

Solución numérica de una estructura de muro pantalla

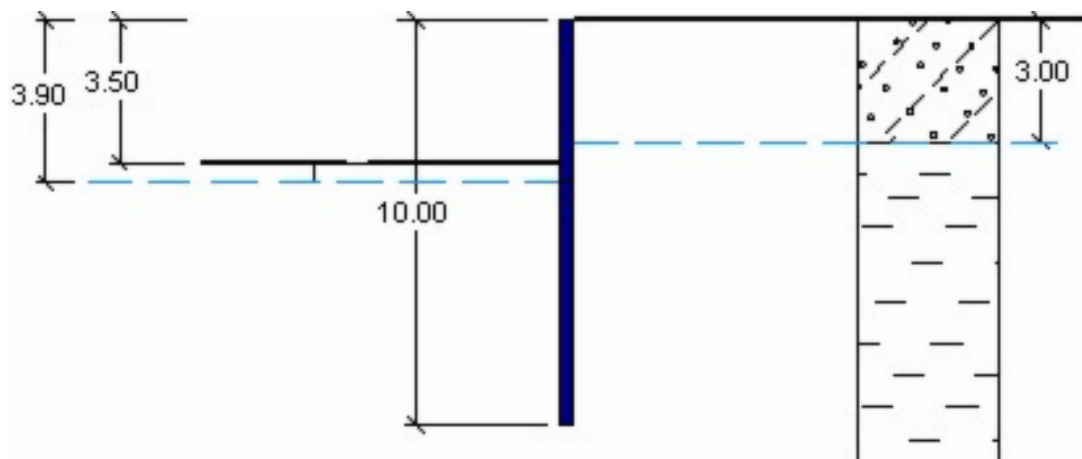
Programa: MEF

Archivo: Demo_manual_24.gmk

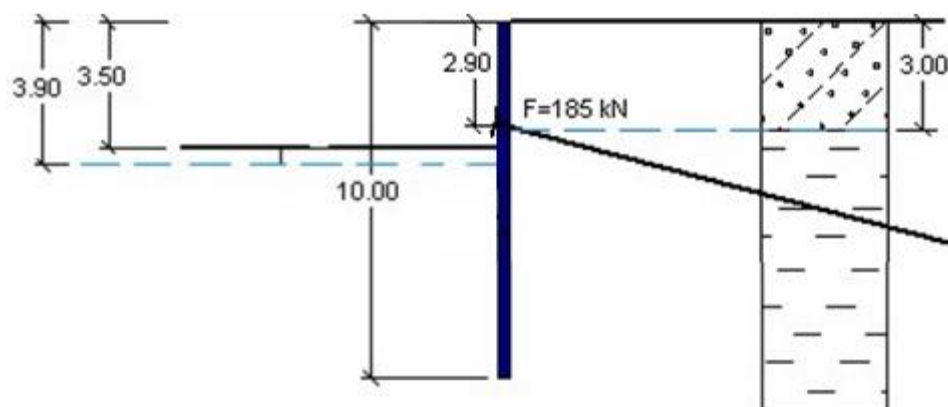
El objetivo de este ejemplo es realizar el análisis de deformaciones de un muro tablestaca anclado y determinar los diagramas de fuerzas internas utilizando el Método de Elementos Finitos.

Especificación del problema:

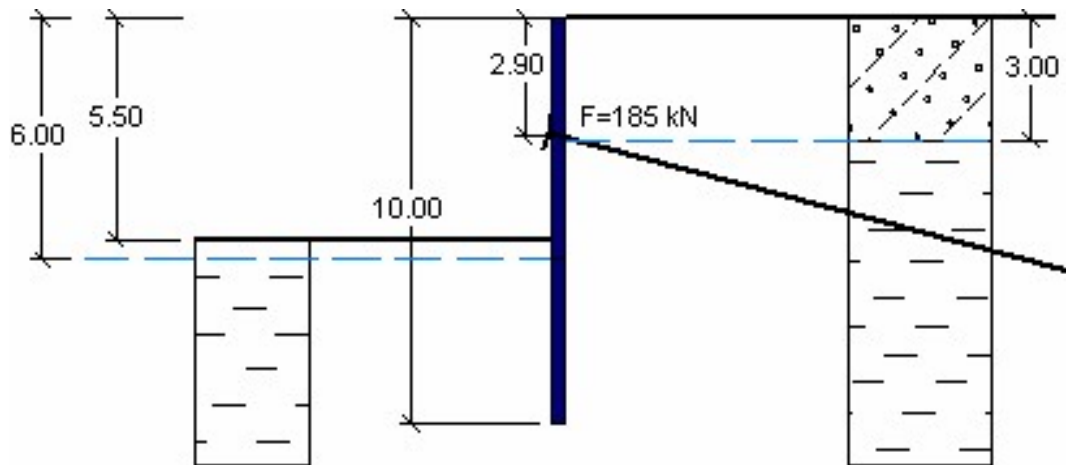
Determinar el estado de tensión (deformaciones) de un muro de tablestaca anclada de $500 \times 340 \times 9,7 \text{ mm}$ VL 503 pilotes entrelazados, el esquema de la estructura para las etapas de construcción individuales se muestra en los siguientes diagramas. Determinar las fuerzas internas que actúan a lo largo de la longitud del muro anclado. Las tablestacas son de la norma EN 10 025: acero Fe 360. La estructura del muro es de 10m de largo (alto).



Etapa de construcción 2 – extracción del suelo hasta la profundidad de 3,5 m



Etapa de construcción 3 – Añadir Anclaje



Etapa de Construcción 4 – extracción de suelo hasta una profundidad de 5,5 m

El perfil geológico se compone de dos tipos de suelo con los siguientes parámetros:

- 0.0 a 3.0 m: Arena limosa (SM – densidad de suelo media)
- Debajo de los 3m: Arcilla de Baja plasticidad (CL, CI – consistencia firme)

Parámetros de suelo / Clasificación	Arena limosa (SM)	Arcilla de Baja plasticidad (CL, CI)
Peso unitario del suelo: $\gamma \left[\frac{kN}{m^3} \right]$	18	21
Módulo de elasticidad: $E [MPa]$	10	4,5
Módulo de elasticidad no cargado $E_{ur} [MPa]$	20	13
Coefficiente de Poisson: $\nu [-]$	0,3	0,4
Cohesión de suelo: $c_{eff} [kPa]$	5	12
Ángulo de fricción interno: $\phi_{eff} [^\circ]$	29	19
Ángulo de dilatación: $\psi [^\circ]$	0	0
Unidad de peso de suelo saturado: $\gamma_{sat} \left[\frac{kN}{m^3} \right]$	20	23

Tabla con parámetros del suelo - muro de tablestaca anclado

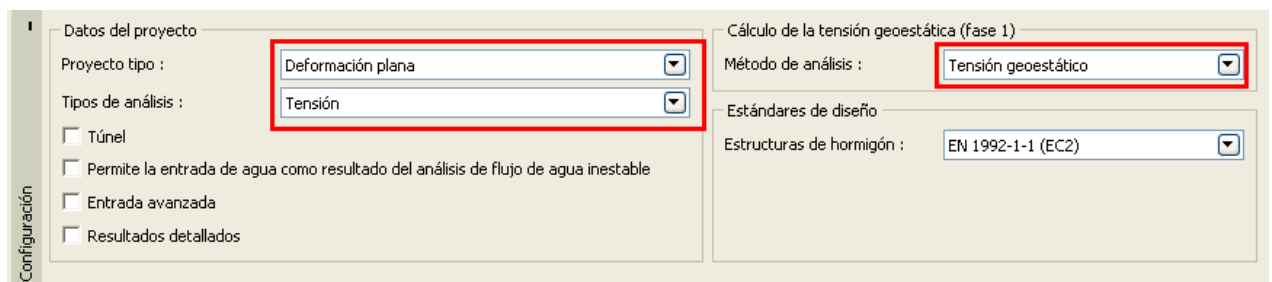
Solución:

El análisis se realizó a través del Programa de MEF de GEO5. El siguiente párrafo describe el paso a paso del procedimiento de solución:

- Topología: configuración y modelado del problema, (interfaz, contactos, aumento de densidad en líneas)
- Etapa de construcción 1: tensión geostática primaria, especificación de puntos de monitor
- Etapa de construcción 2: Activación de regiones, especificación de vigas, análisis de deformación, fuerzas internas
- Etapa de construcción 3: Especificación de anclaje
- Etapa de construcción 4: Excavación de suelo, resultados de análisis + monitores.
- Evaluación de los resultados: comparación, conclusión.

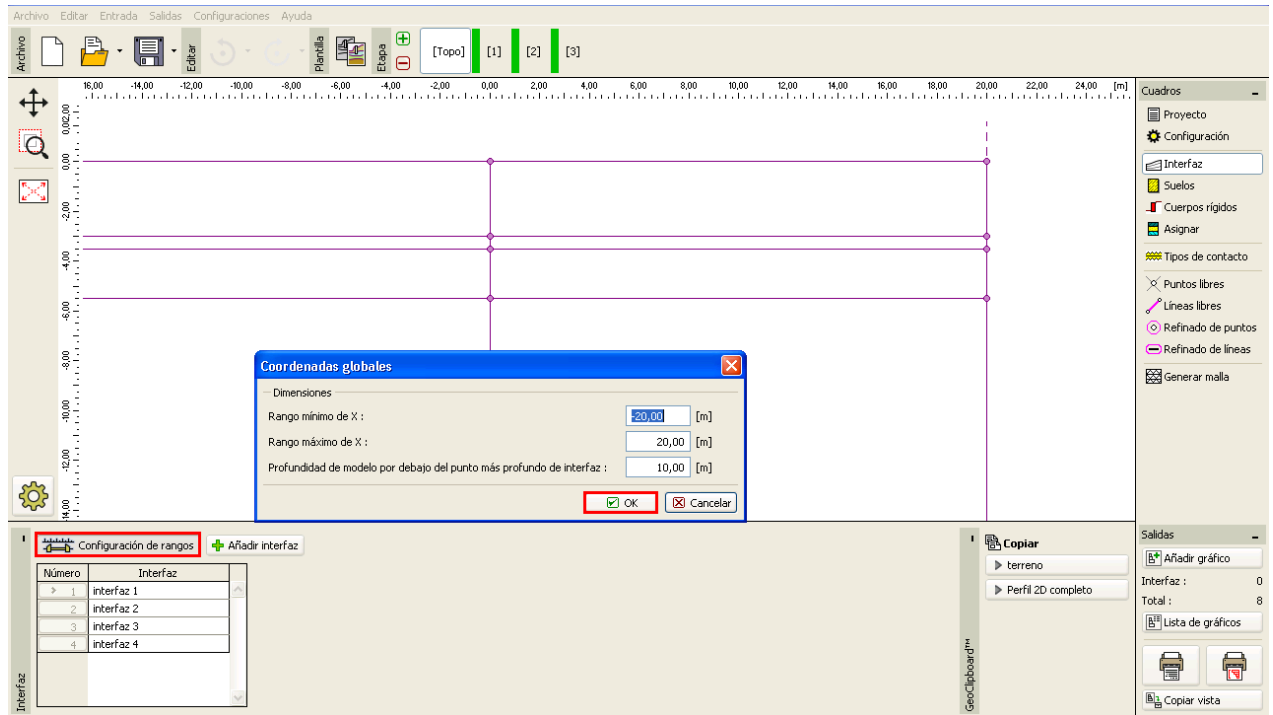
Topología: configuración del problema

Dejaremos el método de análisis para la Etapa de construcción 1 como la “tensión geostática”. Tendremos en cuenta el tipo de análisis como deformación plana.



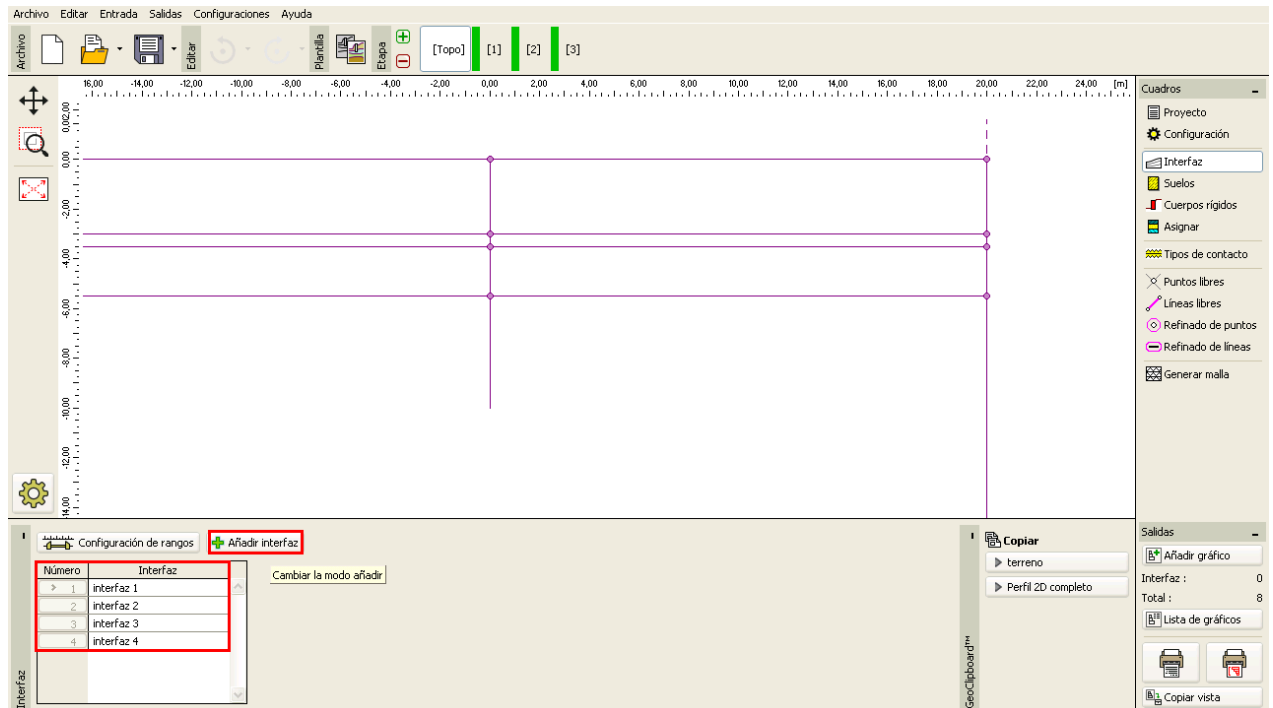
Cuadro “Configuración”

Luego establecemos las coordenadas globales, vamos a elegir las dimensiones mundiales cuyos resultados no se ven afectados por las condiciones límites. Para nuestro problema vamos a elegir las dimensiones del modelo $(-20\text{ m}; 20\text{ m})$, y vamos a establecer la profundidad desde el punto más bajo de la interfaz a 10 m.



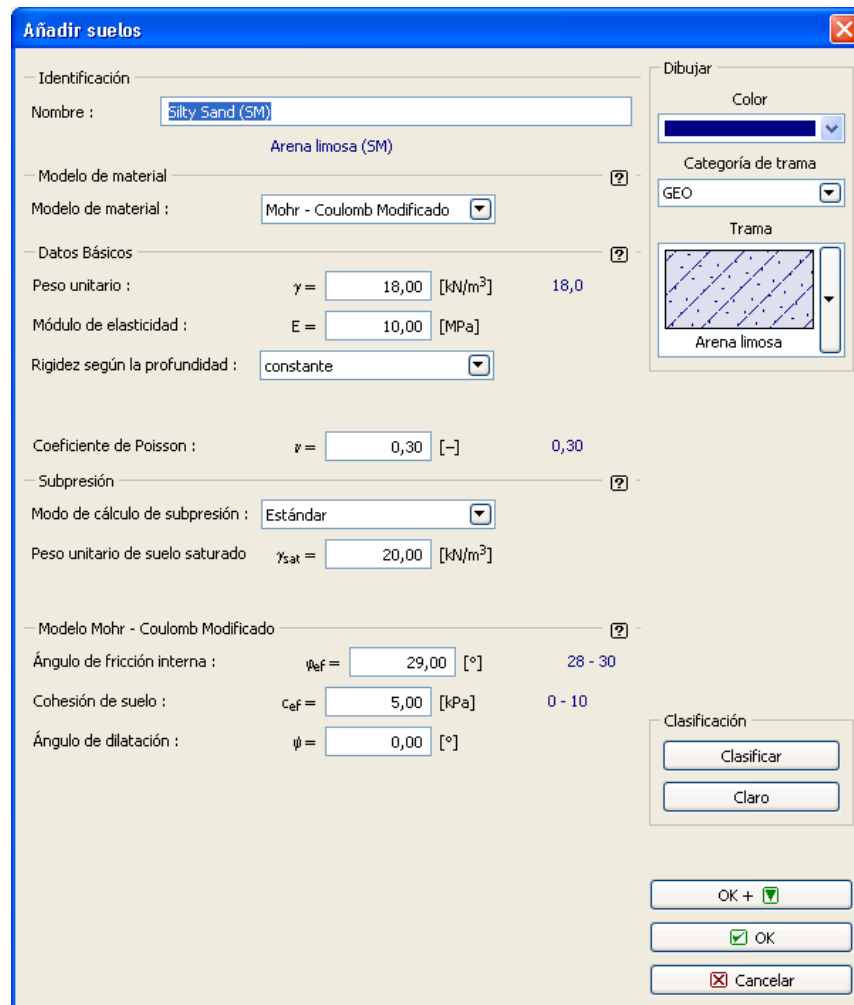
Cuadro "Coordenadas globales"

Cuando se diseñan estructuras de muros pantalla, es necesario definir como "interfaces de suelo" las profundidades a las que se excavará el suelo en las etapas de construcción individual. En este caso particular, vamos a establecer el nivel de la superficie del terreno en 0,0m y las interfaces horizontales a nivel de - 3,0 m, 3,5 m - y - 5,5 m. El punto con coordenadas [0,0; 0,0] forma la parte superior del muro pantalla.



Cuadro "Interfaz"

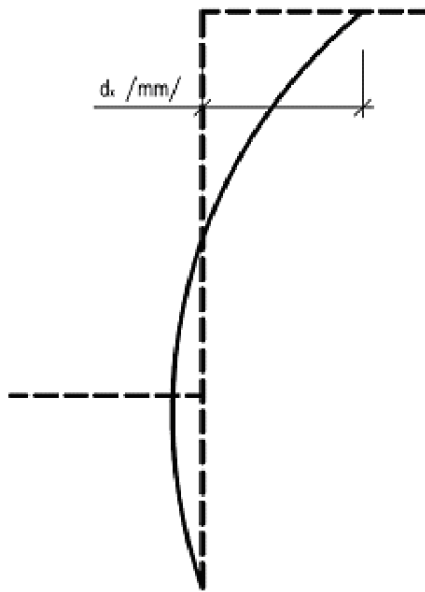
Ahora vamos a especificar los parámetros del suelo respectivos y, posteriormente, le asignaremos el suelo a la región creada. Vamos a seleccionar el modelo Mohr-Coulomb Modificado (Véase la nota).



Cuadro "Añadir nuevo suelo"

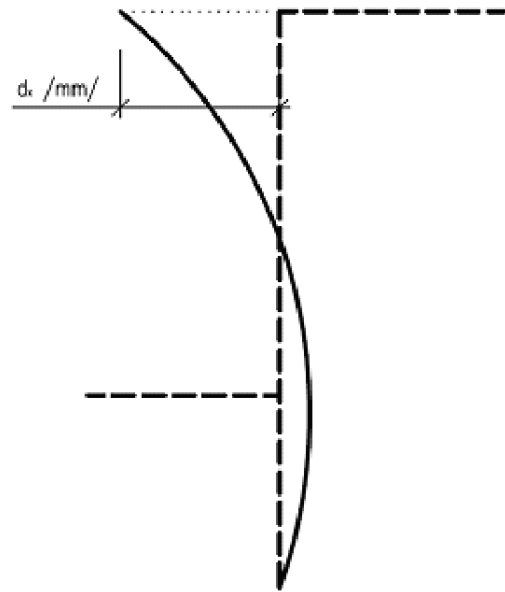
Nota: Cuando las estructuras pantallas están siendo diseñadas, es necesario introducir elementos de contacto entre el suelo y la viga. Solucionar problemas sin elementos de contacto da lugar a resultados totalmente irreales (para más información, visite la Ayuda - F1).

Solución sin contacto



**Deformación de pantalla al suelo
(MAL)**

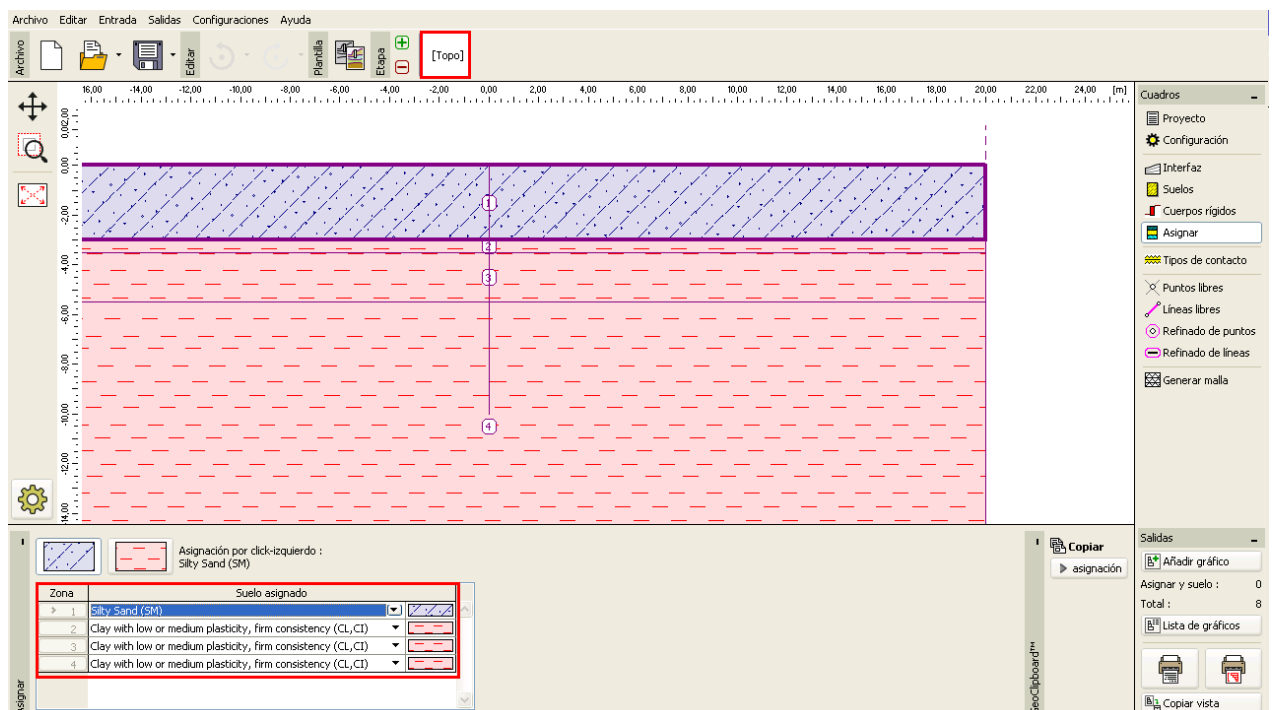
Solución con contacto



**Deformación de pantalla desde el suelo
(Correcto)**

Aplicación de un modelo de material adecuado a un análisis numérico de estructuras pantalla

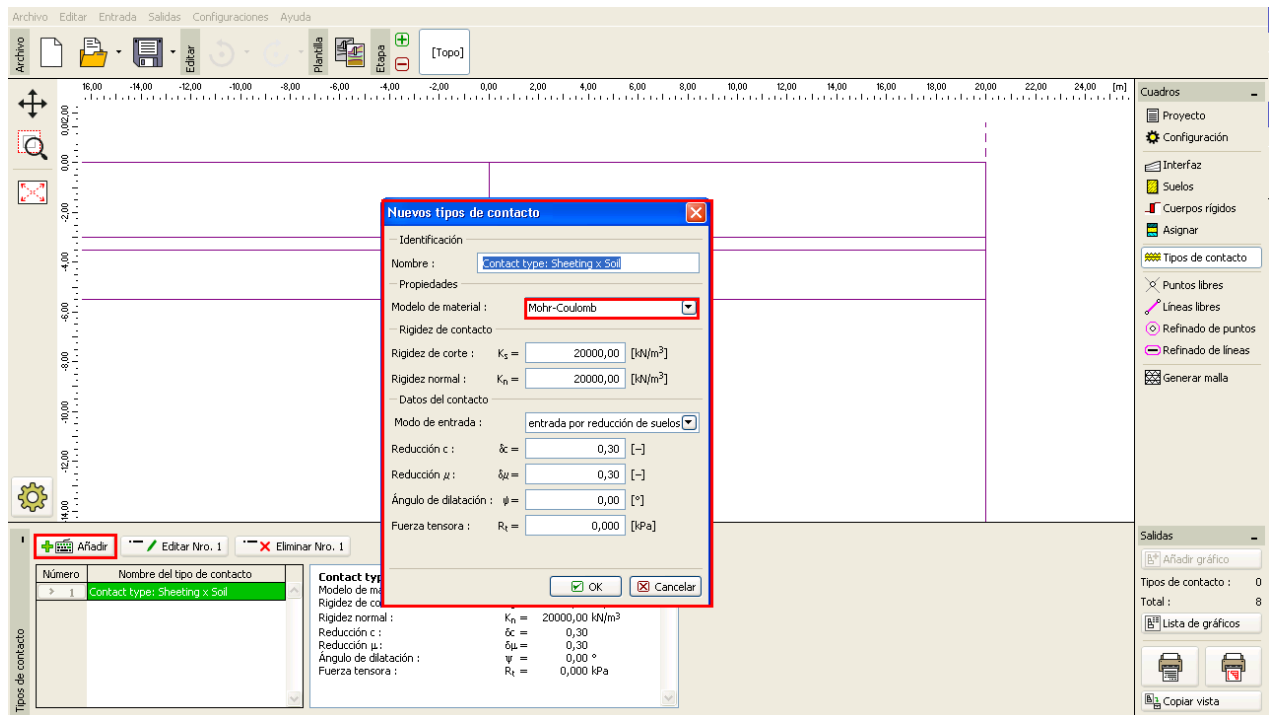
La siguiente figura presenta la asignación de suelo para el perfil geológico.



Cuadro "Asignar"

El siguiente paso consiste en establecer los parámetros de contacto (con el botón "Añadir"). Cuando se analizan las estructuras pantalla, siempre es necesario definir el contacto con el modelo de material no-lineal para los elementos viga. En este caso particular, seleccionaremos la opción "Mohr-Coulomb" para

obtener resultados realistas. Asumimos la reducción de los parámetros de suelo en el contacto para ser $\delta c = \delta \mu = 0.3$ y mantendrá a los valores estándar de la rigidez de contacto $K_s = K_n = 20\,000 \frac{kN}{m^3}$.

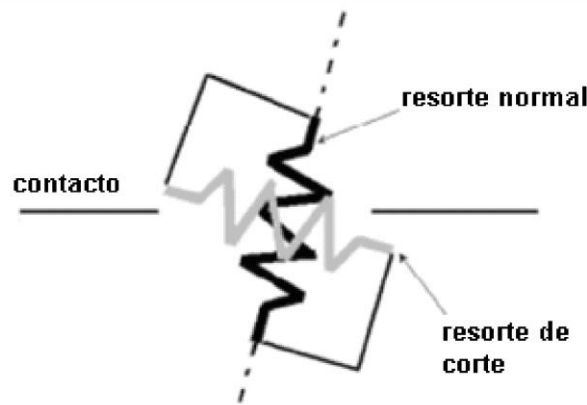


Cuadro "Nuevo tipo de contacto"

Nota: Los elementos de contacto se utilizan en los análisis cuando es necesario permitir interacción entre la estructura y el ambiente circundante - una interfaz entre dos materiales totalmente diferentes (suelo - láminas).

Un ejemplo típico de la utilización de elementos de contacto es el modelado de estructuras pantalla, muros de contención o revestimientos de túneles, donde se utiliza el elemento de contacto para la simulación de una zona delgada de suelo o de roca en la que toma lugar una intensa tensión, sobre todo, la tensión de corte.

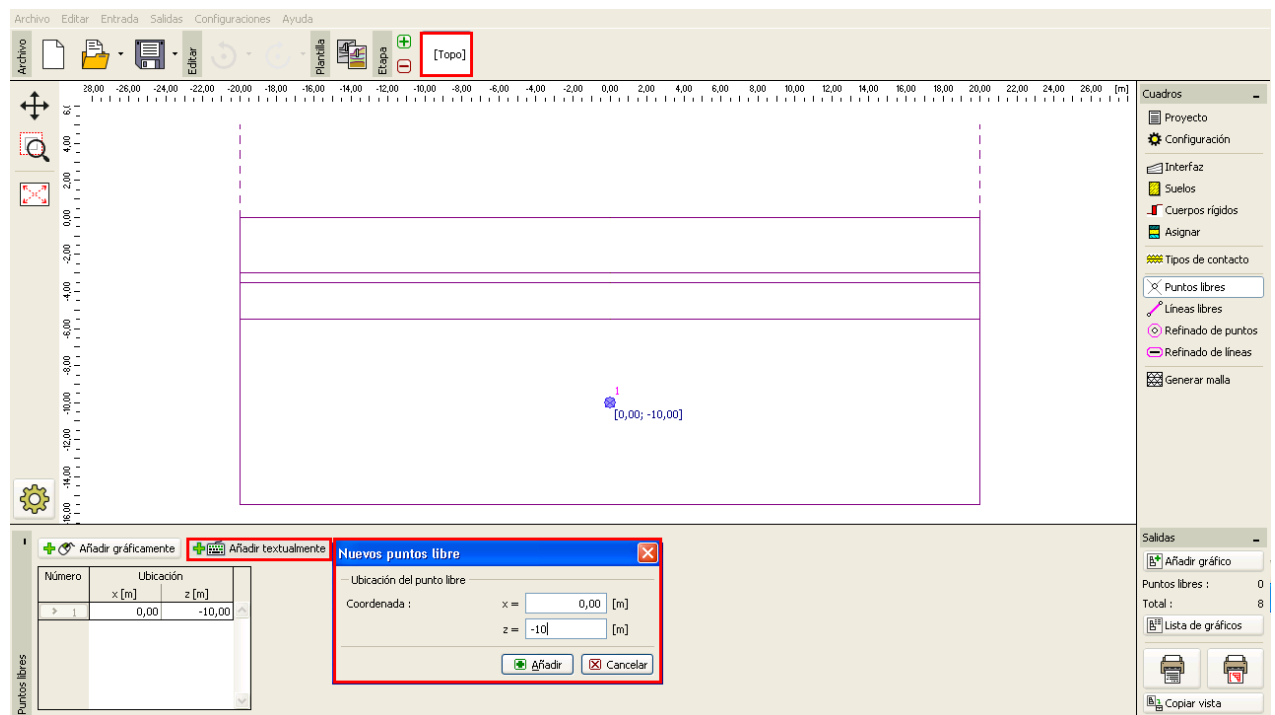
Los contactos se pueden ingresar entre las interfaces individuales del suelo. El elemento de contacto es un elemento con un espesor cero, expresando la relación entre las tensiones de contacto y los cambios relativos en los desplazamientos a lo largo del contacto (para más información, visite la Ayuda - F1).



Esquema de representación de elementos de contacto

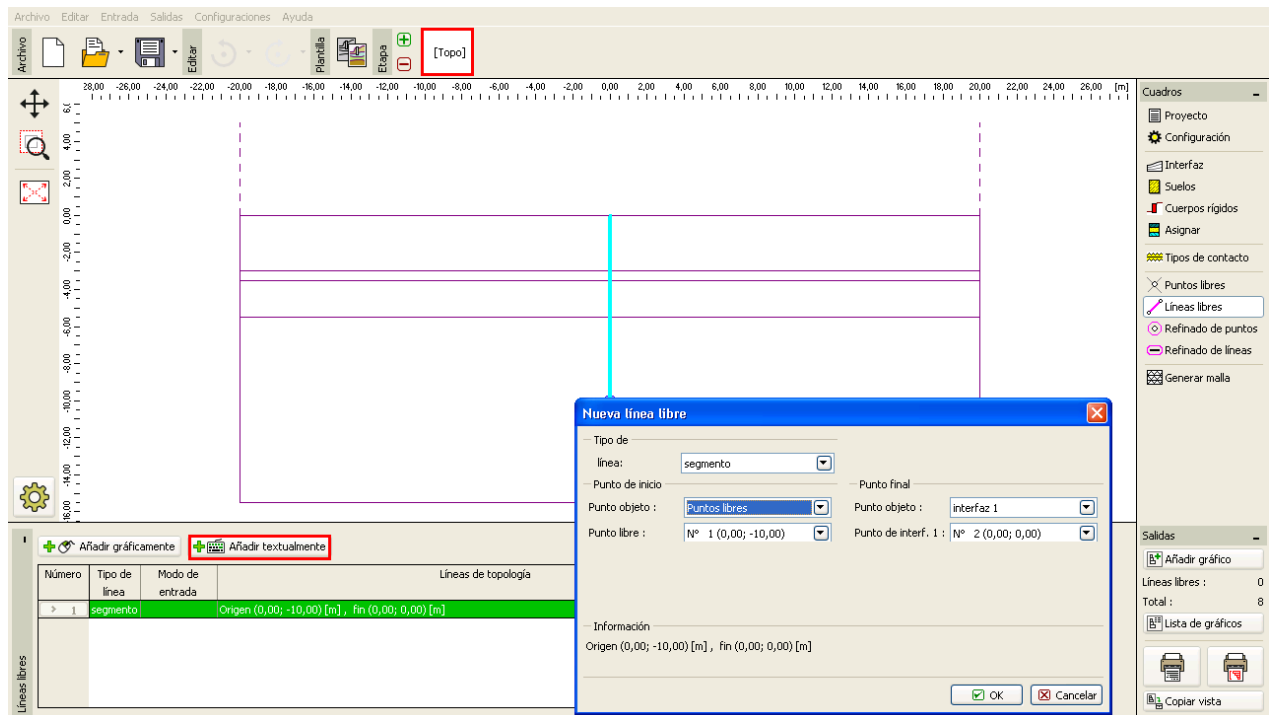
Nota: A pesar del hecho de que la selección del parámetro K_s no es importante en el caso de comportamiento del contacto completamente plástico, la magnitud de esta cantidad es crucial para la solución exitosa del problema no lineal en cuestión. Valores de rigidez muy alta (más de $100\,000 \frac{kN}{m^3}$) pueden conducir a la oscilación de la solución numérica. Por el contrario, valores demasiado bajos de los parámetros K_s y K_n (debajo $10\,000 \frac{kN}{m^3}$) pueden dar lugar a deformaciones poco realistas de estructuras. Sin embargo, los valores de las tensiones de contacto K_s y K_n no se ven afectados de manera significativa por la selección de la rigidez K_s y K_n (para más información, visite la Ayuda - F1).

Luego vamos a configurar la geometría de la estructura pantalla en los cuadros "puntos libres" y "líneas libres". El principio de establecer puntos libres y líneas libres se describe con más detalle en el capítulo anterior 23. *Análisis del revestimiento del colector.*



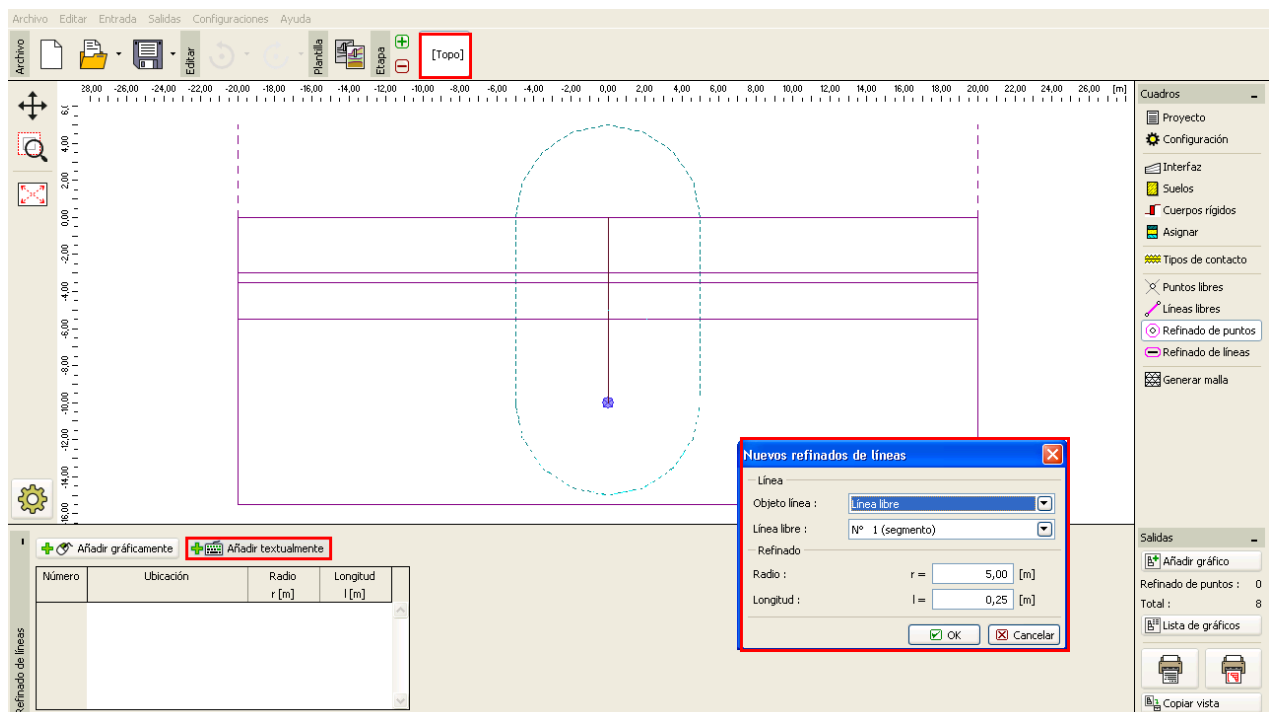
Cuadro "Nuevos puntos libres"

En primer lugar vamos a establecer un nuevo punto de conexión con coordenadas [0,0 - 10,0]. La línea libre que forma el muro pantalla se originará mediante la conexión de este punto con el punto de interfaz del terreno (para más información, visite la Ayuda - F1).



Cuadro "Nueva línea libre"

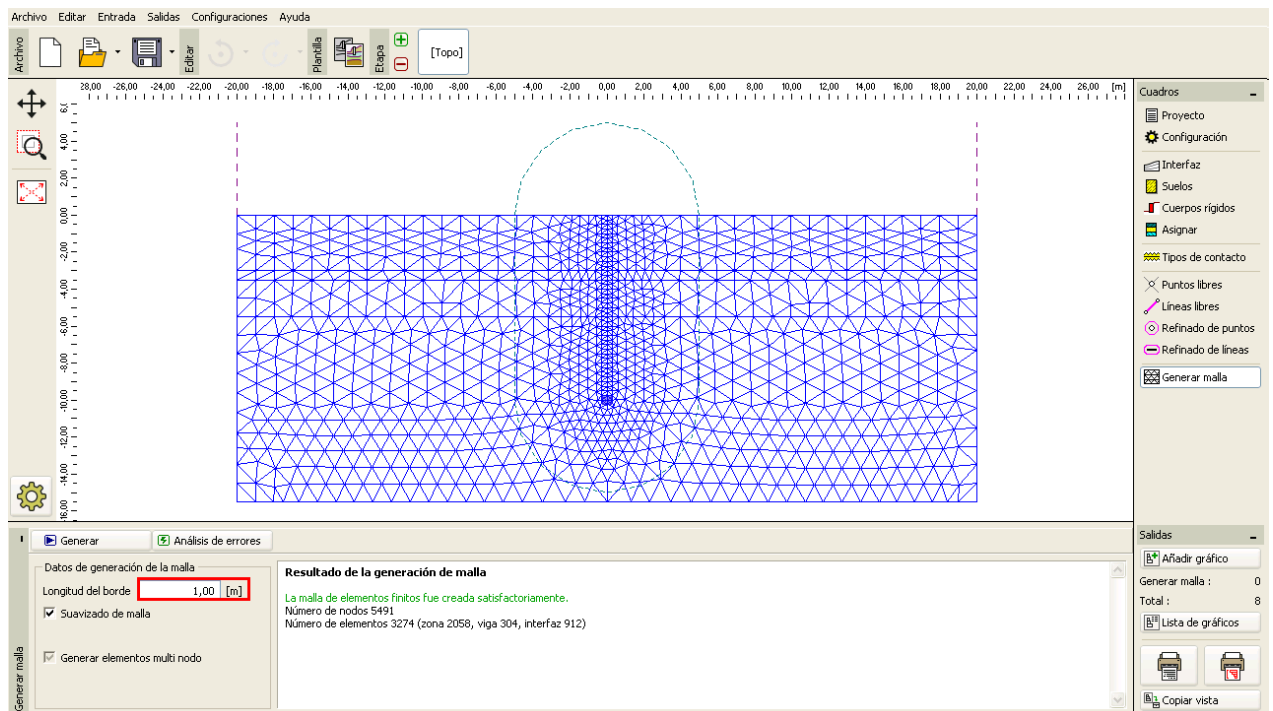
El último paso en la configuración de la topología es la generación de la malla de elementos finitos. Es razonable refinar la malla de EF a los alrededores del muro pantalla. En el cuadro "Nuevo refinado de línea" Vamos a seleccionar la medida de radio $r = 5.0 \text{ m}$ y la longitud del elemento borde $l = 0.25 \text{ m}$



Cuadro "Nueva refinado de línea"

Luego nos dirigiremos al Cuadro "Generar malla" y generamos una malla con la longitud del elemento borde de 1,0 m (utilizando el botón "**Generar**"). El programa suavizará automáticamente la malla de EF refinada.

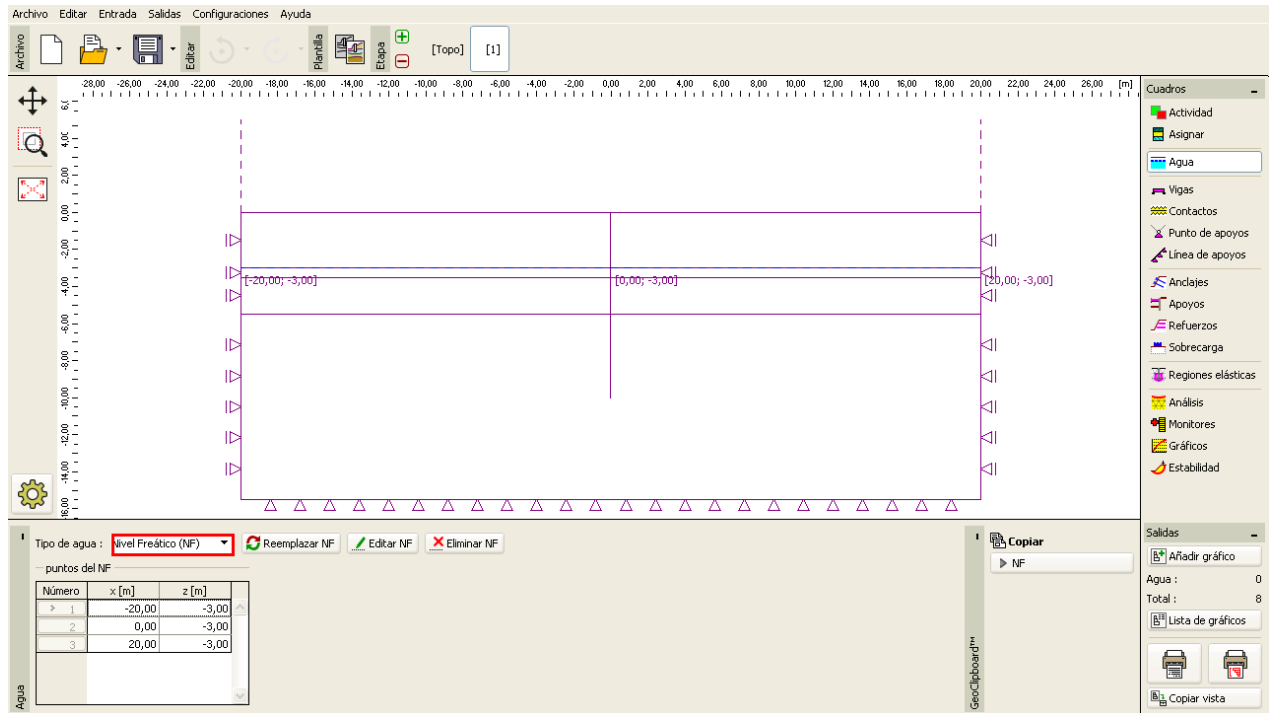
Nota: A continuación vamos a comprobar visualmente si la densidad de la malla de elementos finitos es adecuada a la magnitud y a la complejidad del problema dado (para más información, visite la Ayuda - F1). El aumento de la densidad de la malla contribuye a la estabilidad del análisis no lineal de manera similar al efecto de la disminución en la rigidez de corte.



Cuadro "Generar Malla"— longitud del elemento borde 1 m (con densidad de malla aumentada localmente)

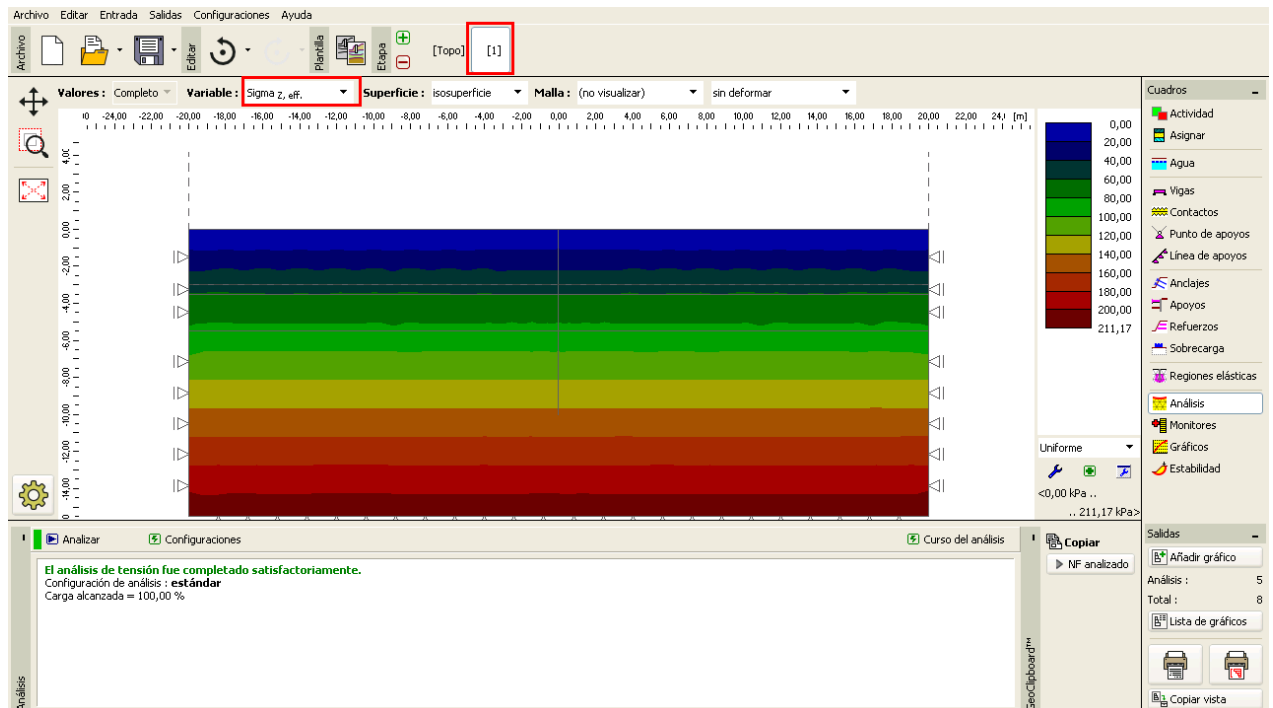
Etapa de construcción 1: Tensión geoestática primaria

Después de generar la malla vamos a ir a la Etapa de construcción 1 y estableceremos el nivel freático (a partir de ahora nos referimos como NF) a una profundidad de 3,0 m bajo la superficie del terreno (véase el diagrama).



Cuadro "Agua"— Etapa de construcción 1 (NF a una profundidad de 3.0 m)

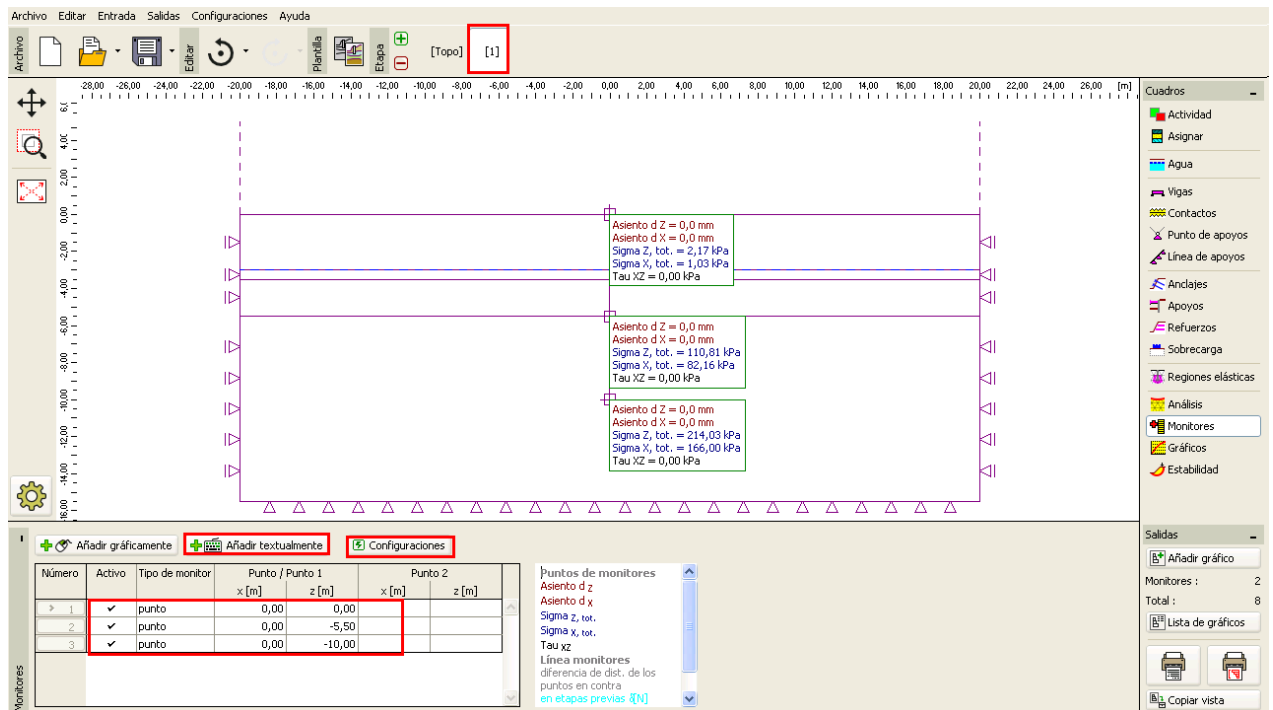
Vamos a llevar a cabo el análisis de la tensión geostática primaria. Dejaremos el tipo de análisis en "Estándar" (para más detalles vea la Ayuda – F1)



Cuadro "Análisis"— Etapa de construcción 1 (Tensión geostática primaria $\sigma_{z,ef}$)

Con el propósito de observar los valores de ciertas cantidades (durante el curso del análisis de las etapas de construcción individuales) vamos a definir los llamados monitores de punto en el programa (utilizando el botón "Añadir"). Vamos a seleccionar las ubicaciones de los monitoreos en los puntos que

representarán a la cabeza y a los pies del muro pantalla que se está modelando, es decir, [0,0; 0,0] y [0,0; - 10,0] y luego en la región de la excavación del suelo en el fondo del pozo de construcción [0,0; - 5,5].

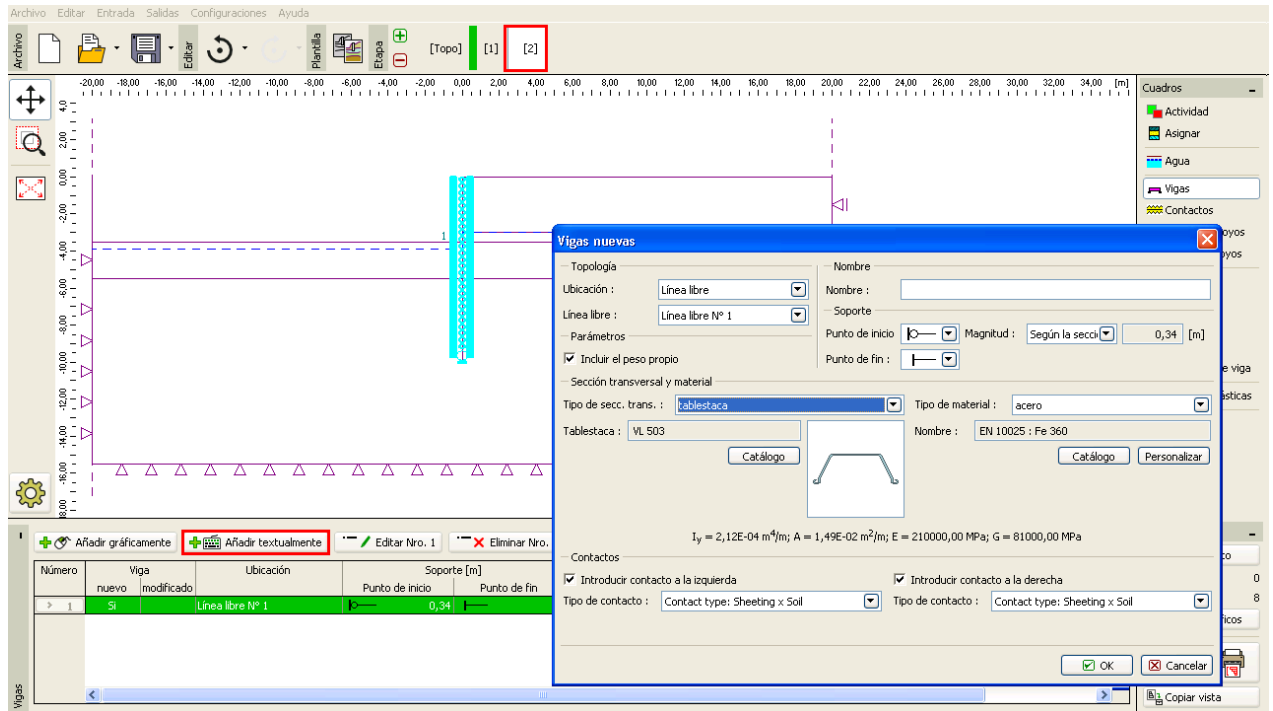


Cuadro "Monitores"– Etapa de construcción 1 (puntos de monitoreo)

Nota: Vamos a editar los valores individuales de las cantidades que queremos visualizar en los resultados utilizando el botón "Configuración" (en la parte inferior derecha de la pantalla). Al analizar la estructura del muro pantalla, estamos sobre todo interesados en el cambio en la tensión geostática y en la magnitud de los desplazamientos verticales o laterales.

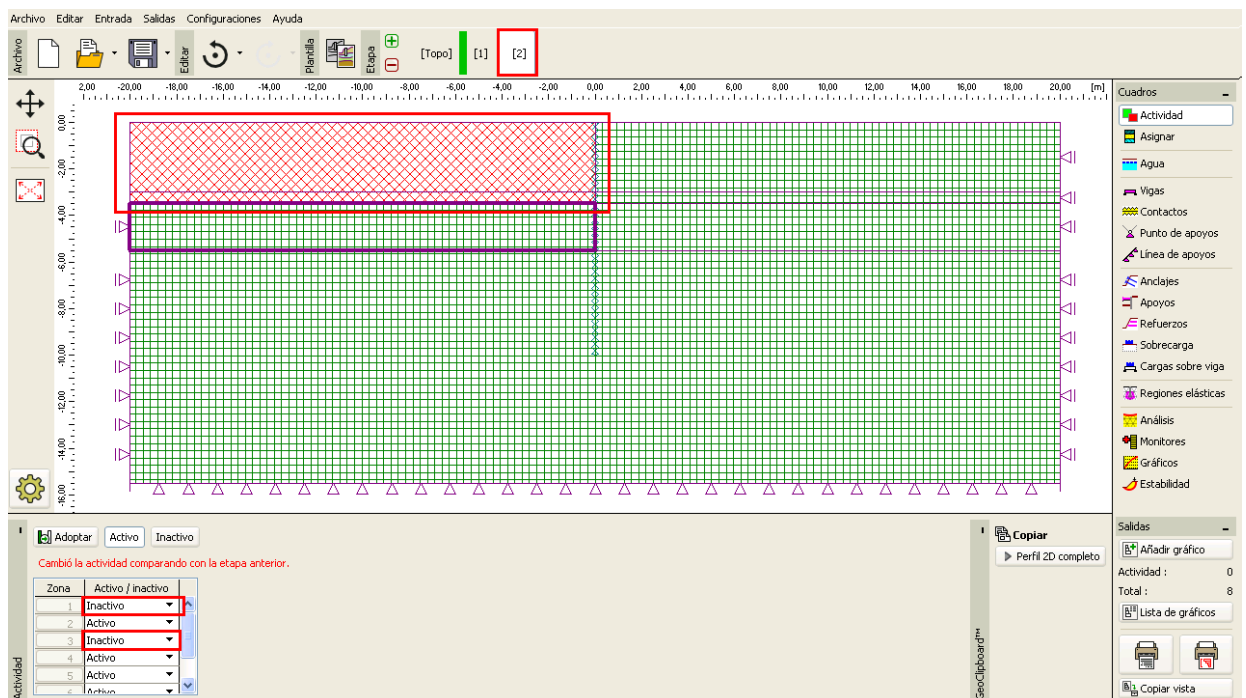
Etapa de construcción 2: modelado de los elementos de viga

En esta etapa de construcción vamos a ir primero al cuadro "Vigas" y modelamos el muro de tablestacas. Vamos a definir lo siguiente: ubicación, material y clase de acero, tipo de sección trasnversal (VL 503), soporte de los extremos viga y los contactos (para más detalles visite la Ayuda - F1).



Cuadro "Nueva viga"– Etapa de construcción 2

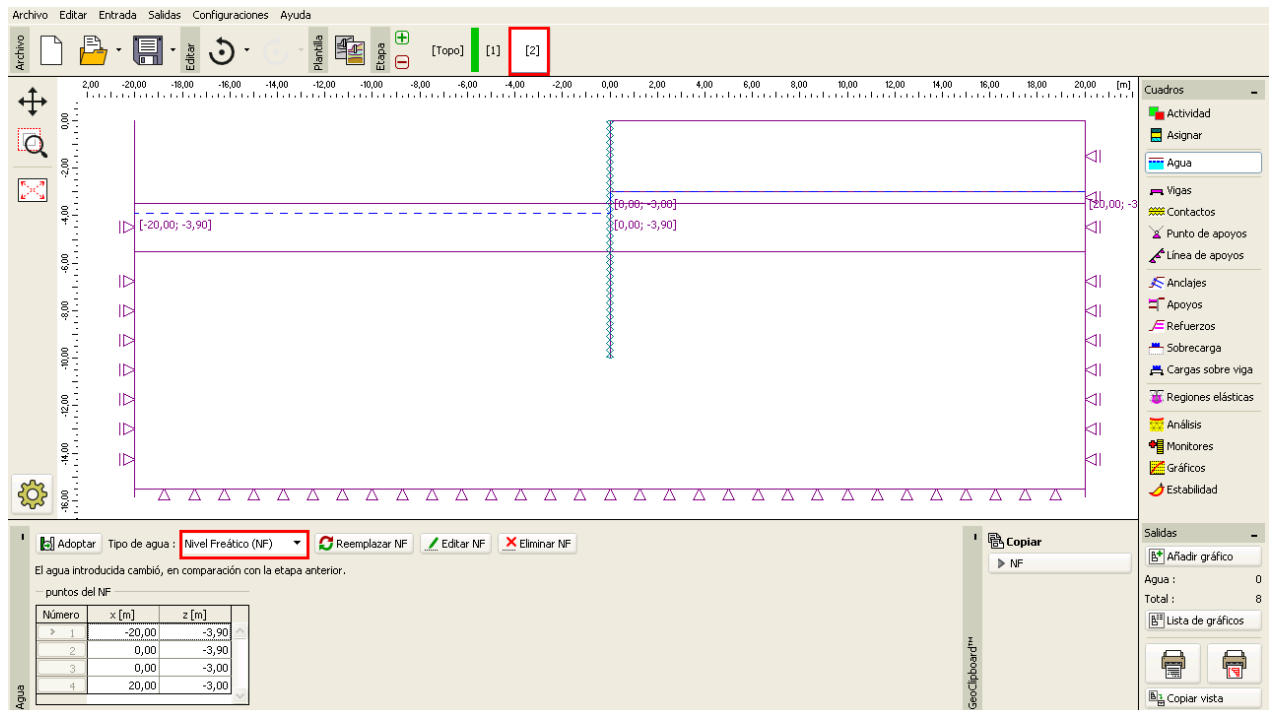
A continuación vamos a modelar la excavación del suelo en el cuadro "Actividad" - fijamos las regiones que figuran en el programa con el ratón como inactivos (para más información, visite la Ayuda - F1).



Cuadro "Actividad"– Etapa de construcción 2

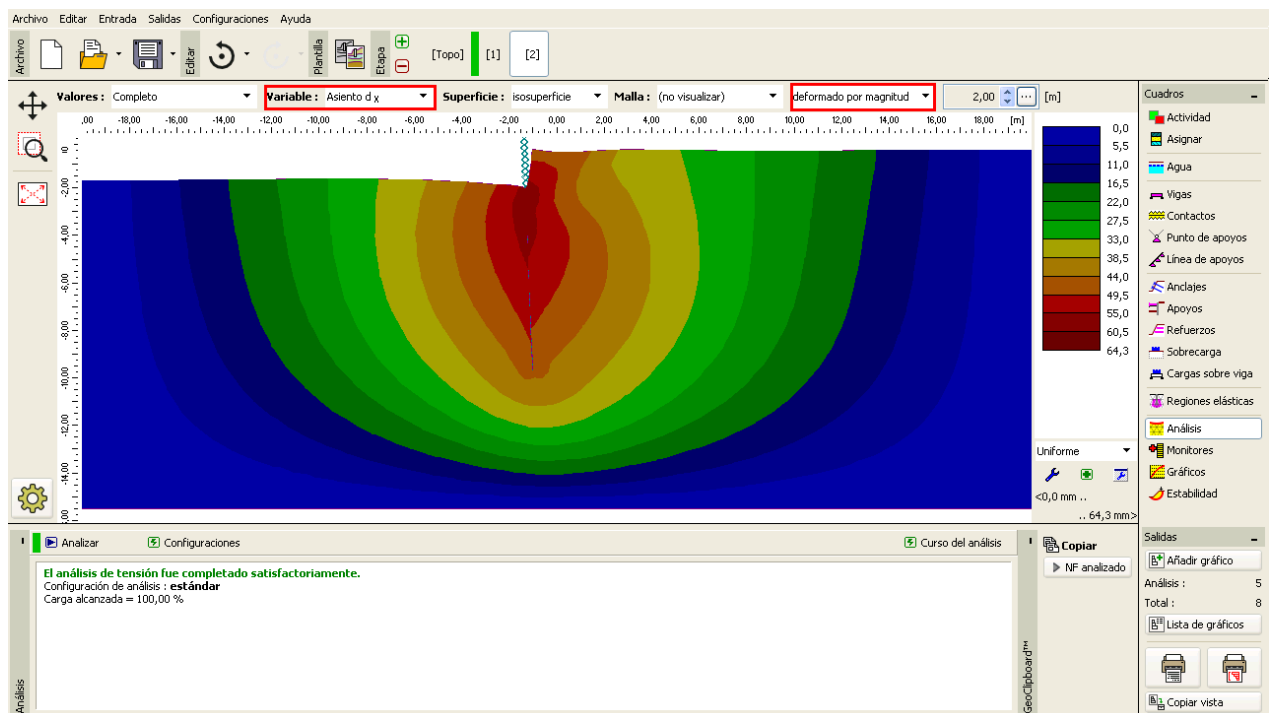
Nota: Es obvio por la figura anterior que el corrector automático de estructura incorporado en el programa divide las interfaces de los suelos atravesados por el muro en regiones circunscritas individuales (para más información, visita Ayuda - F1).

Además, en el Cuadro "Agua" ingresamos el cambio en el NF según la siguiente figura. Los demás parámetros se mantendrán sin cambios.

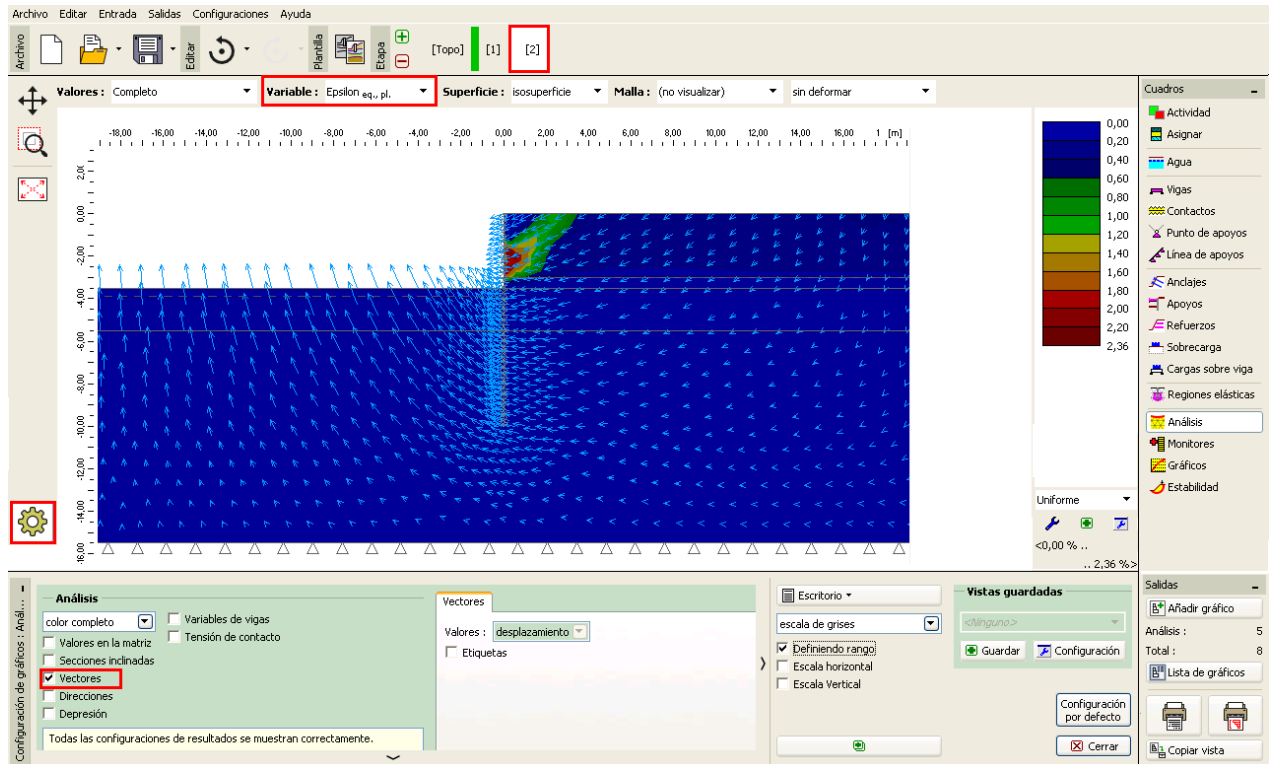


Cuadro "Agua"– Etapa de construcción 2 (cambios en el curso del NF)

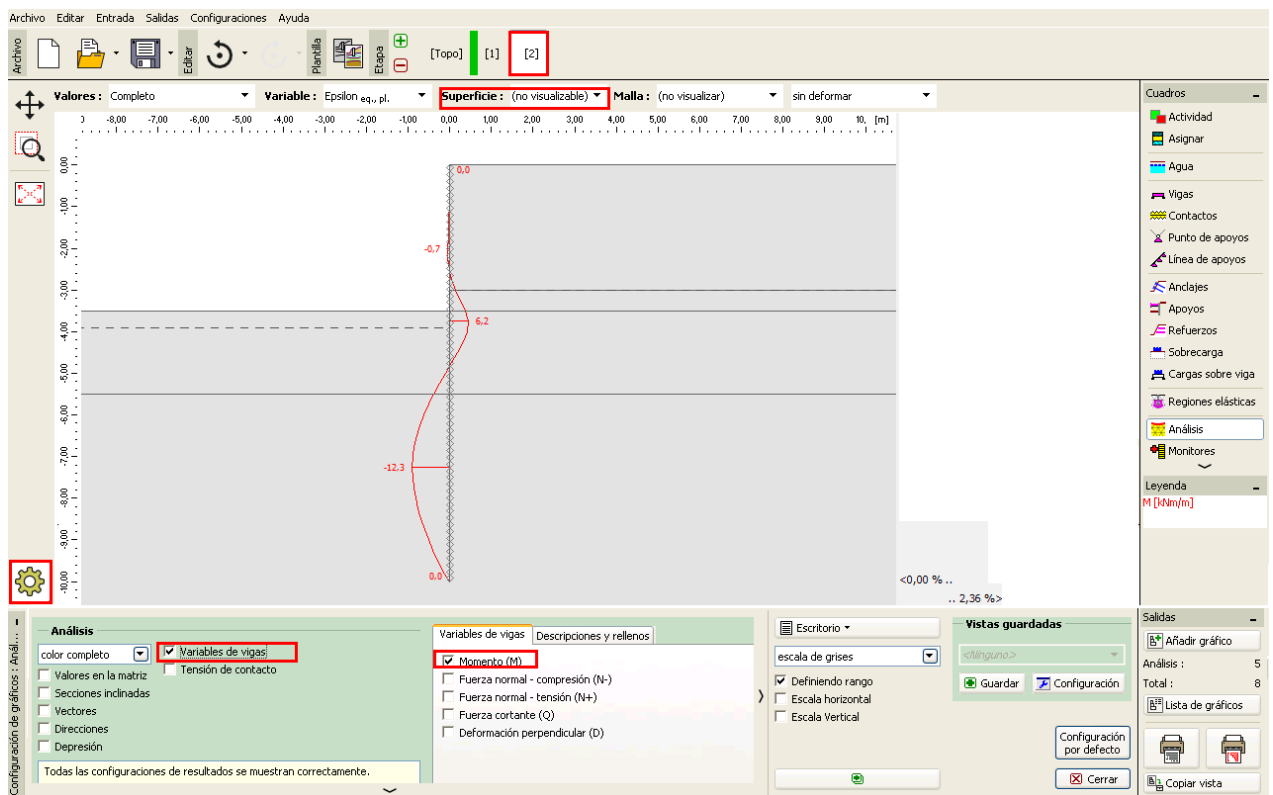
Ahora vamos a llevar a cabo el análisis de la Etapa de construcción 2 y examinaremos los resultados de los diagramas de fuerzas internas a lo largo de la viga, la deformación plástica equivalente y la estructura deformada.



Cuadro "Análisis"– Etapa de construcción 2 (Asiento d_x – estructura deformada)



Cuadro “Análisis”– Etapa de construcción 2 (deformación plástica equivalente $E_{d,pl}$ y vectores de desplazamiento)



Cuadro “Análisis”– Etapa de construcción 2 (distribución del momento de flexión M)

Etapa de construcción 3: configuración de anclajes

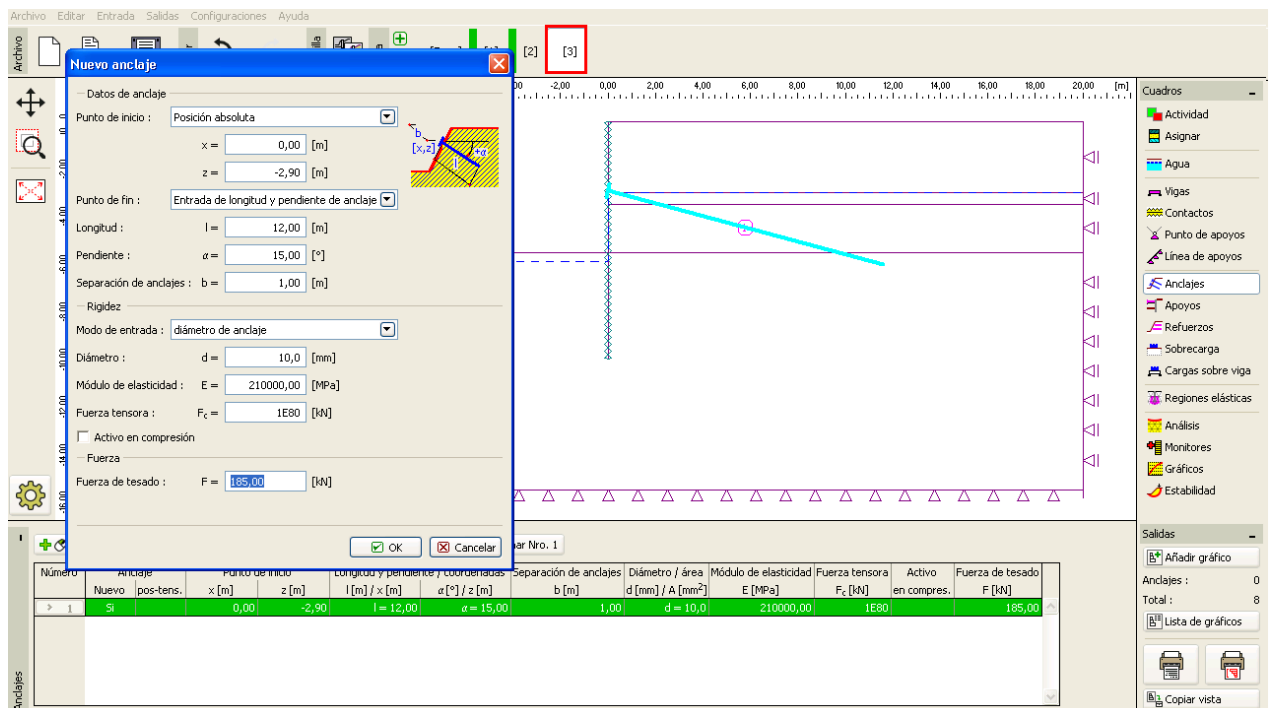
Vamos a añadir Etapa de construcción 3 y luego presionaremos el botón "Añadir" en el cuadro "Anclaje" y, en la ventana de diálogo "Nuevos anclajes", establecemos un anclaje de acero con fuerza pre-estrés $F = 185 \text{ kN}$. Consideraremos el anclaje a una profundidad de 2.9 m debajo de la superficie del terreno: estableceremos las coordenadas de la cabeza de anclaje por el punto [0.0; -2.9].

Nota: Los anclajes se modelan por medio de un elemento de barra elástica con constante de rigidez normal. El fallo del elemento de anclaje se controla mediante la especificación de la fuerza máxima. El anclaje está fijado al suelo en dos puntos - al principio y al final. Se asume que no hay interacción entre el suelo y el elemento de refuerzo a lo largo de la longitud de anclaje (para más información, visite la Ayuda - F1).

Vamos a asumir los siguientes parámetros de anclaje para este problema en particular:

- Longitud de anclaje: $l = 12 \text{ m}$,
- Pendiente del anclaje: $\alpha = 15^\circ$,
- Diámetro del anclaje: $d = 10 \text{ mm}$,
- Espaciado del anclaje: $b = 1 \text{ m}$.

Nota: la rigidez de anclaje se define en el análisis por el módulo de elasticidad, el área de la sección transversal del anclaje y el espaciamiento de los anclajes. Es necesario tener en cuenta que, en el caso de deformación plana, los anclajes se sustituyen por un 1 m de anchura de la membrana. Otro dato de entrada importante de los anclajes es la fuerza de pre-tensado y la fuerza de rotura de anclaje. En este caso particular, no vamos a tener un elemento de refuerzo de rotura, por lo tanto, vamos a establecer la fuerza quiebre F_c en un valor lo suficientemente alto (para más información, visite la Ayuda - F1).



Número	Anclaje	Punto de inicio	Longitud y pendiente y coordenadas	Separación de anclajes	Diámetro / área	Módulo de elasticidad	Fuerza tensora	Activo	Fuerza de tesado
		x [m]	z [m]	l [m] / α [°]	b [m]	d [mm] / A [mm²]	F_c [kN]	en compres.	F [kN]
1	Nuevo pos-tens.	0,00	-2,90	l = 12,00 $\alpha = 15,00$	1,00	d = 10,0	210000,00	1E80	185,00

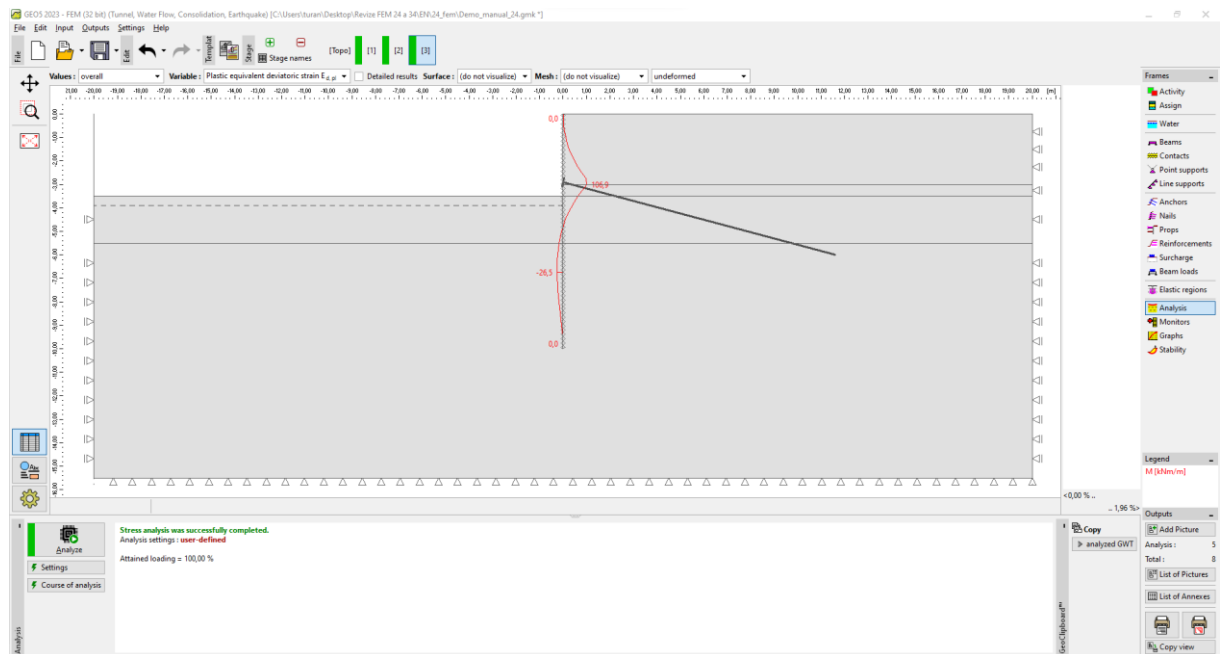
Cuadro "Nuevo anclaje"– Etapa de construcción 3

Nota: El anclaje se deforma durante el curso del análisis. Como resultado de la deformación del anclaje y del macizo que rodea, la fuerza de pre-tensado establecida para el anclaje puede caer. Por lo tanto, si

queremos alcanzar la fuerza de pre-tensado de hormigón, es necesario introducir una tensión adicional en el anclaje durante la siguiente etapa o ajustar la fuerza de pre-tensado lo suficientemente alta (la fuerza resultante en el anclaje después del análisis, se indica en el diagrama en la cabeza del anclaje, debajo del con conjunto de fuerza de pre-tensado). En las etapas de construcción posteriores, los parámetros de anclaje no se pueden cambiar, sólo es posible añadir la tensión para alcanzar la nueva fuerza de pre-tensado, o eliminar todo el anclaje de la estructura.

El empotramiento del anclaje en la masa de tierra debe ser lo suficientemente duro (fijado a un elemento) de manera que la tracción poco realista del anclaje no se produzca cuando las deformaciones plásticas significativas se desarrollan en la proximidad de la raíz de anclaje (se fijan a un nodo, gran aumento de la densidad en el entorno de la raíz), causando la pérdida poco realista de la fuerza de pre-tensado.

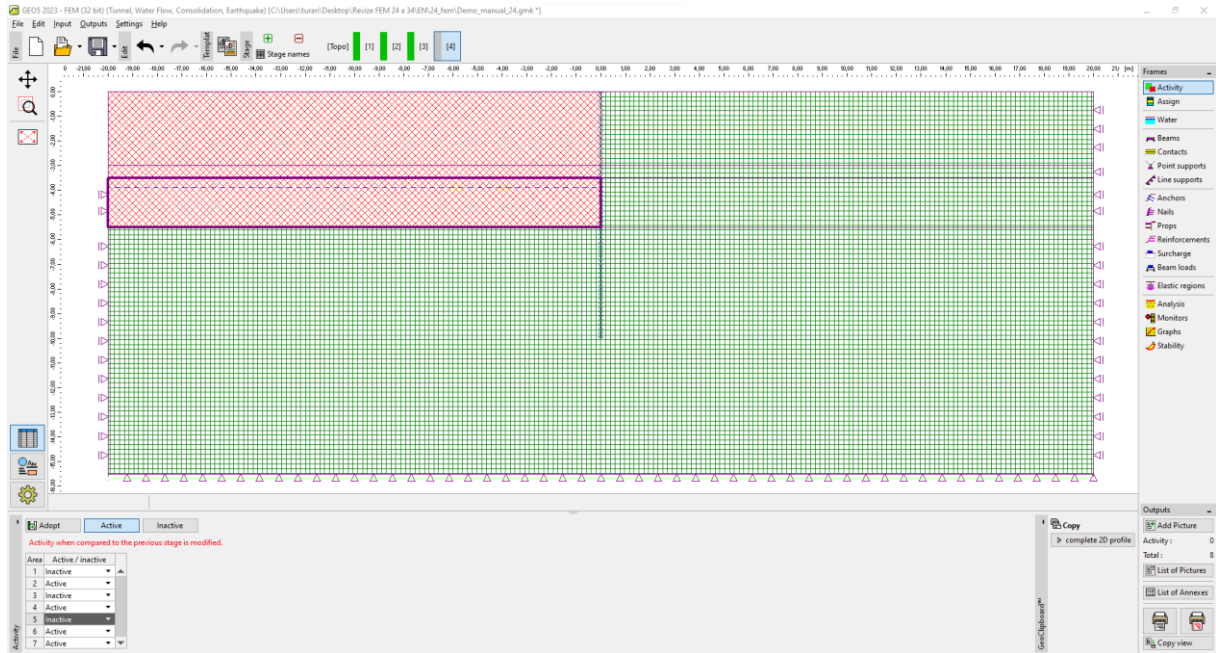
Ahora vamos a llevar a cabo el análisis de la etapa de construcción 3 y a examinar los resultados de la solución numérica (de manera similar a la etapa de construcción anterior).



Cuadro "Análisis"– Etapa de construcción 3

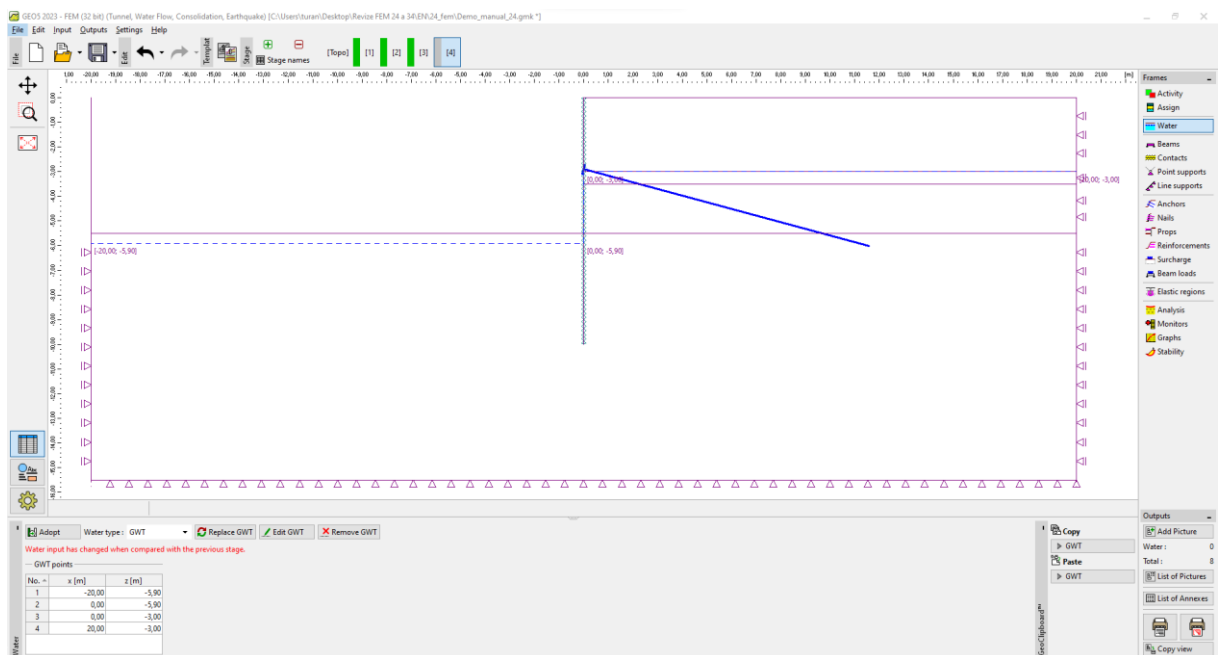
Etapa de Construcción 4: Extraer el suelo restante

Añadimos la etapa de construcción 4 y extraemos el suelo restante. En primer lugar, seleccionaremos la región dada con el cursor del mouse y haremos clic en el botón "inactivo"

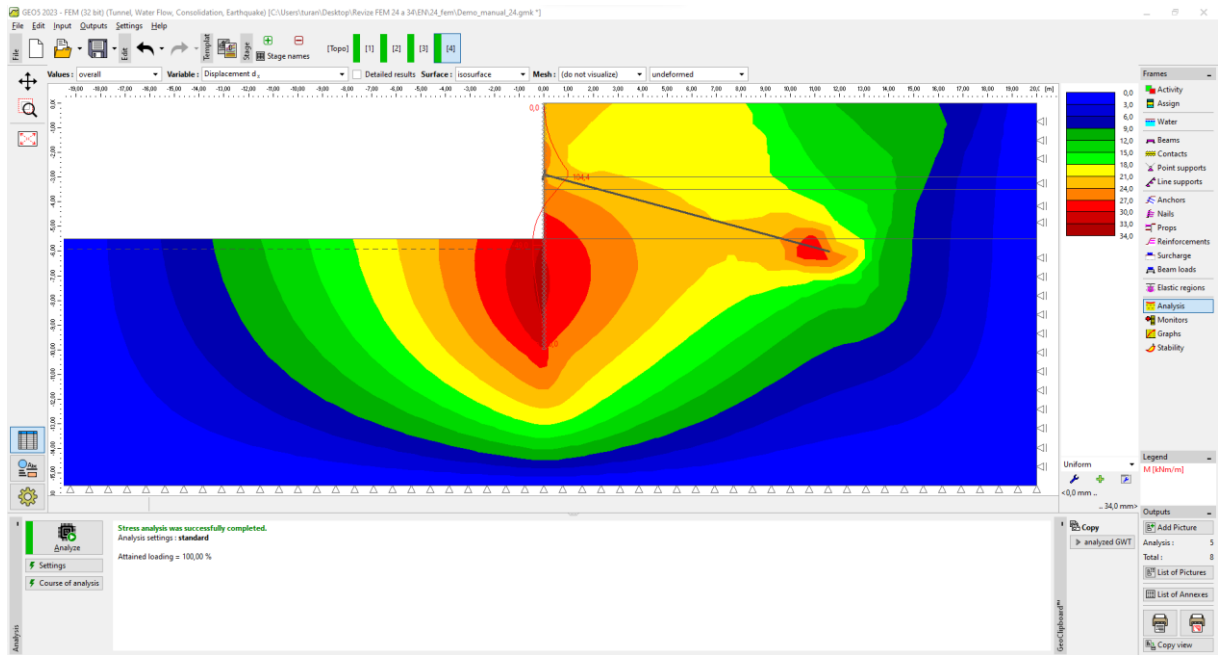


Cuadro “Actividad” – Etapa de construcción 4

En el último paso de configuración, la etapa de construcción 4 cambiaremos el nivel de la napa freática según el siguiente diagrama. Los otros parámetros de entrada permanecerán sin cambios.

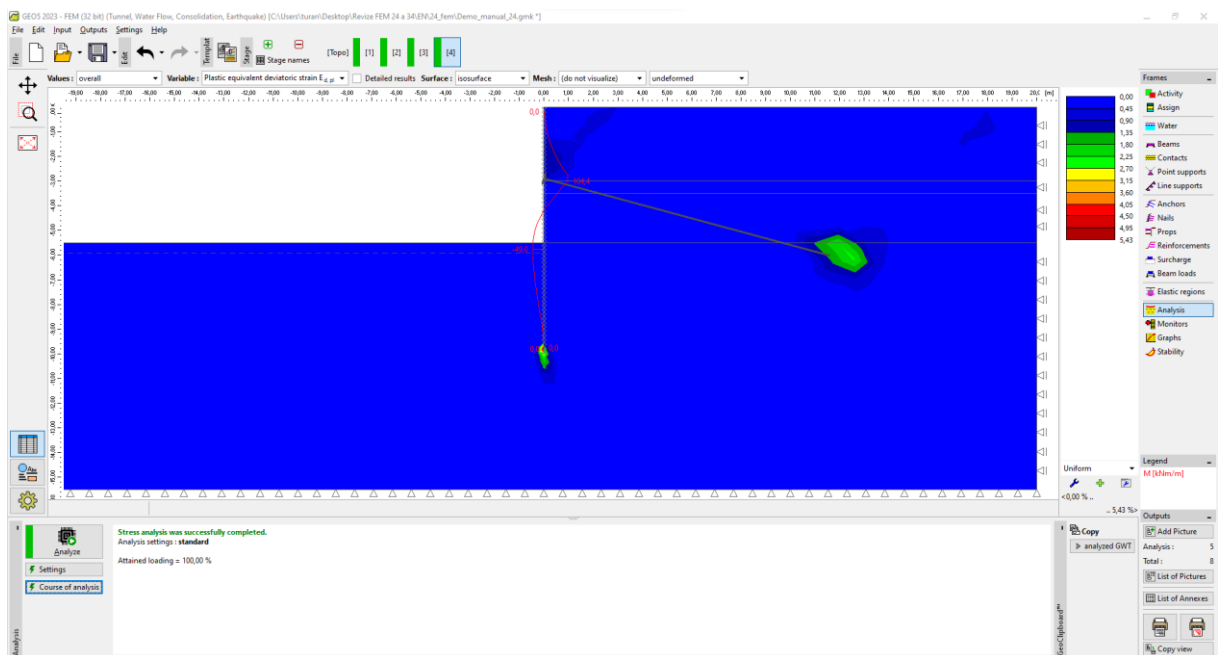


Cuadro “Agua” – Etapa de construcción 4 (cambios en el NF)



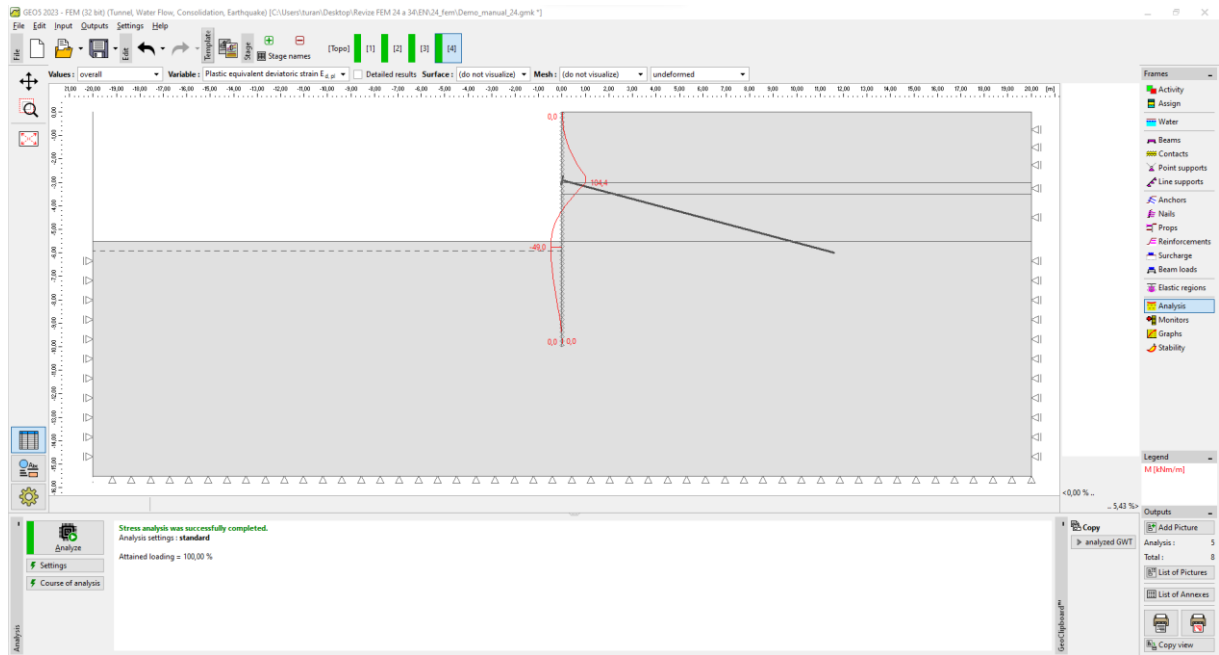
Cuadro "Análisis" - Etapa de construcción 4 (asentamiento d_x Estructura deformada)

De esta figura se deduce que el desplazamiento lateral máximo en las proximidades del muro pantalla formada por tablestacas es de 34 mm.



Cuadro "Análisis" - Etapa de construcción 4 (tensión plástica equivalente $\varepsilon_{eq,pl}$)

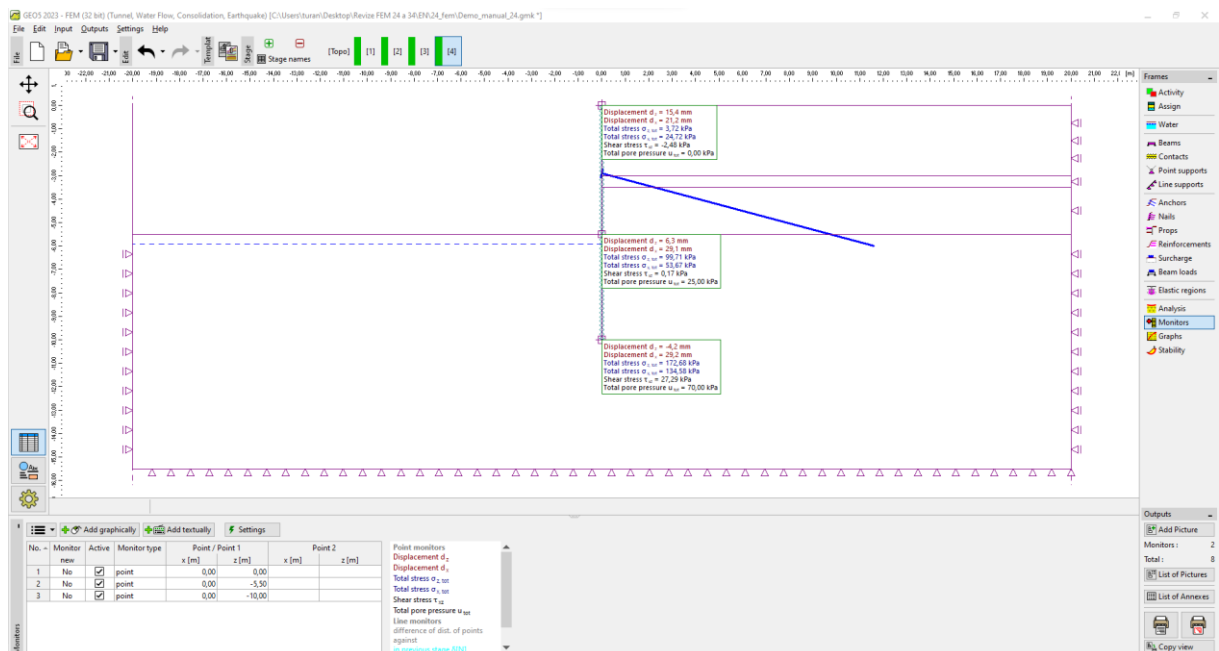
Es obvio a partir de las deformaciones plásticas equivalentes trazadas que las deformaciones plásticas más grandes del suelo se desarrollan en las proximidades de la base del muro pantalla. En la segunda etapa, el suelo fue plastificado en las cercanías de la ubicación de anclaje (para más detalles, visite la ayuda - F1).



Cuadro "Análisis" - Etapa de construcción 4 (Distribución de momentos de flexión M)

Identificamos los extremos locales en el diagrama de curvas paralelos momentos de flexión a lo largo de la longitud del muro pantalla; los grabaremos en la tabla, que se presenta en la última parte de este capítulo.

Ahora examinamos los resultados de los monitores y determinamos las deformaciones en la cabeza del muro pantalla.



Cuadro "Monitores" - Etapa de construcción 4 (monitores de puntos)

Evaluación de Resultados:

La siguiente tabla presenta los extremos de las fuerzas internas a lo largo del muro de tablestacas para las de etapas construcción 2 y 3. Son los valores de los momentos de flexión. Realizamos este análisis primero para el modelo material Mohr-Coulomb Modificado con un aumento local de la densidad de la malla utilizando la opción de línea de refinamiento. Luego comparamos estos resultados con el programa Verificación de Muros Pantalla de GEO5.

Modelo de Material / programa	Etapla 2 $M [kNm/m]$	Etapla 3 - campo $M [kNm/m]$	Etapla 3 – anclaje $M [kNm/m]$
MCM (Modificado M-C)	9.60	-49.00	104.4
Verificación de Muros Pantalla * (solución analítica)	29.16	- 28.91	110.57

Resumen de resultados - momentos de flexión a lo largo de la longitud de la estructura pantalla (altura)

Nota: Para la solución analítica se consideró el análisis de la sub-grado del módulo de reacción horizontal según Schmitt (para más información, visite la Ayuda - F1). Hemos definido los parámetros complementarios de la siguiente manera:*

- **Clase de suelo SM, densidad media:** Análisis de presión en reposo – suelo sin cohesión, Ángulo de fricción entre la estructura y el suelo $\delta = 17^\circ$, Módulo de deformación del suelo $E_{def} = 10 \text{ MPa.}$
- **Clase de suelo CL, consistencia rígida:** Análisis de presión en reposo – suelo cohesivo ($\nu = 0.4$), Ángulo de fricción entre la estructura y el suelo $\delta = 14^\circ$, Módulo de deformación del suelo $E_{def} = 4.5 \text{ MPa.}$

Se consideró el valor de análisis como "Estándar - Estados límite". El análisis de presiones de tierra se llevó a cabo sin reducir los parámetros del suelo. Además no tomamos en cuenta el valor de la presión mínima de dimensionamiento (para más detalles visite la Ayuda - F1).

Conclusión

Las siguientes conclusiones se pueden extraer de los resultados del análisis numérico:

- El aumento de la densidad local de la malla de EF en los alrededores de las líneas conduce a la determinación más precisa de los resultados de las fuerzas internas.
- Es necesario para el análisis de muros pantallas utilizar elementos de contacto y modelos de materiales no lineales, lo que permite el desarrollo de deformaciones plásticas y dar una imagen más fiel del comportamiento real de las estructuras en la masa del suelo circundante.
- Las deformaciones plásticas máximas $E_{d,pl.}$ representan las ubicaciones potenciales de fallo (como resultado de exceder la condición de rendimiento del material)