los ingenieros Juan Sebastián Gutiérrez Gómez y Carlos Eduardo Rodríguez Pineda presentado en su artículo *Diseño de muros de contención bajo carga sísmica en suelos homogéneos cohesivos y friccionantes mediante un aplicativo computacional* (Gutiérrez y Rodríguez, 2013). (Véase figura 1 y tabla 1).

**Tabla 1.**

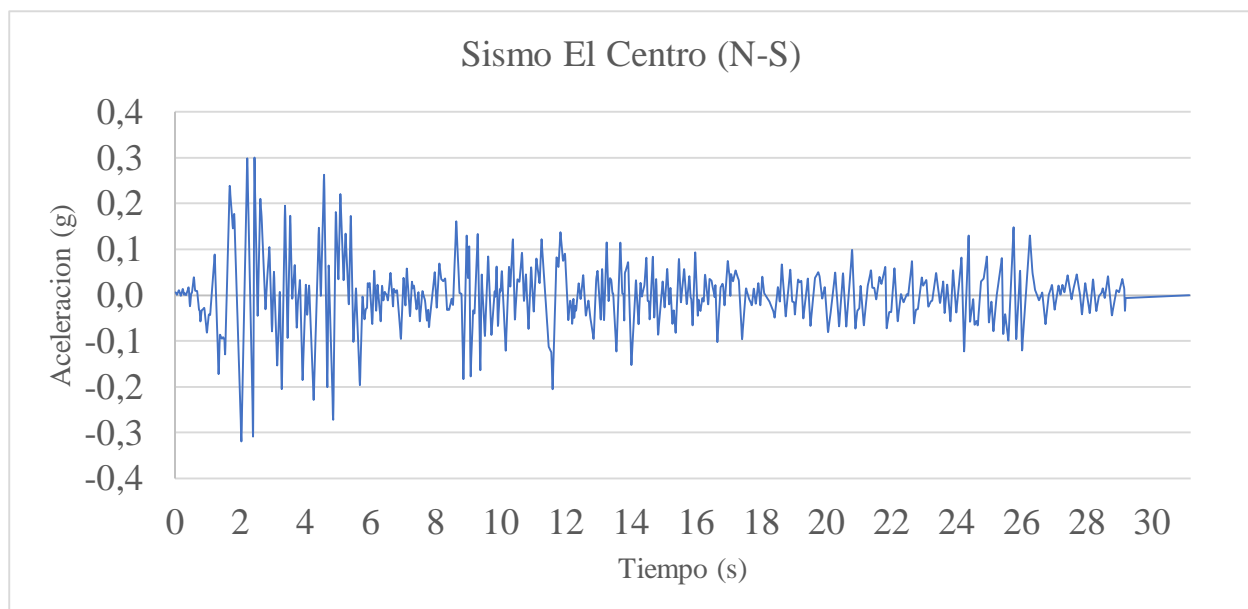
*Parámetros de diseño*

	Suelo de Relleno	Suelo de Cimentación
$\varphi$ (°)	34	30
$\beta$ (°)	10	-
$\theta$ (°)	20.4	-
$\delta$ (°)	20	20
c(kPa)	1	1
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17	16
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	20

*Nota:* Tomando de Gutiérrez y Rodríguez, 2013. Retrieved from [http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2013/cf/siisg/memorias/documentos/2\\_6Muros\\_contencion.pdf](http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2013/cf/siisg/memorias/documentos/2_6Muros_contencion.pdf).

### 3.2. Análisis Teórico

En el análisis dinámico de los métodos teóricos implementados (Richards-Elms, 1979; Whitman-Liao, 1985) se trabajó con el valor de la aceleración pico registrada del espectro del sismo “El Centro” ocurrido en California en el año 1940, de su componente N-S (norte-sur). El registro de aceleraciones se puede apreciar en la figura 2 (UC Berkeley, s.f.). El coeficiente sísmico horizontal  $N_h = 0.32g$  y La velocidad pico registrada con valor de  $V_{max} = 13.7 \text{ in/s}$  ( $0.34798 \text{ m/s}$ ), fueron tomado de los registros del trabajo de Newmark (1965).



**Figura 2.** Registro de aceleraciones del Sismo "El Centro". Adaptado de la universidad de Berkeley. Recuperado de: [https://nisee.berkeley.edu/elibrary/files/documents/data/strong\\_motion/a.k.chopra/el\\_centro\\_data](https://nisee.berkeley.edu/elibrary/files/documents/data/strong_motion/a.k.chopra/el_centro_data)

Una vez obtenida la información necesaria para el análisis, primeramente, se procedió a calcular el coeficiente de aceleración máxima transmisible suelo-muro ( $N$ ) con la ecuación 1. No obstante, la presión activa ( $P_{AE}$ ) está en función de este mismo coeficiente, por lo cual dicha ecuación se resuelve de forma iterativa o a través de métodos gráficos como el desarrollado en el informe de Whitman y Liao (1985). En la tabla 2 se aprecian los valores utilizados para el cálculo del coeficiente  $N$ , a partir del método gráfico:

**Tabla 2.**

*Cálculo del coeficiente de  $N$*

N asumido	$\Psi$ (rad)	$K_{AE}$	$P_{AE}$ (kN/m)	N calculado
<b>0.05</b>	0.050	0.563	172.26	0.446
<b>0.10</b>	0.100	0.625	191.09	0.421
<b>0.15</b>	0.149	0.698	213.66	0.391
<b>0.20</b>	0.197	0.789	241.33	0.355
<b>0.25</b>	0.245	0.903	276.31	0.308
<b>0.30</b>	0.292	1.054	322.52	0.247
<b>0.35</b>	0.336	1.268	388.13	0.160

En la estimación del ángulo de inercia sísmico  $\psi$  se utilizó la ecuación 2-c, tomando el coeficiente sísmico horizontal con valor nulo ( $N_v = 0$ ), tal como sugirieren los autores Seed y Whitman citado en el trabajo de Elms y Richards (1979), así mismo Whitman y Liao (1985) afirman que el coeficiente  $N_v$  no tiene una contribución significativa en el desplazamiento del muro a menos que se presenten picos en la aceleración vertical.

Una vez estimado el ángulo de inercia sísmico ( $\psi$ ) seguidamente se reemplaza en las ecuaciones 2-b y 2-a, para el cálculo del coeficiente de presión activa ( $K_{AE}$ ) y la presión lateral resultante debido al sismo ( $P_{AE}$ ), respectivamente. Por último, se calcula el coeficiente de aceleración máxima transmisible suelo-muro real ( $N_{calculado}$ , en la tabla 2) reemplazando las variables de la ecuación 1.

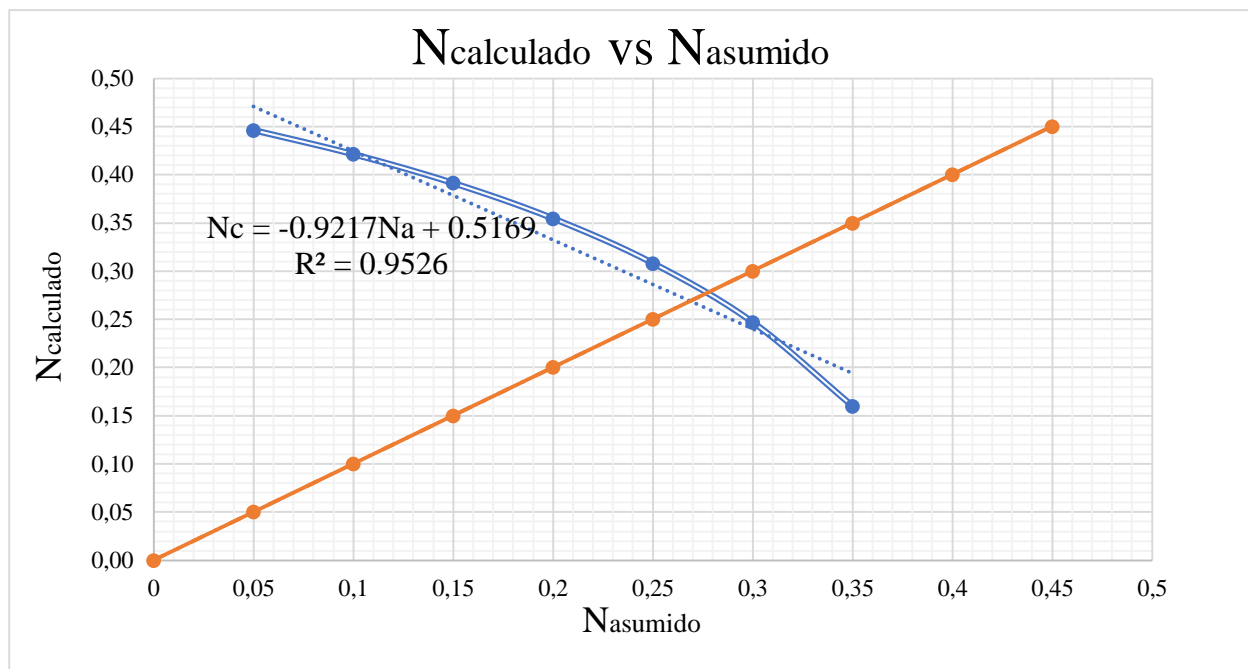
A partir de los resultados obtenidos (véase la tabla 2), se procede a graficar los puntos  $N_{asumido}$  y  $N_{calculado}$  como pares ordenados y se realiza una regresión lineal de la curva que describen (función azul en la figura 3). Luego en el plano se trazó una línea con pendiente de  $45^\circ$  respecto a la horizontal (cuya ecuación es la función identidad,  $y = x$ ; y se presenta en color naranja y continua en la figura 3). El punto de intersección entre la regresión y la función identidad señala en el gráfico el coeficiente de aceleración máxima transmisible suelo muro final. Asimismo, por motivos de verificación se confirmó su valor, calculándolo de forma iterativa mediante la función *Buscar Objetivo* de Microsoft Excel.

El coeficiente de aceleración máxima transmisible suelo muro estimado por el método gráfico tiene un valor  $N_1 = 0.268$ , y el calculado por iteración, un valor de  $N_2 = 0.277$ . Debido a la incertidumbre de los resultados se realizó un promedio aritmético ( $N_{teo}$ , coeficiente teórico) entre ambos, para realizar los respectivos cálculos de desplazamiento:

$$N_{teo} \cong 0.273$$

A continuación, se reemplaza el coeficiente teórico ( $N_{teo}$ ) en la ecuación para el cálculo de desplazamiento de Richards-Elms (ecuación 3), considerando que a la aceleración pico del sismo se debe multiplicar por la aceleración de la gravedad.

En la solución de Whitman-Liao, igualmente se utiliza el coeficiente  $N_{teo}$  para calcular la aceleración crítica del muro ( $A_y$ ) y esta luego es reemplazada en la ecuación de desplazamiento (ecuación 4).



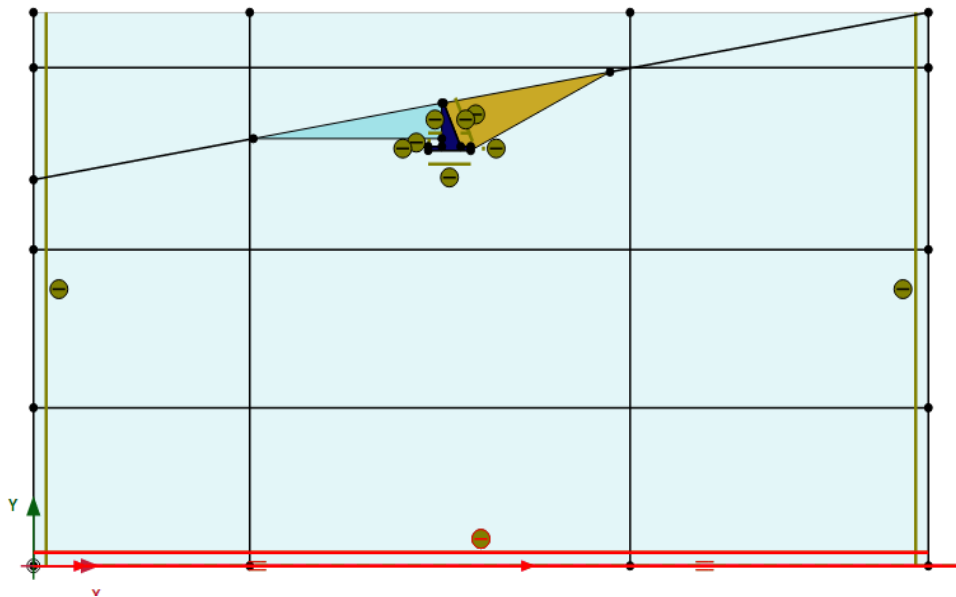
**Figura 3.** Regresiones para la estimación del coeficiente de aceleración máxima transmisible entre suelo y muro ( $N$ ) por método gráfico.

### 3.3 Análisis por PLAXIS 2D (elementos finitos)

Se aplicó el método de elementos finitos modelando primero en el programa PLAXIS 2D. Para esto, se ha construido el modelo por etapas (delimitadas por el software), definiendo en cada una las propiedades y características de las mismas. El proceso se explica a continuación:

**3.3.1 Etapa “Soil”.** En esta etapa se modeló la geometría general del suelo usando la herramienta “Create *borehole*”, creando el contorno del modelo, cuyas dimensiones generales de ancho y alto son 120 metros y 70 metros, respectivamente. Se crearon los materiales a usar (suelo de cimentación, suelo de relleno y concreto) con sus respectivos modelos tipo y parámetros (Véase tablas 1 y 3). Por último, se asignaron al esquema general del modelo las propiedades concernientes al suelo de cimentación.

**3.3.2 Etapa “Structure”.** Se incluye en esta parte la geometría específica del modelo: la forma del muro, la región pertinente al suelo de relleno y la pendiente del mismo (véase figura 4). De esta manera, se modela bajo la influencia de las presiones estáticas del suelo, las mismas que se tomaron en cuenta en el cálculo por métodos teóricos.



**Figura 4.** Geometría del suelo y del muro y la Línea de desplazamiento.

Sin embargo, se introdujo también una componente dinámica en la parte inferior del modelo por medio una línea de desplazamiento (*Line displacement*) a la que se le asignó, en este caso, el

registro de aceleraciones concerniente a la componente norte-sur (**N-S**) del sismo ocurrido en el año 1940 en “El Centro”, California, tomado de la Universidad de California, Berkeley (véase figura 4.)

El modelo del material del que se componen los suelos, además de los parámetros ya mencionados (véase tabla 1), tiene en cuenta algunos parámetros más dentro de sus cálculos, a saber: el módulo de elasticidad (o módulo de Young,  $E$ ) y el coeficiente de Poisson (véase tabla 3). Con estas, el programa calcula automáticamente el módulo de rigidez ( $G$ ), módulo edométrico ( $E_{oed}$ ), la velocidad de onda de corte y la velocidad de onda de compresión del material descrito (PLAXIS 2D, 2019).

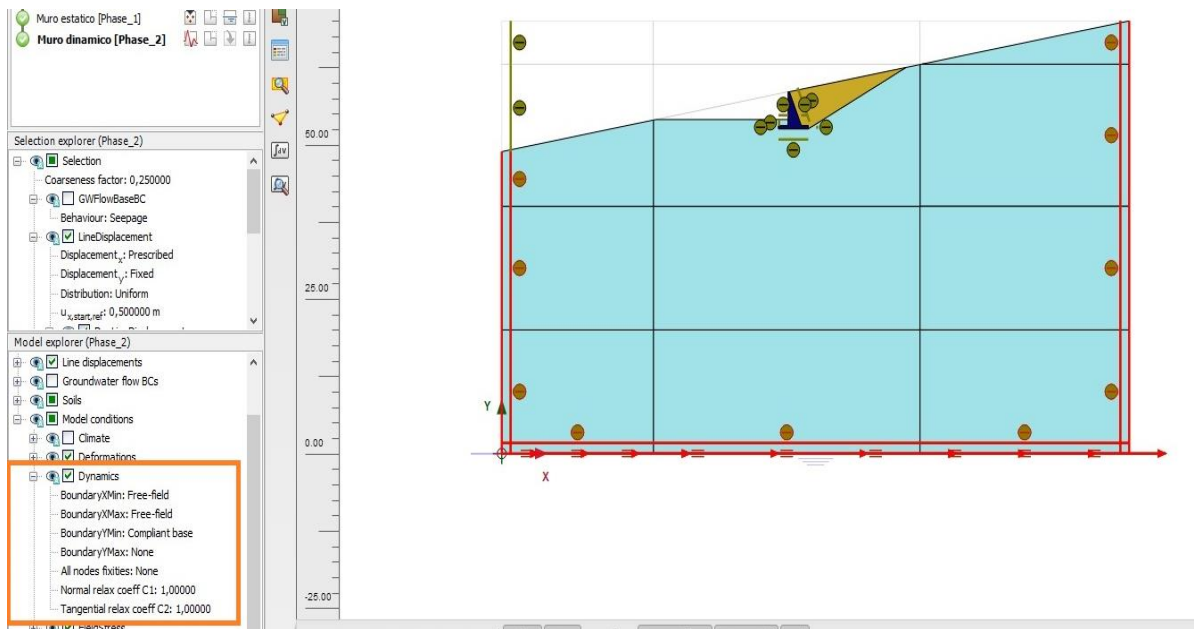
**Tabla 3.**

*Otros parámetros usados en el modelo*

	<b>Suelo de cimentación</b>	<b>Suelo de relleno</b>	<b>Concreto</b>
<b>Modelo del material</b>	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Linear Elastic</i>
<b>Módulo de Young, <math>E</math> (kPa)</b>	4.90E+04	5.E+04	25.00E+06
<b>Coficiente de Poisson, <math>\nu</math></b>	0.3	0.33	0.15
<b>Módulo de Rigidez, <math>G</math> (kPa)</b>	18846.2	18797	10.87E+06

Para el material del muro, se asume un peso específico de  $24 \text{ kN/m}^3$ . El tipo de modelo usado fue “*Linear Elastic*”, debido a que es adecuado para simular el comportamiento de elementos estructurales, cuyas propiedades de resistencia son mayores a las de los suelos en general. Para los suelos de relleno y de cimentación del muro se utilizó el modelo de Mohr-Coulomb, que se asocia a un comportamiento perfectamente elasto-plástico. Los valores han sido tomados en concordancia con los esperados en un material de relleno y una arena densa como suelo de cimentación.

Finalmente, en esta etapa se introducen las condiciones de contorno alrededor del esquema del modelo. Estas permiten, en un análisis dinámico, que las ondas generadas y reflejadas debido al sismo salgan del modelo, de manera que no afecten el análisis. En este proyecto, se usaron las condiciones de frontera “*Free Field*” para las fronteras verticales y “*Compliant base*” para la frontera inferior del modelo, las cuales simulan el suelo, llegando a su periferia, como un medio continuo, permitiendo la propagación del sismo en la parte baja del modelo y la absorción de las ondas que intentan viajar más allá de estas fronteras (véase figura 5). Previamente a esto, se crearon las interfaces del modelo por medio de la herramienta “*Create interfaces on the boundary*”, que otorga automáticamente interfaces en el contorno de la figura, las cuales permiten activar las condiciones de frontera en el análisis dinámico del modelo. También se creó una interfaz entre el muro y el suelo con el fin que una interacción entre ellos.

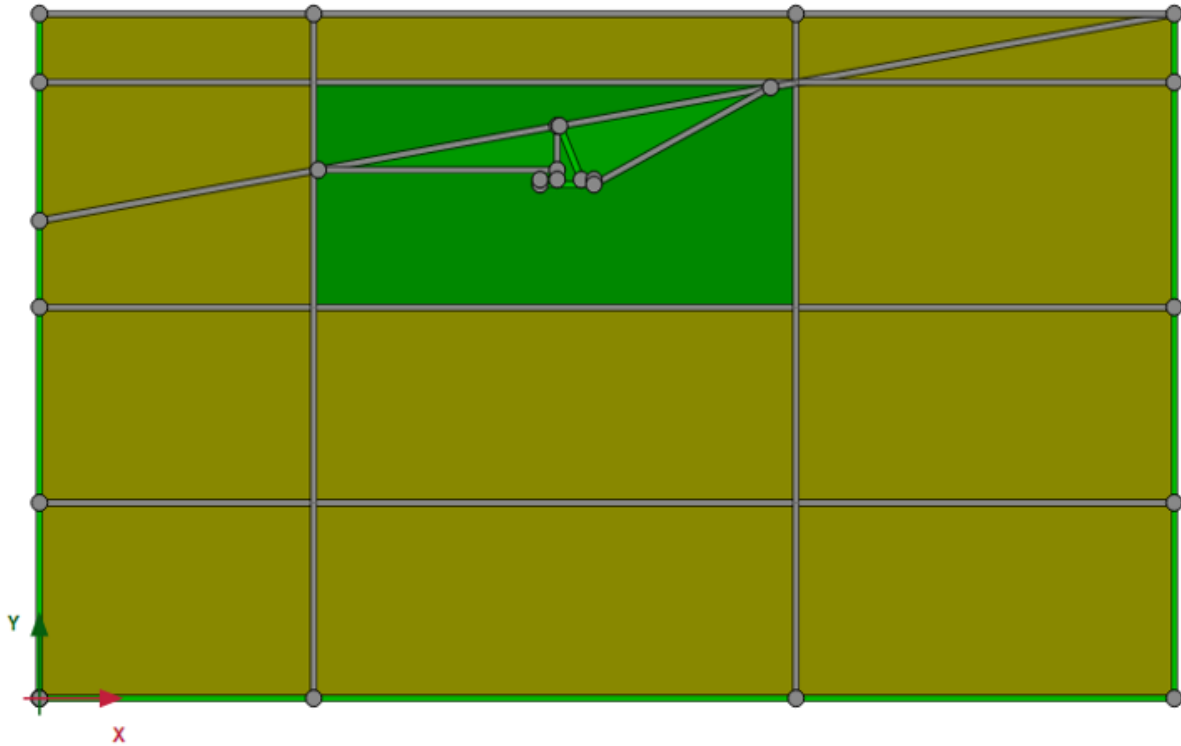


**Figura 5.** Condiciones de contorno

**3.3.3 Etapa “Mesh”.** El programa PLAXIS 2D permite generar una malla de elementos finitos del modelo y escoger desde la opción “Very fine” (una malla muy fina) hasta “Coarse” (una malla más amplia, por lo tanto, con menos elementos). “La malla debe ser lo suficientemente fina para obtener resultados numéricos precisos. Sin embargo, una malla muy fina llevará a tiempos de cálculos excesivos” (tomado textualmente de la traducción del manual de usuario PLAXIS 2D versión 2019) (PLAXIS 2D, 2019).

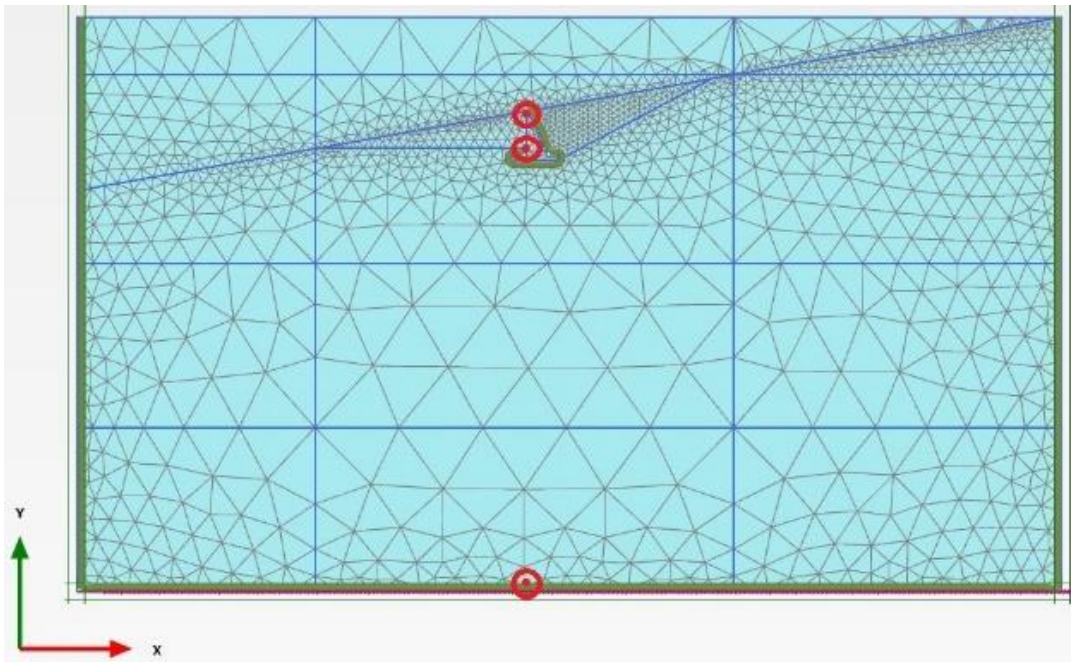
De igual manera, cuenta con un refinamiento local (*Local refinement*), con el que se puede aumentar o disminuir el número de elementos en un área específica del modelo en el que se quiera obtener resultados con mayor o menor grado de exactitud respectivamente, teniendo como finalidad hallar esfuerzos y/o deformaciones críticas. El refinamiento local puede ser descrito levemente de manera cualitativa: en las diferentes zonas del modelo, se generará un grosor de

mallas más finas o gruesas a medida que tienden a una tonalidad clara de verde o amarillo, respectivamente. Las zonas grises mantendrán el refinamiento global sin alteraciones.



**Figura 6.** Refinamiento local del modelo.

Para este caso, se utilizó un refinamiento local de tal manera que las zonas más cercanas al muro tuvieran la mayor cantidad de elementos y por consiguiente una mayor precisión en el cálculo de desplazamientos (véase figura 6).

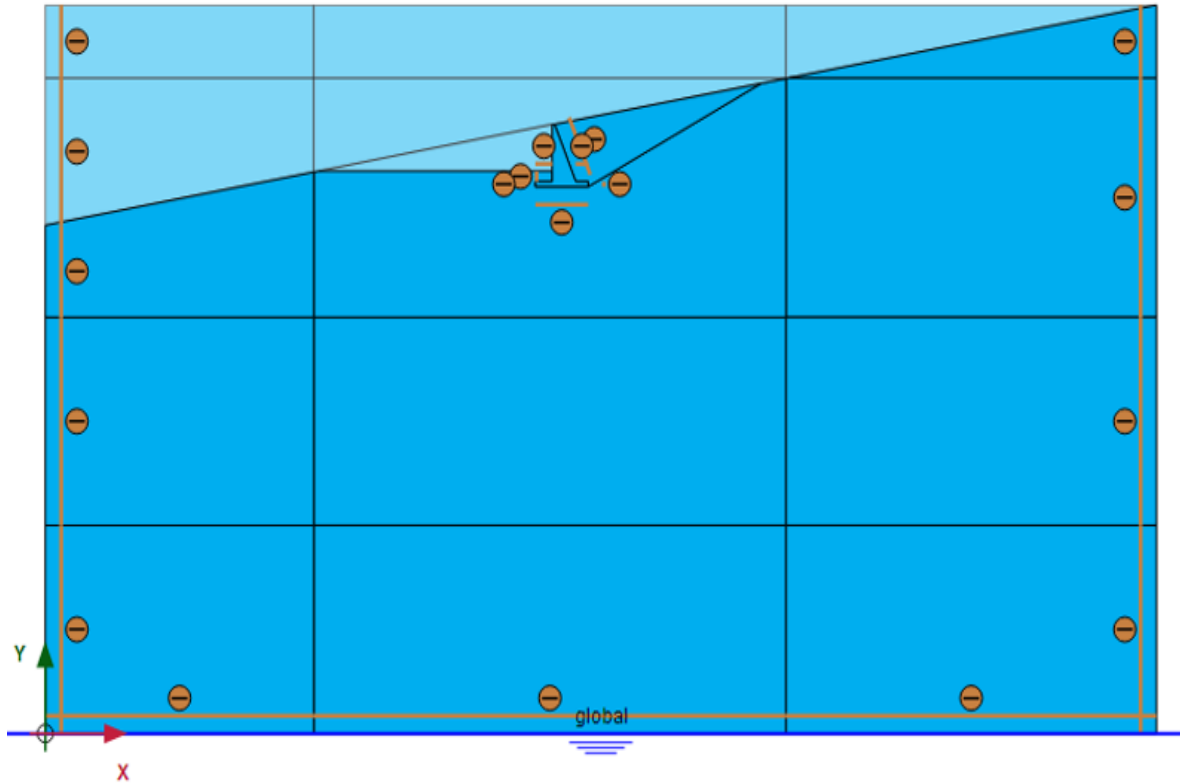


**Figura 7.** Malla del modelo con los puntos de análisis

Finalmente, en esta etapa se eligen los nodos clave en la malla para que registren en el tiempo, el cambio de esfuerzos, deformaciones, aceleraciones, entre otras variables, para luego poder graficarlas comparándolas entre sí (véase figura 7). En este caso, la base del modelo, la base del muro y la corona del muro fueron las zonas en las que se seleccionaron los nodos de la malla, escogidos para hacer seguimiento del modelo y posteriormente su respectivo análisis.

**3.3.4 Etapa “Flow Conditions”.** En esta etapa se asignaron las condiciones de contorno relativas al flujo subsuperficial en el modelo bajo el tipo de comportamiento “*Seepage*” (que indica un flujo de infiltración libre) y se ajustó el nivel freático global a la cota más baja del modelo ( $y = 0$ ). En otras palabras, no hay influencia del nivel freático en el análisis; por lo tanto, las

condiciones de contorno para flujo subsuperficial son irrelevantes, ya que los métodos teóricos suponen el suelo seco (véase figura 8).

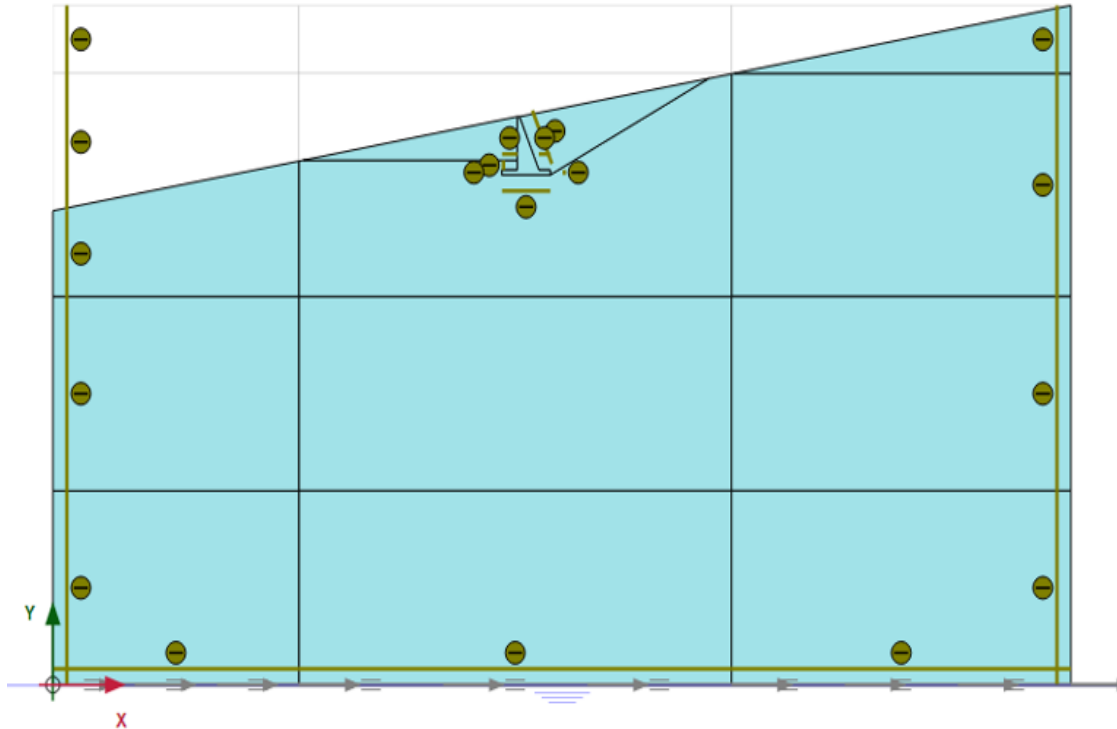


**Figura 8.** Condiciones del flujo subsuperficial

**3.3.5 Etapa “Staged Construction”.** El software PLAXIS 2D permite dividir en fases el análisis del muro de contención. Para esto, se asignaron tres fases, cada una de ellas se describe a continuación:

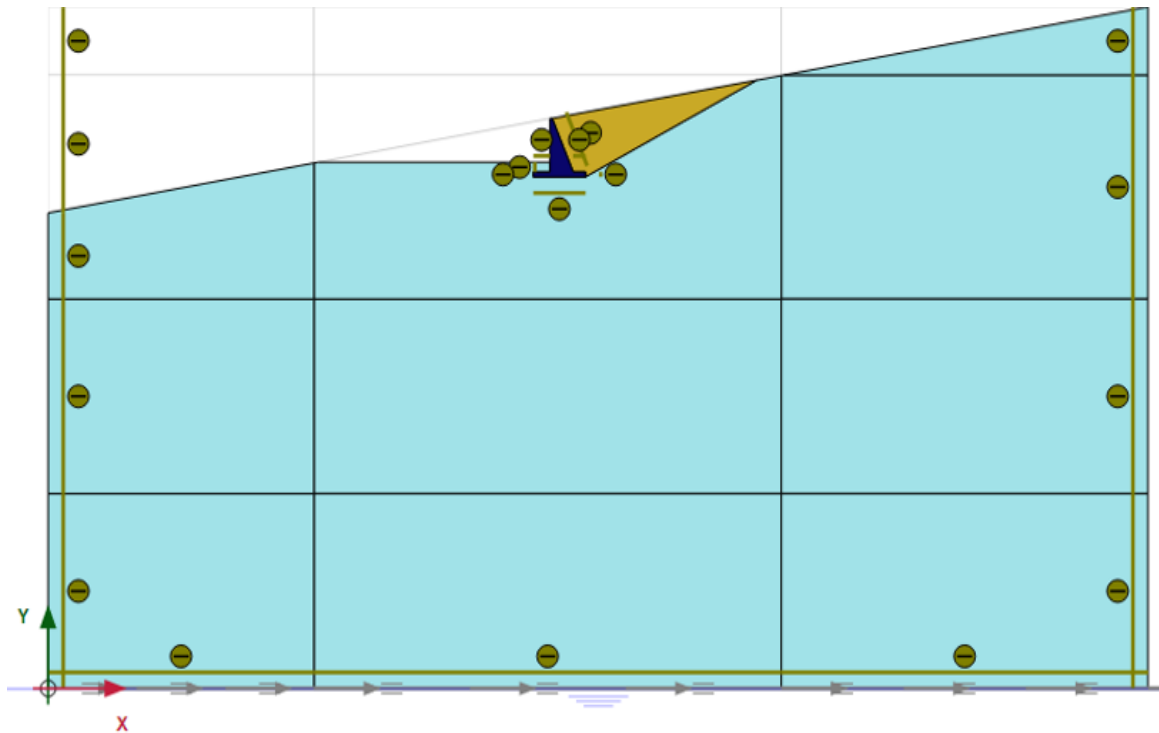
**3.3.5.1 Fase geoestática “Initial Phase”.** Esta fase es establecida automáticamente por el programa como fase inicial. “... es una fase en la que se realiza el cálculo del campo de esfuerzos iniciales para la configuración geométrica preliminar del modelo, por medio de cargas de

*gravidad o por el procedimiento  $K_0$ .*” (PLAXIS 2D, 2019). Para esta configuración inicial (véase figura 9), se presenta el esquema de suelo antes de la construcción del muro, es decir, el terreno original.



**Figura 9.** Configuración de la fase geo-estática.

**3.3.5.2 Fase estática con muro y relleno “2nd Phase”.** En esta fase se utiliza el tipo de cálculo “*Plastic*” (utilizada generalmente en la realización de análisis de deformación elasto-plástico sin tener en cuenta el cambio de presión de poros en el tiempo), se asignan los valores correspondientes al muro (concreto) y al suelo de relleno. Esto con el objetivo de modelar el muro en estado funcional, es decir, después de los procesos de excavación, construcción y empleo del material de relleno en la parte trasera del mismo (véase figura 10).

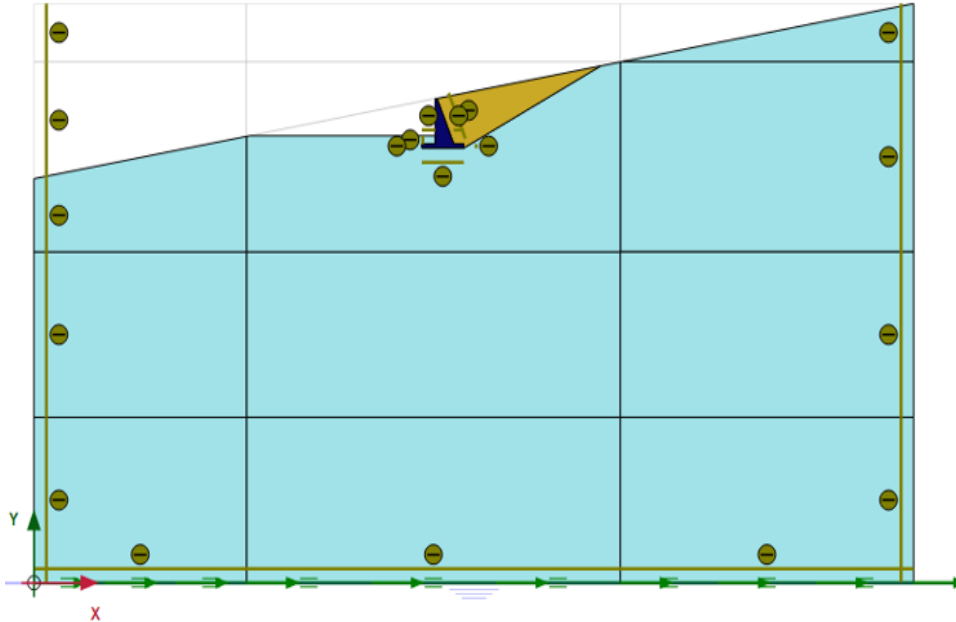


**Figura 10.** Configuración de la segunda fase

Debido a la influencia de las presiones del suelo bajo el comportamiento trazado por el modelo de Mohr-Coulomb, se esperan puntos de plasticidad, indicando la presencia de deformaciones y esfuerzos al final de la fase. Estos valores se tendrán en cuenta para iniciar el cálculo de la fase dinámica.

**3.3.5.3 Fase dinámica “3rd Phase”.** Esta fase concierne al análisis sísmico del muro de contención, a la cual se asignó el tipo de cálculo “*Dynamics*”, que permite el análisis dinámico del modelo en un intervalo de tiempo determinado. Para esto, se activó la línea de desplazamiento (*Line displacement*) con el registro de aceleraciones y las interfaces (*Interfaces*) en las fronteras del modelo, permitiendo así, la perturbación de las ondas del sismo, su propagación y salida del modelo al llegar a los bordes de este (véase sección 3.3.2.).

Se configura también el intervalo de tiempo a 31.18 segundos, que es la duración del registro del sismo (véase figura 11).



*Figura 11.* Configuración de la tercera fase.

#### 4. Resultados y discusión

El coeficiente de aceleración máxima transmisible suelo-muro ( $N$ ) que fue calculado tanto de forma gráfica como de manera iterativa, difiere en sus valores por lo que presenta un grado de incertidumbre. Por este motivo, se decidió utilizar promedio aritmético de ambos procedimientos con el fin de lograr una mejor aproximación de dicho valor, dando como resultado un coeficiente teórico de magnitud  $N_{teo} = 0.273$ . Este valor se ve mayormente afectado por la configuración del muro, debido a que este depende de los ángulos de fricción interna del suelo de relleno ( $\varphi$ ) y el ángulo de fricción suelo-muro ( $\delta$ ).

Es de esperarse que los resultados obtenidos por el método de Richards-Elms fueran mucho más conservadores que los obtenidos por Whitman-Liao, debido a que la solución planteada por Richards-Elms está basada en simplificaciones no muy convenientes, las cuales fueron descritas anteriormente en la sección 2.2.

En la tabla 4 se muestran los resultados de los métodos teóricos.

**Tabla 4.**

*Resultados Métodos teóricos*

$N_{teo}$	$V_{max}(m/s)$	$A_{max} (g)$	Desplazamiento (m)	
			Richards-Elms	Whitman-Liao
0.273	0.348	0.320	0.00634	0.00047

En la figura 12, que corresponde a la distribución de deformaciones horizontales en el muro, específicamente en la zona de trasdós del muro, se presentan valores alrededor de los 0.9 milímetros. Los valores negativos indican, según el eje de referencia usado, que el desplazamiento se dio hacia la izquierda. Esto, es debido al empuje de tierras sobre el muro y al aumento de este debido a la perturbación de las ondas.

Siguiendo un análisis más detallado, se escogieron los puntos referentes a la corona del muro, base del muro y a la base del modelo (véase figura 7), para ser comparados en sus valores de aceleración y desplazamiento. Las gráficas creadas a partir del seguimiento de estos puntos en específico a lo largo del tiempo de duración del registro se muestran a continuación (véase figura

15 y 16). Así mismo se muestran los esfuerzos horizontales debido al sismo al final de este, obtenidos a través de PLAXIS 2D (véase figura 13).

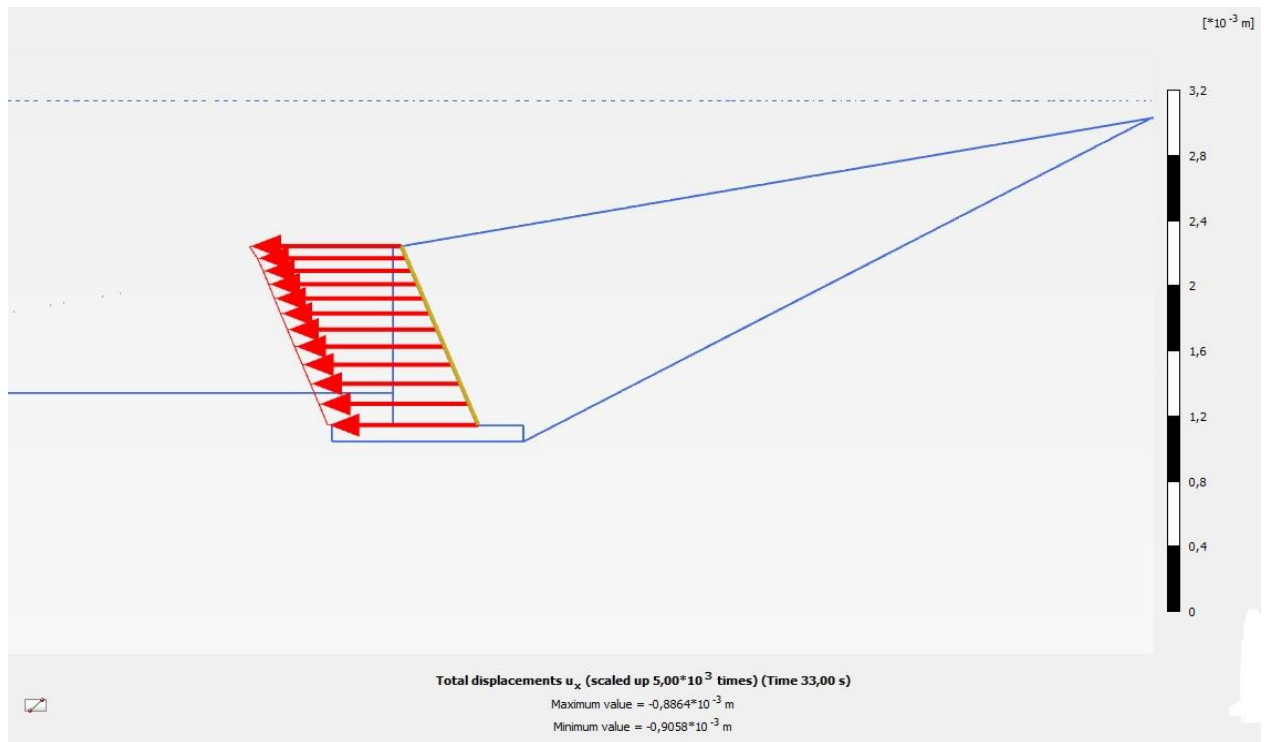
Para tener una perspectiva más general se decide compararlos con los usados en el método de Richards- Elms los cuales se hayan a través del método de Mononobe-Okabe, los cuales se idealizan como una distribución lineal (véase figura 14), arrojando los siguientes resultados mostrados en la tabla 5.

**Tabla 5.**

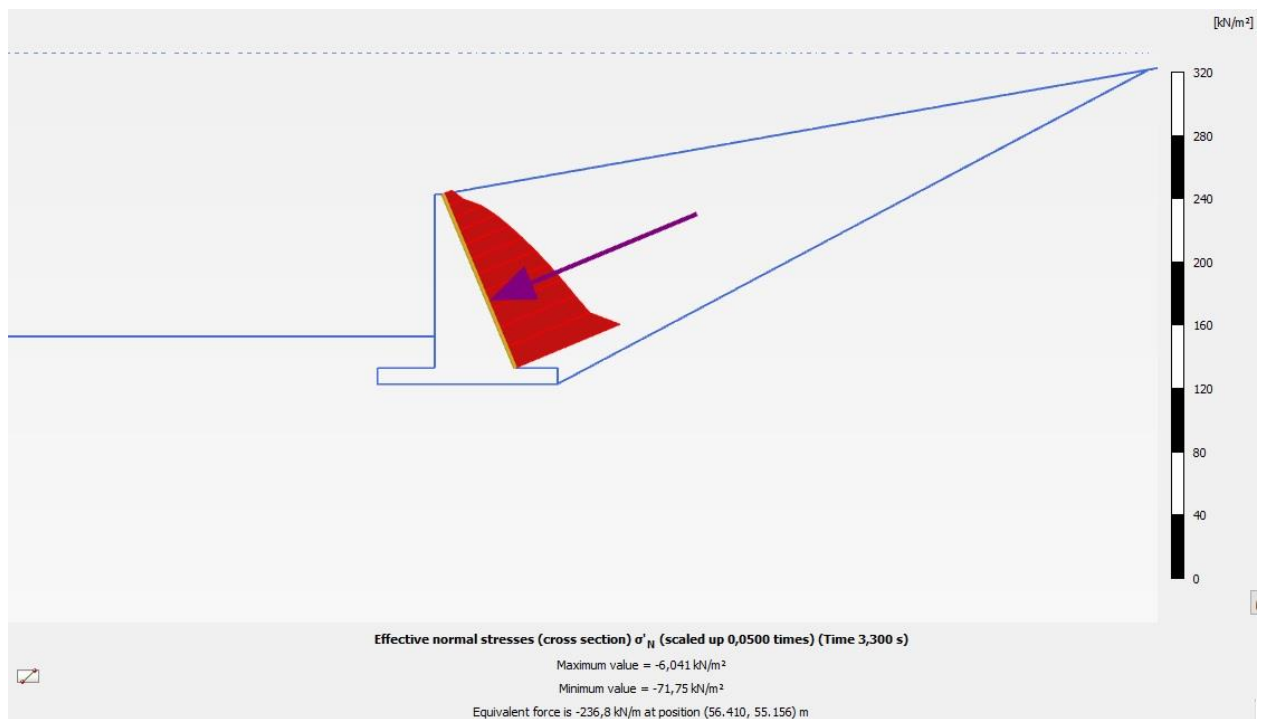
*Resultados de esfuerzos horizontales.*

<b>Métodos de análisis</b>	<b>Esfuerzo <math>\sigma_N</math> [kN/m]</b>
Elementos finitos	236.8
Richards-Elms	295.8

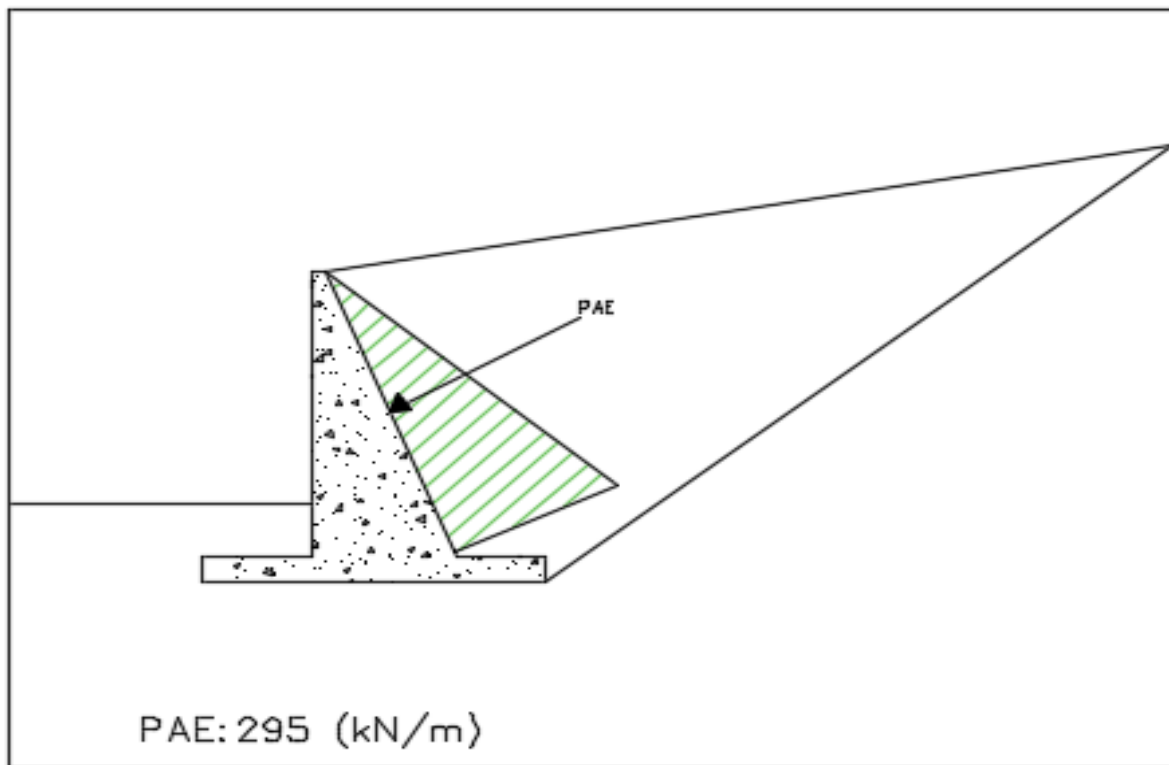
Como se puede observar los esfuerzos obtenidos por Richards-Elms son notablemente más altos que los obtenidos por PLAXIS 2D, debido posiblemente a que PLAXIS 2D posee una representación distribución de esfuerzos que se ajustan mejor a las condiciones reales del problema, en contraste con la distribución lineal usada por Richards-Elms.



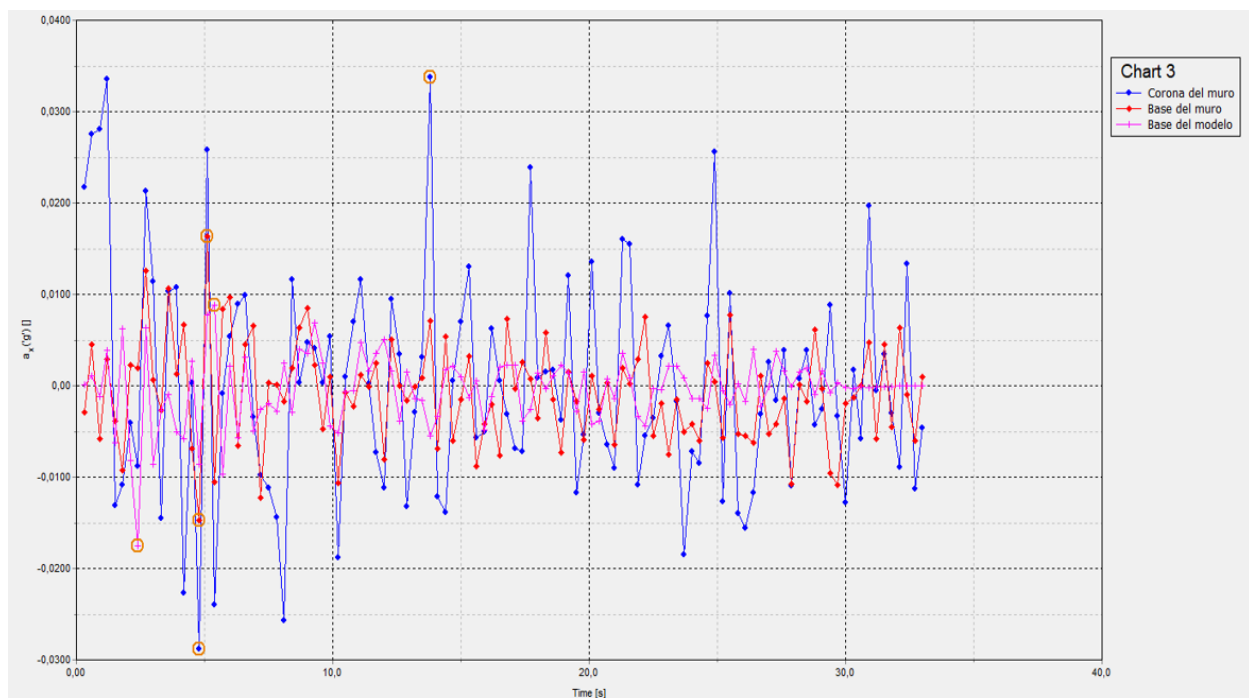
**Figura 12.** Deformaciones del muro después del sismo



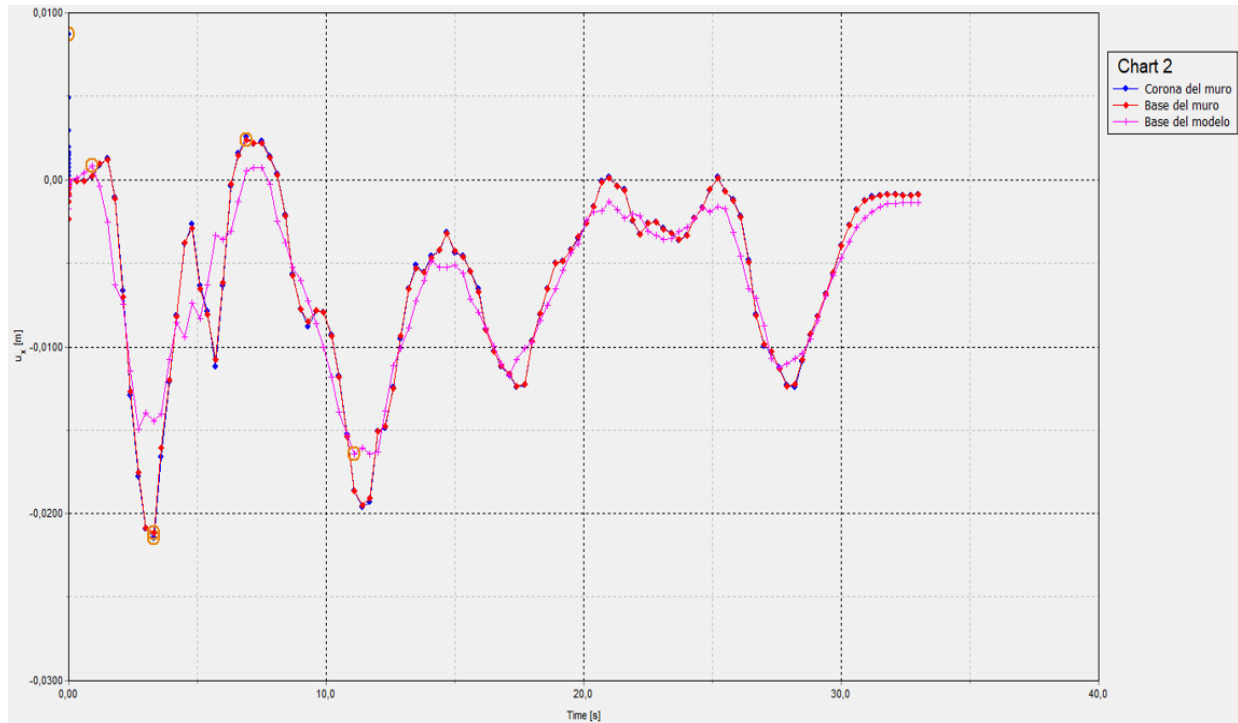
**Figura 13.** Esfuerzos horizontales dinámicos en el muro



**Figura 14.** Esfuerzos horizontales dinámicos obtenido por métodos teóricos



**Figura 15.** Gráfica de aceleraciones registradas en la base del modelo, la corona y base del muro.



**Figura 16.** Gráfica de los desplazamientos horizontales de la corona del muro, base del muro y base del modelo en el tiempo.

Como se señala en los círculos naranjas en la gráfica de la figura 15, la aceleración experimentada en la corona del muro presenta un valor pico de 0.55g, mientras la base del modelo (donde el sismo fue aplicado), representa fielmente el registro del sismo. Este aumento significativo influye de manera proporcional dentro de los desplazamientos sufridos en el muro (véase figura 16). Si bien el desplazamiento horizontal permanente de la corona del muro al final del sismo fue de 0.9 milímetros, cabe resaltar, que el mayor desplazamiento horizontal se produjo cerca de los 3 segundos después de iniciado el cálculo de la fase dinámica (tiempo en el cual se llega a la aceleración pico del registro), el cual fue de 23 milímetros.

El seguimiento de los desplazamientos calculados en la corona del muro después del sismo se muestra a continuación:

**Tabla 6.***Resultados de desplazamientos horizontales*

<b>Método de análisis</b>	<b>Desplazamiento</b>
	<b>[mm]</b>
Richards-Elms	6.34
Whitman-Liao	0.47
Elementos finitos	0.92

## 5. Conclusiones

Respecto a los métodos concernientes a las formulaciones teóricas propuestas por Richards-Elms y Whitman-Liao para el cálculo de desplazamientos horizontales, se puede apreciar una notable diferencia entre sus resultados, recalando que el coeficiente de aceleración máxima transmisible suelo-muro ( $N$ ), el cual depende de la geometría de este, define en gran parte lo que será el comportamiento del mismo. Estos métodos por sí no describen el comportamiento real del muro en el sismo, debido a que el uso simplificado del registro, usando el valor de aceleración y velocidad pico, no permite describir la evolución de los desplazamientos en el tiempo. Sin embargo, se puede tener en cuenta como punto de referencia para compararse con resultados de otros métodos en el caso de un diseño que considere los efectos sísmicos para la condición crítica de desplazamiento.

El modelo de elementos finitos además de tener en cuenta las condiciones de frontera, los parámetros del suelo (entre ellos el coeficiente de Poisson y el módulo elástico del material), y el tipo de comportamiento que se espera del mismo, también permite la creación y análisis de las fases constructivas del modelo, siendo una de ellas un análisis dinámico en el cual se pueden apreciar los cambios presentados en los desplazamientos y esfuerzos a medida que ocurren perturbaciones dinámicas (sean cíclicas o sismos). Se evidencia entonces que este modelo es el que mejor representa las condiciones reales del caso, teniendo en cuenta que a la hora de concebir el modelo la región delimitada de análisis debe ser lo suficientemente amplia como para evitar tener en cuenta valores de desplazamiento que sugieran resultados irrelevantes.

Según los resultados obtenidos en los diferentes métodos de análisis, se puede inferir la importancia de las herramientas de cálculo enfatizadas en la representación de modelos como medida preliminar para estimar los desplazamientos de un muro de contención, siguiendo con la premisa de su exactitud y considerando su amplia opción de modelado en el comportamiento del suelo en un análisis sísmico.

El análisis a través del software PLAXIS 2D, el programa cuenta con herramientas como “*cross section*”, que permite presentar los resultados de desplazamientos y esfuerzos experimentados en una región determinada del modelo por medio de un corte en dicha zona, a su vez, se puede graficar el comportamiento dinámico del muro (sus deformaciones) en el tiempo, presentando un panorama general del evento sísmico. Tener la opción de ver los resultados desde diferentes perspectivas, contribuye de manera positiva a la hora de tomar decisiones cuando se esté realizando un diseño sísmico.

En los resultados se pudo evidenciar un valor conservador respecto al método de Richards-Elms en comparación a los otros métodos. Es indispensable entonces, usar métodos actualizados

que tengan aproximaciones más precisas. Si bien, utilizar dichos métodos para tener una idea general del comportamiento es aceptable, es imperativo realizar un análisis a través de un software especializado, como en este caso, que calcule por medio del método de elementos finitos, pues se pueden presentar resultados que difieran demasiado en sus valores.

## **6. Recomendaciones**

Para próximas investigaciones se puede optar por la comparación de distintos métodos teóricos mucho más actuales, como aquellos registrados en el código colombiano de puentes (CCP-14), con el fin de presentar una gama de resultados mucho más amplia a la hora de escoger un rango de valores en el desplazamiento en el muro en función al diseño sísmico. Así mismo, se puede trabajar en un análisis de sensibilidad para los parámetros del suelo en torno a la parte dinámica del modelo y examinar sus posibles cambios en el comportamiento.

Si bien es cierto que para poder comparar los métodos teóricos con este modelo se tomó la decisión de abatir el nivel freático, sería interesante incluirlo dentro del modelo de análisis, asumiendo el estado de la estructura relativo al final de su vida útil, tiempo para el cual, los drenes dentro de los muros pueden dejar de funcionar correctamente.

Se podría optar también por variar la geometría del modelo (Dimensiones del muro, inclinación del relleno, etc.) y realizar una comparación entre métodos de diseño con la hipótesis de desplazamientos restringidos (Mononobe-Okabe, entre otros) y métodos de diseño con la hipótesis de desplazamientos controlados (Richards-Elms, entre otros).

### Referencias Bibliográficas

- Afanador, G. N., Sanjuán P. Y., Medina C. D. (2012). Diseño sísmico de muros de contención en gravedad y voladizo. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(20), 97-104. <https://doi.org/10.24054/16927257.v20.n20.2012.195>.
- Báez, L. and Echeverri, P. (2015). *Diseño de Estructuras de Contención Considerando Interacción suelo-estructura* (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Bustamante, T., & Romanel, C. (2011). *Estudio del comportamiento de un muro de gravedad sometido a cargas originadas por un sismo en Perú*. Documento presentado en Conferencia Pan-Am CGS de Geotécnica – la 14.a Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica y el 64.o Congreso Canadiense de Geotécnica., Toronto, Canadá. Recuperado de <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper771.pdf>.
- D.G. Elms and R. Richards. (1979). SEISMIC DESIGN OF GRAVITY RETAINING WALLS. *New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 12(3), 8. Retrieved from [https://www.nzsee.org.nz/db/Bulletin/Archive/12\(2\)0114.pdf](https://www.nzsee.org.nz/db/Bulletin/Archive/12(2)0114.pdf)
- Gutiérrez, S., & Rodríguez, C. (2013). Diseño de muros de contención bajo carga sísmica en suelos homogéneos cohesivos y friccionantes mediante un aplicativo computacional Design of Retaining Walls under Seismic Loading in Homogeneous Cohesive and Granular Soils with a Computational Tool. *Universidad Javeriana*. Retrieved from [http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2013/cf/siisg/memorias/documentos/2\\_6Muros\\_contencion.pdf](http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2013/cf/siisg/memorias/documentos/2_6Muros_contencion.pdf).

- Ibrahim, K. M. H. I. (2015). Seismic displacement of gravity retaining walls. *HBRC Journal*, 11(2), 224–230. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcej.2014.03.006>
- Jurado Cabañes, C. (2012). *Problemas de interacción Suelo estructura en cimentaciones y muros de contención. Influencia De los fenómenos de despegue y deslizamiento* (Tesis doctoral. Universidad politécnica de Madrid, España). Recuperado de [http://oa.upm.es/13731/1/Carlos\\_Jurado\\_Cabanes\\_1.pdf](http://oa.upm.es/13731/1/Carlos_Jurado_Cabanes_1.pdf).
- Kramer, S. L. (2014). Performance-based design methodologies for geotechnical earthquake engineering. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(3), 1049–1070. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9484-x>
- Newmark, N. M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15(2), 139–160. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.139>
- Mylonakis, G., Kloukinas, P., & Papantonopoulos, C. (2007). An alternative to the Mononobe-Okabe equations for seismic earth pressures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(10), 957–969. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.01.004>
- PLAXIS. (2019). *PLAXIS 2D Reference Manual 2019*. Retrieved from [https://www.plaxis.com/?plaxis\\_download=2D-2-Reference.pdf](https://www.plaxis.com/?plaxis_download=2D-2-Reference.pdf)
- Taboda, A, Dimaté, C., & Fuenzalida, A. (1998). Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción. *Física de La Tierra*, 10, 111–147. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Cristina\\_Dimate/publication/39279094\\_Sismotectonica\\_de\\_Colombia\\_deformacion\\_continental\\_activa\\_y\\_subduccion/links/57596c4708ae414b8e43bc75/Sismotectonica-de-Colombia-deformacion-continental-activa-y-subduccion.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Cristina_Dimate/publication/39279094_Sismotectonica_de_Colombia_deformacion_continental_activa_y_subduccion/links/57596c4708ae414b8e43bc75/Sismotectonica-de-Colombia-deformacion-continental-activa-y-subduccion.pdf)

- Terzariol, E. Roberto, Aiassa, M. Gonzalo, & Arrúa, A. Pedro. (s.f.). *Diseño sísmico de estructuras de contención en suelos granulares*. Recuperado de [https://www.scipedia.com/wd/images/5/5b/Draft\\_Content\\_349094576Terzariol\\_et\\_al.pdf](https://www.scipedia.com/wd/images/5/5b/Draft_Content_349094576Terzariol_et_al.pdf).
- Tiznado Aitken, J. Carlos. (2010). *Comportamiento sísmico de estructuras rígidas de contención de suelos*. (Trabajo de Fin de Máster. Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile). Recuperado de <https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/1867/550935.pdf>.
- University of California, Berkeley NISEE-PEER e-Library (s.f.). *El Centro Data*. Recuperado el 23 de septiembre del 2019 de: [https://nisee.berkeley.edu/elibrary/files/documents/data/strong\\_motion/a.k.chopra/el\\_centro\\_data](https://nisee.berkeley.edu/elibrary/files/documents/data/strong_motion/a.k.chopra/el_centro_data)
- Whitman, R. V, & Liao, S. (1985). Seismic Design of Gravity Retaining Walls. In *DEFENSE TECHNICAL INFORMATION CENTER*. Retrieved from: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a152325.pdf>

## Apéndices

(Ver apéndice N adjunto en el CD-ROM y puede visualizarlo en la base de datos de biblioteca UIS)

**Apéndice A:** Configuración inicial de las propiedades generales del modelo en el software PLAXIS 2D.

Project properties

Project Model Constants

Type

Model Plane strain

Elements 15-Noded

Units

Length m

Force kN

Time s

Mass t

Temperature K

Energy kJ

Power kW

Stress kN/m<sup>2</sup>

Weight kN/m<sup>3</sup>

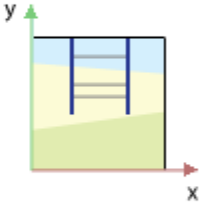
Contour

x<sub>min</sub> 0,00000 m

x<sub>max</sub> 120,000 m

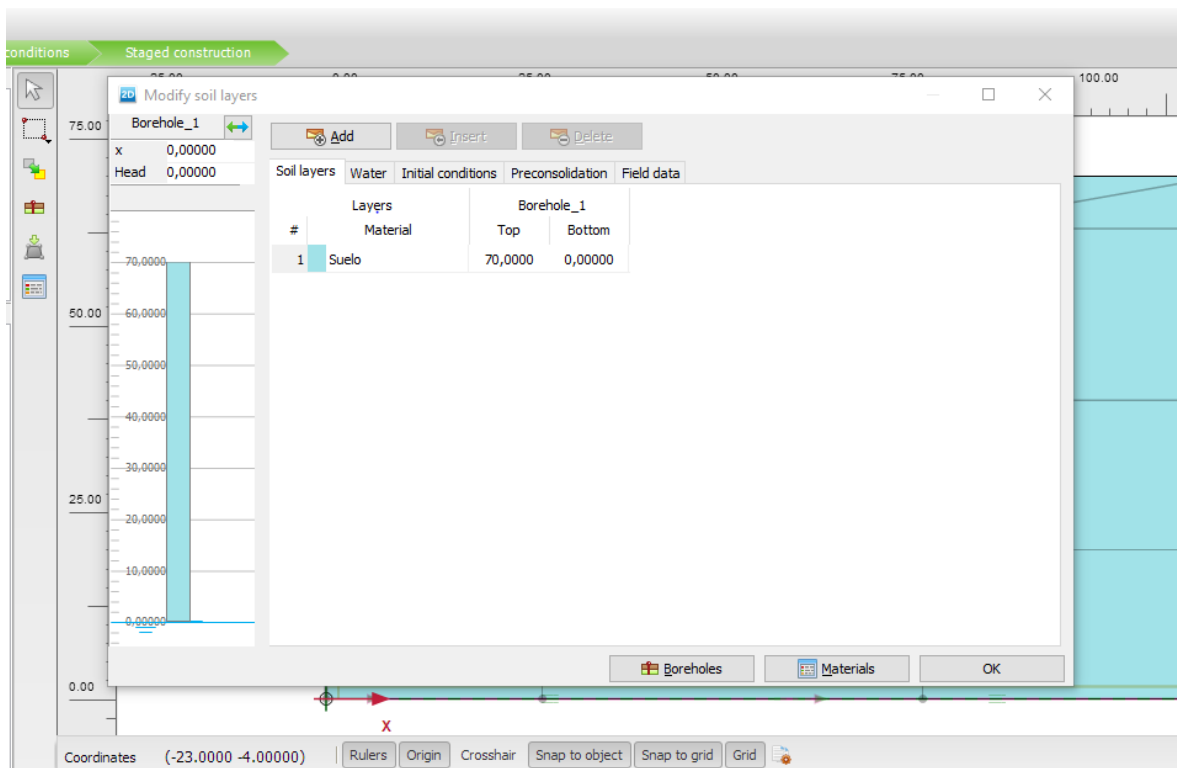
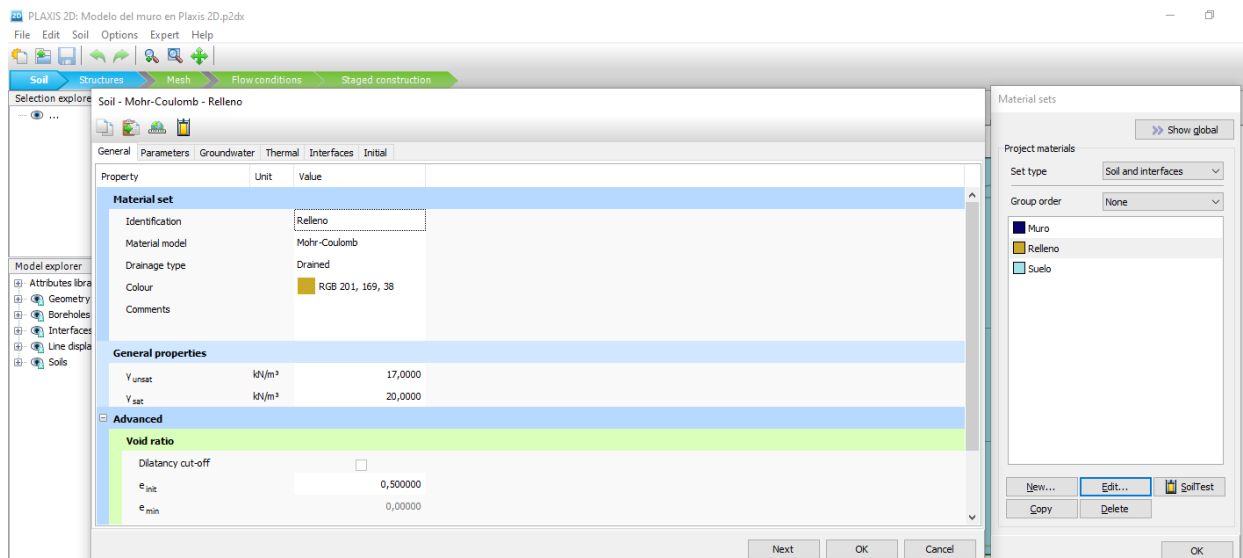
y<sub>min</sub> 0,00000 m

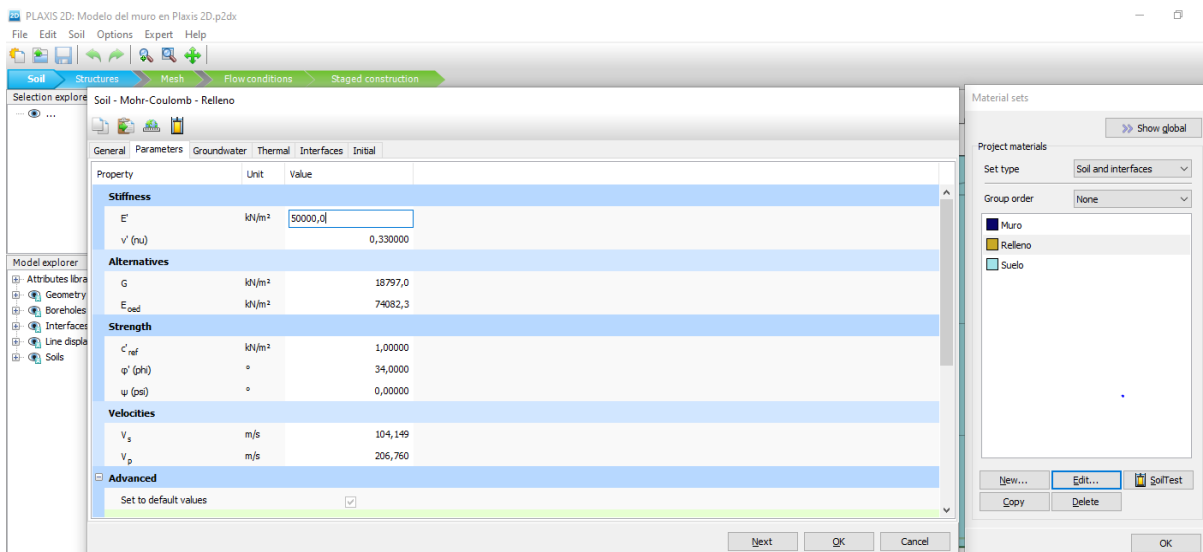
y<sub>max</sub> 80,0000 m



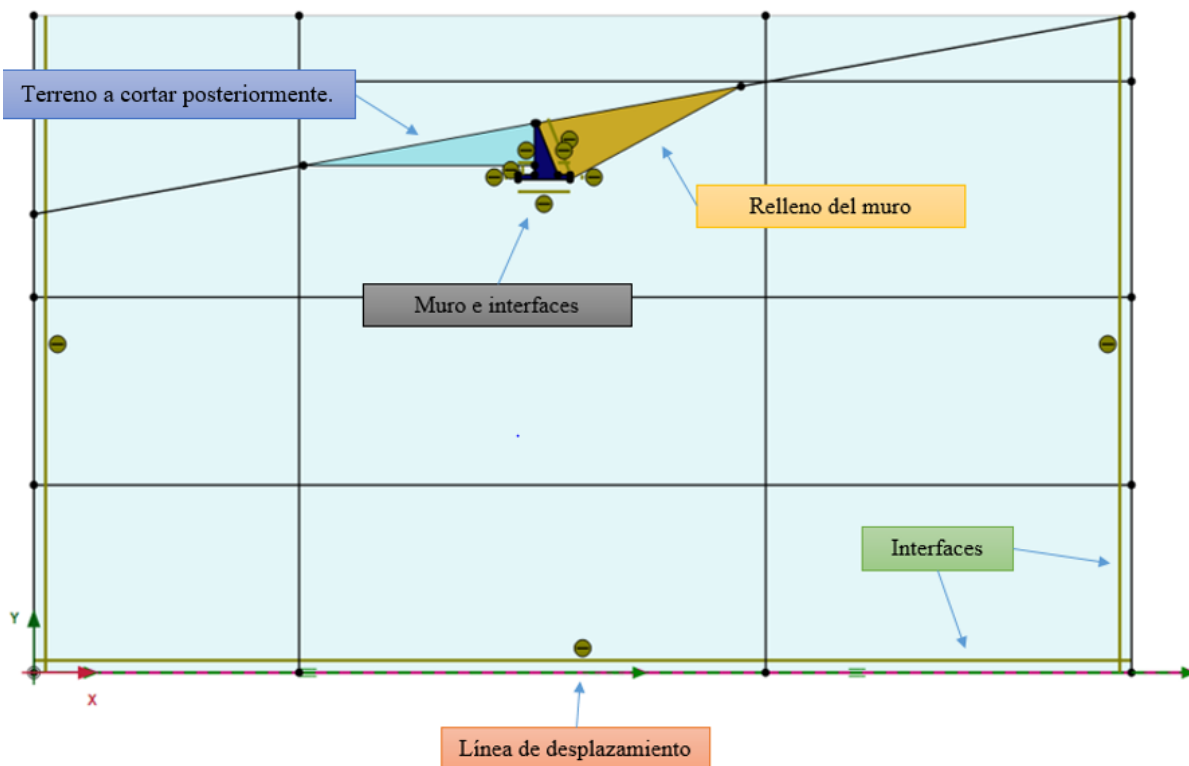
Set as default

Next OK Cancel

**Apéndice B:** Configuración del contorno general del suelo en el software PLAXIS 2D.**Apéndice C:** Configuración de las propiedades generales de los materiales en el software PLAXIS 2D.

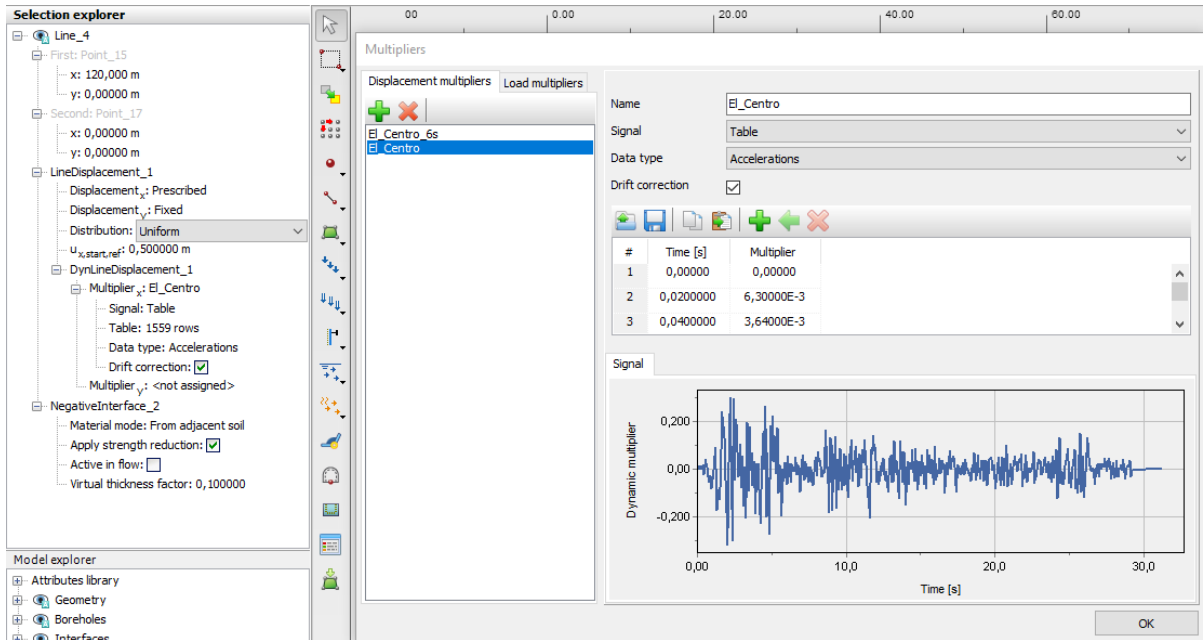
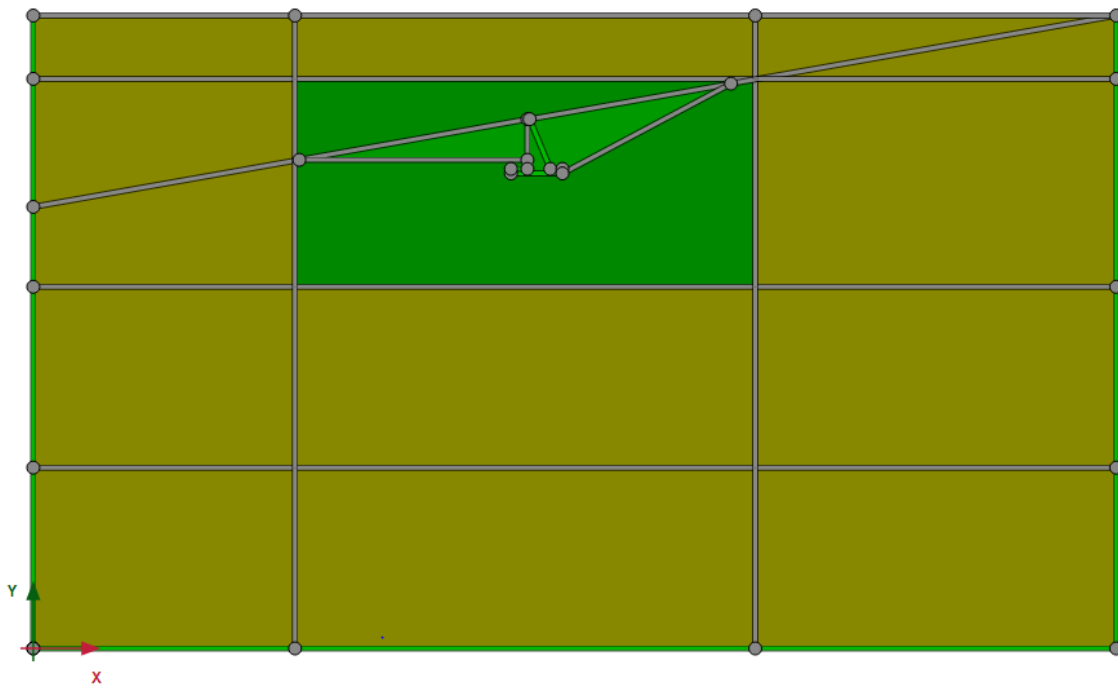
**Apéndice D:** Configuración de los parámetros de los materiales en el software PLAXIS 2D.

**Apéndice E:** Creación de secciones, geometría de muro, relleno del muro e interfaces en el software PLAXIS 2D.

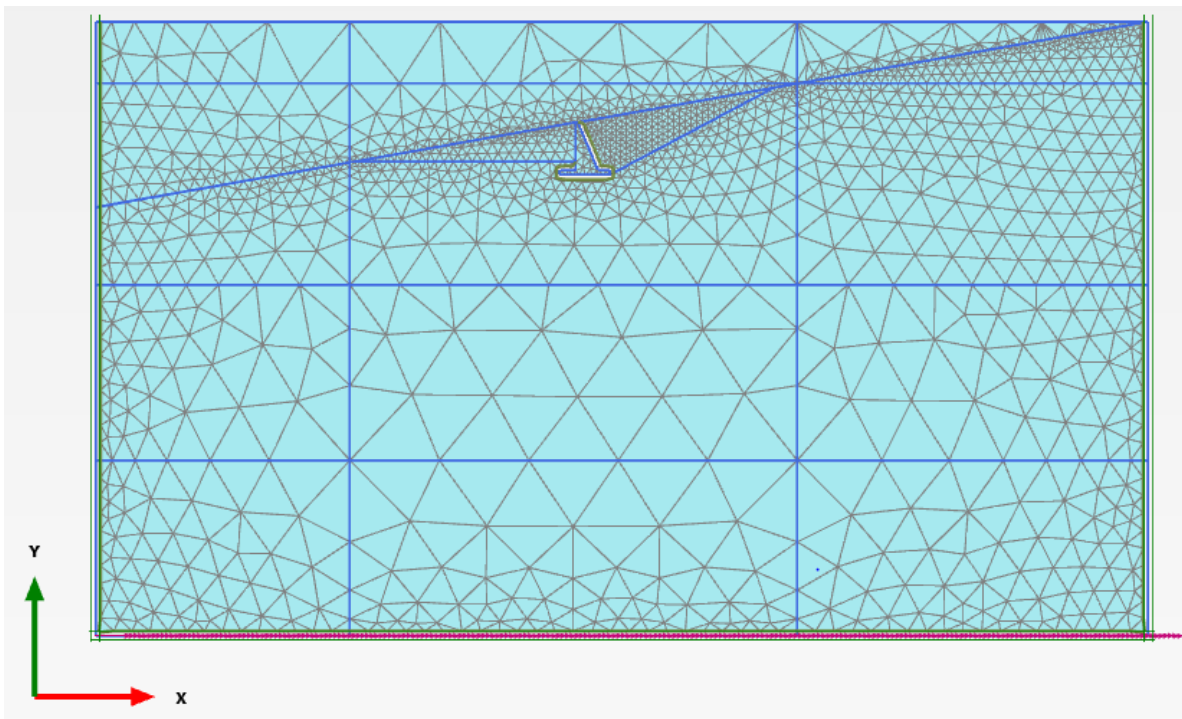


**Apéndice F:** Configuración de la línea de desplazamiento del modelo en el software PLAXIS

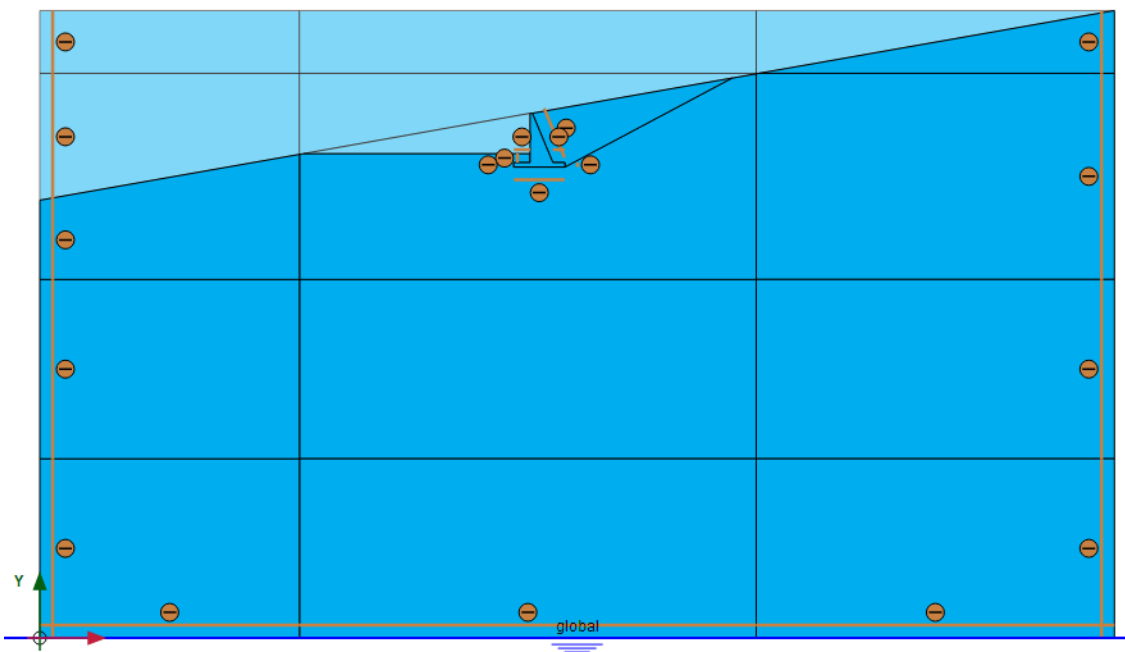
2D.

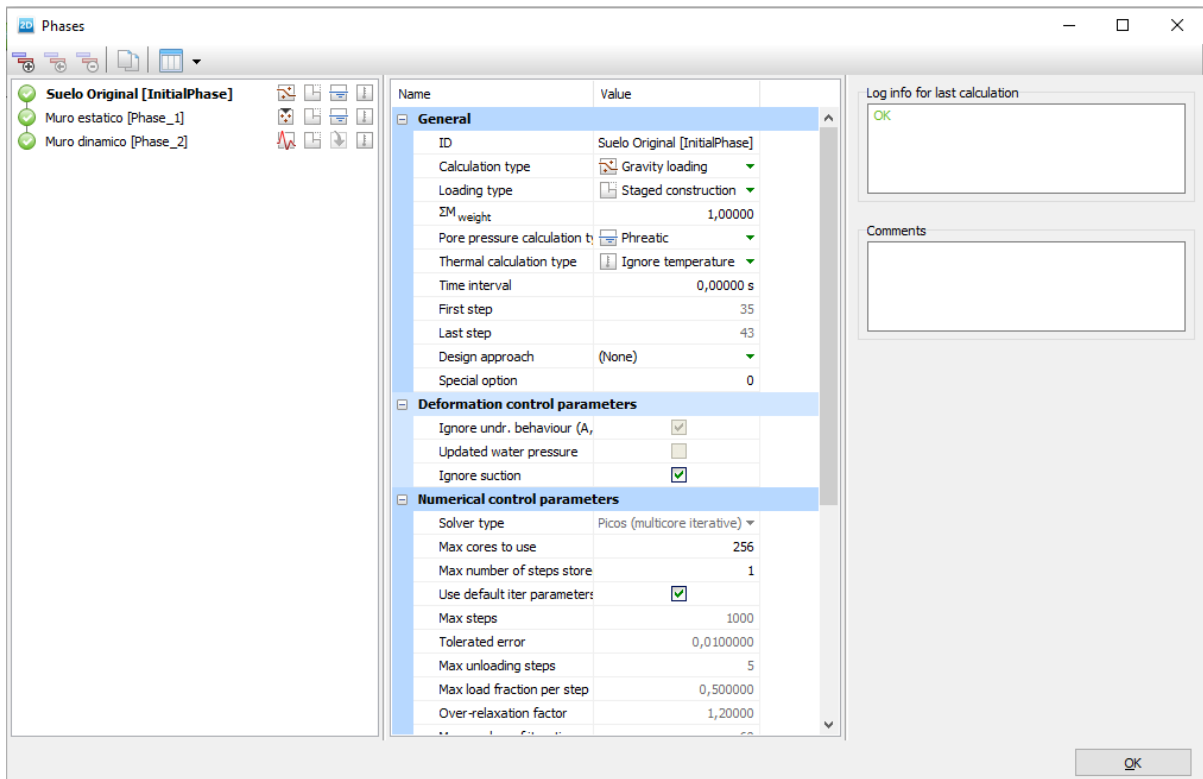
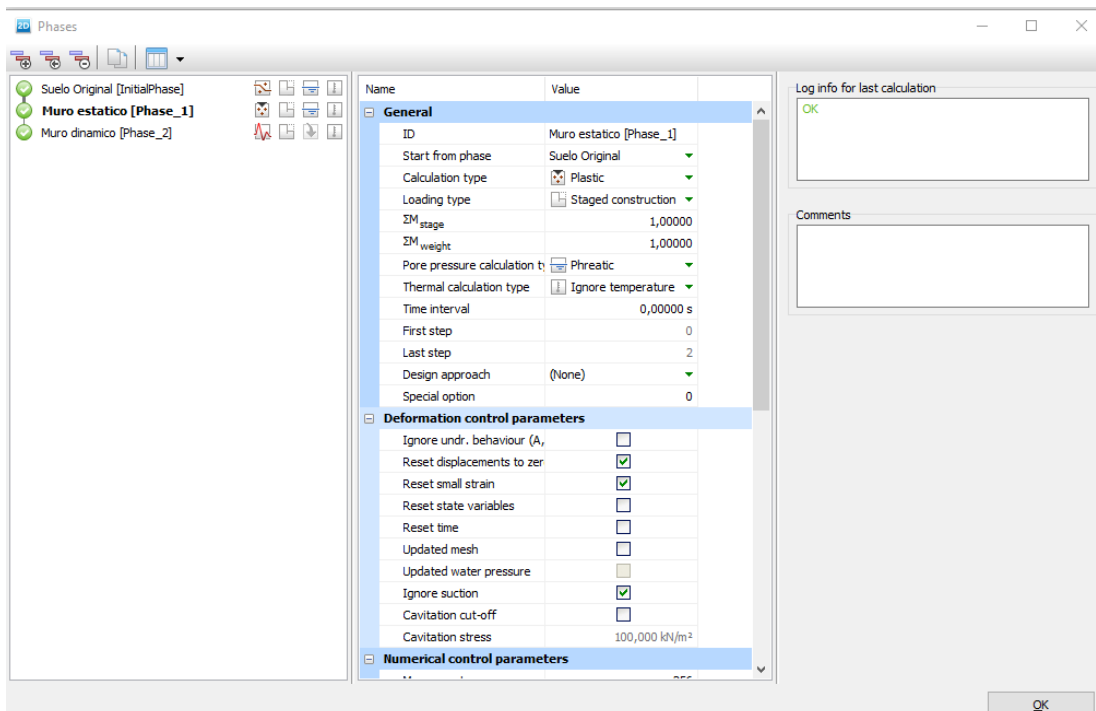
**Apéndice G:** Configuración del refinamiento del modelo en el software PLAXIS 2D.

**Apéndice H:** Visualización de la malla del modelo en el software PLAXIS 2D.

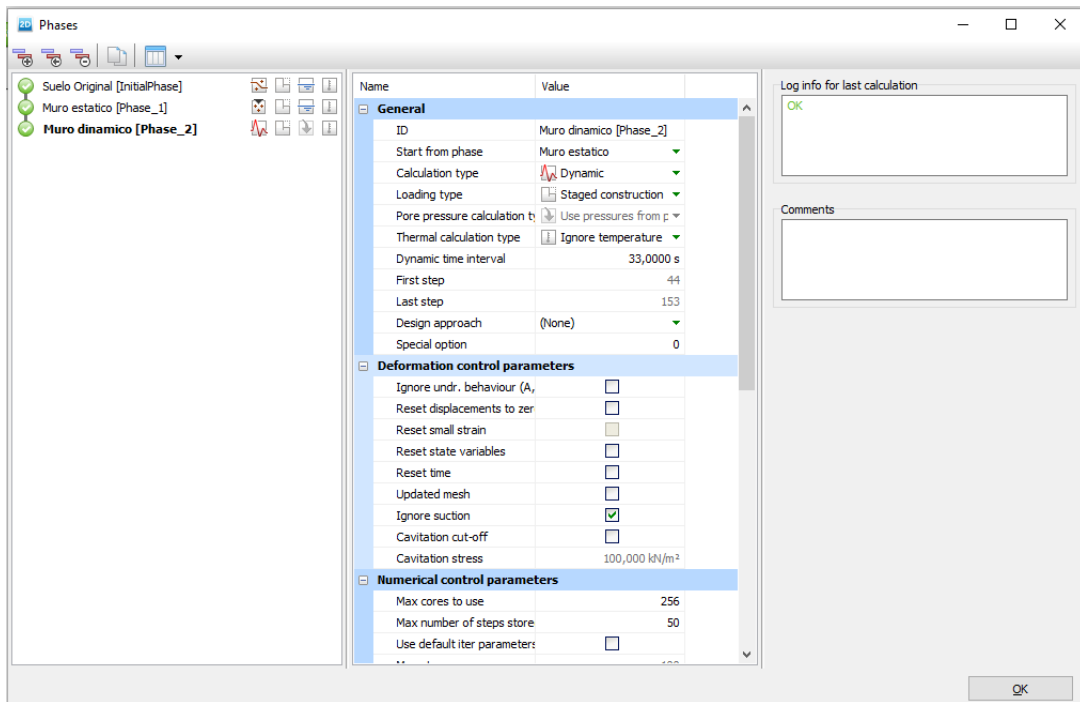


**Apéndice I:** Configuración de las condiciones de flujo del modelo en el software PLAXIS 2D.

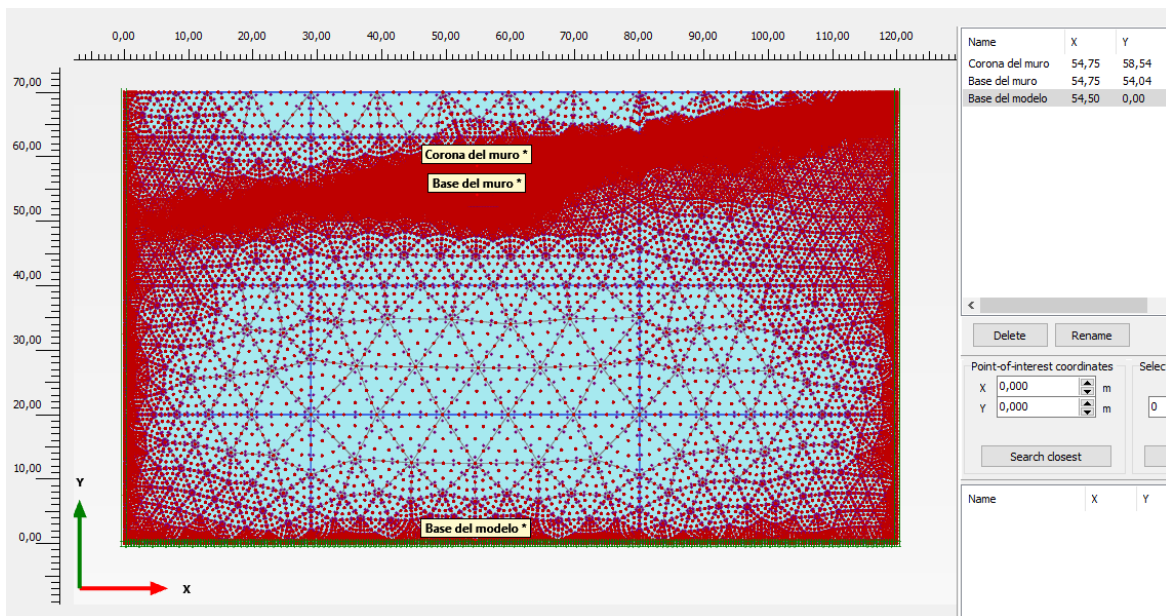


**Apéndice J:** Configuración general de la fase “Suelo original” en el software PLAXIS 2D.**Apéndice K:** Configuración general de la fase “Muro estático” en el software PLAXIS 2D.

**Apéndice L:** Configuración general de la fase “Muro dinámico” en el software PLAXIS 2D.



**Apéndice M:** Visualización de los puntos de análisis del modelo en el software PLAXIS 2D.



**Apéndice N:** Modelo en el software PLAXIS 2D (se puede encontrar en la carpeta apéndices, en el CD-ROM).