



POLITÉCNICO COLOMBIANO  
JAIME ISAZA CADAVID

# Boletín Seguridad, Salud y Ambiente

Facultad de Ingeniería

Boletín #10

# ELEMENTOS FINITOS APLICADOS A LA INGENIERÍA GEOTÉCNICA CASO DE ANÁLISIS EXCAVACIÓN SUMERGIDA



POLITÉCNICO COLOMBIANO  
JAIMÉ ISAZA CADAVID

Por:

**Carlos Andrés Ordóñez Ante**

**Ingeniero Geólogo Especialista en Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Magister - Geotecnia**

**caordonez@elpoli.edu.co**

Introducción

Una modelación geotécnica se utiliza principalmente para el diseño y análisis de diversas estructuras y escenarios, tales como:

- ✓ Excavaciones: Análisis de muros pantalla y estabilidad de fosos.
- ✓ Túneles: Simulación del proceso de excavación y diseño de revestimientos.
- ✓ Presas y terraplenes: Evaluación de estabilidad ante cambios de nivel de agua o construcción por etapas.
- ✓ Cimentaciones: Cálculo de asentamientos y capacidad de carga de zapatas y pilotes.
- ✓ Fenómenos avanzados: Análisis dinámico (sismos), efectos térmicos (congelamiento de suelos) y problemas de mecánica de rocas.

¿Cómo funciona la modelación geotécnica?

Una modelación geotécnica puede realizarse a partir del uso del programa PLAXIS, este es un software de elementos finitos [discretización, o sea dividir el cuerpo continuo – suelo en partes más pequeñas], diseñado específicamente para realizar análisis de deformación, estabilidad y flujo de agua subterránea en proyectos de ingeniería geotécnica.

El método de elementos finitos [FEM], es una técnica numérica que divide un cuerpo continuo (el suelo) en un número finito de partes más pequeñas (elementos), conectadas por puntos llamados nodos.

En el FEM los componentes clave son:

**Elementos:** son formas geométricas (triángulos) que discretizan el dominio.

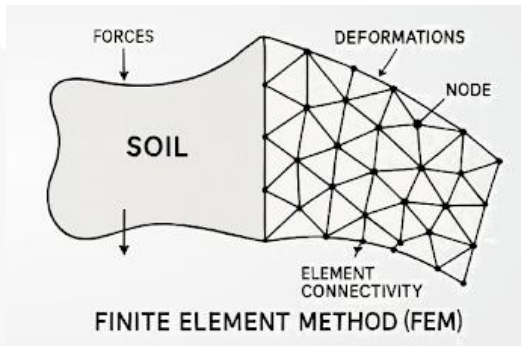
**Nodos:** son puntos de conexión donde se calculan desplazamientos.

**Conectividad:** es la relación entre elementos y nodos.



En la **Figura 1** se relacionan los principales componentes del FEM, extraída del curso ICC [Ingeniería Consultoría y Capacitación] sobre Elementos Finitos en Ingeniería Geotécnica.

Figura 1. Principales componentes del FEM, extraída del curso ICC sobre Elementos Finitos en Ingeniería Geotécnica.



El programa permite calcular deformaciones, esfuerzos del suelo, presiones de poros, fuerzas estructurales y flujo de calor en modelos tanto bidimensionales (deformación plana o axisimétricos) como tridimensionales.

El programa Plaxis utiliza también, diversos modelos constitutivos para el modelamiento de los múltiples problemas geotécnicos de interés. Estos modelos constitutivos sirven para representar matemáticamente la relación entre el esfuerzo y la deformación en el suelo y las rocas. Su función principal es permitir la simulación de comportamientos complejos como la no linealidad, la dependencia del tiempo y la anisotropía de los diferentes materiales geotécnicos que se encuentran en la naturaleza.

Los modelos constitutivos disponibles en PLAXIS son los siguientes:

- ✓ Básicos: Lineal Elástico y Mohr-Coulomb.
- ✓ Avanzados: Hardening Soil (HS), HSsmall y Modified Cam-Clay.
- ✓ Suelos blandos: Soft Soil, Soft Soil Creep y Sekiguchi-Ohta.
- ✓ Rocas: Hoek-Brown y Jointed Rock.
- ✓ Especializados: NGI-ADP (anisotropía), UDCAM-S (cargas cíclicas), UBC3D-PLM (licuación) y Concrete (concreto).
- ✓ Personalizados: Modelos definidos por el usuario (UDSM).



## Resultados de una modelación geotécnica

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de realizar una modelación con Plaxis de una construcción Sumergida de una excavación.

El objetivo principal de este ejercicio es analizar los esfuerzos y las deformaciones producidos por la construcción de una excavación.

Para la modelación de los materiales se trabajará con los modelos constitutivos Mohr Coulomb y Hardening Soil, a continuación, se describen brevemente sus principales características.

El modelo de Mohr-Coulomb es un modelo elástico perfectamente plástico que sirve como aproximación de primer orden para el comportamiento del suelo o la roca. Para definirlo se requieren cinco parámetros: dos de rigidez (módulo de Young  $E$ , relación de Poisson  $\mu$ ) y tres de resistencia (cohesión  $C$ , ángulo de fricción  $\phi$ , y ángulo de dilatación  $\psi$ ).

Es ideal para análisis iniciales básicos debido a su rapidez computacional y también porque sus parámetros se obtienen fácilmente de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos básicos.

El modelo constitutivo Hardening Soil (HS) es un modelo avanzado de segundo orden diseñado para simular el comportamiento tanto de suelos blandos como rígidos. A diferencia del modelo Mohr-Coulomb, sus características principales son:

- Rigidez dependiente del esfuerzo: La rigidez del suelo aumenta con el nivel de confinamiento.
- Doble endurecimiento (Hardening): Incluye endurecimiento por cortante para modelar deformaciones irreversibles, y endurecimiento por compresión para modelar la compactación irreversible bajo compresión primaria edométrica o isotrópica.
- Utiliza tres módulos de rigidez independientes: para la carga triaxial ( $E_{50}$ ), la carga edométrica ( $E_{ocd}$ ) y la descarga/recarga ( $E_{ur}$ ).
- Relación hiperbólica: En carga triaxial primaria, describe la relación entre la deformación axial y el esfuerzo desviador mediante una hipérbola.



- Criterio de falla: Aunque es un modelo de endurecimiento, utiliza el criterio de Mohr-Coulomb ( $C$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ ) para definir la superficie de falla final.

Este modelo es mucho más realista que el Mohr-Coulomb para excavaciones y problemas de asentamientos complejos.

Los elementos claves, utilizados para esta modelación son:

- Geometría: El modelo utiliza deformación plana (Plane strain) y simula la mitad de la excavación, (axisimétrico), tiene 30 m de ancho y una profundidad final de 20 m.

- Estratigrafía: La parte superior (20 m) consiste en una arcilla blanda que se modelará con el modelo constitutivo Mohr Coulomb, y debajo hay una capa de arena más rígida (30 m de profundidad), que se modelará con el modelo constitutivo Hardening Soil.

- Estructuras que se utilizarán:

Muros pantalla: Se modelan con elementos tipo placa de 30 m de longitud.

Interfaces: Se definen interfaces a ambos lados de los muros para simular la interacción suelo-estructura.

- **Apuntalamiento** ○  
**Arriostramiento:** Se modela usando un anclaje de extremo fijo.
- **Carga:** Se aplica una carga superficial de 500 kN/m<sup>2</sup> cerca del borde de la excavación.
- **Análisis:** Para ambos modelos constitutivos y naturalmente para ambos tipos de materiales se utiliza un análisis Drenado.

En la **figura 2** se puede observar la geometría del modelo, así como sus interfaces y la carga uniformemente distribuida que se ha colocado en la parte superior de la excavación.

Figura 2. Geometría del modelo, interfaces carga

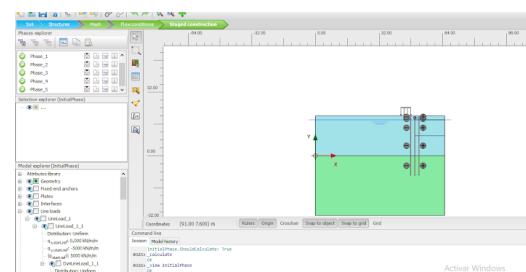
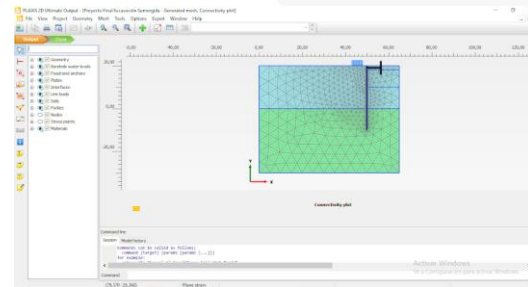
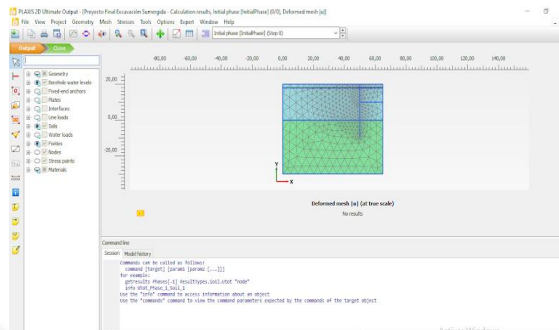




Figura 3. Malla de elementos finitos que se genera al correr el modelo.



Fuente: Elaboración propia

### Fases de Cálculo de la excavación (Staged Construction):

Se simula la construcción por etapas o fases para reflejar el proceso real de construcción:

1. **Fase Inicial:** Generación de esfuerzos iniciales con la geometría completa.

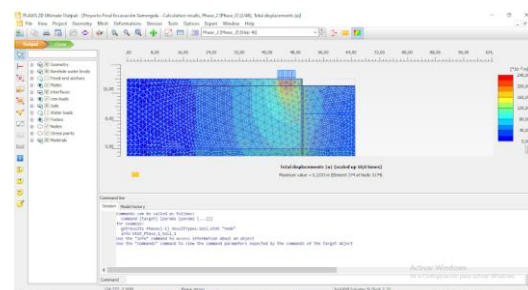
2. **Fase 1 (Carga Externa):** Se activan los muros, las interfases y la carga superficial.

En la **Figura 4** se muestra la fase 1  
Figura 4 Fase 1 de la excavación

3. **Fase 2 (Primera Excavación):** La figura 5 muestra la excavación de la primera capa de suelo (desactivación de la parte superior de suelo).

La **Figura 5** muestra la excavación de la primera capa de suelo.

Figura 5 Excavación de la primera capa de suelo

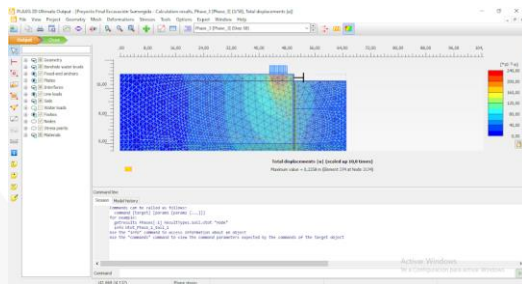


4. **Fase 3 (Instalación del Apuntalamiento ó Arriostramiento):**



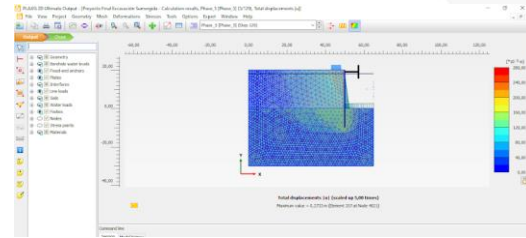
En la figura 6 se puede observar esta fase, Se activa el arriostramiento (*strut*).

Figura 6 Activación del arriostramiento ó apuntalamiento



6. Fase 5 (Tercera Excavación): La figura 8 muestra la excavación final de la arcilla dentro del foso.

Figura 8 excavación final de la capa de arcilla

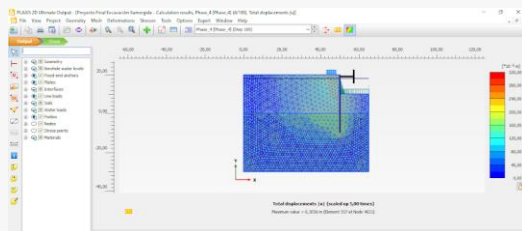


En las siguientes tablas se pueden apreciar las diferentes propiedades de los materiales que intervienen en la modelación.

Propiedades del muro (plate)

5. Fase 4 (Segunda Excavación Sumergida): La figura 7 muestra la desactivación del siguiente cúmulo de suelo. Nota: Como la presión de poros no se desactiva automáticamente, esto simula una excavación donde el agua permanece en la excavación, es decir, una excavación sumergida.

Figura 7 desactivación de otra parte del suelo



Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
General			
Tipo de material		Elástico	
Peso	W	10	kN/m/m
Mecánicas			
Isotrópico		Si	
Rigidez axial	EA1	750000	kN/m
Relación de Poisson	$\mu$	0.0	
Rigidez a la flexión	EI	100000	kNm <sup>2</sup> /m



## Propiedades del Puntal

Propiedades	Nombre	Puntal	Unidad
<b>General</b>			
Tipo de material		Elástico	
<b>Mecánicas</b>			
	L espaciamiento	5	m
Rigidez axial	EA	2000000	kN

en los muros y las fuerzas en el apuntalamiento ó arriostramiento.

## Análisis y Resultados Obtenidos

### 1. Deformaciones (Desplazamientos) y Esfuerzos en el Suelo:

- Al final de la última etapa de excavación (Fase 5), el programa de salida (*Output*) muestra la malla deformada y el desplazamiento máximo del muro. Se obtiene un máximo valor de desplazamiento de 0.2733 m elemento 357 al nodo 4021.
- Se Pueden visualizar los *incrementos de desplazamiento* ( $|\Delta u|$ ) para ver la formación de un mecanismo de movimiento de suelo detrás del muro. Se obtiene un máximo valor de ( $|\Delta u|$ ) de 1.699E-3 m del elemento 369 al nodo 2720.

Propiedades de los materiales utilizados en la modelación: arcilla y arena

Parámetro	nombre	Arcilla	Arena	Unidades
<b>General</b>				
Modelo Constitutivo del suelo	Modelo	Mohr Coulomb	Harding Soil	
Tipo de Drenaje		Drenado	Drenado	
Peso unitario no saturado	yunsat	16	17	kN/m <sup>3</sup>
Peso unitario saturado	ysat	18	20	kN/m <sup>3</sup>
<b>Mecánica</b>				
Rigidez secante en prueba triaxial drenada estándar	E50 ref	80000	40000	kN/m <sup>2</sup>
Rigidez tangente en la carga primaria del edómetro	Eoedref	88890	40000	kN/m <sup>2</sup>
Rigidez de descarga y recarga	Eur ref	----	120000	kN/m <sup>2</sup>
Relación de Poisson	$\mu$	0.20	0.20	
Potencia para la dependencia del nivel de tensión de la rigidez	m		0.5	
Cohesión		100		kN/m <sup>2</sup>
Ángulo de Fricción		25	32	°
Ángulo de Dilatación		---	2	°
Ko valor para consolidación normal	Ko nc	0.5774	0.4701	

<b>Agua Subterránea</b>				
Conjunto de datos		Standard	Standard	
Tipo de suelo		Fino	Grueso	
Dirección de permeabilidad horizontal		0.001	1	m/día
Dirección de permeabilidad vertical		0.001	1	m/día
<b>Interfases</b>				
Determinación de la Fuerza		Manual	Manual	
Factor de reducción de la interface		0.5	0.67	---
<b>Inicial</b>				
Determinación de Ko		Automático	Automático	
Presión previa a la sobrecarga	POP	5	0	/m <sup>2</sup>
Relación de sobreconsolidación	OCR	1	1	---

El objetivo de esta modelación es observar las deformaciones, los esfuerzos estructurales (fuerzas cortantes y momentos flectores)

En las **figuras 9 y 10** se pueden observar los desplazamientos y las tensiones efectivas principales que ocurren en el suelo luego de realizar la excavación.

Figura 9 Desplazamientos que ocurren producto de la excavación

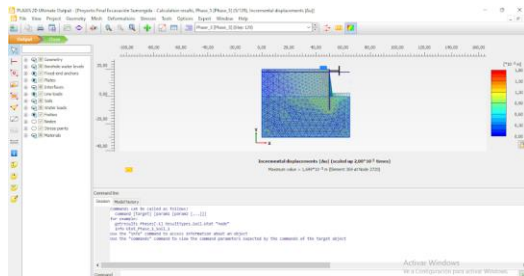
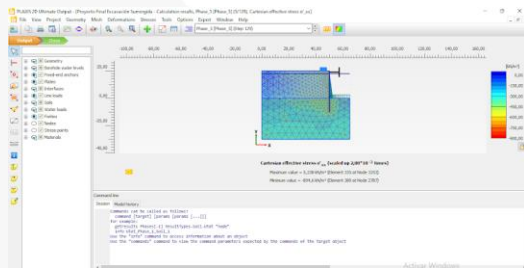
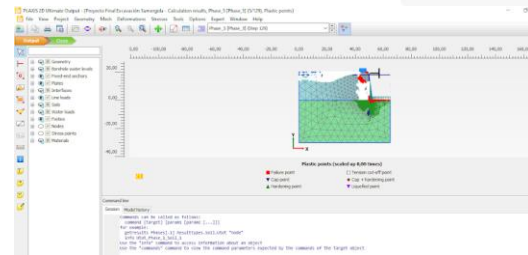


Figura 10. Esfuerzos efectivos que ocurren en la masa de suelo



En la **figura 11** se pueden ver los puntos plásticos del suelo, ocurridos debido a la carga aplicada y a la excavación construida.

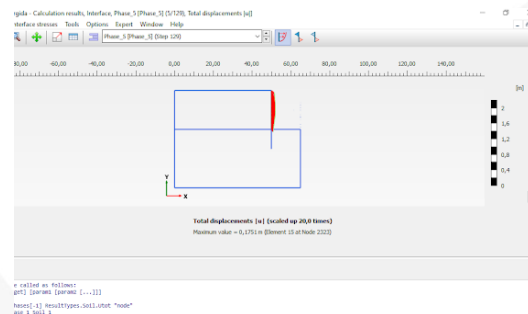
Figura 11. Puntos plásticos del suelo, ocurridos debido a la carga aplicada y a la excavación construida.



## 2. Fuerzas Estructurales en el Muro Pantalla (Plate):

La **figura 12** muestra el máximo valor de desplazamiento que experimenta el muro = 0.1751 m (elemento 15 al nodo 2323).

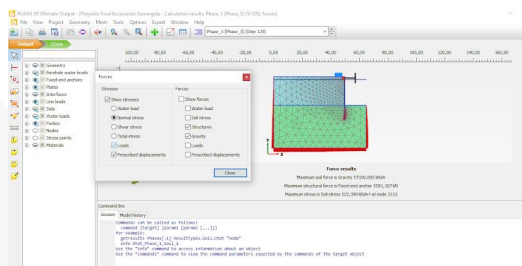
Figura 12 Máximo valor que experimenta el muro





La **figura 13** muestra la máxima fuerza sobre el anclaje o arriostamiento, corresponde a 5591.587 kN. Y el máximo esfuerzo sobre el suelo es de 522.399 kPa en el nodo 3112

Figura 13. *Máxima fuerza sobre el anclaje o arriostamiento*



Al hacer doble clic en el muro, se puede inspeccionar la distribución de las fuerzas internas.

La fuerza axial (en kN) que soporta el arriostamiento se muestra en la siguiente tabla al hacer doble clic en el elemento.

Figura 14. *Fuerza en el Arriostamiento (Strut):*

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N <sub>int</sub> [kN]	N <sub>ext</sub> [kN]	Φ <sub>1</sub> [°]	Length [m]
FixedEndAnchor_1_1	1157	1	50,000	19,000	-5591,187	-5591,187	0,000	0,000	15,000

## CONCLUSIONES

Al finalizar todas las etapas, la excavación permanece estable. Sin embargo, la curva de carga-desplazamiento muestra una pendiente decreciente en la última fase, lo que indica que la deformación plástica está aumentando.

Las presiones de poros no se eliminan automáticamente al desactivar las diferentes partes del suelo (*cluster*). Esto permite simular de forma realista una excavación sumergida donde el agua permanece dentro del foso.

Los incrementos de desplazamiento permiten identificar la formación de un mecanismo de movimiento del suelo detrás del muro pantalla.

El apuntalamiento o arriostamiento ejecutado, absorbe fuerzas axiales significativas para redistribuir los esfuerzos en el muro pantalla durante las fases de excavación.

## BIBLIOGRAFÍA

ICC Ingeniería Curso Elementos Finitos Aplicados en la Ingeniería Geotécnica. Grabaciones de Clases diciembre 2025.

Plaxis 2D 2025.1 General Information Manual.

Plaxis 2D 2025.1 Tutorial Manual.

Plaxis 2D 2025.1 Reference Manual.

Plaxis 2D 2025.1 Materials Models Manual.

Plaxis 2025.1 Scientific Manual