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/COBRAMSEG2026.4/101

Modelagem Tridimensional para Retroanálise de Ruptura em Cortina Atirantada

Mateus do Líbano Pereira
Engenheiro Geotécnico, Vale S.A., Ouro Preto - MG, Brasil,
mateus.pereira1@vale.com

Fernanda Del' Amore Martins
Engenheira Geotécnica, Vale S.A., Ouro Preto – MG, Brasil,
fernanda.martins@vale.com

RESUMO: A análise de rupturas em estruturas de contenção é fundamental para compreender os mecanismos envolvidos e aprimorar práticas de projeto e execução. Cortinas atirantadas, amplamente utilizadas em obras de infraestrutura e mineração, podem apresentar falhas decorrentes de fatores como variação de esforços, interação solo-estrutura e condições não previstas em projeto. A retroanálise surge como uma ferramenta para avaliar essas ocorrências, permitindo ajustar modelos e identificar as causas da instabilidade.
Este trabalho apresenta uma retroanálise tridimensional de uma ruptura ocorrida em uma cortina atirantada, utilizando a metodologia de equilíbrio limite para reproduzir as condições reais da estrutura. Foram considerados parâmetros geotécnicos do solo, características dos tirantes, efeitos de carregamentos externos e condições hidrogeológicas. A abordagem 3D possibilitou compreender variáveis como variação de altura e variação espacial da malha de tirantes.
Os resultados indicam que a retroanálise esclarece os mecanismos de falha e fornece subsídios para aprimorar critérios de projeto e monitoramento, reduzindo riscos em futuras estabilizações no local. O estudo reforça a importância da integração entre modelagem tridimensional e dados de campo para garantir maior confiabilidade em obras de contenção.

PALAVRAS-CHAVE: Retroanálise, Cortina Atirantada, Análise 3D, Ruptura, Estabilidade.

1 INTRODUÇÃO

Estruturas de contenção desempenham papel fundamental em obras de infraestrutura urbana, rodoviária e de mineração, permitindo a estabilização de escavações e taludes em condições geotécnicas desfavoráveis. Entre essas estruturas, as cortinas atirantadas destacam-se pela versatilidade construtiva e pela capacidade de mobilizar resistências em profundidade, sendo amplamente empregadas em áreas com restrição de espaço e grandes alturas de contenção (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

Apesar de sua ampla aplicação, o desempenho de cortinas atirantadas está sujeito a incertezas associadas à variabilidade dos parâmetros geotécnicos, à interação solo-estrutura, às condições hidrogeológicas e à execução dos tirantes. Estudos clássicos apontam que falhas em obras de contenção raramente estão associadas a um único fator isolado, mas sim à combinação de hipóteses simplificadoras de projeto, condições de carregamento não previstas e evolução progressiva dos mecanismos de ruptura (DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014).

Nesse contexto, a análise de rupturas ocorridas em estruturas existentes constitui uma ferramenta essencial para o aprimoramento das práticas de engenharia geotécnica. A retroanálise permite ajustar parâmetros e hipóteses de modelagem de modo a reproduzir o comportamento observado em campo, contribuindo para a identificação dos mecanismos de instabilidade e para a avaliação da segurança estrutural de soluções semelhantes (LAMBE; WHITMAN, 1969).

Tradicionalmente, análises de estabilidade de cortinas atirantadas têm sido conduzidas por meio de modelos bidimensionais, baseados em métodos de equilíbrio limite. Embora esses métodos sejam amplamente aceitos na prática profissional, sua aplicação em problemas complexos pode não capturar adequadamente

variações espaciais de geometria, carregamentos e arranjos de tirantes, especialmente em estruturas extensas ou com geometrias irregulares (ABRAMSON et al., 2002).

Avanços recentes em ferramentas computacionais têm possibilitado a aplicação de modelagens tridimensionais, ampliando a capacidade de representação dos mecanismos reais de ruptura. A análise 3D permite considerar efeitos como a variação de altura da cortina, a distribuição espacial dos tirantes e a influência de condições locais específicas, aspectos que podem ser decisivos na compreensão do comportamento global da estrutura (DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014).

Assim, a aplicação de retroanálises tridimensionais baseadas em métodos de equilíbrio limite representa um avanço relevante na investigação de rupturas em cortinas atirantadas. Ao integrar dados de campo, parâmetros geotécnicos e hipóteses de carregamento mais realistas, essa abordagem contribui para a redução de incertezas, para o aprimoramento de critérios de projeto e para o aumento da confiabilidade em obras de contenção futuras.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização do Caso e Dados de Entrada

A metodologia adotada neste estudo baseia-se na retroanálise de uma ruptura ocorrida em uma cortina atirantada, a partir da reconstrução das condições geométricas, geotécnicas e estruturais existentes à época do evento. Inicialmente, foram reunidas informações provenientes de relatórios geotécnicos e observações de campo realizadas após a ruptura, permitindo a definição da estratigrafia do solo local, da configuração da cortina e do arranjo espacial dos tirantes. A partir das inspeções anteriores e após o evento, foram mapeadas também trincas de tração no solo a montante da cortina, que também foram representadas no modelo, seguindo o princípio de que a retroanálise deve reproduzir não apenas o estado final, mas a trajetória de carregamentos e condições de contorno relevantes do processo construtivo (CLOUGH; O'ROURKE, 1990)

Não foi possível a recuperação das informações de projeto e de execução da estrutura colapsada, sendo então, as variáveis relacionadas a carga e comprimentos dos tirantes os objetivos investigação na retroanálise. Sendo assim, dados relacionados ao comprimento livre/ancorado, ângulo, capacidade e níveis de protensão dos tirantes estimados definidos conforme boas práticas de engenharia observando também, critérios de desempenho e possíveis perdas (relaxação, escorregamento, dissipação de tensões) frequentemente relatadas em campo (LITTLEJOHN, 1996; SABATINI; PASS; BACHUS, 1999).

2.2 Modelo Geotécnico e Condições Hidrogeológicas

O modelo geotécnico foi construído com base na estratigrafia identificada no local, considerando camadas de solo com propriedades mecânicas homogêneas em cada unidade. O comportamento resistente dos materiais foi representado por meio do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

As condições hidrogeológicas foram incorporadas ao modelo por meio de uma abordagem mista. Nos trechos onde havia disponibilidade de dados de instrumentação, o nível d'água foi definido diretamente a partir de leituras de medidores de nível de água instalados em campo, permitindo a representação explícita da superfície freática

Para o aterro existente, onde não havia instrumentação suficiente para a definição direta do regime de poropressão, as condições hidrogeológicas foram representadas por meio do parâmetro adimensional Ru, aplicado de forma distribuída no maciço. O uso do parâmetro Ru constitui uma prática consagrada em análises de estabilidade quando se busca representar, de forma simplificada, a influência da água subterrânea sobre as tensões efetivas, especialmente em estudos de retroanálise e avaliação de cenários desfavoráveis (ABRAMSON et al., 2002).

2.3 Abordagem tridimensional de equilíbrio-limite

A análise de estabilidade foi conduzida via equilíbrio-limite tridimensional, adotando o algoritmo de busca de superfície *cucko search* e cálculo do fator de segurança por método clássico GLE/ Morgenstern-Price. Em contraste com abordagens 2D, a formulação 3D capta variações de altura, irregularidades geométricas e, sobretudo, a distribuição espacial dos tirantes (HOVLAND, 1977; CHEN; UGAI, 2008).

No modelo tridimensional, os tirantes foram representados diretamente como *bolts* do tipo *Grouted Tieback* no *Software Slide3*, da empresa *Rocscience*, com força de aplicação em regime *Active (Method A)*, condizente com o caráter protendido (ativo) dessas ancoragens. Nessa implementação, a força é aplicada paralela ao eixo do tirante e contribui para reduzir as forças motrizes na estimativa do fator de segurança. No esquema *Active/Method A*, a força do tirante não é dividida pelo F.S. (apenas as resistências do solo são reduzidas), devendo-se empregar capacidades admissíveis nas propriedades de suporte (ROCSCIENCE, 2025).

2.4 Procedimento iterativo de retrocalibração

O procedimento iterativo de retrocalibração ocorreu em etapas:

- Montagem de um modelo base com parâmetros médios de investigação;
- Variação sistemática de coesão, atrito, pesos específicos e pressões neutras (N.A. e Ru) dentro de intervalos plausíveis;
- Ajuste das forças dos tirantes por faixas, contemplando perdas de protensão/incertezas de arrancamento;
- busca 3D da superfície crítica e cálculo do F.S.

O objetivo da retrocalibração foi obter F.S. próximo da unidade para a superfície que melhor reproduz a ruptura, evitando ajustes além de limites de engenharia (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1994; DAS; SOBHAN, 2018)

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Caracterização da estrutura, da Ruptura e das Condições Geotécnicas

A área analisada corresponde a uma cortina atirantada implantada no sopé de um platô onde se localiza o núcleo administrativo de uma empresa. Sobre o coroamento da contenção encontram-se, em cota superior, uma unidade de saúde, o terminal rodoviário local e vias de acesso que concentram o tráfego interno. A estrutura de contenção em estudo consiste em uma cortina com três níveis de tirantes. Não foram recuperados documentos de projeto, o que inclui profundidades, inclinações, comprimentos de ancoragem e níveis de protensão, circunstância que condicionou a abordagem adotada na retroanálise.

Ao longo dos anos, registraram-se recalques e trincas a montante da cortina, em áreas pavimentadas e no entorno das edificações, com intensificação durante os períodos chuvosos. Esse comportamento sazonal sugere contribuição direta da infiltração pluviométrica no desempenho global do maciço contido, ainda que o nível d'água do aquífero livre, na fundação, seja profundo. A hipótese de trabalho considera que a água infiltrada percola preferencialmente no aterro superficial, elevando transitoriamente as pressões neutras e reduzindo tensões efetivas na zona próxima à face da contenção, sem necessariamente alcançar o lençol freático regional no intervalo de tempo associado aos eventos observados.

A investigação geotécnica de subsuperfície permitiu consolidar um modelo geológico simples e coerente com o histórico de ocupação: uma camada de aterro com espessura variável entre dois e quatro metros, contida pela cortina, apoiada sobre filitos alterados. Para representar, no momento crítico, o efeito hidrológico de curto prazo no material de aterro, adotou-se um valor de Ru=0,15, adequado para traduzir o incremento de pressões neutras por infiltração sem impor uma superfície freática contínua. Como os parâmetros dos tirantes não estão documentados, a retroanálise foi estruturada para variar exclusivamente a carga atuante nas ancoragens ao longo de faixas fisicamente plausíveis, mantendo constantes as propriedades do aterro e do filito alterado e a condição hidrogeológica representada por Ru no aterro. Essa estratégia permite isolar a influência dos tirantes na estabilidade global e verificar em que patamar de esforço mobilizado o mecanismo calculado reproduz a ruptura observada em campo, respeitando o conjunto de evidências geotécnicas do caso real.

3.2 Modelo Tridimensional do Caso e Estratégia de Retroanálise

A geometria tridimensional foi construída a partir do levantamento topográfico disponível, que permitiu reproduzir a face da contenção e o terreno adjacente com a variação real de cotas. A cortina apresenta altura

variável entre cinco e oito metros, desenvolvendo-se ao longo de aproximadamente cento e sessenta metros no sentido longitudinal. Essa não uniformidade de altura, foi mantida no modelo para preservar os efeitos tridimensionais associados às diferenças locais de gravidade, contenção e carregamentos. A malha de tirantes foi disposta conforme a configuração observada em campo, adotando espaçamento de dois metros na direção X e três metros na direção Y.

A caracterização dos materiais seguiu duas frentes complementares. Para o aterro e para as unidades mais superficiais, os parâmetros geotécnicos foram obtidos a partir de ensaios laboratoriais, compatibilizando resistência ao cisalhamento e pesos específicos com a natureza do material identificado. Para os estratos mais profundos da fundação, onde a investigação direta foi limitada, recorreu-se a faixas de propriedades consolidadas em literatura técnica para materiais de comportamento equivalente, garantindo coerência física e estabilidade numérica. As condições hidrogeológicas foram representadas de forma consistente com a análise da ruptura: aplicou-se Ru=0,15 exclusivamente no aterro, simulando o incremento de pressões neutras associado a episódios de infiltração, complementada por uma superfície freática contínua na fundação, profunda e obtida através dos instrumentos medidores de nível de água.

A análise de estabilidade foi conduzida no Slide3, adotando o método de fatias generalizado de equilíbrio limite (GLE/Morgenstern–Price) para o cálculo do fator de segurança, acoplado a um algoritmo de busca do tipo Cuckoo Search para a identificação de superfícies críticas no espaço tridimensional. Essa combinação favorece a exploração eficiente do domínio de falhas possíveis, preservando a robustez mecânica do equilíbrio de forças e momentos na solução final. Os tirantes foram representados como elementos do tipo Grouted Tieback em regime Active/Method A, condição compatível com sistemas protendidos. Como ponto de partida para a retroanálise, atribuiu-se a cada tirante uma capacidade axial admissível de 150 kN, valor inicial definido para permitir a calibração progressiva das cargas atuantes, uma vez que não há registros de projeto. A partir dessa configuração, a variação de esforços nas ancoragens passa a ser o principal grau de liberdade do processo de ajuste, enquanto as propriedades dos materiais e a condição hidrogeológica representada por Ru se mantêm fixas, de modo a isolar a influência dos tirantes no mecanismo global de instabilidade.

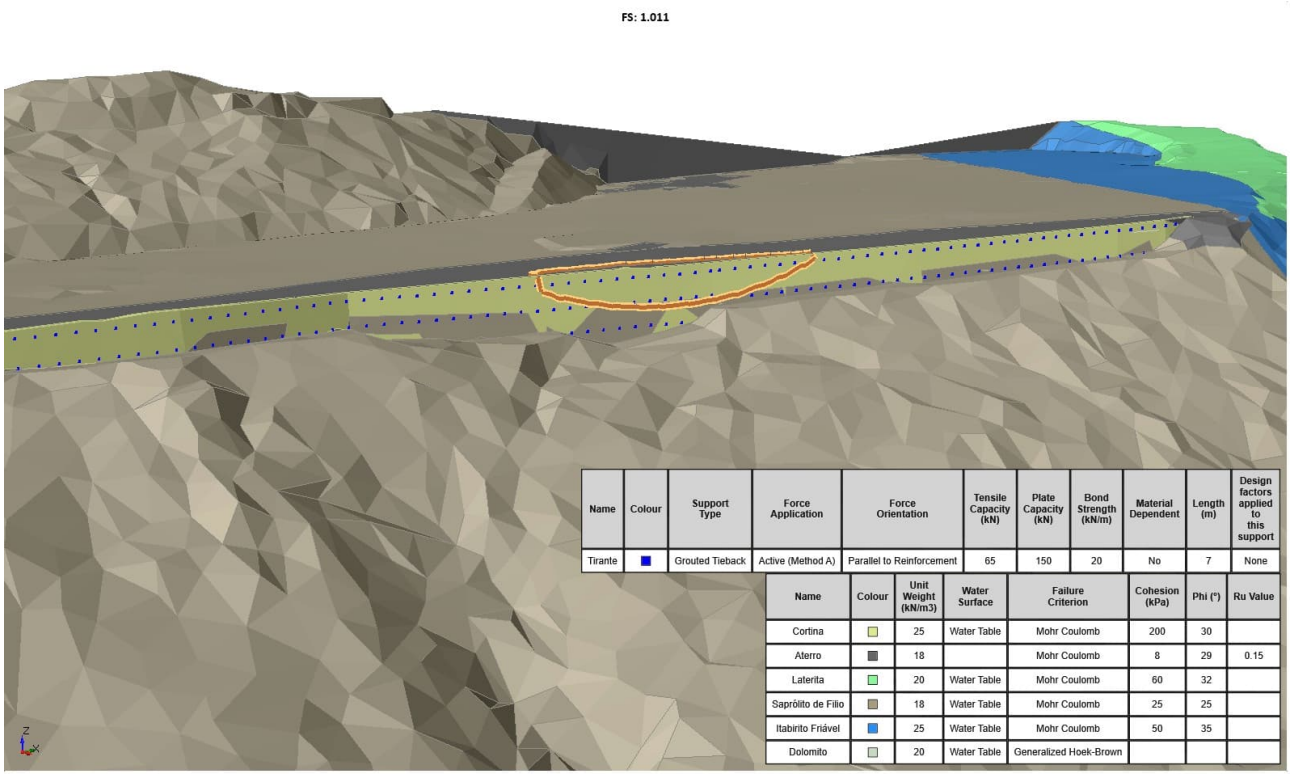
Com o objetivo de forçar e estabilizar a identificação do mecanismo compatível com as evidências de campo, incorporou-se ao modelo a fissura observada antes da ruptura por meio do recurso de “tension crack”, que promove o truncamento vertical da superfície de deslizamento na zona fissurada sempre que a superfície candidata a ultrapassar esse limite. Em paralelo, empregou-se a funcionalidade Regions of Interest para concentrar a busca nas áreas mais críticas do modelo, orientando o algoritmo a explorar com maior densidade as regiões preferenciais de colapso previamente indicadas e reduzindo o custo computacional sem perda de cobertura de superfícies plausíveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A retroanálise partiu da geometria tridimensional construída a partir do levantamento topográfico, do arranjo real de tirantes e da condição hidrogeológica representada por Ru = 0,15 no aterro. A modelagem incorporou a fissura observada antes da ruptura por meio do recurso de tension crack, de modo a suprimir soluções com esforços de tração não físicos na crista, e utilizou Regions of Interest para concentrar a busca do mecanismo em zonas compatíveis com as evidências de campo

4.1 Superfície crítica e mecanismo de ruptura

A busca global convergiu para uma superfície crítica tridimensional cuja geometria apresenta boa correspondência com o padrão de danos observado em campo, especialmente a zona de movimentações registradas a montante e a evolução das trincas durante períodos chuvosos. A superfície crítica identificada intercepta o aterro superficial em sua região mais suscetível.



Name	Colour	Support Type	Force Application	Force Orientation	Tensile Capacity (kN)	Plate Capacity (kN)	Bond Strength (kN/m)	Material Dependent	Length (m)	Design factors applied to this support
Tirante		Grouted Tieback	Active (Method A)	Parallel to Reinforcement	65	150	20	No	7	None

Name	Colour	Unit Weight (kN/m3)	Water Surface	Failure Criterion	Cohesion (kPa)	Phi (°)	Ru Value
Cortina		25	Water Table	Mohr Coulomb	200	30	
Aterro		18		Mohr Coulomb	8	29	0.15
Laterita		20	Water Table	Mohr Coulomb	60	32	
Saprólito de Filio		18	Water Table	Mohr Coulomb	25	25	
Itabirito Friável		25	Water Table	Mohr Coulomb	50	35	
Dolomito		20	Water Table	Generalized Hoek-Brown			

Figura 1: Superfície crítica tridimensional obtida no Slide3

A inclusão da fissura preexistente, representada no modelo via tension crack, foi determinante para suprimir soluções com bases em tração não representativas e para truncar a superfície na região onde o descolamento já havia sido identificado antes do colapso. Esse refinamento permitiu obter uma superfície crítica compatível não apenas com o fator de segurança calculado, mas com o modo de falha inferido a partir das evidências de campo.

4.2 Influência das cargas atuantes nos tirantes

Devido à ausência de dados de projeto, a retroanálise explorou variações nas cargas dos tirantes mantendo fixas as propriedades dos materiais e a condição hidrogeológica. Na configuração inicial, foram atribuídos 150 kN de capacidade axial admissível para cada tirante em regime Active/Method A, coerente com sistemas protendidos nos quais a força de suporte atua integralmente no equilíbrio global sem divisão pelo fator de segurança.

A calibração mostrou que a variação na capacidade dos tirantes exerce influência significativa sobre o fator de segurança, o que reforça o papel crítico da protensão adequada e de sua manutenção ao longo da vida útil da obra. A relação entre capacidade mobilizada e estabilidade global é não linear, com maior sensibilidade nas faixas inferiores de capacidade.

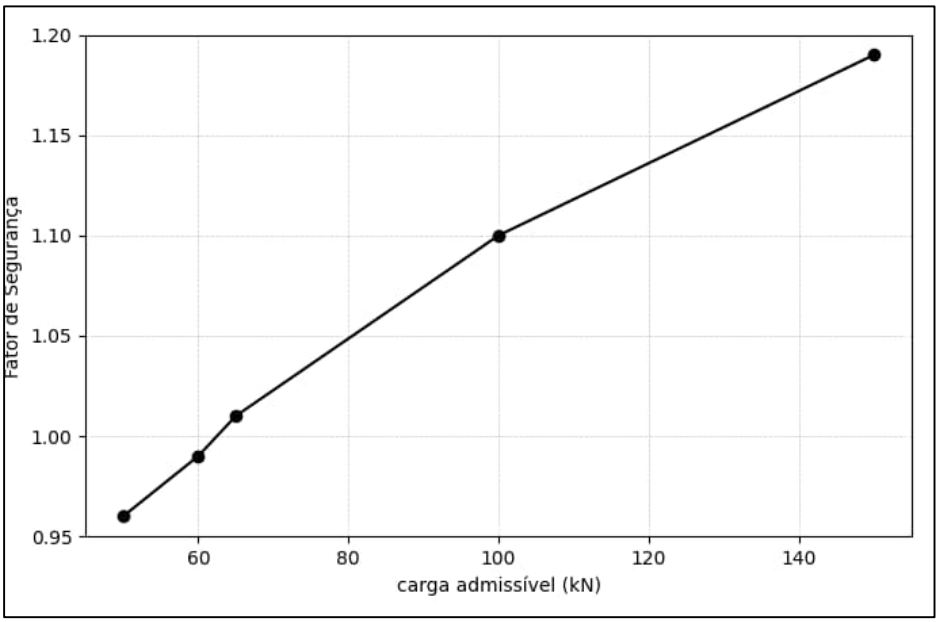


Figura 2: Relação entre a carga axial admissível dos tirantes e o fator de segurança obtido na retroanálise tridimensional.

A leitura do gráfico evidencia que uma relação próxima de linear entre o fator de segurança e capacidade axial admissível dos tirantes. Esse comportamento é consistente com a evolução histórica de danos relatada, especialmente durante períodos de infiltração pluviométrica, quando o aumento transitório das pressões neutras no aterro reduz as tensões efetivas e força maior demanda sobre os tirantes.

5 CONCLUSÕES

A retroanálise tridimensional da ruptura na cortina atirantada permitiu compreender, com maior precisão, a combinação de fatores que levou à instabilidade observada ao longo dos anos. A integração entre dados de campo, representação realista da geometria, uso de Ru = 0,15 para simular o incremento transitório de poropressões no aterro e a modelagem dos tirantes como Grouted Tieback em regime Active/Method A resultou em um modelo capaz de reproduzir de forma consistente o mecanismo crítico associado ao evento de ruptura.

Os resultados evidenciaram que a contenção operava em condição de segurança reduzida, fortemente sensível tanto às pressões neutras induzidas por infiltração quanto à capacidade mobilizada nos tirantes. A análise *Tensile Capacity* × Fator de Segurança reforçou essa conclusão ao demonstrar correlações lineares entre estas grandezas, indicando a falha ocorreu quando as capacidades admissíveis das ancoragens se aproximam de valores inferiores a 70 kN. Esse comportamento é compatível com a evolução dos danos relatados em campo, especialmente durante os períodos chuvosos, quando a infiltração no aterro reduzia as tensões efetivas e aumentava a demanda sobre o sistema de ancoragens.

A adoção de ferramentas do Slide3, como tension crack e Regions of Interest, contribuiu de forma significativa para orientar a busca do mecanismo crítico e evitar soluções incompatíveis com o comportamento real, aprimorando a confiabilidade dos resultados. A superfície crítica obtida mostra forte aderência às evidências geotécnicas e morfológicas registradas, reforçando a adequação da abordagem adotada.

Por fim, reconhece-se que o método de equilíbrio limite 3D oferece excelente capacidade para reproduzir o modo de falha, mas não representa deformações, redistribuições ou efeitos dependentes do tempo. Assim, para fins de projeto ou reforço definitivo, análises adicionais baseadas em métodos numéricos podem complementar a interpretação apresentada, especialmente quando o comportamento deformacional for relevante. Ainda assim, a retroanálise realizada fornece uma base técnica robusta para decisões de engenharia e constitui exemplo claro do valor da modelagem tridimensional no entendimento de rupturas em estruturas de contenção atirantadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMSON, L. W.; LEE, T. S.; SHARMA, S.; BOYCE, G. M. Slope Stability and Stabilization Methods. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002.

CLOUGH, G. W.; O'ROURKE, T. D. Construction induced movements of in-situ walls. In: Proceedings of the ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures. Ithaca, NY, p. 439-470, 1990.

CHEN, Z.; UGAI, K. Limit equilibrium and finite element analysis: a perspective of recent advances. In: CHEN, Z.; ZHANG, J.-M.; HO, K.; WU, F.-Q.; LI, Z.-K. (ed.). Landslides and Engineered Slopes: From the Past to the Future. London: CRC Press/Balkema, 2008. p. 25–38.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. Principles of Geotechnical Engineering. 9. ed. Boston: Cengage Learning, 2018.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. Soil Strength and Slope Stability. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1969.
TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

LITTLEJOHN, G. S. Studies relating to ground anchorage systems. 1996. Thesis — University of Edinburgh, Edinburgh, 1996.

HOVLAND, H. J. Three-dimensional slope stability analysis method. Journal of the Geotechnical Engineering Division, v. 103, n. 9, p. 971–986, 1977.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (U.S.). Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering. Washington, DC: National Academies Press, 1994.

ROCSCIENCE. Slide3 Help – Grouted Tieback (Support Properties). Toronto, 2025a. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/slide3/documentation/support-2/support-properties/grouted-tieback>. Acesso em: 7 fev. 2026

ROCSCIENCE. Slide3 Help – Active/Passive Force Application (Method A/Method B). Toronto, 2025b. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/slide3/documentation/support-2/support-properties/active-passive-force-application>. Acesso em: 7 fev. 2026.

ROCSCIENCE. Slide3 Help – Overview of Support Implementation. Toronto, 2025c. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/slide3/documentation/support-2/support-properties/overview-of-support-implementation>. Acesso em: 7 fev. 2026.

SABATINI, P. J.; PASS, D. G.; BACHUS, R. C. Ground anchors and anchored systems. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 1999. Geotechnical Engineering Circular No. 4, FHWA-IF-99-015.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. Soil Mechanics in Engineering Practice. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.