



Influência da Capacidade de ancoragem dos tirantes no Fator de Segurança do emboque do túnel no Rodoanel Norte (SP): análise por Equilíbrio Limite e Elementos Finitos

André Querelli

Engenheiro Civil, Msc. Geotecnica, SyncGeo Engenharia e Consultoria Geotecnica, Jundiaí, Brasil,
andre.querelli@syncgeo.com.br

Joana Rott

Engenheira Civil, SyncGeo Engenharia e Consultoria Geotecnica, Jundiaí, Brasil,
joana.rott@syncgeo.com.br

RESUMO: As contenções do Rodoanel Norte combinam diferentes sistemas de estabilização, como solo grampeado, tirantes e gabiões, que atuam conjuntamente na contenção de um maciço com aproximadamente 80 metros de altura. Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da capacidade de ancoragem dos tirantes no fator de segurança da contenção associada ao Túnel, obra que conectará as rodovias Fernão Dias (BR-381) e Presidente Dutra (BR-116). Foram considerados três cenários de resistência por aderência solo-bulbo (50%, 75% e 100% da capacidade nominal dos tirantes), definidos a partir das incertezas quanto à qualidade de execução dos tirantes já instalados e da necessidade de representar diferentes níveis de desempenho esperados em campo. Para cada cenário, o fator de segurança (FS) foi calculado com base em duas metodologias distintas: o Método do Equilíbrio Limite (LEM) e a Análise por Elementos Finitos (MEF). Os resultados indicaram que os valores de FS obtidos pelo MEL foram sistematicamente inferiores aos da MEF, variando entre 1,123 e 1,262. Já os FS obtidos por MEF apresentaram variação entre 1,394 e 1,501. A comparação entre as metodologias evidencia a importância de se avaliar o fator de segurança com o apoio de abordagens distintas, principalmente em estruturas com múltiplos mecanismos de contenção. Os resultados demonstram a sensibilidade do sistema à capacidade de ancoragem dos tirantes, reforçando a necessidade de análises robustas para a tomada de decisão em obras geotécnicas complexas.

PALAVRAS-CHAVE: Capacidade de ancoragem, Tirantes, Estabilidade de contenção, Rodoanel.

ABSTRACT: The retaining structures of the Rodoanel Norte highway combine different stabilization systems, including soil nailing, ground anchors, and gabion segments, working together to retain an embankment approximately 80 meters high. This study aims to evaluate the influence of ground anchor capacity on the safety factor of the retaining system associated with Tunnel, which will connect the Fernão Dias (BR-381) and Presidente Dutra (BR-116) highways. Three scenarios of bond strength between the soil and the anchor bulb (50%, 75%, and 100% of the nominal capacity) were considered. These scenarios were defined due to uncertainties regarding the actual execution quality of the installed anchors and the need to represent different levels of expected field performance. For each scenario, the safety factor (SF) was calculated using two different methodologies: Limit Equilibrium Method (LEM) and Finite Element Method (FEM). The results showed that the SF values obtained using LEM were consistently lower, ranging from 1.123 to 1.262, while those obtained with FEM ranged from 1.394 to 1.501. The comparison between methodologies highlights the importance of evaluating the safety factor using different approaches, especially in structures with multiple stabilization mechanisms. The findings demonstrate the system's sensitivity to the anchorage capacity and reinforce the need for robust analysis in complex geotechnical works.

KEYWORDS: Anchoring capacity, Ground anchors, Retaining structure stability, Rodoanel.



1 INTRODUÇÃO

Segundo Silva (2015), os tirantes são elementos fundamentais na ancoragem e reforço de maciços, contribuindo para a segurança estrutural durante o processo construtivo, porém sua execução está sujeita a variabilidades e incertezas que podem comprometer a confiabilidade do sistema de contenção (Silva, 2015). A preparação inadequada do bulbo de ancoragem, a variabilidade dos materiais, a excentricidade na protensão e as condições geotécnicas locais são exemplos de desafios enfrentados durante a execução que trazem incerteza no desempenho dos tirantes (Pereira, 2021).

Um exemplo dessa situação ocorre no Túnel 501, situado no Lote 5 da divisão de obras da antiga DERSA, integrante do Trecho Norte do Rodoanel Metropolitano de São Paulo. Sua implantação integral viabiliza a conexão entre as regiões da Rodovia Fernão Dias (Lote 4) e da Rodovia Presidente Dutra (Lote 6), representando, portanto, um elemento fundamental para a funcionalidade do sistema viário em questão. A concessionária SP Serra, atual responsável pelo contrato de concessão do trecho, tem priorizado a finalização desta estrutura, cujo emboque Oeste foi afetado por um episódio de instabilidade em 2014, acarretando a paralisação das atividades de escavação desde então. Na região do emboque Oeste forma-se como que um anfiteatro (Figura 1) onde, para a estabilidade dos túneis, foi necessário sistema de contenções composto de cortinas atirantadas e solo grampeado, em faixas intercaladas entre si, dando suporte ao maciço.



Figura 1. Fotografia do local.

A avaliação da estabilidade de sistemas atirantados, como o do emboque Oeste, depende diretamente da metodologia de análise adotada. Métodos como o Método dos Estados Limites (MEL) e o Método dos Elementos Finitos (MEF) são amplamente utilizados, mas apresentam diferenças significativas em suas abordagens. Enquanto o MEL oferece uma análise simplificada baseada no equilíbrio limite, o MEF realiza uma modelagem detalhada e numérica do comportamento estrutural e do solo, podendo capturar efeitos complexos que o MEL não considera (Rebêlo, 2021).

A segurança e a eficiência do projeto dependem diretamente da capacidade destes métodos em prever o comportamento real das estruturas, o que reforça a importância de estudos que abordem a incerteza na execução e a validação dos modelos analíticos e numéricos (Gomes Filho, 2023).

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo avaliar o fator de segurança da contenção do emboque Oeste do Túnel 501 com base em duas abordagens metodológicas distintas: o método do Equilíbrio Limite (LEM) e o método dos Elementos Finitos (FEM). A análise considerou três cenários distintos de resistência por aderência solo-bulbo - 50%, 75% e 100% da capacidade nominal dos tirantes -, definidos a partir das incertezas associadas à qualidade de execução dos tirantes já instalados, bem como da necessidade de representar diferentes níveis de desempenho esperados em campo. Essa abordagem permitiu avaliar contenção projetada e a sensibilidade do sistema à variabilidade nos parâmetros de ancoragem, destacando a relevância da comparação entre o MEL e o MEF.



2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização do Local

A estratigrafia da região inicia-se com solo residual silte-argiloso com detritos orgânicos, seguido por solo de alteração de rocha, mais coesivo e compacto, com NSPT acima de 9 golpes, atingindo espessura de até 23 m na área do emboque. Abaixo, encontra-se a rocha alterada mole (RAM), intensamente fraturada e de baixa recuperação, e, em seguida, o maciço rochoso alterado duro (RAD), com variação no grau de alteração e fraturamento, evidenciando a heterogeneidade local do maciço. A Figura 2 demonstra a elevação frontal da contenção elaborada pela Maffei Engenharia e as camadas de solo.

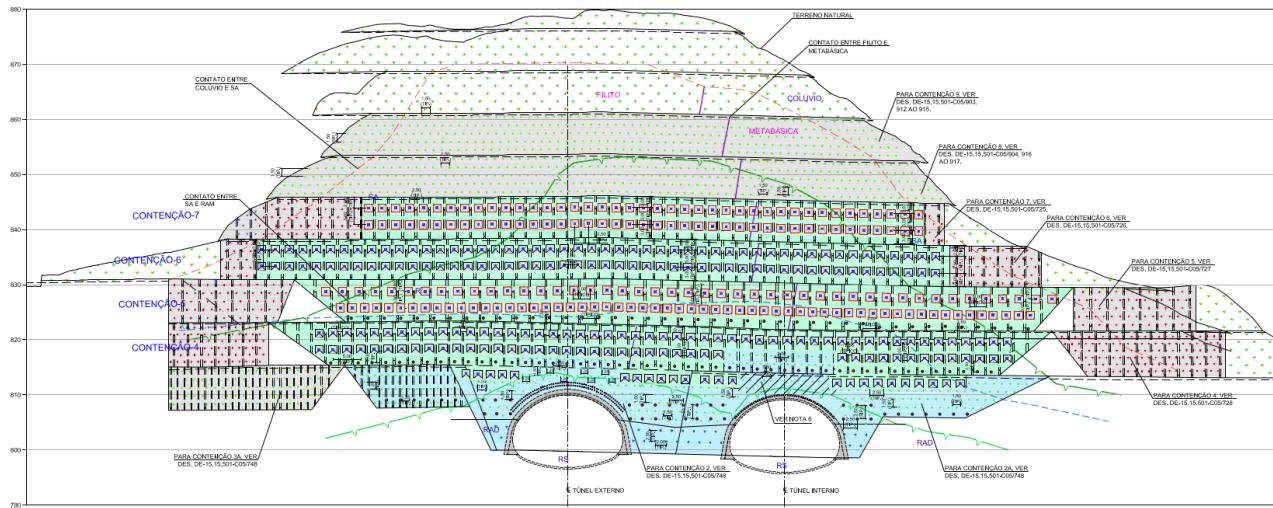


Figura 2. Elevação frontal.

3 PREMISSAS DE CÁLCULO

3.1 Capacidade dos Tirantes

Com o objetivo de explorar diferentes cenários de aumento na capacidade dos tirantes, foram realizados cálculos variando os seguintes parâmetros:

Tensile Capacity: corresponde à capacidade de resistência estrutural do elemento, referente à barra ou cordoalha.

Plate Capacity: capacidade de resistência à tração na ligação entre o elemento de ancoragem e a face da contenção.

Bond Strength: resistência de aderência na interface solo-bulbo, correspondente à ruptura por cisalhamento ao longo do bulbo de ancoragem.

3.2 Cenários de análise

A seguir, são descritos os três cenários considerados na análise, os quais foram definidos a partir da variação da capacidade de aderência solo-bulbo dos tirantes, enquanto os parâmetros de ancoragem do solo grampeado e os parâmetros de resistência dos solos foram mantidos inalterados em todas as simulações:

Cenário I: Considera 50% dos valores de Tensile Capacity, Plate Capacity e Bond Strength da Figura 4

Cenário II: Considera 75% dos valores de Tensile Capacity, Plate Capacity e Bond Strength.

Cenário III: Considera 100% dos valores de Tensile Capacity, Plate Capacity e Bond Strength.

3.3 Características dos dispositivos de ancoragem

Na Figura 3 são apresentados os parâmetros dos tirantes e grampos utilizados nas análises de estabilidade. Nela, está representado apenas 50% da capacidade nominal dos tirantes, valor adotado para o cenário inicial, o qual será variado nos demais cenários ao longo do estudo.

Support Name	Color	Type	Force Application	Out-Of-Plane Spacing (m)	Tensile Capacity (kN)	Plate Capacity (kN)	Shear Capacity (kN)	Compression Capacity (kN)	Bond Length (m)	Bond Strength (kN/m)	Material Dependent	Force Orientation
T85_lanc10		Grouted Tieback	Active (Method A)	2.5	850	850	0	0	15	84.5	No	Parallel to Reinforcement
T80_lanc9 esp 2,5m		Grouted Tieback	Active (Method A)	2.5	850	850	0	0	9	94.5	No	Parallel to Reinforcement
Grampo		Soil Nail	Passive (Method B)	1.5	194	194	0	0		18.9	No	Parallel to Reinforcement
T80_lanc9 esp 3,0		Grouted Tieback	Active (Method A)	3	850	850	0	0	9	94.5	No	Parallel to Reinforcement
T80_lanc9 esp 2,2m		Grouted Tieback	Active (Method A)	2.2	850	850	0	0	9	94.5	No	Parallel to Reinforcement
Enfilagem		Soil Nail	Passive (Method B)	0.4	113	113	0	0		45	No	Parallel to Reinforcement
T100 esp 2,2		Grouted Tieback	Active (Method A)	2.2	1000	1000	0	0	12	94.5	No	Parallel to Reinforcement

Figura 3. Tabela de parâmetros das ancoragens utilizadas na análise de estabilidade para 50% da capacidade nominal dos tirantes.

3.4 Definição dos parâmetros de resistência dos solos

A definição dos parâmetros de resistência dos materiais foi realizada com base nos ensaios em correlações empíricas com os valores de NSPT disponíveis nos resultados das sondagens, na experiência do técnico e em consulta a referências bibliográficas, como por exemplo Joppert Jr. (2007) e Guidicini & Nieble (1976). Os parâmetros de resistência do solo adotados são apresentados abaixo:

Camada	Material	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	v	E (kPa)
1	Colúvio	17	10	25	0,3	7500
2	SAR_F1	19	25	25	0,3	20000
3	SAR_F2	19	40	28	0,3	35000
4	RAM_F	22	30	30	0,3	75000
5	RAD_F	24	100	38	0,3	110000
6	RS_F	24	150	38	0,3	200000
7	RAM_F_anis30	22	35	30	0,3	90000
8	Túnel	20	---	---	0,2	21000000

Figura 4. Parâmetros adotados nas modelagens.

3.5 Método de cálculo, software e critério de ruptura

Para o cálculo em equilíbrio limite foi utilizado o software Slide 2D da Rosciense, aplicando-se a teoria do equilíbrio limite em superfícies circulares (dado o caráter atritivo dos solos), através do método de Morgenstern-Price e Spencer (o que resultar menor valor de FS). Já para a modelagem em elementos finitos foi utilizado o software Plaxis, com uma representação bidimensional em estado plano de deformação (Plane Strain). O domínio foi discretizado por meio de elementos triangulares de 15 nós. O modelo numérico foi composto por 6.927 elementos e 56.253 nós, garantindo refinamento adequado para capturar os comportamentos locais e globais da contenção.

O comportamento mecânico dos solos foi representado por meio do modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, que, apesar de sua simplicidade, é amplamente empregado em estudos de estabilidade devido à sua capacidade de representar satisfatoriamente o comportamento tensão-deformação de solos em problemas envolvendo escorregamentos e contenções.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de Estabilidade

Os três cenários de análise de estabilidade para o emboque do Túnel 501 são demonstrados a seguir.

4.1.1 Cenário I

A Figura 5 mostra a análise de estabilidade realizada por equilíbrio limite e na Figura 6 por elementos finitos.

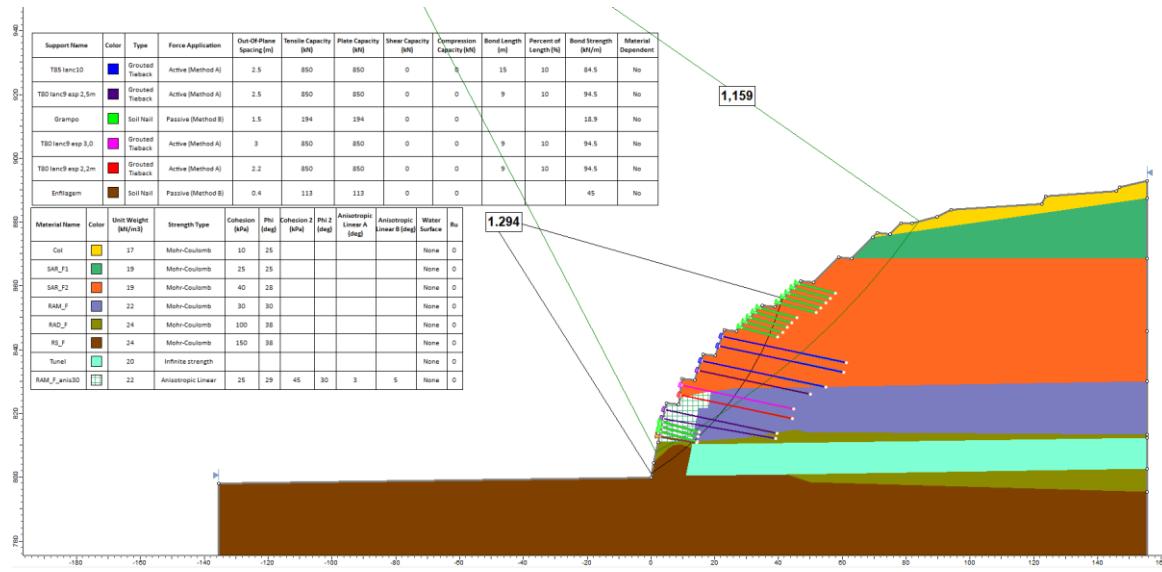


Figura 5. Análise de estabilidade no cenário I – Equilíbrio Limite (FS = 1,159).

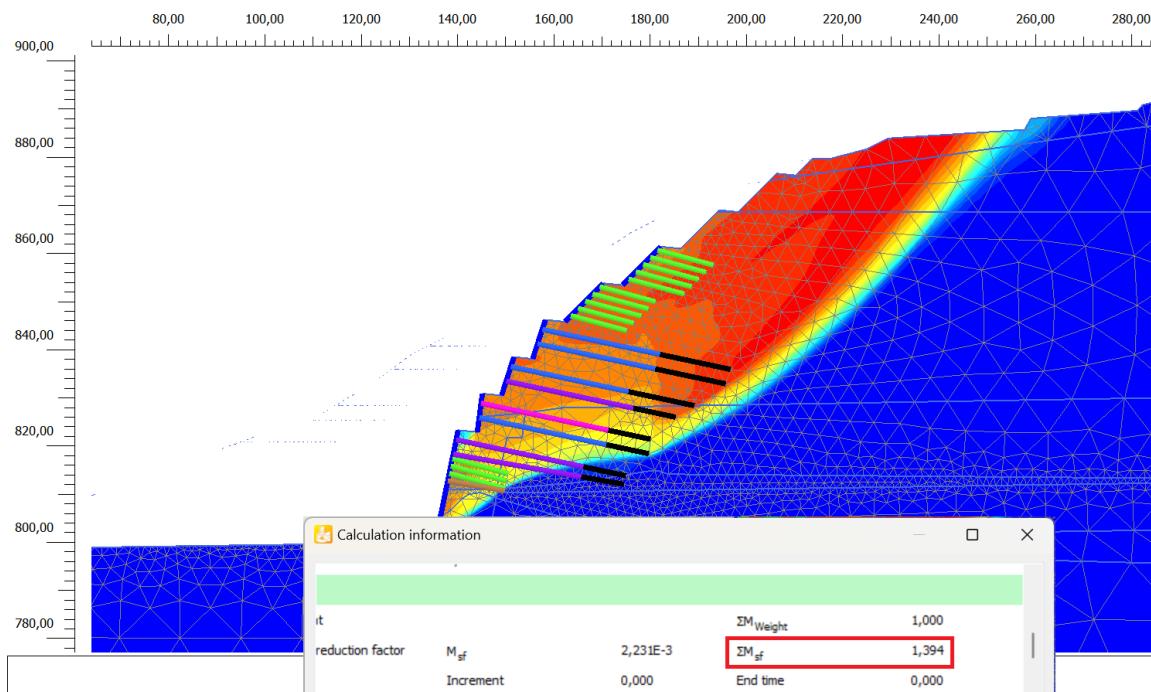


Figura 6. Análise de estabilidade no cenário I – Elementos Finitos (FS = 1,394).



4.1.2 Cenário II

A Figura 7 mostra a análise de estabilidade realizada no software citado para o equilíbrio limite e a Figura 8 para os elementos finitos.

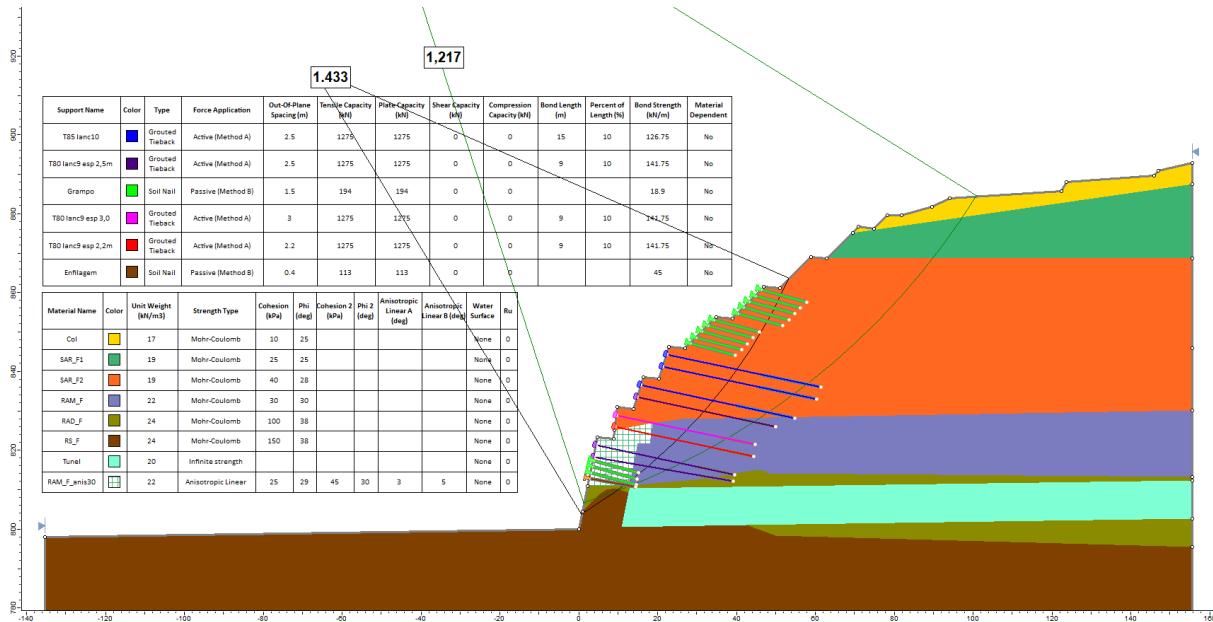


Figura 7. Análise de estabilidade no cenário II – Equilíbrio Limite ($\text{FS} = 1,217$).

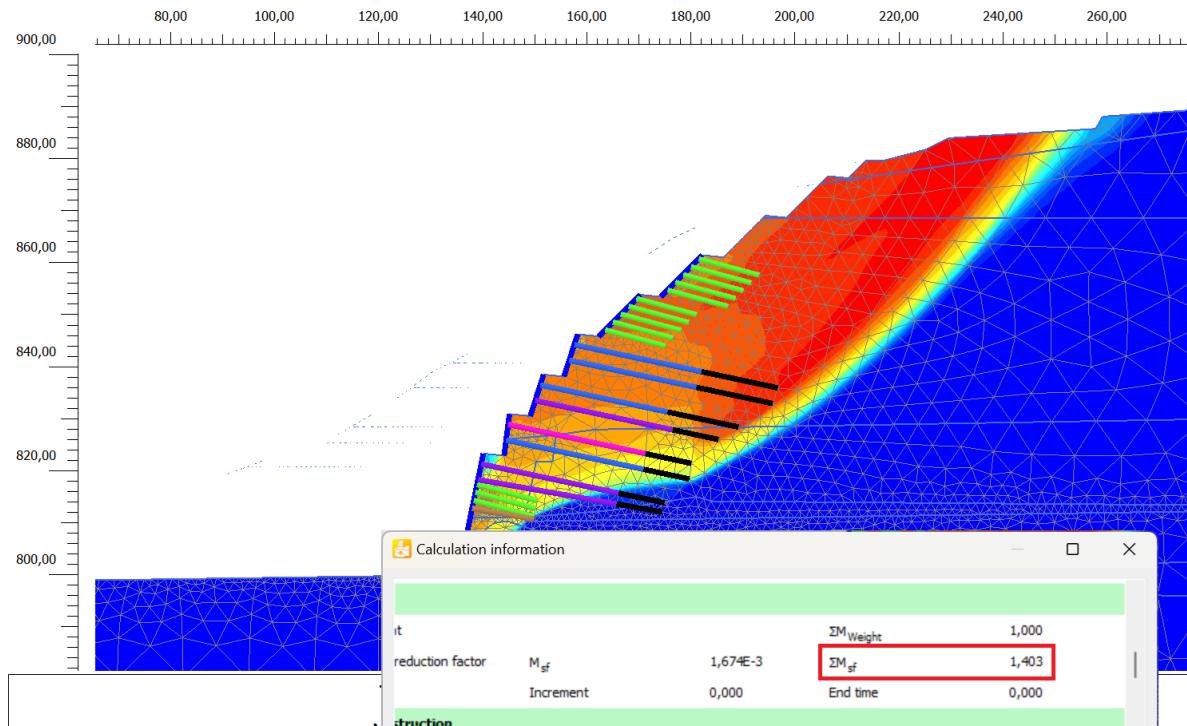


Figura 8. Análise de estabilidade no cenário II – Elementos Finitos ($\text{FS} = 1,403$).



4.1.3 Cenário III

A Figura 9 mostra a análise de estabilidade realizada na metodologia do equilíbrio limite e a Figura 10 para os elementos finitos:

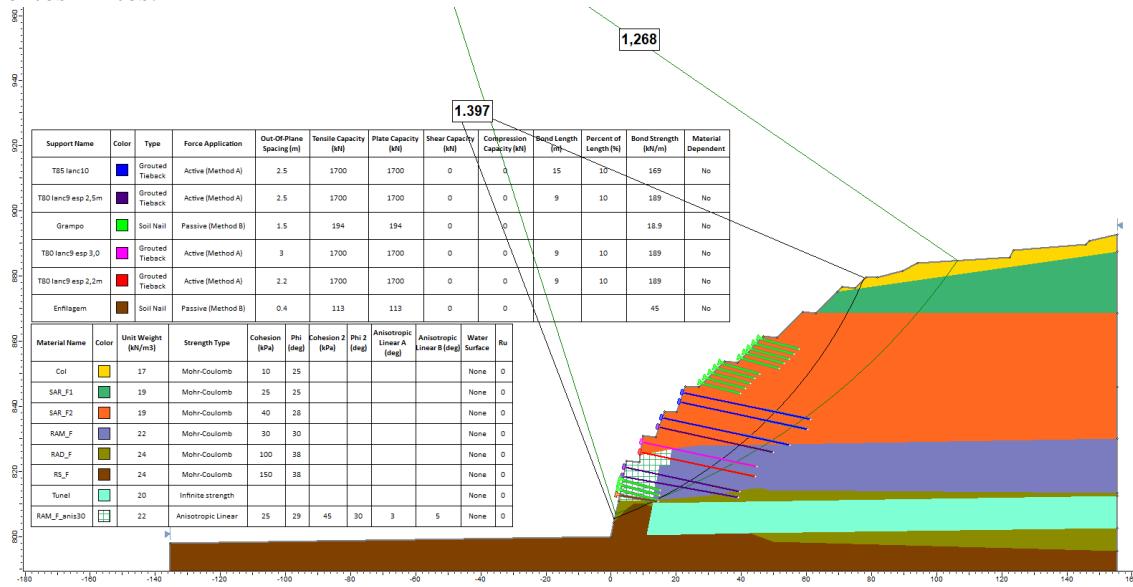


Figura 9. Análise de estabilidade no cenário III – Equilíbrio Limite (FS = 1,268).

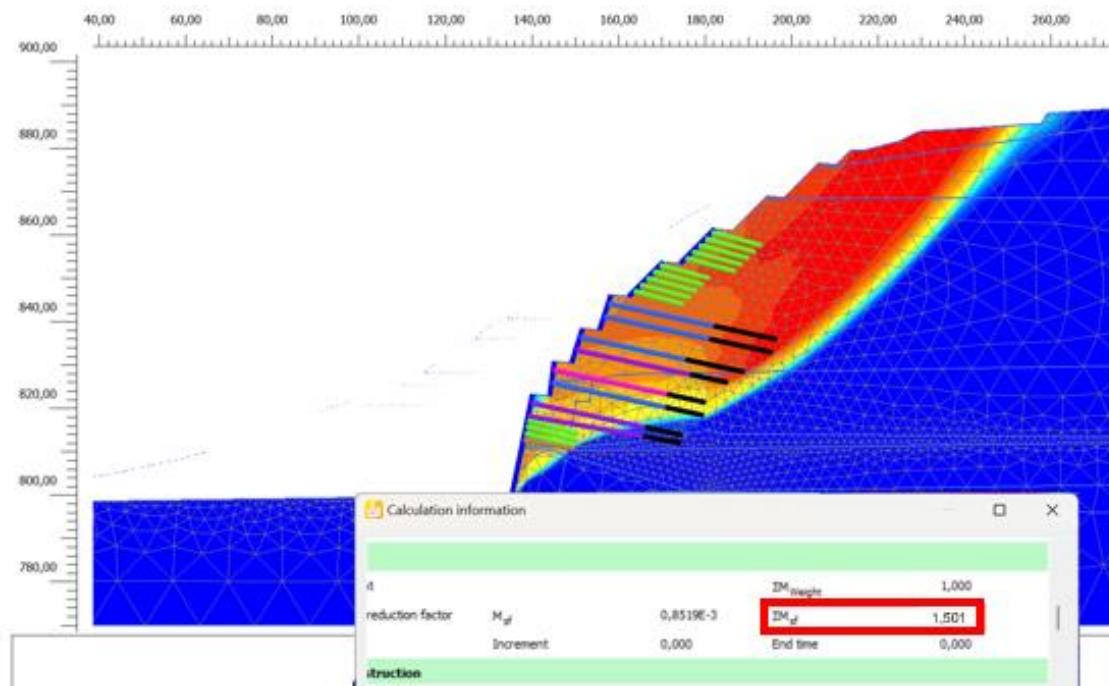


Figura 10. Análise de estabilidade no cenário III – Elementos Finitos (FS = 1,501).

A Tabela 1 apresenta os cenários avaliados e os respectivos fatores de segurança obtidos na análise de estabilidade.

Tabela 1. Fatores de segurança obtidos em cada cenário.

	Considerações	Fator de segurança Equilíbrio Limite	Fator de segurança Elementos Finitos
Cenário I	50% de capacidade dos Tirantes	1,159	1,217
Cenário II	75% de capacidade dos Tirantes	1,217	1,403
Cenário III	100% de capacidade dos Tirantes	1,268	1,501



2 0 2 5

Os fatores de segurança obtidos pelo Método do Equilíbrio Limite (MEL) apresentaram valores inferiores aos calculados pela Análise por Elementos Finitos (MEF) devido às diferenças fundamentais entre as abordagens. O MEL utiliza hipóteses simplificadas e critérios baseados em condições de equilíbrio estático, frequentemente adotando superfícies de ruptura predeterminadas e considerando apenas forças atuantes e resistências em uma configuração limite. Essa abordagem tende a ser conservadora, pois não captura de forma detalhada a distribuição real de tensões e deformações no maciço, nem a interação complexa entre os diferentes sistemas de contenção. Já a MEF permite uma modelagem mais realista do comportamento do solo-estrutura, incluindo a análise do campo de tensões e deslocamentos de maneira contínua e detalhada, a consideração de propriedades constitutivas não lineares e a interação simultânea entre múltiplos mecanismos de estabilização. Essa maior fidelidade na representação do problema resulta em fatores de segurança mais elevados, refletindo o potencial real do sistema de contenção. Portanto, a divergência entre os resultados evidencia a importância de complementar a análise simplificada do MEL com ferramentas numéricas avançadas para obter uma avaliação mais robusta e precisa da estabilidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante ressaltar que os cálculos apresentados estão sujeitos a imprecisões, como ocorre em qualquer modelo geotécnico. No caso do sistema de contenção do Túnel 501, a interpretação dos resultados vai além da simples comparação dos números com os limites normativos. A NBR 11682 (2009) estabelece, para contenções, fator de segurança mínimo de 1,50 considerando a possibilidade de perda de vidas humanas e danos materiais significativos. Assim, valores abaixo desse limite indicam risco operacional elevado.

Com base nos resultados obtidos, apenas o Cenário III (100%), se avaliado pelo Método dos Elementos Finitos, atingiu o fator de segurança mínimo exigido pelas normas técnicas. No entanto, sua adoção ficou condicionada à realização de novos ensaios de reprotensão dos tirantes – fundamentais para validação das premissas utilizadas nas análises.

Além disso, medidas práticas como a instalação de sistemas de drenagem e a implementação de um plano de instrumentação e monitoramento contínuo (marcos de deslocamentos e inclinômetros) devem ser adotadas para acompanhar o desempenho da contenção.

Somente com a combinação de análises numéricas, ensaios em campo e monitoramento, é possível transformar os valores de FS em decisões concretas de engenharia, minimizando riscos operacionais e garantindo que o sistema de contenção opere dentro dos níveis de segurança exigidos pelas normas e boas práticas da engenharia geotécnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682 – *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Gomes Filho, S. N. (2023) *Análise analítico-numérica de confiabilidade aplicada à modelagem geomecânica de túneis profundos reforçados por tirantes passivos*. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/257556>>. Acesso em: 21 set. 2025.
- Guidicini, G.; Nieble, C. M. (1976) *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Joppert Jr., I. (2007) *Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução*. São Paulo: PINI.
- Rebêlo, T. dos S. (2021) *Análise comparativa de métodos analítico e numérico aplicados a estruturas atirantadas*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.
- Silva, H. O. W. da. (2015). Tirantes em estruturas de contenção de solo: diretrizes para projeto e execução. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/138310>>. Acesso em: 21 set. 2025.