

## Verificación de estabilidad de taludes

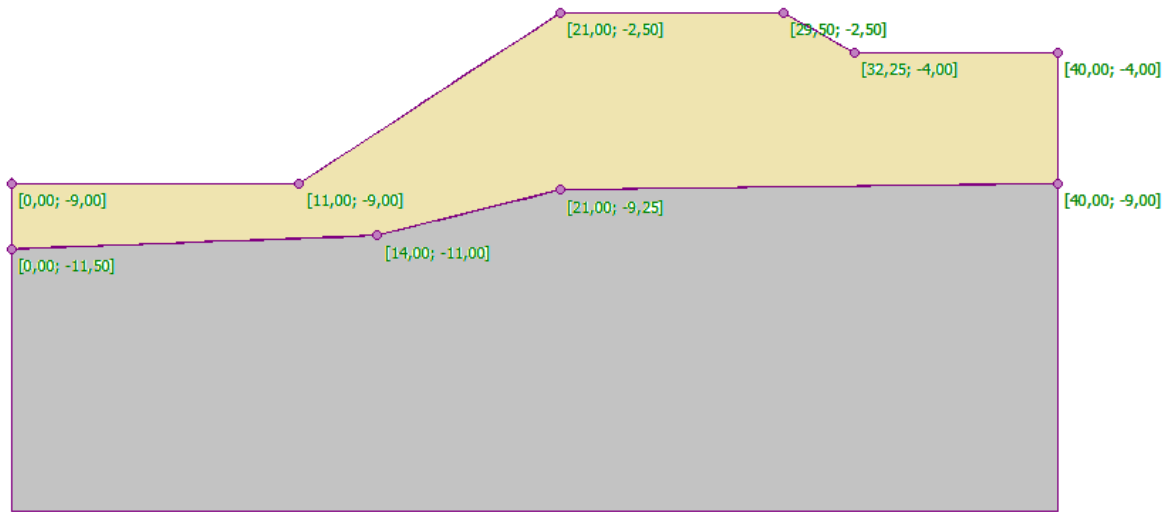
Programa: MEF

Archivo: Demo\_manual\_25.gmk

El objetivo de este manual es analizar el grado de estabilidad de taludes (factor de seguridad) utilizando el Método de los Elementos Finitos.

### Especificación del problema

Determinar el grado de estabilidad de taludes, primero sin la acción de sobrecarga tipo franja y luego debajo la sobrecarga tipo franja  $q = 35,0 \text{ kN/m}^2$ . El esquema de la geometría de la pendiente para todas las etapas de construcción (incluidos los puntos de interfaz individuales) se muestra en el siguiente diagrama. Luego llevamos a cabo la estabilidad de taludes mediante anclajes.



*Esquema de la pendiente que está siendo modelado - puntos de interfaz individuales*

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

Parámetros de suelo / Clasificación	Soil No. 1	Soil No. 2 – R4
Peso unitario del suelo: $\gamma \text{ [kN/m}^3\text{]}$	18	20
Módulo de elasticidad: $E \text{ [MPa]}$	21	300
Coefficiente de Poisson: $\nu \text{ [-]}$	0,3	0,2
Cohesión de suelo: $c_{eff} \text{ [kPa]}$	9	120

Ángulo de fricción interno: $\varphi_{eff}$ [°]	23	38
Ángulo de dilatación: $\psi$ [°]	0	0
Unidad de peso de suelo saturado: $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	20	22

Tabla con parámetros del suelo – Verificación de estabilidad de taludes

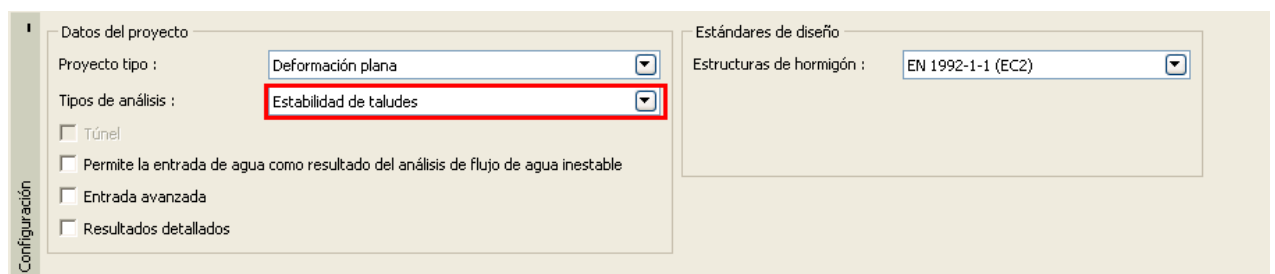
### Solución:

El análisis se realizó a través del Programa de MEF de GEO5. El siguiente párrafo proporciona la descripción paso a paso del procedimiento de solución:

- Topología: configuración para el modelado del problema, (interfaz, generación de malla)
- Etapa de construcción 1: análisis del factor de seguridad de la pendiente original sin sobrecarga tipo franja.
- Etapa de construcción 2: análisis del factor de seguridad de la pendiente bajo sobrecarga tipo franja.
- Etapa de construcción 3: estabilización de taludes mediante anclajes; análisis de estabilidad de taludes.
- Evaluación de los resultados: comparación, conclusión.

### Topología: configuración del problema

Configuramos el tipo de análisis en el cuadro “Configuración” con la opción Estabilidad de Taludes. Los demás parámetros los mantenemos sin cambios.

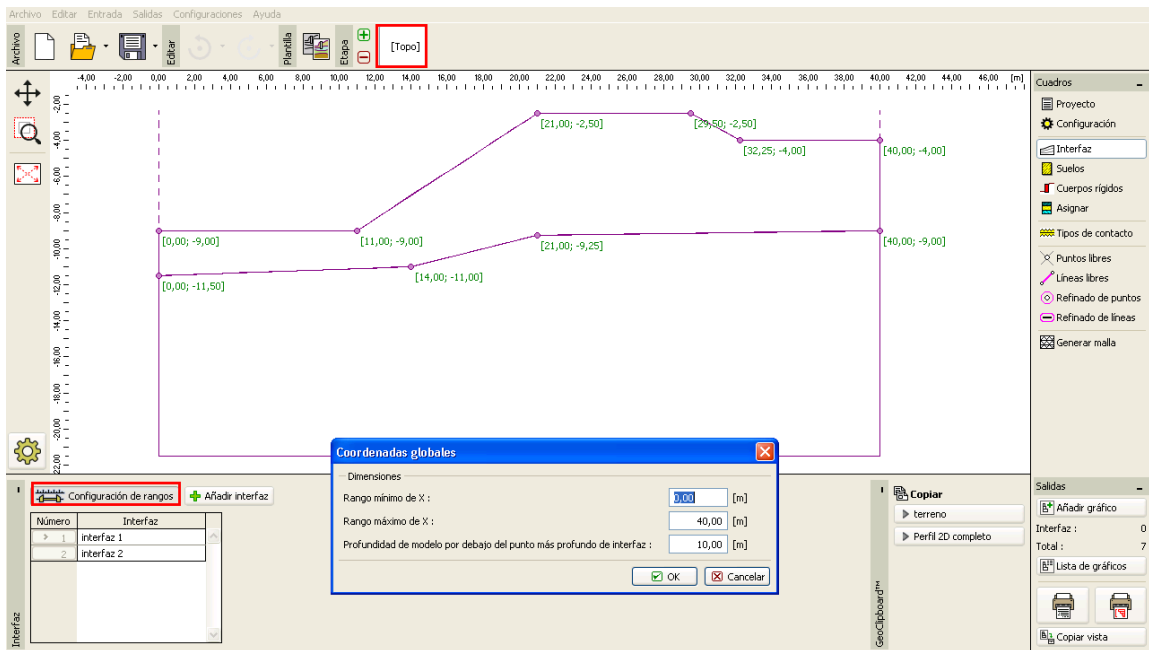


Cuadro “Configuración”

*Nota: La configuración y el desarrollo del modelo en la sección “Estabilidad de taludes” es idéntico al de la sección de “Tensión”. El análisis de estabilidad de taludes se realiza pulsando el botón “Análisis”. Los análisis individuales de la estabilidad de taludes en las etapas de construcción son totalmente independientes y no tienen ninguna relación con las etapas y análisis anteriores (para más información, visite la Ayuda - F1).*

Además vamos a establecer las coordenadas globales. Elegiremos las dimensiones mundiales lo suficientemente grande como para que los resultados no se vean afectados por las condiciones límites. Para nuestro problema particular vamos a elegir el modelo de coordenadas 0 m, 40 m, y establecer la profundidad desde el punto de interconexión más bajo a 10 m.

A continuación vamos a definir los puntos de interfaz para las capas individuales del suelo que se definen en la siguiente tabla



Cuadro "Coordenadas globales"

	Interface 1		Interface 2	
	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
1	0,00	-9,00	0,00	-11,50
2	11,00	-9,00	14,00	-11,00
3	21,00	-2,50	21,00	-9,25
4	29,50	-2,50	40,00	-9,00
5	32,25	-4,00		
6	40,00	-4,00		

Lista de los puntos de interfaces de las capas de suelo individuales

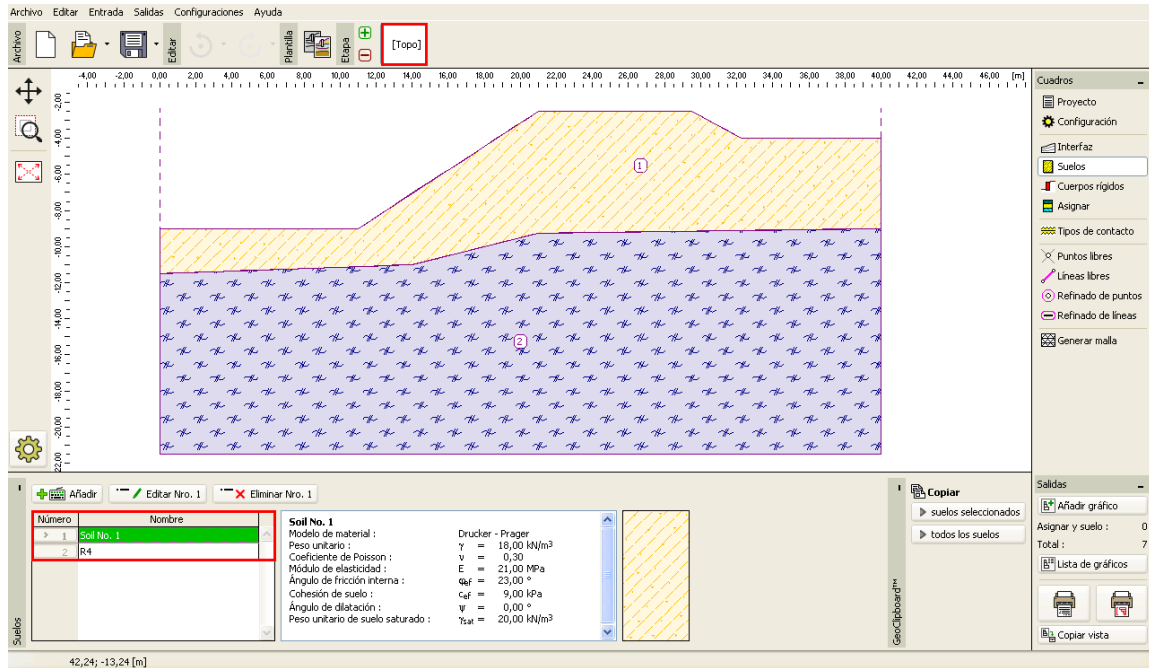
Ahora vamos a configurar los parámetros respectivos de los suelos y, posteriormente, le asignaremos los suelos para las zonas individuales. Vamos a elegir el modelo de Drucker- Prager (para más información, véase la nota). Tendremos en cuenta el ángulo de dilatación  $\psi$  para ambas capas de suelo igual a cero, es decir, el material no cambia su volumen cuando se expone la tensión al corte (para más información, visite la Ayuda - F1).

Nota: Es necesario para el análisis de estabilidad de taludes elegir un modelo de suelo no lineal, que supone el desarrollo de deformación plástica y se formula sobre la base de los parámetros de resistencia de suelos  $c$  y  $\varphi$ .

En este caso particular, se optó por el modelo de material Drucker-Prager, debido a la respuesta de mayor rendimiento de la estructura en comparación con el modelo clásico de Mohr-Coulomb (para más información, visite la Ayuda - F1). La comparación de los resultados obtenidos mediante los modelos de materiales no lineales individuales se presenta en la tabla al final de este ejemplo.

Cuadro “Añadir nuevo suelo”

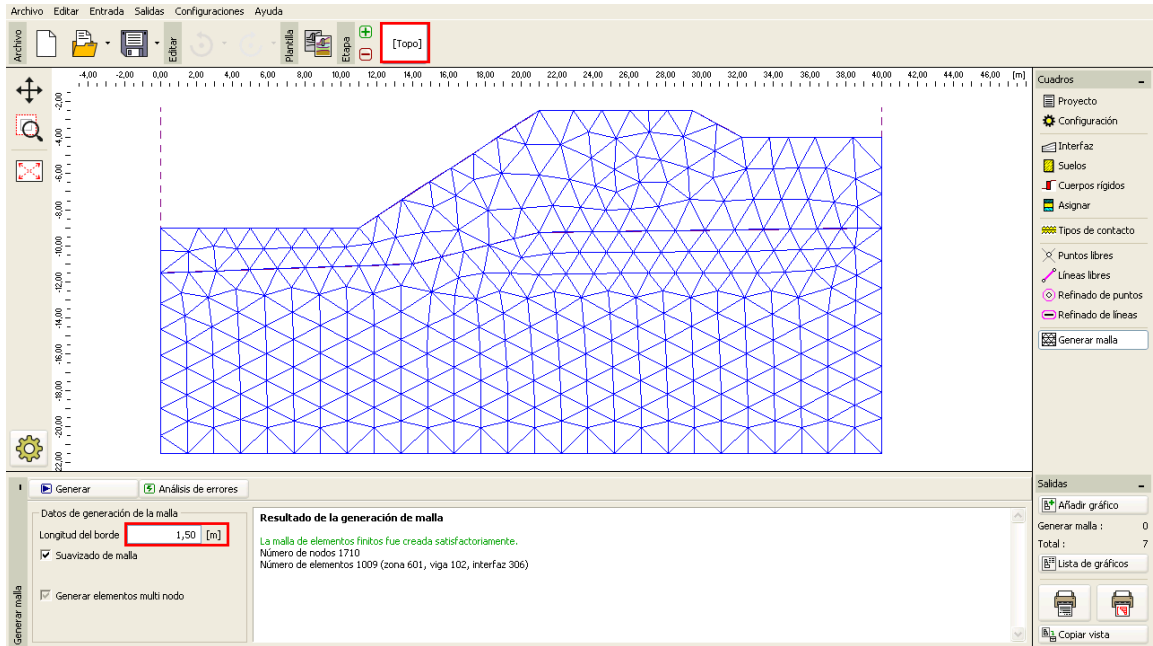
El siguiente diagrama muestra la asignación de los suelos en el perfil geológico.



### Cuadro "Asignar"

Este es el último paso en el proceso de configuración de la topología es la generación de la malla de elementos finitos. La densidad de la malla afecta significativamente el grado resultante de la estabilidad (factor de seguridad) y por lo tanto siempre es necesario escoger una malla lo suficientemente fina.

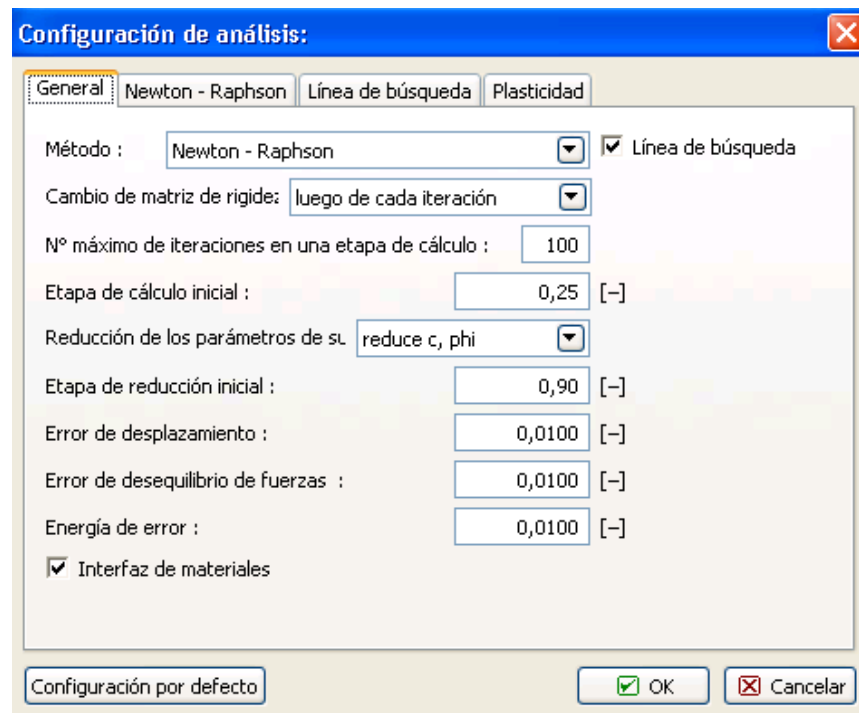
Para este ejemplo particular, vamos a elegir una longitud del elemento borde de 1,5 m y generaremos la malla (utilizando el botón "**Generar**"). Los resultados obtenidos con el Programa de MEF de GEO 5 - para una malla de longitudes de elemento borde de 1,0, 1,5 y 2,0m se presentan en una tabla al final de este capítulo.



Cuadro "Generar Malla"– elementos borde con longitud 1.5 m

## Etapa de construcción 1: Análisis del grado de estabilidad (factor de seguridad)

Después de generar la malla de EF nos movemos a la etapa de construcción 1 y realizaremos el análisis (pulsando el botón "Analizar"). Vamos a mantener la configuración del análisis como "Estándar".



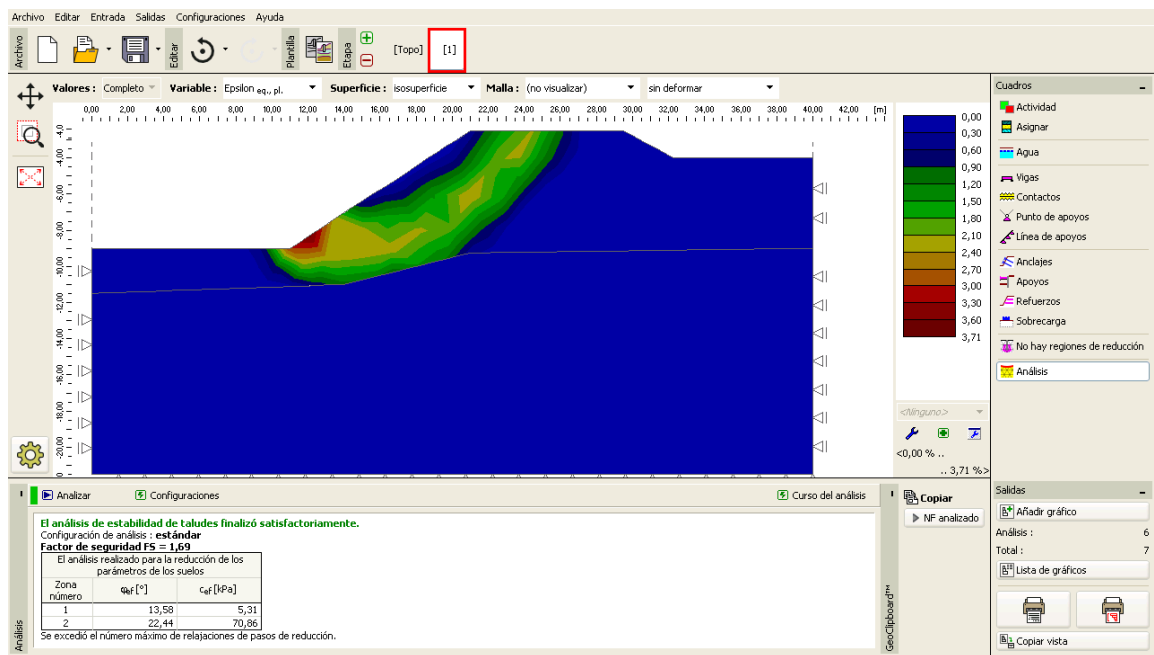
Cuadro "Configuración de análisis"

Nota: El análisis de estabilidad de taludes se basa en  $c$ ,  $\varphi$  **parámetros de reducción relacionados con la tensión-suelo**. El factor de seguridad se define en el cuadro como un parámetro que debe aplicarse para reducir los valores reales de parámetros  $c$ ,  $\varphi$  que conducen a la pérdida de estabilidad (para más detalles visite la Ayuda - F1). El grado de estabilidad de taludes se define en el programa por la relación:

$$FS = \tan \varphi^s / \tan \varphi^p$$

Donde:  $\varphi^s$  - valor real de ángulo de fricción interna,  
 $\varphi^p$  - valor del ángulo de fricción interna en el fallo.

Una de las salidas de gran utilidad para el análisis de estabilidad es la trama de vectores de desplazamiento y deformación plástica equivalente  $\varepsilon_{eq.,pl.}$ . Las deformaciones plásticas muestran la forma y la magnitud de la superficie potencial de falla (vea el siguiente diagrama).



Cuadro "Análisis" – Etapa de construcción 1 (deformación plástica equivalente  $\varepsilon_{eq.,pl.}$ )

Nota: La sección del programa "Estabilidad" permite sólo la representación gráfica de los desplazamientos (en las direcciones Z y X) y las deformaciones (total o plástica). La deformación de la estructura corresponde al estado de análisis para parámetros del suelo reducidos, por lo tanto, no tiene nada en común con la verdadera deformación - que sólo da una imagen de la totalidad del comportamiento de pendiente o de la estructura en el momento del fallo (para más información, visite la Ayuda - F1).

## Etapa de construcción 2: añadiendo el sobrecarga pendiente, análisis

En esta etapa de construcción vamos a ir primero al cuadro "Sobrecarga" para definir los siguientes parámetros - características de sobrecarga y magnitud.

The screenshot shows the GEO5 software interface. A dialog box titled "Nueva sobrecarga" is open, allowing the user to define a new surcharge. The dialog box contains the following fields:

- Nombre: Surchage No. 1
- Datos generales
- Tipo: Franja
- Ubicación: sobre el terreno
- Origen: x = 22,00 [m]
- Longitud: l = 7,00 [m]
- Pendiente:  $\alpha = 0,00$  [°]
- Magnitud: q = 35,00 [kN/m<sup>2</sup>]

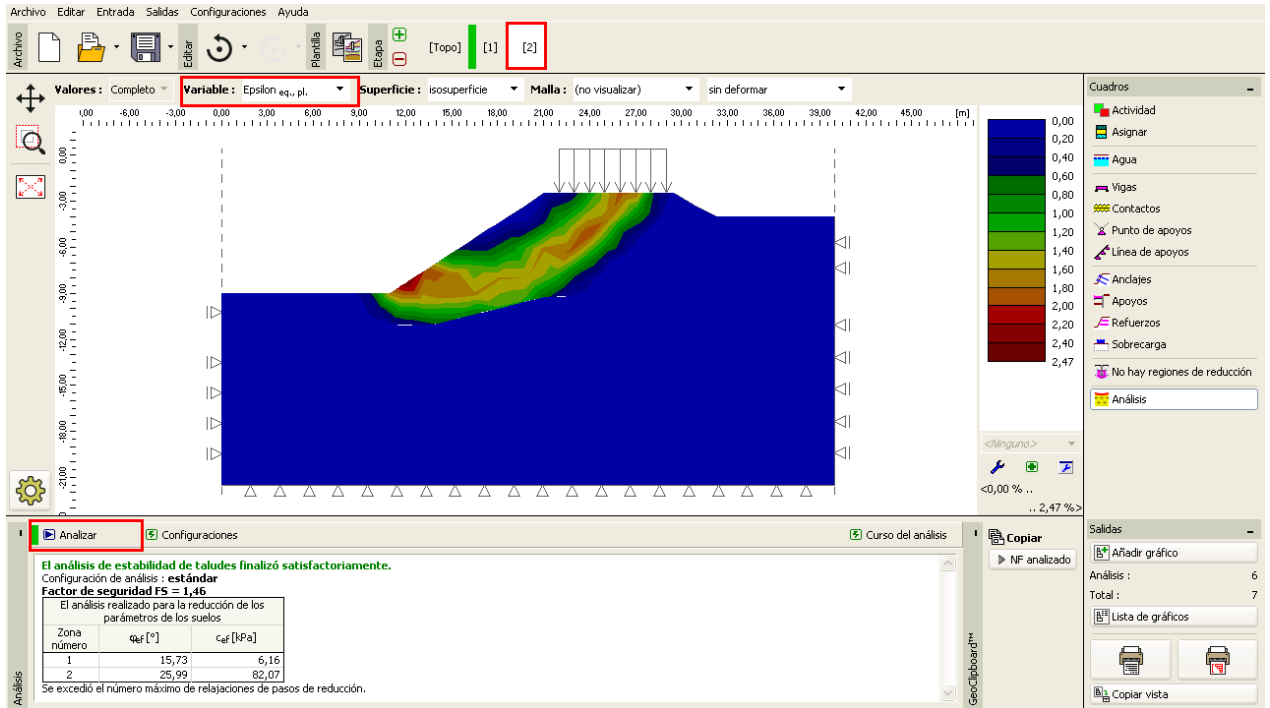
The main window shows a cross-section of a structure with a surcharge applied. The surcharge is represented by a series of downward arrows with a magnitude of 35,00 kN/m<sup>2</sup>. The structure is supported by a foundation. The 'Sobrecarga' table at the bottom of the window is as follows:

Número	Sobrecarga nueva cambia	Nombre	Tipo	Ubicación / Punto 1 z [m] / z <sub>1</sub> [m]	Origen / Punto 1 x [m] / z <sub>1</sub> [m]	Longitud / Punto 2 l [m] / z <sub>2</sub> [m]	Ancho / Punto 2 b [m] / z <sub>2</sub> [m]	Pendiente $\alpha$ [°]	Mag q, q <sub>1</sub> , f, F
> 1	Si	Surchage No. 1	Franja	sobre el terreno	x = 22,00	l = 7,00		0,00	35,00

Cuadro "Nueva sobrecarga" – Etapa de construcción 2

Ahora vamos a llevar a cabo el análisis de la etapa 2 y examinaremos la deformación plástica equivalente.



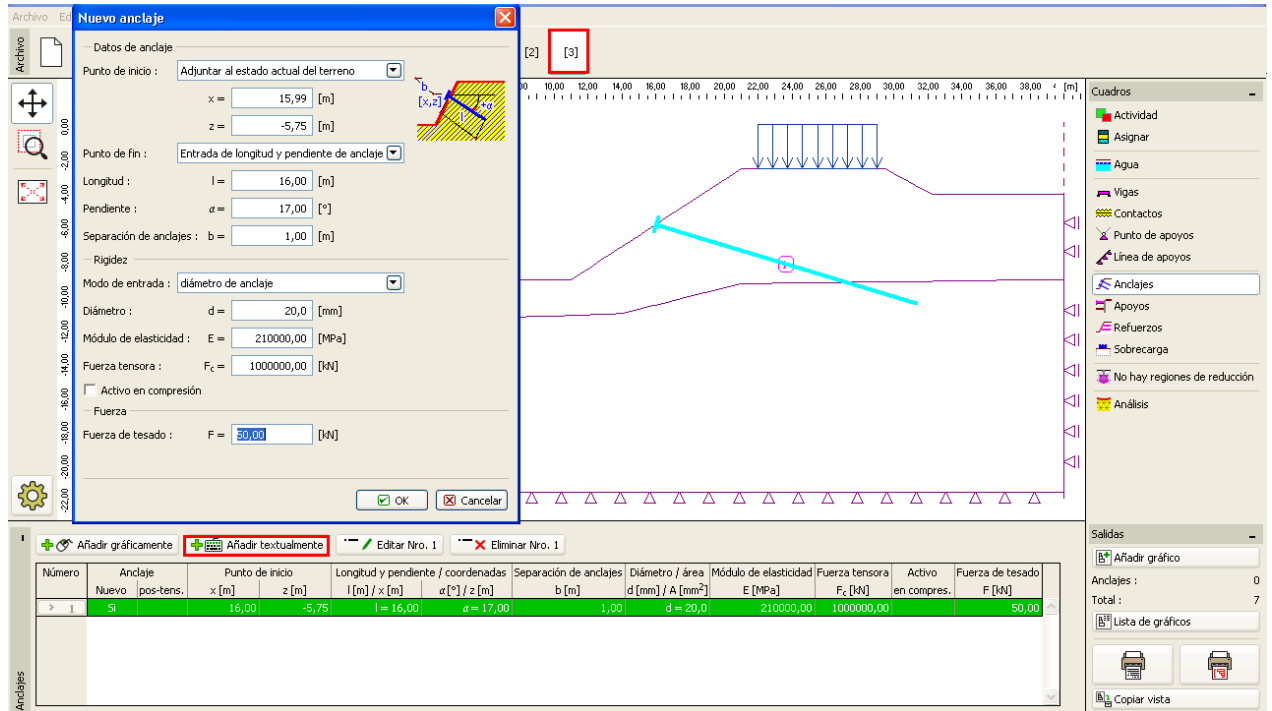


Cuadro "Análisis" – Etapa de construcción 2 (deformación plástica equivalente  $\epsilon_{eq.,pl.}$ )

### Etapa de construcción 3: Estabilidad de taludes con anclajes, análisis

Vamos a añadir la etapa de construcción 3. Luego presione el botón "Añadir" en la sección "Anclajes" y establecemos un anclaje de acero con la fuerza de pretensado  $F = 50 \text{ kN}$  en la ventana de diálogo "Nuevo anclaje". Tendremos en cuenta los siguientes parámetros de anclaje para este problema:

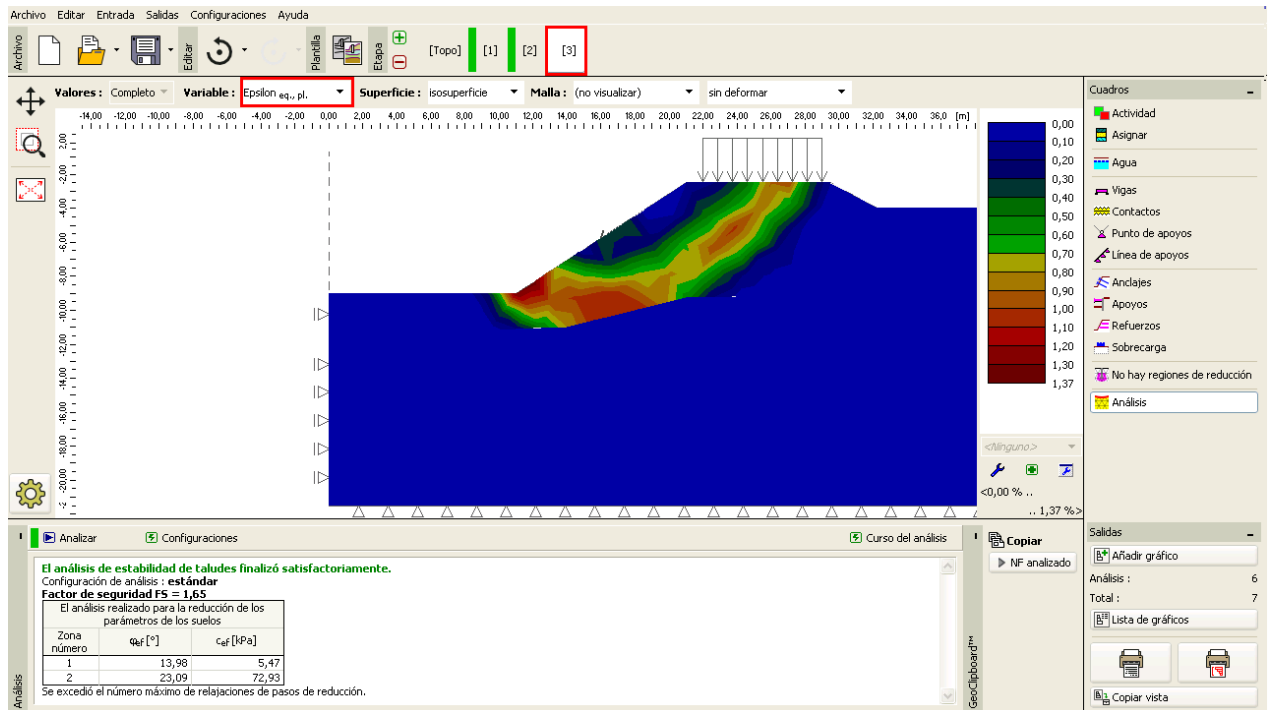
- Longitud de anclaje:  $l = 16 \text{ m}$
- Pendiente del anclaje:  $\alpha = 17^\circ$
- Diámetro del anclaje:  $d = 20 \text{ mm}$
- Espaciado del anclaje:  $b = 1 \text{ m}$



Cuadro “Nuevo anclaje”– Etapa de construcción 3

*Nota: En el análisis de estabilidad de taludes, los anclajes pretensados son ingresados en el análisis como sobrecarga inducida por la fuerza que actúa en la cabeza de anclaje - por lo tanto, la rigidez de anclaje no tiene ningún efecto sobre la estabilidad. Sin embargo, el suelo en la cabeza de anclaje puede ser plastificado. Por lo tanto, es necesario que después del análisis verificar la ubicación y la deformación plástica real que representan la superficie de corte. En el caso de suelos debajo de la cabeza del anclaje que se plastifica, es necesario modificar el modelo (para más información, visite la Ayuda - F1).*

Los otros parámetros de entrada se mantendrán sin cambios. Ahora vamos a llevar a cabo el análisis de la Etapa de construcción 3 y de nuevo a examinar los resultados de la solución (de manera similar a la Etapa de construcción anterior).

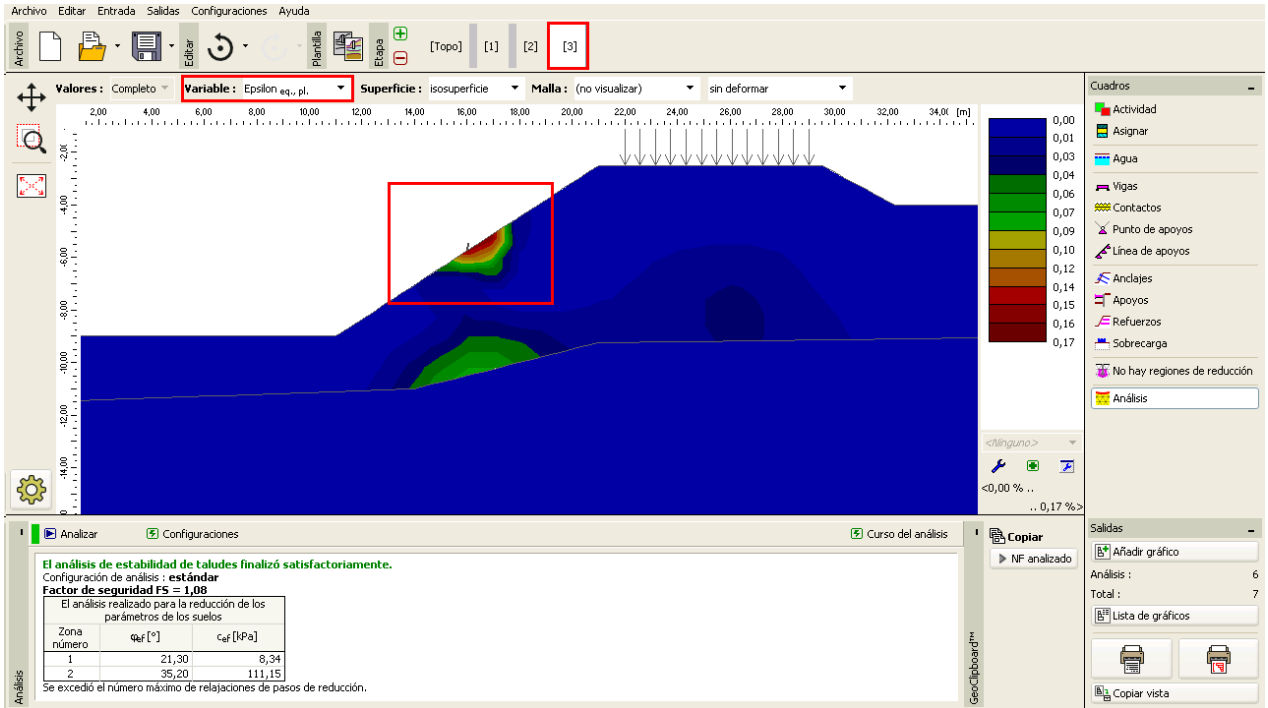


Cuadro “Análisis” – Etapa de construcción 3 (deformación plástica equivalente  $\epsilon_{eq.,pl.}$ )

En esta etapa concluye el análisis inicial. Vamos a registrar los valores resultantes para el grado de estabilidad de taludes en una tabla resumen, y vamos a llevar a cabo la evaluación del problema para otros modelos de materiales (Mohr-Coulomb y modificación de Mohr-Coulomb).

*Nota: La verificación de la forma de la superficie de corte es muy importante, en algunos casos, debido a que un fallo local de la estructura puede tener lugar incluso en diferentes áreas a las esperadas (para más información, visite la Ayuda - F1). En el siguiente diagrama, podemos ver la evolución de la zona de suelo plástica localizada en las inmediaciones de la cabeza de anclaje durante el curso del análisis con una densidad de malla de 1,0 m para el modelo de Drucker-Prager. Si sucede este caso, es razonable editar el modelo de estructura, por ejemplo de la siguiente manera:*

- Para aumentar la longitud del elemento borde de malla,
- Para introducir un suelo con parámetros resistencia-relación  $c$ ,  $\phi$  más altos en la cabeza del anclaje,
- Para definir elementos viga en la cabeza de anclaje (la distribución de la carga en el suelo mejorará).
- No utilizar regiones de reducción (más información – Manual de Ingeniería N° 35)



Cuadro “Análisis” – Etapa de construcción 3 (Plasticidad localizada del suelo debajo de la cabeza del anclaje, Modelo DP con malla de 1,0 m.)

### Resultados de la evaluación:

La siguiente tabla presenta los resultados del grado de estabilidad de taludes (factor de seguridad) en etapas de construcción individuales. Se realizó el cálculo para algunos modelos de materiales no lineales con el Programa de MEF de GEO 5 - y diversas densidades de malla de EF. Para comparación, también se presentan los resultados obtenidos por el programa de Estabilidad de taludes de GEO5 - (según Bishop y Spencer).

Modelo de Material	Espaciado de malla [m]	Etapas 1 <i>FS</i>	Etapas 2 <i>FS</i>	Etapas 3 <i>FS</i>	Nota
DP	1.0	1.67	1.44	1.03 *	* El suelo debajo de la cabeza del anclaje se plastifica.
DP	1.5	1.69	1.46	1.65	
DP	2.0	1.74	1.48	1.69	

<b>MC</b>	1.0	1.56	1.35	0.90 *	* El suelo debajo de la cabeza del anclaje se plastifica.
<b>MC</b>	1.5	1.58	1.35	1.56	
<b>MC</b>	2.0	1.60	1.41	1.56	
<b>MCM</b>	1.0	1.78	1.56	1.14 *	* El suelo debajo de la cabeza del anclaje se plastifica.
<b>MCM</b>	1.5	1.81	1.54	1.78	
<b>MCM</b>	2.0	1.85	1.60	1.81	
<b>BISHOP (solución analítica)</b>	---	1.51	1.33	1.47	Ver debajo
<b>SPENCER (solución analítica)</b>	---	1.51	1.32	1.52	Ver debajo

*Resumen de resultados – grado de estabilidad de taludes (factor de seguridad)*

*Nota: Se consideraron los parámetros de análisis como "Estándar - Factores de seguridad". Hemos llevado a cabo el análisis en primer lugar según el Bishop y según Spencer con la optimización de una superficie de corte circular (sin limitación).*

### **Conclusión:**

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

- El aumento de la densidad local de la malla de EF conduce a resultados más precisos y, por otro lado, la duración del análisis para cada etapa de construcción se extiende.
- Es necesario para los análisis utilizar modelos de materiales no lineales, lo que permite el desarrollo de deformaciones plásticas.
- Las deformaciones máximas equivalentes  $\varepsilon_{eq.,pl.}$  expresan los lugares donde se encuentra una superficie potencial de falla de corte.

- El modelo de material Drucker-Prager cuenta con un poco más de respuesta de rendimiento que el modelo Mohr-Coulomb.