



## Estabilidade de Talude em Arenito Brando de 3<sup>a</sup> categoria e circulação hídrica: caso de obra na rodovia SP-147

Joana Rott

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

André Querelli

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

**RESUMO:** Diante das incertezas próprias da geotecnica, que incluem a variabilidade do subsolo local, os efeitos do tempo, possíveis erros de sondagens e outros fatores imprevisíveis, durante a execução das obras de revitalização da SP-147 e a implantação dos acostamentos, foram identificados trechos com material de 3<sup>a</sup> categoria que não foram considerados nos projetos geométricos e de terraplenagem originais. A presença desse material dificultou a execução das especificações de projeto e os taludes foram executados com inclinação mais acentuada do que o planejado. Além disso, foi observada a presença de veios de água durante a execução, indicando a circulação hídrica no local.

O objetivo desse artigo é apresentar estudo de estabilidade de talude em um trecho da Rodovia SP-147, entre os municípios de Anhembi e Bofete, em São Paulo, para avaliar a estabilidade do talude com a geometria executada, considerando o material de 3<sup>a</sup> categoria e a presença de veios de água na face. Para simular a condição de circulação hídrica, foi adotado um parâmetro de saturação "ru" de 20%, que representa a poro-pressão em qualquer ponto do solo como 20% da tensão vertical aplicada. Como resultado da análise, é necessário realizar abrandamento do talude para garantir a estabilidade do mesmo com fatores de segurança iguais ou superiores ao valor mínimo recomendado pela norma técnica ABNT NBR 11682/2009.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade de taludes, Condições hídricas, Saturação parcial, Poro-pressão, material de 3<sup>a</sup> categoria.

**ABSTRACT:** Given the inherent uncertainties of geotechnical engineering—which include the variability of local subsurface conditions, the effects of time, possible errors in soil investigations, and other unpredictable factors—sections containing third-category material were identified during the revitalization works on highway SP-147 and the construction of shoulders. These materials had not been accounted for in the original geometric and earthwork design projects. The presence of this material made it difficult to follow the original project specifications, and the slopes were executed with steeper inclinations than initially planned. Furthermore, water veins were observed during the execution phase, indicating groundwater flow at the site. The objective of this paper is to present a slope stability study for a section of Highway SP-147, between the municipalities of Anhembi and Bofete, in São Paulo, in order to evaluate the stability of the slope as constructed, considering the presence of third-category material and water veins on the slope face. To simulate groundwater conditions, a saturation parameter "ru" of 20% was adopted, representing pore pressure at any point in the soil as 20% of the applied vertical stress. As a result of the analysis, slope flattening is required to ensure its stability, achieving safety factors equal to or greater than the minimum value recommended by the Brazilian technical standard ABNT NBR 11682:2009.

**KEYWORDS:** Slope stability, Hydraulic conditions, Partial saturation, Pore pressure, Third-category material.

### 1 INTRODUÇÃO

A estabilidade dos taludes é influenciada por diversos fatores, sendo os principais: o modelo geológico, as condições da água subterrânea e a forma construtiva. Esses elementos atuam sobre a resistência ao cisalhamento dos solos e sobre as forças gravitacionais que incidem na massa do terreno. Quando as forças de



gravidade que atuam sobre o talude são maiores que a resistência ao cisalhamento do solo, o talude é considerado instável (Barnes, 2016).

Diante das incertezas próprias da geotecnica, que incluem a variabilidade do subsolo local, os efeitos do tempo, possíveis erros de sondagens e outros fatores imprevisíveis, durante a execução das obras de revitalização da SP-147 e a implantação dos acostamentos, foram identificados trechos com material de 3<sup>a</sup> categoria que não foram considerados nos projetos geométricos e de terraplenagem originais. A presença desse material dificultou a execução das especificações de projeto e os taludes de corte foram executados com inclinação mais acentuada do que o planejado, o que impactou na estabilidade dessas estruturas.

Considerando essas condições, ajustes foram feitos in loco para adaptar o corte dos taludes às novas condições geológicas. Além disso, foi observada a presença de veios de água durante a execução, indicando a circulação hídrica no local.

A água é um dos principais agentes de intemperismo, especialmente sob altas temperaturas e quando sua movimentação no interior do maciço é facilitada pela presença de vazios intergranulares, fissuras e fraturas (Lopes, 2017). A infiltração da água da chuva pode aumentar as pressões neutras no solo, o que reduz sua resistência e, consequentemente, os parâmetros de resistência ao cisalhamento, especialmente a coesão aparente (Massad, 2010). Por esse motivo, o estudo da saturação do solo é importante para a avaliação da estabilidade de taludes.

O objetivo deste artigo é analisar a estabilidade de um talude em trecho da Rodovia SP-147, entre os municípios de Anhembi-SP e Bofete-SP, utilizando o método do equilíbrio limite para estimar o menor fator de segurança da superfície crítica de ruptura, considerando a presença de material de 3<sup>a</sup> categoria e veios de água na face do talude.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Considerações Gerais

A metodologia adotada para a elaboração deste trabalho iniciou-se com uma revisão bibliográfica, baseada em livros, manuais e normas técnicas. Na sequência, realizou-se uma visita técnica ao local, permitindo a observação direta das condições do solo. Com base nas informações obtidas em campo, aliadas aos dados de sondagens geotécnicas e à experiência técnica, foram estabelecidas as premissas de projeto e parâmetros geotécnicos necessários para o desenvolvimento das análises e propostas apresentadas neste trabalho.

### 2.2 Caracterização do Local

Inicialmente, foi realizada uma campanha de sondagem a percussão no local que identificou a presença de duas camadas distintas de solo: colúvio e solo residual, servindo de base para o projeto executivo geométrico. Contudo, durante a execução da obra, constatou-se a ocorrência de arenito brando no subsolo, condição que não havia sido identificada nas investigações preliminares.

A segunda campanha de sondagem, realizada após a identificação de arenito na obra, revelou três camadas de solo distintas: colúvio, solo residual e arenito brando.

A camada superficial é composta por colúvio, uma mistura de fragmentos de rocha e solo pouco consolidada e suscetível à erosão. Abaixo, encontra-se o solo residual, derivado da decomposição da rocha matriz, que atua como transição entre o colúvio e a camada de arenito. Por fim, há uma camada de arenito brando, uma rocha sedimentar de baixa resistência. A estratigrafia do solo é demonstrada na Figura 1.

A camada de arenito revelou dobras que indicam áreas no maciço com maior propensão a deslizamentos ou rupturas, especialmente sob condições de sobrecarga ou variações na umidade. No entanto, quando essas dobras estão orientadas no sentido do talude, elas promovem uma maior continuidade das camadas e ajudam a distribuir as tensões de maneira mais uniforme ao longo do maciço, reduzindo o risco de falhas localizadas.

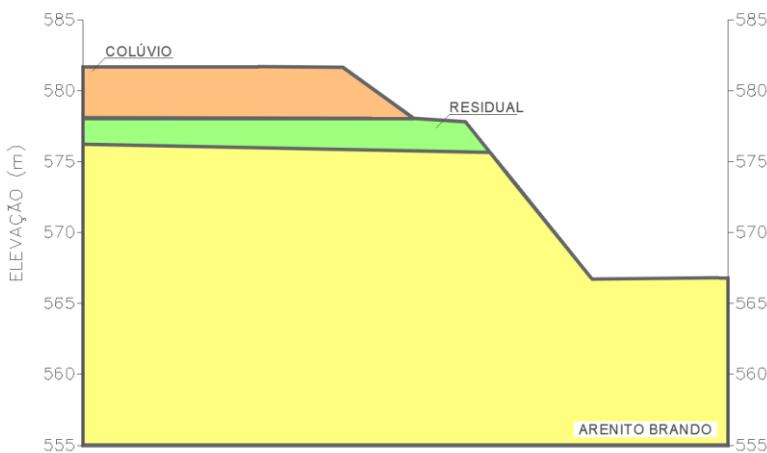


Figura 1. Estratigrafia da seção analisada.

Durante visita ao local, observou-se na face do talude camada predominante de arenito, demonstrada na Figura 2, e a presença de veios de água que percolam entre as fissuras naturais do material rochoso, indicando zonas de infiltração.



Figura 2. Talude analisado.

A Figura 3 evidencia a presença de veios que indicam circulação hídrica no interior do talude.

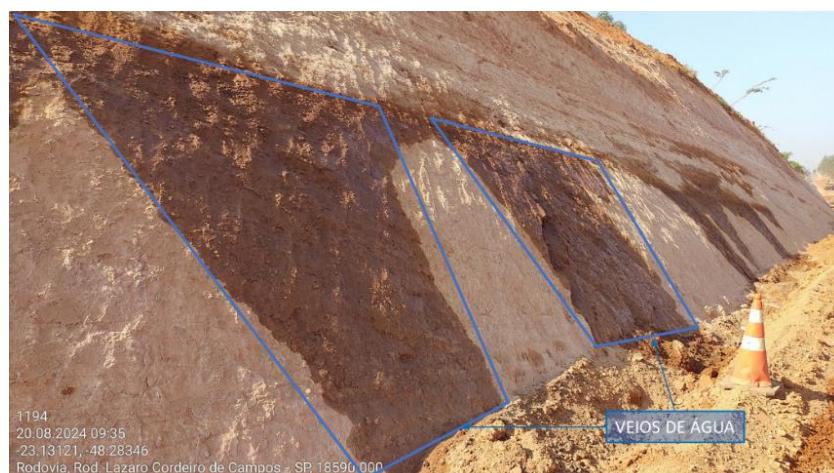


Figura 3. Veios de água na face do talude.



A identificação do arenito brando apenas durante a fase de execução inviabilizou a escavação com o equipamento disponível no canteiro - uma escavadeira hidráulica convencional -, o que impossibilitou a continuidade dos trabalhos conforme previsto no projeto geométrico originalmente elaborado com base nas sondagens iniciais. Na Figura 4, observa-se a discrepância nas inclinações entre o talude de projeto e o executado.

O projeto original previa taludes com uma inclinação de 1V:1H, no entanto, nessa seção específica, os taludes apresentam uma inclinação mais acentuada, com 1V:0,8H. Além disso, houve uma variação significativa na altura da berma entre taludes, estando aproximadamente 4 metros acima da altura projetada.

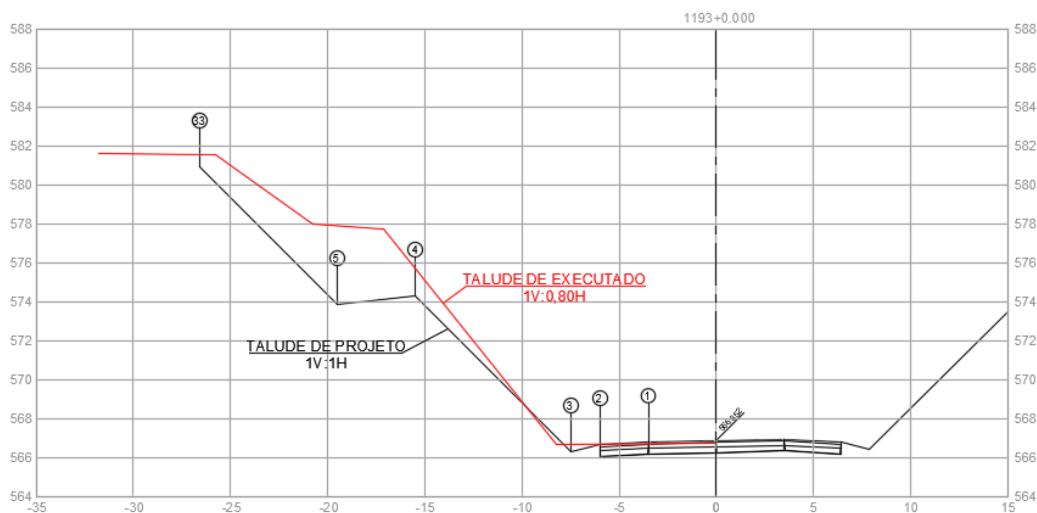


Figura 4. Seção Transversal de projeto versus executado.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Premissas de cálculo: FATOR DE SEGURANÇA

A verificação da estabilidade dos taludes foi realizada através de meios computacionais para a pesquisa de superfícies de ruptura e cômputo do fator de segurança destas. Para tanto, utilizou-se o software Slide, da Rocscience Inc., 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).

Todo material de solo foi considerado homogêneo e isotrópico e analisado em termos de tensões efetivas com resistência máxima disponível regida pelo Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Os resultados obtidos a partir das análises de estabilidade serão comparados com os fatores de segurança recomendados pela NBR 11682 (2009) - Estabilidade de Encostas.

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

Figura 5. Fatores de segurança mínimo desejáveis, extraída da NBR 11682 (2009).

De acordo com os critérios apresentados pela norma técnica de referência foi considerado nível de segurança “médio” contra perda de vidas humanas e “médio” para danos materiais e ambientais, o que resultou no fator de segurança mínimo desejável igual a 1,40.

Considerando que a análise adota a hipótese de saturação parcial do solo e que estão previstas intervenções de drenagem profunda no local, entende-se que a adoção de um fator de segurança igual a 1,40 é



prudente. A presença dos drenos profundos contribuirá para a redução das pressões neutras e para o rebaixamento do nível de água no maciço, aumentando a resistência efetiva do solo ao cisalhamento. Dessa forma, o valor de 1,40 representa uma margem de segurança adequada frente às condições geotécnicas previstas.

### 3.2 Superfície freática

Com base nas sondagens realizadas no local, aliadas à observação direta durante a visita técnica, que revelou a presença de veios de água aflorando na face dos taludes, concluiu-se que o terreno se encontra em uma condição de saturação parcial. Esse comportamento hídrico observado indica a infiltração e circulação de água no interior do maciço, o que influencia a estabilidade dos taludes.

Considerando tal situação, uma maneira de simular a saturação parcial nas verificações de estabilidade é variando o parâmetro de saturação “ru” do solo, introduzido por Bishop & Morgenstern (1960).

O “ru” é uma maneira simples e rápida de definir a poro-pressão como uma fração da tensão vertical, permitindo considerar uma saturação parcial do solo sem necessidade de presumir a região do empoleiramento d’água ou a posição do nível freático, determinado pela Equação 1.

$$r_u = \frac{u}{\gamma \cdot h} \quad (1)$$

De modo que:

$u$  = poro pressão;

$\gamma$  = peso específico;

$h$  = profundidade do ponto na camada de solo.

Na análise de estabilidade dos taludes, foi adotado um grau de saturação de 20%, o que implica que a poro pressão em qualquer ponto do solo corresponde a 20% da tensão vertical aplicada. Embora o software de cálculo permita a inserção de nível freático integral (até o topo; grau de saturação de 100%), optou-se por utilizar o valor de  $ru=20\%$  para garantir uma representação mais fidedigna das condições reais observadas no campo. Esse valor foi considerado com base na avaliação das condições locais, onde a presença de água foi notada, mas não de forma a saturar completamente o solo. Essa abordagem visa equilibrar a precisão da análise com as condições de umidade parciais registradas durante a inspeção.

### 3.3 Parâmetros de resistência do solo

A definição dos parâmetros de resistência dos materiais foi realizada com base nos ensaios em correlações empíricas com os valores de  $N_{SPT}$  disponíveis nos resultados das sondagens, na experiência do técnica e em consulta a referências bibliográficas, como por exemplo Joppert Jr. (2007) e Guidicini & Nieble (1976).

Considerando a natureza friável do material e as discrepâncias observadas entre as sondagens realizadas, adotou-se uma abordagem mais conservadora na definição dos parâmetros geotécnicos, especialmente na camada de arenito brando.

Tabela 1. Resumo dos parâmetros de resistência dos solos.

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
Colúvio	17	8	23
Solo Residual	17	10	26
Arenito Brando	19	12	38

### 3.4 Carregamentos atuantes

No topo dos taludes, não há áreas próximas com uso que justifique uma sobrecarga. Trata-se de terrenos livres de construções e sem fluxo de veículos, o que elimina a necessidade de considerar cargas adicionais no talude. Essa ausência de interferências, sejam edificações ou tráfego, foi um dos principais fatores que nos permitiram desconsiderar a sobrecarga no dimensionamento do talude.



### 3.5 Análise de estabilidade

Na análise de estabilidade, foram consideradas duas condições fundamentais: o talude na condição executada inicialmente, e a projeção do talude suavizado com nova geometria proposta (condição com retalude).

A primeira condição reflete a situação imediata da obra, fornecendo uma visão da estabilidade do talude com as inclinações e alturas executadas inicialmente. Já a segunda condição, relativa ao retaludamento, foi avaliada como uma solução de mitigação para melhorar a estabilidade global. Esse abrandamento envolve a diminuição das inclinações, reduzindo as tensões internas e redistribuindo os esforços ao longo do talude, promovendo maior segurança e minimizando riscos de ruptura.

Foi analisada a condição executada inicialmente, com talude de 11,10m de altura e inclinação 1,00V:0,80H, seguido de uma berma de 3,62m de largura e outro talude de menor altura, com 3,60m de altura e inclinação 1,00V:1,40H. Por meio da análise por carregamento estático realizada, obteve-se um fator de segurança INSATISFATÓRIO (FS<1,40). A Figura 6 mostra o resultado desta análise.

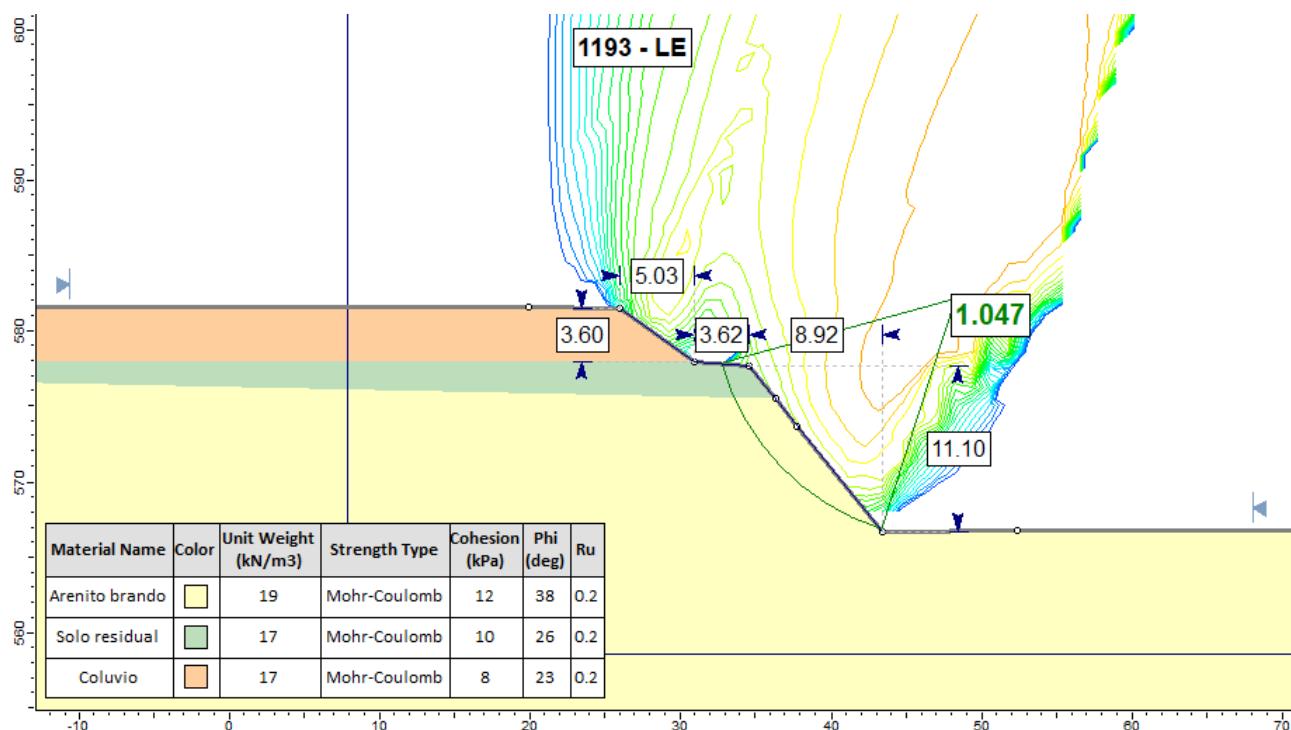


Figura 6. Condição executada inicialmente (FS=1,047).

Para alcançar o fator de segurança mínimo exigido, é fundamental realizar o abrandamento da parte superior do talude, ajustando sua inclinação para 1,00V:1,50H. Além disso, o talude inferior também precisa passar por um ajuste, sendo necessário alterar sua inclinação para 1,00H:1,00V, limitando a altura máxima a 9 metros. Com isso, a Figura 7 mostra que o fator de segurança se torna SATISFATÓRIO (FS>1,40).

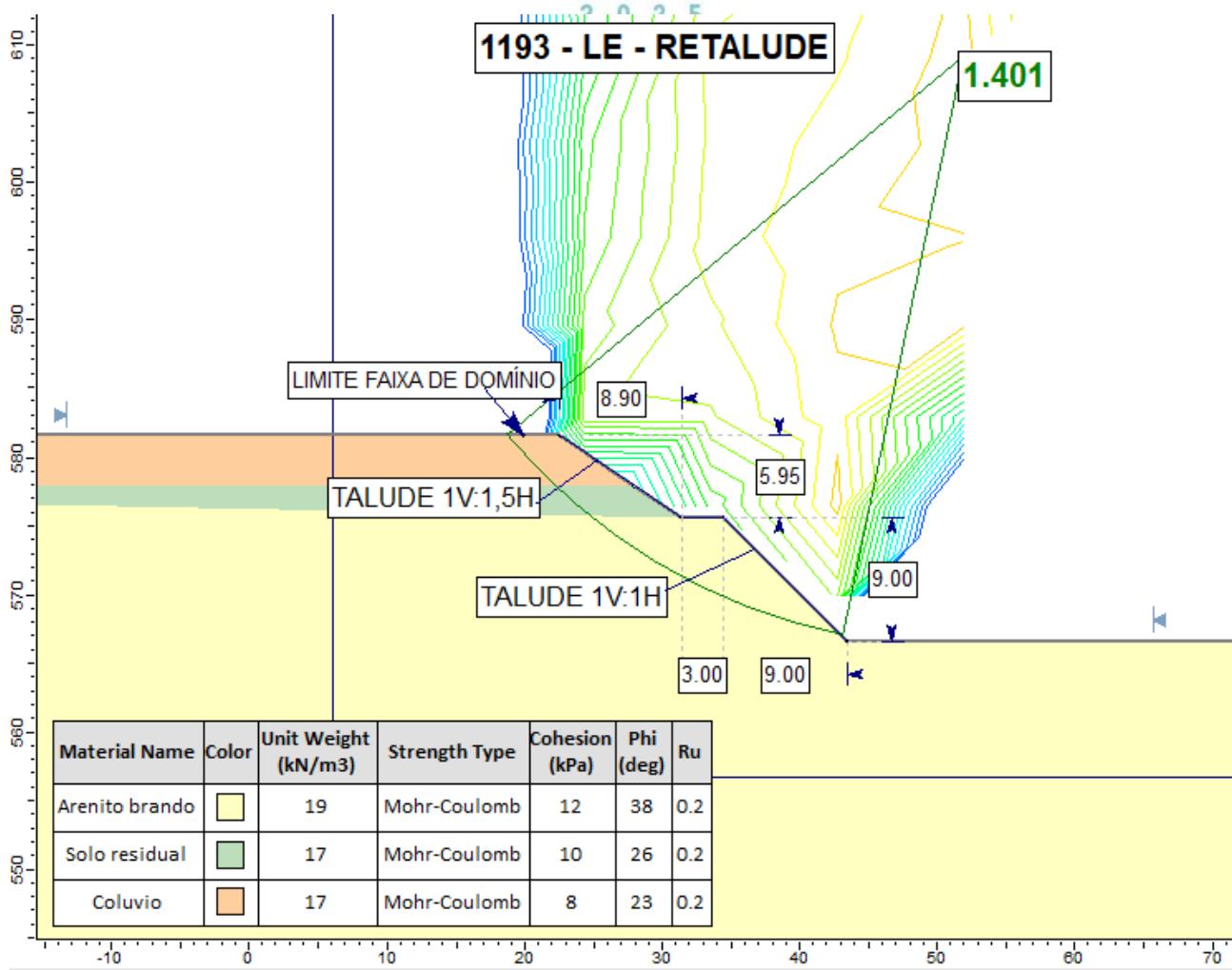


Figura 7. Condição com retalude (FS=1,401).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de estabilidade se faz necessária devido à presença de material rochoso identificado durante as escavações que impediu a execução dos taludes conforme projeto geométrico, obtendo taludes mais íngremes. Como mostrado nos estudos deste documento, é necessário abrandamento dos taludes analisados visando garantir a estabilidade dos mesmos com fatores de segurança iguais ou superiores ao valor mínimo recomendado pela norma técnica ABNT NBR 11682/2009.

Outro aspecto significativo observado durante a inspeção foi a presença de veios d'água aflorando nas faces dos taludes, mesmo em plena estação seca. Esse fenômeno indica a presença de nível d'água, o que pode comprometer a estabilidade das encostas ao longo do tempo, especialmente em períodos de chuvas intensas. A presença constante de água acentua a necessidade de soluções de drenagem eficazes. Diante disso, foi recomendado a implementação de drenos horizontais profundos (DHP's) para controlar a infiltração e aliviar a pressão hidrostática nas encostas, garantindo a estabilidade dos taludes e minimizando o risco de erosão e deslizamentos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- BARNES, G. E. Mecânica dos solos: princípios e práticas. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.
- BISHOP, A. W.; MORGESTERN, N. Stability coefficients for earth slopes. *Géotechnique*, v. 10, p. 129-153, 1960.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo: Edgard Blücher, 1976.
- JOPPERT JR., I. Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução. São Paulo: PINI, 2007.
- LOPES, A. B. Geotecnica: fundamentos e aplicações. 1. ed. São Paulo: Editora XYZ, 2017. 350 p.
- MASSAD, E. Obras de terra: projetos e técnicas. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 450 p.