

Análise numérica de uma parede de contenção

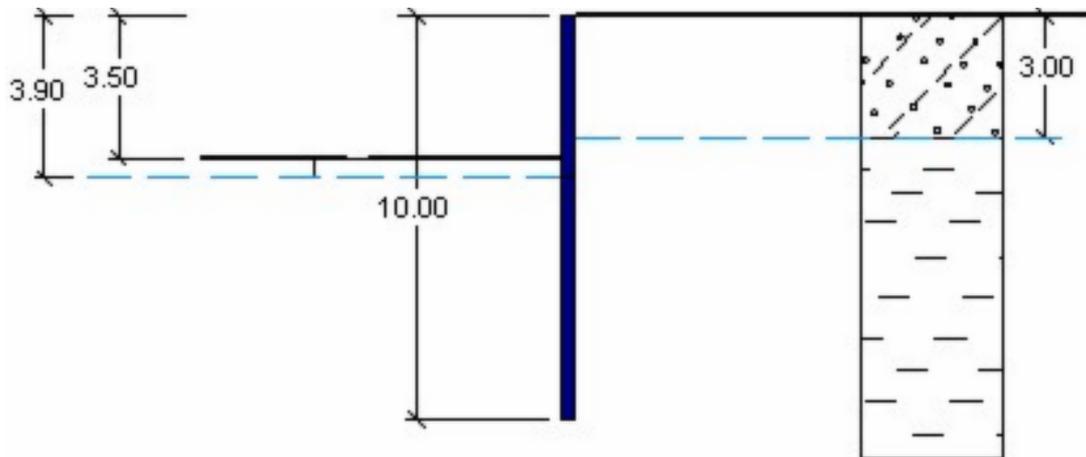
Programa: MEF

Arquivo: Demo_manual_24.gmk

O objetivo deste manual é analisar as deformações de uma parede de contenção ancorada e determinar os diagramas das forças internas, através do Método dos Elementos Finitos.

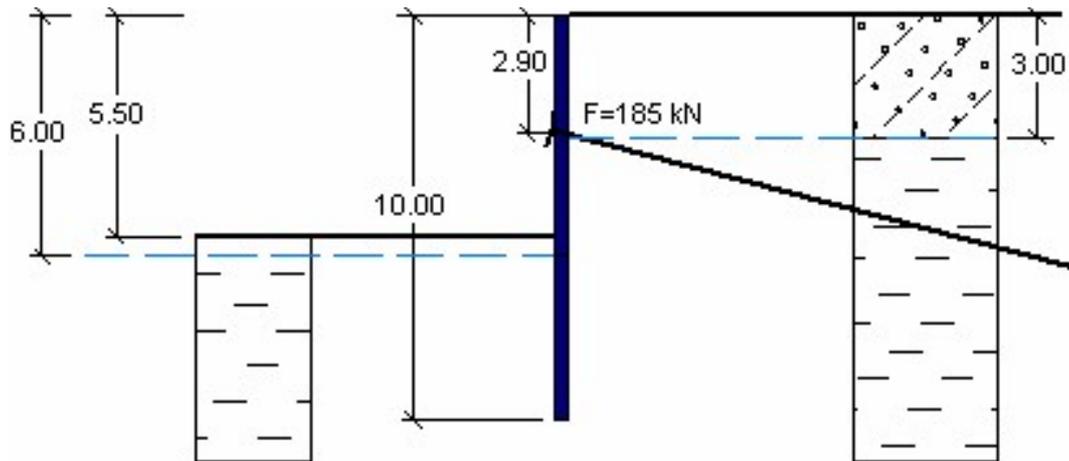
Definição do problema

Determine o estado de tensão (deformações) de uma parede de contenção ancorada, realizada em estacas-prancha VL 503 de dimensões $500 \times 340 \times 9,7 \text{ mm}$; o esquema da estrutura é apresentado em baixo, para cada etapa de construção. Determine as forças internas atuantes ao longo da parede ancorada. As estacas-prancha são de aço EN 10 025: Fe 360. A estrutura tem 10 m de altura.



Etapa de construção 2 – extração de solo até à profundidade de 3.5 m

Etapa de construção 3 – introdução da ancoragem



Etapa de construção 4 – extração de solo até à profundidade de 5.5 m

O perfil geológico consiste em dois tipos de solos, com os parâmetros seguintes:

- 0.0 a 3.0 m: Areia siltosa (SM – solo mediamente denso)
- abaixo de 3 m: Argila de plasticidade reduzida (CL, CI – consistência rígida)

Parâmetros do solo / Classificação	Areia siltosa (SM)	Argila de plasticidade reduzida (CL, CI)
Peso volúmico do solo: γ [kN/m^3]	18	21
Módulo de elasticidade: E [MPa]	10	4.5
Módulo de elasticidade de relaxamento: E_{ur} [MPa]	20	13
Coefficiente de Poisson: ν [-]	0.3	0.4
Coesão do solo: c_{eff} [kPa]	5	12
Ângulo de atrito interno: ϕ_{eff} [$^\circ$]	29	19
Ângulo de dilatação: ψ [$^\circ$]	0	0
Peso volúmico saturado: γ_{sat} [kN/m^3]	20	23

Tabela com os parâmetros do solo – parede de contenção ancorada

Resolução

Para analisar este problema, vamos utilizar o programa GEO5 MEF. Vamos descrever a resolução deste exemplo passo-a-passo, através dos tópicos seguintes:

- Topologia: configuração e modelação do problema (interface, contactos, aumento da densidade de linhas)
- Etapa de construção 1: tensão geostática primária, especificação de pontos monitores
- Etapa de construção 2: ativação de regiões, definição de vigas, análise de deformações, forças internas
- Etapa de construção 3: definição de ancoragens
- Etapa de construção 4: escavação do solo, análise de resultados + monitores
- Análise dos resultados: comparação, conclusão

Topologia: configuração do problema

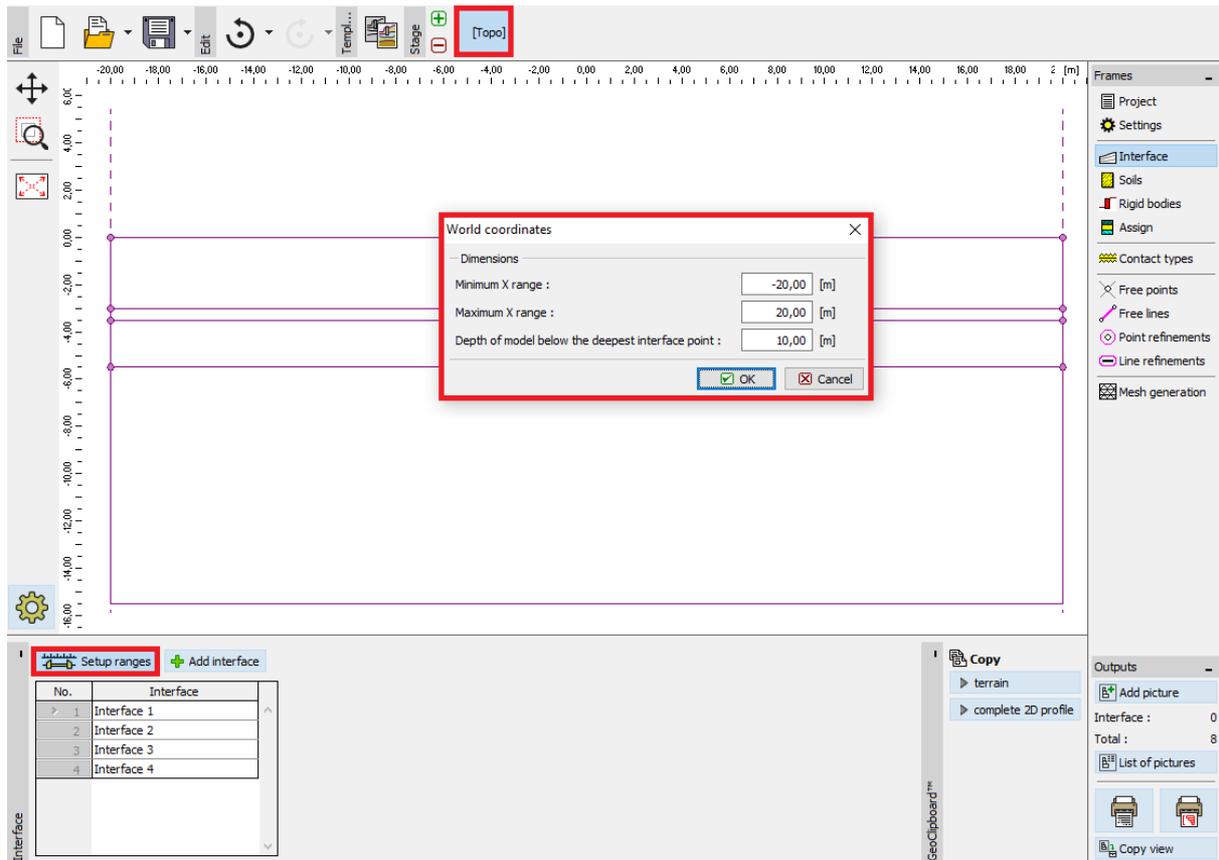
Vamos manter o método de análise para a etapa de construção 1 com “tensão geostática”. Vamos considerar o tipo de análise como *plano de deformação*.

The screenshot shows the 'Configurações' (Settings) window in GEO5. It is divided into three main sections:

- Project parameters:** 'Project type' is set to 'Plane strain' and 'Analysis type' is set to 'Stress'. There are checkboxes for 'Tunnels' and 'Allow to input water as the result of steady state water flow analysis', both of which are currently unchecked.
- Design standards:** 'Concrete structures' is set to 'EN 1992-1-1 (EC2)'. Under 'Calculation of geostatic stress (1st stage)', the 'Analysis method' is set to 'Geostatic stress'.
- Advanced program options:** This section contains four unchecked checkboxes: 'Advanced mesh generating parameters', 'Advanced soil parameters', 'Advanced soil models', and 'Detailed results'.

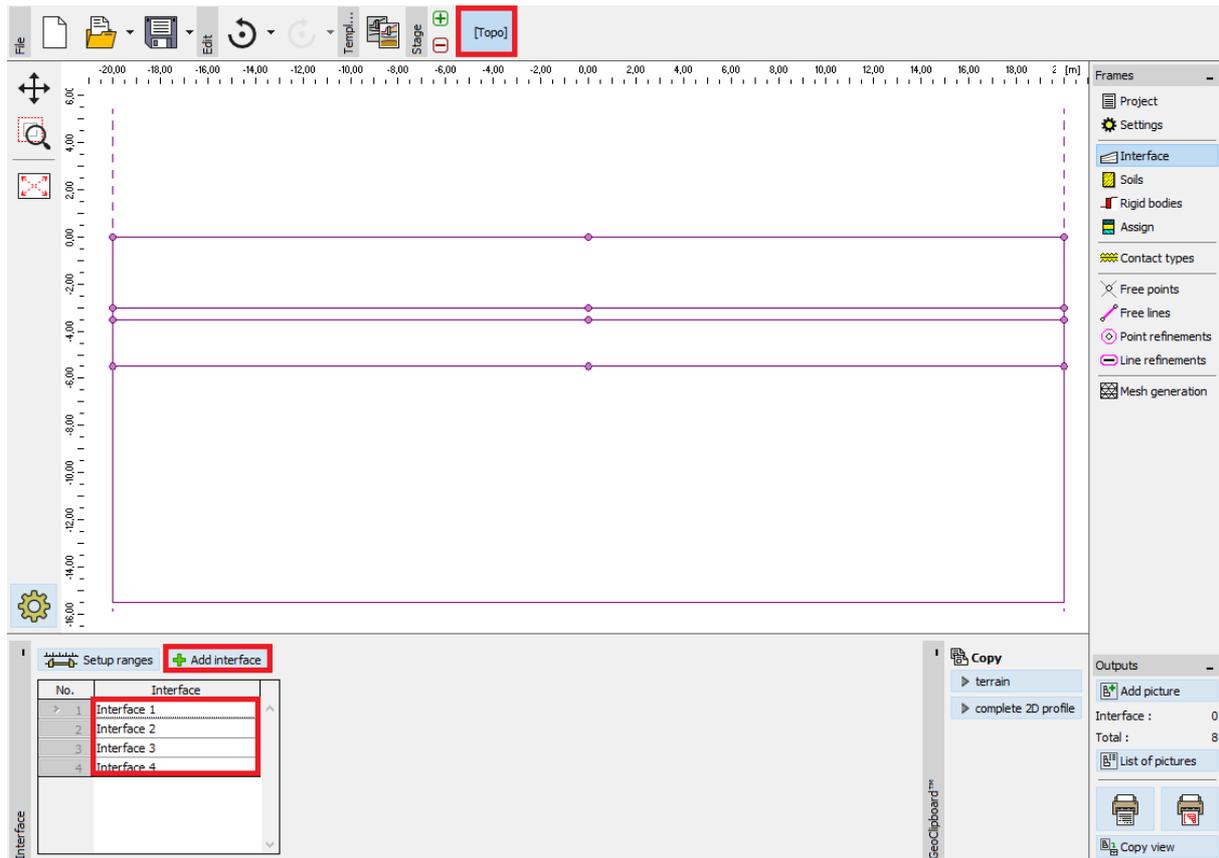
Janela “Configurações”

De seguida, vamos definir as coordenadas globais; vamos definir dimensões suficientemente elevadas para que os resultados não sejam afetados pelas condições nas extremidades. Para este problema, vamos definir os limites do modelo como $\langle -20\text{ m}; 20\text{ m} \rangle$ e vamos definir a profundidade da interface inferior como 10 m.



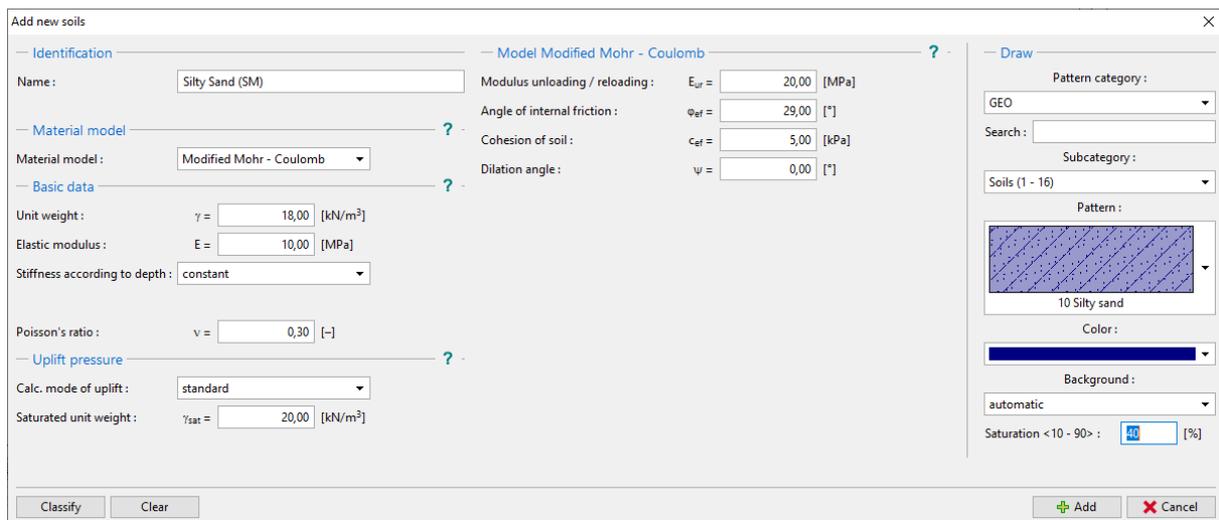
Caixa de diálogo “Coordenadas globais”

Ao dimensionar a parede diafragma, é necessário definir a profundidade de escavação do solo, em cada etapa de construção, como interfaces do solo. Neste caso em particular, vamos definir a superfície do terreno à cota 0.0 m e interfaces horizontais às cotas – 3.0 m, – 3.5 m e – 5.5 m. O ponto com coordenadas [0.0; 0.0] representa o topo da parede diafragma.



Janela "Interface"

Agora, vamos definir os parâmetros dos solos e atribuir os solos às regiões criadas. Vamos selecionar o modelo de Mohr-Coulomb Modificado (ver nota).



Caixa de diálogo "Adicionar novos solos"

Add new soils

Identification
Name: Clay, with medium plasticity, firm consistency

Material model
Material model: Mohr - Coulomb

Basic data
Unit weight: $\gamma = 21,00$ [kN/m³]
Elastic modulus: $E = 4,50$ [MPa]
Stiffness according to depth: constant
Poisson's ratio: $\nu = 0,40$ [-]

Uplift pressure
Calc. mode of uplift: standard
Saturated unit weight: $\gamma_{sat} = 23,00$ [kN/m³]

Model Mohr - Coulomb
Modulus unloading / reloading: $E_{ur} = 13,00$ [MPa]
Angle of internal friction: $\phi_{ef} = 19,00$ [°]
Cohesion of soil: $c_{ef} = 12,00$ [kPa]
Dilation angle: $\psi = 0,00$ [°]

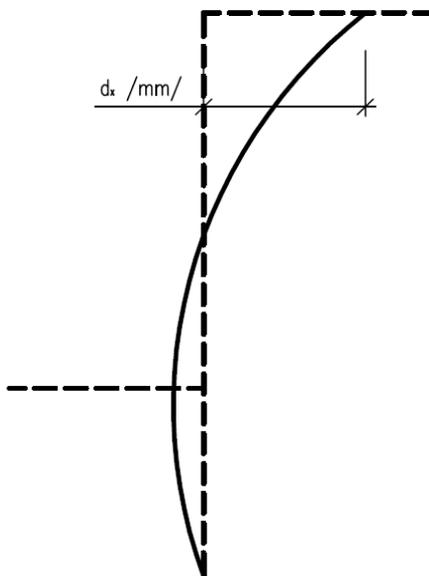
Draw
Pattern category: GEO
Search:
Subcategory: Soils (1 - 16)
Pattern: 4 Clay
Color:
Background: automatic
Saturation <10 - 90>: 50 [%]

Buttons: Classify, Clear, Add, Cancel

Caixa de diálogo "Adicionar novos solos"

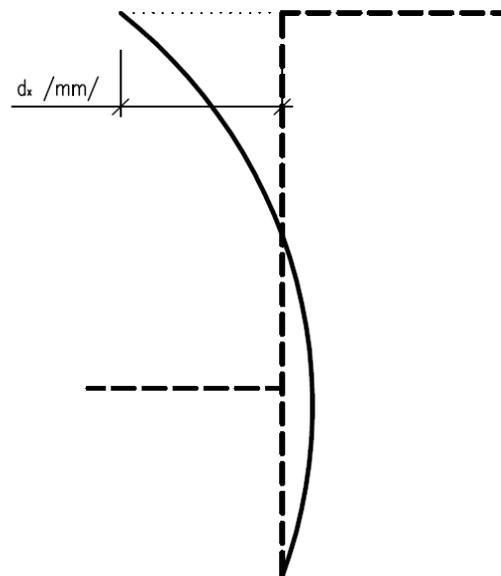
Nota: Durante o dimensionamento de estruturas de contenção, é necessário introduzir elementos de contacto entre o solo e as vigas. A resolução de problemas sem a introdução de elementos de contacto leva a resultados completamente irrealistas (mais detalhes na Ajuda – F1).

Solution without contacts



deformation of sheeting to a soil (wrong)

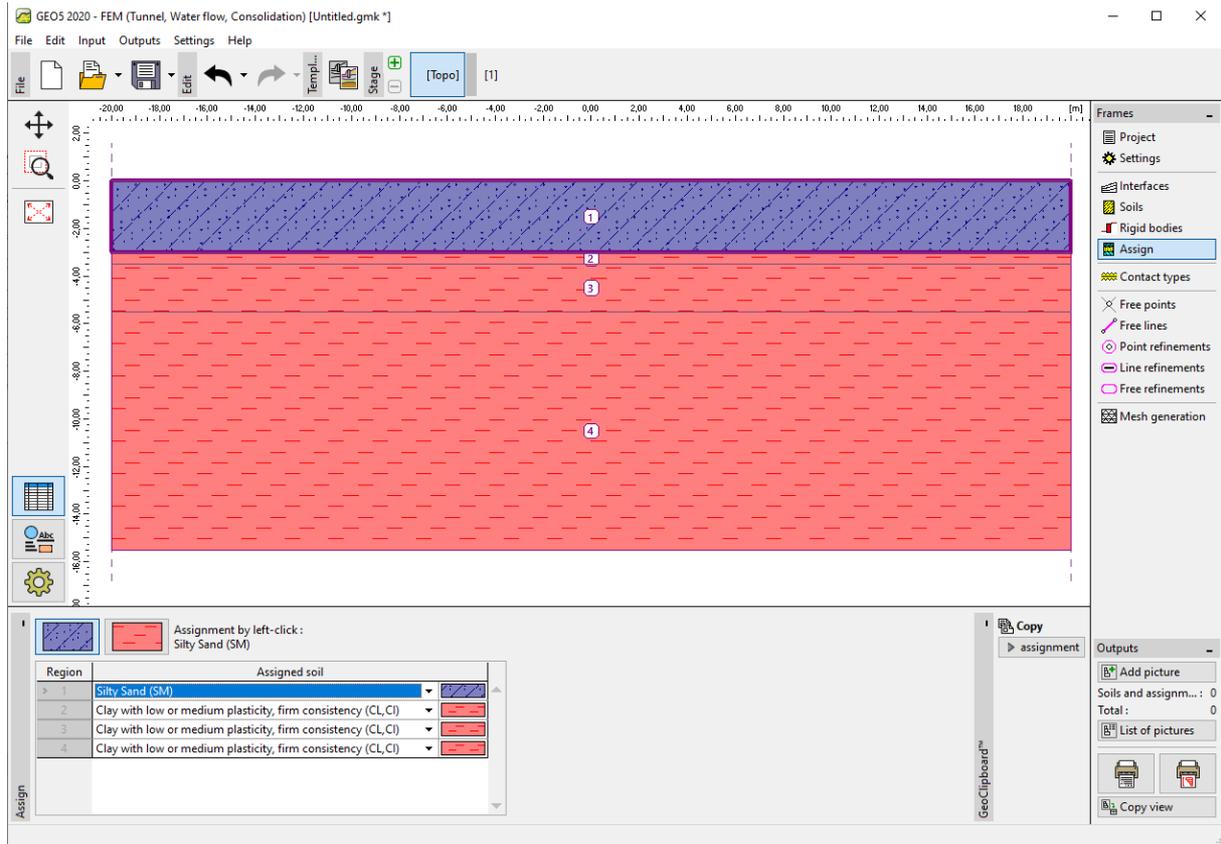
Solution with contacts



deformation of sheeting from a soil (right)

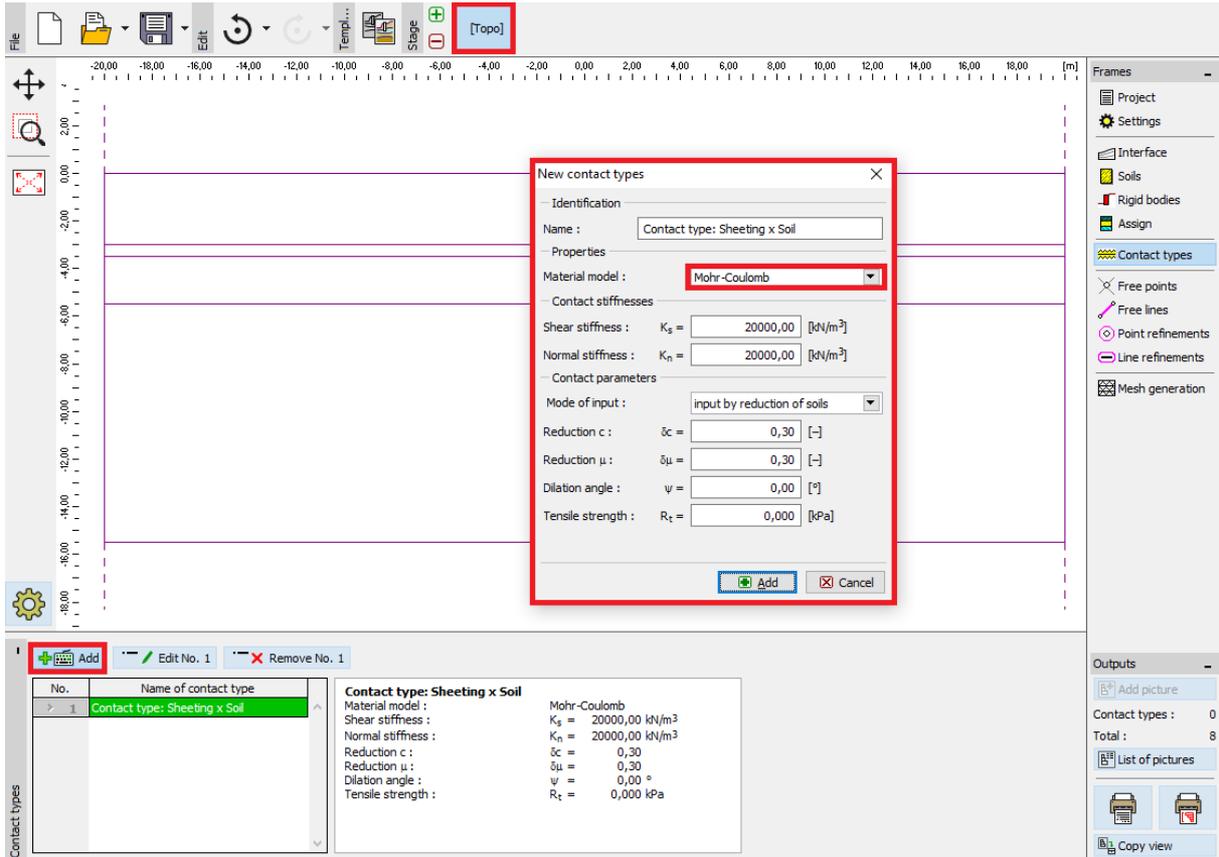
Aplicação do modelo material adequado à análise de estruturas de contenção

A figura seguinte mostra a atribuição de um solo ao perfil geológico.



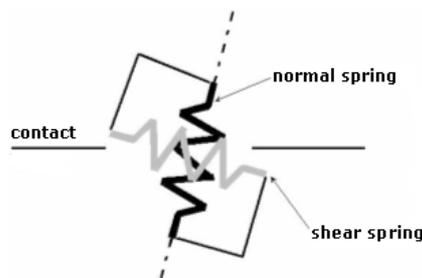
Janela "Atribuir"

O passo seguinte é a definição dos parâmetros dos contactos (através do botão "Adicionar"). Ao analisar estruturas de contenção, é sempre necessário atribuir o contacto ao modelo não linear para os elementos viga. Neste caso, vamos seleccionar a opção "Mohr-Coulomb", para obter resultados realistas. Vamos assumir a redução dos parâmetros do solo, nos contactos, como $\delta c = \delta \mu = 0.3$ e vamos manter os valores de origem para a rigidez dos contactos $K_s = K_n = 20\,000\text{ kN/m}^3$.



Caixa de diálogo “Novos tipos de contacto”

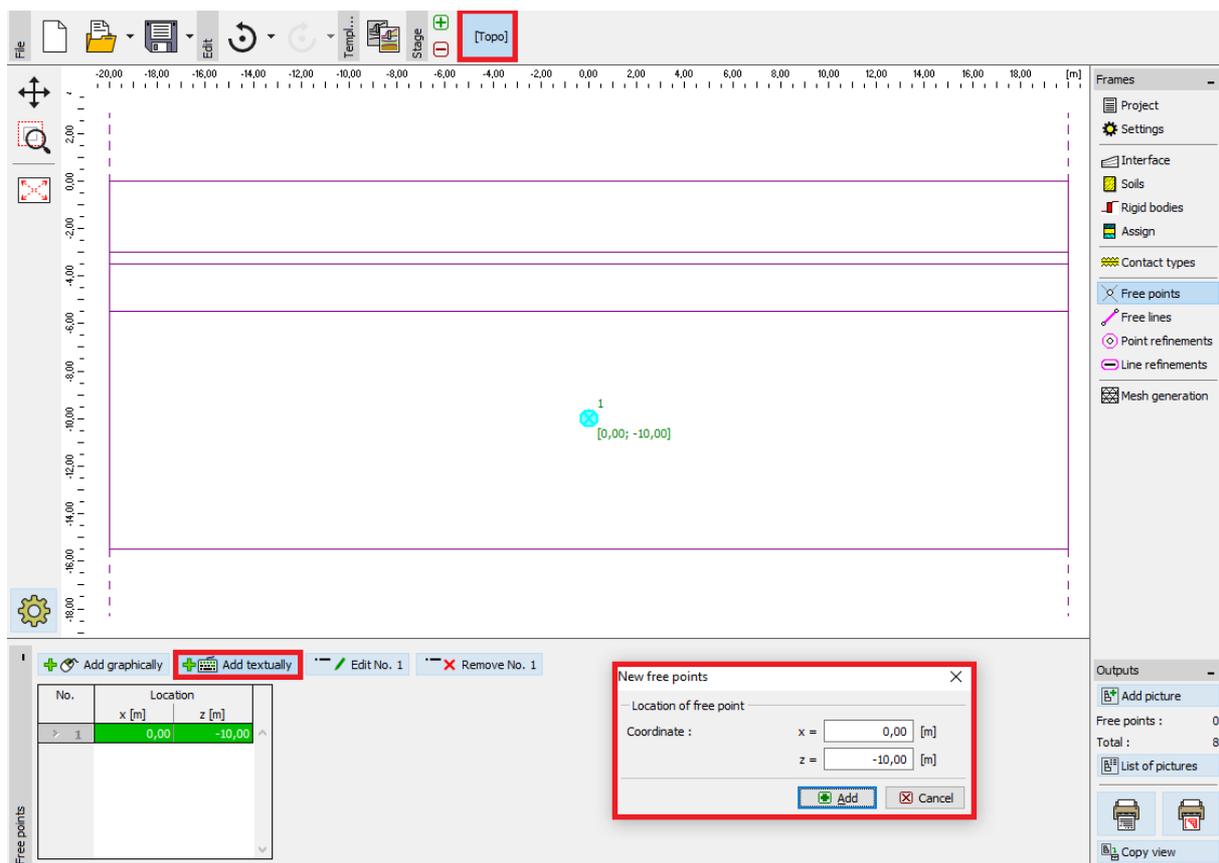
Nota: Os elementos de contacto são utilizados em análises em que é necessário permitir a interação entre a estrutura e o ambiente envolvente – uma interface entre dois materiais totalmente diferentes (solo – estrutura). Exemplos típicos da utilização de elementos de contacto são a modelação de estruturas de contenção, muros de retenção ou revestimentos de túneis, onde se utilizam elementos de contacto para simular uma camada de espessura reduzida de solo ou rocha, onde se verificam tensões elevadas. Os contactos podem ser introduzidos mesmo entre interfaces de solos. O elemento de contacto consiste num elemento de espessura nula, que representa a relação entre tensões de contacto e variações relativas nos deslocamentos ao longo do contacto (mais detalhes na Ajuda – F1).



Representação de um elemento de contacto

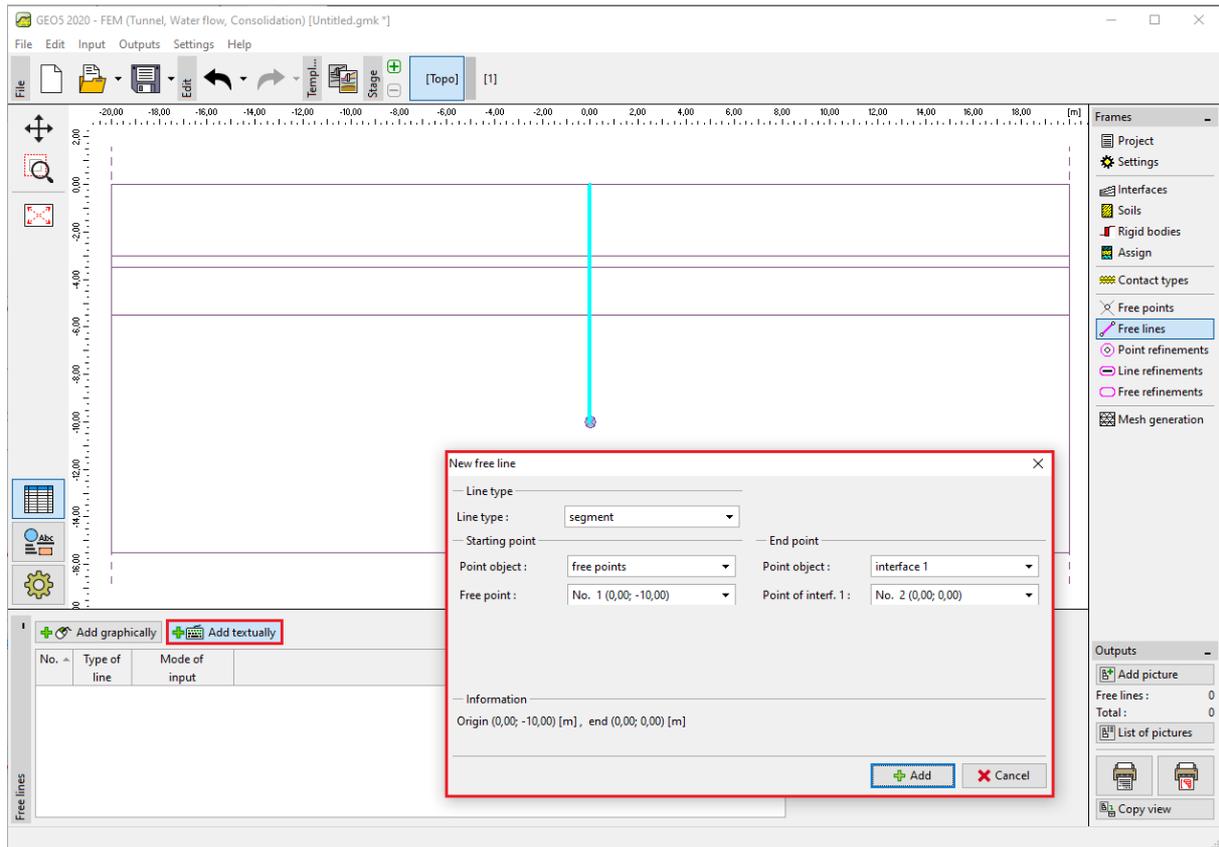
Nota: Apesar da definição do parâmetro K_s não ser importante para o caso de um contacto com comportamento completamente elástico, o seu valor é extremamente importante para uma análise correta de problemas não lineares. Valores de rigidez demasiado elevados (superiores a $100\,000\text{ kN/m}^3$) podem levar a oscilações na análise numérica. Por outro lado, valores de K_s e K_n demasiado reduzidos (inferiores a $10\,000\text{ kN/m}^3$) podem levar a deformações irrealistas das estruturas. No entanto, os valores das tensões de contacto K_s e K_n não são afetados de forma significativa pela definição dos valores de rigidez K_s e K_n (mais detalhes na Ajuda – F1).

Seguidamente, vamos definir a geometria da estrutura de contenção, nas janelas “Pontos livres” e “Linhas livres”. O princípio para a definição de pontos livres e de linhas livres está descrito em detalhe no capítulo anterior (capítulo 23. *Análise do revestimento de um coletor*).



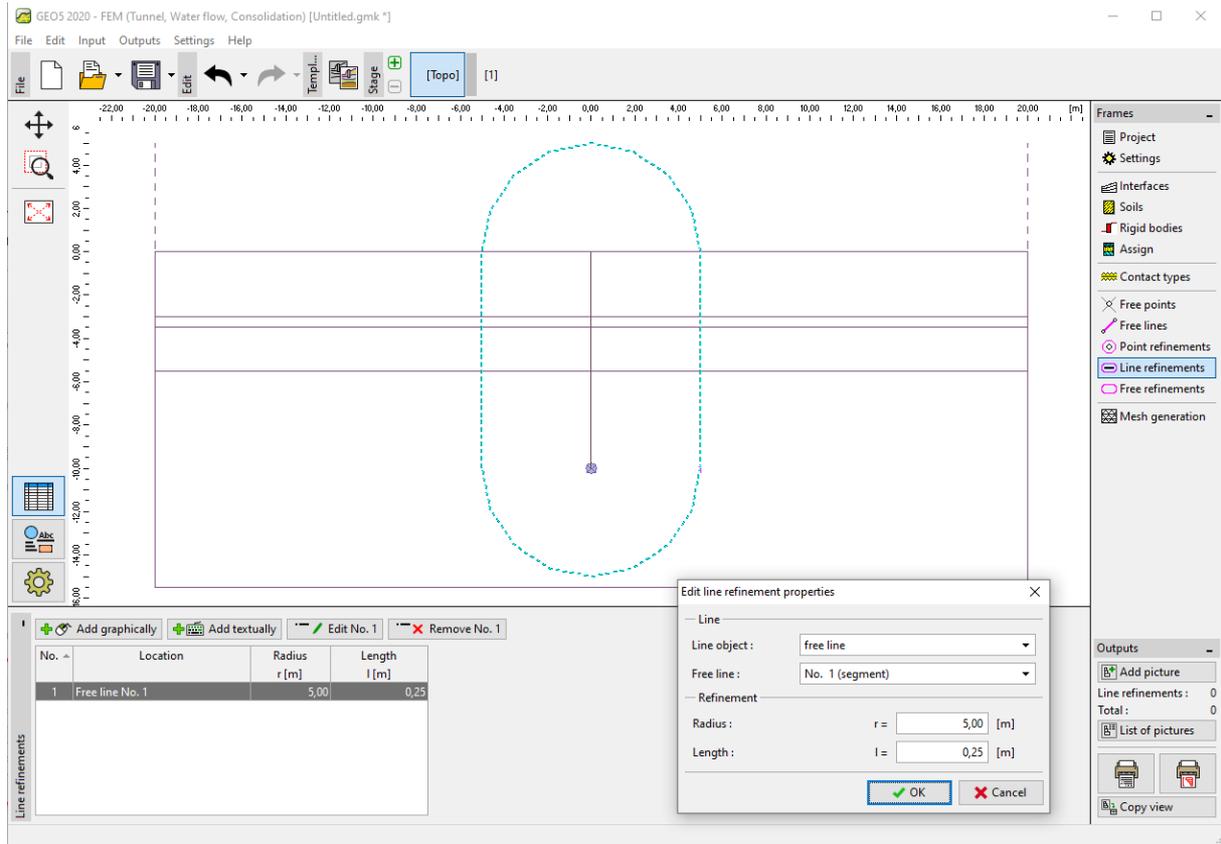
Caixa de diálogo “Novos pontos livres”

Vamos começar por definir um novo ponto livre com coordenadas [0.0; – 10.0]. A linha livre que forma a parede de contenção consiste na ligação entre este ponto e o ponto da interface do terreno (mais detalhes na Ajuda – F1).



Caixa de diálogo “Novas linhas livres”

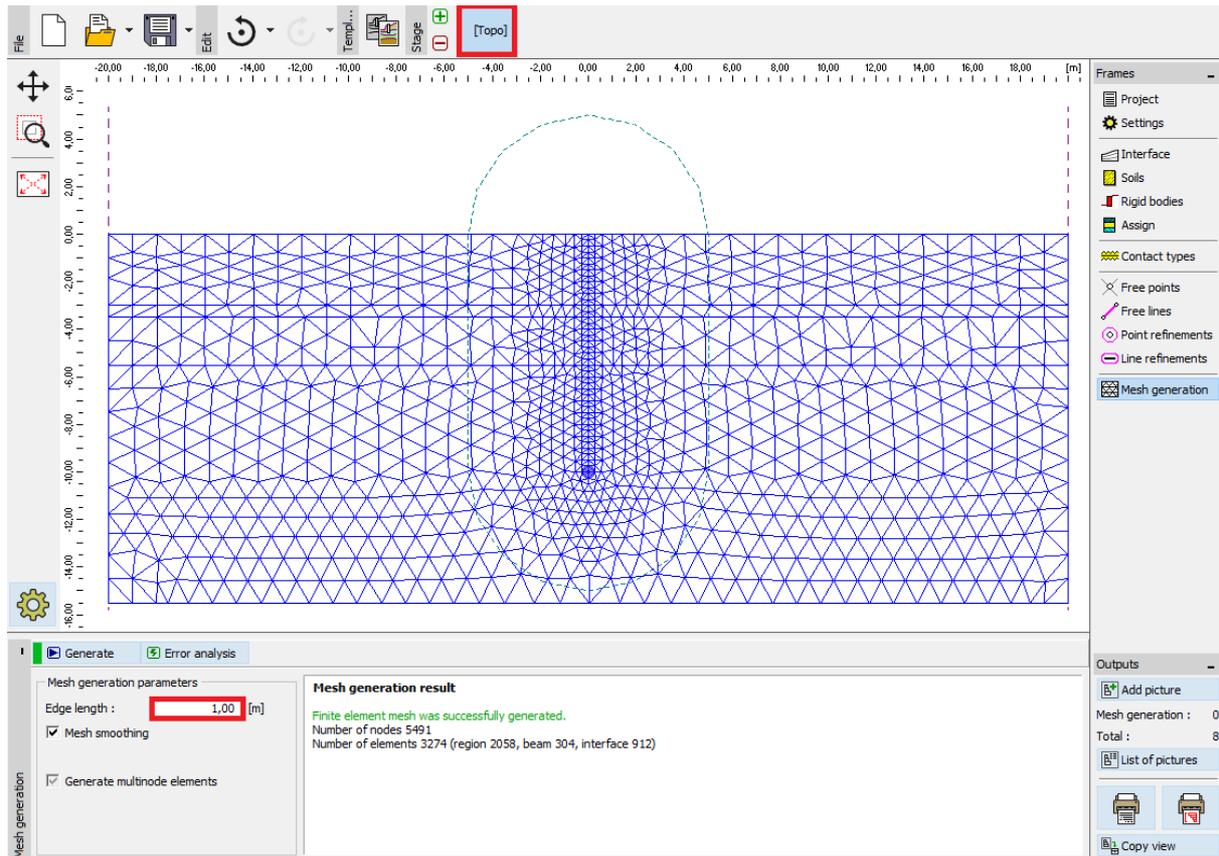
O último passo é a definição da topologia e a geração da malha de elementos finitos. É razoável refinar a malha de EF, na envolvente da parede de contenção. Na caixa de diálogo “Novos refinamentos de linhas”, vamos definir o raio como $r = 5.0 \text{ m}$ e o comprimento das extremidades dos elementos como $l = 0.25 \text{ m}$.



Caixa de diálogo “Novos refinamentos de linhas”

De seguida, vamos passar à janela “Geração da malha” e gerar a malha com elementos com 1.0 m de comprimento (através do botão “Gerar”). O programa suaviza a malha de EF refinada automaticamente.

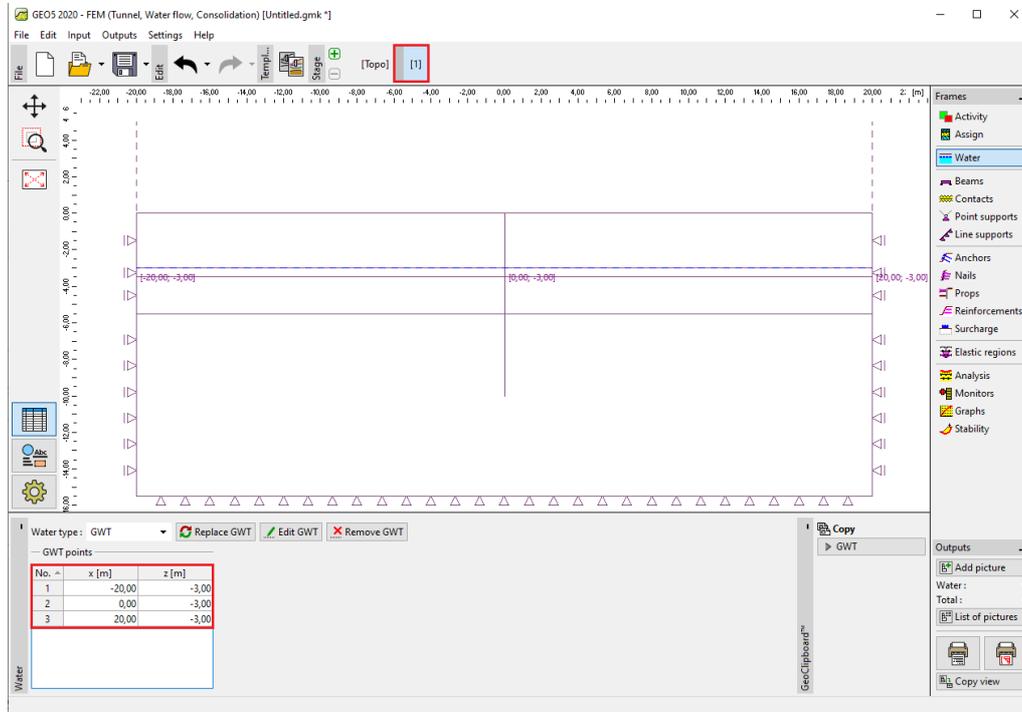
Nota: Seguidamente, vamos visualizar se a densidade da malha de elementos finitos está adequada à extensão e complexidade do problema (mais detalhes na Ajuda – F1). O aumento de densidade da malha contribui para estabilizar a análise não linear, de forma semelhante ao efeito da diminuição da rigidez transversal.



Janela “Geração da malha” – elementos com extremidades de 1 m de comprimento (com densidade da malha aumentada localmente)

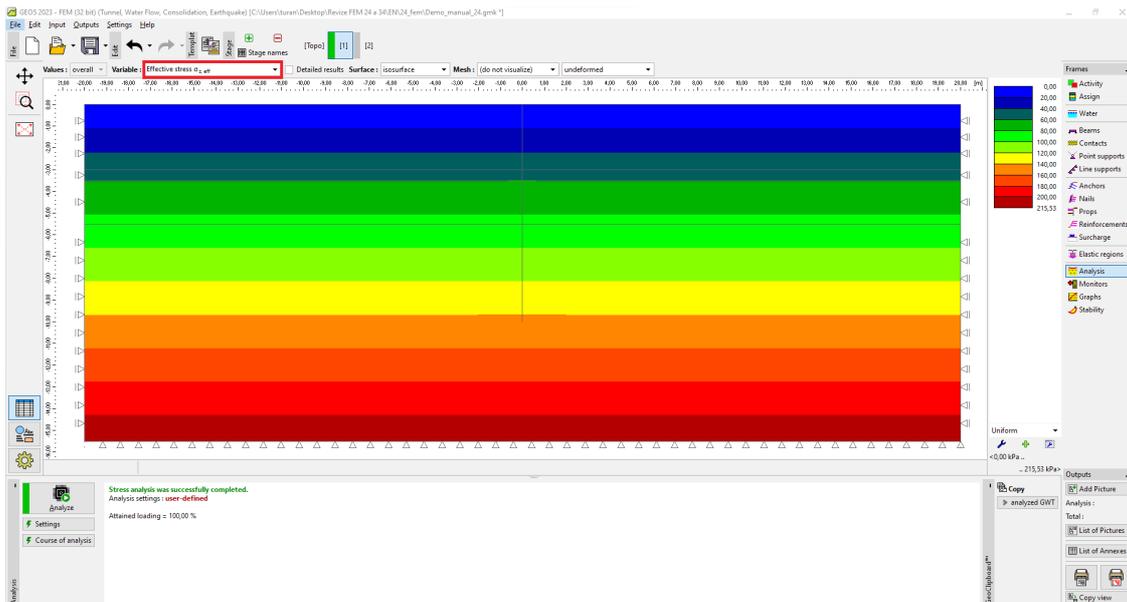
Etapa de construção 1: tensão geostática primária

Após gerar a malha, vamos passar à etapa de construção 1 e definir o nível freático a uma profundidade de 3.0 m abaixo da superfície do terreno (ver imagem).



Janela “Nível freático” – Etapa de construção 1 (nível freático a 3.0 m de profundidade)

Vamos realizar a análise da tensão geostática primária. Vamos manter a configuração de análise “Padrão” (mais detalhes na Ajuda – F1).



Janela “Análise” – Etapa de construção 1 (tensão geostática vertical $\sigma_{z,ef}$)

De modo a observar determinados valores (durante a análise de cada etapa de construção), vamos definir *pontos monitores* (através do botão “Adicionar”). Vamos definir os locais a monitorizar nos pontos que representam o topo e a base da cortina de estacas, isto é, os pontos de coordenadas [0.0; 0.0] e [0.0; - 10.0] e definir o ponto da base da vala de escavação do solo como [0.0; - 5.5].

The screenshot shows the GEO5 2020 software interface. The main window displays a cross-section of a retaining wall with three monitoring points highlighted in green. The 'Monitors' table at the bottom left shows three active point monitors. The 'New monitors' dialog box is open, showing the 'point' monitor type and coordinates x=0.00 and z=-10.00.

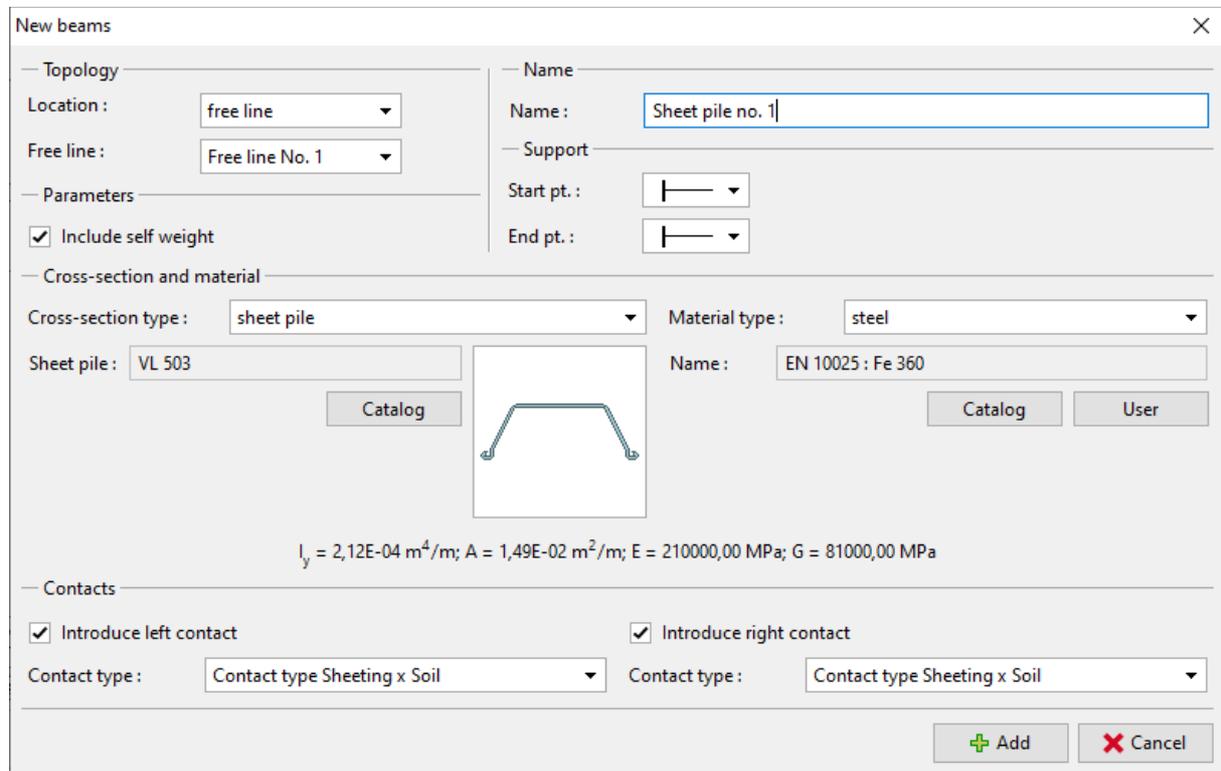
No.	Active	Monitor type	Point / Point 1		Point 2	
			x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
1	<input checked="" type="checkbox"/>	point	0,00	0,00		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	point	0,00	-5,50		
3	<input checked="" type="checkbox"/>	point	0,00	-10,00		

Janela “Monitores” – Etapa de construção 1 (pontos monitores)

Nota: Vamos editar a forma de visualização dos valores que pretendemos observar através do botão “Configurações” (no canto inferior esquerdo do ecrã). Ao analisar a estrutura de contenção, os resultados mais importantes são as variações da tensão geostática e o valor dos deslocamentos verticais e laterais.

Etapa de construção 2: modelação de elementos viga

Nesta etapa de construção, vamos começar a modelar a cortina de estacas na janela “Vigas”. Vamos definir os seguintes parâmetros: localização, material e classe do aço, tipo de secção transversal (VL 503), apoios das extremidades da viga e contactos (mais detalhes na Ajuda – F1).



New beams [X]

— Topology
 Location : free line
 Free line : Free line No. 1

— Parameters
 Include self weight

— Name
 Name : Sheet pile no. 1

— Support
 Start pt. : []
 End pt. : []

— Cross-section and material
 Cross-section type : sheet pile
 Material type : steel
 Sheet pile : VL 503
 Material : EN 10025 : Fe 360

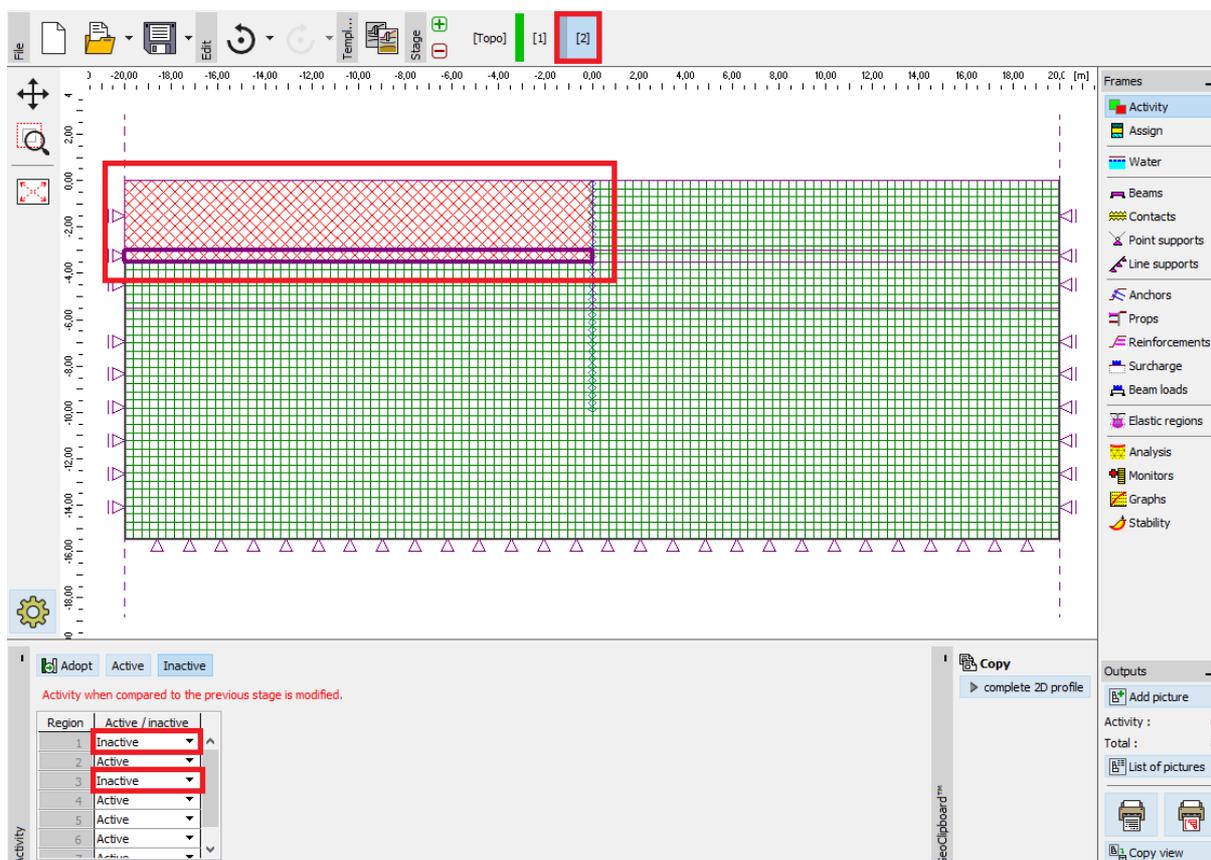
$I_y = 2,12E-04 \text{ m}^4/\text{m}$; $A = 1,49E-02 \text{ m}^2/\text{m}$; $E = 210000,00 \text{ MPa}$; $G = 81000,00 \text{ MPa}$

— Contacts
 Introduce left contact
 Introduce right contact
 Contact type : Contact type Sheeting x Soil
 Contact type : Contact type Sheeting x Soil

[+ Add] [X Cancel]

Caixa de diálogo “Novas vigas” – Etapa de construção 2

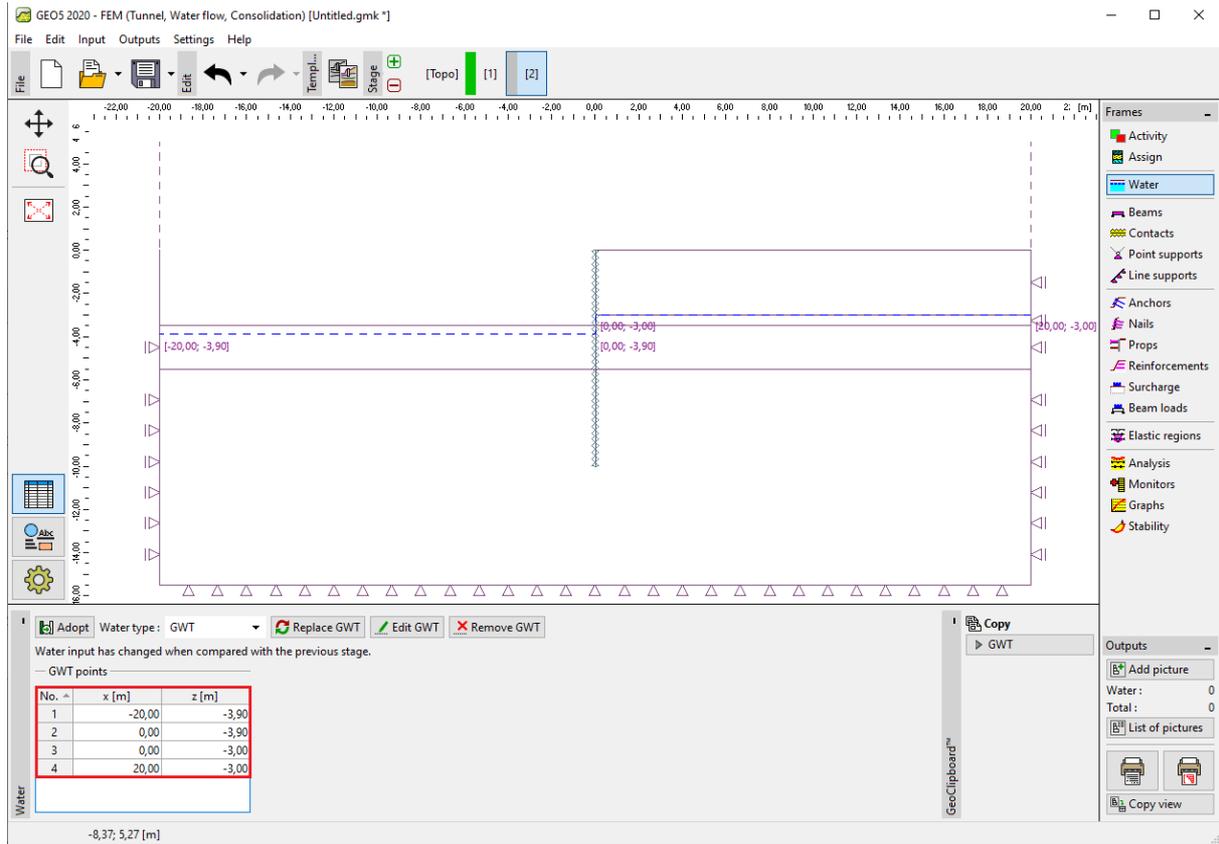
De seguida, vamos modelar a escavação do solo na janela “Atividade” – vamos definir as regiões pretendidas, utilizando o mouse, como inativas (mais detalhes na Ajuda – F1).



Janela “Atividade” – Etapa de construção 2

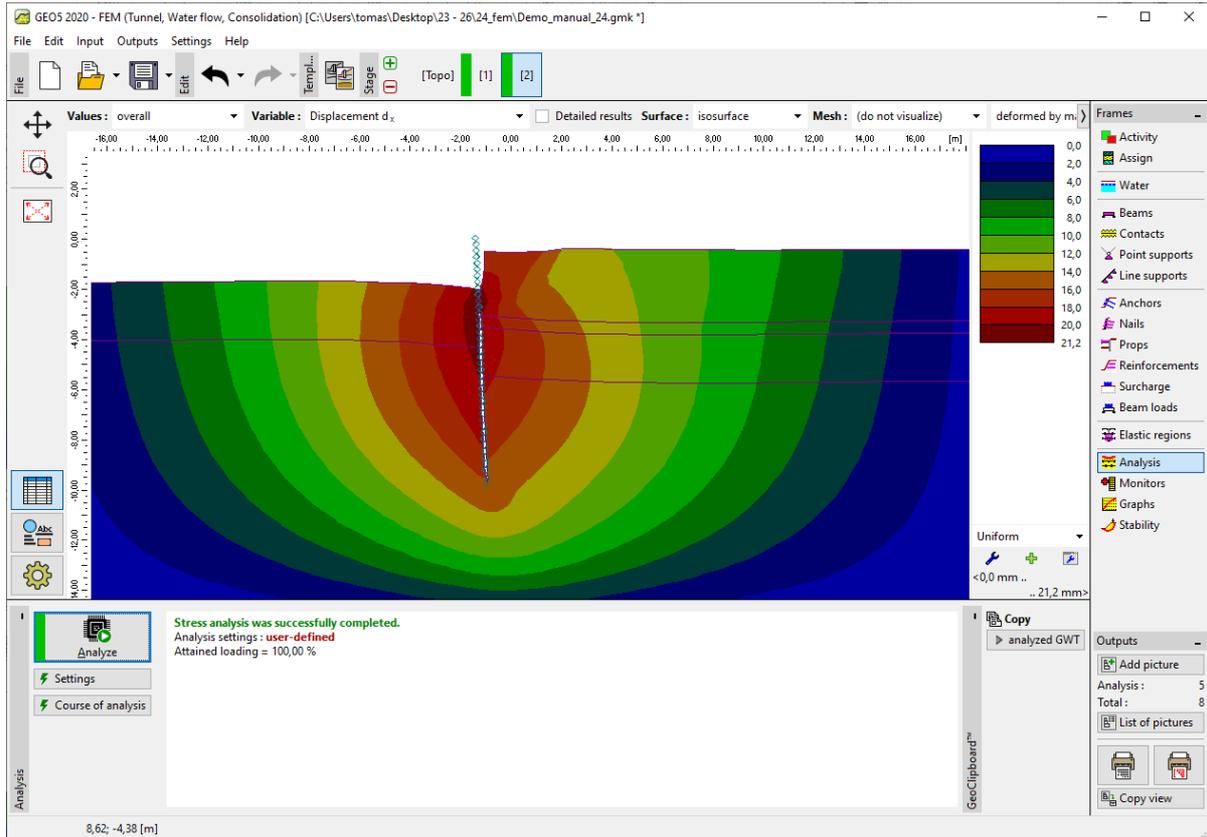
Nota: A partir da imagem anterior é possível observar que o corretor automático do programa dividiu as interfaces dos solos que a parede atravessa em regiões circunscritas (mais detalhes na Ajuda – F1).

Na janela “Nível freático”, vamos introdução uma variação do nível freático de acordo com a imagem seguinte. Os outros parâmetros permanecem inalterados.

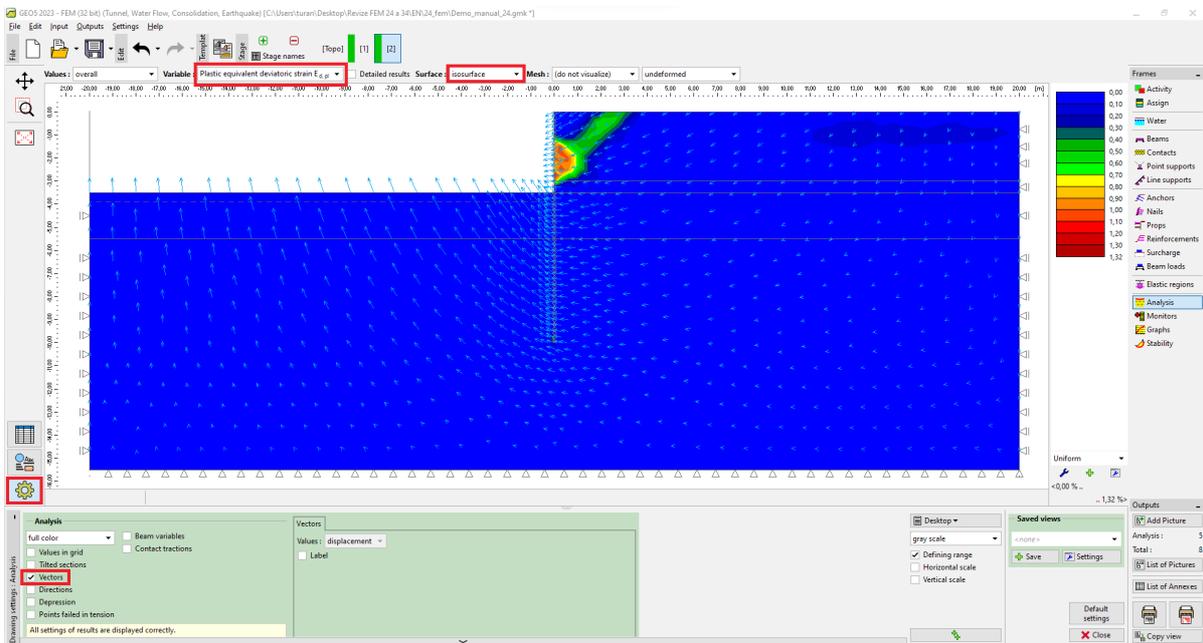


Janela “Nível freático” – Etapa de construção 2 (variações no nível freático)

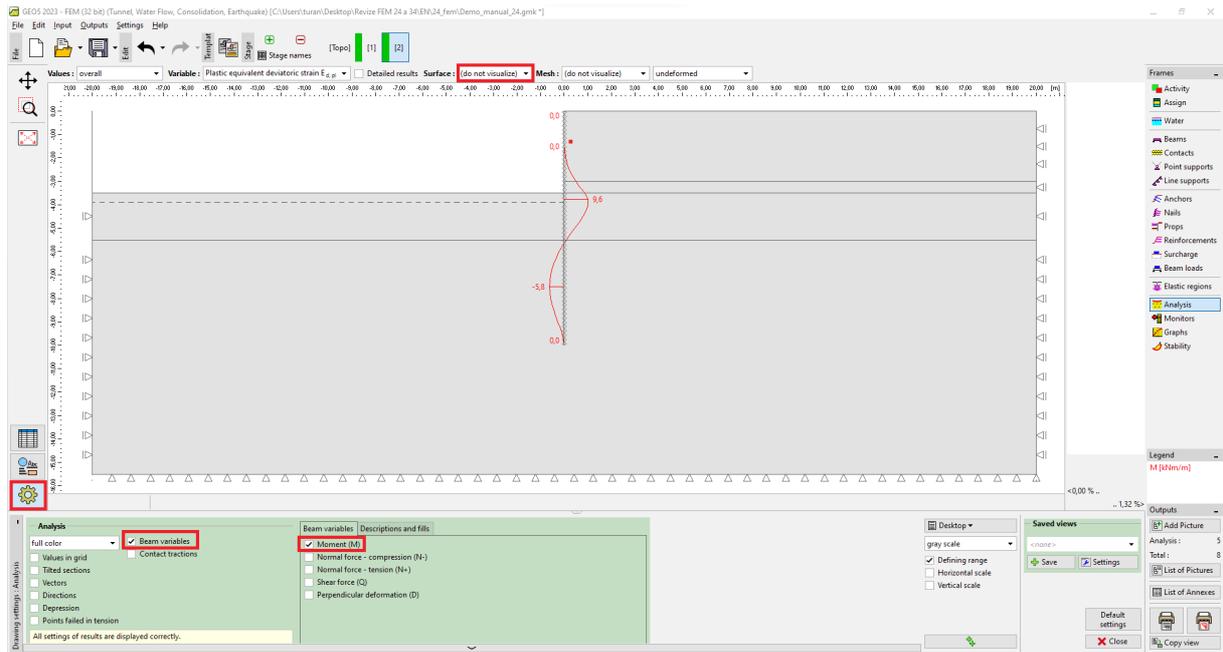
Agora, vamos realizar a análise da etapa de construção 2 e avaliar os resultados obtidos para os diagramas das forças internas ao longo da viga, deformações plásticas equivalentes e a estrutura deformada.



Janela “Análise” – Etapa de construção 2 (assentamento d_x – estrutura deformada)



Janela “Análise” – Etapa de construção 2 (deformações plásticas equivalentes $\epsilon_{eq,pl}$ e vetores deslocamentos)



Janela “Análise” – Etapa de construção 2 (distribuição do momento fletor)

Etapa de construção 3: definição das ancoragens

Vamos adicionar a etapa de construção 3 e vamos clicar no botão “Adicionar” da janela “Ancoragens” e, na caixa de diálogo “Novas ancoragens”, definir uma ancoragem em aço com uma força de pré-esforço $F = 185 \text{ kN}$. Vamos considerar a ancoragem a uma profundidade de 2.9 m abaixo da superfície do terreno – vamos definir a cabeça da ancoragem através do ponto com coordenadas [0.0; – 2.9].

Nota: As ancoragens são modeladas através de elementos elásticos com rigidez normal constante. A rotura dos elementos de ancoragem é controlada pela força máxima definida. A ancoragem é fixada no solo em dois pontos – na superfície e na base. Não se assume nenhuma interação entre o solo e o elemento de reforço ao longo da ancoragem (mais detalhes na Ajuda – F1).

Vamos assumir os seguintes parâmetros para a ancoragem:

- Comprimento da ancoragem: $l = 12 \text{ m}$,
- Inclinação da ancoragem: $\alpha = 15^\circ$,
- Diâmetro da ancoragem: $d = 10 \text{ mm}$,
- Espaçamento entre ancoragens: $b = 1 \text{ m}$.

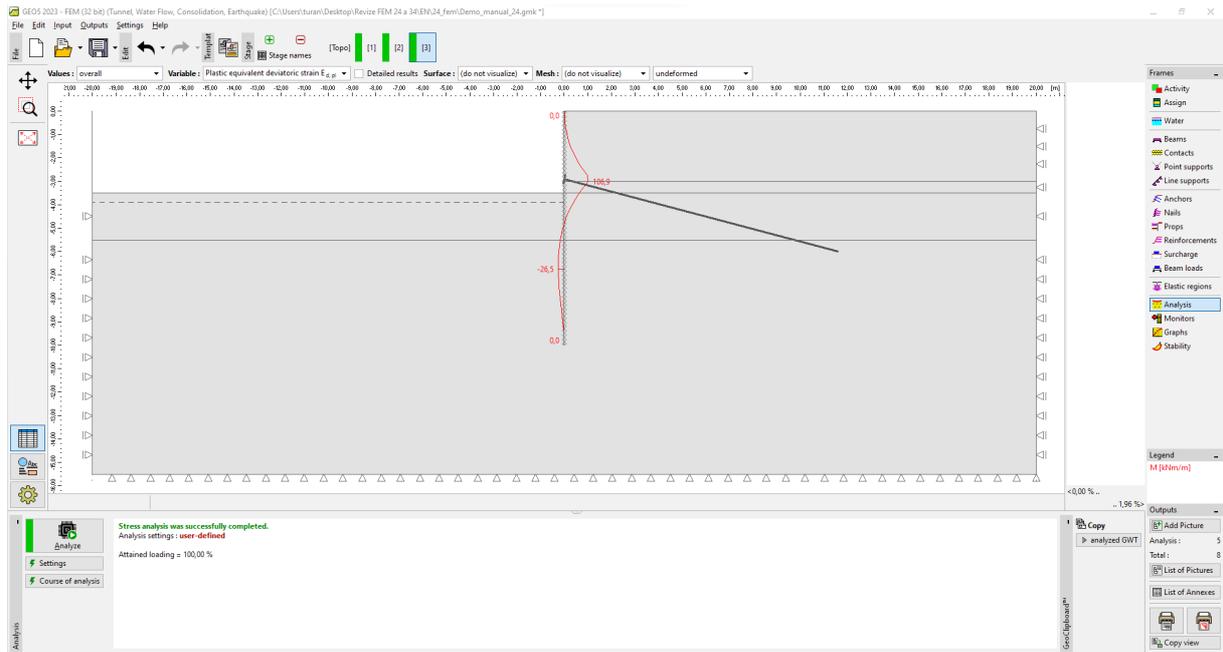
Nota: A rigidez da ancoragem é definida através do modulo de elasticidade, área da secção transversal da ancoragem e espaçamento entre ancoragens. É necessário compreender que para o caso do plano de deformações, as ancoragens são substituídas por membranas com 1 m de largura. Outros dados importantes a introduzir na definição das ancoragens são a força de pré-esforço e a força de rotura. Neste caso, não vamos considerar a possibilidade de rotura do elemento de reforço, sendo que vamos definir a força de rotura F_c como um valor suficientemente elevado (mais detalhes na Ajuda – F1).

Caixa de diálogo “Novas ancoragens” – Etapa de construção 3

Nota: A ancoragem sofre deformações durante o decorrer da análise. Como resultado da deformação da ancoragem e do solo envolvente, a força de pré-esforço definida para a ancoragem pode diminuir. Assim, se for pretendido que seja alcançada uma força de pré-tensionamento específica, é necessário introduzir uma tensão adicional na ancoragem, durante a etapa seguinte, ou definir inicialmente uma força de pré-esforço suficientemente elevada (a força resultante na ancoragem após a análise é indicada no diagrama, na cabeça da ancoragem, em baixo da força de pré-esforço definida). Nas etapas de construção seguintes, os parâmetros das ancoragens não podem ser alterados; apenas é possível aumentar a tensão de modo a atingir a nova força de pré-esforço ou remover completamente a ancoragem da estrutura.

A parte da ancoragem inserida no solo deve ser suficientemente resistente (fixada em um elemento), de modo a que não ocorra uma remoção irrealista da ancoragem quando se verificar o desenvolvimento de deformações plásticas na vizinhança da raiz da ancoragem (fixada em um nó, aumento de densidade demasiado elevada na vizinhança da raiz), que podem causar uma diminuição irrealista da força de pré-esforço.

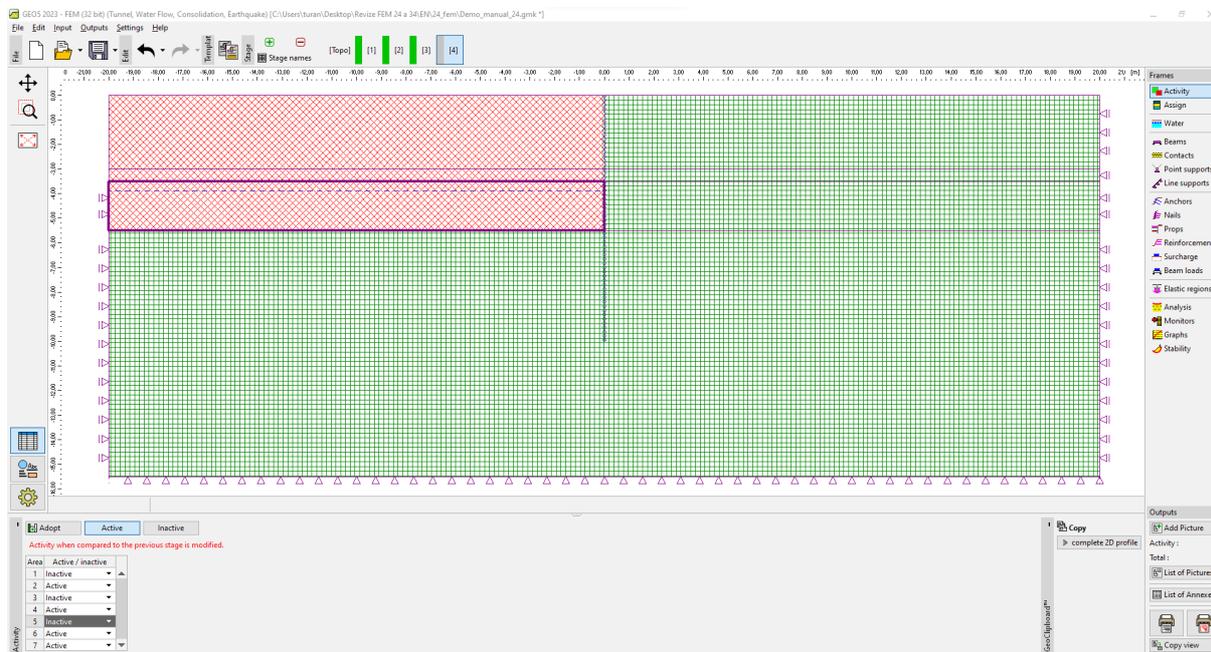
Agora, vamos realizar a análise da etapa de construção 3 e voltar a analisar os resultados da análise numérica (de forma semelhante à etapa de construção anterior).



Janela “Análise” – Etapa de construção 3

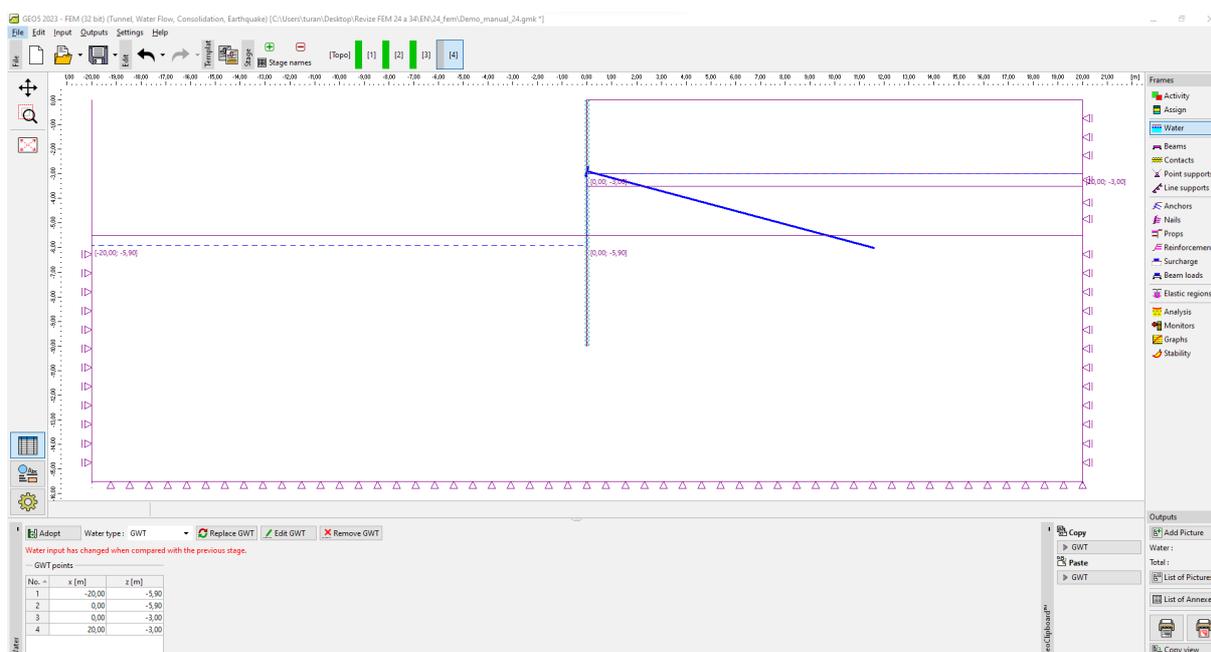
Etapa de construção 3: definição das ancoragens

Vamos adicionar a etapa de construção 4 e remover o solo restante para concluir a escavação. Primeiro, vamos selecionar a região pretendida com o cursor e clicar no botão “Inativa”.

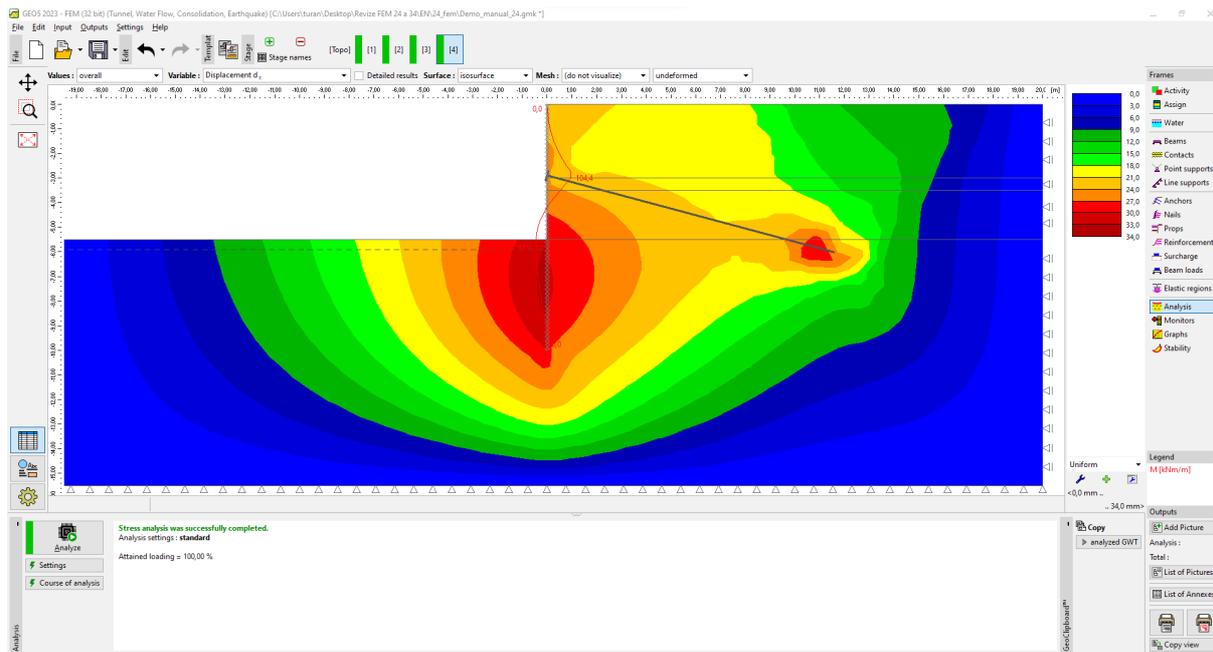


Janela “Atividade” – Etapa de construção 4

O último passo da etapa de construção 4 é a alteração do nível freático, de acordo com a figura seguinte. Os restantes parâmetros permanecem inalterados.

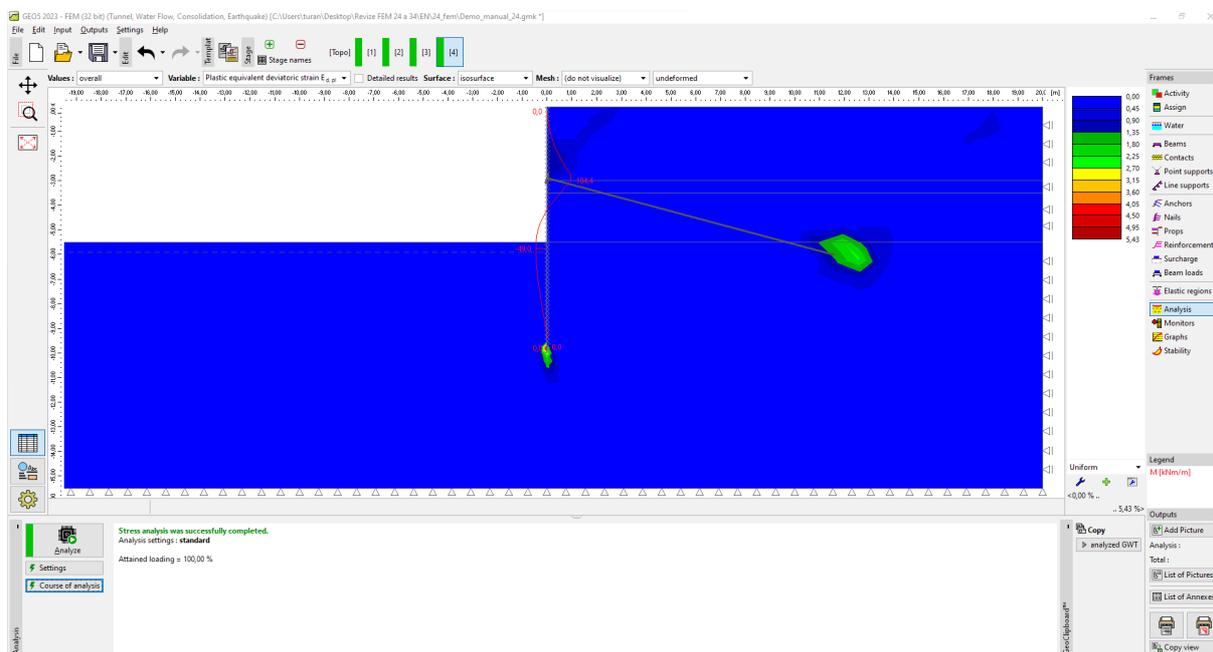


Janela “Nível freático” – Etapa de construção 4 (alteração do nível freático)



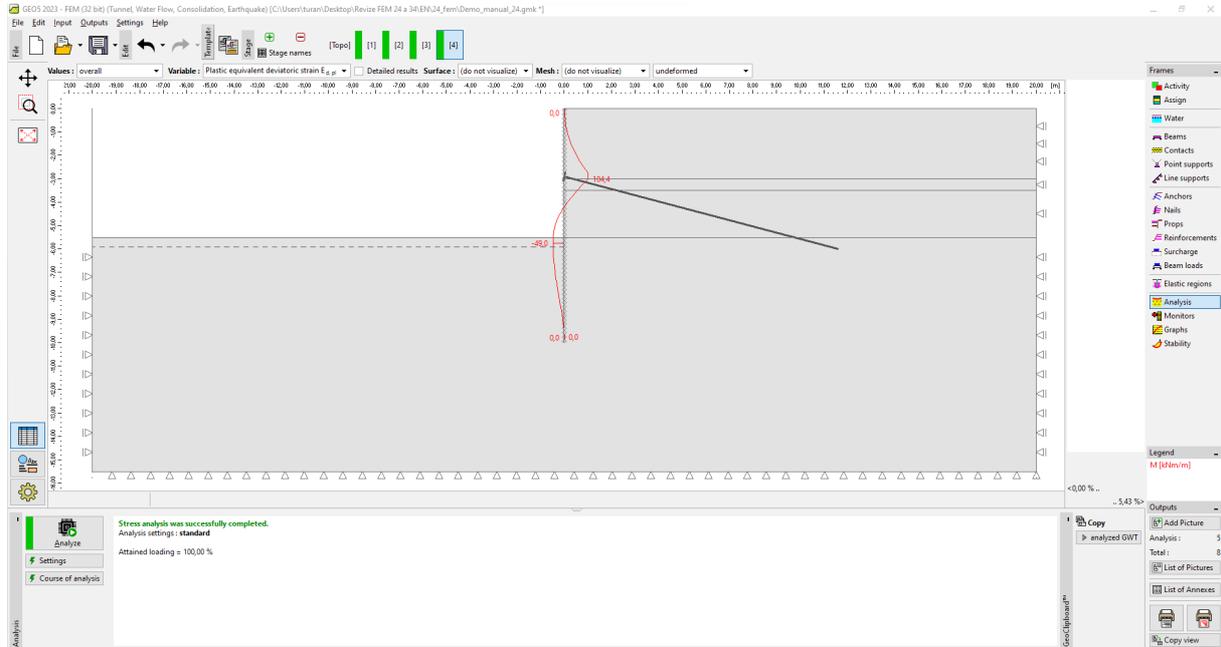
Janela “Análise” – Etapa de Construção 4 (assentamento – estrutura deformada)

A partir da imagem é possível verificar que o deslocamento lateral máximo na vizinhança da cortina de estacas formada por estacas-prancha metálicas é igual a 34 mm.



Janela “Análise” – Etapa de construção 4 (deformação plástica equivalente)

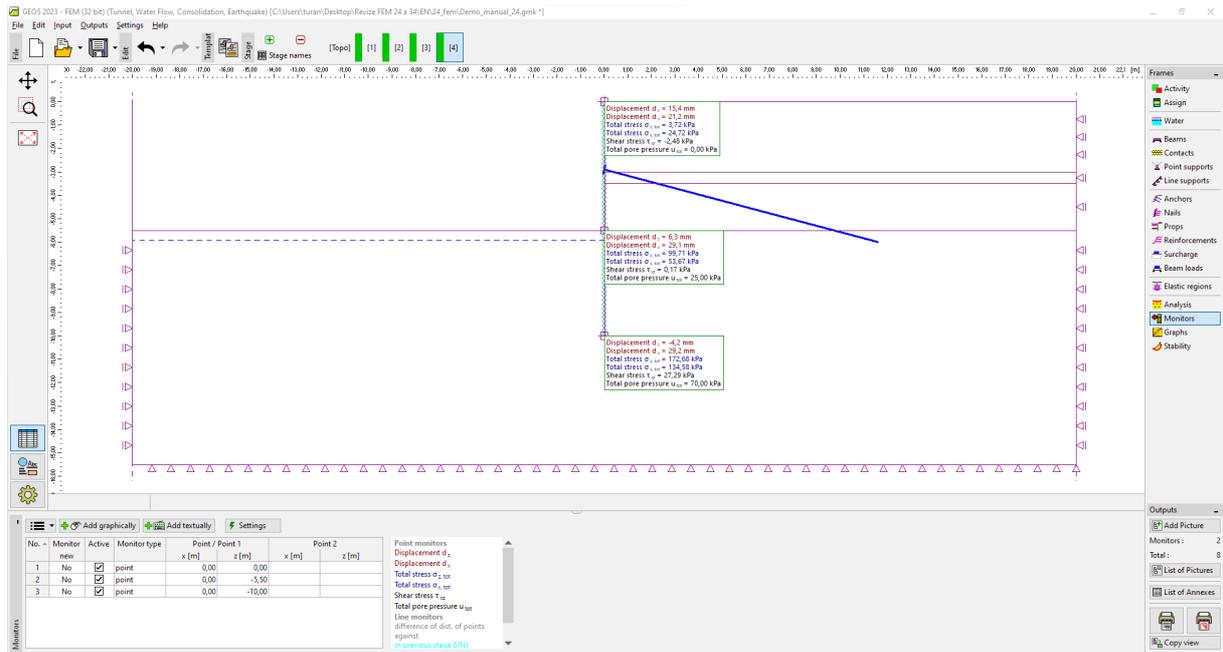
A partir das deformações plásticas obtidas, torna-se evidente que as maiores deformações plásticas do solo se desenvolvem na vizinhança da base da cortina de estacas. Na segunda etapa, verificou-se a plastificação do solo na região envolvente da ancoragem (mais detalhes na Ajuda – F1).



Janela “Análise” – Etapa de construção 4 (distribuição do momento fletor)

Vamos identificar os extremos locais no diagrama de momentos fletores ao longo da parede de contenção; vamos sumariá-los numa tabela, que será apresentada no final deste capítulo.

Agora, vamos examinar os resultados dos monitores e determinar as deformações na parte superior da cortina de estacas.



Janela “Monitores” – Etapa de construção 4 (Pontos monitores)

Análise dos resultados:

A tabela seguinte mostra os valores extremos das forças internas, ao longo da cortina de estacas-prancha, para as etapas de construção 2 e 3. Estes valores referem-se aos momentos fletores. A análise foi realizada de acordo com o modelo material de Mohr-Coulomb Modificado, com a densidade da malha de elementos finitos aumentada localmente, utilizando a opção de refinamento de linhas. Posteriormente, estes resultados foram comparados com os resultados obtidos utilizando o programa GEO5 Verificação de Contensões.

Material modelo / programa	Etapa 2 $M [kNm/m]$	Etapa 3 – solo $M [kNm/m]$	Etapa 3 – ancoragem $M [kNm/m]$
MCM (M-C Modificado)	01-09-60	- 49.00	104.40
Verificação de Contensões * (análise analítica)	29.16	- 28.91	110.57

Sumário dos resultados – momentos fletores ao longo da estrutura de contenção

Nota *: Para a análise analítica, considerou-se uma análise do módulo de reação horizontal da superfície final de acordo com Schmitt (mais detalhes na Ajuda – F1). Os parâmetros adicionais foram definidos da seguinte forma:

- **Solo de classe SM, densidade média:** análise para pressão em repouso – solo não coesivo,
 $\delta = 17^\circ$,
módulo de deformação do solo $E_{def} = 10 \text{ MPa}$.
- **Solo de classe CL, consistência rígida:** pressão em repouso – solo coesivo ($\nu = 0.4$),
 $\delta = 14^\circ$,
módulo de deformação do solo $E_{def} = 4.5 \text{ MPa}$.

Definimos a análise como “Padrão – Estados limite”. A análise de empuxos de terra foi realizada sem redução dos parâmetros do solo. Não se considerou o valor da pressão mínima para dimensionamento (mais detalhes na Ajuda – F1).

Conclusão

Podem ser formuladas as seguintes conclusões a partir dos resultados da análise numérica:

- A densidade aumentada localmente nas vizinhanças de linhas, da malha de EF, permite determinar os valores das forças internas com maior precisão.
- Na análise de paredes de contenção, é necessário utilizar elementos de contacto e modelos materiais não lineares, que permitem o desenvolvimento de deformações plásticas e uma aproximação mais próxima da realidade do comportamento das estruturas e do solo envolvente.
- As deformações equivalentes máximas $\varepsilon_{eq.,pl.}$ representam as localizações onde se podem verificar roturas (como resultado da excedência da condição de cedência do material).