

Análise probabilística da estabilidade de uma cunha rochosa considerando a variabilidade espacial

Renato Pereira¹

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal

Luís Lamas

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal

José Muralha

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal

Tema: A mecânica das rochas e a segurança das obras

RESUMO

O artigo considera um caso de estudo intencionalmente simples – a análise de um talude rochoso com uma única descontinuidade, considerada de forma discreta, formando uma cunha de rocha a ser estabilizada por ancoragens – e compara os resultados obtidos com métodos determinísticos (tradicionais), semi-probabilísticos (dos Eurocódigos) e probabilísticos. O objetivo é calcular a força aplicada pelas ancoragens para verificar o estado limite último de deslizamento da cunha de rocha. São consideradas como variáveis aleatórias as propriedades geométricas e mecânicas da descontinuidade e é dado especial destaque à consideração da variabilidade espacial das propriedades mecânicas ao longo da descontinuidade.

Palavras chave: Descontinuidade rochosa, propriedades mecânicas, propriedades geométricas, variabilidade espacial, Eurocódigo.

1 INTRODUÇÃO

As análises de estabilidade de estruturas geotécnicas em maciços rochosos utilizam, tradicionalmente, métodos determinísticos e coeficientes de segurança globais, cujos valores são baseados na experiência e diferem caso a caso, dependendo da incerteza dos dados e do risco de falha aceitável.

Os Eurocódigos estruturais (EN 199x, 200x) trouxeram os conceitos de fiabilidade estrutural para o projeto de estruturas, incluindo as geotécnicas. Os Eurocódigos estão a atravessar um processo de revisão (prEN 199x, 2021) e um aspecto de importância é a consideração de solo e rocha em bases iguais, pelo que também se aplicam ao projeto de estruturas geotécnicas em maciços rochosos.

O Eurocódigo 7, adota a verificação da segurança em relação aos estados limites usando uma

abordagem semi-probabilística, onde as incertezas são consideradas implicitamente pela especificação de valores representativos de variáveis aleatórias (ações, efeito das ações, resistências e propriedades do terreno) e coeficientes parciais aplicados a essas variáveis. A inclusão de maciços rochosos na atual revisão dos Eurocódigos levanta o problema da calibração dos valores dos coeficientes parciais que afetam as propriedades do terreno, uma vez que os valores usados para os solos podem não ser adequados para os maciços rochosos e as descontinuidades. A sua validade deve ser investigada, para que as estruturas geotécnicas projetadas exibam os níveis de fiabilidade prescritos nos Eurocódigos e não difiram dos níveis de fiabilidade alcançados com os métodos tradicionais. É ainda importante

¹ rpereira@lnec.pt.

notar que não se aplicam coeficientes parciais às propriedades geométricas, tais como a orientação das descontinuidades, pelo que são consideradas de uma forma puramente determinística.

A verificação da segurança por métodos probabilísticos constitui uma abordagem alternativa à semi-probabilística, sendo especialmente adequada quando esta última é incapaz de produzir estruturas com o nível de fiabilidade prescrito devido às incertezas envolvidas. Essas situações são causadas, sobretudo, pela complexidade do processo de calibração dos coeficientes parciais para uma ampla gama de estruturas e variáveis cobertas pelo Eurocódigo. Acresce que os métodos probabilísticos podem facilmente considerar a incerteza de outras variáveis relevantes em maciços rochosos, como é o caso das propriedades geométricas.

É importante ter ainda em conta que as incertezas a considerar no estabelecimento dos valores das propriedades resistentes de uma descontinuidade, deverão associar a incerteza inerente à sua variabilidade espacial. Esta questão é considerada no Eurocódigo 7, de uma forma simplificada, na determinação dos valores característicos.

Este trabalho utiliza um caso de estudo intencionalmente simples, onde são seguidas abordagens determinísticas, semi-probabilísticas e probabilísticas, considerando as incertezas nas propriedades geométricas e mecânicas, e é dado especial destaque à variabilidade espacial destas últimas.

2 CASO DE ESTUDO

A estrutura geotécnica selecionada está representada na Figura 1. Trata-se de um caso de estudo já analisado de forma mais simplificada (Pereira et al., 2021), correspondente a um talude com 25 m de altura, escavado num maciço rochoso de boa qualidade. O talude tem uma inclinação de 85° e no seu topo, a 8 m da crista, aflora uma descontinuidade rochosa persistente, com um traço paralelo à crista, mergulhando no sentido do talude com uma inclinação ψ . Na superfície horizontal superior do terreno está aplicada uma carga permanente, distribuída, vertical, com um valor representativo $G_{rep} = 200 \text{ kN/m}^2$. Durante a escavação do talude, para evitar o deslizamento da cunha rochosa formada pela descontinuidade, considera-

se a instalação de uma ancoragem 6 m abaixo da superfície do terreno inicial, mergulhando 10° .

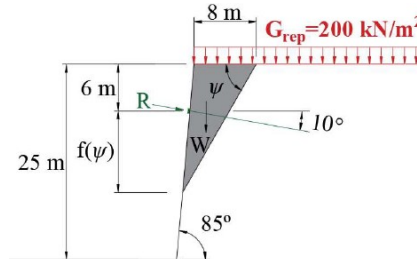


Figura 1. Representação esquemática da geometria e do carregamento do talude rochoso

O objetivo deste estudo é calcular a força na ancoragem (R) de modo a evitar o deslizamento da cunha rochosa. Em primeiro lugar é considerada uma abordagem determinística, utilizando coeficientes de segurança global (CS). Em seguida é considerada a abordagem semi-probabilística, utilizando coeficientes parciais, seguindo os Eurocódigos. Finalmente, segue-se uma abordagem probabilística, considerando as propriedades geométricas e mecânicas da descontinuidade como variáveis aleatórias descritas por funções de probabilidade apropriadas, em que se pretende alcançar os níveis de fiabilidade prescritos nos Eurocódigos.

Para a resistência ao deslizamento da descontinuidade considerou-se a informação proveniente de um programa de ensaios real (LNEC, 2010), em que, a partir de 18 ensaios, se determinaram os seguintes valores dos parâmetros do critério não linear de resistência ao deslizamento de Barton: 8,6 para o coeficiente de rugosidade da descontinuidade (JRC), 79 MPa para a resistência à compressão da sua superfície (JCS) e $25,8^\circ$ para o ângulo de atrito residual (ϕ_r). Posteriormente, a envolvente de Barton foi linearizada na gama de tensões normais estimadas para a geometria do problema em análise (entre 0,15 e 0,25 MPa), obtendo-se os seguintes valores dos parâmetros de resistência ao corte de Mohr-Coulomb equivalentes: 28,8 kPa para a coesão aparente (c) e $44,1^\circ$ para o ângulo de atrito (ϕ). Para a sua caracterização probabilística assumiram-se distribuições lognormais com os valores médios indicados, e considerou-se que os coeficientes de variação respetivos devem ser definidos pela soma das parcelas relativas à incerteza inerente, tendo sido para esta adotados $V_c = 40\%$ e

$V_{\tan\phi} = 10\%$ (Tabela A.2, prEN 1997, 2021), e estatística, tomada como uma fração da incerteza inerente em função do número de ensaios n (V_i/\sqrt{n}).

Para as propriedades geométricas, foram considerados valores da inclinação da descontinuidade (ψ) entre 40° e 70° . Para cada análise, tem-se em conta a possível dispersão da inclinação num intervalo de $\psi \pm \Delta$, com $\Delta = 5,0^\circ$. Para a caracterização probabilística da inclinação, foi usada uma distribuição de Fisher (1953) centrada em ψ . A constante de Fisher (k), parâmetro de concentração que define a distribuição, foi escolhida de modo que se observe uma probabilidade de 95% de os valores da inclinação pertencerem ao intervalo $\psi \pm \Delta$.

O peso volúmico da rocha foi também considerado como variável aleatória. Adotou-se, para a sua caracterização probabilística, uma distribuição normal com média de 25 kN/m^3 e coeficiente de variação de 5%, correspondendo ao limite inferior dos valores indicados no Eurocódigo 7.

3 ABORDAGENS DETERMINÍSTICA, SEMI-PROBABILÍSTICA E PROBABILÍSTICA

Os estudos probabilísticos para análise de estabilidade de cunhas rochosas têm sido realizados desde há muito tempo, pois os parâmetros necessários são em número reduzido e fáceis de modelar, e a avaliação da segurança pode, frequentemente, ser realizada mediante análises de equilíbrio limite para determinar a probabilidade de rotura ou o índice de fiabilidade.

Numa abordagem determinística, o nível de segurança é medido pelo CS, geralmente dado pelo quociente entre os efeitos estabilizadores e desestabilizadores das ações. Considerando que são adotados valores médios das ações e das resistências, a incerteza envolvida no problema é acautelada impondo valores de CS maiores do que 1. Embora não existam critérios de segurança universalmente estabelecidos, o CS para taludes rochosos é muitas vezes definido empiricamente, sendo o intervalo de 1,3 a 1,5 frequentemente adotado para situações de estabilidade a curto prazo e a longo prazo, respetivamente (Wyllie e Mah, 2004).

A abordagem semi-probabilística seguida nos Eurocódigos realiza a verificação da segurança re-

lativamente a estados limites utilizando coeficientes parciais. Os estados limites são definidos como estados para além dos quais uma estrutura deixa de satisfazer os critérios de projeto relevantes. A natureza probabilística é tida em conta definindo os requisitos de desempenho como valores alvo para a probabilidade de falha ou o índice de fiabilidade. Os Eurocódigos usam valores representativos e coeficientes parciais para lidar com várias fontes de incerteza, de tal forma que os requisitos de desempenho podem ser verificados de forma determinística. Assim, os critérios de segurança são traduzidos na verificação de que os efeitos das ações E_d num estado limite específico são menores do que a resistência correspondente R_d , ou seja:

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

Para a verificação dos estados limites últimos em problemas de estabilidade de taludes, o Eurocódigo 7 adota uma abordagem de minoração das propriedades dos materiais, onde E_d e R_d são calculados respetivamente como:

$$E_d = E\{\sum F_{rep} \cdot \gamma_F; a_d; X_{rep}\} \quad (2)$$

$$R_d = \{X_{rep}/\gamma_M; a_d; \sum F_{Ed}\} \quad (3)$$

onde γ_F são os coeficientes parciais aplicados às ações (caso DC3, Tabela A.1.8, prEN 1990, 2021), que são diferentes para ações permanentes ($\gamma_F = 1,0$) e desfavoráveis ou desestabilizadoras ($\gamma_F = 1,3$), e γ_M são os coeficientes parciais aplicados às propriedades do terreno (conjunto M2, Tabela 4.7, prEN 1997, 2021). Em maciços rochosos, para permitir considerar envolventes de rotura não lineares, apenas a resistência ao corte (ou ao deslizamento) é reduzida ($\gamma_M = 1,25 K_m$).

Os Eurocódigos também diferenciam as estruturas geotécnicas de acordo com as consequências da sua falha, distinguindo entre as classes de consequência inferior (CC1), média (CC2) e superior (CC3), que são usadas para estabelecer o fator de consequência K_m aplicado às propriedades do terreno ($K_m = 0,9$ para CC1, $K_m = 1,0$ para CC2 e $K_m = 1,1$ para CC3). Usando esta metodologia, as estruturas resultantes apresentam, supostamente, níveis de fiabilidade correspondentes a $p_f = 10^{-3}$ para CC1, $p_f = 10^{-4}$ para CC2 e $p_f = 10^{-5}$ para CC3.

Na abordagem probabilística, consideram-se funções de desempenho $G(x)$, que descrevem as relações funcionais entre variáveis aleatórias x , para

definir estados limites ($G(x) = 0$). Os níveis de segurança são medidos pela probabilidade de falha obtida pela integração da função de densidade de probabilidade conjunta f_x no domínio de falha:

$$p_f = P(G(x) < 0) = \int_{G(x) < 0} f_x(x) dx \quad (4)$$

Dimensionar uma estrutura para atender aos requisitos de desempenho é um processo de otimização que depende da seleção de variáveis de dimensionamento θ (tipo de material, geometria, elementos de reforço, etc.), considerando as suas possíveis restrições, a fim de minimizar uma função objetivo $f(\theta)$, frequentemente associada aos custos globais.

Numa abordagem semi-probabilística, assim como numa abordagem determinística, o dimensionamento estrutural segue um processo de otimização determinístico (*deterministic design optimization* - DDO), uma vez que os critérios de segurança (Eq. 1) são determinísticos. Por outro lado, para considerar explicitamente as incertezas envolvidas no problema, o dimensionamento estrutural segue um processo de otimização baseado na fiabilidade (*reliability based design optimization* - RBDO) onde se procura a solução do problema impondo que o nível de fiabilidade obtido atinja um valor objetivo.

No presente caso de estudo, a força na ancoragem é a única variável de dimensionamento considerada, uma vez que a inclinação, a geometria e o material são constantes previamente definidas. Para o processo DDO, a solução é conhecida exatamente ao resolverem-se as equações correspondentes aos critérios de segurança determinísticos. Para o processo RBDO, a solução do problema de fiabilidade inverso correspondente pode ser obtida considerando uma versão alargada do algoritmo de Rackwicz-Fiessler (Kiureghian et al., 1994). Procura-se, iterativamente, a força na ancoragem que iguala a probabilidade de falha estimada ao seu valor objetivo, utilizando um método de fiabilidade de primeira ordem (FORM). A partir desta análise, podem também ser obtidos fatores de sensibilidade α , representando a influência de cada variável aleatória.

4 VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA AO DESLIZAMENTO DE UMA DESCONTINUIDADE

Em cálculos probabilísticos, para ter em conta a variabilidade espacial dos parâmetros geotécnicos, estes devem ser modelados por campos aleatórios. Além disso, na prática, observa-se com frequência a existência de correlação espacial dos parâmetros, ou seja, alternam, ao longo de uma descontinuidade, zonas de melhores características com zonas de piores características. Nesse caso, a variabilidade espacial deve ser representada por um campo aleatório estacionário que modela as flutuações do parâmetro ao longo da descontinuidade. O indicador considerado para caracterizar a correlação espacial é a escala de flutuação, que representa a distância a partir da qual o parâmetro apresenta valores de dispersão considerados reduzidos.

Por outro lado, a influência da correlação espacial depende da dimensão do mecanismo de rotura. Nos casos associados a um mecanismo de rotura de maior dimensão, a extensão da superfície de deslizamento é muito maior que a escala de flutuação (ISSMGE, 2021). Nesses casos, importa observar o valor médio do parâmetro ao longo da descontinuidade. Devido à correlação espacial, a variabilidade do valor médio do parâmetro é tanto menor quanto maior é a dimensão do mecanismo (Baecher e Christian, 2008). Deste aspeto resulta que a variância do valor médio do parâmetro ao longo de uma superfície ($\sigma_x^2_{mean}$) deve ser calculada a partir da variância inerente do parâmetro em si σ_x^2 afetada por um fator de redução da variância Γ^2 , isto é:

$$\sigma_x^2_{mean} = \sigma_x^2 \cdot \Gamma^2 \quad (5)$$

O fator de redução da variância Γ^2 é o quadrado da função de variância Γ , adimensional, que depende da razão entre a escala de flutuação δ e o comprimento da descontinuidade L . Entre outros modelos analíticos disponíveis, adota-se aquele que se obtém a partir de uma função de correlação triangular (VanMarcke, 1983):

$$\Gamma^2 = \begin{cases} 1 - L/3\delta, & L/\delta \leq 1 \\ \delta/L \cdot (1 - \delta/3L), & L/\delta \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

Na Figura 2 ilustra-se graficamente a extensão da escala de flutuação face a descontinuidades como a do caso de estudo e o gráfico com o fator de redução da variância em termos de L/δ .

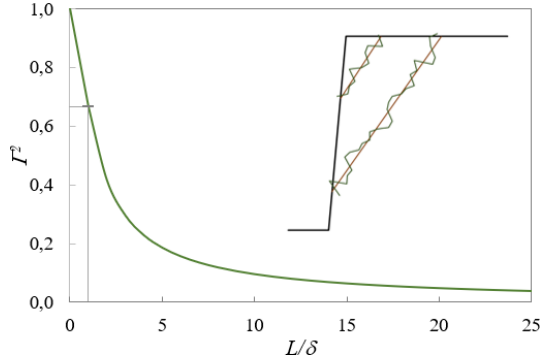


Figura 2. Fator de redução da variância em função da razão entre a escala de flutuação e o comprimento da superfície de ruptura.

No Eurocódigo 7 o tratamento desta fonte de incerteza é simplificado, pois o utilizador tem que decidir previamente se o estado limite trata um fenómeno de rotura global ($\Gamma^2 = 0$) ou local ($\Gamma^2 = 1$). Além disso, há que ter em conta que os parâmetros que caracterizam a resistência ao deslizamento de uma descontinuidade se baseiam maioritariamente nos dados recolhidos em ensaios geotécnicos, geralmente em número limitado, pelo que estão sujeitos a uma incerteza estatística considerável.

Quando existe informação proveniente de ensaios, como no problema resolvido neste trabalho, o valor representativo do parâmetro geotécnico deve ser dado pelo valor característico (X_k), determinado por métodos estatísticos de forma que a sua probabilidade de não-excedência, tendo em conta o mecanismo de rotura em análise, não deve ser superior a 5%. O seu valor característico é então dado por:

$$X_k = \bar{X} \cdot (1 - k_n \cdot V_X) \quad (7)$$

em que \bar{X} é a média aritmética dos valores do parâmetro X recolhidos em ensaios, V_X é o coeficiente de variação de X e k_n um coeficiente que tem em conta a dimensão da amostra n .

A influência da variabilidade espacial é tida em conta na definição do coeficiente k_n , dependendo de se tratar de um mecanismo de rotura global ou local. Assim, o valor característico do parâmetro deve ser:

- Caso A: uma estimativa inferior do valor médio de X no volume envolvido, quando a ocorrência do estado limite não é sensível à variabilidade espacial de X (rotura global); ou
- Caso B: uma estimativa inferior do valor de X no volume envolvido, quando a ocorrência do estado limite é sensível à variabilidade espacial

de X (rotura local).

Esta distinção afeta o valor de k_n que deve, para os casos descritos, ser dado por:

$$k_n = N_{95} \cdot \begin{cases} \sqrt{1/n}, & \text{no caso A} \\ \sqrt{1 + 1/n}, & \text{no caso B} \end{cases} \quad (8)$$

em que N_{95} representa a distribuição normal para um nível de confiança de 95% ($N_{95}=1,645$). O Eurocódigo 7 tem em conta, desta forma, não só a incerteza estatística, como também a contribuição da correlação espacial para a definição do valor característico do parâmetro.

5 CÁLCULOS E ANÁLISE

O caso de estudo apresentado, com o objetivo de comparar as diferentes abordagens para a resolução do problema, não considera a possível variabilidade da carga externa. As análises realizadas comparam a solução do problema (força mínima que deve ser aplicada pela ancoragem para garantir a estabilidade da cunha) seguindo três abordagens distintas: a determinística, com o cálculo de CS de 1,0 a 2,0 com passo de 0,1; a semi-probabilística, de forma que o critério de segurança (Eq. 1) seja verificado para estruturas incluídas nas classes de consequência CC1, CC2 ou CC3; e a probabilística, de modo que a probabilidade de falha prescrita para cada classe de consequência seja respeitada.

Para as abordagens determinística e semi-probabilística, realiza-se um processo DDO, e, para a abordagem probabilística, um processo RBDO. Inicialmente, faz-se uma análise de sensibilidade das propriedades resistentes da descontinuidade. Para esse efeito, consideram-se as propriedades resistentes como variáveis aleatórias, variando o fator de redução da variância Γ^2 , de modo a conhecer a influência deste parâmetro nos resultados. No final, realiza-se uma análise totalmente probabilística em que outras fontes de incerteza (inclinação da descontinuidade e peso volúmico da rocha) são também modeladas como variáveis aleatórias.

5.1 Análise de sensibilidade das propriedades resistentes da descontinuidade

Como referido, os coeficientes de variação que caracterizam a incerteza da resistência da descontinuidade devem ser reduzidos por um fator de redução

da variância Γ^2 quando existir correlação espacial das propriedades. Este fator deverá variar entre 0 e 1, correspondendo, respetivamente, à situação de correlação perfeita onde toda a variabilidade espacial é explicada e, por isso, a variabilidade da propriedade apenas resulta da incerteza estatística, e à inexistência de correlação espacial, não havendo lugar a redução da variância. Trata-se das situações extremas previstas no Eurocódigo 7 que se associam, respetivamente a fenómenos de rotura global e local. Os gráficos da Figura 3 apresentam os resultados dos cálculos para $\Gamma^2 = 1,0$, $\Gamma^2 = 0,5$ e $\Gamma^2 = 0$. Os eixos horizontal e vertical apresentam, respetivamente, a inclinação da descontinuidade (ψ) e a força na ancoragem (R) necessária para estabilizar a cunha. As 11 curvas cinza a traço fino são os resultados dos cálculos determinísticos. As curvas pretas correspondem aos resultados dos cálculos semi-probabilísticos para as três classes de consequência CC1, CC2 e CC3 (só são apresentadas para $\Gamma^2 = 1,0$ e $\Gamma^2 = 0$). As curvas coloridas são os resultados dos cálculos probabilísticos para probabilidades de falha (p_f) de 10^{-3} , 10^{-4} e 10^{-5} , atribuídas nos Eurocódigos às classes de consequência CC1, CC2 e CC3, respetivamente. Como esperado, a variabilidade dos parâmetros de resistência desempenha um papel importante nos resultados obtidos. Note-se que à medida que Γ^2 diminui, a solução da abordagem probabilística depende menos da probabilidade de falha objetivo, estando os resultados para os três valores de p_f mais próximos. Isto deve-se ao facto de que uma parcela maior da variabilidade espacial estar correlacionada. Na situação limite, correspondendo a $\Gamma^2=0$, as três curvas calculadas para

a abordagem probabilística só não se sobrepõem à curva de $CS=1,0$ devido à existência da parcela da variabilidade devida à incerteza estatística.

5.2 Análise totalmente probabilística

Nesta secção, além da incerteza relativa às propriedades resistentes da descontinuidade, outras fontes de incerteza, tais como a sua inclinação e o peso específico da rocha, são consideradas, de acordo com a caracterização probabilística referida na secção 2. Para as propriedades da resistência ao corte da descontinuidade foram distinguidas as mesmas três situações relativas à sua correlação espacial. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4. Observa-se que, à medida que diminui a variabilidade das propriedades de resistência da descontinuidade, menores são os valores calculados para a força da ancoragem R . Este aspeto deve-se à correlação espacial que explica parte da incerteza natural dos parâmetros de resistência.

A Figura 5 mostra os fatores de sensibilidade (α), obtidos, considerando $p_f = 10^{-4}$. As variáveis aleatórias com efeito negativo (desestabilizador) têm valores positivos (γ_r e ψ) e são lidas no eixo vertical à esquerda, enquanto as variáveis aleatórias com efeito positivo (estabilizador) têm valores negativos (c e $\tan\phi$) e são lidas no eixo vertical à direita. Observa-se que a sensibilidade dos resultados aos parâmetros de resistência diminui quando a sua incerteza diminui. Acresce ainda que em problemas com inclinações ψ maiores, a sua variabilidade torna-se claramente dominante. Isso deve-se sobretudo à variabilidade considerável assumida para ψ .

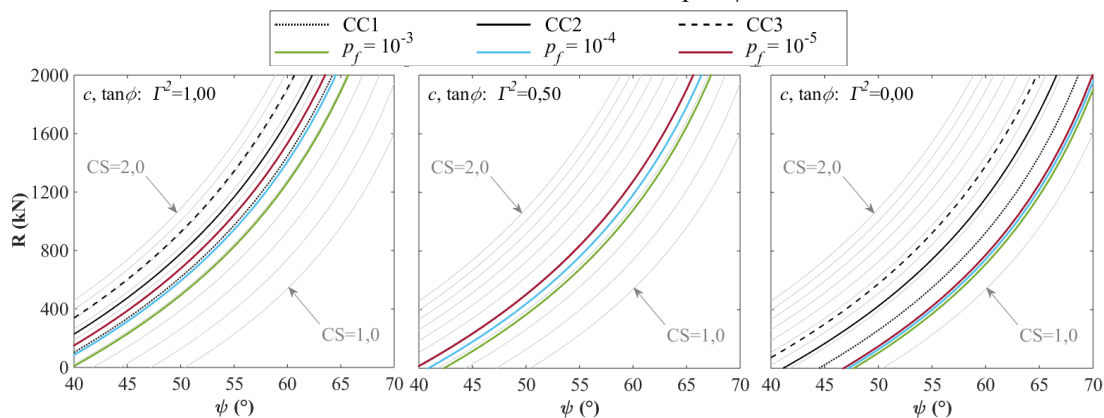


Figura 3. Força na ancoragem obtida nas análises determinística, semi-probabilística e probabilística considerando as propriedades resistentes como variáveis aleatórias

Por fim, a Figura 6 apresenta os valores de CS equivalente associados às análises semi-probabilística e probabilística, em função da inclinação da descontinuidade ψ . Distinguindo as situações que tratam roturas globais ou locais, o Eurocódigo 7 consegue reproduzir o aumento da exigência de segurança requerida para os casos de rotura local. Problemas como o caso de estudo apresentado são geralmente classificados como situações de rotura global pelo que só o gráfico da direita constitui um verdadeiro termo de comparação entre abordagens. Por outro lado, o CS equivalente

do cálculo probabilístico mostra que o nível de fiabilidade não é constante, variando com a inclinação da descontinuidade. Para valores de inclinação aproximadamente acima de 60° , a ancoragem dimensionada de acordo com o Eurocódigo é insuficiente tendo em conta os requisitos probabilísticos. Tornou-se evidente, mais uma vez, a importância da variabilidade espacial das propriedades resistentes da descontinuidade, situação que, como já foi referido, é coberta nos Eurocódigos de forma simplificada.

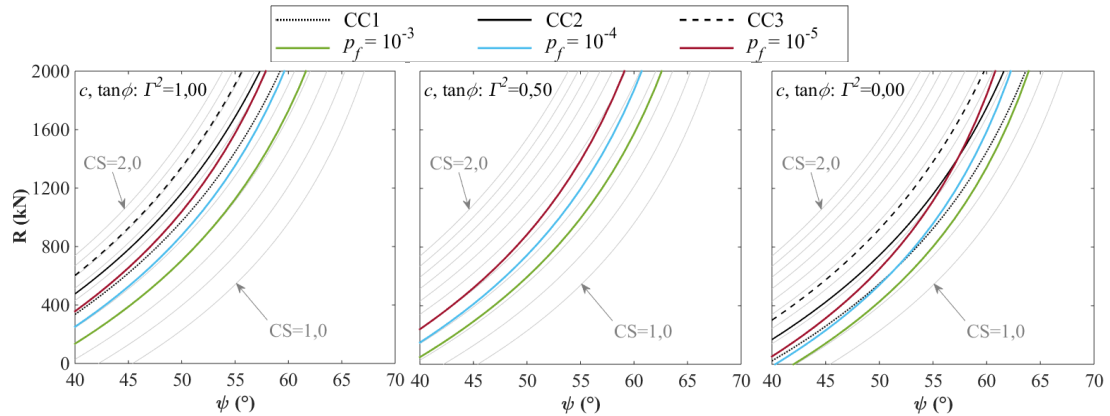


Figura 4. Força na ancoragem obtida nas análises determinística, semi-probabilística e probabilística considerando as propriedades mecânicas (parâmetros resistentes e peso) e a inclinação da descontinuidade como variáveis aleatórias

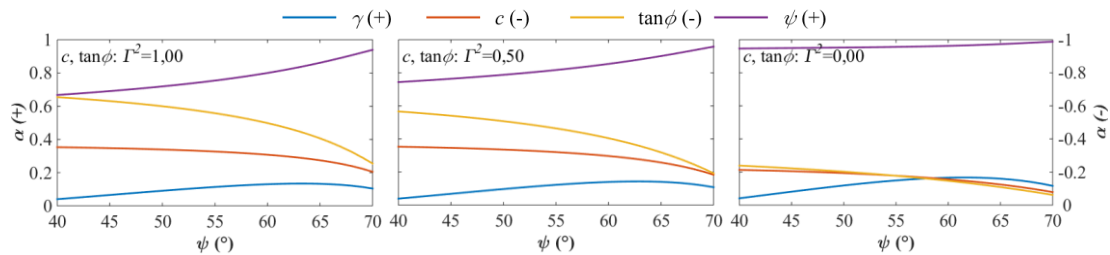


Figura 5. Fatores de sensibilidade extraídos dos cálculos probabilísticos para $p_f=10^{-4}$

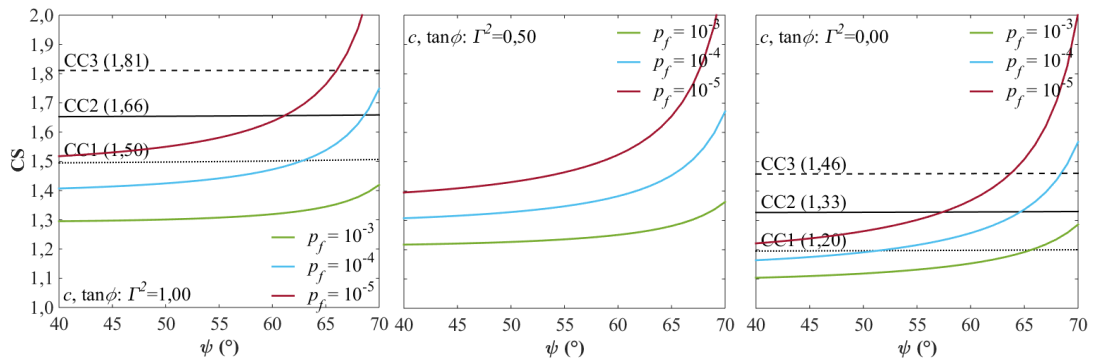


Figura 6. Coeficientes de segurança equivalente das abordagens semi-probabilística e probabilística

6 CONCLUSÕES

Embora o caso de estudo apresentado seja particularmente simples, é possível tirar conclusões interessantes. Em primeiro lugar, os níveis de fiabilidade obtidos com as abordagens semi-probabilística, com coeficientes parciais fornecidos pelo Eurocódigo 7, e determinística, com os valores CS tradicionais, falham em reproduzir a sensibilidade deste problema à incerteza relativa à inclinação da descontinuidade. No entanto, só para inclinações aproximadamente acima de 60° a força na ancoragem dimensionada de acordo com estas abordagens não é suficiente. A relevância da variabilidade da inclinação das descontinuidades ficou demonstrada, pelo que a realização de reconhecimentos adequados das propriedades geométricas das descontinuidades, por forma a reduzir a sua incerteza, pode ter um impacto significativo nos resultados.

Realça-se que a variabilidade espacial dos parâmetros de resistência tem também importância acrescida. A correlação espacial entre os parâmetros de resistência que geralmente existe ao longo de descontinuidades deve ser tida em conta como uma forma de reduzir a incerteza com que o valor médio destes parâmetros é quantificado. Este aspeto é tratado de forma simplificada no Eurocódigo ao distinguir apenas os casos de rotura local e rotura global. No entanto, as situações reais deverão apresentar um comportamento intermédio que só é possível ter em consideração recorrendo a cálculos probabilísticos. Conduzir cálculos probabilísticos, por forma a considerar a correlação espacial das propriedades, tem, por isso, uma vantagem significativa na força na ancoragem. Salienta-se ainda a contribuição que a incerteza estatística tem nos resultados da abordagem probabilística. Os níveis de segurança conseguidos com a abordagem semi-probabilística dos Eurocódigos podem, por isso, aproximar-se dos respetivos requisitos probabilísticos com o investimento em campanhas de ensaios mais extensas. A realização de mais ensaios permite conhecer, com menor incerteza estatística, os parâmetros de resistência e, com isso, reduzir as forças nas ancoragens.

Estas conclusões fornecem indicações importantes sobre os resultados das três abordagens, mas sua validade não pode ser extrapolada, dado que

muitos casos de estudo semelhantes, mas com características geométricas diferentes, devem ser efetuados para permitir a obtenção de conclusões generalizáveis. Em particular, deve ser dada atenção, tanto à calibração dos dos fatores parciais usados no Eurocódigo para a verificação de segurança dos estados limites em estruturas em maciços rochosos, como ao modo como as incertezas geométricas podem ser incluídas na análise.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho integra-se no projeto RockGeoStat – Modelação de maciços rochosos heterogéneos (Proc. 0402/112/20538) incluído no Plano de Investigação e Inovação 2013-2020 do LNEC.

BIBLIOGRAFIA

EN 1997 (2004). Eurocode 7: *Geotechnical design*. European Committee for Standardization.

Fisher, R (1953). Dispersion on a sphere. *Proc. Royal Society, London*, 217 295–305.

Kiureghian, A.D., Zhang, Y. e Li, C. (1994). Inverse reliability problems. *Journal of Engineering Mechanics* 120(5) 1154–59.

LNEC (2010). *Barragem de Gouvães – Determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade de descontinuidades*. Relatório 450/2010, Lisboa, LNEC.

Pereira, R. Lamas, L. e Muralha, J. (2021). Sliding stability analyses of a rock slope using deterministic, semi-probabilistic and probabilistic methods. *Proc. Eurock 2021, Turin*. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 833 012192.

prEN 1990 (2021). *Basis of structural and geotechnical design*. European Committee for Standardization.

prEN 1997 (2021). *Geotechnical design*. European Committee for Standardization.

Wyllie, D.C., Mah C. (2004). *Rock slope engineering – Civil and mining 4th Edition* (New York: Spon Press) p 456.

ISSMGE (2021). *State-of-the-art review of inherent variability and uncertainty in geotechnical properties and models*. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering - Technical Committee TC304.

Baecher, G. B. e Christian, J. T. (2008). Spatial variability and geotechnical reliability. *Reliability-based design in geotechnical engineering*, Ed. Phoon, K. (Taylor & Francis)

VanMarcke, E. (1983). *Random fields* (The MIT Press) p 382.