

Talude rochoso – estabilidade de uma cunha de rocha

Programa: Estabilidade de Rochas

Arquivo: Demo_manual_28.gsk

O objetivo deste Manual de Engenharia é explicar como analisar a estabilidade de um talude rochoso (rocha média a dura) de uma escavação situada numa zona afetada tectonicamente.

Os contornos da escavação em análise são formados por um sistema de falhas e juntas tectónicas, que criam cunhas de rocha 3D não estáveis.

Definição do problema

O historial do afloramento rochoso regista trabalhos de escavação relacionados com a construção de um túnel ferroviário de duas faixas, através de explosivos, numa zona de rocha ígnea do Paleozoico. Existem juntas estruturais ocupadas por micro-granitos, aplitos e granitos anfibolitos-biotíticos (tipos de rocha mais comuns).

O afloramento analisado é típico com orientação dos planos transversais não viável, afetando a estabilidade da face do talude rochoso e dando origem a deslizamentos em cunha (Img. 1).



Imagem 1: Talude Oeste da escavação, L. Marik photography

A investigação geológica concluiu que a estabilidade da escavação é afetada por três a quatro sistemas de falhas e juntas. O maciço rochoso está fragmentado em pedras, pedregulhos e blocos de grande escala, que atinge vários metros.

As falhas da rocha com a direção de mergulho (*dip-direction*) formam um ângulo agudo, inferior a 45 graus, com o talude da escavação, que tem uma inclinação de 65 a 80 graus para Este (Img. 2).

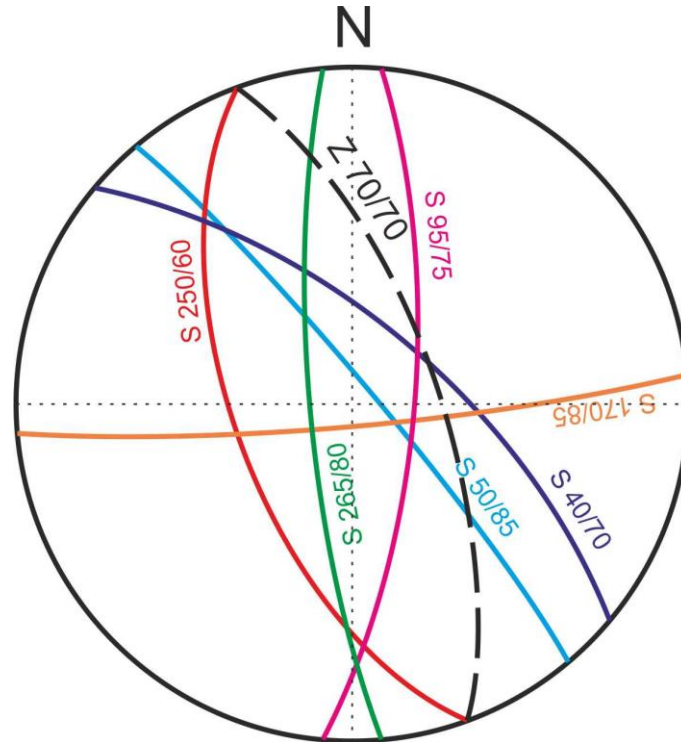


Imagem 2: Diagrama de projeção ortogonal de Lambert com as descontinuidades mais comuns, a orientação da face do talude rochoso é Z 70/70 (direção de mergulho/mergulho – dip-direction/dip)

Estas orientações não compatíveis das discontinuidades afetam os trabalhos de escavação, devido à instabilidade das cunhas de rocha formadas ao longo do talude (Img. 3). As orientações não compatíveis não eram expectáveis antes do início dos trabalhos de escavação.

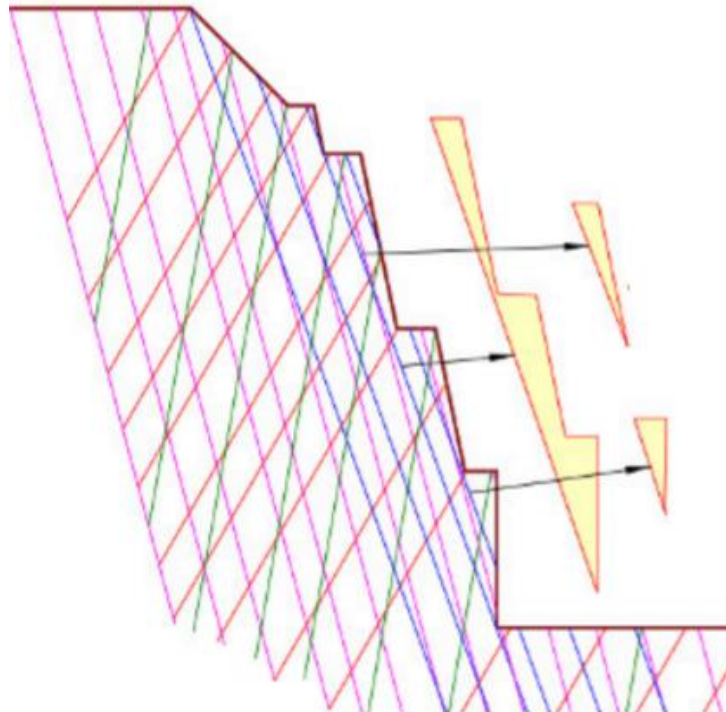


Imagem 3: Planos transversais principais e juntas com a secção transversal da escavação

Esta situação não compatível das forças atuantes no talude da escavação implica o dimensionamento de estruturas de estabilização – dimensionamento de cunhas ativas de rocha para estabilização. A estabilização de cunhas de rocha é descrita neste Manual.

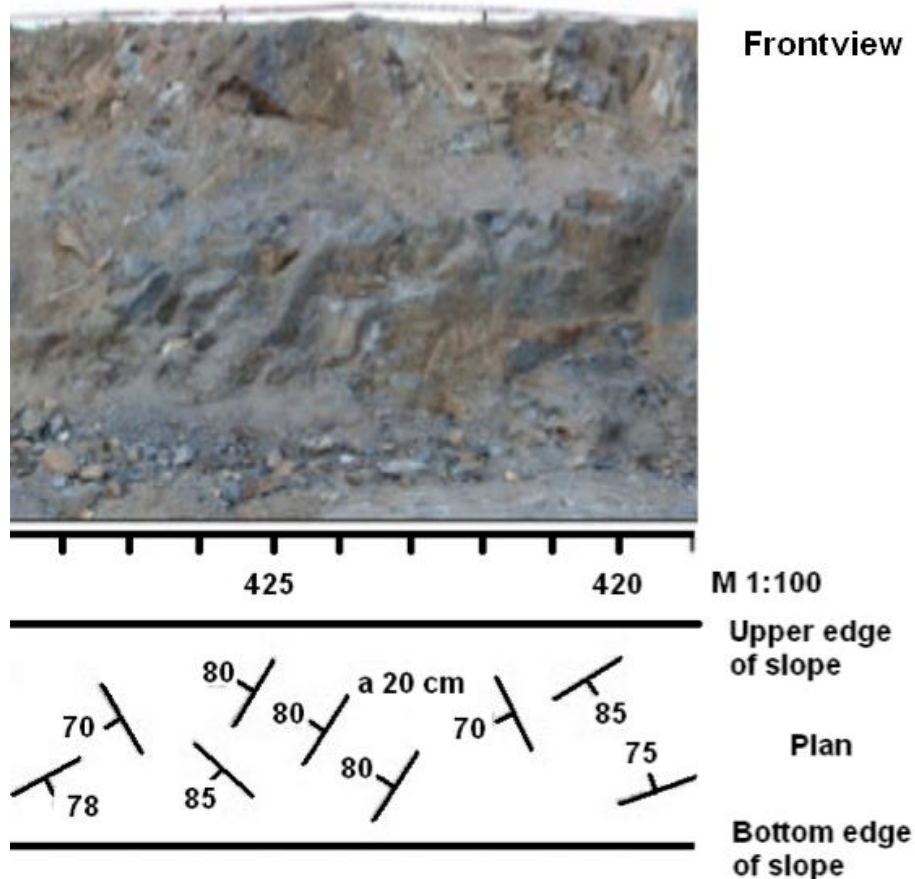
Nota: Cada maciço de rocha natural contém pelo menos dois sistemas principais de descontinuidades que afetam a estabilidade do talude rochoso. No entanto, quando o maciço rochoso é fraturado por um sistema de continuidades reduzido, o sistema é a peça chave para a análise da estabilidade global de um mecanismo de rotura e de uma situação de instabilidade.

Configurações

O processo de dimensionamento da estabilização de uma cunha de rocha 3D instável é descrito neste exemplo, para a secção transversal de uma escavação de um túnel. A estabilização é dimensionada para um período de vida útil de 100 anos e o fator de segurança imposto é de 1.5.

Com base na investigação geotécnica realizada, as amostras obtidas de granito e aplite são classificadas como rocha dura do tipo R2 e R3 (ČSN 73 6133) e possuem as seguintes propriedades mecânicas: $\sigma_c = 15 - 60$ MPa, peso volúmico $\gamma = 27$ kN/m³, ângulo de atrito efetivo $\phi' = 32 - 42$ °, coesão efetiva $c' = 100 - 150$ kPa, coeficiente de Poisson $\nu = 0.20$, módulo de deformação $100 - 200$ MPa. Assim, os parâmetros mecânicos mostram elevadas características de deformação do maciço rochoso, medidos a partir de amostras de rochas de pequenas dimensões, em que a resistência global do maciço é inferior devido à elevada fracturação por falhas transversais (efeito da dimensão). A resistência ao cisalhamento dos planos pode convergir para zero.

As condições hidrogeológicas são simples e não existem infiltrações nas juntas da face do talude rochoso. Existem pequenas fontes de água aleatórias, que estão relacionadas com fenômenos de pluviosidade mais elevados ou com o derretimento de neve. O nível freático não está presente ao longo da face do talude. As orientações das juntas rochosas foram medidas por um geólogo. A orientação do talude de escavação da rocha é Z 180/15 (direção de mergulho/mergulho – *dip-direction/dip*) e as orientações das roturas típicas em análise são 20/80 e 225/70. A resistência de cisalhamento medida nos planos transversais é $\phi' = 15$ ° e a coesão é $c' = 5$ kPa.



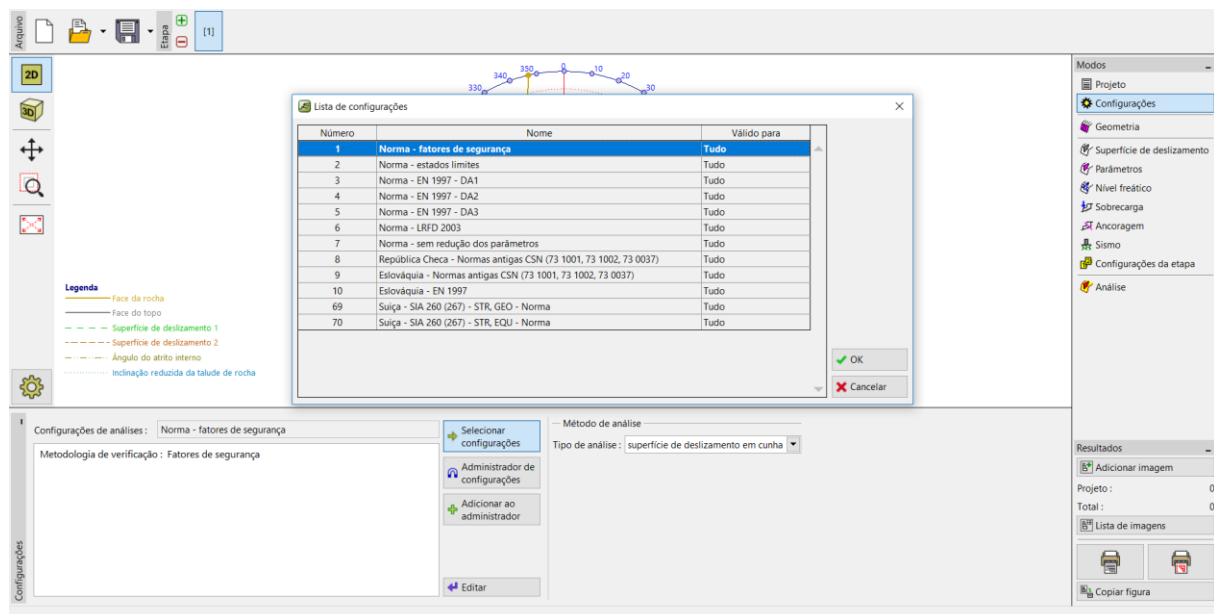
Resolução

É realizada a análise da estabilidade do talude para o deslizamento em cunhas de rocha e a sua estabilização, de acordo com os fatores de segurança (a principal razão é a comparação com o cálculo manual). Cada fase da análise de dimensionamento é descrita no texto seguinte.

Configurações do problema

Configurações para a computação necessária de acordo com o fator de segurança e a rotura de um talude rochoso

Na janela “Configurações”, clique no botão “Selecionar configurações”, escolha a opção “Norma – fatores de segurança” e confirme através do botão “OK”.



Caixa de diálogo “Lista de configurações”

Nesta janela, seleciona, também, a opção “superfície de deslizamento em cunha”.

Nota: O programa Estabilidade de Rochas pode analisar um talude rochoso fissurado por roturas transversais (deslizamento de rochas), através de cunhas de rocha planas e/ou planos transversais poligonais.

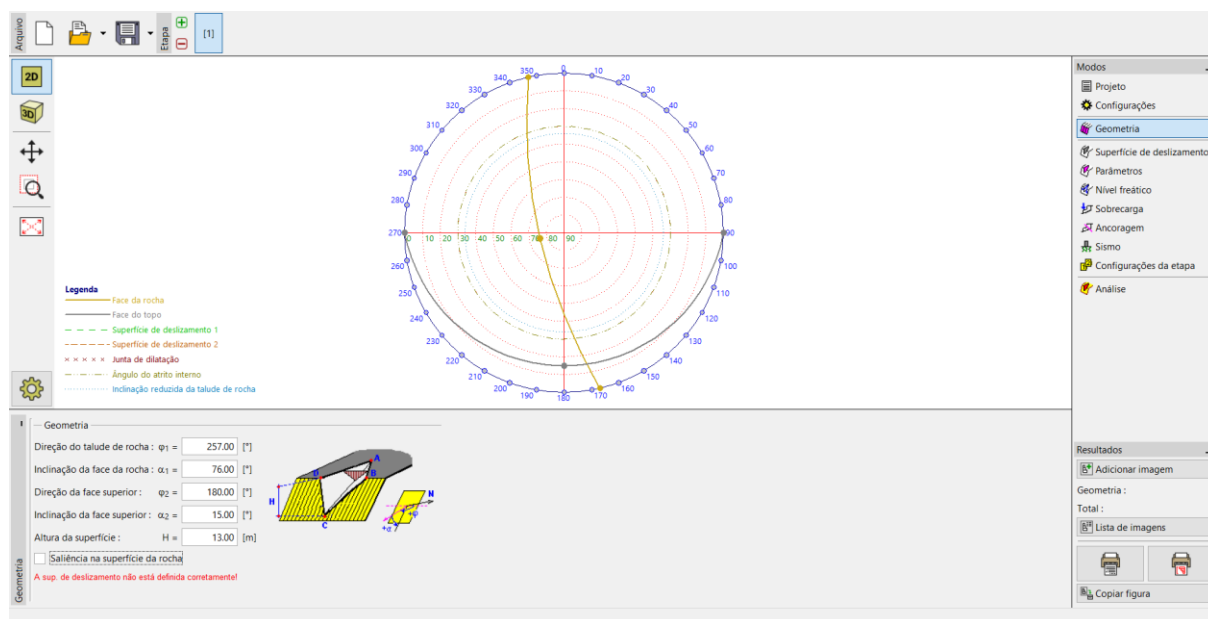
Geometria base da superfície e da face do maciço rochoso

A geometria 3D do terreno e da face do talude rochoso em análise é avaliada na janela “Terreno”. A definição da orientação do talude ou da superfície do terreno é realizada através da direção de mergulho/mergulho (*dip-direction/dip*), conforme os dados obtidos a partir da investigação geotécnica – os dados introduzidos são visíveis numa tabela. A face do talude rochoso tem 13 m de altura. Os planos introduzidos são visíveis na projeção ortogonal de Lambert e um arco que representa a projeção (corte transversal) do plano transversal com a hemisfério inferior de Lambert.

Nota: Numa situação em que a investigação geotécnica não foi realizada, a orientação da face do talude rochoso 3D pode ser dada por uma investigação geodésica a partir de três pontos para cada plano (ex.: 2x na base do talude e 1x no topo do talude). Outra possibilidade é a medição do talude ou através da fotogrametria. Em condições difíceis, existe a opção de avaliar a altura do talude através de um rácio entre um homem e a face do talude.

Configuração da orientação (terreno e face do talude rochoso)

	Direção de mergulho (<i>Dip-direction</i>)	Mergulho (<i>Dip</i>)
	[°]	[°]
Face do talude rochoso	257	76
Terreno (superfície)	180	15



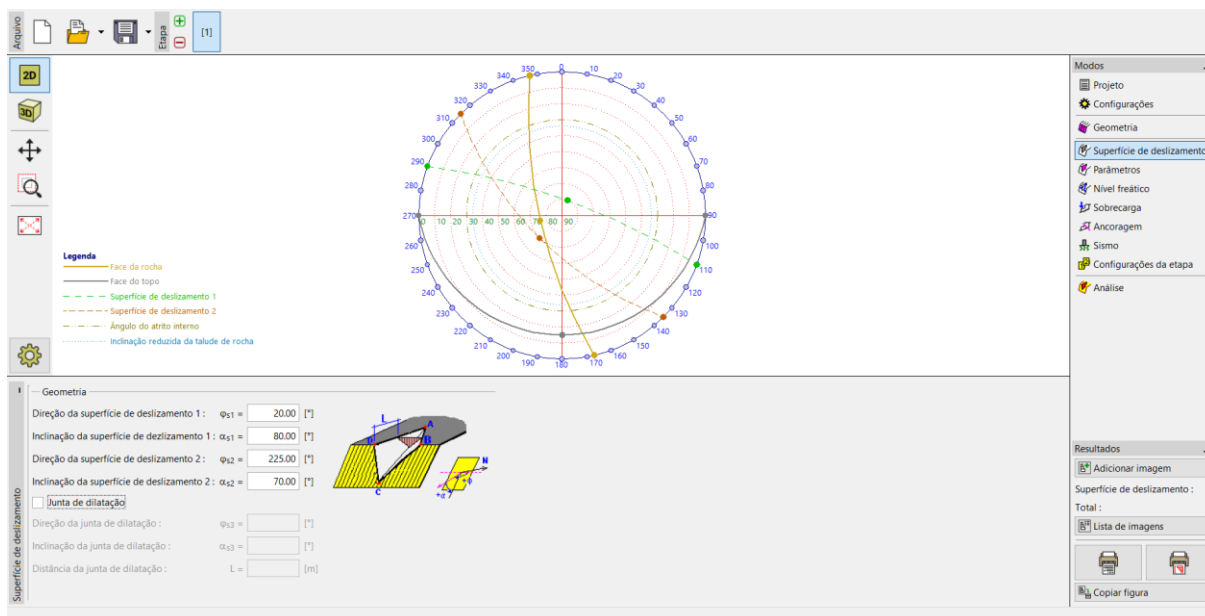
Janela “Geometria”

Introdução da orientação da rotura transversal

A orientação da rotura 3D (geometria) deve ser definida na janela “Superfície de deslizamento”. A introdução da orientação das roturas transversais é realizada através da direção de mergulho/mergulho (*dip-direction/dip*) e é analisada através de uma investigação geotécnica – os dados introduzidos são visíveis numa tabela. A introdução de dados é realizada numa janela que mostra a orientação gráfica através da projeção ortogonal de Lambert. Um arco mostra o corte transversal de um plano no hemisfério inferior de Lambert.

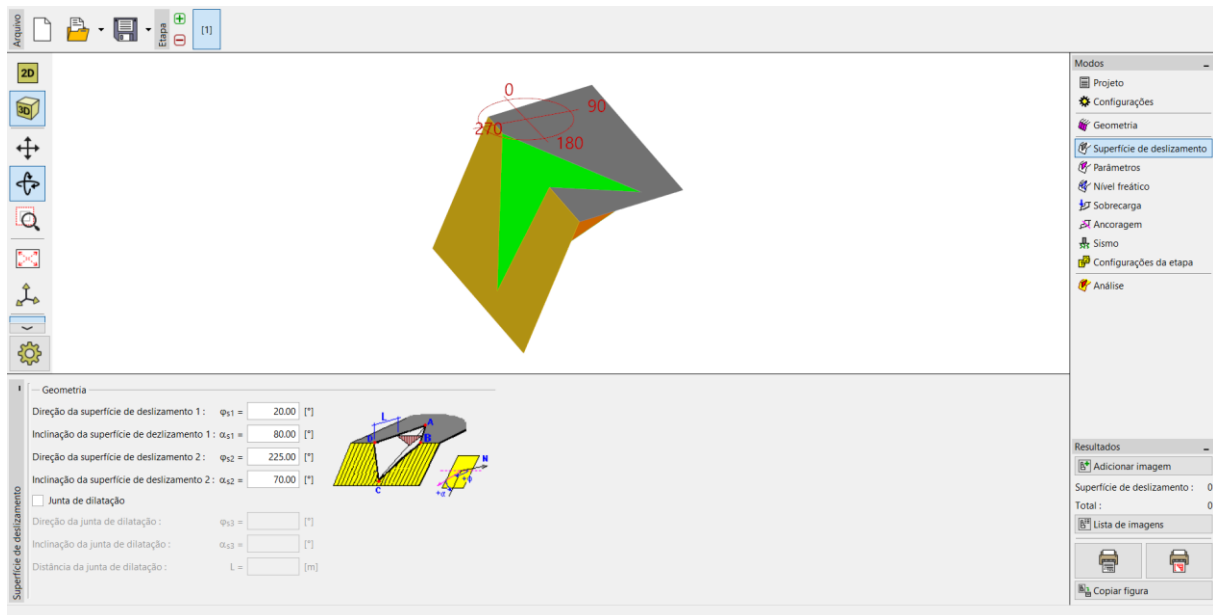
Dados da geometria da face do talude rochoso e do terreno

	Direção de mergulho (<i>Dip-direction</i>)	Mergulho (<i>Dip</i>)
	[°]	[°]
Superfície de deslizamento 1	20	80
Superfície de deslizamento 2	225	70



Janela “Superfície de deslizamento”

Também é possível a cunha de terra definida através de uma “visualização 3D”.

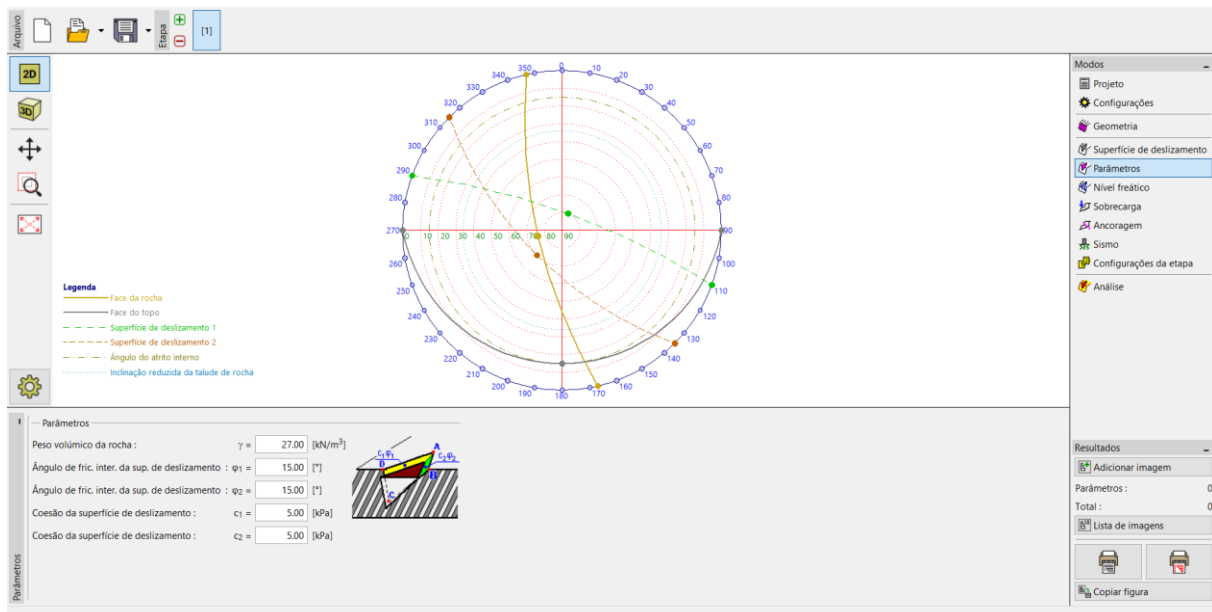


Modo 3D – visualização 3D da cunha de rocha

Nota: As orientações dos planos transversais 3D estão relacionadas com as coordenadas geográficas. Estas coordenadas estão de acordo com a orientação Norte, numa direção horizontal para o centro de gravidade na direção vertical. A orientação é medida com um compasso geológico. As roturas principais podem ser definidas através de medições geofísicas.

Introdução das propriedades da rocha e dos planos transversais

As propriedades mecânicas do maciço rochoso são definidas na janela “Parâmetros”. Nesta janela, são introduzidos o peso volúmico do material do maciço rochoso e a forma do plano transversal da rocha, de acordo com o modelo de Mohr-Coulomb. O peso volúmico do granito é $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ e as propriedades de cisalhamento obtidas a partir de ensaios em ambos os planos transversais mencionados anteriormente são $\varphi' = 15^\circ$ e $c' = 5 \text{ kPa}$.



Janela “Parâmetros”

Nota: O ensaio mais simples para obter a resistência ao cisalhamento num plano transversal é o movimento entre dois blocos de rocha, retirados do maciço rochoso (separados por um plano transversal). Esta medição apenas é possível em planos sem picos ou furos (unidades de dilatação). Se o plano transversal não for plano, as propriedades devem ser obtidas a partir da computação na janela apropriada, ou através de um ensaio in situ complexo.

Nível freático

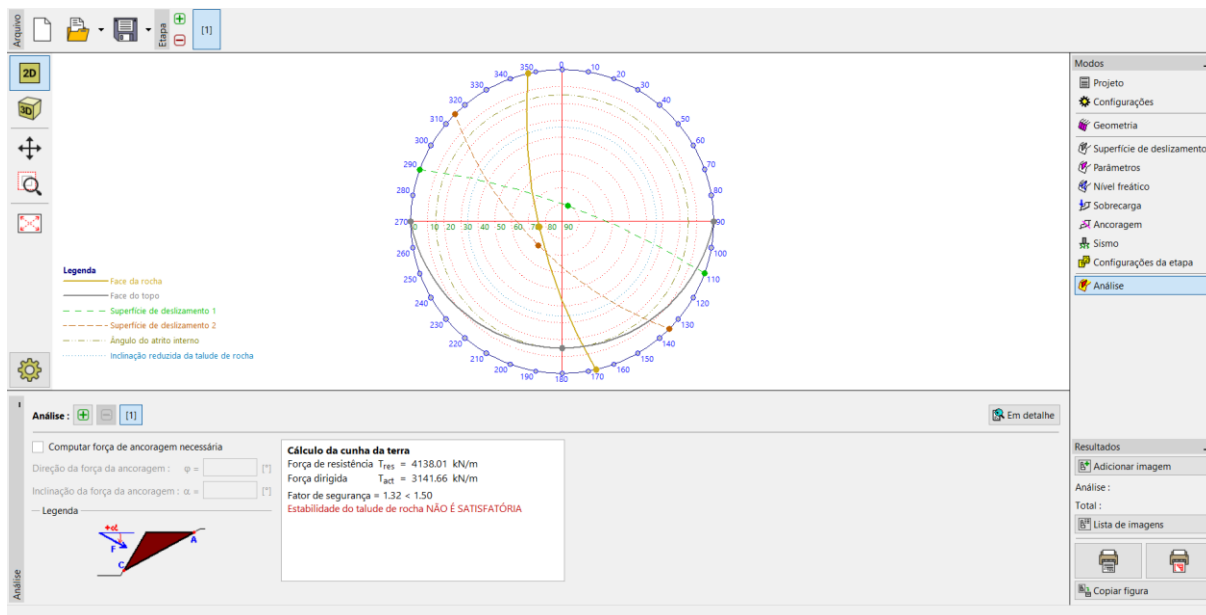
O nível freático é definido na janela “Nível freático”. Com base na investigação hidrogeológica realizada, não se consideram os efeitos do nível freático.

Configurações da etapa de dimensionamento

Na janela “Configurações da etapa”, define-se a situação de projeto pretendida. Neste caso, para um período de vida útil de 100 anos, seleciona-se uma situação permanente para a análise de estabilidade da face rochosa na secção do portal do túnel.

Computação

O processo de computação é executado na janela “Análise”. Os resultados base, e outros resultados pretendidos, são visíveis nesta janela. Através do botão “Em detalhe”, podem ser consultados os resultados com detalhe da análise, também presentes no relatório de resultados. Para este exemplo, foi obtido um fator de segurança de 1.32. A estabilidade da cunha de rocha não está de acordo com a segurança imposta ($F \geq 1.5$). Numa escala temporal alargada, existe a possibilidade de ocorrerem instabilidades locais à superfície que podem afetar o maciço rochoso. Assim, devem ser dimensionadas soluções técnicas para aumentar a estabilidade da cunha.



Análise – Etapa 1

Dimensionamento da solução para aumentar estabilidade

O aumento da estabilidade da cunha de rocha pode ser conseguido através da alteração da forma do talude, para uma inclinação de mergulho menor, ou através da escavação de pequenos patamares, para diminuir o mergulho global. Estas soluções implicam grandes movimentações de terras e uma maior área, o que as torna dispendiosas. Uma segunda opção é manter a forma do talude rochoso e fixar a estabilidade do deslizamento em cunha através de roquetes (ancoragens) ou de grampos. Esta segunda opção é descrita de seguida.

O dimensionamento de ancoragens é realizado numa segunda etapa de construção, que é introduzida através do botão “+”, da barra de ferramentas “Etapa”.



Adição da etapa seguinte

Na janela “Análise”, selecione a opção “Computar força de ancoragem necessária” e defina a direção e a inclinação da força de ancoragem: a orientação para a inclinação é $\varphi = 270^\circ$ e o ângulo da força de ancoragem é $\alpha = 10^\circ$. Após definir os dados necessários, realiza-se uma computação automática e o programa obtém um resultado. Para a ancoragem computada, de 428 kN, obtemos um valor de 1.5 para o fator de segurança.

Legenda

- Face da rocha
- Face do topo
- - - Superfície de deslizamento 1
- - - Superfície de deslizamento 2
- Ângulo do atrito interno
- Inclinação reduzida da talude de rocha

Análise [1]

Computar força de ancoragem necessária

Direção da força de ancoragem : $\varphi = 270.00$ [°]

Inclinação da força de ancoragem : $\alpha = 10.00$ [°]

Cálculo da cunha da terra

Análise da força de ancoragem requerida:

- Gradiente de força de ancoragem $\alpha = 10.00^\circ$
- Direção da força de ancoragem $\varphi = 270.00^\circ$
- Força de ancoragem requerida $F = 428.41$ kN
- Força de resistência $T_{res} = 4352.43$ kN/m
- Força dirigida $T_{dir} = 2897.31$ kN/m
- Fator de segurança = 1.50 > 1.50
- Estabilidade do talude de rocha É SATISFATÓRIA

Resultados

Adicionar imagem

Análise : 0

Total : 0

Lista de imagens

Copiar figura

Janela “Análise” – Resultados detalhados da computação

A geometria do talude permite uma direção e inclinação constante a todas as ancoragens de rocha. Assim, o passo seguinte é a avaliação de uma tecnologia de roquetes adequada, com a definição da capacidade de suporte e do número de ancoragens a colocar (densidade da colocação). Neste caso, vamos utilizar roquetes não tensionados standard (os roquetes selecionados são rebocados durante os trabalhos de perfuração). Os roquetes produzem uma força de 50 kN imediatamente após serem instalados e apresentam uma capacidade de suporte mínima de 150 kN 24 horas após a sua instalação. A computação mostra que para conseguir a estabilização da cunha de rocha são necessários 5 roquetes; a dimensão dos roquetes é 2.5 x 2.5 m. Considerando a rotura por desagregação do maciço rochoso, é aconselhável a aplicação de uma rede de aço.

Nota: Numa situação em que o maciço rochoso apresenta uma base, ou planos paralelos, afetados tectonicamente, deve ser colocada uma ancoragem com direção próxima da perpendicular aos planos (o ângulo mínimo entre o plano do talude rochoso e os roquetes deve ser de 45°).

Conclusão

Os resultados iniciais da análise da cunha de terra mostram um fator de segurança $F=1.32$, que não é satisfatório. Este resultado conduziu à escolha de uma solução técnica para aumentar a estabilidade do talude. Decidiu-se optar pela ancoragem da cunha, por se tratar de uma opção economicamente mais viável. Durante a segunda etapa de construção, realizou-se o dimensionamento da força de ancoragem e da inclinação da ancoragem. O tipo de roquete adequado e a sua densidade foram computados de acordo com a necessidade de implementar roquetes com inclinação constante no maciço rochoso.