

Análise da estabilidade de taludes

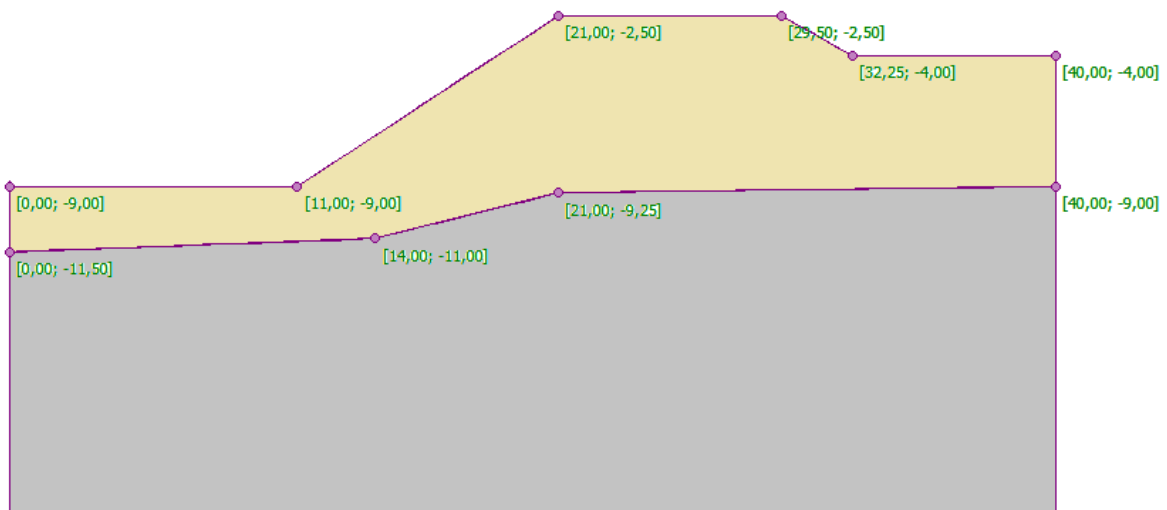
Programa: MEF

Arquivo: Demo_manual_25.gmk

O objetivo deste Manual é analisar o grau de estabilidade de um talude (fator de segurança), através do Método dos Elementos Finitos.

Definição do problema

Determine o grau de estabilidade de um talude, primeiro sem a ação de uma sobrecarga contínua e, depois, sob o efeito de uma sobrecarga contínua $q = 35,0 \text{ kN/m}^2$. A imagem seguinte mostra a representação esquemática da geometria do talude, que se mantém igual para todas as etapas de construção (todos os pontos das interfaces incluídos). De seguida, realize a estabilização do talude através da introdução de ancoragens pré-esforçadas.



Esboço da modelação do talude – pontos das interfaces

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

Parâmetros do solo / Classificação	Solo No. 1	Solo No. 2 – R4
Peso volúmico do solo: γ [kN/m^3]	18	20
Módulo de elasticidade: E [MPa]	21	300
Coefficiente de Poisson: ν [-]	0.3	0.2
Coesão do solo: c_{eff} [kPa]	9	120
Ângulo de atrito interno: ϕ_{eff} [$^\circ$]	23	38
Ângulo de dilatação: ψ [$^\circ$]	0	0
Peso volúmico saturado: γ_{sat} [kN/m^3]	20	22

Tabela com os parâmetros dos solos – verificação da estabilidade do talude

Nota: Não vamos considerar valores diferentes para o módulo E para carregamento/relaxamento ($E_{ur}=E$).

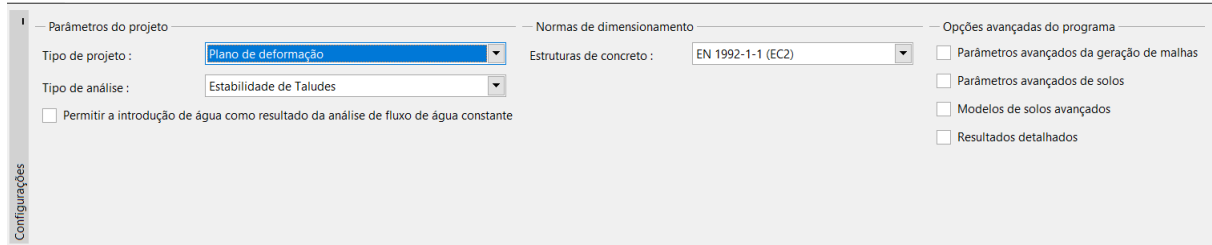
Resolução

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

- Topologia: configuração e modelação do problema (interface, geração da malha)
- Etapa de construção 1: análise do fator de segurança do talude original sem efeito da sobrecarga contínua
- Etapa de construção 2: análise do fator de segurança do talude original sob o efeito da sobrecarga contínua
- Etapa de construção 3: estabilização do talude através de ancoragens, análise de estabilidade do talude
- Análise de resultados: comparação, conclusão

Topologia: configuração do problema

Vamos definir a opção *Estabilidade de taludes* como tipo de análise, na janela “Configurações”. Vamos manter os restantes parâmetros inalterados.

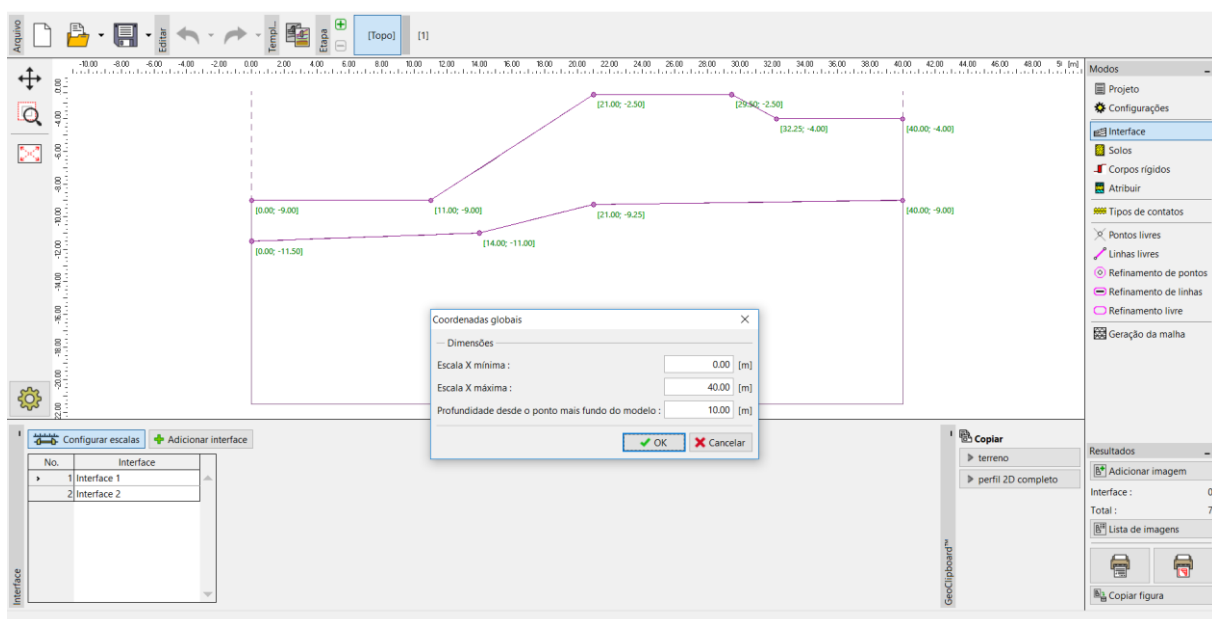


Janela “Configurações”

Nota: A configuração de um modelo no modo “Estabilidade de taludes” é idêntico à modelação no modo “Tensão”. A análise de estabilidade de taludes é realizada através do botão “Analisar”. Cada análise da estabilidade de um talude, correspondente a cada etapa de construção, é totalmente independente das etapas anteriores (mais detalhes na Ajuda – F1).

Vamos, também, definir as coordenadas globais. Vamos definir dimensões suficientemente elevadas de modo a que os resultados não sejam afetados pelas condições das extremidades do modelo. Para este caso em particular, vamos definir os limites do modelo como $\langle 0\text{ m}; 40\text{ m} \rangle$ e definir a profundidade como 10 m.

De seguida, vamos definir os pontos das interfaces, correspondentes a cada camada de solo, conforme a tabela seguinte.



Caixa de diálogo “Coordenadas globais”

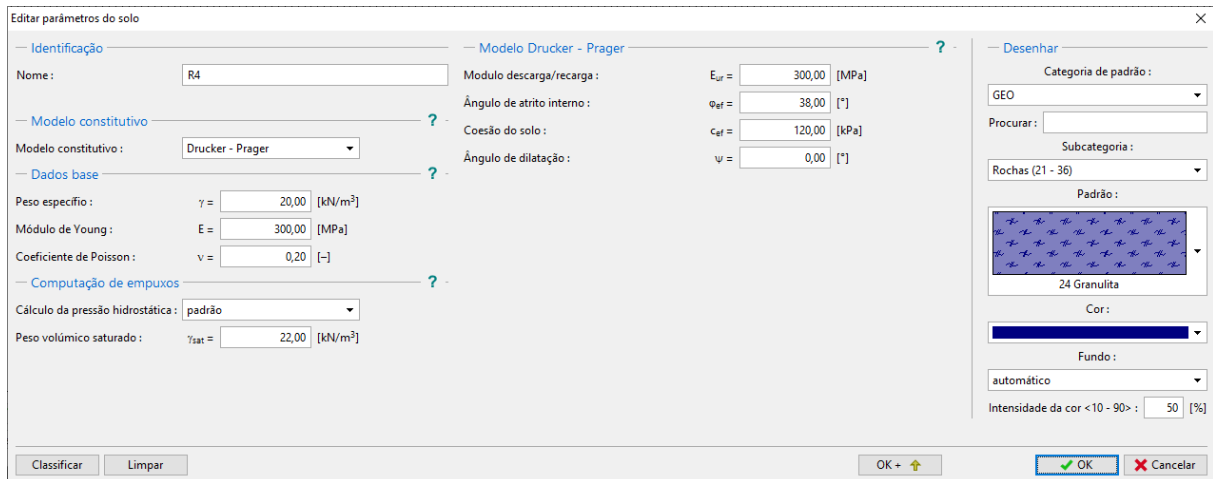
	Interface 1		Interface 2	
	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
1	0,00	-9,00	0,00	-11,50
2	11,00	-9,00	14,00	-11,00
3	21,00	-2,50	21,00	-9,25
4	29,50	-2,50	40,00	-9,00
5	32,25	-4,00		
6	40,00	-4,00		

Lista de pontos de cada interface

Agora, vamos definir os parâmetros dos solos e atribuir os solos às camadas respectivas. Vamos selecionar o modelo de Drucker-Prager (ver *nota*). Vamos considerar o ângulo de dilatação ψ como nulo, para ambos os solos, isto é, o material não sofre variações de volume quando exposto a tensões (mais detalhes na Ajuda – F1).

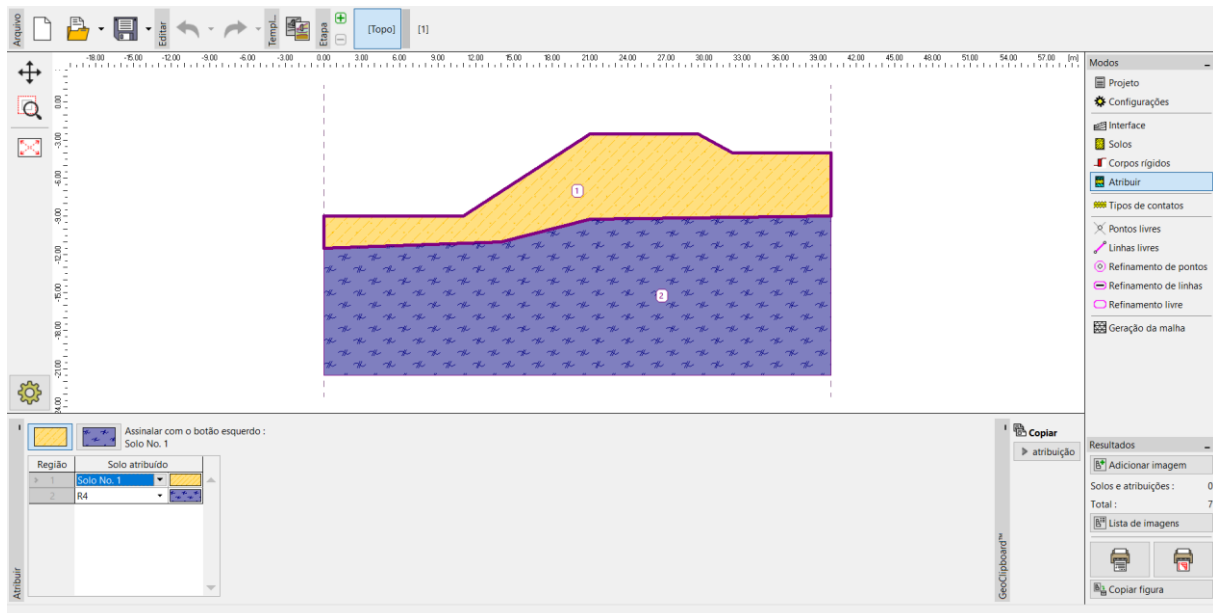
Nota: Ao realizar a análise de estabilidade de taludes, é necessário utilizar um modelo de solo não linear, que considere o desenvolvimento de deformações plásticas e que seja formulado com base nos parâmetros de resistência dos solos, c e ϕ .

Neste caso, vamos escolher o modelo material de Drucker-Prager, devido à melhor resposta na cedência da estrutura em comparação com o modelo clássico de Mohr-Coulomb (mais detalhes na Ajuda – F1). A comparação entre os resultados obtidos utilizando diferentes modelos materiais não lineares é apresentada numa tabela, no final deste exemplo.



Caixa de diálogo "Adicionar novos solos"

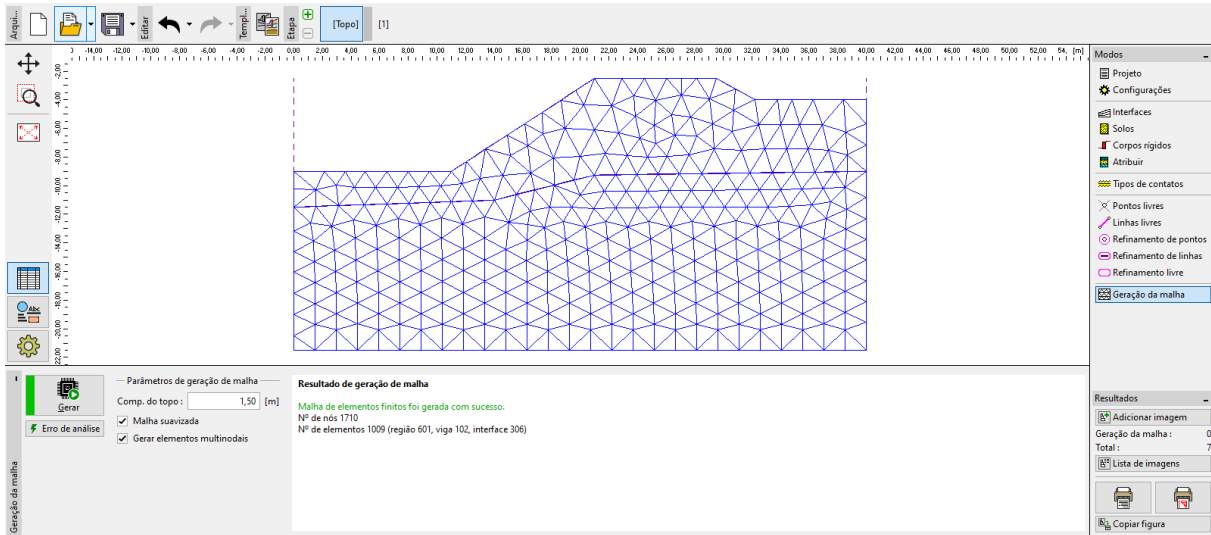
A imagem seguinte mostra a atribuição de solos ao perfil geológico.



Janela "Atribuir"

O último passo no processo de configuração da topologia é a geração da malha de elementos finitos. A densidade da malha afeta de forma significativa o grau de estabilidade resultante (fator de segurança) e é sempre necessário definir uma malha suficientemente refinada.

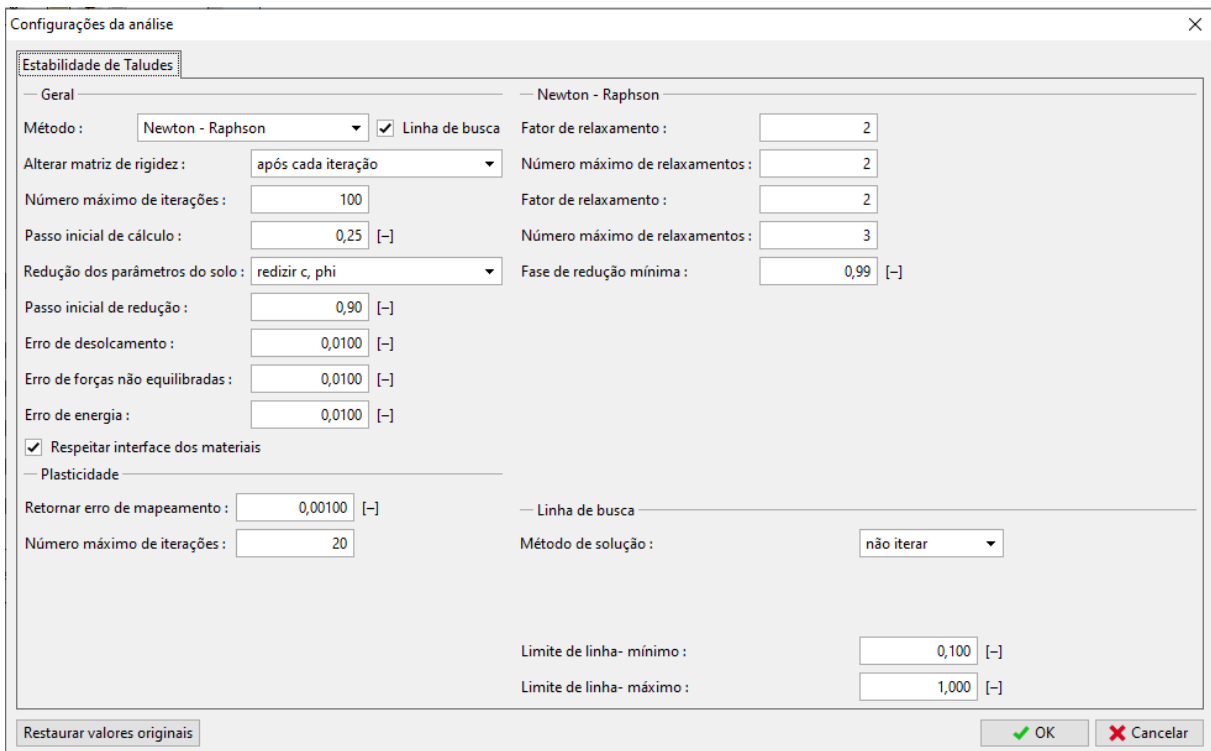
Para este exemplo, vamos definir elementos com extremidades com 1.5 m de comprimento e gerar a malha (através do botão “Gerar”). Os resultados obtidos através do programa GEO5 MEF, para malhas com elementos com extremidades com 1.0, 1.5 e 2.0 m de comprimento, são apresentados numa tabela no final deste capítulo.



Janela “Geração da malha” – elementos com extremidades com 1.5 m de comprimento

Etapa de construção 1: análise do grau de estabilidade (fator de segurança)

Após gerar a malha de EF, vamos passar para a etapa de construção 1 e realizar a análise (através do botão “Analisar”). Vamos manter as configurações da análise como “Padrão”.



Caixa de diálogo “Configurações da análise”

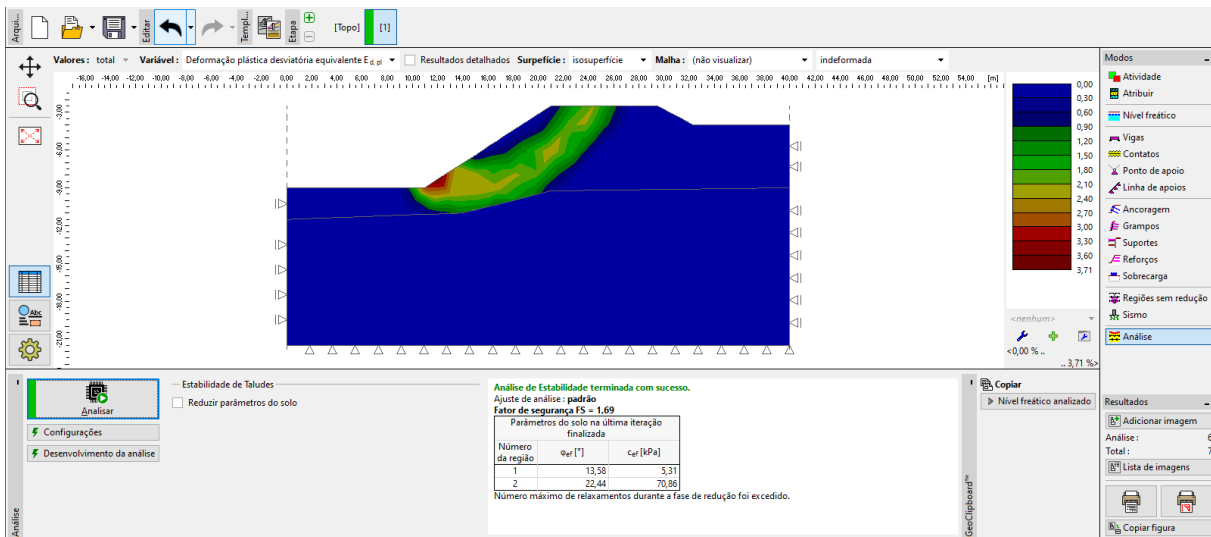
Nota: A análise da estabilidade de taludes baseia-se na **redução dos parâmetros de resistência do solo** c, φ . O fator de segurança é definido dentro do intervalo deste método, como um parâmetro a ser aplicado para reduzir os valores originais dos parâmetros c, φ , que leva a uma redução da estabilidade (mais detalhes na Ajuda– F1). O grau de estabilidade do talude é definido pela relação

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

onde: φ^s – ângulo de atrito interno

φ^p – ângulo de atrito interno durante a rotura

Os resultados importantes na análise de estabilidade são os vetores deslocamento e as deformações plásticas equivalentes $\varepsilon_{eq.,pl.}$. As deformações plásticas mostram a forma e valor das superfícies de rotura potenciais (ver a *imagem seguinte*).

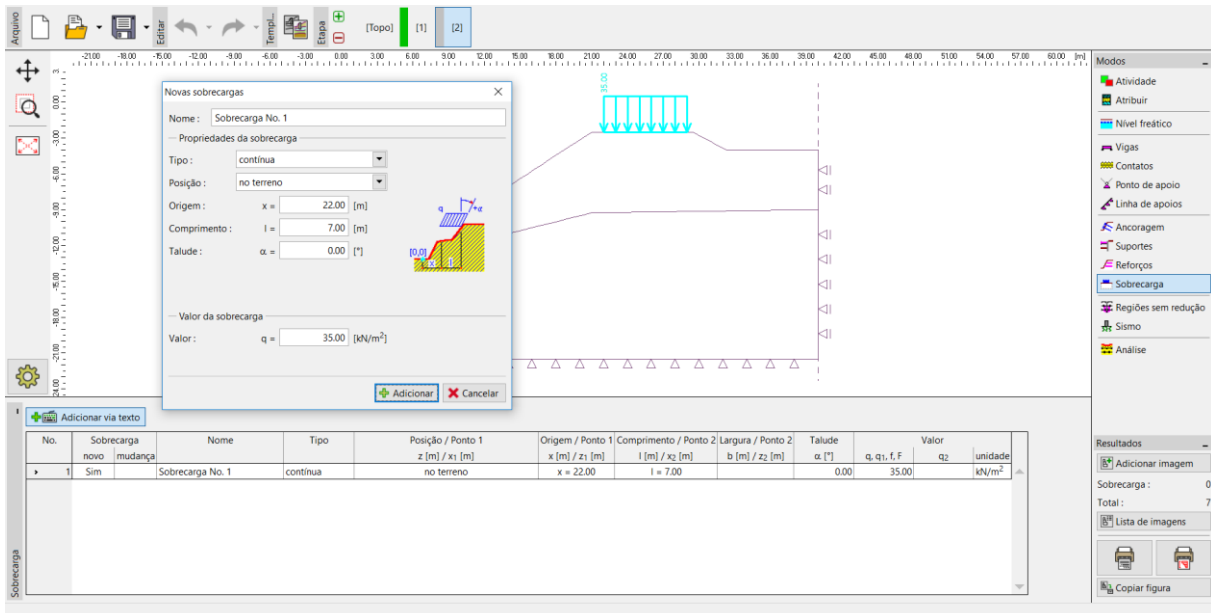


Janela “Análise” – Etapa de construção 1 (deformações plásticas equivalentes $\varepsilon_{eq.,pl.}$)

Nota: O modo “Estabilidade” apenas permite obter deslocamentos (nas direções Z e X) e deformações (totais ou plásticas). A deformação da estrutura corresponde ao estado da análise para parâmetros dos solos reduzidos, não representando a deformação real – apenas permite uma aproximação do comportamento do talude para o momento de rotura (mais detalhes na Ajuda – F1).

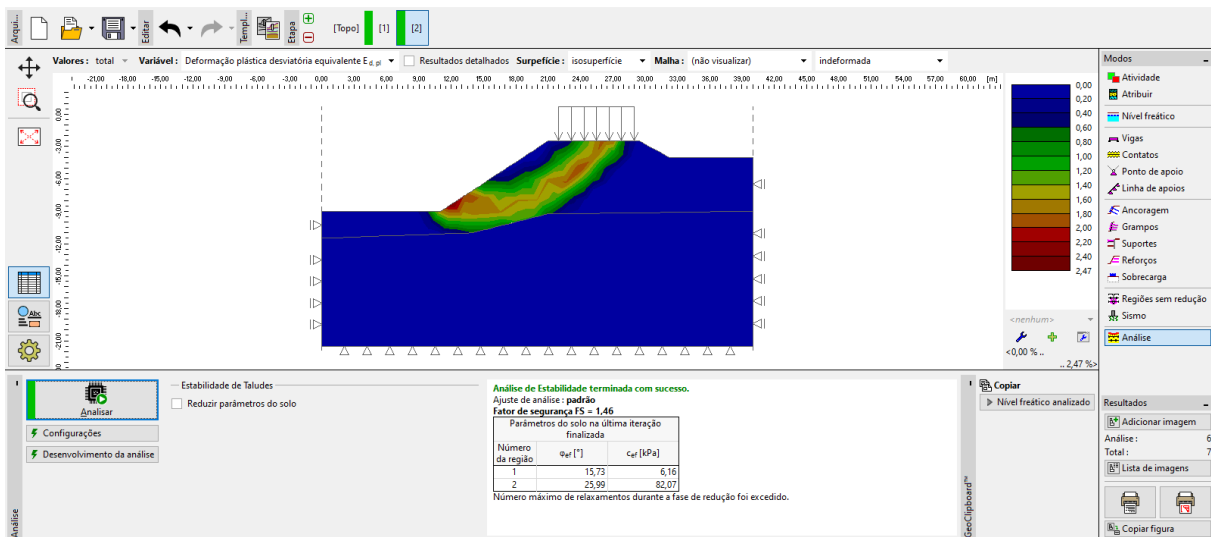
Etapa de construção 2: adição da sobrecarga do talude, análise

Nesta etapa de construção, vamos começar pela janela “Sobrecarga”, para definir os parâmetros seguintes: características e valor da sobrecarga.



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

Agora, vamos realizar a análise da etapa 2 e examinar as deformações plásticas equivalentes.

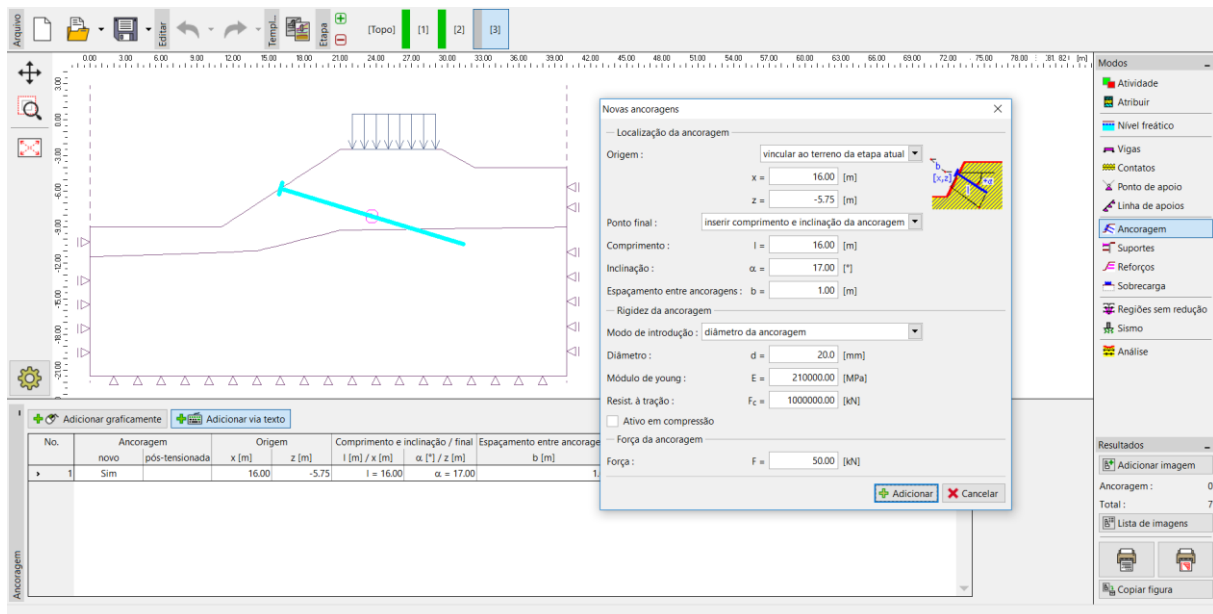


Janela “Análise” – Etapa de construção 2 (deformações plásticas equivalentes $\epsilon_{eq,pl}$.)

Etapa de construção 3: estabilização do talude através de ancoragens, análise

Vamos passar à etapa de construção 3. De seguida, vamos clicar no botão “Adicionar”, na janela “Ancoragens”, e definir uma ancoragem de aço com uma força de pré-esforço $F = 50 \text{ kN}$, na caixa de diálogo “Novas ancoragens”. Vamos considerar os seguintes parâmetros para a ancoragem:

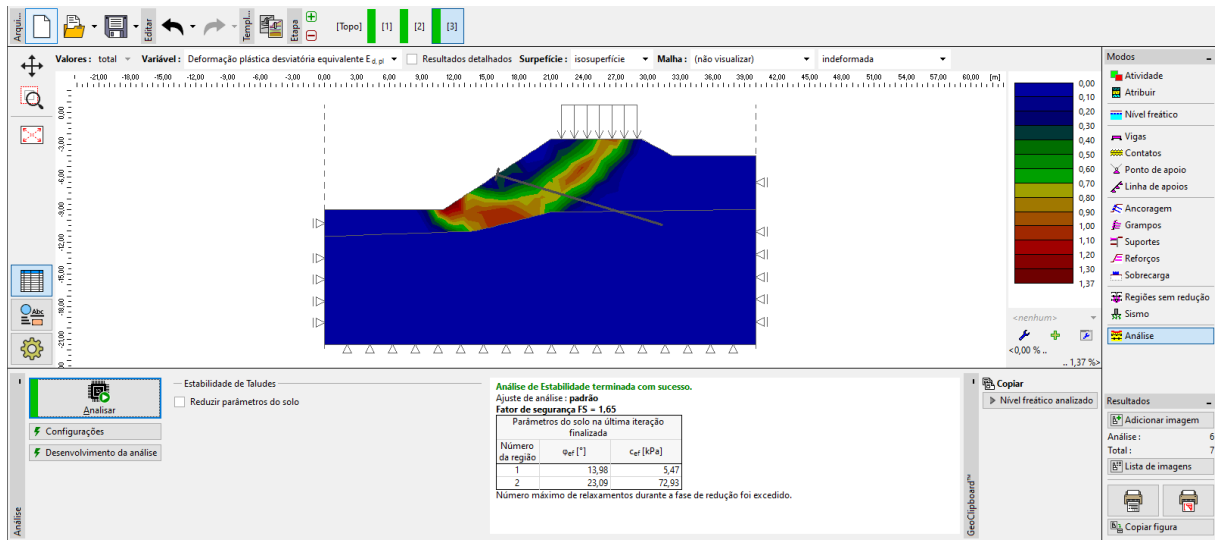
- Comprimento da ancoragem: $l = 16 \text{ m}$,
- Inclinação da ancoragem: $\alpha = 17^\circ$,
- Diâmetro da ancoragem: $d = 20 \text{ mm}$,
- Espaçamento entre ancoragens: $b = 1 \text{ m}$.



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

Nota: Na análise de estabilidade de taludes, as ancoragens pré-esforçadas são introduzidas na análise como uma força atuante na cabeça da ancoragem – a rigidez da ancoragem não tem efeito na estabilidade. No entanto, o solo que envolve a cabeça da ancoragem pode sofrer plastificação. Assim, é necessário verificar a localização de deformações plásticas, após a análise estar concluída. No caso de o solo sob a cabeça da ancoragem sofrer plastificação, é necessário editar o modelo (mais detalhes na Ajuda – F1).

Os restantes parâmetros mantêm-se inalterados. Agora, vamos realizar a análise para a etapa de construção 3 e voltar a examinar os resultados da análise (de forma semelhante à análise anterior).

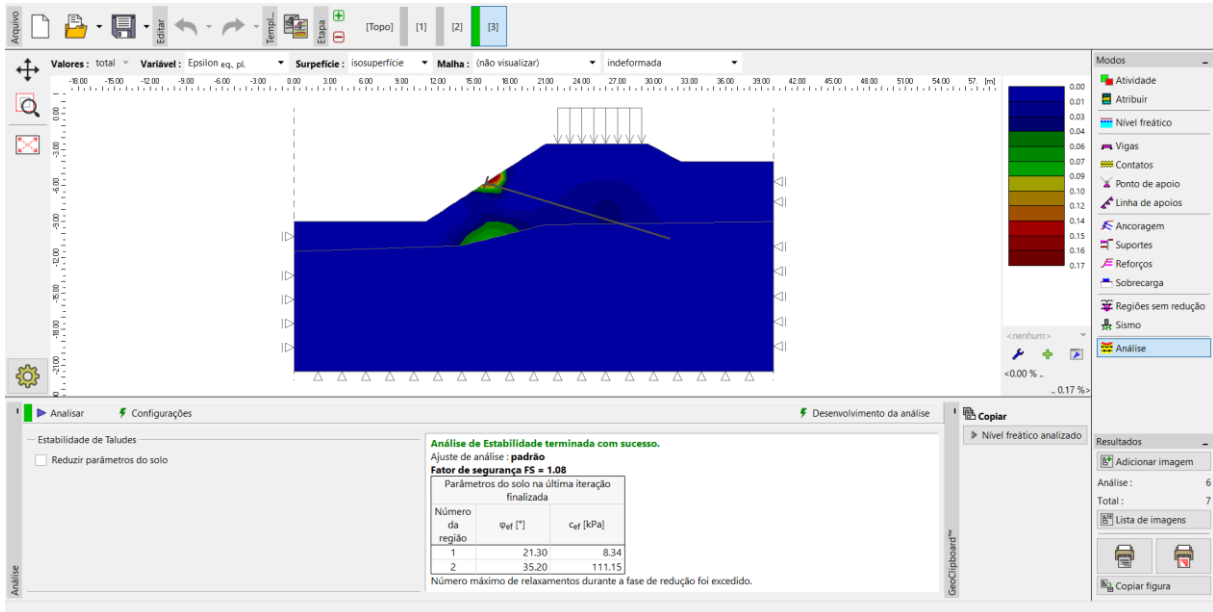


Janela “Análise” – Etapa de construção 3 (deformações plásticas equivalentes $\varepsilon_{eq.,pl.}$)

Este passo conclui a análise inicial. Vamos anotar os resultados para o grau da estabilidade do talude numa tabela sumário; agora, vamos realizar a análise do problema através de outros modelos (Mohr-Coulomb e Mohr-Coulomb Modificado).

Nota: A verificação da forma da superfície transversal é muito importante em alguns casos, dado que uma rotura local da estrutura pode verificar-se mesmo em áreas em que não é expectável (mais detalhes na Ajuda – F1). Na figura seguinte é possível observar o desenvolvimento de zonas plásticas localizadas na vizinhança da cabeça da ancoragem, durante a análise para a malha com 1.0 m de densidade, utilizando o modelo de Drucker-Prager. Caso se verifique, é razoável editar o modelo da estrutura, através das formas seguintes, por exemplo:

- aumentar o comprimento das extremidades dos elementos da malha
- introduzir um solo com parâmetros de resistência c, ϕ mais elevados, na cabeça da ancoragem
- definir elementos viga na cabeça da ancoragem (a distribuição de cargas para o solo será melhorada)
- não utilizar regiões reduzidas (mais informações no Manual de Engenharia No. 35)



Janela “Análise” – Etapa de construção 3 (plasticidade localizada no solo sob a cabeça da ancoragem, modelo de DP com malha com 1.0 m)

Avaliação de resultados

A tabela seguinte apresenta os resultados para o grau de estabilidade do talude (fator de segurança) para as diferentes etapas de construção. Realizámos a análise para vários modelos não lineares, através do programa GEO5 MEF e para várias densidades de malha. Para comparação, também apresentamos resultados obtidos através do programa GEO5 Estabilidade de Taludes (segundo Bishop e Spencer).

Modelo material	Espaçamento da malha [m]	Etapa 1 <i>FS</i>	Etapa 2 <i>FS</i>	Etapa 3 <i>FS</i>	Nota
DP	1.0	1.65	1.42	1.08 *	* Solo plastificado sob a cabeça da ancoragem
DP	1.5	1.69	1.46	1.65	
DP	2.0	1.71	1.48	1.69	
MC	1.0	1.52	1.35	0.90 *	* Solo plastificado sob a cabeça da ancoragem
MC	1.5	1.56	1.37	1.52	
MC	2.0	1.58	1.39	1.58	
MCM	1.0	1.76	1.54	1.20 *	* Solo plastificado sob a cabeça da ancoragem
MCM	1.5	1.81	1.58	1.76	
MCM	2.0	1.83	1.58	1.81	
BISHOP (solução analítica)	---	1.51	1.33	1.47	Ver abaixo
SPENCER (solução analítica)	---	1.51	1.32	1.52	Ver abaixo

Sumário de resultados – grau de estabilidade do talude (fator de segurança)

Nota: Considerámos as configurações da análise como “Padrão – Fatores de segurança”. Realizámos a análise segundo Bishop, primeiro, e segundo Spencer, depois, com a otimização de uma superfície de cisalhamento circular (sem limitações).

Conclusão

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

- A densidade da malha de EF aumentada localmente permite resultados mais precisos; por outro lado, a duração da análise de cada etapa também aumenta.
- É necessário utilizar modelos não lineares para as análises, que permitam o desenvolvimento de deformações plásticas.
- As deformações plásticas equivalentes máximas $\varepsilon_{eq.,pl.}$ representam os locais de potenciais superfícies de rotura.