XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/35

Avaliação de Drenagem Horizontal profunda na Estabilização de Taludes em Solo Residual

João Vitor Oliveira Ferreira
Graduando, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, joao.vof@aluno.ufop.edu.br

Thiago Cruz Bretas
Diretor, TBretas Consultoria, Belo Horizonte, Brasil, tbretas@tbretas.com

Lucas Guimarães Carvalho
Eng. Geotécnico, Rocscience, Belo Horizonte, Brasil, lucas.guimaraes@rocscience.com

Thales Furtado Cota
Eng. Geotécnico, TBretas Consultoria, Belo Horizonte, Brasil, thales@tbretas.com

Felipe de Campos Loch
Professor, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, felipe.loch@ufop.edu.br

RESUMO: A estabilidade de taludes naturais representa uma preocupação recorrente em obras de engenharia civil, especialmente em cortes em solos residuais, encostas rodoviárias e barragens de terra. Nesses casos, o Fator de Segurança (FS) é amplamente utilizado como indicador do desempenho da estabilidade, sendo seu valor comparado com critérios mínimos estabelecidos por normas técnicas. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar quantitativamente a influência da Drenagem Horizontal Profunda (DHP) na estabilidade de taludes em solo residual, por meio de análises numéricas realizadas com e sem a presença de drenagem interna. A modelagem hidráulica e geomecânica do maciço foi realizada no software RS2, permitindo simular a evolução das poropressões e a posição da superfície freática em regime transiente. As análises de estabilidade foram conduzidas no software Slide2 por meio do Método do Equilíbrio Limite, adotando-se o método de Morgenstern-Price para o cálculo do fator de segurança. A geometria do talude, a estratigrafia e a posição inicial do nível d'água foram definidas a partir de dados de sondagens à percussão, enquanto os parâmetros geotécnicos de resistência foram obtidos com base em ensaios triaxiais. Foram analisados cenários com e sem a instalação de drenos horizontais profundos, permitindo avaliar a influência da drenagem na dissipação das poropressões e na estabilidade global do talude. Os resultados indicam que a instalação de DHPs promove redução das poropressões no interior do maciço e rebaixamento da superfície freática, contribuindo para o aumento do fator de segurança. Observou-se, entretanto, que o ganho de estabilidade depende da posição da cunha potencial de ruptura em relação à zona saturada do talude, podendo ocorrer situações em que o rebaixamento da freática apresenta influência limitada no FS. As análises também evidenciam que as estimativas de fator de segurança são sensíveis à interpretação da posição do nível d'água, aos parâmetros de resistência do solo e aos critérios de busca da superfície crítica adotados no método de equilíbrio limite. Dessa forma, os resultados reforçam a importância da utilização de técnicas de drenagem profunda como medida de estabilização de taludes, bem como da adoção de abordagens integradas de modelagem hidráulica e geomecânica na avaliação da estabilidade de encostas.PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade taludes, Drenagem horizontal profunda, poropressão, fator de segurança.

ABSTRACT: The stability of natural slopes is a recurring concern in civil engineering works, particularly in cuts in residual soils, highway slopes, and earth dams. In such cases, the Factor of Safety (FS) is widely used as an indicator of slope stability performance, and its value is compared with minimum criteria established by technical standards. In this context, the present study aims to quantitatively evaluate the influence of Deep Horizontal Drains (DHDs) on the stability of slopes in residual soils through numerical analyses performed with and without internal drainage. The hydraulic and geomechanical modeling of the slope was carried out using the RS2 software, allowing the simulation of pore pressure evolution and the position of the groundwater

table under transient flow conditions. Stability analyses were performed using the Slide2 software through the Limit Equilibrium Method (LEM), adopting the Morgenstern–Price method for the calculation of the factor of safety. The slope geometry, stratigraphy, and initial groundwater level were defined based on standard penetration test (SPT) borehole data, while the geotechnical strength parameters were obtained from triaxial laboratory tests. Scenarios with and without the installation of deep horizontal drains were analyzed in order to evaluate the influence of drainage on pore pressure dissipation and on the overall stability of the slope. The results indicate that the installation of DHDs promotes a reduction in pore pressures within the soil mass and a lowering of the groundwater table, contributing to an increase in the factor of safety. However, it was observed that the stability gain depends on the position of the potential failure wedge relative to the saturated zone of the slope, and situations may occur in which the groundwater lowering has limited influence on the FS. The analyses also show that the estimated values of the factor of safety are sensitive to the interpretation of the groundwater level, the soil strength parameters, and the search criteria used to identify the critical slip surface in limit equilibrium analyses. Therefore, the results highlight the importance of deep drainage techniques as an effective measure for slope stabilization, as well as the need for integrated hydraulic and geomechanical modeling approaches in slope stability assessments.
KEYWORDS: Slope stability, deep horizontal drainage, pore pressure, factor of safety

1. INTRODUÇÃO

A instabilidade de taludes representa um dos principais problemas geotécnicos associados a obras de infraestrutura, especialmente em regiões onde predominam solos residuais. Esses materiais apresentam comportamento fortemente dependente das condições hidráulicas do maciço, sendo comum que variações no nível freático e no regime de fluxo subterrâneo provoquem alterações significativas nas tensões efetivas e na resistência ao cisalhamento do solo. Conforme apresentado por Budhu (2011), aumento das pressões neutras reduz a tensão efetiva atuante no solo, o que pode levar à diminuição da resistência ao cisalhamento e favorecer a ocorrência de instabilidades em encostas naturais ou taludes escavados.

Em obras de infraestrutura, como rodovias, ferrovias e cortes urbanos, a execução de escavações frequentemente altera o equilíbrio hidráulico do maciço, podendo provocar elevação da superfície freática e aumento das poropressões internas. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009), a presença de água no interior do talude é um dos fatores mais relevantes na ocorrência de rupturas, sendo fundamental considerar soluções de drenagem como medida de controle da estabilidade. Nesse contexto, técnicas de drenagem interna têm sido amplamente utilizadas como forma de reduzir as pressões neutras e aumentar a segurança de encostas.

Entre as soluções de drenagem empregadas na prática geotécnica, destaca-se o uso de drenos horizontais profundos (DHPs), que consistem em perfurações horizontais ou sub-horizontais executadas no interior do talude com o objetivo de interceptar o fluxo de água subterrânea e conduzi-lo para fora do maciço. Esse tipo de sistema tem sido aplicado em diversas obras de estabilização devido à sua relativa simplicidade construtiva, baixo custo e capacidade de promover dissipação significativa das poropressões (Bastos, 2006). A redução das pressões neutras resulta em aumento das tensões efetivas e, consequentemente, em melhoria das condições de estabilidade do talude.

Nesse contexto, o avanço das ferramentas de modelagem numérica tem possibilitado análises mais detalhadas do comportamento hidráulico e mecânico de taludes. Métodos baseados em elementos finitos permitem simular a interação entre fluxo subterrâneo, redistribuição de tensões e deformações do maciço, possibilitando avaliar a influência de diferentes soluções de drenagem na estabilidade global do talude. Além disso, análises de estabilidade por métodos de equilíbrio limite, como o método do círculo de deslizamento proposto por Bishop (1955), continuam sendo amplamente utilizadas para a avaliação do fator de segurança em estudos geotécnicos.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência da utilização de drenos horizontais profundos na estabilização de um talude em solo residual por meio de modelagem numérica bidimensional em regime de fluxo transiente. A análise busca investigar a influência do comprimento dos drenos na dissipação de poropressões, na redistribuição das tensões efetivas e no incremento do fator de segurança do talude, contribuindo para o entendimento do desempenho desse tipo de solução em obras de estabilização de encostas.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo baseia-se em uma abordagem numérica aplicada à engenharia geotécnica, com o objetivo de avaliar a influência da drenagem profunda na estabilidade de um talude em solo residual. A Figura *1* mostra as etapas utilizadas no estudo sobre a influência dos DHPs.



Figura 1 - Fluxograma do estudo
Fonte: Autor

Após a realização das análises em elementos finitos, a geometria da superfície freática obtida nas simulações foi exportada para o software Slide2, onde foram conduzidas as análises de estabilidade por meio de métodos de equilíbrio limite. Esse procedimento permitiu considerar, nas análises de estabilidade, a distribuição de poropressões resultante da modelagem hidráulica realizada previamente.

Para a avaliação da estabilidade do talude foi empregado o método de equilíbrio limite, no qual o fator de segurança é definido como a razão entre as forças resistentes e as forças solicitantes atuantes ao longo da superfície potencial de ruptura. A partir dessa abordagem, o fator de segurança é determinado para diferentes

superfícies de deslizamento até a identificação da condição crítica de estabilidade. Neste estudo foi adotado como critério de estabilidade a condição de fator de segurança igual ou superior a 1,50, valor comumente recomendado para taludes permanentes em projetos geotécnicos.
Além das análises realizadas no RS2, foram conduzidas análises adicionais de estabilidade utilizando o software Slide2, baseado em métodos de equilíbrio limite. Essa abordagem permitiu comparar os resultados obtidos por diferentes métodos de análise, proporcionando maior confiabilidade às avaliações realizadas.

Foram simulados diferentes cenários de drenagem, incluindo uma condição inicial sem a presença de drenos horizontais profundos e diferentes configurações com a instalação de DHPs de comprimentos variados. Para cada cenário foram avaliadas a evolução das poropressões, os deslocamentos do maciço e os valores do fator de segurança ao longo das etapas de escavação e na condição final da obra.

2.1. SEQUENCIAMENTO OPERACIONAL

Na Figura *2*, apresenta-se o modelo geomecânico adotado neste estudo, estruturado com base nas características geológicas e geotécnicas do talude analisado, considerando os parâmetros de resistência e deformabilidade do solo residual, bem como as condições hidráulicas iniciais do maciço. Além da definição das propriedades constitutivas, foi estabelecido o sequenciamento operacional das etapas de escavação, de modo a representar de forma realista a evolução do estado de tensões e das poropressões ao longo do processo construtivo. Essa abordagem permitiu avaliar a influência das intervenções no comportamento tensão–deformação e na estabilidade global do talude.

Adicionalmente, nas análises hidráulicas em regime transiente foi considerado um período total de 1800 dias, equivalente a aproximadamente cinco anos, tempo necessário para que o sistema atingisse uma condição de regime permanente (steady state). Esse intervalo de simulação permitiu representar adequadamente a dissipação gradual das poropressões e a estabilização da superfície freática no interior do maciço, garantindo que os resultados obtidos refletissem a condição hidráulica final do talude após a completa evolução do processo de drenagem.

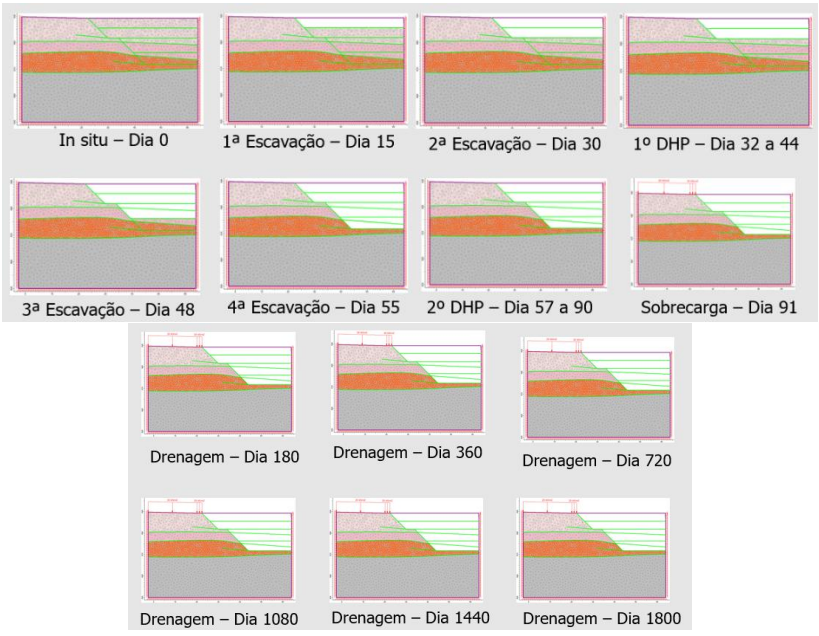


Figura 2 – Sequenciamento operacional
Fonte: Autor

1.1. CENÁRIOS ANÁLISADOS

Para comparar a eficiência dos DHPs foram adotados alguns comprimentos afim de se garantir qual o melhor comprimento de DHP adequado para do estudo, ao qual atendesse o FSmin de projeto e fundamentasse tal escolha, conforme Figura *3*.

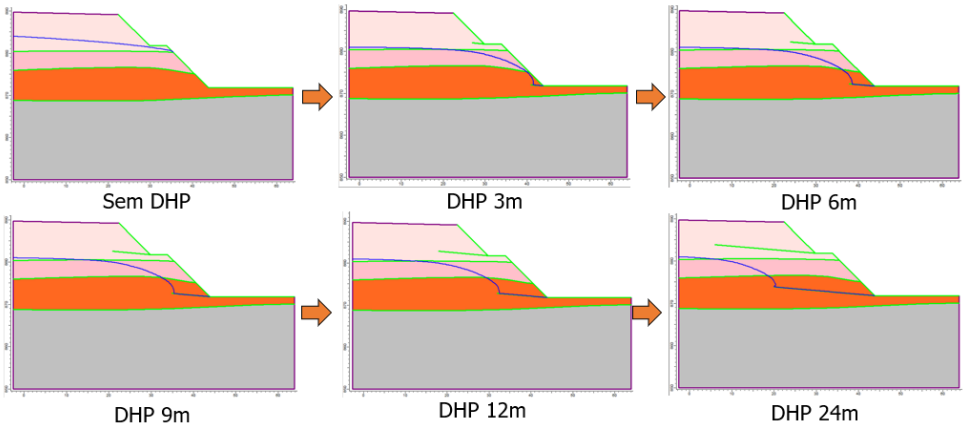


Figura 3 – Cenários de análise
Fonte: Autor

1.2. SEÇÃO DE PROJETO

Para a realização do estudo apresentado, foi utilizado como base a seção de análise conforme Figura *4*.

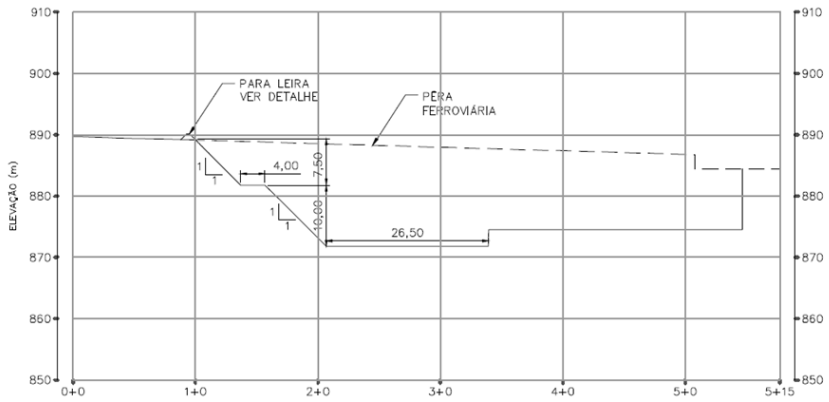


Figura 4 – Seção de projeto estudada
Fonte: Autor

1.3. Parâmetros de Resistência e deformabilidade adotados

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizados nas análises foram estimados a partir de correlações empíricas baseadas nos valores do índice de resistência à penetração obtidos nos ensaios de sondagem à percussão (SPT) e calibrados com ensaios de laboratório. A adoção desse procedimento justifica-se pela ampla utilização dessas correlações na prática geotécnica, sobretudo em estudos preliminares e em análises numéricas de taludes, nas quais a disponibilidade de ensaios laboratoriais representativos é limitada. As correlações por NSPT permitem relacionar de forma indireta os valores medidos em campo aos parâmetros de resistência do solo, considerando o comportamento típico de solos naturais e residuais.

Tabela 1 - Parâmetros adotados nas análises

Parâmetro geotécnico	Camada 1 SRM Nspt=8	Camada 2 SRJ-1 Nspt=14	Camada 3 SRJ-2 Nspt=25	Camada 4 SRJ-3 Nspt=31	Camada 5 SAP Nspt=50	Camada 6 Rocha - Impenetrável
Peso específico γ (kN/m³)	17	18	19	20	21	22
Coesão C' (kPa)	18	20	27	25	40	100
Ângulo de atrito ϕ (º)	20	28	30	32	35	35
Coeficiente de permeabilidade k (m/s)	1,25e-05	4,59e-07	3,5e-07	4,5e-07	4,0e-06	1e-07
Mod. Deformabilidade (Ea)	10.000	20.000	35.000	45.000	100.000	200.000

Fonte: Autor

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações numéricas permitiram avaliar de forma integrada o comportamento hidráulico e mecânico do talude, evidenciando a influência da drenagem profunda na dissipação de poropressões e na estabilidade global do maciço.

Nesse contexto, o comprimento de 6,00 m, mostrou-se o mais eficiente dentro das premissas adotadas, por proporcionar uma expressiva redução das poropressões, controle adequado dos deslocamentos e atendimento ao critério de segurança FS ≥ 1,50. O comprimento de 6 m corresponde ao valor mínimo capaz de atender ao critério de segurança adotado.

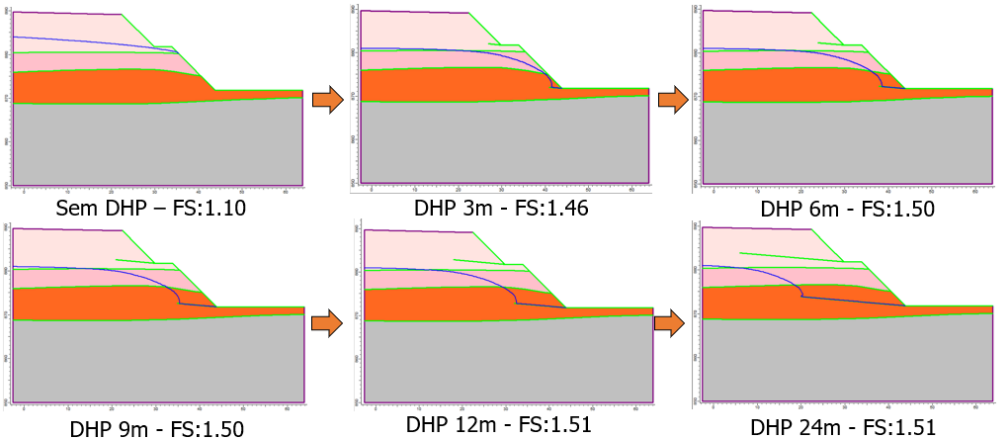


Figura 5 – Resultados em função do comprimento dos DHPs
Fonte: Autor

A Figura 6 apresenta a evolução do fator de segurança ao longo do tempo para os diferentes comprimentos de drenos analisados. Observa-se que, a partir do comprimento de 6 m, os incrementos no fator de segurança tornam-se pouco significativos. Esse comportamento ocorre porque, embora o aumento do comprimento dos drenos promova rebaixamento adicional da superfície freática, essa redução das poropressões ocorre em regiões do maciço afastadas da cunha potencial de ruptura. Dessa forma, a influência hidráulica dos drenos passa a ter impacto limitado nas condições de estabilidade global do talude, não justificando comprimentos muito grandes de DHP.

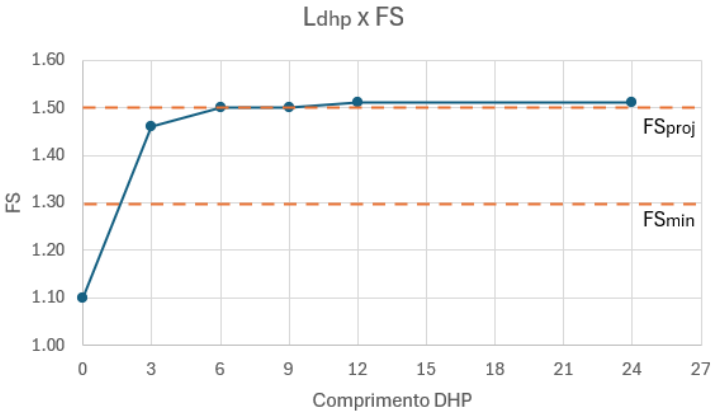


Figura 6 – Gráfico comprimento de DHP x Fator de segurança
Fonte: Autor

Na condição inicial, sem a presença de drenos horizontais profundos, observou-se a formação de uma superfície freática relativamente elevada no interior do talude, resultando em níveis significativos de poropressões ao longo do maciço. Essa condição contribui para a redução das tensões efetivas e, consequentemente, para a diminuição da resistência ao cisalhamento do solo.

A introdução dos drenos horizontais profundos promoveu uma redução significativa das poropressões ao longo do talude, evidenciando a eficiência desse sistema de drenagem na interceptação do fluxo subterrâneo. A dissipação das poropressões resultou em aumento das tensões efetivas e melhoria das condições de estabilidade do maciço.

A análise do fator de segurança mostrou aumento progressivo da estabilidade do talude com a adoção de drenos horizontais profundos. Observou-se que o incremento no comprimento dos drenos contribui para maior eficiência na drenagem do maciço, promovendo maior dissipação de poropressões e, consequentemente, elevação do fator de segurança.

Entretanto, conforme a Figura 6 os resultados também indicam que, a partir de determinado comprimento de dreno, os ganhos adicionais em termos de redução de poropressões e aumento do fator de segurança tornam-se menos significativos. Esse comportamento sugere a existência de um comprimento de dreno tecnicamente eficiente para a condição analisada, a partir do qual o aumento do comprimento não resulta em melhorias proporcionais no desempenho da drenagem. Esses resultados reforçam a importância de análises numéricas no processo de dimensionamento de sistemas de drenagem profunda, permitindo avaliar de forma mais precisa a interação entre fluxo subterrâneo e comportamento mecânico do maciço.

A Figura 7 apresenta a condição de drenagem do talude após 1800 dias de simulação, correspondente a aproximadamente cinco anos. Nesse período, observa-se que a superfície freática se estabiliza, caracterizando a condição de regime permanente (steady state). Entretanto, mesmo após a estabilização hidráulica do maciço, não se verifica incremento significativo no fator de segurança. Esse comportamento ocorre porque a cunha potencial de ruptura encontra-se posicionada predominantemente fora da região saturada do talude, de modo que as variações nas poropressões exercem influência limitada nas condições de estabilidade global.

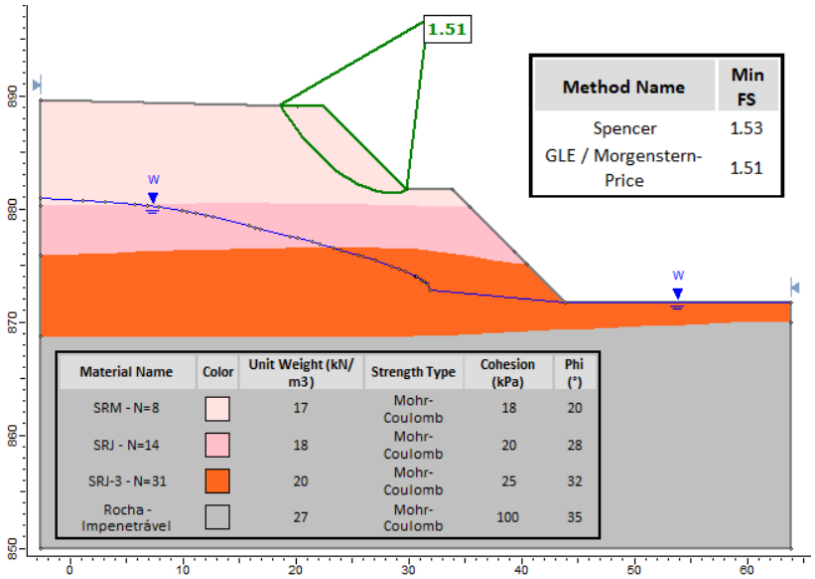


Figura 7 – Análise de estabilidade por Equilíbrio limite – Dia 1800 (5 anos)
Fonte: Autor

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados, as simulações demonstraram que a instalação de drenos horizontais profundos promove significativa redução das poropressões no interior do maciço, contribuindo para o aumento das tensões efetivas e para a melhoria das condições de estabilidade do talude.

Os resultados indicam que o comprimento dos drenos exerce influência direta na eficiência do sistema de drenagem, sendo observado aumento do fator de segurança com o incremento do comprimento dos drenos. Entretanto, verificou-se que, a partir de determinado valor, o aumento do comprimento passa a produzir ganhos menos expressivos em termos de estabilidade.

Dessa forma, a definição do comprimento dos drenos deve considerar não apenas critérios empíricos, mas também análises técnicas que avaliem a eficiência hidráulica e geomecânica do sistema de drenagem. Nesse sentido, a modelagem numérica se mostra uma ferramenta relevante para o apoio ao dimensionamento de soluções de drenagem em obras de estabilização de taludes.

Os resultados obtidos contribuem para a compreensão do comportamento de taludes drenados por meio de drenos horizontais profundos e fornecem subsídios técnicos para o desenvolvimento de projetos mais eficientes e economicamente adequados em obras geotécnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

BASTOS, I. G. Estabilização de encostas através de drenagem profunda: estudo de um caso de estabilização com um túnel de drenagem. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, London, v. 5, n. 1, p. 7–17, 1955.

BUDHU, M. *Foundations and earth retaining structures. Hoboken: John Wiley & Sons*, 2011