

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 $q = 35,0 \ kN/m^2$. 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



Parâmetros do solo / Classificação	Solo No. 1	Solo No. 2 – R4
Peso volúmico do solo: $\gamma \left[kN/m^{3} ight]$	18	20
Módulo de elasticidade: $E[MPa]$	21	300
Coeficiente de Poisson: $ u\left[- ight]$	0.3	0.2
Coesão do solo: $c_{\scriptscriptstyle e\!f\!f} \; ig [kPaig]$	9	120
Ângulo de atrito interno: $arphi_{_{e\!f\!f}}\left[^{\circ} ight]$	23	38
Ângulo de dilatação: $\psi\left[^\circ ight]$	0	0
Peso volúmico saturado: $\gamma_{sat} \left[k N/m^3 ight]$	20	22

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

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.

Т	— Parâmetros do projeto ——		- Normas de dimensionamen	to	– — Opções avançadas do programa ————
	Tipo de projeto :	Plano de deformação 🔽	Estruturas de concreto :	EN 1992-1-1 (EC2)	Parâmetros avançados da geração de malhas
	Tipo de análise :	Estabilidade de Taludes			Parâmetros avançados de solos
	Permitir a introdução de a	água como resultado da análise de fluxo de água constante			Modelos de solos avançados
					Resultados detalhados
Ses					
juraçĉ					
Config					
		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1 // 0 / 0	~ "	

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 $\langle 0 m; 40 m \rangle$ 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"

	Interf	Interface 1		ace 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 respetivas. 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, $c \in \varphi$.

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.

Adicionar novos solos							×
— Identificação ———		– – Modelo Drucker - Prag	er		? •	— Desenhar —	
Nome :	Solo No. 1	Modulo descarga/recarga :	E _{ur} =	21.00	[MPa]	Categoria de padr	ão :
		Ângulo de atrito interno :	φ _{ef} =	23.00	[°]	GEO	•
— Modelo material ———	~~~~?	Coesão do solo :	Cef =	9.00	[kPa]	Procurar :	
Modelo material :	Drucker - Prager	Ângulo de dilatação :	ψ =	0.00	[°]	Subcategoria :	
— Dados base ———	?					Solos (1 - 16)	-
Peso volúmico :	γ = 18.00 [kN/m ³]					Padrão :	
Módulo de Young :	E = 21.00 [MPa]						
Coeficiente de Poisson :	v = 0.30 [-]						//////
- Computação de empuxo	os ——— ?						
Cálculo da pressão hidrostática :	padrão 💌					2 Silte arenoso	
Peso volúmico saturado :	γsat = 20.00 [kN/m ³]					Cor :	
							
						Fundo :	
						automático	
						Saturação <10 - 90> :	50 [%]
Classificar Limpar							



Editar parâmetros do solo				×
— Identificação ————		- Modelo Drucker - Prager		— ? - Desenhar — — — — — — — — — — — — — — — — — — —
Nome :	R4	Modulo descarga/recarga : E _{ur} =	300,00 [MPa]	Categoria de padrão :
— Modelo constitutivo ——		Ângulo de atrito interno : $\phi_{ef} = \frac{1}{2}$	38,00 [°]	Procurar :
Modelo constitutivo : — Dados base	Drucker - Prager	Ângulo de dilatação : ψ =	0,00 [°]	Subcategoria : Rochas (21 - 36)
Peso específio : Módulo de Young : Coeficiente de Poisson : — Computação de empuxos Cálculo da pressão hidrostática : Peso volúmico saturado :	γ = 20,00 [kH/m ³] E = 300,00 [MPa] ν = 0,20 [-] padrão ▼ γ _{sat} = 22,00 [kH/m ³]			Padrão :
Classificar Limpar	1		OK + - 4	Fundo : automático Intensidade da cor <10 - 90> : 50 [%]

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".

Configurações da análise		>				
Estabilidade de Taludes						
Geral		- Newton - Raphson				
Método : Newton - Rap	hson 👻 🗹 Linha de busca	Fator de relaxamento : 2				
Alterar matriz de rigidez :	após cada iteração 🔹	Número máximo de relaxamentos : 2				
Número máximo de iterações :	100	Fator de relaxamento : 2				
Passo inicial de cálculo :	0,25 [-]	Número máximo de relaxamentos : 3				
Redução dos parâmetros do solo	•: redizir c, phi 🔹	Fase de redução mínima : 0,99 [-]				
Passo inicial de redução :	0,90 [-]					
Erro de desolcamento :	0,0100 [-]					
Erro de forças não equilibradas :	0,0100 [-]					
Erro de energia :	0,0100 [-]					
 Respeitar interface dos mate 	riais					
- Plasticidade		-				
Retornar erro de mapeamento :	0,00100 [-]	— Linha de busca —				
Número máximo de iterações :	20	Método de solução : não iterar 🔹				
		Limite de linha- mínimo : 0,100 [-]				
		Limite de linha- máximo : 1,000 [-]				
Restaurar valores originais		V OK X Cancelar				

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 $\mathcal{E}_{eq.,pl.}$. 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 $arepsilon_{eq.,pl.}$)

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).

GEO5

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 $\mathcal{E}_{eq.,pl.}$)

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 $F = 50 \ kN$, na caixa de diálogo "Novas ancoragens". Vamos considerar os seguintes parâmetros para a ancoragem:

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

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)

Valence: Total Valence: Epsilon eq. pl. Surpeticie: isoupericie: Natha: (nde value)/200 300 420 510 610	Addos ♣ Atividade ≜ Atribuir ➡ Nivel freătico ➡ Vigas ➡ Contatos ➡ Contatos ➡ Conto de apoio ▲ Linha de apoios ▲ Ancoragem ➡ Suportes ♣ Recijões sem redução ♣ Sismo ➡ Análise
Analisar € Configurações € Desenvolvimento da análisar € Desenvolvimento da análisar € Desenvolvimento da análisar € Desenvolvimento da análisar ● Notel fredicio analizado ■ Notel fredici	tesultados _ Malicionar imagem Análise : 6 Total : 7 ∭ Lista de imagens Lista de imagens Man Copiar figura

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 [<i>m</i>]	Etapa 1 FS	Etapa 2 FS	Etapa 3 FS	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	
МС	1.0	1.52	1.35	0.90 *	* Solo plastificado sob a cabeça da ancoragem
МС	1.5	1.56	1.37	1.52	
МС	2.0	1.58	1.39	1.58	
МСМ	1.0	1.76	1.54	1.20 *	* Solo plastificado sob a cabeça da ancoragem
МСМ	1.5	1.81	1.58	1.76	
МСМ	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.
- As deformações plásticas equivalentes máximas $\mathcal{E}_{eq.,pl.}$ representam os locais de potenciais superfícies de rotura.