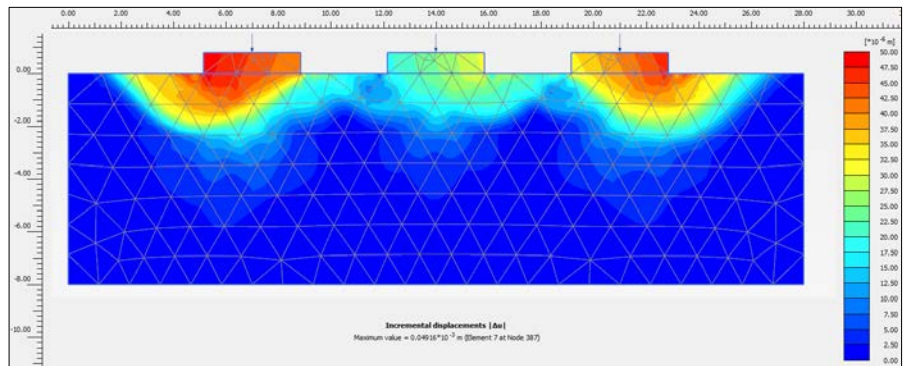
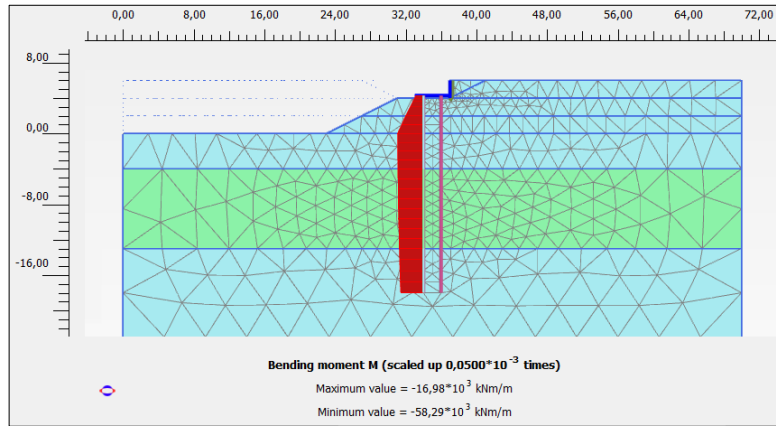




Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos y Puertos y de Ingeniería de Minas

RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA MEDIANTE PLAXIS 2D



Gonzalo García Ros
José Antonio Jiménez Valera
Iván Alhama Manteca
María Encarnación Martínez Moreno



Universidad Politécnica de Cartagena

RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA MEDIANTE PLAXIS 2D

Gonzalo García Ros

José Antonio Jiménez Valera

Iván Alhama Manteca

María Encarnación Martínez Moreno

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas
Universidad Politécnica de Cartagena

© 2019, Gonzalo García Ros
José Antonio Jiménez Valera
Iván Alhama Manteca
María encarnación Martínez Moreno

© 2019, Universidad Politécnica de Cartagena.

CRAI Biblioteca
Plaza del Hospital, 1
30202 Cartagena.
968325908
ediciones@upct.es



Primera edición, 2019

ISBN: 978-84-17853-03-7



Esta obra está bajo una licencia de Reconocimiento-NOcomercial-SinObraDerivada (by-nc-nd): no se permite el uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.

[http://es.creativecommons.org/blog/wp-content/uploads/2013/04/by-nc-nd.eu_petit .png](http://es.creativecommons.org/blog/wp-content/uploads/2013/04/by-nc-nd.eu_petit.png)

Prólogo

Este texto constituye un nuevo esfuerzo del Área de Ingeniería del Terreno de la UPCT en elaborar material docente que facilite a los alumnos del Grado y Máster de Ingeniería Civil la iniciación al manejo del software PLAXIS 2D, uno de los programas de referencia en el análisis y resolución de problemas relacionados con la Geotecnia. Hoy en día, la utilización por parte de los ingenieros de programas de cálculo comerciales (y en este caso tan potentes como PLAXIS) debe ser una parte fundamental en su formación, principalmente por dos motivos: en primer lugar, disfrutar de una experiencia de aprendizaje aplicada y que a la vez sirva para apuntalar los conceptos teóricos cursados y, en segundo lugar, orientarse y prepararse para su futura salida de la universidad y su entrada en el mercado laboral de la ingeniería.

El objetivo de los ejercicios resueltos en el presente libro es, exclusivamente, la iniciación al manejo del programa PLAXIS. Sin carecer de rigor desde el punto de vista geotécnico, el texto está enfocado a la creación, partiendo cero y de forma guiada, de distintos modelos de PLAXIS 2D que reflejen de forma fidedigna los condicionantes geotécnicos planteados en cada problema. Por supuesto, la obtención y representación de resultados a través del programa PLAXIS Output tiene igual importancia en el texto.

Las posibilidades del programa PLAXIS 2D, tanto en la introducción de datos y creación de modelos como en la representación de resultados mediante PLAXIS Output, son muy variadas, lo cual nos ha llevado a seleccionar de manera muy cuidadosa los ejercicios a resolver con el objeto de proporcionar al alumno un aprendizaje progresivo y ordenado.

Así, el libro consta de siete ejercicios, cada uno de ellos fácil de identificar y relacionar con las diferentes unidades temáticas que los alumnos estudian a lo largo de su formación en ingeniería del terreno: factores de seguridad en desmontes y terraplenes, consolidación de suelos, redes de flujo bajo estructuras de retención, cimentaciones superficiales, muros pantalla y cimentaciones profundas.

El libro está concebido para aprender el manejo del programa de manera gradual, con lo cual un usuario sin experiencia previa con el programa debería seguir el orden en el que aparecen los ejercicios en el texto. Así, en la redacción y enfoque de los primeros ejercicios prima, por encima de todo, el carácter de guía, describiéndose de forma minuciosa todas y cada una de las opciones que el alumno debe ajustar en la interfaz de entrada para obtener el modelo de cálculo. En estos primeros ejercicios, la obtención y representación de resultados es también minuciosamente guiada. Después, una vez que el texto avanza, el carácter de guía se reduce con objeto de mostrar la versatilidad del programa: diferentes tipos de cálculo, modelos constitutivos, elementos estructurales, sus combinaciones y, por supuesto, la potente interfaz de representación de resultados.

Este libro y su contenido tienen únicamente un fin educativo. La elaboración del mismo, así como la captura de imágenes del programa, ha sido autorizada por la marca PLAXIS, propiedad de la compañía Bentley Systems, a la cual queremos agradecer su colaboración. El documento “PLAXIS 2D Reference Manual 2019”, así como la ayuda disponible online <https://www.plaxis.com/support>, ha sido de gran ayuda para la resolución de los problemas, y se anima al lector a consultar dichos manuales para una experiencia avanzada.

La versión utilizada en la resolución de los problemas ha sido la 2016.01, contando con la correspondiente licencia de uso.

Los autores quedamos abiertos a cualquier consulta o sugerencia. Todos los comentarios serán bienvenidos.

Los autores

Índice

Ejercicio 01 Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo	1
Ejercicio 02 Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso	23
Ejercicio 03 Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía	39
Ejercicio 04 Red de flujo bajo una presa de hormigón	75
Ejercicio 05 Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso	97
Ejercicio 06 Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla	137
Ejercicio 07 Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente	191

Ejercicio 01

Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmante excavado en un material homogéneo

1.1. INTRODUCCIÓN

En el presente ejercicio se pretende ilustrar un desmante excavado en un suelo homogéneo, analizando diferentes aspectos de interés en este tipo de obras, especialmente la determinación de la posible superficie de rotura y el factor de seguridad global a largo plazo.

1.2. PARÁMETROS DEL PROBLEMA

Consideraremos una masa de suelo homogéneo lo suficientemente amplia (80 metros de ancho por 30 metros de alto). La geometría del desmante (10 metros de desnivel con talud 3H:2V) y los parámetros geotécnicos del problema considerado se representan en la Figura 1.1 y en la Tabla 1.1, respectivamente.

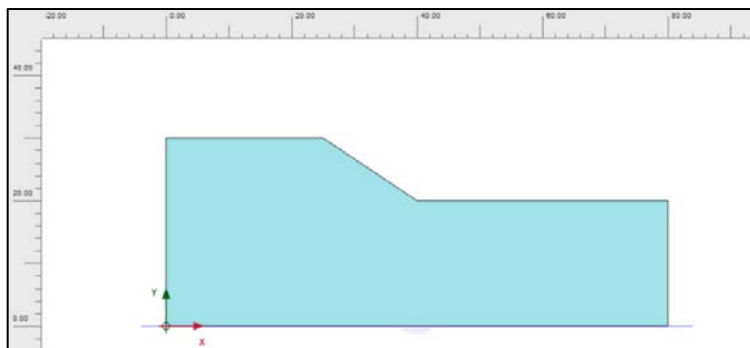


Figura 1.1. Esquema de desmante excavado sobre un suelo homogéneo en PLAXIS 2D

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

Parámetros geotécnicos

Material	Arcilla
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Comportamiento material	Drenado°
Peso específico no saturado (γ_{unsat})	17,5 kN/m ³
Peso específico saturado (γ_{sat})	20 kN/m ³
Módulo de Young (E')	15.000 kPa
Coficiente de Poisson (ν')	0,33
Cohesión efectiva (c')	14 kPa
Ángulo de rozamiento efectivo (ϕ')	23,5°
Ángulo de dilatación (ψ)	0 °

Parámetros geométricos

Altura de desmonte	10 m
Inclinación del talud	3H:2V
Nivel freático	A media altura del desmonte (5 m)

Tabla 1.1. Parámetros geotécnicos y geométricos del desmonte excavado sobre un suelo homogéneo

1.3. RESOLUCIÓN DEL DESMONTES CON PLAXIS 2D

1.3.1 Introducción de los parámetros de proyecto

Iniciamos el programa de elementos finitos PLAXIS 2D (“PLAXIS input”) y elija la opción “*Start a new project*” en la pantalla emergente “*Quick select*”.

Al continuación aparecerá otra pantalla emergente llamada “*Project properties*”. En esta pantalla, que tiene tres pestañas, es donde vamos a nombrar el proyecto, a elegir las unidades, el tipo de modelo y elementos, los valores de determinadas constantes y las medidas de los contornos donde definiremos la geometría del suelo y las estructuras.

En la pestaña “*Project*” nombramos el proyecto (Figura 1.2). Así, por ejemplo, en la barra de título escribimos: “*Desmonte excavado en suelo homogéneo*”.

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

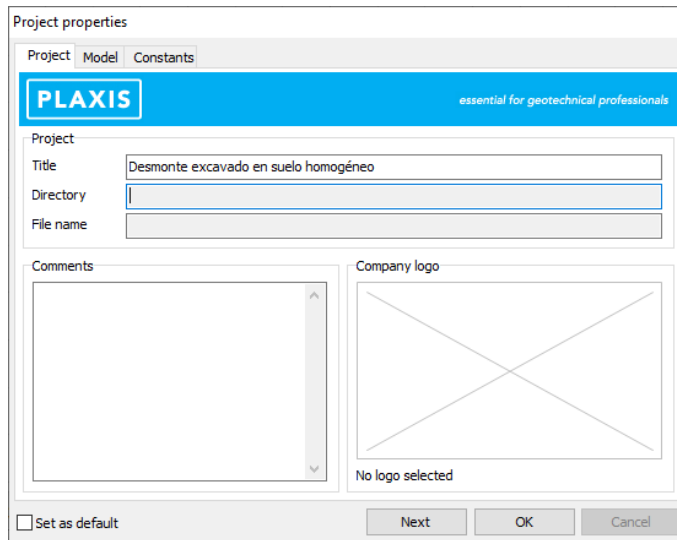


Figura 1.2. Pantalla de introducción de propiedades del proyecto. Datos básicos

Antes de pulsar “OK”, pasamos a la pestaña “Model” y elegimos la opción “Plane strain” para el modelo y “15-Noded” para los elementos. Mantendremos las unidades que aparecen en el programa por defecto, tal y como aparecen en la Figura 1.3. Finalmente, para definir el contorno, escribimos los valores que aparecen en la Tabla 1.2.

x_{\min}	0	m
x_{\max}	80	m
y_{\min}	0	m
y_{\max}	35	m

Tabla 1.2. Coordenadas para el contorno del proyecto

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

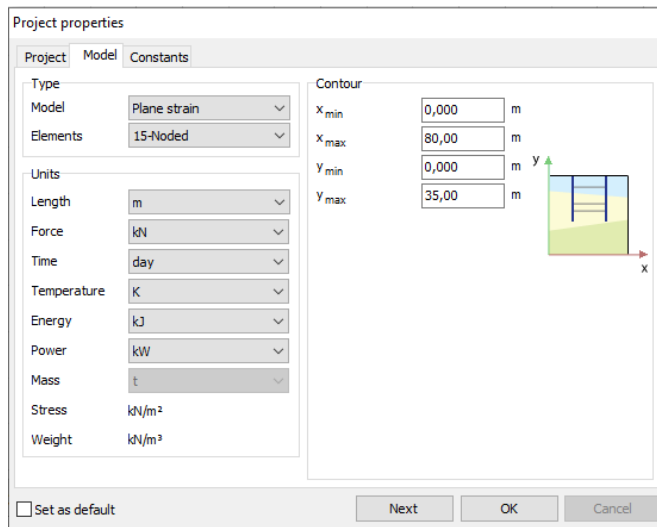


Figura 1.3. Pantalla de introducción de propiedades del proyecto. Modelo, unidades y contorno del proyecto

En cuanto a las constantes, mantendremos los valores que aparecen por defecto en el programa (Figura 1.4). Pulsamos “OK” para guardar todas las modificaciones introducidas en las propiedades del proyecto.

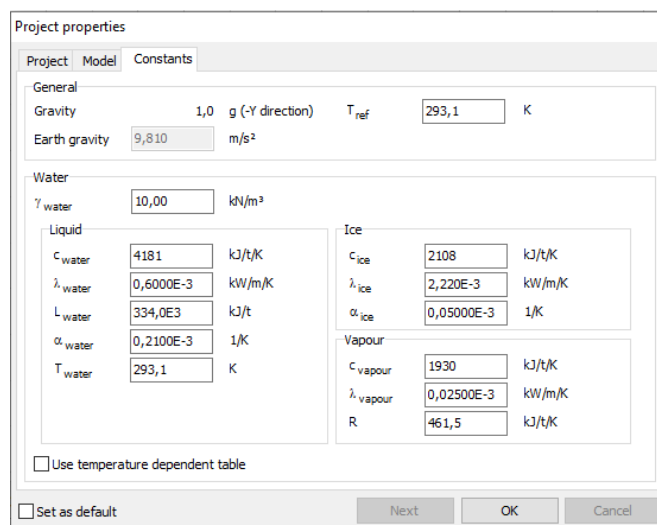


Figura 1.4. Pantalla de introducción de propiedades del proyecto. Constantes del proyecto

1.3.2 Definición del suelo

Para definir el material homogéneo sobre el cual se ha realizado la excavación, pulsamos la pestaña azul “Soil”. En el programa hay dos pestañas azules que son los “Modos de geometría” y tres pestañas verdes que son los “Modos de cálculo”.

Haciendo click en el icono “Create borehole”, tal y como se muestra en la Figura 1.5, procedemos a crear el primer sondeo necesario para definir nuestro material excavado.

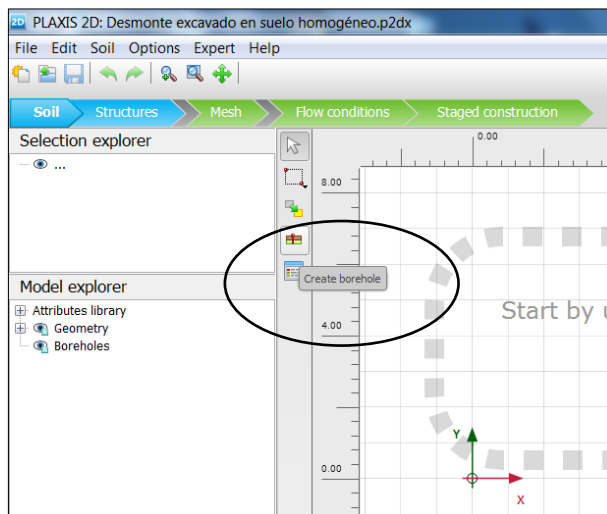


Figura 1.5. Botón para la creación de sondeos

Para definir el sondeo, primero pinchamos en el punto (0,0), apareciendo la pantalla emergente “Modify soil layers”. Seleccionamos “Add”, asignando en “Top” el valor de 30 y en “Bottom” el valor 0.

Como el nivel freático se encuentra situado a media altura del desmonte, en “Head” escribimos 25 (metros). Una vez realizado esto, pulsamos “OK” para guardar los datos de este primer sondeo, Figura 1.6.

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

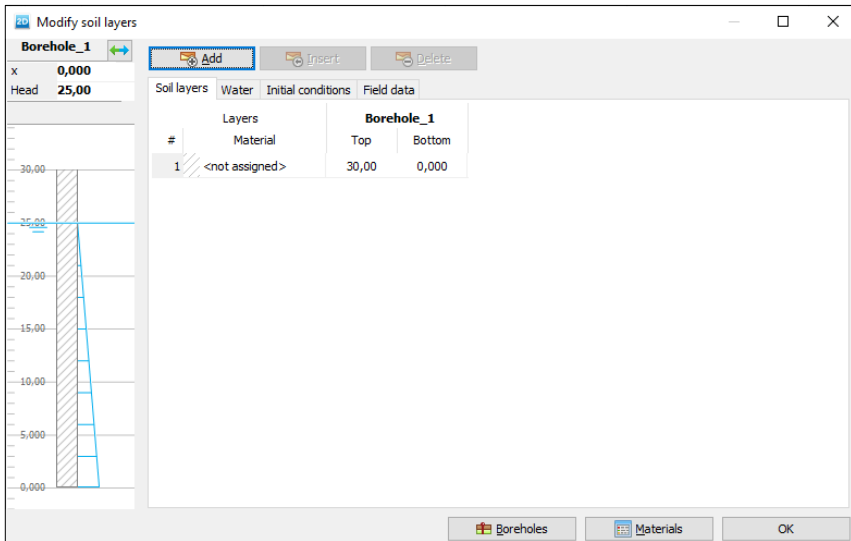


Figura 1.6. Primer sondeo necesario para definir el desmonte propuesto

El segundo sondeo lo situamos en las coordenadas (25, 30). Nuevamente, en “*Top*” escribimos 30 y en “*Bottom*” asignamos el valor de 0. El valor de “*Head*” es 25.

El tercer sondeo queda situado en las coordenadas (32,5; 25). Para poder situar el sondeo en la coordenada $x = 32,5$, es necesario tener asignado el valor de 2 en “Number of snap intervals”, dentro de la opción “Snapping options” Figura 1.7. Esto permite subdividir cada elemento del espaciado (1 metro) en 2, a efectos de introducción de datos. A continuación, una vez situado el sondeo en sus coordenadas (32,5; 25), escribimos en “*Top*” 25 y en “*Bottom*” 0. El valor de “*Head*” sigue siendo 25 en éste caso.

El cuarto y último sondeo está situado en las coordenadas (40, 20). En “*Top*” introducimos 20 y en “*Bottom*” 0. Como el nivel freático ahora está en la cota 20 (en la superficie del terreno) en “*Head*” asignaremos el valor de 20.

Una vez definida la geometría del terreno, hay que crear el material del que está formado el suelo homogéneo. Para ello, seleccionamos el icono “*Show materials*” (Figura 1.8). Una vez dentro, dejamos las opciones que aparecen por defecto (el valor de “Set type” en “Soil and interfaces”) y pinchamos en “*New*”, asignamos un nombre al material (por ejemplo, “Arcilla”) e introducimos los parámetros geotécnicos del

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmante excavado en un material homogéneo

enunciado (Tabla 1.1). En las Figuras 1.9 y 1.10 aparecen los parámetros introducidos en PLAXIS 2D.

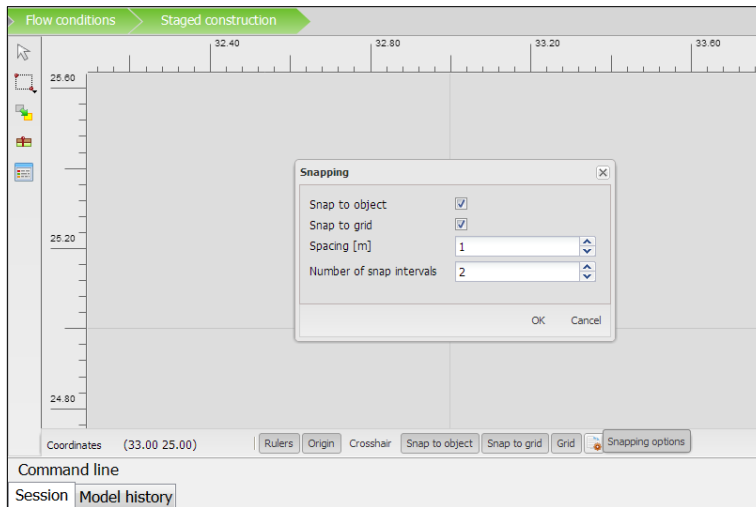


Figura 1.7. Selección de las opciones de espaciado



Figura 1.8. Icono “Show Materials” y geometría del desmante

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

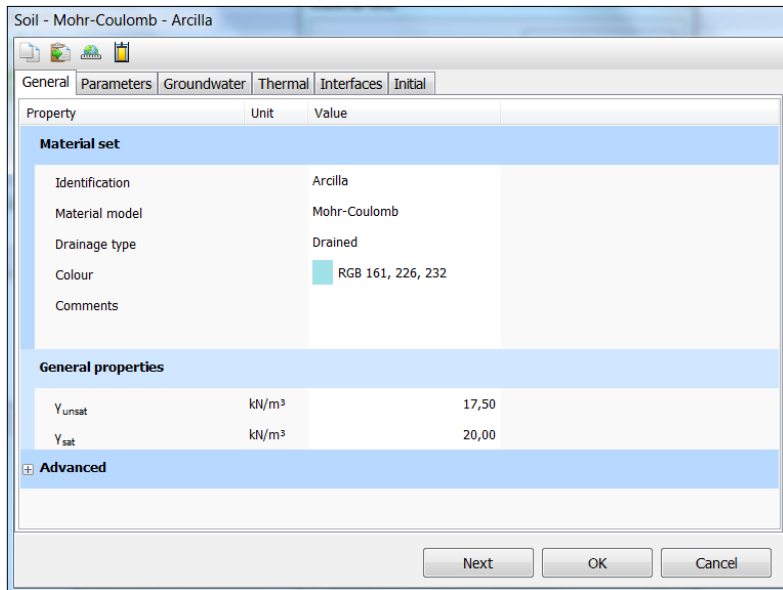


Figura 1.9. Propiedades generales del terreno de nuestro proyecto

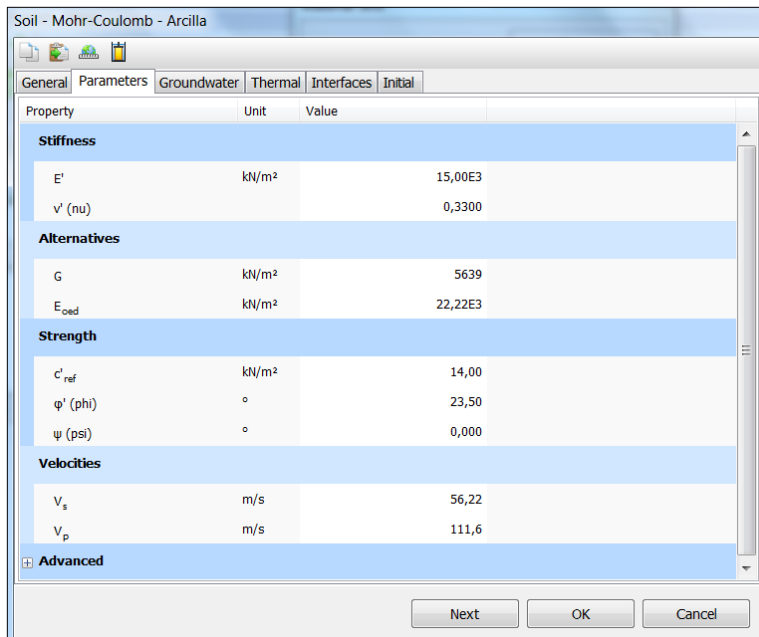


Figura 1.10. Parámetros del terreno de nuestro proyecto

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

Dentro del modo de geometría “Soil”, seleccionamos (en el espacio de trabajo) con el botón derecho del ratón el material que ha sido generado con anterioridad (selección “Set material”, selección “Arcilla”), Figura 1.11.

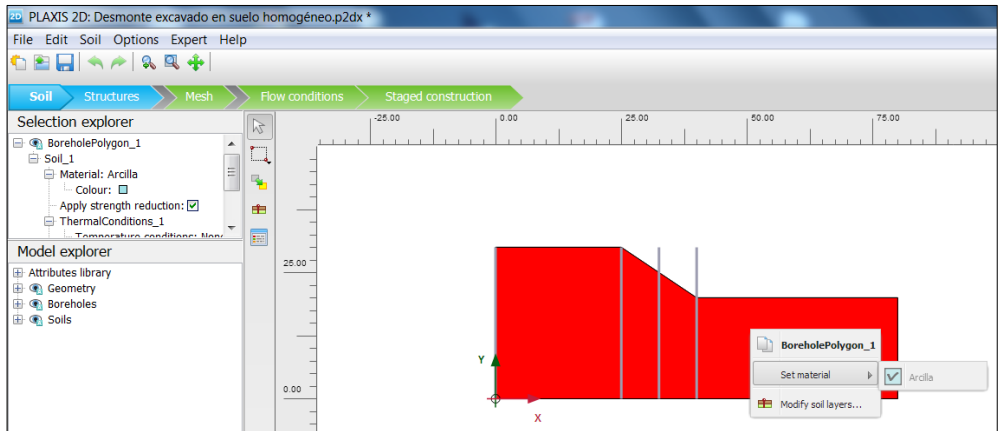


Figura 1.11. Asignación de la Arcilla como material que forma el terreno de estudio

1.3.3 Mallado del terreno

Seleccionamos el modo de cálculo “Mesh” para mallar el terreno. A continuación, pulsamos el icono “Generate mesh” (Figura 1.12) e indicamos que queremos una distribución de elementos media (Figura 1.13).

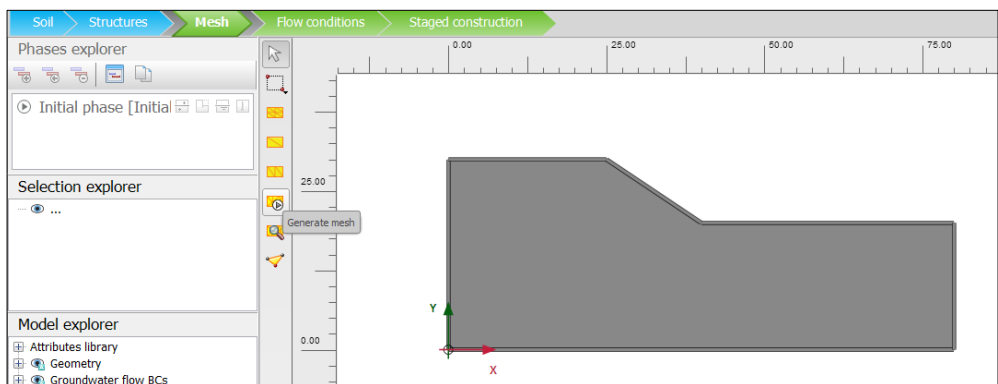


Figura 1.12. Generación de la malla dentro del modo de cálculo “Mesh”

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

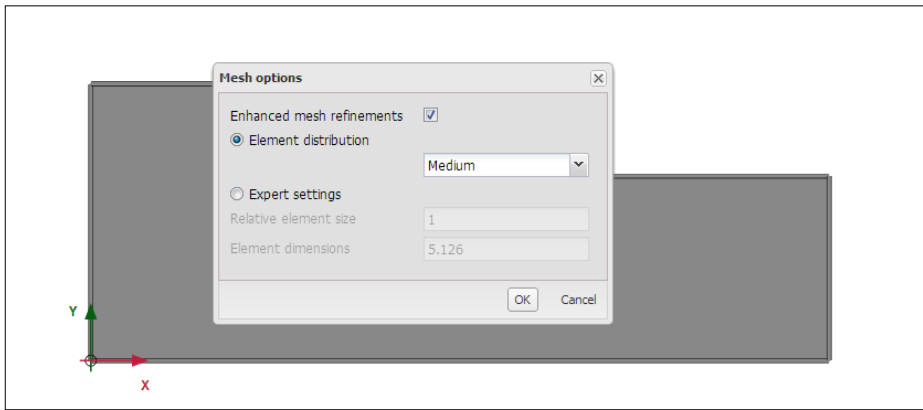


Figura 1.13. Selección de una distribución de elementos de tipo medio

Para visualizar la malla que se ha creado seleccionamos el icono “View mesh”, situado justo debajo del icono “Generate mesh”. A continuación, se abre el programa “PLAXIS Output”, permitiéndonos ver el mallado generado (Figura 1.14).

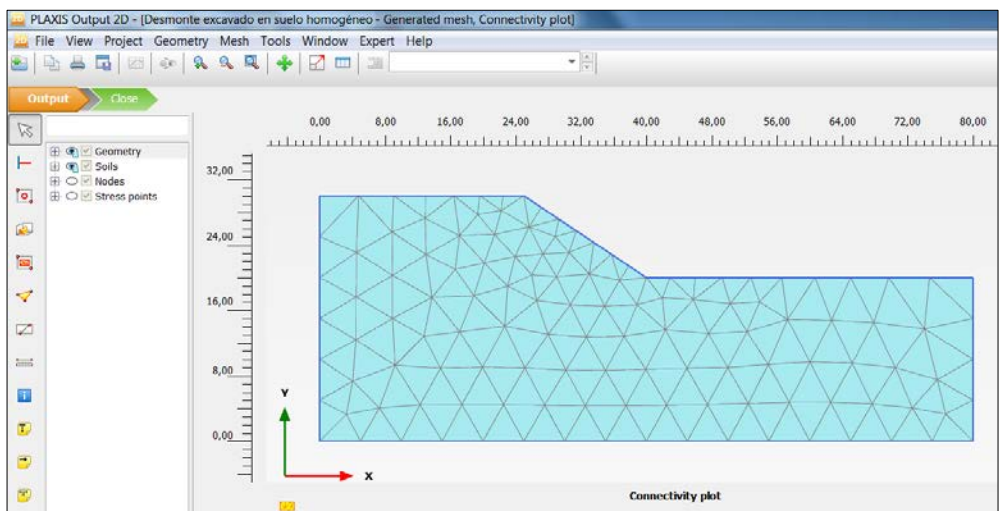


Figura 1.14. Malla generada, representada en “PLAXIS Output”

1.3.4 Visualización del nivel freático en el terreno

Si seleccionamos el modo de cálculo “Flow conditions”, podemos visualizar el nivel freático que se ha creado al definir el suelo mediante sondeos (Figura 1.15).

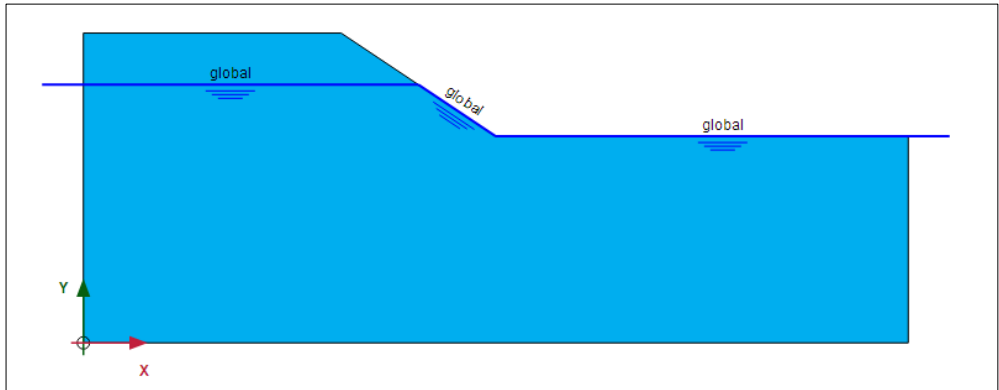


Figura 1.15. Nivel freático global generado

1.3.5. Fases de proyecto

En éste caso particular, al ser el estudio de la estabilidad de un desmonte, sólo implementaremos dos fases de cálculo. La primera fase corresponderá en realidad a una fase inicial en la que ya se encuentra el terraplén formado, mientras que la segunda fase es en la que indicaremos que se calcule el factor de seguridad.

La primera frase (“Initial phase”) ya está creada. Por defecto, el tipo de cálculo (“*Calculation type*”) es “*K0 procedure*”, pero lo cambiaremos a “*Gravity loading*” (Figura 1.16). Tanto una opción como la otra tienen como objetivo determinar las tensiones iniciales que se tienen en el terreno natural, pero la manera en que se obtienen son distintas.

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

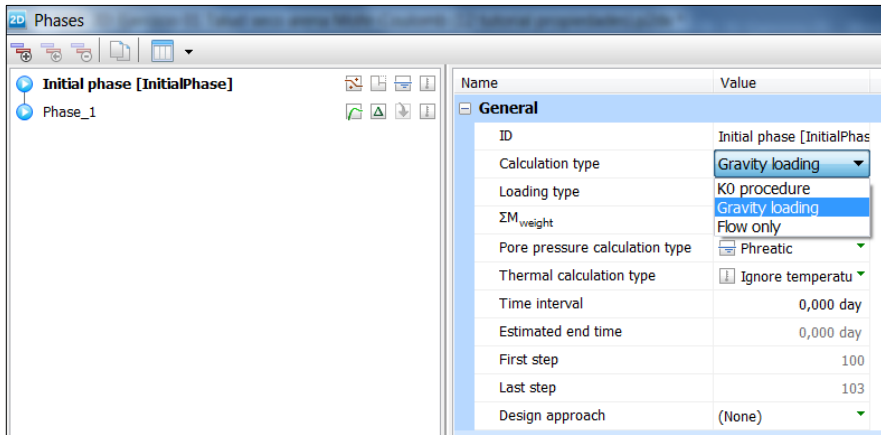


Figura 1.16. Definición de la Fase inicial. Selección del tipo de cálculo “Gravity loading”

Así, mediante la opción “K0 procedure” el programa calcula las tensiones verticales y deriva las horizontales a partir del valor dado a K_0 . Se trata de un cálculo que no emplea elementos finitos (no resuelve las ecuaciones de gobierno), con lo que el equilibrio no queda garantizado salvo que tengamos capas de suelo estrictamente horizontales.

En cambio, con la opción “Gravity loading” el programa sí que realiza un cálculo plástico, en el que las tensiones iniciales se obtienen tras la aplicación del peso propio del material. Esta opción es, por tanto, la más indicada cuando no se tiene una estratigrafía horizontal. Como veremos más adelante, esta opción sí que da lugar a la aparición de desplazamientos, con lo cual deberemos indicar al programa que no los tenga en cuenta para el inicio de la fase siguiente.

Para crear la segunda fase (que permite obtener el valor del factor de seguridad y la superficie de rotura) pulsamos el icono “Add phase” dentro del menú “Phases explorer” (Figura 1.17).

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

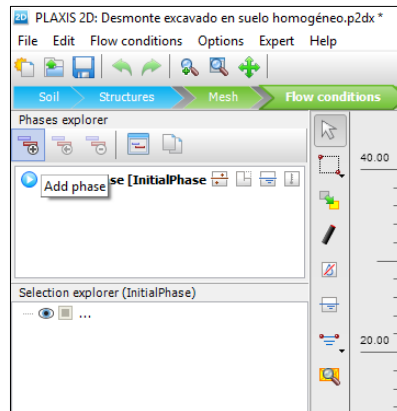


Figura 1.17. Creación de nueva fase en el menú “*Phases explorer*”

Pulsando dos veces sobre la “Phase_1” que se ha creado y aparecerá una pantalla emergente llamada “*Phases*”. En el apartado “*General*”, en ID escribiremos un nombre para reconocer la fase, que en éste caso llamaremos “*Safety*”. Nótese como, a pesar de haberla etiquetado, el programa aún mantiene la etiqueta que indica que es la “Phase 1”.

En el apartado “*Calculation type*” (seguimos dentro de “*General*”) seleccionaremos “*safety*”, que permitirá calcular el factor de seguridad del desmonte para la fase con la cual va asociada, en este caso la fase inicial (“*Start from Phase*”, “*Initial Phase*”), tal y como aparece en la Figura 1.18. Nos aseguraremos de que está marcada la opción “*Reset displacements to zero*”, mientras que el resto de opciones de cálculo las dejaremos sin modificar. Pulsamos “*OK*” para aceptar.

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

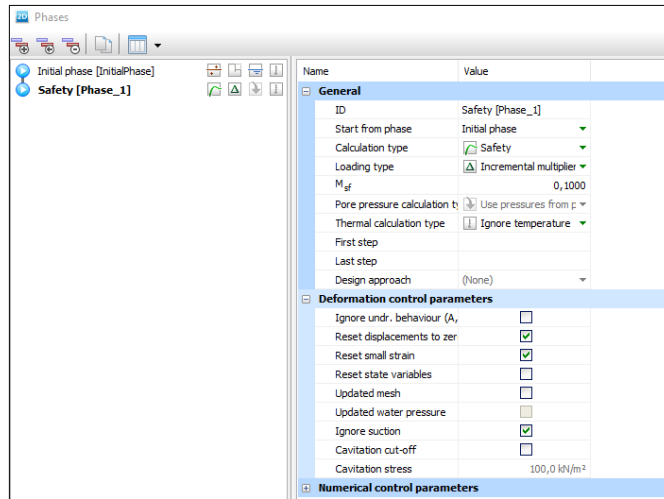


Figura 1.18. Fase 1 “Safety”

Antes de empezar a calcular es posible seleccionar (en el modo de cálculo “*Staged Construction*”, “*Selecting points for curves*”) aquellos puntos que consideremos interesantes para realizar gráficos de salida avanzados en “PLAXIS Output”, por ejemplo, varios puntos cercanos a la posible superficie de rotura.

También es posible proceder a los cálculos sin introducir los puntos* y, una vez conocida la superficie de rotura, seleccionar los puntos más tarde. Procederemos de esta última manera. Por lo tanto, pulsamos “*Calculate*”, dentro del modo de cálculo “*Staged Construction*” (Figura 1.19). Se visualizará una advertencia del programa como que no se han indicado nodos para las curvas avanzadas. La ignoramos.

* **NOTA:** cuando se procede a realizar los cálculos sin haber seleccionado puntos para gráficos de salida avanzados, los resultados ofrecidos por “PLAXIS Output” son correctos, tanto en las representaciones gráficas que se muestran en el espacio de trabajo como en la información en forma de tablas. Sin embargo, si tras realizar los cálculos añadimos puntos para realizar gráficos de salida avanzados, la información contenida en dichos gráficos avanzados puede ser incorrecta (a pesar de mostrarse bien tanto en el espacio de trabajo como en las tablas). Por ello, cada vez que se añadan puntos para curvas avanzadas procederemos a recalculer todas las fases del proyecto.

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

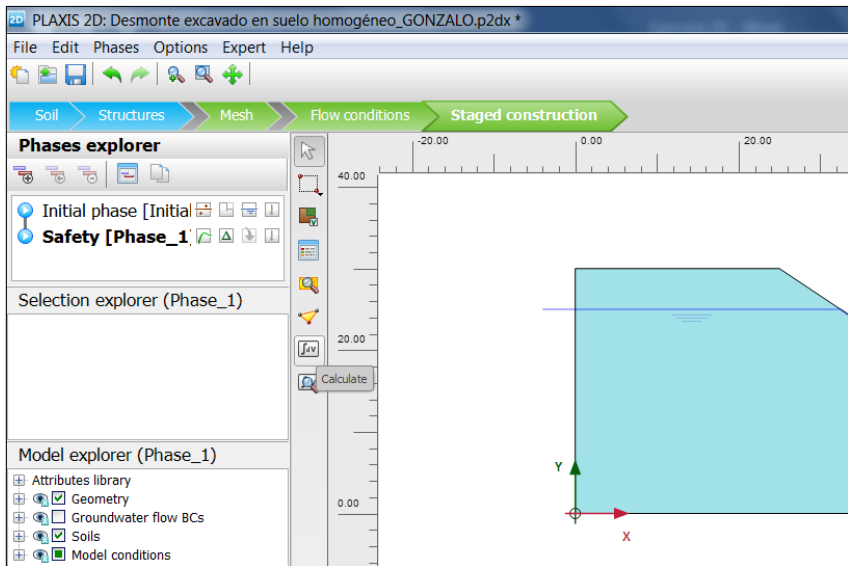


Figura 1.19. Icono para que PLAXIS realice los cálculos

Si durante el transcurso de los cálculos de las dos fases no ha habido ningún error, se podrán visualizar los resultados en “PLAXIS Output” seleccionando el icono “View Calculation Results” (Figura 1.20).

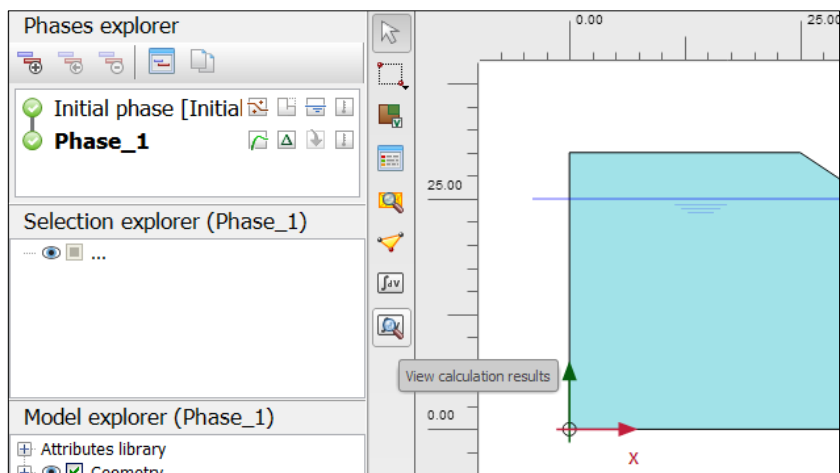


Figura 1.20. Fases calculadas con éxito e icono para ver los resultados en “PLAXIS Output”

1.3.6. Resultados en “PLAXIS Output”

En “PLAXIS Output” se puede visualizar fácilmente la deformada de cada una de las fases calculadas. Esta gráfica (“Deformed mesh | u |”) es la primera que aparece en el espacio de trabajo, nada más abrirse “PLAXIS Output” tras pulsar “View Calculation Results” (Figuras 1.21 y 1.22).

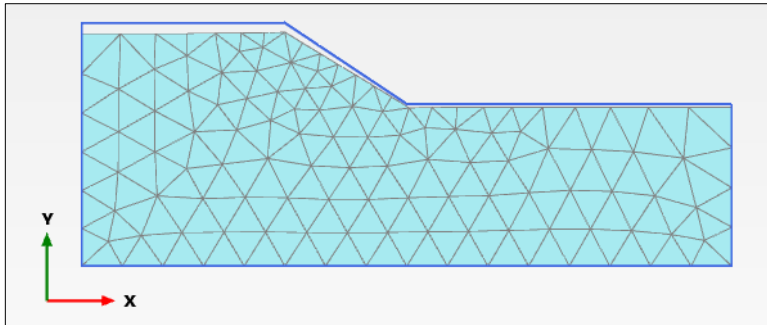


Figura 1.21. Deformada de la fase inicial

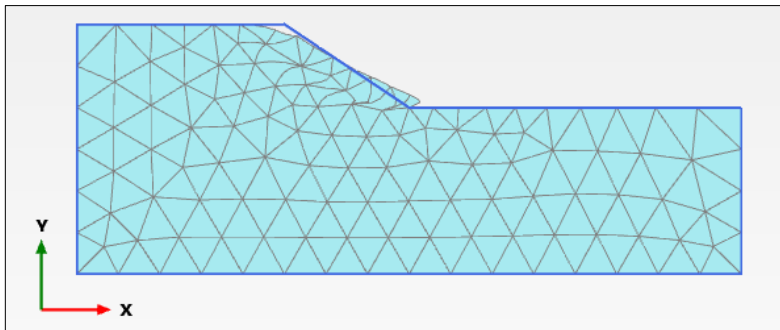


Figura 1.22. Deformada de la fase Safety

Para visualizar la deformada de una determinada fase, debemos seleccionar, en la barra superior, la fase deseada (“Initial Phase” o “Safety [Phase_1]”). En este punto, es importante destacar que en las fases de cálculo de tipo “safety” el valor numérico de los desplazamientos no es significativo, pues el cálculo realizado por PLAXIS bajo esta modalidad se centra en la obtención de los factores de seguridad y, en todo caso, en la identificación de la superficie de rotura, pero no en el valor numérico de los desplazamientos. En cuanto a los desplazamientos representados en la Fase inicial

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

(Figura 1.21), estos son debidos al procedimiento por el cual se han obtenido las tensiones iniciales para esta fase, pero no son tenidos en cuenta para el cálculo de desplazamientos en las fases posteriores.

Para visualizar la superficie de rotura, a partir de las deformaciones del desmonte, podemos seleccionar la opción “*Deformations*”, “*total displacements*”, “ $|u|$ ”, tal y como se recoge en la Figura 1.23.

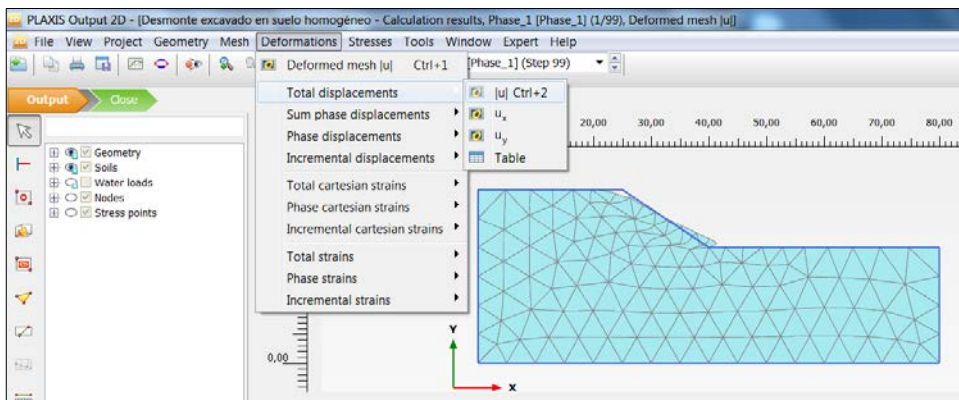


Figura 1.23. Ventanas para seleccionar los desplazamientos totales y obtener la posible superficie de deslizamiento

A continuación se puede observar la posible superficie de rotura (Figura 1.24).

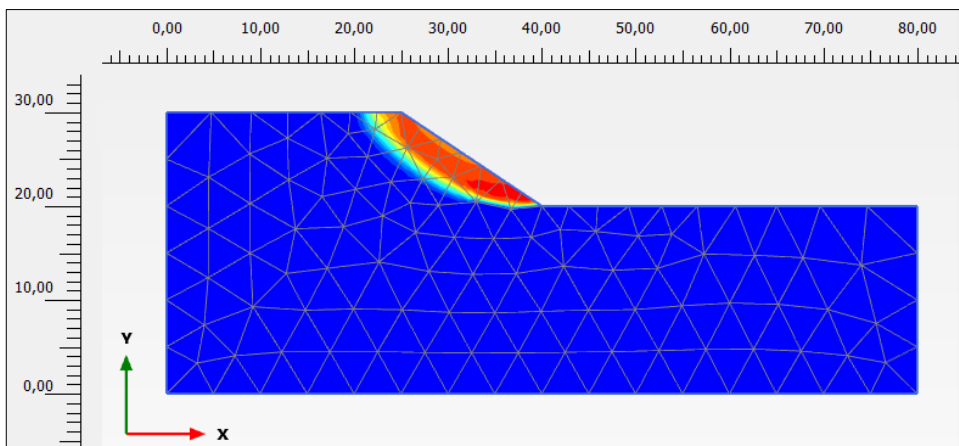


Figura 1.24. Posible superficie de rotura

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmote excavado en un material homogéneo

Existen diversas formas en “PLAXIS Output” de obtener el valor del factor de seguridad global, tal y como veremos a continuación.

En el análisis del factor de seguridad global, PLAXIS aplica el “*phi-c strength reduction method*”, una rutina por la cual los parámetros de resistencia al corte “ $\tan\varphi$ ” y “ c ” del suelo, así como la resistencia a tracción, se reducen sucesivamente hasta que se produce el fallo de la estructura. El multiplicador ΣM_{sf} (que es el factor de seguridad) se usa para definir el valor de los parámetros de resistencia del suelo en una etapa dada en el análisis:

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan\varphi}{\tan\varphi_{red}} = \frac{c}{c_{red}} = \frac{s_u}{s_{u,red}} = \frac{\text{resistencia a tracción}}{\text{resistencia a tracción}_{red}}$$

La manera más sencilla y directa de conocer el factor de seguridad es mediante la opción “*Calculation information*” que encontramos en el menú “*Project*” de la barra de herramientas (Figura 1.25). En la ventana que aparece se puede visualizar el valor exacto del factor de seguridad, ΣM_{sf} , valiendo en este caso 1,133 (Figura 1.26). Para ello, debe estar seleccionada previamente la fase “*Safety*” (desplegable justo encima del espacio de trabajo).

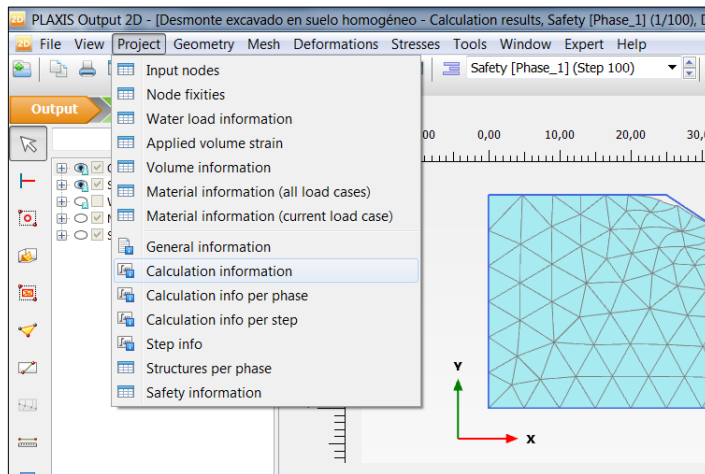


Figura 1.25. Selección de “*Calculation information*” para obtener el factor de seguridad

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

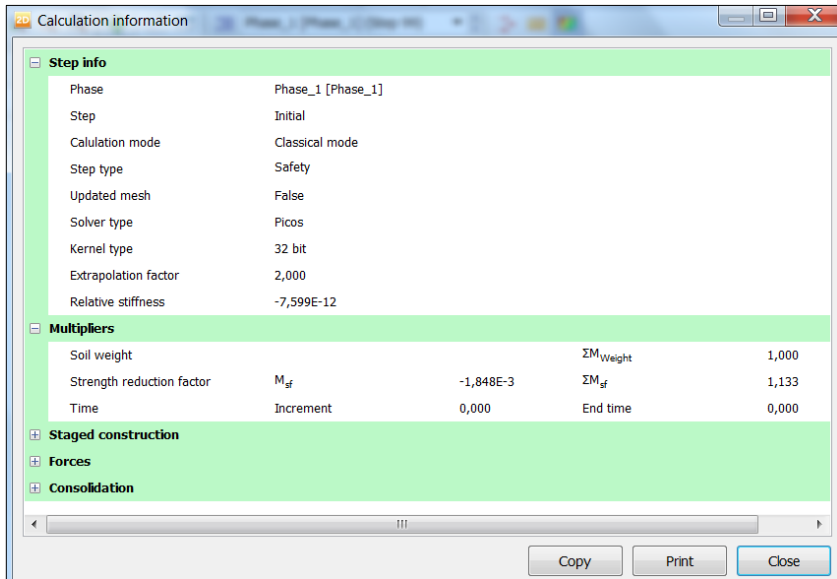


Figura 1.26. Información de cálculo, donde ΣM_{sf} es el factor de seguridad

Otra forma de obtener el factor de seguridad es graficar en un punto del terreno cualquier variable (por ejemplo, los desplazamientos) frente al factor de seguridad ΣM_{sf} .

Pero antes es necesario seleccionar aquellos puntos en los cuales queremos generar gráficos de salida avanzados. Para ello volvemos al “PLAXIS Input” y en el modo de cálculo “*Staged construction*” seleccionamos el icono “*Select points for curves*” (Figura 1.27). Vemos que el programa nos lleva nuevamente a la ventana de “PLAXIS Output”.

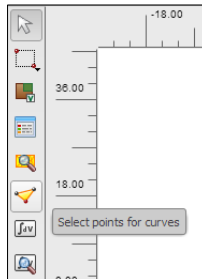


Figura 1.27. Icono “*Select points for curves*”

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmante excavado en un material homogéneo

Procedemos a seleccionar, por ejemplo, varios puntos* que pasen cerca de la superficie de deslizamiento (ver Figura 1.24) y un punto en el pie del talud (Figura 1.28). Los seleccionamos pinchando directamente sobre el espacio de trabajo y, una vez que hemos terminado la selección, pulsamos “Update”.

* **NOTA:** existen dos tipos de puntos: 1) “Nodes” (color rojo), que se emplearán básicamente en la representación de desplazamientos, y 2) “Stress points” (color morado), para representar esencialmente esfuerzos y deformaciones.

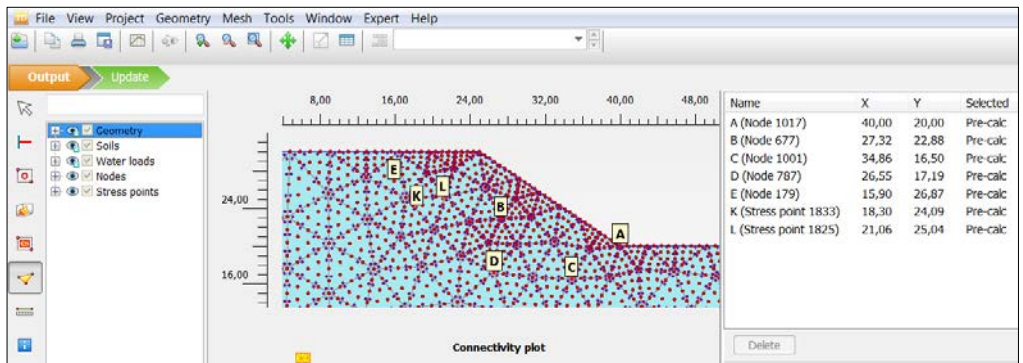


Figura 1.28. Puntos seleccionados para gráficos de salida avanzados

Ahora procederemos a recalcular todas las fases del proyecto: volviendo a “PLAXIS Input”, vamos al modo de cálculo “*Staged construction*” y en el menú de la izquierda “*Phases explorer*”, con el botón derecho, marcamos cada fase para cálculo (“*Mark for calculation*”). Terminados los cálculos, en “PLAXIS Output” pulsamos el icono “*Curves manager*” (Figura 1.29).

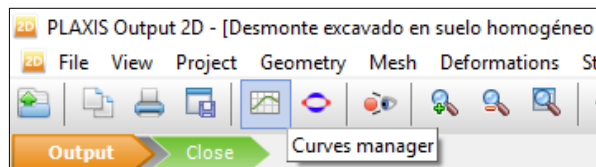


Figura 1.29. Icono “*Curves manager*” para generar gráficos de salida avanzados

En la pantalla “*Curves manager*” marcamos la pestaña “*Charts*” y seleccionamos “*New*” (Figura 1.30) para generar una nueva gráfica.

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

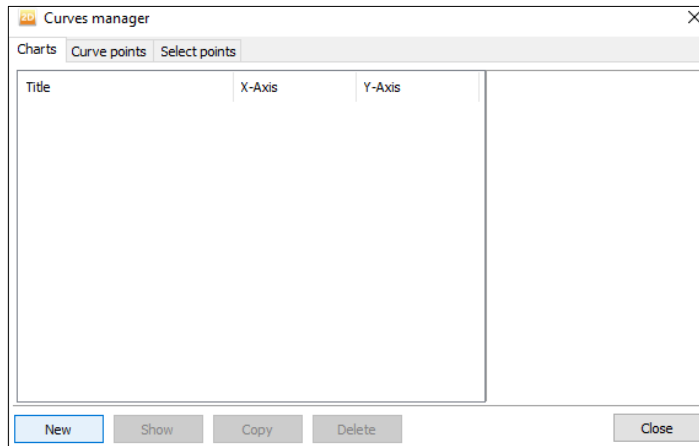


Figura 1.30. Aspecto inicial de la pantalla “Curves manager”

La Figura 1.31 recoge los parámetros y opciones que hay que elegir para graficar, en el punto A, los desplazamientos totales frente al factor de seguridad, viendo así la relación entre estos (Figura 1.32).

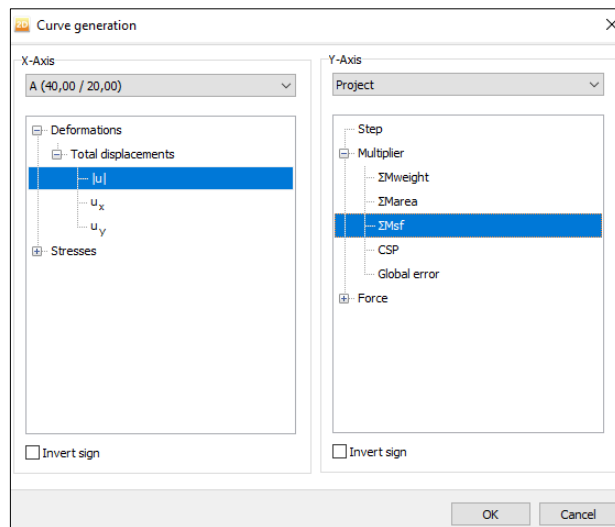


Figura 1.31. Selección de las variables que se desean graficar con “Curves manager”

Ejercicio 01. Análisis de la estabilidad a largo plazo de un desmonte excavado en un material homogéneo

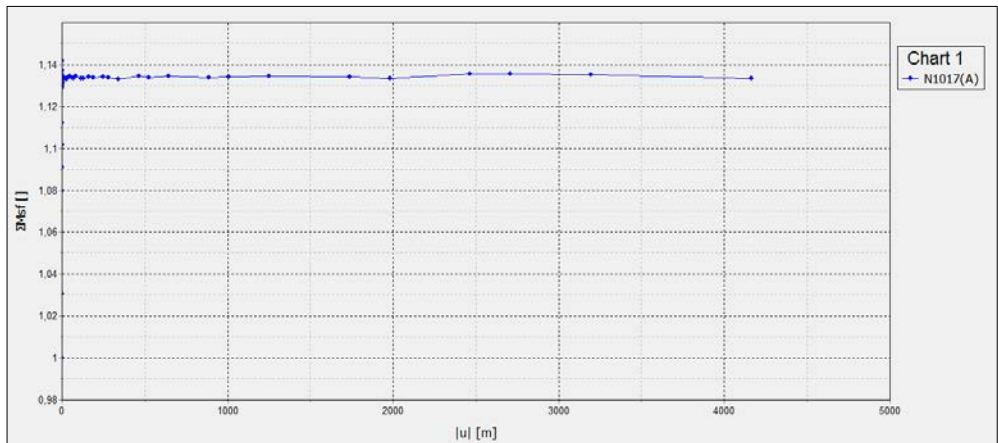


Figura 1.32. Variación del factor de seguridad frente al desplazamiento total (fase de cálculo “safety”) en el punto A

Como ya comentamos anteriormente, en las fases de cálculo de tipo “safety” el valor numérico de los desplazamientos no es significativo, pues en el cálculo realizado por PLAXIS bajo esta modalidad los desplazamientos únicamente se utilizan para poder conducir el proceso e indiciar el posible mecanismo de rotura. Como se observa en la Figura 1.32, un valor del factor de seguridad entorno a 1,135 es alcanzado rápidamente, para después mantenerse constante a partir de un determinado valor del hipotético desplazamiento. Al cerrar la gráfica, si se desea, es posible guardarla para poder cargarla posteriormente desde el gestor “*Curves manager*”.

Ejercicio 02

Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

2.1 INTRODUCCIÓN

Sobre un material arcilloso de gran espesor, se ha construido un terraplén de 5 metros de altura y 25 metros de anchura en coronación. Los taludes tienen una inclinación de 2H:1V. Se desea conocer el factor de seguridad global (terraplén – terreno de cimentación) cuando el nivel freático se encuentra en la superficie del terreno de cimentación. Tanto los parámetros geométricos como los parámetros geotécnicos están indicados en el siguiente apartado.

2.2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y GEOTÉCNICOS

En la Figura 2.1 se presenta un esquema con la geometría del problema.

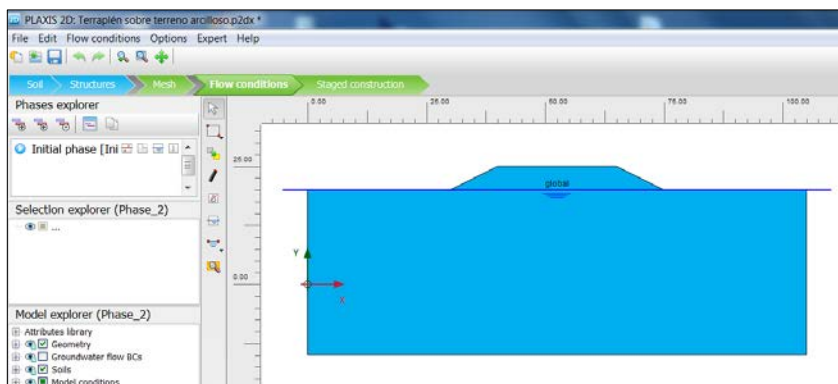


Figura 2.1 Geometría del problema

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

En las Tablas 2.1, 2.2, y 2.3 aparecen reflejados tanto los parámetros geotécnicos de los materiales (cimentación y terraplén) como los parámetros geométricos del terraplén.

Parámetros geotécnicos material cimentación

Material cimentación	Arcilla
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Comportamiento material	No drenado (C)
Peso específico no saturado (γ_{unsat})	20 kN/m ³
Peso específico saturado (γ_{sat})	20 kN/m ³
Módulo de Young (E')	14.000 kPa
Coefficiente de Poisson (ν')	0,495
Resistencia a corte no drenada ($S_{u,\text{ref}}$)	40 kpa

Tabla 2.1. Parámetros geotécnicos del material de cimentación

Parámetros geotécnicos terraplén

Material terraplén	Terraplén
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Comportamiento material	Drenado
Peso específico no saturado (γ_{unsat})	20,7 kN/m ³
Peso específico saturado (γ_{sat})	23 kN/m ³
Módulo de Young (E')	35000 kPa
Coefficiente de Poisson (ν')	0,3
Cohesión efectiva (c')	15 kPa
Ángulo de rozamiento efectivo (ϕ')	28°
Ángulo de dilatación (ψ)	0°

Tabla 2.2. Parámetros geotécnicos del terraplén

Parámetros geométricos

Altura del terraplén	5 m
Inclinación del talud	2H:1V
Nivel freático	En la superficie del terreno de cimentación

Tabla 2.3. Parámetros geométricos del terraplén

2.3. RESOLUCIÓN DEL TERRAPLÉN CON PLAXIS 2D

2.3.1 Introducción de los parámetros de proyecto

Comenzamos nombrando el proyecto en la pestaña “*Project*” de la pantalla emergente “*Project properties*”. En la barra de título escribimos, por ejemplo: “*Terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso*”.

En la pestaña “*Model*” comprobamos que está seleccionada la opción “*Plane strain*” en el modelo y elegimos “*15-Noded*” en elementos.

Para definir el contorno del espacio de trabajo, utilizaremos las distancias que aparecen en la Tabla 2.4.

x_{\min}	0	m
x_{\max}	105	m
y_{\min}	0	m
y_{\max}	40	m

Tabla 2.4. Coordenadas para el contorno del proyecto

Mantendremos las constantes que aparecen por defecto en el programa (pestaña “*constants*”).

2.3.2 Definición del terreno de cimentación y del material del terraplén

Seleccionamos el modo de geometría “*Soil*” y pulsamos sobre el icono “*Create borehole*” para crear el primer y único sondeo necesario para definir el terreno de cimentación en este problema.

Marcamos el punto (0,0) para definir el sondeo en “*Modify soil layers*”. A continuación, pinchamos en “*Add*” y asignamos el valor de 20 en “*Top*” y -15 en “*Bottom*”. Se va a considerar, por lo tanto, un espesor de arcillas de 35 metros. Como el nivel freático está situado en la superficie del terreno de cimentación, en “*Head*” escribimos 20 m. Los datos del sondeo introducido en PLAXIS 2D, aparecen la Figura 2.2.

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

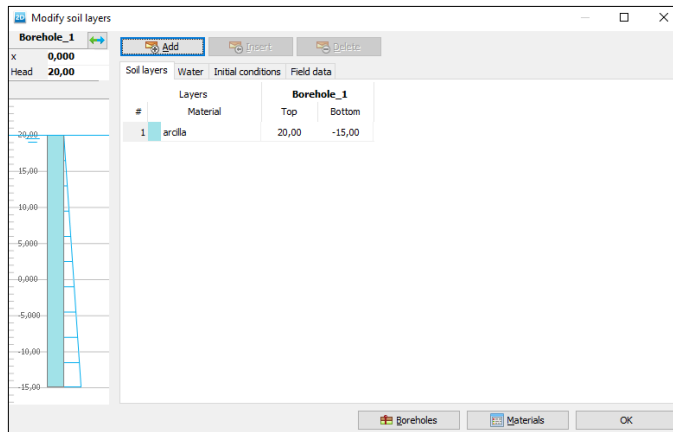


Figura 2.2. Primer y único sondeo necesario para definir el terreno de cimentación

Se creará la geometría que aparece en la Figura 2.3.

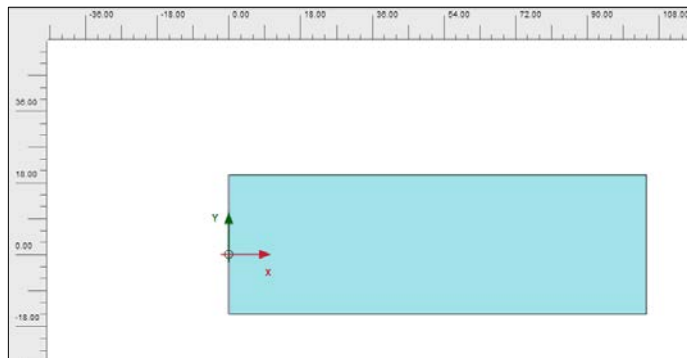


Figura 2.3. Geometría del terreno de cimentación

Continuamos creando el material del que está formado el suelo homogéneo. Para definir el material que constituye el terreno, en el modo de geometría “Soil” seleccionamos el icono “Show materials”. Manteniendo la opción de “Set type” en “Soil and interfaces”, seleccionamos “New” e introducimos los parámetros geotécnicos del enunciado correspondientes a la arcilla (Tabla 2.1). En las Figuras 2.4 y 2.5 aparecen los parámetros introducidos en el programa para este material. Una vez creado este material, podemos arrastrarlo con el ratón desde el menú de materiales hasta el espacio de trabajo, asignando al terreno de cimentación el material

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

“Arcilla”. Seguiremos los mismos pasos para la definición del material del terraplén (Tabla 2.2) y una vez definida la geometría le asignaremos este material.

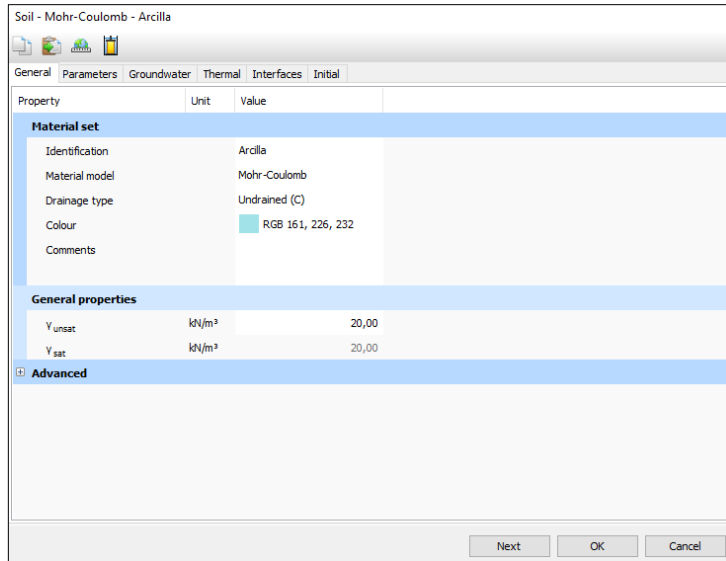


Figura 2.4. Propiedades generales del terreno de cimentación

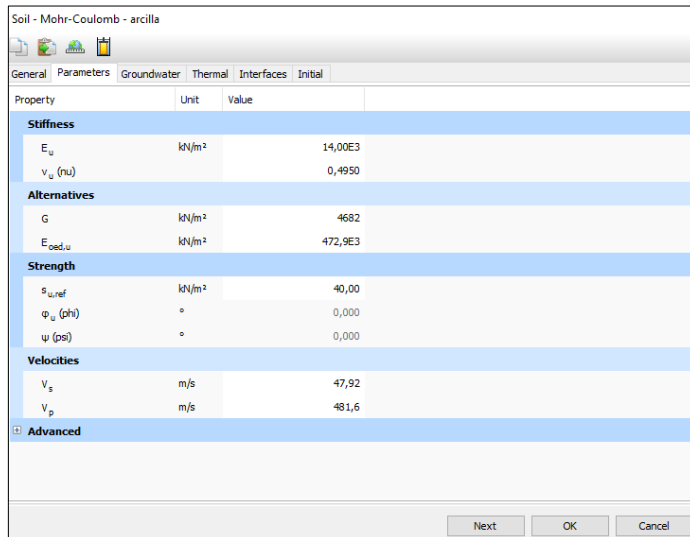


Figura 2.5. Parámetros geotécnicos del terreno de cimentación

2.3.3. Definición de la geometría del terraplén

Para definir la geometría del terraplén, nos dirigimos al modo de geometría “Structures” y seleccionamos el icono “Create soil polygon” (Figura 2.6).

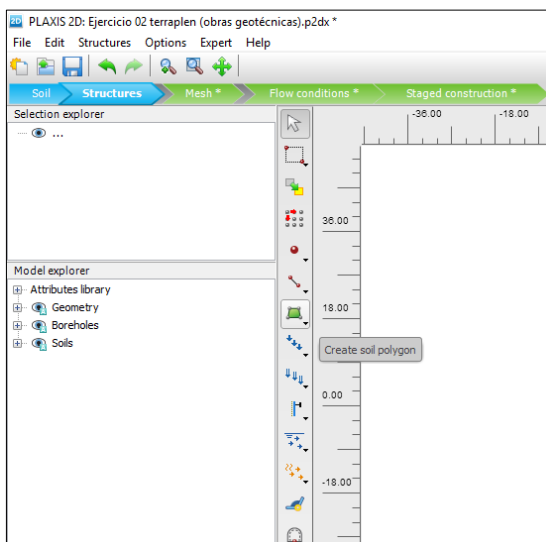


Figura 2.6. Icono “Create soil polygon”, dentro del modo de geometría “Structures”

Para crear el terraplén, seleccionamos con el ratón (en el espacio de trabajo), las siguientes coordenadas (Tabla 2.5):

Coordenadas de los puntos del contorno del terraplén	
A	(30, 20)
B	(40, 25)
C	(65, 25)
D	(75, 20)

Tabla 2.5. Coordenadas del contorno del terraplén

Para la asignación del material, en el espacio de trabajo, pinchamos en el terraplén ya dibujado con el botón derecho, marcando la opción “Soil”, seguidamente “Set material” y finalmente elegimos el material “Terraplén” (Figura 2.7).

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

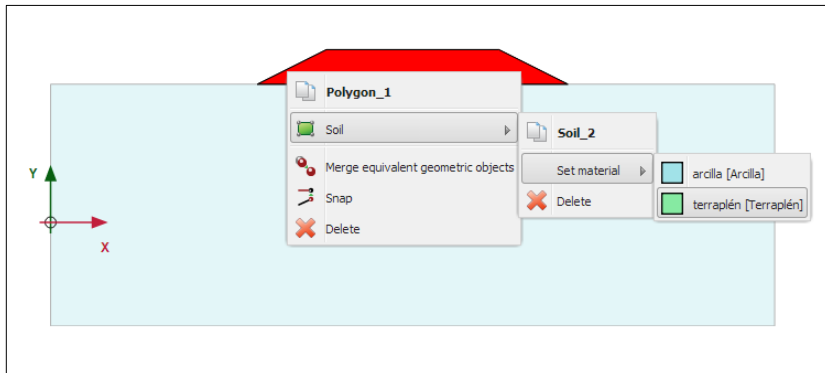


Figura 2.7. asignación del material al polígono de terraplén creado

2.3.4. Mallado del problema

Seleccionamos el modo de cálculo “*Mesh*” para mallar el terreno, pulsamos el icono “*Generate mesh*” e indicamos que el mallado sea medio. Para visualizar la malla que se ha creado en “PLAXIS Output” pulsamos sobre el icono “*View mesh*” (Figura 2.8).

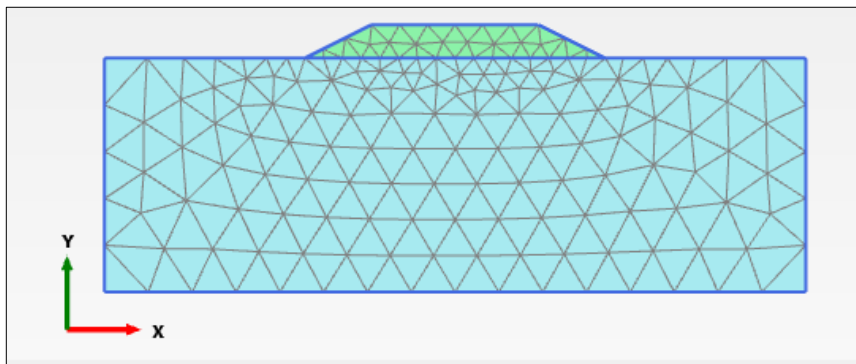


Figura 2.8. Mallado del problema en PLAXIS Output

2.3.5. Visualización del nivel freático en el terreno

Si seleccionamos el modo de cálculo “*Flow conditions*”, podremos visualizar el nivel freático que se ha creado al definir el suelo en el primer sondeo (Figura 2.9).

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

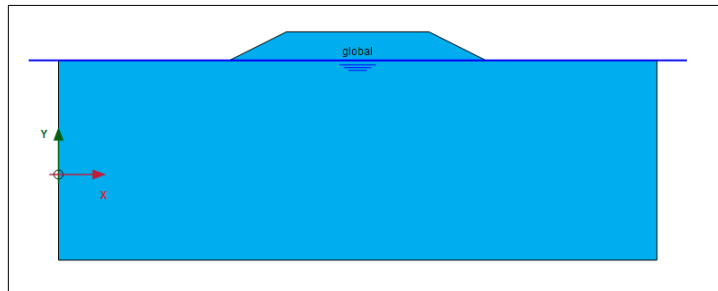


Figura 2.9. Situación del nivel freático

2.3.6. Fases de proyecto

Definiremos 3 fases diferenciadas en nuestro proyecto:

- Fase inicial: En ésta fase tan sólo consideramos el terreno de cimentación. Por lo tanto, desactivaremos el terraplén pulsando el botón derecho del ratón sobre el terraplén y seleccionando “*deactivate*” (Figura 2.10). Para ello, debemos tener seleccionado previamente el modo de cálculo “*Staged construction*”. Una vez desactivado el terraplén, el espacio de trabajo queda como se ve en la Figura 2.11, para esta fase inicial.

En esta ocasión, a diferencia del ejercicio anterior, mantendremos el tipo de cálculo que viene por defecto, “*K0 procedure*” (vamos al menú de la izquierda “*Phases explorer*” y hacemos doble click sobre “*Initial phase*”), ya que se trata de una capa de suelo completamente horizontal.

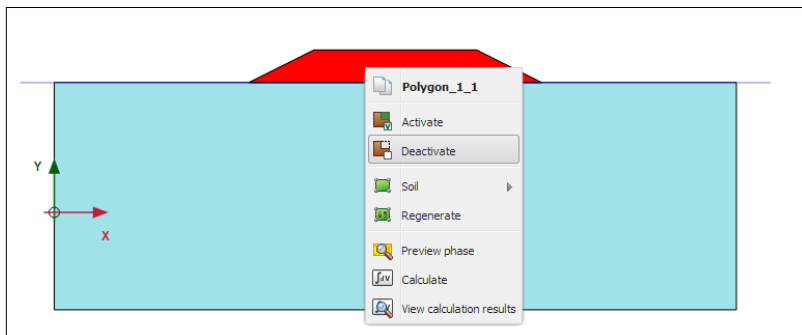


Figura 2.10. Desactivación del terraplén para la fase inicial

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

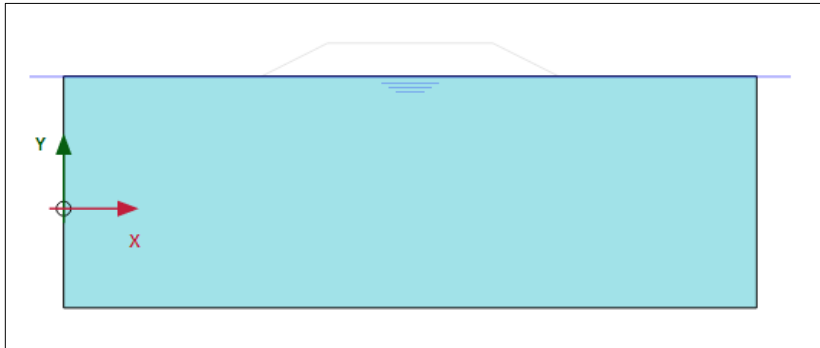


Figura 2.11. Aspecto del espacio de trabajo para la fase inicial

- Fase 1 (Terraplén): Creamos esta nueva fase y activamos el terraplén (Figura 2.12).

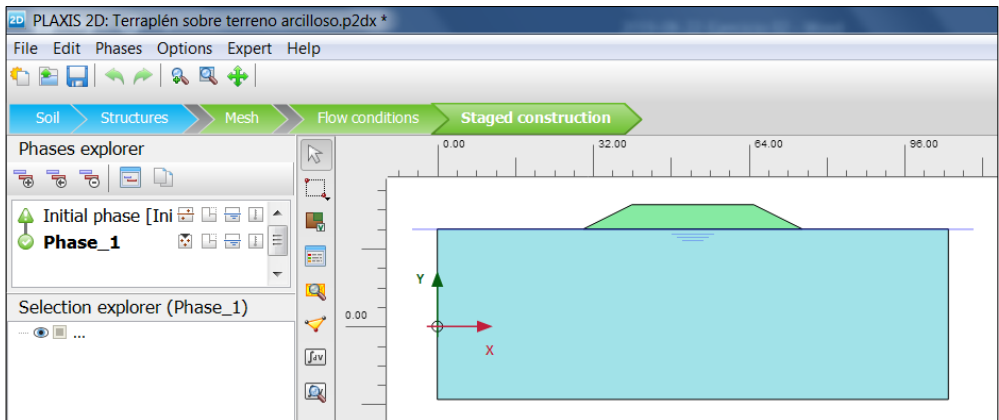


Figura 2.12. Aspecto del espacio de trabajo para la Fase 1 (Terraplén)

- Fase 2 (Safety): esta fase sirve para evaluar el factor de seguridad del terraplén sobre el terreno de cimentación, así como para obtener gráficamente la superficie de deslizamiento. En la Figura 2.13 se muestra como queda definida esta nueva fase.

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

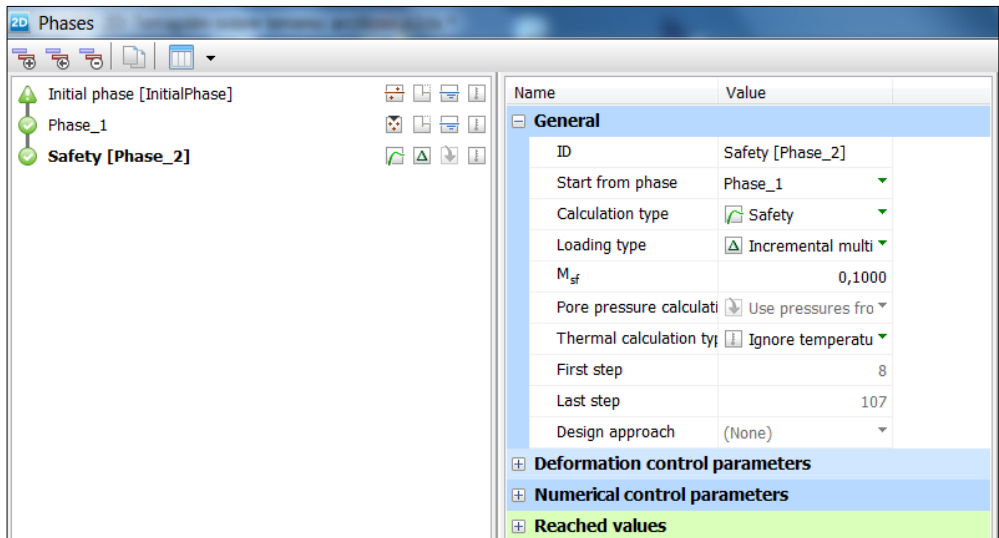


Figura 2.13. Definición de la Fase 2 (Safety)

Una vez definidas todas las fases, pulsamos el icono “Calculate”. Si en este momento aún no se ha indicado al programa ningún nodo del modelo sobre el que realizar posteriormente gráficos de salida avanzados, se mostrará una advertencia sobre esto, aunque podremos ignorarla. Si durante el transcurso de los cálculos PLAXIS no informa de ningún error, podremos visualizar los resultados en “PLAXIS Output” seleccionando el icono “View Calculation Results”.

2.3.7. Resultados en “PLAXIS Output”

En “PLAXIS Output”, lo primero que visualizamos tras finalizar los cálculos es la deformada del problema (está disponible para cada una de las fases definidas), Figuras 2.14 y 2.15.

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

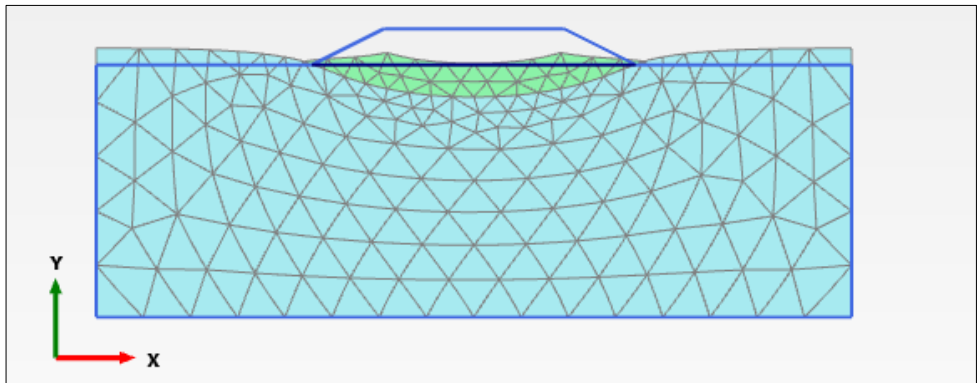


Figura 2.14. Deformada de la Fase 1 (terraplén)

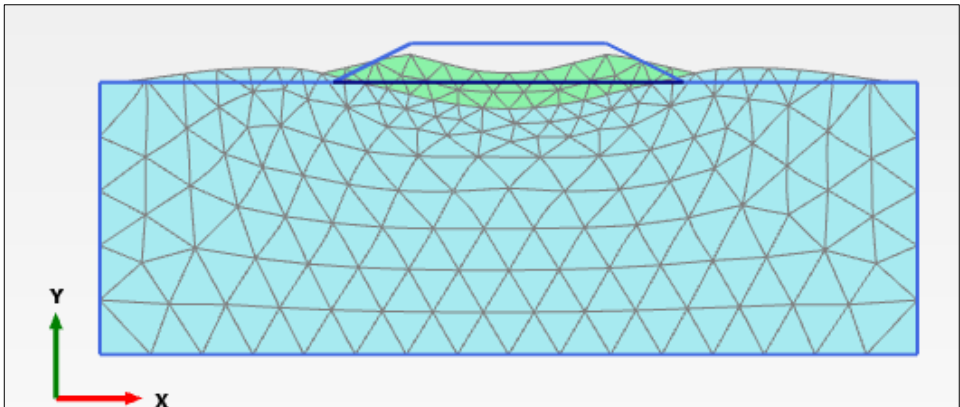


Figura 2.15. Deformada de la Fase 2 (Safety)

Para obtener la superficie de rotura mediante las deformaciones del desmonte, seleccionaremos “*Deformations*”, “*total displacements*”, “ $|u|$ ”. La representación de los desplazamientos totales $|u|$ para la fase Safety se muestra en la Figura 2.16.

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

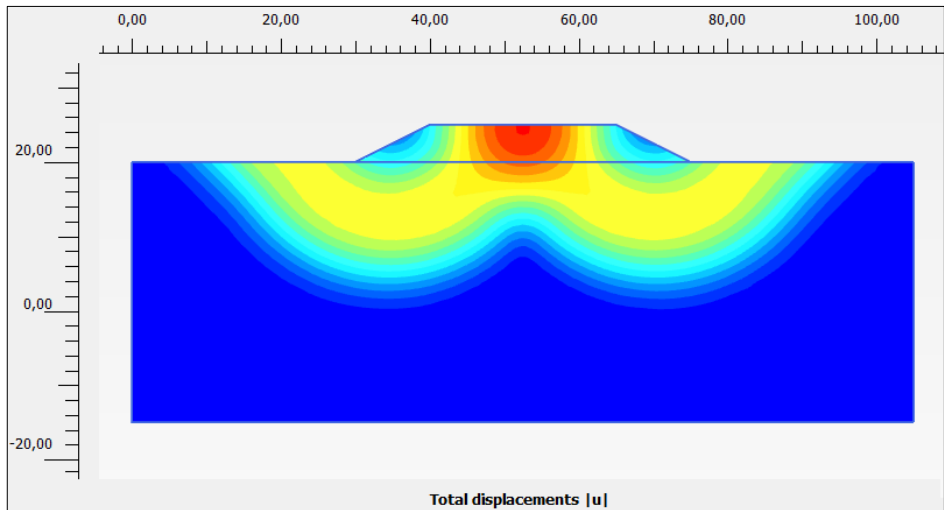


Figura 2.16. Representación de desplazamientos totales $|u|$ (fase Safety)

En este caso, la superficie de rotura se encuentra situada en su mayor parte en el terreno de cimentación, a gran profundidad. Para identificar ésta con mayor precisión debemos tener en cuenta que la rotura se producirá por aquellos puntos del suelo que presenten una mayor deformación y, a la vista de la Figura 2.16, éstos se encuentran en la zona de color amarillo. Por tanto, si lo deseamos, podemos modificar la configuración de la leyenda del dibujo, delimitando los desplazamientos representados a un determinado rango de valores (pulsando con el botón derecho sobre el gráfico representado y seleccionando la opción “Legend settings...”) para así visualizar mejor la superficie de rotura, Figura 2.17.

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

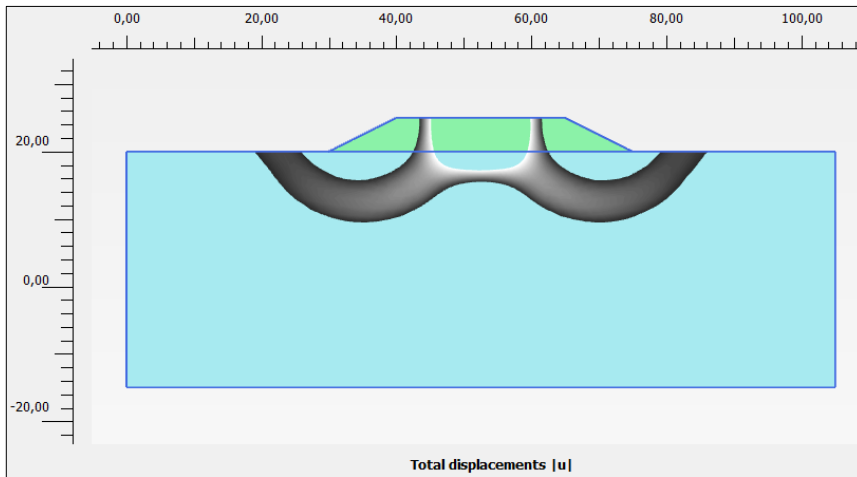


Figura 2.17. Superficie de deslizamiento (fase Safety)

Finalmente, vamos a obtener el factor de seguridad. Como comentamos en el ejercicio anterior, existen diversas formas de obtenerlo. Como primera opción, una vez que tenemos seleccionada la fase “Safety” en el desplegable que nos permite cambiar de fase (Figura 2.18), seleccionamos en la barra de herramientas de “PLAXIS Output” la opción “Calculation information” de la pestaña “Project”. En la ventana que aparece, se puede visualizar el valor exacto del factor de seguridad, ΣM_{sf} (Figura 2.19), que en este caso vale 2,04.

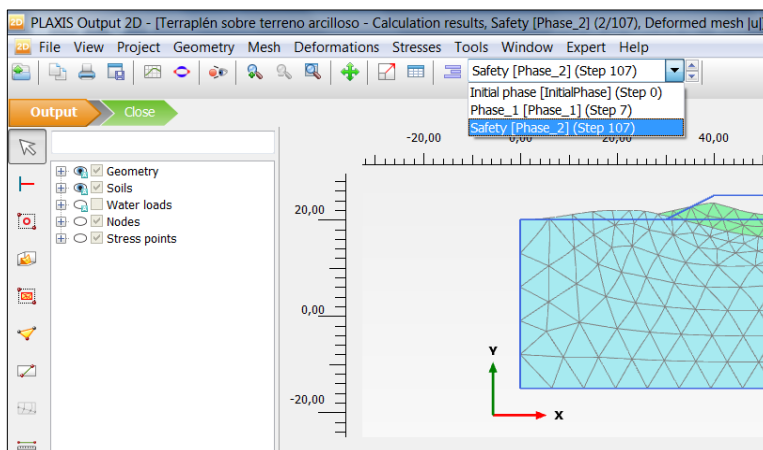


Figura 2.18. Desplegable para selección de fase

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

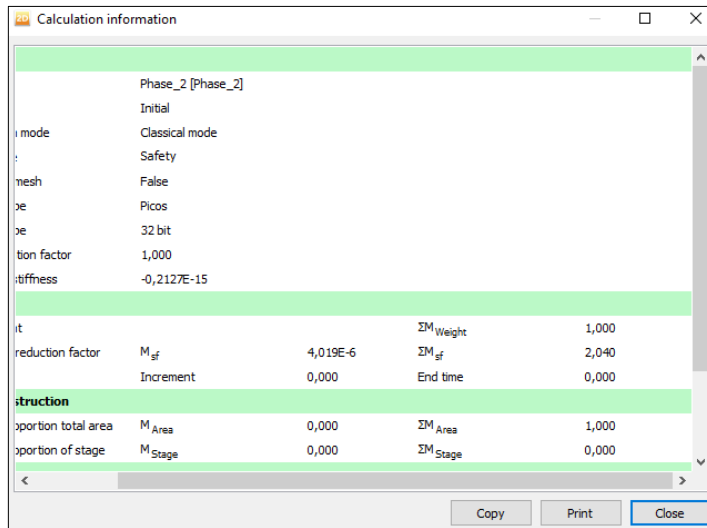


Figura 2.19. Valor del factor de seguridad

También es posible obtener el factor de seguridad graficando en un punto del terreno o del terraplén cualquier variable de salida frente al factor de seguridad ΣM_{sf} . Para ello, es necesario escoger al menos un punto de la malla, para representar la evolución de las diferentes variables en el mismo. Volviendo al “PLAXIS Input”, y en el modo de cálculo “*Staged construction*”, seleccionamos el icono “*Select points for curves*”.

Los puntos seleccionados en este caso pueden ser los que vienen recogidos en las Figuras 2.20 y 2.21. Los puntos pueden seleccionarse directamente pinchando sobre el nodo deseado.

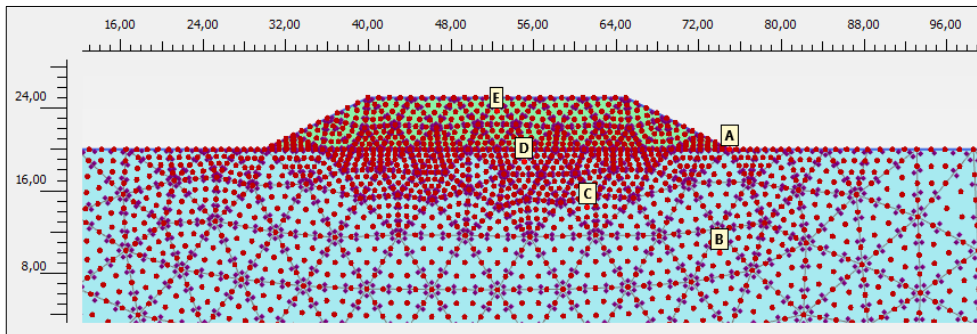


Figura 2.20. Selección de puntos en el terreno y en el terraplén

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

Name	X	Y	Selected
A (Node 539)	75,00	20,00	Pre-calc
B (Node 734)	74,07	10,01	Pre-calc
C (Node 1045)	61,22	14,41	Pre-calc
D (Node 1062)	55,15	18,79	Pre-calc
E (Node 908)	52,50	23,71	Pre-calc

Figura 2.21. Coordenadas de los puntos seleccionados en el terreno y en el terraplén

Ahora procedemos a recalcular todas las fases del proyecto, pues de lo contrario los gráficos de salida avanzados mostrarían valores erróneos: volviendo a “PLAXIS Input”, vamos al modo de cálculo “*Staged construction*” y en el menú de la izquierda “*Phases explorer*”, con el botón derecho, marcamos cada fase para cálculo (“*Mark for calculation*”).

Terminados los cálculos, pulsamos el icono de “*Curves manager*” en “PLAXIS Output”. En la pantalla “*Curves manager*” (pestaña “*Charts*”) seleccionamos “*New*”.

En la Figura 2.22, se pueden observar los parámetros que hay que elegir para graficar en el punto A los desplazamientos totales $|u|$ frente al factor de seguridad. Como se observa en la Figura 2.23, por este procedimiento se llega a un valor similar del factor de seguridad. Recordemos (tal y como indicamos en el ejercicio anterior) que el valor numérico de los desplazamientos representados en una fase safety no es significativo.

Al cerrar la gráfica, si se desea, es posible guardarla para poder cargarla posteriormente desde el gestor “*Curves manager*”.

Ejercicio 02. Análisis de la estabilidad de un terraplén sobre un terreno de cimentación arcilloso

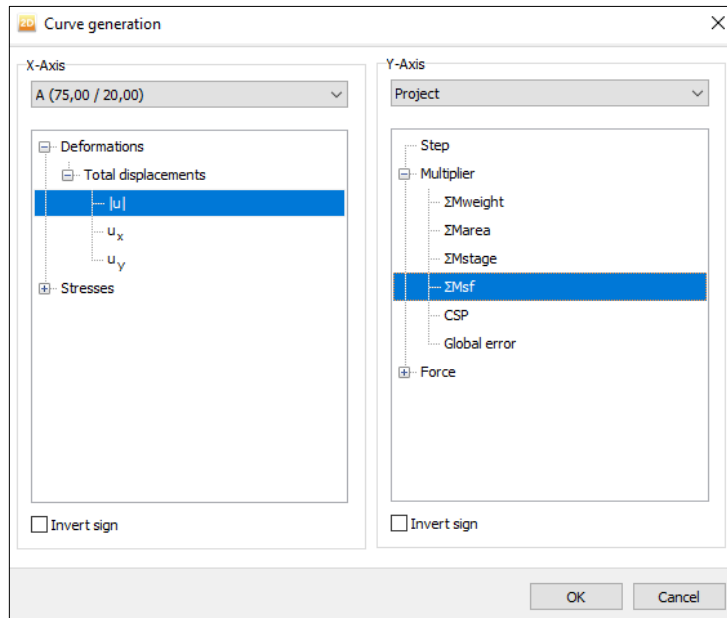


Figura 2.22. Selección de los parámetros que se desean graficar

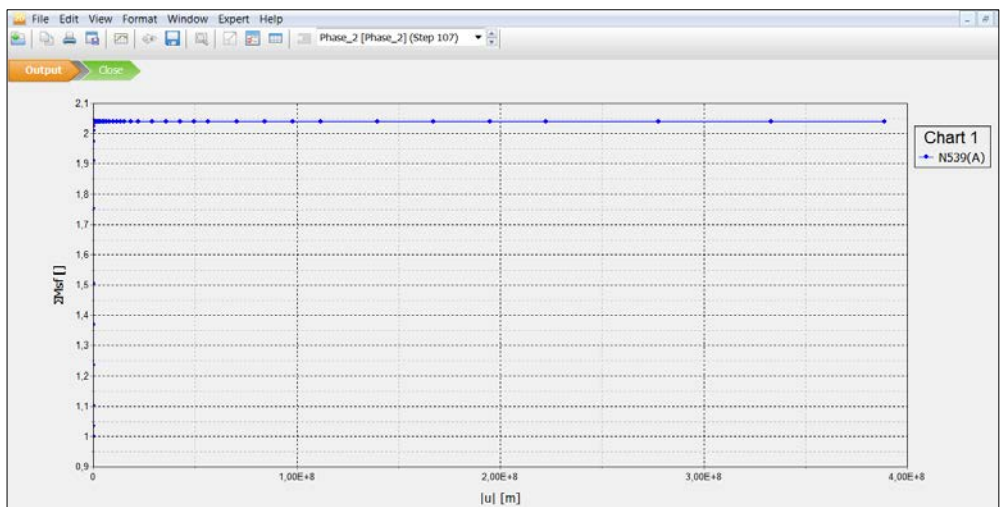


Figura 2.23. Variación del factor de seguridad frente al desplazamiento total (fase de cálculo “safety”) en el punto A

Ejercicio 03

Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

3.1 INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Se desea realizar un análisis de consolidación y estudiar la estabilidad de un terraplén de 10 metros de altura (con 30 metros de anchura de coronación y taludes 3H:2V) que se tiene previsto construir sobre un material homogéneo de 30 metros de espesor. El terraplén se realizará con el mismo material, ya que ha sido extraído de un desmante próximo a la zona, pero con características geotécnicas ligeramente distintas.

Se pretenden estudiar cuatro casos diferentes.

- En primer lugar, la construcción del terraplén en siete fases:

- 1ª Fase: construcción de los 4 primeros metros del terraplén durante un periodo de 4 días.
- 2ª Fase: se dejan transcurrir 10 días, permitiendo la consolidación del terreno.
- 3ª Fase: se construyen los 3 siguientes metros del terraplén, durante 3 días.
- 4ª Fase: se dejan transcurrir otros 10 días.
- 5ª Fase: se construyen los últimos 3 metros del terraplén, durante 3 días.
- 6ª Fase: se dejan transcurrir otros 10 días.
- 7ª Fase: se aplica una sobrecarga de tráfico* de 23 kN/m².

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

- En segundo lugar, el terraplén se construye también en siete fases, pero de la siguiente manera:

- 1ª Fase: construcción de los 4 primeros metros del terraplén durante un periodo de 4 días.
- 2ª Fase: se deja al terreno consolidar hasta que se alcance un grado de consolidación del 70%.
- 3ª Fase: se construyen los 3 siguientes metros del terraplén, durante 3 días.
- 4ª Fase: se deja al terreno consolidar hasta que se alcance un grado de consolidación del 80%.
- 5ª Fase: se construyen los últimos 3 metros del terraplén, durante 3 días.
- 6ª Fase: se deja al terreno consolidar hasta que se alcance un grado de consolidación del 90%.
- 7ª Fase: se aplica una sobrecarga de tráfico* de 23 kN/m^2 .

* Para todos los casos, en el estudio de la aplicación de la sobrecarga de tráfico consideraremos dos escenarios posibles: la aplicación de la sobrecarga sólo sobre la mitad del terraplén (lado derecho) y la aplicación de la sobrecarga sobre todo el terraplén.

3.2 PARÁMETROS DEL PROBLEMA

3.2.1 Geometría del problema

La Figura 3.1 muestra el aspecto general de la geometría del problema.

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

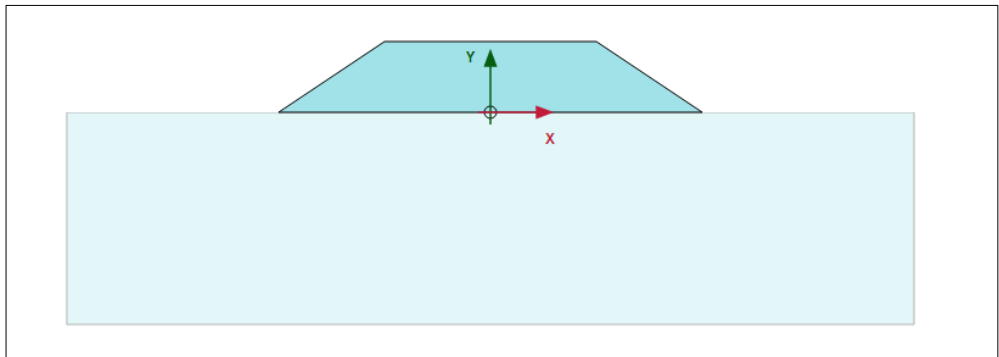


Figura 3.1. Geometría general del problema

3.2.2 Parámetros del terreno

En las Tablas 3.1 y 3.2 aparecen definidas las propiedades tanto del terreno de cimentación como del terraplén.

Terreno de cimentación

Material	Arcilla natural (Terreno previo)
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Comportamiento material	Drenado
Peso específico no saturado (γ_{unsat})	20,5 kN/m ³
Peso específico saturado (γ_{sat})	22 kN/m ³
Módulo de Young (E')	12.500 kPa
Coefficiente de Poisson (ν')	0,35
Cohesión efectiva (c')	7 kPa
Ángulo de rozamiento efectivo (ϕ')	32,5°
Ángulo de dilatación (ψ)	0°
Conductividad hidráulica horizontal (K_x)	0,02 m/día
Conductividad hidráulica vertical (K_v)	0,02 m/día

Tabla 3.1. Parámetros geotécnicos del suelo natural

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

Parámetros geotécnicos (material del terraplén)

Material	Arcilla compacta (Terraplén)
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Comportamiento material	Drenado
Peso específico no saturado (γ_{unsat})	20,5 kN/m ³
Peso específico saturado (γ_{sat})	22 kN/m ³
Módulo de Young (E')	28.000 kPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,35
Cohesión efectiva (c')	7 kPa
Ángulo de rozamiento efectivo (ϕ')	32,5°
Ángulo de dilatación (ψ)	0°
Conductividad hidráulica horizontal (K_x)	0,012 m/día
Conductividad hidráulica vertical (K_v)	0,012 m/día

Parámetros geométricos del terraplén

Altura del talud	10 m
Inclinación del talud	3H:2V
Nivel freático	A 2 metros de profundidad bajo el suelo natural

Tabla 3.2. Parámetros geotécnicos y geométricos del terraplén

3.3 Resolución del problema con PLAXIS 2D

3.3.1 Introducción de los parámetros de proyecto

Al iniciar PLAXIS 2D (“PLAXIS input”) y elegimos la opción “*Start a new Project*” en la pantalla emergente “*Quick select*”. En la pestaña “*Project*” nombramos el problema. “Análisis de consolidación y de estabilidad de un terraplén para Autovía”.

En la pestaña “*Model*” elegimos la opción “*Plane strain*” en el modelo y “*15-Noded*” en elementos. Mantenemos las unidades que aparecen en el programa por defecto, tal y como aparecen en la Figura 3.2. Para definir el contorno, escribimos los valores que aparecen en la Figura 3.2. Mantenemos las constantes que aparecen por defecto en el programa (pestaña “*Constants*”).

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

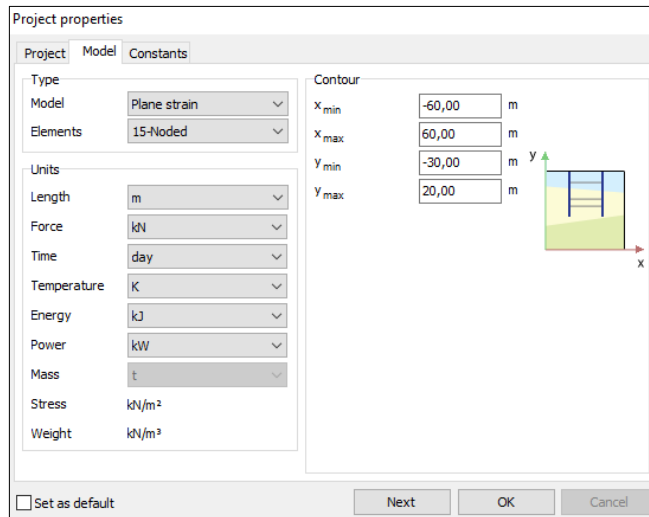


Figura 3.2. Tipo de modelo, unidades y contorno del problema

3.3.2 Definición del terreno

Para definir el terreno homogéneo sobre el cual se construirá el terraplén, iniciamos el modo de geometría “Soil”. Pinchamos en el icono “Create borehole” para crear el sondeo que definirá el terreno de apoyo del terraplén.

Pulsamos en la coordenada (-60, 0) y en la pantalla emergente “Modify soil layers” seleccionamos “Add” (con el desplegable marcando la opción “Soil and interfaces”). En “Top” escribimos 0 y el “Bottom” escriba -30. Como el nivel freático se encuentra 2 metros bajo la superficie del terreno inicial, escribimos en “Head” el valor de -2. En la Figura 3.3 aparecen reflejados los datos del sondeo. De esta manera, se crea la geometría del material homogéneo sobre el que se construirá el terraplén (Figura 3.4).

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

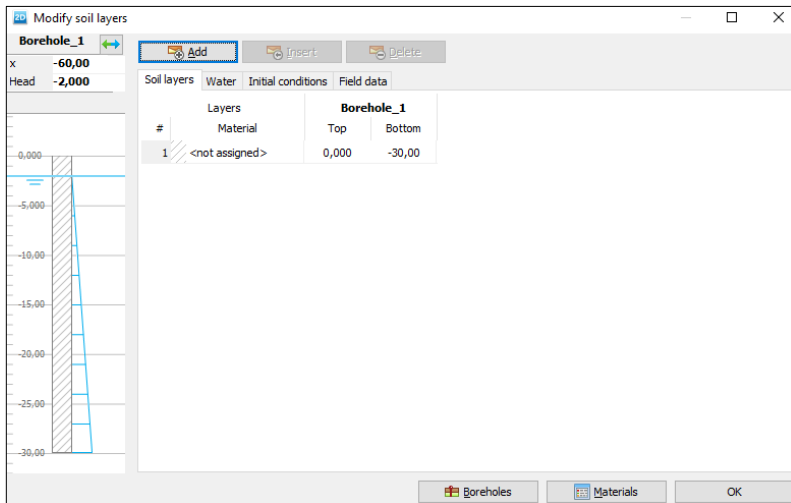


Figura 3.3. Sondeo para definir el terreno sobre el que se construirá el terraplén

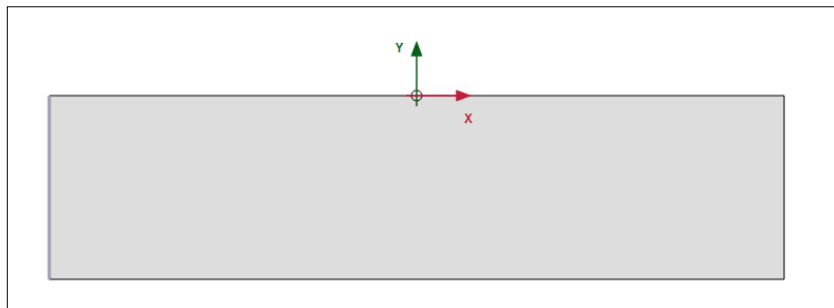


Figura 3.4. Geometría del material homogéneo sobre el que se construirá el terraplén

Para crear los materiales de los cuales están formados tanto el suelo homogéneo como el terraplén, pinchamos en el icono “*Show materials*”. Seleccionamos “*New*” y creamos el primer material (“*Terreno previo*”) a partir de los datos de la Tabla 3.1. A continuación, pulsando de nuevo “*New*”, creamos el segundo material (“*Terraplén*”) con los parámetros geotécnicos de la Tabla 3.2 (Figuras 3.5, 3.6 y 3.7).

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

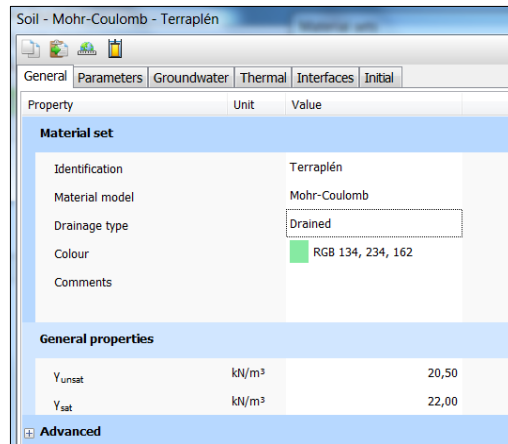


Figura 3.5. Propiedades generales del material del terraplén

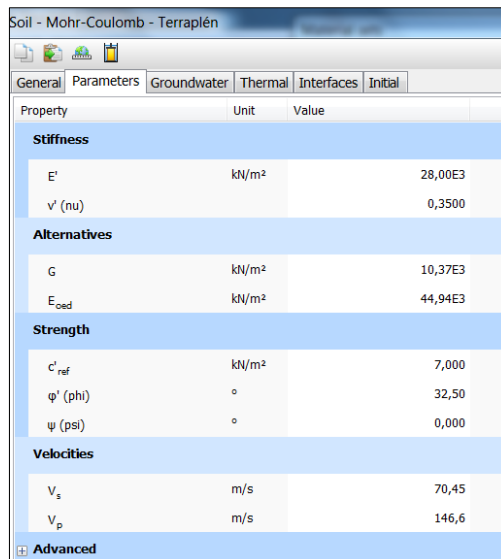


Figura 3.6. Parámetros resistentes del material del terraplén

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

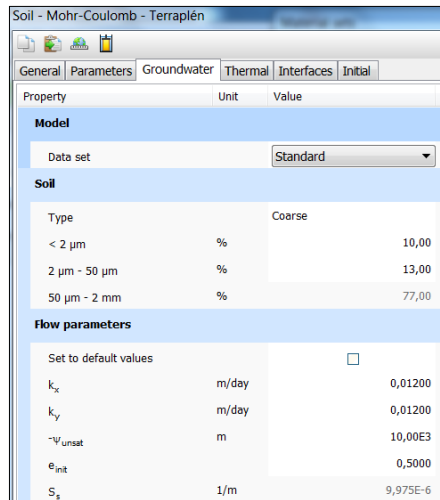


Figura 3.7. Parámetros de flujo de agua del material del terraplén

Pinchamos con el botón derecho del ratón el terreno que ha sido generado (Figura 3.4) y seleccionamos (en “Soil”) “Set material” y el valor “Terreno previo”.

3.3.3. Definición de la geometría del terraplén

Para definir el terraplén, nos dirigimos al modo de geometría “Structures” y seleccionamos el icono “Create soil polygon”.

Para crear el terraplén, seleccionamos con el ratón en el cuadro de dibujo (o espacio de trabajo) las siguientes coordenadas (Tabla 3.3):

Coordenadas de los puntos del contorno del terraplén
A (-30, 0)
B (-15, 10)
C (15, 10)
D (30, 0)

Tabla 3.3. Coordenadas del contorno del terraplén

Ahora, asignamos el material al polígono que ha sido creado con el botón derecho del ratón. Seleccionamos “Set material” y elegimos el material “Terraplén”.

En la Figura 3.1 se puede observar la geometría del terraplén sobre el terreno natural.

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

Como el terraplén se creó en su totalidad, para dividirlo en las fases pertinentes de construcción (en caso de que no sea construido en su totalidad de una vez) se deben crear dos líneas para separar los diferentes espesores de cada etapa.

En el modo de geometría “*Structures*”, pulsamos sobre el icono “*Create line*” (Figura 3.8) y seleccionamos las coordenadas de cada una de las líneas de la Tabla 3.4. Para ello, será necesario cambiar el valor de “*Number of snap intervals*” (del menú “*snapping options*”, situado justo debajo del espacio de trabajo) a 2.

Línea	Coordenadas primer punto	Coordenadas segundo punto
A	(-24, 4)	(24, 4)
B	(-19,5; 7)	(19,5; 7)

Tabla 3.4. Coordenadas de las líneas que dividen el terraplén en tres tongadas

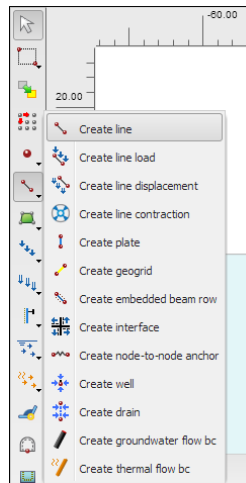


Figura 3.8. Icono “*Create line*”, dentro del modo de geometría “*Structures*”

3.3.4. Definición de las sobrecargas

Continuamos dentro del modo de geometría “*Structures*”. Pinchamos en el icono “*Create load*” y seleccionamos “*Create line load*” (Figura 3.9).

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

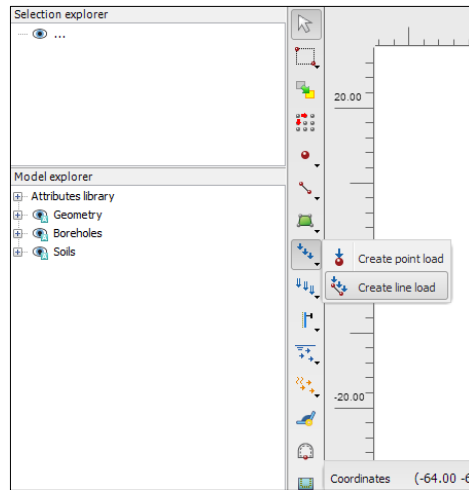


Figura 3.9. Icono “*Create line load*”, dentro del modo de geometría “*Structures*”

Crearemos dos sobrecargas, simétricas e idénticas, de 23 kN/m^2 aplicadas sobre una longitud de 15 metros cada una. La sobrecarga de la derecha se aplica sobre las coordenadas (0, 10) a (15,10), Figura 3.10. La de la izquierda va de (-15, 10) a (0, 10), Figura 3.11.

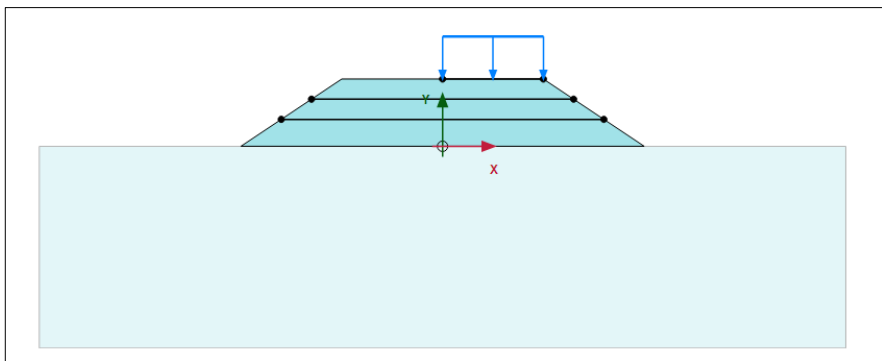


Figura 3.10. Sobrecarga sobre la parte derecha del terraplén

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

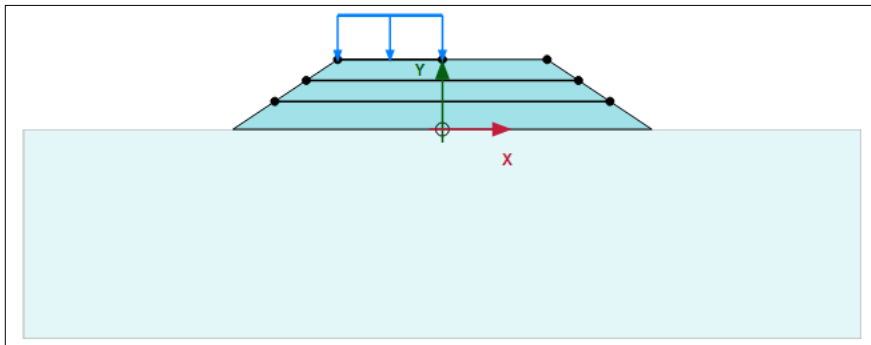


Figura 3.11. Sobrecarga sobre la parte izquierda del terraplén

Una vez dibujada la línea de aplicación de ambas sobrecargas (Figura 3.12), definiremos su valor. Para ello marcamos la sobrecarga a la que queremos dar valor, vamos al menú de la izquierda “*Selection explorer*” y escribimos -23 en la casilla “ $q_{y,start,ref}$ ” (el tipo de carga es “*LineLoad*”), Figura 3.13.

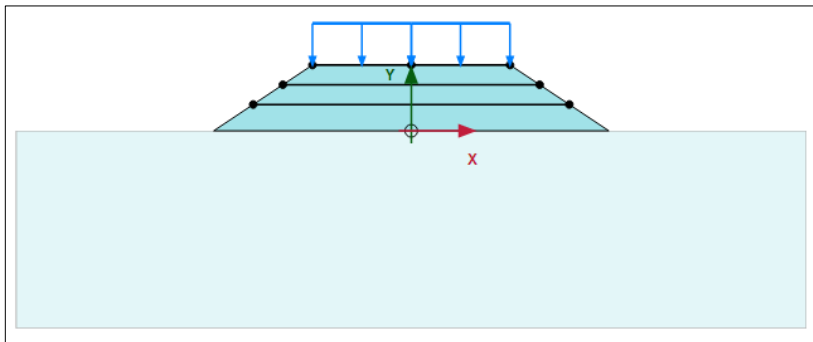


Figura 3.12. Sobrecarga sobre toda la longitud del terraplén

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

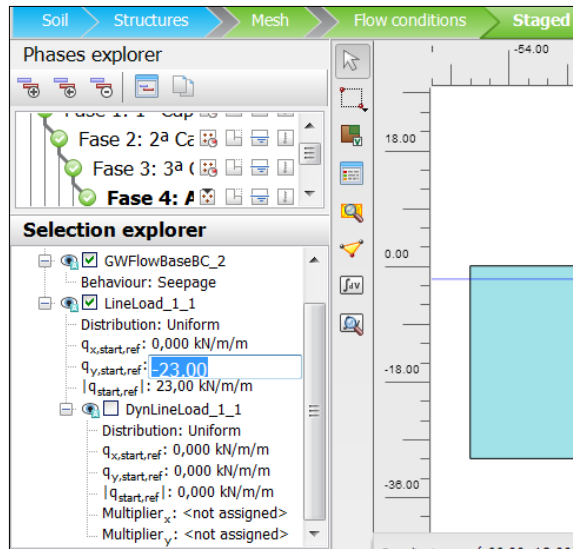


Figura 3.13. Asignación del valor de la sobrecarga en “Selection explorer”

3.3.5. Mallado del problema

Seleccionamos el modo de cálculo “Mesh” para mallar el terreno y pulsamos el icono “Generate mesh”, indicando que el mallado sea medio. Para visualizar la malla que se ha creado en “PLAXIS Output” (Figura 3.14) seleccionamos el icono “View mesh”.

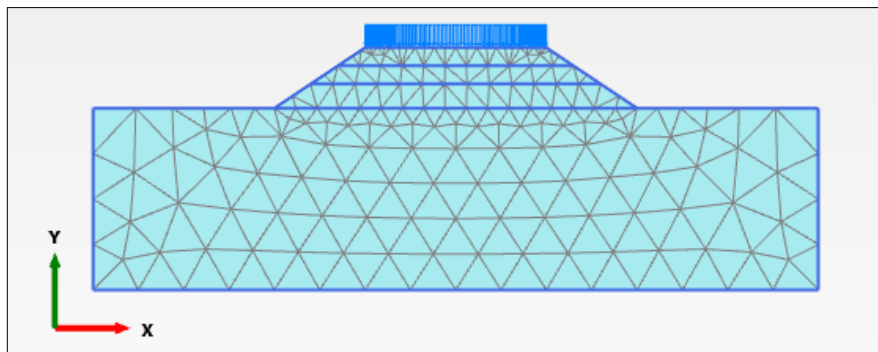


Figura 3.14. Mallado del problema

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

3.3.6. Visualización del nivel freático en el terreno

Seleccionando el modo de cálculo “*Flow conditions*” podemos visualizar el nivel freático que se ha creado al definir el suelo en el sondeo (Figura 3.15):

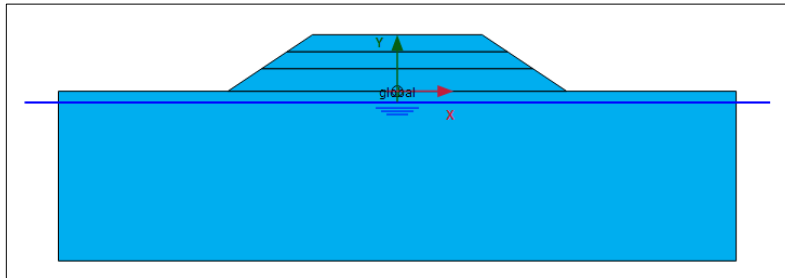


Figura 3.15. Posición del nivel freático

3.3.7. Elección de puntos para gráficos avanzados

Los puntos elegidos para la representación de gráficos avanzados serán los siguientes (Figuras 3.16 y 3.17):

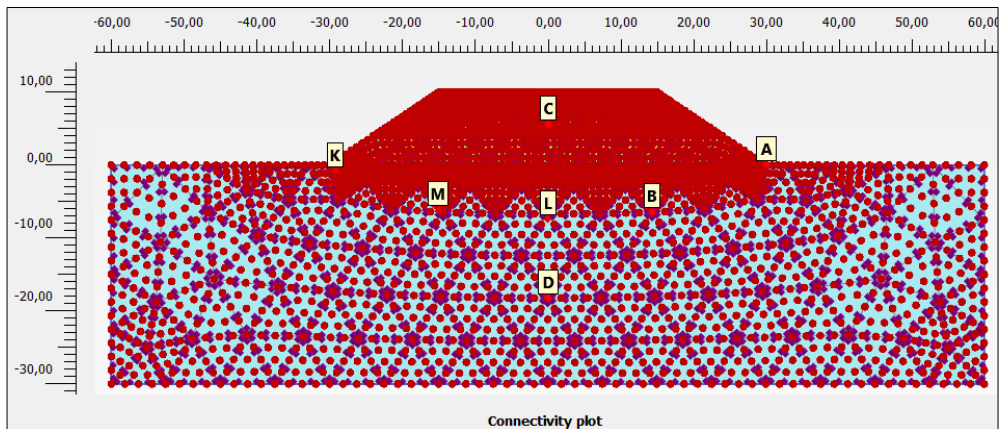


Figura 3.16. Puntos seleccionados en el terreno de cimentación y en el terraplén para gráficos avanzados

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

Name	X	Y	Selected
A (Node 300)	30,00	0,00	Pre-calc
B (Node 1245)	14,34	-6,47	Pre-calc
C (Node 1010)	0,04	5,50	Pre-calc
D (Node 1819)	0,00	-18,22	Pre-calc
K (Stress point 3440)	-29,17	-0,80	Pre-calc
L (Stress point 2701)	0,00	-7,40	Pre-calc
M (Stress point 2943)	-15,01	-6,21	Pre-calc

Figura 3.17. Coordenadas de los puntos seleccionados en el terreno de cimentación y en el terraplén para gráficos avanzados

3.3.8. Definición de las fases de proyecto en el estudio de la consolidación

NOTA: Sería conveniente en este momento guardar el proyecto, con un nombre identificativo claro, pues a continuación se van a definir las diferentes fases que componen cada una de las variantes propuestas en el enunciado. Asimismo, se aconseja guardar cada una de las variantes (una vez se hayan definido las fases y se haya procedido con los cálculos) como un archivo independiente.

Primer caso: a) Construcción del terraplén en siete fases utilizando tiempos de consolidación. La sobrecarga se aplica sobre el lado derecho del terraplén.

Debemos definir 8 fases:

- Fase inicial: sólo el terreno de cimentación.
- Fase 1: se construye el primer espesor de terraplén de 4 metros durante un periodo de 4 días.
- Fase 2: se mantiene la carga otros 10 días, permitiendo la consolidación del terreno.
- Fase 3: se construyen los 3 siguientes metros del terraplén, durante un periodo de 3 días.
- Fase 4: se mantiene la carga otros 10 días, permitiendo la consolidación del terreno.
- Fase 5: se construyen los 3 últimos metros del terraplén, durante un periodo de 3 días
- Fase 6: se mantiene la carga otros 10 días, permitiendo la consolidación del terreno.

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

- Fase 7: se aplica una sobrecarga de tráfico de 23 kN/m^2 en el lado derecho del terraplén.

Para la Fase inicial, debemos desactivar los tres espesores de terraplén y la sobrecarga y dejar activado únicamente el terreno de cimentación. Podemos nombrar la fase como “Fase inicial” (Figura 3.18). Comprobamos que en la ventana “Phases”, el tipo de cálculo elegido es el de “*K0 procedure*”.

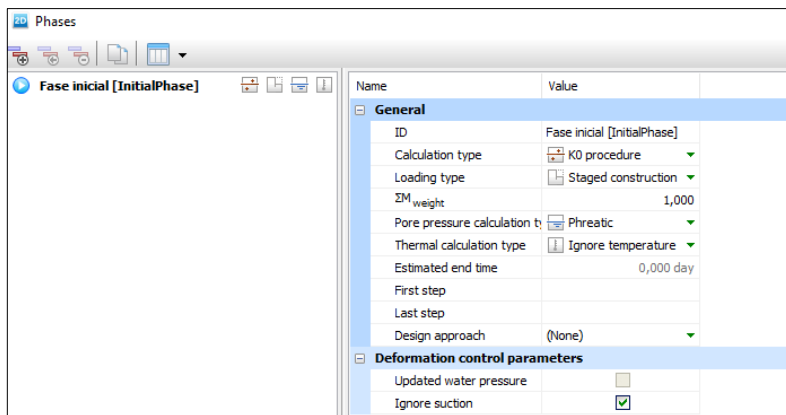


Figura 3.18. Fase Inicial, correspondiente al terreno de cimentación

En la Fase 1 activamos la primera capa del terraplén y seleccionamos como tipo de cálculo “*consolidation*”. En la misma pantalla se debe indicar un intervalo de tiempo de 4 días (véase Figura 3.19).

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

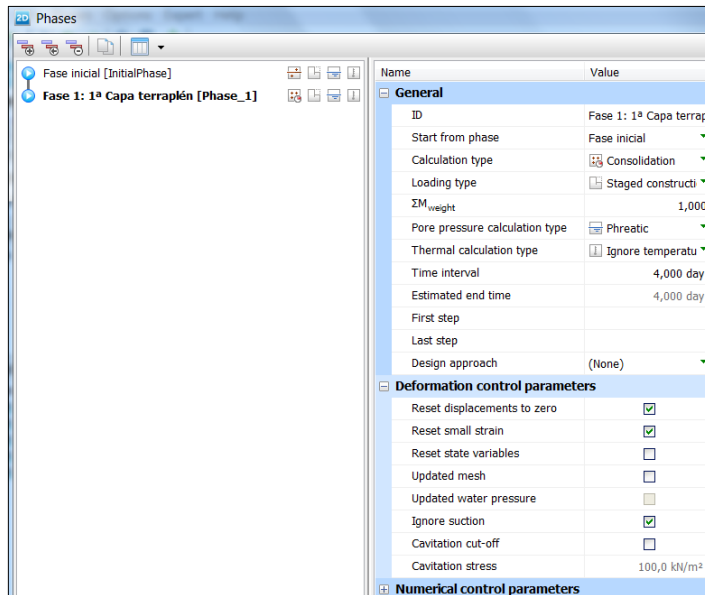


Figura 3.19. Fase 1: construcción de la primera capa del terraplén (4 metros)

Para la Fase 2, no activamos ni desactivamos nada. Como tipo de cálculo seleccionamos “*Consolidation*” y como intervalo de tiempo indicamos 10 días.

Para la Fase 3, activamos la segunda capa de terraplén y elegimos el tipo de cálculo “*consolidation*”. En la pantalla “*Phases*” se debe indicar un intervalo de tiempo de 3 días (Figura 3.20).

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

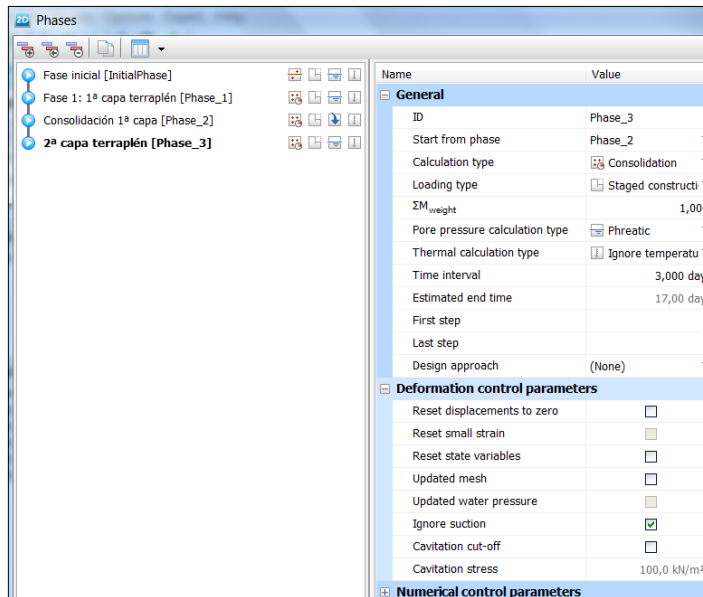


Figura 3.20. Fase 3: construcción de la segunda capa del terraplén (3 metros)

La Fase 4 la configuraremos de manera similar a la Fase 2.

Para la Fase 5, activamos la tercera capa de terraplén, cambiamos el cálculo a “consolidation” e indicamos un intervalo de tiempo de 3 días (Figura 3.21).

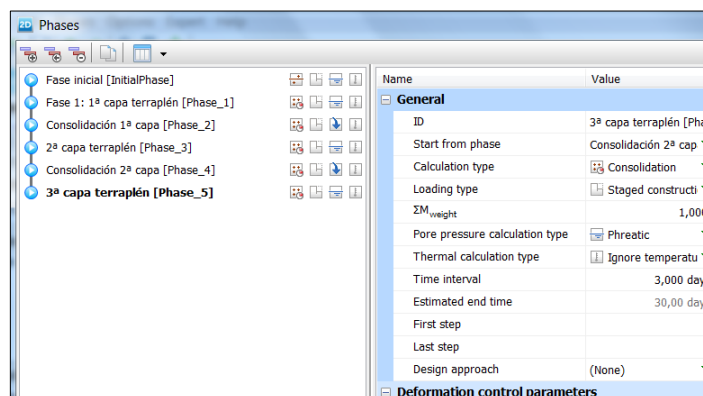


Figura 3.21. Fase 5: construcción de la tercera capa del terraplén (3 metros)

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

La Fase 6 la configuraremos de manera similar a las Fases 2 y 4.

En la Fase 7, activamos la sobrecarga sólo sobre el lado derecho del terraplén y cambiamos el tipo de cálculo a “*Plastic*” (Figura 3.22):

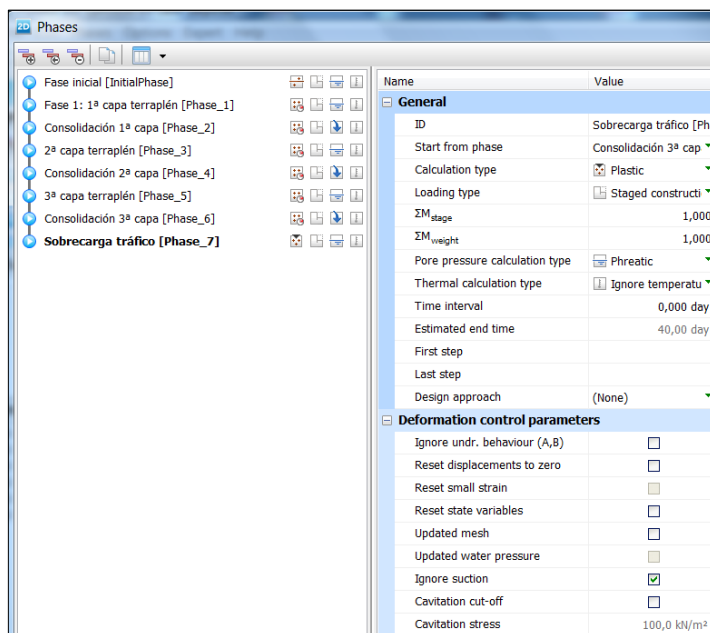


Figura 3.22. Fase 7: aplicación de la sobrecarga sobre el lado derecho del terraplén

En las Figuras 3.23 a 3.27 se pueden visualizar las diferentes etapas de la construcción del terraplén:

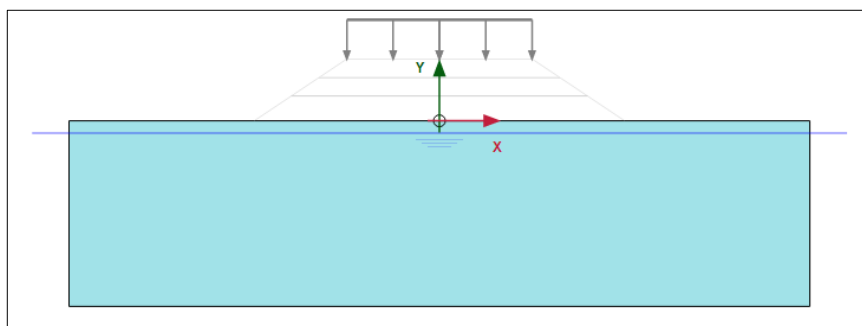


Figura 3.23. Fase Inicial, correspondiente al terreno de cimentación

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

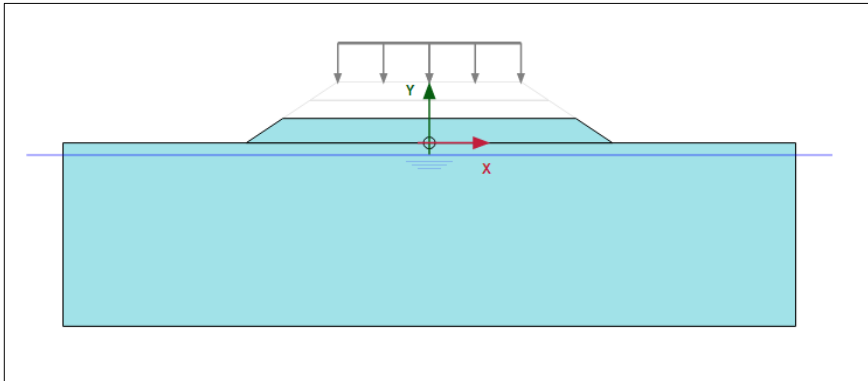


Figura 3.24. Fase 1, primeros 4 metros de terraplén

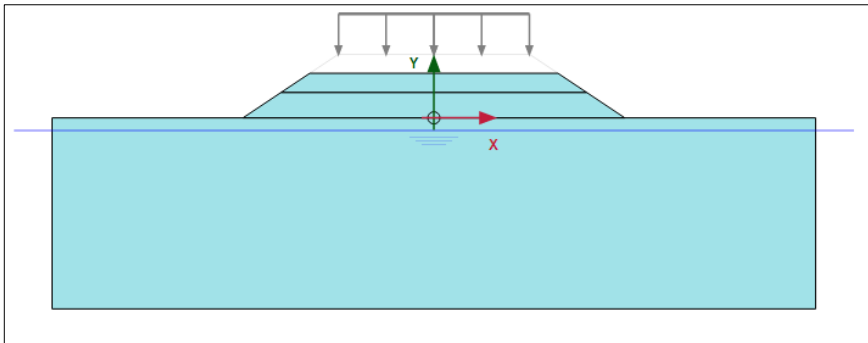


Figura 3.25. Fase 3, segunda capa de 3 metros de terraplén

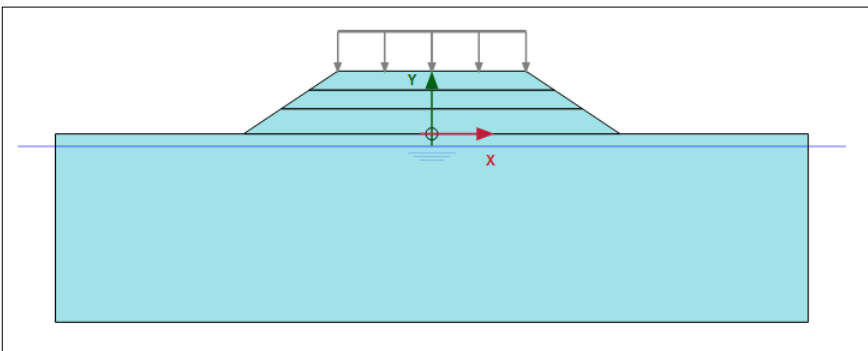


Figura 3.26. Fase 5, últimos 3 metros de terraplén

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

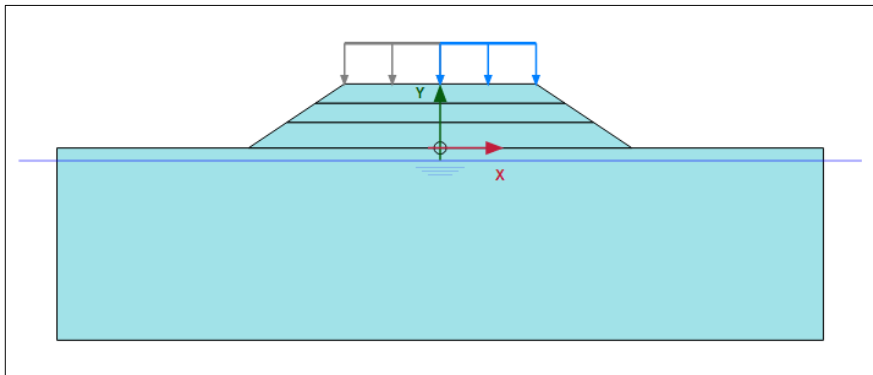


Figura 3.27. Fase 7, sobrecarga de tráfico a la derecha del terraplén

NOTA: Una vez definidas las fases, sería conveniente guardar el proyecto, con un nombre identificativo claro, pues a continuación se va a definir el resto de variantes del proyecto propuestas en el enunciado (se aconseja guardar cada variante en un archivo distinto).

Primer caso: b) Construcción del terraplén en siete fases utilizando tiempos de consolidación. La sobrecarga se aplica sobre todo el terraplén.

Debemos definir 7 fases:

Las Fases inicial, 1, 2, 3, 4, 5 y 6 son iguales al caso a), con lo que si se desea se puede tomar el archivo guardado anteriormente como base. Sin embargo, en la Fase 7 se aplica la sobrecarga sobre todo el terraplén (Figura 3.28) al pasar 40 días desde el inicio de la construcción de los primeros 4 metros del terraplén.

Por lo tanto, para definir la Fase 7, activamos las dos sobrecargas (lado derecho y lado izquierdo del terraplén). Todos los demás parámetros son iguales a la Fase 7 del apartado a). Guardamos el proyecto en un archivo con el nombre adecuado.

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

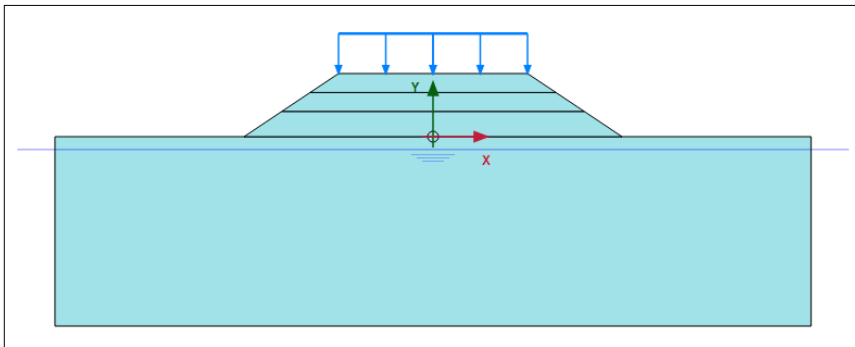


Figura 3.28. Fase 4, sobrecarga de tráfico sobre todo el terraplén, a los 90 días del inicio

Segundo caso: a) El terraplén se construye en siete fases, pero se pasa de una fase a otra a partir de un determinado valor del grado de consolidación. La sobrecarga se aplica sobre el lado derecho del terraplén

Definiremos 8 fases:

- Fase inicial: sólo el terreno de cimentación.
- Fase 1: se construye el primer espesor de terraplén de 4 metros durante un periodo de 4 días.
- Fase 2: se mantiene la carga hasta alcanzar un grado de consolidación del 70%.
- Fase 3: se construyen los 3 siguientes metros del terraplén, durante un periodo de 3 días.
- Fase 4: se mantiene la carga hasta alcanzar un grado de consolidación del 80%.
- Fase 5: se construyen los 3 últimos metros del terraplén, durante un periodo de 3 días
- Fase 6: se mantiene la carga hasta alcanzar un grado de consolidación del 90%.
- Fase 7: se aplica una sobrecarga de tráfico de 23 kN/m^2 en el lado derecho del terraplén.

En la Fase inicial, desactivamos los tres espesores de terraplén y las sobrecargas y dejamos activado sólo el terreno de cimentación. Podemos nombrar la fase como

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

“fase inicial”. Comprobamos que en la ventana “*Phases*” el tipo de cálculo seleccionado es “*K0 procedure*”.

En la Fase 1 activamos la primera capa del terraplén y seleccionamos como tipo de cálculo “*consolidation*”. En la misma pantalla se debe indicar un intervalo de tiempo de 4 días.

La “Fase 2” es una fase de consolidación, la cual va a estar ligada a un determinado valor del grado de consolidación. En la ventana “*Phases*” elegimos como tipo de cálculo la opción “*Consolidation*”, mientras que en “*Loading type*” elegimos “*Degree of consolidation*”. Finalmente, en “*Degree of consolidation*” escribimos 70%. Véase Figura 3.29.

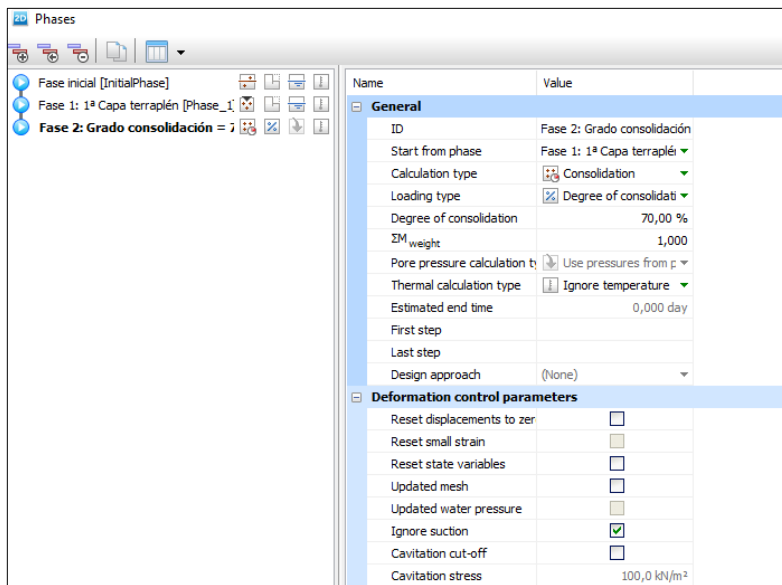


Figura 3.29. Fase 2 del terraplén construido por fases ligadas a un determinado valor del grado de consolidación

Para la “Fase 3” activamos los siguientes 3 metros del terraplén y seleccionamos como tipo de cálculo “*consolidation*”, asignando un intervalo de tiempo de 3 días.

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

La “Fase 4” es otra fase de consolidación ligada a un determinado valor del grado de consolidación. Procediendo de manera similar a la “Fase 2”, en “*Degree of consolidation*” escribimos 80%. Véase Figura 3.30.

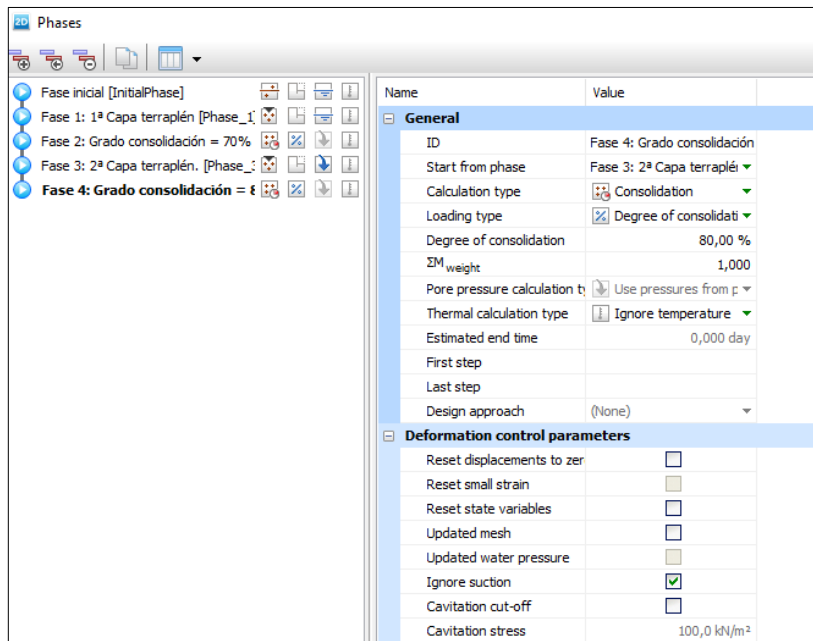


Figura 3.30. Fase 4 del terraplén construido por fases ligadas a un determinado valor del grado de consolidación

En la “Fase 5” activamos los últimos 3 metros del terraplén y seleccionamos como tipo de cálculo “*consolidation*”, asignando un intervalo de tiempo de 3 días.

La “Fase 6” es otra fase de consolidación ligada a un determinado valor del grado de consolidación. Procediendo de manera similar a las Fases 2 y 4, en “*Degree of consolidation*” escribimos 90%. Véase Figura 3.31.

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

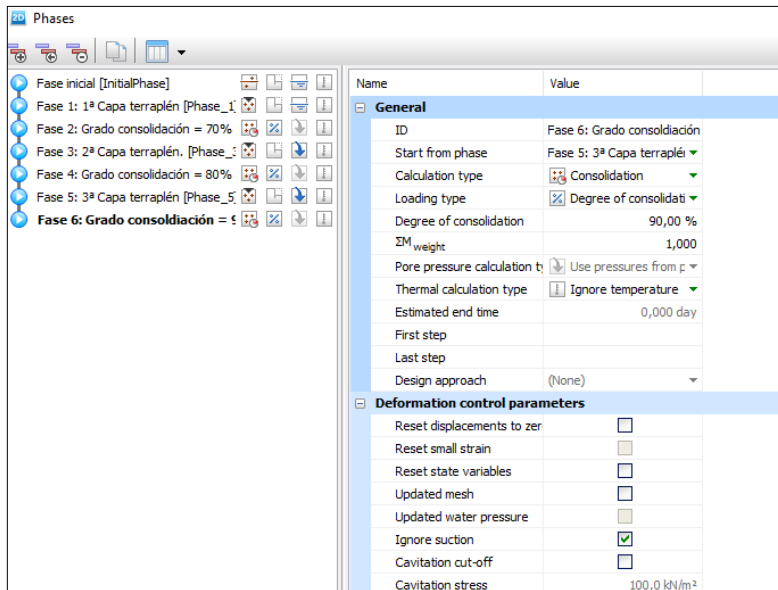


Figura 3.31. Fase 6 del terraplén construido por fases ligadas a un determinado valor del grado de consolidación

En la “Fase 7” se activa la carga lineal sólo sobre el lado derecho del terraplén y asignamos como tipo de cálculo “Plastic”.

En la Figura 3.32 se pueden observar las diferentes fases creadas. Guardamos el proyecto en un archivo con el nombre adecuado.

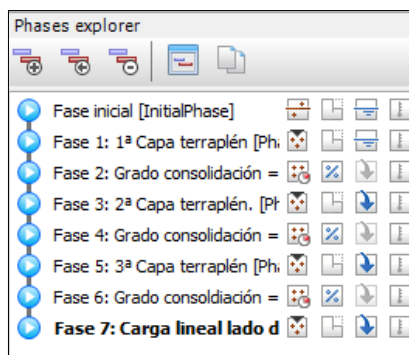


Figura 3.32. Fases del terraplén construido por fases ligadas a un determinado valor del grado de consolidación, con sobrecarga aplicada en el lado derecho del terraplén

Segundo caso: b) El terraplén se construye en siete fases, pero se pasa de una fase a otra a partir de un determinado valor del grado de consolidación. La sobrecarga se aplica sobre todo el terraplén

Debemos definir 8 fases:

Las Fases inicial, 1, 2, 3, 4, 5 y 6 son iguales al caso anterior. En la Fase 7 se aplica la sobrecarga sobre todo el terraplén tras alcanzarse un grado de consolidación del 90%.

Por lo tanto, para definir la Fase 7, activamos las dos sobrecargas (lado derecho y lado izquierdo del terraplén). Todos los demás parámetros son iguales a la Fase 7 del apartado anterior.

Guardamos el proyecto en un archivo con un nombre adecuado.

3.3.9. Resultados en “PLAXIS Output” en el estudio de consolidación

En el modo de cálculo “*Staged construction*”, pulsamos el icono “*Calculate*”. Podremos visualizar los resultados en “PLAXIS Output” seleccionando el icono “*View Calculation Results*”.

Primer caso: a) Construcción del terraplén en siete fases utilizando tiempos de consolidación. La sobrecarga se aplica sobre el lado derecho del terraplén

En PLAXIS podemos visualizar la información relacionada con las deformaciones de diversas maneras. En ocasiones es interesante ver los desplazamientos representados mediante flechas. Para obtener esta representación, se debe seleccionar “*Deformations*”, seguidamente “*Total displacements*” y finalmente se elige la opción de desplazamientos totales que se desee: desplazamientos totales $|u|$, desplazamientos totales horizontales u_x o desplazamientos totales verticales u_y (Figura 3.33).

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

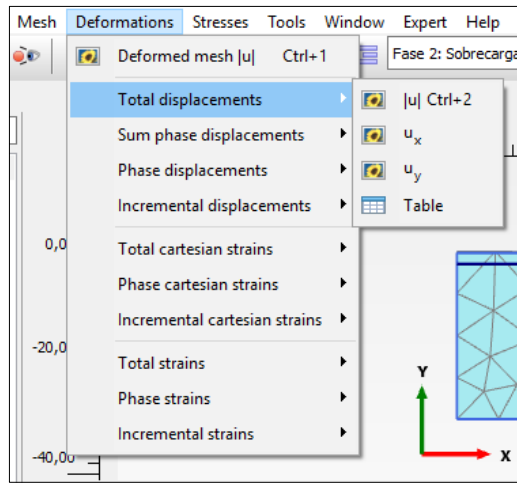


Figura 3.33. Opción para representar los desplazamientos totales

Para que se vea la representación mediante flechas, seleccionamos el icono “Arrows” (Figura 3.34).

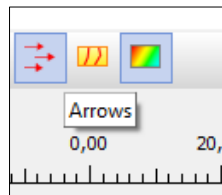


Figura 3.34. Icono “Arrows” para representación de desplazamientos mediante flechas

Se obtienen así los gráficos de las Figuras 3.35, 3.36 y 3.37, que corresponden respectivamente a los desplazamientos totales $|u|$, u_x y u_y de la última fase (fase 7).

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

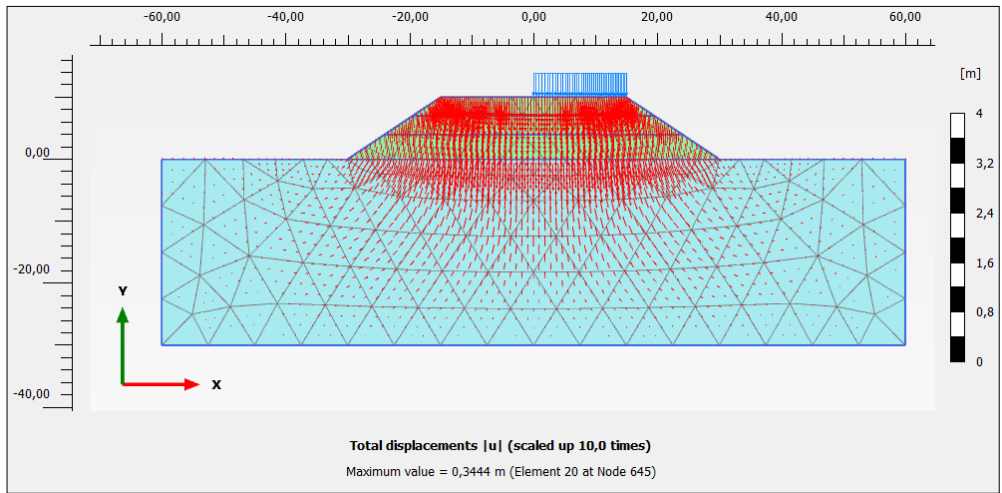


Figura 3.35. Desplazamientos totales $|u|$ en la Fase 7

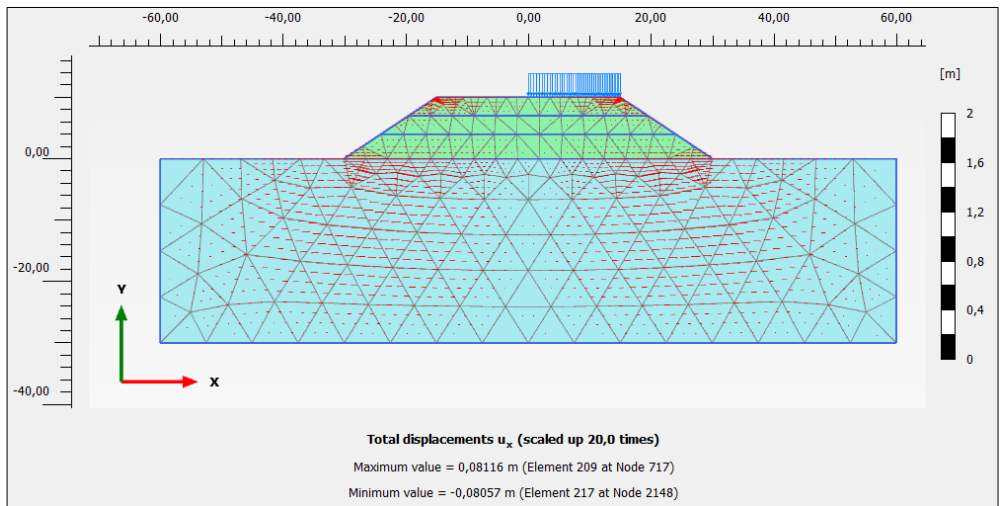


Figura 3.36. Desplazamientos totales horizontales u_x en la Fase 7

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

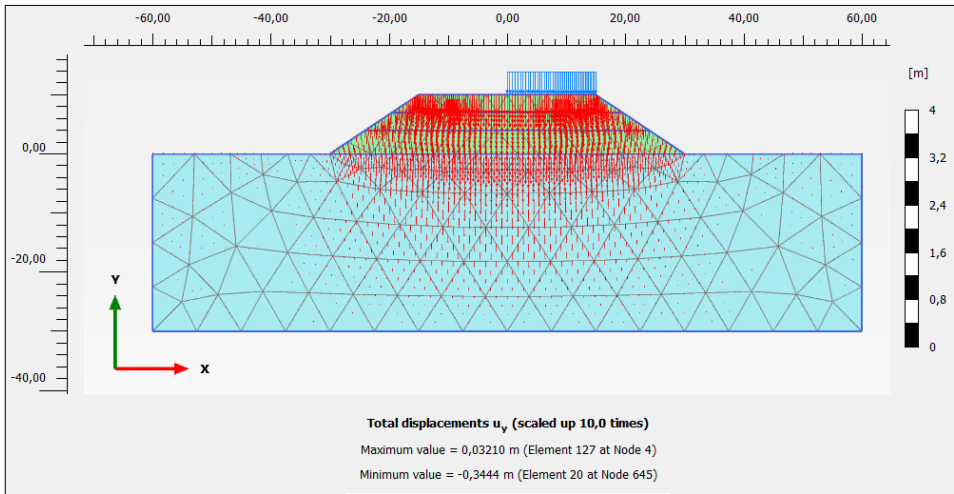


Figura 3.37. Desplazamientos totales verticales u_y en la Fase 7

Para obtener gráficos avanzados de desplazamientos totales, y en los diferentes nodos que se han seleccionado anteriormente (Figuras 3.16 y 3.17), pulsaremos sobre “Curves manager” y seguidamente sobre “New” para crear una nueva curva (con la pestaña “Charts” activada). En “X-Axis” seleccionaremos la opción “Project” en el desplegable y “Time” como la variable a representar. En “Y-Axis” elegiremos el punto deseado (A, B, C o D) y escogemos “Deformations”, “Total displacements” y los desplazamientos que deseemos representar: u_x , u_y o, como haremos en este caso, $|u|$ (Figura 3.38).

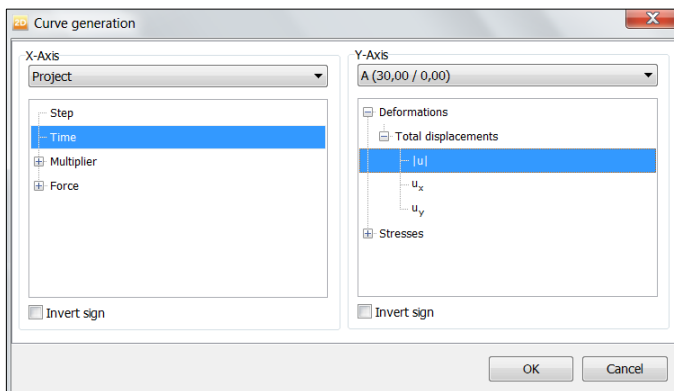


Figura 3.38. Generador de curvas para desplazamientos totales en puntos

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

Sobre un gráfico se pueden añadir otros puntos, pinchando sobre el mismo con el botón derecho y seleccionando “Add curve”, “From current Project...”. También es posible ajustar diversas opciones del gráfico (límites de los ejes, tipo de escala, parrilla, etc.) seleccionando “Settings”.

En la Figuras 3.39 se muestran los desplazamientos totales $|u|$ durante la ejecución del terraplén en los nodos A, B, C y D.

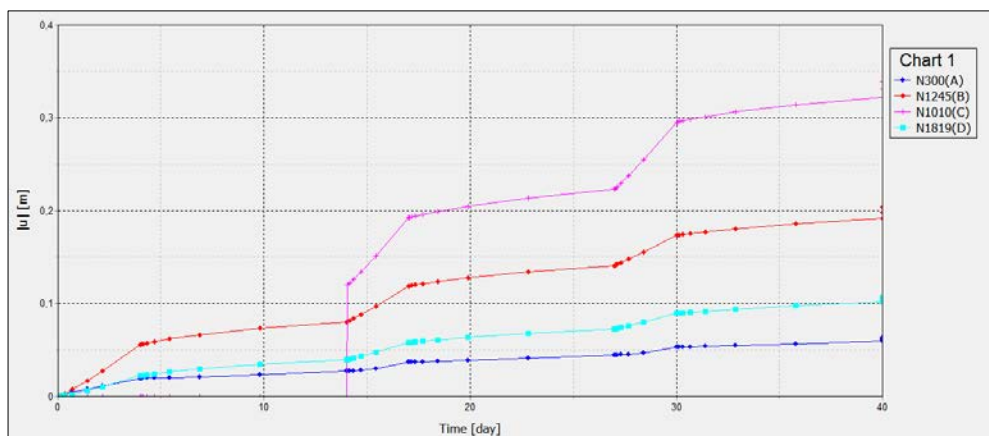


Figura 3.39. Desplazamientos totales $|u|$ durante la ejecución del terraplén en los nodos A, B, C y D

De igual manera, también es posible realizar gráficos avanzados de la evolución de las presiones intersticiales (P_{excess} , Figuras 3.40 y 3.41), o del esfuerzo efectivo vertical (σ'_{yy} , Figuras 3.42 y 3.43), sobre los “Stress points” que se añadieron para realizar este tipo de gráficos (Stress points K, L y M de las Figuras 3.16 y 3.17).

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

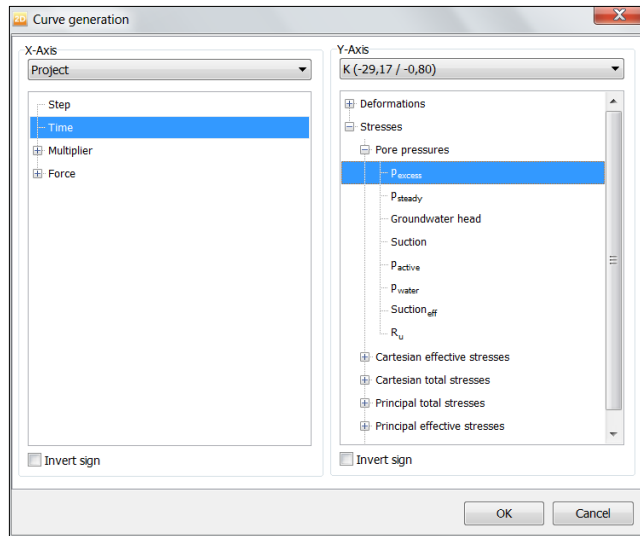


Figura 3.40. Generador de curvas para presiones intersticiales

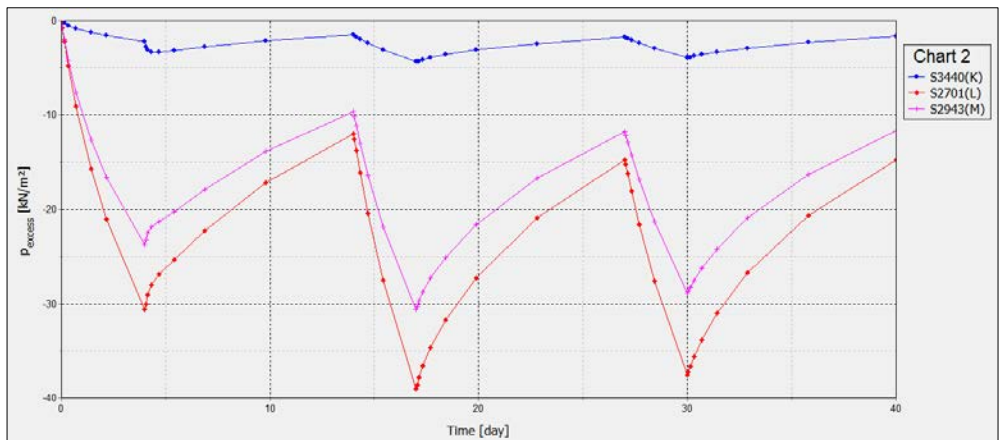


Figura 3.41. Presiones intersticiales durante la ejecución del terraplén en los puntos K, L y M

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

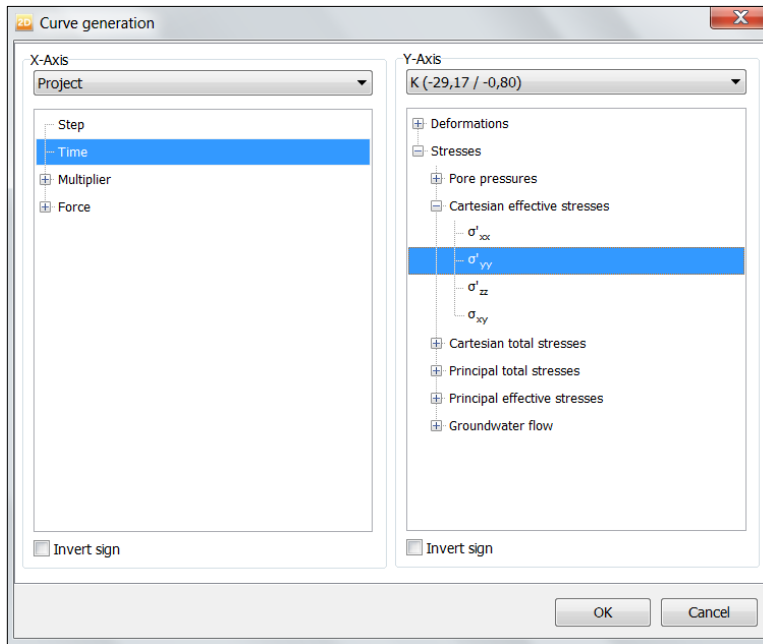


Figura 3.42. Generador de curvas para esfuerzo efectivo vertical σ'_{yy}

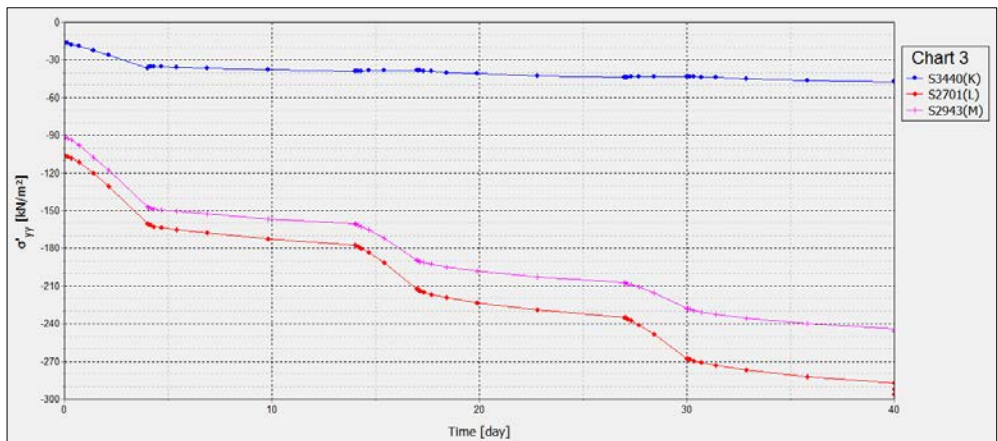


Figura 3.43. Esfuerzo efectivo vertical σ'_{yy} durante la ejecución del terraplén en los puntos K, L y M

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

Primer caso: b) Construcción del terraplén en siete fases utilizando tiempos de consolidación. La sobrecarga se aplica sobre todo el terraplén.

En la Figuras 3.44, 3.45 y 3.46 se representan, respectivamente, los desplazamientos totales $|u|$, presiones intersticiales y esfuerzos efectivos verticales σ'_{yy} para la Fase 7 (sobrecarga sobre todo el terraplén ya aplicada).

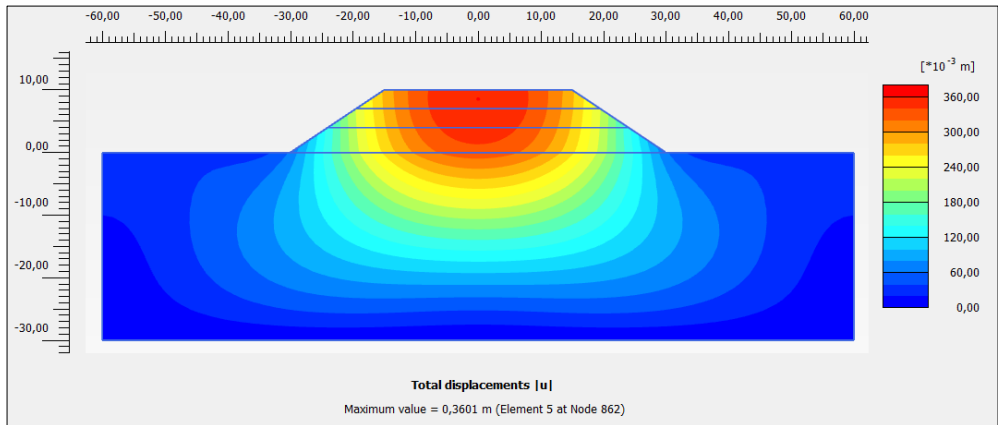


Figura 3.44. Desplazamientos totales $|u|$ en la Fase 7 (terraplén construido utilizando tiempos de consolidación y sobrecarga completa)

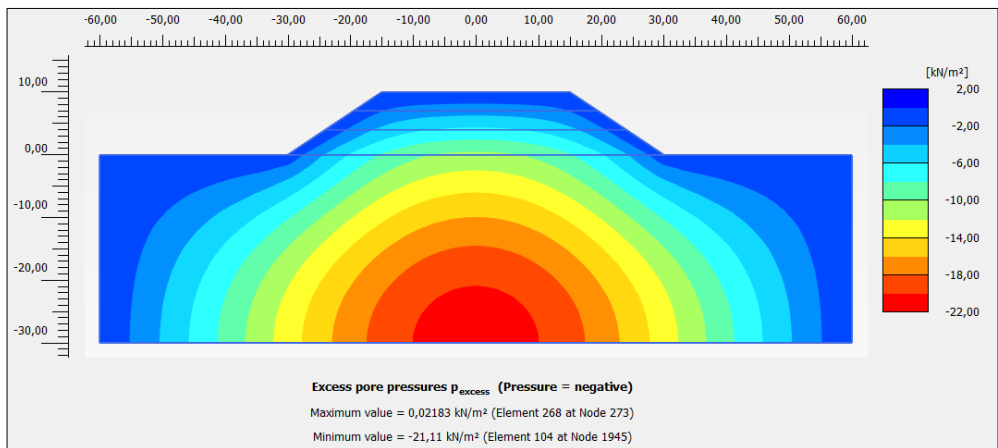


Figura 3.45. Presiones intersticiales en la Fase 7 (terraplén construido utilizando tiempos de consolidación y sobrecarga completa)

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

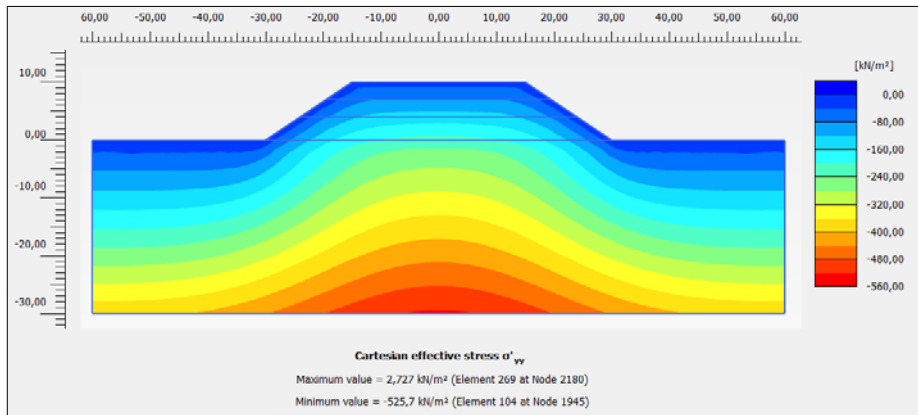


Figura 3.46. Esfuerzo efectivo vertical σ'_{yy} en la Fase 7 (terraplén construido utilizando tiempos de consolidación y sobrecarga completa)

Segundo caso: a) El terraplén se construye en siete fases, pero el análisis de consolidación se realiza a partir del grado de consolidación. La sobrecarga se aplica sobre el lado derecho del terraplén.

En la Figuras 3.47, 3.48 y 3.49 se representan, respectivamente, las evoluciones de desplazamientos totales $|u|$, presiones intersticiales y esfuerzos efectivos verticales σ'_{yy} durante la ejecución del terraplén, para el caso construido a partir del grado de consolidación y con sobrecarga en el lado derecho.

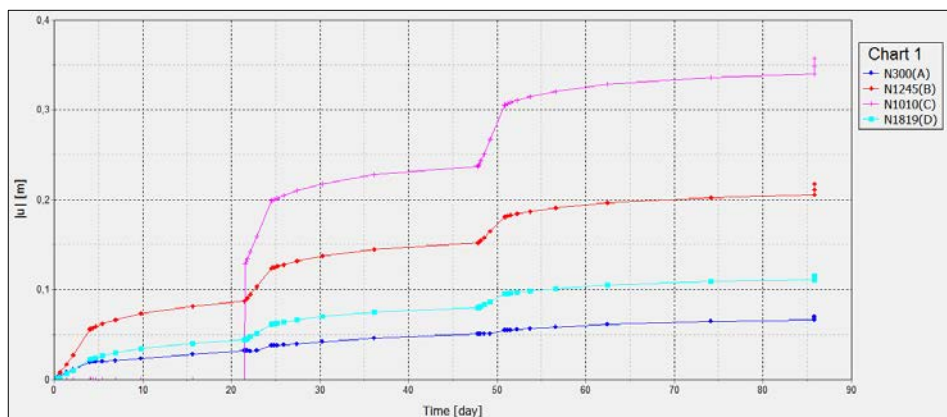


Figura 3.47. Desplazamientos totales $|u|$ durante la ejecución del terraplén en los nodos A, B, C y D (terraplén construido a partir del grado de consolidación y sobrecarga en el lado derecho)

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

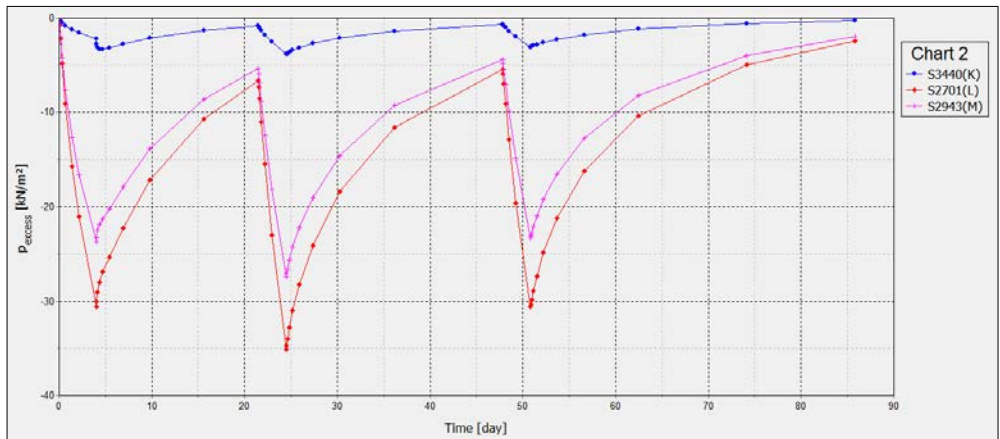


Figura 3.48. Presiones intersticiales durante la ejecución del terraplén en los puntos K, L y M (terraplén construido a partir del grado de consolidación y sobrecarga en el lado derecho)

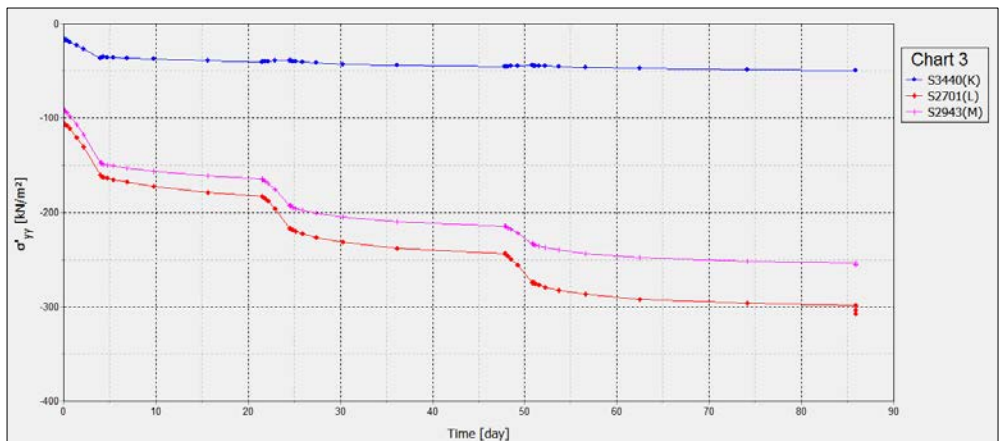


Figura 3.49. Esfuerzo efectivo vertical σ'_{yy} durante la ejecución del terraplén en los puntos K, L y M (terraplén construido a partir del grado de consolidación y sobrecarga en el lado derecho)

Segundo caso: b) El terraplén se construye en siete fases, pero el análisis de consolidación se realiza a partir del grado de consolidación. La sobrecarga se aplica sobre todo el terraplén.

En la Figuras 3.50, 3.51 y 3.52 se representan, respectivamente, los desplazamientos totales $|u|$, presiones intersticiales y esfuerzos efectivos verticales σ'_{yy} para la Fase 7 (sobrecarga sobre todo el terraplén ya aplicada).

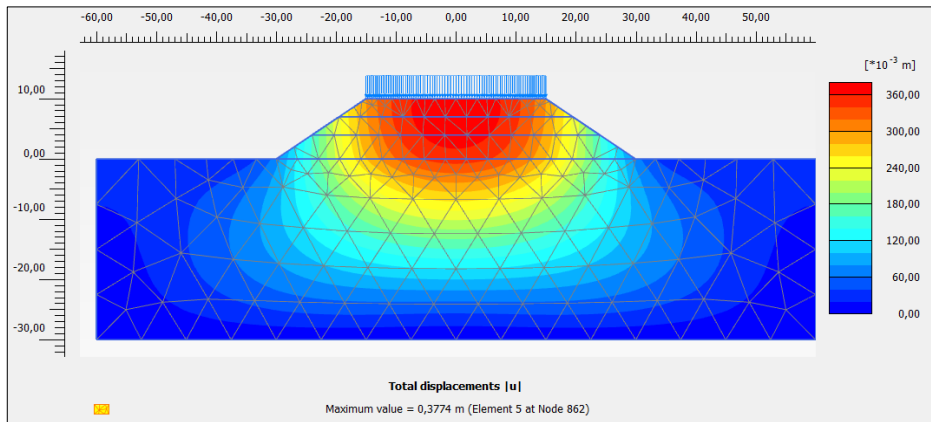


Figura 3.50. Desplazamientos totales $|u|$ en la Fase 7 (terraplén construido a partir del grado de consolidación y sobrecarga completa)

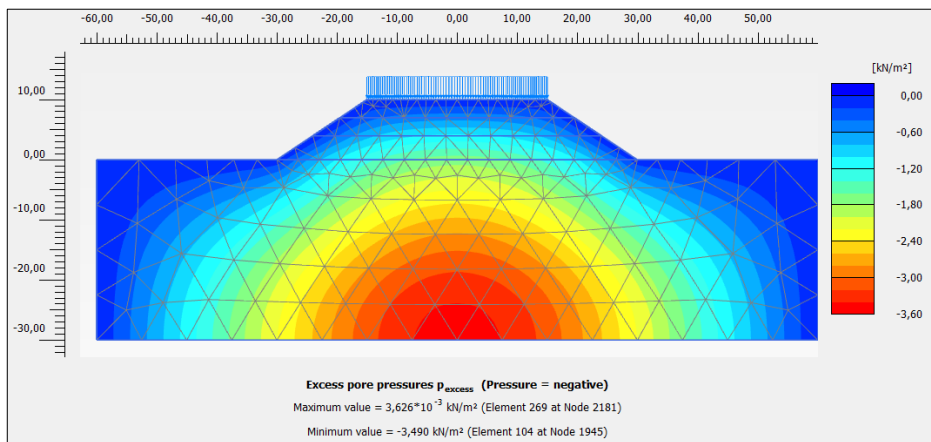


Figura 3.51. Presiones intersticiales en la Fase 7 (terraplén construido a partir del grado de consolidación y sobrecarga completa)

Ejercicio 03. Análisis de la consolidación de un terraplén construido sobre un terreno homogéneo para la creación de una nueva autovía

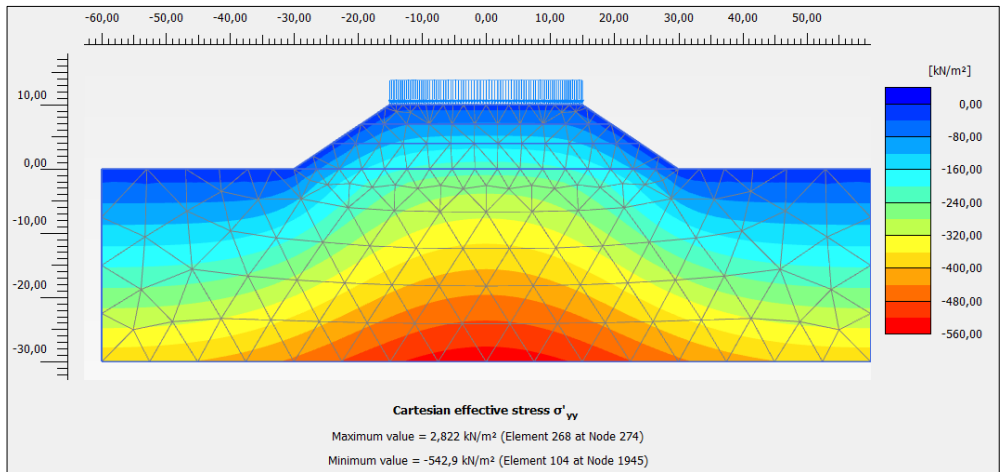


Figura 3.52. Esfuerzo efectivo vertical σ'_{yy} en la Fase 7 (terraplén construido a partir del grado de consolidación y sobrecarga completa)

Ejercicio 04

Red de flujo bajo una presa de hormigón

4.1. INTRODUCCIÓN

Sobre un terreno areno arcilloso de 10 metros espesor, se ha construido una presa de hormigón (10 metros de altura, 10 metros de anchura en la base y 5 metros en coronación). Aguas arriba de la presa el embalse generado tiene una longitud de 10 metros y un nivel de agua de 8 metros. Aguas abajo de la presa el embalse tiene también una longitud de 10 metros y un nivel de agua de 3 metros. Las propiedades del terreno y del hormigón se indican en el siguiente apartado.

Se desea obtener la representación de la red de flujo (líneas equipotenciales y vectores de velocidad), así como el caudal infiltrado bajo la estructura.

4.2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y GEOTÉCNICOS

4.2.1 Geometría del problema

En la Figura 4.1 se puede observar la geometría de la presa sobre el material areno-arcilloso.

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

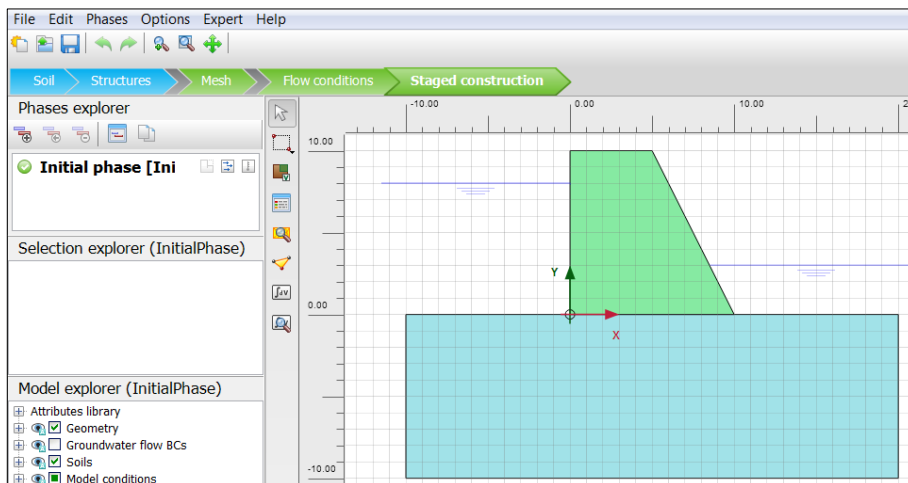


Figura 4.1. Esquema de presa sobre material areno-arcilloso

4.2.2 Parámetros del problema

En la Tabla 4.1 aparecen definidos los parámetros del terreno de cimentación. A su vez, en la Tabla 4.2 los parámetros definidos son los de la presa de hormigón.

Terreno de cimentación

Material	Terreno areno-arcilloso
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Comportamiento material	Drenado
Peso específico no saturado (γ_{unsat})	18,5 kN/m ³
Peso específico saturado (γ_{sat})	21,5 kN/m ³
Módulo de Young (E')	22500 kPa
Coefficiente de Poisson (ν')	0,32
Cohesión efectiva (c')	5 kPa
Ángulo de rozamiento efectivo (ϕ')	30°
Ángulo de dilatación (ψ)	0°
Conductividad hidráulica horizontal (K_x)	4 · 10 ⁻⁶ m/día
Conductividad hidráulica vertical (K_y)	10 ⁻⁶ m/día

Tabla 4.1. Parámetros del terreno de cimentación de la presa

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

Presa de hormigón

Material	Hormigón
Modelo constitutivo	Elástico lineal
Comportamiento material	No poroso
Peso específico no saturado (γ_{unsat})	24 kN/m ³
Peso específico saturado (γ_{sat})	24 kN/m ³
Módulo de Young (E)	200·10 ⁶ kPa
Coficiente de Poisson (ν')	0,15

Tabla 4.2. Parámetros del hormigón de la presa

4.3 Resolución del problema con PLAXIS 2D

4.3.1 Introducción de los parámetros de proyecto

Iniciamos “PLAXIS Input” y elegimos la opción “*Start a new Project*” en la pantalla emergente “*Quick select*”.

Nombramos el problema en la pestaña “*Project*”. En la barra de título escribiremos: “Red de flujo de una presa de hormigón sobre material areno-arcilloso”.

En la pestaña “*Model*” elegimos la opción “*Plane strain*” en el modelo y “*15-Noded*” en elementos. Mantenemos las unidades que aparecen en el programa por defecto (Figura 4.2).



Figura 4.2. Unidades para el ejercicio

El contorno puede definirse por los valores que aparecen en la Figura 4.3.

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

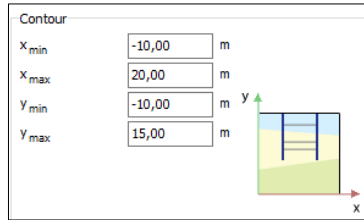


Figura 4.3. Coordenadas del contorno del entorno gráfico

Utilizamos las constantes que aparecen por defecto en el programa (pestaña “constants”).

4.3.2. Definición del terreno

En el modo de geometría “Soil” seleccionamos el icono “Create borehole” y definimos el terreno de apoyo de la presa.

Pulsamos en la coordenada (-10, 0) y en la pantalla emergente “Modify soil layers” seleccionamos “Add”. En “Top” escribimos 0 y en “Bottom” -10.

Como el nivel freático sobre éste sondeo en concreto se encuentra 8 metros por encima de la superficie del terreno, escribiremos en “Head” 8 m. En la Figura 4.4 aparecen reflejados los datos del sondeo.

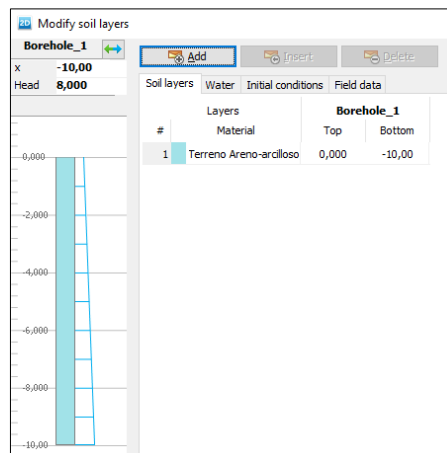


Figura 4.4. Definición del primer sondeo

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

El segundo sondeo lo situamos sobre las coordenadas (0, 0), mientras que el resto de parámetros son iguales a los del primer sondeo (Figura 4.5).

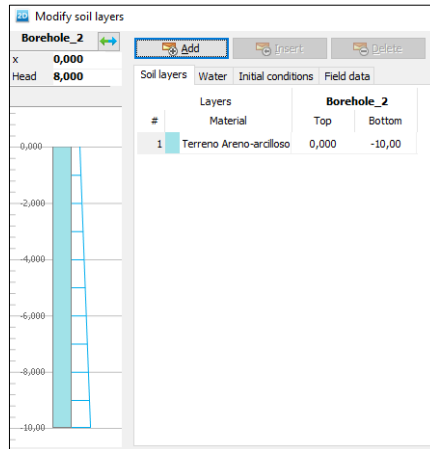


Figura 4.5. Definición del segundo sondeo

Para crear el tercer sondeo, seleccionamos el punto de coordenadas (8,5; 0). Para ello, será necesario cambiar el valor de “*Number of snap intervals*” (del menú “*snapping options*”) a 2. En la pantalla “*Modify soil layers*” seleccionaremos “*Add*”. En “*Top*” escribimos 0 y en “*Bottom*” -10. Como el nivel freático sobre este sondeo se encuentra 3 metros por encima de la superficie del terreno, escribimos en “*Head*” 3 m (Figura 4.6).

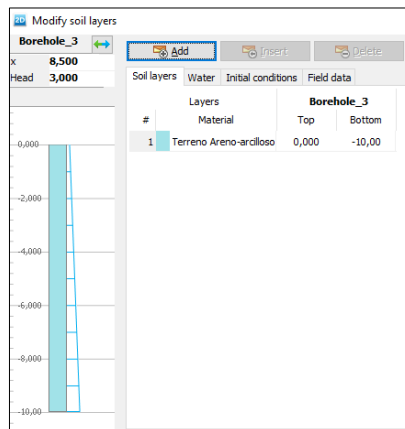


Figura 4.6. Definición del tercer sondeo

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

El cuarto sondeo lo situamos en el punto (10, 0). En “Top” escribimos 0 y en “Bottom” -10. Como el nivel freático sobre éste sondeo se encuentra también 3 metros por encima de la superficie del terreno, escribimos en “Head” 3 m. Para concluir, definimos el quinto y último sondeo, seleccionando el punto (20, 0). El resto de propiedades son similares a las del cuarto sondeo (Figura 4.7).

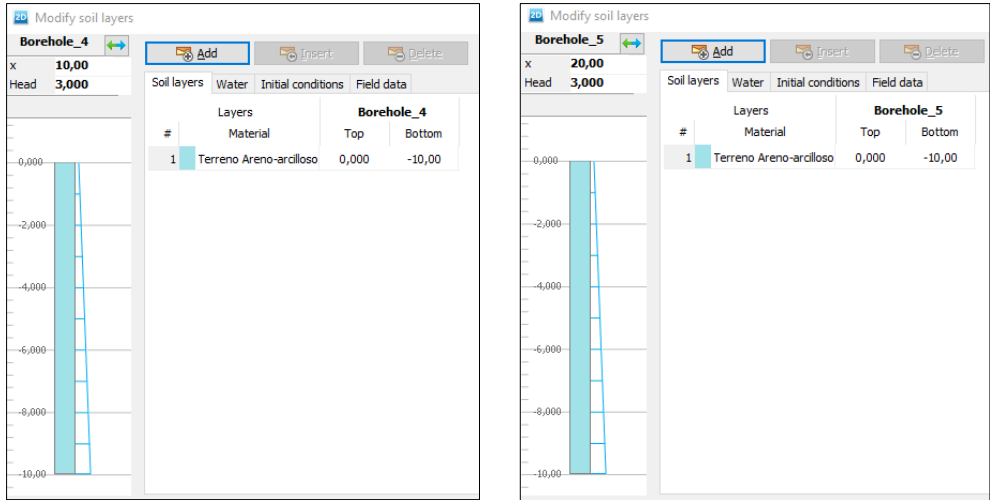


Figura 4.7. Definición del cuarto sondeo (izquierda) y del quinto sondeo (derecha)

En la Figura 4.8 se puede ver el terreno definido.

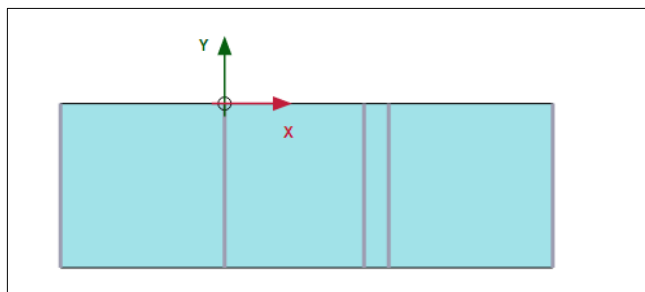


Figura 4.8. Terreno sobre el que se construirá la presa

Para crear el material del que está formado el terreno sobre el que se construirá la presa de hormigón, seleccionamos el icono “*Show materials*”. Pinchamos en “*New*”

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

(estando seleccionado “Soil and interfaces”) e introducimos los parámetros geotécnicos del apartado 4.2.2 (Figuras 4.9, 4.10 y 4.11).

Soil - Mohr-Coulomb - Terreno Areno-arcilloso

General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Terreno Areno-arcilloso
Material model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Drained
Colour		RGB 161, 226, 232
Comments		
General properties		
V_{unsat}	kN/m ³	18,50
V_{sat}	kN/m ³	21,50
Advanced		

Figura 4.9. Propiedades generales del terreno areno-arcilloso

Soil - Mohr-Coulomb - Terreno Areno-arcilloso

General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	22,50E3
ν' (ν)		0,3200
Alternatives		
G	kN/m ²	8523
E_{oed}	kN/m ²	32,20E3
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ' (ϕ)	°	30,00
ψ (ψ)	°	0,000
Velocities		
V_s	m/s	67,23
V_p	m/s	130,7

Figura 4.10. Parámetros del terreno areno-arcilloso

k_x	m/day	4,000E-6
k_y	m/day	1,000E-6

Figura 4.11. Conductividades hidráulicas del terreno areno-arcilloso

4.3.3. Definición de la presa

El material de hormigón de la presa tiene las siguientes propiedades (Figuras 4.12 y 4.13):

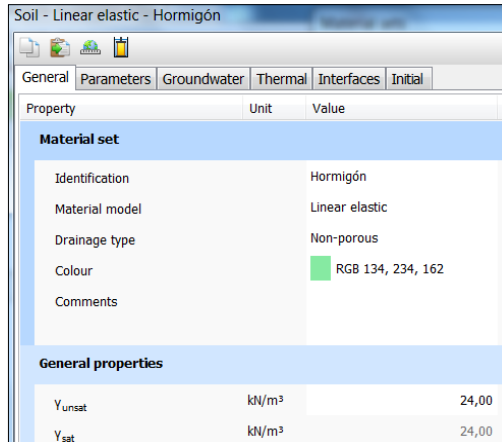


Figura 4.12. Propiedades generales del hormigón

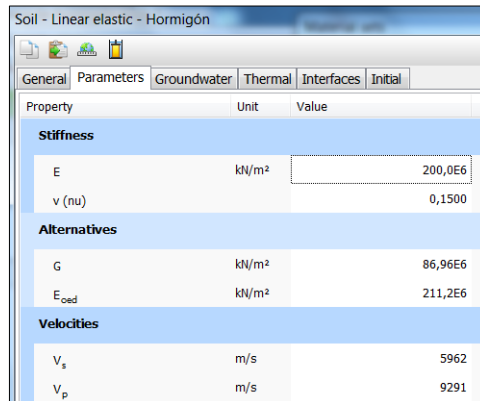


Figura 4.13. Parámetros elásticos del hormigón

Para crear la presa, nos dirigimos al modo de geometría “Structures” y seleccionamos “Create soil polygon”.

Seleccione con el ratón en el cuadro de dibujo las siguientes coordenadas (Tabla 4.3):

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

Coordenadas de los puntos del contorno de la presa

A (0, 0)
B (0, 10)
C (5, 10)
D (10, 0)

Tabla 4.3. Coordenadas de los puntos del contorno de la presa de hormigón

Pinchamos con el botón derecho del ratón sobre la presa y seleccionamos el material “Hormigón”, que ha sido creado anteriormente” (Figura 4.14):

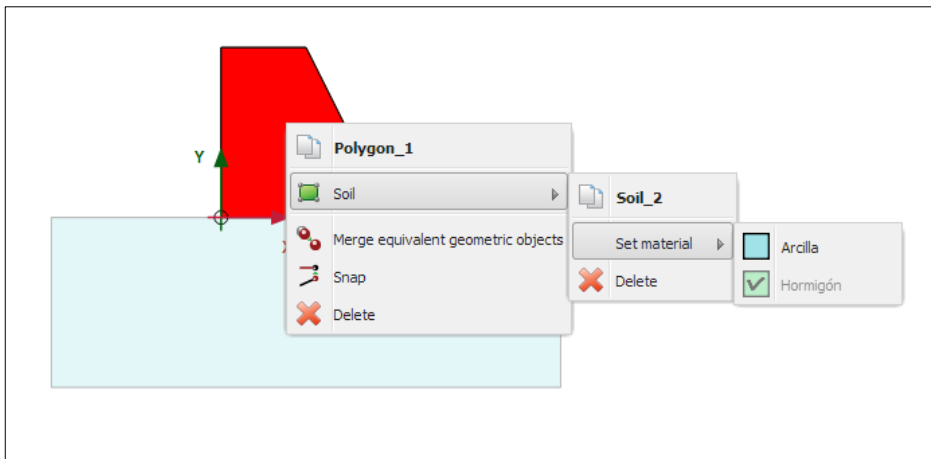


Figura 4.14. Definición del hormigón como material de la presa

La presa quedará definida como se muestra en la Figura 4.15:

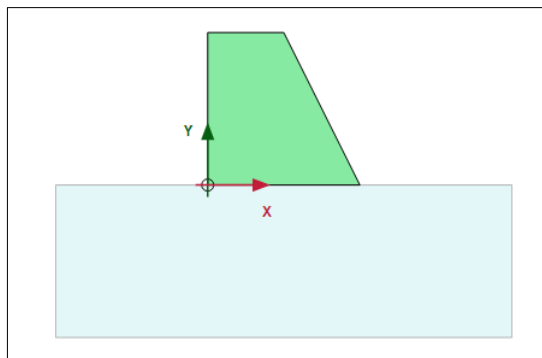


Figura 4.15. Presa definida sobre el terreno de cimentación areno-arcilloso

4.3.4. Mallado del problema

Nos dirigimos al modo de cálculo “*Mesh*” para mallar el terreno y pulsamos el icono “*Generate mesh*” indicando que el mallado sea fino (“*Fine*”).

Para visualizar la malla que se ha creado en “*PLAXIS Output*” (Figura 4.16) seleccionamos el icono “*View mesh*”.

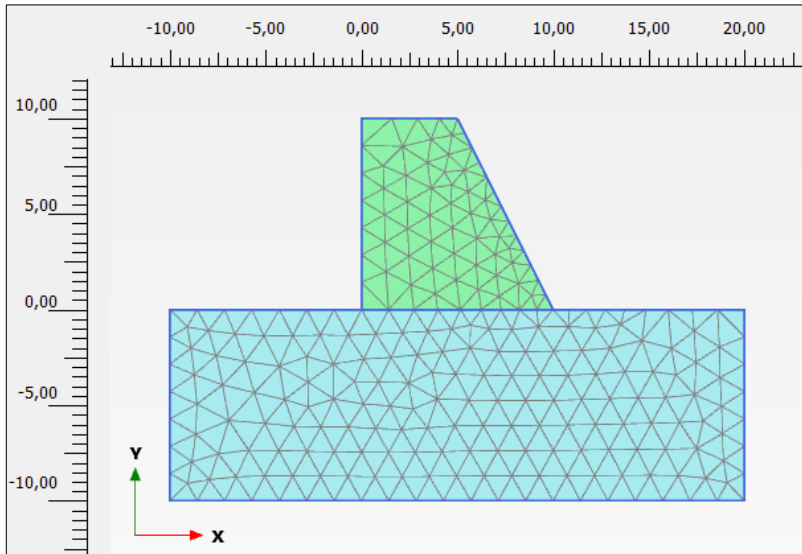


Figura 4.16. Mallado del problema

4.3.5. Fases de proyecto

En este caso sólo es necesario crear una única fase (“*Initial phase*”). En “*Calculation type*” seleccionamos “*Flow only*” y en “*Pore pressure calculation type*” escogemos “*Steady state groundwater flow*”, Figura 4.17.

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

Name	Value
General	
ID	Initial phase [InitialPhase]
Calculation type	Flow only
Pore pressure calculation type	Steady state groundwater flow
Thermal calculation type	Ignore temperature
Estimated end time	0,000 day
First step	
Last step	
Design approach	(None)
Numerical control parameters	
Solver type	Picos (multicore iterative)
Max cores to use	256
Max number of steps store	50
Flow control parameters	

Figura 4.17. Configuración de la Fase inicial para el estudio del flujo estacionario de agua bajo la presa de hormigón

Finalmente, pinchamos en el icono “*Calculate*” para que se inicien los cálculos. Una vez calculada la fase, nos dirigimos a “*PLAXIS Output*” para visualizar los resultados (pulsando sobre el icono “*View calculation results*”).

4.3.6. Resultados en “*PLAXIS Output*”

Para ver las líneas equipotenciales, seleccionamos en “*Stresses*” la opción “*Pore pressures*” y “*Groundwater head*” (Figura 4.18). En la Figura 4.19 se pueden apreciar las líneas equipotenciales.

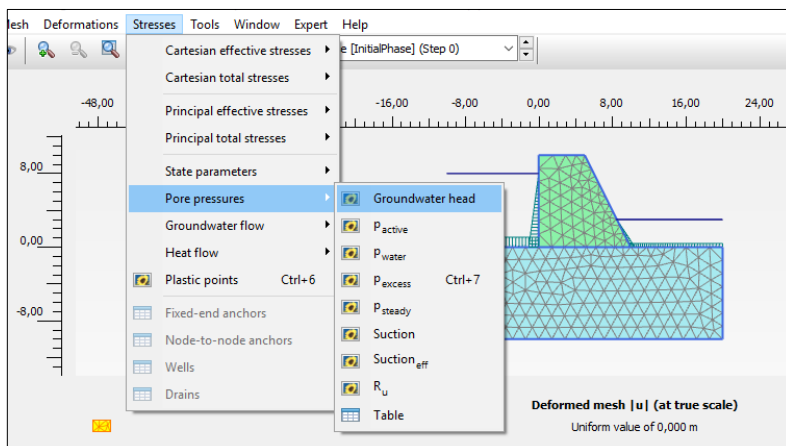


Figura 4.18. Selección de representación de las líneas equipotenciales

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

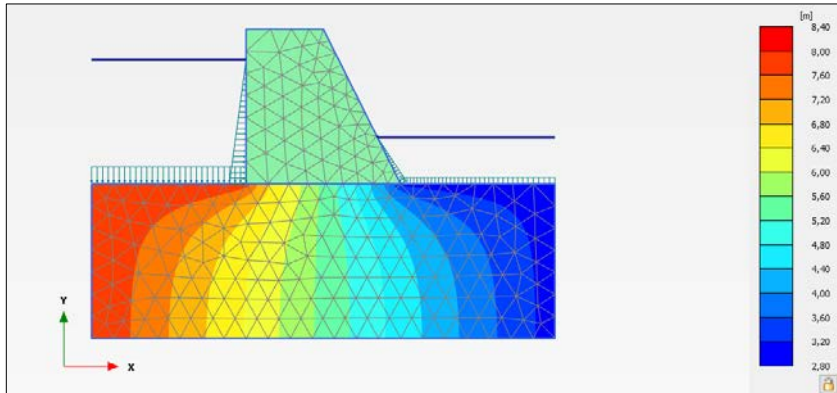


Figura 4.19. Líneas equipotenciales

Para representar los vectores de velocidad del agua seleccionamos en “Stresses” la opción “Groundwater flow” y marcamos el módulo del caudal $|q|$ (Figura 4.20). En la Figura 4.21 aparecen representados los vectores de velocidad del flujo.

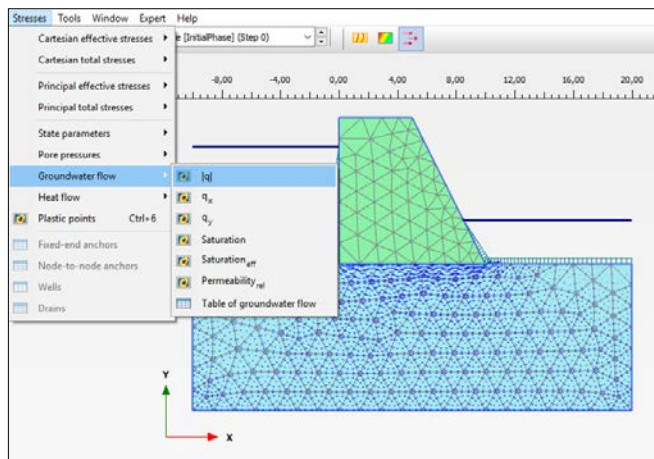


Figura 4.20. Selección de representación de los vectores de velocidad del flujo

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

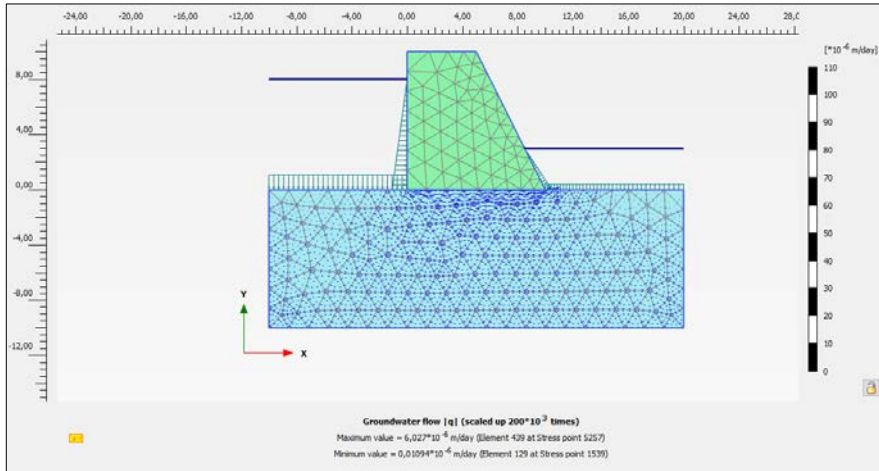


Figura 4.21. Representación de los vectores de velocidad del agua

4.3.7. Red de flujo si los contornos laterales e inferior y la presa actúan como barreras impermeables

En ocasiones, nos puede interesar impedir el flujo de agua a través de los contornos del problema. Lo que se busca en este caso es obtener la red de flujo considerando únicamente el flujo desde el embalse aguas arriba de la presa, desde la línea de coordenadas (-10, 0) a (0, 0), hasta el embalse de aguas debajo de la presa, línea de coordenadas (10, 0) a (20, 0).

Por lo tanto, tenemos que “cerrar” el flujo en las líneas de contorno tanto de la presa (líneas 1, 2, 3 y 5) como de los bordes impermeables del problema (líneas 7, 8 y 9), tal y como aparecen definidas en la Tabla 4.4:

Contorno presa	Coordenadas primer punto	Coordenadas segundo punto
Línea 1	(0, 10)	(5, 10)
Línea 2	(0, 0)	(0, 10)
Línea 3	(5, 10)	(10, 0)
Línea 5	(0, 0)	(10, 0)

Contorno impermeable	Coordenadas primer punto	Coordenadas segundo punto
Línea 7	(-10, 0)	(-10, -10)
Línea 8	(20, 0)	(20, -10)
Línea 9	(-10, -10)	(20, -10)

Tabla 4.4. Líneas de contorno en las que se impedirá el flujo de agua

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

Nos dirigimos en “Plaxis Input” al modo de cálculo “*Staged construction*”. Seleccionamos, por ejemplo, la Línea 7 (Figura 4.22), y en el menú “*Selection Explorer*” elegimos la opción “*closed*” en “*Behaviour*” y la activamos (tick verde):

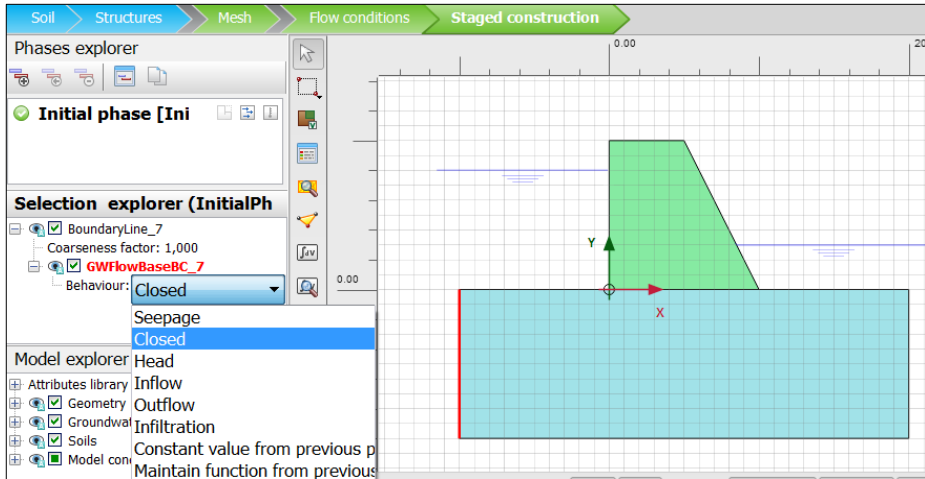


Figura 4.22. Opción “closed” para no permitir el flujo en una determinada línea

Hacemos lo mismo para el resto de líneas y calculamos de nuevo la fase (para este caso se ha elegido un reticulado fino).

En las Figuras 4.23 y 4.24 se pueden apreciar tanto las líneas equipotenciales, como los vectores de velocidad del agua.

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

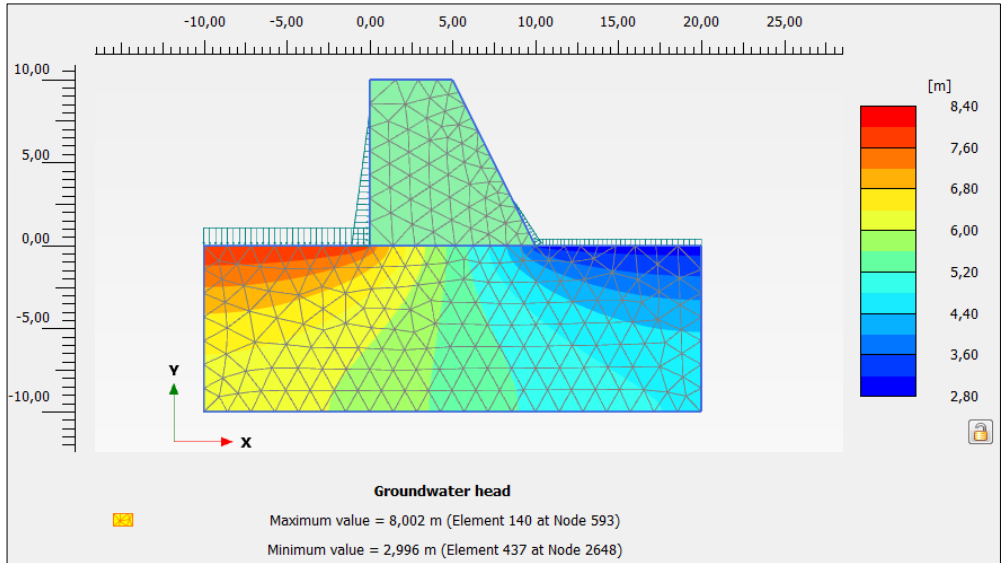


Figura 4.23. Líneas equipotenciales

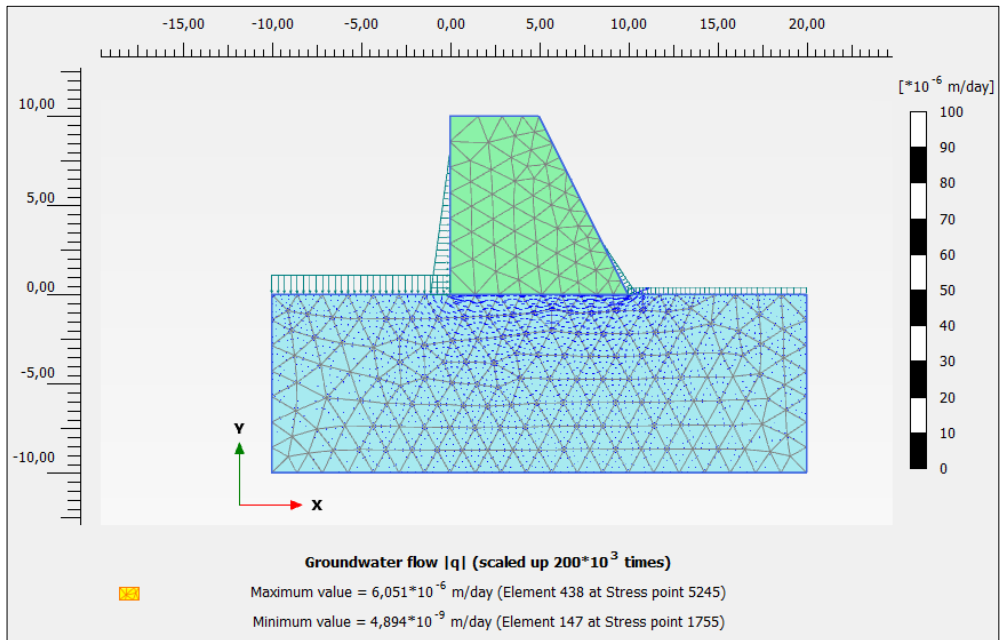


Figura 4.24. Representación de los vectores de velocidad del agua

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

Ahora vamos a obtener el caudal entrante (y saliente) que circula bajo la presa.

Para ello, teniendo previamente representado el módulo del caudal $|q|$ (“*Stresses*”, “*Groundwater flow*”), seleccionamos el icono “*Cross section*” (Figura 4.25).

En la tabla que aparece escribimos las coordenadas de la línea 4, de (-10, 0) a (0, 0), Figura 4.26, para conocer el caudal que circulará por esa sección (caudal entrante). También podemos seleccionar los puntos de las coordenadas directamente sobre el dibujo. Como resultado, obtenemos que el caudal entrante (“*Total discharge*”) es de aproximadamente $5,71 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{día}/\text{m}$ (Figuras 4.27 y 4.28).

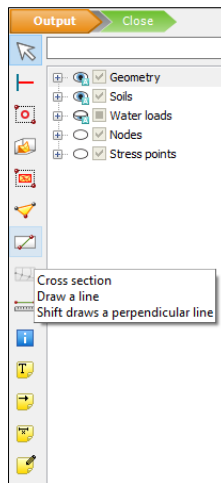


Figura 4.25. Icono “*Cross section*”

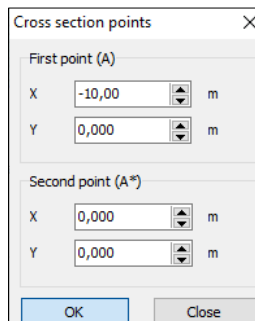
A dialog box titled 'Cross section points' with a close button (X) in the top right corner. It contains two sections for defining points. The first section is 'First point (A)' with input fields for X (-10,00 m) and Y (0,000 m). The second section is 'Second point (A*)' with input fields for X (0,000 m) and Y (0,000 m). At the bottom, there are 'OK' and 'Close' buttons.

Figura 4.26. Coordenadas de la línea (sección) sobre la que se desea conocer el caudal circulante

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

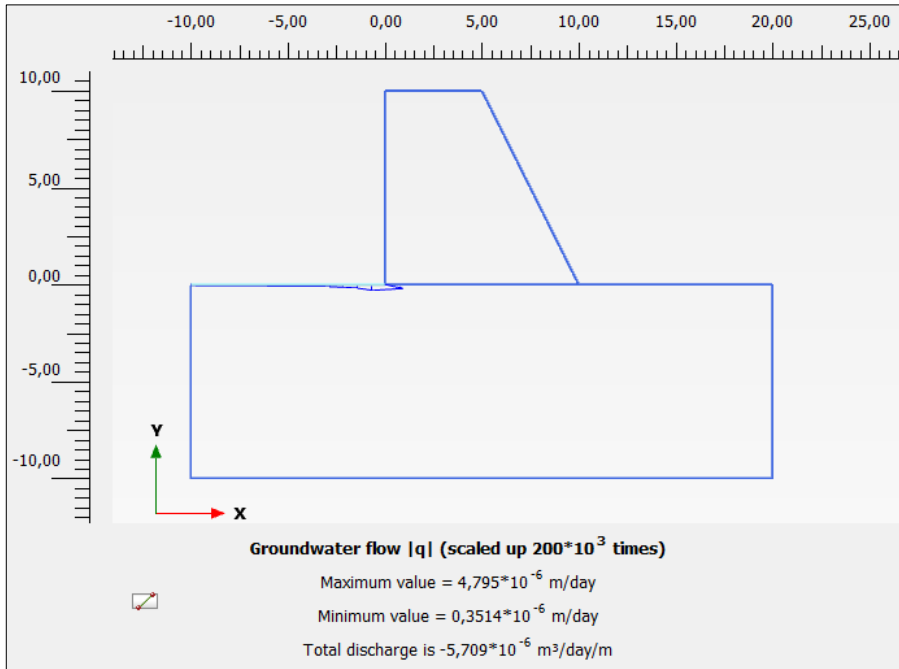


Figura 4.27. Caudal entrante (por metro de espesor de presa)

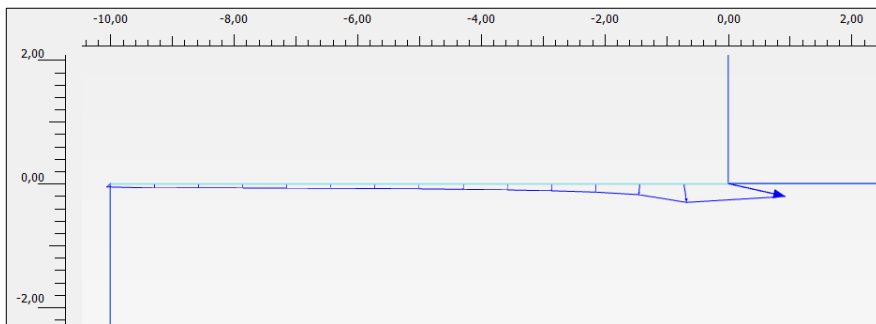


Figura 4.28. Caudal entrante (por metro de espesor de presa), imagen ampliada

Para conocer el caudal (saliente) que circula sobre la línea 6, de (10, 0) a (20, 0), procedemos de manera similar, obteniendo como resultado las Figuras 4.28 y 4.29. El valor del caudal saliente (“*Total discharge*”) es de aproximadamente $5,63 \cdot 10^{-6}$ m³/día/m, similar al entrante.

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

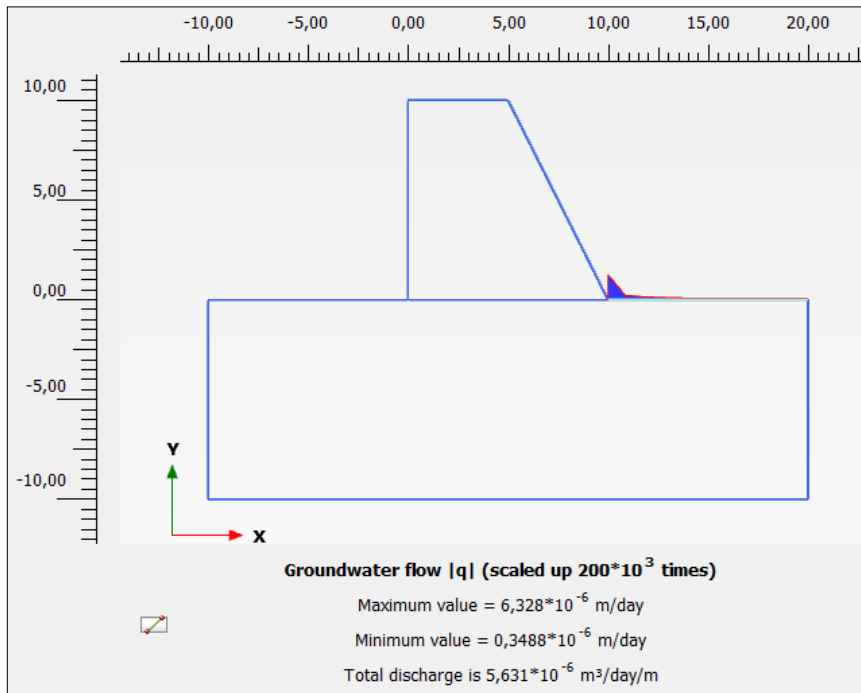


Figura 4.29. Caudal saliente (por metro de espesor de presa)

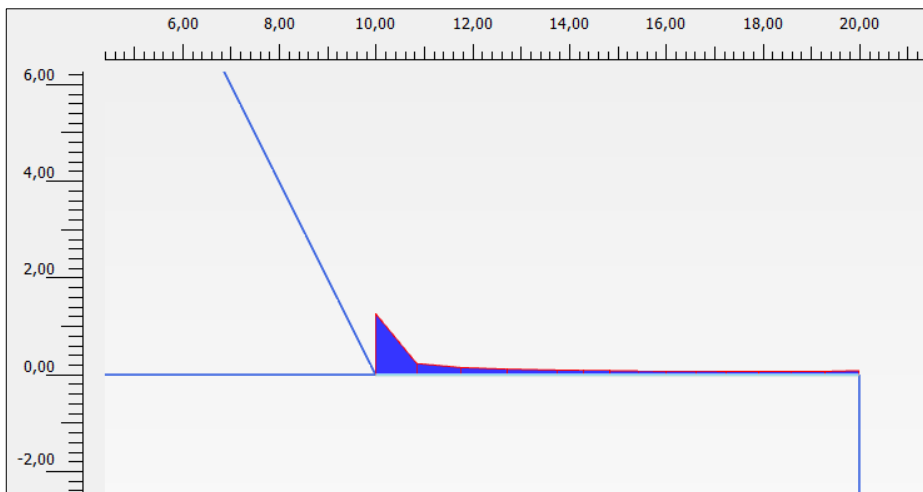


Figura 4.30. Caudal entrante (por metro de espesor de presa), imagen ampliada

4.4 Red de flujo con tablestaca bajo la presa

4.4.1. Introducción de la tablestaca en “PLAXIS Input”

La geometría del problema es idéntica al anterior (podemos utilizarlo como punto de partida y guardarlo en un fichero con otro nombre), salvo por una tablestaca construida en la zona de aguas debajo de la presa. La tablestaca tiene una profundidad bajo el terreno de cimentación de 3 metros. En la Figura 4.31 aparece reflejada la geometría del problema y en la Tabla 4.5 los puntos que forman el contorno de la tablestaca. Como en el apartado anterior, los contornos laterales e inferior, la presa y la tablestaca actúan como barreras impermeables.

Coordenadas de los puntos del contorno de la tablestaca

A (8, 0)
B (8, -3)
C (9, -3)
D (9, 0)

Tabla 4.5. Coordenadas de los puntos del contorno de la tablestaca

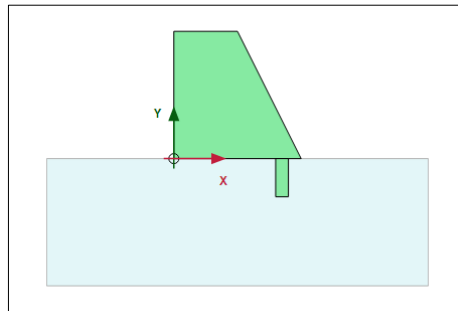


Figura 4.31. Geometría del problema con la tablestaca

Para crear la tablestaca, nos dirigimos al modo de geometría “*Structures*” y pinchamos en “*Create soil polygon*”. Seleccionamos los puntos del contorno de la tablestaca que aparecen reflejados en la Tabla 4.5.

Una vez dibujada la tablestaca, le asignamos el material “Hormigón” (Figura 4.32).

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

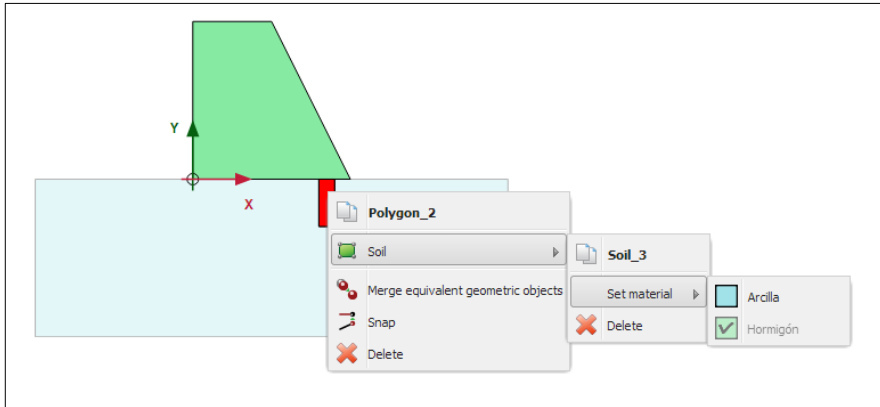


Figura 4.32. Asignación del material “Hormigón” a la tablestaca

Debemos dirigirnos al modo de geometría “*Mesh*” para mallar el terreno de nuevo. Pulsamos el icono “*Generate mesh*” indicando que el mallado sea muy fino.

Debemos crear una única fase inicial al igual que en el problema anterior (Figura 4.17). En “*Calculation type*”, seleccionamos “*Flow only*” y en “*Pore pressure calculation type*” escogemos “*Steady state groundwater flow*”. Procedemos a calcular.

4.4.2. Resultados de la red de flujo con la tablestaca

En las Figuras 4.33 y 4.34 se pueden apreciar tanto las líneas equipotenciales, como los vectores de velocidad de red de flujo resultante:

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

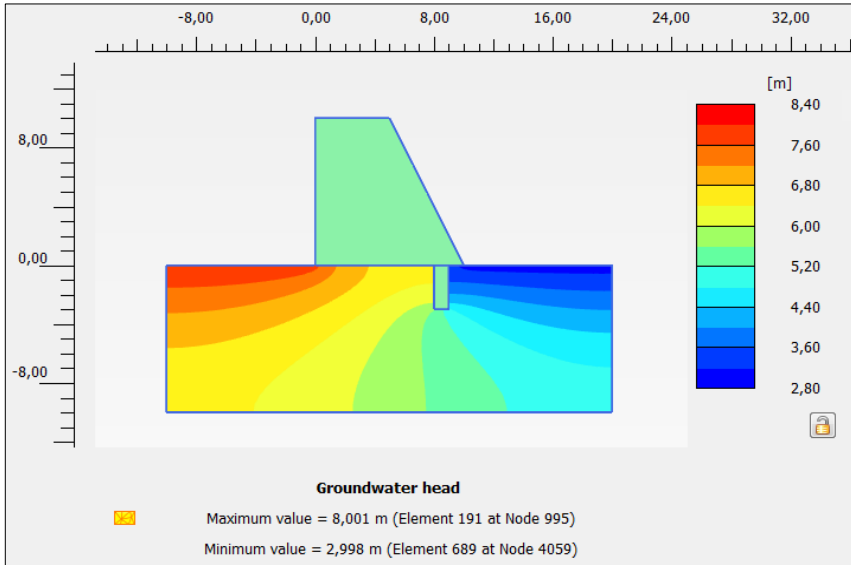


Figura 4.33. Líneas equipotenciales de la red de flujo en el caso de presa de hormigón con tablestaca

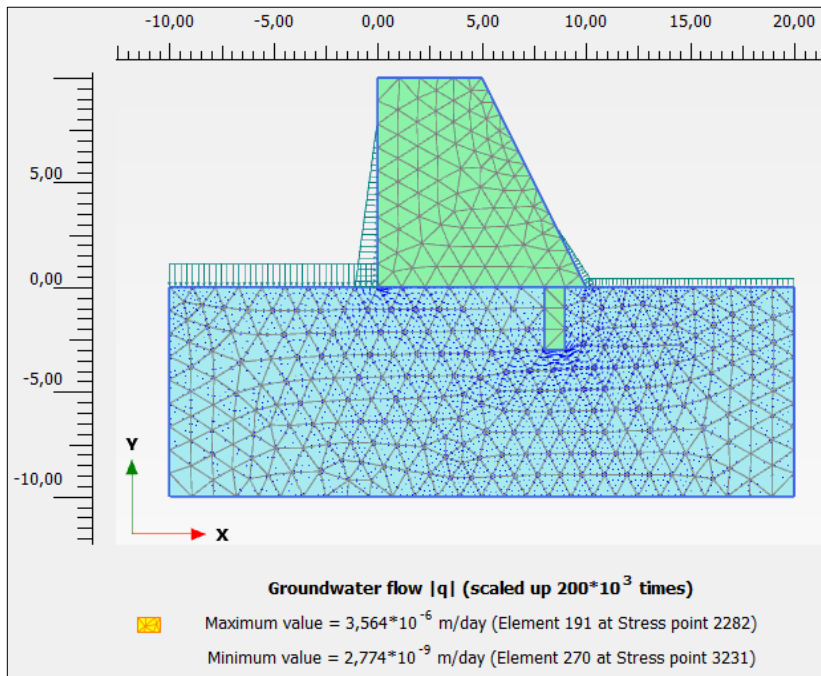


Figura 4.34. Vectores de velocidad del agua bajo la presa de hormigón con tablestaca

Ejercicio 04. Red de flujo bajo una presa de hormigón

En este caso, el valor del caudal saliente (“Total discharge”) es de aproximadamente $4,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{día}/\text{m}$ (Figura 4.35). Es decir, la construcción de la tablestaca ha reducido el valor del caudal infiltrado de forma considerable.

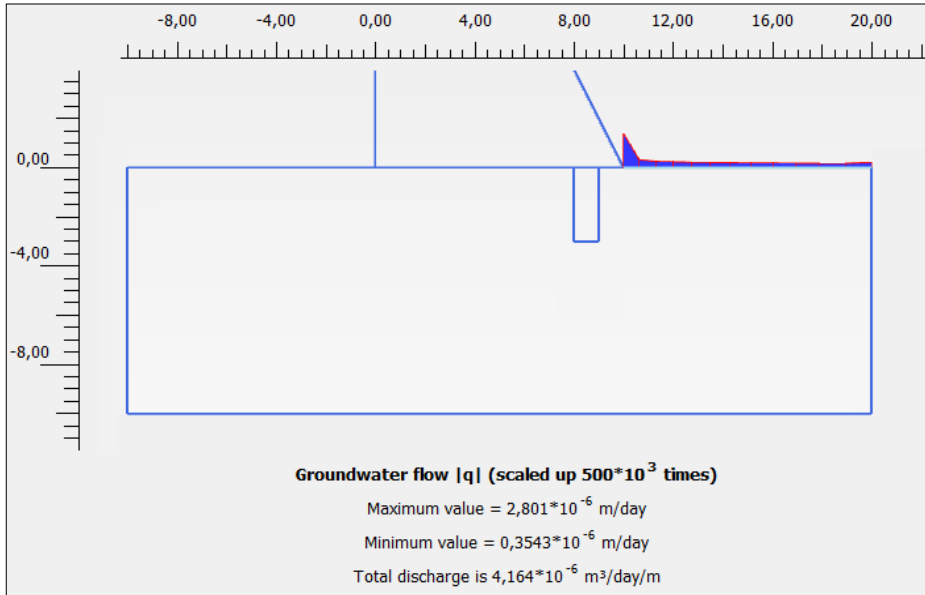


Figura 4.35. Caudal saliente (por metro de espesor de presa con tablestaca)

Ejercicio 05

Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

5.1. INTRODUCCIÓN

Sobre un terreno arcilloso de 8 metros de espesor se ha construido un edificio de 5 plantas (Planta baja + 3 forjados intermedios + ático).

Se ha realizado un estudio para conocer la carga que le llega a cada pilar y, por lo tanto, a cada una de las zapatas sobre la que apoyarán los pilares. Cada fila de zapatas cuenta con tres de ellas. Por lo tanto, el problema estudiado en PLAXIS, una vez simplificado, cuenta con tres zapatas. Éstas, apoyadas sobre el terreno natural, tienen un ancho de 3,70 metros y un canto de 0,8 metros. La distancia entre ejes de las zapatas es de 7 metros. Se considera suficiente realizar el estudio sobre un ancho de terreno de 28 metros (Figura 5.1).

Tanto la planta baja como cada uno de los forjados intermedios supone una carga adicional para cada zapata de 140 kN/m, mientras que el ático aportará solamente 40 kN/m. De esta forma, una vez construido el edificio completo, la carga que deberá soportar cada zapata es de 600 kN/m.

Se busca conocer si el terreno podrá resistir las cargas del edificio que ha sido construido (representando los desplazamientos y tensiones en el terreno, así como el factor de seguridad). Cuando esto no sea así, obtendremos el valor de la carga de hundimiento.

El nivel freático se encuentra en la superficie del terreno.

5.2. PARÁMETROS DEL PROBLEMA

La geometría del problema de estudio aparece definida en la Figura 5.1.

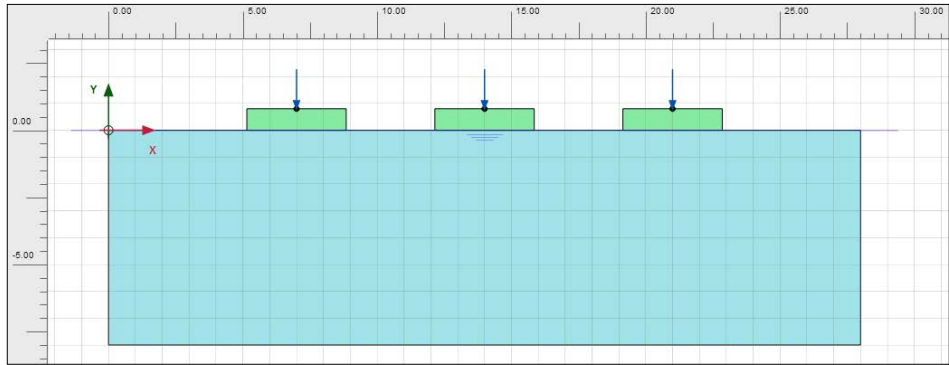


Figura 5.1. Geometría del problema en PLAXIS 2D

Los parámetros geotécnicos del material sobre el que se va a edificar son los que aparecen reflejados en la Tabla 5.1:

Parámetros geotécnicos

Material	Arcilla
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Comportamiento material	Drenado
Peso específico no saturado γ_{unsat}	16,5 kN/m ³
Peso específico saturado γ_{sat}	19 kN/m ³
Módulo de Young (E')	47.000 kPa
Coficiente de Poisson (ν')	0,33
Cohesión efectiva (c')	4,5 kPa
Ángulo de rozamiento efectivo (ϕ')	22°
Ángulo de dilatación (ψ)	0°

Tabla 5.1. Parámetros geotécnicos del terreno donde se va a construir el edificio

Las propiedades del hormigón con el que se van a construir las zapatas aparecen reflejadas en la Tabla 5.2:

Presa de hormigón	
Material	Hormigón
Modelo constitutivo	Elástico lineal
Comportamiento material	No poroso
Peso específico no saturado γ_{unsat}	24 kN/m ³
Peso específico saturado γ_{sat}	24 kN/m ³
Módulo de Young (E')	200·10 ⁶ kPa
Coefficiente de Poisson (ν')	0,15

Tabla 5.2. Parámetros del hormigón para las zapatas

5.3 Resolución del problema con PLAXIS 2D

5.3.1 Introducción de los parámetros de proyecto

Tras iniciar “PLAXIS input”, elegimos la opción “*Start a new Project*” en la pantalla emergente “*Quick select*”. En la barra de título de la pestaña “*Project*” escribimos, por ejemplo: “Zapatas construidas sobre un terreno arcilloso”.

En la pestaña “*Model*” elegimos la opción “*Plane strain*” para el modelo y elementos con 15 nodos (“*15-Noded*”). Mantendremos las unidades tal y como aparecen en el programa (Figura 5.2).



Figura 5.2. Unidades para el problema de estudio

El contorno del espacio de trabajo se puede definir tal y como se ve en la Figura 5.3.

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

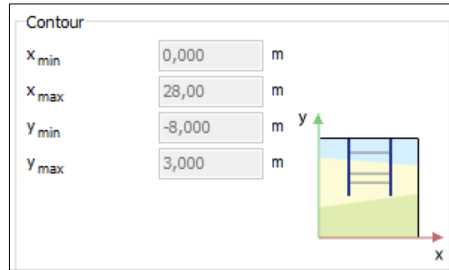


Figura 5.3. Contorno del problema

Mantendremos las constantes que aparecen por defecto en el programa (pestaña “constants”).

5.3.2. Definición del terreno

Para definir el terreno de apoyo sobre el que se va a edificar, nos dirigimos al modo de geometría “Soil” y seleccionamos el icono “Create borehole”. Seleccionamos el punto (0, 0) y pulsamos “Add”. En “Top” escribimos 0 y en “Bottom” -8. El nivel freático se encuentra en la superficie del terreno, de forma que en “Head” escribiremos 0 m.

(Figura 5.4):

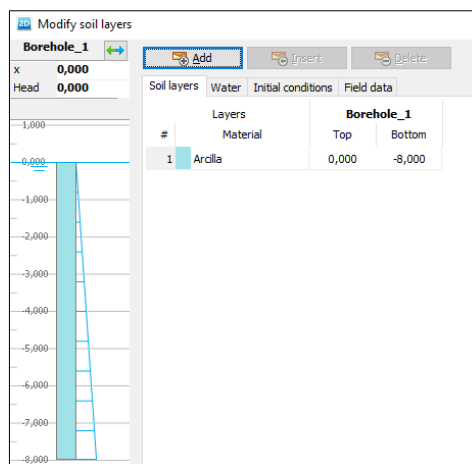


Figura 5.4. Primer sondeo del problema

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

Para crear el material del que está formado el terreno sobre el que se construirán las zapatas, seleccionamos el icono “*Show materials*”. Pinchamos en “*New*” e introducimos los parámetros geotécnicos de la Tabla 5.1 (Figuras 5.5 y 5.6).

Soil - Mohr-Coulomb - Arcilla			
General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial			
Property	Unit	Value	
Material set			
Identification		Arcilla	
Material model		Mohr-Coulomb	
Drainage type		Drained	
Colour		RGB 161, 226, 232	
Comments			
General properties			
Y_{unsat}	kN/m ³	16,50	
Y_{sat}	kN/m ³	19,00	

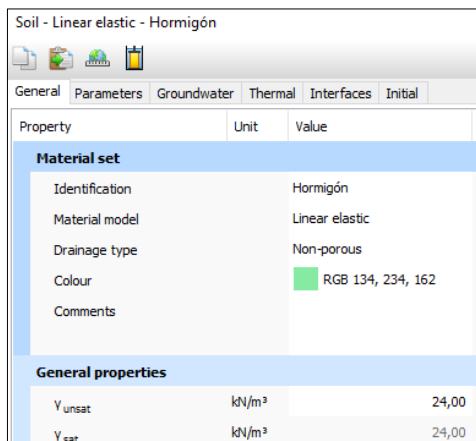
Figura 5.5. Propiedades generales del terreno arcilloso

Soil - Mohr-Coulomb - Arcilla			
General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial			
Property	Unit	Value	
Stiffness			
E'	kN/m ²	47,00E3	
ν' (nu)		0,3300	
Alternatives			
G	kN/m ²	17,67E3	
E_{ced}	kN/m ²	69,64E3	
Strength			
c'_{ref}	kN/m ²	4,500	
ϕ' (phi)	°	22,00	
ψ (psi)	°	0,000	
Velocities			
V_s	m/s	102,5	
V_p	m/s	203,5	

Figura 5.6. Parámetros geotécnicos del terreno arcilloso

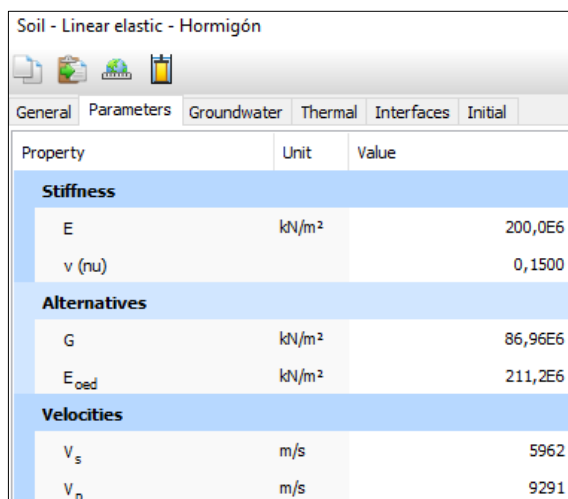
Seguidamente, volvemos a seleccionar “*New*” e introducimos los parámetros resistentes del hormigón de la Tabla 5.2 para la creación del hormigón que compone las zapatas (Figuras 5.7 y 5.8).

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso



Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Hormigón
Material model		Linear elastic
Drainage type		Non-porous
Colour		RGB 134, 234, 162
Comments		
General properties		
Y_{unsat}	kN/m ³	24,00
Y_{sat}	kN/m ³	24,00

Figura 5.7. Propiedades generales del hormigón



Property	Unit	Value
Stiffness		
E	kN/m ²	200,0E6
ν (ν_u)		0,1500
Alternatives		
G	kN/m ²	86,96E6
E_{oed}	kN/m ²	211,2E6
Velocities		
V_s	m/s	5962
V_p	m/s	9291

Figura 5.8. Parámetros resistentes del hormigón

Pinchando con el botón derecho del ratón sobre el terreno creado, seleccionamos la arcilla como el material del que está formado el terreno de cimentación.

5.3.3. Definición de las tres zapatas

Nos dirigimos al modo de geometría “Structures”. Pinchamos sobre el icono “Create soil polygon” y después en “Create soil rectangle” (Figura 5.9).

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

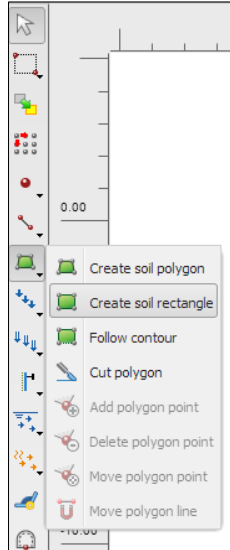


Figura 5.9. Icono “Create soil rectangle” para crear una estructura con forma rectangular

En la barra de comandos escribimos (a continuación de “_polygon”): “(5.15 0) (8.85 0) (8.85 0.8) (5.15 0.8)” y pulsamos intro. Con éstas coordenadas se dibuja la primera zapata. Otra posible forma es pinchando, en el espacio de trabajo, primero en el punto (5,15; 0) y luego en el punto (8,85; 0,8). Para esta segunda opción, debemos indicar el valor 20 en “*Number of snap intervals*” (accediendo a través del botón “*Snapping options*”, ubicado justo debajo del espacio de trabajo).

Para crear la segunda zapata, en la barra de comandos escribimos (a continuación de “_polygon”): “(12.15 0) (15.85 0) (15.85 0.8) (12.15 0.8)”.

Finalmente, para crear la tercera zapata, en la barra de comandos escribimos (a continuación de “_polygon”): “(19.15 0) (22.85 0) (22.85 0.8) (19.15 0.8)”.

Las tres zapatas recién introducidas pueden verse en la Figura 5.10. Una vez creadas, seleccionamos el hormigón como material del que están construidas (Figura 5.11):

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

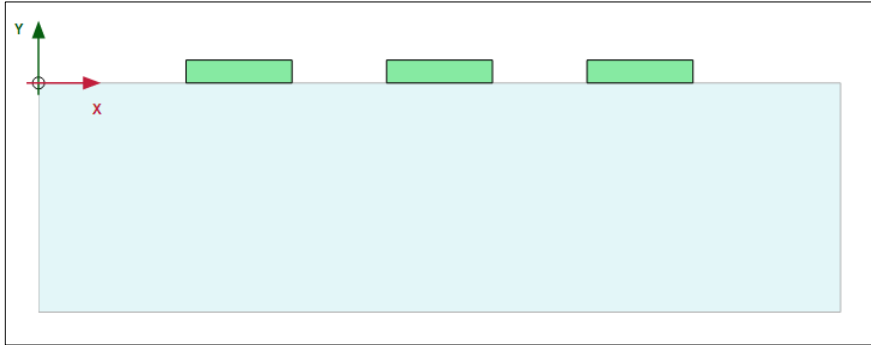


Figura 5.10. Zapatas creadas sobre el terreno

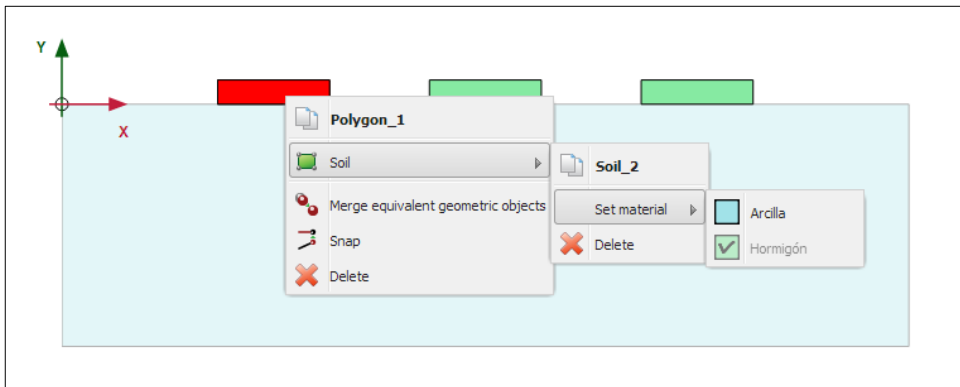


Figura 5.11. Definición del hormigón como material de las zapatas

5.3.4. Definición de las cargas puntuales que llegarán a las tres zapatas

Seleccionamos el icono “*Create load*” y pulsamos sobre “*Create point load*” (Figura 5.12):

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

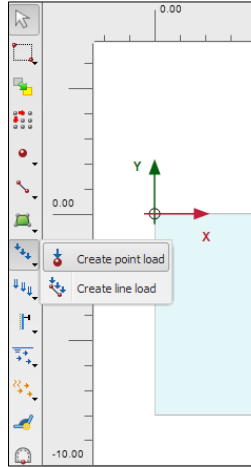


Figura 5.12. Creación de las cargas puntuales sobre las zapatas

Pinchamos sobre las coordenadas (7; 0,8), (14; 0,8) y (21; 0,8). Las tres cargas puntuales se crearán sobre cada zapata (Figura 5.13):

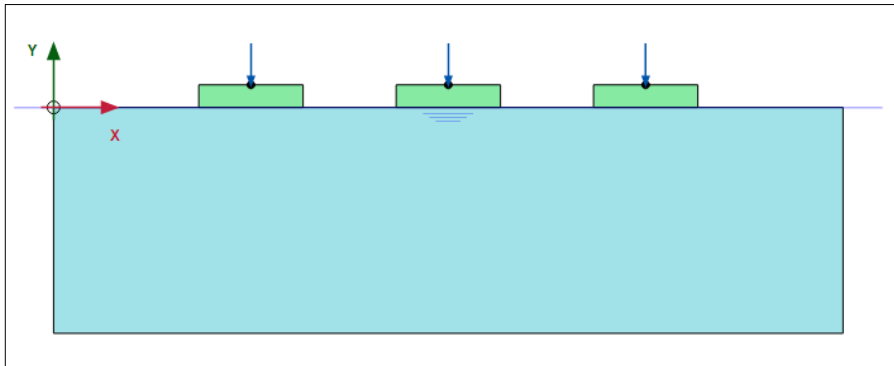


Figura 5.13. Cargas puntuales sobre las zapatas

5.3.5. Mallado del problema

En el modo de cálculo “*Mesh*”, pulsamos sobre el icono “*Generate mesh*” indicando que el mallado sea medio.

Para visualizar el mallado creado en “PLAXIS Output” (Figura 5.14) seleccionamos el icono “*View mesh*”.

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

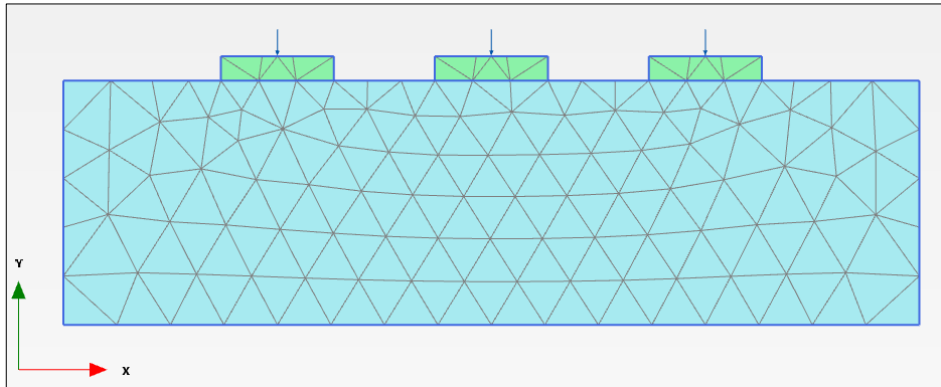


Figura 5.14. Mallado del problema

5.3.6. Fases de proyecto

Definiremos las siguientes fases de proyecto:

- Fase inicial: sólo el terreno de cimentación.
- Fase 1: se construyen las zapatas.
- Fase 2: actúa el primer forjado sobre la zapata (planta baja).
- Fase 3: se suma el peso del segundo forjado (primer forjado intermedio).
- Fase 4: se suma el peso del tercer forjado (segundo forjado intermedio).
- Fase 5: se suma el peso de cuarto forjado (tercer forjado intermedio).
- Fase 6: se suma el peso del ático.
- Fase 7: fase “Safety” para conocer el factor de seguridad tras la construcción del ático.

Para la Fase inicial, en el modo de cálculo “*Staged construction*” desactive tanto las tres zapatas, como las 3 cargas puntuales que actúan sobre cada una de ellas.

Mantendremos las características generales que aparecen en la Figura 5.15. Se utilizará por defecto “*KO procedure*” como tipo de cálculo. También se utilizará por defecto “*Staged construction*” como tipo de carga.

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

General	
ID	Initial phase [InitialPhase]
Calculation type	K0 procedure
Loading type	Staged construction
ΣM weight	1,000
Pore pressure calculation type	Phreatic
Thermal calculation type	Ignore temperature
First step	0
Last step	0
Design approach	(None)

Figura 5.15. Características de la Fase inicial

Mantendremos seleccionado “*Ignore temperature*” en el tipo de cálculo térmico y “*Phreatic*” para el cálculo de las presiones intersticiales.

A continuación, creamos la Fase 1 y activamos las tres zapatas pulsando el botón derecho del ratón sobre cada una de ellas (Figura 5.16). En la Figura 5.17 se ven reflejadas las características generales de la Fase 1 (con “*Plastic*” como tipo de cálculo seleccionado).

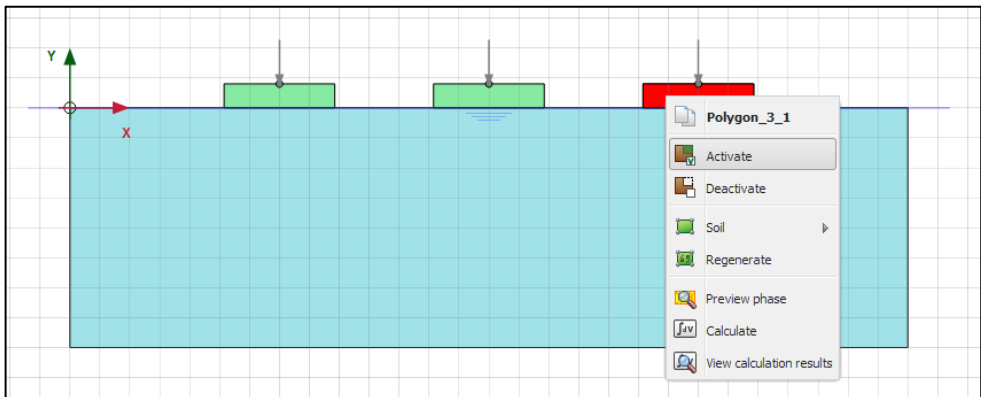


Figura 5.16. Activación de la tercera zapata en la Fase 1

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

General	
ID	Zapata [Phase_1]
Start from phase	Initial phase
Calculation type	Plastic
Loading type	Staged construction
Σ stage	1,000
Σ weight	1,000
Pore pressure calculation type	Phreatic
Thermal calculation type	Ignore temperature
Time interval	0,000 day
First step	1
Last step	3
Design approach	(None)

Figura 5.17. Características de la Fase 1: “Zapata”

En la Fase 2 (llamada, por ejemplo, “1er forjado”) activaremos las tres cargas puntuales (Figura 5.18). Las características generales para esta fase (tipo “*Plastic*”) quedan recogidas en la Figura 5.19.

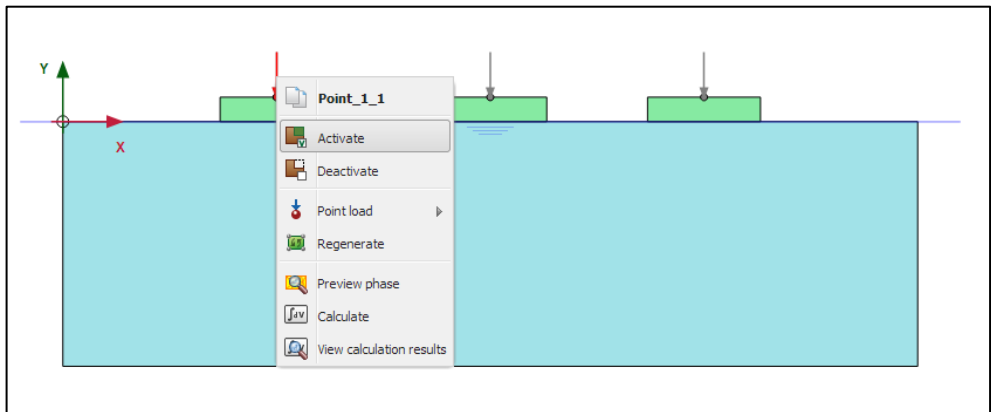


Figura 5.18. Activación de la carga de la primera zapata, en la Fase 2 (primer forjado)

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

General	
ID	1er forjado [Phase_2]
Start from phase	Zapata
Calculation type	Plastic
Loading type	Staged construction
ΣM_{stage}	1,000
ΣM_{weight}	1,000
Pore pressure calculation type	Phreatic
Thermal calculation type	Ignore temperature
Time interval	0,000 day
First step	12
Last step	18
Design approach	(None)

Figura 5.19. Características de la Fase 2 (primer forjado)

Por último, hemos de asignar a cada una de las cargas puntuales su valor. Para ello, marcaremos la carga en el espacio de trabajo y en el menú de la izquierda “*Selection explorer*” daremos a “ $F_{y,ref}$ ” el valor de -140 kN/m (Figura 5.20). Obsérvese que el tipo de carga es puntual (“*PointLoad_1_1*”, Figura 5.20).

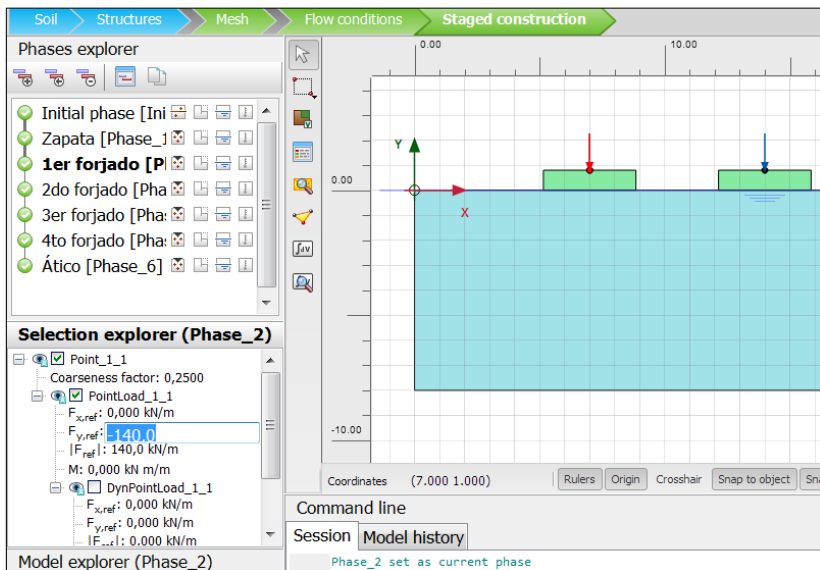


Figura 5.20. Asignación del valor de la carga del primer forjado en “*Selection explorer*”

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

Seleccionamos el icono “Add phase” para crear la Fase 3 (llamada “2do forjado”). Mantenemos activas las tres cargas puntuales y aumentamos el valor de cada una de ellas hasta -280 kN/m (Figura 5.21). Las características de esta fase son iguales a la Fase 2.

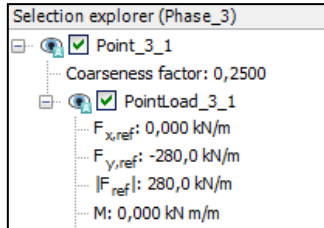


Figura 5.21. Asignación del valor de la carga de la fase correspondiente al segundo forjado

Para crear la Fase 4 (llamada “3er forjado”) mantenemos activas las tres cargas puntuales y aumentamos sus valores hasta -420 kN/m. Las características de esta fase son iguales a las Fases 2 y 3.

Añadimos la Fase 5 (llamada “4to forjado”) y mantenemos activas las tres cargas puntuales, aumentando sus valores hasta -560 kN/m (Figura 5.22). Las características de esta fase son iguales a la Fase 4.

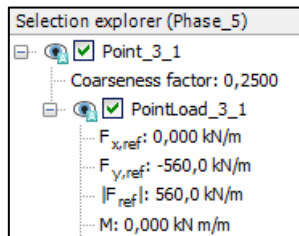


Figura 5.22. Asignación del valor de la carga de la fase correspondiente al cuarto forjado

A continuación, añadimos la Fase 6 (llamada: “ático”) y mantenemos activas las tres cargas puntuales, aumentando sus valores hasta -600 kN/m (Figura 5.23). Las características de esta fase son iguales a la Fase 5.

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

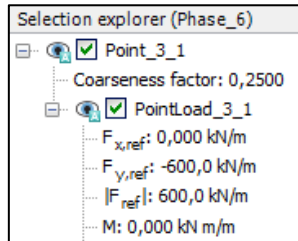


Figura 5.23. Asignación del valor de la carga de la fase correspondiente al ático

Finalmente, para definir la fase “Safety” (que irá justo a continuación de la fase del ático), seleccionamos el icono “Add phase” para crear la Fase 7 (llamada “Safety”). Las características de ésta fase aparecen reflejadas en la Figura 5.24 (tipo de cálculo “Safety”, con la opción de tipo de carga “Incremental multipliers”).

General	
ID	Safety [Phase_7]
Start from phase	Ático
Calculation type	Safety
Loading type	Incremental multipliers
M_{sf}	0,1000
Pore pressure calculation type	Use pressures from previous ph
Thermal calculation type	Ignore temperature
First step	
Last step	
Design approach	(None)
Deformation control parameters	
Ignore undr. behaviour (A,B)	<input type="checkbox"/>
Reset displacements to zero	<input type="checkbox"/>
Reset small strain	<input type="checkbox"/>
Reset state variables	<input type="checkbox"/>
Updated mesh	<input type="checkbox"/>
Updated water pressure	<input type="checkbox"/>
Ignore suction	<input checked="" type="checkbox"/>
Cavitation cut-off	<input type="checkbox"/>
Cavitation stress	100,0 kN/m ²
Numerical control parameters	
Max cores to use	256
Max number of steps stored	50
Use default iter parameters	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 5.24. Características de la Fase “Safety”

5.3.7. Selección de puntos para gráficos de salida avanzados y cálculo del modelo

Antes de proceder a calcular, seleccionaremos una serie de puntos bajo las zapatas sobre los que después podremos representar gráficos de salida avanzados (Figura 5.25). Las coordenadas de dichos puntos se presentan en la Figura 5.26, en la que se puede observar que hay 2 tipos de puntos: “Nodes”, en los que esencialmente representaremos desplazamientos, y “Stress points”, en lo que representaremos tensiones y deformaciones.

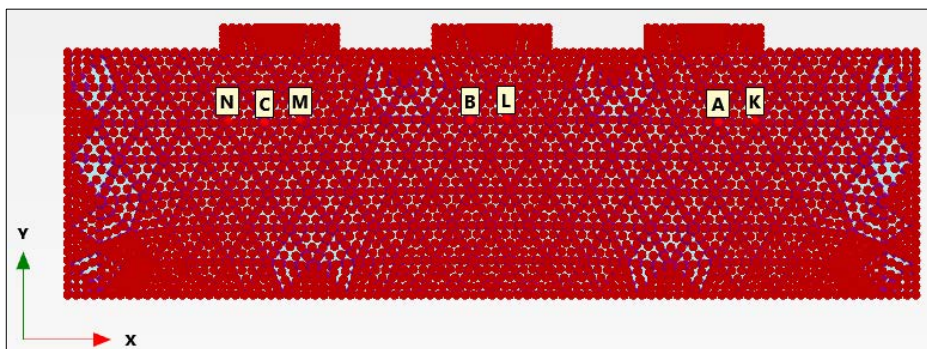


Figura 5.25. selección de puntos para gráficos de salida avanzados

Name	X	Y	Selected
A (Node 2229)	21,48	-2,30	Pre-calc
B (Node 1389)	13,28	-2,25	Pre-calc
C (Node 607)	6,48	-2,31	Pre-calc
K (Stress point 878)	22,69	-2,25	Pre-calc
L (Stress point 1694)	14,48	-2,18	Pre-calc
M (Stress point 1009)	7,67	-2,23	Pre-calc
N (Stress point 939)	5,29	-2,25	Pre-calc

Figura 5.26. Coordenadas de los puntos para gráficos de salida avanzados

Finalmente, pulsamos el icono “*Calculate*” y esperamos a que el programa calcule las fases. Para ver los resultados en “*Plaxis Output*”, seleccionamos el icono “*View calculation results*”.

5.3.8. Resultados en “PLAXIS Output”

Como podemos observar, el cálculo de todas las fases ha concluido de manera satisfactoria. Con lo cual, podemos aceptar que todas las cargas aplicadas durante la

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

construcción del edificio son compatibles con el terreno y la solución de cimentación propuesta.

Otra forma (muy habitual) de comprobar esto es realizando un gráfico avanzado (“*Curves manager*”) de la variable de proyecto “ ΣM_{stage} ”. Así, por ejemplo, en la Figura 5.27 se representa la evolución del desplazamiento vertical (u_y) experimentado por el punto A frente a ΣM_{stage} .

Para ello, seleccionamos las opciones del gráfico avanzado tal y como aparecen en la Figura 5.28. Una vez se crea el gráfico, es muy importante tener en cuenta que, por defecto, “*Curves manager*” nos grafica todas las fases existentes en el proyecto, incluidas las de tipo “*Safety*”. Sin embargo, tal y como ya hemos explicado en otros problemas, la información de los desplazamientos de este tipo de fases no es válida, con lo que procedemos a eliminarla del gráfico. Para ello, pulsamos con el botón derecho encima del gráfico y seleccionamos “*Settings ...*”. Tras esto, se nos abre una ventana como la de la Figura 5.29. Marcamos la pestaña del punto A (“*N2229*”) y después seleccionamos “*Phases*”. Finalmente, deseleccionamos la fase “*Safety*” (Figura 5.30). Ahora sí, obtenemos la Figura 5.27 tal cual se muestra a continuación.

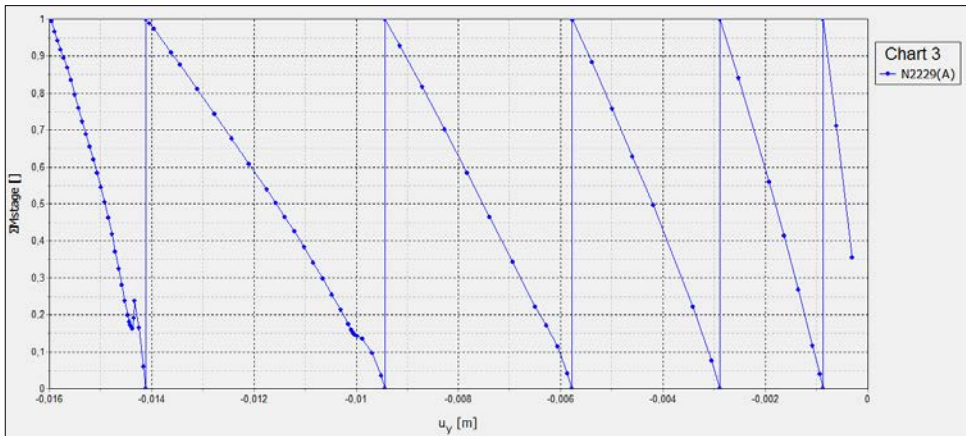


Figura 5.27. Desplazamientos verticales del punto A frente ΣM_{stage}

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

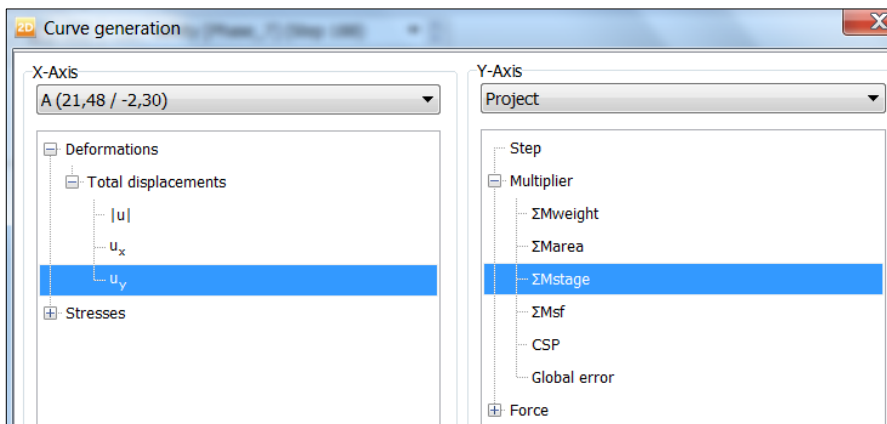


Figura 5.28. Selección de opciones para graficar los desplazamientos verticales del punto A frente ΣM_{stage}

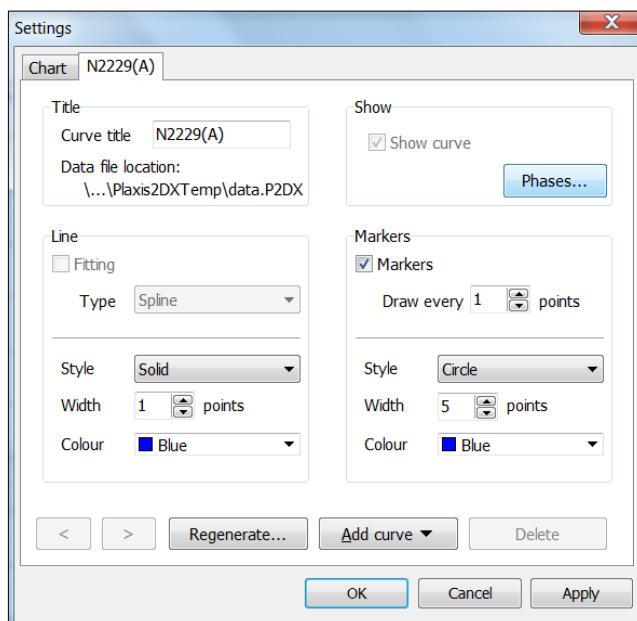


Figura 5.29. Pantalla de configuración del gráfico de salida avanzado

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

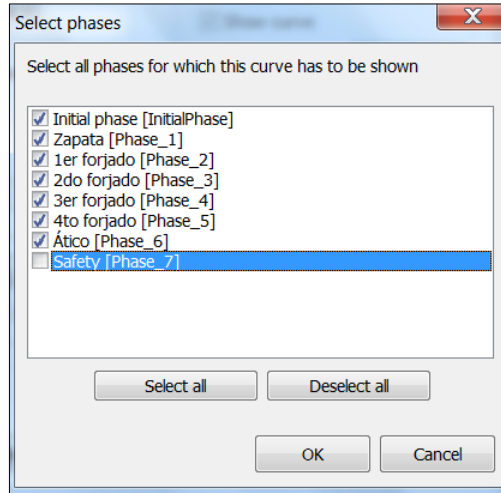


Figura 5.30. Selección de las fases a representar en el gráfico de salida avanzado

En la Figura 5.27 se observa como el programa ha sido capaz de completar el cálculo del 100% de todas las fases (ΣM_{stage} vale 1), esto es, el terreno y la cimentación van a soportar todas las tensiones y desplazamientos producidos en cada una de las fases. Efectivamente, como vemos, PLAXIS resuelve cada fase por pasos (“Steps”) de manera que “ ΣM_{stage} ” va aumentando a medida que la fase se completa. Para cada uno de estos pasos PLAXIS resuelve las ecuaciones de gobierno y, por tanto, obtiene valores de las variables de salida (por eso podemos ver la evolución del desplazamiento, en este caso). Una vez se llega al 100% de una fase (ΣM_{stage} igual a 1), se inicia la siguiente fase (ΣM_{stage} igual 0). En la Figura 5.27, vemos como el desplazamiento vertical del punto A, al final de la Fase 6 “ático” vale aproximadamente 1,6 cm.

A continuación, vamos a representar ΣM_{stage} frente a las tensiones verticales totales (σ_{yy}) de los puntos K y L. Para ello abrimos de nuevo “Curves manager” y marcamos las opciones que se muestran en la Figura 5.31 (que nos permiten graficar el punto K).

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

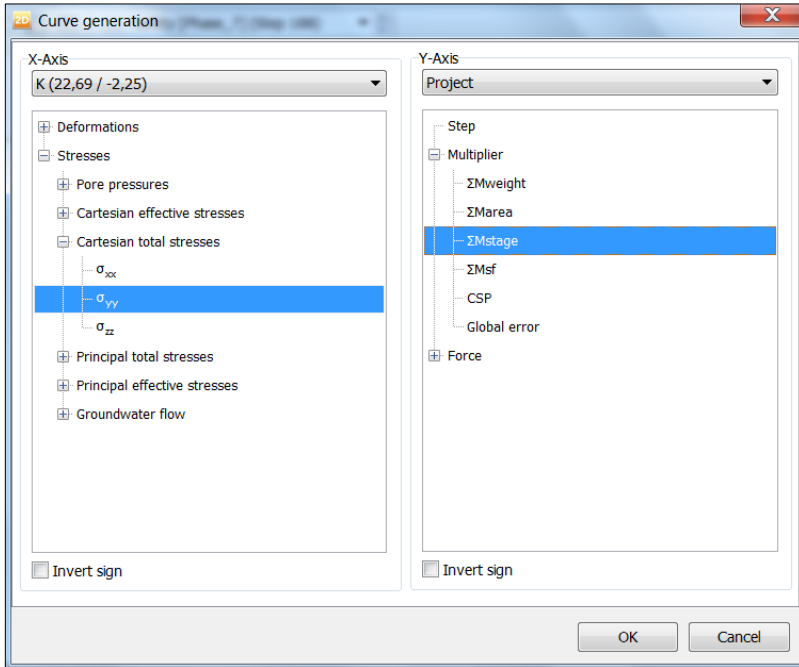


Figura 5.31. Selección de opciones para graficar las tensiones verticales totales del punto K frente ΣM_{stage}

Mediante la opción “Settings” eliminamos de nuevo la fase “Safety”, pudiendo también modificar otras opciones del gráfico como el color de la línea y los marcadores (los cambiamos a color negro), entre otras opciones.

A continuación, pulsando sobre la gráfica con el botón derecho, marcamos la opción “Add curve” y después “From current Project...”. Añadimos ahora el punto L, marcando las mismas opciones que las del punto K. Una vez graficado, eliminamos también la fase “Safety” para este punto y, si lo deseamos, cambiamos la línea y los marcadores a color rojo, obteniendo finalmente la representación de la Figura 5.32.

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

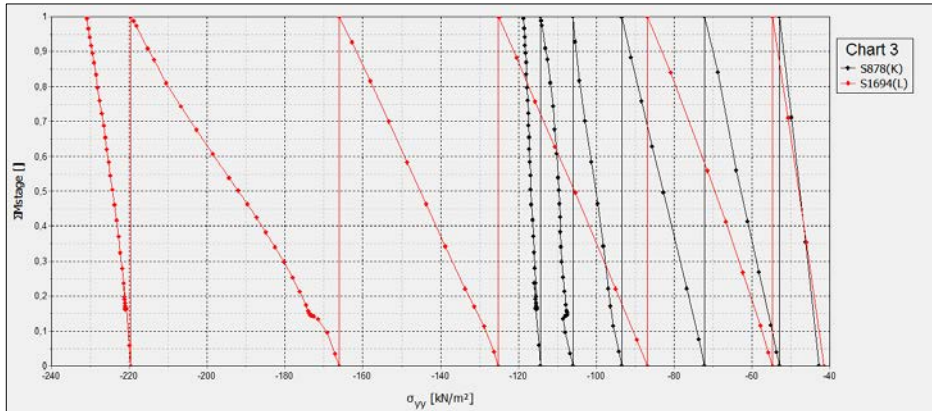


Figura 5.32. Tensiones verticales totales de los puntos K y L frente ΣM_{stage}

A modo de ilustración, las Figuras 5.33, 5.34 y 5.35 muestran los desplazamientos totales $|u|$ de las Fases 2, 4 y 6, respectivamente:

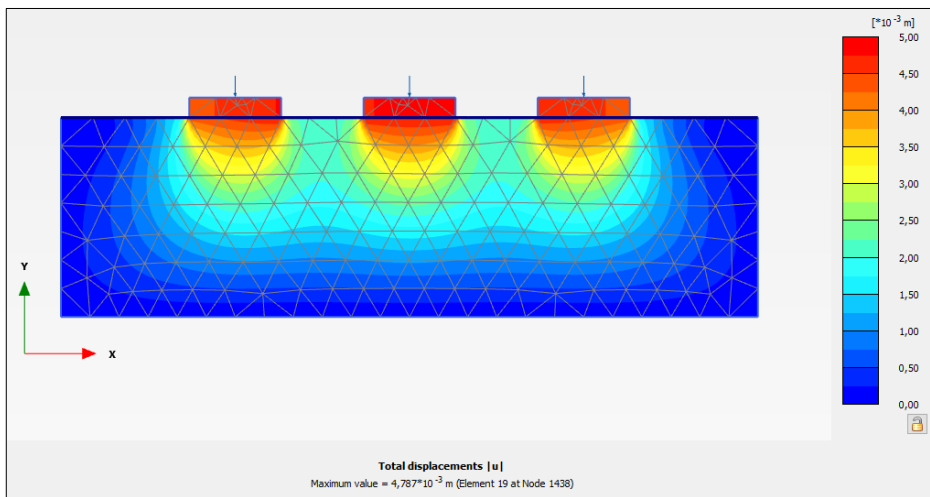


Figura 5.33. Desplazamientos totales $|u|$ de la Fase 2 (1er forjado)

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

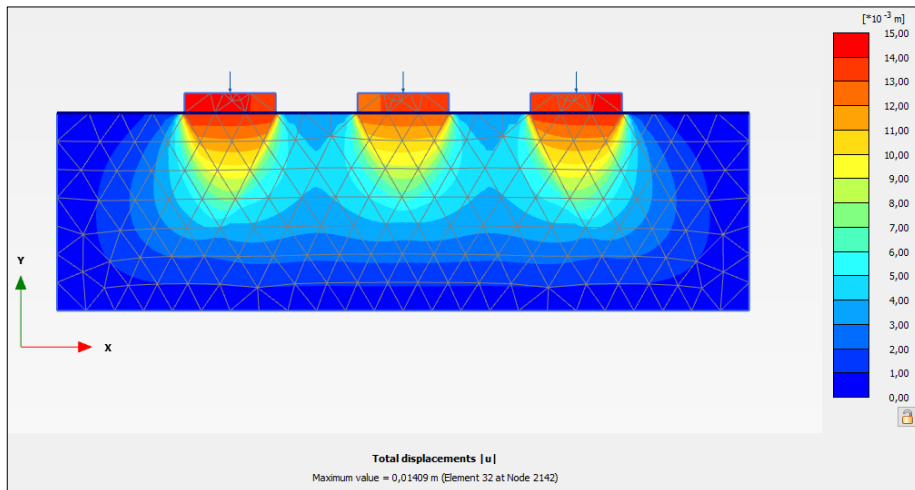


Figura 5.34. Desplazamientos totales $|u|$ de la Fase 4 (3er forjado)

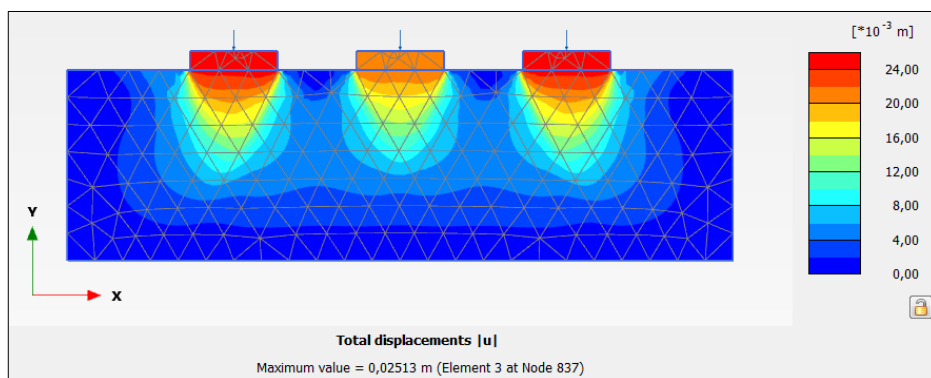


Figura 5.35. Desplazamientos totales $|u|$ de la Fase 6 (ático)

Como se puede observar, al final de la Fase 6 los desplazamientos bajo las zapatas exteriores son algo mayores que en la zapata central. Quizá, todavía más ilustrativa puede resultar la representación de los desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$, que para las Fases 2, 4 y 6 resultan ser (Figuras 5.36, 5.37 y 5.38):

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

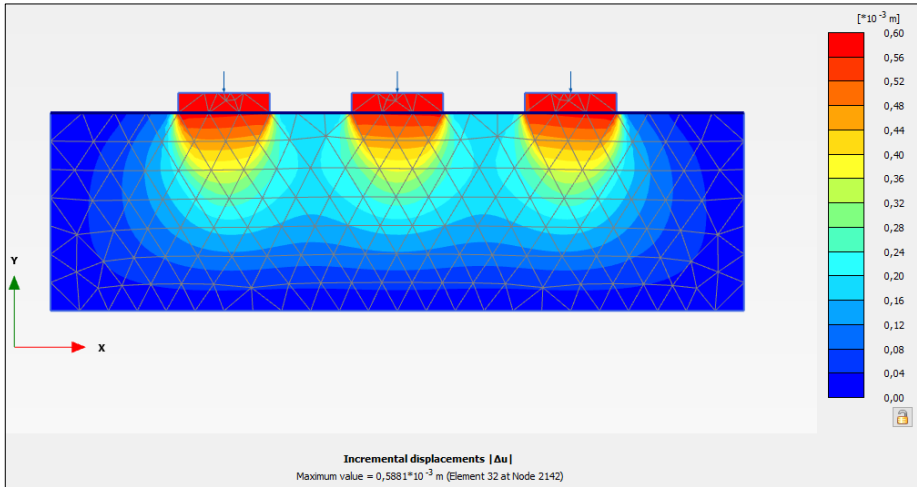


Figura 5.36. Desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ de la Fase 2 (1er forjado)

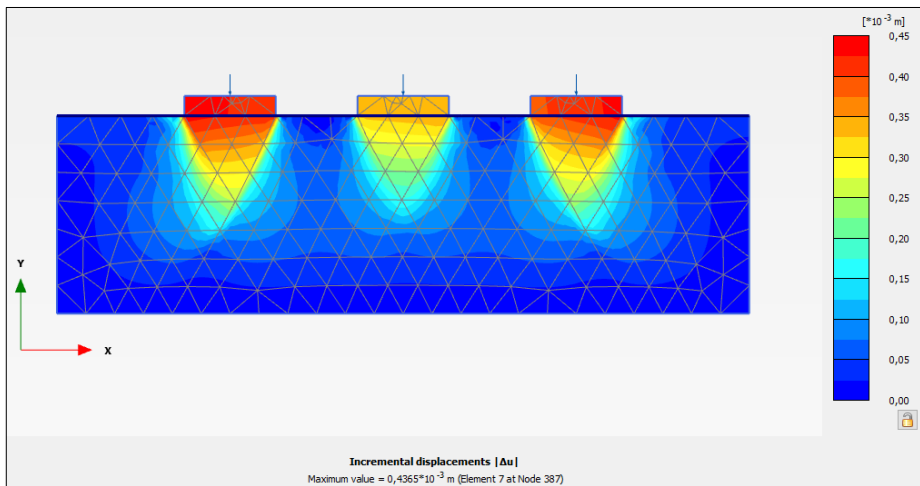


Figura 5.37. Desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ de la Fase 4 (3er forjado)

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

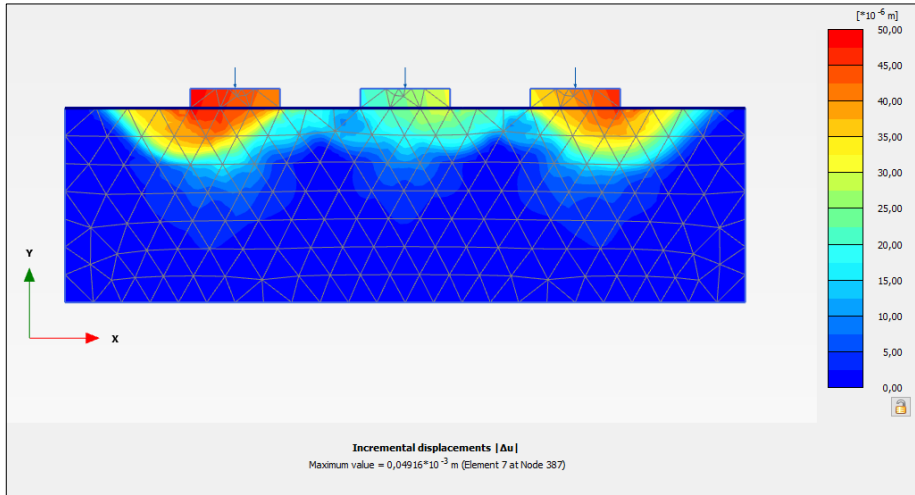


Figura 5.38. Desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ de la Fase 6 (ático)

Los desplazamientos incrementales muestran la diferencia de desplazamiento que existe entre una determinada fase y la fase anterior. Así, para la Fase 6 (Figura 5.38) se puede observar la gran diferencia que existe entre los desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ de las zapatas exteriores y de la zapata central. Es decir, entre la Fase 5 y la Fase 6 la mayor parte de la deformación se produce en las zapatas exteriores (lo cual significa que podemos estar cerca de la rotura).

Por tanto, vamos a buscar el valor del factor de seguridad que tenemos una vez se ha construido el ático. Para ello, teniendo seleccionada la fase “Safety” (va a continuación de la Fase 6 “ático”), pinchamos en “Project” y, a continuación, en “Calculation information”. De esta manera, vemos que el factor de seguridad tiene un valor 1,019 (Figura 5.39).

*NOTA: en la pantalla “Calculation information” siempre se muestra el valor de ΣM_{sf} , sea cual sea la fase que tengamos seleccionada. Sin embargo, el valor de este parámetro sólo tiene validez cuando se trata de una fase tipo “Safety”, en la cual el programa aplica el “phi-c strength reduction method” para calcularlo (ver ejercicio 01) una vez que se ha alcanzado el 100% de la fase anterior. Para el resto de fases (por ejemplo, tipo “Plastic”), el valor de ΣM_{sf} no superará nunca el valor de 1, pues como máximo sólo se habrá alcanzado, durante los cálculos, el 100% de esa fase.

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

Calculation information				
Step info				
Phase	Safety [Phase_7]			
Step	Initial			
Calculation mode	Classical mode			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	32 bit			
Extrapolation factor	1,000			
Relative stiffness	-0,02877E-6			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0,04651E-3	ΣM_{sf}	1,019
Time	Increment	0,000	End time	0,000
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	1,000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000

Figura 5.39. Factor de seguridad ΣM_{sf} (del ático) en la pantalla “Calculation information”

Como el factor de seguridad obtenido tiene un valor de 1,019 un pequeño aumento de carga supondrá la rotura del terreno. Si graficamos los desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ para la fase “Safety” podemos ver, de forma aproximada, la superficie de rotura que se desarrollará bajo las zapatas exteriores (Figura 5.40). El factor de seguridad es tan próximo a la unidad que apenas se producen desplazamientos incrementales bajo la zapata central, concentrándose prácticamente toda esta deformación bajo las zapatas que colapsan.

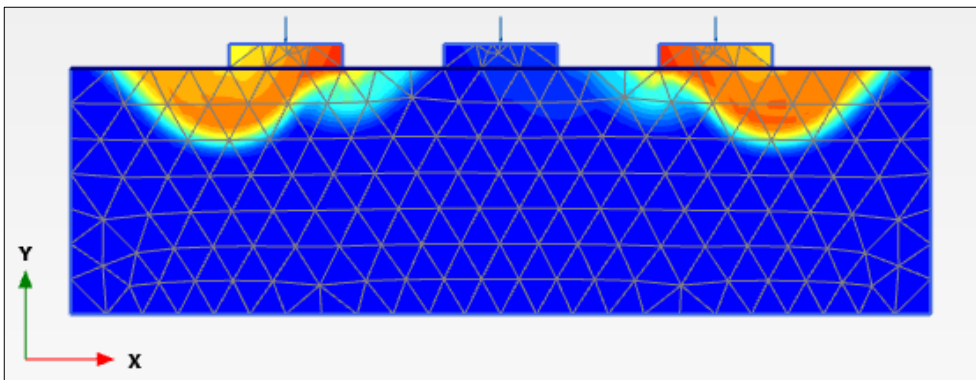


Figura 5.40. Desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ (superficie de deslizamiento aproximada) en las zapatas exteriores para la fase “Safety”

En el siguiente apartado se va a suponer que en lugar de construir un ático de 40 kN/m se coloca un quinto forjado de 140 kN/m, de forma que el terreno romperá ante esta última carga. De esta manera podremos conocer la carga de hundimiento. Guardamos el presente proyecto con un nombre adecuado.

5.3.9. Construcción de un quinto forjado en lugar de un ático

Crearemos este nuevo proyecto a partir del anterior, por lo que podemos guardar el proyecto con un nombre diferente. A continuación, nos dirigimos al modo de cálculo “*Staged Construction*”. Hacemos doble clic en la Fase 6 (anteriormente llamada “ático”) y cambiamos su nombre en la pantalla “*Phases*” (por ejemplo, “5to forjado”). Mantendremos las mismas características que tenía la fase “ático” (Figura 5.41):

General	
ID	5to forjado [Phase_6]
Start from phase	4to forjado
Calculation type	Plastic
Loading type	Staged construction
ΣM_{stage}	1,000
ΣM_{weight}	1,000
Pore pressure calculation type	Phreatic
Thermal calculation type	Ignore temperature
Time interval	0,000 day
First step	57
Last step	88
Design approach	(None)

Figura 5.41. Características generales de la nueva Fase 6 “5to forjado”

En el menú “Selection explorer”, mantenemos seleccionadas las tres cargas puntuales pero cambiaremos el valor de “ $F_{y,ref}$ ” a -700 kN/m (Figura 5.42).

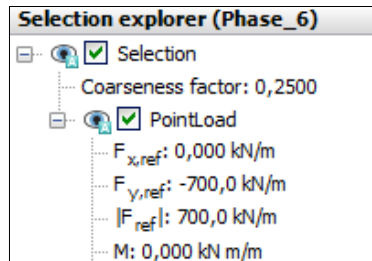


Figura 5.42. Valor de la carga puntal en la última fase de carga “5to forjado”

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

Eliminamos, de momento, la fase “Safety” que teníamos, pinchando con el botón derecho sobre la fase y seleccionando “Delete”. A continuación, procedemos a calcular.

En la Figura 5.43 se puede apreciar que los cálculos para la Fase 6 no se han podido completar, lo cual parece indicar que se ha producido la rotura del terreno en ésta nueva fase.

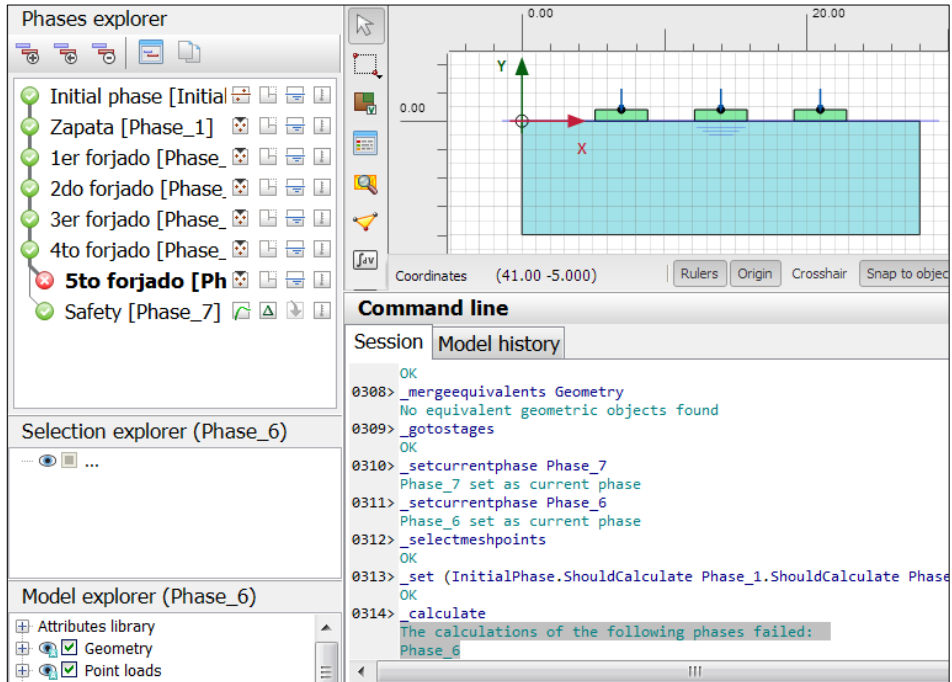


Figura 5.43. Indicación de que los cálculos han fallado en la Fase 6

Para conocer más sobre la rotura del terreno en esta nueva fase, representaremos la evolución de ΣM_{stage} respecto a los desplazamientos verticales u_y producidos en el punto A. También consultaremos el valor del factor de seguridad tras la construcción del 4to forjado.

Para esto último, vamos a crear una fase “Safety” que irá a continuación de la Fase 5 (4to forjado). Para ello, teniendo marcada la Fase 5, pulsamos “Add phase” en el menú de la izquierda “Phases explorer”. Una vez creada, pasamos a editarla tal y como se ve en la Figura 5.44.

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

General	
ID	Safety [Phase_7]
Start from phase	4to forjado
Calculation type	Safety
Loading type	Incremental multipliers
M_{sf}	0,1000
Pore pressure calculation type	Use pressures from previous pl
Thermal calculation type	Ignore temperature
First step	
Last step	
Design approach	(None)
Deformation control parameters	
Ignore undr. behaviour (A,B)	<input type="checkbox"/>
Reset displacements to zero	<input type="checkbox"/>
Reset small strain	<input type="checkbox"/>
Reset state variables	<input type="checkbox"/>
Updated mesh	<input type="checkbox"/>
Updated water pressure	<input type="checkbox"/>
Ignore suction	<input checked="" type="checkbox"/>
Cavitation cut-off	<input type="checkbox"/>
Cavitation stress	100,0 kN/m ²
Numerical control parameters	
Max cores to use	256
Max number of steps stored	50

Figura 5.44. Selección de opciones de la fase “Safety” tras el cuarto forjado

Volvemos a recalcular las fases y, una vez calculadas, nos dirigimos a “PLAXIS Output”.

La Figura 5.45 muestra los desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ en la Fase 6 (5to forjado). En ella se puede observar el mecanismo de rotura de una de las dos zapatas exteriores (en este caso, aunque el problema sea simétrico, la rotura se refleja sólo en una de las dos zapatas exteriores debido a un mecanismo interno de cálculo del programa).

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

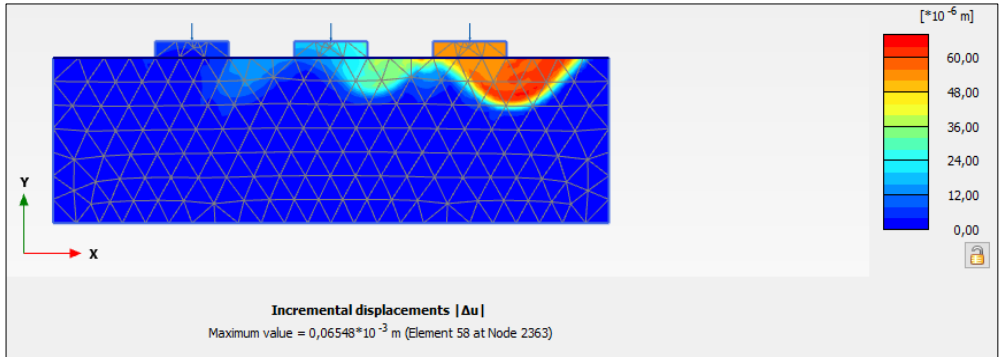


Figura 5.45. Desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ en la Fase 6 (5to forjado)

Para consultar el factor de seguridad de la Fase 5 (4to forjado), utilizamos la información proporcionada por la opción “Project”, “Calculation information” (Figura 5.46).



Figura 5.46. Factor de seguridad tras la construcción del cuarto forjado

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

En cuanto a la evolución de ΣM_{stage} , la Figura 5.47 muestra el valor que toma esta variable de proyecto frente a los desplazamientos verticales u_y producidos en el punto A (eliminar de la representación la fase “Safety”, mediante la opción “Settings”). Como veremos después, el valor de ΣM_{stage} es muy útil para conocer la carga de hundimiento del terreno:

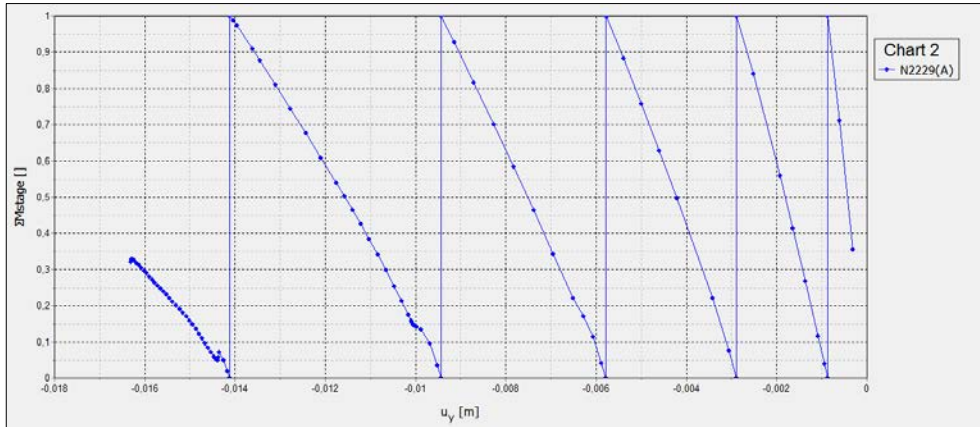


Figura 5.47. ΣM_{stage} frente a los desplazamientos verticales u_y del punto A

Como se puede observar, la última fase de carga no llega a completarse, si no que al llegar aproximadamente a un 32% de la carga del 5to forjado el terreno de cimentación rompe.

También es posible conocer el valor exacto alcanzado por ΣM_{stage} en una determinada fase (en este caso, nos interesa la Fase 6 “5to forjado”). Para ello, usamos la opción “Project”, “Calculation information” (Figura 5.48).

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

Calculation information				
Step info				
Phase	Sto forjado [Phase_6]			
Step	Initial			
Calculation mode	Classical mode			
Step type	Plastic			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	32 bit			
Extrapolation factor	1,000			
Relative stiffness	-1,897E-3			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	0,000	ΣM_{sf}	1,000
Time	Increment	0,000	End time	0,000
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	1,000
Active proportion of stage	M_{Stage}	-1,760E-3	ΣM_{Stage}	0,3193

Figura 5.48. Valor de ΣM_{stage}

Como vemos, el valor alcanzado por ΣM_{stage} en la Fase 6 de 0,3193.

Finalmente, para calcular la carga de hundimiento tenemos que:

$$\frac{Q_u}{B} = \frac{F_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}}}{B} + (\gamma_{\text{horm}} * d)$$

Siendo “B” el ancho de la zapata, “d” el canto y $F_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}}$:

$$F_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} = Q_{\text{in}} + \Sigma M_{\text{stage}} * (Q_{\text{fin}} - Q_{\text{in}})$$

Donde:

Q_{in} : carga al comienzo de la fase de fallo.

Q_{fin} : carga que se pretendía alcanzar al final de la fase de fallo.

Por lo tanto:

$$F_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} = 560 + 0,3193 * (700 - 560) = 604,7 \text{ kN/m}$$

$$\frac{Q_u}{B} = \left(\frac{604,7 \text{ kN/m}}{3,7} + 24 * 0,8 \right) = 182,63 \text{ kN/m}^2$$

5.3.10. Construcción de un quinto forjado en lugar de un ático y cimentación mediante losa

Para este nuevo proyecto podemos usar como base el archivo anterior. Puesto que lo vamos a modificar, guardamos el proyecto con un nombre diferente.

En este problema lo que se propone es aumentar la superficie de cimentación, uniendo las tres zapatas en una única losa de cimentación.

Nos dirigimos al modo de geometría “Structures”. Borramos las tres zapatas existentes (Figura 5.49) y a continuación creamos la losa, escribiendo en la línea de comando: `_polygon (5.15 0) (22.85 0) (22.85 0.8) (5.15 0.8)`, Figura 5.50.

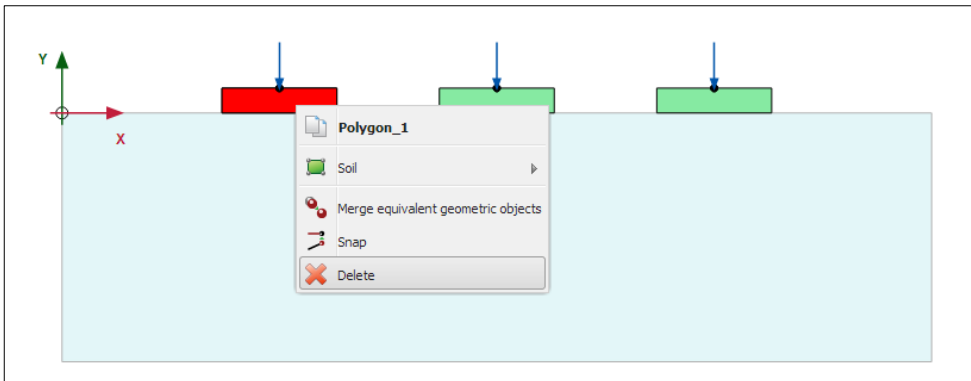


Figura 5.49. Eliminación la primera zapata, en el modo de geometría “Structures”

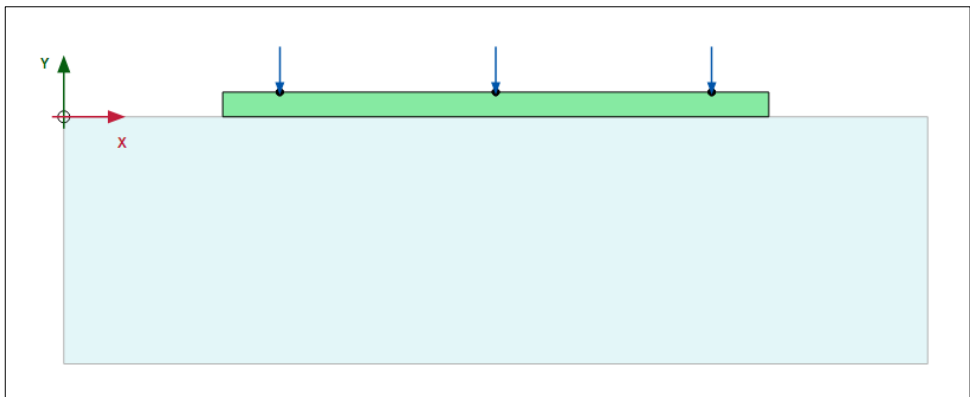


Figura 5.50. Nueva losa de cimentación

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

Una vez creada, asignaremos “Hormigón” como el material del cual está hecha la losa (Figura 5.51).

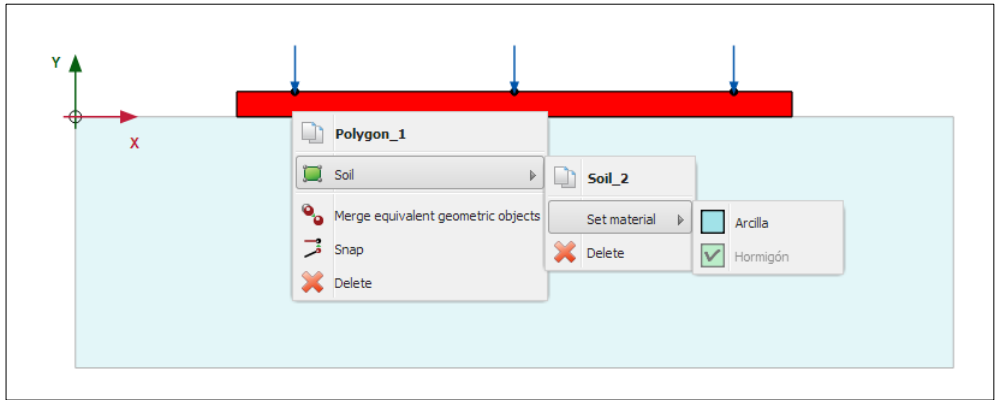


Figura 5.51. Selección de “Hormigón” como material que compone la losa

Dado que hemos modificado la geometría del problema, tenemos que volver a establecer el mallado. En el modo de cálculo “*Mesh*” procedemos a establecer la retícula del problema, indicando un mallado de tipo medio. Seleccionando el icono “*View mesh*” podemos ver el mallado creado (Figura 5.52):

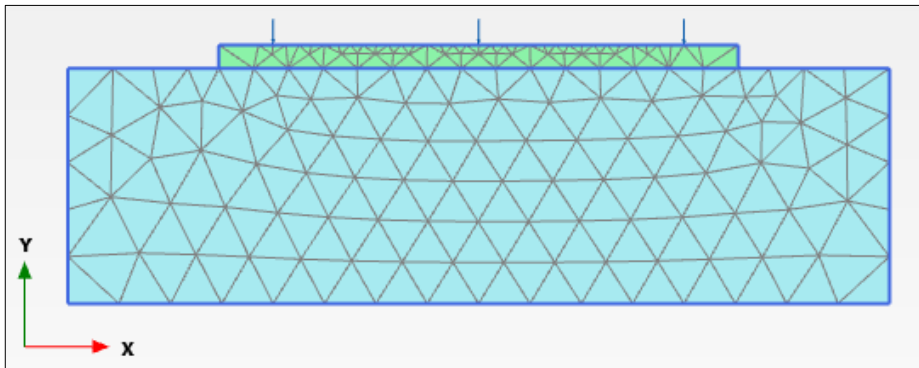


Figura 5.52. Mallado del problema con cimentación mediante losa

Las fases van a ser idénticas al problema anterior con zapata, salvo que en lugar de activar las tres zapatas a partir de la “Fase 1” (llamada anteriormente “zapata”) se activará la losa (asegurándose de que está desactivada en la fase inicial). Si lo deseamos, podemos llamar a la Fase 1 “Losa”.

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

Otra pequeña diferencia es que el estudio del factor de seguridad lo vamos a cambiar de fase. Para ello, eliminamos la fase “Safety” anterior y creamos una nueva después de la última fase (Fase 6 “5to forjado”). Esta fase safety tiene las mismas propiedades que las creadas en apartados anteriores. En la Figura 5.53 se pueden ver las diferentes fases del problema, antes de proceder a su cálculo:

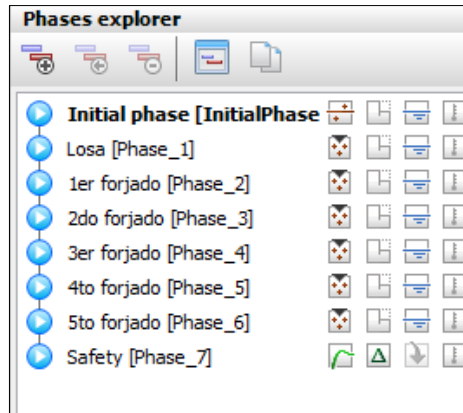


Figura 5.53. Fases del problema con cimentación mediante losa

Al contar con un mallado nuevo, debemos volver a seleccionar una serie de puntos para representar gráficos de salida avanzados. Los puntos elegidos (Figura 5.54) son muy próximos a los de los problemas anteriores, pero no tienen exactamente las mismas coordenadas ya que la retícula generada no es exactamente igual. Las coordenadas de dichos puntos se presentan en la Figura 5.55.

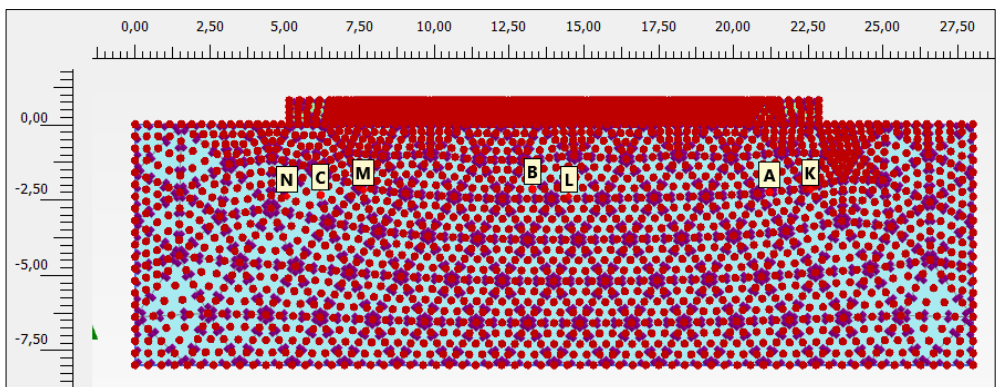


Figura 5.54. selección de puntos para gráficos de salida avanzados

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

Name	X	Y	Selected
A (Node 495)	21,20	-2,26	Pre-calc
B (Node 1463)	13,28	-2,16	Pre-calc
C (Node 2121)	6,19	-2,35	Pre-calc
K (Stress point 2546)	22,57	-2,18	Pre-calc
L (Stress point 2817)	14,48	-2,39	Pre-calc
M (Stress point 2594)	7,63	-2,19	Pre-calc
N (Stress point 2348)	5,08	-2,40	Pre-calc

Figura 5.55. Coordenadas de los puntos para gráficos de salida avanzados

Una vez realizados los cálculos podemos ver que todas las fases se han podido completar (Figura 5.56), lo cual significa que el terreno no va romper a pesar de haber construido el quinto forjado, gracias a la utilización de losa como cimentación superficial en lugar de las tres zapatas:

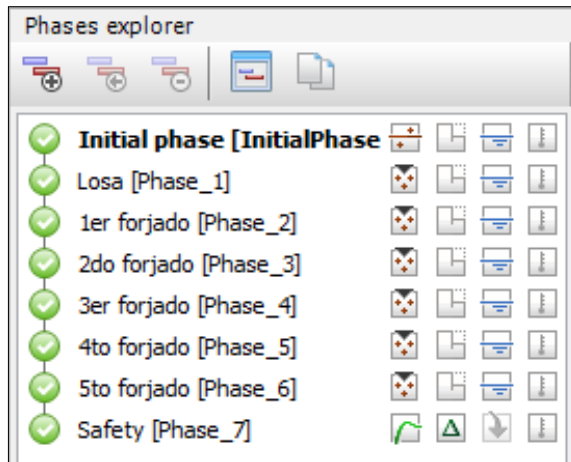


Figura 5.56. Fases del problema con cimentación mediante losa completamente calculadas

A continuación presentaremos una serie de resultados obtenidos con “PLAXIS Output”. Así por ejemplo, podemos ver los desplazamientos verticales u_y al final de la Fase 6 (con el quinto forjado ya construido) en la Figura 5.57.

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

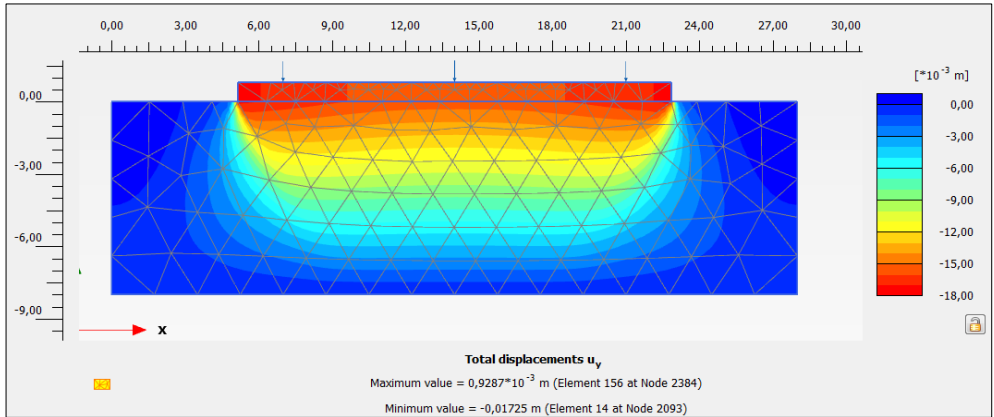


Figura 5.57. Desplazamientos verticales u_y en la Fase 6 (5to forjado)

En las Figuras 5.58 y 5.59 podemos ver los desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ en las fases 6 y safety, respectivamente. En concreto, la Figura 5.59 de la fase safety muestra un posible mecanismo de rotura, en el caso de que en la fase 6 la carga aplicada fuese superior. Podemos consultar el factor de seguridad de la fase 6 a partir de la información contenida en “Project”, “Calculation information” (tenemos que tener previamente seleccionada la fase safety, que está definida justo a continuación de la fase 6). Así, en la Figura 5.60 podemos comprobar que el valor de ΣM_{sf} es de 1,631.

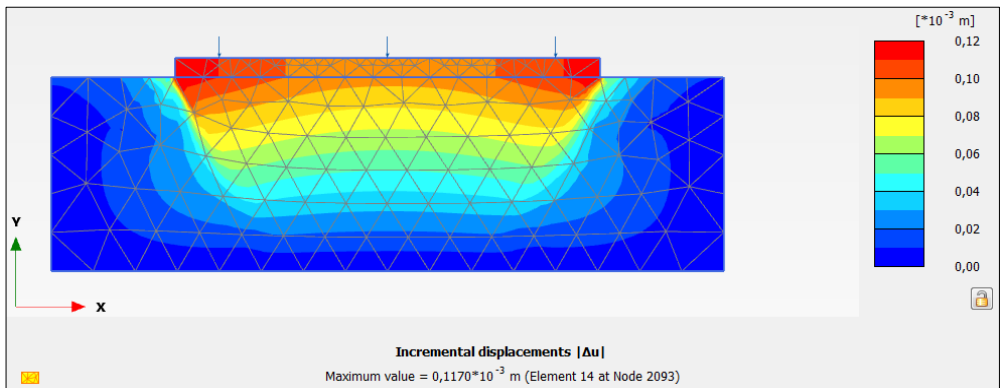


Figura 5.58. Desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ en la Fase 6 (5to forjado)

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

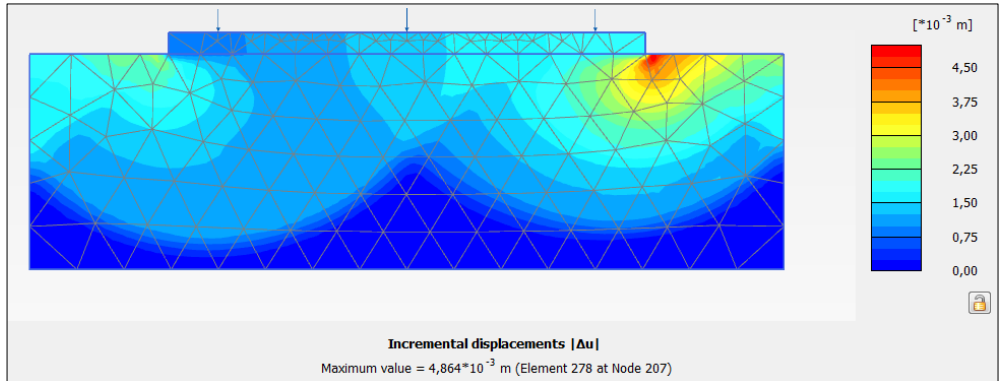


Figura 5.59. Desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ en la Fase Safety (a continuación del 5to forjado)

Step info				
Phase	Safety [Phase_7]			
Step	Initial			
Calculation mode	Classical mode			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	32 bit			
Extrapolation factor	1,000			
Relative stiffness	0,1461E-3			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	0,3131E-3	ΣM_{sf}	1,631
Time	Increment	0,000	End time	0,000
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	1,000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000

Figura 5.60. Factor de seguridad de la fase 6 (todos los forjados ya construidos)

Guardamos el proyecto.

5.3.11. Construcción de 4 forjados y un ático con cimentación mediante losa

Tomaremos como base el fichero anterior, y guardaremos el proyecto con otro nombre distinto. La única diferencia respecto al caso anterior reside en la carga aplicada en la fase 6, que en lugar de ser de -700 kN/m será de -600 kN/m . La Fase pasará a llamarse “ático” en lugar de “5to forjado”. Eliminamos la fase safety existente y creamos una nueva al final de la construcción del ático.

Podemos comprobar como los desplazamientos son menores que los mostrados en el ejemplo anterior (cinco forjados y losa de cimentación). En la Figura 5.61 se muestran los desplazamientos verticales u_y al final de la Fase 6 (con el ático ya construido).

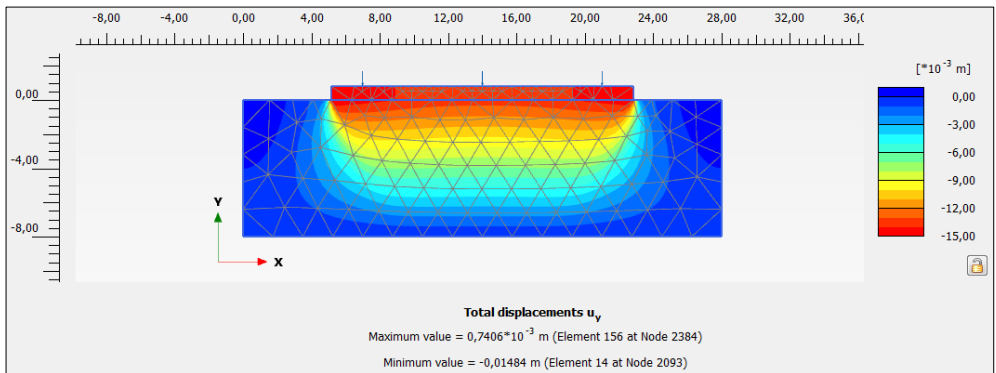


Figura 5.61. Desplazamientos verticales u_y en la Fase 6 (ático)

En las Figuras 5.62 y 5.63 podemos ver los desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ en las fases 6 y safety, respectivamente. En concreto, la Figura 5.63 de la fase safety muestra un posible mecanismo de rotura, en el caso de que en la fase 6 la carga aplicada fuese superior.

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

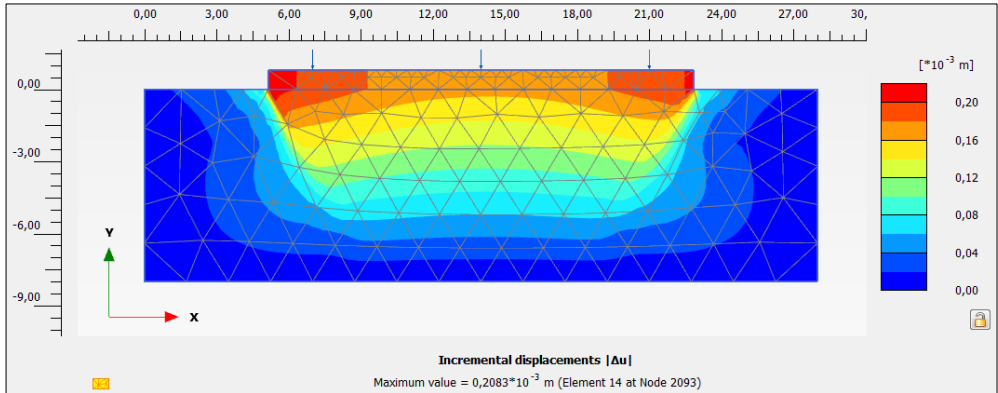


Figura 5.62. Desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ en la Fase 6 (ático)

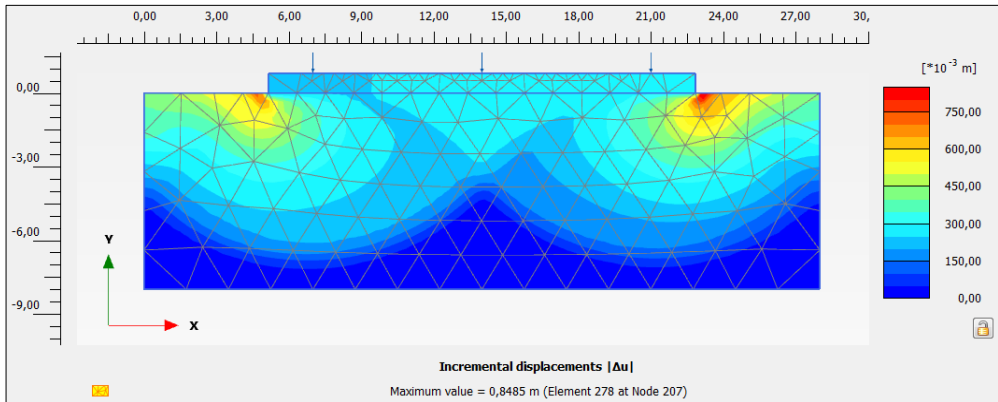


Figura 5.63. Desplazamientos incrementales totales $|\Delta u|$ en la Fase Safety (a continuación del ático)

A partir de “Project”, “Calculation information” podemos consultar el factor de seguridad de la fase 6 (tenemos que tener previamente seleccionada la fase safety, que está definida justo a continuación de la fase 6). Así, en la Figura 5.64 vemos que el valor de ΣM_{sf} es de 1,736, algo mayor al del ejemplo anterior (cinco forjados y losa de cimentación).

Ejercicio 05. Cimentaciones superficiales construidas sobre un terreno arcilloso

Calculation information				
mode	Classical mode			
:	Safety			
mesh	False			
pe	Picos			
pe	32 bit			
tion factor	1,000			
stiffness	-2,785E-9			
it				
reduction factor	M_{sf}	-4,514E-6	ΣM_{Weight}	1,000
	Increment	0,000	ΣM_{sf}	1,736
			End time	0,000
struction				
portion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	1,000
portion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000
		0,000 kN/m		
		0,000 kN/m		

Figura 5.64. Factor de seguridad de la fase 6 (ático ya construido)

Ejercicio 06

Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

6.1. INTRODUCCIÓN

Se pretende realizar una excavación de 8 metros de profundidad sobre un terreno heterogéneo, de 21 metros de espesor, el cual está formado por tres estratos bien diferenciados. Los primeros 2 metros más cercanos a la superficie están formados por arcillas. Los siguientes 9 metros son terreno arenoso. Finalmente, el tercer estrato, de 10 metros de espesor está formado por limos.

La excavación se llevará a cabo mediante muros pantalla (o pantallas diafragma, del inglés “diaphragm walls”) y tendrá una profundidad total de 8 metros. Se utilizarán anclajes para reforzar las pantallas.

El nivel freático se encuentra a 5,5 metros de profundidad respecto a la superficie del terreno. Adicionalmente, actuará una carga distribuida de valor no constante en la superficie del terreno.

Los detalles sobre la geometría completa del problema, los valores de la sobrecarga, las características de los estratos y el procedimiento de ejecución de la excavación, las pantallas y los anclajes se definirán en los siguientes apartados.

Se desea obtener, para todas las fases, los momentos flectores que actúan sobre las pantallas, los desplazamientos totales y las tensiones efectivas horizontales en el terreno. También se estudiará, para la última fase de proyecto, la red de flujo: líneas equipotenciales, presiones intersticiales, vectores de velocidad y caudal total infiltrado.

6.2 GEOMETRÍA Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL PROBLEMA

Un esquema de la geometría del problema de estudio se muestra en la Figura 6.1:

- Anchura de terreno a considerar: 75 metros.
- Anchura de la excavación: 15 metros (centrada en los 75 metros de terreno).
- Sobrecarga: tipo trapecial.
 - Primer extremo a 10,5 metros a la derecha del eje de la excavación y de valor 12 kN/m/m.
 - Segundo extremo a 25,5 metros a la derecha del eje de la excavación y de valor 4 kN/m/m.
- Profundidad de las pantallas: 12 metros.
- Fases de excavación:
 - Se retiran 2 metros y se colocan los primeros anclajes (superiores).
 - Se retiran 3,5 metros y se colocan los segundos anclajes (inferiores).
 - Se retiran los últimos 2,5 metros de terreno.
- Los anclajes tienen una longitud de 17 metros (a los que hay que sumar 4 metros de bulbo) y un ángulo de inclinación respecto al horizontal de 30°. Los materiales y características de los anclajes se definirán posteriormente.

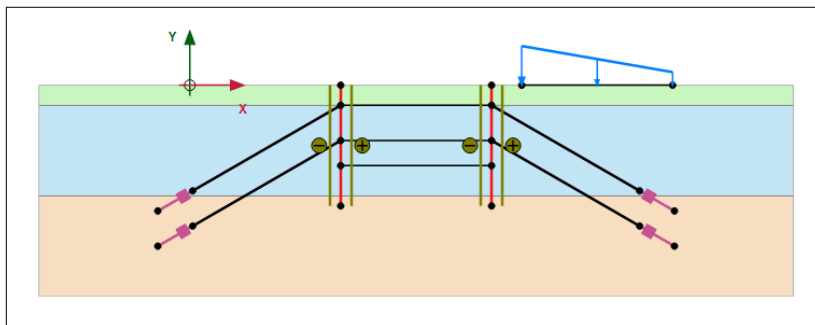


Figura 6.1. Geometría del problema en PLAXIS

En las Tablas 6.1, 6.2 y 6.3 aparecen definidos los parámetros geotécnicos del material de cada estrato.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

Parámetros geotécnicos del primer estrato (arcilla)

Material	Arcilla
Modelo constitutivo	Hardening-Soil
Comportamiento material	Drenado
Peso específico no saturado γ_{unsat}	17,5 kN/m ³
Peso específico saturado γ_{sat}	20 kN/m ³
Índice de poros inicial (e_{init})	0,5
Stiffness	
Secante (E_{50}^{ref})	21000 kN/m ²
Tangente ($E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$)	21000 kN/m ²
Descarga y recarga ($E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$)	55000 kN/m ²
Dependencia de la rigidez del nivel de esfuerzo (m)	0,5
Strength	
Cohesión efectiva referencia (c'_{ref})	7 kPa
Ángulo de rozamiento efectivo (ϕ')	35°
Ángulo de dilatancia (ψ)	0°
Advanced stiffness	
K_0 en suelo normalmente consolidado (K_0^{nc})	0,4264
Soil	
< 2 μm	46%
2 μm – 50 μm	26%
50 μm – 2 mm	28%
Flow parameters	
Conductividad hidráulica horizontal k_x	0,08 m/día
Conductividad hidráulica vertical k_y	0,08 m/día
Interfaces	
Tipo de resistencia en la interfaz (strength)	Rígido
R_{inter} (factor de reducción de resistencia)	1
Initial	
Determinación de k_0	Automático
Sobreconsolidación	
Razón de sobreconsolidación (OCR) ($\sigma'_{v,\text{max}} / \sigma'_{v,\text{actual}}$)	1
Presión previa a la sobrecarga (POP) ($\sigma'_{v,\text{max}} - \sigma'_{v,\text{actual}}$)	15 kN/m ²

Tabla 6.1. Parámetros geotécnicos del primer estrato de terreno (arcilla)

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

Parámetros geotécnicos del segundo estrato (arena)

Material	Arena
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Comportamiento material	Drenado
Peso específico no saturado γ_{unsat}	18 kN/m ³
Peso específico saturado γ_{sat}	21 kN/m ³
Stiffness	
Módulo de Young (E')	34.000 kPa
Coefficiente de Poisson (ν')	0,3
Strength	
Cohesión efectiva (c')	0 kPa
Ángulo de rozamiento efectivo (ϕ')	28°
Ángulo de dilatancia (ψ)	0°
Soil	
< 2 μ m	10%
2 μ m – 50 μ m	13%
50 μ m – 2 mm	77%
Flow parameters	
Conductividad hidráulica horizontal k_x	4,3 m/día
Conductividad hidráulica vertical k_y	4,3 m/día
Interfaces	
Tipo de resistencia en la interfaz (strength)	Manual
R_{inter} (factor de reducción de resistencia)	0,8

Tabla 6.2. Parámetros geotécnicos del segundo estrato de terreno (arena)

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

Parámetros geotécnicos del tercer estrato (limo)

Material	Limo
Modelo constitutivo	Hardening-Soil
Comportamiento material	Drenado
Peso específico no saturado γ_{unsat}	16,5 kN/m ³
Peso específico saturado γ_{sat}	19,5 kN/m ³
Índice de poros inicial (e_{init})	0,5
Stiffness	
Secante (E_{50}^{ref})	17000 kN/m ²
Tangente ($E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$)	13000 kN/m ²
Descarga y recarga ($E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$)	41000 kN/m ²
Dependencia de la rigidez del nivel de esfuerzo (m)	0,5
Strength	
Cohesión efectiva referencia (c'_{ref})	5 kPa
Ángulo de rozamiento efectivo (ϕ')	3°
Ángulo de dilatación (ψ)	0°
Advanced stiffness	
K_0 en suelo normalmente consolidado (K_0^{nc})	0,485
Soil	
< 2 μm	19%
2 μm – 50 μm	41%
50 μm – 2 mm	40%
Flow parameters	
Conductividad hidráulica horizontal k_x	0,15 m/día
Conductividad hidráulica vertical k_y	0,15 m/día
Interfaces	
Tipo de resistencia en la interfaz (strength)	Manual
R_{inter} (factor de reducción de resistencia)	0,7
Initial	
Determinación de k_0	Automático
Sobreconsolidación	
Razón de sobreconsolidación (OCR) ($\sigma'_{v,\text{max}} / \sigma'_{v,\text{actual}}$)	1
Presión previa a la sobrecarga (POP) ($\sigma'_{v,\text{max}} - \sigma'_{v,\text{actual}}$)	5 kN/m ²

Tabla 6.3. Parámetros geotécnicos del tercer estrato de terreno (limo)

6.3 Resolución del problema en PLAXIS 2D

6.3.1. Introducción de los parámetros de proyecto

Tras iniciar PLAXIS 2D (PLAXIS input), elegimos la opción “*Start a new Project*” en la pantalla emergente “*Quick select*”. En la pestaña “*Project*” nombramos el problema. En la barra de título escribimos, por ejemplo: “Excavación en terreno heterogéneo”.

Elegimos la opción “*Plane strain*”, en la pestaña “*Model*”, y elementos de 15 nodos (“*15-Noded*”). Mantenemos las unidades del programa por defecto, tal como aparecen en la Figura 6.2.

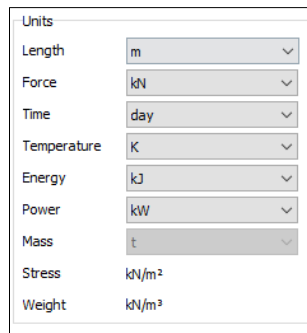


Figura 6.2. Unidades del problema en PLAXIS

Definimos el contorno escribiendo los valores que aparecen en la Figura 6.3.

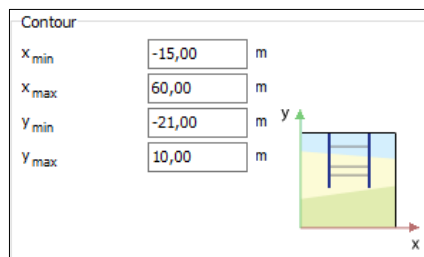


Figura 6.3. definición del contorno del problema

Mantenemos las constantes que aparecen por defecto en el programa (en la pestaña “*constants*”).

6.3.2 Definición de los materiales y de los estratos que forman el terreno

Para crear los 3 materiales de los que está formado el suelo heterogéneo, seleccionamos el icono “*Show materials*”. Seleccionamos “*New*” (set type “*Soil and interfaces*”) e introducimos los parámetros geotécnicos para la primera capa de terreno (“*Arcilla*”, Tabla 6.1).

En las Figuras 6.4 a 6.8 se pueden observar las propiedades de la “*Arcilla*”.

Property	Unit	Value
Stiffness		
E_{50}^{ref}	kN/m ²	21,00E3
E_{oed}^{ref}	kN/m ²	21,00E3
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	55,00E3
power (m)		0,5000
Alternatives		
Use alternatives		<input type="checkbox"/>
C_c		0,01643
C_s		5,645E-3
e_{init}		0,5000
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	7,000
$\varphi' (phi)$	°	35,00
$\psi (psi)$	°	0,000
Advanced		
Set to default values		<input checked="" type="checkbox"/>
Stiffness		
v'_{ur}		0,2000
p_{ref}	kN/m ²	100,0
K_0^{nc}		0,4264

Figura 6.4. Parámetros resistentes de la arcilla

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla


Soil - Hardening soil - Arcilla		
General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial		
Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Arcilla
Material model		Hardening soil
Drainage type		Drained
Colour		 RGB 68, 224, 41
Comments		
General properties		
γ_{unsat}	kN/m ³	17,50
γ_{sat}	kN/m ³	20,00

Figura 6.5. Propiedades generales de la arcilla

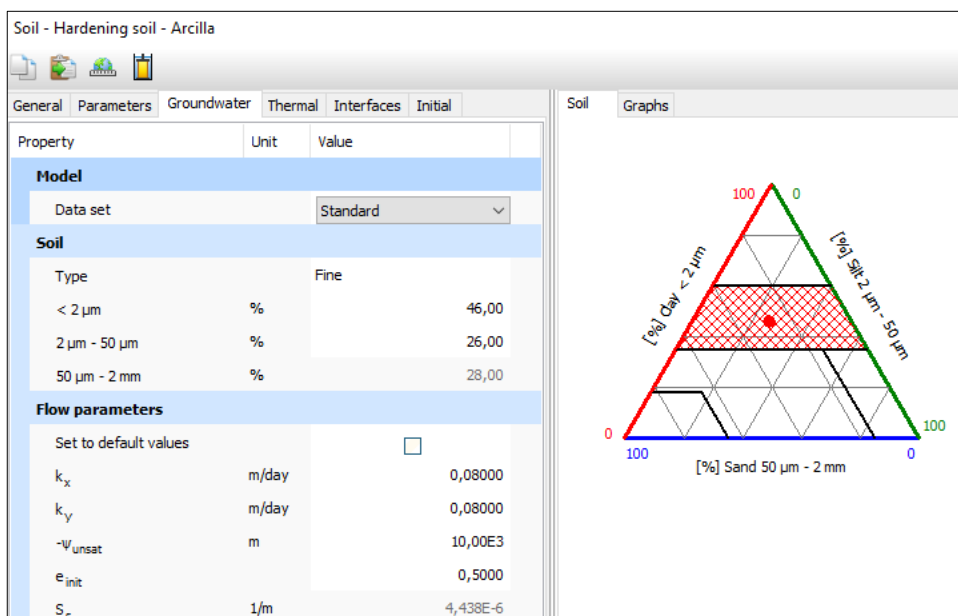


Figura 6.6. Parámetros de flujo subterráneo de la arcilla

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

Property	Unit	Value
Strength		
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		<input checked="" type="checkbox"/>
Real interface thickness		
δ_{inter}		0,000
Heat transfer		
R	$m^2 K/kW$	0,000

Figura 6.7. Configuración de las interfaces de la arcilla

Property	Unit	Value
K0 settings		
K_0 determination		Automatic
Overconsolidation		
OCR		1,000
POP	kN/m^2	15,00

Figura 6.8. Determinación de K_0 y parámetros de sobreconsolidación de la arcilla

De la misma manera crearemos el segundo estrato (“Arena”, Tabla 6.2). En las Figuras 6.9 a 6.12 se pueden observar las propiedades introducidas para la este material.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

Soil - Mohr-Coulomb - Arena

General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Arena
Material model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Drained
Colour		RGB 50, 169, 220
Comments		
General properties		
γ_{unsat}	kN/m ³	18,00
γ_{sat}	kN/m ³	21,00

Figura 6.9. Propiedades generales de la arena

Soil - Mohr-Coulomb - Arena

General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	34,00E3
ν' (ν)		0,3000
Alternatives		
G	kN/m ²	13,08E3
E_{oed}	kN/m ²	45,77E3
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	0,000
φ' (ϕ)	°	28,00
ψ (ψ)	°	0,000
Velocities		
V_s	m/s	84,42
V_p	m/s	157,9

Figura 6.10. Parámetros resistentes de la arena

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

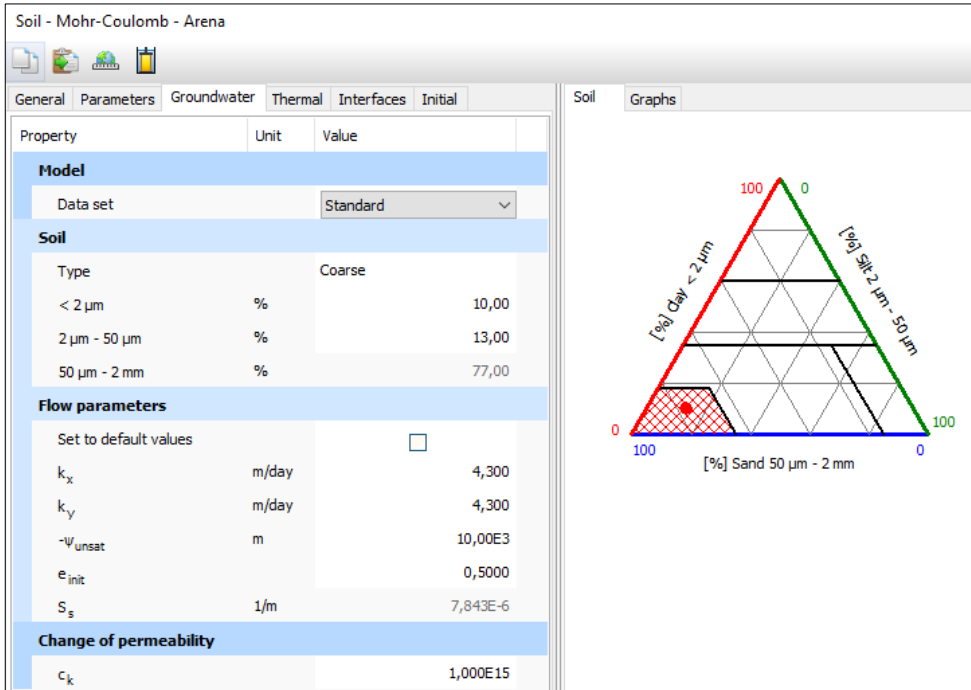


Figura 6.11. Parámetros de flujo subterráneo de la arena

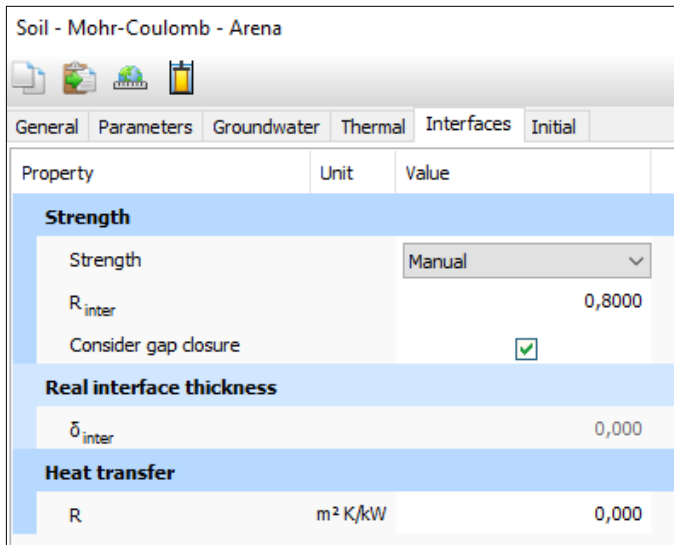


Figura 6.12. Configuración de las interfaces de la arena

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

Finalmente, creamos el tercer estrato (“Limo”, Tabla 6.3). Se trata de un material con el mismo tipo de modelo constitutivo (Hardening soil drenado) que la “Arcilla”, por lo que la introducción de los parámetros es similar.

Para definir el terreno heterogéneo en el cual se va a realizar la excavación, seleccionamos el modo de geometría “Soil”. A continuación, pinchamos en el icono “Create borehole” para crear un sondeo y seleccionamos la coordenada (0,0).

Seleccionamos “Add” para crear estrato más superficial. En “Top” escribimos 0 y en “Bottom” -2. En el desplegable “Material”, seleccionamos “Arcilla”.

Para crear el estrato intermedio, volvemos a seleccionar “Add”, escribiendo en “Top” -2 y en “Bottom” -11. En el desplegable “Material”, seleccionamos “Arena”.

Finalmente, para crear el tercer estrato, tras seleccionar “Add”, escribimos en “Top” -11 y en “Bottom” -21. En el desplegable “Material”, seleccionamos “Limo”.

Puesto el que nivel freático se encuentra a 5,5 metros de profundidad bajo la superficie del terreno, en “Head” escribimos -5,5, Figura 6.13.

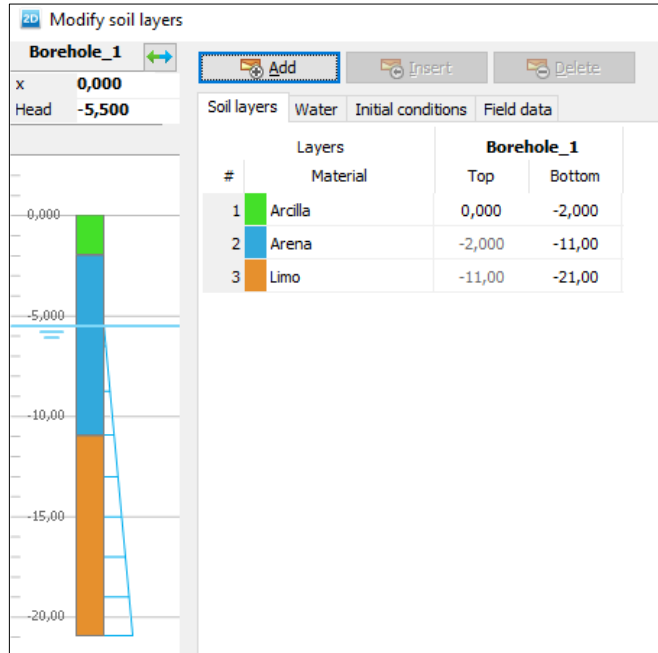


Figura 6.13. Definición de la estratigrafía del terreno en la pantalla “Modify soil layers”

En la Figura 6.14 se puede ver la geometría resultante.

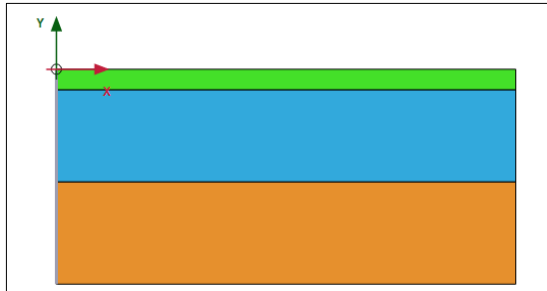


Figura 6.14. Geometría de los tres estratos sobre los que se realizará la excavación

6.3.3 Definición de las pantallas estructurales

Nos dirigimos al modo de geometría “Structures” y dibujamos las dos pantallas diafragma como placas (“Create line”, “Create plate”, Figura 6.15). Las coordenadas de cada placa están definidas en la Tabla 6.4.

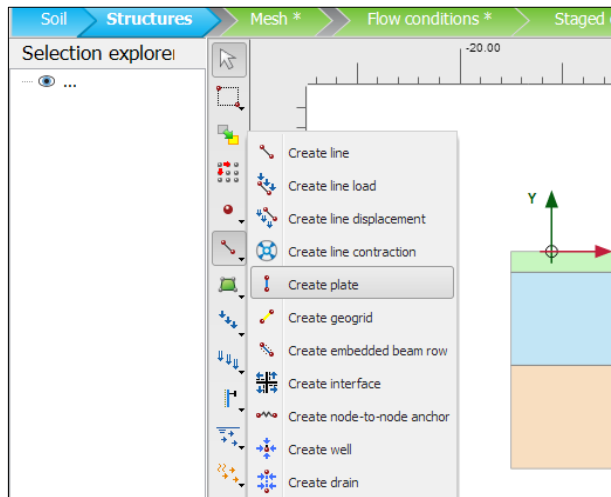


Figura 6.15. Icono de comando para la creación de placas (“Plates”)

Placa	Punto inicial	Punto final
Izquierda	(15, 0)	(15, -12)
Derecha	(30, 0)	(30, -12)

Tabla 6.4. Coordenadas de los muros pantalla

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

En la Figura 6.16 se pueden visualizar las dos placas creadas:

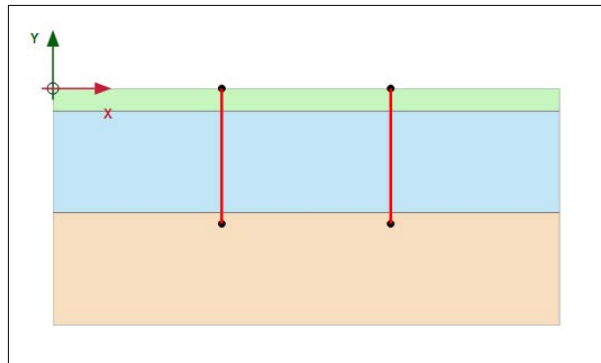


Figura 6.16. Placas creadas en el terreno

Debemos ahora crear y asignar un nuevo material para las placas. Para ello, seleccionamos las dos placas a la vez (manteniendo pulsada la tecla CTRL) y, en el menú “*Selection explorer*”, dentro de la opción “*Plate*”, seleccionamos “*New*” en la sub-opción “*Material*” (Figura 6.17).

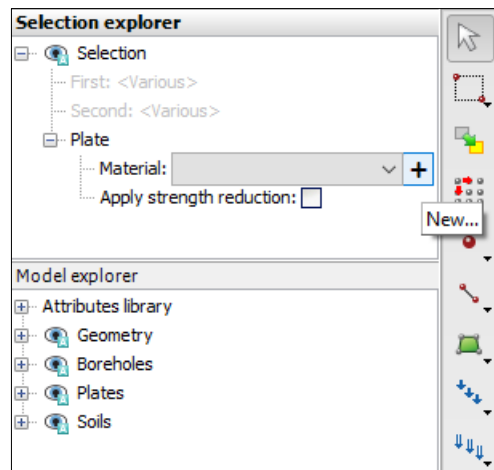
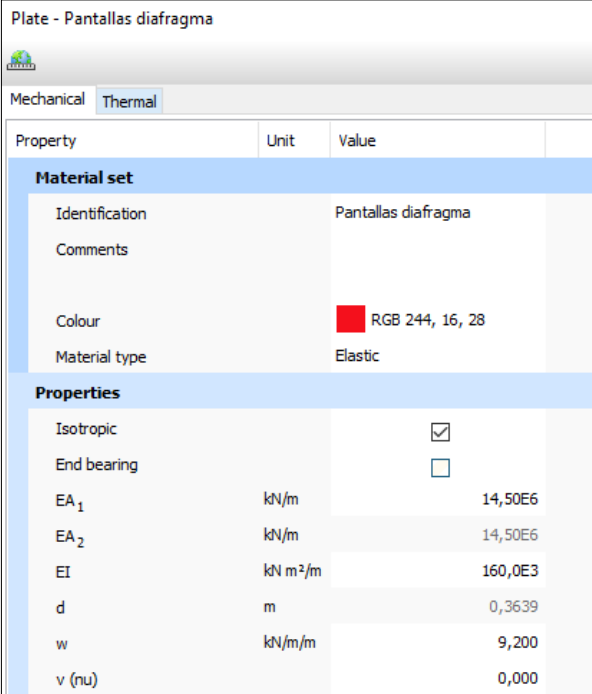


Figura 6.17. Creación de un nuevo material para las placas

Tras asignarles un nombre a este nuevo material (“Pantallas diafragma”), escribimos las propiedades mecánicas del material de las placas: tipo de material, rigidez normal (EA), rigidez a flexión (EI), peso (w) y coeficiente de Poisson (ν), Figura 6.18.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla




Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Pantallas diafragma
Comments		
Colour		 RGB 244, 16, 28
Material type		Elastic
Properties		
Isotropic		<input checked="" type="checkbox"/>
End bearing		<input type="checkbox"/>
EA ₁	kN/m	14,50E6
EA ₂	kN/m	14,50E6
EI	kN m ² /m	160,0E3
d	m	0,3639
w	kN/m/m	9,200
v (nu)		0,000

Figura 6.18. Propiedades mecánicas del material de las placas

Finalmente, en el menú “*Selection explorer*” aparecerá el nuevo material definido como material del que están formadas las placas. Véase Figura 6.19:

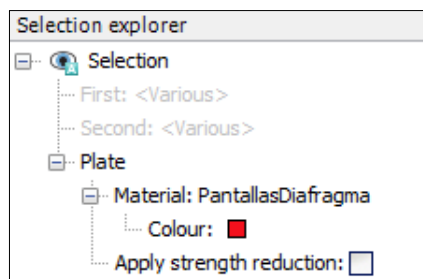


Figura 6.19. Material “Pantallas Diafragma” en el menú “*Selection explorer*”

Si deseamos editar las propiedades de este material, siempre es posible hacerlo pinchando con el botón derecho encima del material y seleccionando la opción “*Edit*” (Figura 6.20).

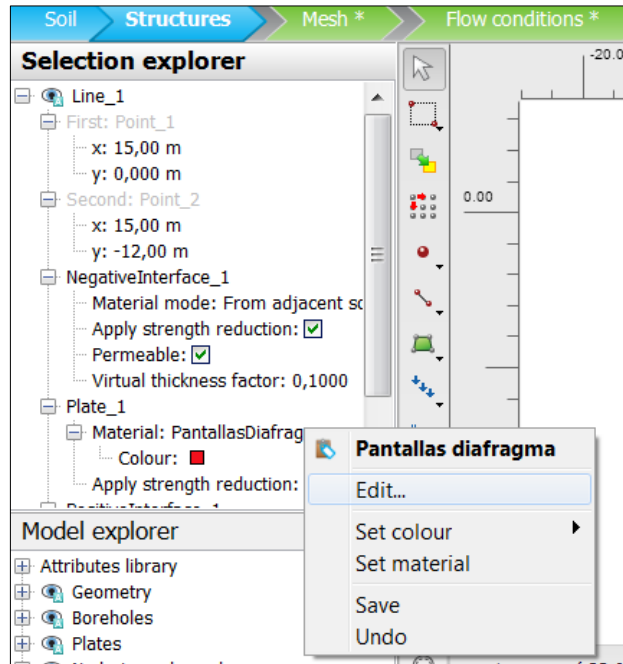


Figura 6.20. Selección para edición del material de las placas

Finalmente, es necesario crear las interfaces positiva y negativa de las placas. Gracias a éstas podemos simular la interacción entre el terreno y las placas a través del factor de reducción de resistencia definido para el material del suelo. Para ello, seleccionamos primero, por ejemplo, la placa izquierda con el botón derecho del ratón. Elegimos la opción “Create” y seguidamente pulsamos “Positive interface”. Volvemos a hacer lo mismo, pero ahora seleccionando “Negative interface”. Las interfaces positiva y negativa se habrán creado para la placa izquierda (Figuras 6.21, 6.22 y 6.23).

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

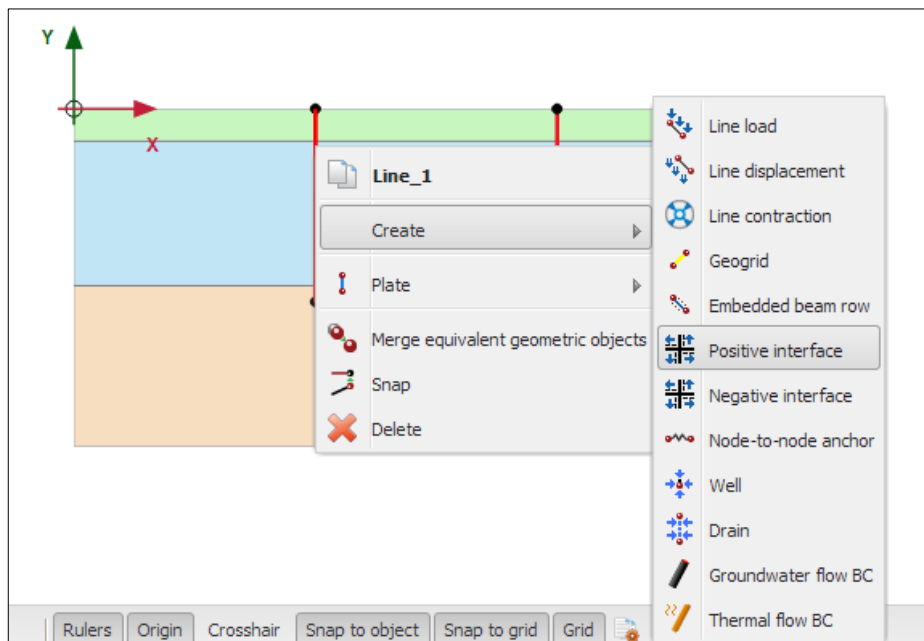


Figura 6.21. Creación de la interfaz positiva

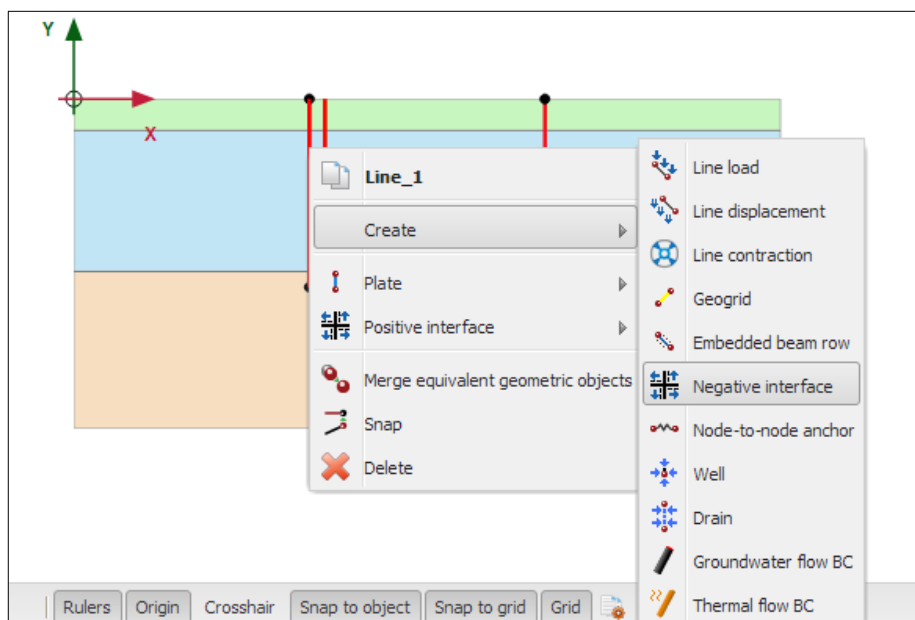


Figura 6.22. Creación de la interfaz negativa

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

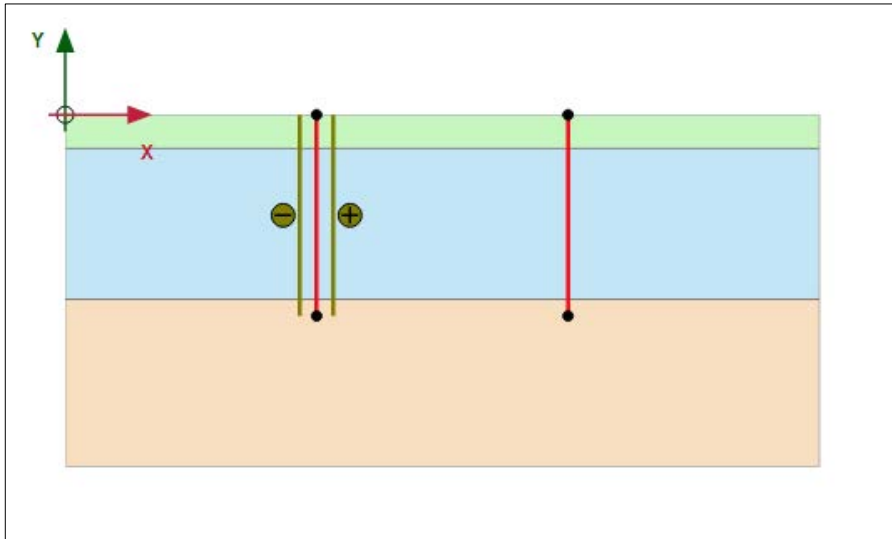


Figura 6.23. Interfaces positiva y negativa creadas para la placa izquierda

Haciendo lo mismo para la placa derecha, finalmente tendremos las interfaces creadas para ambas placas (Figura 6.24):

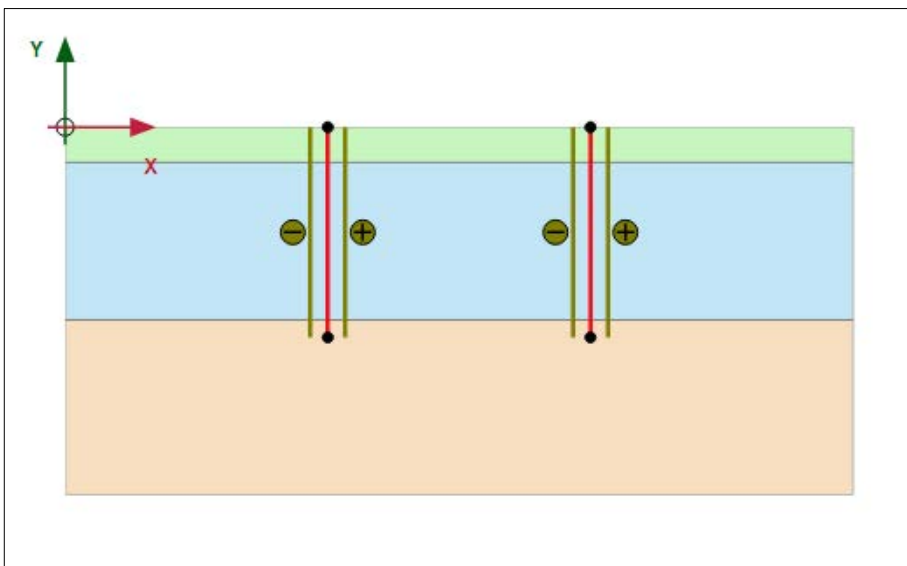


Figura 6.24. Interfaces positivas y negativas creadas para ambas placas

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

Para definir los diferentes niveles de excavación (Tabla 6.5) debemos crear tres líneas, una para cada nivel de excavación.

Nivel de excavación	Punto inicial	Punto final
1	(15, -2)	(30, -2)
2	(15; -5,5)	(30; -5,5)
3	(15, -8)	(30, -8)

Tabla 6.5. Niveles de excavación

Para ello, seleccionamos el icono “*Create line*” (opción “*Create line*”). Tras esto, podemos dibujarlas directamente en el espacio de trabajo o bien definir las escribiendo en la barra de comandos:

_line (15 -2) (30 -2)

_line (15 -5.5) (30 -5.5)

_line (15 -8) (30 -8)

6.3.4. Definición de la sobrecarga

A una distancia de 3 metros, a la derecha de la excavación (10,5 metros a la derecha del eje de la excavación), el terreno se encuentra sometido a una sobrecarga trapezoidal de la siguiente manera:

Primer extremo a 10,5 metros a la derecha del eje de la excavación y de valor 12 kN/m/m.

Segundo extremo a 25,5 metros a la derecha del eje de la excavación y de valor 4 kN/m/m.

Por lo tanto, la sobrecarga tendrá una longitud total de 15 metros.

De esta forma, crearemos una sobrecarga que vaya desde el punto (33, 0) al punto (48, 0). En su borde izquierdo, tendrá un valor de -12 kN/m/m y en su borde derecho de -4 kN/m/m.

En primer lugar, creamos la sobrecarga desde el punto (33, 0) hasta el punto (48, 0), con el comando “*Create line*”, “*Create line load*”.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

A continuación (teniendo la sobrecarga seleccionada) vamos al menú “*Selection explorer*” y en la opción “*Distribution*” escogemos “*Linear*”. Finalmente, en “ $q_{y,start,ref}$ ” escribimos -12 kN/m/m y en “ $q_{y,end,ref}$ ” escribimos -4 kN/m/m (Figura 6.25).

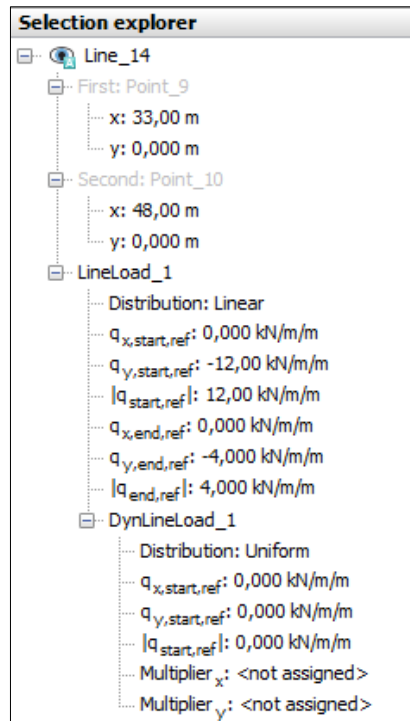


Figura 6.25. Definición de la sobrecarga distribuida de tipo lineal

6.3.5 Definición de los anclajes

Para crear los anclajes pulsamos el icono “*Create structure*” y seleccionamos la opción “*Create node-to-node anchor*” (Figura 6.26). Los anclajes tienen una longitud de 17 metros y un ángulo de inclinación respecto a la horizontal de 30°.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

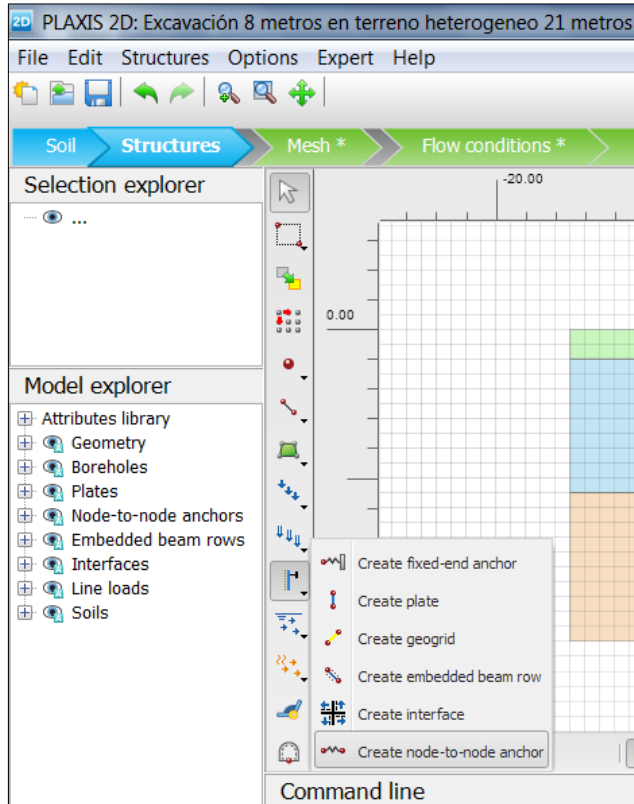


Figura 6.26. Icono de comando para la creación de un anclaje de nodo a nodo

Las coordenadas de los nudos (inicial y final) de cada anclaje están recogidas en la Tabla 6.6.

Anclaje	Primer punto	Segundo punto
1	(15, -2)	(0,28; -10,5)
2	(15; -5,5)	(0,28; -14)
3	(30, -2)	(44,72; -10,5)
4	(30; -5,5)	(44,72; -14)

Tabla 6.6. Nodos de los anclajes

Las coordenadas, si no se han introducido correctamente, se pueden modificar en el menú "Selection explorer" (Figura 6.27).

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

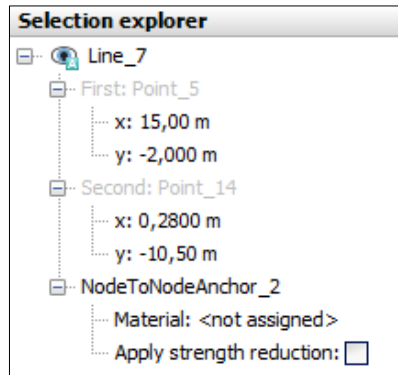


Figura 6.27. Coordenadas inicial y final de los nudos del anclaje

En la Figura 6.28 aparecen los cuatro anclajes que se han definido.

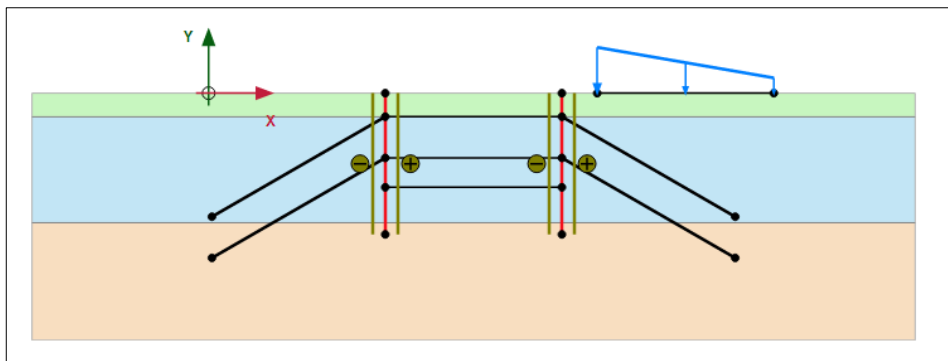


Figura 6.28. Anclajes entre el terreno y las pantallas

Ahora tenemos que crear el material del que están formados los anclajes. Nos dirigimos a “Show Materials”. En “Set type” escogemos “Anchors” (Figura 6.29). Pinchamos en “New” e introducimos el tipo de material, la rigidez normal (EA) y el espaciamiento, Figura 6.30.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

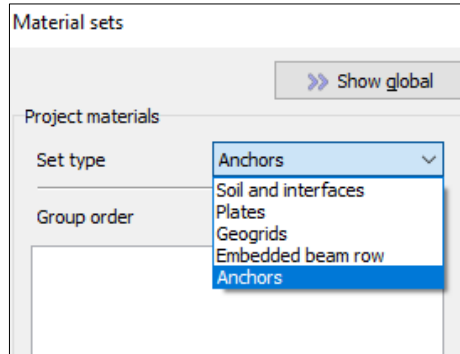


Figura 6.29. Elección del tipo “Anchors” para crear el material del que están formados los anclajes

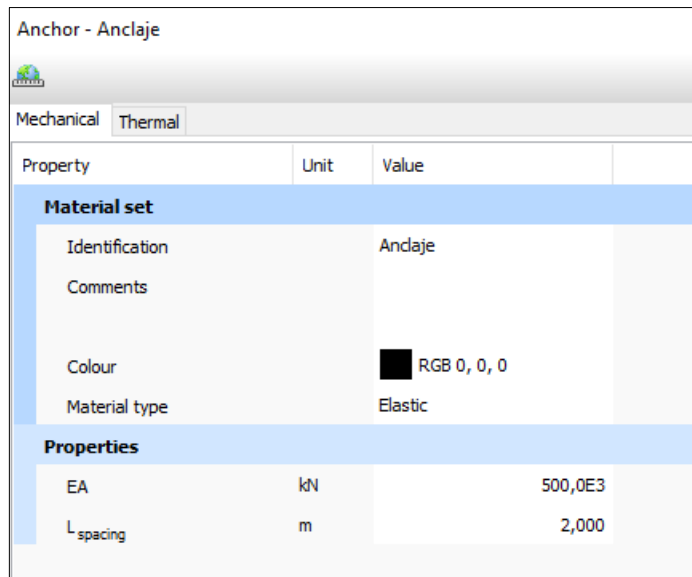


Figura 6.30. Propiedades del material de los anclajes y espaciamiento

A continuación, marcamos los cuatro anclajes a la vez y pulsamos el botón derecho del ratón. Seleccionamos “Node-to-node anchor”, “Set material” y finalmente asignamos el material “Anclaje” (Figura 6.31).

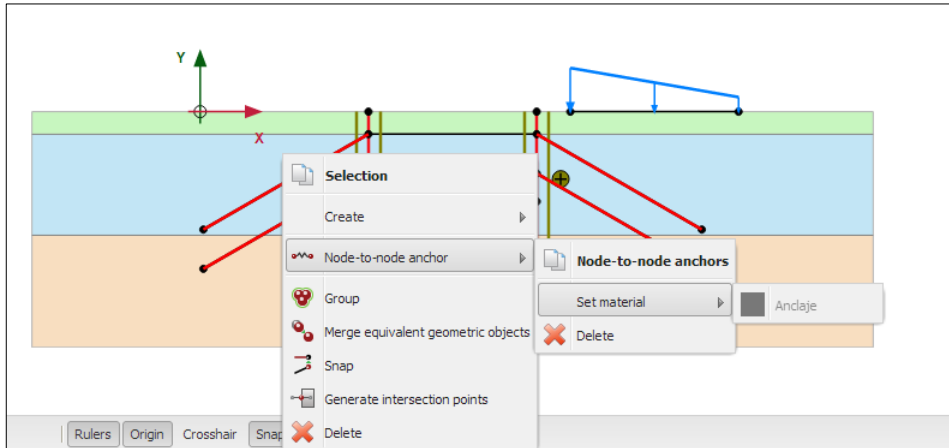


Figura 6.31. Asignación del material para los anclajes

6.3.6 Definición del material para el bulbo e introducción en el modelo

En primer lugar, definiremos el material por el que están formados los bulbos (“*Grout body*”). Para ello, nos dirigimos al menú “*Show Materials*”. En “*Set type*” escogemos “*Embedded beam row*” (Figura 6.32). Seleccionamos “*New*” e introducimos los valores para los parámetros: rigidez (E), peso unitario (γ), tipo, tipo predefinido, diámetro, espaciamiento, resistencia por fuste lineal (Axial skin resistance, T_{skin}), resistencia por punta (Base resistance, F_{max}) y el factor de rigidez en la interfaz, Figuras 6.33 y 6.34.

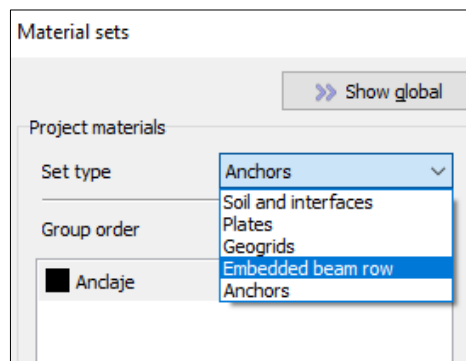


Figura 6.32. Elección del tipo “*Embedded beam row*” para crear el material del que están formados los bulbos

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla


Material set			
Identification	Grout body		
Comments			
Colour	 RGB 199, 82, 143		
Material type	Elastic		
Properties			
E	kN/m ²		8,400E6
γ	kN/m ³		0,000
Pile type	Predefined		
Predefined pile type	Massive circular pile		
Diameter	m		0,3000
A	m ²		0,07069
I	m ⁴		0,3976E-3
L _{spacing}	m		2,000
Rayleigh α	0,000		
Rayleigh β	0,000		

Figura 6.33. Propiedades del material de los bulbos y espaciamiento

Axial skin resistance			
Axial skin resistance	Linear		
T _{skin, start, max}	kN/m		500,0
T _{skin, end, max}	kN/m		500,0
Lateral skin resistance			
Lateral skin resistance	Unlimited		
Base resistance			
F _{max}	kN		0,000
Interface stiffness factor			
Default values	<input checked="" type="checkbox"/>		
Axial stiffness factor	0,6026		
Lateral stiffness factor	0,6026		
Base stiffness factor	6,026		

Figura 6.34. Propiedades del material de los bulbos (continuación)

Ahora, para crear los anclajes seleccionamos el icono “*Create structure*” y seguidamente “*Create embedded beam row*” (Figura 6.35).

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

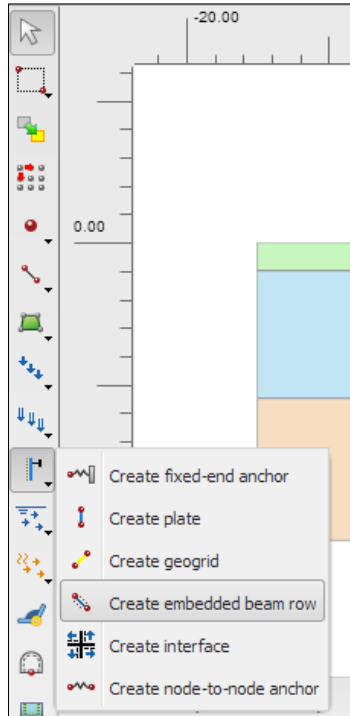


Figura 6.35. Creación del elemento estructural para el bulbo

Las coordenadas inicial y final de cada uno de los nudos de los bulbos están recogidas en la Tabla 6.7.

Anclaje	Primer punto	Segundo punto
1	(0,28; -10,5)	(-3,184; -12,5)
2	(0,28; -14)	(-3,184; -16)
3	(44,72; -10,5)	(48,184; -12,5)
4	(44,72; -14)	(48,184; -16)

Tabla 6.7. Nudos inicial y final de los bulbos

Una vez creados, les asignamos el material por el cual están formados. Para ello, pulsamos con el botón derecho del ratón sobre cada uno de ellos, asignándoles el material (“*Grout body*”), Figura 6.36.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

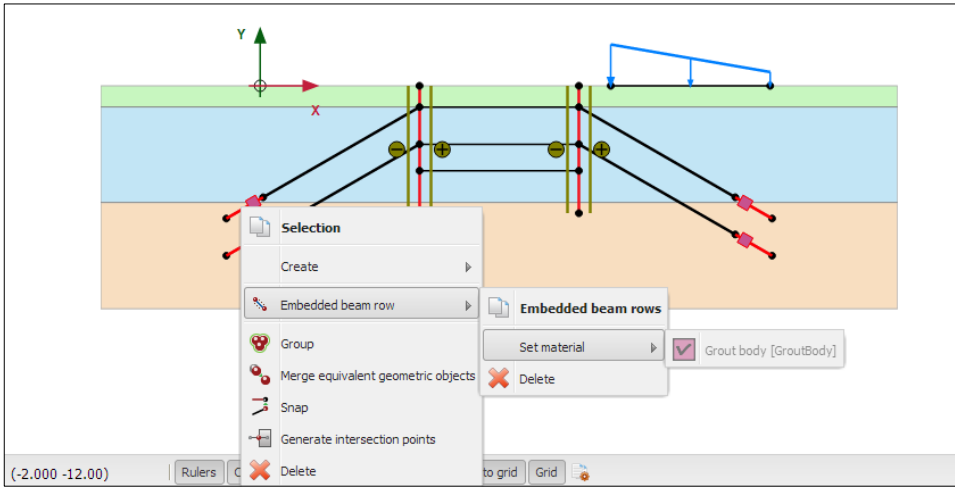


Figura 6.36. Elección de “Grout body” como material para los bulbos

Finalmente, el esquema de la excavación, antes del mallado y de definir las fases, es el siguiente (Figura 6.37):

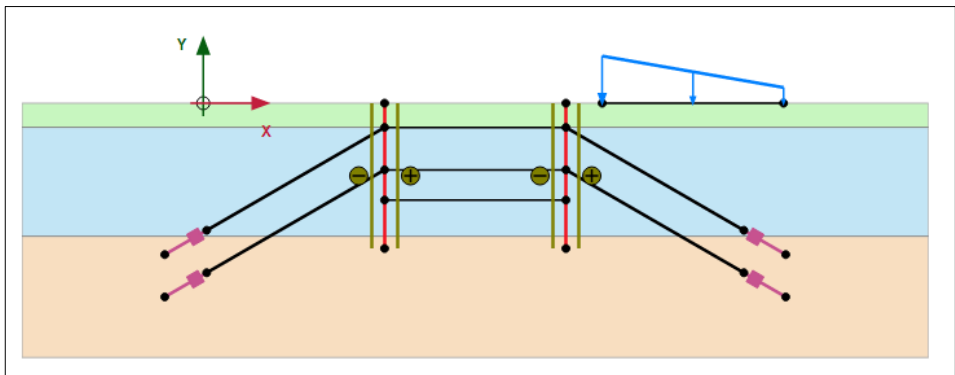


Figura 6.37. Esquema de la excavación antes del mallado

6.3.7. Mallado del problema

Seleccionamos el modo de geometría “Mesh” para mallar el terreno y pulsamos el icono “Generate mesh”. El mallado elegido será de tipo medio.

El mallado generado se puede ver en la Figura 6.38.

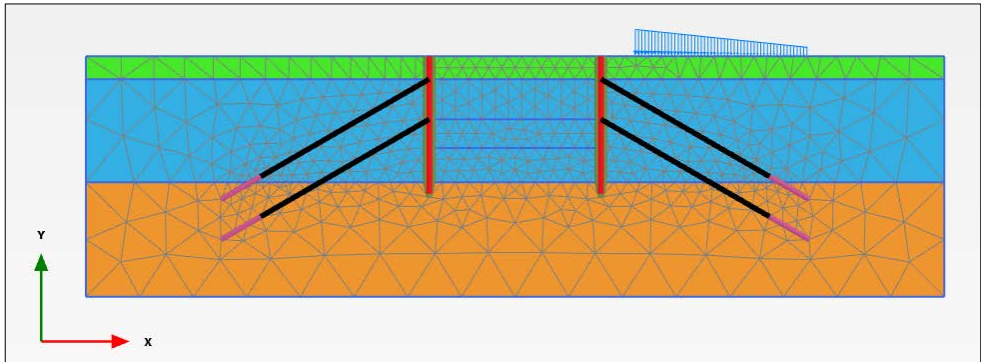


Figura 6.38. Mallado del problema de estudio

6.3.8. Fases de proyecto

La excavación está formada por 7 fases:

- Fase inicial: Sólo se considera el terreno en su estado natural.
- Fase 1: Se activan las dos pantallas, las interfaces y la sobrecarga.
- Fase 2: se excavan los dos primeros metros de terreno, es decir, el espesor arcilloso.
- Fase 3: Se activan los anclajes superiores.
- Fase 4: Se excavan los siguientes 3,5 metros arenosos.
- Fase 5: Se activan los anclajes inferiores.
- Fase 6: Excavación final de los últimos 2,5 metros.

Para definir la fase inicial, en el menú “*Phases explorer*” hacemos doble click en “Initial Phase”. Como “*Calculation type*” elegimos la opción “*K0 procedure*”. En “*Loading type*” mantenemos “*Staged construction*”. Finalmente, “*Phreatic*” es la opción elegida para “*Pore pressure calculation type*”. Véase Figura 6.39.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

Name	Value
General	
ID	Initial phase [InitialPhase]
Calculation type	K0 procedure
Loading type	Staged construction
ΣM weight	1,000
Pore pressure calculation type	Phreatic
Thermal calculation type	Ignore temperature
Estimated end time	0,000 day
First step	
Last step	
Design approach	(None)
Deformation control parameters	
Updated water pressure	<input type="checkbox"/>
Ignore suction	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 6.39. Configuración de la Fase inicial

Hacemos click en “Add” para crear la Fase 1 (tipo “Plastic”). El nombre de la fase puede ser: “Pantallas e interfaces”. En esta fase se deben activar los dos muros pantalla, así como sus interfaces (nótese que al haber subdividido el terreno con varias líneas, para separar las distintas fases de excavación, tanto las pantallas como las interfaces también se han subdividido), Figura 6.40. Activamos también la sobrecarga.

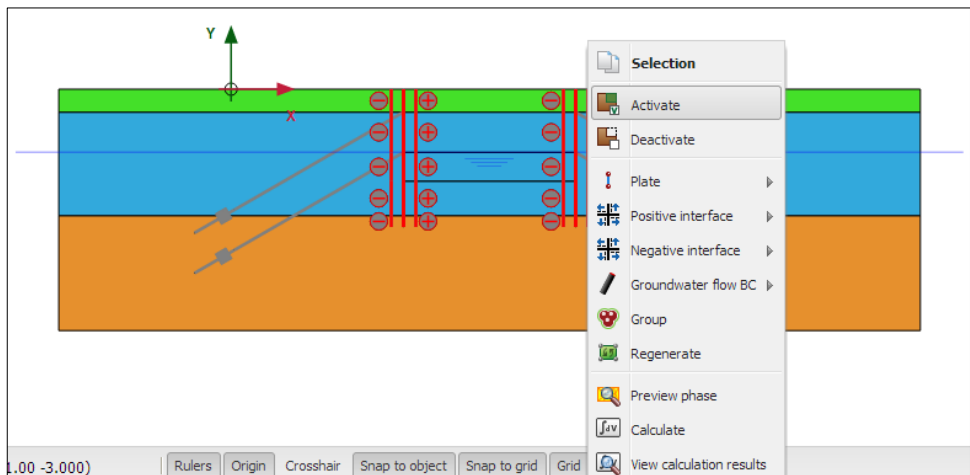


Figura 6.40. Activación de los muros pantalla y de las interfaces

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

Hacemos click en “Add” para crear la Fase 2 (tipo “Plastic”). Desactivamos el primer estrato de la excavación (Figura 6.41):

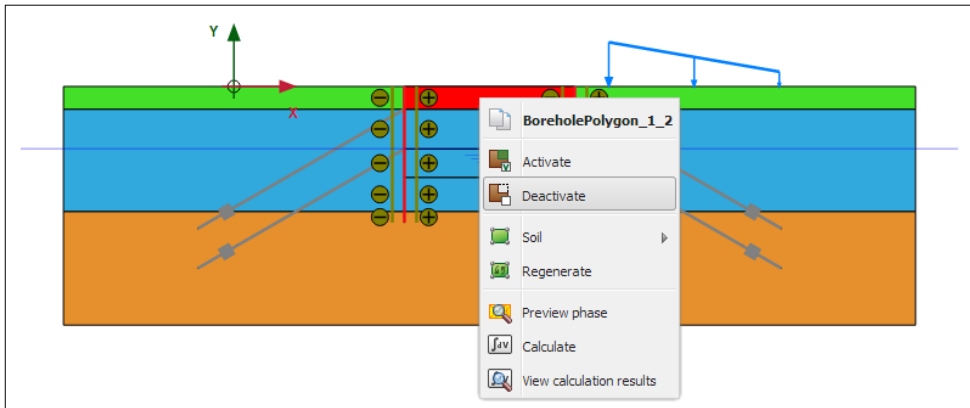


Figura 6.41. Desactivación de la primera capa de excavación (arcilla)

Para la fase 3 (tipo “Plastic”), activamos los dos anclajes superiores (Figura 6.42).

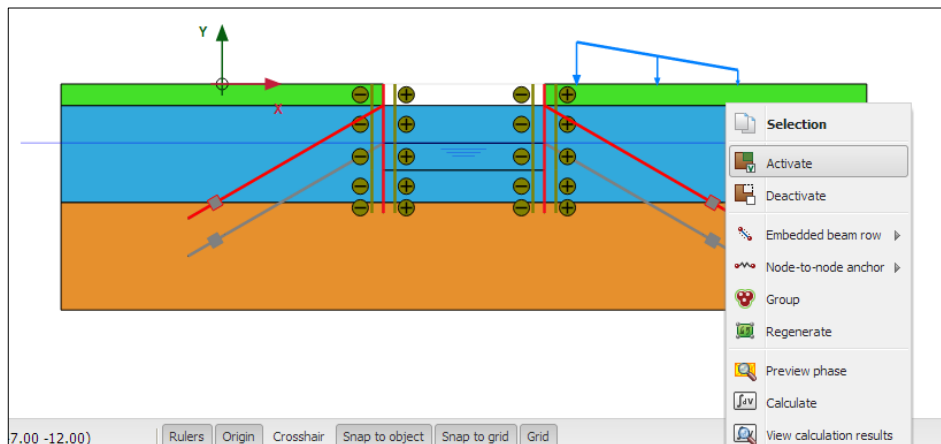


Figura 6.42. Activación de los anclajes superiores

A continuación, vamos a aplicar a cada uno de los anclajes una fuerza de tesado*. Para ello, en el menú “Selection explorer” pulsamos “Adjust Prestress” y en “ $F_{prestress}$ ” escribimos 550 kN (Figura 6.43).

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

* **NOTA:** este valor de la fuerza de tesado sólo se aplicará en la fase en la que se encuentra definido. Para el resto de fases sucesivas, su valor aumentará o disminuirá dependiendo del desarrollo de las fuerzas y tensiones circundantes.

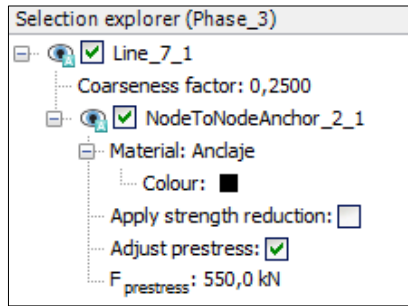


Figura 6.43. Ajuste de la fuerza de tesado de un anclaje superior

En la fase 4 (tipo “Plastic”), desactivamos el primer nivel de arenas, de 3,5 metros de profundidad, Figura 6.44.

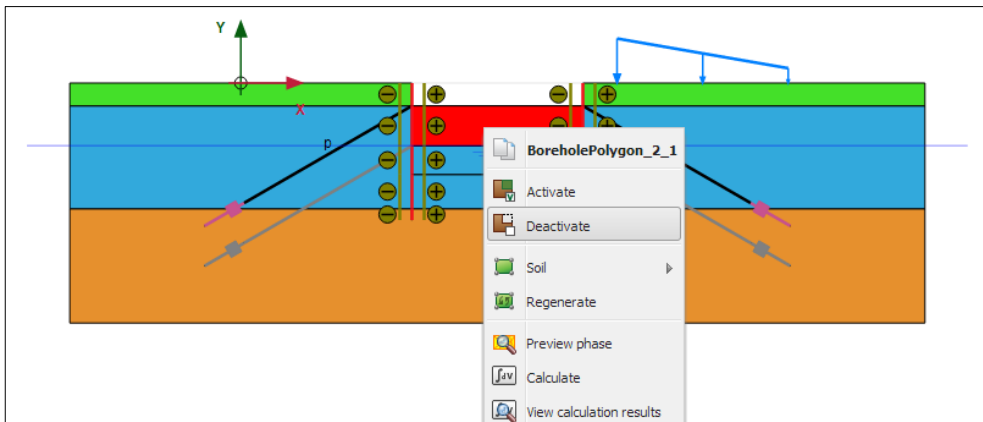


Figura 6.44. Desactivación de la segunda capa de excavación (3,5 metros de arena)

En la fase 5 (tipo “Plastic”), activamos los dos anclajes inferiores (Figura 6.45) y en el menú “Selection explorer” marcamos “Adjust Prestress”. Finalmente, asignamos una valor de 1100 kN a “F_{prestress}” a cada uno de los anclajes inferiores, Figura 6.46.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

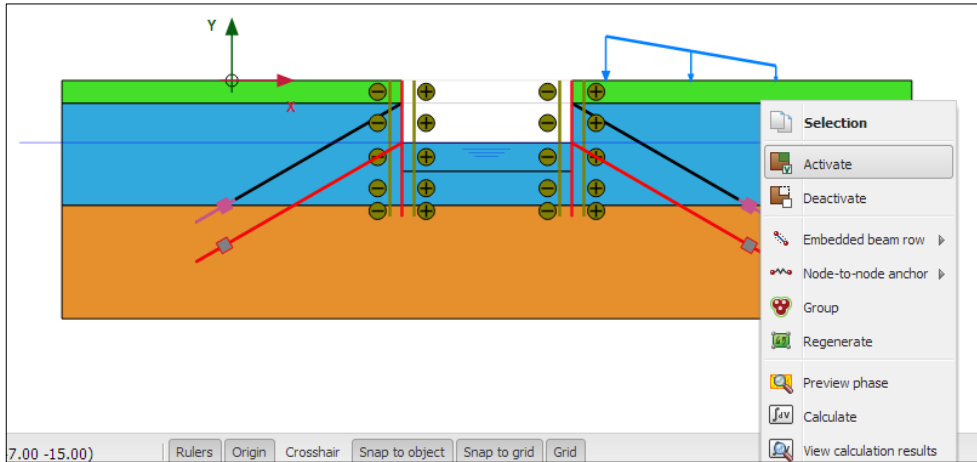


Figura 6.45. Activación de los anclajes inferiores

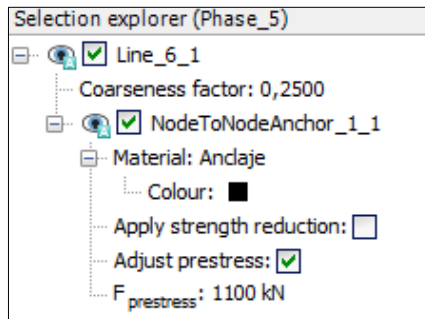


Figura 6.46. Ajuste de la fuerza de tesado de un anclaje inferior

Finalmente, para la fase 6 (tipo “Plastic”) debemos cambiar la opción “Pore pressure calculation type” a “Steady state groundwater flow” (Figura 6.47), pues esta última etapa de excavación rebasará el nivel freático inicial.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

General	
ID	Excavación final [Phase_6]
Start from phase	Andajes inferiores
Calculation type	Plastic
Loading type	Staged construction
Σ _{stage}	1,000
Σ _{weight}	1,000
Pore pressure calculation type	Steady state groundwater flow
Thermal calculation type	Ignore temperature
Time interval	0,000 day
Estimated end time	0,000 day
First step	
Last step	
Design approach	(None)

Figura 6.47. Configuración de la fase 6 (excavación final)

A continuación, desactivamos los últimos 2,5 metros de la excavación (Figura 6.48):

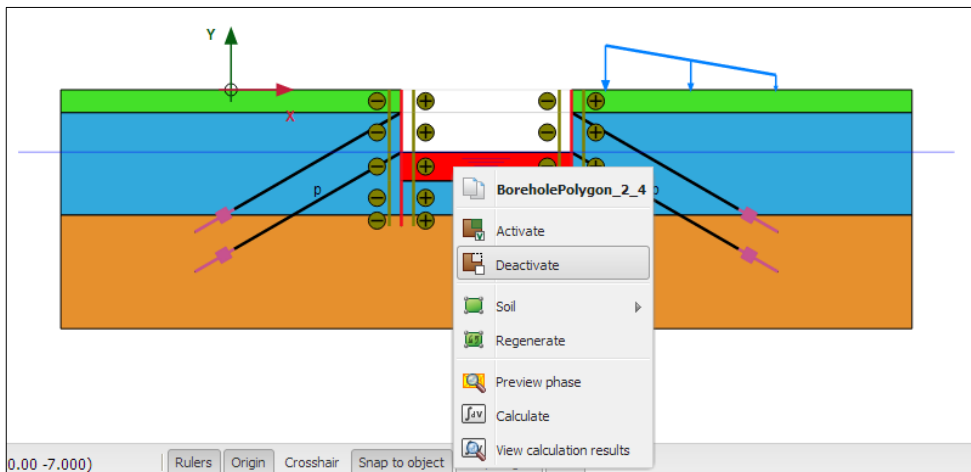


Figura 6.48. Desactivación de la tercera capa de excavación (2,5 metros de arena)

Nos dirigimos al modo de cálculo “*Flow conditions*”. En el menú “*Model explorer*” expandimos “*Attributes library*” y a continuación “*Water levels*”.

Seleccionamos en la barra vertical de herramientas “*Create water level*” (Figura 6.49):

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

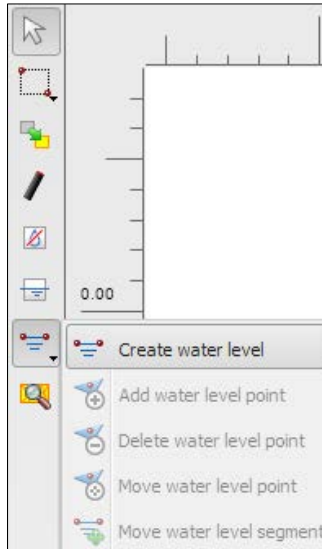


Figura 6.49. Creación de un nivel freático

El nuevo nivel freático irá desde el punto (-15; -5,5) hasta el (60; -5,5), pasando por (15, -8) y por (30, -8), (Figura 6.50).

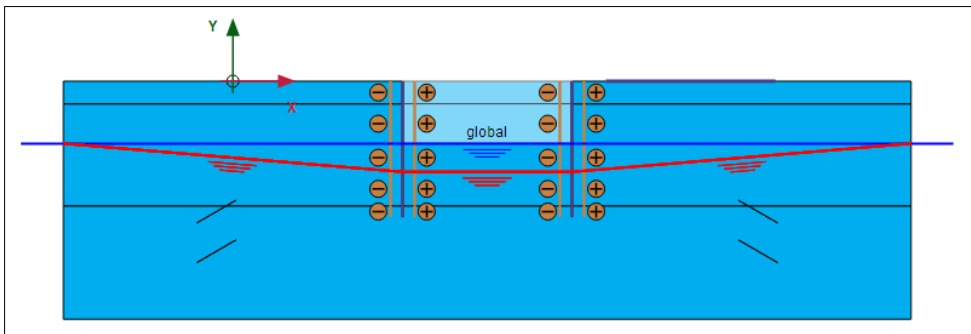


Figura 6.50. Nuevo nivel freático creado

Expandimos el árbol “Water levels” y “User water levels”. Haciendo doble click en “UserWaterLevel_1” lo renombramos a “Nivel_freático_inferior” para una mejor identificación (Figuras 6.51 y 6.52).

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

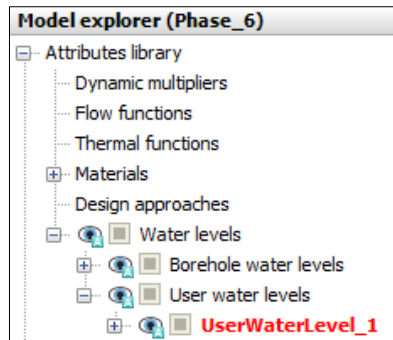


Figura 6.51. Selección del nivel de agua creado por el usuario

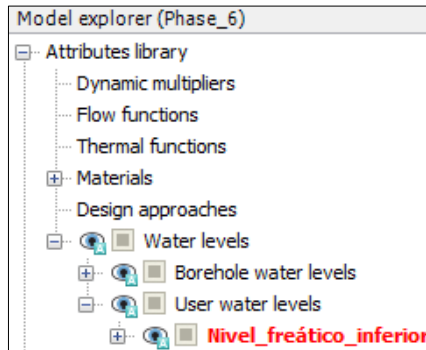


Figura 6.52. Cambio de nombre del nivel de agua creado por el usuario

Finalmente, en el menú “*Model explorer*” expandimos “*Model conditions*” y a continuación “*Water*”. Cambiamos el valor de “*GlobalWaterLevel*” a “*Nivel_freático_inferior*” (Figura 6.53).

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

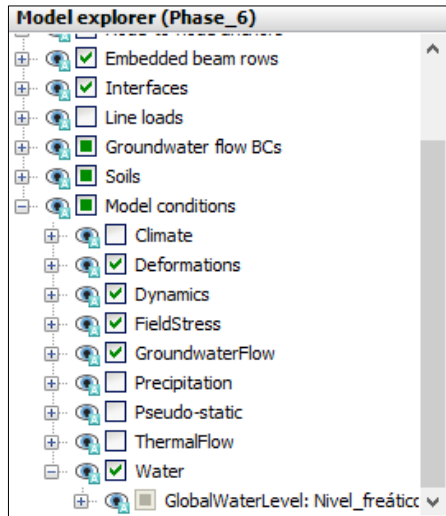


Figura 6.53. Definición del nivel freático creado (“Nivel_freático_inferior”) como nivel de agua global (“GlobalWaterLevel”)

El modelo y el nivel de agua definido para la fase 6 se muestran en la Figura 6.54.

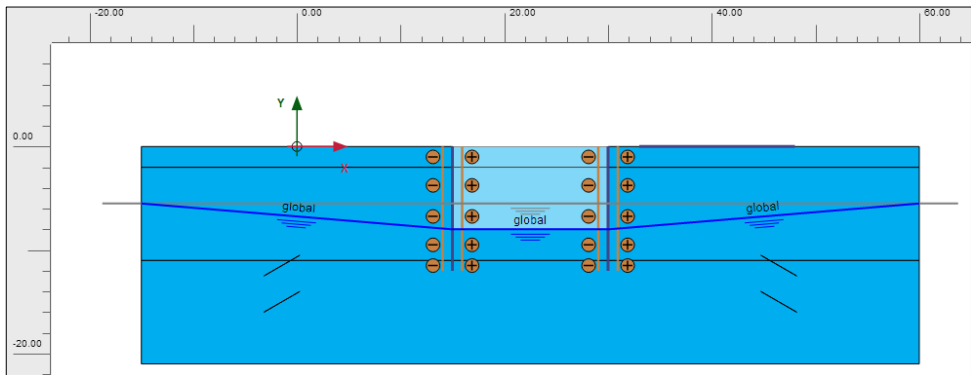


Figura 6.54. Configuración de la fase 6 en el mode de cálculo “Flow conditions”

Antes de proceder a los cálculos, podemos elegir una serie de puntos (Figuras 6.55 y 6.56) para representar, si lo deseamos, gráficos de salida avanzados.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

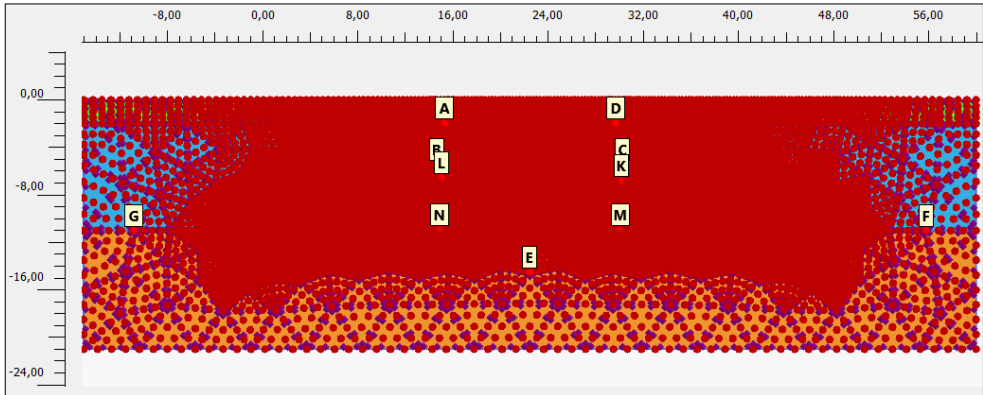


Figura 6.55. Puntos elegidos para gráficos de salida avanzados

Name	X	Y	Selected
A (Node 3104)	15,00	-2,00	Pre-calc
B (Node 2850)	15,00	-5,50	Pre-calc
C (Node 8267)	30,00	-5,50	Pre-calc
D (Node 8428)	30,00	-2,00	Pre-calc
E (Node 4170)	22,50	-14,56	Pre-calc
F (Node 5620)	55,78	-11,00	Pre-calc
G (Node 1357)	-10,78	-11,00	Pre-calc
K (Stress point 6...)	30,15	-6,83	Pre-calc
L (Stress point 7...)	15,07	-6,59	Pre-calc
M (Stress point 6...)	30,08	-10,94	Pre-calc
N (Stress point 4...)	14,92	-10,94	Pre-calc

Figura 6.56. Coordenadas de los puntos elegidos para gráficos de salida avanzados

Una vez definidas todas y cada una de las fases, pulsamos el icono “*Calculate*” para realizar los cálculos. Cuando estos hayan terminado, pulsando “*View calculation results*” accedemos a “*PLAXIS Output*” para visualizar los resultados.

6.3.9. Resultados del problema

En primer lugar, se van a representar los momentos flectores actuantes sobre cada una de las pantallas y para cada fase.

Para ello, seleccionamos el icono “*Structural forces in volumes*” (Figura 6.57) y con el ratón pinchamos en los puntos inicial (30, 0) y final (30, -12) de la pantalla de la

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

derecha. También es posible introducir los puntos a partir de la ventana “Center line points” (Figura 6.58). De esta última manera procederíamos así:

“Point #1”: damos a X el valor de 30, a Y el valor de 0. Pulsamos “Add”.

“Point #2”: damos a X el valor de 30, a Y el valor de -12. Pulsamos “Add”. Pulsamos “Ok” (Sin llegar a añadir el siguiente punto).

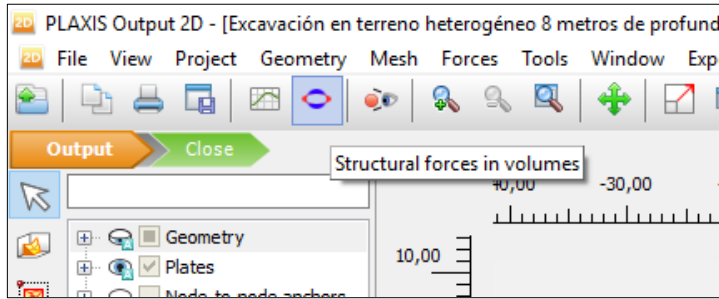


Figura 6.57. Selección de la opción “Structural forces in volumes”

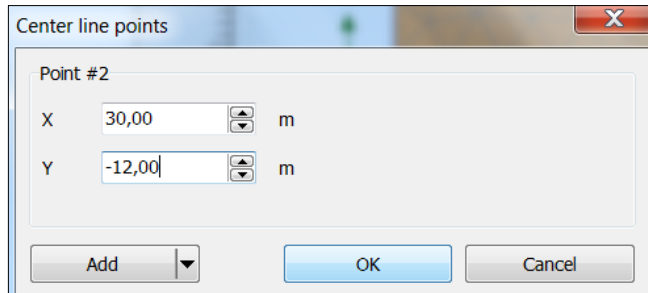


Figura 6.58. Definición del segundo punto de la pantalla de la derecha para visualización de los momentos flectores

En las Figuras 6.59 a 6.64 se pueden ver los momentos flectores “ M ” actuantes en la pantalla de la derecha, para cada fase. También es posible visualizar los axiles “ N ” y cortantes “ Q ” a través de la opción “Forces”, Figura 6.65.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

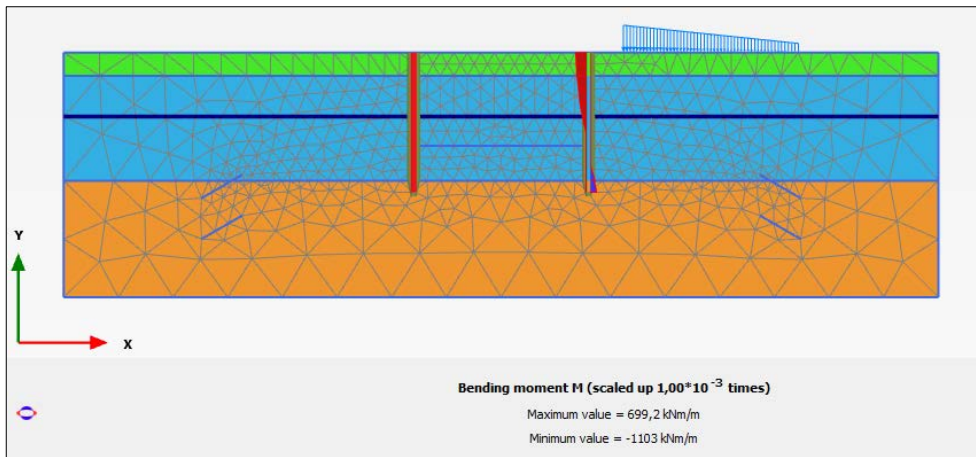


Figura 6.59. Momentos flectores sobre la pantalla derecha en la Fase 1

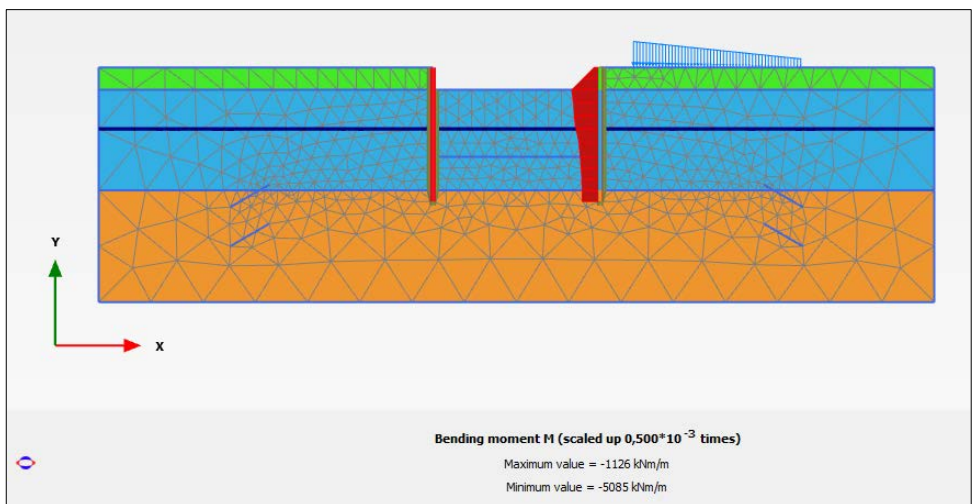


Figura 6.60. Momentos flectores sobre la pantalla derecha en la Fase 2

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

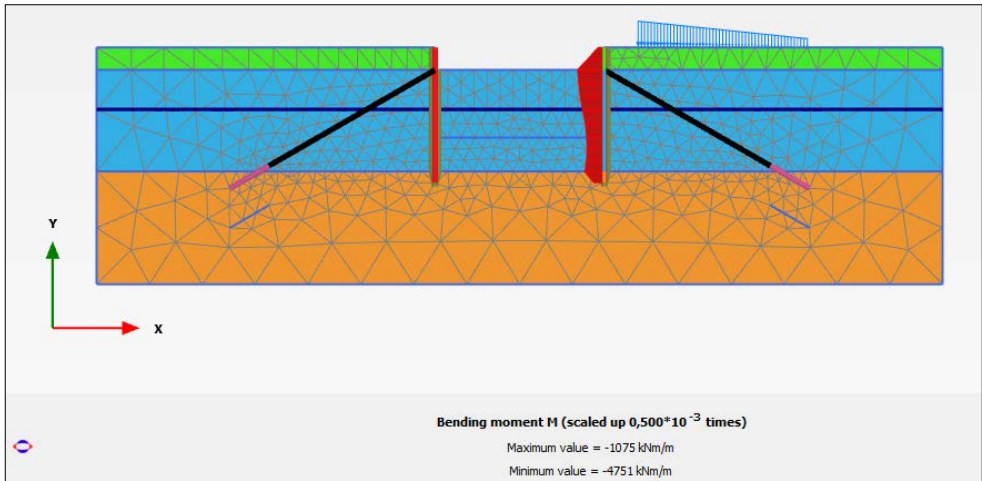


Figura 6.61. Momentos flectores sobre la pantalla derecha en la Fase 3

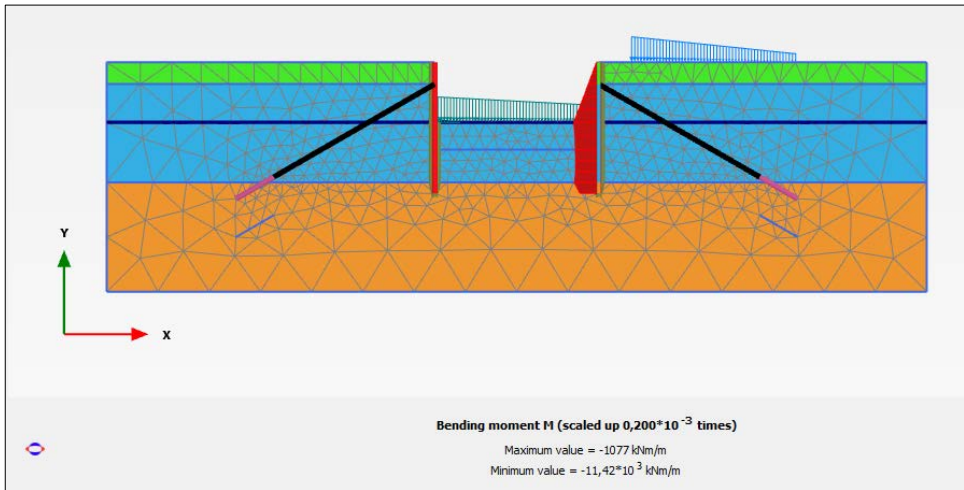


Figura 6.62. Momentos flectores sobre la pantalla derecha en la Fase 4

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

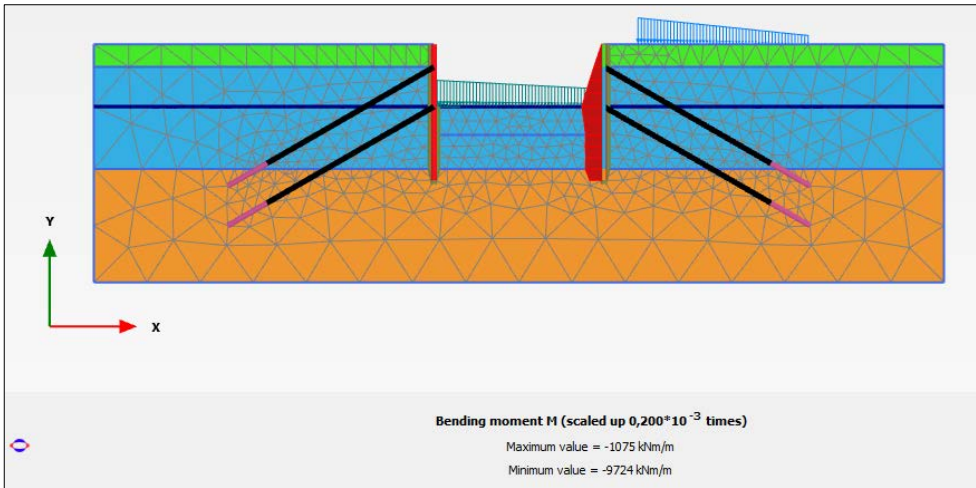


Figura 6.63. Momentos flectores sobre la pantalla derecha en la Fase 5

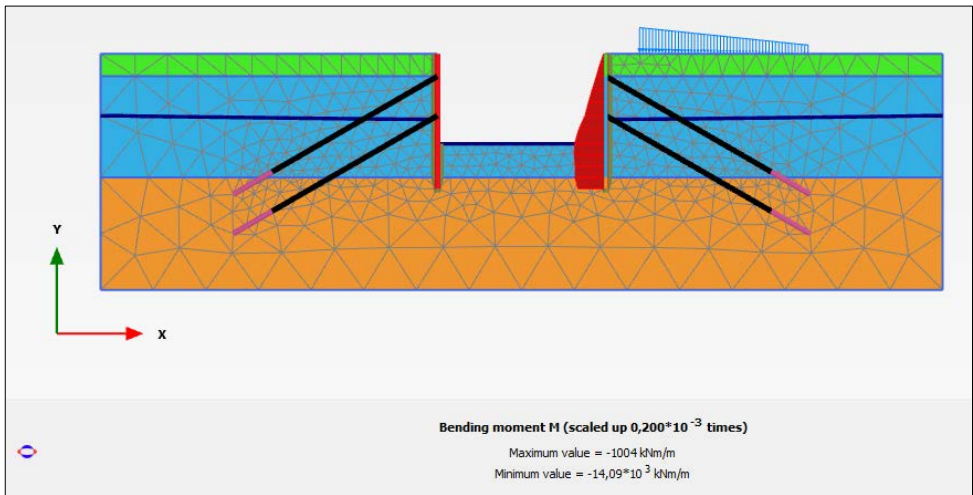


Figura 6.64. Momentos flectores sobre la pantalla derecha en la Fase 6

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

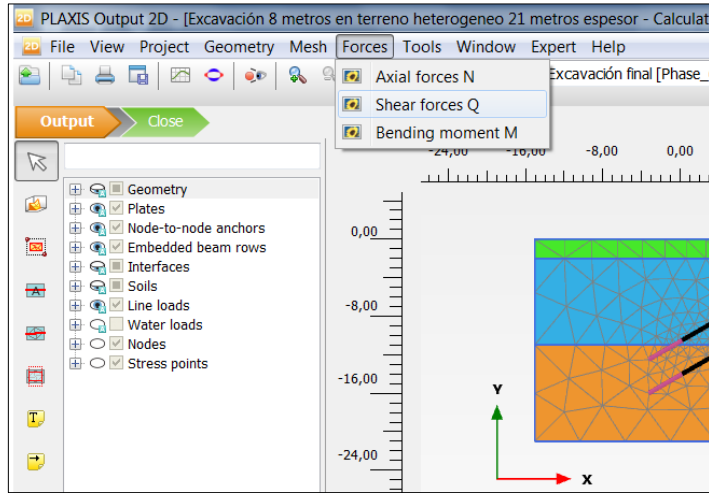


Figura 6.65. Selección de axiles “N”, cortantes “Q” o momentos flectores “M” como esfuerzos a representar

En las Figuras 6.66 a 6.71 se pueden ver los momentos flectores actuantes sobre la pantalla de la izquierda.

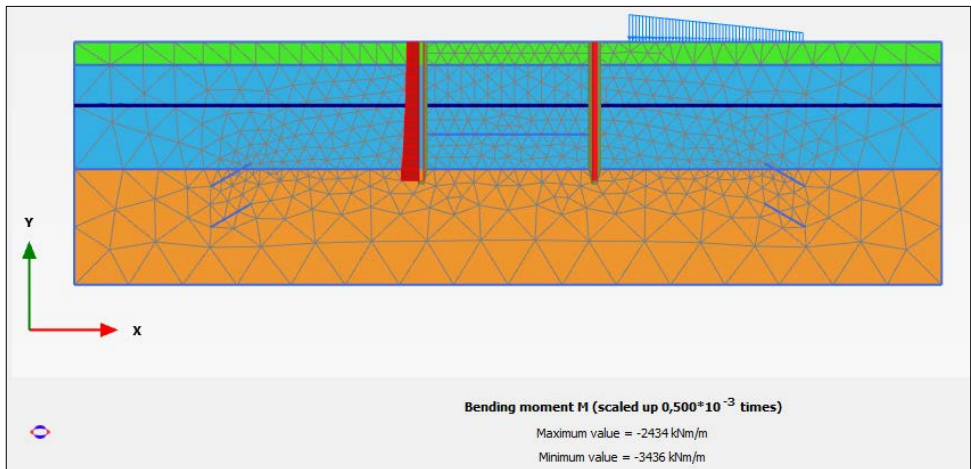


Figura 6.66. Momentos flectores sobre la pantalla izquierda en la Fase 1

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

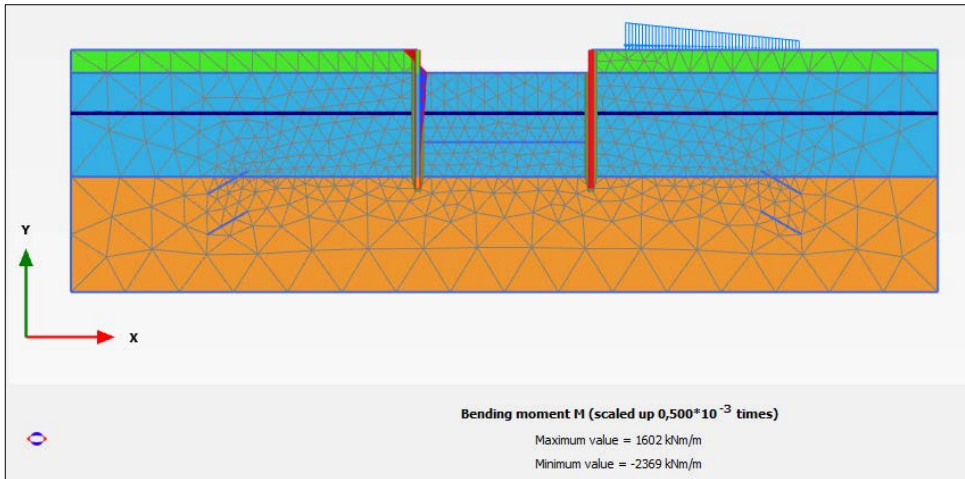


Figura 6.67. Momentos flectores sobre la pantalla izquierda en la Fase 2

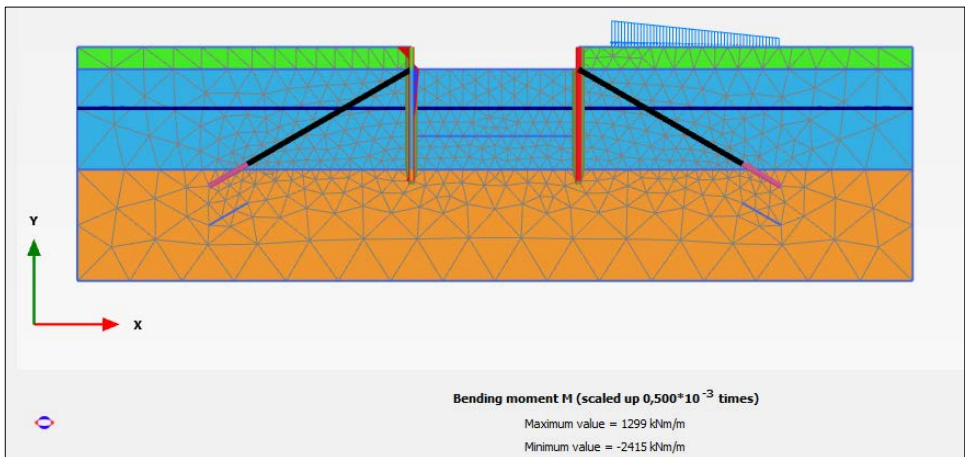


Figura 6.68. Momentos flectores sobre la pantalla izquierda en la Fase 3

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

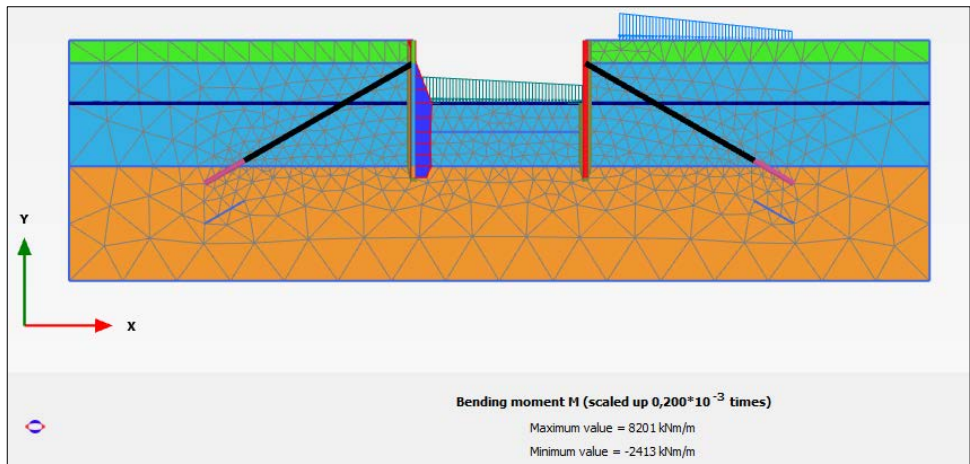


Figura 6.69. Momentos flectores sobre la pantalla izquierda en la Fase 4

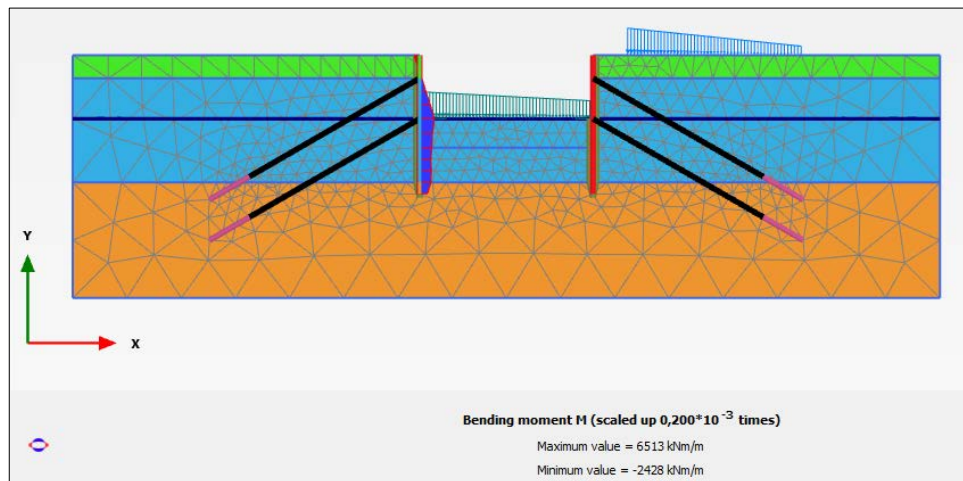


Figura 6.70. Momentos flectores sobre la pantalla izquierda en la Fase 5

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

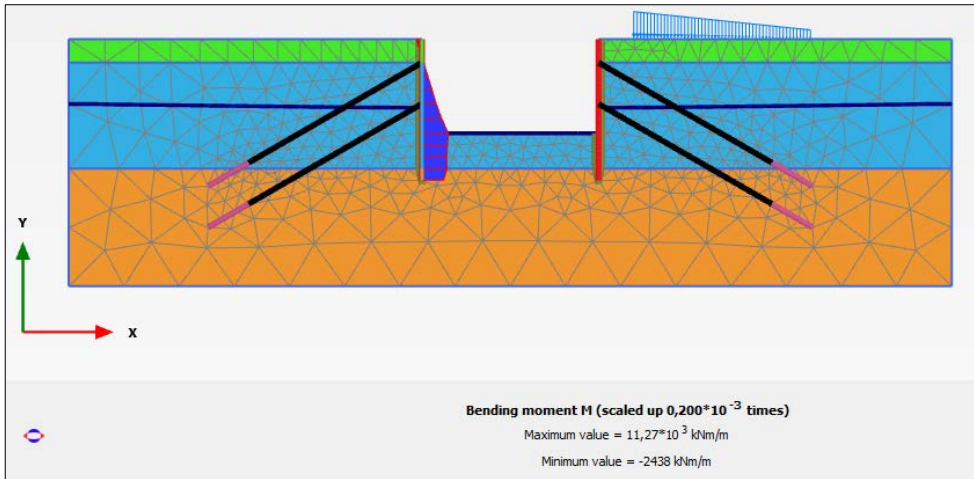


Figura 6.71. Momentos flectores sobre la pantalla izquierda en la Fase 6

En las Figuras 6.72, 6.73 y 6.74 se pueden ver los desplazamientos totales $|u|$ del terreno en las Fases 1, 3 y 6, respectivamente.

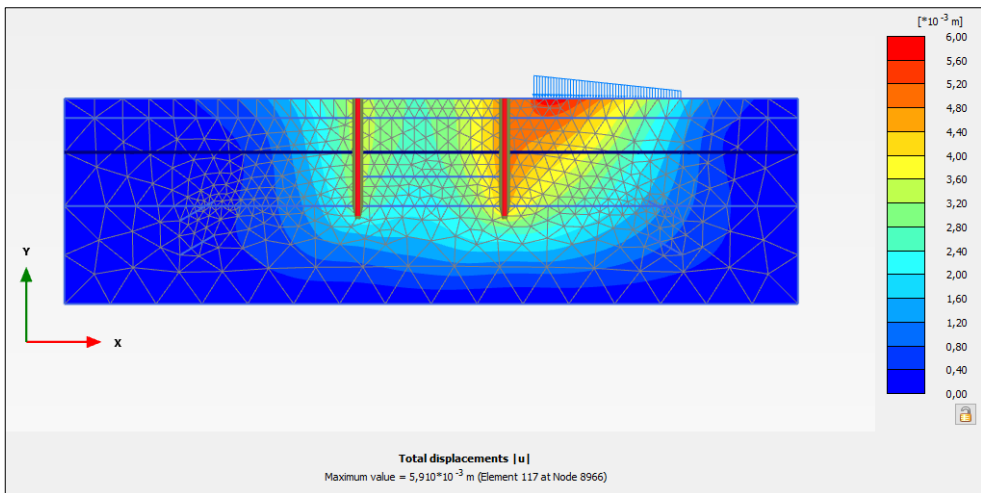


Figura 6.72. Desplazamientos totales $|u|$ en la Fase 1

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

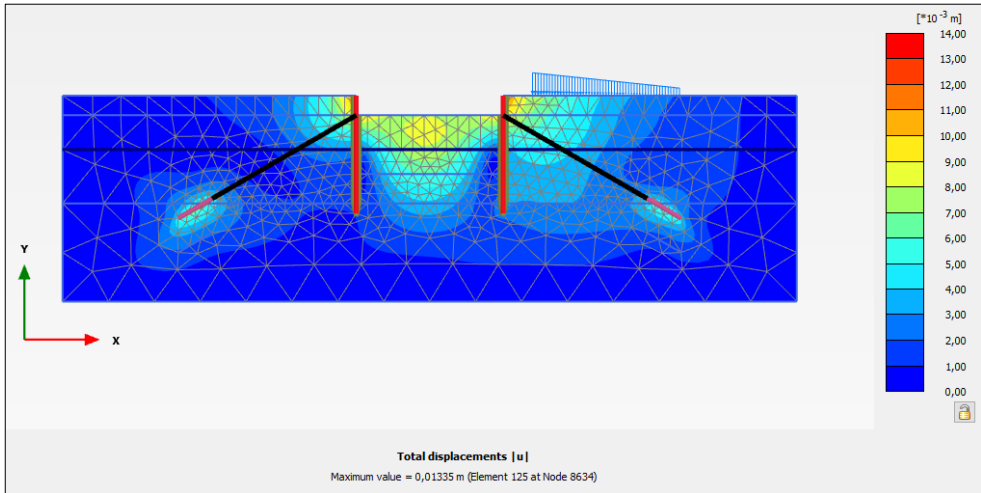


Figura 6.73. Desplazamientos totales $|u|$ en la Fase 3

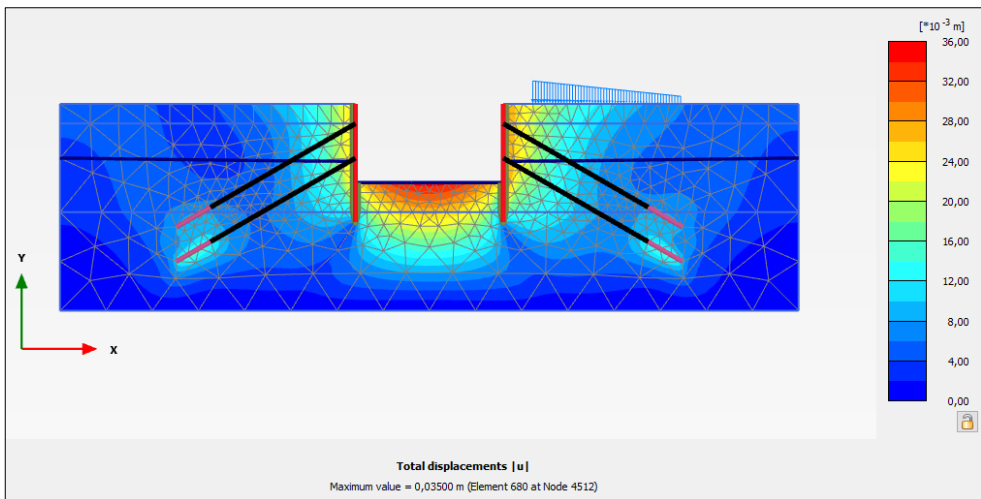


Figura 6.74. Desplazamientos totales $|u|$ en la Fase 6

Para representar las tensiones efectivas horizontales σ'_{xx} , en el botón “*Stresses*” elegimos “*Cartesian effective stresses*” y finalmente “ σ'_{xx} ” (Figura 6.75).

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

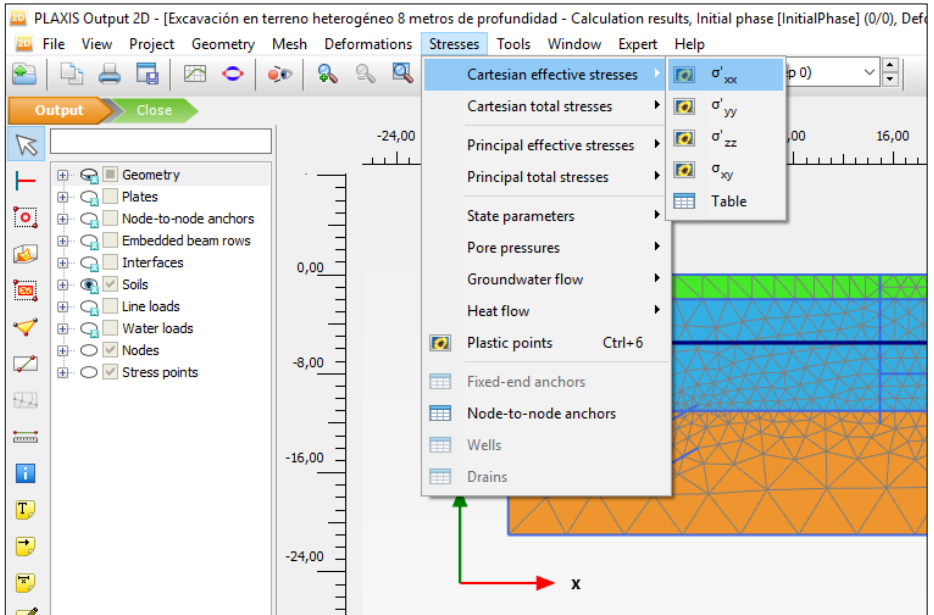


Figura 6.75. selección de representación de las tensiones efectivas horizontales σ'_{xx}

En las Figuras 6.76 a 6.79 se muestran las tensiones efectivas horizontales σ'_{xx} para las fases inicial, 1, 3 y 6, respectivamente.

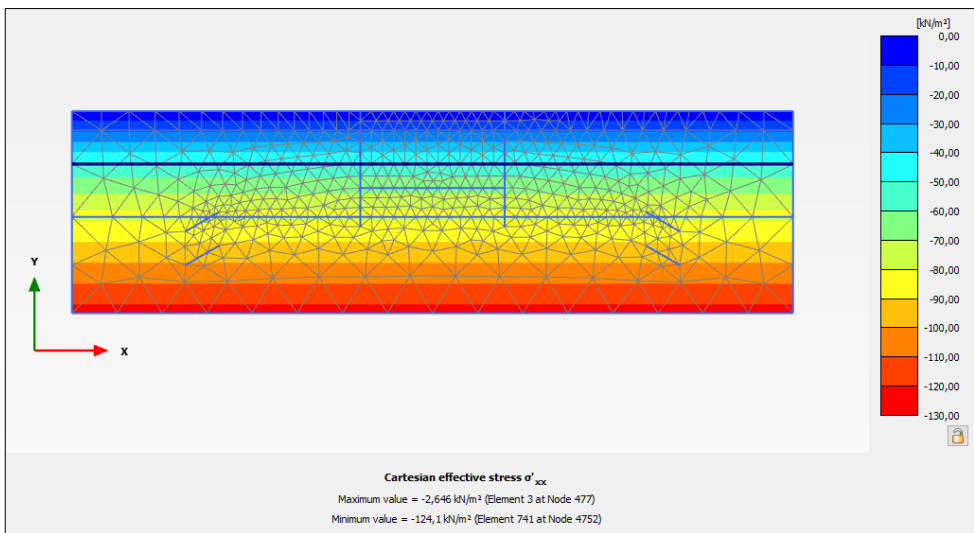


Figura 6.76. Tensiones efectivas horizontales σ'_{xx} en la fase inicial

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

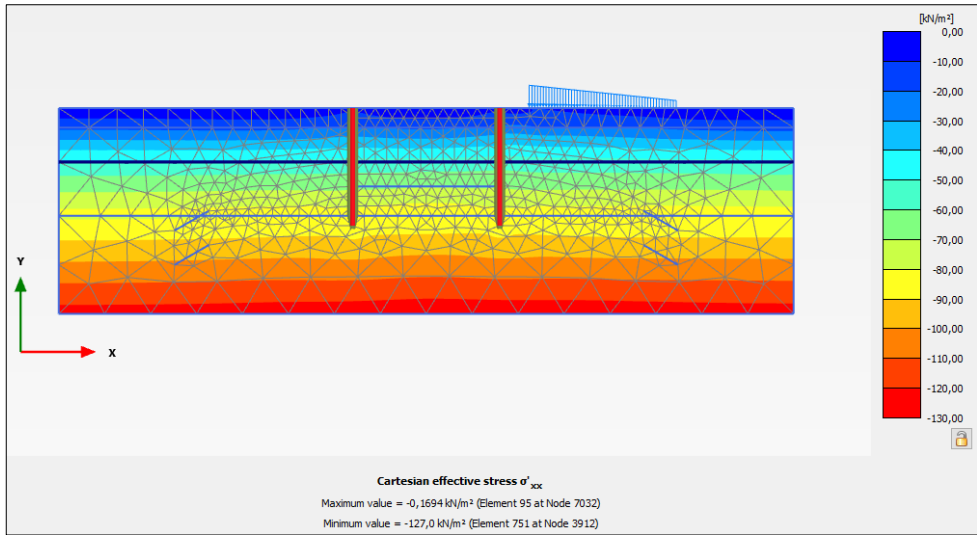


Figura 6.77. Tensiones efectivas horizontales σ'_{xx} en la fase 1

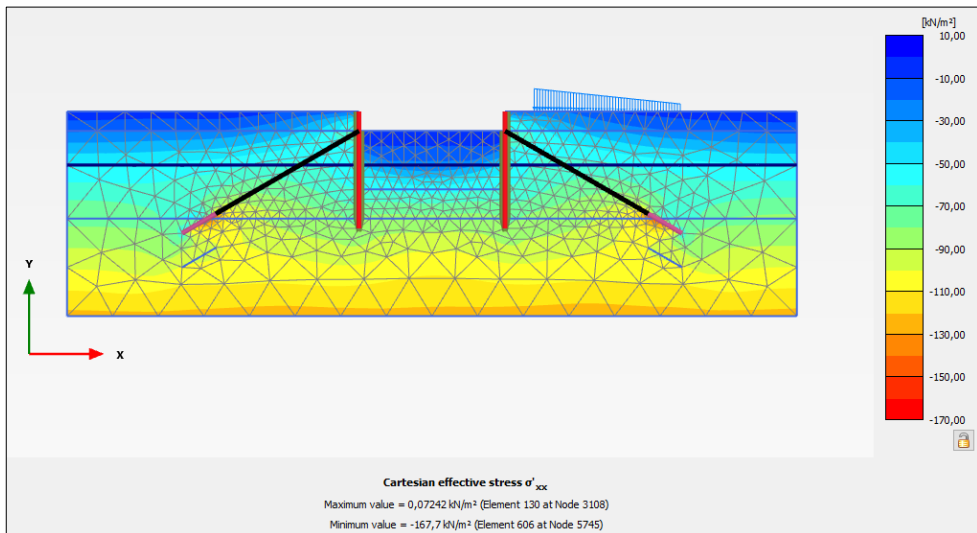


Figura 6.78. Tensiones efectivas horizontales σ'_{xx} en la fase 3

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

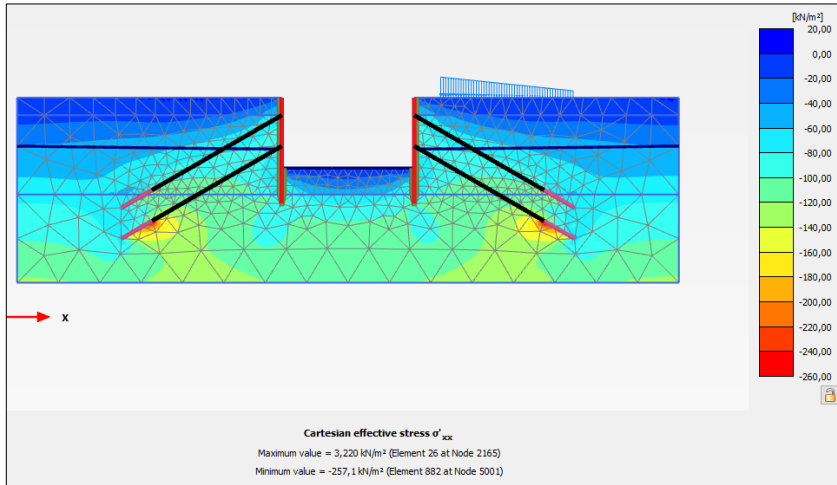


Figura 6.79. Tensiones efectivas horizontales σ'_{xx} en la fase 6

Finalmente, vamos a estudiar la red de flujo correspondiente a la última fase del proyecto (fase 6).

Para representar las equipotenciales, seleccionamos “Stresses”, “Pore pressures” y, finalmente, elegimos la opción “Groundwater head”. En la Figura 6.80 aparecen representadas las líneas equipotenciales, para la fase 6.

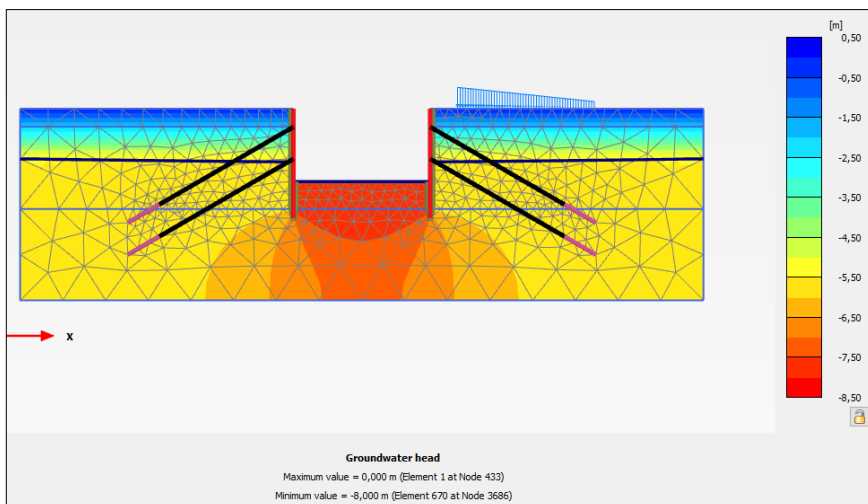


Figura 6.80. Representación de las líneas equipotenciales en la fase 6

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

Como se puede observar, el programa propone una leyenda por defecto que, en ocasiones, puede ser conveniente modificar (pulsando el botón derecho del ratón sobre la leyenda, opción “*Legend settings*”, Figura 6.81), pues PLAXIS asigna a aquellos puntos que se encuentran por encima del nivel freático un valor del potencial igual a su cota. Por tanto, si queremos visualizar estrictamente la red de flujo que se produce en el problema, debemos acotar la leyenda entre las equipotenciales -5,5 (el valor del nivel freático inicial) y -8 (la cota a la que se encuentra el fondo de la excavación), Figura 6.82.

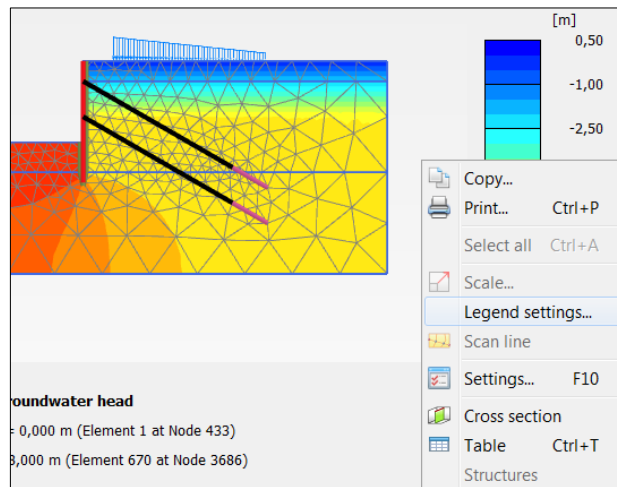


Figura 6.81. Selección del ajuste para la leyenda

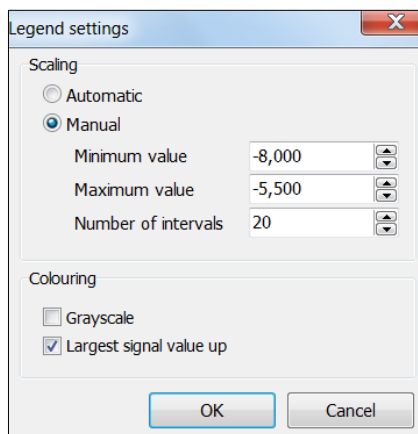


Figura 6.82. Asignación manual de los parámetros de la leyenda

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

La red de flujo queda ahora representada por la Figura 6.83.

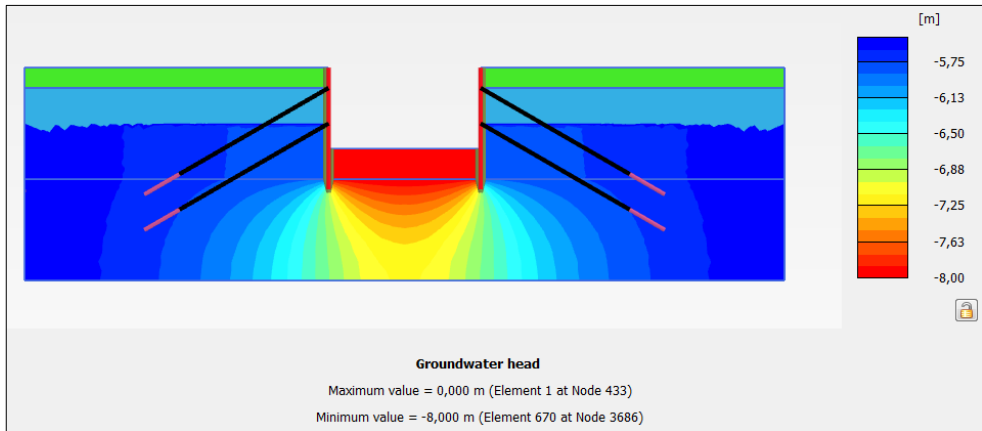


Figura 6.83. Representación de las líneas equipotenciales en la fase 6

Si queremos conocer la distribución de la presión intersticial, seleccionamos “Stresses”, “Pore pressures”, opción “ P_{water} ” (Figura 6.84).

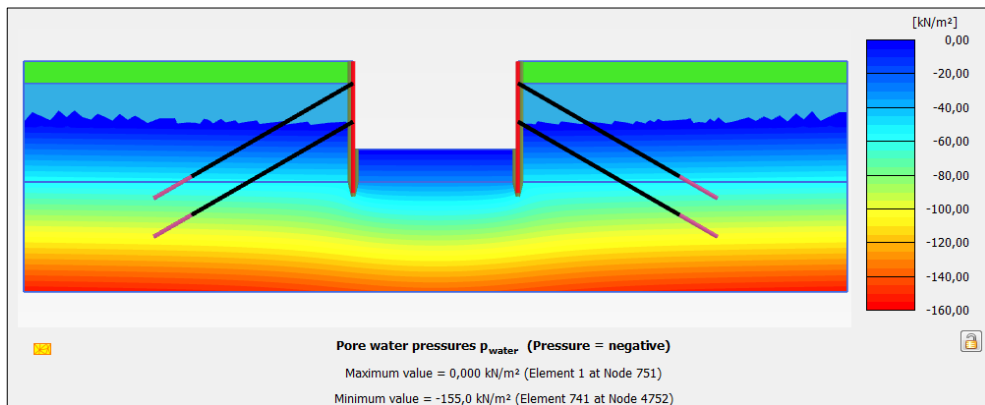


Figura 6.84. Representación de la presión intersticial en la fase 6

Para representar los vectores de velocidad de la red flujo, seleccionamos “Stresses”, “Groundwater flow”, “ $|q|$ ” (marcar la opción “Arrows”), Figuras 6.85, 6.86 y 6.87.

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

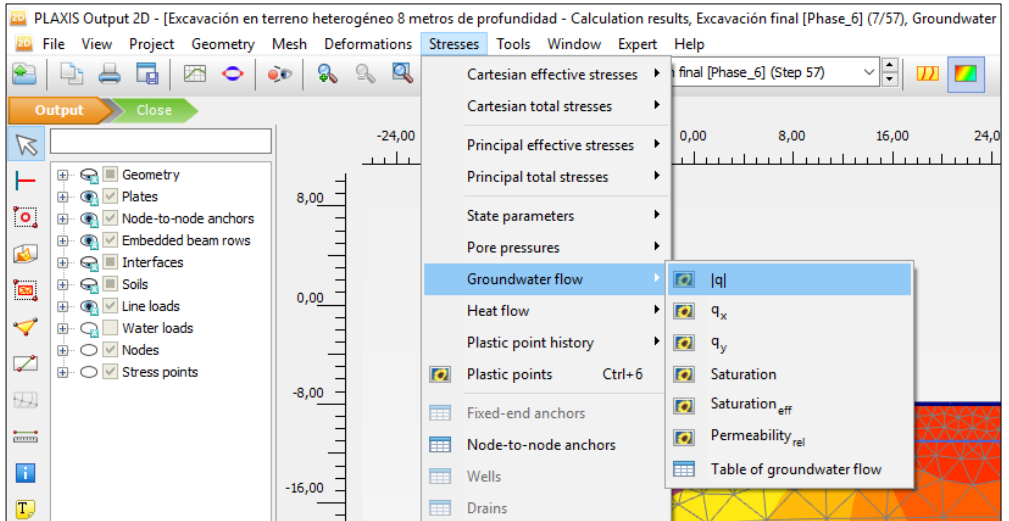


Figura 6.85. Selección de representación de los vectores de velocidad

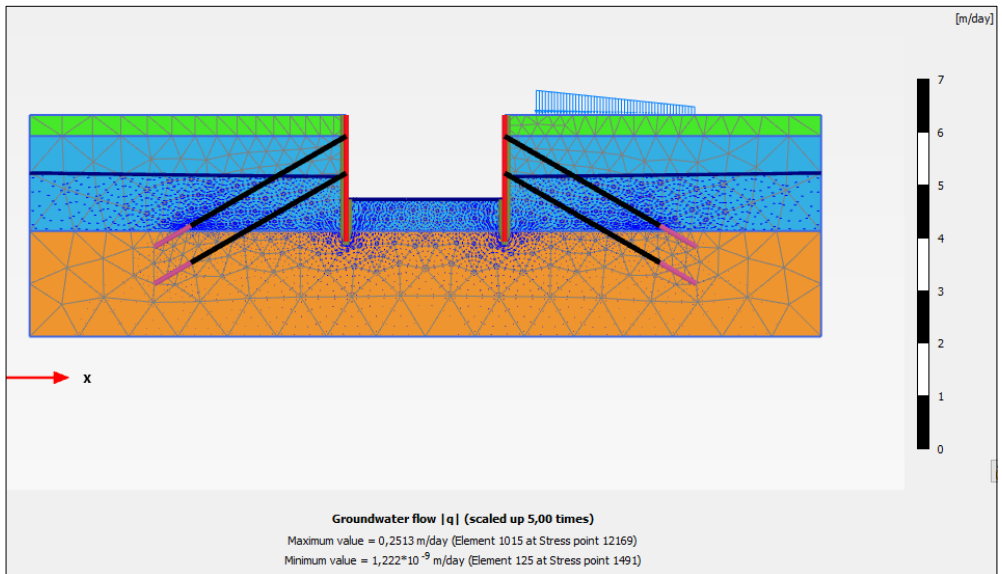


Figura 6.86. Vectores de velocidad de la red de flujo en la fase 6

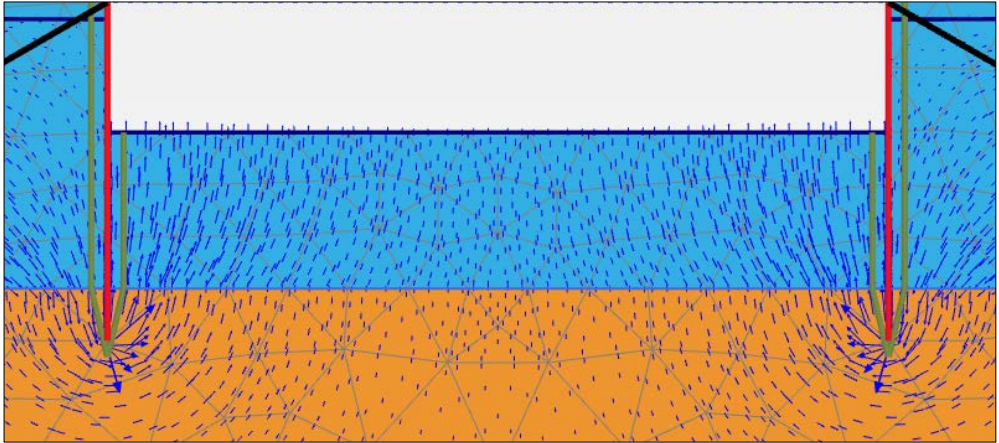


Figura 6.87. Vectores de velocidad de la red de flujo en la fase 6 (detalle bajo la excavación)

Para conocer el caudal que llegaría al fondo de la excavación, utilizamos la opción “Cross section” (Figura 6.88).

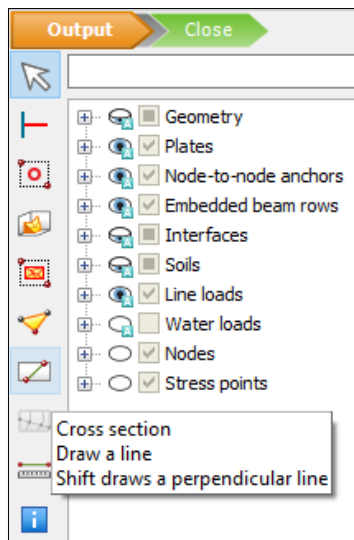


Figura 6.88. Selección de la opción “Cross section”

Elegimos las coordenadas (15, -8) y (30, -8) para definir la sección correspondiente al fondo de la excavación. Aunque es posible marcar las coordenadas en el espacio de trabajo, es preferible introducirlas a través de la ventana que aparece (Figura 6.89).

Ejercicio 06. Excavación en terreno heterogéneo al abrigo de muros pantalla

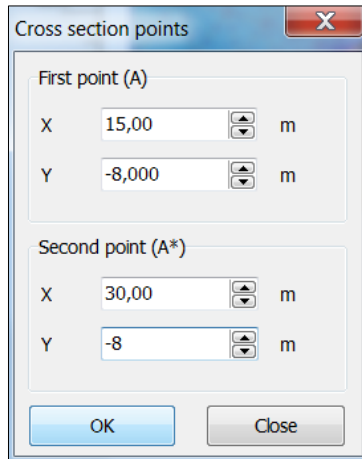


Figura 6.89. Selección de los puntos de la sección transversal sobre la que queremos determinar el caudal

El caudal descargado hacia el fondo de la excavación aparece reflejado en la Figura 6.90 y es de $0,63 \text{ m}^3/\text{día}/\text{m}$.

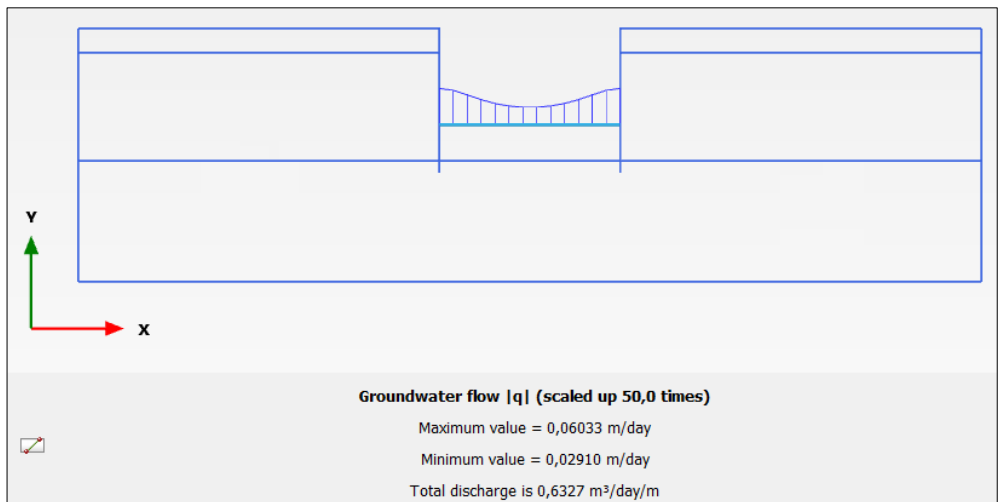


Figura 6.90. Caudal que llega al fondo de la excavación debido a la red de flujo generada

Ejercicio 07

Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

7.1 INTRODUCCIÓN

Sobre un terreno formado por tres estratos, se pretende construir un terraplén (de tres capas, cada una de dos metros de espesor) para colocar el apoyo del tablero de un puente y una cimentación compuesta de pilotes.

Los diferentes espesores de terreno están constituidos por dos materiales diferentes (arena y arcilla).

La primera capa se construirá en 3 días y, una vez construida, se esperarán 25 días para construir la segunda capa. La segunda capa también se construirá en 3 días y, una vez finalizada, se esperarán 50 días para colocar la tercera y última capa. Finalmente, la tercera capa se construirá en 3 días y se mantendrá, una vez colocada, 75 días. Las tres capas de terraplén están formadas por material arenoso de propiedades idénticas a la arena existente en el terreno de cimentación.

Una vez construido el terraplén, se debe excavar un desmote con una profundidad total de 2 metros, ancho del fondo de excavación de 6 metros y taludes a ambos lados 2H:1V. Posteriormente se construirán la cimentación y el apoyo.

Finalmente, se retirará parte del terraplén consolidado para formar el talud (2H:1V) que permita la construcción de la obra lineal que pasará bajo el puente y se rellenará el trasdós de la placa vertical del apoyo.

7.2 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS Y PROPIEDADES DE LAS PLACAS Y PILOTES

En las Tablas 7.1 y 7.2 aparecen reflejados los parámetros geotécnicos de la arena y la arcilla que forman los tres estratos de terreno inicial y las tres capas de terraplén construidas posteriormente (arena). La disposición y espesor de los estratos de suelo se definen en apartados posteriores.

Parámetros geotécnicos del material arenoso

Material	Arena
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Comportamiento material	Drenado
Peso específico no saturado γ_{unsat}	17,5 kN/m ³
Peso específico saturado γ_{sat}	20 kN/m ³
Módulo de Young (E')	31.500 kPa
Coefficiente de Poisson (ν')	0,28
Cohesión efectiva (c')	0 kPa
Ángulo de rozamiento efectivo (ϕ')	32°
Ángulo de dilatación (ψ)	0°
Conductividad hidráulica horizontal K_x	0,4 m/día
Conductividad hidráulica vertical K_y	0,1 m/día
R_{inter} (factor de reducción de resistencia)	0,7

Tabla 7.1. Parámetros geotécnicos de la arena

Parámetros geotécnicos del material arcilloso

Material	Arcilla
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Comportamiento material	No drenado tipo A
Peso específico no saturado γ_{unsat}	19 kN/m ³
Peso específico saturado γ_{sat}	19 kN/m ³
Módulo de Young (E')	13.500 kPa
Coefficiente de Poisson (ν')	0,33
Cohesión efectiva (c')	5 kPa
Ángulo de rozamiento efectivo (ϕ')	22,50°
Ángulo de dilatación (ψ)	0°
Conductividad hidráulica horizontal K_x	$5,5 \cdot 10^{-4}$ m/día
Conductividad hidráulica vertical K_y	$2,1 \cdot 10^{-4}$ m/día
R_{inter} (factor de reducción de resistencia)	0,5

Tabla 7.2 Parámetros geotécnicos de la arcilla

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

En las Tablas 7.3 y 7.4 se muestran las propiedades de las placas que forman el apoyo y de los pilotes.

Propiedades de las placas del apoyo	
Tipo de Material	Elástico
Isotrópico	Sí
Rigidez normal (EA)	$3 \cdot 10^7$ kN/m
Rigidez a flexión (EI)	$2,5 \cdot 10^6$ kN/m ² /m
Peso (w)	24 kN/m/m
Coefficiente de Poisson (ν)	0

Tabla 7.3. Propiedades del material de las placas del apoyo

Propiedades de los pilotes	
Rigidez (E)	$3 \cdot 10^7$ kN/m ²
Peso unitario (γ)	14 kN/m ³
Tipo de pilote	Predefinido
Tipo de pilote predefinido	Circular macizo
Diámetro	0,6 m
Espaciamiento (L_{spacing})	2 m
Resistencia por fuste	Linear
Resistencia fuste inicial ($T_{\text{skin,start,max}}$)	10 kN/m
Resistencia fuste final ($T_{\text{skin,end,max}}$)	100 kN/m
Resistencia por punta (F_{max})	1000 kN

Tabla 7.4. Propiedades del material de los pilotes

7.3. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA EN PLAXIS 2D

7.3.1 Introducción de los parámetros de proyecto

El nombre del proyecto puede ser “*Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente*”.

En la pestaña “*Model*” comprobamos que está seleccionada la opción “*Plane strain*” en el modelo y “*15-Noded*” en elementos.

Definiremos el contorno del espacio de trabajo utilizando las distancias que aparecen en la Tabla 7.5:

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

x_{\min}	0	m
x_{\max}	70	m
y_{\min}	-25	m
y_{\max}	9	m

Tabla 7.5. Contorno del proyecto

En la pestaña “constants” mantenemos las constantes que aparecen por defecto en el programa.

7.3.2 Definición de la estratigrafía inicial y de las tres capas que forman el terraplén

Debemos crear un único sondeo en el punto (0, 0).

Añadiremos 6 capas en la pantalla “Modify soil layers”. El espesor de cada capa aparece reflejado en la Figura 7.1 (el terreno natural está formado por las capas 4, 5 y 6, mientras que el terraplén está formado por las capas 3, 2 y 1):

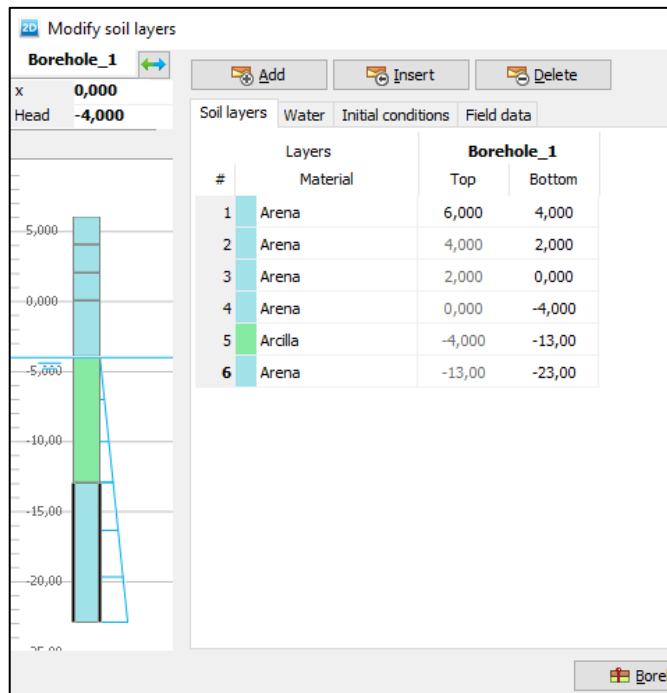


Figura 7.1. Primer y único sondeo para definir el terreno inicial y el terraplén

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

El nivel freático se encuentra situado a 4 metros bajo la superficie inicial del terreno.

Una vez creadas las diferentes capas de terreno, deberemos crear los dos materiales que forman el suelo y, seguidamente, los materiales de las placas y de los pilotes.

Para definir tanto la arena como la arcilla, nos dirigimos al icono “*Show materials*”. En “*Set type*”, seleccionamos “*Soil and interfaces*”. Pulsamos “*New*” e introducimos, en primer lugar, los parámetros geotécnicos de la arena (Tabla 7.1) y, en segundo lugar, los de la arcilla (Tabla 7.2).

Para definir el material por el que están formadas las placas del apoyo, en “*Set type*”, seleccionamos “*Plates*”. Pulsamos “*New*” e introducimos las propiedades de las placas (Tabla 7.3).

Finalmente, definiremos el material de los pilotes. En “*Set type*”, seleccionamos “*Embedded beam row*”. Pulsamos “*New*” e introduzca las propiedades de los pilotes (Tabla 7.4).

Las tres capas del terraplén (2 metros de espesor cada una) están formadas por arena. La primera capa del terreno inicial (4 metros) y la más profunda (10 metros) son también arenosas. La capa intermedia (9 metros de espesor) es la única formada por arcillas (Figura 7.2).

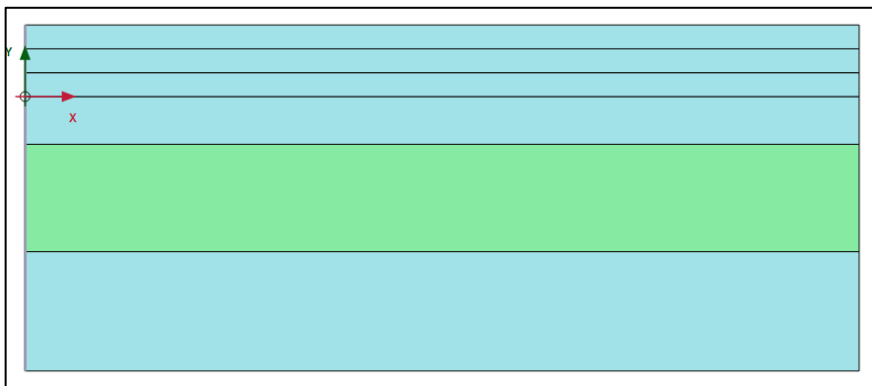


Figura 7.2. Estratigrafía del terreno inicial junto con las tres capas del terraplén

7.3.3. Definición del apoyo, de los pilotes, de las interfaces y de las líneas sobre las que se realizará la excavación y el desmonte

Nos dirigimos al modo de geometría “*Structures*”.

Dibujamos dos líneas para crear las placas del apoyo. Las dos líneas tienen las siguientes coordenadas (Tabla 7.6):

Línea	X _{inicial}	Y _{inicial}	X _{final}	Y _{final}
1	37 m	6 m	37 m	4 m
2	33 m	4.3 m	37 m	4.3 m

Tabla 7.6. Coordenadas de las dos líneas que definen en placas

Pinchamos sobre la línea 1 con el botón derecho del ratón. Seleccionamos “*Create*” y después elegimos la opción “*Plate*”. Volvemos a seleccionar la línea 1 con el botón derecho del ratón. En “*Plate*” pinchamos sobre “*Set material*” y finalmente elegimos el material de la placa que ha sido creado anteriormente.

Haremos exactamente lo mismo para la línea 2.

Finalmente deberemos crear las interfaces positivas y negativas para ambas placas.

Para crear los pilotes, dibujaremos dos líneas verticales. Las dos líneas tienen las siguientes coordenadas (Tabla 7.7):

Línea	X _{inicial}	Y _{inicial}	X _{final}	Y _{final}
3	34 m	4.3 m	34 m	-18 m
4	36 m	4.3 m	36 m	-18 m

Tabla 7.7. Coordenadas de las dos líneas que se convertirán en pilotes

Se puede observar que ambos pilotes están separados una distancia de 2 metros.

Pinchamos sobre la línea 3 con el botón derecho del ratón. Seleccionamos “*create*” y después “*Embedded beam row*”. Volvemos a seleccionar la línea 3 con el botón derecho del ratón; en “*Embedded beam row*” pinchamos sobre “*Set material*” y, finalmente, elegimos el material del pilote que ha sido creado anteriormente.

Haremos exactamente lo mismo para la línea 4.

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

Finalmente, definiremos las líneas que servirán para crear el desmonte y la excavación. Las coordenadas de las líneas aparecen definidas en la Tabla 7.8:

Excavación para placas y pilotes

Línea	X _{inicial}	Y _{inicial}	X _{final}	Y _{final}
5	27 m	6 m	31 m	4 m
6	37 m	4 m	41 m	6 m

Excavación para placas y pilotes

Línea	X _{inicial}	Y _{inicial}	X _{final}	Y _{final}
7	31 m	4 m	23 m	0 m

Tabla 7.8. Coordenadas de las líneas de desmonte y excavación

En la Figura 7.3 aparecen reflejadas las placas, los pilotes, las interfaces y las líneas de desmonte y de excavación.

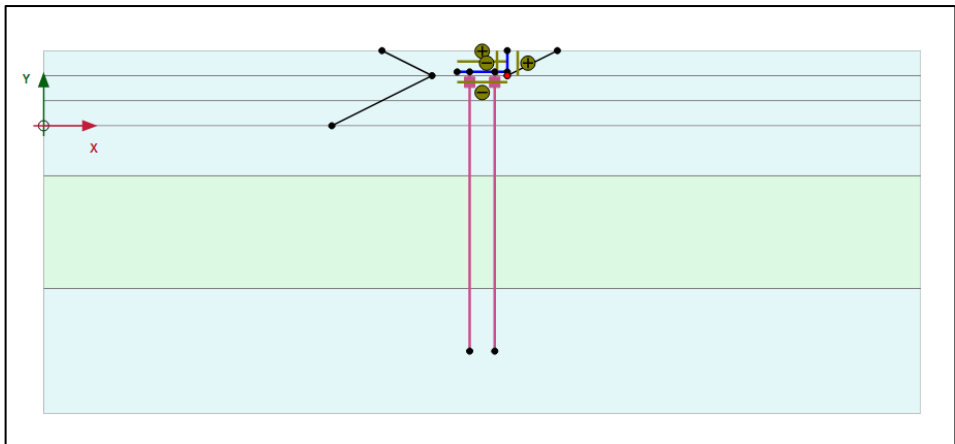


Figura 7.3. Definición de placas, pilotes, interfaces y líneas de desmonte y de excavación

7.3.4. Mallado del problema

Nos dirigimos al modo de geometría “Mesh” para mallar el terreno. Pulsamos el icono “Generate mesh” y elegimos un mallado medio.

En la Figura 7.4 se muestra el mallado creado:

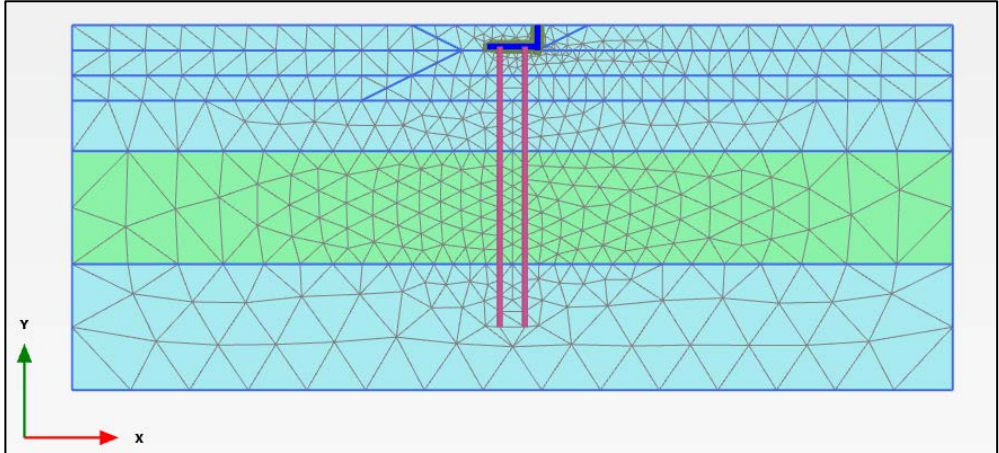


Figura 7.4. Mallado del problema

7.3.5. Fases de proyecto

El proyecto consta de 11 fases:

- **Fase inicial:** Sólo existen los tres estratos del terreno inicial. Desactivamos las tres capas de terraplén y verificamos que las placas, los pilotes y las interfaces se encuentran también desactivados. En “*Calculation type*” elegimos “*K0 procedure*”. En “*Loading type*” elegimos “*Staged construction*” y finalmente en “*Pore pressure*” escogemos la opción “*Phreatic*”.
- **Fase 1:** Construcción de la primera capa de terraplén. Activamos la primera capa del terraplén y verificamos que tanto las placas, como los pilotes y las interfaces se encuentran también desactivados. En “*Calculation type*” elegimos “*Consolidation*”. En “*Loading type*” elegimos “*Staged construction*” y finalmente en “*Pore pressure*” escogemos la opción “*Phreatic*”. En “*Time interval*” escribimos 3 días.
- **Fase 2:** Consolidación de la primera capa de terraplén. Esta fase es idéntica a la Fase 1, salvo en el intervalo de tiempo (25 días). En ésta fase, tras construir la primera capa de terraplén, se esperan 25 días para construir la segunda capa del terraplén.
- **Fase 3:** Construcción de la segunda capa de terraplén. Activamos la segunda capa del terraplén y verificamos que las placas, los pilotes y las interfaces se

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

encuentran también desactivados. El resto de opciones son iguales a las de la fase 1.

- **Fase 4:** Consolidación de la segunda capa de terraplén. Ésta fase es idéntica a la Fase 3, salvo en el intervalo de tiempo (50 días). En ésta fase, tras construir la segunda capa de terraplén, se esperan 50 días para construir la tercera capa del terraplén.
- **Fase 5:** Construcción de la tercera capa de terraplén. Activamos la tercera capa del terraplén y verificamos que las placas, los pilotes y las interfaces se encuentran también desactivados. El resto de opciones son iguales a las de las fases 1 y 3.
- **Fase 6:** Consolidación de la tercera capa de terraplén. Ésta fase es idéntica Fase 3, salvo en el intervalo de tiempo (75 días). En ésta fase, tras construir la tercera capa de terraplén, se esperan 75 días para realizar la excavación.
- **Fase 7:** Excavación para la instalación de las placas y los pilotes. Debemos desactivar el terreno comprendido entre las líneas 5 y 6 (Tabla 7.8), Figura 7.5. El resto de opciones son iguales a las de las fases 1, 3 y 5.

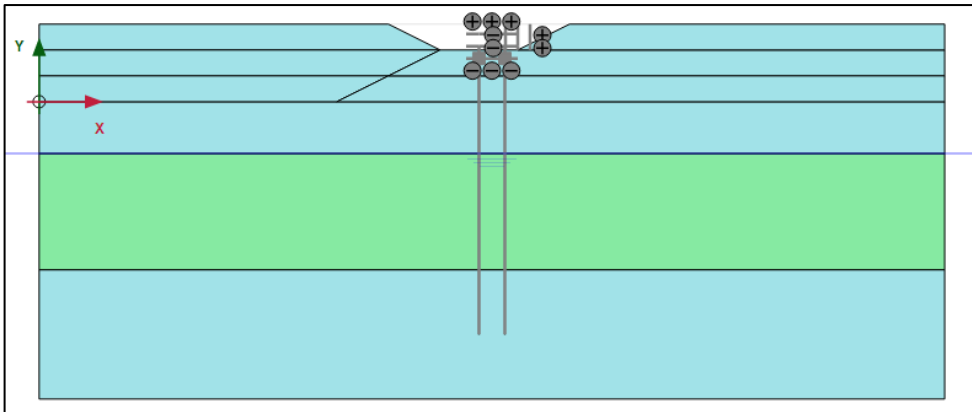


Figura 7.5. Fase 7. Excavación para instalación de placas y pilotes

- **Fase 8:** Construcción de las placas y los pilotes. Debemos activar las placas, las interfaces y los pilotes. En “*Calculation type*” elegimos “*Consolidation*”, en “*Loading type*” marcamos “*Staged construction*” y en “*Pore pressure*” escogemos la opción “*Phreatic*”. En “*Time interval*” escribiremos 10 días (Figura 7.6).

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

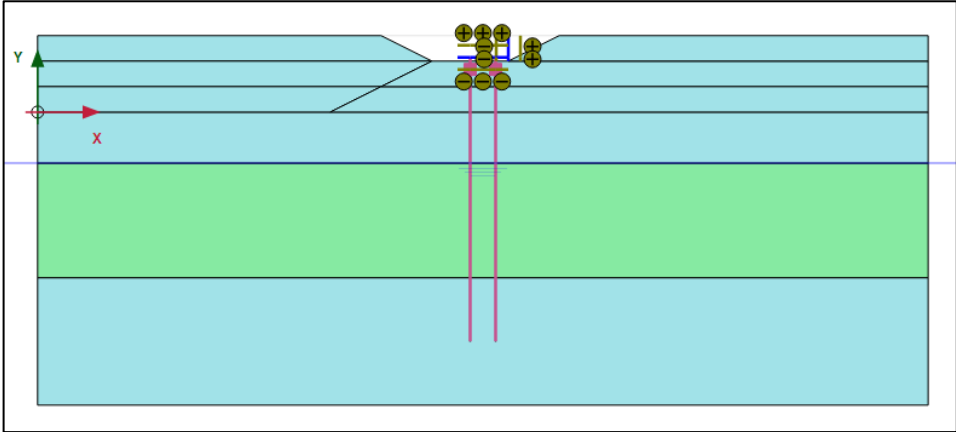


Figura 7.6. Fase 8. Activación de las placas, de las interfaces y de los pilotes

- **Fase 9:** Ejecución del desmonte. Se deben desactivar los polígonos que hay a la izquierda de las líneas 5 y 7 (Tabla 7.8). Activamos la cuña de terreno arenoso a la derecha de la placa vertical. El resto de opciones son iguales a las de la fase 8, Figura 7.7.

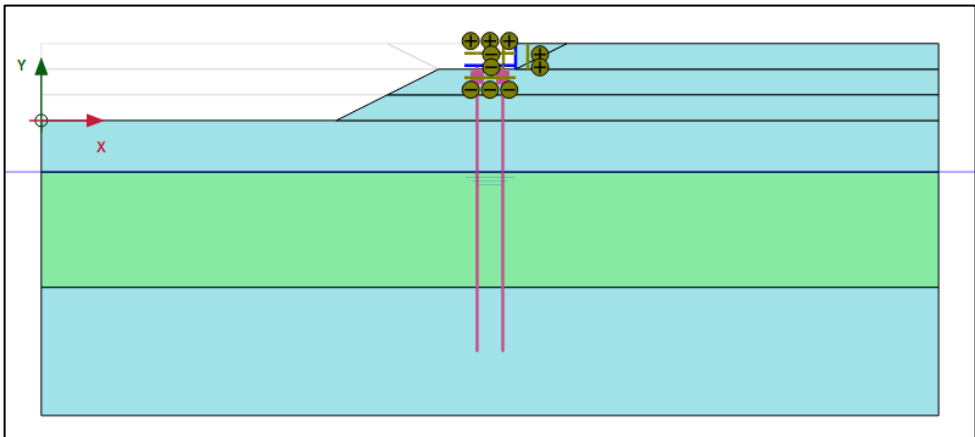


Figura 7.7. Fase 9. Desactivación del desmonte y activación de la cuña arenosa a la derecha de la placa vertical

- **Fase 10:** Fase final de consolidación. En “*Calculation type*” elegimos “*Consolidation*”. En “*Loading type*” escogemos en este caso “*Mínimum pore*”

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

pressure” y en “Pore pressure” marcamos la opción “Phreatic”. En “P-stop” escribiremos 10 kPa.

Una vez definidas las fases, pulsamos el icono “Calculate”. Para visualizar los resultados en “PLAXIS Output” seleccionamos el icono “View Calculation Results”.

7.3.6. Resultados del problema para la fase final de consolidación

Todas las representaciones de este apartado estarán referidas para la última fase del proyecto (fase final de consolidación). En la Figura 7.8 se puede observar la deformada del problema.

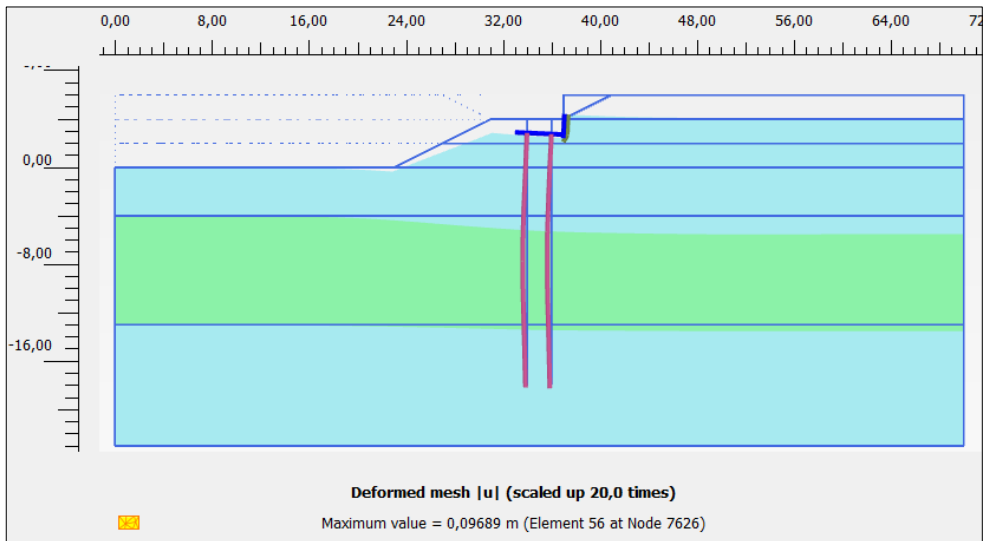


Figura 7.8. Deformada de la fase final de consolidación

Los desplazamientos totales $|u|$, los desplazamientos horizontales u_x y los desplazamientos verticales u_y aparecen reflejados en las Figuras 7.9, 7.10 y 7.11.

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

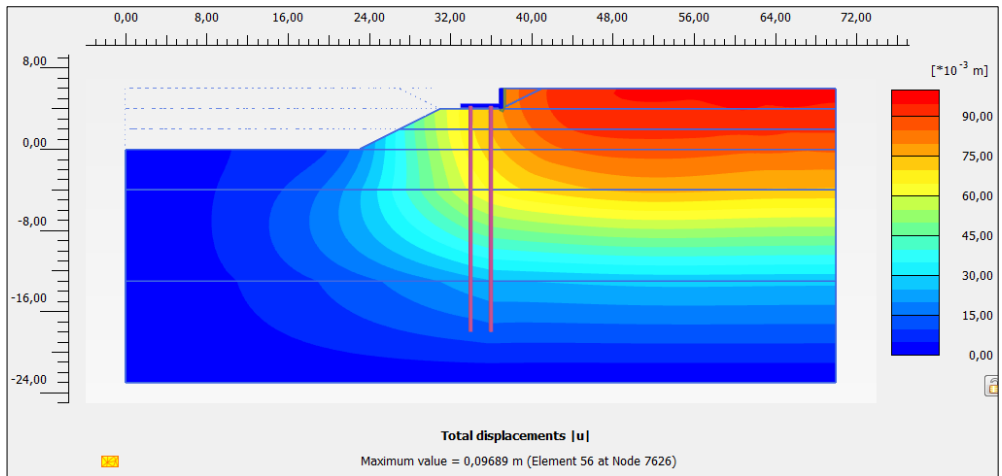


Figura 7.9. Desplazamientos totales $|u|$ de la fase final de consolidación

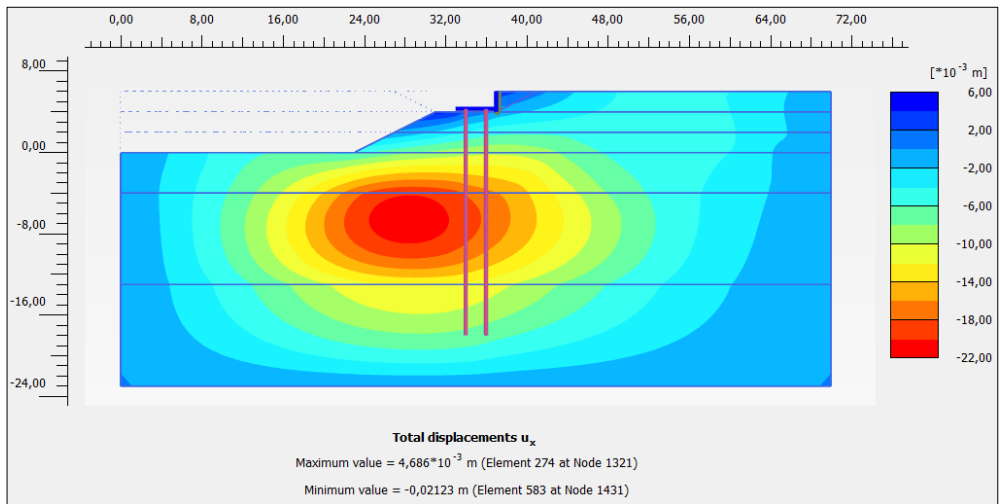


Figura 7.10. Desplazamientos horizontales u_x de la fase final de consolidación

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

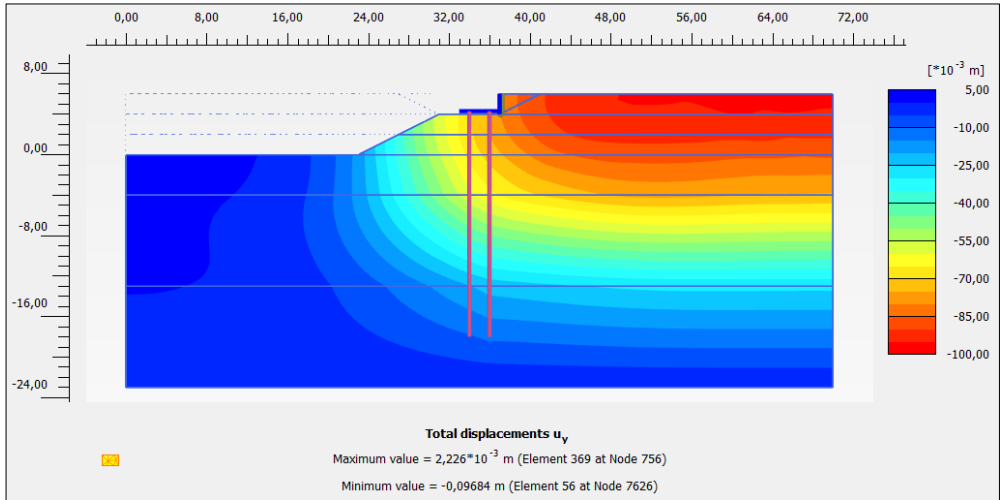


Figura 7.11. Desplazamientos verticales u_y de la fase final de consolidación

Los “*Plastic points*” (puntos que han alcanzado el estado plástico a nivel de esfuerzos) se pueden visualizar en la Figura 7.12.

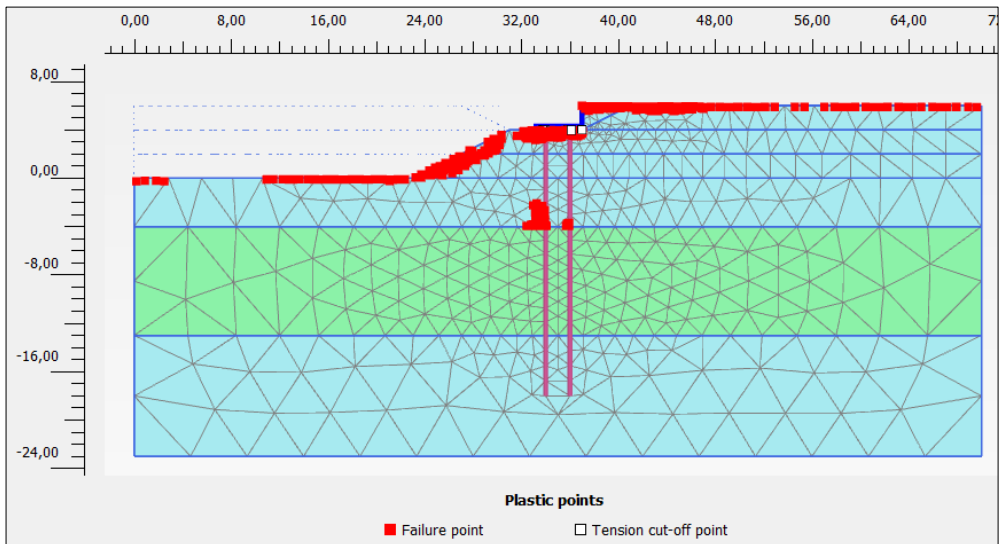


Figura 7.12. “*Failure points*” (rojo) y “*Tension cut-off points*” (blanco) de la fase final de consolidación

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

En la Figura 7.13 se representa el exceso de presión intersticial.

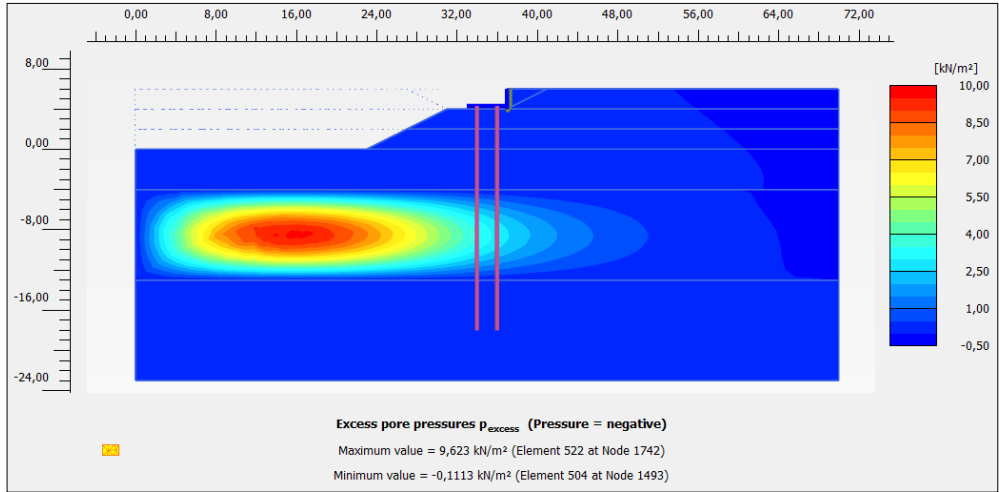


Figura 7.13. Exceso de presión intersticial en la fase final de consolidación

Los momentos flectores, esfuerzos axiales y cortantes sobre el pilote izquierdo aparecen ilustrados en las Figuras 7.14, 7.15 y 7.16.

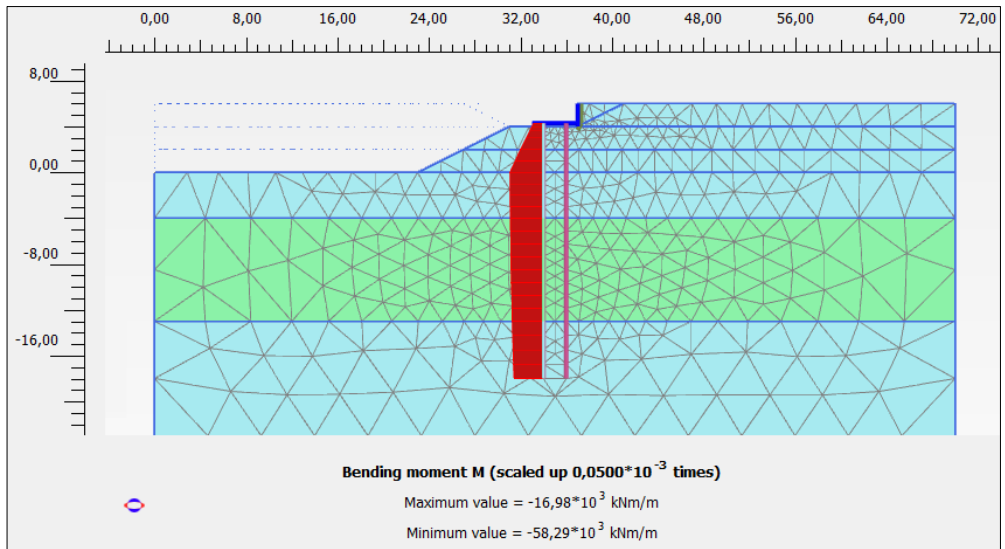


Figura 7.14. Momentos flectores actuantes sobre el pilote izquierdo en la fase final de consolidación

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

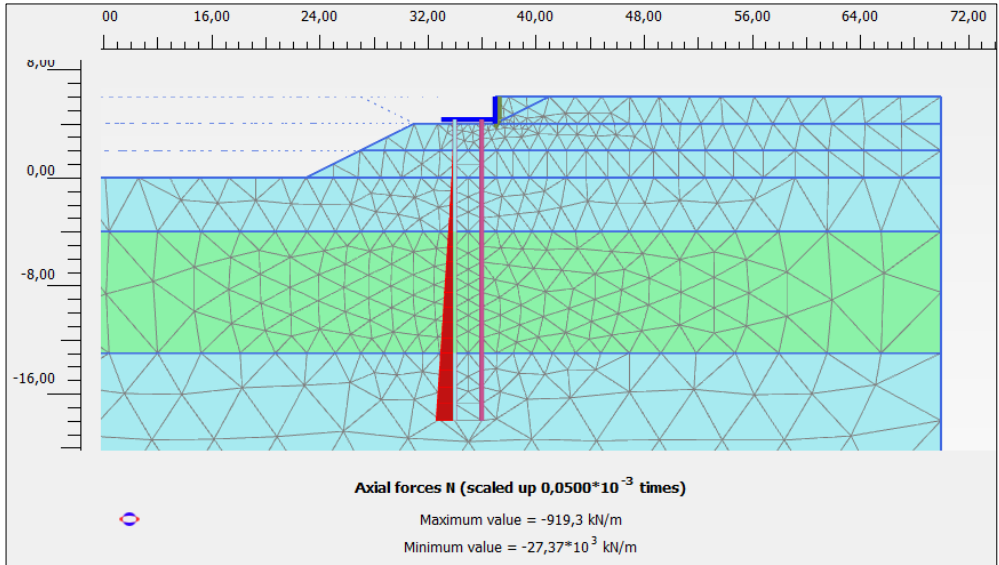


Figura 7.15. Esfuerzos axiales actuantes sobre el pilote izquierdo en la fase final de consolidación

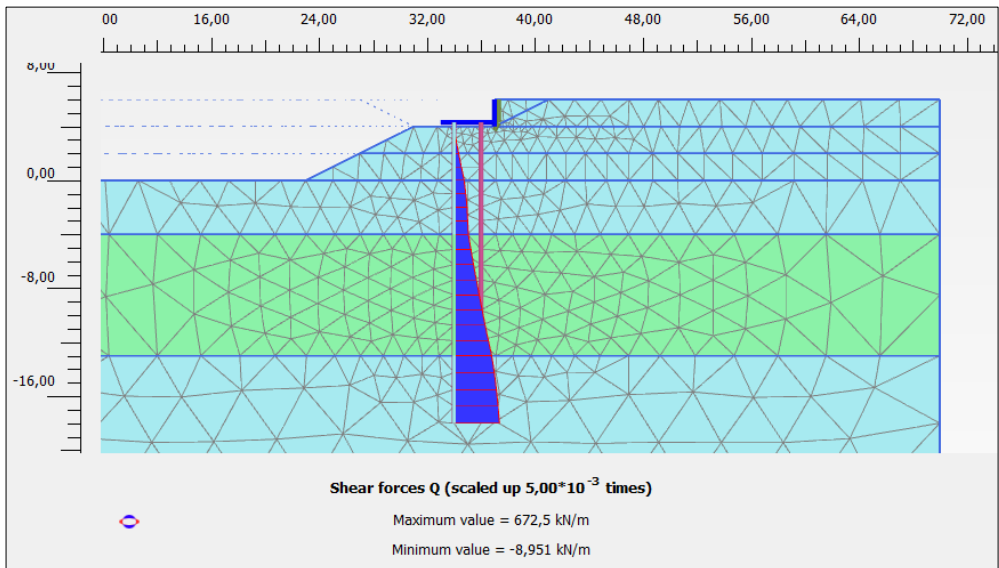


Figura 7.16. Esfuerzos cortantes actuantes sobre el pilote izquierdo en la fase final de consolidación

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

Los momentos flectores, esfuerzos axiales y cortantes sobre el pilote derecho aparecen ilustrados en las Figuras 7.17, 7.18 y 7.19.

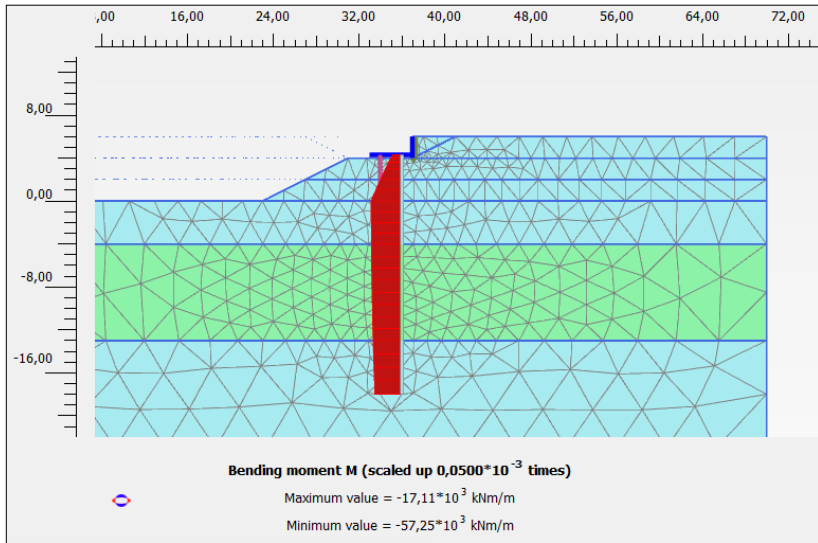


Figura 7.17. Momentos flectores actuantes sobre el pilote derecho en la fase final de consolidación

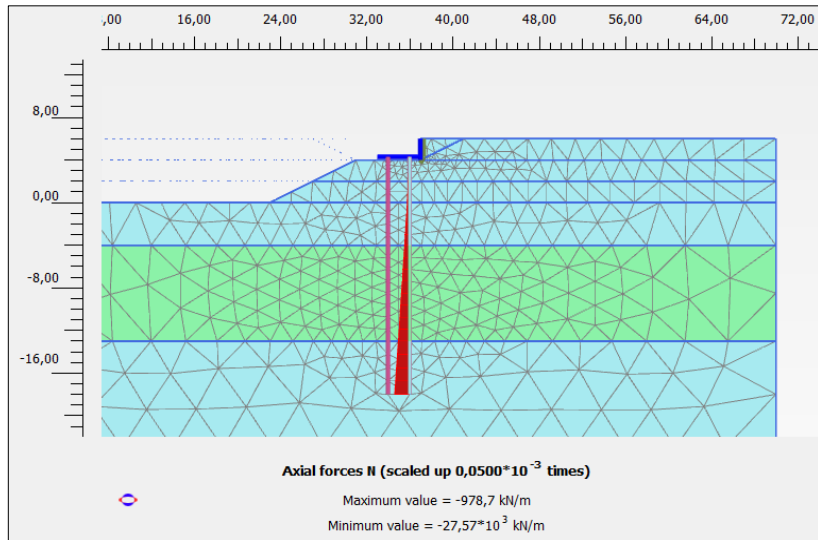


Figura 7.18. Esfuerzos axiales actuantes sobre el pilote derecho en la fase final de consolidación

Ejercicio 07. Pilotes bajo el apoyo del tablero de un puente

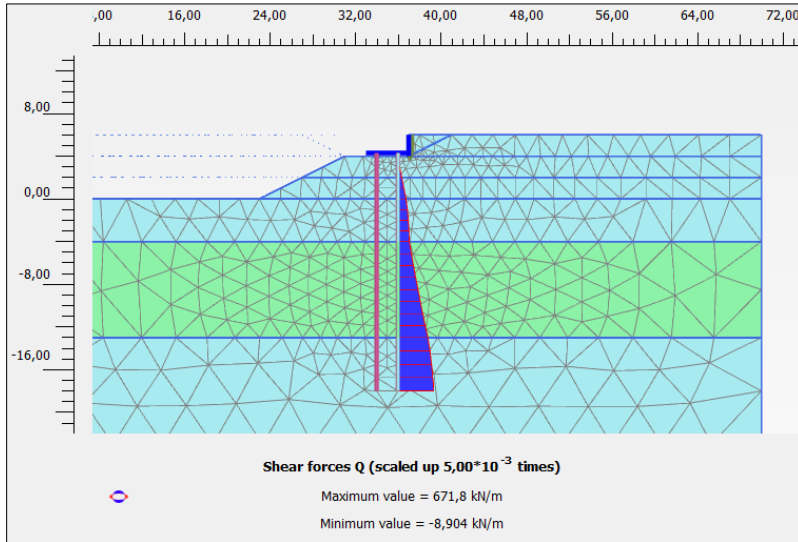


Figura 7.19. Esfuerzos cortantes actuantes sobre el pilote derecho en la fase final de consolidación