

**MODELAMIENTO DE PROBLEMAS DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN
LATERAL MEDIANTE PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS**

**CAROLINA ANDREA CAMARGO GARCÍA
ALBA LUCIA GONZALEZ ESCAMILLA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2011**

**MODELAMIENTO DE PROBLEMAS DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN
LATERAL MEDIANTE PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS**

**CAROLINA ANDREA CAMARGO GARCÍA
ALBA LUCIA GONZALEZ ESCAMILLA**

**Tesis de grado modalidad investigación
Para optar al título de:
Ingeniera civil**

**Director:
WILFREDO DEL TORO RODRIGUEZ
Ingeniero civil, M.Sc., Ph D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2011**

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por brindarme la salud, el amor, por ser mi guía, por cuidarme y por la fortaleza para no desfallecer ante las adversidades.

A mi papito Hernando que aunque ya no esté a mi lado siempre me animo a seguir mis metas y a no darme por vencida, su carácter firme me llevo siempre por el buen camino y gracias a sus enseñanzas de vida hoy estoy haciendo realidad un sueño más.

A mi mamita María Cecilia por su amor, confianza, apoyo incondicional y por estar siempre presente en cada etapa de mi vida. Ella fue una de las motivaciones más importantes para culminar satisfactoriamente este propósito.

A mis hermanos Javier y Hernando por su buen ejemplo, comprensión, cariño y por su protección, por hacerme saber que siempre cuento con ellos y nunca estaré sola.

A Julián Silva por llegar a complementar mi vida, con su amor, alegría y entrega. Por robarme mi corazón y por encontrar siempre las palabras indicadas en los momentos adecuados.

A mi profesor Wilfredo del Toro por su paciencia, comprensión y por todos los conocimientos que me trasmitió en este largo proceso.

Al club deportivo los tigres, mis amiguitas Leidy Pineda, Alba González, Laura Chapeta, Laura Torres, mis primitas Nelly Ríos y Diana Arenas por tantos momentos de felicidad compartidos en diferentes fases de mi vida.

Finalmente a mis familiares, amigos, profesores y compañeros de admisiones y registro académico que siempre me brindaron su mano en señal de ayuda en los momentos que los necesitaba.

Muchas gracias a todos los que confiaron y creyeron en mí.

CAROLINA ANDREA CAMARGO GARCÍA

AGRADECIMIENTOS

Al Creador Dueño y Señor de todas las cosas por sostener con firmeza mi mano cuando sentí desfallecer y por darme todos los días una nueva oportunidad para continuar el camino de crecimiento espiritual y profesional...

A mis padres Reinaldo González (q.p.d) y Rosa escamilla por el amor, el apoyo y el voto de confianza que depositaron en mí para dar el primer paso hacia esta meta...

A mi esposo Ludwing Vargas por su amor, comprensión, dedicación y esfuerzo que hicieron posible la conquista de este logro...

A mi hijo Jose Ludwing por ser el motor de mi vida...

A Doña Nuvia Afanador que ha puesto gran parte de su vida en el bienestar de la familia...

A mi compañera Carolina Camargo por la alegría y positivismo que siempre me contagio...

A mi profesor Wilfredo del Toro por su amabilidad, alegría y buen humor con que siempre nos brindo su colaboración...

A mis familiares, amigos(as), compañeros(as) y profesores gracias por aportar su granito de arena en la construcción de este sueño...

ALBA LUCIA GONZALEZ ESCAMILLA

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	15
JUSTIFICACIÓN	17
OBJETIVOS	18
OBJETIVO GENERAL.....	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1 MARCO TEORICO	19
1.1 CLASIFICACION DE LOS MUROS DE CONTENCION.....	19
1.2 PRESIONES LATERALES	20
1.2.1 Presión lateral de tierra en reposo	20
1.2.2 Presión activa de la tierra.....	21
1.2.3 Presión pasiva	24
1.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	26
1.4 COMPONENTES DE LA MALLA DE ELEMENTOS FINITOS EMPLEADA EN EL SOFTWARE UTILIZADO.	26
2 INFORMACIÓN GENERAL DEL SOFTWARE	28
2.1 CARACTERÍSTICAS BASICAS	28
3 UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA	31
3.1 INICIO DEL PROGRAMA	31
3.1.1 Creación de un modelo geométrico	32
3.1.2 Unidades.....	34
3.1.3 Convención de signos	34
3.1.4 Administración de archivos.....	35
3.2 TIPOS DE ENTRADA	35
3.2.1 Entrada de modelos geométricos	35
3.2.2 Entrada de texto y valores	36
3.2.3 Entrada de selecciones	36
3.3 ESTRUCTURA DE ENTRADA.....	36
3.3.1 Modelo geométrico.....	37
3.3.2 Generación de malla.....	37
3.4 CONDICIONES INICIALES	38

3.5	CONDICIONES DE AGUA.....	38
3.5.1	Generación de presiones de agua.....	38
3.5.2	Generación de esfuerzos iniciales.....	38
4	PROGRAMA DE CÁLCULOS.....	39
4.1	EL MENÚ DE CÁLCULO.....	39
4.2	DEFINICIÓN DE UNA FASE DE CÁLCULO.....	39
4.2.1	Identificación de fase y ordenamiento.....	40
4.2.2	Tipos de cálculo.....	40
4.3	PARÁMETROS DE CONTROL DE CÁLCULO.....	40
4.4	CONSTRUCCION POR ETAPAS.....	41
4.4.1	Cambio de configuración.....	41
4.4.2	Aplicación de los desplazamientos a utilizar.....	41
4.4.3	Reasignación de los datos del material.....	42
4.4.4	Pre-esfuerzo de los anclajes.....	42
4.4.5	Puntos de selección de curvas.....	42
4.5	EJECUCIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO.....	42
4.5.1	Cálculo no finalizado de la construcción por etapas.....	42
5	PROGRAMA DE SALIDA.....	43
5.1	EL MENÚ DE SALIDA.....	43
5.1.1	Selección de pasos de salida.....	43
5.1.2	Deformaciones.....	44
5.1.3	Esfuerzos.....	44
5.1.4	Tablas de salida.....	44
5.1.5	Visualización de un corte transversal.....	44
5.1.6	Generación de informes.....	44
6	EL PROGRAMA DE CURVAS.....	45
6.1.1	Ventanas de tabla.....	45
6.1.2	Barra de herramientas.....	45
6.1.3	Menú de curvas.....	45
6.1.4	Generación de curva.....	45
6.1.5	Actualización de curvas.....	46

6.1.6	Opciones de formato	46
6.1.7	Visualización de una tabla.....	46
7	EJERCICIO MODELO	47
	CONCLUSIONES.....	53
	BIBLIOGRAFIA.....	55
	ANEXOS.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Muros convencionales	19
Figura 2. Muros mecánicamente estabilizados	20
Figura 3. Presión del relleno granular con sobrecarga, en reposo.....	21
Figura 4. Presión activa de tierra.	21
Figura 5. Presión activa de Rankine.	22
Figura 6. Diagrama de presión para suelos cohesivos.	22
Figura 7. Presión activa de Coulomb.	23
Figura 8. Presión pasiva.	24
Figura 9. Presión pasiva de Rankine.	24
Figura 10. Diagrama de presión pasiva suelo cohesivo.....	25
Figura 11. Presión pasiva de Coulomb.	25
Figura 12. Posición de los nodos.	27
Figura 13. Puntos de tensión.	27
Figura 14. Configuración general - hoja de la pestaña proyecto.....	31
Figura 15. Configuración general - hoja de la pestaña dimensiones.	32
Figura 16. Ventana principal de entrada del programa.	32
Figura 17. Barra de herramientas generales.	33
Figura 18. Barra de herramientas geométricas.....	33
Figura 19. Sistema de coordenadas cartesianas e indicación de las componentes de esfuerzo positivo.	35
Figura 20. Ventana solicitadora de archivos Plaxis.....	35
Figura 21. Cuadro de entrada para las dimensiones geométricas.....	36
Figura 22. Entrada de selecciones.....	36
Figura 23. Control de pestañas, hoja descriptiva y grupos de casillas.....	37
Figura 24. Introducción del modelo geométrico.	37
Figura 25. Hoja de la pestaña Parámetros de la ventana de cálculos.	41

RESUMEN

TITULO: MODELAMIENTO DE PROBLEMAS DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN LATERAL MEDIANTE PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

AUTORES: CAMARGO GARCIA Carolina Andrea
GONZALEZ ESCAMILLA Alba Lucia

PALABRAS CLAVES: elementos finitos, modelamiento, estructuras de contención lateral, desplazamiento, suelo, muros, guía y herramienta computacional.

DESCRIPCION:

Esta investigación consistió en la creación de un manual de un programa de elementos finitos, el cual nos permitiera realizar el modelamiento, diseño y estudio de las estructuras de contención lateral. Interpretar y analizar fenómenos como los desplazamientos laterales indeseados del suelo que son un factor clave en el diseño de muros.

Tomamos como referencia el programa Plaxis 2D, hay que resaltar que este software no es libre y para su empleo hay que obtener una licencia.

Se probaron diferentes parámetros para obtener el modelo más adecuado a las expectativas del usuario, para ello fue necesario familiarizarse con el entorno gráfico y aprender la utilización del programa con el cual se realizó el modelamiento de diferentes tipos de muros de contención tales como: en voladizo, con anclajes, entre otros. Es importante tener en cuenta que la utilización de esta herramienta debe hacerse con precaución y consiente que se debe tener una buena caracterización de los materiales en el momento de introducir los parámetros con el fin de obtener los mejores resultados de las simulaciones.

Con base en la experiencia obtenida en el modelamiento de muros de contención, se elaboró un guía práctica para los estudiantes y docentes de la escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander que facilitará la solución de problemas de este tipo mediante una herramienta computacional basada en elementos finitos.

Proyecto de grado.
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil.
Director Wilfredo del Toro Rodríguez.

ABSTRACT

TITLE: MODELING STRUCTURES OF CONTAINMENT PROBLEMS BY SIDE FINITE ELEMENT PROGRAM.

Authors: CAMARGO GARCÍA CAROLINA ANDREA
GONZALEZ ESCAMILLA ALBA LUCIA

KEYWORDS: finite element modeling, lateral containment structures, displacement, soil, walls, guidance and software tool.

DESCRIPTION:

This research was the creation of a manual for in finite element program, which allowed us to do the modeling, design and survey of lateral containment structures. Interpret and analyze phenomena such as unwanted lateral displacements of soil that are a key factor in the design of walls.

We consider the Plaxis 2D program, it should be noted that this software is not free and for use must obtain a license.

Different parameters were tested to obtain the most appropriate model to user expectations, for it was necessary to become familiar with the graphical environment and learn the use of the program which was carried out modeling of different types of retaining walls such as cantilever , anchors, among others. It is important to note that the use of this tool should be done with caution and agree that you must have a good characterization of materials at the time of entering parameters to obtain the best results of the simulations.

Based on experience in modeling walls produced a practical guide for students and teachers of the school of civil engineering at the University of Industrial de Santander that will facilitate the solution of such problems using a computational tool based finite elements.

Dissertation.
Faculty of Physical-Mechanical Engineering School of Civil Engineering.
Director del Toro Wilfredo Rodríguez.

INTRODUCCION

Un muro de contención es toda estructura continua que de forma pasiva produce un efecto estabilizador sobre una masa de suelo, en unas ocasiones en un terreno natural y en otras en un relleno artificial. El cuerpo del muro trabaja esencialmente a flexión y la compresión vertical debida a su propio peso es un factor estabilizante. En algunas situaciones el muro desempeña una segunda misión que es la de transmitir cargas verticales al terreno, desempeñando una función de cimiento. Los muros de contención se comportan básicamente como voladizos empotrados en su base.

Actualmente existen programas de elementos finitos muy útiles en el modelamiento y diseño de estructuras, como es el caso del programa PLAXIS 2D, que puede ser fácilmente utilizado en el estudio de muros de contención lateral y demás aplicaciones en ingeniería de fundaciones en las que los modelos se utilizan para analizar el fenómeno de esfuerzo-deformación del suelo de acuerdo al tipo de estructura que lo afecte. Los procedimientos de entrada gráfica sencilla permiten una rápida generación de complejos modelos de elementos finitos, y las facilidades de salida ofrecen una presentación detallada de los resultados computacionales. El cálculo es totalmente automatizado y basado en consistentes procedimientos numéricos. Los códigos de los programas y los modelos del suelo se han desarrollado con gran cuidado; sin embargo no es posible garantizar que los resultados obtenidos sean 100% libre de errores.

Por otra parte la simulación de problemas geotécnicos mediante el método de elementos finitos inevitablemente lleva implícito errores numéricos y de modelado, la precisión depende en gran forma de la experiencia del usuario con respecto a la modelización del problema, la comprensión del modelo de los suelos y sus limitaciones, la selección de parámetros del modelo y la capacidad para juzgar la fiabilidad de los resultados computacionales, por lo tanto un programa de elementos finitos arroja resultados más certeros cuando es utilizado por personas

que tienen un buen conocimiento del material que se trabaja y de los principios del método de elementos finitos.

El método de los elementos finitos es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. Está desarrollado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complejas.

El aporte de esta investigación se fundamenta en crear un manual práctico diseñado para ayudar a los nuevos usuarios a familiarizarse con el programa PLAXIS y su utilización como complemento en los estudios sobre estructuras de contención lateral.

JUSTIFICACIÓN

A partir de fenómenos naturales que nos afectan, la ingeniería busca disminuir el riesgo ambiental y suplir las necesidades de la sociedad. Para lograrlo el hombre ha creado diferentes tipos de metodologías y programas de computación que han evolucionado con el tiempo, alcanzando un alto grado de eficacia y eficiencia en la búsqueda de soluciones, evaluando el impacto y las consecuencias que las prácticas ingenieriles conllevan.

El soporte lateral de suelos y los movimientos laterales indeseados de este son un factor clave en el diseño de estructuras de contención, la manera más adecuada de analizar esta situación es por medio de cálculos de elementos finitos en donde se incorporan los modelos para simular el comportamiento del suelo y la interacción suelo estructura.

Por esta razón es importante encontrar una forma de optimizar el tiempo utilizado en resolver los modelos para interpretar un fenómeno. En este sentido, el aporte de esta investigación se fundamenta en crear un manual práctico diseñado para ayudar a los nuevos usuarios a familiarizarse con el programa PLAXIS y su utilización como complemento en los estudios sobre estructuras de contención lateral.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Elaborar una guía para los estudiantes y docentes de ingeniería civil, que facilite el modelamiento de problemas sobre estructuras de contención lateral mediante programas de elementos finitos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ♣ Investigar y recopilar información sobre las estructuras de contención lateral y su modelación mediante software de elementos finitos.
- ♣ Conocer el manejo y utilidad del programa PLAXIS aplicado a las estructuras de contención lateral.
- ♣ Probar diferentes parámetros en el diseño de estructuras de contención lateral para obtener el modelo más adecuado a las expectativas.
- ♣ Proporcionar a los estudiantes y docentes una guía práctica de manejo del software PLAXIS para estos problemas particulares.

1 MARCO TEORICO

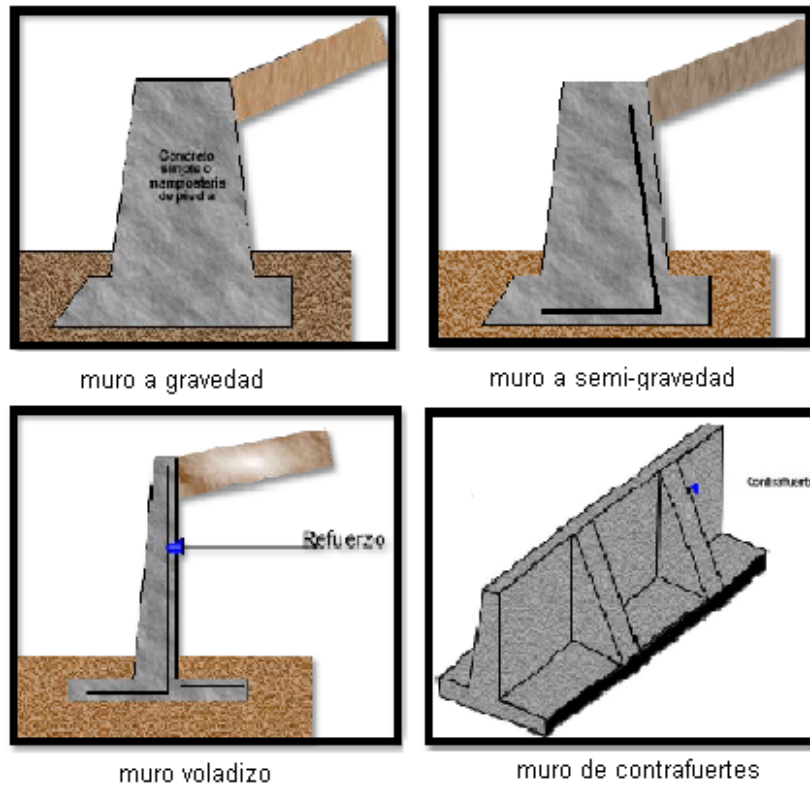
Se define como muro de contención al elemento estructural dispuesto para contener un empuje lateral de un material.

1.1 CLASIFICACION DE LOS MUROS DE CONTENCIÓN

Se dividen en dos categorías principales:

- ♣ Muros convencionales: estos se clasifican como muros de retención de gravedad, muros de retención de semi-gravedad, muros de retención en voladizo y muros de retención con contrafuertes.

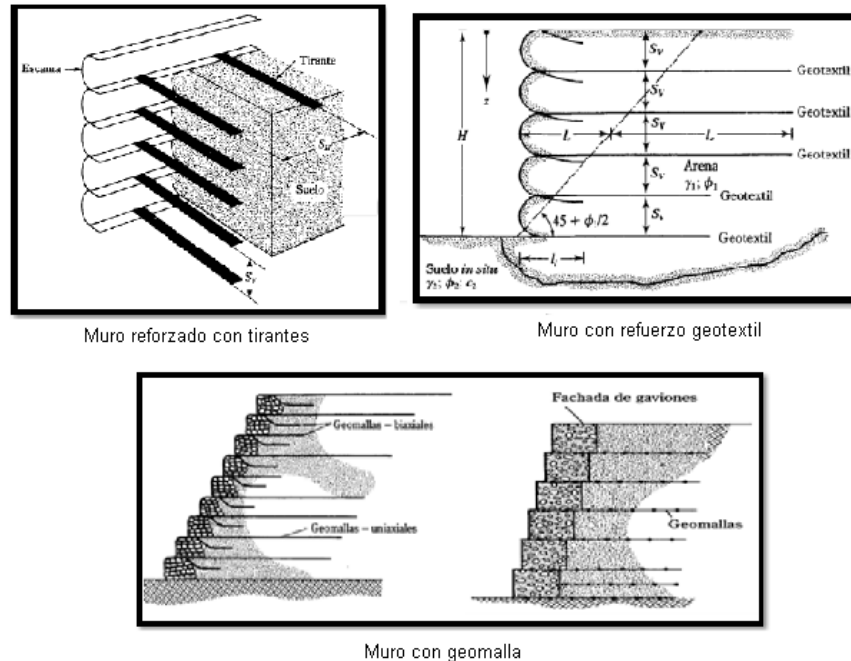
Figura 1. Muros convencionales



Fuente: García Forero, Nancy. Elaboración de texto guía y ayudas didácticas para la asignatura de fundaciones I.

- ♣ Muros de tierra estabilizados mecánicamente: tienen sus rellenos estabilizados por elementos de refuerzo tales como mallas de alambre soldado, franjas metálicas y geomallas. Estos muros son relativamente flexibles y soportan grandes desplazamientos horizontales y verticales sin mucho daño.

Figura 2. Muros mecánicamente estabilizados



Fuente: García Forero, Nancy. Elaboración de texto guía y ayudas didácticas para la asignatura de fundaciones I.

1.2 PRESIONES LATERALES

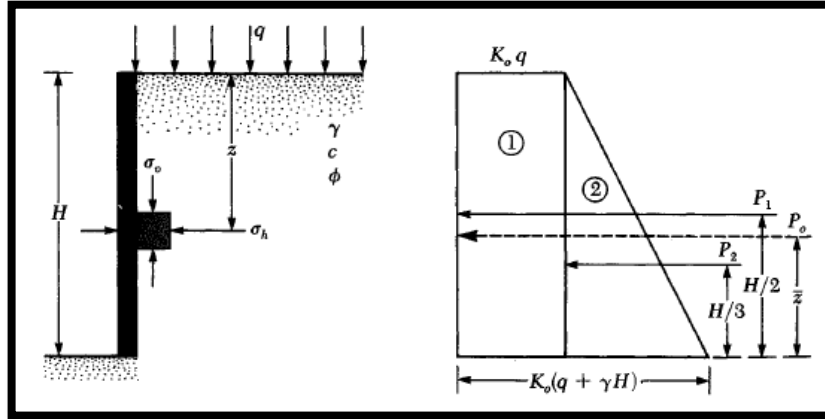
El adecuado diseño de las estructuras de contención requiere la estimación de la presión lateral de tierra, que es una función de varios factores, tales como: el tipo y magnitud del movimiento de los muros, los parámetros de resistencia cortante del suelo, el peso específico del suelo y las condiciones de drenaje en el relleno.

1.2.1 Presión lateral de tierra en reposo

El muro está restringido contra movimiento. La presión lateral de la tierra a cualquier profundidad se llama presión de tierra en reposo.

En la figura 3 se encuentran los siguientes parámetros: γ = peso específico, H = altura del muro, q = carga uniforme distribuida por área unitaria, c = Cohesión, ϕ = Angulo de fricción, σ' = Esfuerzo efectivo normal, z = profundidad, σ_v = esfuerzo vertical y σ_h = presión lateral.

Figura 3. Presión del relleno granular con sobrecarga, en reposo.

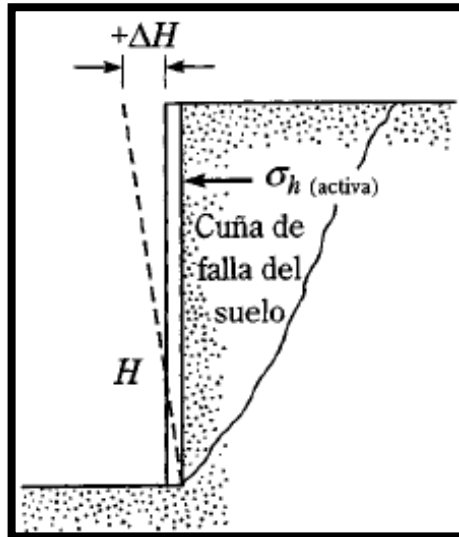


Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

1.2.2 Presión activa de la tierra

El muro se inclina respecto al suelo retenido. Con suficiente inclinación del muro fallara una cuña triangular de suelo detrás del muro.

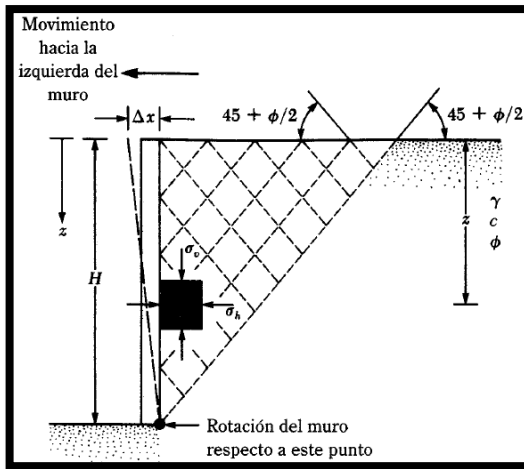
Figura 4. Presión activa de tierra.



Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

- ♣ **Presión activa de tierra de Rankine:** Los cálculos de la presión activa de Rankine se basan en la hipótesis de que el muro no tiene fricción. Las líneas de deslizamiento en el suelo forman ángulos de $\pm(45^\circ + \phi/2)$ con la horizontal, como muestra la figura 5.

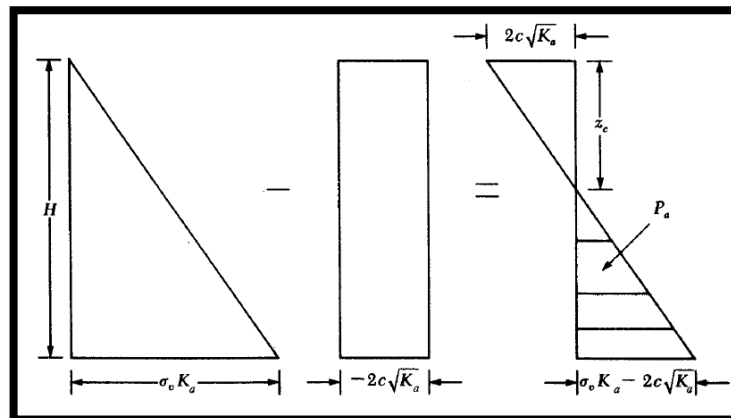
Figura 5. Presión activa de Rankine.



Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

La variación de la presión activa con la profundidad para el muro mostrado en la figura 5 se da en la figura 6. Nótese que $\sigma_v = 0$ en $z = 0$ y $\sigma_v = \gamma \cdot H$ en $z = H$. La distribución de presión muestra que en $z = 0$, la presión activa es igual a $-2c\sqrt{K_a}$, que indica un esfuerzo de tensión el cual decrece con la profundidad.

Figura 6. Diagrama de presión para suelos cohesivos.



Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

La profundidad z_c se llama profundidad de la grieta de tensión. La fuerza total de Rankine por unidad de longitud del muro antes de que ocurra la grieta de tensión es:

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma * H^2 * K_a - 2c * H * \sqrt{K_a} \quad \text{Ecuación 1}$$

Después de que ocurre la grieta de tensión la fuerza sobre el muro será causada solo por la distribución de presión entre las profundidades $z = z_c$ y $z = H$. Esta se expresa como:

$$P_a = \frac{1}{2} \left(H - \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}} \right) * (\gamma * H * K_a - 2c * \sqrt{K_a}) \quad \text{Ecuación 2.}$$

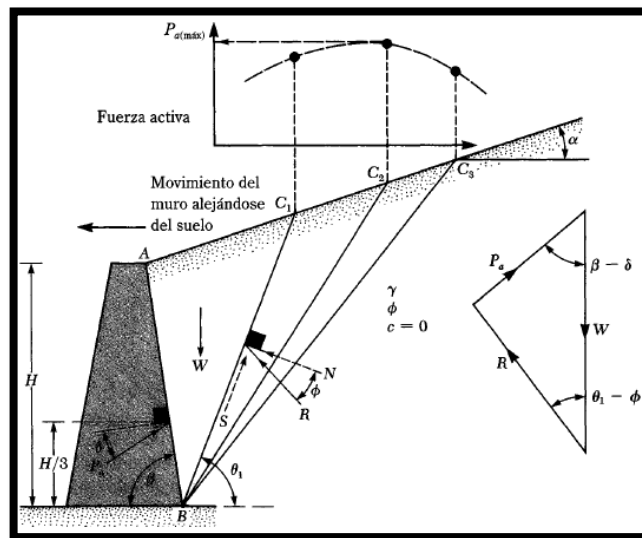
Donde K_a es el coeficiente de presión activa de Rankine. Ver anexo 4.

- ♣ **Presión activa de tierra de Coulomb:** Coulomb supuso que la superficie de falla en el suelo sería un plano (BC_1, BC_2, \dots), figura 7. La fuerza activa es:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a * \gamma * H^2 \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde K_a es el coeficiente de presión activa de Coulomb. Ver anexo 5.

Figura 7. Presión activa de Coulomb.

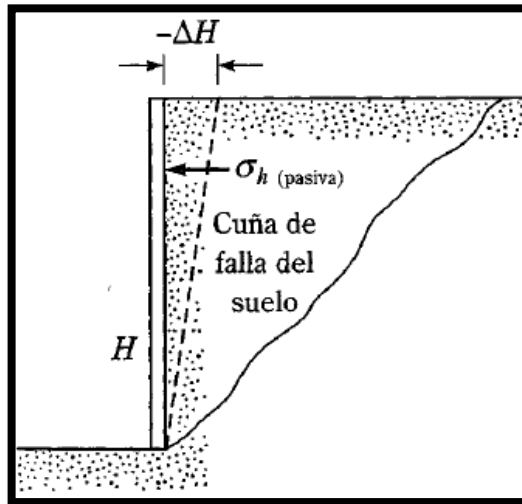


Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

1.2.3 Presión pasiva

El muro es empujado hacia el suelo retenido. Con suficiente movimiento del muro fallara una cuña de suelo como se muestra en la figura 8.

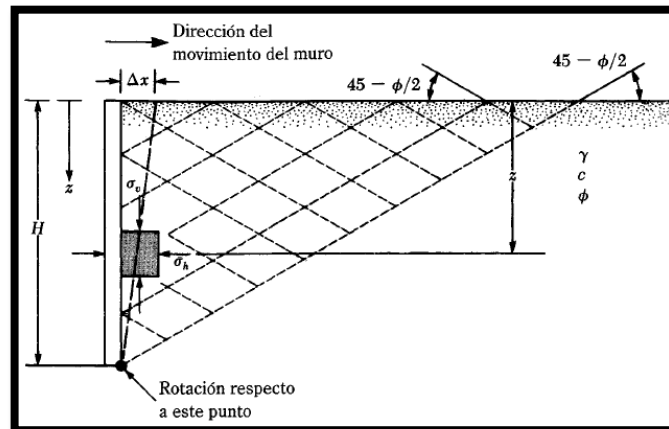
Figura 8. Presión pasiva.



Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

- ♣ **Presión pasiva de tierra de Rankine:** Si el muro es empujado hacia la masa del suelo una cantidad Δx , como se muestra en la figura 9, el esfuerzo vertical a la profundidad z permanecerá igual; sin embargo el esfuerzo horizontal se incrementará.

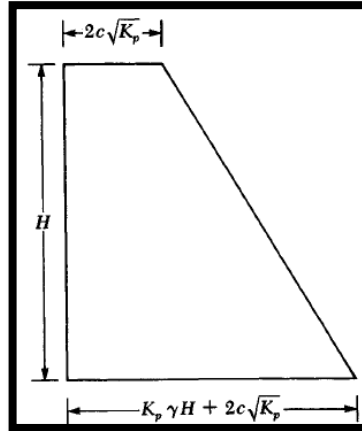
Figura 9. Presión pasiva de Rankine.



Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

La fuerza pasiva por unidad de longitud del muro se determina del área de diagrama de presión, figura 10.

Figura 10. Diagrama de presión pasiva suelo cohesivo.



Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

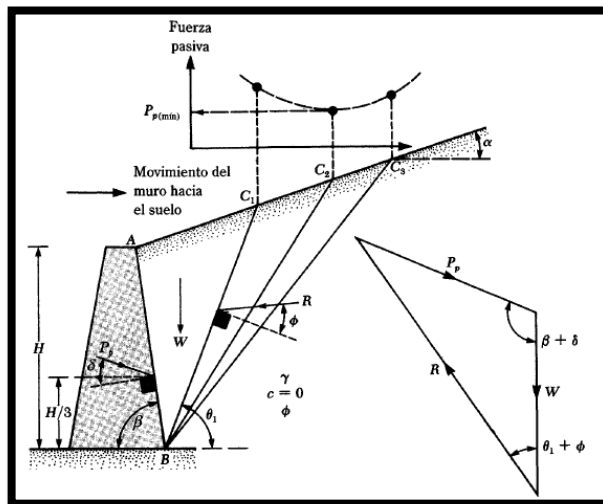
O por medio de la ecuación:

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma * H^2 * K_p + 2c * H * \sqrt{K_p} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde K_p es el coeficiente de presión pasiva de Rankine. Ver anexo 6.

- ♣ **Presión pasiva de tierra de Coulomb:** Igual que en caso de la presión activa, Coulomb supuso que la superficie potencial de falla en el suelo es un plano, figura 11.

Figura 11. Presión pasiva de Coulomb.



Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

El valor mínimo de p_p en este diagrama es la fuerza pasiva de Coulomb. Matemáticamente, ésta se expresa para suelo granular como:

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma * H^2 * K_p \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

K_p = coeficiente de presión pasiva de Coulomb. Ver anexo 7.

1.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Este método permite la solución aproximada de las ecuaciones diferenciales parciales, de tanta aplicación en diferentes ramas de la ingeniería. Se basa en el empleo de sub-divisiones del dominio geométrico del problema en un número finito de elementos más pequeños, en lugar de la idea de continuidad del cálculo diferencial. Cada elemento consiste en un número de nodos y estos a su vez poseen determinados grados de libertad que corresponden a valores discretos de las incógnitas del problema a resolver. En el caso del cálculo de deformaciones los grados de libertad representan las componentes del desplazamiento de cada nodo.

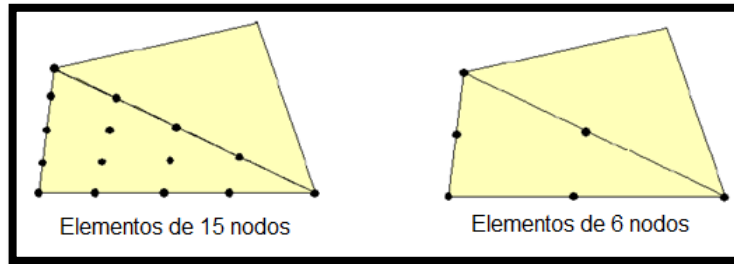
1.4 COMPONENTES DE LA MALLA DE ELEMENTOS FINITOS EMPLEADA EN EL SOFTWARE UTILIZADO.

Los componentes de malla de elementos finitos son de tres tipos y se describen a continuación:

- ♣ **Elementos:** Durante la generación de la malla los materiales que contengan iguales propiedades son divididos en elementos de forma triangular. Se puede elegir entre elementos de quince (15) o de seis (6) nodos. El primero proporciona un cálculo más preciso de los esfuerzos y las cargas de falla, pero requiere mayor tiempo para el procesamiento de los datos.
- ♣ **Nodos:** La Figura 12 muestra la distribución de nodos sobre los elementos de 15 y 6 nodos respectivamente. Los elementos

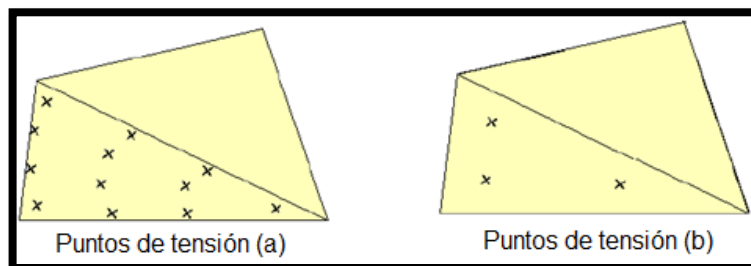
adyacentes son unidos por sus nodos comunes. Durante un procesamiento de datos de elementos finitos, los desplazamientos (u_x y u_y) son calculados en los nodos. Los nodos pueden ser preseleccionados para la generación de curvas de carga-desplazamiento.

Figura 12. Posición de los nodos.



- ♣ **Puntos de tensión:** Un elemento triangular de 15 nodos contiene 12 puntos de tensión como se indica en la figura 13a y un elemento triangular de 6 nodos contiene tres puntos de tensión como se indica en la figura 13b. Los puntos de tensión pueden ser pre-seleccionados para la generación de trayectorias de esfuerzo o diagramas de esfuerzo-deformación.

Figura 13. Puntos de tensión.



2 INFORMACIÓN GENERAL DEL SOFTWARE

Plaxis comenzó su desarrollo en la Universidad Técnica de Delft en 1987, el objetivo inicial era desarrollar un código de elementos finitos de uso sencillo para analizar el comportamiento de los diques y terraplenes construidos sobre los suelos blandos de los ríos de Holanda. En los años siguientes, Plaxis creció para cubrir otras áreas de la ingeniería geotécnica hasta conseguir formar en 1993, debido a sus continuas actividades de crecimiento, una compañía llamada Plaxis BV.

En este programa el comportamiento mecánico de los suelos puede ser modelado con diferentes grados de precisión, entre otros, como el modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb que involucra cinco parámetros, el módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson (ν), el ángulo de rozamiento interno (ϕ), la cohesión (c) y el ángulo de dilatación (ψ).

2.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

PLAXIS 2D es un paquete de elementos finitos diseñado para el análisis bidimensional de deformación y estabilidad en ingeniería geotécnica; está equipado con funciones para hacer frente a diversos aspectos de la complejidad de las estructuras geotécnicas tales como:

- ♣ **Entrada gráfica de modelos de geometría:** Permite una modelación detallada de la geometría de la sección transversal incluidos los materiales del suelo y las diversas estructuras.
- ♣ **Generación de malla automática:** a partir del modelo geométrico una malla de elementos finitos 2D se genera con facilidad.
- ♣ **Elementos de orden superior:** El programa dispone de elementos triangulares de seis (6) y quince (15) nodos, para modelar las deformaciones y tensiones en el suelo.

- ♣ **Placas:** Las placas son objetos estructurales utilizados para modelar estructuras esbeltas en el suelo con una rigidez significativa a la flexión y una rigidez normal.
- ♣ **Interfaces:** Dispone de un conjunto de elementos para modelar la interacción suelo-estructura.
- ♣ **Anclas:** El comportamiento de estos elementos se define mediante una rigidez normal y una fuerza máxima.
- ♣ **Geomallas:** Son de uso frecuente en la práctica para la construcción de terraplenes reforzados o estructuras de retención del suelo.
- ♣ **Modelo de Mohr-coulomb:** Este modelo no lineal se puede utilizar para calcular la presión real de apoyo, las cargas de cimentación, un factor de seguridad, etc.
- ♣ **Modelos de suelo definidos por el usuario:** Este rasgo permite al usuario incluir modelos de suelo auto-programados en los cálculos.
- ♣ **Presión de poros estable:** Distribuciones de presión de poros complejas pueden ser generadas sobre la base de una combinación de niveles freáticos o la entrada directa de presiones de agua.
- ♣ **Exceso de presión de poros:** Se distingue entre suelos drenados y no drenados, para el modelo de arenas permeables, como arcillas casi impermeables.
- ♣ **Control de longitud de arco:** Esta característica permite realizar los cálculos exactos de cargas de derrumbamiento y mecanismos de falla.
- ♣ **Construcción organizada:** Esta función permite una simulación realista de la construcción y procesos de excavación mediante la activación y desactivación de grupos de elementos, la aplicación de cargas, cambio de capas freáticas, etc.
- ♣ **Análisis de consolidación:** El descenso del exceso de presión de poros se puede calcular mediante este análisis que requiere la entrada de coeficientes de permeabilidad de las diferentes capas del suelo.

- ♣ **Factor de seguridad:** Para muros de contención es apropiado utilizar la mecánica de suelos que define un factor de seguridad como la relación de la fuerza disponible de corte y la resistencia mínima al corte, necesaria para el equilibrio.
- ♣ **Actualización del análisis de Lagrange:** Usando esta opción, la malla de elementos finitos es actualizada continuamente durante el cálculo.
- ♣ **Presentación de resultados:** Los valores obtenidos se visualizan en las tablas de resultados que pueden ser enviadas a dispositivos de salida o al portapapeles de Windows para exportarlas a otro software.
- ♣ **Trayectorias de esfuerzos:** Permiten un detallado análisis de los resultados de un cálculo.
- ♣ **Características de salida:** Las animaciones incluyen desplazamientos y esfuerzos en elementos estructurales. Los esfuerzos pueden ser apreciados en todos los componentes cartesianos.
- ♣ **Generador de informe:** Proporciona un informe de datos de entrada y los resultados de salida que pueden ser corregidos en Word.

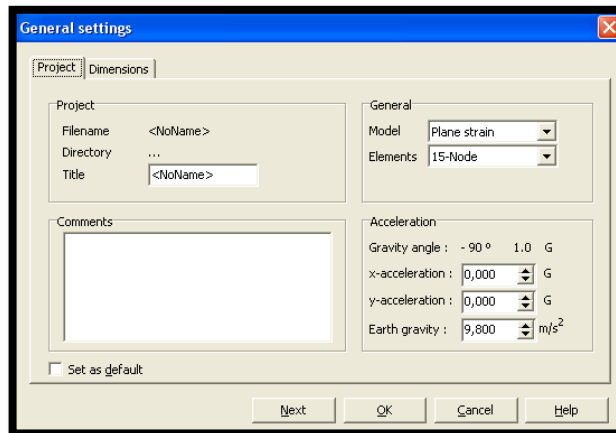
3 UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA

A continuación encontrará una breve descripción del manual de Modelamiento de problemas de estructuras de contención lateral mediante un programa de elementos finitos. El manual completo se obtiene en los anexos de esta tesis, en el está consignado detalladamente las características del software y una serie de ejemplos paso a paso para los usuarios que deseen introducirse en el uso del programa Plaxis.

3.1 INICIO DEL PROGRAMA

Se puede iniciar haciendo doble clic sobre el icono de Plaxis Input. Al usuario se le preguntará si desea definir un nuevo problema o recuperar un proyecto previamente definido. Si un nuevo proyecto ha de ser definido, la ventana de Configuración general aparece, figura 14.

Figura 14. Configuración general - hoja de la pestaña proyecto.

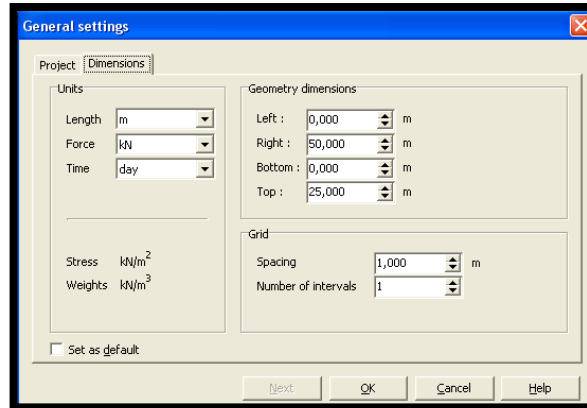


Fuente: Plaxis 2D.

El título se utiliza como un nombre de archivo propuesto y aparece en los espacios de salida, el cuadro de comentarios es un lugar conveniente para almacenar información sobre el análisis, el tipo de análisis y el tipo de elementos deben ser especificados.

La hoja de la segunda pestaña se muestra en la figura 15, las unidades de longitud, fuerza, tiempo y las dimensiones mínimas de la zona de dibujo se deben dar, de manera que la geometría del modelo se ajuste al área de dibujo.

Figura 15. Configuración general - hoja de la pestaña dimensiones.

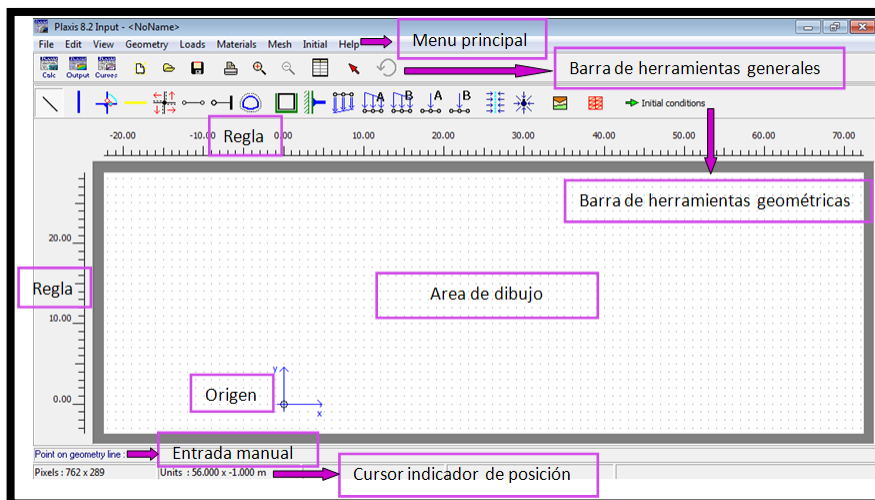


Fuente: Plaxis 2D.

3.1.1 Creación de un modelo geométrico

Cuando la configuración general se introduce y se hace clic en el botón **OK**, la ventana de entrada principal aparece figura 16.

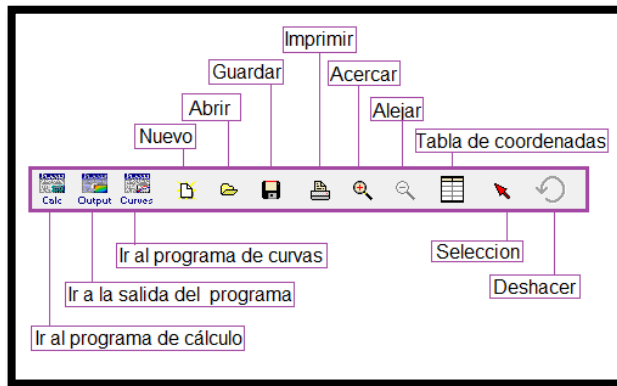
Figura 16. Ventana principal de entrada del programa.



Fuente: Plaxis 2D.

- ♣ **Menú principal:** El menú principal contiene todas las opciones que están disponibles en las barras de herramientas y algunas opciones adicionales.
- ♣ **Barra de herramientas generales:** Esta barra de herramientas contiene botones para las acciones generales y para iniciar los otros programas del paquete PLAXIS (Cálculo, Salida y Curvas) figura 17.

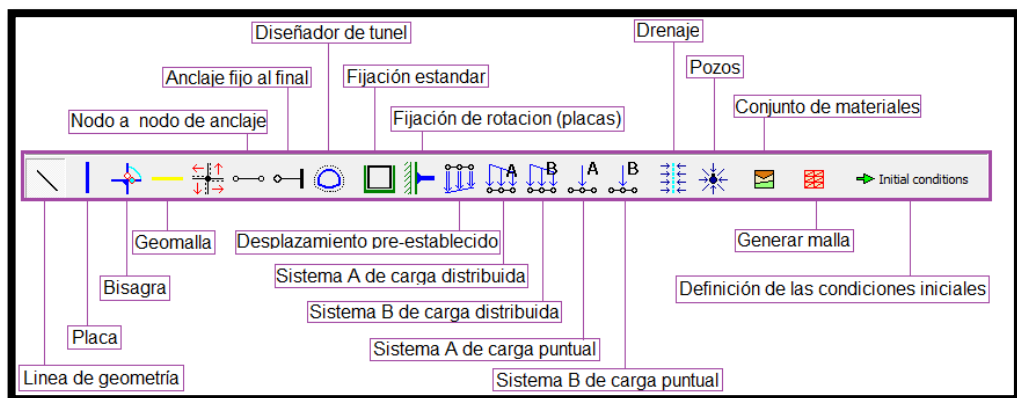
Figura 17. Barra de herramientas generales.



Fuente: Plaxis 2D.

- ♣ **Barra de herramientas geométricas:** Los botones están ordenados en la barra de herramientas de izquierda a derecha de tal manera que siguiendo este orden se consiga un modelo completamente definido, figura 18.

Figura 18. Barra de herramientas geométricas



Fuente: Plaxis 2D.

- ♣ **Reglas:** Están ubicadas a la izquierda y en la parte superior de la zona de dibujo, indican las coordenadas físicas.

- ♣ **Zona de dibujo:** Es el área de dibujo en la que se crea el modelo geométrico.
- ♣ **Origen:** Se representa mediante un círculo pequeño, con una indicación de los ejes X y Y.
- ♣ **Entrada manual:** Si el dibujo con el mouse no da la precisión deseada, entonces la entrada manual se puede utilizar.
- ♣ **Cursor indicador de posición:** El indicador de posición del cursor nos da la posición actual de las unidades físicas y píxeles de pantalla.

3.1.2 Unidades

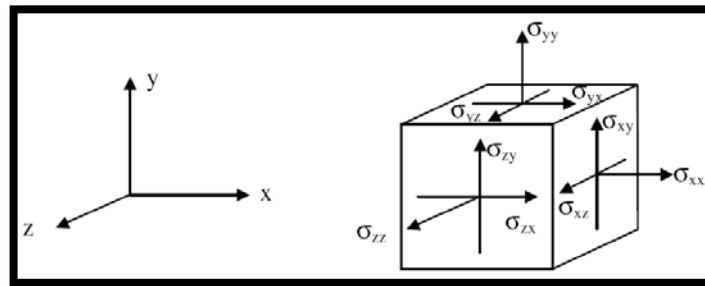
Las unidades básicas son la longitud, la fuerza y el tiempo. Estas unidades se definen en la ventana de Configuración general del programa de entrada y las unidades disponibles son:

- ♣ **Longitud:** Milímetro (mm), metro (m), pulgada (in) y pie (Ft).
- ♣ **Fuerza:** Newton (N), kilo Newton (KN), mega Newton (MN), libra (lb) y Kilo libra (Klb).
- ♣ **Tiempo:** segundo (s), minutos (min), horas (hr) y días (día).

3.1.3 Convención de signos

La generación de un modelo de elementos finitos de dos dimensiones en Plaxis se basa en un modelo geométrico creado en el plano XY del sistema global de coordenadas. Aunque Plaxis es un programa 2D, los esfuerzos se basan en el sistema de coordenadas cartesianas 3D como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Sistema de coordenadas cartesianas e indicación de las componentes de esfuerzo positivo.

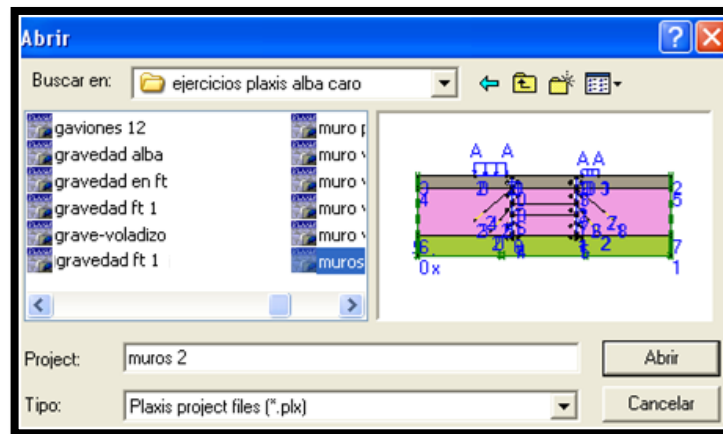


Fuente: Plaxis Reference Manual.

3.1.4 Administración de archivos

Con la ventana solicitadora de archivos, mostrada en la figura 20, es posible buscar archivos en cualquier directorio del computador.

Figura 20. Ventana solicitadora de archivos Plaxis.



Fuente: Plaxis 2D.

3.2 TIPOS DE ENTRADA

Se puede distinguir entre cuatro tipos de entrada: Entrada de modelos geométricos, entrada de texto, entrada de valores y entrada de selecciones.

3.2.1 Entrada de modelos geométricos

La creación de un modelo geométrico se basa en la entrada de puntos y líneas, esto se hace en el área de dibujo.

3.2.2 Entrada de texto y valores

La entrada requerida es especificada en los cuadros de edición, muchos parámetros tienen valores por defecto. En la figura 21, se muestra un ejemplo de tipo de entrada.

Figura 21. Cuadro de entrada para las dimensiones geométricas.

Geometry dimensions

Left :	0,000	m
Right :	50,000	m
Bottom :	0,000	m
Top :	25,000	m

Fuente: Plaxis 2D.

3.2.3 Entrada de selecciones

Las selecciones se hacen por medio de botones, casillas de verificación o cuadros combinados como se muestra en los ejemplos de la figura 22.

Figura 22. Entrada de selecciones.

Iterative procedure

Standard setting
 Manual setting

Def

Botones (a)

Reset displacements to zero
 Ignore undrained behaviour
 Delete intermediate steps

Casillas de verificación (b)

Material model: Mohr-Coulomb
Material type: Drained
Drained
UnDrained
Non-porous

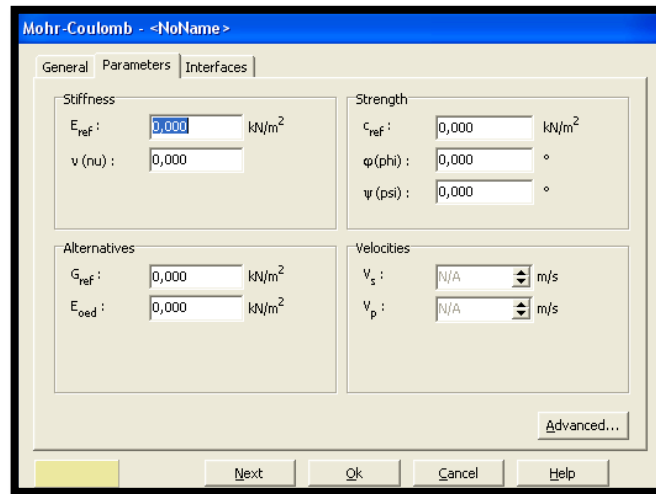
Cuadro de combos (c)

Fuente: Plaxis 2D.

3.3 ESTRUCTURA DE ENTRADA

Algunos tipos de estructura de entrada son: Control de pestañas, hoja descriptiva y grupo de casillas. Figura 23.

Figura 23. Control de pestañas, hoja descriptiva y grupos de casillas.

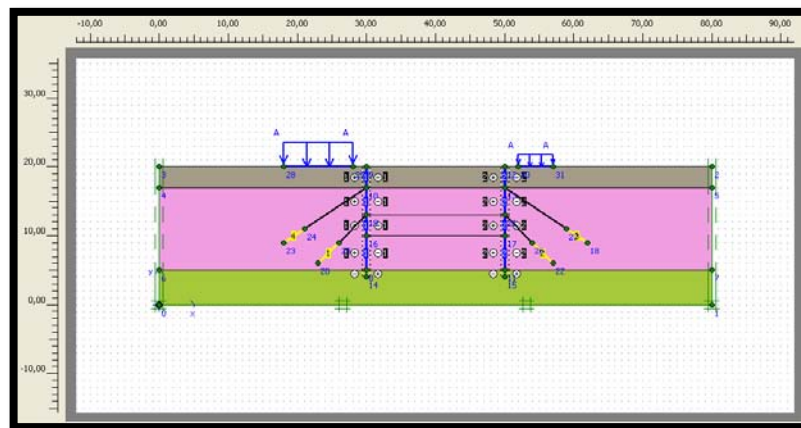


Fuente: Plaxis 2D.

3.3.1 Modelo geométrico

Para cada nuevo proyecto es importante crear una geometría del modelo que comprenda una representación en dos dimensiones de un problema real tridimensional. El modelo geométrico debe incluir la división del subsuelo, objetos estructurales, las fases de construcción y cargas. Ver figura 24.

Figura 24. Introducción del modelo geométrico.



Fuente: Plaxis 2D.

3.3.2 Generación de malla

Cuando el modelo de la geometría está completamente definido y las propiedades de los materiales se asignan a todos los grupos y objetos estructurales, la

geometría tiene que dividirse en elementos finitos con el fin de realizar los respectivos cálculos.

3.4 CONDICIONES INICIALES

Las condiciones iniciales consisten en dos modos diferentes: Un modo para la generación de presiones iniciales de agua y otro para la especificación de la configuración de la geometría inicial y la generación del campo de esfuerzo efectivo inicial.

3.5 CONDICIONES DE AGUA

El modo de condiciones de agua puede ser omitido en proyectos que no tienen que ver con presiones de agua. En este caso, un nivel freático general se toma en la parte inferior del modelo de la geometría y todas las presiones de poro y la presión exterior del agua se considerarán nulas. En los proyectos que influyen las presiones de agua se deben tener en cuenta el peso unitario del agua y la posición del nivel freático en cada fase de cálculo.

3.5.1 Generación de presiones de agua.

Después de la entrada de los niveles freáticos o la entrada de las condiciones de contorno para el flujo de agua subterránea, las presiones de agua se deben generar.

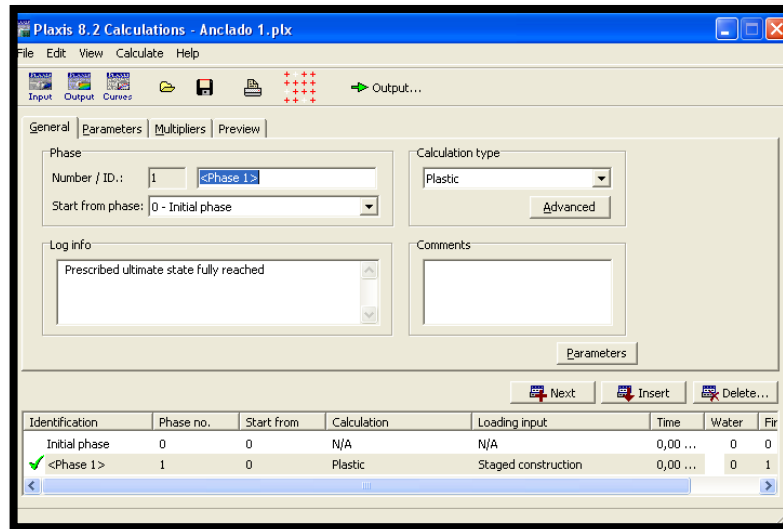
3.5.2 Generación de esfuerzos iniciales

Los esfuerzos iniciales en el cuerpo del suelo están influenciados por el peso del material y su formación.

4 PROGRAMA DE CÁLCULOS

El programa de cálculo contiene todas las facilidades para definir y poner en marcha los cálculos de elementos finitos.

Figura 1. Ventana principal del programa de cálculos.



Fuente: Plaxis 2D.

4.1 EL MENÚ DE CÁLCULO

El menú principal del programa de cálculo contiene un sub-menú desplegable que cubre la mayoría de las opciones para el manejo de archivos, definiendo las fases y ejecución de cálculos.

4.2 DEFINICIÓN DE UNA FASE DE CÁLCULO

Para introducir una fase de cálculo, el botón Next debe ser presionado y la etapa tiene que ser definida. No es necesario definir todas las fases antes de iniciar el proceso de cálculo ya que el programa permite la definición de nuevas fases después del cálculo de las fases anteriores.

4.2.1 Identificación de fase y ordenamiento

El grupo de fases en la hoja de la pestaña General muestra el número de la fase, Plaxis asigna automáticamente un número a cada fase de cálculo que no puede ser cambiado.

4.2.2 Tipos de cálculo

Se distingue entre tres tipos básicos de cálculos: un cálculo plástico, un análisis de consolidación y reducción de Phi-c (análisis de seguridad).

♣ Cálculo plástico:

Un cálculo plástico debe ser seleccionado para llevar a cabo un análisis de la deformación elásto-plástica. La matriz de rigidez en un cálculo plástico normal se basa en la geometría original sin deformar.

♣ Análisis de consolidación:

Un análisis de consolidación debe ser seleccionado cuando es necesario analizar el desarrollo o la disipación del exceso de presiones de poros en suelos saturados de agua, en función del tiempo.

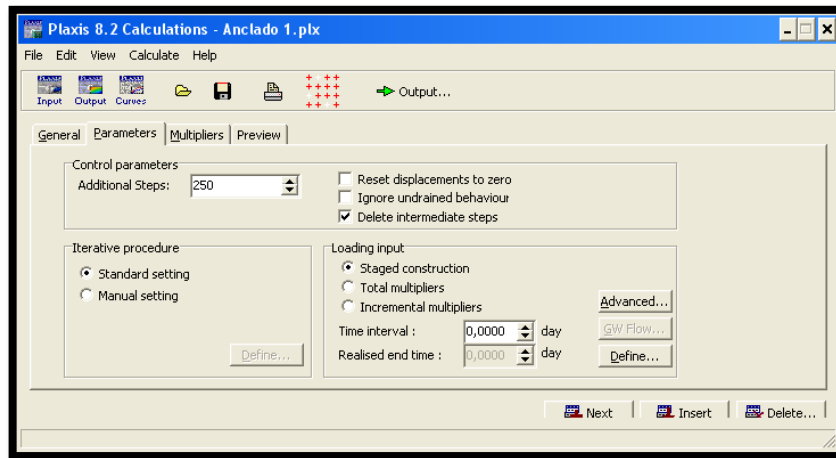
♣ Phi-c reducción:

Un análisis de seguridad en Plaxis se puede ejecutar mediante la reducción de los parámetros de resistencia del suelo, la reducción de Phi-c se debe seleccionar cuando se desea calcular un factor de seguridad global. Tenga en cuenta que una fase de reducción de phi-c no se puede utilizar como una condición de partida para otra fase de cálculo, ya que termina en un estado de falla.

4.3 PARÁMETROS DE CONTROL DE CÁLCULO

La hoja de la pestaña Parámetros se utiliza para definir los parámetros de control de una fase de cálculo en particular y el procedimiento de solución correspondiente.

Figura 25. Hoja de la pestaña Parámetros de la ventana de cálculos.



Fuente: Plaxis 2D.

4.4 CONSTRUCCION POR ETAPAS

En la hoja de la pestaña Parámetros la opción de Construcción por etapas se puede seleccionar, posteriormente se hace clic en el botón Definir y el programa de entrada se inicia. Después el botón Actualizar (update) debe ser presionado para almacenar la información y volver al programa de cálculos.

4.4.1 Cambio de configuración

Los grupos, objetos estructurales y cargas pueden ser activados o desactivados para simular un proceso de construcción. Si más de un objeto está en una línea geométrica, aparece una ventana de selección de la cual el objeto deseado puede ser elegido. Al hacer doble clic en un objeto estructural, la ventana de propiedades correspondiente aparece y las propiedades se pueden cambiar.

4.4.2 Aplicación de los desplazamientos a utilizar

Los desplazamientos prescritos que se crearon en la entrada de la geometría no se aplican automáticamente en los cálculos, pero pueden ser activados por medio de un proceso de construcción por etapas. Cuando los desplazamientos prescritos han sido definidos y están inactivos, los nodos son totalmente libres.

4.4.3 Reasignación de los datos del material

La opción de volver a asignar los datos del material puede ser utilizada para simular el cambio de las propiedades del material con el tiempo en las diferentes etapas de la construcción. En lugar de cambiar los datos fijados del material, otro conjunto de datos debe ser asignado al grupo u objeto, esto garantiza la consistencia en la base de datos del material.

4.4.4 Pre-esfuerzo de los anclajes

El pre-esfuerzo de los anclajes se puede activar desde el modo de configuración de la geometría de la ventana de la construcción por etapas, al hacer doble clic en el ancla que desee.

4.4.5 Puntos de selección de curvas

Después de que las fases de cálculo se han definido y antes de que el proceso de cálculo se haya iniciado, algunos puntos pueden ser seleccionados por el usuario para la generación de las curvas de carga-desplazamiento o trayectorias de esfuerzos.

4.5 EJECUCIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO

Cuando las fases de cálculo han sido definidas y los puntos para las curvas han sido seleccionados, el proceso de cálculo puede ser ejecutado. Una fase de cálculo que se ha seleccionado para su ejecución se indica con una flecha azul (➡). Las fases de cálculo que han terminado con éxito se indican con una marca de verificación verde (✓), mientras que las fases que no han finalizado correctamente se indican con una equis roja (X).

4.5.1 Cálculo no finalizado de la construcción por etapas

Si un cálculo no ha finalizado correctamente, aparece una advertencia en el cuadro de información de registro. Hay dos posibles razones para una etapa de construcción sin terminar: La falla de la estructura del suelo se ha producido durante el cálculo o el número máximo de pasos de carga fue insuficiente.

5 PROGRAMA DE SALIDA

El programa de salida contiene todas las ayudas para ver los resultados generados de la lista de datos de entrada y cálculos de elementos finitos.

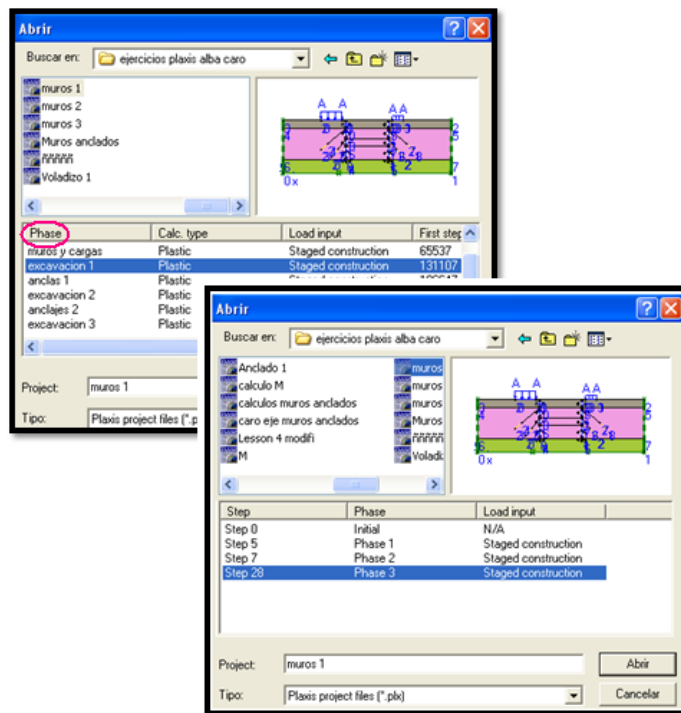
5.1 EL MENÚ DE SALIDA

El menú principal del programa de salida contiene sub-menús desplegables que cubren la mayoría de las opciones para el manejo de archivos, la transferencia de datos, visualización de gráficos y tablas. El tipo principal de los resultados de un cálculo de elementos finitos consta de esfuerzos y deformaciones.

5.1.1 Selección de pasos de salida

Cuando el usuario selecciona un proyecto, el solicitante de archivo muestra la lista correspondiente a las fases de cálculo. Al seleccionar una fase de cálculo, se abre una nueva forma de salida en que se presentan los resultados de la etapa de cálculo final de la fase seleccionada.

Figura 2. Solicitante de archivo para la selección de una fase o un paso intermedio.



Fuente: Plaxis 2D.

5.1.2 Deformaciones

Este submenú contiene varias opciones para visualizar deformaciones, tales como la malla deformada, desplazamiento total, desplazamiento vertical y horizontal, deformaciones totales, entre otras.

5.1.3 Esfuerzos

El sub-menú Esfuerzos contiene varias opciones para visualizar el estado de esfuerzo en el modelo de elementos finitos, tales como esfuerzos afectivos, esfuerzos totales, entre otros.

5.1.4 Tablas de salida

Para todos los tipos de gráficos los datos numéricos se pueden ver en las tablas de salida haciendo clic en el botón Tabla.

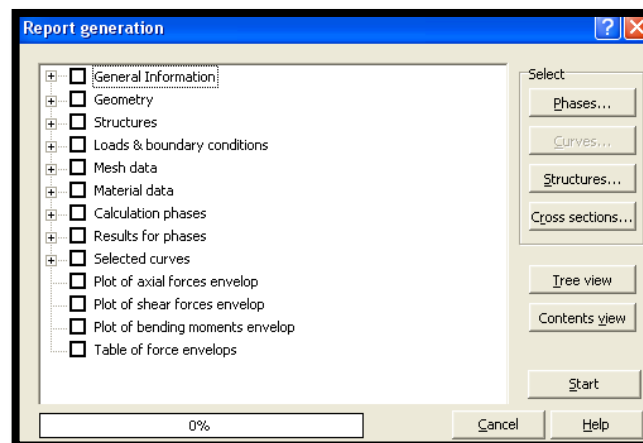
5.1.5 Visualización de un corte transversal

Para tener información sobre la distribución de esfuerzos y desplazamientos en los elementos del suelo, es útil ver la distribución de esa cantidad en un corte transversal del modelo.

5.1.6 Generación de informes

Está disponible para documentar los datos de entrada de proyecto y resultados computacionales, esta opción requiere la presencia del software Microsoft® Word.

Figura 3. Ventana de generación de informes.

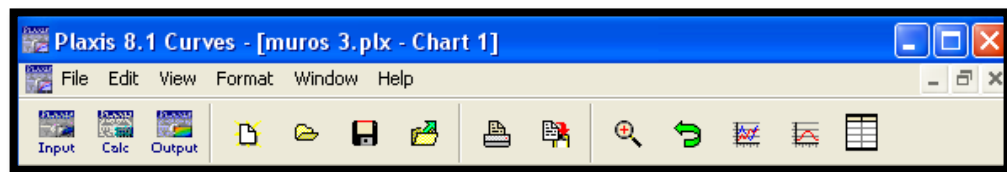


Fuente: Plaxis 2D.

6 EL PROGRAMA DE CURVAS

El programa de curvas contiene todas las facilidades para generar curvas de carga-desplazamiento, trayectorias de esfuerzo y los diagramas de esfuerzo-deformación. Al inicio del programa, hay que elegir entre la selección de un gráfico existente y la creación de un nuevo.

Figura 4. Barra de herramientas en la ventana principal del programa de Curves



Fuente: Plaxis 2D.

6.1.1 Ventanas de tabla

Estas son las ventanas en las que se muestran los gráficos. Múltiples formas de gráficos se pueden abrir simultáneamente y cada uno puede contener un máximo de diez curvas.

6.1.2 Barra de herramientas

Esta barra contiene botones que se pueden utilizar como acceso directo a las ayudas del menú.

6.1.3 Menú de curvas

El menú de curvas consiste en los siguientes sub-menús: archivo, editar, formato y ver.

6.1.4 Generación de curva

Una nueva curva puede ser generada cuando se inicia el programa de curvas, se pueden generar curvas de carga-desplazamiento, tiempo-desplazamiento, diagramas de esfuerzo deformación, trayectorias de esfuerzo deformación, también es posible la creación de múltiples curvas en un solo grafico.

6.1.5 Actualización de curvas

Si un proceso de cálculo se repite o amplía con nuevas fases, se debe actualizar las curvas existentes para cumplir con los nuevos datos.

6.1.6 Opciones de formato

La opción Curva se utiliza para modificar la presentación de las curvas, y la opción Grafico se utiliza para establecer el gráfico y los ejes en los que las curvas aparecen.

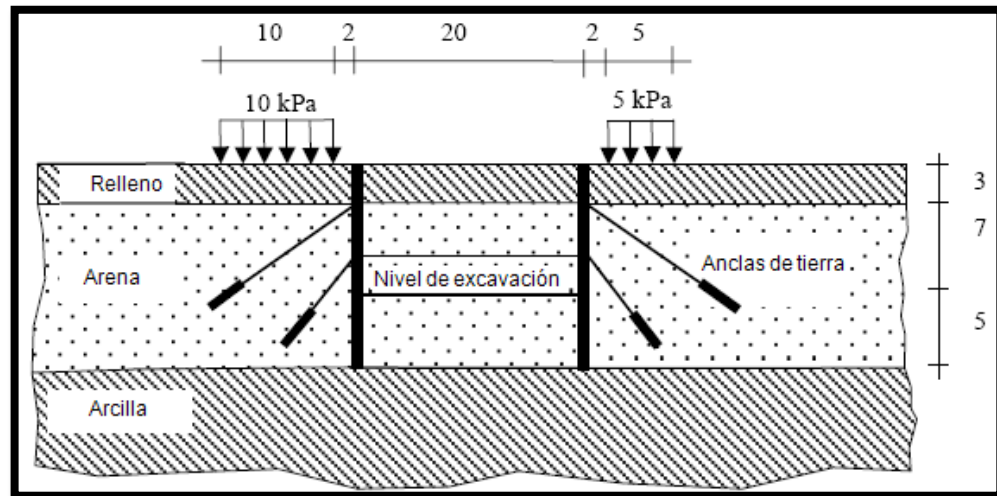
6.1.7 Visualización de una tabla

Para ver los datos numéricos presentados en las curvas, una tabla puede ser abierta haciendo clic en el botón Tabla. Hay opciones disponibles en el menú de la tabla para imprimir y copiar todos o una parte de los datos en el portapapeles de Windows. Los datos copiados pueden pegarse en un programa de hoja de cálculo para su posterior elaboración.

7 EJERCICIO MODELO

Se realiza una excavación de 20 m de ancho y 10 m de profundidad, los muros pantalla son de hormigón cuyo modulo de Young es de 35 Gpa y tiene un espesor de 0,35 m y una longitud de 15 m. Se utilizan en cada pared dos filas de anclajes al terreno para soportar los muros. Los anclajes superiores tienen una longitud total de 14,5 m., una inclinación de $33,7^\circ$ (2:3) y se unen al muro a una profundidad de 3m respecto a la superficie. Los anclajes inferiores son de 10 m de largo, se instalan con un ángulo de 45° (1:1) y se unen al muro a una profundidad de 7m desde la superficie. En el lado izquierdo de la excavación hay una carga de 10 kN/m^2 y en el lado derecho una carga de 5 kN/m^2 que se tienen en cuenta.

Figura 26. Excavación soportada por muros sujetos posteriormente.

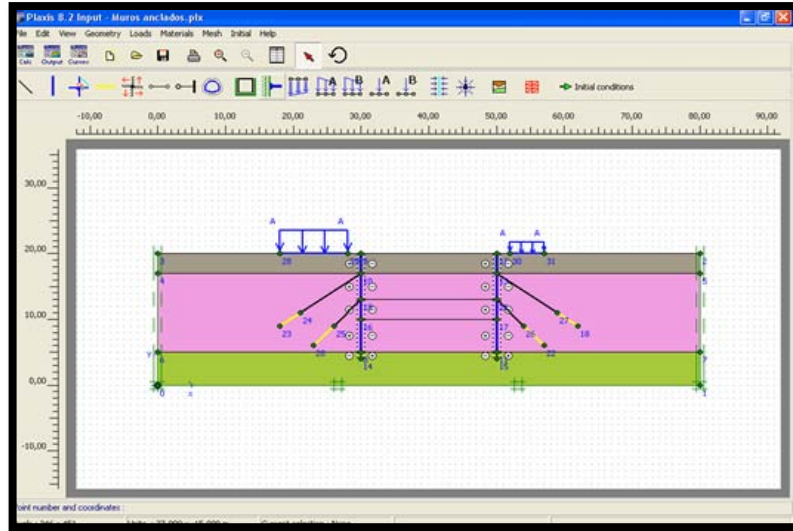


Fuente: Plaxis manual tutorial.

La parte del suelo relacionada se compone de tres capas distintas. Desde la superficie del suelo a una profundidad de 3 metros hay un relleno de suelo relativamente suelto de arena fina. Debajo del relleno, a una profundidad mínima de 15m, se encuentra una capa más o menos homogénea formada por arena densa bien gradada. En la situación inicial hay un nivel freático horizontal de 3m. por debajo de la superficie de tierra, (es decir, en la base de la capa de relleno), debajo de la capa de arena hay una capa de arcilla, que se extiende a gran profundidad.

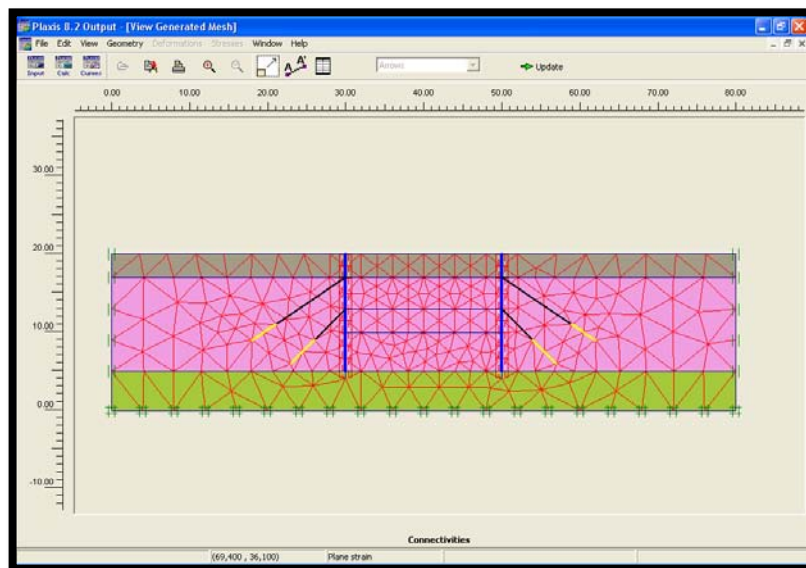
En la figura 27 se observa la geometría del modelo ya introducida en Plaxis y cada una de las capas del suelo con sus respectivas propiedades.

Figura 27. Geometría del modelo.



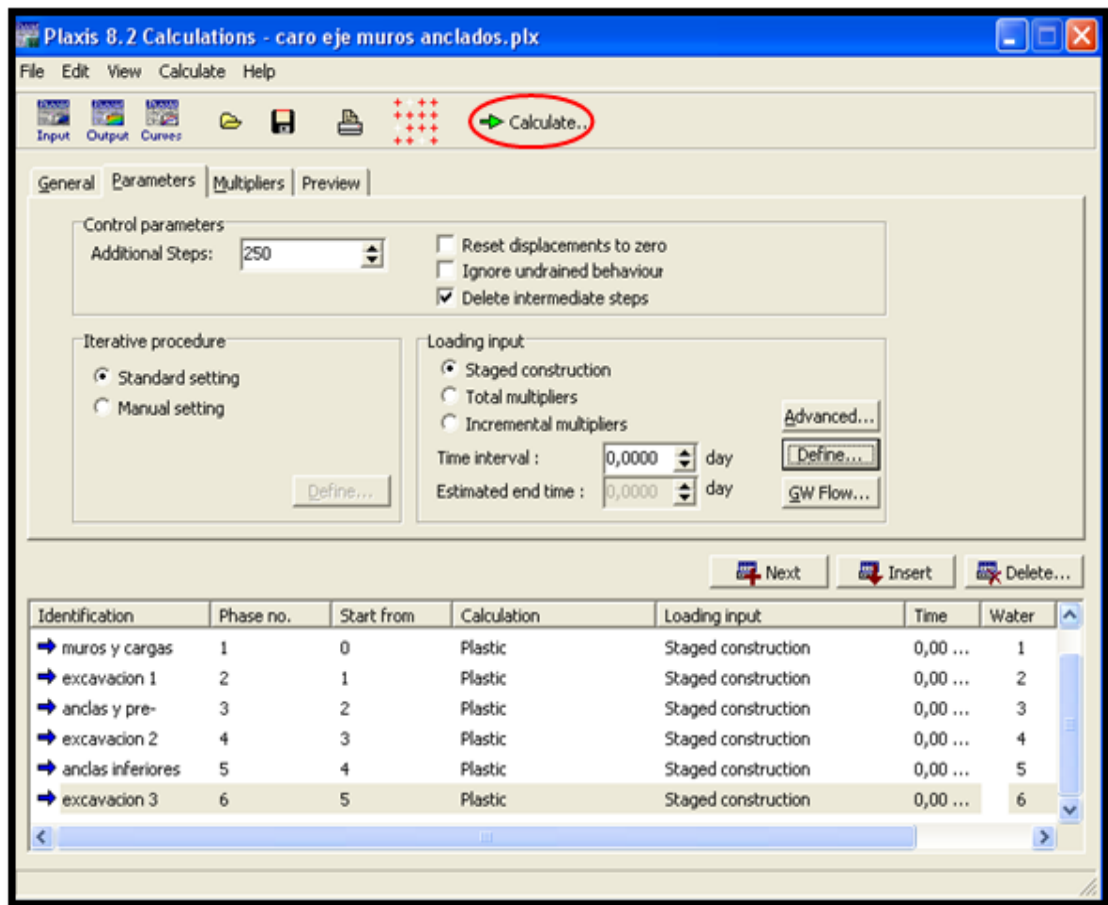
Para la generación de malla se recomienda seleccionar **Mesh** en la barra de herramientas, elegir **Global coarseness** y escoger la opción de **Medium**, posteriormente se hace clic en **Generate mesh**.

Figura 28. Malla generada.



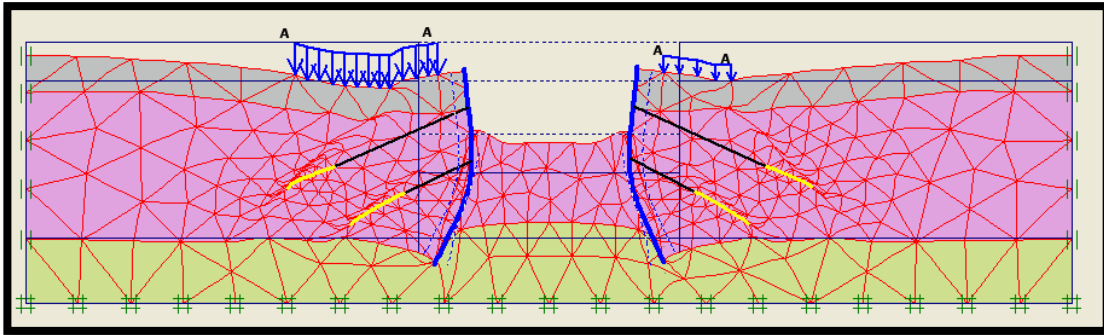
Después de que se genera la malla se establecen las condiciones iniciales del modelo; que incluye la ubicación del nivel freático, la generación de presiones de agua y esfuerzos iniciales. Posteriormente se da clic en Calculate para proceder al modo de cálculo, en esta etapa se crean las 6 fases de cálculo para este caso en particular, figura 29. Seguidamente se da nuevamente clic en calcúlate para que el programa empiece a iterar.

Figura 29. Definición de las fases.



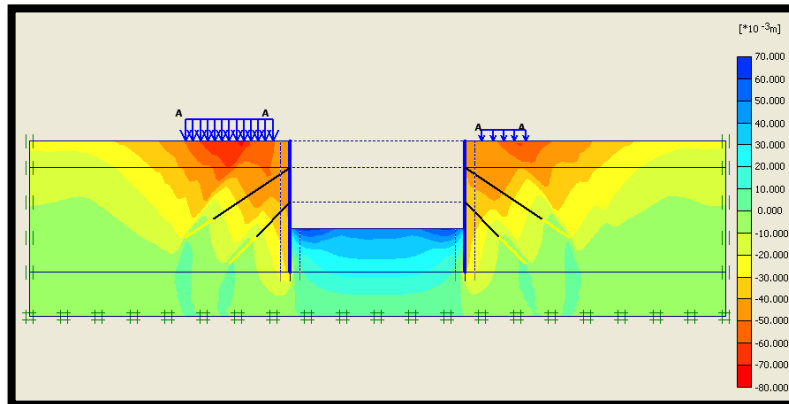
Después de que todas las fases han terminado satisfactoriamente, se puede observar los resultados de salida en diversas presentaciones según las necesidades del usuario tales como figuras, tablas y graficas. A continuación se muestra algunas posibilidades de resultados; estas se pueden apreciar para cada fase por separado.

♣ MALLA DEFORMADA EN LA FASE FINAL.



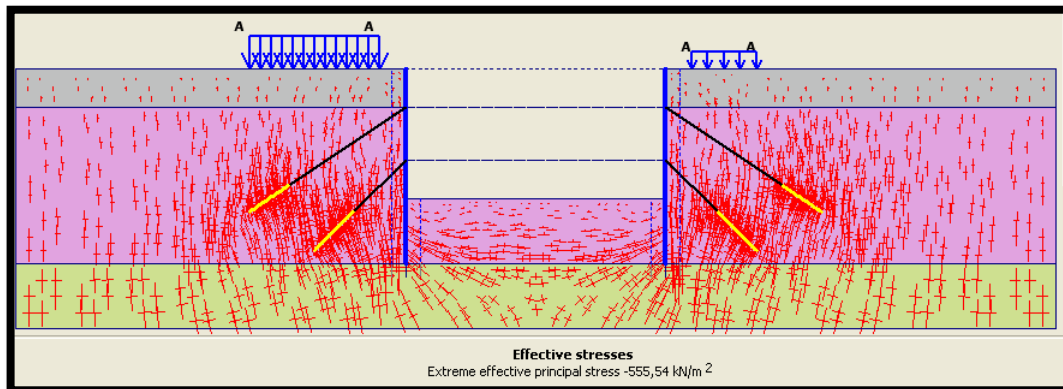
Desplazamiento total mayor = $94.92 \cdot 10^{-3}$ m.

♣ DESPLAZAMIENTOS VERTICALES EN LA FASE FINAL.



Desplazamiento vertical mayor (U_y) = $-70,65 \cdot 10^{-3}$ m.

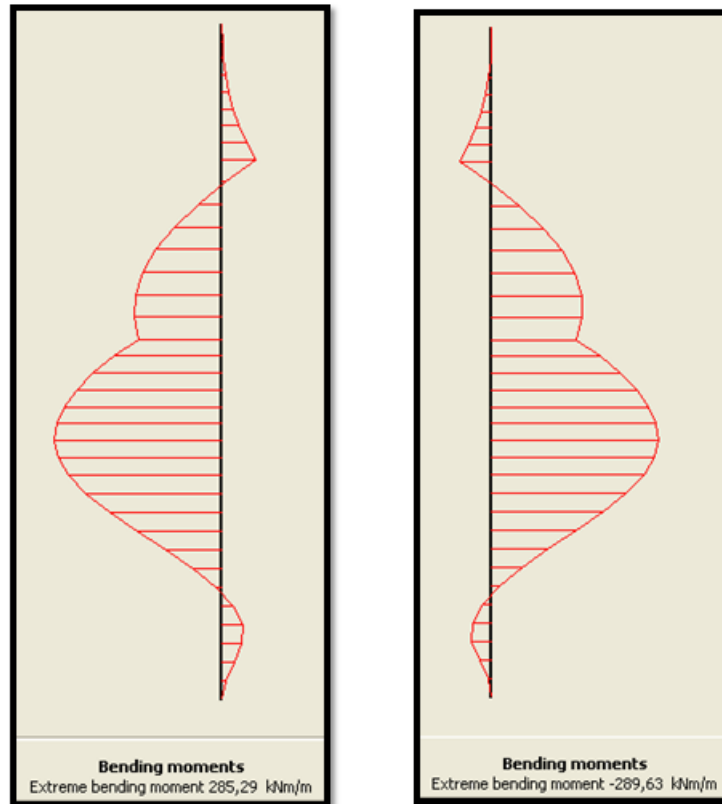
♣ ESFUERZOS EFECTIVOS EN LA FASE FINAL



Principal esfuerzo efectivo mayor = $-555,54$ KN/m²

El software también nos permite hacer cortes transversales para tener una información más precisa de ciertos lugares de interés en la figura 30 muestra el diagrama de momentos del muro izquierdo y derecho.

Figura 30. Diagrama de momentos de flexion.



Los momentos de flexión máximos son 285,29 KNm/m y -289,63 KNm/m para los muros de la izquierda y derecha respectivamente.

El programa proporciona los valores de cada uno de los nodos del suelo y de las estructuras. En la figura 31 se encuentra una fracción de la tabla correspondiente a los desplazamientos de los elementos del muro diafragma de la izquierda.

Figura 31. Desplazamientos en el muro de la izquierda.

Plate	Element	Node	X [m]	Y [m]	Ux [10 ⁻³ m]	Uy [10 ⁻³ m]
1	1	1444	30,000	20,000	70,664	-40,667
		1443	30,000	19,625	71,392	-40,667
		1442	30,000	19,250	72,120	-40,667
		1441	30,000	18,875	72,851	-40,667
		1608	30,000	18,500	73,588	-40,666
	2	1608	30,000	18,500	73,588	-40,666
		1607	30,000	18,125	74,337	-40,666
		1606	30,000	17,750	75,106	-40,665
		1605	30,000	17,375	75,907	-40,664
		1604	30,000	17,000	76,753	-40,663
	3	1604	30,000	17,000	76,753	-40,663
		1588	30,000	16,500	77,974	-40,656
		1587	30,000	16,000	79,194	-40,650
		1586	30,000	15,500	80,315	-40,643
		1585	30,000	15,000	81,251	-40,636
	4	1585	30,000	15,000	81,251	-40,636
		1560	30,000	14,500	81,938	-40,629
		1559	30,000	14,000	82,329	-40,622
		1558	30,000	13,500	82,403	-40,614
		1571	30,000	13,000	82,157	-40,606

Si es el deseo del usuario el software por medio del programa de curvas le permite graficar los resultados de los puntos que fueron escogidos con anterioridad.

Por último es posible usar la herramienta de generar informe donde se pueden observar los datos deseados y expórtalos a Microsoft® Word.

CONCLUSIONES

En esta tesis los estudiantes y docentes de la escuela de Ingeniería Civil encontraran una herramienta útil para el modelamiento de estructuras de contención lateral mediante el programa de elementos finitos Plaxis 2D.

Este manual permite al usuario optimizar el tiempo para resolver problemas de estructuras de contención lateral.

La exactitud de los resultados obtenidos del software depende en gran parte de la precisión del estudio geotécnico realizado al suelo que soportara la estructura de contención, al los ensayos realizados en laboratorio para determinar las propiedades mecánicas de los muros de retención y a la correcta definición de las fases de construcción por etapas.

Para este proyecto no se realizo ningún tipo de ensayo de laboratorio ni estudios geotécnicos, los datos usados en los problemas propuestos fueron tomados de bases de datos existentes.

La generación de una malla de elementos finitos demasiado refinada incrementa el número de nodos y puntos de esfuerzo, permitiendo mayor información en la zona de estudio, esto a su vez aumenta significativamente el tiempo requerido para el procesamiento de los cálculos y exige la utilización de un computador con buen procesador, suficiente memoria RAM y tener la mínima cantidad de programas trabajando simultáneamente para evitar que el equipo se bloquee.

El programa cuenta con una herramienta para el modelamiento de muros pantalla, para los muros a gravedad, en voladizo y gaviones se debe hacer una serie de suposiciones ya que no posee una herramienta específica para cada uno de ellos lo que generan cierta incertidumbre en los resultados obtenidos.

Cuando la cohesión de un suelo específico es cero el programa recomienda utilizar un valor aproximado a este, para que el rendimiento del cálculo no se vea afectado.

La generación de los modelos en el programa Plaxis 2D, no se realizó con propósitos lucrativos, el objetivo fue crear un manual que facilitara la implementación de esta nueva herramienta en la escuela de ingeniería civil.

BIBLIOGRAFÍA

- ♣ ALMEYDA VELANDIA, Cristian Fernando. AMADO ESPITIA, Miguel Angel. 2010. Modelamiento de Fundaciones Utilizando el Método de los Elementos Finitos 3D.
- ♣ CIGANA, JUAN P. Modelación Numérica de Estructuras de Contención Portuarias: Aplicación al Muro de Gravedad del Puerto de Buenos Aires.
- ♣ DAS, BRAJA, 2001. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. Thompson Learning.
- ♣ GARCÍA FORERO, Nancy Milena. 2010. Elaboración de texto guía y ayudas didácticas para la asignatura de fundaciones I.
- ♣ <http://www.plaxis.nl/>.
- ♣ JARA MORI, Gonzalo Andrés. 2008. Estudio de la aplicabilidad de materiales compuesto al diseño de estructuras de contención de tierras y su interacción con el terreno, para su empleo en obras de infraestructura viaria.
- ♣ PLAXIS. General Information.
- ♣ PLAXIS. Reference Manual.
- ♣ PLAXIS Tutorial Manual.
- ♣ VADILLO, FERNANDO. 2006. Una Introducción al Método de Elementos Finitos.

ANEXOS

Anexo 1: Licencia del programa Plaxis.



END-USER LICENCE AGREEMENT FOR PLAXIS SOFTWARE No. _____ Date: September 8, 1997

The Undersigned:

1. **Plaxis B.V.**, a company organised under the laws of the Netherlands, having its principal place of business at Klaidijk 35, Rhoon (the Netherlands), hereinafter referred to as "Plaxis";

and

2. **Jaime Suarez**
Bv. Jaime Suarez
Calle #1, 25-33
Euzoanango
COLOMBIA

herein after referred to as "licensee".

HAVE AGREED AS FOLLOWS:

Article 1 - Grant of rights

- 1.1 Plaxis hereby grants to licensee the non-exclusive and non-transferable right to use the Plaxis-software subject to the terms and conditions contained in this Agreement.
- 1.2 Nothing in this Agreement shall be construed or interpreted as implying any transfer and/or assignment of the intellectual property rights, including the copyright in the Plaxis software.

Article 2 - Installation of the software

- 2.1 Licensee shall be solely responsible for the installation and implementation of the Plaxis-software on its computer, including but not limited to loading the Plaxis-software on its computer and implementing the necessary configuration. Plaxis does not warrant that the Plaxis-software operates on the type of computer owned by licensee and licensee shall be solely responsible for obtaining a computer compatible with the Plaxis-software.
- 2.2 Licensee is solely responsible for the use of the Plaxis-software, for selecting the Plaxis-software to achieve the intended results and for the results obtained from the Plaxis-software.

Article 3 - Restrictions of use

- 3.1 The license to use the Plaxis-software granted to licensee under this Agreement is limited to the right to load the Plaxis-software into the memory of and use the Plaxis-software on one single computer only.
- 3.2 Licensee does not have the right to and shall at all times withhold from:
 - a) making any copies or duplications of the Plaxis-software, the Documentation and/or any parts thereof, except that licensee may make one back-up copy of the Plaxis-software on disk for security reasons;
 - b) changing and/or adding to the Plaxis-software;

- c) making the Plaxis-software or the use of the Plaxis-software available to any third party, including but not limited to sub-licensing, renting and leasing the Plaxis-software to third parties;
- d) performing any operations regarding decompiling, disassembling and/or "reverse engineering" of the Plaxis-software without the prior written consent in writing of Plaxis. At the request of Licensee Plaxis shall provide licensee with the information necessary to achieve the interoperability of the Plaxis-software with other software provided that such information has not been previously been readily available to licensee.

Article 4 - Warranty

- 4.1 Plaxis does not warrant that the Plaxis-software will be error-free, but if, within 12 (twelve) months from the date of entry into force of this Agreement, it is demonstrated to Plaxis that the copy of the Plaxis-software sent to licensee contained an error or fault, Plaxis shall exert all reasonable endeavours to correct such error or fault or (at its option) shall replace such copy free of charge, provided that:
 - a) the Plaxis-software has been used properly at all times and in accordance with the documentation provided to Licensee with the Plaxis-software ("the Documentation"); and
 - b) the alleged error or fault in the Plaxis-software has been notified in writing to Plaxis within the warranty period specified above; and
 - c) no alteration, modification or addition has been made to the Plaxis-software; and
 - d) adequate documentation has been provided to ascertain the cause of the problem.
- 4.2 Each claim of licensee under this warranty shall be sent in writing to Plaxis specifying the nature of the error or fault.

Article 5 - Maintenance

Notwithstanding and without prejudice to the warranty obligations contained in article 4 of this Agreement Plaxis shall see to the maintenance of the Plaxis-software. Maintenance includes and is limited to providing licensee at its own discretion with updates of the Plaxis-software. If Plaxis is willing to provide licensee with updates it shall:

- notify licensee of its intention to provide updates.
- inform licensee of the prices for such updates.
- provide licensee, as soon as an update is released, with the relevant documentation in order to give licensee the opportunity to verify the consequences for licensee's software and/or management.
- provide licensee with the update in a machine-readable form if licensee decides to use the update.



END-USER LICENCE AGREEMENT FOR PLAXIS SOFTWARE
 No. _____ Date: September 3, 1997

Article 6 - Limitation of liability

- 6.1 Plaxis shall not be liable to licensee or to any other party for or be responsible for any loss or damage, indirect, direct or otherwise, including but not limited to time, money or goodwill, costs of substitution, property damage, material damage, damage to the company, damage resulting from stagnation, loss of data, loss of profit or other losses arising from the use, operation, execution or modification of the Plaxis-software, its documentation and/or any output generated by or through the use of the Plaxis-software by licensee, unless licensee can prove that the loss or damage was caused by willful misconduct or gross negligence on the part of Plaxis.
- 6.2 Licensee shall indemnify and hold Plaxis harmless from and against any claim of third parties for loss or damages caused by or related to the use of the Plaxis-software and its documentation by licensee.
- 6.3 If, notwithstanding the exclusion of liability contained in this article, Plaxis can be held liable by licensee, the liability of Plaxis for loss or damage (including personal injury or death) shall in any event be limited to a maximum of the amount charged to licensee for obtaining the Plaxis-software.

Article 7 - Insurance

Licensee shall insure with a reputable insurance company, against all loss of or damage to property and injury to persons (including death) arising from the use, operation, execution or modification of the Plaxis-software, the Documentation and/or any output generated by or through the use of the Plaxis-software by licensee.

Article 8 - Confidentiality

Licensee acknowledges that the Plaxis-software and the Documentation contain confidential information and shall hold the Plaxis-software and the Documentation in strict confidence and shall withhold from making the Plaxis-software and/or the Documentation and/or any part thereof available to third parties without the express written consent of Plaxis.

Article 9 - Duration and termination of the Agreement

- 9.1 This Agreement shall enter into force on the date of signature by both parties and shall remain in force until terminated in accordance with the provisions hereof.
- 9.2 Licensee may terminate this Agreement by giving 30 (thirty) days written notice to Plaxis by registered post.
- 9.3 Both parties have the right to terminate this Agreement in the following events:

- a) if the other party violated any of the provisions of this Agreement. If a party wishes to terminate this Agreement due to a default by the other party as provided for in this paragraph, the party wishing to terminate shall give the other party written notice of default, sent by registered mail, giving the details of the default which is to be remedied. If the defaulting party fails to remedy the default within 2 (two) weeks of receipt of this notice, the other party shall be entitled to terminate this Agreement with immediate effect. Such termination shall be effected by giving the other party notice by registered letter with receipt to the other party.
 - b) if the other party is declared bankrupt or a receiver is appointed to administer its assets.
- 9.4 Upon termination (for whatever reason) of this Agreement licensee shall:
- a) cease to have the right to use the Plaxis-software or the Documentation and shall immediately withhold from such use with immediate effect;
 - b) immediately return the Plaxis-software, the Documentation and the hardlock key;
 - c) erase or otherwise destroy any computer program or other series of instructions forming part of the Plaxis-software contained in any memory device in the possession of licensee or under its control.

Article 10 - General

- 10.1 This Agreement sets forth the entire agreement and understanding between the parties with respect to the subject matter thereof and supersedes all prior oral and written agreements and understandings between the parties relating thereto.
- 10.2 If any term or provision of this Agreement is found to be illegal or unenforceable, then, notwithstanding any such illegality or unenforceability, this Agreement shall remain in full force and effect and such term or provision shall be deemed to be deleted.
- 10.3 This Agreement is governed by Dutch law. Any dispute in connection with this Agreement can only be referred to the competent Court in Rotterdam, unless Plaxis prefers at its sole discretion, to submit the dispute to any other competent (foreign) Court.

Agreed and signed in duplicate on

Name: R.G.A. de Jong
 Managing director

Name: _____

Plaxis B.V.

Licensee

of the
 hall

Iconos del software.

ICONOS	NOMBRE
	Programa de entrada
	Nuevo
	Abrir
	Guardar
	Imprimir
	Ampliar
	Disminuir
	Tablas
	Puntero
	Rehacer
	Línea geométrica
	Placas
	bisagras
	Geomalla
	Interfaces
	Anclajes nodo a nodo
	Anclajes nodo a empotramiento
	Túnel
	Empotramientos estándar
	Articulación
	Desplazamientos pre-escritos
	Distribución de cargas lineales
	Cargas puntuales
	Drenaje
	Pozos
	Conjunto de materiales

ICONOS	NOMBRE
	Generación de malla
	Establecer condiciones iniciales
	Nivel freático
	Límite de flujo cerrado
	Límite de consolidación cerrado
	Conjunto de materiales
	Generación de presiones de agua
	Interruptor
	Generación de esfuerzos iniciales
	Programa de cálculo
	Selección de puntos para las curvas
	Siguiente
	Insertar
	Eliminar
	Realizar los cálculos
	Ver resultados de los cálculos
	Programa para la visualización de los resultados
	Copiar al portapapeles
	Factor de escala
	Sección transversal
	Generación de reporte
	Programa de curvas
	Agregar una nueva curva
	Restablecer vista
	Ajuste de gráfico
	Ajuste de curva

Anexo 2: Propiedades de los materiales utilizados.

Suelos e interfaces	Modelo	Tipo	γ (KN/m ³)		Permeabilidad (m/día)		Modulo de young (KN/m ²) (E _{ref})	Relacion de poisson (ν)	Cohesion (KN/m ²) (C _{ref})	Angulo de friccion (°) (ϕ)	Angulo de dilatancia (°) (ψ)	Factor de reduccion de la interfaz (R _{inter})
			Humedo	Saturado	Horizontal (K _x)	Vertical (K _y)						
Arena 1	Mohr-Coulom	Drenada	17	20	1	1	13000	0.3	1	31	0	Rigida
Arena 2	Mohr-Coulom	Drenada	17	20	1	1	40000	0.4	2	32	2	0.67
Arena 3	Mohr-Coulom	Drenada	17	20	0.5	0.5	30000	0.3	1	34	4	7
Arena 4	Mohr-Coulom	Drenada	16	20	1	1	30000	0.3	1	30	0	Rigida
Arena 5	Mohr-Coulom	Drenada	16.5	20	1	1	80000	0.3	1	31	1	Rigida
Arena 6	Mohr-Coulom	Drenada	20	20	1	1	5000	0.3	50	35	5	0.8
Arena 7	Mohr-Coulom	Drenada	20	20	1	1	1000	0.3	20	36	6	0.8
Areana profunda	Mohr-Coulom	Drenada	17	21	0.5	0.5	120000	0.3	1	33	3	0.7
Arcilla 1	Mohr-Coulom	Drenada	16	18	0.001	0.001	10000	0.35	5	25	0	0.5
Arcilla 2	Mohr-Coulom	Sin drenar	16	18	0.001	0.001	2000	0.35	2	24	0	Rigida
Arcilla 3	Mohr-Coulom	Sin drenar	15	18	0.0001	0.0001	1000	0.33	2	24	0	Rigida
Arcilla 4	Mohr-Coulom	Drenada	15	18	0.0001	0.0001	1000	0.33	5.5	24	0	Rigida
Arcilla profunda	Mohr-Coulom	Drenada	16	18.5	0.01	0.01	10000	0.33	4	25	0	0.7
Turba 1	Mohr-Coulom	Sin drenar	8	11.5	0.01	0.001	500	0.35	7	20	0	Rigida
Turba 2	Mohr-Coulom	Sin drenar	8	11	0.002	0.001	350	0.35	5	20	0	Rigida
Relleno	Mohr-Coulom	Drenada	16	20	1	1	8000	0.3	1	30	0	0.65
Marga	Mohr-Coulom	Drenada	17	19	0.1	0.1	20000	0.33	8	29	0	Rigida
Concreto 1	Lineal elastico	No poroso	24	-	-	-	17800	0.2	-	-	-	Rigida
Concreto 2	Lineal elastico	No poroso	24	-	-	-	19300	0.2	-	-	-	Rigida
Concreto 3	Lineal elastico	No poroso	24	-	-	-	20600	0.2	-	-	-	Rigida
Concreto 4	Lineal elastico	No poroso	24	-	-	-	21800	0.2	-	-	-	Rigida
Concreto 5	Lineal elastico	No poroso	24	-	-	-	23100	0.2	-	-	-	Rigida

Anexo 3: Modulo de Young y relación de Poisson para el concreto.

Resistencia del concreto (f'c)		Modulo de young (E)*		Relacion de poisson**	γ concreto (KN/m3)
PSI	Mpa	(MPa)	(GPa)		
3000	21	17872,05	17,87	0.2	24
3500	24,5	19304,02	19,30	0.2	24
4000	28	20636,86	20,64	0.2	24
4500	31,5	21888,70	21,89	0.2	24
5000	35	23072,71	23,07	0.2	24

*Para el modulo de elasticidad el valor medio para toda la informacion experimental sin distiguir por tipo de agregado es

**La relacion de poisson para el concreto debe determinarse por medio del ensayo de cilindros de concreto, realizado de acuerdo a la norma NTC 4025 en el caso de que no se disponga del valor experimental se recomienda utilizar un valor de 0.2

Anexo 4: Variación del coeficiente de presión activa de Rankine.

Angulo de fricción (φ) del suelo (grados)	$K_a = \tan^2 (45 - \phi/2)$	Angulo de fricción (φ) del suelo (grados)	$K_a = \tan^2 (45 - \phi/2)$
20	0.490	33	0.395
21	0.472	34	0.283
22	0.455	35	0.271
23	0.438	36	0.260
24	0.422	37	0.249
25	0.406	38	0.238
26	0.395	39	0.228
27	0.376	40	0.217
28	0.361	41	0.208
29	0.347	42	0.198
30	0.333	43	0.189
31	0.320	44	0.180
32	0.307	45	0.172

Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

Anexo 5: Variación del coeficiente de presión activa de Coulomb.

α (grados)	ϕ (grados)	β (grados)					
		90	85	80	75	70	65
0	28	0,3213	0,3588	0,4007	0,4481	0,5026	0,5662
	29	0,3091	0,3464	0,3886	0,4362	0,4908	0,5547
	30	0,2973	0,3349	0,3769	0,4245	0,4794	0,5435
	31	0,2860	0,3235	0,3655	0,4133	0,4682	0,5326
	32	0,2750	0,3125	0,3545	0,4023	0,4574	0,5220
	33	0,2645	0,3019	0,3439	0,3917	0,4469	0,5117
	34	0,2543	0,2916	0,3335	0,3813	0,4367	0,5017
	35	0,2444	0,2816	0,3235	0,3713	0,4267	0,4919
	36	0,2349	0,2719	0,3137	0,3615	0,4170	0,4824
	37	0,2257	0,2626	0,3042	0,3520	0,4075	0,4732
	38	0,2168	0,2535	0,2950	0,3427	0,3983	0,4641
	39	0,2082	0,2447	0,2861	0,3337	0,3894	0,4553
	40	0,1998	0,2361	0,2774	0,3249	0,3806	0,4468
	41	0,1918	0,2278	0,2689	0,3164	0,3721	0,4384
	42	0,1840	0,2197	0,2606	0,3080	0,3637	0,4302

α (grados)	ϕ (grados)	β (grados)					
		90	85	80	75	70	65
5	28	0,3431	0,3845	0,4311	0,4843	0,5461	0,6190
	29	0,3295	0,3709	0,4175	0,4707	0,5325	0,6056
	30	0,3165	0,3758	0,4043	0,4575	0,5194	0,5926
	31	0,3039	0,3451	0,3916	0,4447	0,5067	0,5800
	32	0,2919	0,3329	0,3792	0,4324	0,4943	0,5677
	33	0,2803	0,3211	0,3673	0,4204	0,4823	0,5558
	34	0,2691	0,3097	0,3558	0,4088	0,4707	0,5443
	35	0,2583	0,2987	0,3446	0,3975	0,4594	0,5330
	36	0,2479	0,2881	0,3338	0,3866	0,4484	0,5221
	37	0,2379	0,2778	0,3233	0,3759	0,4377	0,5115
	38	0,2282	0,2679	0,3133	0,3656	0,4273	0,5012
	39	0,2188	0,2582	0,3033	0,3556	0,4172	0,4911
	40	0,2098	0,2489	0,2937	0,3458	0,4074	0,4813
	41	0,2011	0,2398	0,2844	0,3363	0,3978	0,4718
	42	0,1927	0,2311	0,2753	0,3271	0,3884	0,4625

α (grados)	ϕ (grados)	β (grados)					
		90	85	80	75	70	65
10	28	0,3702	0,4164	0,4686	0,5287	0,5992	0,6834
	29	0,3548	0,4007	0,4528	0,5128	0,5831	0,6672
	30	0,3400	0,3857	0,4376	0,4974	0,5676	0,6516
	31	0,3259	0,3713	0,4230	0,4826	0,5526	0,6365
	32	0,3123	0,3575	0,4089	0,4683	0,5382	0,6219
	33	0,2993	0,3442	0,3953	0,4545	0,5242	0,6078
	34	0,2868	0,3314	0,3822	0,4412	0,5107	0,5942
	35	0,2748	0,3190	0,3696	0,4283	0,4976	0,5810
	36	0,2633	0,3072	0,3574	0,4158	0,4849	0,5682
	37	0,2522	0,2957	0,3456	0,4037	0,4726	0,5558
	38	0,2415	0,2846	0,3342	0,3920	0,4607	0,5437
	39	0,2313	0,2740	0,3231	0,3807	0,4491	0,5321
	40	0,2214	0,2636	0,3125	0,3697	0,4379	0,5207
41	0,2119	0,2537	0,3021	0,3590	0,4270	0,5097	
42	0,2027	0,2441	0,2921	0,3487	0,4164	0,4990	

α (grados)	ϕ (grados)	β (grados)					
		90	85	80	75	70	65
15	28	0,4065	0,4585	0,5179	0,5868	0,6685	0,7670
	29	0,3881	0,4397	0,4987	0,5672	0,6483	0,7463
	30	0,3707	0,4219	0,4804	0,5484	0,6291	0,7265
	31	0,3541	0,4049	0,4629	0,5305	0,6106	0,7076
	32	0,3384	0,3887	0,4462	0,5133	0,5930	0,6895
	33	0,3234	0,3732	0,4303	0,4969	0,5761	0,6721
	34	0,3091	0,3583	0,4150	0,4811	0,5598	0,6554
	35	0,2954	0,3442	0,4003	0,4659	0,5442	0,6393
	36	0,2823	0,3306	0,3862	0,4513	0,5291	0,6238
	37	0,2698	0,3175	0,3726	0,4373	0,5146	0,6089
	38	0,2578	0,3050	0,3595	0,4237	0,5006	0,5945
	39	0,2463	0,2929	0,3470	0,4106	0,4871	0,5805
	40	0,2353	2813,0000	0,3348	0,3980	0,4740	0,5671
41	0,2247	0,2702	0,3231	0,3858	0,4613	0,5541	
42	0,2146	0,2594	0,3118	0,3740	0,4491	0,5415	

α (grados)	ϕ (grados)	β (grados)					
		90	85	80	75	70	65
20	28	0,4602	0,5205	0,5900	0,6714	0,7689	0,8880
	29	0,4364	0,4958	0,5642	0,6445	0,7406	0,8581
	30	0,4142	0,4728	0,5403	0,6195	0,7144	0,8306
	31	0,3935	0,4513	0,5179	0,5961	0,6898	0,8043
	32	0,3742	0,4311	0,4968	0,5741	0,6666	0,7799
	33	0,3559	0,4121	0,4769	0,5532	0,6448	0,7569
	34	0,3388	0,3941	0,4581	0,5335	0,6241	0,7351
	35	0,3225	0,3771	0,4402	0,5148	0,6044	0,7144
	36	0,3071	0,3609	0,4233	0,4869	0,5856	0,6947
	37	0,2925	0,3455	0,4071	0,4799	0,5677	0,6759
	38	0,2787	0,3308	0,3916	0,4636	0,5506	0,5579
	39	0,2654	0,3168	0,3768	0,4480	0,5342	0,6407
	40	0,2529	0,3034	0,3626	0,4331	0,5481	0,6242
	41	0,2408	0,2906	0,3490	0,4187	0,5033	0,6083
	42	0,2294	0,2784	0,3360	0,4049	0,4888	0,5930

Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

Anexo 6: Variación del coeficiente de presión pasiva de Rankine.

Angulo de fricción (ϕ) del suelo (grados)	$K_p = \tan^2 (45+\phi/2)$	Angulo de fricción (ϕ) del suelo (grados)	$K_p = \tan^2 (45+\phi/2)$
20	2,040	33	3,392
21	2,117	34	3,537
22	2,198	35	3,690
23	2,283	36	3,852
24	2,371	37	4,023
25	2,464	38	4,204
26	2,561	39	4,395
27	2,663	40	4,599
28	2,770	41	4,815
29	2,882	42	5,045
30	3,000	43	5,289
31	3,124	44	5,550
32	3,255	45	5,828

Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones

Anexo 7: Variación del coeficiente de presión pasiva de Coulomb.

ϕ (grados)	δ (grados)				
	0	5	10	15	20
15	1,698	1,900	2,130	2,405	2,735
20	2,040	2,313	3,636	3,030	3,525
25	2,464	2,830	3,286	3,855	4,597
30	3,000	3,506	4,143	4,977	6,105
35	3,690	4,390	5,310	6,854	8,324
40	4,600	5,590	6,946	8,870	11,772

Fuente: Braja Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

Anexo 8: Manual del software.

**MANUAL DE MODELAMIENTO DE
PROBLEMAS DE ESTRUCTURAS DE
CONTENCIÓN LATERAL
MEDIANTE PROGRAMA DE
ELEMENTOS FINITOS.**

**CAROLINA ANDREA CAMARGO GARCÍA
ALBA LUCIA GONZALEZ ESCAMILLA**

TABLA DE CONTENIDO

1	PROGRAMA DE ENTRADA.....	77
1.1	MENÚ DE ENTRADA	77
1.1.1	Lectura de un proyecto existente	77
1.1.2	Configuración general	78
1.1.3	Modelo	78
1.1.4	Gravedad y aceleración	79
1.1.5	Dimensiones	79
1.1.6	Grilla.....	79
1.2	GEOMETRÍA	79
1.2.1	Puntos y líneas.....	80
1.2.2	Placas	80
1.2.3	Geomallas	81
1.2.4	Interfaces	81
1.2.5	Anclajes nodo a nodo.....	83
1.2.6	Empotramiento al final de los de anclajes	83
1.3	CARGAS Y CONDICIONES DE LÍMITE.....	83
1.3.1	Desplazamientos Prescritos	83
1.3.2	Empotramientos	84
1.3.3	Empotramientos estándar	84
1.3.4	Distribución de cargas.....	84
1.3.5	Cargas puntuales	85
1.3.6	Drenajes.....	86
1.3.7	Pozos	86

1.4	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	86
1.4.1	Base de datos de los conjuntos de materiales	86
1.4.2	Modelos de comportamiento del suelo	86
1.4.3	Conjuntos de datos del material para el suelo y las interfaces.....	87
1.4.4	Modelo de material.....	87
1.4.5	Tipo de comportamiento del material - Tipo de material	89
1.4.6	Peso saturado y no saturado (γ_{sat} y γ_{insat}).....	89
1.4.7	Permeabilidades (k_x y k_y)	90
1.4.8	Propiedades generales avanzadas	90
1.4.9	Parámetros Avanzados de Mohr-Coulomb	93
1.4.10	Interfaz de fuerza (R_{inter})	95
1.4.11	Conjuntos de datos del material para las placas.....	96
1.4.12	Juego de datos para geomallas	98
1.4.13	Conjunto de datos para anclajes.....	98
1.4.14	Asignación de grupos de datos para componentes de geometría ..	98
1.5	GENERACIÓN DE MALLA	99
1.5.1	Tipo básico de elemento	99
1.5.2	Grosor Global.....	99
1.5.3	Refinamiento Global.....	99
1.5.4	Grosor Local.....	100
1.5.5	Refinamiento Local.....	100
1.6	CONDICIONES INICIALES	100
1.7	CONDICIONES DE AGUA	101
1.7.1	Peso del agua	101

1.7.2	Niveles freáticos	101
1.7.3	Condiciones de límite para el cálculo de flujo de agua subterránea	104
1.7.4	Generación de presión de agua	106
1.7.5	Límites cerrados de consolidación	109
1.8	CONFIGURACIÓN DE LA GEOMETRÍA INICIAL	109
1.8.1	Desactivación de cargas y objetos geométricos	109
1.8.2	Generación de esfuerzo inicial	109
1.9	CÁLCULOS DE PARTIDA	111
2	CÁLCULOS	112
2.1	PROGRAMA DE CÁLCULOS	112
2.2	EL MENÚ DE CÁLCULO	113
2.3	DEFINICIÓN DE UNA FASE DE CÁLCULO	114
2.4	CONFIGURACIÓN GENERAL DE CÁLCULO	115
2.4.1	Identificación de fase y ordenamiento	116
2.4.2	Tipos de cálculo	116
2.5	PROCEDIMIENTOS DE AVANCE DE CARGA	118
2.5.1	Procedimientos automáticos tamaño del paso	118
2.5.2	Avance a último nivel de carga	118
2.5.3	Número de pasos de avance de carga	119
2.5.4	Tiempo de avance automático (consolidación)	119
2.6	PARÁMETROS DE CONTROL DE CÁLCULO	119
2.6.1	Procedimiento iterativo de control de parámetros	121
2.6.2	Entrada de carga	124
2.6.3	Multiplicadores totales	125

2.6.4	Multiplicadores Incrementales.....	125
2.6.5	Mínima presión de poro (consolidación).....	126
2.6.6	Incremento de tiempo, intervalo de tiempo, tiempo de finalización y tiempo estimado de finalización.....	126
2.7	CONSTRUCCION POR ETAPAS.....	127
2.7.1	Cambio de configuración de la geometría.....	127
2.7.2	Activar y desactivar grupos u objetos estructurales	128
2.7.3	Activación o cambio de cargas.....	129
2.7.4	Aplicación de los desplazamientos a utilizar	130
2.7.5	Reasignación de conjuntos de datos de materiales	131
2.7.6	Aplicación de una deformación volumétrica al volumen de un cluster.....	132
2.7.7	Pre-esfuerzo de los anclajes	132
2.7.8	Cambio de distribución de presión de agua	133
2.7.9	Construcción por etapas con $\Sigma M_{stage} < 1$	134
2.7.10	Cálculo no finalizado de la construcción por etapas	134
2.8	MULTIPLICADORES DE CARGA	135
2.8.1	Multiplicadores de carga estándar.....	136
2.8.2	Otros multiplicadores y parámetros de cálculo.....	137
2.9	REDUCCION PHI-C	138
2.10	ANÁLISIS DE ACTUALIZACION DE MALLA	139
2.11	VISTA PREVIA DE UNA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN	140
2.12	PUNTOS DE SELECCIÓN DE CURVAS	140
2.13	EJECUCIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO	141

2.13.1	Puesta en marcha del proceso de cálculo	141
2.13.2	Múltiples proyectos	141
2.13.3	El administrador de cálculo	141
2.13.4	Cancelar un cálculo	142
2.14	SELECCIÓN DE LAS FASES DE CÁLCULO DE SALIDA	142
2.15	SALIDA DURANTE LOS CÁLCULOS	143
2.15.1	Curva de carga-desplazamiento	143
2.15.2	Paso y numero de iteraciones.....	143
2.15.3	Error global	144
2.15.4	Tolerancia	144
2.15.5	Puntos de esfuerzo plástico	144
2.15.6	Puntos plásticos de la interfaz	144
2.15.7	Puntos de esfuerzo inexacto.....	144
2.15.8	Número tolerado de puntos de esfuerzo inexacto.....	144
2.15.9	Puntos tensión	145
2.15.10	Puntos Cap / Hard	145
2.15.11	Puntos pico	145
2.16	AJUSTE S DE LOS DATOS DE ENTRADA ENTRE LOS CÁLCULOS..	145
2.17	CONTROL AUTOMATICO DE ERRORES.....	146
2.17.1	Control del error global.....	146
2.17.2	Control del error local:.....	146
2.17.3	Terminación de iteraciones:.....	146
3	DATOS DE SALIDA DESPUES DEL PROCESO	147
3.1	PROGRAMA DE SALIDA	147

3.1.1	Menú de salida	147
3.1.2	Formas de salida.....	148
3.1.3	Barra de herramientas.....	148
3.1.4	Estado de línea	148
3.2	EL MENÚ DE SALIDA	148
3.3	SELECCIÓN DE PASOS DE SALIDA	148
3.4	DEFORMACIONES	150
3.4.1	Malla deformada.....	150
3.4.2	Desplazamiento total, horizontal y vertical	150
3.4.3	Desplazamientos incrementales	150
3.4.4	Deformaciones totales.....	151
3.4.5	Deformaciones cartesianas.....	151
3.4.6	Deformaciones incrementales.....	151
3.4.7	Incrementos de la deformación cartesiana.....	151
3.5	ESFUERZOS.....	151
3.5.1	Esfuerzos efectivos	152
3.5.2	Esfuerzos totales.....	152
3.5.3	Esfuerzos efectivos cartesianos.....	152
3.5.4	Esfuerzos totales cartesianos	153
3.5.5	Relación de sobre-consolidación	153
3.5.6	Puntos plásticos	153
3.5.7	Presión de poros activa.....	154
3.5.8	Exceso de presión de poro.....	154
3.5.9	La cabeza de aguas subterráneas	154

3.5.10	Campo de flujo.....	155
3.5.11	Grado de saturación.....	155
3.6	ESTRUCTURAS E INTERFACES:.....	156
3.6.1	Placas	156
3.6.2	Geomallas	156
3.6.3	Interfaces	157
3.6.4	Anclajes.....	157
3.7	VER LAS TABLAS DE SALIDA	157
3.7.1	Tablas de desplazamiento	158
3.7.2	Tablas de esfuerzo-deformación.....	158
3.7.3	Tablas de nodos y puntos de esfuerzo.....	158
3.7.4	Esfuerzos y fuerzas en las interfaces y estructuras	158
3.8	VISUALIZACIÓN DE SALIDA EN UN CORTE TRANSVERSAL.....	159
3.8.1	Deformaciones	159
3.8.2	Esfuerzos	159
3.8.3	Integración de los esfuerzos: fuerza equivalente	160
3.9	VER OTROS DATOS	160
3.9.1	Información general del proyecto	160
3.9.2	Datos del material	160
3.9.3	Multiplicadores y parámetros de cálculo	160
3.9.4	Diagrama de conectividad.....	161
3.9.5	Descripción general de las ayudas de visualización del grafico.....	161
3.10	GENERACIÓN DE INFORMES.....	162
3.11	EXPORTACIÓN DE DATOS	163

4	CURVAS CARGA-DESPLAZAMIENTO Y TRAYECTORIAS DE ESFUERZO.....	164
4.1	EL PROGRAMA DE CURVAS.....	164
4.1.1	Menú de curvas.....	165
4.1.2	Ventanas de gráficos.....	165
4.1.3	Barra de herramientas.....	165
4.2	MENÚ DE CURVAS	165
4.3	GENERACIÓN DE CURVA	166
4.3.1	Curvas de Carga- Desplazamiento	167
4.3.2	Curvas de Tiempo-Desplazamiento	168
4.3.3	Diagramas de Esfuerzo-Deformación	168
4.3.4	Trayectorias de esfuerzo y deformación.	169
4.4	MÚLTIPLES CURVAS EN UN GRÁFICO.....	169
4.5	REGENERACIÓN DE CURVAS.....	170
4.6	OPCIONES DE FORMATO.....	170
4.6.1	Ajuste de curva.....	171
4.6.2	Ajuste del gráfico.....	172
4.7	VER INFORMACION.....	174
4.8	VISUALIZACIÓN DE UNA TABLA.....	174
4.8.1	Edición de datos de la curva	175
5	EJERCICIOS	176

LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura 1. Modo creación de la geometría.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 2. Modo de las condiciones iniciales.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 3. Ventana de Configuración general.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4. Ejemplo de un problema de deformación plana y simetría axial.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5. Situaciones en las cuales las placas, las anclas y las interfaces se utilizan.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6. Usos de las geomallas.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 7. Puntos de esquina inflexibles, causando tensión y resultados de poca calidad.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 8. Punto de esquina flexible con mejores resultados de tensión.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 9. Ingreso a la ventana para Desplazamientos prescritos.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 10. Ventana de entrada para cargas distribuidas.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 11. Ventana de entrada para cargas puntuales.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 12. Ventana de conjuntos de materiales del suelo y de la interfaz (Hoja De La Pestaña General).....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 13. Ventana Opciones Avanzadas en la hoja de la pestaña General.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 14. Definición de E_0 y E_{50}.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 15. Producción de círculos de esfuerzo; envolventes de Coulomb.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 16. Ventana parámetros Avanzados de Mohr-Coulomb.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 17. Combinación de momento máximo de flexión y fuerza axial.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 18. Modelado Inexacto y Exacto de las presiones externas de agua.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 19. Ventana distribución presión de poros clúster.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 20. Flujo a través de un terraplén con la indicación de una superficie de filtración.</i>	<i>105</i>
<i>Figura 21. Ventana de generación de presiones de agua.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 22. Ventana de los parámetros de control de cálculo de aguas subterráneas.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 23. Ventana de generación de esfuerzos iniciales.....</i>	<i>110</i>

<i>Figura 24. Ventana principal del programa de cálculos.</i>	<i>113</i>
<i>Figura 25. Hoja de la pestaña General en la ventana de cálculos.</i>	<i>115</i>
<i>Figura 26. Hoja de la pestaña Parámetros de la ventana de cálculos.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 27. Ventana de procedimiento iterativo de control de parámetros.</i>	<i>121</i>
<i>Figura 28. Solución computarizada en comparación con la solución exacta.</i>	<i>122</i>
<i>Figura 29. Proceso de iteración con sobre-relajación (a) y sin sobre-relajación (b).</i>	<i>123</i>
<i>Figura 30. Entrada de la ventana para una carga de punto.</i>	<i>130</i>
<i>Figura 31. Entrada de la ventana para una carga distribuida.</i>	<i>130</i>
<i>Figura 32. Ventana de propiedades del suelo.</i>	<i>131</i>
<i>Figura 33. Ventana de deformación volumétrica.</i>	<i>132</i>
<i>Figura 34. Multiplicadores hoja de la ficha de la ventana de cálculos.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 35. Ventana del administrador de cálculos para múltiples proyectos.</i>	<i>142</i>
<i>Figura 36. Ventana de cálculo.</i>	<i>143</i>
<i>Figura 37. Barra de herramientas en la ventana principal del programa de salida.</i>	<i>147</i>
<i>Figura 38. Solicitante de archivo para la selección de una fase o un paso intermedio.</i>	<i>149</i>
<i>Figura 39. Convención de signos para esfuerzos.</i>	<i>153</i>
<i>Figura 40. Ventana de generación de informes.</i>	<i>163</i>
<i>Figura 41. Barra de herramientas en la ventana principal del programa de Curves.</i>	<i>164</i>
<i>Figura 42. Ventana de generación de la curva.</i>	<i>167</i>
<i>Figura 43. Ventana de configuración de la curva.</i>	<i>171</i>
<i>Figura 44. Ventana de configuración del grafico.</i>	<i>173</i>

8 PROGRAMA DE ENTRADA

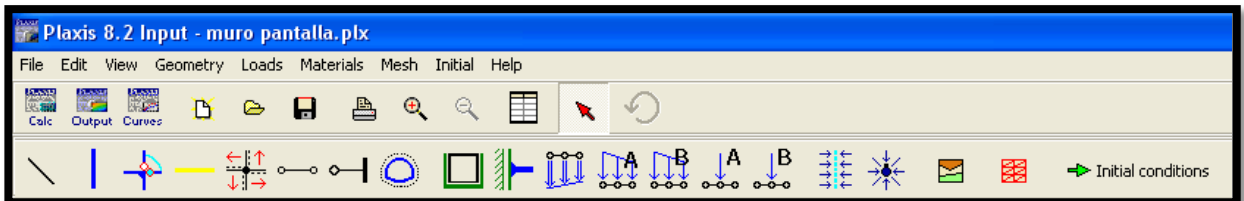


El programa de entrada contiene todas las facilidades para crear y modificar un modelo de geometría, para generar la malla de elementos finitos correspondientes y las condiciones iniciales.

8.1 MENÚ DE ENTRADA

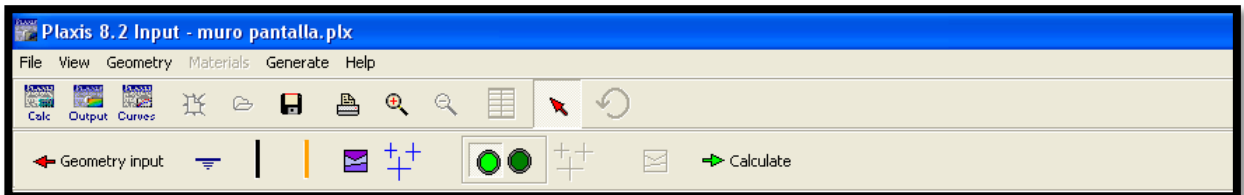
El menú principal del programa de entrada contiene sub-menús desplegables que cubren la mayoría de las opciones para el manejo de archivos, transferencia de datos, visualización de gráficos, creación de un modelo de geometría, generación de mallas de elementos finitos y la introducción de datos en general. Se puede distinguir entre el menú del modo de creación de la geometría, figura 1 y el menú del modo de las condiciones iniciales, figura 2.

Figura 32. Modo creación de la geometría.



Fuente: Plaxis 2D.

Figura 33. Modo de las condiciones iniciales.



Fuente: Plaxis 2D.

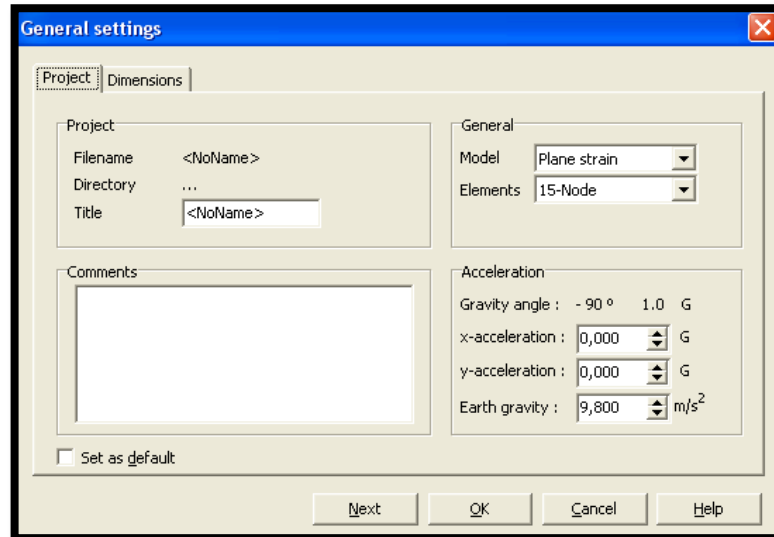
8.1.1 Lectura de un proyecto existente

Un proyecto existente de Plaxis se pueden leer, seleccionando la opción Abrir del menú Archivo.

8.1.2 Configuración general

La ventana de Configuración general aparece al inicio de nuevos proyectos y después pueden ser seleccionados del sub-menú Archivo, figura 3.

Figura 34. Ventana de Configuración general.

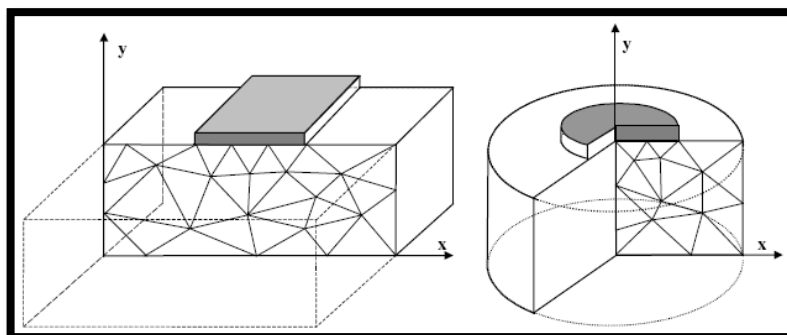


Fuente: Plaxis 2D.

8.1.3 Modelo

Los modelos de elementos finitos pueden ser de deformación plana o simetría axial. La selección del plano de deformación o los resultados de simetría axial se realiza en un modelo de dos dimensiones de elementos finitos con sólo dos grados de libertad de traslación por nodo, dirección X y Y.

Figura 35. Ejemplo de un problema de deformación plana y simetría axial.



Fuente: Plaxis Reference Manual

8.1.4 Gravedad y aceleración

La gravedad es incluida implícitamente en las unidades de peso dadas por el usuario. Los valores de entrada X y los componentes de aceleración Y se expresan en términos de la aceleración de la gravedad normal (g) y se introducen en la hoja de la pestaña proyecto, de la ventana de Configuración general.

8.1.5 Dimensiones

Las dimensiones de la zona de dibujo no influyen en la propia geometría y pueden ser cambiadas al modificar un proyecto ya existente, siempre que la geometría existente se ajuste a las dimensiones modificadas.

8.1.6 Grilla

Para facilitar la creación del modelo geométrico, el usuario puede definir una red para el área de dibujo. Las especificaciones de la red se introducen en la hoja de la pestaña Dimensiones de la ventana de Configuración General. En el Sub-Menú Ver se puede activar o desactivar la opción de grilla y ajustarla.

8.2 GEOMETRÍA

La generación de un modelo de elementos finitos se inicia con la creación de un modelo geométrico, que es una representación del problema de interés. Se recomienda iniciar la creación de un modelo dibujando el contorno completo de la geometría, además especificar las capas de materiales, los objetos estructurales, las líneas utilizadas para las fases de construcción, las cargas y las condiciones de borde. El modelo de la geometría no sólo debe incluir la situación de partida, sino también las situaciones que se producen en las diferentes fases de cálculo.

♣ Selección de los componentes de la geometría:



Cuando la herramienta Selección (flecha roja) está activa se puede seleccionar uno, o varios componentes sosteniendo la tecla Shift.

♣ Propiedades de los componentes de la geometría:

Después de hacer doble clic en un componente geométrico la correspondiente ventana de propiedades aparece. Si más de un objeto se encuentra en el punto indicado, un cuadro aparece en el cual el componente deseado puede ser seleccionado.

8.2.1 Puntos y líneas



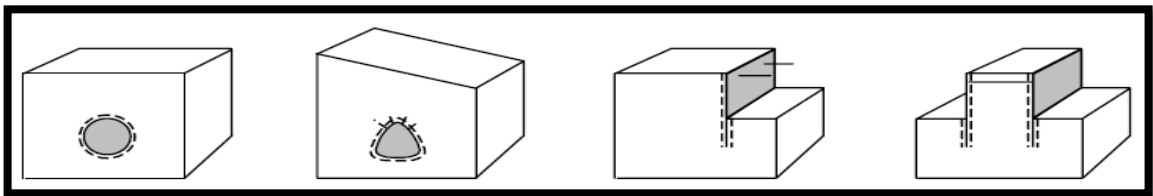
Cuando la opción línea geométrica se selecciona, el usuario puede crear puntos y líneas. Si un punto se va a crear sobre o cerca de una línea existente, el puntero se ajusta a la línea y crea un nuevo punto exactamente en esa línea. Si se traza una línea que coincide en parte con una línea existente, el programa se asegura de que en el rango donde las dos líneas coinciden sólo una línea está presente. Todos estos procedimientos garantizan que se cree una geometría coherente sin puntos o líneas dobles.

8.2.2 Placas



Las placas son objetos estructurales utilizados para modelar la influencia de las paredes, conchas o revestimientos que se extiende en dirección z y estructuras esbeltas en el suelo con una rigidez significativa a flexión y una rigidez normal. Ejemplos de participación de placas en estructuras geotécnicas se muestran en la figura 5.

Figura 36. Situaciones en las cuales las placas, las anclas y las interfaces se utilizan.



Fuente: Plaxis Reference Manual.

Los parámetros más importantes son la resistencia a la flexión (EI) y la rigidez axial (EA). A partir de estos dos parámetros se calcula el espesor equivalente de una placa (d_{eq}) con la siguiente ecuación:

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}}$$

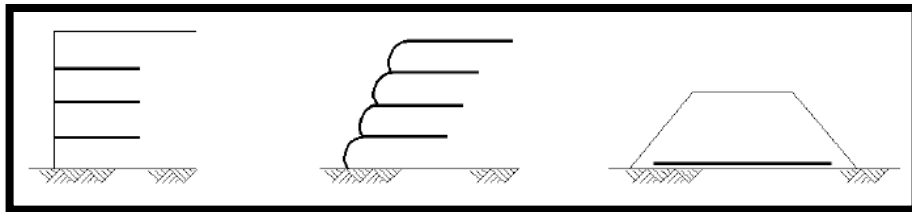
Ecuación 6.

8.2.3 Geomallas



Las geomallas son estructuras delgadas, con una rigidez normal, pero sin la rigidez de flexión. Sólo puede mantener fuerzas de tracción y no de compresión.

Figura 37. Usos de las geomallas.



Fuente: Plaxis Reference Manual.

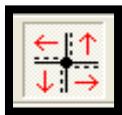
♣ Elementos de Geomallas:

Las geomallas se componen de elementos de línea con dos grados de libertad de traslación en cada nodo (U_x , U_y).

♣ Modelado de anclajes al terreno:

En este caso las geomallas se utilizan para modelar el cuerpo de la lechada y el nodo a nodo de anclaje se utiliza para modelar el anclaje de la barra.

8.2.4 Interfaces



Cada interfaz tiene asignado un "espesor virtual" que es una dimensión imaginaria utilizada para definir las propiedades del material de la interfaz, el valor por defecto es de 0,1.

Tenga en cuenta que las interfaces pueden ser colocadas a ambos lados de una línea de geometría. Esto permite una interacción total entre los objetos estructurales (paredes, placas, geomallas, etc.) y el suelo circundante.

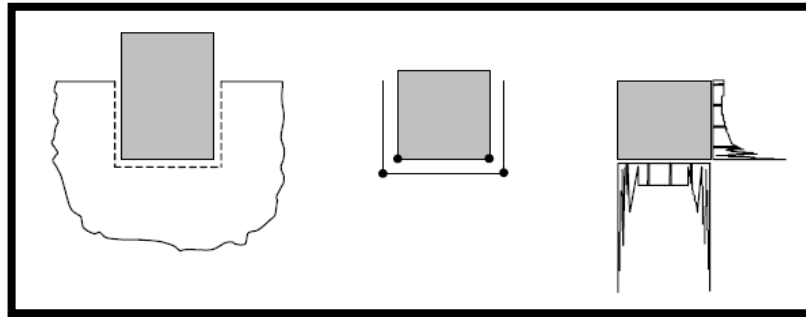
♣ **Propiedades de Interfaz:**

La propiedad básica de un elemento de la interfaz es el conjunto de datos de materiales asociados para el suelo y las interfaces. En un análisis de consolidación o en un análisis de flujo de aguas subterráneas, los elementos de la interfaz se pueden utilizar para bloquear el flujo perpendicular a la interfaz, por ejemplo, para simular una pantalla impermeable.

♣ **Interfaces alrededor de puntos de esquina:**

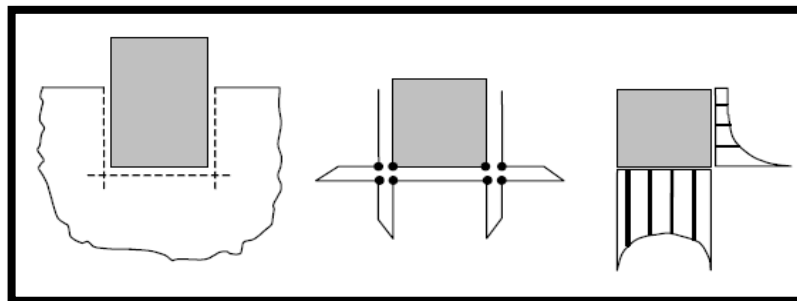
Las Interfaces alrededor de los puntos esquineros figuras 7 y 8 muestran que los problemas de interacción suelo-estructura pueden incluir puntos que requieren atención especial.

Figura 38. Puntos de esquina inflexibles, causando tensión y resultados de poca calidad.



Fuente: Plaxis Reference Manual.

Figura 39. Punto de esquina flexible con mejores resultados de tensión.



Fuente: Plaxis Reference Manual.

Estas figuras muestran que el problema de la oscilación de la tensión puede ser prevenida mediante la especificación de los elementos de interfaz adicionales

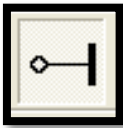
dentro del cuerpo del suelo. Estos elementos mejorarán la flexibilidad de la malla de elementos finitos y así evitan resultados de deformación no físicos.

8.2.5 Anclajes nodo a nodo



Este elemento puede ser sometido a fuerzas de tensión o de compresión. No se recomienda trazar una línea de geometría en la posición donde un anclaje nodo a nodo se va a colocar. Sin embargo, los puntos finales de los anclajes nodo a nodo deben estar siempre conectados a las líneas de la geometría.

8.2.6 Empotramiento al final de los de anclajes

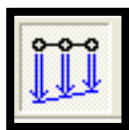


Los anclajes empotrados al final siempre deben estar conectados a las líneas de la geometría existente, pero no necesariamente a los puntos. Haciendo doble clic en el centro del anclaje aparece la ventana de propiedades donde el ángulo y longitud equivalente se puede cambiar. Las propiedades se pueden introducir en la base de datos de material para las anclas.

8.3 CARGAS Y CONDICIONES DE LÍMITE

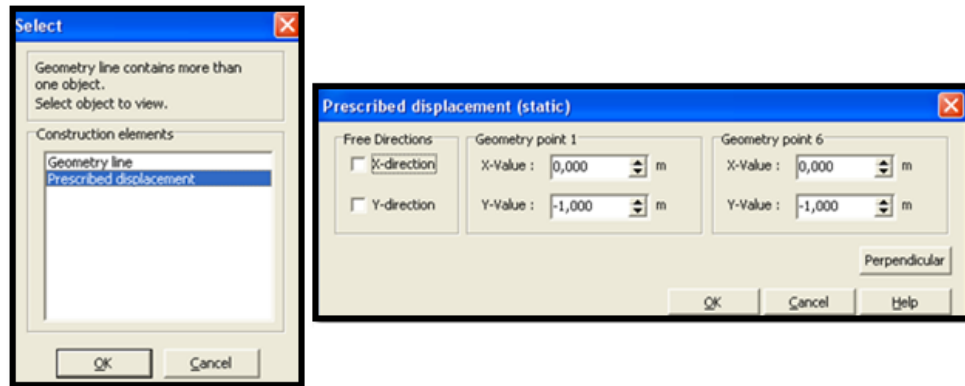
El Sub-menú Cargas contiene las opciones para introducir cargas puntuales, lineales o distribuidas y desplazamientos previstos en el modelo geométrico. Las cargas y los desplazamientos prescritos se pueden aplicar en los límites del modelo, así como en el interior del modelo.

8.3.1 Desplazamientos Prescritos



Los Desplazamientos Prescritos son condiciones especiales que pueden ser impuestas en el modelo para controlar los desplazamientos de algunos puntos.

Figura 40. Ingreso a la ventana para Desplazamientos prescritos.



Fuente: Plaxis 2D.

Aunque los valores de entrada de los desplazamientos prescritos pueden ser especificados en el modelo geométrico, los valores reales que se aplican durante un cálculo pueden ser cambiados en el marco de la construcción por etapas.

8.3.2 Empotramientos

En los empotramientos se prescriben los desplazamientos iguales a cero. Estas condiciones se pueden aplicar a las líneas y a los puntos de la geometría. En el modelo geométrico, se puede distinguir entre los empotramientos horizontales y verticales. Además, se pueden seleccionar los empotramientos totales, que es una combinación de ambos.

8.3.3 Empotramientos estándar



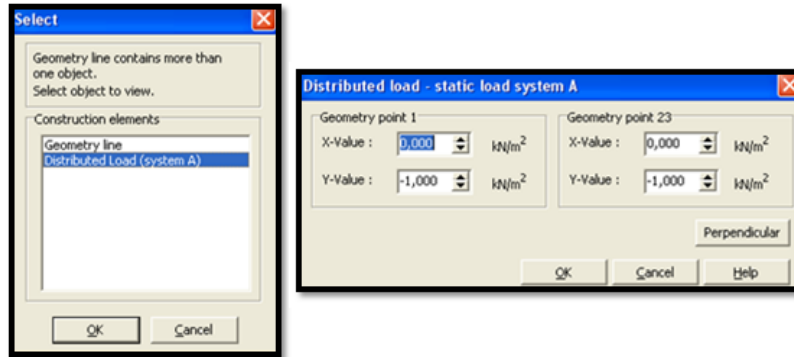
Al seleccionar los empotramientos estándar, Plaxis automáticamente impone una serie de condiciones de contorno generales para el modelo geométrico.

8.3.4 Distribución de cargas



Dos sistemas de carga (A y B) están disponibles para una combinación de cargas distribuidas. La carga de los sistemas A y B se puede activar de forma independiente.

Figura 41. Ventana de entrada para cargas distribuidas.



Fuente: Plaxis 2D.

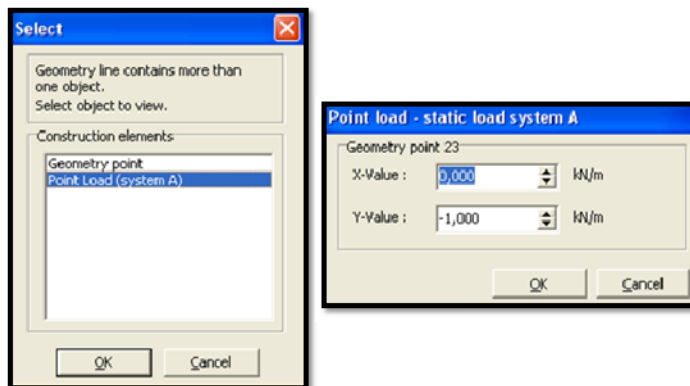
8.3.5 Cargas puntuales



Esta opción puede utilizarse para crear cargas puntuales, que en realidad son cargas en la línea fuera de la dirección del plano. Los valores de entrada de las cargas puntuales se dan en unidades de fuerza por unidad de longitud. De forma predeterminada, al aplicar cargas puntuales, la carga estará en la dirección negativa de Y (-Y).

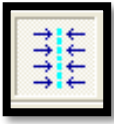
No es útil aplicar cargas en un punto de una línea con desplazamientos plenamente establecidos debido a que predominan los desplazamientos sobre las cargas en el momento de realizar los cálculos. Cuando sólo una dirección de desplazamiento se prescribe mientras que la otra dirección es libre, es posible aplicar una carga puntual en el sentido libre.

Figura 42. Ventana de entrada para cargas puntuales.



Fuente: Plaxis 2D.

8.3.6 Drenajes



Se utilizan para prescribir las líneas dentro del modelo geométrico en que las presiones de poros están en cero, es relevante para el análisis de consolidación o cálculos de flujo de agua subterránea.

8.3.7 Pozos



Se utilizan para prescribir puntos dentro del modelo geométrico, donde una descarga específica es restada (fuente) o agregada al suelo (sumidero), es relevante para el cálculo de flujo de agua subterránea.

8.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

En Plaxis, las propiedades del suelo y de los materiales de las estructuras se almacenan en los conjuntos de datos del material, hay cuatro tipos diferentes: interfaces, placas, geomallas y anclajes. Desde la base de datos, los conjuntos de datos pueden ser asignados a los grupos del suelo o los objetos estructurales correspondientes al modelo geométrico.

8.4.1 Base de datos de los conjuntos de materiales



Un conjunto de materiales aparece en la ventana que muestra el contenido de la base de datos del proyecto. Además de la base de datos de proyecto, hay una base de datos global, esta base puede ser usada para almacenar conjuntos de datos de materiales en un directorio global y cambiar conjuntos de datos entre proyectos diferentes.

Para los conjuntos de datos del tipo de suelo y de interfaces, los conjuntos de datos pueden ser ordenados en grupos de acuerdo con el modelo y tipo de material o el nombre del conjunto de datos.

8.4.2 Modelos de comportamiento del suelo

Tanto las rocas como el suelo tienden a comportarse de manera no lineal bajo carga. Este comportamiento de esfuerzo-deformación no lineal se puede modelar en varios niveles de exactitud. Claramente, el número de parámetros del modelo

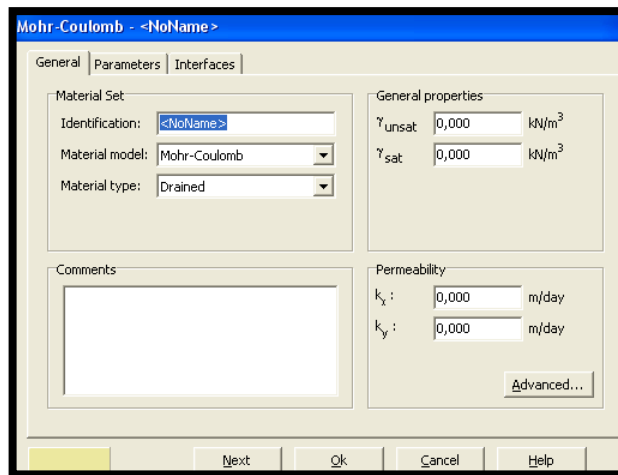
aumenta con el nivel de sofisticación. El modelo de Mohr-Coulomb puede ser considerado como una primera aproximación del comportamiento real del suelo. Plaxis también es compatible con algunos modelos avanzados del suelo.

8.4.3 Conjuntos de datos del material para el suelo y las interfaces

Las propiedades del material de las interfaces están relacionadas con las propiedades del suelo y se introducen en los conjuntos de datos igual que las propiedades del suelo. Un conjunto de datos para el suelo y las interfaces en general, representa una capa de suelo determinada.

Varios conjuntos de datos pueden ser creados para distinguir entre las diferentes capas del suelo. El usuario puede especificar cualquier título de identificación de un conjunto de datos. Las propiedades de los conjuntos de datos se dividen en tres pestañas: General, Parámetros e Interfaces. Figura 12.

Figura 43. Ventana de conjuntos de materiales del suelo y de la interfaz (Hoja De La Pestaña General).



Fuente: Plaxis 2D.

8.4.4 Modelo de material

Plaxis soporta varios modelos para simular el comportamiento del suelo y otros medios continuos.

♣ **Modelo elástico lineal:**

El modelo consta de dos parámetros de rigidez elástica, es decir, el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν). El modelo elástico lineal es muy limitado para la simulación del comportamiento de los suelos. Se utiliza sobre todo para las estructuras rígidas en el suelo.

♣ **Modelo Mohr-Coulomb:**

Este modelo se utiliza como una primera aproximación del comportamiento del suelo en general. El modelo consta de cinco parámetros, el módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson (ν), la Cohesión (c), el Ángulo de fricción (ϕ), y el Ángulo de dilatación (ψ).

♣ **Modelo de roca fracturada:**

Este es un modelo anisótropo elásto-plástico en donde el corte plástico sólo puede ocurrir en un número limitado de direcciones de corte.

♣ **Modelo del suelo endurecido:**

El modelo implica el endurecimiento por compresión para simular la compactación irreversible del suelo bajo compresión primaria. Este modelo de segundo orden se puede utilizar para simular el comportamiento de las arenas y gravas, así como tipos de suelo más suave, tales como arcillas y limos.

♣ **Modelo de suelos blandos:**

Este es un modelo que se puede utilizar para simular el comportamiento de los suelos blandos como las arcillas normalmente consolidadas y la turba. El modelo se comporta mejor en situaciones de compresión primaria.

♣ **Modelo de suelos blandos (creep):**

El modelo puede ser utilizado para simular el comportamiento dependiente del tiempo de los suelos blandos como las arcillas normalmente consolidadas y la turba. El modelo incluye la compresión logarítmica.

♣ **Modelo del suelo definido por el usuario:**

Con esta opción es posible utilizar otros modelos constitutivos diferentes a los estándares de Plaxis.

8.4.5 Tipo de comportamiento del material - Tipo de material

Para la interacción agua-estructura en la respuesta del suelo, Plaxis permite para cada modelo elegir entre tres tipos de comportamiento:

♣ **Comportamiento drenado:**

Usando esta opción no se generan exceso de presiones de poro. Este es claramente el caso de suelos secos y también para el drenaje completo debido a la alta permeabilidad (arenas) y / o una baja tasa de carga.

♣ **Comportamiento sin drenar:**

Esta configuración se utiliza para un desarrollo pleno de las presiones de poro en exceso. El flujo de agua intersticial a veces puede ser disminuido debido a una baja permeabilidad (arcillas) y / o una alta tasa de carga. Además de la rigidez y la fuerza de la estructura del suelo, Plaxis añade una rigidez para el agua y distingue entre el total de esfuerzos, esfuerzos efectivos y el exceso de presiones de poro.

♣ **Comportamiento no poroso:**

Usando esta opción las presiones de poros iniciales y el exceso de presiones de poros no serán tenidos en cuenta en grupos de este tipo. Las aplicaciones se pueden encontrar en el modelado del concreto o comportamiento estructural. El comportamiento no poroso se utiliza a menudo en combinación con el modelo lineal elástico. El tipo de material no poroso puede aplicarse también a las interfaces, para bloquear completamente el flujo a través de las paredes de las tablestacas o por medio de otras estructuras resistentes.

8.4.6 Peso saturado y no saturado (γ_{sat} y γ_{insat})

El peso saturado (γ_{sat}) se refiere al peso total de la unidad del suelo incluyendo el líquido en los poros y se aplica a todo el material por debajo del nivel freático. El

peso no saturado o insaturado (γ_{insat}) se aplica a todo el material por encima del nivel freático. Las unidades de peso se introducen como una fuerza por unidad de volumen (kN/m^3).

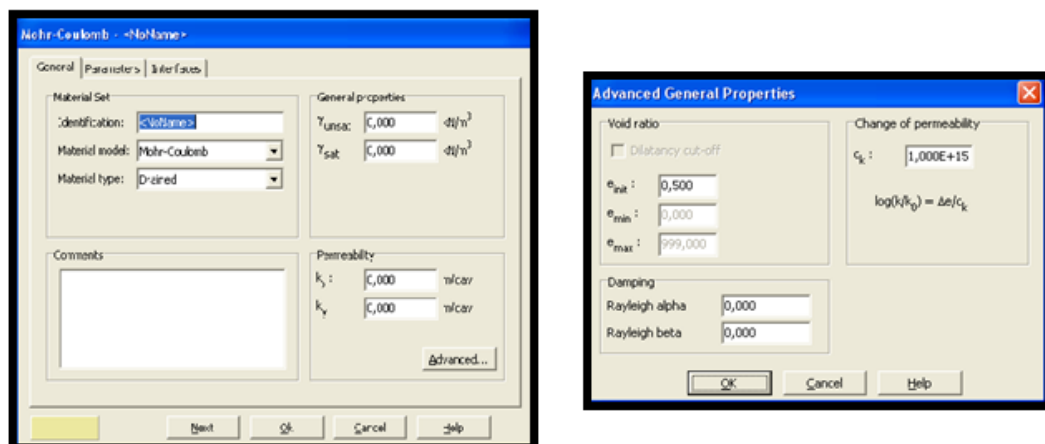
8.4.7 Permeabilidades (k_x y k_y)

Estas permeabilidades tienen dimensiones de velocidad (unidad de longitud por unidad de tiempo). La entrada de los parámetros de permeabilidad sólo es necesaria para la consolidación y el análisis de los cálculos de flujo de agua subterránea. Con el fin de obtener resultados precisos, la relación entre el mayor y el menor valor de permeabilidad de la geometría no debe ser superior de 10^5 . Para simular un material casi impermeable (por ejemplo hormigón o roca sin fisuras) el usuario debe introducir una permeabilidad que sea baja en relación con el suelo circundante en lugar de entrar en la permeabilidad real. En general, un factor de 10^3 será suficiente para obtener resultados satisfactorios.

8.4.8 Propiedades generales avanzadas

Una de las características avanzadas de Plaxis es la variación de la permeabilidad en un análisis de consolidación, se puede aplicar mediante la introducción de un valor adecuado para el parámetro C_K y el índice de porosidad.

Figura 44. Ventana Opciones Avanzadas en la hoja de la pestaña General.

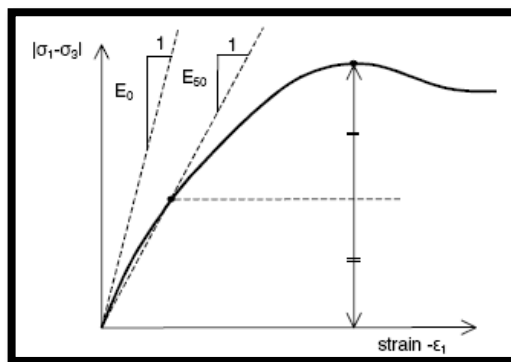


Fuente: Plaxis 2D.

♣ **Módulo de Young (E):**

Plaxis utiliza el módulo de Young como el módulo de rigidez de base en el modelo elástico y el modelo de Mohr-Coulomb, pero algunas alternativas de módulos de rigidez se muestran adicionalmente. Un módulo de rigidez tiene dimensiones de esfuerzo (fuerza por unidad de superficie). En mecánica de suelos, la pendiente inicial suele ser indicada como E_0 y el módulo secante en un 50% de la fuerza se denota como E_{50} (figura 14). Para arcillas sumamente sobre-consolidadas y algunas rocas con un gran rango elástico lineal, es realista utilizar E_0 , mientras que para las arenas y arcillas normalmente consolidadas sometidas a la carga es más apropiado utilizar E_{50} .

Figura 45. Definición de E_0 y E_{50} .



Fuente: Plaxis Reference Manual.

♣ **El coeficiente de Poisson (ν):**

La selección de un coeficiente de Poisson es particularmente simple cuando el modelo elástico o el modelo de Mohr-Coulomb se utilizan para la carga de la gravedad. En el caso del comportamiento sin drenaje, se recomienda introducir un valor efectivo de la relación de Poisson y seleccionar el tipo de comportamiento del material sin drenaje. De este modo Plaxis añadirá automáticamente una rigidez mayor para el fluido intersticial basado en la relación de Poisson de 0.495 sin drenar. En este caso, la relación de Poisson efectiva, debe ser inferior a 0,35. El uso de valores más altos de la relación de Poisson significaría que el agua no

sería lo suficientemente fuerte en lo que respecta a la estructura del suelo para simular el comportamiento sin drenar.

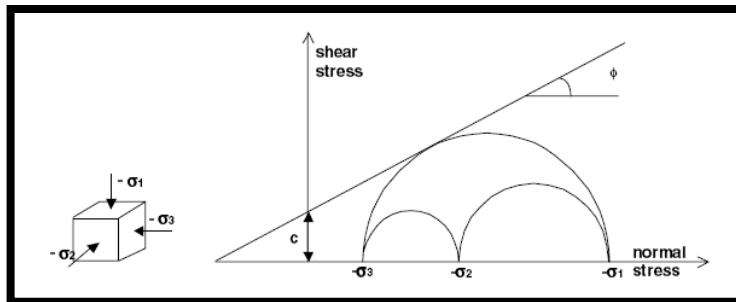
♣ **La cohesión (c):**

La fuerza de cohesión tiene dimensiones de esfuerzo. Plaxis puede manejar arenas sin cohesión ($c = 0$), pero algunas opciones no funcionan bien. Para evitar complicaciones, a los usuarios sin experiencia se les aconseja introducir al menos un valor pequeño (usar $c > 0,2$ KPa).

♣ **Ángulo de fricción (ϕ):**

El ángulo de fricción phi (ϕ), se introduce en grados. Los ángulos de alta fricción, como a veces se obtienen en las arenas densas, aumentan considerablemente el esfuerzo plástico computacional. El ángulo de fricción determina en gran medida la resistencia al corte como se muestra en la figura 15 por medio de los círculos de esfuerzo de Mohr.

Figura 46. Producción de círculos de esfuerzo; envolventes de Coulomb.



Fuente: Plaxis Reference Manual.

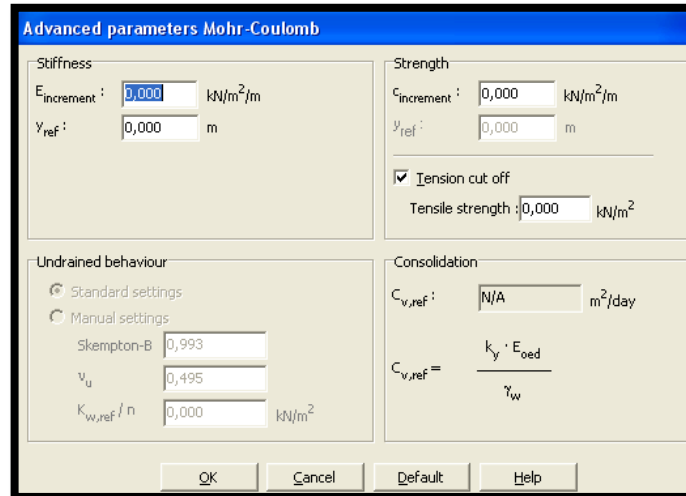
♣ **Ángulo de Dilatancia (ψ):**

El ángulo de dilatancia (ψ), se especifica en grados. Aparte de las capas más fuertemente consolidadas, los suelos arcillosos tienden a no mostrar dilatancia en absoluto (es decir, $\psi = 0$). La dilatancia de la arena depende de la densidad y el ángulo de fricción.

8.4.9 Parámetros Avanzados de Mohr-Coulomb

Las características avanzadas incluyen el aumento de la rigidez, la fuerza de cohesión con la profundidad y el uso de una tensión de corte. De hecho, esta última opción se utiliza por defecto, pero puede ser desactivada, si lo desea. Ver figura 16.

Figura 47. Ventana parámetros Avanzados de Mohr-Coulomb.



Fuente: Plaxis 2D.

♣ Aumento de la rigidez ($E_{\text{increment}}$):

En los suelos reales, la rigidez depende en gran medida del nivel de esfuerzo, lo que significa que la rigidez generalmente aumenta con la profundidad. Cuando se utiliza el modelo de Mohr-Coulomb, la rigidez es un valor constante.

♣ Aumento de la cohesión ($c_{\text{increment}}$):

Plaxis ofrece una opción avanzada para la entrada de las capas de arcilla en la que la cohesión aumenta con la profundidad. Para tener en cuenta el aumento de la cohesión con la profundidad el valor $c_{\text{increment}}$ puede ser utilizado, que es el aumento de la cohesión por unidad de profundidad (expresado en unidades de esfuerzo por unidad de profundidad).

♣ Parámetro B Skempton:

Cuando el tipo de material (tipo de comportamiento del material) se establece sin drenaje, Plaxis supone automáticamente un módulo implícito sin drenar, K_u , para

el suelo en su conjunto (estructura del suelo + agua) y distingue entre esfuerzos totales, esfuerzos efectivos y exceso de presión de poros.

Esfuerzos totales: $\Delta p = K_u \Delta \varepsilon_v$ **Ecuación 7.**

Esfuerzos efectivos: $\Delta p' = (1 - B) \Delta p = K' \Delta \varepsilon_v$ **Ecuación 8.**

Exceso de presión de poros: $\Delta p_w = B \Delta p = \frac{K_w}{n} \Delta \varepsilon_v$ **Ecuación 9.**

El módulo de compresibilidad sin drenaje es calculado automáticamente por Plaxis utilizando la ley de Hooke de la elasticidad:

$$K_u = \frac{2G(1+\nu_u)}{3(1-2\nu_u)} \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde:

$$G = \frac{E'}{2(1+\nu')} \quad \text{Ecuación 11.}$$

Cuando se utiliza la configuración estándar: $\nu_u = 0.495$

Ó

Cuando se usa el ajuste manual $\nu_u = \frac{3\nu' + B(1-2\nu')}{3-B(1-2\nu')}$ **Ecuación 12.**

Un valor particular de la relación de Poisson (ν_u) sin drenaje, implica una rigidez de referencia correspondiente al líquido intersticial:

$$\frac{K_{w,ref}}{n} = K_u - K' \quad \text{Ecuación 13.}$$

Dónde:

$$K' = \frac{E'}{3(1-2\nu')} \quad \text{Ecuación 14.}$$

Si el valor del parámetro B Skempton es desconocido, pero el grado de saturación (S), y la porosidad (n), son conocidos, la rigidez de la mayor parte de la estructura del suelo puede estimarse a partir de:

$$\frac{K_w}{n} = \frac{K_w^0 K_{air}}{SK_{air} + (1-S)K_w^0} \frac{1}{n} \quad \text{Ecuación 15.}$$

Donde: $K_{air} = 200 \text{ kN/m}^2$ de aire a presión atmosférica.

El valor del parámetro B Skempton ahora puede calcularse a partir de la relación entre la rigidez mayor de la estructura del suelo y el líquido de los poros:

$$B = \frac{1}{1 + \frac{nK'}{K_w}} \quad \text{Ecuación 16.}$$

Donde:

$$K' = \frac{E'}{3(1-2\nu')} \quad \text{Ecuación 17.}$$

♣ **Tensión de corte:**

En algunos problemas prácticos, una zona de esfuerzos de tracción se puede desarrollar. De acuerdo a las envolventes de Coulomb que se muestran en la figura 15, esto es permitido cuando el esfuerzo cortante (dado por el radio del círculo de Mohr) es suficientemente pequeño. Sin embargo, el suelo también puede fallar a tensión en lugar de corte. Este comportamiento se puede incluir en un análisis Plaxis mediante la selección de la tensión de corte.

8.4.10 Interfaz de fuerza (R_{inter})

Un modelo elasto-plástico se utiliza para describir el comportamiento de las interfaces para el modelado de la interacción suelo-estructura. El criterio de Coulomb se utiliza para distinguir entre el comportamiento elástico, donde pequeños desplazamientos puede ocurrir dentro de la interfaz, y el comportamiento plástico de la interfaz donde deslizamientos permanentes pueden ocurrir. La fuerza de interfaz se puede establecer mediante las siguientes opciones:

♣ **Rígida:**

Esta opción se utiliza cuando la interfaz no debe influir en la resistencia del suelo circundante.

♣ **Manual:**

Si la intensidad de la interfaz se configura en Manual, el valor de la R_{inter} se puede introducir manualmente. En general, para una verdadera interacción suelo-estructura de la interfaz es más débil y más flexible que la capa de suelo asociadas, lo que significa que el valor de R_{inter} debe ser inferior a 1.

♣ **Espesor real de la interfaz (δ_{inter}):**

El espesor real de la interfaz (δ_{inter}), es un parámetro que representa el espesor real de una zona de cizalla entre la estructura y el suelo. El valor de δ_{inter} es sólo de importancia cuando las interfaces se utilizan en combinación con el modelo de endurecimiento del suelo.

♣ **Interfaces debajo o alrededor de las esquinas de las estructuras:**

Cuando las interfaces se extienden por debajo o alrededor de las esquinas de las estructuras para evitar las oscilaciones del esfuerzo, estas interfaces extendidas no están destinadas a modelar el comportamiento de interacción suelo-estructura, sólo permiten la suficiente flexibilidad.

♣ **Interfaz de permeabilidad:**

Las interfaces no tienen una permeabilidad que se les asigne, pero son, por defecto, totalmente impermeables.

En conclusión:

- ✓ Una interfaz activa es totalmente impermeable.
- ✓ Una interfaz inactiva es totalmente permeable.

8.4.11 Conjuntos de datos del material para las placas

Las placas se utilizan para modelar el comportamiento de las paredes delgadas, placas o conchas finas. Se puede distinguir entre el comportamiento elástico y elasto-plástico. Las propiedades de rigidez para un comportamiento elástico de rigidez axial (EA) y una rigidez a la flexión (IE), se deben especificar como

propiedades de los materiales. De la relación de IE y EA un espesor equivalente de placa (d_{eq}) se calcula automáticamente a partir de la ecuación:

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}}$$

Ecuación 18.

♣ **Relación de Poisson:**

Para las estructuras finas con un perfil determinado o estructuras que son relativamente flexibles fuera de la dirección del plano es aconsejable establecer la relación de Poisson a cero. En estructuras masivas reales es más realista entrar una relación de Poisson del orden de 0,15. Dado que Plaxis considera placas (que se extiende fuera de la dirección del plano) en lugar de vigas (estructuras de una sola dimensión).

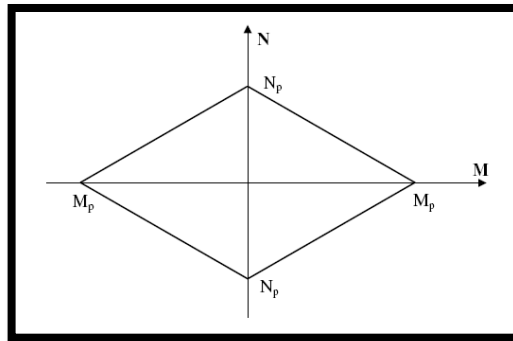
♣ **Peso:**

En un material fijado para las placas de un peso específico se puede definir, que se introduce como una fuerza por unidad de superficie. Para las estructuras relativamente masivas esta fuerza es en principio, el resultado de multiplicar la unidad de peso del material de la placa por el espesor de la placa. Tenga en cuenta que en un modelo de elementos finitos, las placas se superponen en un continuo y por lo tanto se traslapan al suelo.

♣ **Parámetros de fuerza (plasticidad):**

La plasticidad se puede tomar en cuenta al especificar un momento máximo de flexión (Mp). La forma de diamante que se visualiza en la figura 17 representa la mejor combinación de las fuerzas de la plasticidad que se producirá. Las combinaciones de la Fuerza en el interior del diamante darán lugar a deformaciones elásticas solamente. Por defecto, el momento máximo se establece en 10^{15} unidades si el tipo de material se establece como elástico. Momentos de flexión y fuerzas axiales se calculan en los puntos de tensión de los elementos de viga.

Figura 48. Combinación de momento máximo de flexión y fuerza axial.



Fuente: Plaxis Reference Manual.

8.4.12 Juego de datos para geomallas

La única propiedad en un conjunto de datos de geomalla es la rigidez elástica axial, EA, introducida en unidades de fuerza por unidad de longitud. La rigidez axial, EA, es generalmente proporcionada por el fabricante de la geomalla y se puede determinar a partir de diagramas en los que el alargamiento de la geomalla se representa frente a la fuerza aplicada en una dirección longitudinal.

8.4.13 Conjunto de datos para anclajes

Un conjunto de datos de material para las anclas pueden contener las propiedades de los anclajes de nodo a nodo, así como los de empotramiento. La propiedad de soporte importante es la rigidez axial (EA) aportada al anclaje en la unidad de fuerza y no por unidad de longitud fuera de la dirección del plano. Los anclajes pueden ser pre-esforzados en un cálculo de la construcción por etapas. La fuerza de pre-esfuerzo no es considerada como una propiedad del material y por tanto no está incluida en un conjunto de datos de anclaje.

8.4.14 Asignación de grupos de datos para componentes de geometría

Después de crear todos los conjuntos de datos de material de las capas del suelo y diversas estructuras, los conjuntos de datos deben ser asignados a los componentes correspondientes.

8.5 GENERACIÓN DE MALLA



Cuando el modelo de la geometría está completamente definido y las propiedades de los materiales se asignan a todos los grupos y objetos estructurales, la geometría tiene que dividirse en elementos finitos con el fin de realizar los respectivos cálculos. El tipo básico de los elementos de malla es el elemento triangular de 15 o 6 nodos. Además de estos elementos, hay elementos especiales para el comportamiento estructural (placas, geomallas y anclajes). Plaxis permite la generación automática de mallas de elementos finitos.

8.5.1 Tipo básico de elemento

El usuario puede seleccionar elementos triangulares de 15 o 6 nodos como el tipo de elemento básico del modelo de capas de suelo y otros grupos de volumen. El tipo de elemento para las estructuras e interfaces es automáticamente compatible con el tipo de elemento básico del suelo.

8.5.2 Grosor Global

Se distingue entre cinco niveles de grosor global: Muy grueso, grueso, mediano, fino y muy fino. De forma predeterminada, la grosor global se establece en grueso. El tamaño promedio de los elementos y el número de elementos triangulares generados depende de esta configuración. Una estimación aproximada es dada a continuación sobre la base de una generación sin refinamiento local.

Muy grueso: Alrededor de 50 elementos, $nc = 25$.

Grueso: Alrededor de 100 elementos, $nc = 50$.

Medio: Alrededor de 250 elementos, $nc = 100$.

Fino: Alrededor de 500 elementos, $nc = 200$.

Muy Fino: Alrededor de 1000 elementos, $nc = 400$.

8.5.3 Refinamiento Global

Una malla de elementos finitos puede ser refinada a nivel global mediante la selección de la opción Refinamiento global del Sub-menú malla. Al seleccionar

esta opción, el parámetro de grosor global se incrementa un nivel (por ejemplo, de gruesa a mediana) y la malla se regenera automáticamente.

8.5.4 Grosor Local

En las zonas donde se esperan concentraciones de gran esfuerzo o grandes gradientes de deformación, es conveniente disponer de una mayor precisión de malla de elementos finitos (más fina), mientras que en otras partes de la geometría no se puede exigir una malla fina. Esta situación ocurre a menudo cuando el modelo de la geometría incluye bordes o esquinas u objetos estructurales. El parámetro de grosor local es el factor de tamaño de los elementos locales, que figura en cada punto de la geometría. Estos factores dan una indicación del tamaño del elemento relativo con respecto al tamaño del elemento promedio, determinado por el parámetro de grosor local, estos valores son aceptables en el rango de 0,05 a 5,0.

8.5.5 Refinamiento Local

En lugar de especificar los factores locales del tamaño del elemento, un refinamiento local se puede lograr mediante la selección de clusters, líneas o puntos y seleccionar una opción de refinamiento local del Sub-menú malla. Al seleccionar uno o más clusters, el Sub-menú malla permite la opción Filtrar clúster. Del mismo modo, al seleccionar una o más líneas de la geometría, el Sub-menú malla proporciona la opción de refinar la línea. Al seleccionar uno o más puntos, la opción Refinar alrededor del punto está disponible.

8.6 CONDICIONES INICIALES



Las condiciones iniciales consisten en dos modos diferentes: Un modo para la generación de presiones iniciales de agua y otro para la especificación de la configuración de la geometría inicial y la generación del campo de esfuerzo efectivo inicial. El cambio entre estos dos modos se hace por medio del "interruptor" en la barra de herramientas. Las condiciones iniciales permiten un retorno al modo de creación de la geometría,

pero en general esto no debe hacerse, ya que alguna información acerca de las condiciones iniciales se perderá.

8.7 CONDICIONES DE AGUA

El modo de condiciones de agua puede ser omitido en proyectos que no tienen que ver con presiones de agua. En este caso, un nivel freático general se toma en la parte inferior del modelo de la geometría y todas las presiones de poro y la presión exterior del agua se considerarán nulas.

8.7.1 Peso del agua

En los proyectos que involucran a las presiones de poros, la entrada del peso unitario del agua es necesaria para distinguir entre los esfuerzos efectivos y presiones de poros. Al entrar en el modo de condiciones del agua por primera vez, aparecerá una ventana en la que el peso del agua se puede introducir.

8.7.2 Niveles freáticos



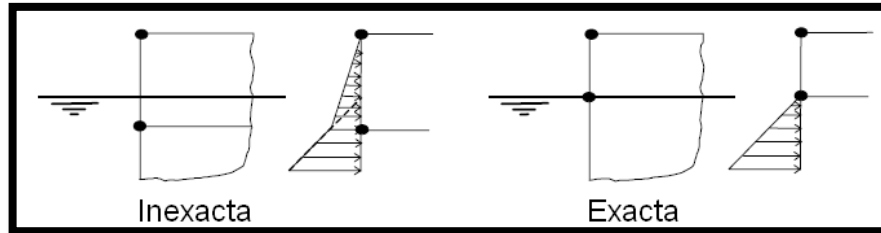
Un nivel freático representa una serie de puntos donde la presión del agua es cero. Introduciendo un nivel freático, la presión del agua aumentará linealmente con la profundidad en función del peso del agua especificado (es decir, la variación de la presión se supone que es hidrostática). Los niveles freáticos están definidos por dos o más puntos. Los puntos pueden ser ingresados de 'izquierda' a 'derecha' o viceversa. Los puntos y las líneas se superponen, pero no interactúan con el modelo. Los cruces de los niveles freáticos y las líneas geométricas no introducen puntos adicionales a la geometría.

♣ Nivel freático general:

Si ninguno de los grupos se selecciona y un nivel freático se dibuja, este se considera general. De forma predeterminada, el nivel freático general se encuentra en la parte inferior del modelo geométrico, al entrar una nueva línea el antiguo nivel freático general se sustituye. Si el nivel freático cruza la frontera en un punto

no existente de la geometría, la presión externa de agua no se puede calcular con precisión figura 18.

Figura 49. Modelado Inexacto y Exacto de las presiones externas de agua.



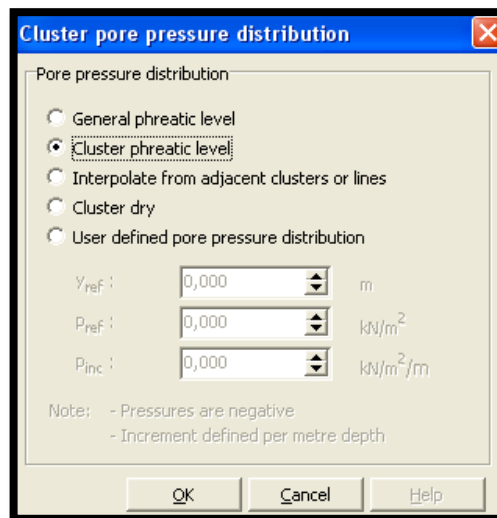
Fuente: Plaxis Reference Manual.

Para calcular la presión exterior del agua con precisión, el nivel freático general, es preferible que cruce la frontera del modelo en los puntos de la geometría existente.

♣ Nivel freático de cluster:

Para permitir una distribución discontinua de presión poros, cada grupo puede dar un Nivel freático de clúster independiente. De hecho, un nivel freático de clúster no es necesariamente un verdadero nivel freático. En el caso de una capa del acuífero, el nivel freático del clúster representa la altura de la presión, es decir, el nivel cero virtual de de las presiones de poro en esa capa.

Figura 50. Ventana distribución presión de poros clúster.



Fuente: Plaxis 2D.

♣ **Interpolación de grupos adyacentes o líneas:**

Al seleccionar la opción Interpolación de grupos adyacentes o líneas, la presión de poros en ese grupo se interpola linealmente en una dirección vertical, a partir del valor en la parte inferior de la agrupación anterior y termina en el valor en la parte superior de la agrupación siguiente, excepto si la presión de poros en el grupo por encima o por debajo es una distribución de presión de poros definida por el usuario. En este último caso la presión de poros se interpola a partir del Nivel freático general. La opción Interpolar se puede utilizar repetidamente en dos o más agrupaciones sucesivas. En el caso de que un valor de partida para la interpolación vertical de la presión de poro no se pueda encontrar, entonces el punto de partida se basará en el nivel freático general.

Además de los valores en las capas por encima o por debajo del cluster a partir del cual la presión de poros se interpola, también se puede introducir directamente la cabeza del agua subterránea en las líneas de la geometría para los propósitos de interpolación.

♣ **Cluster seco:**

Una opción rápida y conveniente está disponible para grupos drenados y sin drenar que deben ser secos o en otras palabras, que debe tener cero presiones de poros. Esto se puede hacer seleccionando la opción de Clúster seco. Como resultado, las presiones de poros en el estado de equilibrio que se agrupan se ponen en cero y el peso del suelo se considera el peso no saturados.

♣ **Distribución de la presión de poros definida por el usuario:**

Si la distribución de la presión de poros en un grupo particular del suelo es muy específica y no puede definirse por una de las opciones existentes, puede ser especificada como una distribución de presión de poros definida por el usuario. Al seleccionar esta opción, puede introducir un nivel de referencia (y_{ref}), en la unidad de longitud, una presión de referencia, preferentemente, en la unidad de esfuerzo (es decir, la presión de poro en el nivel de referencia) y un incremento de la

presión (p_{inc}), en la unidad de esfuerzo por unidad de profundidad. De esta manera, cualquier distribución de presión lineal de poros se puede definir.

♣ **Presiones de agua en clusters inactivos:**

Cuando se genera la presión del agua sobre la base de los niveles freáticos que algunos grupos están inactivos en la configuración de la geometría inicial no se hace distinción entre los grupos activos e inactivos. Esto significa que la presión de poros constante se genera tanto para los grupos activos e inactivos de acuerdo con el nivel freático correspondiente. Si se desea excluir a las presiones de agua en ciertos grupos, la opción cluster seco debe ser usado o un nivel freático del cluster debe ser definido por debajo del grupo correspondiente.

8.7.3 Condiciones de límite para el cálculo de flujo de agua subterránea

Esto requiere la entrada de condiciones de contorno en la cabeza de agua subterránea. En principio, dos tipos de condiciones de frontera existen: Una cabeza de agua subterránea y una descarga específica prescritas normal a la frontera. Esta última sólo se puede especificar como una descarga específica igual a cero, lo que se denomina un límite de flujo cerrado.

♣ **Prescrita la cabeza de las aguas subterráneas:**

La cabeza de agua subterránea prescrita en los límites de la geometría externa es por defecto, derivada de la posición del nivel freático general, al menos cuando el nivel freático general este fuera de la geometría activa. También las líneas de la geometría interna que se han convertido en las fronteras exteriores debido a la desactivación de las agrupaciones del suelo se consideran límites de la geometría externa y por lo tanto se tratan similarmente.

Además del ajuste automático de las condiciones de frontera en función del nivel freático general, una cabeza de agua subterránea prescrita puede introducirse manualmente.

♣ **Límite de flujo cerrado:**

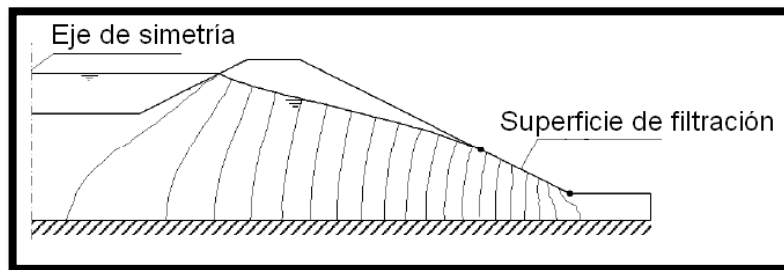


Un límite de flujo cerrado es un objeto que puede ser colocado en el límite del modelo de la geometría para garantizar que el flujo a través de esa frontera no se produzca.

♣ **Filtración de superficies:**

Los problemas de flujo con un nivel freático libre pueden implicar una superficie de filtración en la frontera aguas abajo, como se muestra en la figura 20. Una superficie de filtración siempre se producirá cuando el nivel freático toca una frontera abierta aguas abajo. La superficie de filtración se trata de una línea en la que la cabeza de las aguas subterráneas (h), es igual a la cabeza de elevación ($Y =$ posición vertical). Esta condición surge del hecho de que la presión del agua es cero en la superficie de filtración, que es la misma condición que existe en el nivel freático.

Figura 51. Flujo a través de un terraplén con la indicación de una superficie de filtración.



Fuente: Plaxis Reference Manual.

♣ **Grupos inactivos en el cálculo de flujo de aguas subterráneas:**

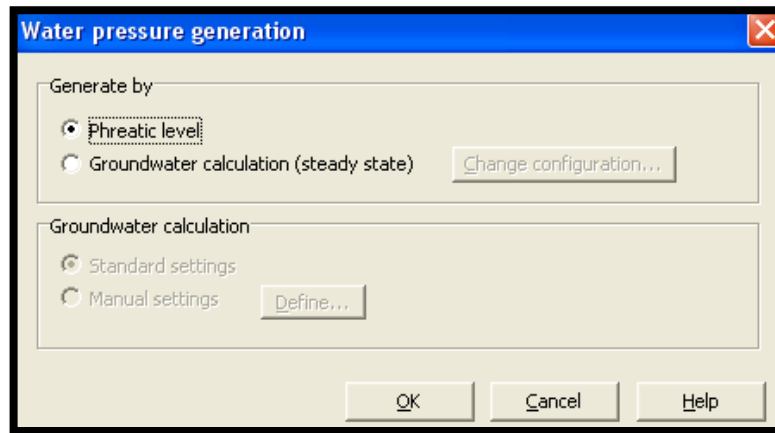
Si las agrupaciones se encuentran inactivas (en parte) por debajo del nivel freático general, habrá una distribución de agua a presión hidrostática por debajo de este, mientras que la presión del agua por encima del nivel freático general es cero en estos grupos. El límite entre grupos activos e inactivos se considera que está "abierto" para que el agua pueda fluir a través de esa frontera.

8.7.4 Generación de presión de agua



Después de la entrada de los niveles freáticos o la entrada de condiciones de contorno para el cálculo de flujo de aguas subterráneas, las presiones de agua se pueden generar.

Figura 52. Ventana de generación de presiones de agua.



Fuente: Plaxis 2D.

♣ Generar por niveles freáticos:

La generación de la presión del agua por los niveles freáticos se basa en la entrada de un nivel freático general. Esta generación es rápida y sencilla. Cuando se genera la presión del agua sobre la base de los niveles freáticos y algunos grupos están inactivos en la configuración de la geometría inicial no se hace distinción entre los grupos activos y grupos inactivos. Esto significa que la presión de poros constante se genera tanto para los grupos activos e inactivos de acuerdo con el nivel freático correspondiente.

♣ Generar por el cálculo de las aguas subterráneas:

La generación de la presión mediante el cálculo del agua subterránea se basa en un cálculo de elementos finitos con la utilización de la generación de malla, la permeabilidad de los grupos del suelo y las condiciones de contorno de flujo (la cabeza de aguas subterráneas prescrita y los límites cerrados de flujo). Esta generación es más compleja y por lo tanto consume más tiempo que una

generación por medio de niveles freáticos, pero los resultados pueden ser más realistas, siempre que los parámetros de entrada adicionales sean seleccionados adecuadamente.

♣ **Transitoria del flujo de agua subterránea:**

Los resultados de este cálculo de flujo transitorio, es decir, la distribución en función del tiempo de las presiones de poros, se puede utilizar como datos de entrada para un análisis de la deformación. Esta opción requiere la presencia del módulo Plaxis de flujo de aguas subterráneas, que está disponible como una extensión.

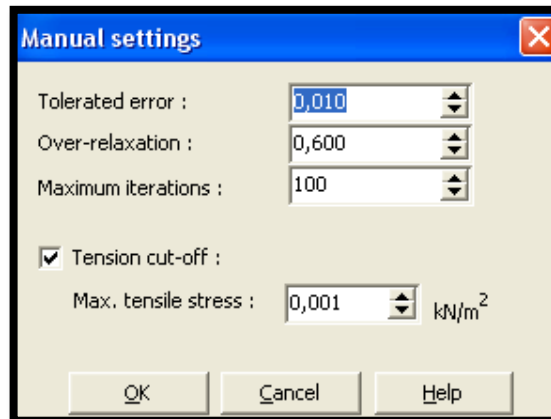
♣ **Resultados de la generación de presión de agua:**

La generación de presiones de agua se puede utilizar como datos de entrada para un análisis de deformación. La presión del agua no se activa hasta que se aplique efectivamente en un cálculo. La activación de presiones de agua se asocia a la activación del peso del suelo. En principio, los puntos de esfuerzo en los elementos con una presión de poros estacionaria cero se consideran no saturados, mientras que los puntos de esfuerzo que tienen presión de poros constante distinto de cero se consideran saturados.

♣ **Ajuste manual de los parámetros de control de cálculo de las aguas subterráneas:**

Al seleccionar la opción de configuración manual en la ventana de la generación de presiones de agua y haciendo clic en el botón Definir una nueva ventana se abre en la que se muestra la configuración actual de los parámetros de control de cálculo de las aguas subterráneas.

Figura 53. Ventana de los parámetros de control de cálculo de aguas subterráneas.



Fuente: Plaxis 2D.

- ✓ **Error Tolerado:** Esta es la tolerancia global (relativa) de error en el balance de masa de agua. Al usar la configuración estándar, el error tolerado se establece en 0,01.
- ✓ **Exceso de relajación:** Al usar la configuración estándar, el factor de exceso de relajación se establece en 1.0. Un factor de relajación más grande que 1.0 puede ser usado para acelerar el proceso de iteración, pero también puede dar lugar a la divergencia.
- ✓ **Máximas iteraciones:** Al usar la configuración estándar, el número máximo de iteraciones es igual a 100, que es generalmente suficiente. En algunos casos, sin embargo, un mayor número de iteraciones se necesita para obtener una solución convergente. El programa permite cualquier valor hasta 999.
- ✓ **Tensión de corte:** Con el fin de evitar una sobre-estimación de la resistencia al corte, los esfuerzos de tensión de poro pueden ser omitidos por la selección de la opción tensión de corte. Posteriormente, el máximo parámetro de esfuerzo de tensión se puede ajustar al máximo esfuerzo admisible a la tensión (en la unidad de esfuerzo). Al usar la configuración estándar, la opción tensión de corte se selecciona y el máximo parámetro de esfuerzo a la tensión se establece en cero.

8.7.5 Límites cerrados de consolidación



Un análisis de consolidación implica condiciones límites adicionales para las presiones de poros en exceso. Por defecto, todas las fronteras geométricas son "abiertas", lo que significa que el agua puede fluir dentro o fuera de ellas. En los casos donde no hay flujo a través de estos límites, se puede utilizar la opción Límite cerrado de consolidación. Un perímetro de consolidación cerrado no implica automáticamente un límite de flujo cerrado o viceversa.

8.8 CONFIGURACIÓN DE LA GEOMETRÍA INICIAL



Para desplazarse desde el modo de condiciones del agua al modo de configuración de la geometría, haga clic en el lado derecho del "interruptor" en la barra de herramientas. El modo de configuración de la geometría sirve para establecer la configuración de la geometría inicial y le permite cancelar la selección de los grupos geométricos que no son activos en la situación inicial.

8.8.1 Desactivación de cargas y objetos geométricos

La activación o desactivación de los componentes de la geometría se puede hacer por un clic en el componente en el modelo de la geometría. Los anclajes sólo pueden estar activos si el suelo o estructuras a las que están conectados también están activos. Si las cargas o desplazamientos previstos a actuar sobre una parte de la geometría están inactivos, estas condiciones no se aplican durante el análisis. A pesar de que las cargas externas pueden estar "activas" en la configuración inicial, no se consideran en la generación de esfuerzo inicial.

8.8.2 Generación de esfuerzo inicial



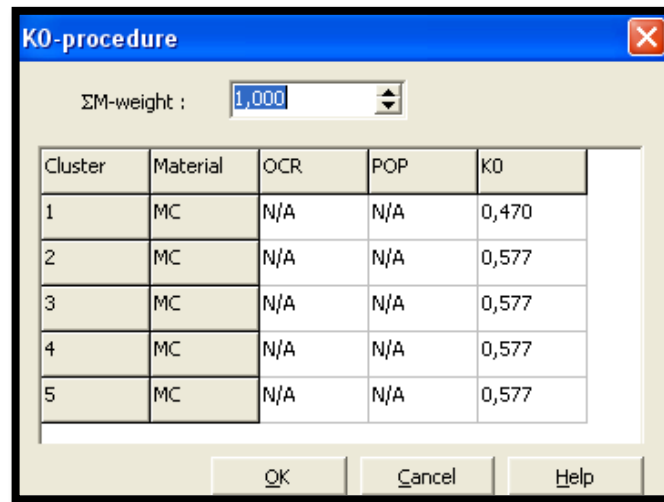
Los esfuerzos iniciales en el cuerpo del suelo están influenciados por el peso del material y su formación. Este estado de esfuerzo se caracteriza generalmente por un esfuerzo efectivo vertical inicial ($\sigma'_{v,0}$).

El esfuerzo efectivo horizontal inicial ($\sigma'_{h,0}$), está relacionado con el esfuerzo efectivo vertical inicial por el coeficiente de empuje lateral (k_0).

$$\sigma'_{h,0} = k_0 \sigma'_{v,0}$$

Ecuación 19.

Figura 54. Ventana de generación de esfuerzos iniciales.



Fuente: Plaxis 2D.

El significado de los distintos parámetros en la ventana se describe a continuación.

♣ **ΣMweight:**

Este parámetro representa la proporción de la gravedad que se aplica. En general, el valor predeterminado de 1,0 puede ser aceptado, lo que implica que el peso total del suelo se activa. Para restablecer previamente los esfuerzos iniciales generados en cero, ΣMweight debe ser puesto a cero.

♣ **Cluster o grupo:**

La primera columna muestra el número de cluster. Al introducir un valor en la tabla el grupo correspondiente se indica en la ventana principal en el fondo.

♣ **Modelo:**

La segunda columna muestra el modelo de material que se utiliza en un grupo determinado.

♣ **Relación de sobre-consolidación (OCR) y presión antes de la sobrecarga (POP):**

La tercera y la cuarta columna se utilizan para introducir ya sea una OCR o una POP. Cualquiera de estos valores se utiliza para generar la presión de pre-consolidación del suelo blando (Creep) y el modelo de suelo endurecido. Cuando se utiliza el material de otros modelos de entrada OCR y POP no son aplicables.

♣ **K_0 :**

La quinta columna se utiliza para introducir el valor K_0 para todos los grupos individuales. El valor K_0 por defecto se basa en la fórmula $(1-\sin\phi)$, pero este valor puede ser cambiado por el usuario. Tenga cuidado con valores K_0 muy bajos o muy altos, ya que estos valores pueden causar la plasticidad inicial.

♣ **Resultados de la generación de esfuerzos iniciales:**

Después de la generación de esfuerzos iniciales el programa de salida se inicia y una grafica del esfuerzo efectivo inicial se presenta. En general, el esfuerzo inicial en un punto de tensión se deriva del peso del material por encima de este punto y el valor de $\Sigma Mweight$.

$$\sigma'_{v,0} = \Sigma Mweight[\sum_i \gamma_i \times h_i - p_w] \quad \text{Ecuación 20.}$$

y

$$\sigma'_{h,0} = K_0 \sigma'_{v,0} \quad \text{Ecuación 21.}$$

Donde γ_i es el peso unitario de las capas individuales, h_i es la profundidad de la capa y P_w es la presión de poros inicial en el punto de tensión.

El uso de valores K_0 que difieren sustancialmente de la unidad a veces puede conducir a un estado de esfuerzo inicial que viola el criterio de Coulomb.

8.9 CÁLCULOS DE PARTIDA

Con la generación de los esfuerzos iniciales, la generación de la situación inicial del modelo de elementos finitos se ha completado.

9 CÁLCULOS

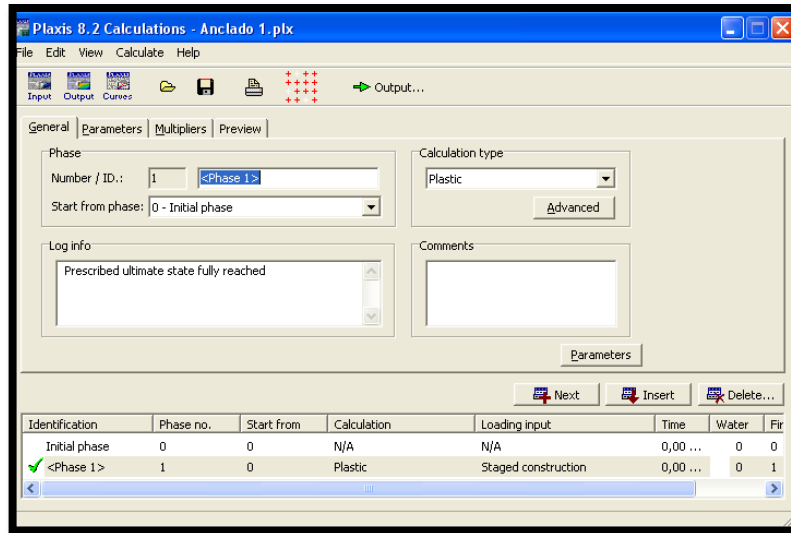
Plaxis permite diferentes tipos de cálculos de elementos finitos. Un cálculo de flujo de agua subterránea se utiliza para generar una distribución de presión del agua para su uso como entrada de datos para un análisis de deformación. Al considerar los cálculos del programa sólo se analiza la deformación y la diferencia entre el cálculo plástico, un análisis de consolidación, la reducción de Phi-c (análisis de la seguridad) y un cálculo dinámico. Esta última opción requiere la presencia del módulo Plaxis Dynamics, que está disponible como una extensión. Los primeros tres tipos de cálculos (plástico, consolidación, reducción de Phi-c) opcionalmente permiten los efectos de los grandes desplazamientos siendo tomados en cuenta. Esto se conoce como Actualización de malla, que está disponible como una opción avanzada.

9.1 PROGRAMA DE CÁLCULOS



El programa de cálculo contiene todas las facilidades para definir y poner en marcha los cálculos de elementos finitos. Al inicio del programa de cálculos, el usuario tiene que seleccionar el proyecto para el cual se va a definir los cálculos. La ventana de selección permite una rápida selección de uno de los cuatro proyectos más recientes. Después de la selección de un proyecto, la ventana principal del programa de cálculos aparece (ver figura 24), que contiene los siguientes elementos:

Figura 55. Ventana principal del programa de cálculos.



Fuente: Plaxis 2D.

♣ **Menú de cálculos:**

El menú de cálculos contiene todas las instalaciones de operación del programa de cálculos. La mayoría de las opciones también están disponibles como botones en la barra de herramientas.

♣ **Barra de herramientas:**

La barra de herramientas contiene botones que se pueden utilizar como acceso directo a las instalaciones de menú.

♣ **Pestañas y hojas (parte superior):**

Las hojas de las pestañas se utilizan para definir y tener una vista previa de una fase de cálculo.

♣ **Lista de las fases de cálculo (parte inferior):**

Si la fase aún no se ha ejecutado, los números de paso están en blanco.

9.2 EL MENÚ DE CÁLCULO

El menú principal del programa de cálculo contiene un sub-menú desplegable que cubre la mayoría de las opciones para el manejo de archivos, definiendo las fases

y ejecución de cálculos. El menú consiste en cálculos de los Sub-menús Archivo, Editar, Ver, Calcular y Ayuda.

9.3 DEFINICIÓN DE UNA FASE DE CÁLCULO

Considere la posibilidad de un nuevo proyecto para el que aún no ha definido la fase de cálculo. En este caso, la lista contiene los cálculos de una sola línea, se indica como "fase inicial" con el número de fase 0. Para introducir la fase del primer cálculo para el proyecto actual, el botón Next debe ser presionado después de lo cual aparece una nueva línea. Después de la introducción de la nueva fase de cálculo, la etapa tiene que ser definida. Esto debe hacerse mediante las hojas de la pestaña General, los parámetros y multiplicadores en la parte superior de la ventana principal. No es necesario definir todas las fases de cálculo antes de iniciar el proceso de cálculo ya que el programa permite la definición de nuevas fases de cálculo después de las fases anteriores calculadas.

♣ Inserción y eliminación de fases de cálculo:

Al insertar y borrar las fases de cálculo se tiene que tener en cuenta que las condiciones de inicio para las fases posteriores cambian, una y otra vez se debe especificar de forma manual. En general, una fase nueva de cálculo se define al final de la lista de cálculo utilizando el botón Siguiente. Es posible, sin embargo, insertar una nueva fase entre dos fases existentes, esto se hace pulsando el botón Insertar de forma predeterminada, la nueva fase se iniciará a partir de los resultados de la fase anterior de la lista. Esto significa que el estado de los clusters activos, los objetos estructurales, las cargas, las condiciones del agua y los multiplicadores se adoptan a partir de la fase anterior. El usuario tiene que definir los ajustes para la fase a insertarse de una manera similar a la definición de una nueva fase al final de la lista de los cálculos.

Además de la inserción de las fases de cálculo también es posible eliminarlas. Esto se realiza mediante la selección de la fase que se va a eliminar y haciendo clic en el botón Eliminar.

9.4 CONFIGURACIÓN GENERAL DE CÁLCULO

La hoja de la pestaña General se utiliza para definir la configuración general de una fase de cálculo en particular.

♣ Fase:

Los elementos de la fase de grupo pueden ser utilizados para identificar la fase de cálculo y determinar el orden mediante la selección de la fase de cálculo que se utiliza como punto de partida para el cálculo actual.

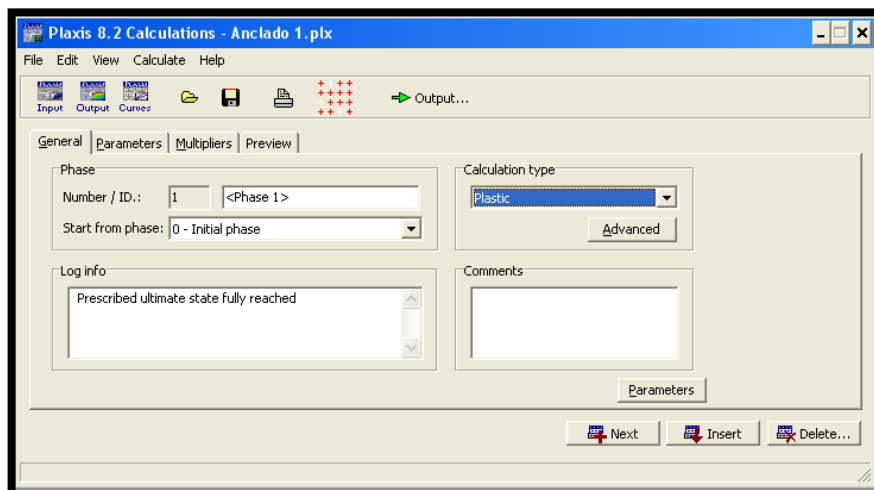
♣ Tipo de cálculo:

Las selecciones de tipo de cálculo realizadas en el grupo determinan el tipo de cálculo que se utiliza.

♣ Registro de información y comentarios:

El registro de información muestra el cuadro de mensajes generados durante el cálculo de elementos finitos y se utiliza para propósitos de registro. El apartado de comentarios se puede utilizar para almacenar cualquier información relacionada con una fase de cálculo en particular.

Figura 56. Hoja de la pestaña General en la ventana de cálculos.



Fuente: Plaxis 2D.

9.4.1 Identificación de fase y ordenamiento

El grupo de fases en la hoja de la pestaña General muestra el número de la fase y una cadena de identificación de la fase del cálculo actual. Plaxis asigna automáticamente un número a cada fase de cálculo que no se puede cambiar por el usuario.

Cuando se define sólo una fase de cálculo simple, es obvio que el cálculo debe partir de la situación generada en las condiciones iniciales del programa de entrada. Sin embargo, si se generan más fases, estas toman como referencia por defecto la fase inmediatamente anterior, pero también pueden comenzar desde la fase inicial.

9.4.2 Tipos de cálculo

Se distingue entre tres tipos básicos de cálculos: un cálculo plástico, un análisis de consolidación y reducción de Φ -c (análisis de seguridad). Opcionalmente, un cálculo dinámico está disponible en el cuadro combinado, pero esto requiere la presencia del módulo Plaxis Dynamics, que está disponible como una extensión.

♣ Cálculo plástico:

Un cálculo plástico debe ser seleccionado para llevar a cabo un análisis de la deformación elásto-plástica en la que no es necesario tener en cuenta la declinación con el tiempo del exceso de presiones de poros. La matriz de rigidez en un cálculo plástico normal se basa en la geometría original sin deformar. Este tipo de cálculo es apropiado en la mayoría de aplicaciones geotécnicas prácticas.

La realización de un análisis completamente drenado puede evaluar los asentamientos a largo plazo, esto le dará una razonable y precisa predicción de la situación final.

♣ **Análisis de consolidación:**

Un análisis de consolidación debe ser seleccionado cuando es necesario analizar el desarrollo o la disipación del exceso de presiones de poro en suelos saturados de agua, tipo arcilla en función del tiempo. Plaxis permite cierto análisis de la consolidación elástico-plástica. En general, un análisis de la consolidación, sin carga adicional se realiza después de un cálculo plástico sin drenar. También es posible aplicar las cargas durante un análisis de consolidación.

♣ **Phi-c reducción (análisis de seguridad):**

Un análisis de seguridad en Plaxis se puede ejecutar mediante la reducción de los parámetros de resistencia del suelo, la reducción de Phi-c se debe seleccionar cuando se desea calcular un factor de seguridad global de la situación en cuestión. Tenga en cuenta que una fase de reducción de phi-c no se puede utilizar como una condición de partida para otra fase de cálculo, ya que termina en un estado de falla.

De hecho, la reducción de Phi-c es un tipo especial de cálculo plástico. Cuando se utiliza la reducción de Phi-C en combinación con los modelos avanzados del suelo, estos modelos realmente se comportan como un modelo estándar de Mohr-Coulomb, ya que el esfuerzo depende del comportamiento de la rigidez y los efectos de endurecimiento están excluidos del análisis.

♣ **Análisis de actualización de malla:**

Un análisis de Actualización de malla es un cálculo donde los efectos de grandes deformaciones se tienen en cuenta. Este tipo de cálculo debe tenerse en cuenta cuando las deformaciones son de esperarse que influyan significativamente en la forma de la geometría. La matriz de rigidez en un análisis actualizado de malla se basa en la geometría deformada. Además, una definición especial de los tipos de esfuerzo se adopta, que incluyen términos de rotación.

Tenga en cuenta que un cálculo de actualización de malla no puede ser seguido por un cálculo normal. Inversamente, un cálculo normal puede ser seguido por un

cálculo de actualización de malla, siempre que la opción Restablecer desplazamientos a cero se utilice.

9.5 PROCEDIMIENTOS DE AVANCE DE CARGA

En Plaxis existen diversos procedimientos para la solución de los problemas de plasticidad no-lineal. Todos los procedimientos se basan en una selección automática del tamaño del paso. Los siguientes procedimientos están disponibles: avance a último nivel de carga, número de pasos de avance de carga y el tiempo automático paso a paso. Los usuarios no necesitan preocuparse por la adecuada selección de estos procedimientos, ya que Plaxis utilizará automáticamente el procedimiento más adecuado por sí solo para garantizar un rendimiento óptimo.

Los usuarios pueden influir en los procedimientos de solución automática ajustando manualmente los parámetros de control. De esta manera es posible tener un control más estricto sobre el tamaño de paso y precisión. Antes de proceder al cálculo de los parámetros de control, una descripción detallada se da de los procedimientos de solución.

9.5.1 Procedimientos automáticos tamaño del paso

Tanto los procedimientos de avance de carga (máximo nivel y número de pasos) hacen uso de un algoritmo de tamaño de paso automático. El tamaño del paso de la primera carga es elegido de forma automática o manualmente por el usuario, dependiendo del algoritmo aplicado.

9.5.2 Avance a último nivel de carga

El procedimiento tamaño de paso automático se utiliza sobre todo para las fases de cálculo que requieren llegar a un cierto "estado" o nivel de carga. El procedimiento de cálculo termina cuando el estado especificado o el nivel de carga son alcanzados o cuando el problema del suelo es detectado. De forma predeterminada, el número de pasos adicionales se establece en 250.

Una propiedad importante de este procedimiento de cálculo es que el usuario especifica el estado o los valores de la carga total que se va a aplicar. Un cálculo plástico donde se encuentra la entrada de carga a la construcción por etapas o multiplicadores total utiliza este procedimiento de avance a máximo nivel de carga.

Cuando una carga de falla se ha alcanzado, la carga total especificada no se ha aplicado y el siguiente mensaje se muestra en el cuadro de información de registro: el último estado prescrito no se ha alcanzado, cuerpo del suelo colapsado.

9.5.3 Número de pasos de avance de carga

El procedimiento tamaño de paso automático siempre realiza la cantidad de pasos adicionales que se especifiquen. Este algoritmo es, en general, utilizado para las fases de cálculo donde un mecanismo de falla completo debería ser desarrollado durante el análisis. El cálculo continuará hasta que el número de pasos adicionales se haya aplicado, el máximo nivel de cálculo no se detendrá cuando la falla se alcance.

9.5.4 Tiempo de avance automático (consolidación)

Cuando el tipo de cálculo se establece en consolidación entonces el Tiempo de avance automático procede a ser usado. Este procedimiento elegirá automáticamente la medida del tiempo adecuada para un análisis de consolidación. Cuando el cálculo se ejecuta sin problemas, con muy pocas iteraciones por paso, el programa elige un intervalo de tiempo mayor. Cuando el cálculo utiliza muchas iteraciones, debido a una creciente cantidad de plasticidad, el programa se llevará a pequeños intervalos de tiempo.

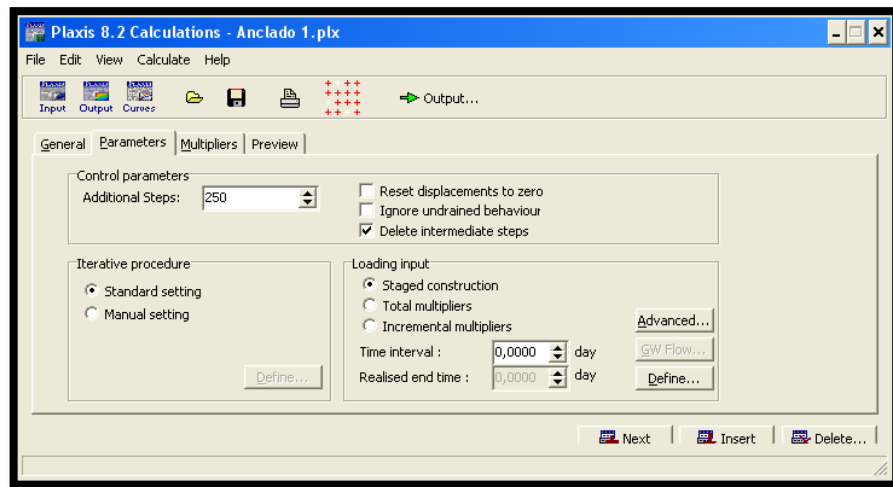
9.6 PARÁMETROS DE CONTROL DE CÁLCULO

La hoja de la pestaña Parámetros se utiliza para definir los parámetros de control de una fase de cálculo en particular y el procedimiento de solución correspondiente. Esta hoja contiene los siguientes elementos:

♣ Pasos adicionales:

Este parámetro especifica el número máximo de pasos de cálculo que se realiza en una fase de cálculo en particular, el parámetro de medidas adicionales se establece en 250, generalmente es suficiente para completar la fase de cálculo.

Figura 57. Hoja de la pestaña Parámetros de la ventana de cálculos.



Fuente: Plaxis 2D.

♣ Restablecer desplazamientos a cero:

Debe ser seleccionada cuando los desplazamientos irrelevantes de los pasos de cálculos anteriores deben ser respetados en el comienzo de la fase de cálculo actual. Esta opción no influye en el campo de esfuerzos y no se puede llevar a cabo en una secuencia de cálculos en la que la opción Actualización de malla se utiliza.

♣ Omitir el comportamiento sin drenaje:

Es útil si se desea excluir temporalmente los efectos del comportamiento sin drenar, como resultado todos los grupos de materiales sin drenar se convierten temporalmente en drenados, la carga gravitatoria de los materiales sin drenar dará un resultado poco realista del exceso de presiones de poros. La opción omitir el comportamiento sin drenar no está disponible para los análisis de consolidación,

ya que un análisis de consolidación no tiene en cuenta el tipo de material (drenado o sin drenar) como se especifica en los conjuntos de datos de materiales.

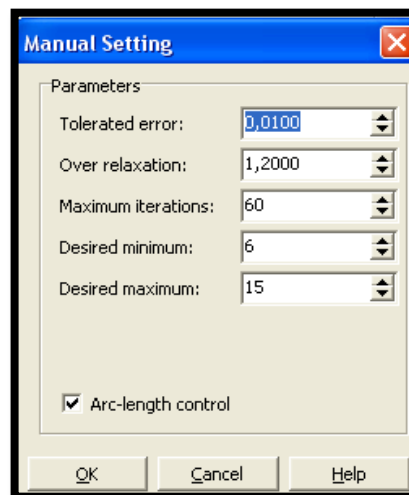
♣ **Eliminar pasos intermedios:**

Esta opción está seleccionada de forma predeterminada para ahorrar espacio en el disco. Como resultado, todas las medidas adicionales de salida en la fase de cálculo, a excepción de la última, se eliminan cuando una fase de cálculo ha terminado con éxito. Si una fase de cálculo no termina con éxito, todas las etapas de cálculo se conservan, independientemente de la selección de la opción Eliminar pasos intermedios. Esto permite una evaluación por etapas de la causa del problema.

9.6.1 Procedimiento iterativo de control de parámetros

Los procedimientos iterativos, en particular los procedimientos de avance de carga, se ven influidos por algunos parámetros de control. Estos parámetros se pueden establecer en el grupo procedimiento iterativo. Plaxis tiene la opción de adoptar una configuración estándar de estos parámetros. En algunas situaciones puede ser necesario cambiar la configuración estándar, en este caso el usuario debe seleccionar el ajuste manual y hacer clic en el botón Definir en el grupo de procedimiento iterativo. Figura 27.

Figura 58. Ventana de procedimiento iterativo de control de parámetros

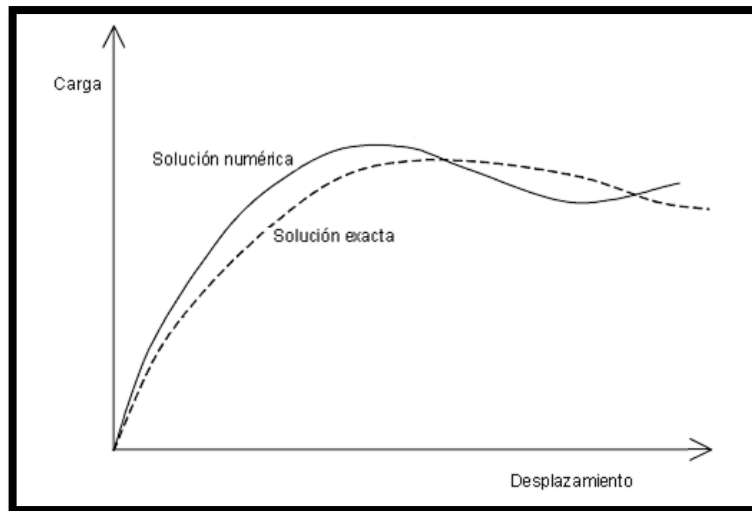


Fuente: Plaxis 2D.

♣ **Error tolerado:**

En cualquier análisis no lineal, donde se utiliza un número finito de pasos de cálculo habrá algunos desvíos de la solución exacta, como se muestra en la figura 28. Dentro de cada paso, el programa de cálculo sigue realizando iteraciones hasta que los errores calculados son menores que el valor especificado. Si el error tolerado se establece en un valor alto, entonces el cálculo será relativamente rápido, pero puede ser inexacto. Si es adoptado un error tolerado bajo el tiempo en la computadora puede llegar a ser excesivo. En general, el ajuste estándar de 0,03 es adecuado para la mayoría de los cálculos.

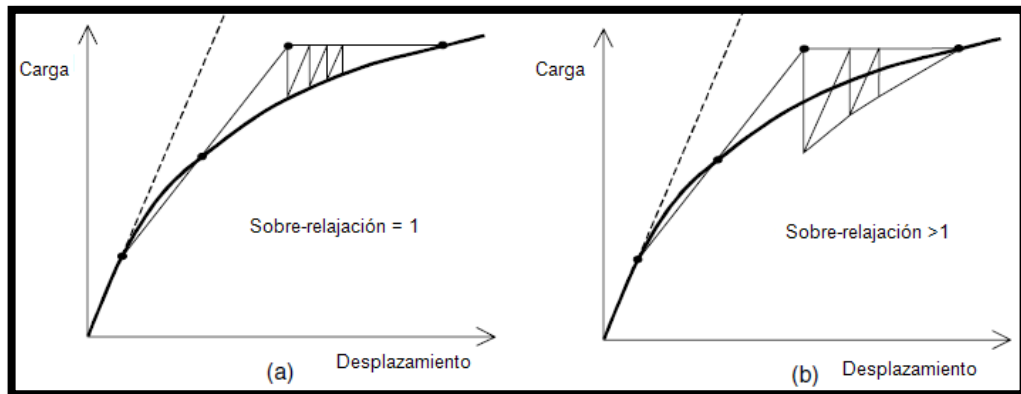
Figura 59. Solución computarizada en comparación con la solución exacta.



♣ **Sobre-relajación:**

Para reducir el número de iteraciones necesarias para la convergencia, Plaxis hace uso de un procedimiento de sobre-relajación, como se indica en la figura 29. Para ángulos de fricción bajos del suelo, por ejemplo $\phi < 20^\circ$, un factor de sobre-relajación de alrededor de 1,5 tiende a optimizar el proceso iterativo, si el suelo contiene un ángulo de fricción más alto, un factor más bajo puede ser requerido. La configuración estándar de 1,2 es aceptable en la mayoría de los cálculos.

Figura 60. Proceso de iteración con sobre-relajación (a) y sin sobre-relajación (b).



♣ **Iteraciones máximas:**

El valor estándar de iteraciones máximas es de 50, pero este número puede ser cambiado en el rango de 1 a 100. Si el número de iteraciones máximas es alcanzado en la etapa final de una fase de cálculo, el resultado final puede ser inexacto. Si este es el caso, entonces el mensaje "iteraciones máxima alcanzadas en el paso final" se muestra en el cuadro de información de registro de la hoja de la pestaña General. Esta situación en ocasiones se produce cuando el proceso de solución no converge.

♣ **Mínimo deseado y máximo deseado:**

Si un tipo de cálculo plástico o un análisis de reducción de Phi-c se seleccionan como tipo de cálculo, Plaxis hace uso de un algoritmo automático de tamaño de paso, este procedimiento se controla con los dos parámetros deseados máximo y mínimo, especificando el mínimo deseado y el número máximo de iteraciones por paso. Los valores estándar de estos parámetros son 4 y 10, respectivamente, pero estos números pueden cambiar dentro del rango de 1 a 100.

♣ **Tiempo del primer paso:**

El tiempo del primer paso es el incremento del tiempo utilizado en el primer paso de un análisis de consolidación, excepto cuando se utiliza como Multiplicadores incrementales de carga de entrada. De forma predeterminada, el paso por primera

vez es igual al paso de tiempo crítico general. Se debe tener cuidado con los pasos de tiempo que son más pequeños que el intervalo de tiempo mínimo recomendado. Como para la mayoría de los procedimientos de integración numérica, aumenta la precisión cuando el paso de tiempo se reduce. Por debajo de un incremento de tiempo en particular la exactitud disminuye rápidamente.

♣ **Extrapolación:**

La extrapolación es un procedimiento numérico, que se utiliza automáticamente, cuando una carga que se aplicó en la etapa de cálculo anterior se continúa en el próximo paso. La solución de desplazamiento en el incremento de carga anterior se puede utilizar como una primera estimación de la solución al incremento de cargas nuevas, esta primera estimación generalmente no es exacta debido al comportamiento del suelo no lineal. Después de la primera iteración, las iteraciones posteriores se basan en la matriz de rigidez elástica. Utilizando la extrapolación el número total de iteraciones necesarias para alcanzar el equilibrio es menor, este procedimiento es particularmente útil cuando el suelo es muy plástico.

9.6.2 Entrada de carga

♣ En los cálculos plásticos, se hace distinción entre los siguientes tipos de entrada de carga, sólo uno de estos tipos puede activarse en cualquier fase de cálculo:

- ✓ Carga en el sentido de cambiar la combinación de carga, estado de esfuerzo, peso, fuerza o rigidez de los elementos, que se activa al cambiar la configuración de la carga y la geometría o la distribución de la presión de poros a través de la construcción por etapas.
- ✓ Cargar en el sentido de aumentar o reducir una combinación predefinida de fuerzas externas, activado mediante el cambio total de multiplicadores.
- ✓ Cargar en el sentido de aumentar o reducir una combinación predefinida de fuerzas externas, activado mediante el cambio multiplicadores incrementales.

♣ Cuando se selecciona la reducción de PHI-c sólo la opción de multiplicadores incrementales está disponible.

♣ En un análisis de la consolidación, las siguientes opciones están disponibles:

- ✓ Consolidación y carga simultánea en el sentido de cambiar la combinación de carga, estado de esfuerzo, peso, fuerza o rigidez de los elementos, que se activa al cambiar la configuración de la carga y la geometría o la distribución de la presión de poros a través de la construcción por etapas.
- ✓ La consolidación sin carga adicional, hasta que todos los excesos de presiones de poros han disminuido por debajo de un cierto valor mínimo, especificado por el parámetro P-stop. De forma predeterminada, P-stop se establece en 1 unidad de esfuerzo, pero este valor puede ser cambiado por el usuario. Tenga en cuenta que el parámetro P-stop es un valor absoluto, que se aplica a presión, así como resistencia a la tensión.
- ✓ Consolidación y carga simultánea en el sentido de aumentar o disminuir una combinación predefinida de fuerzas externas, que se activa mediante el cambio de multiplicadores incrementales. Es necesario especificar un valor para el parámetro de incremento de tiempo en la unidad de tiempo.

9.6.3 Multiplicadores totales

Si la opción multiplicadores totales está seleccionada en el cuadro de carga, el usuario puede especificar los multiplicadores que se aplican a la configuración actual de las cargas externas. La carga real aplicada al final de la fase de cálculo es el producto del valor de la carga de entrada y la carga correspondiente al multiplicador.

9.6.4 Multiplicadores Incrementales

La selección de multiplicadores incrementales en el cuadro de carga permite que el usuario especifique multiplicadores incrementales de carga que se aplican a la configuración actual de las cargas externas. El incremento de carga aplicado

inicialmente en el primer paso de la fase de cálculo es el producto del valor de la entrada de la carga y el multiplicador adicional correspondiente.

9.6.5 Mínima presión de poro (consolidación)

Esta opción de consolidación implica un criterio adicional para dar por terminado el análisis. El cálculo se detiene cuando el exceso de presión de poro máxima absoluta (P_{\max}), es inferior al valor exigido de presión mínima de poros (P-stop).

El grado de consolidación (x), se define en términos de la proporción de la solución final, aunque el término se utiliza a menudo para describir la proporción de las presiones de poro que se hayan disipado. La opción presión de poro mínima puede ser utilizada para especificar el grado final de la consolidación en cualquier análisis.

Un valor adecuado de P-stop puede determinarse a partir de la expresión:

$$P\text{-stop} = P_{\max}(100 - x) \qquad \text{Ecuación 22}$$

9.6.6 Incremento de tiempo, intervalo de tiempo, tiempo de finalización y tiempo estimado de finalización

Un valor distinto de cero para el incremento de tiempo o los parámetros de intervalo de tiempo sólo es relevante cuando un análisis de consolidación se lleva a cabo o cuando se utilizan modelos de materiales dependientes del tiempo, como el modelo de suelo blando Creep.

♣ Incremento de tiempo:

Es el incremento considerado en una sola etapa (primer paso) en la fase de cálculo actual.

♣ Intervalo de tiempo:

Es el período de tiempo total considerado en la fase de cálculo actual.

♣ Tiempo de finalización:

Es el tiempo real acumulado al final de una fase de cálculo terminado.

♣ **Tiempo estimado de finalización:**

Es una estimación del tiempo acumulado al final de una fase que se va a calcular. Este parámetro se calcula a partir del intervalo de tiempo de la fase actual y el tiempo estimado o de finalización de la fase anterior.

9.7 CONSTRUCCION POR ETAPAS

Para llevar a cabo un cálculo de la construcción por etapas, primero es necesario crear un modelo de geometría que incluye todos los objetos que se van a utilizar en el cálculo. Los objetos que no son necesarios en el inicio del cálculo deben ser desactivados en la configuración de la geometría inicial al final del programa de entrada.

Un análisis de construcción por etapas se puede ejecutar en un cálculo plástico, así como en un análisis de consolidación. En la hoja de la pestaña Parámetros la opción de Construcción por etapas se puede seleccionar en el cuadro de entrada de carga. Posteriormente al hacer clic en el botón Definir, el programa de entrada se inicia y aparece la ventana de la construcción por etapas.

Después que la nueva situación se ha definido, el botón Actualizar (update) debe ser presionado para almacenar la información y volver al programa de cálculos. Los cambios en la configuración de la geometría o las condiciones del agua generalmente causan importantes fuerzas fuera de equilibrio. Estas fuerzas son paso a paso aplicadas a la malla de elementos finitos usando un procedimiento de adelanto a máximo nivel de carga.

9.7.1 Cambio de configuración de la geometría

Al igual que en la configuración de la geometría inicial, los grupos u objetos estructurales pueden ser reactivados o desactivados para simular un proceso de construcción o excavación. Esto se puede hacer haciendo clic en el objeto en el modelo de la geometría. Al hacer clic una vez sobre un objeto, el objeto cambia de activo a inactivo, y viceversa. Si más de un objeto está en una línea geométrica,

aparece una ventana de selección de la cual el objeto deseado puede ser seleccionado.

Al hacer doble clic en un objeto estructural, la ventana de propiedades correspondiente aparece y las propiedades se pueden cambiar. En la ventana de selección que aparece después de hacer doble clic en un cluster del suelo, puede cambiar las propiedades del material o aplicar una deformación volumétrica para el grupo seleccionado.

9.7.2 Activar y desactivar grupos u objetos estructurales

Grupos de suelos y objetos estructurales pueden ser activados o desactivados haciendo clic una vez sobre el grupo o los objetos estructurales en el modelo de la geometría. Los anclajes sólo pueden estar activos si al menos uno de los grupos o las placas del suelo a los que se conectan también están presentes, de lo contrario el programa de cálculos se desactiva automáticamente.

♣ Las siguientes reglas aplican para los elementos que se encuentran inactivos:

- ✓ El peso, la rigidez y la fuerza, no se tienen en cuenta.
- ✓ Todas las tensiones se ponen a cero.
- ✓ Todos los nodos inactivos tendrán desplazamientos cero.
- ✓ Los límites que se derivan de la supresión de elementos son libres.
- ✓ Las presiones de poros de estado estacionario siempre se tienen en cuenta, esto significa que Plaxis generará automáticamente la presión adecuada de agua en los límites sumergidos causada por la eliminación de elementos.
- ✓ Las cargas externas o desplazamientos prescritos que actúan sobre una parte de la geometría inactiva no se tendrán en cuenta.

♣ Para los elementos que han estado inactivos y que son re-activados en un cálculo determinado, aplican las siguientes reglas:

- ✓ La rigidez y la fuerza se tendrán en cuenta desde el principio es decir, el primer paso de la fase de cálculo.
- ✓ El peso, en principio, se tiene en cuenta desde el comienzo de la fase de cálculo.
- ✓ Los esfuerzos se desarrollan a partir de cero.
- ✓ Si un elemento es reactivado y el tipo de material del conjunto de datos del material correspondiente se ha establecido sin drenaje, entonces el elemento se comportará temporalmente drenado en la fase en la que se activó.

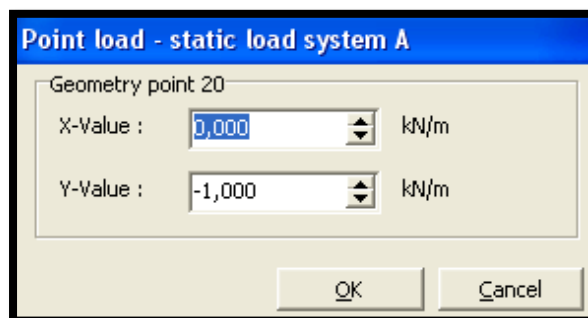
9.7.3 Activación o cambio de cargas

Las cargas que se crearon en la entrada de la geometría se desactivan en la situación inicial, pero se pueden reactivar mediante un proceso de construcción por etapas. Como es el caso de objetos estructurales, las cargas se pueden activar o desactivar haciendo clic una vez sobre la carga en la geometría del modelo.

♣ Valor de entrada de una carga:

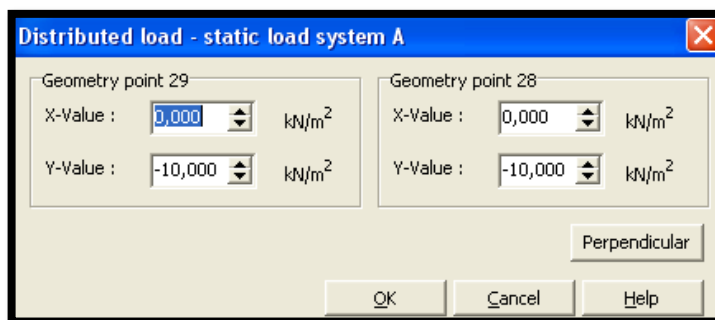
De forma predeterminada, el valor de la entrada de una carga es el valor que figura en la creación de la geometría y puede ser cambiado en cada fase del cálculo en el marco de la construcción por etapas. Esto se puede hacer haciendo doble clic en la carga de la geometría, como resultado, aparece una ventana de carga en la que los valores de entrada de las cargas se pueden cambiar. Después de hacer doble clic en un punto de carga aparece una ventana en la que los componentes X y Y se pueden introducir directamente, figura 30. Después de hacer doble clic en una carga distribuida aparece una ventana en la que los componentes X y Y se pueden introducir directamente en los dos puntos de la geometría correspondientes, figura 31.

Figura 61. Entrada de la ventana para una carga de punto.



Fuente: Plaxis 2D.

Figura 62. Entrada de la ventana para una carga distribuida.



Fuente: Plaxis 2D.

El botón Perpendicular se puede utilizar para asegurarse de que la carga distribuida sea perpendicular a la línea de la geometría correspondiente.

♣ **Multiplicador de carga:**

El valor real de la carga que se aplica durante el cálculo se determina por el producto del valor de entrada de la carga y la carga correspondiente al multiplicador ($\sum MloadA$ o $\sum MloadB$). El multiplicador $\sum MloadA$ se utiliza para aumentar o disminuir a nivel global todas las cargas del sistema de carga A, mientras que $\sum MloadB$ se utiliza para cambiar todas las cargas del sistema B.

9.7.4 Aplicación de los desplazamientos a utilizar

Los desplazamientos prescritos que se crearon en la entrada de la geometría no se aplican automáticamente en los cálculos, pero pueden ser activados por medio de un proceso de construcción por etapas. Cuando los desplazamientos prescritos

han sido definidos y están inactivos, los nodos son totalmente libres. Al activar desplazamientos prescritos, el valor real del desplazamiento que se aplica durante el cálculo se determina por el valor de la entrada de los desplazamientos prescritos y la carga correspondiente al multiplicador ΣM_{disp} .

♣ **Valor de entrada de los desplazamientos prescritos:**

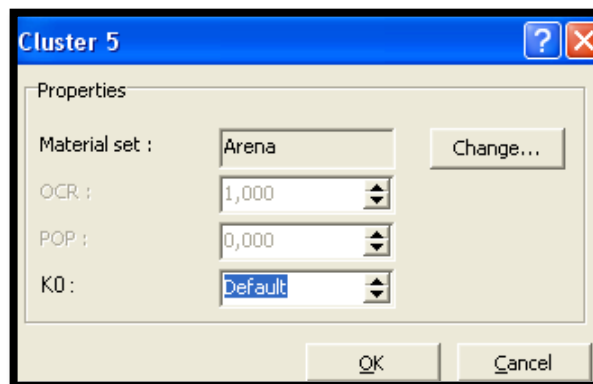
De forma predeterminada, el valor de entrada de un desplazamiento prescrito es el valor dado en la creación de la geometría. El valor de entrada de la carga puede ser cambiado en cada fase de cálculo utilizando el procedimiento de construcción por etapas. Esto se puede hacer haciendo doble clic en el desplazamiento prescrito en la geometría.

9.7.5 Reasignación de conjuntos de datos de materiales

Se puede utilizar para simular el cambio de las propiedades del material con el tiempo en las diferentes etapas de la construcción, para simular los procesos de mejora del suelo. En lugar de cambiar los datos fijados del material, otro conjunto de datos debe ser asignado al grupo u objeto. Esto garantiza la consistencia en la base de datos del material.

Al hacer doble clic sobre un grupo o un objeto estructural del suelo en el modelo de la geometría, la ventana de propiedades aparece en la cual los conjuntos de datos del material de los objetos se puede cambiar.

Figura 63. Ventana de propiedades del suelo.



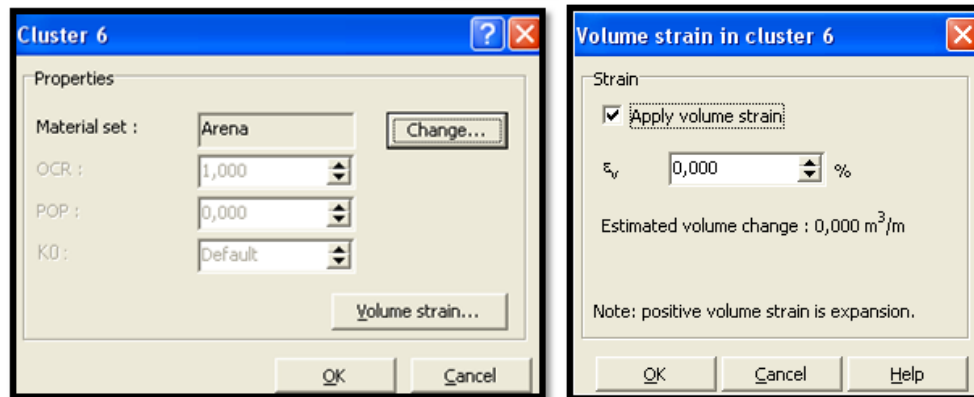
Fuente: Plaxis 2D.

Si un cambio en el conjunto de datos de una placa se considera que es importante tenga en cuenta que un cambio en la relación de la IE / EA va a cambiar el espesor equivalente (d_{eq}), por esta razón, si las propiedades del material de una placa se cambian durante el análisis debe señalarse que la proporción de IE / EA debe permanecer sin cambios.

9.7.6 Aplicación de una deformación volumétrica al volumen de un cluster

Esta opción puede utilizarse para simular los procesos mecánicos que dan lugar a las deformaciones volumétricas en el suelo. En la ventana de propiedades que aparece después de hacer doble clic en un cluster del suelo, puede pulsar el botón de deformación volumétrica. La estimación de la variación en el volumen total se da en unidad de volumen por unidad de ancho en la dirección fuera del plano. Un valor positivo de la deformación volumétrica representa un aumento del volumen de expansión, mientras que un valor negativo representa una disminución de volumen.

Figura 64. Ventana de deformación volumétrica.



Fuente: Plaxis 2D.

9.7.7 Pre-esfuerzo de los anclajes

El pre-esfuerzo de los anclajes se puede activar desde el modo de configuración de la geometría de la ventana de la construcción por etapas. Por tanto, debe hacer doble clic en el ancla que desee. Una fuerza de pre-esfuerzo se debe administrar como una fuerza por unidad de ancho en la dirección fuera del plano. Tenga en cuenta que la tensión se considera positiva y la compresión negativa.

Para desactivar una fuerza de pre-esfuerzo introducida previamente, el ajuste de parámetros de la fuerza de pre-esfuerzo debe ser seleccionado en lugar de establecer la fuerza de pre-esfuerzo a cero. El pre-esfuerzo del anclaje se indica con una 'p'.

9.7.8 Cambio de distribución de presión de agua

Ejemplos de problemas que pueden ser analizados mediante esta opción incluyen el arreglo de las capas de suelo blando, debido a una disminución de la capa freática, el desarrollo de la deformación y la fuerza de las paredes o revestimientos de túneles, debido a la excavación y drenaje, y la estabilidad de un terraplén del río después de un aumento del nivel de agua externo.

Haga clic en el lado izquierdo del "interruptor" en la barra de herramientas para mostrar el modo del agua y las condiciones para cambiar la distribución de la presión del agua.

La presión del agua se pueden generar haciendo clic en el botón Generar presiones de agua en la barra de herramientas o seleccionando la opción de presiones de agua en el menú Generar.

La columna de agua de la lista de cálculo muestra ahora el número de la fase actual para indicar que las condiciones del agua han cambiado en esta fase. Este número de la fase volverá a aparecer en fases posteriores de cálculo, siempre y cuando la presión del agua no se regenere.

♣ Excavación y drenaje:

Si el drenaje de una excavación es considerado y el fondo de la excavación no está completamente "cerrado" por medio de una capa impermeable o inyectada, el flujo de las aguas subterráneas se producirá. El flujo de agua subterránea influye en la distribución de la presión de poros en el suelo circundante.

Las condiciones de contorno para el cálculo de flujo de agua subterránea de esta situación se pueden establecer mediante el cambio del nivel freático general, que

representa el primer nivel freático en el límite exterior de la geometría y la tabla de disminución de agua dentro de la excavación. Es probable que el nivel freático general este, compuesto de múltiples puntos.

La línea freática general no tiene un significado dentro de grupos activos del suelo, ya que la distribución de la presión de poros del suelo dentro de grupos activos se computa en el cálculo del flujo de agua subterránea de las condiciones de contorno y la permeabilidad del suelo.

9.7.9 Construcción por etapas con $\Sigma M_{stage} < 1$

El menor valor permitido de entrada es de 0.001, si ΣM_{stage} es inferior a este valor, la carga se considera que es insignificante y no se llevará a cabo los cálculos. Un valor mayor de 1,0 no se usa normalmente. Al entrar en el valor por defecto de 1,0, la construcción por etapas procedimiento se realiza de forma normal.

Se debe tener cuidado con un nivel máximo de $\Sigma M_{stage} < 1$, ya que esto conduce a un resultado fuera de la fuerza de equilibrio al final de la fase de cálculo. Esta fase de cálculo siempre debe ser seguida por otro cálculo de la construcción por etapas. Si ΣM_{stage} no se ha especificado por el usuario, el valor por defecto de 1.0 es adoptado siempre.

9.7.10 Cálculo no finalizado de la construcción por etapas

Si un cálculo no ha finalizado correctamente, es decir, el multiplicador ΣM_{stage} es menor que el nivel final deseado al final de un análisis de la construcción por etapas, aparece una advertencia en el cuadro de información de registro. Hay dos posibles razones para una etapa de construcción sin terminar.

♣ **La falla de la estructura del suelo se ha producido durante el cálculo:** Esto significa que no es posible terminar la etapa de construcción. Tenga en cuenta que la fuerza fuera de equilibrio está todavía en parte sin resolver, por lo que otros cálculos a partir de la última fase no tienen sentido.

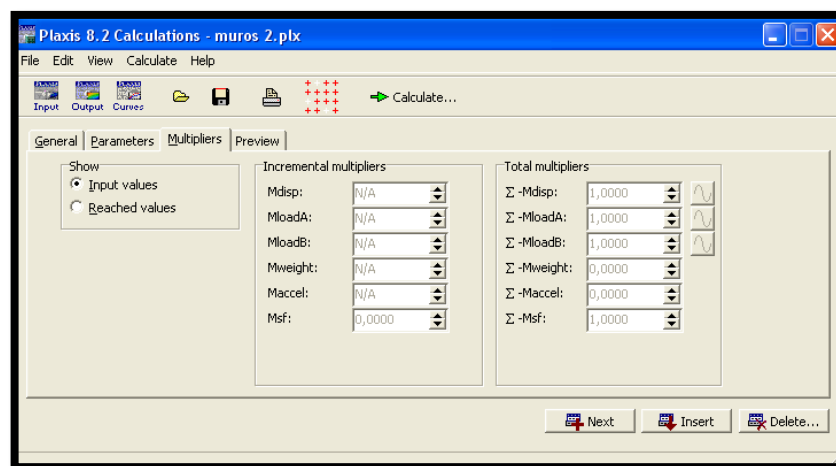
♣ **El número máximo de pasos de carga fue insuficiente:**

En este caso, la etapa de construcción se debe continuar llevando a cabo otros cálculos de la construcción por etapas que comenzaron directamente sin cambiar la configuración de la geometría o la presión del agua. Por otra parte, la fase se puede calcular con un mayor número de pasos adicionales.

9.8 MULTIPLICADORES DE CARGA

Se distingue entre los multiplicadores totales y multiplicadores incrementales. Los multiplicadores incrementales representan el incremento de la carga de una etapa de cálculo individual, mientras que los multiplicadores totales representan el nivel total de la carga en una etapa de cálculo o fase particular. La forma en que los diversos multiplicadores se utilizan depende de la carga de entrada seleccionada en la hoja de la pestaña Parámetros. Tanto los multiplicadores incrementales y los multiplicadores totales para una determinada fase de cálculo se muestran en el sub-menú Multiplicadores. Todos los multiplicadores incrementales se denotan por M. Considerando que todos los multiplicadores totales se denotan por ΣM . Un multiplicador no tiene una unidad asociada a ella, ya que es sólo un factor. Las descripciones de varios multiplicadores de carga son las siguientes.

Figura 65. Multiplicadores hoja de la ficha de la ventana de cálculos



Fuente: Plaxis 2D.

9.8.1 Multiplicadores de carga estándar

♣ **Mdisp, Σ Mdisp:**

El valor de Σ Mdisp puede utilizarse para aumentar o disminuir globalmente el desplazamiento prescrito. En los cálculos donde se establece la entrada de carga de multiplicadores incrementales, Mdisp se utiliza para especificar un incremento global de los desplazamientos prescritos en la etapa de cálculo.

♣ **MloadA, Σ MloadA, MloadB, Σ MloadB:**

Los valores de Σ MloadA y Σ MloadB pueden utilizarse para aumentar o disminuir globalmente la carga aplicada. En los cálculos en la entrada de carga se establecen multiplicadores incrementales, MloadA y / o MloadB, se utilizan para especificar un incremento global de los sistemas de carga correspondiente de la etapa de cálculo.

♣ **Mweight, Σ Mweight:**

Los multiplicadores Mweight y Σ Mweight controlan la proporción de la gravedad normal aplicada en el análisis y por lo tanto la porción de los pesos de materiales (suelo, agua y estructuras) como se especifica en el programa de entrada. La proporción total de los pesos de material aplicado en el cálculo está dada por el parámetro Σ Mweight. En los cálculos donde se establece la entrada de carga de multiplicadores incrementales, Mweight se utiliza para especificar el incremento de peso en la etapa de cálculo en primer lugar.

♣ **Maccel, Σ Maccel:**

Estos multiplicadores controlan la magnitud de las fuerzas pseudo-estáticas. La magnitud total de la aceleración aplicada durante el cálculo es el producto de los valores de entrada de los componentes de la aceleración y el parámetro Σ Maccel. Inicialmente, el valor de Σ Maccel se establece en cero. En los cálculos donde se establece la entrada de carga de multiplicadores incrementales, Maccel se puede

utilizar para especificar el incremento de la aceleración de la primera etapa del cálculo.

♣ **Msf, Σ Msf:**

Estos multiplicadores se asocian con la opción de reducción de Phi-c en Plaxis para el cálculo de factores de seguridad. Σ Msf está ajustado a 1,0 en el inicio de un cálculo para establecer todas las concentraciones de material a sus valores sin reducción. Msf se utiliza para especificar el incremento de la reducción de la fuerza de la primera etapa de cálculo. Este incremento está por defecto a 0.1.

♣ **Valores de entrada y los valores alcanzados:**

Los valores de entrada de los multiplicadores pueden diferir de los valores que se alcanzaron en realidad después de la operación. Este puede ser el caso si la falla de la estructura del suelo se produce. Los botones en el grupo Mostrar se puede utilizar para ver los valores de entrada o los valores alcanzados. Si la opción valores alcanzados se selecciona otro cuadro de grupo aparece en el cual algunos multiplicadores y otros parámetros de cálculo se muestran.

9.8.2 Otros multiplicadores y parámetros de cálculo

♣ **Σ Mstage:**

Este multiplicador total da la proporción de una fase de construcción que se ha completado. Sin intervención del usuario, el valor de Σ Mstage siempre es cero en el inicio de un análisis de la construcción por etapas y al final por lo general será de 1,0.

♣ **Σ Marea:**

Este parámetro indica la proporción del volumen total de las agrupaciones del suelo en el modelo de la geometría que está activo actualmente. Si todos los grupos del suelo están activas a continuación Σ Marea tiene un valor de 1.0.

♣ **Rigidez:**

El parámetro de rigidez da una indicación de la pérdida de rigidez que se produce debido a la plasticidad del material. El parámetro es un número único, de 1,0 cuando la estructura es totalmente elástica y reduce en magnitud como se desarrolla la plasticidad. Es posible que este parámetro tenga valores negativos, si se produce ablandamiento.

♣ **Fuerza-X, Fuerza-Y:**

Estos parámetros indican las fuerzas correspondientes a los desplazamientos prescritos diferentes de cero. En los modelos de deformación plana, la fuerza-X y la fuerza-Y se expresan en la unidad de fuerza por unidad de ancho en la dirección fuera del plano. La fuerza-X y la fuerza-Y son el valor de la fuerza total en las direcciones X y Y, respectivamente, aplicado a los desplazamientos prescritos diferentes de cero.

♣ **Pmax:**

El parámetro Pmax se asocia con el comportamiento de materiales sin drenar y representa el exceso de presión de poros máxima absoluta en la malla, expresada en la unidad de esfuerzo. Durante la carga sin drenar en un cálculo plástico Pmax generalmente aumenta, mientras que durante un análisis de la consolidación Pmax disminuye.

9.9 REDUCCION PHI-C

Es una opción disponible en Plaxis para calcular los factores de seguridad. Esta opción puede ser seleccionada como un tipo de cálculo independiente en la hoja de la pestaña General. En el enfoque de reducción de Phi-c los parámetros de resistencia $\tan\phi$ y C del suelo se reducen sucesivamente hasta que la falla de la estructura se produce. La fuerza de las interfaces, si se utiliza, se reduce en la misma forma.

Cuando se utiliza la reducción de Phi-C en combinación con los modelos avanzados del suelo, estos modelos realmente se comportan como un modelo

estándar de Mohr-Coulomb, ya que el comportamiento de la rigidez con el esfuerzo y los efectos que dependen del endurecimiento están excluidos.

9.10 ANÁLISIS DE ACTUALIZACION DE MALLA

Las aplicaciones típicas del análisis de actualización de malla puede ser necesario incluirlas en el análisis de las estructuras de suelo reforzado, el análisis de los grandes problemas de fallas en alta mar y el estudio de problemas donde los suelos son blandos y se presentan grandes deformaciones.

Es necesario actualizar la malla de elementos finitos antes del cálculo, esto se hace automáticamente en Plaxis cuando la opción de Actualización de malla se selecciona.

♣ Procedimientos de Cálculo:

Para llevar a cabo un análisis de actualización de malla se debe presionar el botón Avanzadas en el cuadro Tipo de Cálculo en la hoja de la pestaña General. Como resultado, en la ventana de Configuración avanzada aparece la opción de Actualización de malla que puede ser seleccionada y los cálculos se realizan utilizando procedimientos de iteración similares a las opciones convencionales de plasticidad. Debido al efecto de grandes deformaciones, la matriz de rigidez es siempre actualizada en el comienzo de una fase de carga.

♣ Consideraciones prácticas:

Se recomienda que cuando un nuevo proyecto este en estudio un cálculo convencional de plasticidad se lleve a cabo antes de un análisis de actualización de malla. Si el usuario está en duda sobre si el análisis de actualización de malla es necesario entonces el problema sólo puede resolverse mediante la realización de los análisis de actualización de malla y comparar los resultados con el análisis convencional equivalente.

El cambio de un cálculo plástico normal o de un análisis de consolidación a un análisis de actualización de malla sólo es válido cuando los desplazamientos se

restablecen a cero, debido a que el análisis de actualización de malla debe partir de una geometría no deformada. El cambio de un cálculo actualizado de malla a un cálculo plástico normal o un análisis de consolidación no es válido.

9.11 VISTA PREVIA DE UNA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN

Cuando una construcción por etapas está totalmente definida, una vista previa de la situación se presenta en la hoja de la pestaña Vista previa de la ventana de cálculos, esto permite un control visual directo de las etapas de construcción antes de que el proceso de cálculo se haya iniciado. Esta opción sólo está disponible si la fase de cálculo se ha definido en el modo de construcción por etapas.

9.12 PUNTOS DE SELECCIÓN DE CURVAS

Después de que las fases de cálculo se han definido y antes de que el proceso de cálculo se haya iniciado, algunos puntos pueden ser seleccionados por el usuario para la generación de las curvas de carga-desplazamiento o trayectorias de esfuerzos. La generación de estas curvas se basa en la información almacenada, por ello no es posible generar las curvas de los puntos que no hayan sido preseleccionados.

Además de los nodos, los puntos de esfuerzo pueden ser seleccionados para la generación de trayectorias de esfuerzos, el recorrido del esfuerzo y los diagramas de esfuerzo-deformación. Hasta 10 puntos de esfuerzo puede ser seleccionado para la generación de las curvas de esfuerzo-deformación. Para anular la selección de todos los nodos, puede hacer clic en el botón Deseleccionar, todos los nodos o puntos de esfuerzo.

Cuando todos los nodos que desee y los puntos de esfuerzo han sido seleccionados, en el botón Actualizar (Update) en la esquina superior derecha debe ser presionado para almacenar la información y volver al programa de cálculos.

9.13 EJECUCIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO

Cuando las fases de cálculo han sido definidas y los puntos para las curvas han sido seleccionados, a continuación el proceso de cálculo puede ser ejecutado. Antes de iniciar el proceso, sin embargo, es útil comprobar la lista de las fases de cálculo. Una fase de cálculo que se ha seleccionado para su ejecución se indica con una flecha azul (➡) delante de la línea. Las fases de cálculo que se han terminado con éxito se indican con una marca de verificación verde (✓), mientras que las fases que no han finalizado correctamente se indican con una cruz roja (X). Para seleccionar o anular la selección de una fase de cálculo para su ejecución, debe hacer doble clic en la línea correspondiente. Como alternativa, el botón derecho del ratón se puede presionar en la línea correspondiente y la opción Marcar o Desmarcar cálculo se debe seleccionar en el menú del cursor.

9.13.1 Puesta en marcha del proceso de cálculo

El proceso de cálculo se puede iniciar pulsando el botón Calcular en la barra de herramientas. Como resultado, el programa realiza una primera comprobación en el orden y la coherencia de las fases de cálculo. Además, la primera fase de cálculo en ser ejecutada se determina y todas las fases de cálculo seleccionadas en la lista son posteriormente ejecutadas.

9.13.2 Múltiples proyectos

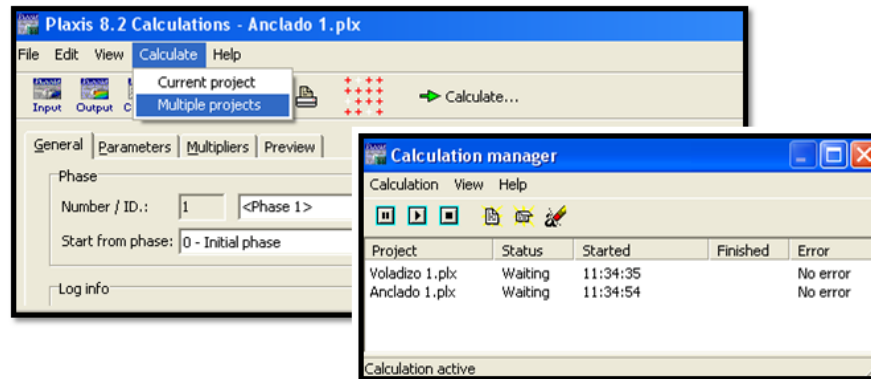
Además de la ejecución del proceso de cálculo del proyecto actual, es posible seleccionar más proyectos para ser ejecutados posteriormente. Esto se puede hacer seleccionando la opción Múltiples proyectos en el menú Calcular. Como resultado, el solicitante de archivo aparece, desde el cual el proyecto deseado puede ser seleccionado. Todos los proyectos en que los cálculos deben ser ejecutados aparecen en la ventana del administrador de cálculo.

9.13.3 El administrador de cálculo

La ventana del administrador de cálculo se puede abrir seleccionando la opción correspondiente en el menú Ver. La ventana muestra el estado de todos los

proyectos en que los cálculos se han ejecutado o se van a ejecutar. Un ejemplo se presenta en la figura 35.

Figura 66. Ventana del administrador de cálculos para múltiples proyectos.



Fuente: Plaxis 2D.

9.13.4 Cancelar un cálculo

Si el usuario decide cancelar un cálculo, esto se puede hacer pulsando el botón Cancelar de la ventana que muestra información sobre el proceso de iteración de la fase de cálculo actual.

9.14 SELECCIÓN DE LAS FASES DE CÁLCULO DE SALIDA

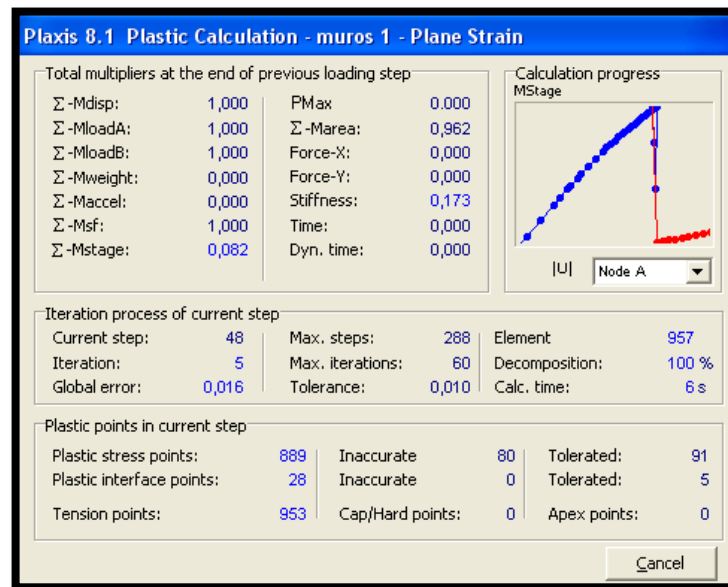
Después de que el proceso de cálculo ha terminado, la lista de cálculo se actualiza. Al seleccionar una fase de cálculo terminada y haciendo clic en el botón Salida, los resultados de la fase seleccionada se visualizan directamente en el programa de salida.

El usuario puede seleccionar múltiples fases de cálculo a la vez manteniendo pulsada la tecla Shif. Cuando posteriormente hace clic en el botón Salida, los resultados de todas las fases seleccionadas se muestran en ventanas separadas. De esta manera, los resultados de fases de cálculo diferentes se pueden comparar fácilmente.

9.15 SALIDA DURANTE LOS CÁLCULOS

Durante un análisis de deformación de elementos finitos, la información sobre el proceso de iteración se presenta en una ventana independiente. La información comprende los valores actuales de los multiplicadores de la carga total y otros parámetros para el cálculo de la fase de ejecución.

Figura 67. Ventana de cálculo.



Fuente: Plaxis 2D.

9.15.1 Curva de carga-desplazamiento

Durante la fase de cálculo una pequeña curva de carga-desplazamiento se presenta desde la cual el estado de la geometría entre totalmente elástica y la falla se puede estimar.

9.15.2 Paso y numero de iteraciones

El valor máximo en el número de pasos indica el último paso de la fase de cálculo actual de acuerdo con el parámetro de pasos adicionales. El valor máximo de iteraciones corresponde con el parámetro máximo de iteraciones en la configuración del procedimiento iterativo.

9.15.3 Error global

El error global es una medida de los errores de equilibrio global en la etapa de cálculo. Estos errores tienden a reducir cuando el número de iteraciones aumenta.

9.15.4 Tolerancia

La tolerancia es el máximo error global de equilibrio que está permitido. El valor de la tolerancia corresponde con el valor del error tolerado en la configuración del procedimiento iterativo.

9.15.5 Puntos de esfuerzo plástico

Este es el número total de puntos de esfuerzo en los elementos del suelo que están en un estado plástico. Además de los puntos donde el círculo de Mohr toca la envolvente de falla de Coulomb, los puntos debido a la plasticidad de endurecimiento están incluidos.

9.15.6 Puntos plásticos de la interfaz

Esto le da el número total de puntos de esfuerzo que se han convertido en plásticos en los elementos de interfaz.

9.15.7 Puntos de esfuerzo inexacto

Los valores inexactos dan el número de puntos de esfuerzo plástico en los elementos del suelo y elementos de la interfaz, para los cuales el error local supera el error tolerado.

9.15.8 Número tolerado de puntos de esfuerzo inexacto

Los valores tolerados son el número máximo de puntos de esfuerzo inexacto que están permitidos en elementos del suelo y elementos de la interfaz. El proceso de iteración por lo menos continua mientras el número de puntos de esfuerzo inexacto sea mayor que el número tolerado.

9.15.9 Puntos tensión

Un punto de tensión es un punto de esfuerzo que falla a tensión. Estos puntos se desarrollan cuando la tensión de corte se utiliza en algunos de los conjuntos de material.

9.15.10 Puntos Cap / Hard

Un punto Cap se produce si el Modelo de endurecimiento del suelo o el Modelo de suelo blando se utiliza y el estado de esfuerzo en un punto es equivalente al esfuerzo de pre-consolidación, es decir, el nivel de esfuerzo máximo ha sido previamente alcanzado ($OCR \leq 1.0$). Un punto Hard se produce si el Modelo de endurecimiento del suelo es utilizado y el estado de esfuerzo en un punto corresponde con el ángulo de rozamiento que ya ha sido alcanzado.

9.15.11 Puntos pico

Estos son puntos plásticos especiales donde el esfuerzo cortante permisible es cero. El procedimiento iterativo tiende a ser lento cuando el número de puntos plásticos pico es grande. Los puntos pico pueden ser evitados mediante la selección de la opción Tensión de corte en los conjuntos de datos de materiales para el suelo y las interfaces.

9.16 AJUSTES DE LOS DATOS DE ENTRADA ENTRE LOS CÁLCULOS

Se debe tener cuidado con el cambio de datos de entrada entre las fases de cálculo, en general esto no se debe hacer ya que deja de ser coherente. Hay otras maneras de cambiar los datos entre las fases de cálculo en lugar de cambiar los datos de entrada en sí.

Al cambiar la geometría, en el programa se restablecerán todos los datos relacionados con las etapas de construcción para la configuración inicial. Esto se hace porque, en general, después de un cambio de la geometría la información de la construcción por etapas deja de ser válida. Al hacerlo, la malla y las condiciones iniciales tienen que ser regeneradas. En el programa de cálculo, el usuario tiene

que redefinir las etapas de construcción y el proceso de cálculo debe comenzar desde la primera fase.

Cuando la malla de elementos finitos se regenera sin necesidad de cambiar la geometría, toda la información de cálculo se mantiene. Tenga en cuenta que en este caso sigue siendo necesario regenerar las condiciones iniciales para reiniciar el cálculo de la primera fase.

9.17 CONTROL AUTOMATICO DE ERRORES

Dos indicadores de error se utilizan para este propósito. Uno de ellos se basa en una medida del error de equilibrio global y el otro es un control del error local. Los valores de estos dos indicadores deben estar por debajo de los límites predeterminados para terminar el procedimiento iterativo. Estos dos indicadores de error y los procedimientos de comprobación de error asociado se describen a continuación.

9.17.1 Control del error global

El parámetro de comprobación de errores globales que se utiliza en Plaxis se relaciona con la suma de las magnitudes de las fuerzas fuera de equilibrio en los nodos, este término se refiere a la diferencia entre las cargas externas y las fuerzas que están en equilibrio con los esfuerzos actuales.

9.17.2 Control del error local:

Los errores locales se refieren a los errores en cada punto de esfuerzo individual. Para entender el procedimiento de comprobación de errores locales utilizados en Plaxis es necesario considerar los cambios del esfuerzo que se producen en un punto de esfuerzo típico durante el proceso iterativo.

9.17.3 Terminación de iteraciones:

Para terminar las iteraciones en la fase actual de carga, Plaxis realiza automáticamente algunos controles de error.

10 DATOS DE SALIDA DESPUES DEL PROCESO

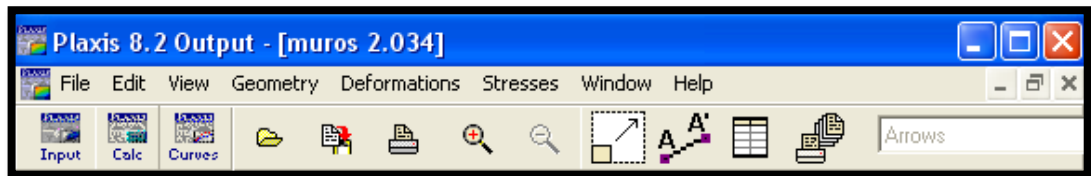
Las principales cantidades de un resultado de cálculo de elementos finitos son los desplazamientos en los nodos y los esfuerzos en los puntos de tensión. Además, cuando un modelo de elementos finitos consiste en elementos estructurales, las fuerzas estructurales se calculan en estos elementos. Existe una gama amplia de ayudas en Plaxis para mostrar los resultados de un análisis de elementos finitos. El conjunto de ayudas pueden ser seleccionadas desde el programa de salida que se describe a continuación.

10.1 PROGRAMA DE SALIDA



El programa de salida contiene todas las ayudas para ver los resultados generados de la lista de datos de entrada y cálculos de elementos finitos. Al iniciar el programa de salida, el usuario tiene que seleccionar el modelo y la fase de cálculo adecuado o el número de paso para que los resultados puedan ser vistos. Después de esta selección una primera ventana de la salida se abre, mostrando la malla deformada.

Figura 68. Barra de herramientas en la ventana principal del programa de salida.



Fuente: Plaxis 2D.

10.1.1 Menú de salida

Este menú contiene todas las ayudas de operación del programa de salida. Los elementos del menú pueden cambiar dependiendo de la forma activa de salida.

10.1.2 Formas de salida

Estas son las ventanas en las que se muestra una salida en particular. Las formas de salida pueden contener gráficos del modelo completo, gráficos de los objetos especiales del modelo, o las tablas de datos de salida. Múltiples formas de salida se pueden abrir simultáneamente.

10.1.3 Barra de herramientas

La barra de herramientas contiene botones que se pueden utilizar como acceso directo a las ayudas del menú. Además, un cuadro combinado está incluido que se puede utilizar para seleccionar directamente el tipo de presentación de las cantidades.

10.1.4 Estado de línea

La barra de estado contiene información sobre el tipo de análisis y la posición del cursor en el modelo.

10.2 EL MENÚ DE SALIDA

El menú principal del programa de salida contiene sub-menús desplegables que cubren la mayoría de las opciones para el manejo de archivos, la transferencia de datos, visualización de gráficos y tablas. El tipo principal de los resultados de un cálculo de elementos finitos consta de esfuerzos y deformaciones. Por lo tanto, estos dos aspectos constituyen la mayor parte del menú de salida.

Cuando se muestra un modelo de la geometría completa, el menú total consta de los sub-menús: Archivo, Editar, Ver, Geometría, deformaciones, esfuerzos y la ventana Ayuda. El menú depende del tipo de datos que se presentan en la forma de salida.

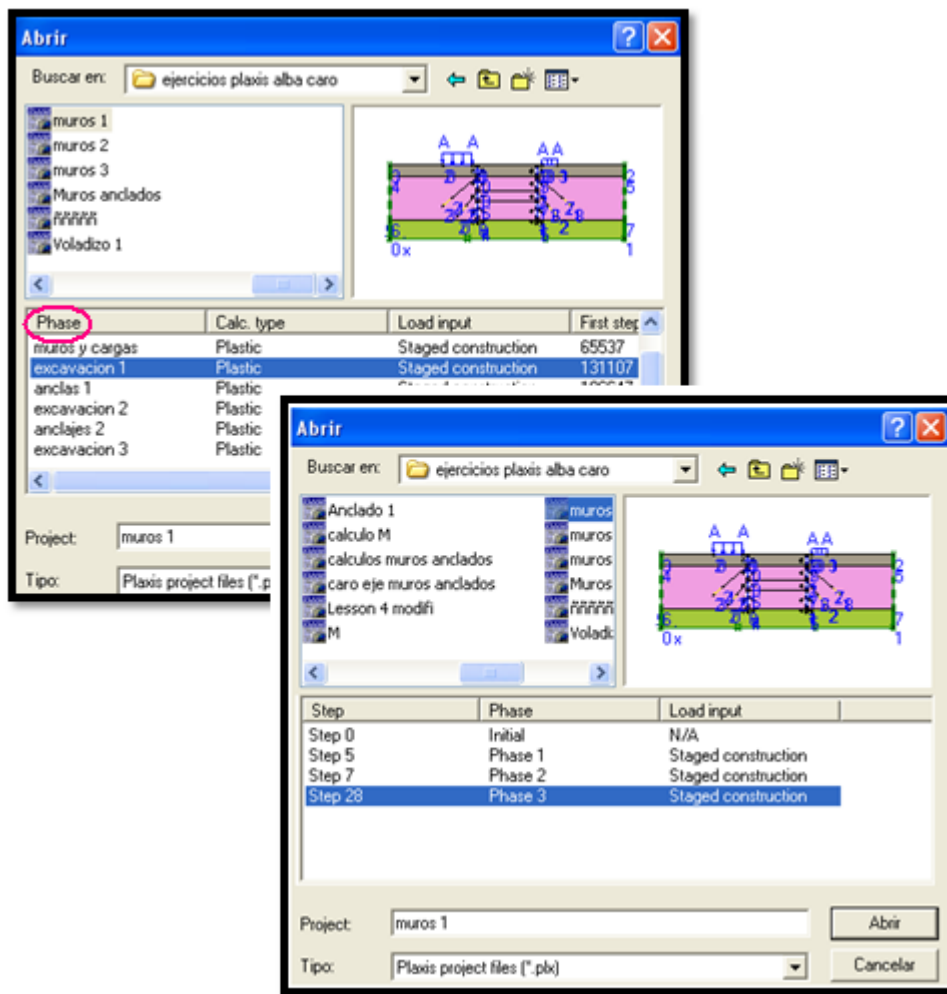
10.3 SELECCIÓN DE PASOS DE SALIDA

Cuando el usuario selecciona un proyecto en particular, el solicitante de archivo muestra la lista correspondiente a las fases de cálculo. Al seleccionar una fase de

cálculo, se abre una nueva forma de salida en que se presentan los resultados de la etapa de cálculo final de la fase seleccionada.

Si se desea seleccionar un paso de cálculo intermedio, debe darse un clic en la columna de fases, como resultado, la lista de cálculo se convierte en una lista con todos los números de paso, desde la que puede seleccionar el número de paso deseado.

Figura 69. Solicitante de archivo para la selección de una fase o un paso intermedio.



Fuente: Plaxis 2D.

10.4 DEFORMACIONES

Este sub-menú contiene varias opciones para visualizar deformaciones. De forma predeterminada, las cantidades mostradas se escalan automáticamente para dar un diagrama que se puede interpretar cómodamente.



El factor de escala se puede cambiar haciendo clic en el botón correspondiente en la barra de herramientas o seleccionando la opción de escala en el submenú edición. El factor de escala para las deformaciones se refiere a un valor de referencia de la deformación que se dibuja como un porcentaje de las dimensiones de la geometría. Para comparar las graficas de deformación del cálculo de diferentes fases, los factores de escala en las diferentes graficas deben hacerse iguales.

10.4.1 Malla deformada

Este argumento puede seleccionarse en el submenú de deformaciones. Si se desea ver las deformaciones en la escala real, es decir, la escala de la geometría, puede utilizar la opción de escala.

10.4.2 Desplazamiento total, horizontal y vertical

Los desplazamientos totales son los desplazamientos absolutos acumulados ($|u|$), combinados desde el componente horizontal y vertical de los desplazamientos de todos los nodos al final de la etapa actual de cálculo. Del mismo modo, los desplazamientos horizontales y verticales son, respectivamente, la componente de desplazamiento acumulada horizontal (x) y vertical (y) en todos los nodos al final de la etapa actual de cálculo. Estas opciones pueden seleccionarse en el submenú deformaciones.

10.4.3 Desplazamientos incrementales

Los Incrementos totales son los desplazamientos incrementales absolutos del paso actual $\Delta(|u|)$, combinados desde los desplazamientos incrementales horizontal y vertical en todos los nodos, calculados para el paso actual, que se

muestra en una grafica de la geometría. Del mismo modo, los Incrementos horizontales e Incrementos verticales son los desplazamientos incrementales en X y Y respectivamente para todos los nodos, calculados para el paso actual. Estas opciones pueden seleccionarse en el sub-menú Deformaciones.

10.4.4 Deformaciones totales

Las Deformaciones totales son las deformaciones acumuladas de la geometría en los puntos de esfuerzo, esta opción puede seleccionarse en el sub-menú Deformaciones. Las deformaciones totales pueden representarse como: Deformaciones principales, Deformaciones volumétricas ϵ_v o Deformaciones equivalentes de cizalladura (ϵ_s), seleccionando la opción adecuada en la presentación de la barra de herramientas.

10.4.5 Deformaciones cartesianas

Al seleccionar las deformaciones cartesianas desde el sub-menú de deformaciones, puede hacerse una selección entre los componentes individuales de la deformación total ϵ_{xx} , ϵ_{yy} y γ_{xy} .

10.4.6 Deformaciones incrementales

Las deformaciones incrementales son los incrementos de la deformación en los puntos de esfuerzo de la geometría. Esta opción puede seleccionarse en el sub-menú de deformaciones.

10.4.7 Incrementos de la deformación cartesiana

Al seleccionar Incrementos de la deformación cartesiana desde el sub-menú de deformaciones, una selección puede hacerse entre los componentes individuales de las deformaciones incrementales $\Delta\epsilon_{xx}$, $\Delta\epsilon_{yy}$ y $\Delta\gamma_{xy}$.

10.5 ESFUERZOS

El sub-menú Esfuerzos contiene varias opciones para visualizar el estado de esfuerzo en el modelo de elementos finitos. De forma predeterminada, las cantidades mostradas se escalan automáticamente.

El factor de escala para los esfuerzos se refiere a un valor de referencia de los esfuerzos que se dibuja como un porcentaje de las dimensiones de la geometría. Para comparar las graficas de esfuerzos del cálculo de diferentes fases, los factores de escala en las diferentes graficas deben hacerse iguales.

10.5.1 Esfuerzos efectivos

Esta opción puede seleccionarse en el sub-menú de Esfuerzos. Los esfuerzos efectivos puede representarse como Esfuerzo principales, Esfuerzo promedios (p'), Esfuerzos de corte relativo (τ_{rel}), seleccionando la opción adecuada en la barra de herramientas.

La opción de esfuerzo de corte relativo da una indicación de la proximidad del punto de esfuerzo a la envolvente de falla. El esfuerzo de corte relativo, (τ_{rel}), se define como:

$$\tau_{rel} = \frac{\tau}{\tau_{max}} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde τ es el valor máximo de esfuerzo de cizalladura, es decir, el radio del círculo de esfuerzo de Mohr. El parámetro τ_{max} es el valor máximo de esfuerzo de corte para el caso en que se amplía el círculo de Mohr para tocar la envolvente de falla de Coulomb permaneciendo el esfuerzo principal intermedio constante.

10.5.2 Esfuerzos totales

Esta opción puede seleccionarse en el sub-menú de Esfuerzos. Los esfuerzos totales pueden ser representados como Esfuerzos principales, Esfuerzos promedios (p), Esfuerzos desviadores (q), seleccionando la opción adecuada en la barra de herramientas.

10.5.3 Esfuerzos efectivos cartesianos

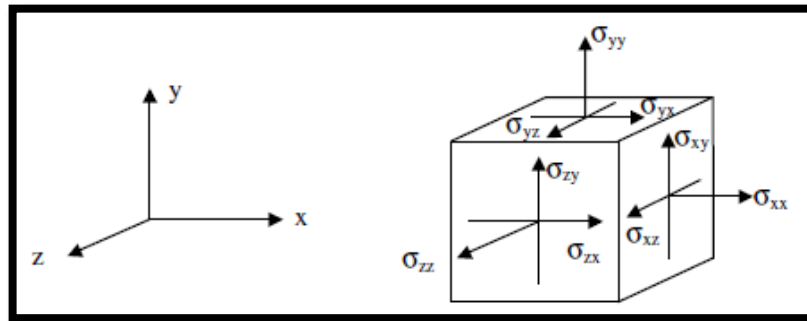
Al seleccionar esfuerzos efectivos cartesianos desde el sub-menú esfuerzos, puede hacerse una selección entre los componentes de los esfuerzos efectivos individuales σ'_{xx} , σ'_{yy} , σ'_{zz} y σ'_{xy} . La figura 39 muestra la convención de signos

adoptado para los esfuerzos. Tenga en cuenta que la presión se considera negativa.

10.5.4 Esfuerzos totales cartesianos

Al seleccionar esfuerzos totales cartesianos desde el sub-menú de esfuerzo, puede hacerse una selección entre los componentes individuales de esfuerzo total, σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} y σ_{xy} .

Figura 70. Convención de signos para esfuerzos.



Fuente: Plaxis Reference manual.

10.5.5 Relación de sobre-consolidación

La relación de sobre-consolidación sólo se activa si el modelo de endurecimiento del suelo o el modelo de suelo blando (Creep) se utilizan.

La relación de sobre-consolidación, OCR, tal como se define en esta opción, es la relación entre el esfuerzo de pre-consolidación isotrópico, p_p , y el actual esfuerzo equivalente isotrópico p^{eq} .

$$OCR = \frac{p_p}{p^{eq}}$$

Ecuación 24

Donde p^{eq} varía de acuerdo al modelo a utilizar.

10.5.6 Puntos plásticos

Los puntos plásticos de Coulomb son particularmente útiles para comprobar si el tamaño de la malla es suficiente. Estos puntos son los puntos de esfuerzo en un estado plástico, que aparecen en un gráfico de la geometría no deformada. Los puntos de esfuerzo plástico se indican mediante pequeños símbolos que pueden

tener diferentes formas y colores, dependiendo del tipo de plasticidad que ha ocurrido. Un cuadro rojo indica que los esfuerzos se encuentran en la superficie de la envolvente de falla de Coulomb. Un cuadrado blanco sólido indica que el criterio de esfuerzos de corte se aplicó. Un cuadrado azul cruzado representa un estado de consolidación normal, donde los esfuerzos de pre-consolidación son equivalentes al estado actual de los esfuerzos. Este último tipo de puntos plásticos sólo se produce si el modelo de suelo blando (Creep) o el modelo de suelo endurecido se utiliza.

10.5.7 Presión de poros activa

La presión de poros activa es el total de presiones de agua (p_w), es decir, presiones de poros en estado estacionario más el exceso de presión de poros en la geometría en la etapa final del cálculo actual, que aparecen en una gráfica de la geometría no deformada. Esta gráfica se puede seleccionar del sub-menú esfuerzos. De forma predeterminada, las presiones de poros activas se presentan como esfuerzos principales, a pesar de que son isotrópicas y no tienen ninguna dirección principal. La longitud de las líneas representa la magnitud de la presión de poros activa y las direcciones coinciden con los ejes X y Y.

10.5.8 Exceso de presión de poro

El exceso de presión de poros es la presión de agua debido a la carga de los grupos sin drenar al final de la etapa de cálculo actual, que aparecen en una gráfica de la geometría no deformada. Esta gráfica se puede seleccionar del sub-menú Esfuerzo. De forma predeterminada, el exceso de presión de poros se presenta como esfuerzos principales, aunque no tienen ninguna dirección principal. La longitud de las líneas representa la magnitud del exceso de presión de poros y las direcciones coinciden con los ejes X y Y.

10.5.9 La cabeza de aguas subterráneas

La cabeza de aguas subterráneas es una cantidad alternativa para la presión de poros activa. La cabeza de aguas subterráneas se define como:

$$h = y + \frac{p}{\gamma_w}$$

Ecuación 25.

Donde y es la coordenada vertical, p es la presión de poros activos y γ_w es el peso unitario del agua.

La opción cabeza de aguas subterráneas está disponible en el sub-menú esfuerzo. Esta opción no solo es relevante en los proyectos donde ha sido llevado a cabo un cálculo de flujo de aguas subterráneas para generar la distribución de las presiones de poros, sino también en situaciones en las que el exceso de presiones de poros se genera en los grupos del suelo sin drenar.

10.5.10 Campo de flujo

Cuando un cálculo de flujo de aguas subterráneas se ha llevado a cabo para generar la distribución de la presión de poro, las descargas específicas en el elemento de los puntos de esfuerzo están disponibles en el programa de salida, además de la distribución de la presión de poros. La descarga específica se puede ver seleccionando la opción campo de flujo del sub-menú Esfuerzo. Cuando la descarga específica se presenta como flechas, la longitud de la flecha indica la magnitud de la descarga específica mientras que la dirección de la flecha indica la dirección del flujo.

10.5.11 Grado de saturación

El módulo de flujo de aguas subterráneas en Plaxis se puede utilizar para calcular la distribución de la presión de poros para flujos confinados, así como para problemas de flujo no confinado. La determinación de la posición de la superficie libre freática y la longitud asociada a la superficie de filtración es uno de los principales objetivos de un cálculo de flujo de agua subterránea no confinada. En este caso, una relación se usa entre la presión de poros y el grado de saturación. Ambas cantidades se calculan en un cálculo de flujo de agua subterránea y se ponen a disposición en el programa de salida. Si se desea ver el grado de saturación, la opción correspondiente se puede seleccionar del sub-menú Esfuerzo.

10.6 ESTRUCTURAS E INTERFACES:

Las estructuras y las interfaces son por defecto las que aparecen en la geometría. Opcionalmente, estos objetos se pueden ocultar o mostrar de nuevo con la opción de Estructuras del sub-menú Geometría. La producción de estos tipos de elementos se puede obtener haciendo doble clic en el objeto deseado.

Si se desea mostrar la salida de múltiples estructuras del mismo tipo en una sola forma, todos estos objetos, a excepción del último, se debe seleccionar con un solo clic mientras se mantiene pulsada la tecla Shift y en el último se debe hacer doble clic.

10.6.1 Placas

Los datos de salida para una placa comprenden deformaciones y fuerzas. Desde el sub-menú Deformaciones, el usuario puede seleccionar los desplazamientos absolutos acumulados al final de la etapa de cálculo, o el componente de desplazamiento individual acumulado u_y y u_x . En el sub-menú Fuerzas las opciones fuerzas de corte, fuerzas axiales y momentos de flexión están disponibles. Para los modelos de simetría axial el sub-menú Fuerza también incluye las fuerzas en dirección fuera del plano (fuerzas de Hoop). Estas fuerzas representan las fuerzas reales al final de la etapa de cálculo. Además de las fuerzas reales, PLAXIS realiza un seguimiento de las fuerzas máximas y mínimas en todas las fases de cálculo posteriores, después de seleccionar la fuerza deseada (fuerzas axiales, fuerzas de corte, momentos de flexión o fuerzas Hoop) se pueden ver estos valores hasta el paso de cálculo actual. Tenga en cuenta que las fuerzas axiales o fuerzas Hoop positivas genera esfuerzos de tracción.

10.6.2 Geomallas

Los datos de salida para geomallas pueden obtenerse haciendo doble clic en la correspondiente línea amarilla en la geometría. La salida para una geomalla comprende deformaciones y fuerzas. Desde el submenú Deformaciones, el usuario puede seleccionar los desplazamientos absolutos acumulados o los

componentes individuales de desplazamiento. Las fuerzas de tracción en la geomalla siempre son positivas y las fuerzas de la resistencia a la compresión no están permitidas en estos elementos.

10.6.3 Interfaces

La salida para las interfaces puede obtenerse haciendo doble clic en las líneas correspondientes en la geometría. La salida para una interfaz consta de deformaciones y esfuerzos.

Desde el sub-menú Deformaciones, el usuario puede seleccionar desplazamientos Totales, Horizontales y Verticales, incrementos Totales, Horizontales y Verticales, desplazamientos relativos e incrementos relativos.

Desde el sub-menú Esfuerzo las opciones esfuerzo efectivo normal, esfuerzo cortante, esfuerzo de cizallamiento relativo, las presiones de poros activas y el exceso de presión de poros están disponibles.

Tenga en cuenta que la presión se considera negativa para los esfuerzos normales y las presiones de poros.

10.6.4 Anclajes

Al hacer doble clic en un ancla se abre una pequeña ventana en la que se presenta la fuerza de anclaje y las fuerzas de máxima rigidez. Si el valor absoluto de la fuerza de anclaje es igual a una fuerza máxima, el ancla se encuentra en un estado plástico. Las fuerzas de tracción se definen positivas.

10.7 VER LAS TABLAS DE SALIDA



Para todos los tipos de gráficos de datos numéricos se pueden ver las tablas de salida haciendo clic en el botón Tabla en la barra de herramientas o seleccionando la opción de tabla en el menú Ver. Como resultado, una ventana se abre en la que las cantidades correspondientes se presentan.

10.7.1 Tablas de desplazamiento

Al seleccionar la opción de tabla cuando una grafica de desplazamiento se muestra, una ventana de la tabla aparece en el cual los componentes de desplazamiento en todos los nodos se presentan. El u_x son los desplazamientos totales y u_y son los desplazamientos acumulados de todas las fases de cálculo anterior, mientras que los desplazamientos incrementales Δu_x y Δu_y pertenecen a la fase de cálculo actual.

10.7.2 Tablas de esfuerzo-deformación

Al ver los cuadros de esfuerzo-deformación en los elementos del suelo, se muestran las tablas de los componentes cartesianos en todos los puntos de esfuerzo. Tenga en cuenta que la compresión es considerada como negativa.

La columna de estado en la tabla de los esfuerzos indica si un punto de esfuerzo es un punto elástico, plástico, de tensión, pico, de endurecimiento o Cap.

10.7.3 Tablas de nodos y puntos de esfuerzo

Cuando las tablas de esfuerzo y deformación se muestran, el menú incluye el sub-menú Geometría. Este sub-menú contiene opciones para ver la posición y la numeración de los nodos y los puntos de esfuerzo del elemento. La opción puntos de esfuerzo también muestra el módulo elástico de rigidez real (E), la cohesión real (c), y la relación sobre-consolidación real (OCR). La tabla muestra que la rigidez y la cohesión se han aplicado realmente en todos los puntos de esfuerzo en la etapa de cálculo actual.

10.7.4 Esfuerzos y fuerzas en las interfaces y estructuras

Al ver las tablas de esfuerzo de la interfaz, la tabla presentan los esfuerzos efectivos normales (σ'_n), el esfuerzo cortante (τ), la presión de poros activa (P_{Active}) y el exceso de presión de poros (P_{excess}) en todos los puntos. Al ver las tablas de las fuerzas de la placa, la tabla presenta la fuerza axial (N), la fuerza de corte (Q) y el momento de flexión (M) en los nodos. Para geomallas, la tabla sólo presenta la fuerza en la dirección axial de la geomalla (N). Para los anclajes no hay una tabla

disponible solo la que se presenta después de hacer doble clic en el ancla en la geometría.

10.8 VISUALIZACIÓN DE SALIDA EN UN CORTE TRANSVERSAL



Para tener información sobre la distribución de una determinada cantidad en el suelo es útil ver la distribución de esa cantidad en un corte transversal del modelo. Esta opción está disponible en Plaxis para todo tipo de esfuerzos y desplazamientos en los elementos del suelo. Se puede seleccionar haciendo clic en el botón Corte transversal en la barra de herramientas o seleccionando la correspondiente opción en el menú Ver. Cortes transversales horizontales o verticales exactos pueden trazarse manteniendo presionada la tecla Shift.

Múltiples cortes transversales pueden extraerse de la misma geometría. Cada sección transversal aparecerá en un gráfico de salida diferente. Para identificar las diferentes secciones, se indican los puntos finales de un corte transversal con caracteres en orden alfabético.

10.8.1 Deformaciones

Además del desplazamiento horizontal, vertical y componentes cartesianos de deformación, disponibles para una geometría completa, la opción de corte transversal permite deformaciones normales y deformaciones de cizalladura. La deformación Normal se define como la deformación perpendicular a la línea de corte transversal, y la deformación de cizalladura se define como la deformación de cizalladura a lo largo de la línea de corte transversal.

10.8.2 Esfuerzos

Diferentes opciones están disponibles para dibujar los esfuerzos efectivos y totales en el corte transversal. La opción de corte transversal permite esfuerzos normales y esfuerzos tangenciales. Los esfuerzos normales se definen como el esfuerzo perpendicular a la sección transversal y los esfuerzos tangenciales se definen

como el esfuerzo de corte a lo largo de la línea de corte transversal. Tenga en cuenta que la presión se considera negativa.

10.8.3 Integración de los esfuerzos: fuerza equivalente

Cuando los componentes de esfuerzo normales se trazan en un corte transversal, Plaxis calcula automáticamente y muestra una fuerza equivalente que representa la integral del esfuerzo normal sobre la sección transversal. El valor y la posición de la fuerza equivalente se muestran en el título del gráfico.

10.9 VER OTROS DATOS

El menú Ver incluye opciones para ver los datos generales del modelo y los datos del material. Además, algunos datos de la salida general en relación con el proceso de cálculo están disponibles en el sub-menú vista.

10.9.1 Información general del proyecto

La opción Información general del sub-menú vista contiene información general sobre el proyecto, el modelo y la malla de elementos finitos generados.

10.9.2 Datos del material

Las propiedades de los materiales y los parámetros del modelo se pueden ver con la opción información de material del sub-menú Vista. Dentro de esta opción se puede elegir a partir de los cuatro tipos de conjuntos de datos: El suelo y las interfaces, placas, geomallas o anclajes. Dentro de la opción del suelo y las interfaces de los conjuntos de datos están dispuestas en hojas de la pestaña de acuerdo con los modelos de material. Los datos pueden ser enviados a la impresora haciendo clic en el botón Imprimir.

10.9.3 Multiplicadores y parámetros de cálculo

Si la opción información de cálculo se selecciona en el menú Ver aparece una ventana que presenta los multiplicadores de carga y diversos parámetros de cálculo correspondiente a la etapa final del cálculo.

En la hoja de la pestaña multiplicadores, la situación del proceso de carga es determinada, incluidos los valores de los multiplicadores incrementales y totales. La ventana también muestra el factor de extrapolación y la rigidez relativa. Cuando se carga una estructura y falla, la rigidez relativa reduce gradualmente de 1.0 (elasticidad) a cero (falla).

10.9.4 Diagrama de conectividad

Un diagrama de conectividad es una grafica de la malla en la que las conexiones de los elementos son claramente visualizados. Esta grafica es de interés particular, cuando elementos de la interfaz se incluyen en la malla.

En el diagrama de conectividad, por ejemplo, se puede observar cuando una interfaz se encuentra entre dos elementos del suelo, donde estos elementos no tienen nodos comunes y la conexión está formada por la interfaz. En una situación en la que las interfaces se colocan a ambos lados de una placa, la placa y los elementos del suelo adyacentes no tienen nodos en común, la conexión entre la placa y el suelo está formada por la interfaz. Esto también se puede ver en el diagrama de conectividad.

10.9.5 Descripción general de las ayudas de visualización del grafico

Para mejorar la interpretación de los resultados de salida, Plaxis tiene varias ayudas para ver el modelo de elementos finitos. Una visión general de estas ayudas es la siguiente:

♣ Zoom:

La opción zoom del sub-menú vista puede ser utilizado para amplia una parte del modelo y ver un detalle en particular. La opción de zoom se puede utilizar repetidamente.

♣ Visualización de objetos estructurales:

Los resultados de objetos estructurales se pueden ver con más detalle haciendo doble clic en el objeto estructural deseado en la geometría.

♣ **Visualización de la sección transversal:**

Los usuarios pueden definir secciones para ver la salida. Esto se puede hacer seleccionando la opción de corte transversal del sub-menú Vista.

♣ **Cambiar la intensidad de los colores del conjunto de datos de materiales:**

Los colores del conjunto de datos de material pueden aparecer en tres diferentes intensidades. A nivel global, para aumentar la intensidad de todos los colores de conjunto de datos, el usuario puede presionar <Ctrl> <Alt> <C> simultáneamente.

10.10 GENERACIÓN DE INFORMES

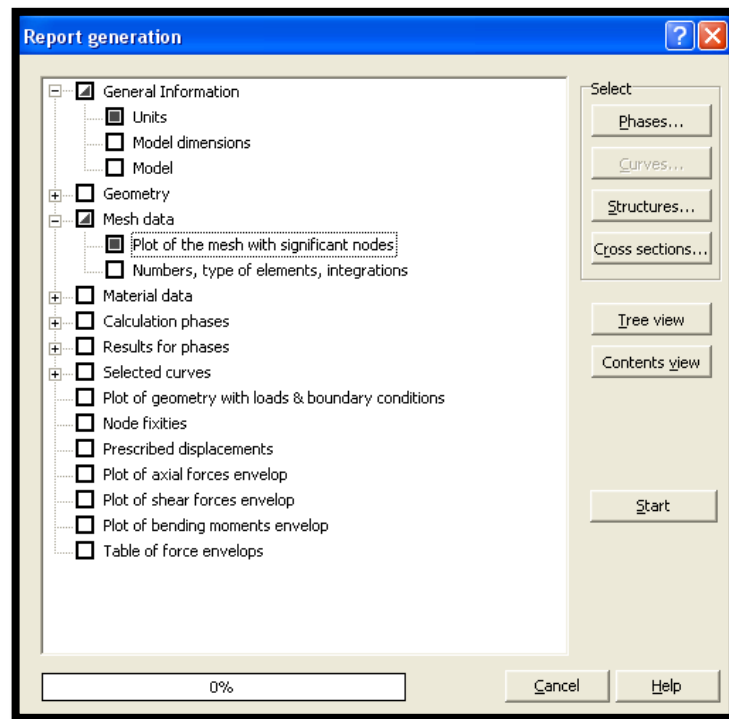


Para documentar los datos de entrada de proyecto y resultados computacionales, una ayuda de generación de informe está disponible en el programa de salida de PLAXIS. Esta opción requiere la presencia del software Microsoft® Word. Puede seleccionar la opción de generación de informe desde el sub-menú archivo o haciendo clic en el botón correspondiente en la barra de herramientas. De este modo, aparecerá la ventana de generación de informe en el que se puede realizar una selección de los datos de proyecto que debe incluirse en el informe.

El cuadro de grupo Selección permite una selección de fases, curvas, estructuras y cortes transversales. Para incluir los datos de salida de estructuras o cortes transversales en el informe es necesario mostrar primero las estructuras deseadas o cortes transversales en la ventana de salida independiente. Después de la selección de todos los elementos deseados, puede ser presionado el botón de vista de contenido para ver el contenido del informe que se crea.

Si las selecciones son satisfactorias, entonces debe pulsarse el botón de inicio para generar el informe. Como resultado, se inicia el programa Microsoft® Word y se crea el informe en un documento nuevo. Desde allí puede ser impreso o copiado en otra documentación.

Figura 71. Ventana de generación de informes.



Fuente: Plaxis 2D.

10.11 EXPORTACIÓN DE DATOS

Los datos de salida pueden ser exportados a otros programas usando la función del Portapapeles de Windows. Esta función puede activarse haciendo clic en el botón Copiar en la barra de herramientas o seleccionando la opción Copiar en el menú Edición. Las graficas se exportan de manera que aparecen, por ejemplo, como figuras en un paquete de dibujo o en un procesador de texto al pegar los datos del portapapeles. Los datos de las tablas se exportan de manera que figuran en celdas en una hoja de cálculo al pegar los datos del Portapapeles. Además de la función de Portapapeles, se pueden producir copias impresas de gráficos y tablas.

Cuando se utiliza la opción copiar del Portapapeles o la opción de imprimir, en una grafica que muestra una parte ampliada del modelo, sólo la parte que está visible actualmente se exportará al Portapapeles o a la impresora.

11 CURVAS CARGA- DESPLAZAMIENTO Y TRAYECTORIAS DE ESFUERZO

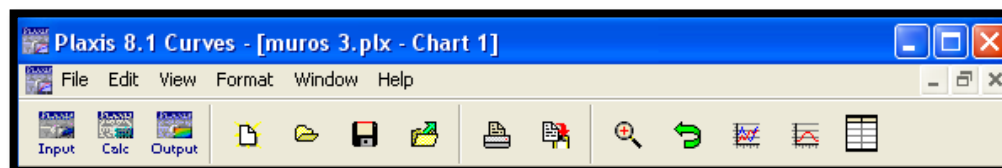
El programa de curvas puede ser utilizado para dibujar las curvas de carga-desplazamiento o de tiempo-desplazamiento, diagramas de esfuerzo-deformación y trayectorias de esfuerzo o deformación de los puntos pre-seleccionados en la geometría. Estas curvas muestran el desarrollo de determinadas cantidades durante diferentes fases de cálculo, esto da una idea del comportamiento global y local del suelo. Se distingue entre los nodos y puntos de esfuerzo. En general, los nodos se utilizan para la generación de las curvas de carga-desplazamiento, mientras que los puntos de esfuerzo se utilizan para los diagramas de esfuerzo-deformación y trayectorias de esfuerzo.

11.1 EL PROGRAMA DE CURVAS



El programa de curvas contiene todas las facilidades para generar curvas de carga-desplazamiento, trayectorias de esfuerzo y los diagramas de esfuerzo-deformación. Al inicio del programa, hay que elegir entre la selección de un gráfico existente y la creación de un nuevo. Al seleccionar Nuevo gráfico, la ventana de generación de la curva que aparece en los parámetros para la generación de una curva se puede ajustar. Al seleccionar Gráfico existente, la ventana de selección permite una rápida selección de una de las cuatro listas de los gráficos más recientes. La ventana principal del programa de Curvas contiene los siguientes elementos, figura 41.

Figura 72. Barra de herramientas en la ventana principal del programa de Curves.



Fuente: Plaxis 2D.

11.1.1 Menú de curvas

El menú curvas contiene todas las opciones y operación de las ayudas del programa de Curvas. Algunas de las opciones también están disponibles como botones en la barra de herramientas.

11.1.2 Ventanas de gráficos

Estas son las ventanas en las que se muestran los gráficos. Múltiples formas de gráficos se pueden abrir simultáneamente y cada uno puede contener un máximo de diez curvas.

11.1.3 Barra de herramientas

Esta barra contiene botones que se pueden utilizar como acceso directo a las ayudas del menú.

11.2 MENÚ DE CURVAS

El menú de curvas consiste en los siguientes sub-menús: archivo, editar, formato y ver.

- ♣ **El sub-menú de archivo:** Este sub-menú está compuesto por las siguientes funciones: Nuevo, Abierto, Guardar, Añadir Curva, Imprimir, Guía de trabajo, Últimos gráficos y Salir.
- ♣ **El sub-menú Editar:** Este sub-menú está compuesto por la funcione: Copiar.
- ♣ **El sub-menú de formato:** Este sub-menú está compuesto por las siguientes funciones: Curvas y Gráficos.
- ♣ **El sub-menú Ver:** Este sub-menú está compuesto por las siguientes funciones: Ampliar, Alejar, Restablecer vista, Tabla, Información e Indicador del valor.

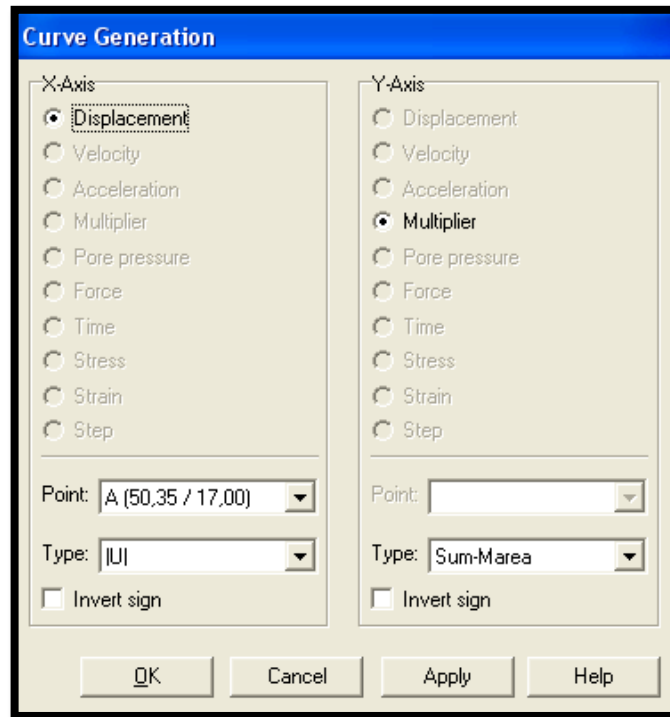
11.3 GENERACIÓN DE CURVA

Una nueva curva puede ser generada por la puesta en marcha del programa de curvas o seleccionando la opción Nuevo del menú Archivo. Como resultado, el solicitante de archivo aparece y el proyecto para el que la curva tiene que ser generada deberá ser seleccionado. Después de la selección del proyecto, la ventana de generación de la curva aparece, tal como se presenta en la Figura 42.

Dos cuadros similares con los diferentes apartados se muestran, uno para el eje X y otro para el eje Y. La opción Invertir signo puede ser seleccionado para multiplicar todos los valores de la cantidad X o la cantidad Y por -1. Esta opción puede, ser utilizada para representar los esfuerzos (que son generalmente negativos) como valores positivos.

La combinación de los valores de paso dependientes de de la cantidad X y la cantidad Y, forman los puntos de la curva. Los números de puntos de la curva corresponden a los números de pasos del cálculo más uno. El punto de la primera curva (que corresponde al paso 0) es el número 1. Cuando las cantidades han sido definidas y se pulsa el botón OK, la curva se genera y se presenta en una ventana gráfica.

Figura 73. Ventana de generación de la curva.



Fuente: Plaxis 2D.

11.3.1 Curvas de Carga- Desplazamiento

Las curvas de carga-desplazamiento se pueden utilizar para visualizar la relación entre la carga aplicada y el desplazamiento resultante de un cierto punto en la geometría. El eje X se relaciona con el desplazamiento de un nodo en particular y el eje Y contiene los datos relativos al nivel de carga.

La selección del desplazamiento debe ser completado con la selección de un nodo pre-seleccionado en el cuadro combinado Punto y la selección de un componente de desplazamiento en el cuadro combinado Tipo.

La selección del multiplicador debe ser completado con la selección del sistema de carga deseada, representada por el multiplicador correspondiente en el cuadro combinado Tipo.

Otra cantidad que se puede presentar en una curva es el Exceso de presión de poros, que debe completarse con la selección de un nodo pre-seleccionado en el

cuadro combinado Punto. El cuadro combinado Tipo no es pertinente en este caso.

Cuando los desplazamientos prescritos diferentes de cero se activan en un cálculo, las fuerzas de reacción en contra de los desplazamientos previstos en la dirección X y Y se calculan y se almacenan como parámetros de salida. Estos componentes de la fuerza también se pueden utilizar en las curvas de carga-desplazamiento mediante la selección de la opción Fuerza, la selección de esta opción debe ser completada con la selección del componente deseado (Fuerza-X o Fuerza-Y) en el cuadro combinado Tipo.

11.3.2 Curvas de Tiempo-Desplazamiento

Las curvas de Tiempo-Desplazamiento pueden ser útiles para interpretar los resultados de los cálculos en los que el comportamiento del suelo dependiente del tiempo juega un papel importante, por ejemplo, la consolidación y la fluencia. En este caso la opción de tiempo es generalmente seleccionado para el eje X y el eje Y contiene datos relativos a los desplazamientos de un nodo en particular.

11.3.3 Diagramas de Esfuerzo-Deformación

Los diagramas de esfuerzo-deformación se pueden utilizar para visualizar el comportamiento local de esfuerzo-deformación del suelo. Estos diagramas representan el comportamiento idealizado del suelo de acuerdo con el modelo de suelo seleccionado. La selección de Esfuerzo o Deformación debe ser completada con la selección de un punto de esfuerzo pre-seleccionado en el cuadro combinado Punto y la selección de un determinado componente en el cuadro combinado Tipo. Los siguientes componentes de esfuerzo y deformación están disponibles:

♣ **Esfuerzos**

- ✓ σ'_{xx} Esfuerzo efectivo horizontal.
- ✓ σ'_{yy} Esfuerzo efectivo vertical.
- ✓ σ'_{zz} Esfuerzo efectivo en la dirección fuera del plano.

- ✓ σ'_{xy} Esfuerzo de corte.
- ✓ σ'_1 El esfuerzo principal efectivo mayor en sentido absoluto.
- ✓ σ'_2 El esfuerzo principal efectivo intermedio.
- ✓ σ'_3 El esfuerzo principal efectivo menor en sentido absoluto.
- ✓ p' Esfuerzo isotrópico efectivo (esfuerzo efectivo medio).
- ✓ q Esfuerzo desviador (esfuerzo cortante equivalente).
- ✓ P_{excess} El exceso de presión de poro.

♣ Deformación

- ✓ ϵ_{xx} Deformación horizontal
- ✓ ϵ_{yy} Deformación vertical
- ✓ γ_{xy} Deformación cortante
- ✓ ϵ_1 Deformación principal efectiva mayor en sentido absoluto.
- ✓ ϵ_2 Segunda deformación principal.
- ✓ ϵ_3 Tercera deformación principal.
- ✓ ϵ_v Deformación volumétrica
- ✓ ϵ_q Deformación angular equivalente

11.3.4 Trayectorias de esfuerzo y deformación.

Una trayectoria de esfuerzo representa el desarrollo de todos los esfuerzos locales en un punto de la geometría. Del mismo modo, una trayectoria de deformación representa el desarrollo de la deformación. Este tipo de curvas son útiles para analizar el comportamiento local del suelo. Para la generación de trayectorias de esfuerzos y trayectorias de deformación, una selección se puede hacer del esfuerzo disponible y los componentes de la deformación.

11.4 MÚLTIPLES CURVAS EN UN GRÁFICO

A menudo es útil comparar el desarrollo de los desplazamientos o los esfuerzos en diferentes puntos de una geometría, o incluso en diferentes geometrías o proyectos. Por lo tanto Plaxis permite la generación de un máximo de diez curvas

en el mismo gráfico. Una vez que una sola curva se ha generado, la opción Agregar a la curva se puede utilizar para generar una nueva curva en el gráfico actual. Esta opción se puede seleccionar haciendo clic en el botón Agregar a la curva de la barra de herramientas o seleccionando la opción correspondiente en el sub-menú archivo. Además, una selección debe hacerse para especificar si la curva se basa en el proyecto actual o en otro proyecto. En este último caso, el proyecto puede ser seleccionado con el solicitante archivo.

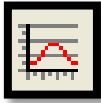
11.5 REGENERACIÓN DE CURVAS

Si un proceso de cálculo se repite o amplía con nuevas fases, deben actualizarse las curvas existentes para cumplir con los nuevos datos. Esto se puede hacer por medio de la ayuda Regenerar, este servicio está disponible en la ventana de configuración de la curva, que se pueden seleccionar haciendo clic en el botón Cambiar configuración de la curva en la barra de herramientas o seleccionando la opción Curvas en el menú Formato. Al hacer clic en el botón Regenerar, la ventana de generación de la curva muestra la configuración actual del eje X y Y, al pulsar el botón OK se regenera la curva con los nuevos datos; para cerrar la ventana de configuración y ver la curva recién generada, presione el botón Aceptar. Cuando se utilizan varias curvas en un gráfico, la ayuda Regenerar se debe utilizar para cada curva de forma individual.

11.6 OPCIONES DE FORMATO

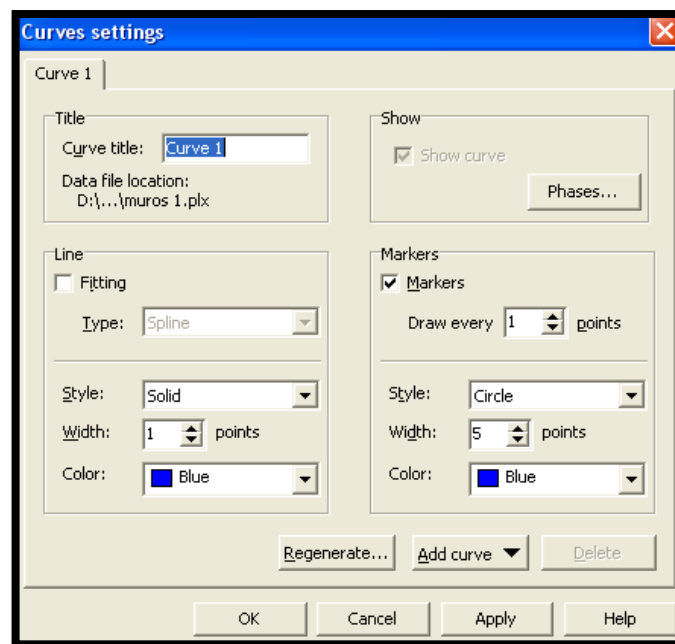
El diseño y la presentación de las curvas y los gráficos se pueden personalizar seleccionando las opciones en el menú Formato. Se distingue entre la configuración de la curva y la configuración de la grafica. La opción Curvas se utiliza para modificar la presentación de las curvas, y la opción Grafico se utiliza para establecer el gráfico y los ejes en los que las curvas aparecen.

11.6.1 Ajuste de curva



La configuración de la curva se puede seleccionar en el menú Formato. Alternativamente, se puede hacer clic en el botón Configuración de la curva en la barra de herramientas. Como resultado, la ventana de configuración de la curva aparece, tal como se presenta en la figura 43. Esta ventana contiene un sub-menú con las mismas opciones para cada una de las curvas de la gráfica actual.

Figura 74. Ventana de configuración de la curva.



Fuente: Plaxis 2D.

♣ Título:

Un título por defecto se da a cualquier curva generada, este título puede ser cambiado en el cuadro de edición Título de la curva.

♣ Mostrar curva:

La opción Mostrar la curva puede ser útil cuando múltiples curvas están presentes dentro de un gráfico y sea necesario ocultar temporalmente una o varias curvas.

♣ **Fases:**

El botón Fases se puede utilizar para seleccionar aquellas fases de cálculo que se tienen en cuenta en la generación de la curva. Esta opción es útil cuando no todas las fases de cálculo debe ser incluidas en la curva.

♣ **Presentación de la línea y el marco:**

Hay varias opciones disponibles para personalizar la apariencia de las líneas de las curvas y los marcos.

♣ **Montaje:**

Para dibujar una curva suave, el usuario puede seleccionar la opción de montaje. Este tipo de ayuda se puede seleccionar en el cuadro combinado Tipo. La instalación Spline generalmente da los resultados más satisfactorios, pero, como alternativa, una curva puede ajustarse a un polinomio utilizando el método de mínimos cuadrados.

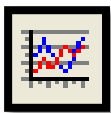
♣ **Añadir curva:**

El botón Añadir curva puede ser utilizado para agregar nuevas curvas de la gráfica actual.

♣ **Eliminar:**

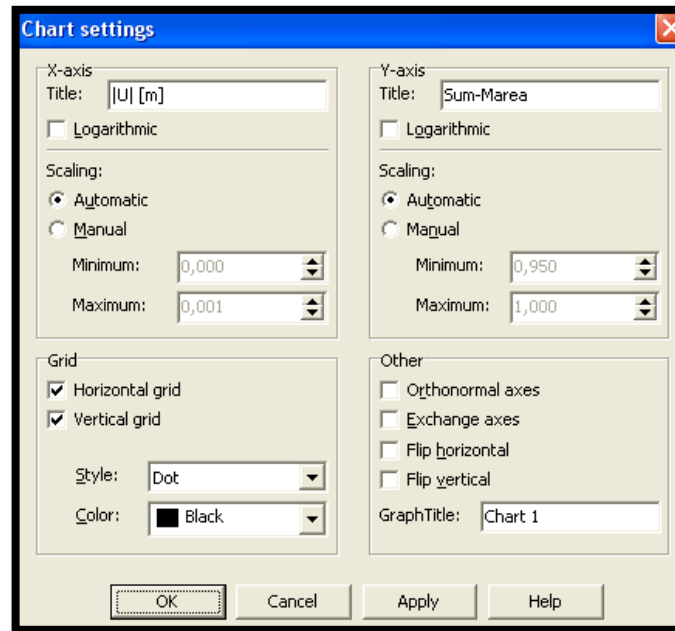
Cuando múltiples curvas están presentes dentro de una tabla, el botón Eliminar se puede utilizar para borrar una curva.

11.6.2 Ajuste del gráfico



La configuración del gráfico se refiere a la presentación de la estructura y los ejes. Estos ajustes se pueden seleccionar en el menú Formato, figura 44.

Figura 75. Ventana de configuración del grafico.



Fuente: Plaxis 2D.

♣ **Títulos:**

De forma predeterminada, se da un título para el eje X y el eje Y, basándose en las cantidades que se han seleccionado para la generación de la curva. Sin embargo, este título puede cambiarse en los cuadros de edición Título del correspondiente grupo de ejes. Además, puede darse un título al gráfico completo, que puede introducirse en el cuadro de edición Título de gráfico. Este título no debe confundirse con el título de la curva como se describe en la sección anterior.

♣ **Escala de los ejes X y Y:**

De forma predeterminada, el rango de valores indicados en el eje X y Y se escala automáticamente, pero el usuario puede seleccionar la opción Manual y entrar el rango mínimo y máximo deseado en los cuadros de edición. Como resultado, los datos fuera de este rango no aparecerán en el gráfico. Además, es posible trazar el eje X y / o el eje Y en una escala logarítmica utilizando la casilla de verificación logarítmica. El uso de una escala logarítmica sólo es válido si el rango completo de valores a lo largo de un eje es positivo.

♣ **Grilla:**

Las líneas de la grilla pueden agregarse al gráfico seleccionando elementos de rejilla Horizontal o vertical. Las líneas pueden personalizarse por medio de las opciones de estilo y color.

♣ **Ejes Orto-normal:**

La opción ejes orto-normales se puede utilizar para asegurarse de que la escala utilizada para el eje X y el eje Y sea la misma. Esta opción es útil cuando las cantidades que se trazan en el eje X y eje Y tienen valores similares, por ejemplo, al trazar trayectorias de esfuerzo o diagramas de deformación.

♣ **Cambio de ejes:**

La opción de cambio de ejes puede ser utilizado para intercambiar el eje X y el eje Y, y sus cantidades correspondientes. Como resultado de este ajuste, el eje X se convertirá en el eje vertical y el eje Y se convertirá en el eje horizontal.

♣ **Invertir horizontal o vertical:**

Esta opción es especialmente útil al trazar trayectorias de esfuerzos o diagramas de esfuerzo-deformación, ya que los esfuerzos y las deformaciones son generalmente negativos.

11.7 VER INFORMACION

De forma predeterminada, la información se presenta en la parte derecha de cada ventana de curvas. La información da una breve descripción de los datos presentados en la curva correspondiente. La descripción que aparece es en realidad el título de la curva, que se genera automáticamente sobre la selección de las cantidades para el eje X y eje Y.

11.8 VISUALIZACIÓN DE UNA TABLA

Para ver los datos numéricos presentados en las curvas, una tabla puede ser abierta, haciendo clic en el botón Tabla de la barra de herramientas o

seleccionando la correspondiente opción en el menú Ver. Hay opciones disponibles en el menú de la tabla para imprimir y copiar todos los datos o una parte seleccionada, en el portapapeles de Windows.

11.8.1 Edición de datos de la curva

Después de la selección de la curva adecuada en el cuadro combinado, puntos de la curva pueden ser insertados o eliminados y los valores existentes se pueden modificar. Estas opciones están disponibles haciendo clic en el botón derecho del mouse cuando la ventana de la tabla está activa. La edición de curvas de carga-desplazamiento es a menudo necesaria cuando la gravedad de carga se utiliza para generar los esfuerzos iniciales de un proyecto. Para modelar el comportamiento de la estructura del suelo en su conjunto cuando material adicional se coloca, el grupo del material adicional se activará mediante un cálculo de la construcción por etapas. Al inicio de este cálculo de la construcción por etapas, todos los desplazamientos deben ponerse a cero por el usuario.

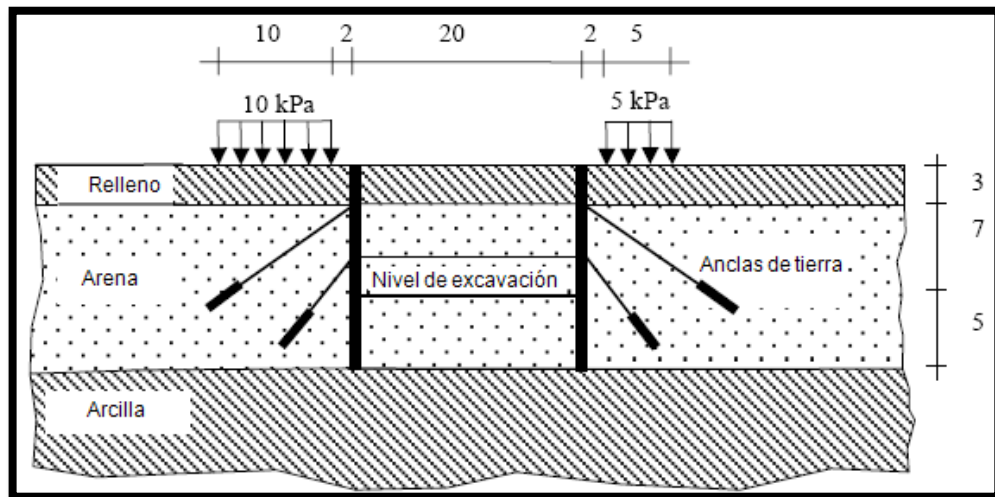
12 EJERCICIOS

El siguiente ejercicio consta de una excavación drenada apoyada en muros pantalla de hormigón, sujetos al terreno por anclajes pre-esforzados.

EJERCICIO 1.

Se realiza una excavación de 20 m de ancho y 10 m de profundidad, los muros pantalla son de hormigón cuyo modulo de Young es de 35 Gpa y tiene un espesor de 0,35 m y una longitud de 15 m. Se utilizan en cada pared dos filas de anclajes al terreno para soportar los muros. Los anclajes superiores tienen una longitud total de 14,5 m., una inclinación de $33,7^\circ$ (2:3) y se unen al muro a una profundidad de 3m respecto a la superficie. Los anclajes inferiores son de 10 m de largo, se instalan con un ángulo de 45° (1:1) y se unen al muro a una profundidad de 7m desde la superficie. En el lado izquierdo de la excavación hay una carga de 10 kN/m^2 y en el lado derecho una carga de 5 kN/m^2 que se tienen en cuenta.

Figura 5. Excavación soportada por muros sujetos posteriormente.



Fuente: Plaxis manual tutorial.

La parte del suelo relacionada se compone de tres capas distintas. Desde la superficie del suelo a una profundidad de 3 metros hay un relleno de suelo relativamente suelto de arena fina. Debajo del relleno, a una profundidad mínima de 15m, se encuentra una capa más o menos homogénea formada por arena densa bien gradada. En la situación inicial hay un nivel freático horizontal de 3m. por debajo de la superficie de tierra, (es decir, en la base de la capa de relleno), debajo de la capa de arena hay una capa de arcilla, que se extiende a gran profundidad.

Tabla 1. Propiedades de la barra de anclaje (anclaje nodo a nodo).

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad
Tipo de comportamiento	Tipo de material	Elástico	-
Rigidez normal	EA	$2 \cdot 10^5$	KN
Espaciado fuera del plano	Ls	2.5	m
Máxima fuerza	Fmax,comp	$1 \cdot 10^{15}$	KN
	Fmax,tens	$1 \cdot 10^{15}$	KN

Tabla 2. Propiedad del cuerpo de la lechada (geomalla).

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad
Rigidez normal	EA	$1 \cdot 10^5$	kN/m

Tabla 4. Propiedades del muro.

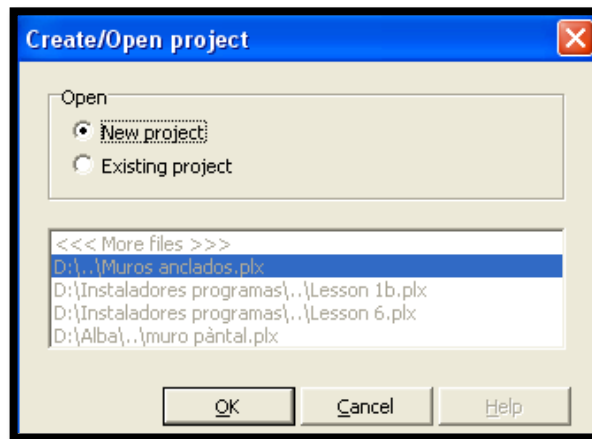
Parámetro	Nombre	Valor	unidad
Tipo de comportamiento	Tipo de material	Elástico	-
Rigidez normal	EA	$12 \cdot 10^6$	kN/m
Rigidez a la flexión	EI	$0.12 \cdot 10^6$	kNm^2/m
Espesor equivalente	d	0.346	m
Peso	W	8.3	$\text{kN}/\text{m}/\text{m}$
relación de Poisson	v	0.15	-

Tabla 3. Propiedades del suelo y la interfaz.

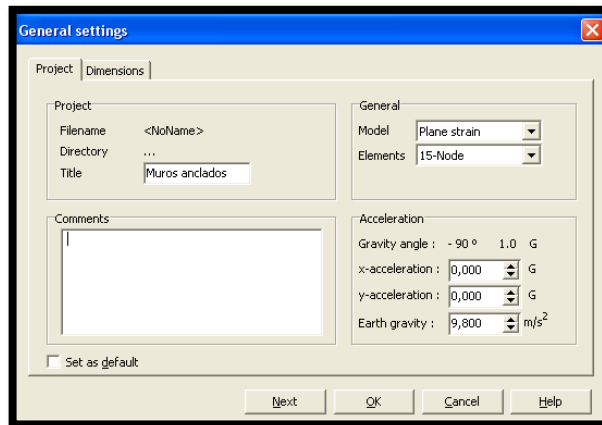
PARAMETRO	RELLENO	ARENA	ARCILLA	UNIDAD
Modelo del materia (Model).	MC	MC	MC	-
Tipo de comportamiento del material (Type).	drenado	drenado	drenado	-
Unidad de peso del suelo por encima del nivel freático (γ_{unsat}).	16	17	17	KN/m ³
Unidad de peso del suelo por debajo del nivel freático (γ_{sat}).	20	20	19	KN/m ³
Permeabilidad horizontal (k_x).	1	0.5	0.1	m/dia
Permeabilidad vertical (k_y).	1	0.5	0.1	m/dia
Modulo de young (E_{ref}).	8000	30000	20000	KN/m ²
Relación de Poisson (ν).	0.3	0.3	0.33	-
Cohesión (c_{ref}).	1	1	8	KN/m ²
Angulo de fricción (ϕ).	30	34	29	°
Angulo de dilatancia (ψ).	0	4	0	°
Factor de reducción de la interfaz (R_{inter}).	0.65	0.7	rigid	-

SOLUCION:

1. Abra el **Input program**, seleccione **New project** y haga clic en el botón **OK**.



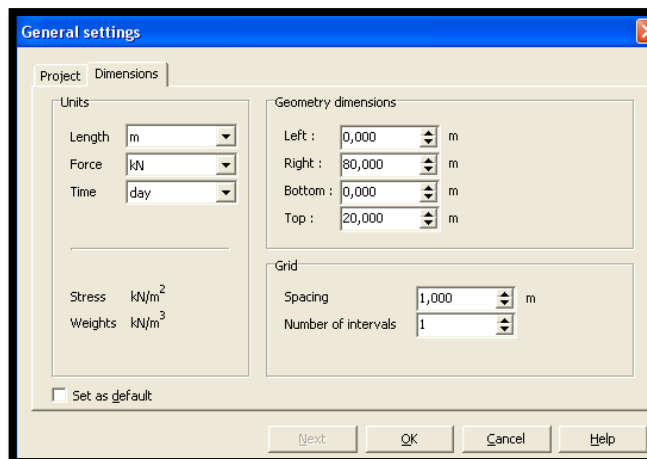
Introduzca un nombre apropiado al proyecto y conserve los ajustes por defecto.



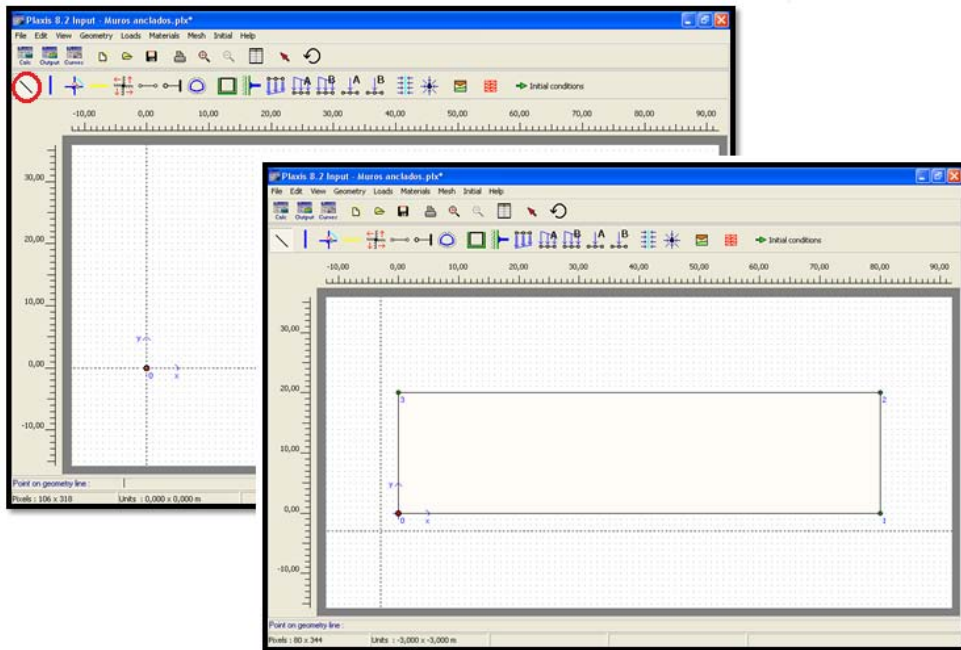
2. Para el modelo geométrico:

El problema puede ser modelado con un área de dibujo de 80 m. de ancho y 20 m. de alto. En la pestaña de dimensiones guarde las unidades estándar e introduzca las dimensiones adecuadas:

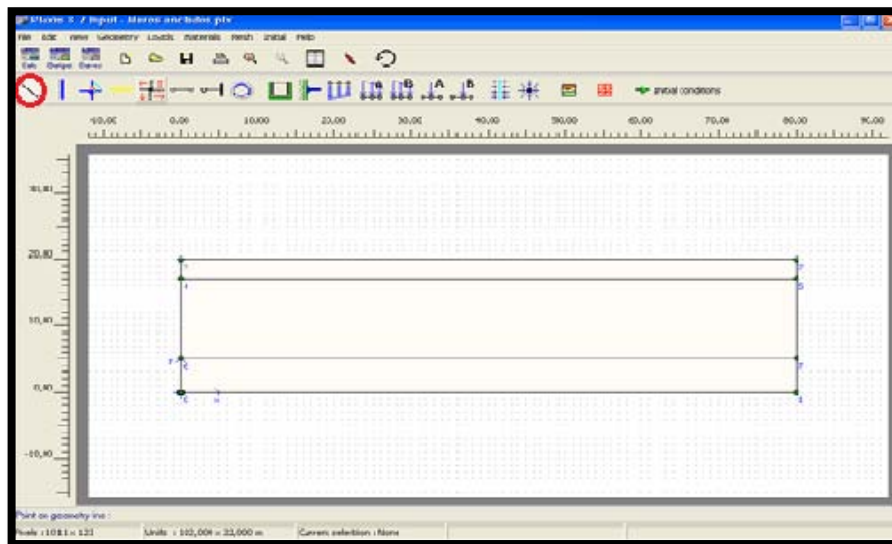
- Left = 0
- Right = 80
- Bottom = 0
- Top = 20
- En la hoja Grid: se recomienda dejar los valores por defecto.
- Spacing = 1
- Number of intervals = 1



Seleccione **Geometry line** de la barra de herramienta y ubique el cursor en el origen (0.0, 0.0) y de un clic, mueva el cursor desde el origen a los puntos de coordenadas necesarias en este caso (80.0, 0.0), (80.0, 20.0), (0.0, 20.0) y (0.0, 0.0) haga clic derecho para terminar.

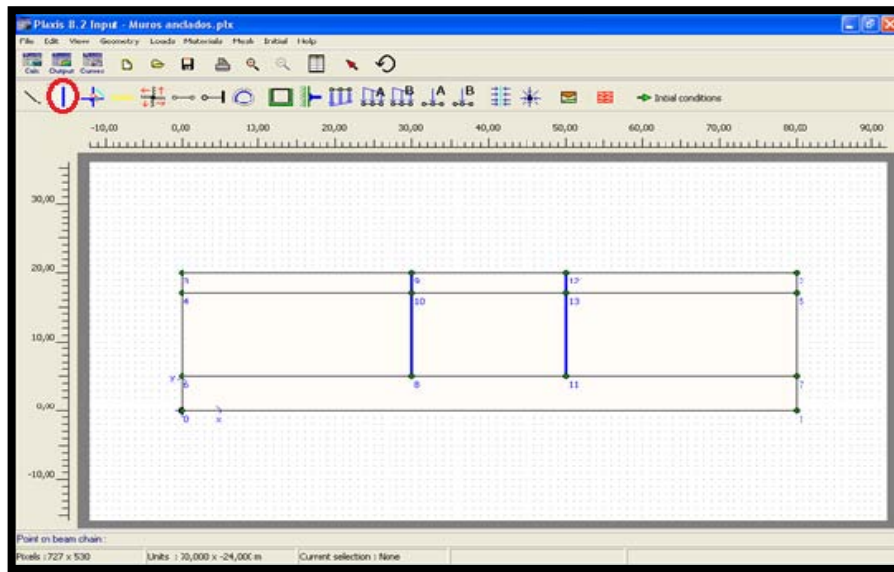


Para subdividir las capas del suelo seleccione **Geometry line** y haga clic en los puntos de coordenadas respectivos: (0.0, 17.0) y (80.0, 17.0), de clic derecho para terminar e iniciar con la siguiente división (0.0, 5.0) y (80.0, 5.0).



Los muros pantalla se modelan como placas. Para dibujarlos seleccione **Plate** y de un clic en los puntos de coordenadas correspondiente:

- Muro lado izquierdo. (30.0, 5.0) y (30.0, 20.0).
- Muro lado derecho. (50.0, 5.0) y (50.0, 20.0).



Para la separación de las etapas de selección con la ayuda de **Geometry line**, de un clic en los puntos de coordenadas:

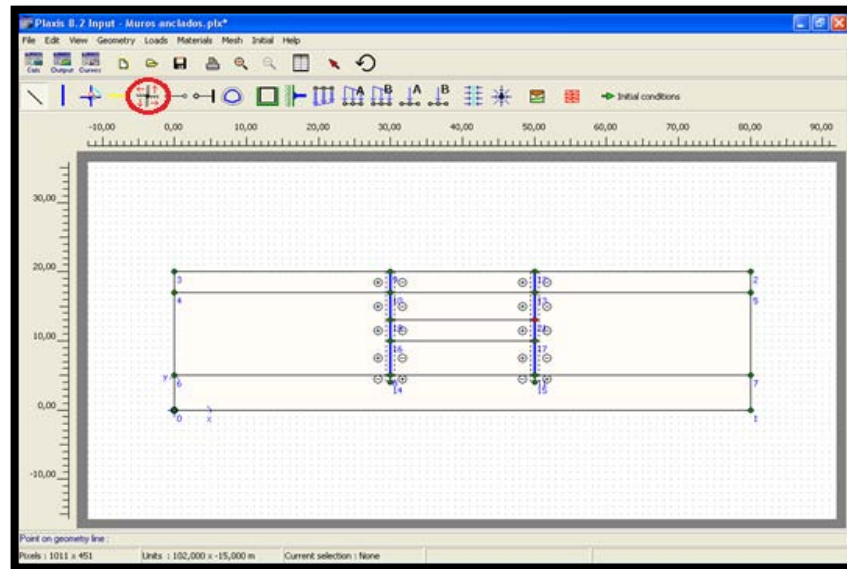
- (30.0, 17.0) y (50.0, 17.0) Anclaje superior.
- (30.0, 13.0) y (50.0, 13.0) Anclaje inferior.
- (30.0, 10.0) y (50.0, 10.0) Nivel de excavación.

Las interfaces alrededor de las placas se utilizan para modelar los efectos de interacción suelo-estructura, estas se extienden 1m. por debajo del muro; tenga en cuenta que las interfaces no deben ser utilizadas alrededor de la geomalla. Es un buen hábito extender las interfaces en las esquinas de las estructuras para permitir la suficiente libertad de deformación y para obtener una distribución de esfuerzos más precisa. Para el diseño de las interfaces seleccione el botón

Interface de la barra de herramienta y de clic en el punto de coordenadas respectivo.

- Muro izquierdo: (30.0, 20.0), (30.0, 4.0) y (30.0, 20.0).
- Muro derecho: (50.0, 20.0), (50.0, 4.0) y (50.0, 20.0).

Al trazar la línea hacia abajo se genera la interfaz al lado izquierdo del muro y cuando se traza hacia arriba se genera la interfaz al lado derecho.

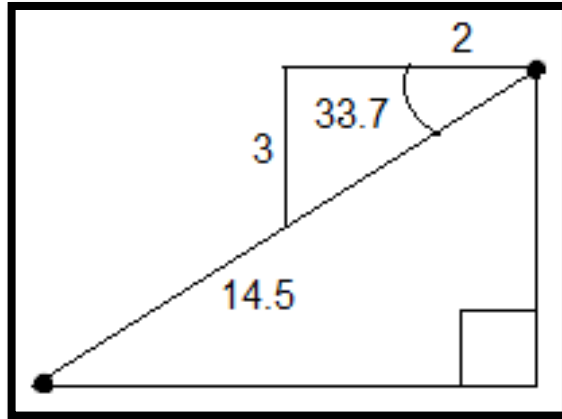


3. Propiedades de los materiales:

Respecto a las propiedades de las anclas de tierra, dos conjuntos de datos de materiales se necesitan: Uno para los tipos de anclaje y otro para los tipos de geomalla, en este ejercicio se utilizan anclajes nodo a nodo. El conjunto de datos de anclajes contiene las propiedades de la barra de anclaje y el conjunto de datos de geomalla contiene las propiedades del cuerpo de la lechada. Los datos correspondientes se muestran en las Tablas 1 y 2 del enunciado.

Para diseñar las anclas se selecciona el botón **Anclaje nodo a nodo** e introducimos las coordenadas que cumplan con la longitud y el grado de inclinación indicada en el enunciado para cada una de las anclas.

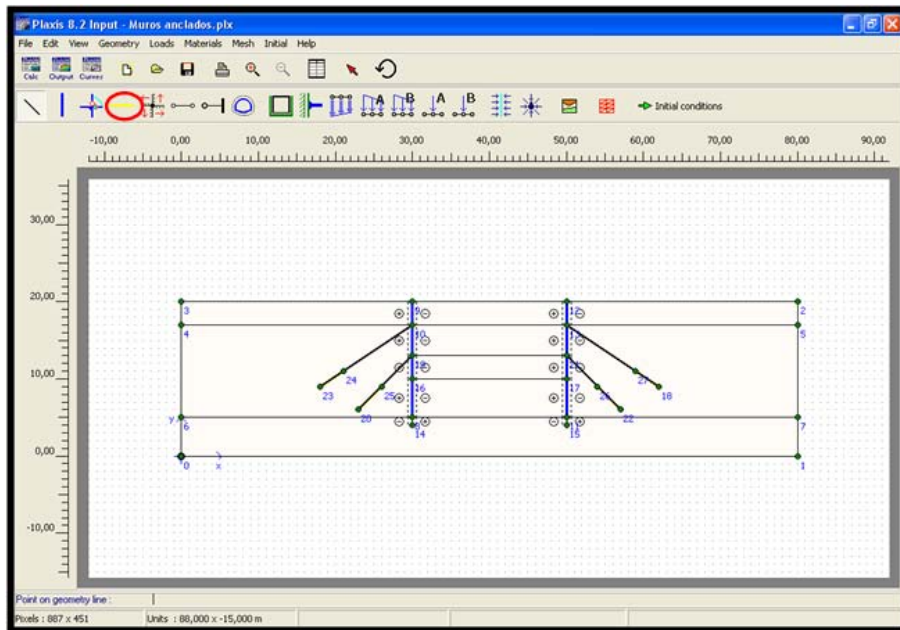
Ilustración 1. Sugerencia para hallar las coordenadas respectivas:



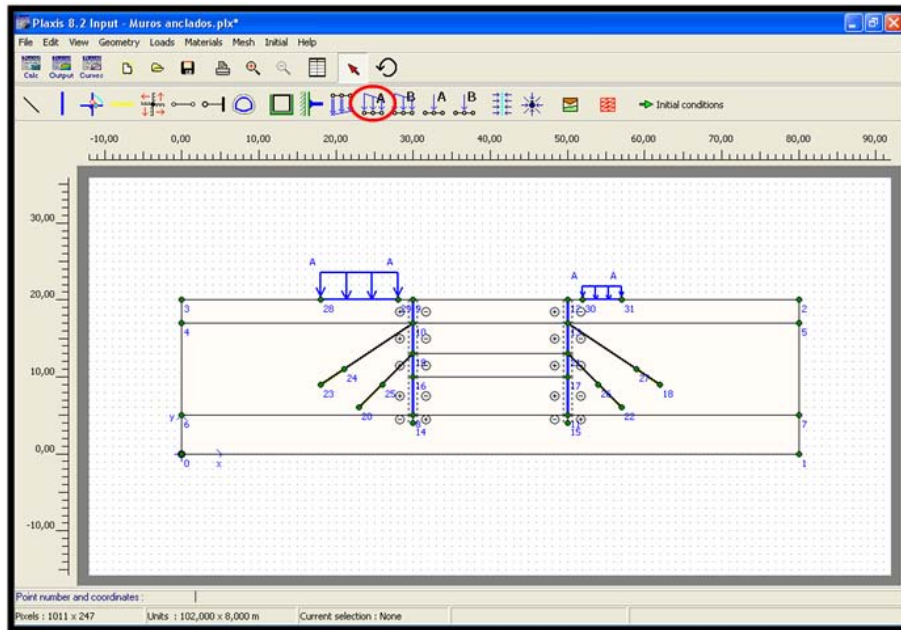
Posterior mente se dibuja la geomalla para modelar el cuerpo de la lechada como se indica a continuación.

Haga clic en el botón **Geogrid** con las coordenadas correspondientes:

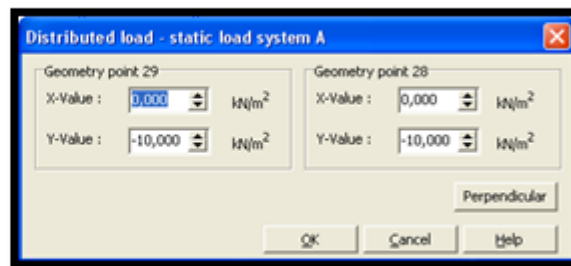
- Anclaje superior izquierdo: (18.0, 9.0) y (21.0, 11.0).
- Anclaje superior derecho: (62.0, 9.0) y (59.0, 11.0).
- Anclaje inferior izquierdo: (23.0, 6.0) y (26.0, 9.0).
- Anclaje inferior derecho: (57.0, 6.0) y (54.0, 9.0).



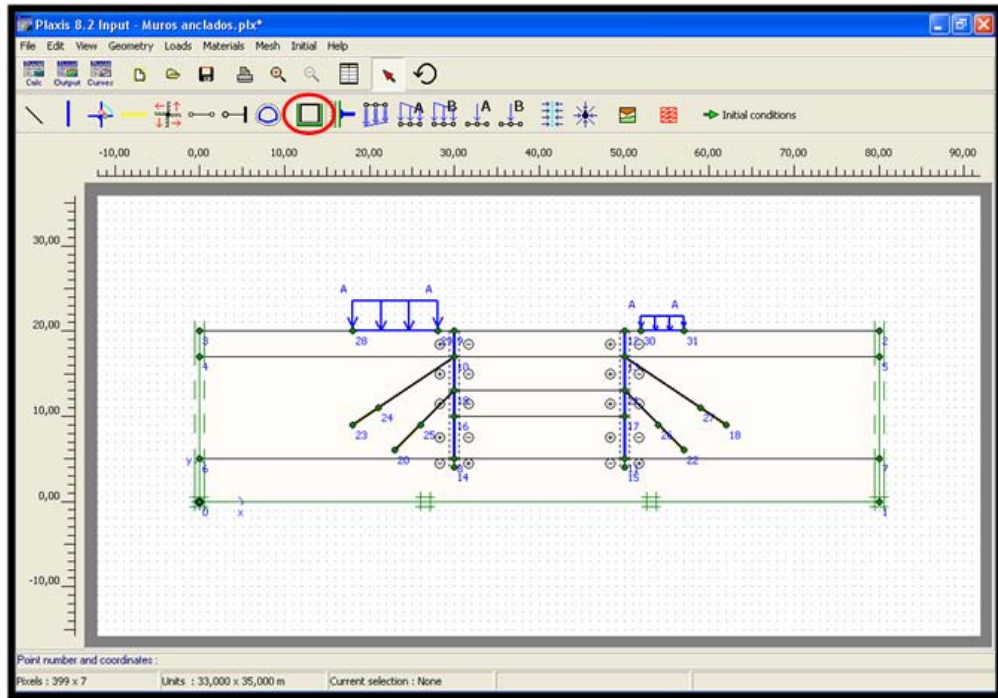
Seleccione el sistema de **Carga distribuida A** y dibuje la carga en el respectivo punto de aplicación, tenga en cuenta que al elegir los multiplicadores deben corresponder a este sistema de carga.



Introduzca el valor de las cargas haciendo doble clic en la línea geométrica correspondiente y seleccionando el sistema de carga en el cuadro de diálogo de selección.



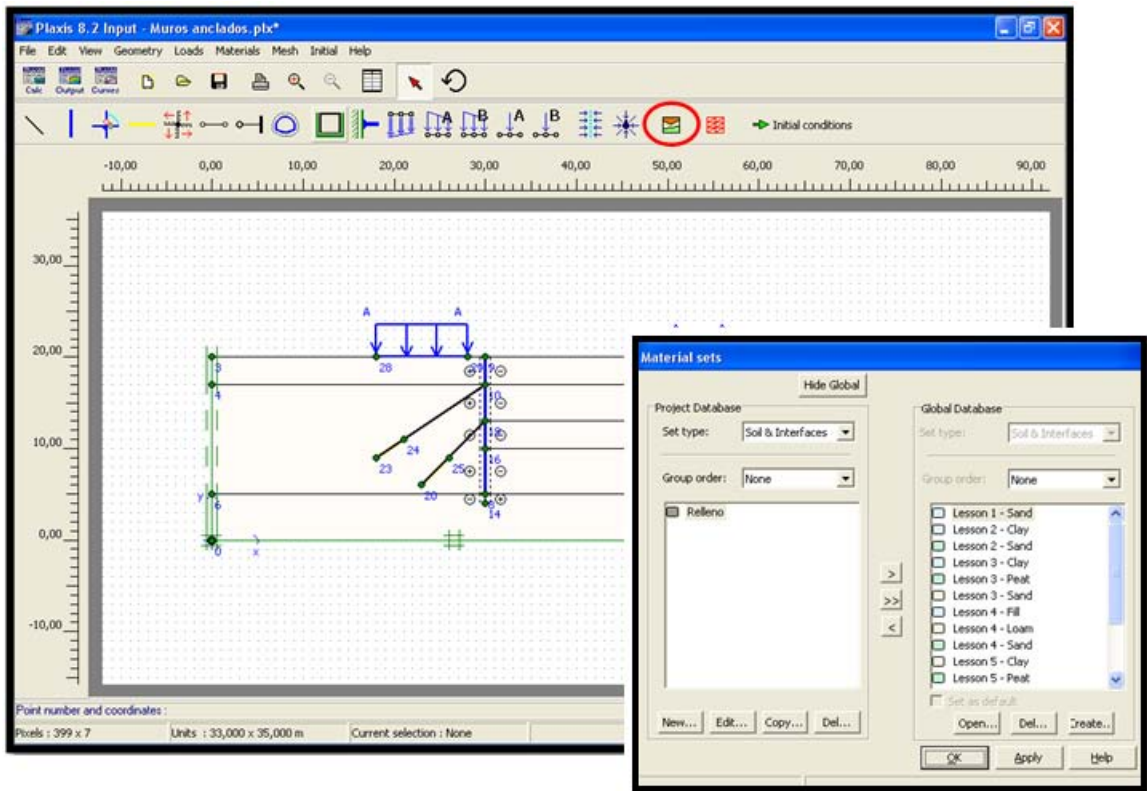
Para crear las condiciones de limite seleccione **Standard fixities** del menú herramientas.



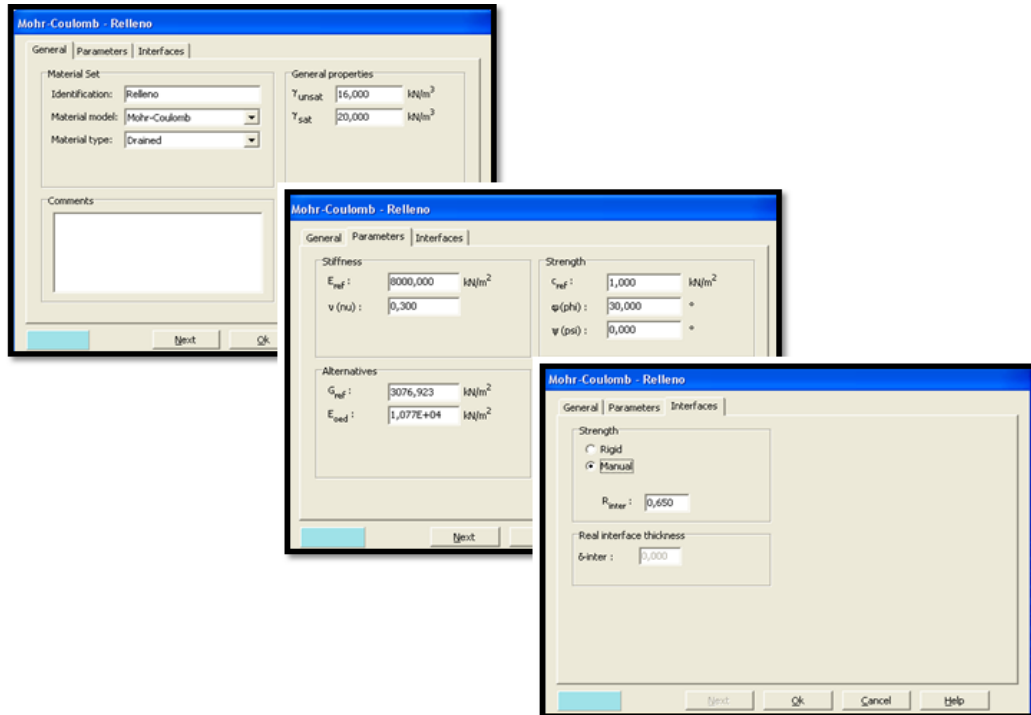
El suelo se compone de tres capas distintas. Introduzca tres conjuntos de datos para el suelo y las interfaces con los parámetros dados en la Tabla 3 del enunciado.

Las propiedades del diafragma del muro de hormigón se introducen en un conjunto de materiales de tipo Placa. Recuerde que el hormigón tiene un módulo de Young de 35 GPa y el muro tiene un espesor de 0,35 m. Las propiedades se muestran en la Tabla 4 del enunciado.

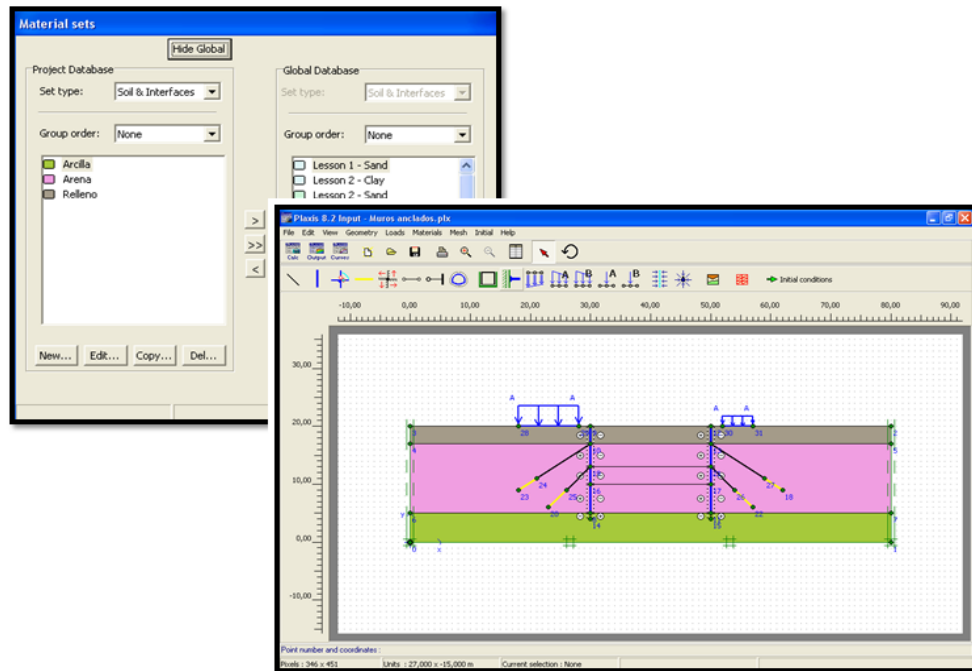
Para la asignación de cada una de estas propiedades de un clic en el botón de **Material sets**



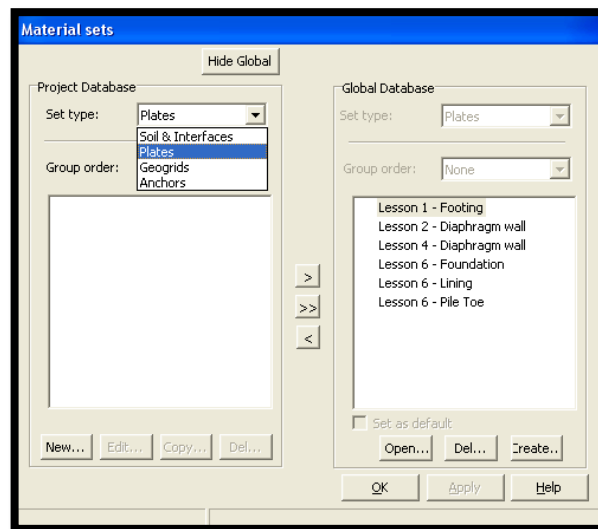
Haga clic en **New** del sistema de materiales y asigne el nombre indicado e incorpore las propiedades de cada capa del suelo de acuerdo a la tabla 3.



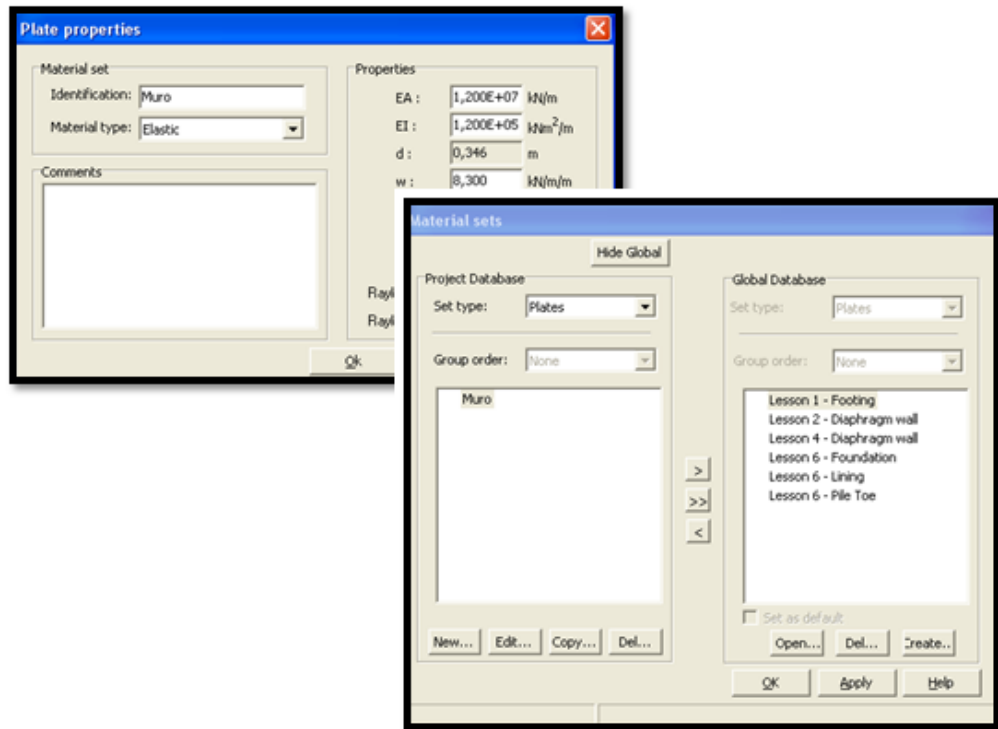
Sin cerrar la tabla de materiales, seleccione la capa de relleno y arrástrela con el mouse hasta el cluster de la geometría en la parte superior y así sucesivamente con cada material.



En el sistema de materiales seleccione el tipo de parámetro **Plates** posteriormente de clic en **New**.



Asigne el nombre y las características para los muros según la tabla 4 e igualmente, sin cerrar la ventana de materiales, selecciónelo y arrástrelo con el mouse hasta la geometría de cada muro.

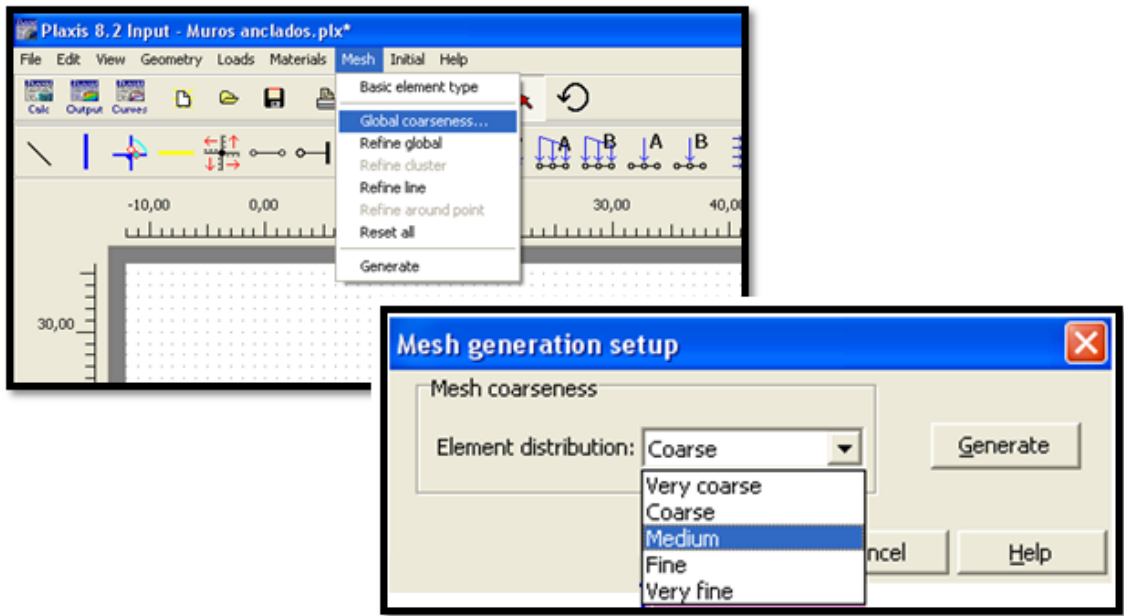


En el sistema de materiales seleccione el tipo de parámetro **anchors** posteriormente **New** de igual manera que los otros materiales asigne las propiedades indicadas en la tabla 1.

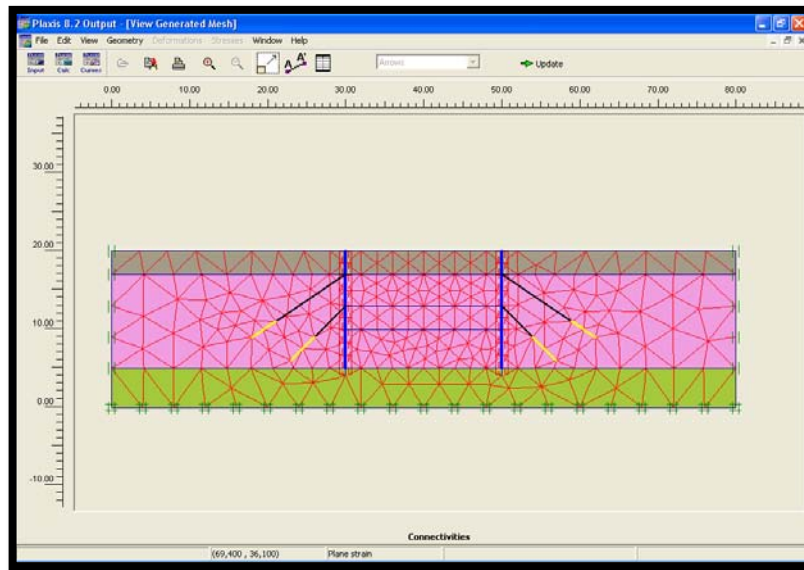
En el sistema de materiales seleccione el tipo de parámetro **Geogrids** posteriormente **New** de igual manera que los otros materiales asigne las propiedades indicadas en la tabla 2.

4. Generación de malla:

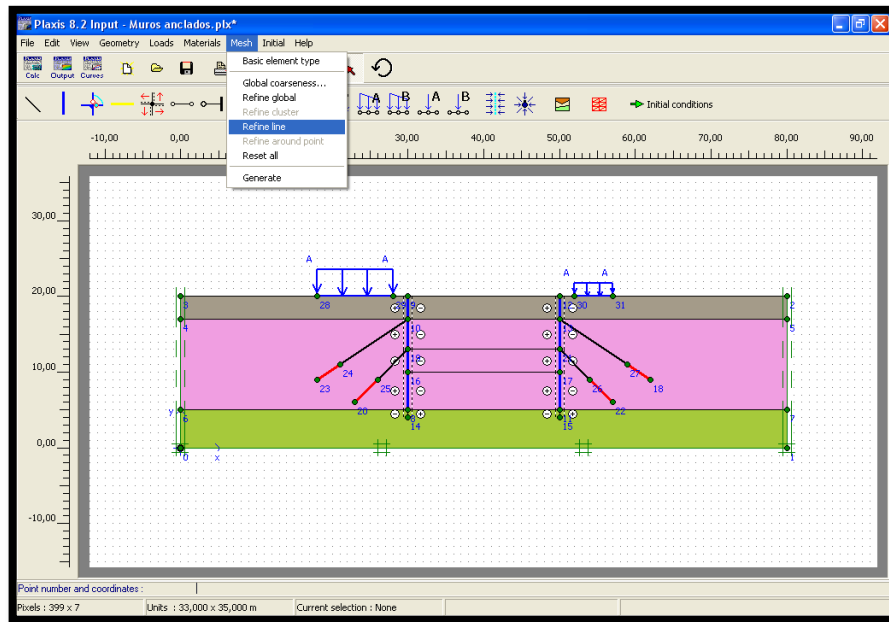
Para la generación de malla se recomienda seleccionar **Mesh** en la barra de herramientas, elegir **Global coarseness** y en la ventana que aparece cambie la opción **Coarse** por **Medium**, posteriormente haga clic en **Generate mesh**.



En la ventana del programa de salida se indica el primer refinamiento, haga clic en **Update** para salir.



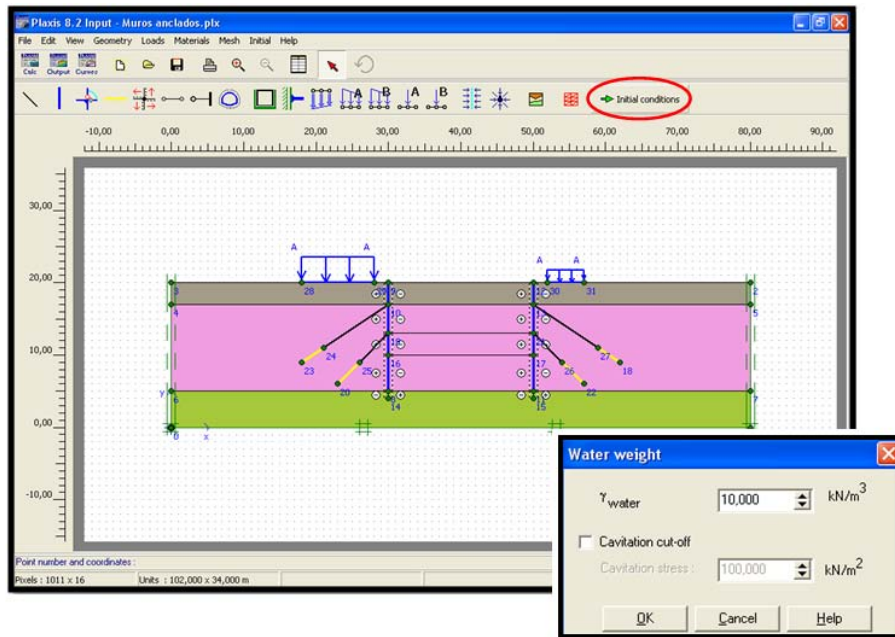
Seleccione las cuatro geomallas simultáneamente (usando la tecla <Shif>) y escoja **Refinar línea** en **Mesh**.



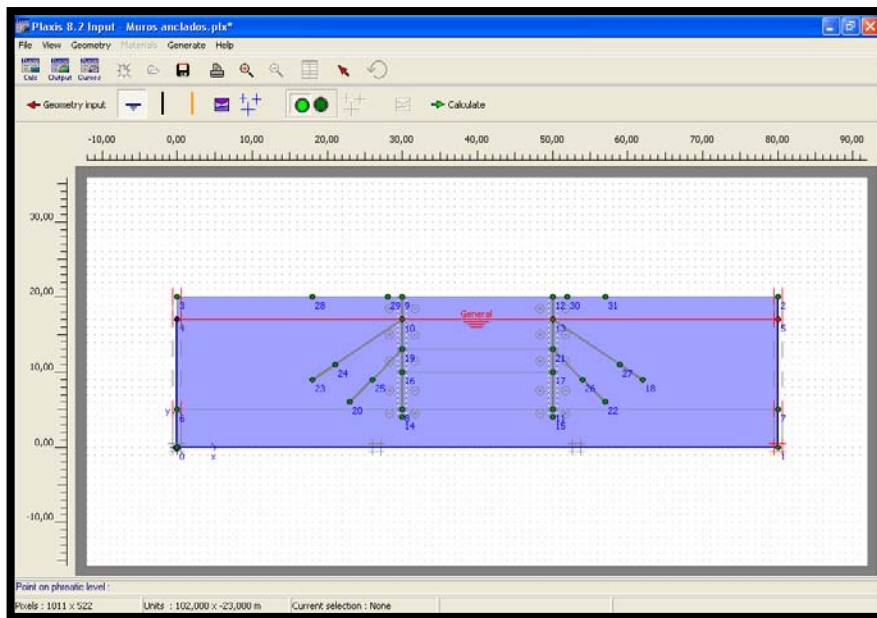
Este proceso resulta en una malla de aproximadamente 590 elementos.

5. Condiciones iniciales:

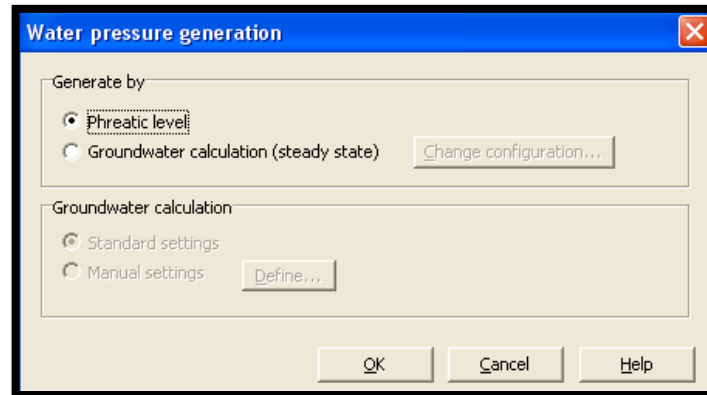
Inicialmente, todos los componentes estructurales están inactivos. Por lo tanto, asegúrese de que las placas, los anclajes de nodo a nodo y geomallas estén desactivadas. Las cargas superficiales son también inicialmente inactivas. El campo de tensión inicial se genera por medio del Procedimiento K0, que utiliza el valor predeterminado K0 en todas las categorías. Seleccione **Initial conditions**, acepte el valor por defecto para el peso del agua en la nueva ventana.



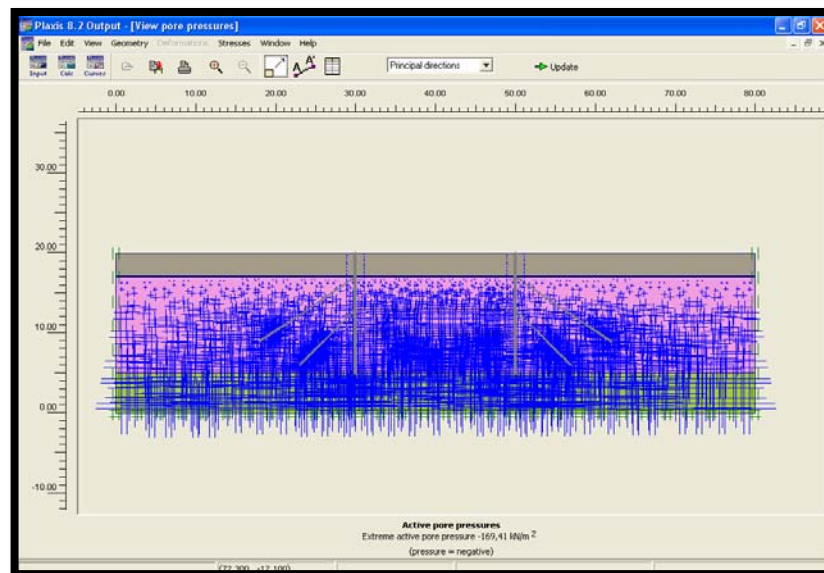
Las condiciones de agua subterránea se activan, la ventana muestra un nivel freático que está activo por defecto, pero este puede ser modificado de acuerdo a las necesidades del ejercicio, para este caso se traza el nivel freático general a unas coordenadas de (0.0, 17.0) y (80.0, 17.0) haga clic derecho para terminar.



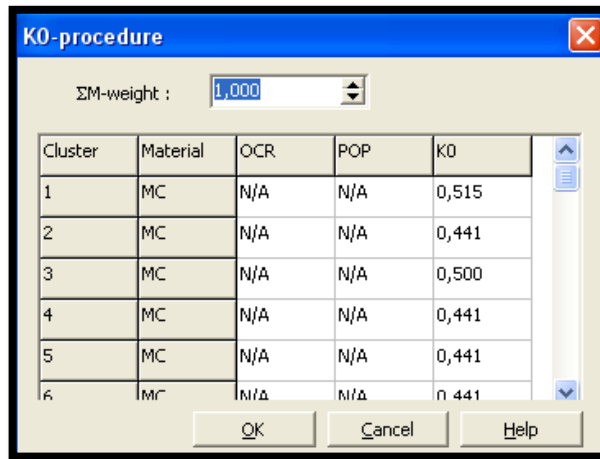
Seleccione **Generate water pressures** en la nueva ventana acepte **phreatic level**.



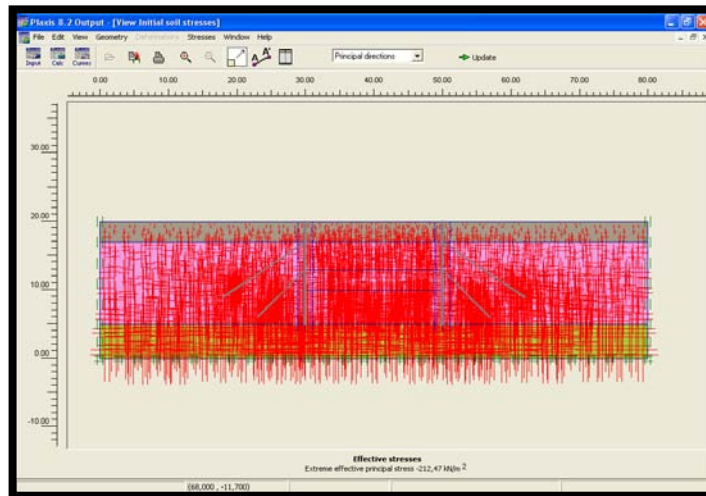
Después de generar las presiones de agua el resultado se exhibe en la ventana del programa de salida.



Ahora hay que proceder a la configuración de la geometría, oprima el botón derecho del interruptor con el fin de activar el botón **Generate initial stresses**, haga clic sobre este y acepte los valores prefijados del multiplicador de peso (ΣM -weight) y K_0 .

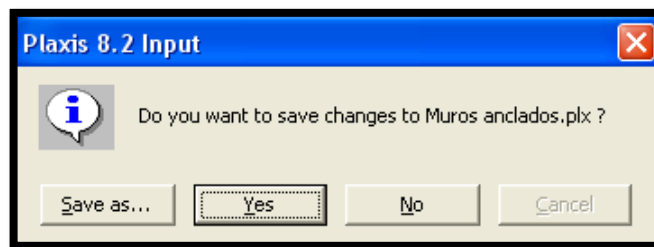


Los resultados se exhiben en la ventana del programa de salida.

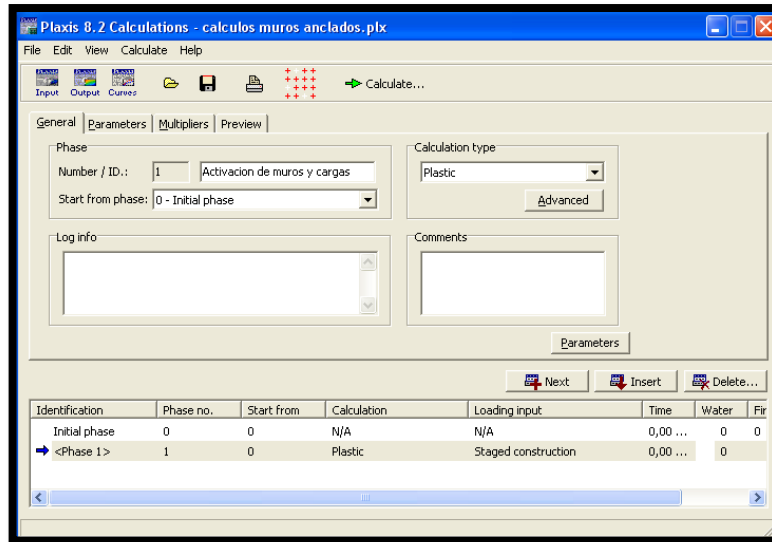


6. Cálculos:

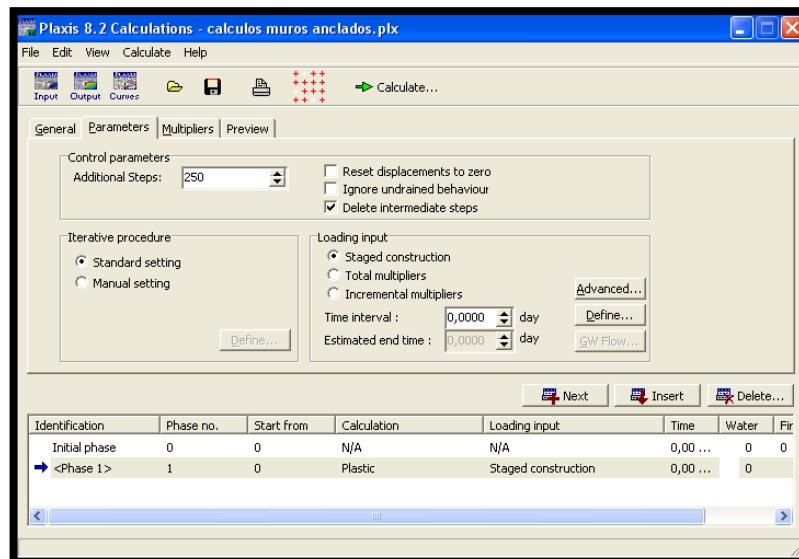
De clic en **Calculate** para proceder al modo de cálculo y guarde con un nombre conveniente el archivo.



Además de la fase inicial, la primera fase de cálculo también ha sido creada automáticamente. Mantenga los valores por defecto en la ventana general, se puede asignar un nombre indicado para cada fase.



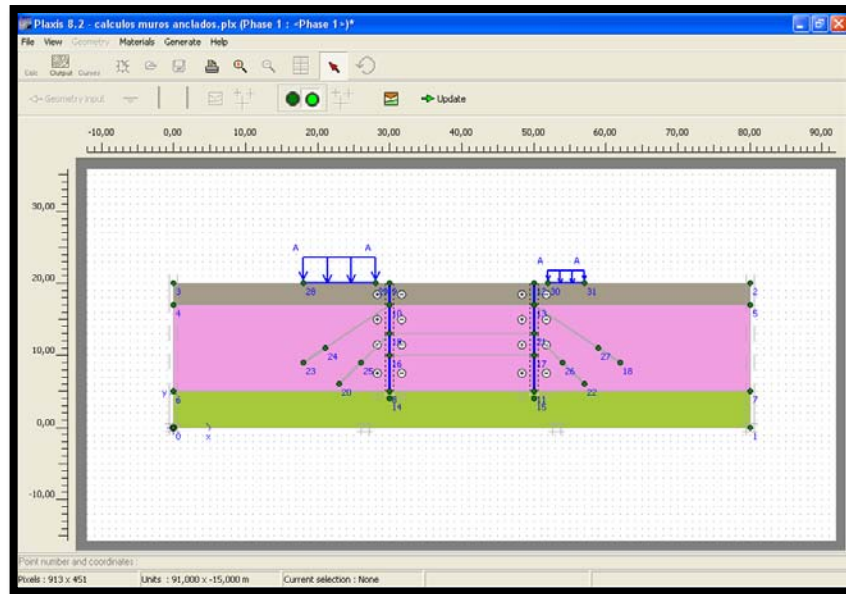
En la ventana parámetros active **Staged construction**, acepte los valores predeterminados y luego seleccione **Define**.



El cálculo se compone de seis fases, estas se definen como cálculo plástico con la construcción por etapas como la carga de entrada y la configuración estándar para

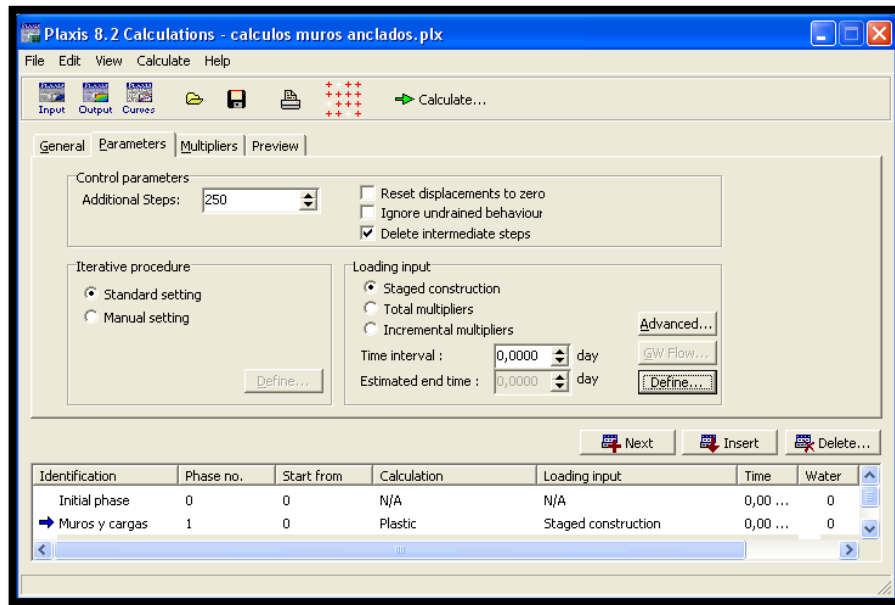
todos los otros parámetros. Las instrucciones dadas a continuación se limitan a una descripción de cómo las fases se definen en el modo de construcción por etapas.

Fase 1. Los muros y las cargas de la superficie se activan: Para la primera fase de cálculo asegúrese que tanto las cargas como los muros estén activos, esto se hace dando clic sobre estos elementos, deben tomar un color azul. Introduzca un valor $Y = -10 \text{ kPa}$ y $Y = -5 \text{ kPa}$ para las cargas en el lado izquierdo y derecho respectivamente.

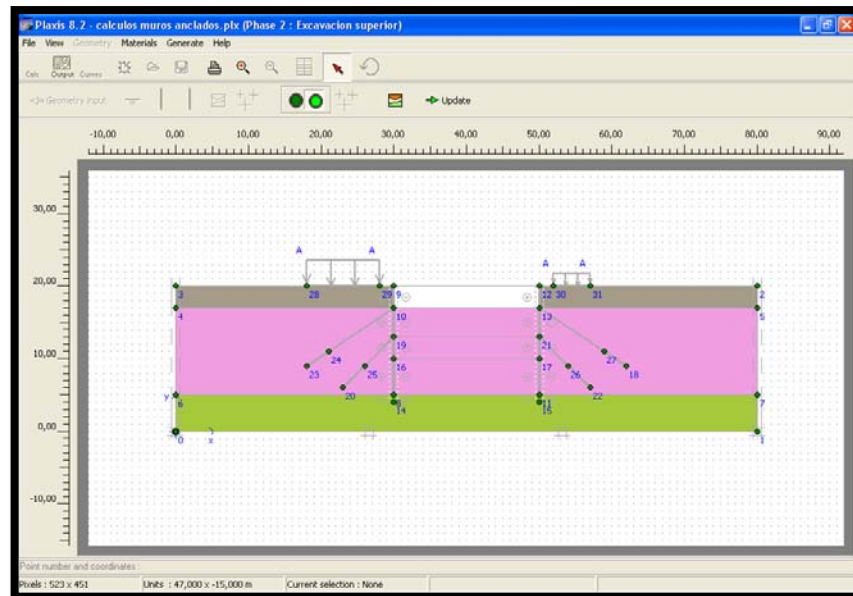


Fase 2. Se excavan los primeros 3 m del pozo sin la conexión de los anclajes al muro, a esta profundidad se mantiene seca la excavación:

Desactivar el grupo superior de la excavación. Para introducir la fase 2 se hace por medio del botón **Next** e igualmente se le asigna un nombre en la pestaña general. En la pestaña parámetros se activa **Staged construction**, acepte los valores predeterminados y luego seleccione **Define**.

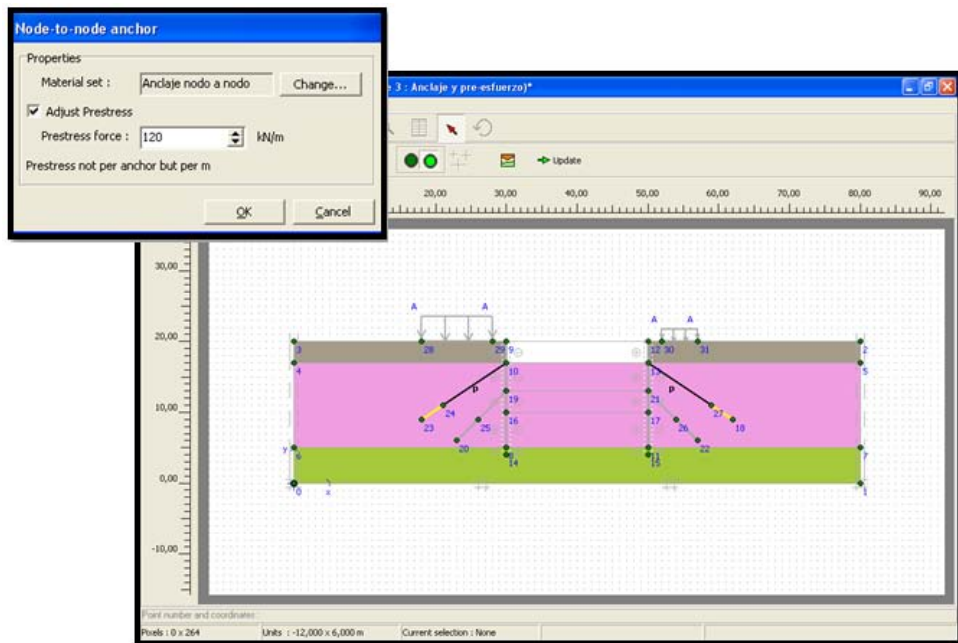


Haga clic en la primera excavación para quitar el suelo.



Fase 3: Se instala el primer ancla y se pre-esfuerza:

Para definir la fase 3, active las geomallas superiores dando clic sobre ellas. Haga doble clic en los anclajes nodo a nodo superiores, la ventana de propiedades aparece con las opciones de pre-esfuerzo, active **Adjust Prestress** del cuadro e introduzca una fuerza de 120 kN / m. Pulse **OK** para cerrar la ventana.

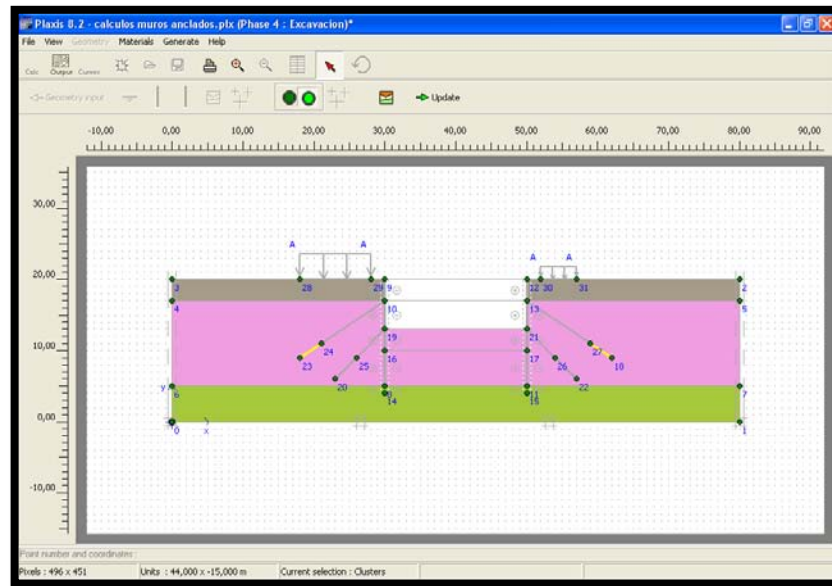


Sugerencia:

Una fuerza de pre-esfuerzo se adapta exactamente al final de un cálculo de la construcción por etapas y termina convertida en una fuerza de anclaje. En las fases sucesivas de cálculo de la fuerza es considerada como la fuerza sólo un ancla y puede aumentar por lo tanto más o disminuir, dependiendo de la evolución de los alrededores de las tensiones y fuerzas.

Fase 4: consiste en una excavación más a una profundidad de 7 metros, incluida la desecación de la excavación. Esto implica un análisis de flujo de aguas subterráneas para calcular la nueva distribución del agua intersticial, que es una parte de la definición de la tercera fase de cálculo.

Desactive el segundo grupo de la excavación. Para definir la fase 4, se hace por medio del botón **Next** e igualmente se le asigna un nombre en la pestaña general. En la pestaña parámetros se activa **Staged construction**, acepte los valores predeterminados y luego seleccione **Define**, Haga clic en la segunda excavación para quitar el suelo.

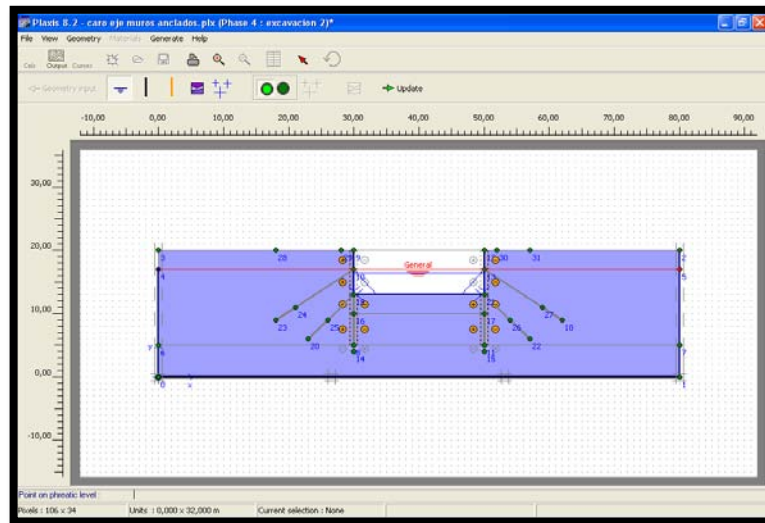


Ahora las condiciones de contorno para el cálculo de flujo de agua subterránea tienen que ser ingresadas. En los límites laterales, la cabeza del agua subterránea se mantiene en un nivel de 17.0 m. El límite inferior del problema se debe cerrar. El flujo de las aguas subterráneas se desencadena por el hecho de que el pozo se bombea seco. En la parte inferior de la excavación la presión del agua es cero, lo que significa que la cabeza del agua subterránea es igual al nivel vertical (cabeza = 13,0 m). Esta condición puede efectuar la elaboración de un nuevo nivel freático general y realizar un cálculo de flujo de aguas subterráneas. La activación de las interfaces en el cálculo de flujo de agua subterránea impide el flujo a través del muro.

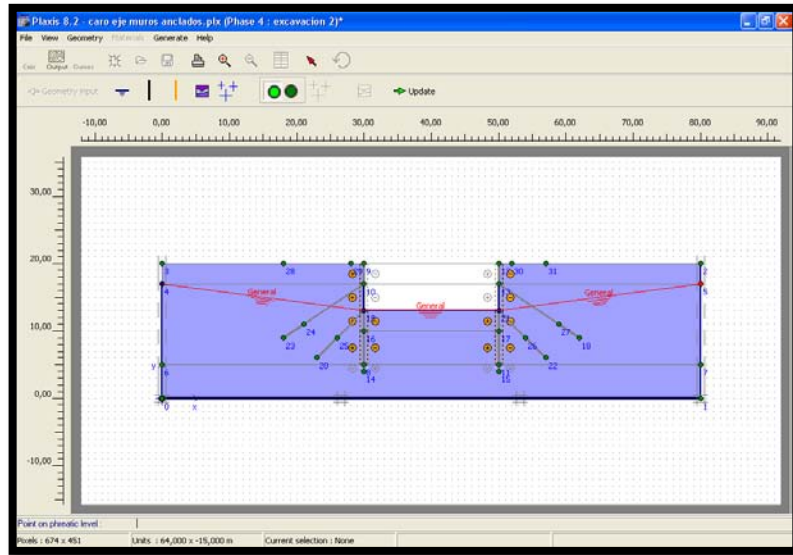
Esto implica un análisis de flujo de aguas subterráneas para calcular la nueva distribución del agua intersticial. Esta condición puede efectuar la elaboración de un nuevo nivel freático general y realizar un cálculo de flujo de aguas subterráneas. La activación de las interfaces en el cálculo de flujo de agua subterránea impide el flujo a través del muro. Con el fin de prescribir correctamente estas condiciones de frontera, siga estos pasos:

- Haga clic en el 'interruptor' para ir al modo de presión de agua.

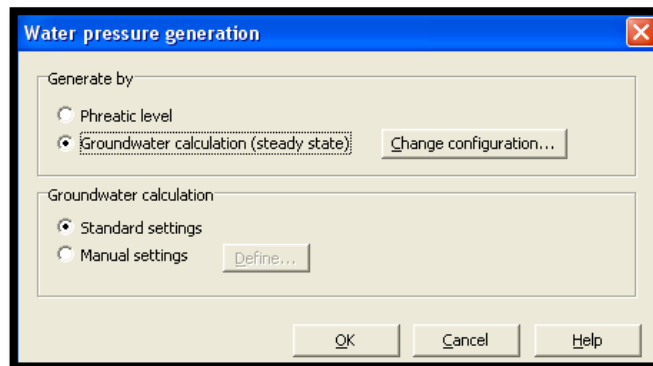
- Seleccione el botón **Closed flow boundary** (línea negra) de la barra de herramientas.
- Haga clic en el punto inferior izquierdo de la geometría y proceda a hacer clic al punto inferior derecho.
- Haga clic en el botón de selección (flecha roja).



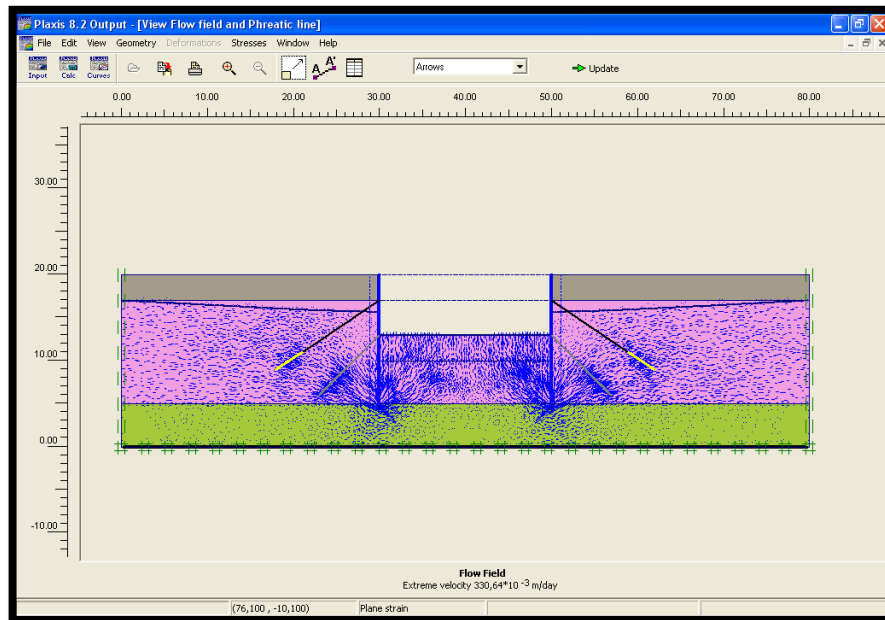
Las interfaces de ambos lados de la pared son activadas de forma predeterminada en el modo de presión de agua, marcándolos como impermeables. Una interfaz activa está marcada con un círculo naranja y se considera impermeable durante los cálculos de las aguas subterráneas. No encienda las interfaces debajo de los muros para impermeabilizar, deben permanecer inactivo durante el cálculo de flujo de agua subterránea. Haga clic en el botón **Phreatic level general** y dibuje un nuevo nivel freático. Inicie en (0.0, 17.0) y dibuje el nivel freático a través de (30.0, 13.0), (50.0, 13.0) y finaliza en (80.0, 17.0).



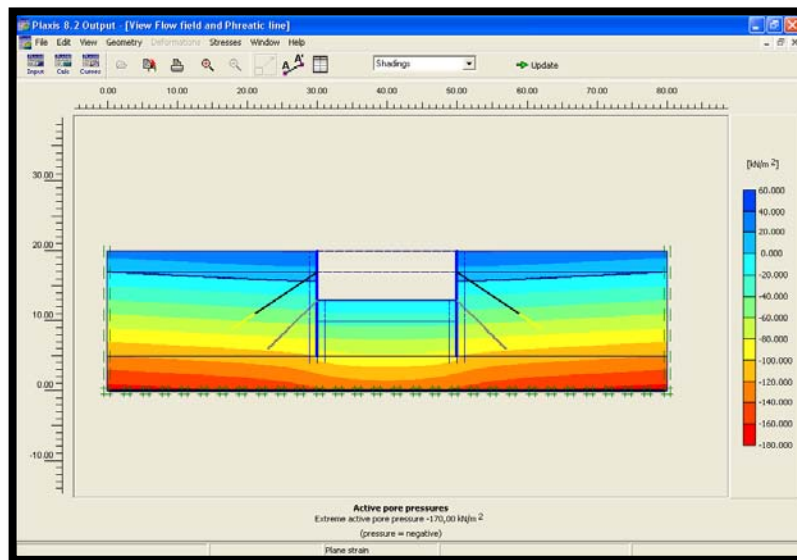
Haga clic en el botón **Generate water pressures**. Active **Grondwater calculation** del cuadro y haga clic en **OK** para iniciar el cálculo de flujo de agua subterránea.



Después de que el cálculo de las aguas subterráneas ha terminado, presione el botón OK en la ventana de cálculo. La ventana se cierra y el campo de flujo se presenta en la ventana de resultados.

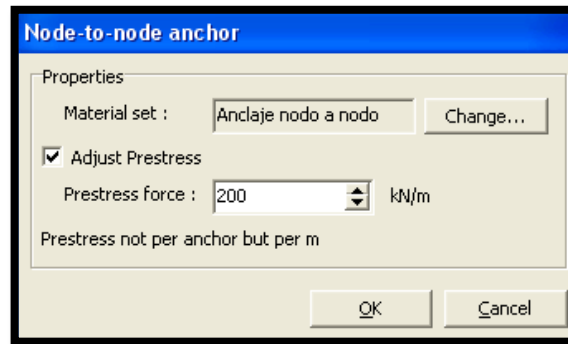


Los resultados de un cálculo de aguas subterráneas se pueden ver como las presiones de poros, el campo de flujo y la cabeza de aguas subterráneas. Estas opciones están disponibles en el menú **Stresses**.

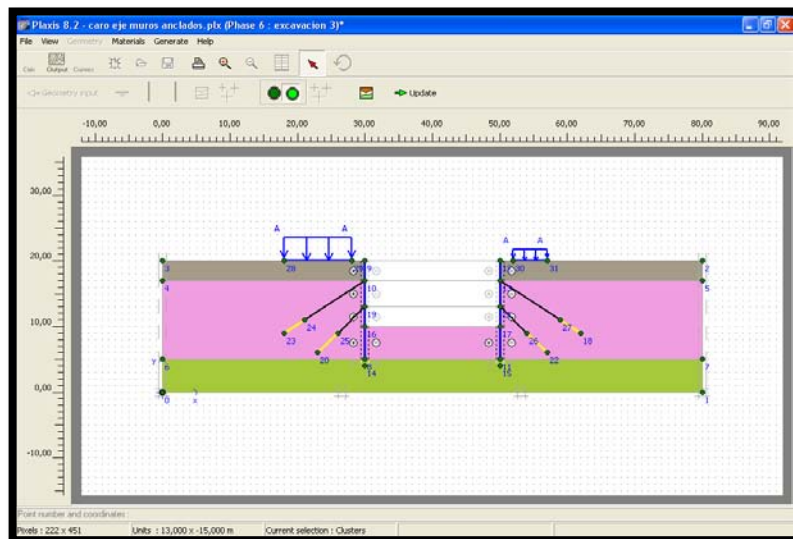


Haga clic en el botón **Update** para volver al modo de construcción por etapas y en el modo de construcción por etapas, haga clic en el botón **Update** nuevamente para volver al programa de cálculo.

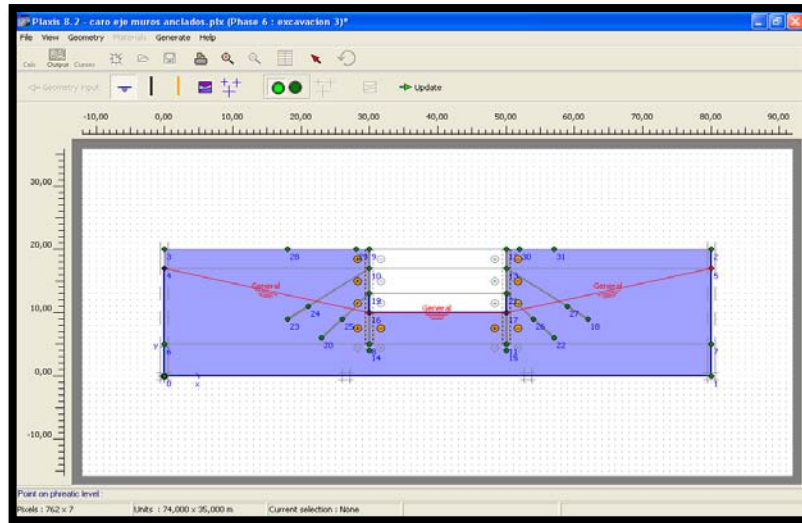
Fase 5: Para definir la fase 5, active las geomallas inferiores dando clic sobre ellas. Haga doble clic en los anclajes nodo a nodo inferiores, la ventana de propiedades aparece con las opciones de pre-esfuerzo, active **Adjust Prestress** del cuadro e introduzca una fuerza de 200 kN / m. Pulse **OK** para cerrar la ventana.



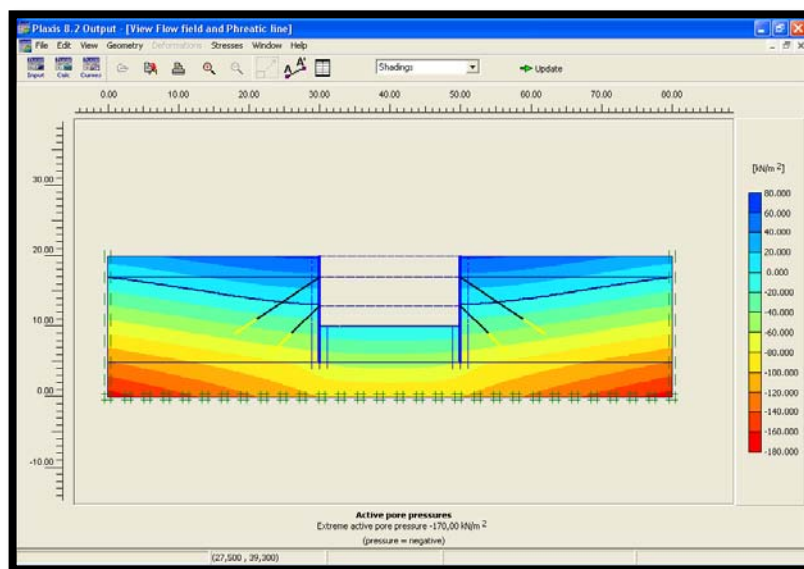
Fase 6: Es una excavación y desecación mas a una profundidad final de 10 m. Para introducir la fase 6 se hace por medio del botón **Next** e igualmente se le asigna un nombre en la pestaña general. En la pestaña parámetros se activa **Staged construction**, acepte los valores predeterminados y luego seleccione **Define**. Haga clic en la tercera excavación para quitar el suelo.



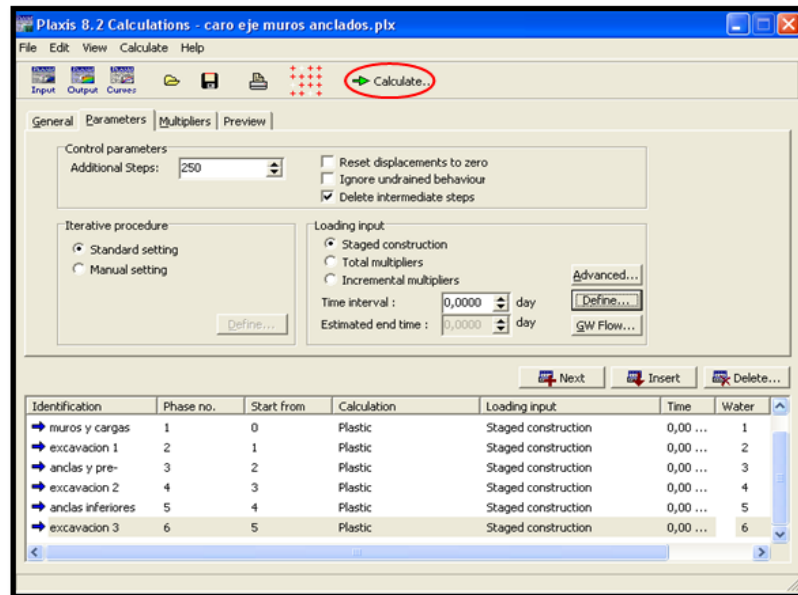
Realice de nuevo todos los pasos de la fase 4, teniendo en cuenta las nuevas coordenadas del nivel freático; dibuje un nuevo nivel freático general de (0.0, 17.0) a través de puntos (30.0, 10.0) (50.0, 10.0) y (80,0, 17,0).



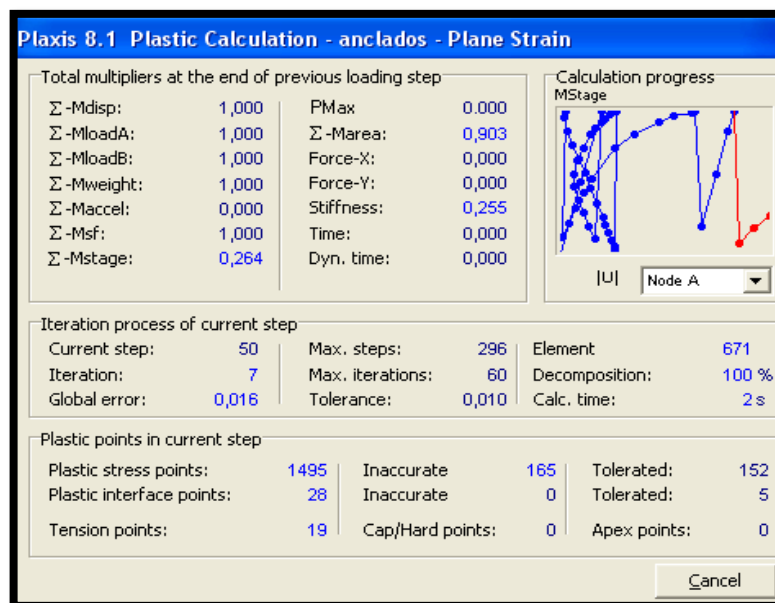
Los resultados de un cálculo de aguas subterráneas se pueden ver como las presiones de poros, el campo de flujo y la cabeza de aguas subterráneas. Estas opciones están disponibles en el menú **Stresses**.



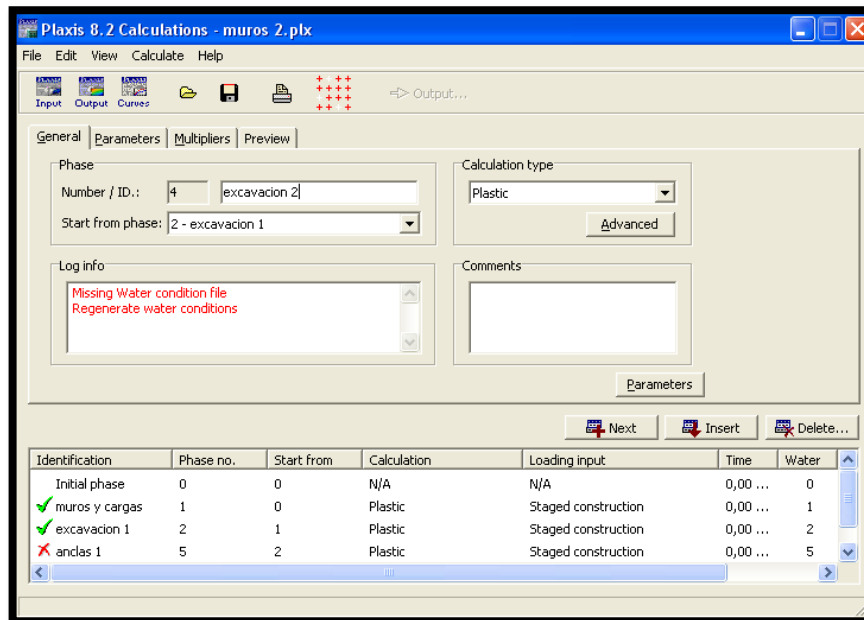
Después de que todas las fases de cálculo se han definido algunos puntos de las curvas carga-desplazamiento deben ser seleccionados (por ejemplo los puntos de conexión de las anclas de tierra en la pared del diafragma). Procedemos a realizar los cálculos dando clic en el botón **Calculate**



Al hacer clic en el botón **calculate** aparece la ventana de iteraciones de cada fase.



Una vez terminado el proceso de cálculo se debe verificar que este haya terminado exitosamente para cada fase, lo cual se indica por un símbolo de color verde, si aparece una cruz roja significa que el cálculo no termino satisfactoriamente y debe inspeccionarse el motivo de la falla para ser corregida.

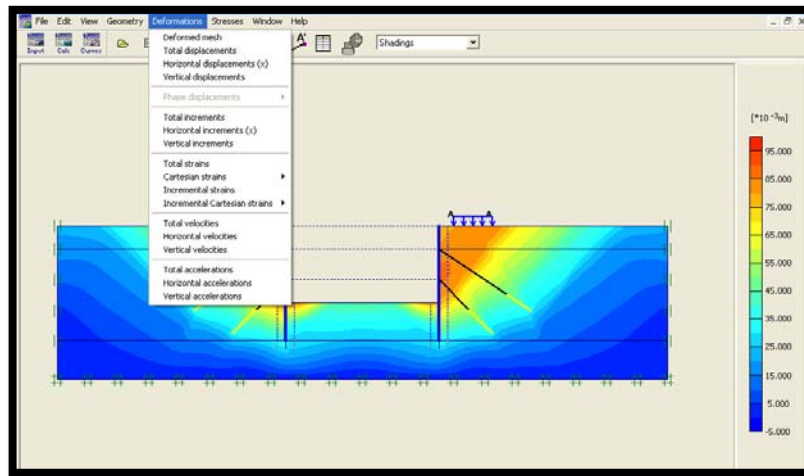


RESULTADOS:

En las siguientes figuras se muestra cómo se va deformando la malla en cada una de las fases de cálculo.

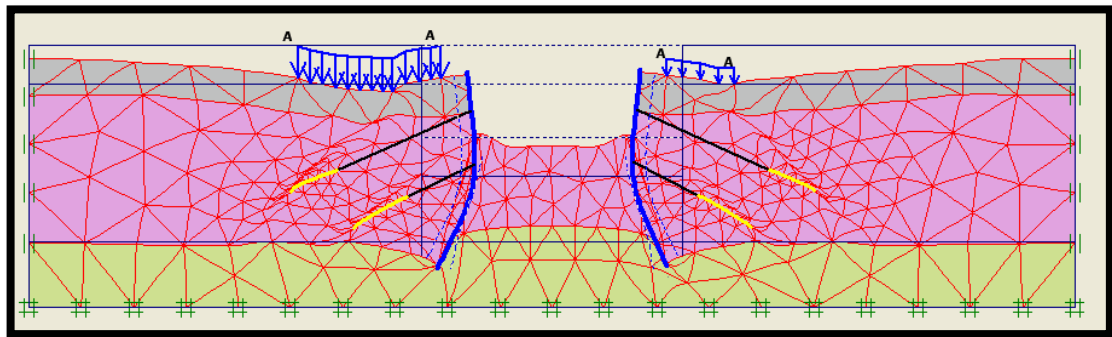
DEFORMACIONES

Al hacer clic sobre la ventana deformaciones se despliega una serie de opciones como: malla deformada, desplazamientos totales, desplazamientos horizontales, desplazamientos verticales, incrementos totales, incrementos horizontales, incrementos verticales, deformaciones totales, deformaciones cartesianas, deformaciones incrementales, deformaciones incrementales cartesianas, velocidad vertical, aceleración total, aceleración horizontal y aceleración vertical.



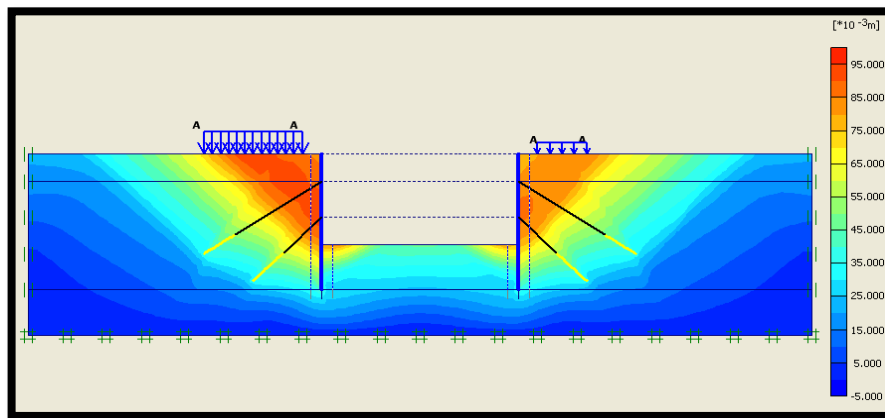
A continuación se exponen algunas de estas graficas:

- ♣ Malla deformada de la última fase.



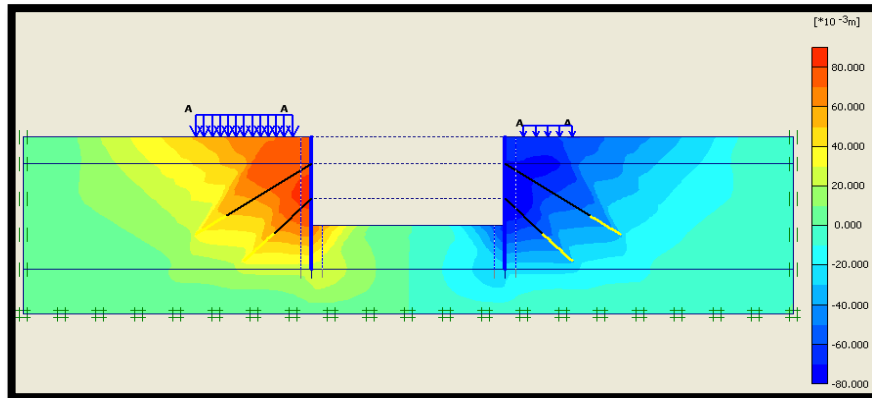
Desplazamiento total $94.92 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

- ♣ Desplazamientos totales última fase.



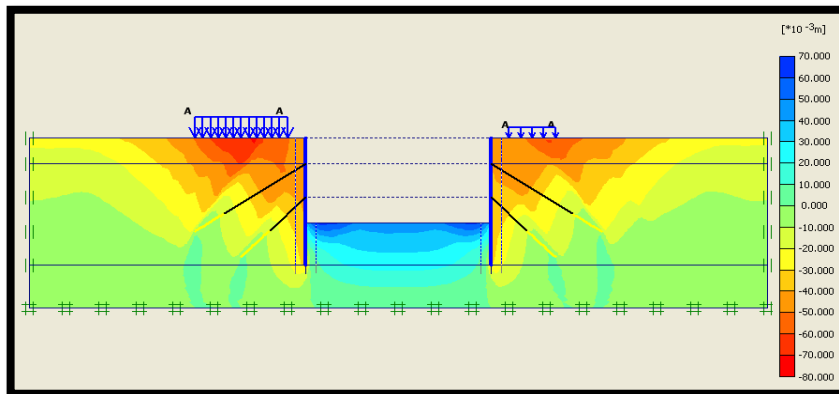
Desplazamiento total (U tot) $94,92 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

♣ Desplazamientos horizontales (x) última fase.



Desplazamiento horizontal (U_x) máximo $82,40 * 10^{-3}$ m.

♣ Desplazamientos verticales última fase.



Desplazamiento vertical (U_y) extremo $-70,65 * 10^{-3}$ m.

Desplazamientos en el muro de la izquierda:

El programa proporciona los valores de los desplazamientos en cada uno de los nodos del suelo y de las estructuras. La siguiente tabla es una fracción de la tabla correspondiente a los desplazamientos en los nodos de 4 de los elementos del muro diafragma de la izquierda.

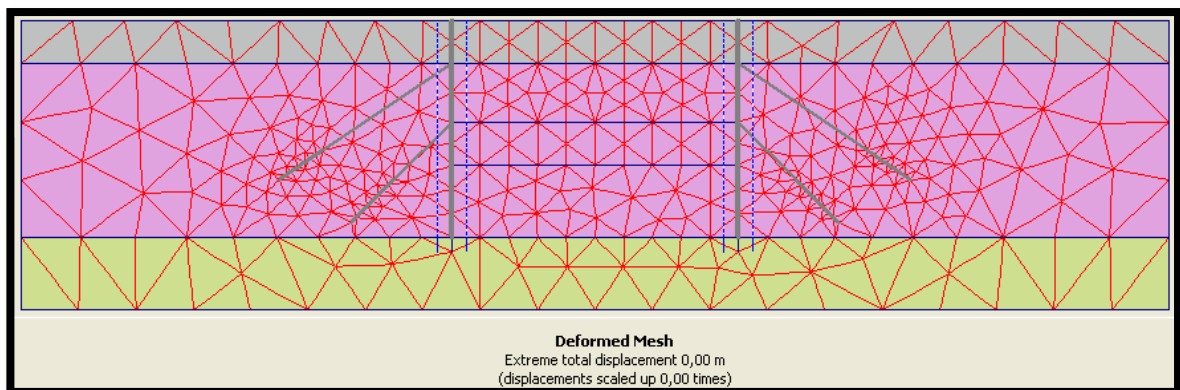
Plate	Element	Node	X [m]	Y [m]	Ux [10 ⁻³ m]	Uy [10 ⁻³ m]
1	1	1444	30,000	20,000	70,664	-40,667
		1443	30,000	19,625	71,392	-40,667
		1442	30,000	19,250	72,120	-40,667
		1441	30,000	18,875	72,851	-40,667
		1608	30,000	18,500	73,588	-40,666
	2	1608	30,000	18,500	73,588	-40,666
		1607	30,000	18,125	74,337	-40,666
		1606	30,000	17,750	75,106	-40,665
		1605	30,000	17,375	75,907	-40,664
		1604	30,000	17,000	76,753	-40,663
	3	1604	30,000	17,000	76,753	-40,663
		1588	30,000	16,500	77,974	-40,656
		1587	30,000	16,000	79,194	-40,650
		1586	30,000	15,500	80,315	-40,643
		1585	30,000	15,000	81,251	-40,636
	4	1585	30,000	15,000	81,251	-40,636
		1560	30,000	14,500	81,938	-40,629
		1559	30,000	14,000	82,329	-40,622
		1558	30,000	13,500	82,403	-40,614
		1571	30,000	13,000	82,157	-40,606

Desplazamientos en el muro de la izquierda:

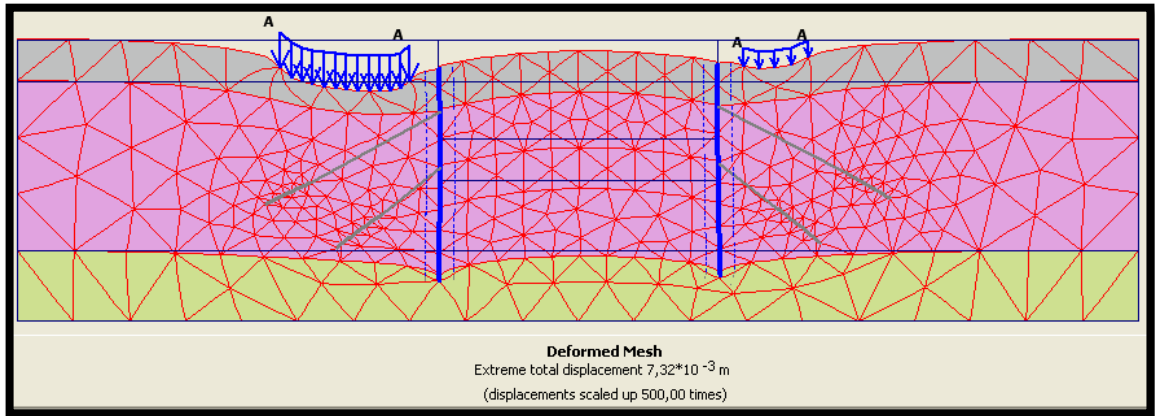
La siguiente tabla es una fracción de la tabla correspondiente a los desplazamientos en los nodos de 4 de los elementos del muro diafragma de la derecha.

Plate	Element	Node	X [m]	Y [m]	Ux [10 ⁻³ m]	Uy [10 ⁻³ m]
1	1	3742	50,000	20,000	-64,383	-37,810
		3741	50,000	19,625	-65,145	-37,810
		3740	50,000	19,250	-65,908	-37,810
		3739	50,000	18,875	-66,674	-37,809
		3866	50,000	18,500	-67,446	-37,809
	2	3866	50,000	18,500	-67,446	-37,809
		3865	50,000	18,125	-68,231	-37,808
		3864	50,000	17,750	-69,038	-37,807
		3863	50,000	17,375	-69,878	-37,806
		3886	50,000	17,000	-70,766	-37,805
	3	3886	50,000	17,000	-70,766	-37,805
		3885	50,000	16,500	-72,048	-37,799
		3884	50,000	16,000	-73,341	-37,793
		3883	50,000	15,500	-74,551	-37,786
		3882	50,000	15,000	-75,595	-37,780
	4	3882	50,000	15,000	-75,595	-37,780
		3782	50,000	14,500	-76,410	-37,772
		3781	50,000	14,000	-76,948	-37,765
		3780	50,000	13,500	-77,185	-37,758
		3779	50,000	13,000	-77,116	-37,750

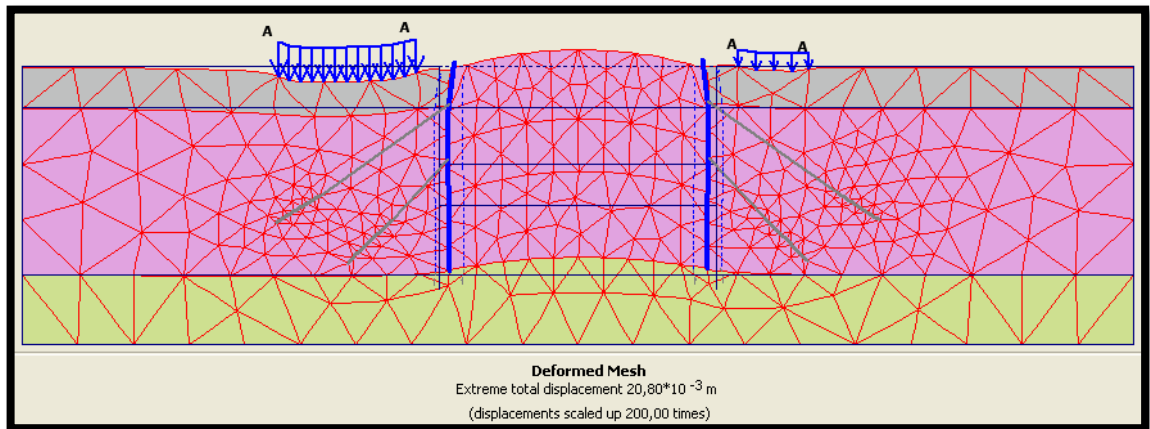
FASE INICIAL



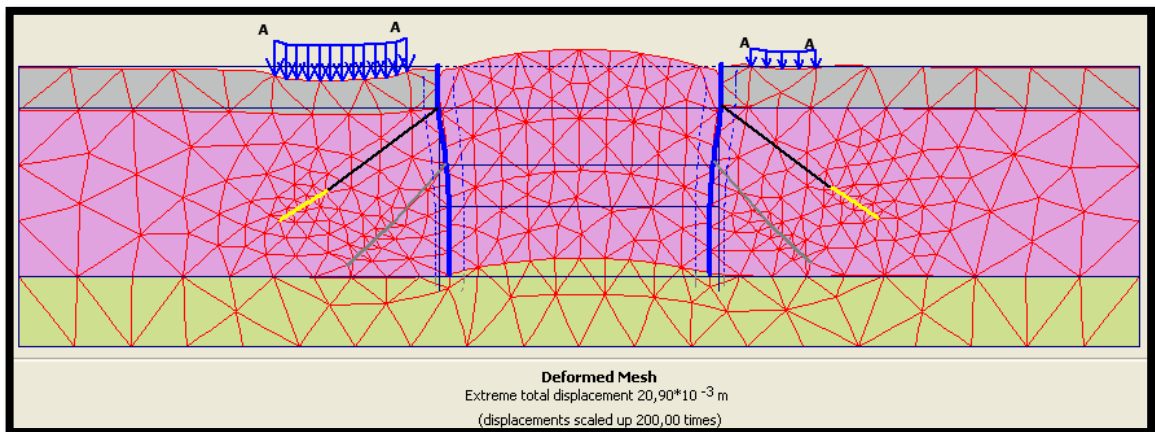
FASE 1



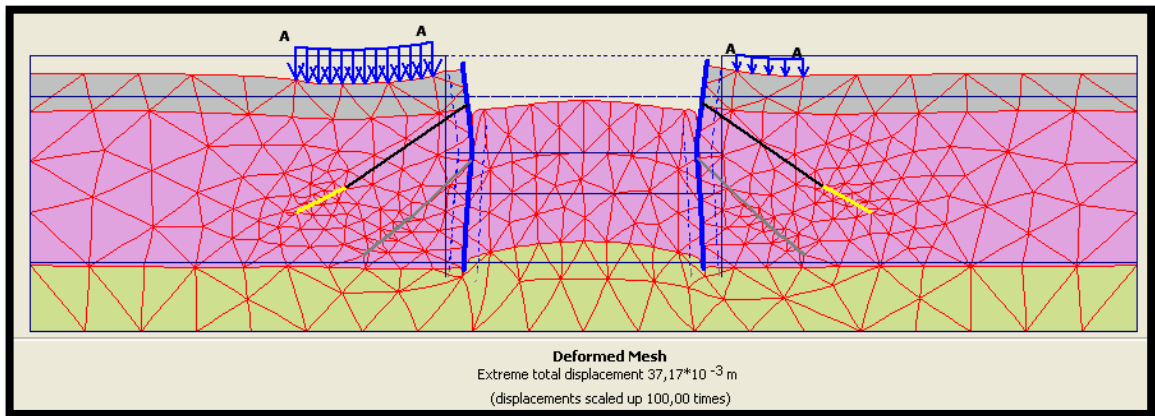
FASE 2



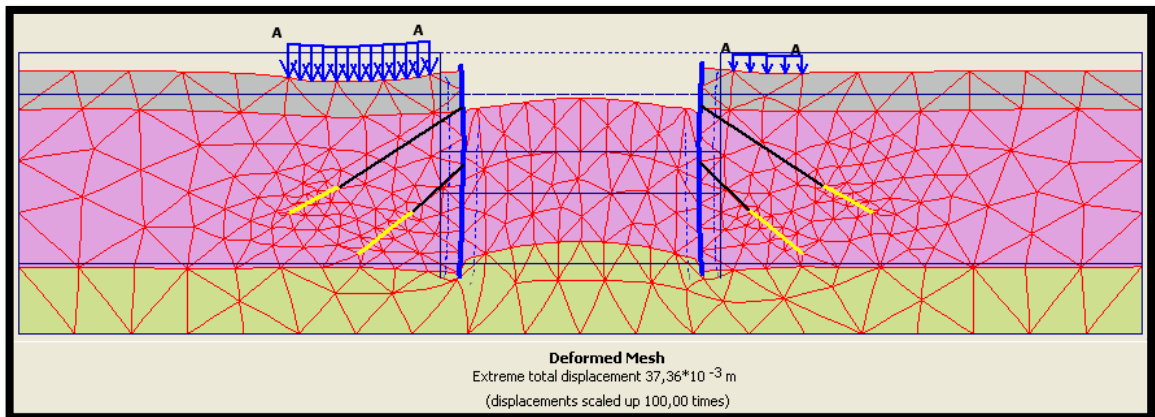
FASE 3



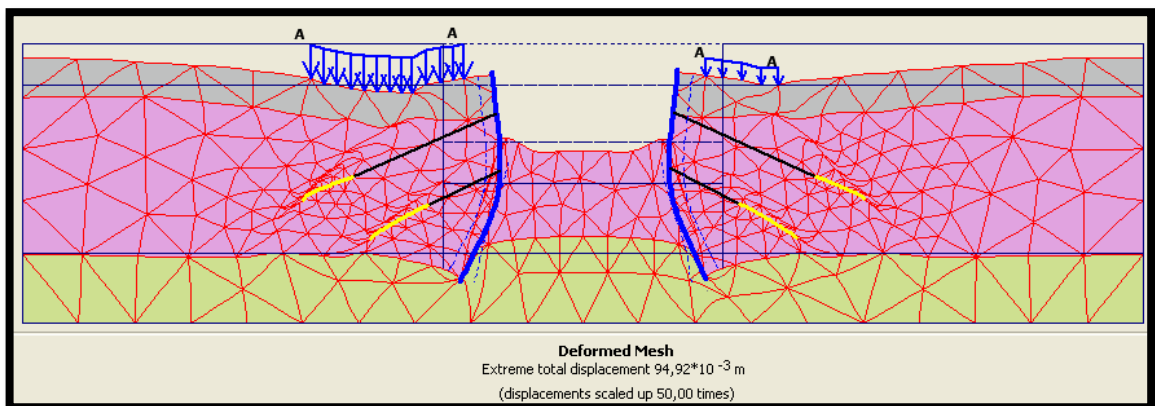
FASE 4



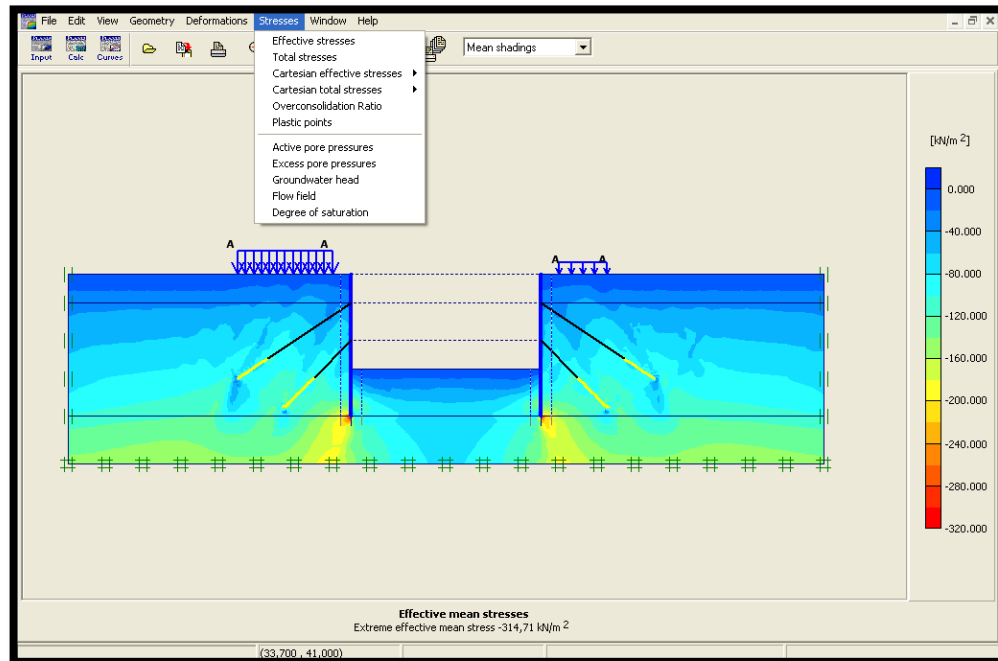
FASE 5



FASE 6

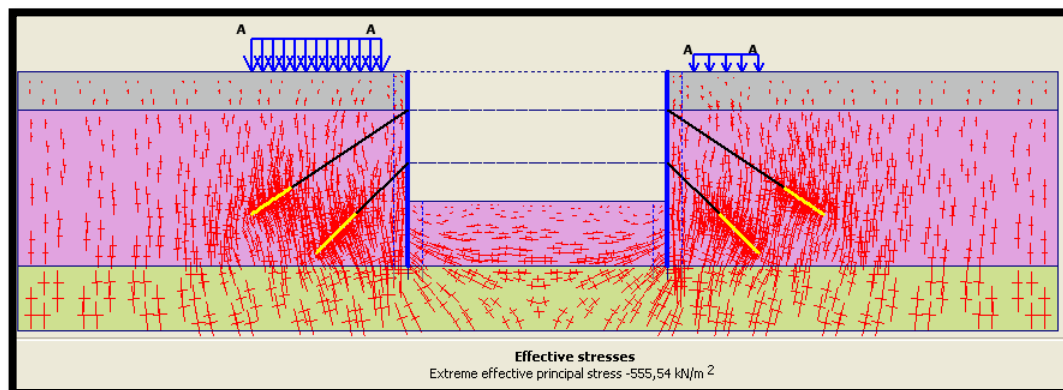


ESFUERZOS: Al hacer clic sobre la ventana de esfuerzos se despliega una serie de opciones como: esfuerzos efectivos, esfuerzos totales, esfuerzos efectivos cartesianos, esfuerzos cartesianos totales, relación de sobre-consolidación, puntos plásticos, presiones activas de poros, exceso de presión de poros, cabeza de aguas subterráneas, flujo de campo y grado de saturación.



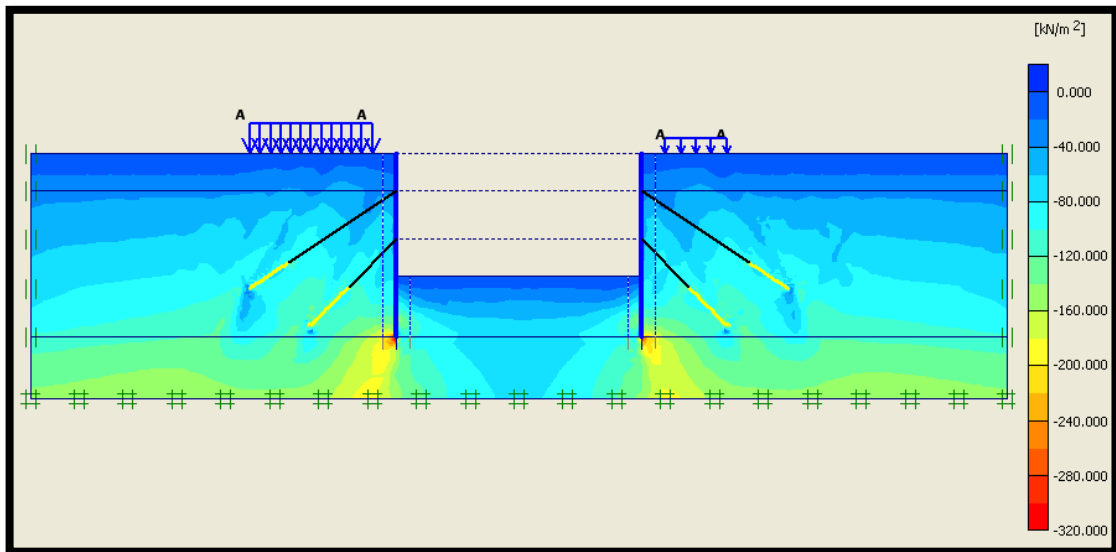
A continuación veremos algunas de estas graficas:

♣ **Esfuerzos efectivos en la fase final:**



Principal esfuerzo efectivo extremo -555,54 KN/m²

♣ **Esfuerzos efectivos promedio en la fase final:**

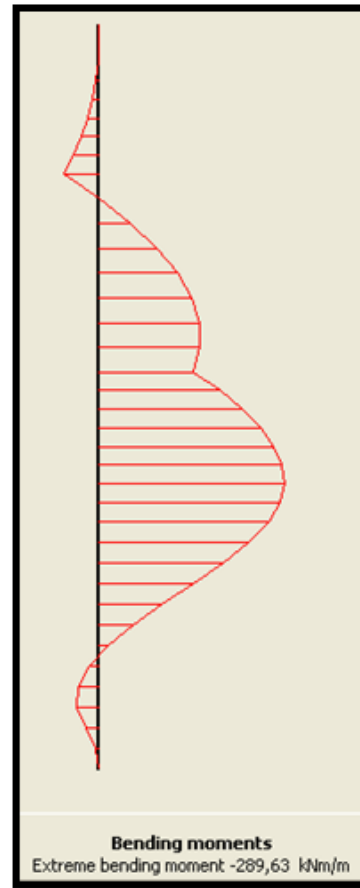
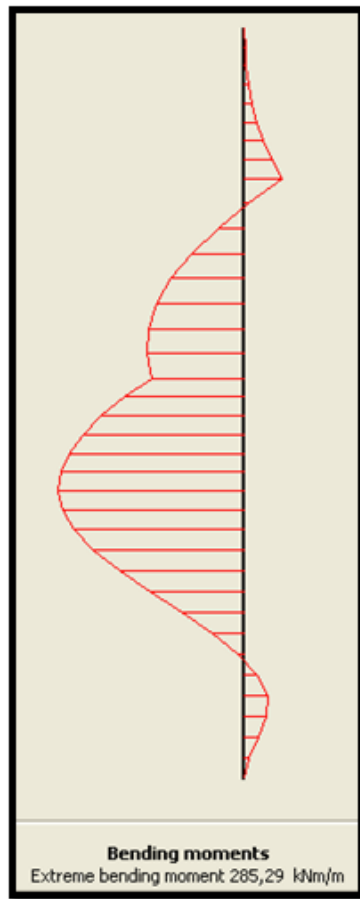


Esfuerzo efectivo promedio $-314,71 \text{ KN/m}^2$

La figura muestra los principales esfuerzos efectivos en la situación final. El estado de esfuerzos pasivos por debajo de la parte inferior de la excavación es claramente visible. También se puede ver que existen concentraciones de esfuerzos alrededor de los anclajes de la lechada.

Momentos de flexión:

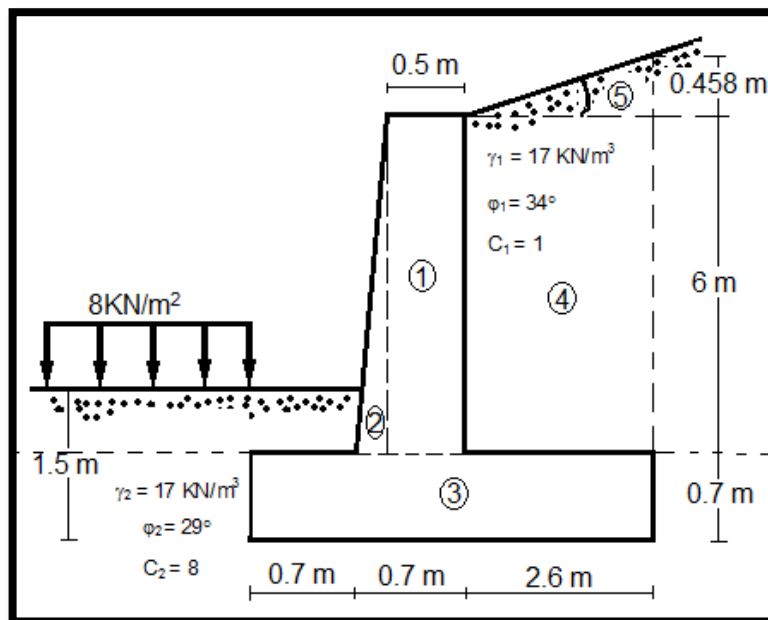
Estas figuras muestran los momentos de flexión en las paredes de los diafragmas izquierdo y derecho en el estado final. Las dos caídas en la línea de los momentos son causados por las fuerzas de anclaje. La fuerza de anclaje se puede ver haciendo doble clic en el ancla. Al hacer esto para los resultados de la tercera y la quinta fase de cálculo, se puede comprobar que la fuerza de anclaje es de hecho igual a la fuerza específica de pre-esforzado.



Los momentos de flexión extremos son 285,29 KNm/m y -289,63 KNm/m para los muros de la izquierda y derecha respectivamente.

EJERCICIO 2

Este ejercicio se va a realizar en un área de trabajo de 8m de ancho y 10m de profundidad, consta de dos tipos de suelo: desde la superficie del suelo hasta una profundidad aproximada de 6.5m hay un suelo relativamente suelto de arena fina, debajo de este relleno se encuentra una capa más o menos homogénea formada por arcilla que se extiende a gran profundidad. El muro de retención en voladizo es de hormigón y las dimensiones de la sección transversal se muestra en la siguiente figura. Sobre el relleno de la parte izquierda del muro se aplicara una carga distribuida de -8 KN/m^2 .



Las propiedades de los suelos, del muro y de la interfaz se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Propiedades de los materiales y la interfaz.

PARAMETRO	ARENA FINA	RELLENO	ARCILLA	HORMIGON	UNIDAD
Modelo del materia (Model).	MC	MC	MC	Linear elastic	-
Tipo de comportamiento del material (Type).	drenado	drenado	drenado	No poroso	-
Unidad de peso del suelo por encima del nivel freático (γ_{unsat}).	16	17	17	24	KN/m ³
Unidad de peso del suelo por debajo del nivel freático (γ_{sat}).	20	20	19	-	KN/m ³
Permeabilidad horizontal (k_x).	1	0.5	0.1	-	m/dia
Permeabilidad vertical (k_y).	1	0.5	0.1	-	m/dia
Modulo de young (E_{ref}).	8000	30000	20000	35000000	KN/m ²
Relación de Poisson (ν).	0.3	0.3	0.33	0.2	-
Cohesión (c_{ref}).	1	1	8	-	KN/m ²
Angulo de fricción (ϕ).	30	34	29	-	°
Angulo de dilatación (ψ).	0	4	0	-	°
Factor de reducción de la interfaz (R_{inter}).	0.65	0.7	rigid	rigid	-

SOLUCION:

7. Abra el **Input program**, seleccione **New project** y haga clic en el botón **OK**. Introduzca un nombre apropiado al proyecto y conserve los ajustes por defecto.

8. Para el modelo geométrico: El problema puede ser modelado con un área de dibujo de 8m. de ancho y 10 m. de profundidad. En la pestaña de dimensiones guarde las unidades estándar e introduzca las dimensiones adecuadas:

- Left = 0
- Right = 8
- Bottom = 0
- Top = 10

- En la hoja Grid: se recomienda dejar los valores por defecto.
- Spacing = 1
- Number of intervals = 1

Seleccione **Geometry line** de la barra de herramienta y ubique el cursor en el origen (0.0, 0.0) y de un clic, mueva el cursor desde el origen a los puntos de coordenadas necesarias en este caso (8.0, 0.0), (8.0, 10.0), (0.0, 10.0) y (0.0, 0.0) haga clic derecho para terminar.

Para subdividir las capas del suelo seleccione **Geometry line** y haga clic en los puntos de coordenadas respectivos: (0.0, 2.7) y (8.0, 2.7), de clic derecho para terminar, posteriormente dibuje la geometría correspondiente al muro y a las capas del relleno.

Las interfaces alrededor de las placas se utilizan para modelar los efectos de interacción suelo-estructura, estas se extienden por lo menos 1m por debajo del muro. Para el diseño de las interfaces seleccione el botón **Interface** de la barra de herramienta y de clic en el punto de coordenadas respectivo.

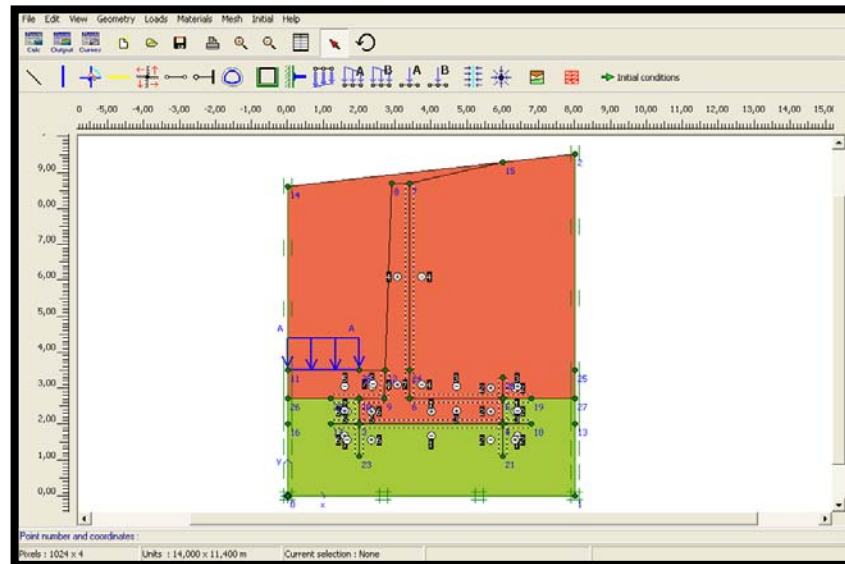
9. Propiedades de los materiales: El suelo se compone de dos capas distintas. Introduzca dos conjuntos de datos para el suelo y las interfaces y otro para el muro con los parámetros dados en la Tabla 1 del enunciado.

Para crear las condiciones de limite seleccione **Standard fixities** del menú herramientas.

Para la asignación de cada una de estas propiedades de un clic en el botón de **Material sets**

Haga clic en **New** del sistema de materiales y asigne el nombre indicado e incorpore las propiedades de cada capa del suelo de acuerdo a la tabla anteriormente mencionada.

Sin cerrar la tabla de materiales, seleccione la capa de arena fina y arrástrela con el mouse hasta el cluster de la geometría en la parte superior y así sucesivamente con cada material. Posteriormente seleccione el sistema de carga distribuida A y dibújela como se ve en la siguiente figura, de doble clic sobre la carga para asignarle un valor de -8 KN/m^2 .



11. Generación de malla: Para la generación de malla se recomienda seleccionar **Mesh** en la barra de herramientas, elegir **Global coarseness** y en la ventana que aparece cambie la opción **Coarse** por **Medium**, posteriormente haga clic en **Generate mesh**.

En la ventana del programa de salida se indica el primer refinamiento, haga clic en **Update** para salir.

12. Condiciones iniciales: Inicialmente, todos los componentes estructurales están inactivos. El campo de tensión inicial se genera por medio del Procedimiento K0, que utiliza el valor predeterminado K0 en todas las categorías. Seleccione **Initial conditions**, acepte el valor por defecto para el peso del agua en la nueva ventana.

Las condiciones de agua subterránea se activan, la ventana muestra un nivel freático que está activo por defecto, pero este puede ser modificado de acuerdo a las necesidades del ejercicio, para este caso no se modificara debido a que el nivel freático se encuentra a una profundidad significativa de la capa de suelo inferior del proyecto.

Seleccione **Generate water pressures** en la nueva ventana acepte **phreatic level**.

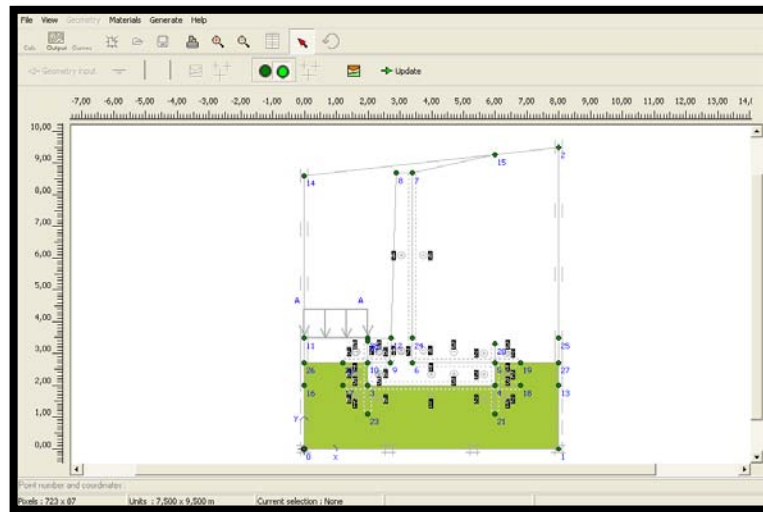
Después de generar las presiones de agua el resultado se exhibe en la ventana del programa de salida.

Ahora hay que proceder a la configuración de la geometría, oprima el botón derecho del interruptor con el fin de activar el botón **Generate initial stresses**, haga clic sobre este y acepte los valores prefijados del multiplicador de peso (ΣM -weight) y K_0 .

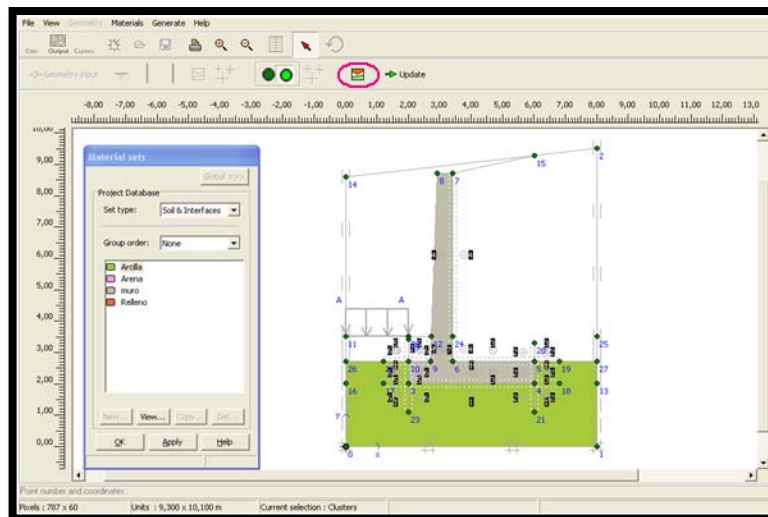
13. Cálculos: De clic en **Calculate** para proceder al modo de cálculo y guarde con un nombre conveniente el archivo. Además de la fase inicial, la primera fase de cálculo también ha sido creada automáticamente. Mantenga los valores por defecto, en la ventana general se puede asignar un nombre indicado para cada fase.

En la ventana parámetros active **Staged construction**, acepte los valores predeterminados y luego seleccione **Define**. El cálculo se compone de tres fases, Las instrucciones dadas a continuación se limitan a una descripción de cómo las fases se definen en el modo de construcción por etapas.

Fase 1. Excavación: Se excavan 8 m del terreno. Haga clic en todos los clusters correspondientes a la excavación para quitar el suelo.

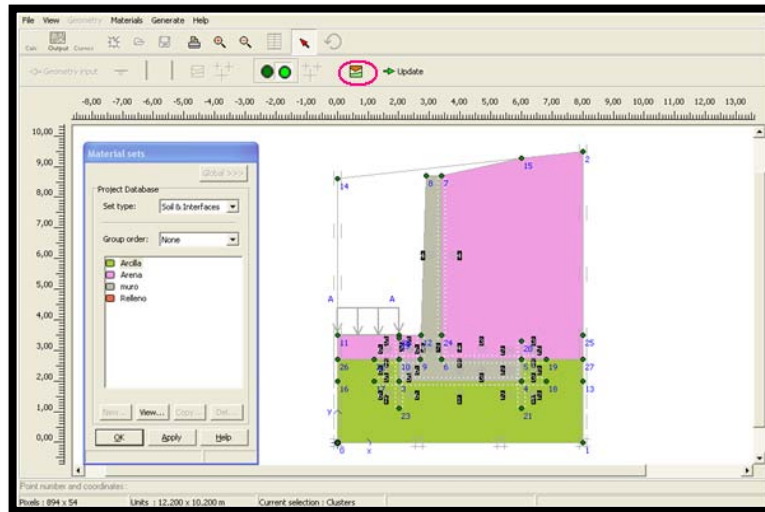


Fase 2. Construcción del muro de retención en voladizo: Para introducir la fase 2 se hace por medio del botón **Next** e igualmente se le asigna un nombre en la pestaña general. En la pestaña parámetros se activa **Staged construction**, acepte los valores predeterminados y luego seleccione **Define**, seguidamente haga clic en el botón **Material Sets**, seleccione el material correspondiente al muro, arrástrelo hasta la geometría correspondiente y de clic para activarlo.

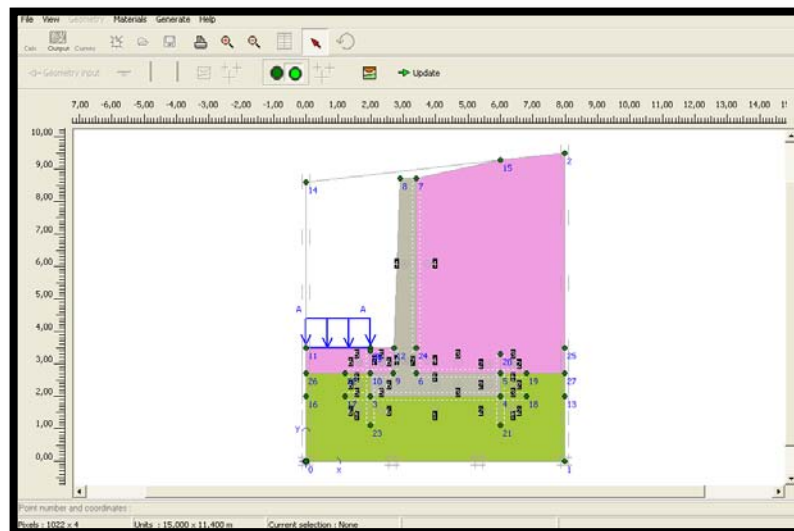


Fase 3: Relleno con material adecuado: Para definir la fase 3, se hace por medio del botón **Next** e igualmente se le asigna un nombre en la pestaña general. En la pestaña parámetros se activa **Staged construction**, acepte los valores

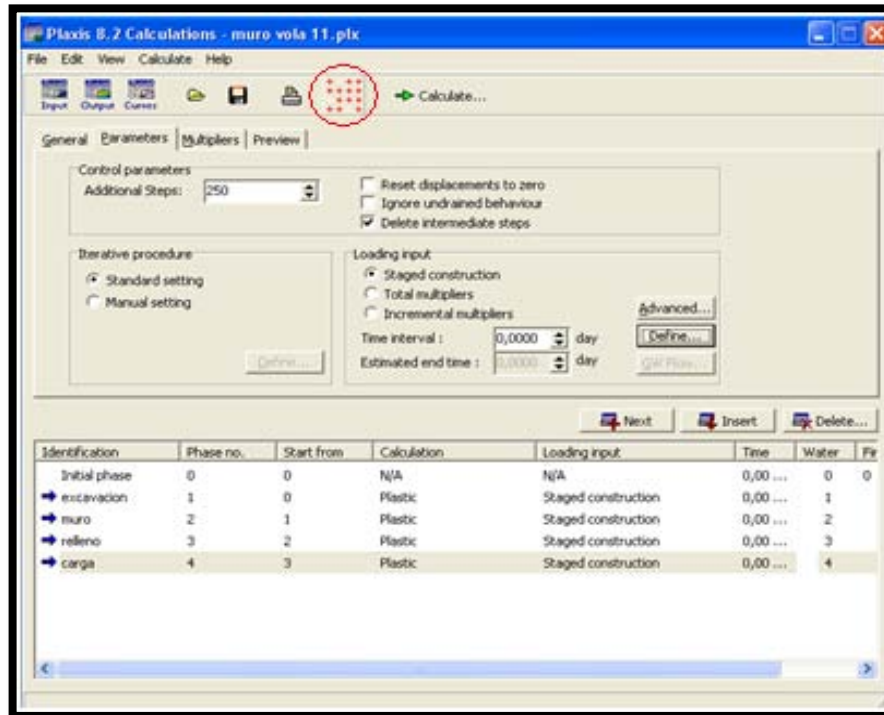
predeterminados y luego seleccione **Define**, seguidamente haga clic en el botón **Material Sets**, seleccione el material correspondiente al material de relleno en este caso es arena, arrástrelo hasta la geometría correspondiente y de clic para activarlo.



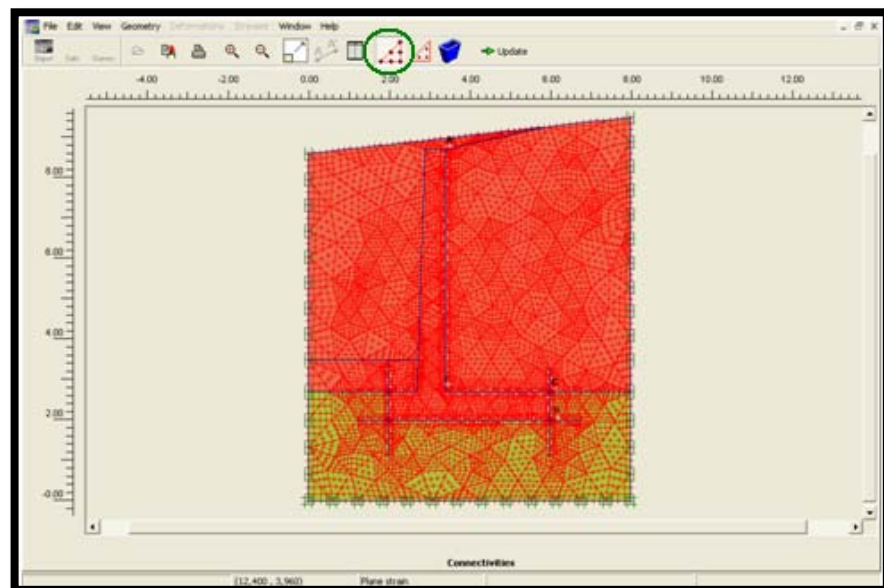
Fase 4: Carga: Para definir la fase 4, se hace por medio del botón **Next** e igualmente se le asigna un nombre en la pestaña general. En la pestaña parámetros se activa **Staged construction**, acepte los valores predeterminados y luego seleccione **Define**, seguidamente haga clic sobre la carga para activarla.



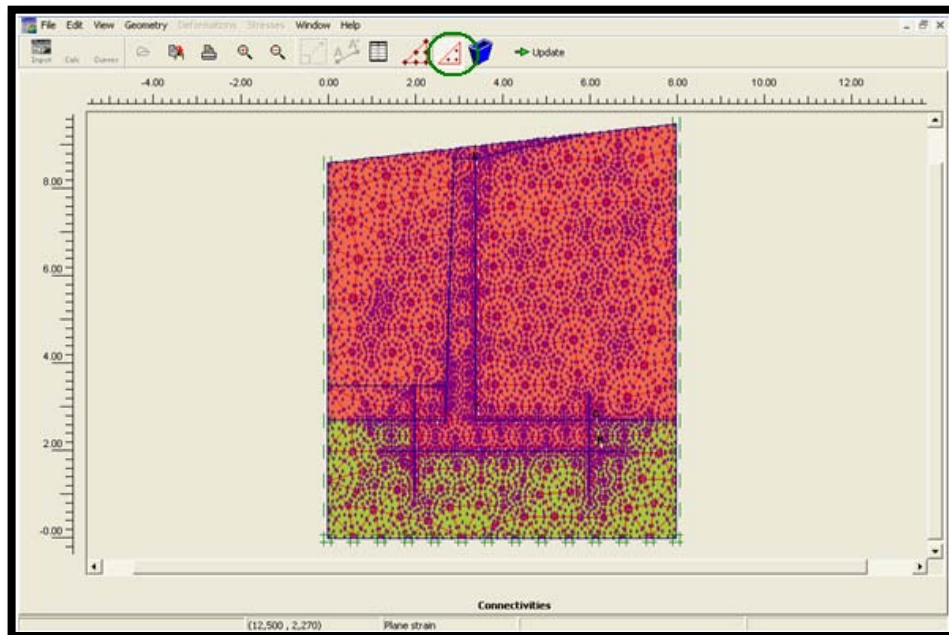
Después de que todas las fases de cálculo se han definido algunos puntos de las curvas carga-desplazamiento y esfuerzo deformación deben ser seleccionados.



Selección de los nodos para las curvas de carga/desplazamiento:



Selección de los puntos de esfuerzo para las curvas de esfuerzo/ deformación:



Procedemos a realizar los cálculos dando clic en el botón **Calculate**.

Plaxis 8.1 Plastic Calculation - muro vola 11 - Plane Strain

Total multipliers at the end of previous loading step			
Σ -Mdisp:	1,000	PMax	0,000
Σ -MloadA:	1,000	Σ -Marea:	0,258
Σ -MloadB:	1,000	Force-X:	0,000
Σ -Mweight:	1,000	Force-Y:	0,000
Σ -Maccel:	0,000	Stiffness:	0,854
Σ -Msf:	1,000	Time:	0,000
Σ -Mstage:	0,728	Dyn. time:	0,000

Calculation progress
MStage

|U| Node A

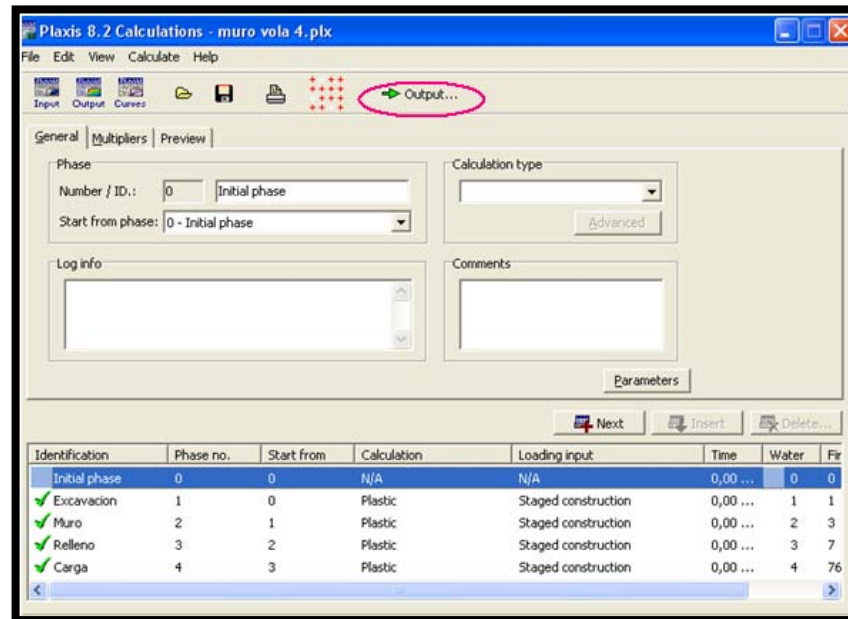
Iteration process of current step			
Current step:	8	Max. steps:	255
Iteration:	5	Max. iterations:	60
Global error:	0,002	Tolerance:	0,010
Element	703	Decomposition:	100 %
Calc. time:	1 s		

Plastic points in current step			
Plastic stress points:	38	Inaccurate	26
Plastic interface points:	0	Inaccurate	0
Tension points:	12	Cap/Hard points:	0
Tolerated:	6	Apex points:	0
Tolerated:	3		

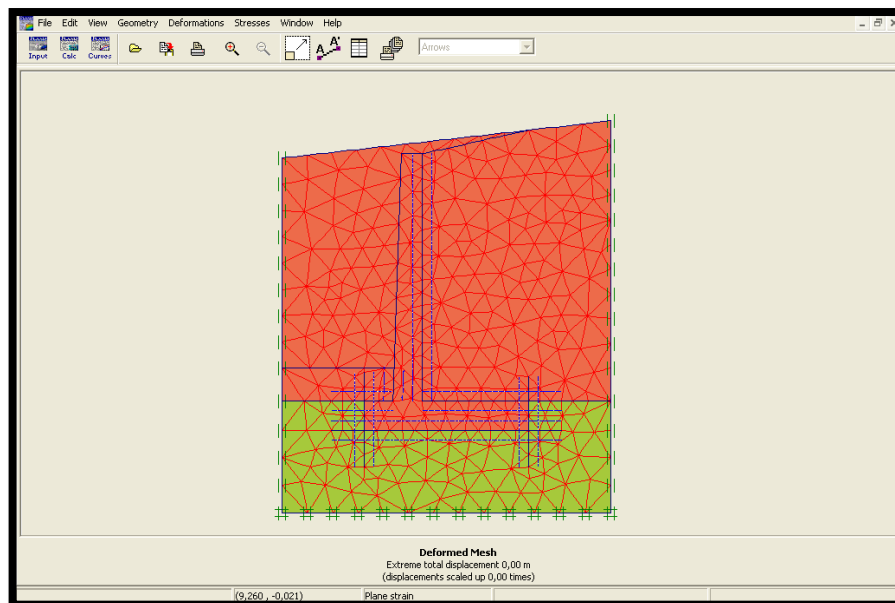
Cancel

RESULTADOS:

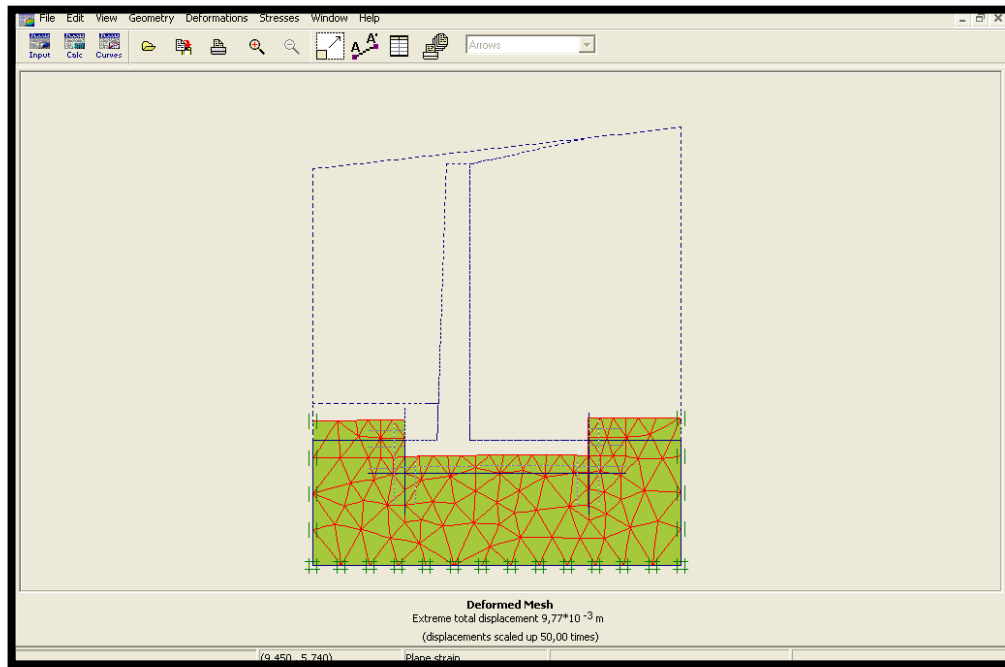
Verifique que todas las fases de cálculo hayan corrido exitosamente, para ver los resultados de cada una, selecciónela y de clic sobre el botón **output**. En las siguientes figuras se muestra cómo se va deformando la malla en cada una de las fases de cálculo.



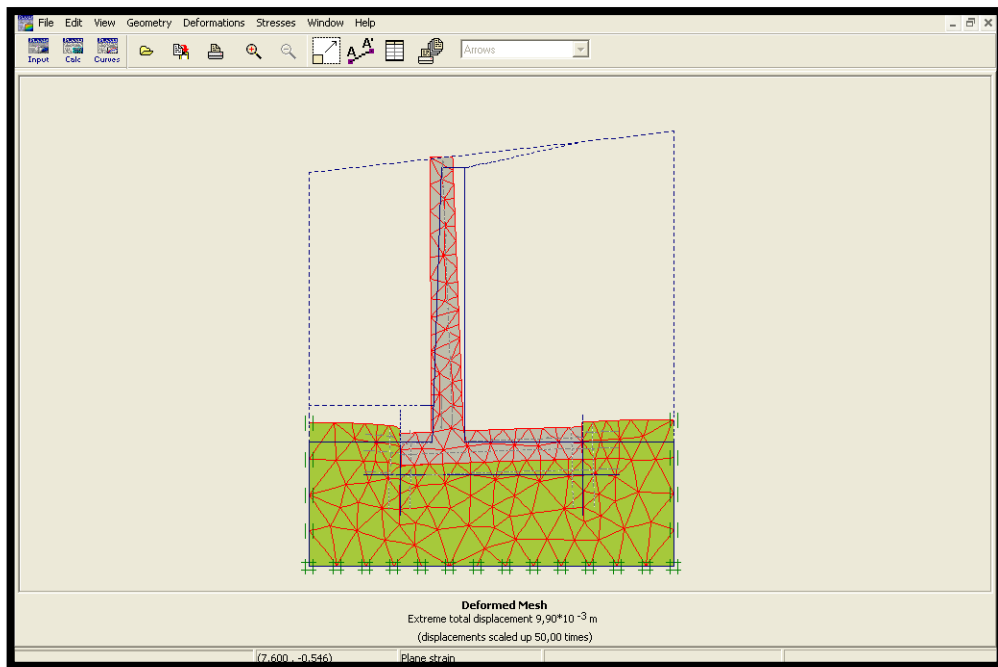
FASE INICIAL



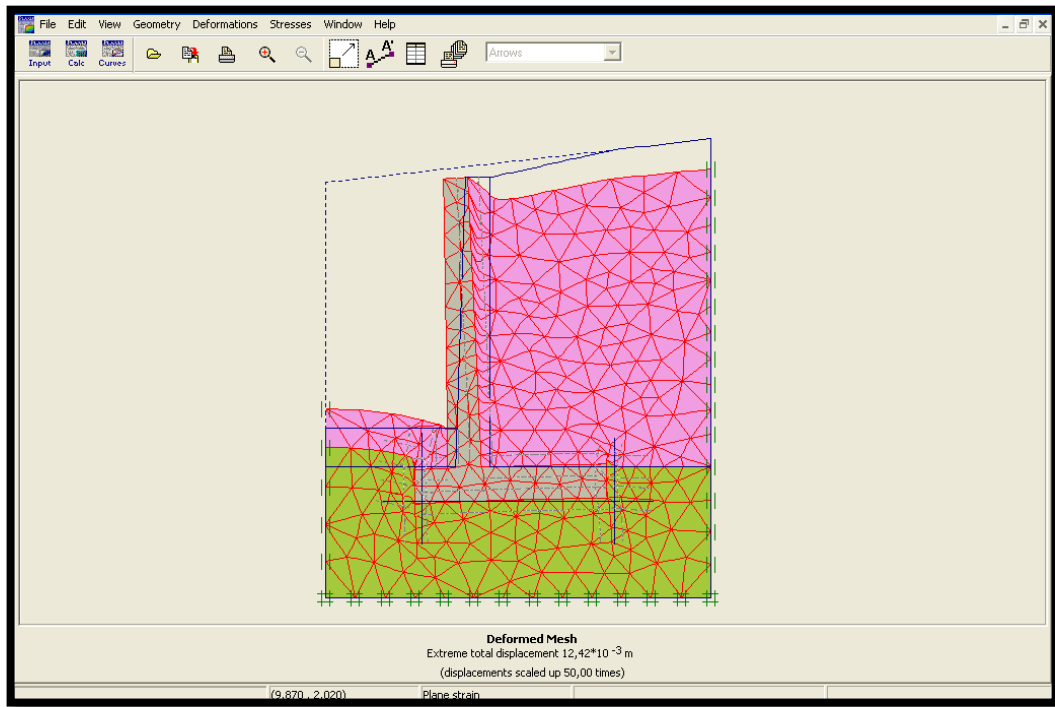
FASE 1



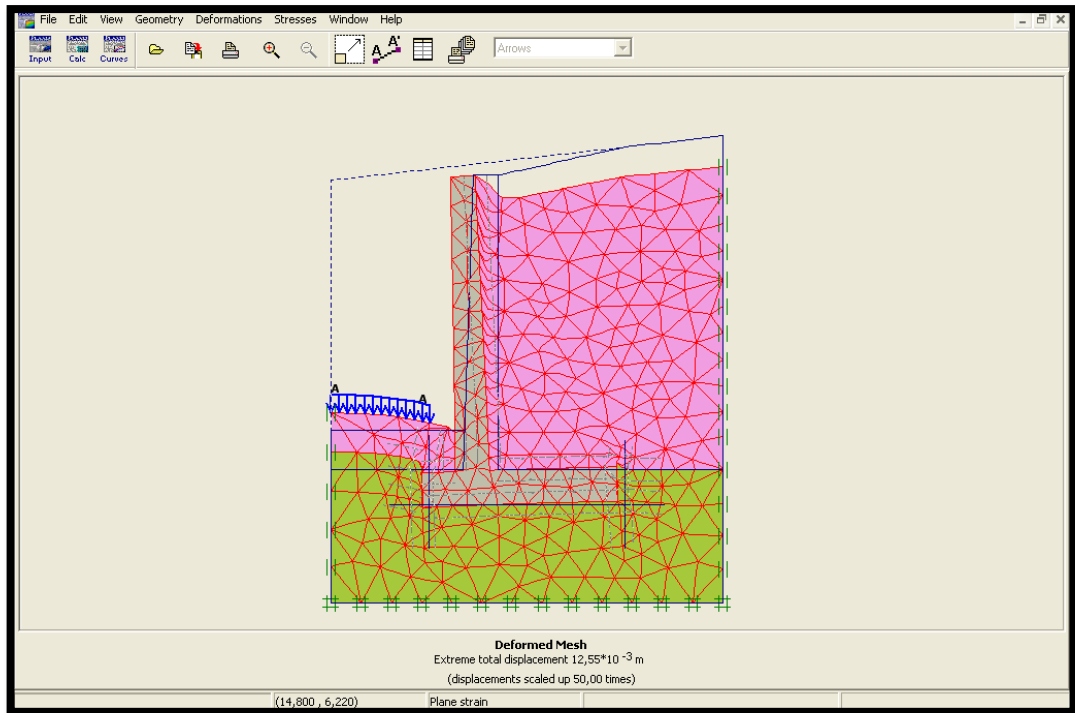
FASE 2:



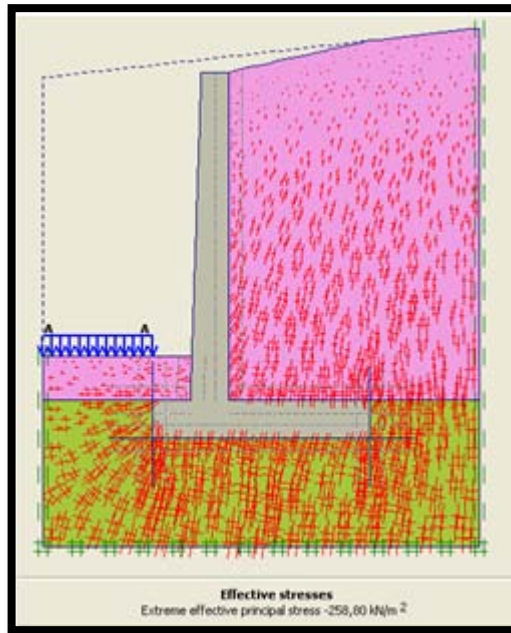
FASE 3:



FASE 4:

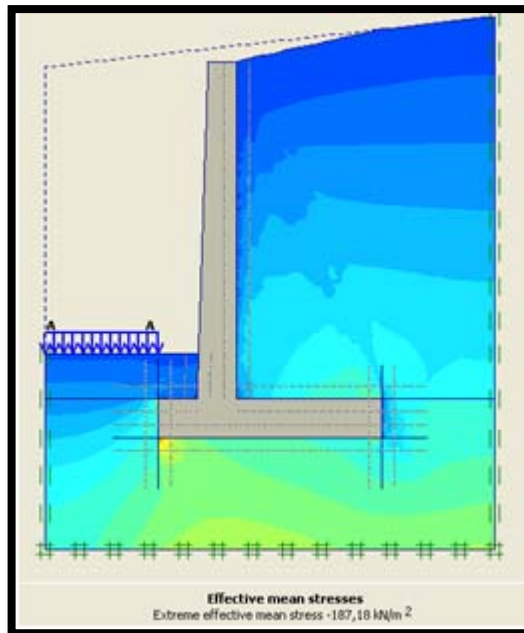


♣ **Esfuerzos efectivos:**



Principal esfuerzo efectivo extremo -258,80 KN/m²

♣ **Esfuerzos efectivos Medios:**



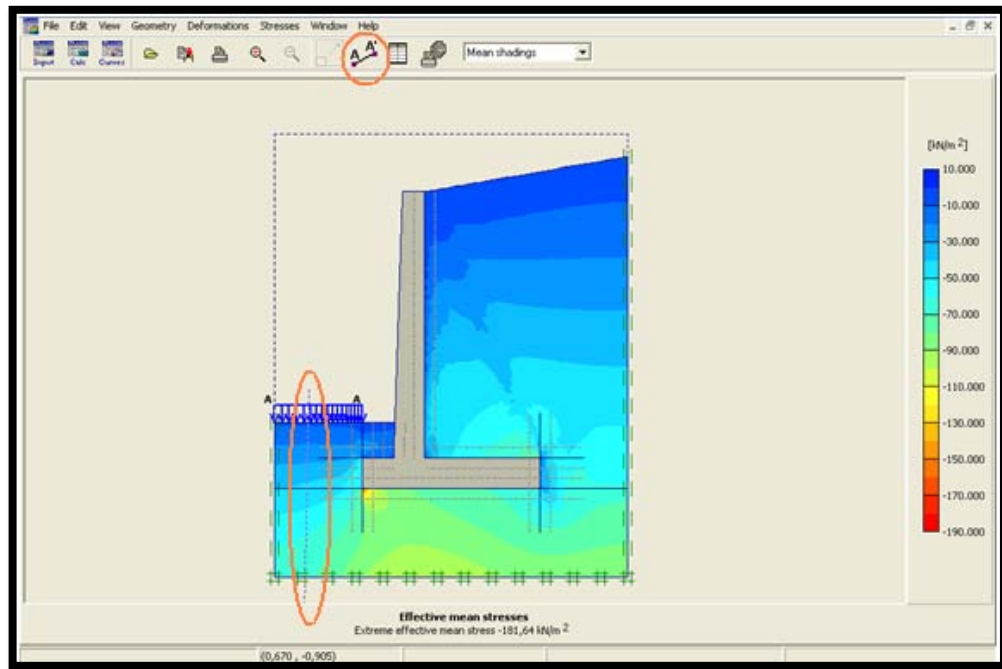
Esfuerzo efectivo Medio extremo -187,18 KN/m²

TABLA DE ESFUERZOS EFECTIVOS PARA LOS ELEMENTOS DEL SUELO:

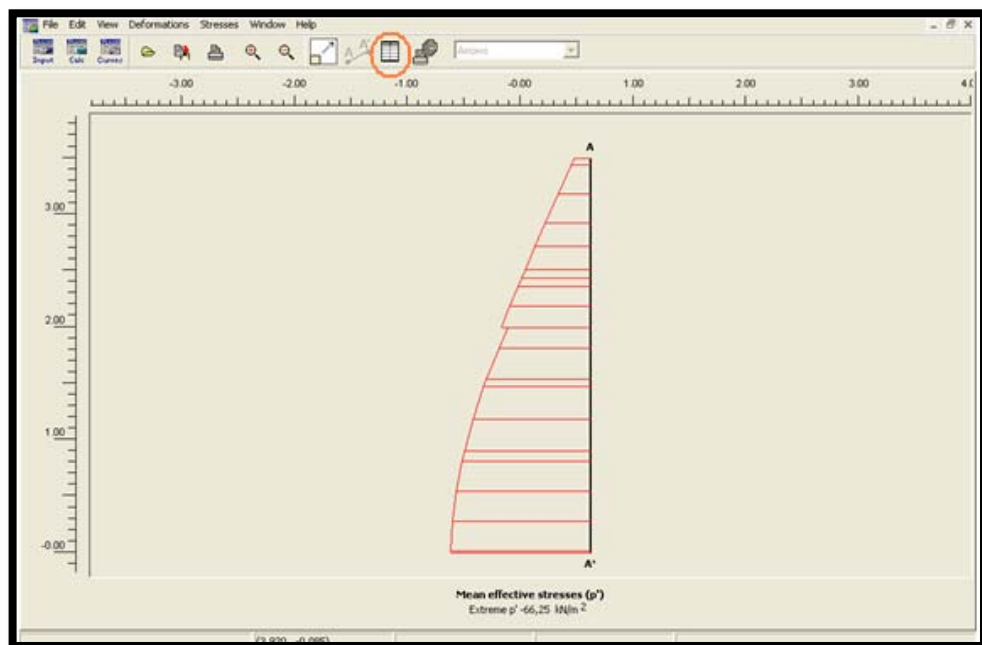
La siguiente es una parte de la tabla de esfuerzos efectivos proporcionada por Plaxis para cada punto de esfuerzo en los elementos de cada cluster.

Cluster	Soil Element	Stress Point	X [m]	Y [m]	σ_{xx} [kN/m ²]	σ_{yy} [kN/m ²]	σ_{xy} [kN/m ²]	σ_{zz} [kN/m ²]	Status
315	Relleno	3769	1,782	7,320	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic
		3770	1,915	7,801	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic
		3771	1,340	7,615	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic
		3772	1,711	7,498	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic
		3773	1,752	7,648	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic
		3774	1,573	7,590	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic
		3775	1,828	7,463	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic
		3776	1,881	7,657	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic
		3777	1,741	7,750	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic
		3778	1,510	7,675	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic
		3779	1,467	7,522	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic
3780	1,645	7,404	0,000	0,000	0,000	0,000	Elastic		
4	muro	3781	3,175	2,776	176,652	285,897	-34,495	92,510	Elastic
		3782	3,384	2,721	684,578	2332,242	-755,484	603,364	Elastic
		3783	3,384	2,937	-38,978	1288,550	-38,401	249,914	Elastic
		3784	3,271	2,800	215,388	848,565	-202,065	212,791	Elastic
		3785	3,336	2,783	141,120	1156,196	-201,451	259,463	Elastic
		3786	3,336	2,851	63,504	1207,865	-167,469	254,274	Elastic
		3787	3,236	2,757	295,277	472,926	-64,293	153,641	Elastic
		3788	3,320	2,735	446,194	949,143	-307,500	279,068	Elastic
		3789	3,386	2,786	-50,411	1565,999	-96,019	303,118	Elastic
		3790	3,386	2,873	-40,966	1304,100	3,017	252,627	Elastic

Haciendo clic sobre el botón **Cross Section** podemos obtener un corte para ver la distribución de esfuerzos efectivos donde se desee.



En la siguiente grafica vemos la distribución de esfuerzos efectivos para el anterior corte, se observa que el valor en el extremo del corte es de $-66,25 \text{ Kn/m}^2$. Haciendo clic sobre el botón **Table** obtenemos la tabla para los valores de esfuerzos efectivos



X [10 ⁻³ m]	Y [m]	p' [kN/m ²]
627,027	3,500	-7,783
627,027	3,437	-9,263
627,027	3,437	-9,260
627,027	3,182	-15,339
627,027	2,926	-21,483
627,027	2,926	-21,413
627,027	2,719	-26,265
627,027	2,511	-31,043
627,027	2,511	-31,042
627,027	2,437	-32,785
627,027	2,437	-32,756
627,027	2,362	-34,482
627,027	2,362	-34,472
627,027	2,190	-38,237
627,027	2,190	-38,240
627,027	2,000	-42,245

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

EJERCICIO 3.

El siguiente ejercicio consiste en la estabilización mecánica de un terraplén por medio de la inclusión de tiras metálicas, las cuales refuerzan el suelo por el efecto de interacción que se genera entre ambos, aumentando significativamente su resistencia. Las tiras son conectadas en su extremo a un muro de revestimiento, que sirve principalmente para prevenir el escape del relleno y que está constituido por placas.

El proceso constructivo de estos muros consiste en la ejecución de un relleno compactado en capas de espesor uniforme, el cual es contenido por placas de revestimiento que son instaladas al finalizar la compactación de cada capa. A cada nivel de tierras se instalan las tiras de refuerzo que son conectadas a las placas mediante adecuados sistemas de sujeción. Las placas de revestimiento empleadas en estos muros tienen configuraciones geométricas de variadas formas, en este problema se emplearon placas rectangulares de 1.50x1.50 m. En cuanto a las armaduras de refuerzo están elaboradas en acero galvanizado con un módulo de elasticidad E_s de 200000 Mpa, tienen una sección transversal de 6 cm de ancho y 0.4 cm de espesor, instaladas en el relleno a intervalos regulares con separación vertical (S_v) y horizontal (S_h) de aproximadamente 0.75 m.

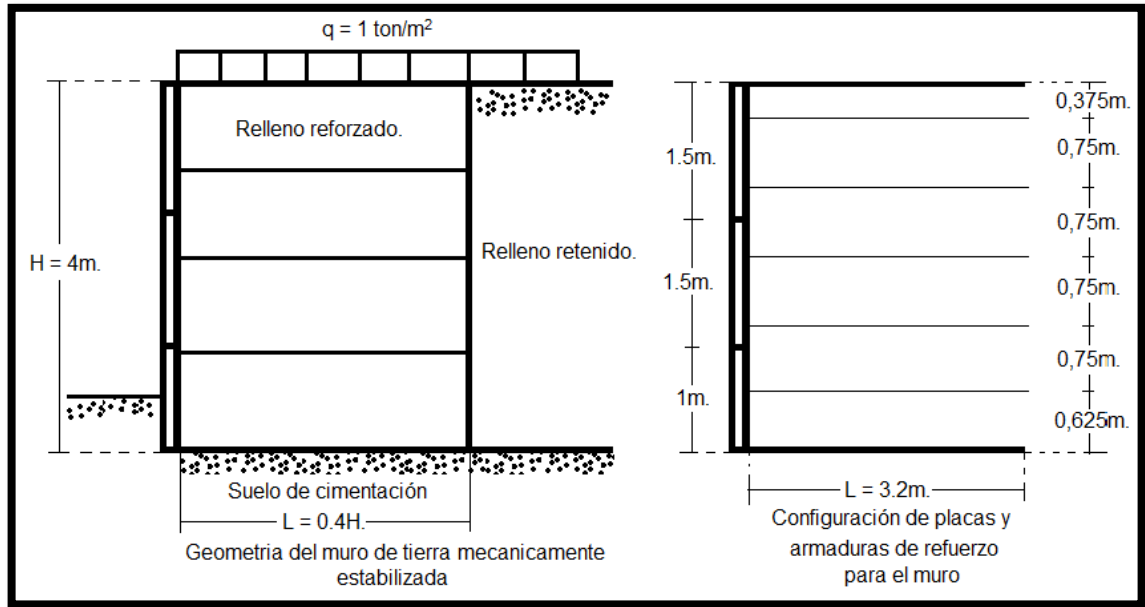


Tabla 1. Parámetros geotécnicos adoptados para la simulación del muro.

PARAMETRO	UNIDADES	SUELO REFORZADO	RELLENO RETENIDO	SUELO CIMENTACIÓN
γ_{vsoat}	KN/m ³	19	20	20
γ_{soat}	KN/m ³	19	20	20
E	KN/m ²	50000	50000	10000
ν	-	0,3	0,3	0,3
C	KN/m ²	0	50	20
ϕ	°	38	35	36
Ψ	°	8	5	6
R_{inter}	-	0,8	0,8	0,8

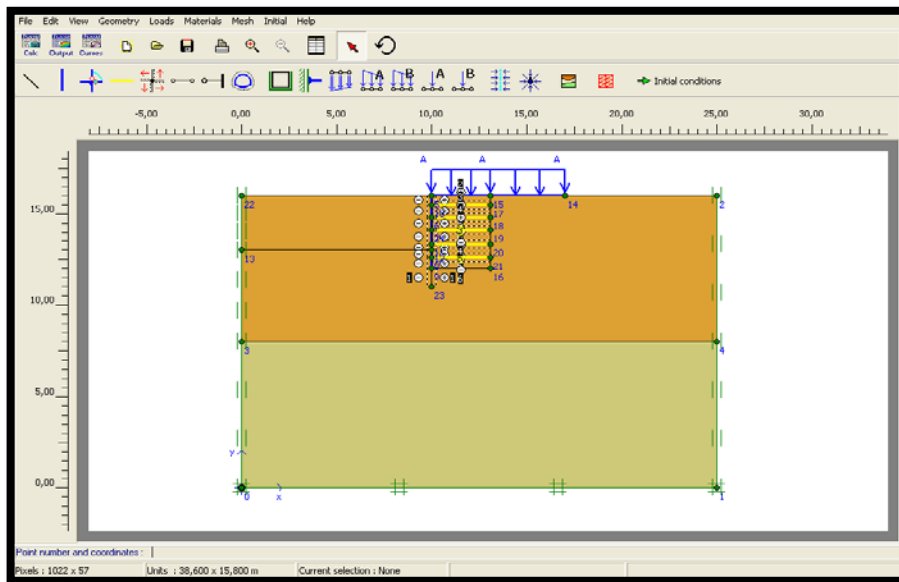
Tabla 2. Parámetros de los elementos de la placa y geomalla adoptados para el modelamiento.

PARAMETRO	UNIDADES	CONVENCIONAL
Elementos placa		
EA	KN/m	2,18E+06
EI	KNm ² /m	1968,512
D	m	0,104
W	KN/m/m	2,288
ν	-	0,2
Elementos grilla		
EA	KN/m	4,80E+07

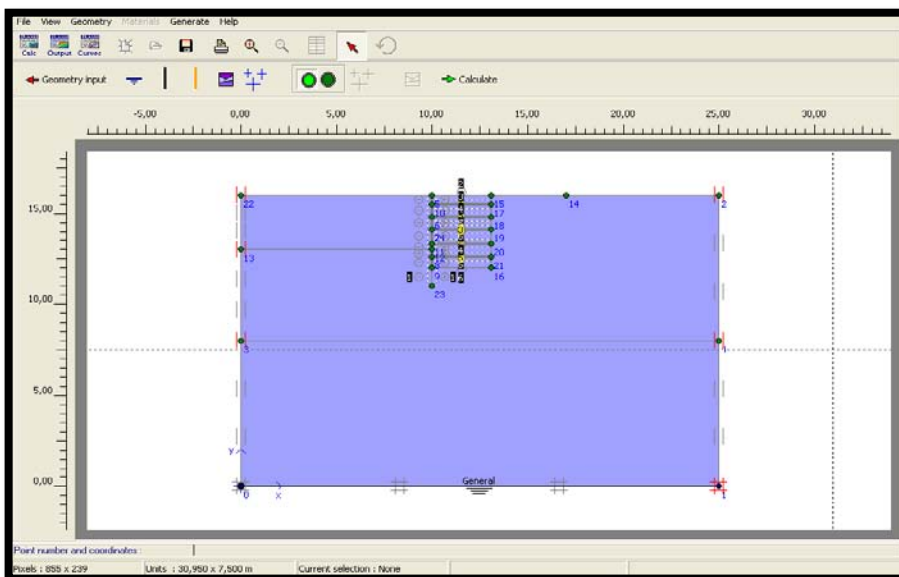
SOLUCION:

Para la solución de este ejercicio los pasos a seguir son iguales a los anteriormente mencionados en los ejercicios 1 y 2 de este capítulo a continuación se muestran las graficas de cómo va evolucionando el problema.

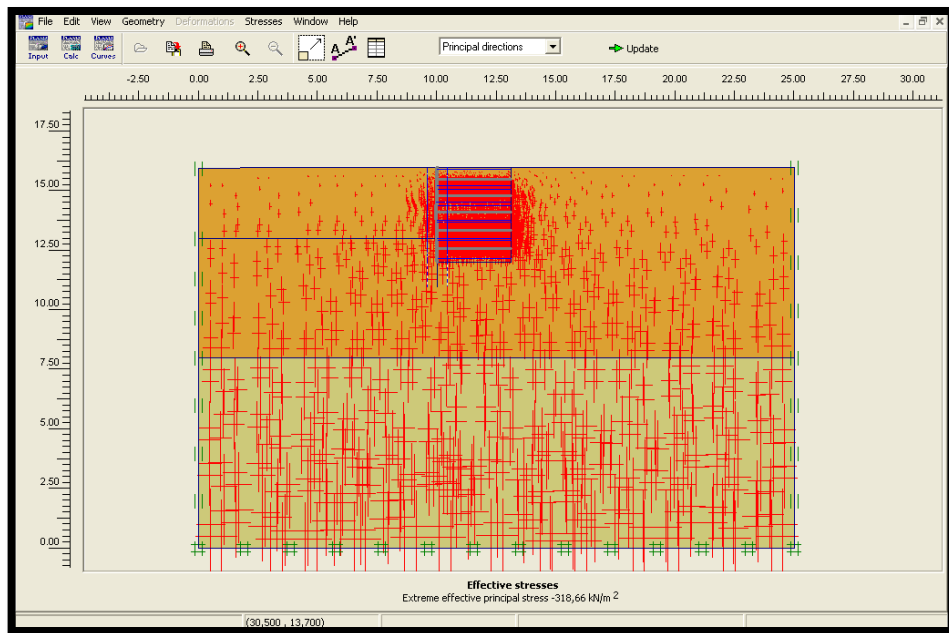
Modelo geometrico



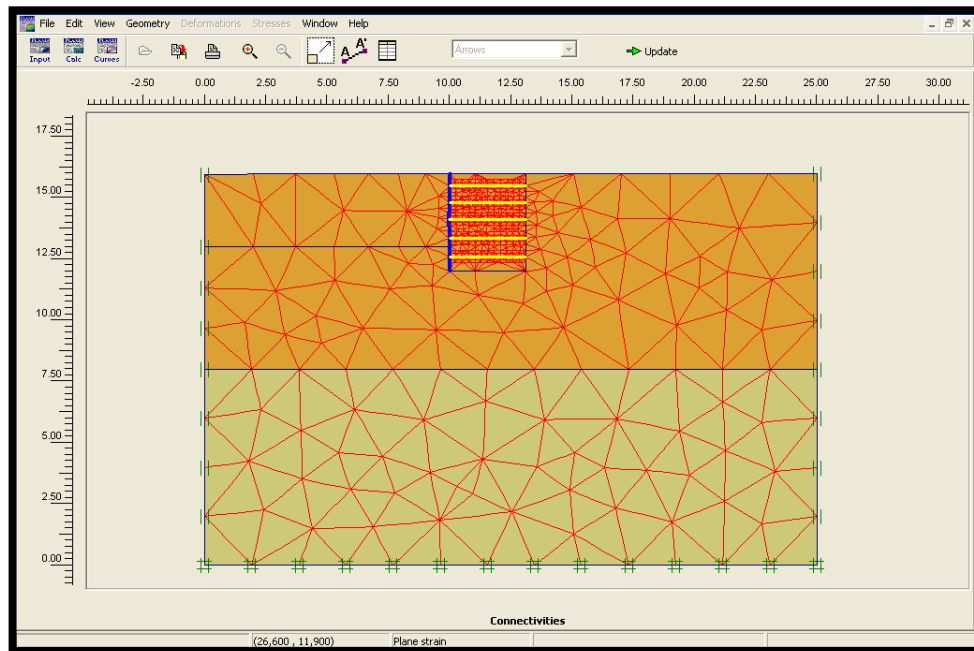
Condiciones iniciales



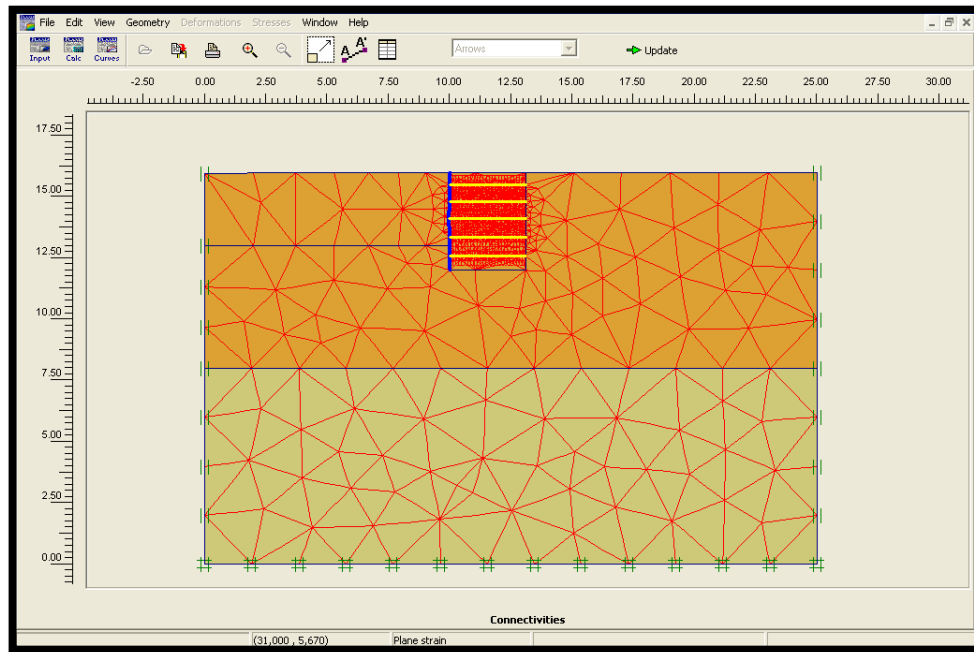
Esfuerzos iniciales



Generación de malla

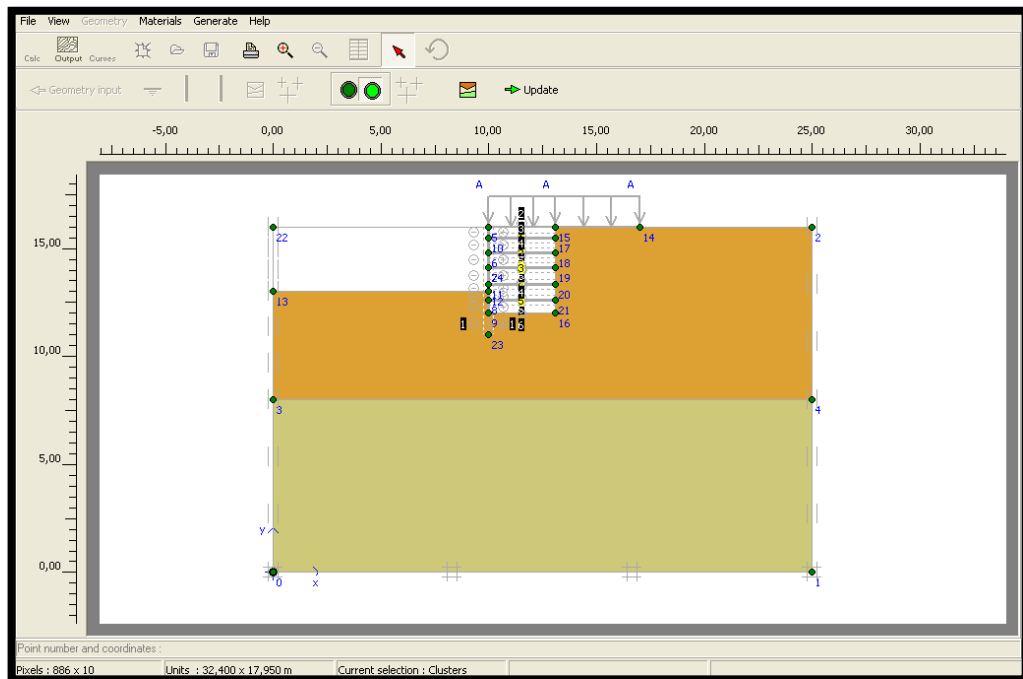


Refinamiento de línea para las geomalla

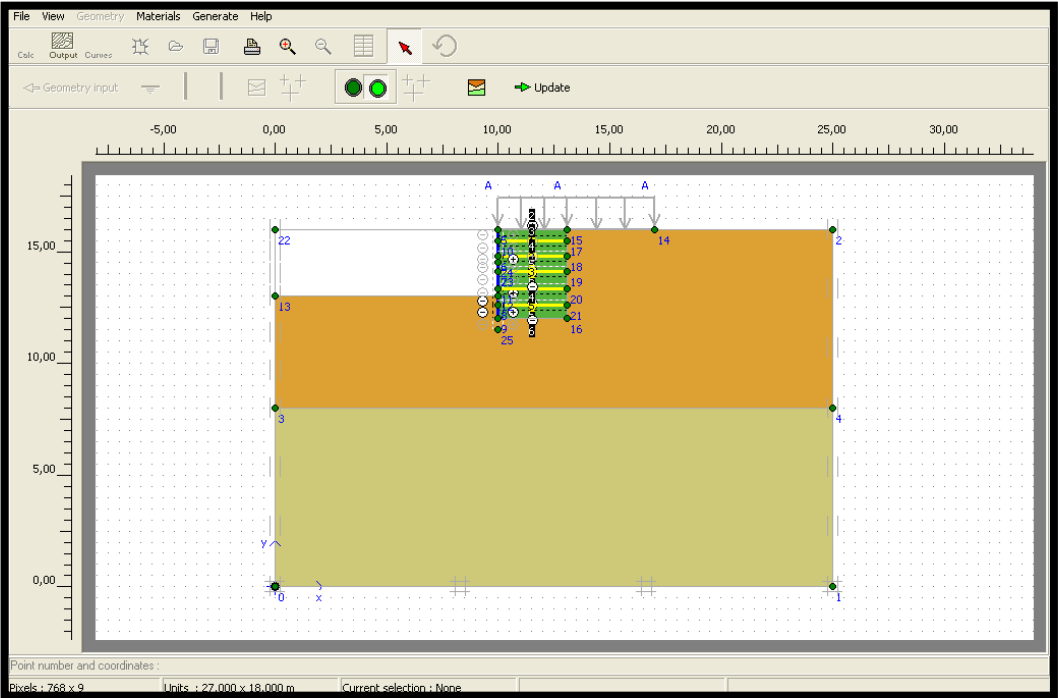


Definición de fases

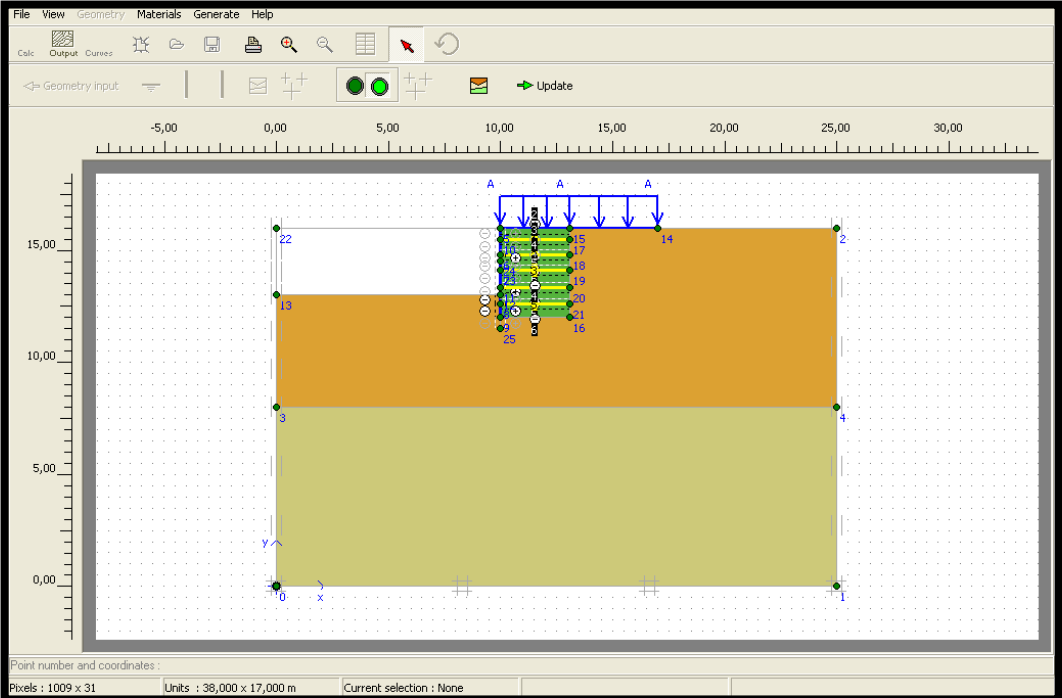
Fase 1



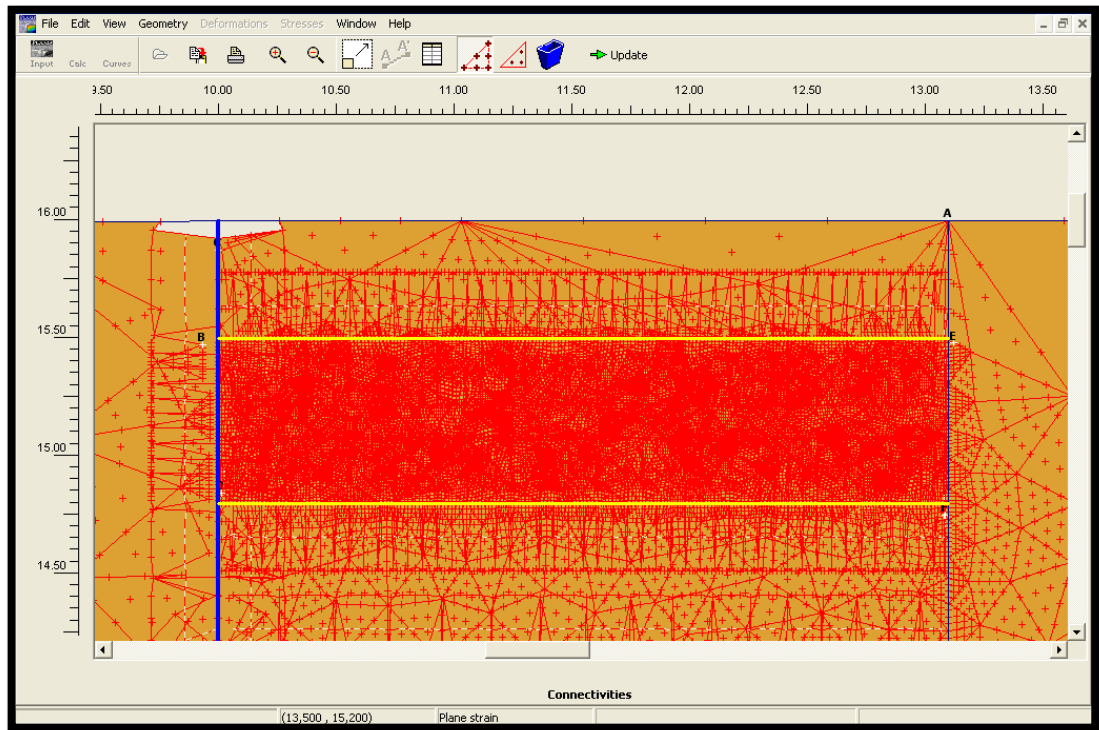
Fase 2



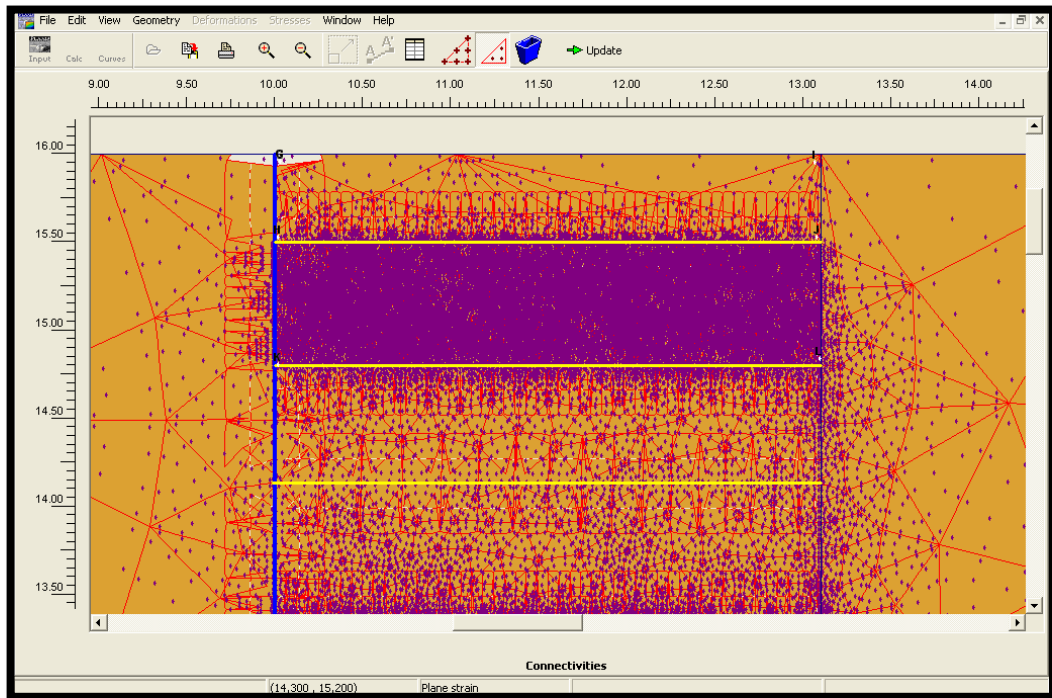
Fase 3



Selección de nodos para las curvas de carga-desplazamiento

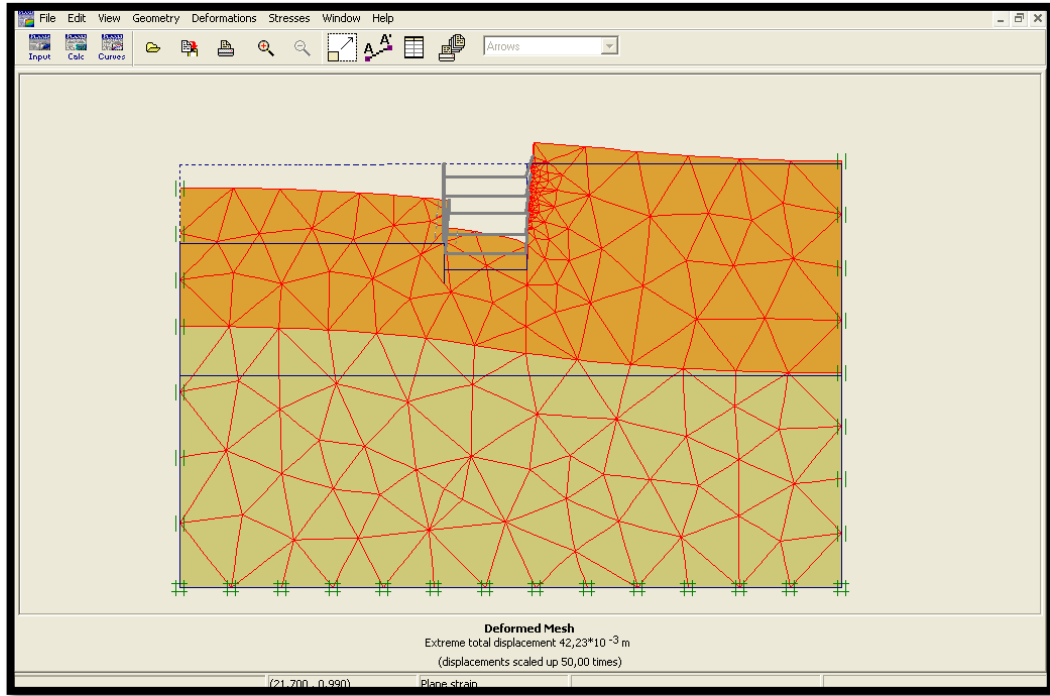


Selección de los puntos para las curvas de esfuerzo-deformación

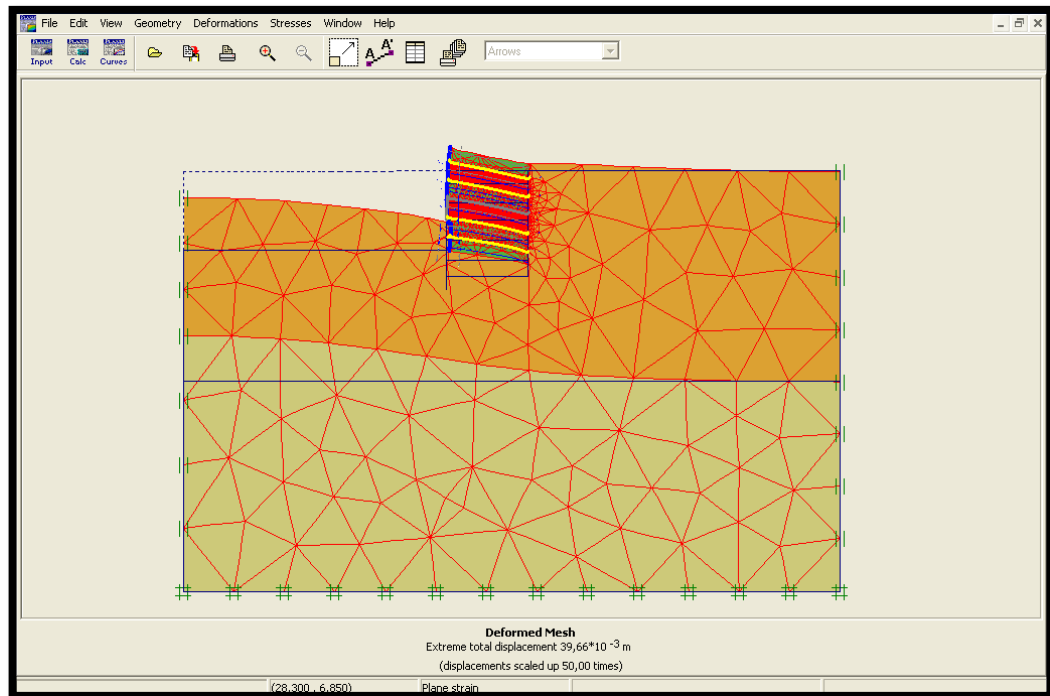


Malla deformada

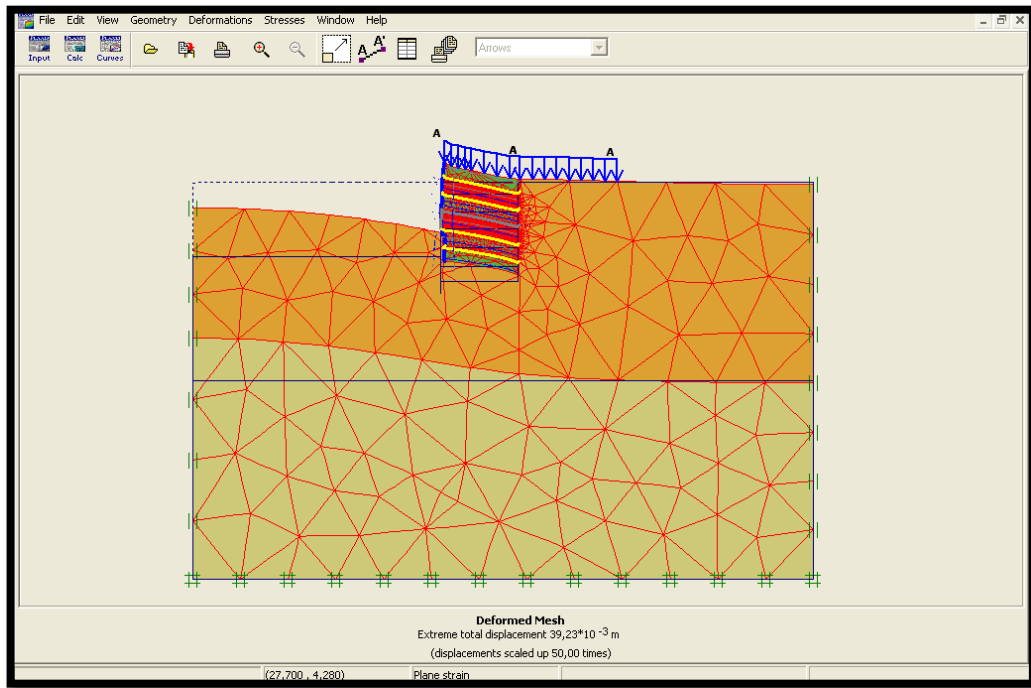
Fase 1



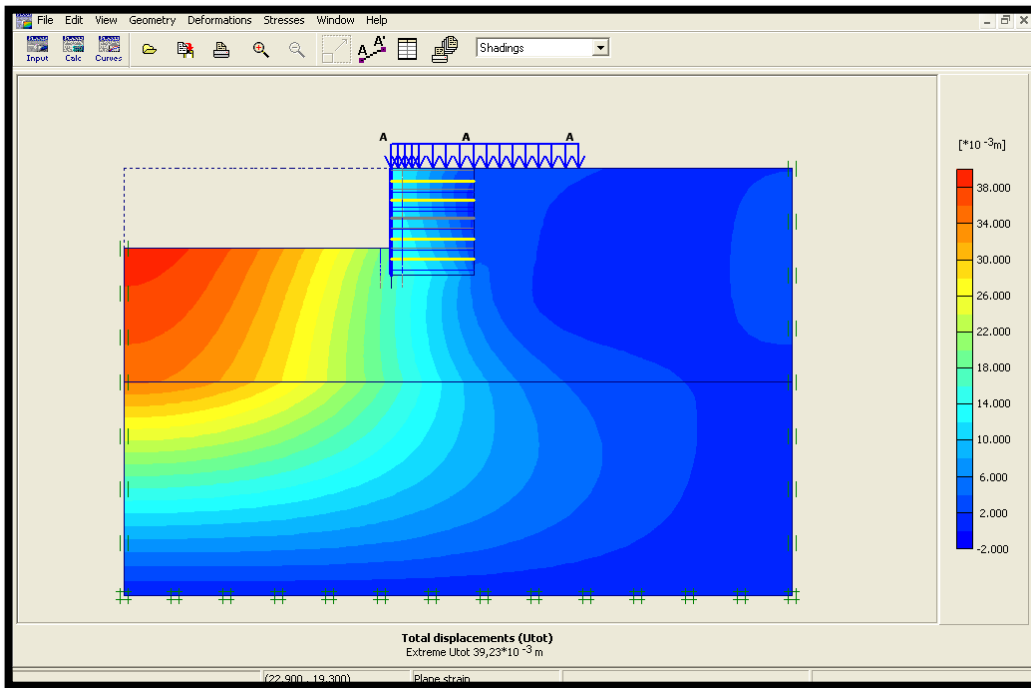
Fase 2



Fase 3



Desplazamientos totales



Esfuerzos efectivos

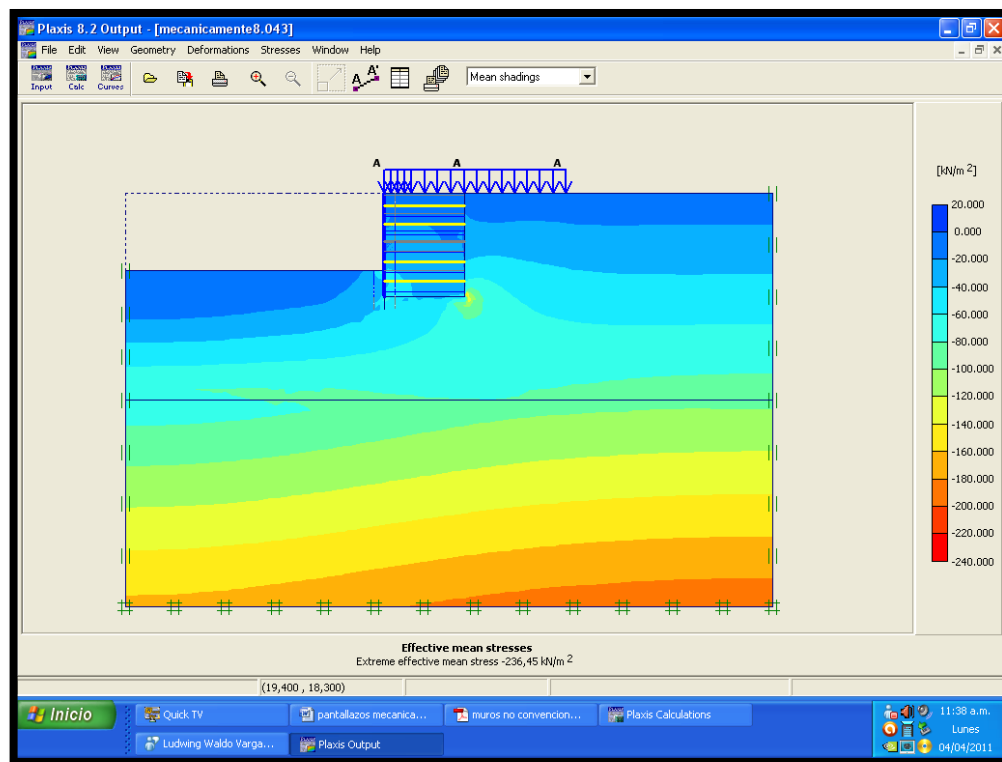


Diagrama de momentos de flexión para la placa superior

