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/COBRAMSEG2026.4/29

Avaliação comparativa da estabilidade de uma cortina atirantada pelo método de Costa Nunes utilizando MEL e MEF

Fernando Henrique Neiva Pereira Ferreira
Doutorando em Geotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, fernando.h.ferreira@ufv.br

Josimar Lopes Martins
Engenheiro Civil, Centro Universitário de Viçosa, Viçosa, Brasil, josimarmartins567@gmail.com

RESUMO: A avaliação da estabilidade de taludes e o dimensionamento de estruturas de contenção são etapas fundamentais em projetos geotécnicos, especialmente em regiões suscetíveis a instabilidades induzidas por características geológicas e climáticas complexas. Este estudo apresenta uma análise comparativa entre o Método do Equilíbrio Limite (MEL) e o Método dos Elementos Finitos (MEF) aplicados à verificação da estabilidade de uma cortina atirantada dimensionada pelo método de Costa Nunes (1957), em um talude localizado na cidade de Viçosa-MG. A análise pelo MEL foi conduzida no software Slide 6.0 (Rocscience®), utilizando o método de Morgenstern-Price, enquanto a modelagem numérica pelo MEF foi realizada no RS2/Phase² (Rocscience®), considerando diferentes tipos e refinamentos de malha (T6 e Q4). Os resultados indicaram que, sem tirantes, o fator de segurança (FS) variou entre 1,15 e 1,34, enquanto com a instalação dos tirantes os valores aumentaram significativamente, atingindo até 3,38 nas análises com elementos refinados. Observou-se que o MEF apresentou maior sensibilidade à discretização e às propriedades do modelo, refletindo uma representação mais detalhada do comportamento tensão-deformação. Ambos os métodos atenderam aos requisitos mínimos de estabilidade estabelecidos pela NBR 11682:2009, confirmando a eficiência da cortina atirantada e a validade da integração entre abordagens analíticas e numéricas na engenharia geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Fator de Segurança, Redução da resistência ao cisalhamento, Método dos elementos finitos, Método do equilíbrio limite.

ABSTRACT: The evaluation of slope stability and the design of retaining structures are fundamental stages in geotechnical engineering projects, especially in regions prone to instability caused by complex geological and climatic conditions. This study presents a comparative analysis between the Limit Equilibrium Method (LEM) and the Finite Element Method (FEM) applied to the stability assessment of an anchored retaining wall designed using the Costa Nunes method (1957), in a slope located in Viçosa-MG, Brazil. The LEM analysis was performed using Slide 6.0 (Rocscience®) with the Morgenstern-Price method, while the FEM modeling was carried out with RS2/Phase² (Rocscience®), considering different mesh types and refinements (T6 and Q4). The results showed that, without anchors, the factor of safety (FS) ranged from 1.15 to 1.34, whereas with the installation of anchors, the FS values increased significantly, reaching up to 3.38 in refined mesh analyses. The FEM demonstrated higher sensitivity to mesh discretization and model parameters, providing a more detailed representation of the stress-strain behavior of the soil mass. Both methods met the minimum stability requirements established by NBR 11682:2009, confirming the efficiency of the anchored retaining system and reinforcing the validity of integrating analytical and numerical approaches in geotechnical engineering.

KEYWORDS: Slope stability, Factor of Safety, Shear strength reduction, Finite Element Method, Limit equilibrium method.

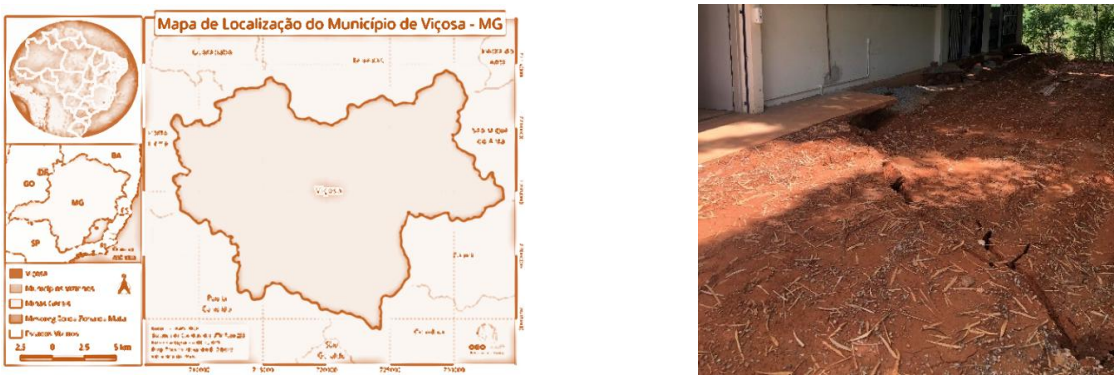
1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes e estruturas de contenção constitui um dos principais desafios da Engenharia Geotécnica, especialmente em áreas com condições geológicas e climáticas adversas. Entre as soluções adotadas, as cortinas atirantadas destacam-se pela eficiência na estabilização de terrenos instáveis, exigindo dimensionamento adequado para garantir a segurança global da estrutura. A análise de estabilidade envolve, fundamentalmente, a determinação do fator de segurança e da superfície crítica de ruptura, podendo ser realizada por métodos experimentais, numéricos ou de equilíbrio limite (Yang *et al*., 2023).

No Brasil, o método de Costa Nunes (1957), baseado no equilíbrio limite (MEL), é amplamente empregado devido à sua simplicidade e aplicação prática. Entretanto, o avanço computacional permitiu a adoção do Método dos Elementos Finitos (MEF), que considera o comportamento deformacional do maciço e fornece avaliação mais detalhada das tensões e deslocamentos. Assim, este estudo realiza a análise comparativa da estabilidade de uma cortina atirantada por meio do MEL e do MEF, discutindo diferenças, limitações e implicações práticas dessas abordagens no projeto geotécnico.

2 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em etapas sequenciais que compreenderam a caracterização do solo, o dimensionamento da cortina atirantada, a análise de estabilidade pelo método do equilíbrio limite (MEL), a modelagem numérica pelo método dos elementos finitos (MEF) e, por fim, a comparação dos resultados obtidos, considerando como área de estudo o talude desestabilizado localizado na cidade de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.



(a) (b)

Figura 1. (a) Localização e (b) Desnível do talude em relação ao prédio principal

2.1 Caracterização geotécnica do terreno

A etapa inicial consistiu no levantamento e tratamento dos dados geotécnicos provenientes de sondagens de simples reconhecimento (SPT) executadas no local do estudo, situado no município de Viçosa–MG. A partir dos boletins de sondagem, foram elaborados perfis geológico-geotécnicos, possibilitando a identificação das camadas do subsolo e a determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade.

Os valores de peso específico, coesão e ângulo de atrito interno foram definidos com base em correlações empíricas disponíveis na literatura geotécnica, adequadas às condições locais. Esses parâmetros serviram de entrada tanto para o dimensionamento da cortina quanto para as análises de estabilidade.

2.2 Dimensionamento da cortina atirantada

O dimensionamento do sistema de contenção foi realizado com base no método proposto por Costa Nunes (1957), amplamente utilizado no Brasil por sua simplicidade e aplicabilidade prática. O método baseia-se no equilíbrio limite das forças atuantes sobre a cortina, considerando o empuxo ativo do solo, o peso próprio da estrutura e a resistência mobilizada pelos tirantes e pelo solo de fundação. Foram determinadas as principais

grandezas envolvidas, tais como ângulo de inclinação da cortina, carga nos tirantes, espaçamento entre ancoragens, profundidade de embutimento e esforços internos. O AutoCAD® foi utilizado para o traçado geométrico e detalhamento da cortina, enquanto o Ftool® auxiliou no cálculo dos momentos fletores e esforços cortantes ao longo do painel.

2.3 Métodos de análise de estabilidade

2.3.1 Método de equilíbrio limite (MEL)

O método de equilíbrio limite (MEL) considera que o colapso do maciço ocorre de forma brusca, sem deformações significativas, mantendo o fator de segurança (FS) constante ao longo do plano de ruptura (Massad, 2010). Entre suas formulações, destacam-se os métodos das fatias e das cunhas, nos quais o talude é dividido em seções para análise do equilíbrio de forças e momentos, considerando as tensões normais e tangenciais na base de cada fatia (Gerscovich, 2016).

A estabilidade é avaliada a partir do equilíbrio entre esforços solicitantes e resistentes, sendo o fator de segurança obtido pela razão entre ambos (Guidicini e Nieble, 1984). Dentre os métodos de análise, os mais rigorosos são os de Spencer (1967) e Morgenstern & Price (1965), pois satisfazem simultaneamente as condições de equilíbrio de forças e momentos (Krahn, 2003).

A análise de estabilidade global foi realizada no software Slide 6.0® (Rocscience), empregando o método rigoroso de Morgenstern e Price (1965). Essa abordagem considera superfícies potenciais de ruptura não circulares e o critério de resistência de Mohr-Coulomb, sendo conduzida de forma automatizada com o recurso de auto-refinamento da superfície crítica. As análises foram realizadas para duas condições distintas: sem a presença de tirantes, representando a condição inicial de instabilidade do talude; com a inclusão dos tirantes dimensionados, avaliando a eficiência do sistema de contenção projetado.

Foram obtidos os respectivos fatores de segurança (FS) para cada condição, comparando-os aos limites mínimos estabelecidos pela NBR 11682:2009 - Estabilidade de Encostas, que recomenda FSmín ≥ 1,50 para casos com risco à vida humana e danos materiais.

2.3.2 Método de elementos finitos (MEF)

O método dos elementos finitos (MEF), aplicado à análise de estabilidade de taludes, utiliza a abordagem de redução da resistência ao cisalhamento (Shear Strength Reduction - SSR) para o cálculo do fator de segurança. Segundo Berisavljevic *et al*. (2015), o MEF é uma técnica numérica destinada à obtenção de soluções aproximadas para problemas de valor de contorno associados a equações diferenciais parciais, permitindo avaliar o comportamento mecânico do solo sob diferentes condições de carregamento e geometria. Os materiais analisados são geralmente representados por um modelo elasto-plástico baseado no critério de ruptura de Mohr-Coulomb, que considera parâmetros de resistência ao cisalhamento, módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e parâmetros de deformação, embora estes últimos exerçam influência limitada sobre o fator de segurança.

Entre as vantagens do método SSR em relação ao MEL, destacam-se a dispensa da necessidade de assumir uma distribuição prévia de forças cisalhantes, a determinação direta da superfície crítica de ruptura a partir da tensão de cisalhamento e a capacidade de representar condições geotécnicas complexas, incluindo deslocamentos, tensões e pressões neutras (Chiwaye, 2010). A formulação do MEF consiste na divisão do domínio contínuo em sub-regiões de geometria simples, denominadas elementos finitos, cuja precisão depende do tipo, quantidade e refinamento dos elementos, interligados por nós, sendo a convergência numérica assegurada à medida que o tamanho dos elementos tende a zero e o número de nós tende ao infinito (Souza, 2003).

A modelagem numérica foi conduzida no software RS2® (Rocscience), com o objetivo de reproduzir o comportamento tensão-deformação do maciço e da cortina atirantada, adotando as mesmas condições geométricas e parâmetros geotécnicos definidos na análise MEL para permitir comparação direta entre os resultados. As malhas numéricas foram geradas em duas configurações: sem e com refinamento, variando o tipo de elemento entre triangulares de seis nós (T6) e quadriláteros de quatro nós (Q4) (Figura 2), totalizando oito análises distintas. Para as simulações padrão, utilizou-se aproximadamente 50.000 elementos, enquanto

nas análises refinadas aplicou-se um fator de graduação de 0,1 e comprimento médio de elemento igual a 0,5 m, com o objetivo de aprimorar a precisão nos campos de tensão e deslocamento, especialmente na interface solo-estrutura e na superfície crítica de ruptura.



(a) (b)

Figura 2. Esquematização do tipo de elemento (a)T6 e (b)Q4

As condições de contorno foram impostas de modo a restringir deslocamentos verticais na base e horizontais nas laterais do domínio modelado, garantindo comportamento compatível com o confinamento natural do talude. Os tirantes foram representados por elementos de tensão axial, com as forças de ancoragem definidas conforme o dimensionamento obtido pelo método de Costa Nunes.

2.4 Análise comparativa dos resultados

Após a execução das análises pelo MEL e pelo MEF, os resultados foram comparados considerando o valor do fator de segurança global (FS), a configuração e profundidade da superfície crítica de ruptura, a distribuição de tensões e deslocamentos no maciço e a eficiência do sistema de contenção com tirantes, permitindo avaliar a consistência e a precisão de ambos os métodos, identificar diferenças entre o equilíbrio limite e a modelagem numérica e verificar se os valores obtidos atendem aos critérios de estabilidade estabelecidos pela NBR 11682:2009, assegurando assim o desempenho seguro da estrutura analisada.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização do terreno

A análise geotécnica do talude identificou três camadas principais com características distintas: a camada superior de silto arenoso, de menor resistência; a camada intermediária de argila arenosa, com resistência e rigidez médias; e a camada profunda de silto arenoso reforçado, a mais resistente e determinante para a estabilidade global.

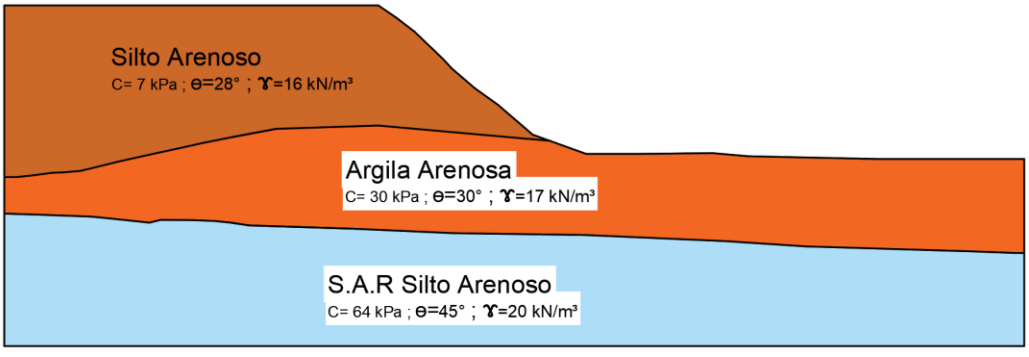


Figura 3. Seção típica e dados geotécnicos do talude desestabilizado

3.2 Dimensionamento da Cortina Atirantada

Para o dimensionamento da cortina atirantada, considerou-se um peso específico do solo de 17 kN/m³, coesão de 7 kPa e ângulo de atrito interno de 28°, representando os valores mais críticos das camadas analisadas. As sobrecargas atuantes foram 25 kN/m², referente ao tráfego, e 77 kN/m², associada à carga permanente do edifício. O talude possui extensão de 35 m e altura de 6 m, com fator de segurança desejado de F_s = 1,75. O dimensionamento resultou em 28 tirantes, sendo 14 horizontais e 2 verticais, com espaçamentos de 2,5 m horizontalmente e 3 m verticalmente, e comprimentos de 12 m e 10 m para os tirantes de primeira e segunda fileira, respectivamente, com ângulo de inclinação de 20°. A força de trabalho dos tirantes foi calculada em 39 tf, atendendo aos critérios de resistência, estabilidade e segurança do talude, incluindo verificação de punção.

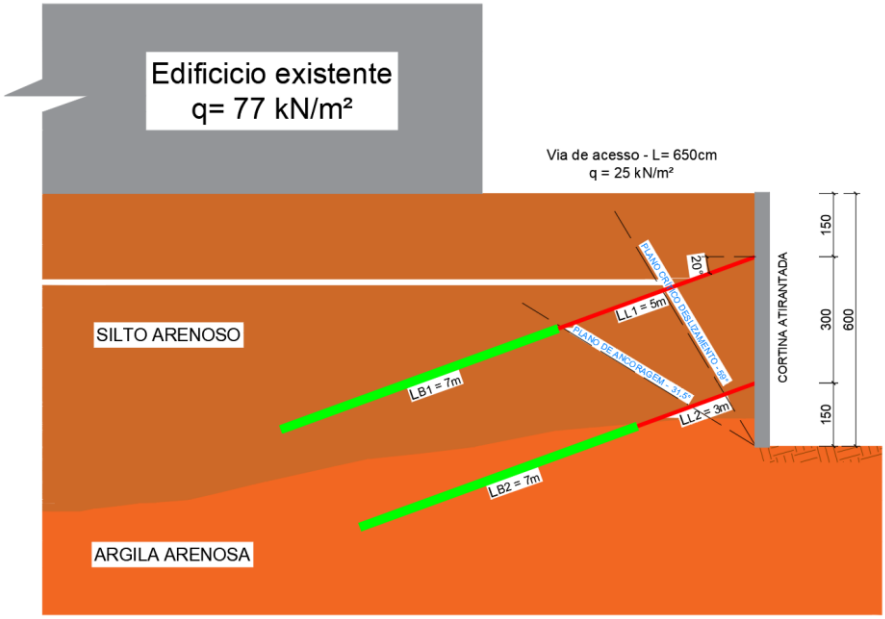
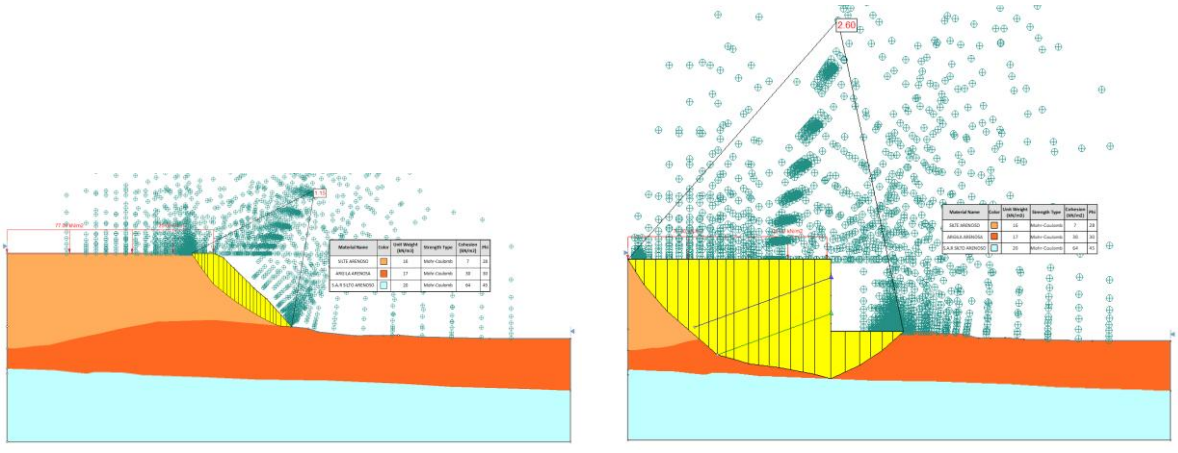


Figura 4. Seção na cortina atirantada - Vista lateral Esquerda

3.3 Análises de Estabilidade

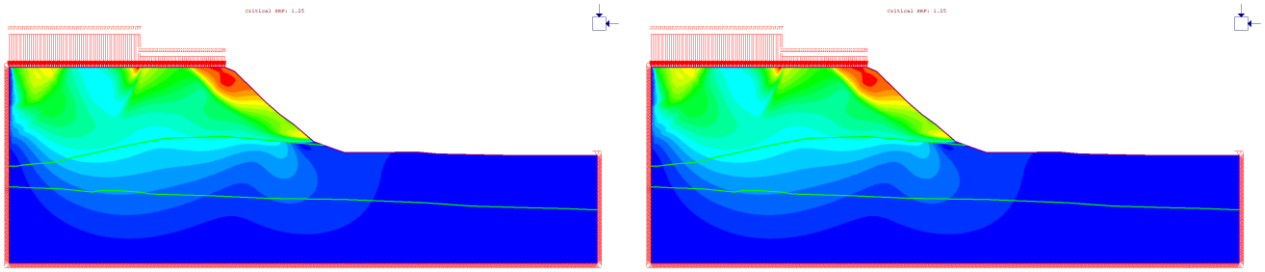
3.3.1 Método de equilíbrio limite (MEL)



(a) (b)

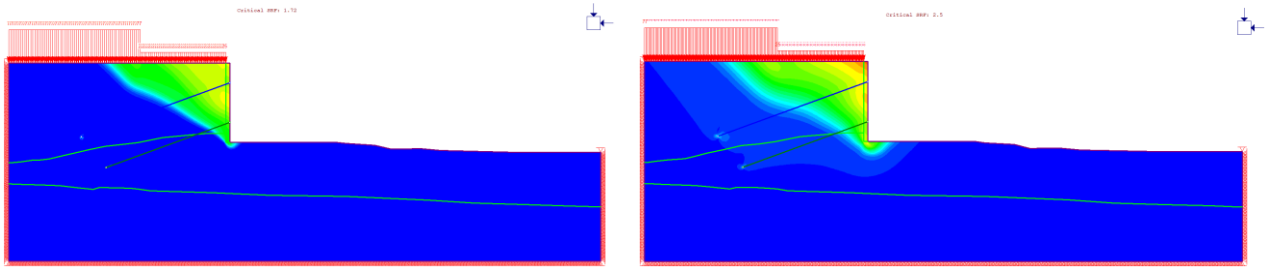
Figura 5. FS pelo MEL (a) Sem tirante - FS=1,15 (b) Com tirante - FS=2,60

3.3.2 Método de elementos finitos (MEF) – Sem Refinamento



(a) (b)

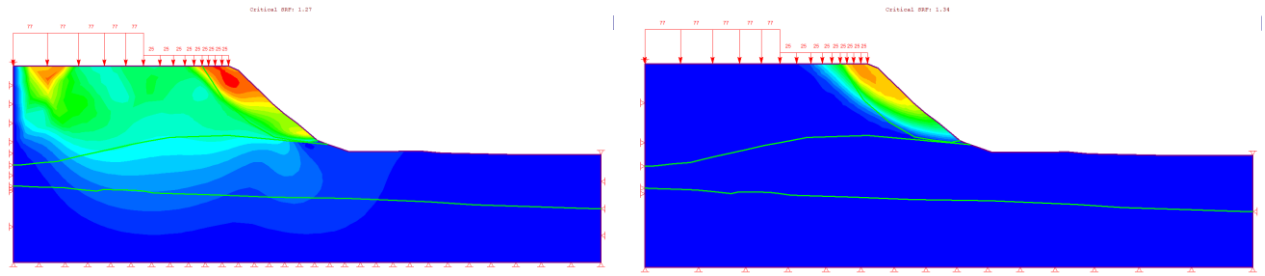
Figura 6. FS pelo MEF - Sem tirante (a) T6 - SRF=1,25 e (b) Q4 - SRF=1,27



(a) (b)

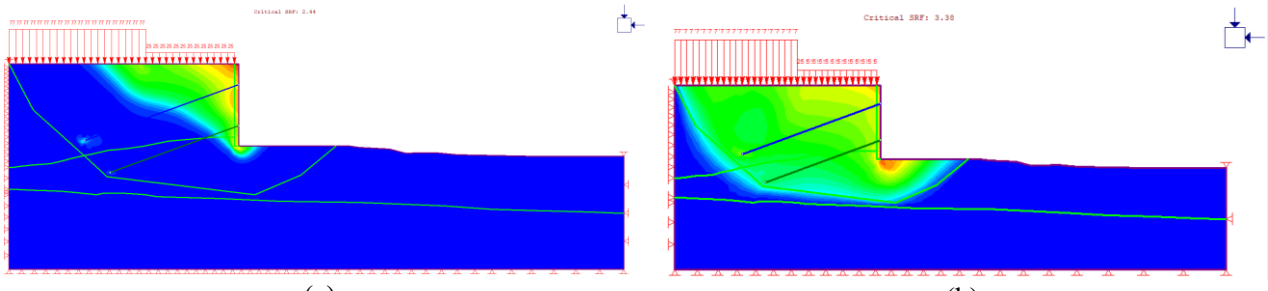
Figura 7. FS pelo MEF - Com tirante (a) T6 - SRF=1,72 e (b) Q4 - SRF=2,5

3.3.2 Método de elementos finitos (MEF) – Com Refinamento



(a) (b)

Figura 8. FS pelo MEF - Sem tirante (a) T6 - SRF=1,27 e (b) Q4 - SRF=1,34

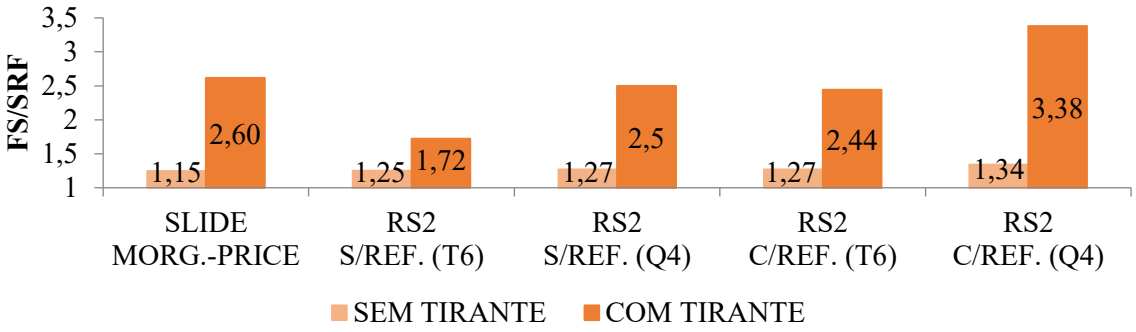


(a) (b)

Figura 9. FS pelo MEF - Com tirante (a) T6 - SRF=2,44 e (b) Q4 - SRF=3,38

3.3 Análise comparativa dos FS

Gráfico 1. Resultados dos FS



A comparação entre as análises realizadas pelo método do equilíbrio limite (MEL), utilizando o programa Slide 6.0 com o método de Morgenstern-Price, e pelo método dos elementos finitos (MEF), por meio do software RS2/Phase², evidenciou diferenças significativas nos valores do fator de segurança (FS), tanto na condição sem tirantes quanto na condição reforçada. Na situação sem tirantes, o Slide 6.0 apresentou FS = 1,15, valor ligeiramente inferior aos obtidos pelo MEF, que variaram entre 1,25 e 1,34, dependendo do tipo e do refinamento da malha. Essa diferença está relacionada à forma como cada método representa o comportamento tensão-deformação do solo. Enquanto o MEL baseia-se no equilíbrio estático de forças e momentos, o MEF considera a distribuição contínua de tensões e deformações no interior do maciço, permitindo uma análise mais detalhada e, geralmente, mais conservadora da estabilidade. Observou-se também que o refinamento da malha influenciou positivamente a precisão numérica, refletindo maior coerência nos resultados à medida que os elementos se tornaram menores e mais uniformemente distribuídos.

Na condição com tirantes, constatou-se um aumento expressivo dos fatores de segurança em todas as análises, comprovando a eficiência da cortina atirantada no controle da instabilidade. O Slide 6.0 apresentou FS = 2,60, enquanto as simulações no RS2/Phase² resultaram em valores entre 1,72 e 3,38, sendo o maior correspondente ao modelo com elementos quadriláteros refinados (Q4). Essa variação reflete a sensibilidade do MEF à discretização da malha e à forma de representação das interações solo-estrutura. O valor mais elevado obtido para o modelo Q4 refinado pode ser atribuído à maior rigidez numérica característica dos elementos quadriláteros, que apresentam deformações menores e uma distribuição mais regular das tensões internas. O refinamento da malha potencializa esse comportamento, melhorando a representação dos campos de tensão, mas também reduzindo a mobilização das tensões cisalhantes, o que tende a superestimar o fator de segurança. Além disso, a precisão aumentada na interface solo-estrutura contribui para uma melhor distribuição das forças de ancoragem dos tirantes, diminuindo concentrações locais de tensões e elevando o FS global. Outro aspecto relevante é a própria formulação do método de redução da resistência ao cisalhamento (Shear Strength Reduction - SSR), que pode amplificar o efeito da rigidez dos elementos, especialmente quando são adotados critérios de convergência mais rigorosos e incrementos menores de redução, resultando em valores de FS numericamente superiores.

De modo geral, o método do equilíbrio limite (MEL) apresentou resultados compatíveis com a literatura técnica e comumente empregados na prática de engenharia, fornecendo uma estimativa global e segura da estabilidade do talude. O método dos elementos finitos (MEF), por sua vez, mostrou-se mais sensível à modelagem geométrica e às propriedades do solo, reproduzindo com maior fidelidade o comportamento não linear e as redistribuições locais de tensões, especialmente nas regiões próximas aos tirantes. Embora o FS = 3,38 obtido na análise com elementos Q4 refinados não represente necessariamente uma condição física mais estável, ele destaca a influência que o refinamento e o tipo de elemento exercem sobre a resposta numérica.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa entre o método do equilíbrio limite (MEL) e o método dos elementos finitos (MEF) aplicada à avaliação da estabilidade de uma cortina atirantada dimensionada pelo método de Costa

Nunes demonstrou que ambos os procedimentos apresentam resultados coerentes e complementares. O MEL, implementado no software Slide 6.0, forneceu estimativas consistentes do fator de segurança global, adequadas para o dimensionamento preliminar e em conformidade com os critérios da NBR 11682:2009. Já o MEF, aplicado via RS2/Phase², permitiu uma compreensão mais abrangente do comportamento tensão-deformação do maciço, evidenciando a influência da discretização da malha e do tipo de elemento sobre os resultados.

Os valores mais elevados de fator de segurança obtidos com elementos quadriláteros refinados (Q4) indicam a sensibilidade do modelo numérico à rigidez e à precisão da malha, reforçando a necessidade de calibração criteriosa para evitar interpretações superestimadas da estabilidade. Apesar dessas variações, todas as simulações confirmaram a eficácia da cortina atirantada em garantir condições seguras de contenção, com fatores de segurança acima do mínimo exigido pela norma.

Dessa forma, conclui-se que o uso combinado dos métodos MEL e MEF representa uma estratégia robusta para a análise e verificação de sistemas de contenção, unindo a simplicidade e aplicabilidade prática do equilíbrio limite à capacidade do modelo numérico de capturar efeitos não lineares e interações solo-estrutura com maior realismo. Essa abordagem integrada contribui para projetos mais seguros, otimizados e tecnicamente fundamentados na engenharia geotécnica contemporânea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 116812. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.

Berisavljevic Z., *et al.* (2015) Slope stability analysis using limit equilibrium and strength reduction methods. *Gradevinar*, 67 (10), p. 975-983.

Chiwaye H. (2010) *A Comparison of the Limit Equilibrium and Numerical Modelling Approaches to Risk Analysis for Open-Pit Mine Slopes.* University of the Witwatersrand, Johannesburg.

Gerscovich D., *et al.* (2016) *Estabilidade de taludes.* 2ºed*,* São Paulo: Oficina de Textos.

Guidicini G., Nieble C. (2011) *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. 2. ed, São Paulo: Blucher, 1984. (reimpr. 2011).

Krahn J. (2003) *Stability Modeling with SLOPE/W: An Engineering Methodology*. Geo Slope International Ltd. Canada. 2003.

Souza R. (2003) *O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor.* Notas de Aulas - Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Civil Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia. Belém.

Y*ang* Y.*, et al.* (2023) Investigation of slope stability based on strength-reduction based numerical manifold method and generalized plastic strain. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 164