

Retroanálise de estabilidade com dimensionamento de reforço utilizando Método dos Elementos Finitos

Lucas de Araujo Estanqueiro

Engenheiro Civil, Mestrando COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, lucasestanqueiro@gmail.com

Lucas Martins da Silva Azeredo

Engenheiro Civil, Mestrando COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, lucas.azeredo@coc.ufrj.br

RESUMO: O solo grampeado representa uma das soluções mais aplicadas em estabilidade de talude no caso de projetos viários, levando em consideração questões econômicas e de segurança. O Método Francês, apesar de ter grande rigor nas verificações de esforços à flexão e tração nos grampos, não leva em consideração a plastificação do solo. No presente trabalho foram realizadas análises no módulo SLOPE/W (equilíbrio limite) e SIGMA/W (MEF) do software Geostudio. Os resultados das análises possibilitaram a comparação dos métodos, com relação aos fatores de segurança críticos, esforços atuantes e deformações do talude. Pela análise comparativa foi possível redimensionar toda a configuração de reforço, de forma que a nova configuração atendesse aos fatores de segurança de ambos os métodos. Através da comparação realizada, foi possível verificar a diferença entre as soluções e avaliar como afetam o projeto de contenção.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Grampeado, Elementos Finitos, Grampos, Análise de Estabilidade, Tensão-deformação.

ABSTRACT: Soil nailing represents one of the most widely applied solutions for slope stability in the case of road projects, taking into account economic and safety issues. The French Method, despite being very rigorous in checking flexural and tensile efforts in the clamps, does not take soil plasticization into account. In the present work, analyzes were carried out in the SLOPE/W (limit equilibrium) and SIGMA/W (MEF) module of the Geostudio software. The results of the analyzes made it possible to compare the methods, in relation to critical safety factors, active efforts and slope deformations. Through comparative analysis, it was possible to resize the entire reinforcement configuration, so that the new configuration met the safety factors of both methods. Through the comparison carried out, it was possible to verify the difference between the solutions and evaluate how they affect the containment project.

KEYWORDS: Soil nailing, finite elements, nails, stability analysis, stress-strain

1 INTRODUÇÃO

Até metade do século XX, houve uma eclosão de rodovias construídas por todo o país, com a necessidade de locomoção e migração para os grandes centros urbanos. No Estado do Rio de Janeiro, especificamente, o trecho sinuoso entre a região serrana e a região litorânea condicionou à estradas estreitas, com faixas únicas em sua grande maioria.

Por conta destas condições, em eventos de movimento de massa, as rodovias acabam sendo diretamente afetadas, com interdições, danos materiais, e por vezes, danos ambientais e à vidas humanas (conforme estabelece o critério da ABNT NBR 11682:2009). Após estes eventos geotécnicos, alguma solução é implantada para que determinada região não sofra mais com problemas similares. Uma das alternativas de contenção mais utilizadas no Brasil é denominada “solo grampeado”, cuja construção consiste em instalação de elementos de reforço, resistente à tração (denominados “grampos”), com diversos tipos de paramento, garantindo a estabilidade do talude no processo executivo (escavação ou talude rompido) e na fase operacional, conforme descreve Clouterre (1991).

O presente trabalho realiza uma retroanálise de estabilidade de um talude rompido, chegando até um Fator de Segurança (FS) próximo da unidade, simulando a condição de ruptura, e em seguida faz a comparação

de uma análise de estabilidade por equilíbrio limite com uma análise de tensão-deformação por elementos finitos.

Os parâmetros de resistência dos materiais foram determinados a partir de ensaios de laboratórios disponíveis da região e classificação geomecânica do maciço com base nas sondagens mistas realizadas. O talude objeto de estudo deste trabalho fica situado à beira de uma rodovia da região serrana do estado do RJ, que após um longo período de chuvas intensas, sofreu um deslizamento no primeiro trimestre de 2022, vencendo os limites da rodovia e atingindo casas que se encontravam às margens da pista, conforme a Figura 1 ilustra.

As análises de estabilidade global e de tensão-deformação foram feitas, respectivamente, a partir dos módulos SLOPE/W e SIGMA/W da Geostudio, para o dimensionamento inicial do solo grampeado, e para o novo dimensionamento, produto de saída após a comparação das duas análises iniciais.

Através da comparação dos resultados obtidos em cada método, foi possível redimensionar os elementos de reforço, de forma que a nova configuração atendesse à ambas as análises (equilíbrio limite e tensão-deformação), demonstrando a importância do refino de análises em um projeto que envolve um grau de criticidade alto quanto à segurança.



Figura 1. Cicatriz deixada pelo escorregamento alguns dias após o evento.

2 CARACTERIZAÇÃO DO TERRENO E PARÂMETROS ADOTADOS

O talude foi dividido em três regiões representativas: o topo do talude foi caracterizado por uma fina camada de solo residual sobre rocha gnáissica – característica da região serrana do estado do Rio de Janeiro – muito fraturada e alterada. Este solo residual é composto por argila siltosa amarelada, com alguns blocos de rocha e matacões visíveis porventura na face do talude, com espessura de cerca de 2,00 metros. Na zona intermediária encontra-se um colúvio, oriundo do movimento de massa predecessor à análise. É importante ratificar que, para fins de análise e dimensionamento, esta fina camada de colúvio não foi considerada no perfil planialtimétrico da seção crítica, uma vez que a mesma foi retirada logo no início dos serviços da obra, de forma a conferir maior segurança aos envolvidos nas atividades da execução da contenção. Já para a base do talude, encontra-se um aloramento de rocha gnáissica de boa competência, onde não foram observadas fraturas significativas, tampouco alteração avançada.

Após o movimento de massa, foram realizadas quatro sondagens mistas e levantamento planialtimétrico, conforme pode-se verificar na Figura 2. A partir disto, foi possível definir o perfil geológico-geotécnico da

seção crítica do talude, justamente no eixo de onde ocorreu o deslizamento. Não foi observado nível d'água em nenhuma das quatro sondagens realizadas na região.

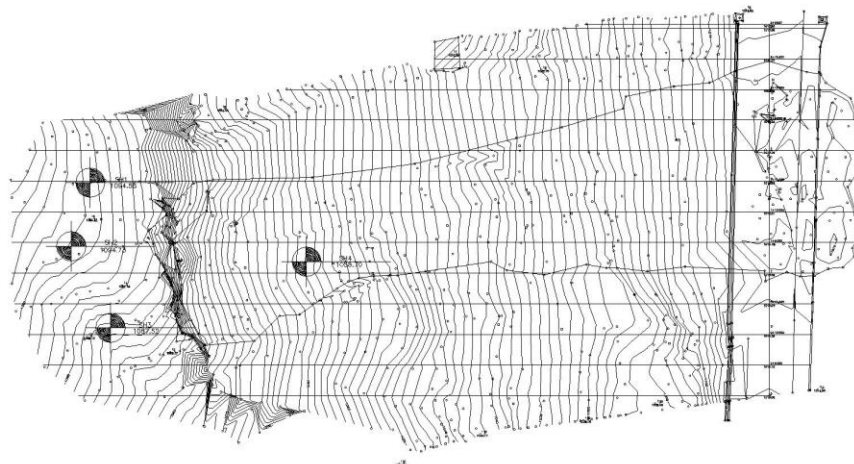


Figura 2. Levantamento planialtimétrico com as curvas de nível e a locação das sondagens mistas realizadas.

Foram verificados alguns parâmetros do solo que se aproximavam do Fator de segura (FS) igual a unidade, sendo possível desta forma simular a condição do escorregamento. Os parâmetros encontrados nesta retroanálise são muito próximos de resultados de ensaios realizados em outras obras próximas da região, e por este motivo, foram considerados ao longo de todo o trabalho, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para as análises e dimensionamentos.

Descrição	Peso específico (γ)	Coesão efetiva (c')	Ângulo de Atrito (ϕ')	Resist. ao arrancamento (q_s)
Solo residual	18 kN/m ³	5kPa	32°	150kPa

3 METODOLOGIA E ESTUDO

3.1 Análise de Estabilidade

A análise de estabilidade, em primeiro momento, foi realizada pelo método do Equilíbrio Limite, onde uma parcela do solo se comporta como um corpo rígido e que a superfície de ruptura possui geometria conhecida. A utilização do método das fatias parte da hipótese de que uma massa de solo instável pode ser dividida em diversas fatias verticais de maneira imaginária, onde as tensões normais que atuam na base de cada fatia dependem, principalmente, do peso próprio do material naquela referida fatia. A saída desta análise é um número adimensional, popularmente conhecido, denominado de “Fator de Segurança” (FS), que é definido pela razão entre a resistência disponível no terreno e as forças atuantes.

A superfície de ruptura crítica é justamente aquela em que se encontra o menor FS disponível. O método escolhido para análise foi o Morgenstern & Price (1965), devido ao seu rigor. A partir deste método, a solução é iterativa, definindo-se previamente a função de distribuição de forças entre as fatias, admitindo valores para FS e o fator de escala (λ) e calculando $E(x)$ e $M(x)$ para cada fatia. Nos contornos, os valores de E e M devem ser nulos. Desta forma, são feitas diversas iterações até que as condições de contorno sejam satisfeitas.

O software utilizado para a análise de estabilidade foi o SLOPE/W, e na Figura 3 é possível verificar o perfil típico com FS próximo à unidade, simulando a condição de ruptura.

Foram definidas entradas e saídas no software de forma que, ao se pesquisar a superfície crítica a partir das iterações, esta não se localize nas extremidades da entrada e saída definida, garantindo que a superfície de ruptura encontrada seja, de fato, a mais crítica considerando a geometria do problema. Por este motivo, recomenda-se sempre realizar análises com diversas formas de entrada e saída, de forma a garantir a real superfície crítica

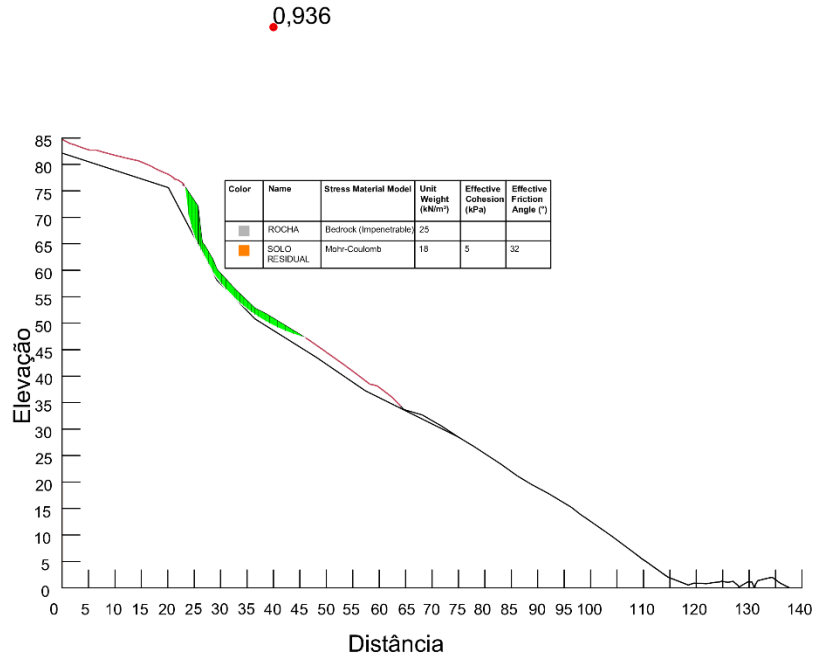


Figura 3. FS próximo de 1,00 simulando a condição de ruptura do terreno, considerando a geometria retirada do levantamento planialtimétrico.

A solução de engenharia concebida para estabilização deve ter um novo Fator de Segurança mínimo para o talude de acordo com os critérios estabelecidos na ABNT NBR 11682:2009 Estabilidade de Encosta em seu item 7.3.7.2. Por se tratar de uma encosta à beira de uma rodovia principal, foi considerado que o nível de segurança contra perda de vidas humanas é Alto, pois está localizada em uma área com tráfego intenso. O nível de segurança contra danos materiais também foi considerado Alto, pois o próprio evento de deslizamento implica nesta consideração, uma vez que o movimento de massa atingiu casas do outro lado da pista, gerando prejuízo financeiro para dezenas de famílias.

Sendo assim, o FS mínimo admissível para o dimensionamento do reforço é de 1,50, como pode ser visto na Figura 4.

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais \ Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

NOTA 1 No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10 %. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico indicado no Anexo D.

NOTA 2 No caso de estabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , ϕ , c , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3 Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

Figura 4. Fatores de Segurança mínimos para deslizamentos. Fonte: ABNT NBR 11682:2009 Estabilidade de Encosta

3.2 Dimensionamento do Reforço

O método escolhido para o dimensionamento do solo grampeado foi o Método Francês (ou Multicritério). Este método, conforme sintetiza LANZIERI, D.R. (2019), faz uso dos mecanismos básicos de interação solo-grampo (Equação 1), atrito e pressão do solo exercida no grampo (Equação 2). São consideradas a resistência à tração, resistência ao cisalhamento (Equação 3) e a rigidez à flexão do grampo (Equação 4). Os procedimentos utilizados são os convencionais utilizados para análise de estabilidade de taludes, com base no método de Equilíbrio Limite, onde as verificações de esforços resistentes à tração e cisalhamento são feitas a partir de quatro critérios:

Critério 1 – Arrancamento do grampo: Verificação da falha do grampo em relação a seu arrancamento devido ao esforço de tração, onde T_n é a resistência à tração considerada no grampo (em kN), q_s é a resistência na interface solo-grampo (em kpa), D é o diâmetro do furo (em metros) e L é o comprimento ancorado (em metros).

$$T_n = q_s * \pi * D * L \quad (1)$$

Critério 2 – Plastificação lateral do solo: Onde a pressão lateral exercida pelo grampo no solo é limitada pela capacidade de suporte deste, P_u (em kpa), onde T_C é a resistência ao cisalhamento considerada no grampo (em kN), $T_{C2,máx}$ é o limite da resistência ao cisalhamento no grampo devido ao critério 2 (em kN) e L_0 é o comprimento de transferência de carga (em metros).

$$T_C = T_{C2,máx} = \frac{D * L_0 * P_u}{2} \quad (2)$$

Critério 3 – Ruptura do grampo por tração e cisalhamento combinados: A ruptura do grampo é verificada a partir da combinação de esforços cisalhantes e de tração, com análise feita pelo critério de Tresca, onde, além das variáveis encontradas nas Equações 1 e 2, respectivamente, T_n e T_C , R_n é a resistência à tração pura do grampo (em kN) e R_c é a resistência ao cisalhamento puro do grampo (em kN).

$$\left(\frac{T_n}{R_n}\right)^2 + \left(\frac{T_C}{R_c}\right)^2 \leq 1 \quad (3)$$

Critério 4 – Plastificação do grampo por momento fletor: Este critério faz a verificação de formação de rótula plástica no grampo devido ao esforço de flexão, onde M_p é o momento de resistência máximo (em kN.m).

$$T_C \leq T_{C4,máx} = 1,62 * \frac{M_p}{L_0} * \left[1 - \left(\frac{T_n}{R_n}\right)^2\right] + 0,24 * D * L_0 * P_u \quad (4)$$

Após serem feitas as quatro verificações, todos os resultados são expressos em um plano cartesiano, onde o eixo das abcissas representa a tensão normal T_n e o eixo das ordenadas representa a tensão de cisalhamento T_c . A região interna é delimitada pelos quatro critérios, define um domínio no plano cartesiano onde os grampos se encontram estáveis.

Após a retroanálise realizada para simular a condição de ruptura do talude, foram dimensionados os grampos de acordo com o Método Francês e chegou-se a uma geometria de reforço que pode ser observada na Figura 5, com grampos de 4,0m de comprimento e espaçamento vertical de 3,5m, barra de aço CA-50 de 16mm de diâmetro e perfuração de 75mm de diâmetro, além de grampos de 9,0m de comprimento na crista do talude, com as mesmas características do grampo de 4,0m. Com este reforço modelado na seção transversal crítica, realizou-se uma nova análise de estabilidade, para obter o novo fator de segurança.

Se fosse considerado somente o equilíbrio limite, a partir do método de Morgenstern & Price (1965), este reforço atenderia as condições da ABNT NBR 11682 Estabilidade de Encostas, para o fator requerido de 1,5 conforme a Figura 4 deste trabalho.

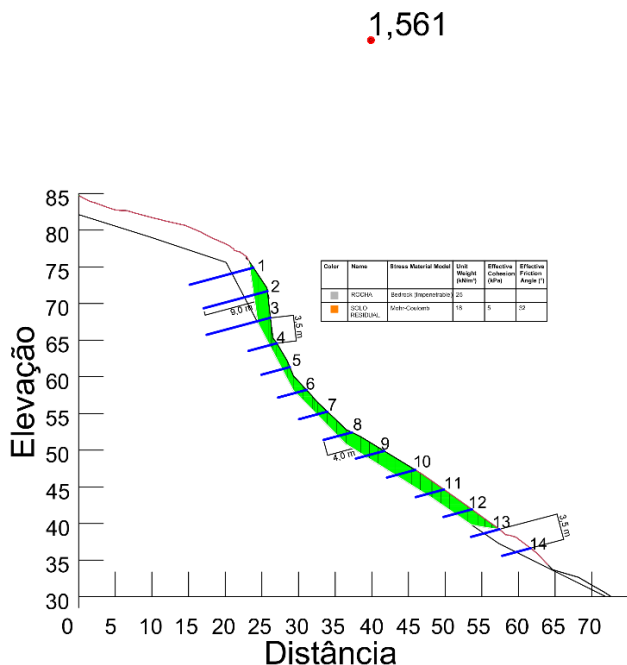


Figura 5. Seção transversal crítica com dimensionamento de reforço de grampos e Fator de Segurança encontrado através de Equilíbrio Limite no valor de 1,561.

Porém, foi realizada uma análise pelo Método dos Elementos Finitos, para que se avaliasse a contribuição da tensão-deformação do solo, principalmente deformação plástica, nos esforços resultantes nos grampos do reforço.

A Figura 6, com análise feita no módulo SIGMA/W, mostra que, na parte superior do talude, há uma região representativa de plastificação – região avermelhada – que indica, em um primeiro momento, um ponto de atenção no dimensionamento do reforço. O próprio software, quando selecionado individualmente cada grampo, apresenta o resultado dos esforços cortantes que são gerados a partir da plastificação da região específica.

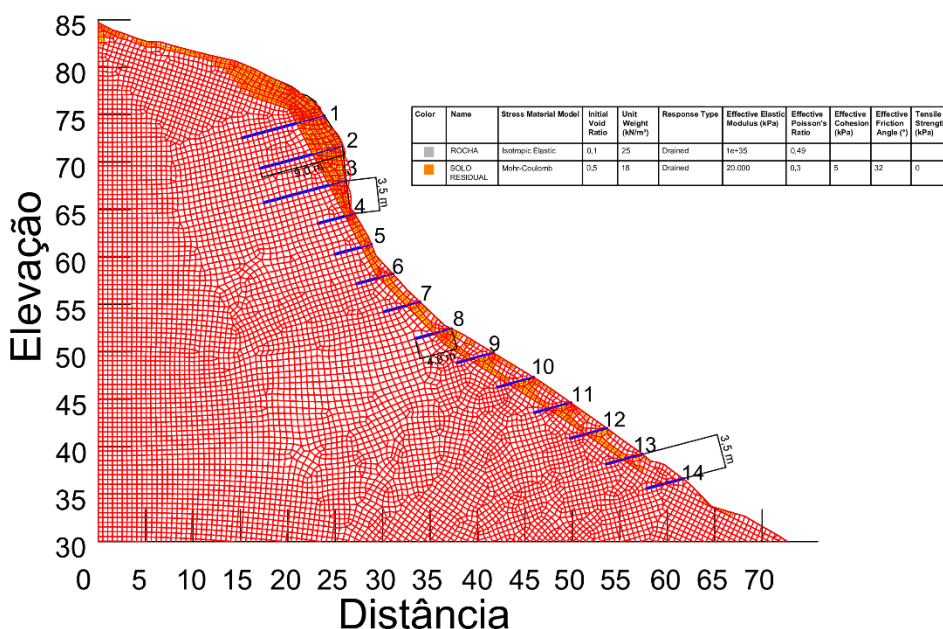


Figura 6. Seção transversal crítica com dimensionamento de reforço de grampos e zona de plastificação – avermelhada – encontrada a partir do Método dos Elementos Finitos.

Dentro dos cálculos realizados pelo Método Francês, os grampos utilizados para reforço do solo, resistiam a um esforço cortante de 37,48kN. Tão logo, era necessário que os esforços gerados a partir da plastificação do solo fossem menores do que seus esforços resistentes. Ao realizar esta análise com o primeiro dimensionamento, todos os grampos de 9,0 metros de comprimento localizados na região superior do talude, rompiam por esforço cortante e, portanto, foram inseridos mais grampos, com um espaçamento vertical de 2,0 metros entre eles.

4 RESULTADOS

A nova configuração do Solo Grampeado contou com grampos de 9,0 metros de comprimento espaçados verticalmente 2,0 metros entre si ($EV = 2,0m$), na seção transversal crítica de análise e os grampos de 4,0 metros de comprimento com $EV = 3,5m$. Com esta nova configuração, foi realizada uma nova análise por elementos finitos a fim de verificar se a nova geometria atendia às tensões-deformações geradas no solo. Na Figura 7 apresenta-se um exemplo de verificação do esforço cortante ao longo de todo o grampo (barra de aço + bainha de calda de cimento), onde se verifica que, o maior esforço cortante encontrado foi de cerca de 24kN. Todos os grampos do sistema passaram pela verificação, e em nenhum deles o esforço resultante foi maior do que o esforço resistente, conferindo assim, confiabilidade estrutural para cada grampo individualmente, tão logo, para o sistema como um todo.

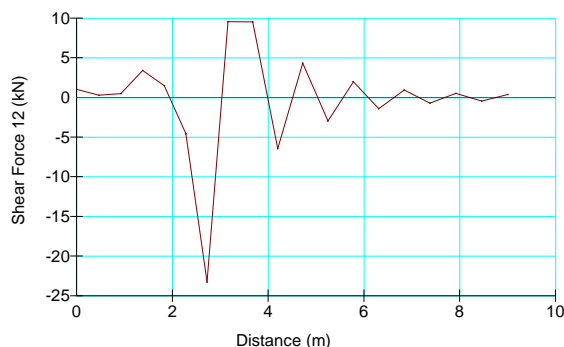


Figura 7. Gráfico do comportamento do esforço cortante ao longo de todo o comprimento de um dos grampos do sistema de solo grampeado.

Por fim, foi realizada novamente uma análise de estabilidade utilizando equilíbrio limite para que se encontrasse um Fator de Segurança para a nova configuração do reforço. O resultado encontrado deste novo FS foi de 1,705, conforme Figura 8, valor um pouco maior do que na análise realizada com a primeira configuração do sistema de solo grampeado. Então, o dimensionamento final atendeu aos requisitos do equilíbrio limite, além da análise de tensão-deformação por elementos finitos, conferindo confiabilidade geotécnica e estrutural ao sistema de solo grampeado.

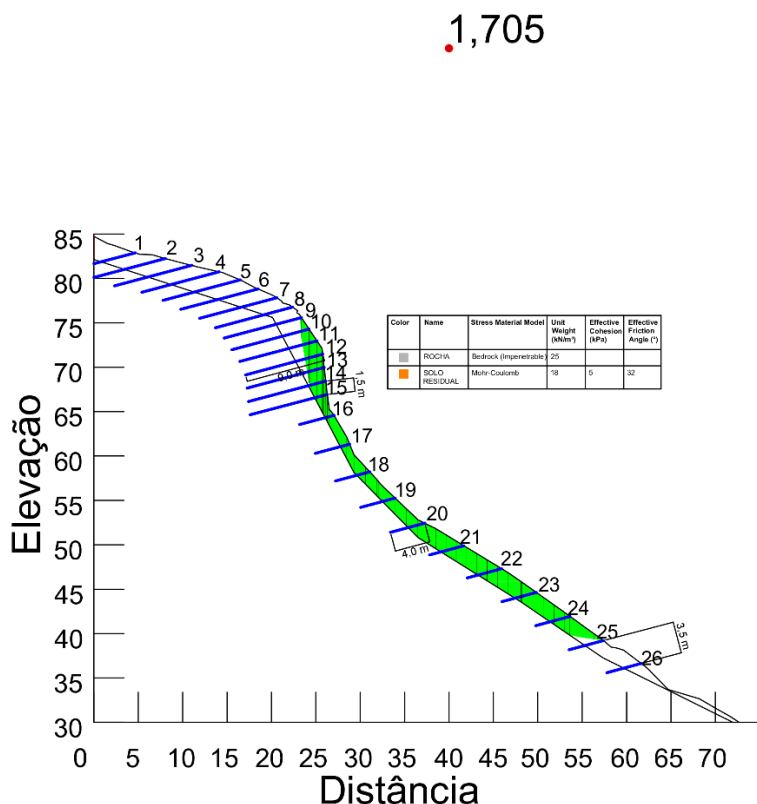


Figura 8. Seção transversal crítica com novo dimensionamento de grampos e novo Fator de Segurança encontrado por equilíbrio limite no valor de 1,705

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A partir do exposto neste trabalho, pode-se concluir que, para dimensionamento de sistema de solo grampeado, é recomendável que além das análises clássicas por equilíbrio limite, sejam feitas também uma análise da tensão-deformação do solo a fim de garantir que, a estabilidade global do talude seja garantida, mas também a confiabilidade estrutural de cada elemento de reforço individualmente, para que estes não sofram esforços maiores do que seus esforços resistentes.

Como sugestão para trabalhos futuros, convém estudar o correto dimensionamento e análise dos ensaios de arrancamento realizados na obra, para que se faça uma verificação do q_s adotado em projeto, e a região exata de onde pretende-se aferir este parâmetro, trazendo muito importância para a geometria dos grampos de sacrifício, tal como para as características do aço utilizado, intimamente ligadas às cargas de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. Estabilidade de Encostas

CLOUTERRE. Recommendations Clouterre. Project National Clouterre. Presses de 1° ENPC. Paris, 1991. 269p.

Estudos Geotécnicos para Projeto de Estabilização de Talude. Fundação COPPETEC. 2022.

LANZIERI, D. R. “Avaliação de métodos de cálculos de solos grampeados por meio de modelagem tridimensional em elementos finitos e caso de obra.”. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2019. 141p.