

Análise Teórico-Experimental da Estabilidade de Taludes em Solos Argilosos Lateríticos

Bóris Casanova Sokolovicz

Professor do curso de Engenharia Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, Brasil, boriscs@san.uri.br

Beatriz Correia de Moraes

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, Brasil, beatrizcmoraes@aluno.santoangelo.uri.br

Paulinne Thomas Klee

Graduada em Engenharia Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, Brasil, paulinnetk@hotmail.com

Leonardo Lunkes Wagner

Professor do curso de Engenharia Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, Brasil, lwagner@san.uri.br

Gustavo Martins Cantarelli

Professor do curso de Engenharia Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, Brasil, gcantarelli@san.uri.br

RESUMO: O planejamento e a análise do solo são cruciais para evitar consequências adversas em termos de segurança, aspectos sociais, econômicos e ambientais. Um estudo foi conduzido em um talude artificial na região noroeste do Rio Grande do Sul, onde não houve controle adequado de compactação. Durante a primeira inspeção, notou-se uma deformação de aproximadamente 10 centímetros, causando a separação entre a estrutura pré-fabricada e a fundação moldada no local. Para compreender a estratigrafia do solo, foi realizado o ensaio de penetração padrão (SPT) até atingir a camada indeformável, situada a 2,10 metros de profundidade. A partir do levantamento topográfico e do ensaio SPT, foi elaborado um provável perfil do terreno, visando explicar o recalque da fundação. Para avaliar a estabilidade do talude, foram realizadas simulações pelo Método de Bishop, considerando diversas condições, como solo saturado, influência das fundações e implementação de um muro de contenção com drenos. As recomendações para melhorar a estabilidade incluem a instalação de drenos, a construção de uma estrutura de arrimo na base do talude e o plantio de gramíneas.

PALAVRAS-CHAVE: Talude, Estabilidade, Recalque, Fator de Segurança, Contenção.

ABSTRACT: The planning and analysis of soil are crucial to avoid adverse consequences in terms of safety, social aspects, economics, and the environment. A study was conducted on an artificial slope in the northwestern region of Rio Grande do Sul, where there was inadequate compaction control. During the initial inspection, a deformation of approximately 10 centimeters was noted, causing separation between the precast structure and the molded foundation on-site. To understand the soil stratigraphy, the standard penetration test (SPT) was conducted until reaching the non-deformable layer, located at 2.10 meters depth. Based on the topographic survey and SPT, a probable terrain profile was developed to explain the foundation settlement. To assess the slope stability, simulations were performed using the Bishop Method, considering various conditions such as saturated soil, foundation influence, and the implementation of a retaining wall with drains. Recommendations to improve stability include installing drains, constructing a supporting structure at the base of the slope, and planting grasses.

KEYWORDS: Slope, Stability, Repression, Safety Factor. Containment.

1 INTRODUÇÃO

Os taludes desempenham um papel fundamental na estabilização do solo na construção civil, sendo superfícies inclinadas que delimitam massas de terra ou rocha. Comumente encontrados em projetos de obras viárias, barragens, mineração e urbanização acelerada, sua estabilização é cada vez mais crucial para evitar consequências graves. A demanda por técnicas de estabilização de taludes tem crescido, à medida que a ciência e a tecnologia avançam, impulsionando estudos mais aprofundados sobre sua estabilidade. De acordo com Gerscovich (2012), a avaliação da segurança, geralmente expressa em coeficientes de segurança ou probabilidade de ruptura, é de importante na fase de projeto e implementação. Investir em profissionais qualificados para realizar análises geológicas e de estabilidade torna-se crucial para mitigar os riscos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A estabilidade de taludes na engenharia geotécnica abrange a análise crítica dos fatores que influenciam a estabilidade de encostas naturais e artificiais. Esses estudos frequentemente se baseiam em princípios fundamentais da mecânica dos solos, como a teoria de Terzaghi (1943) sobre a resistência dos solos e a análise de tensões críticas. Duncan e Wright (2005) contribuíram significativamente com o entendimento das propriedades de resistência dos solos e sua aplicação na estabilidade de taludes.

A abordagem moderna também considera avanços em métodos numéricos e modelagem computacional para simular o comportamento complexo das encostas em diferentes condições de carregamento e ambientais (Griffiths & Lane, 1999). Estudos recentes enfatizam a importância da investigação detalhada das propriedades geotécnicas do solo, monitoramento contínuo e a aplicação de medidas preventivas para mitigar riscos de instabilidade (Aleotti & Chowdhury, 1999; Fredlund et al., 2012). A compreensão desses aspectos teóricos e práticos é essencial para a segurança de infraestruturas construídas em encostas e para o planejamento urbano sustentável.

O colapso de taludes é um fenômeno geotécnico grave, resultante da perda de estabilidade de encostas devido a fatores como saturação do solo, erosão ou sobrecargas. Este evento pode causar danos significativos a estruturas e comunidades adjacentes, representando riscos à segurança pública e ambiental. Estudos focam na análise das condições que levam ao colapso, incluindo a investigação das propriedades do solo, geometria da encosta e histórico de instabilidades anteriores (Hung et al., 2014). Medidas de mitigação, como sistemas de drenagem adequados e monitoramento contínuo, são essenciais para reduzir os riscos associados e melhorar a resiliência de áreas vulneráveis.

3 METODOLOGIA

Foi escolhido um talude artificial, sem controle de compactação, na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Não serão disponibilizadas informações da cidade e proprietário, devido um termo de confidencialidade. Foi realizada uma sequência de verificações. Para isso foram coletadas amostras deformadas.



Figura 1. Situação Inicial Encontrada no Talude na Fachada Norte e Leste, Respectivamente.

Dessa maneira, foram realizados os ensaios de Granulometria por Peneiramento e Sedimentação - NBR 7181 (2018), Limite de Liquidez - NBR 6459 (2017), Limite de Plasticidade - NBR 7180 (2016), Compactação normal – NBR 7182 (2020), Resistência ao Cisalhamento - IE/ DNER 04 (1971), Peso Específico - NBR 7181 (2018). A Figura 1 apresenta a situação inicial do talude.

Na Figura 1, nota-se que houve uma deformação de 10 centímetros que separou a estrutura pré-fabricada da estrutura de fundação no local, indicando um movimento significativo do solo devido ao carregamento. A edificação, situada próxima a uma rodovia movimentada, enfrenta esforços de vibração. Foi observado também, em outros pontos, a presença de árvores cortadas e inclinação significativa da frente para os fundos, facilitando a percolação da água durante chuvas, falta de controle de compactação, mata densa adjacente e o movimento intenso do solo, evidenciando desafios geológicos específicos da região.

3.1 Monitoramento do Talude e Modelagem

Após a coleta das amostras e realização dos ensaios, foi realizado o monitoramento do talude. Nesse sentido, realizou-se o monitoramento da movimentação do talude durante 5 meses com Estação Total. Além disso, foi realizada a modelagem computacional no *software MacStars*.

3.2 Ensaio SPT

Para uma avaliação correta da estratigrafia do solo, foi realizado o ensaio de penetração padrão (SPT) até chegar no indeformável. O ensaio SPT é regido pela ABNT NBR 6484 (2020), conforme Figura 2.



Figura 2. Resultado do ensaio SPT e o Ensaio Sendo Realizado no Local.

Conforme a Figura 2, pode-se verificar que o impenetrável se encontra a 2,10 metros de profundidade conforme preconiza a ABNT NBR 6484 (2020). É fundamental salientar que o ensaio não havia sido realizado para a execução da obra, onde as estacas foram executadas sobre um aterro sem nenhum tipo de controle de compactação. O SPT foi efetuado para uma análise de reforço estrutural.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaios Laboratoriais

A Tabela 1 apresenta o resultado dos ensaios. Já a Figura 3 apresenta a localização dos pontos no talude que foram coletados para ensaios no laboratório.

Tabela 1. Resultado dos Ensaios de Laboratório.

Ensaio	Resultado	Unidade
Granulometria por sedimentação	Argila 72,00	%
	Silte 18,00	%
	Areia Fina 7,00	%
	Areia Média 2,00	%
	Areia Grossa 1,00	%
Limite de Liquidez	53,25	%
Limite de Plasticidade	23,97	%
Índice de Plasticidade	29,28	%
Peso específico real dos grãos	2,22	g/cm ³
Densidade máxima aparente seca	1,55	g/cm ³
Umidade ótima	26,30	%
Resistência ao cisalhamento		
Ponto 1: Coesão	5,0	KPa
Ângulo de atrito	16,0	Graus
γ natural	15,3	g/cm ³
Ponto 2: Coesão	15,0	KPa
Ângulo de atrito	28,0	Graus
γ natural	16,4	g/cm ³
Ponto 3: Coesão	11,0	KPa
Ângulo de atrito	31,0	Graus
γ natural	17,5	g/cm ³
Ponto 4: Coesão	23,0	KPa
Ângulo de atrito	39,0	Graus
γ natural	18,2	g/cm ³
Ponto 5: Coesão	22,0	KPa
Ângulo de atrito	41,0	Graus
γ natural	18,6	g/cm ³

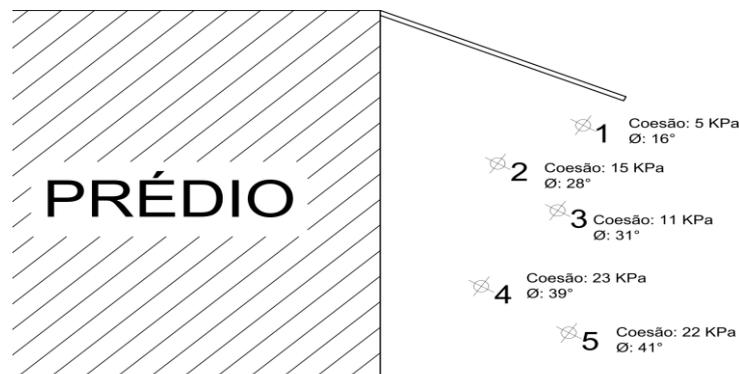


Figura 3. Coesão e ângulo de atrito (\emptyset).

Conforme a Figura 3, o ponto de menor coesão e ângulo de atrito foi o ponto 1, sendo este o que apresentou os maiores deslocamentos, ou seja, junto a contenção já executada. Uma explicação para esse maior deslocamento nesse ponto é justamente o maior fluxo de água nesse ponto, pois como não foi realizada nenhum tipo de drenagem no talude e junto ao muro. Assim, esse maior fluxo próximo ao muro promoveu uma maior movimentação do talude, deixando menores os valores de coesão e ângulo de atrito.

Também observa-se a grande variação nos resultados de coesão e ângulo de atrito, o que evidencia que não houve nenhum tipo de controle de compactação e execução.

4.2 Movimento do Talude e Fundações

Segundo as informações coletadas, as fundações com estacas de 80 centímetros de diâmetro, com 8 barras de 12.5 mm, de comprimento variável, e estribos de 5.0 a cada 20 centímetros. Os pilares ficaram embutidos nas estacas.

Conforme a ABNT NBR 6122 (2022), no item 9.2.2.1, estabelece que a carga de trabalho de uma estaca escavada sem revestimentos é de 5 MPa acima de 70 centímetros de diâmetro, sem a necessidade de fazer prova de carga. Para uma estaca de 80 cm de diâmetro, a capacidade resistente da estaca é conforme a Equação 1:

$$P = \sigma \cdot A = 5 \text{ MPa} \cdot (\pi \cdot r^2) = 5 \text{ MPa} \cdot (\pi \cdot 0,40^2) = 2,51327 \text{ MN} = 2.513,27 \text{ KN} = 251,33 \text{ tf} \quad (1)$$

Já, conforme o SPT, a capacidade de carga da estaca, que nesse caso é preponderantemente de ponta, sendo usual o Método de Aoki-Velloso (1975) é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Capacidade de Carga Geotécnica da Estaca de Diâmetro 80 cm.

Estaca		Escavada sem lama		F1		F2	
Diam.	80,0	(cm)		3,00		6,00	
Área	5026,5	(cm ²)					
Perímetro	251,3	(cm)					

Aoki-Velloso (1975)													
Camada	Profundidade (m)	N SPT	Solo	α (%)	K (kgf/cm ²)	Δl (cm)	rI (kgf/cm ²)	RI (kgf)	Atrito		Ponta Rp (kgf)	Total R = RI + Rp (kgf)	Admissível Qa = R/2 (kgf)
									Σ RI (kgf)	qc (kgf/cm ²)			
1	0,0 - 1,0	8	Argila arenosa	2,40	3,50	100	0,11	2814,9	2814,9	28,0	46914,5	49729,3	0,0
2	1,0 - 2,0	7	Argila arenosa	2,40	3,50	100	0,10	2463,0	5277,9	24,5	41050,1	46328,0	23164,0
3	2,0 - 3,0	50	Argila arenosa	2,40	3,50	100	0,70	17592,9	22870,8	175,0	293215,3	316086,1	158043,1
4	3,0 - 4,0	50	Argila arenosa	2,40	3,50	100	0,70	17592,9	40463,7	175,0	293215,3	333679,0	166839,5
5	4,0 - 5,0	50	Argila arenosa	2,40	3,50	100	0,70	17592,9	58056,6	175,0	293215,3	351271,9	175636,0
6	5,0 - 6,0	50	Argila arenosa	2,40	3,50	100	0,70	17592,9	75649,6	175,0	293215,3	368864,9	184432,4

Conforme a Tabela 2 e a ABNT NBR 6484 (2020), o SPT foi adotado como 50 após o terceiro metro para simular a rocha até 5 metros de profundidade, calculando assim a dissipação do bulbo de tensões na ponta da estaca. Isso resultou em uma capacidade de carga estrutural de 251,33 toneladas e uma capacidade de carga geotécnica de 158,04 toneladas. Sem a planta de cargas do projeto, estimou-se a carga do pilar afetado pelo recalque em cerca de 20 toneladas usando o método da área de influência, conforme ilustra a Figura 4. A Figura 5 mostra o monitoramento do talude.

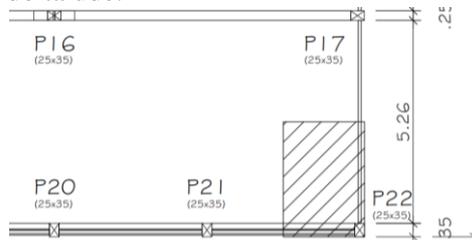


Figura 4 – Área de influência do pilar que apresentou o recalque

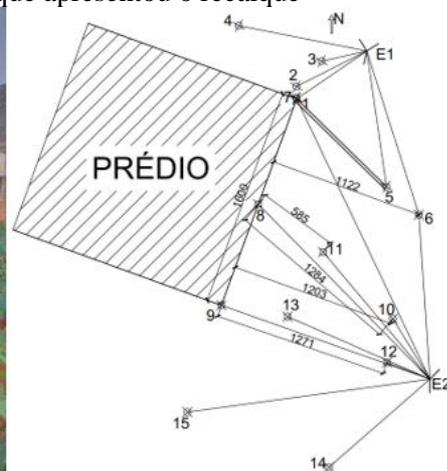


Figura 5. Pontos de monitoramento do talude.

Embora não devam surgir patologias se as fundações estiverem corretamente ancoradas na rocha, a falta de embutimento das estacas e a omissão dos esforços horizontais do solo podem causar deslocamentos e deformações nas estacas. Portanto, é fundamental revisar a execução das fundações e o dimensionamento das estacas para garantir um desempenho adequado do talude, além de controlar a compactação da terraplanagem e dos esforços horizontais do solo.

Destaque-se a importância da contenção na fachada norte, na Figura 5, que estabilizou o solo próximo à base da estaca, crucial para evitar deslocamentos significativos na estrutura. A ausência dessa contenção poderia expor a estrutura a sérios riscos. Em estruturas de arrimo, a drenagem é fundamental para evitar aumento de peso e movimentação do solo, o que não foi feito neste caso. A Figura 6 mostra a simulação da chuva e como ela percola pelo solo sobre a rocha basáltica inclinada.

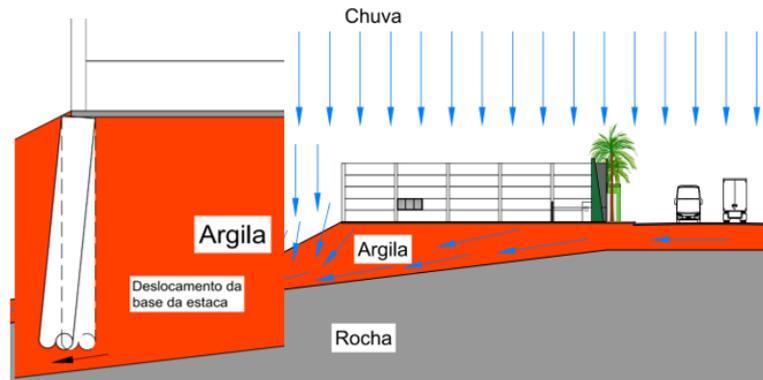


Figura 6. Efeito da chuva.

Foi observado a inclinação da rocha em direção aos fundos do terreno, sendo este composto por basalto. Com o tempo, o intemperismo químico e físico desagrega a rocha, levando à laterização, caracterizada pelo enriquecimento de óxidos de ferro e alumínio, conferindo a cor vermelha típica da região. Esses óxidos podem causar colapsos na estrutura do solo quando expostos à água durante períodos chuvosos, aumentando o empuxo ativo e a poropressão, arrastando partículas e comprometendo o suporte do solo.

4.3 Monitoramento do Talude

A Tabela 3 mostra o deslocamento em cm. Os marcos foram instalados em 15/01/2021.

Tabela 3 – Deslocamento em centímetros dos Pontos Avaliados.

Ponto	15/01/2021	15/02/2021	15/03/2021	15/04/2021	15/05/2021	15/06/2021
1	-	5,22	3,53	1,97	1,13	0,31
2	-	3,35	2,24	1,23	0,86	0,11
3	-	1,22	0,81	0,45	0,32	0,07
4	-	1,20	0,77	0,36	0,25	0,05
5	-	3,14	2,10	1,11	0,94	0,14
6	-	2,12	1,55	1,24	0,84	0,13
7 (prédio)	-	0,84	0,52	0,32	0,21	0,02
8	-	3,22	2,11	1,45	0,98	0,21
9	-	2,01	1,20	1,03	0,47	0,04
10	-	1,25	0,54	0,32	0,28	0,02
11	-	1,54	0,74	0,53	0,35	0,11
12	-	0,87	0,75	0,42	0,25	0,02
13	-	1,41	0,71	0,55	0,33	0,08
14	-	0,70	0,61	0,32	0,10	0,01
15	-	0,75	0,63	0,33	0,18	0,03

Conforme a Tabela 3 observa-se que os deslocamentos medidos com a Estação total foram reduzindo com a evolução do tempo, o que é algo positivo. O ponto crítico foi o 1, que na primeira medição apresentou 5,22 centímetros, que foi exatamente onde o talude rompeu.

4.4 Modelagem Computacional do Talude

O talude foi simulado conforme o Método de Bishop para avaliar sua estabilidade em uma situação crítica com solo saturado ilustrado na Figura 7. Inicialmente, considerou-se apenas os carregamentos, resultando em um fator de segurança (FS) de 0,678, abaixo do mínimo aceitável de 1,50. Ao incluir a influência das fundações, o FS aumentou para 1,07, ainda insuficiente segundo as normas técnicas. Recomenda-se modelar o entorno da edificação durante o monitoramento para uma avaliação mais abrangente da estabilidade.

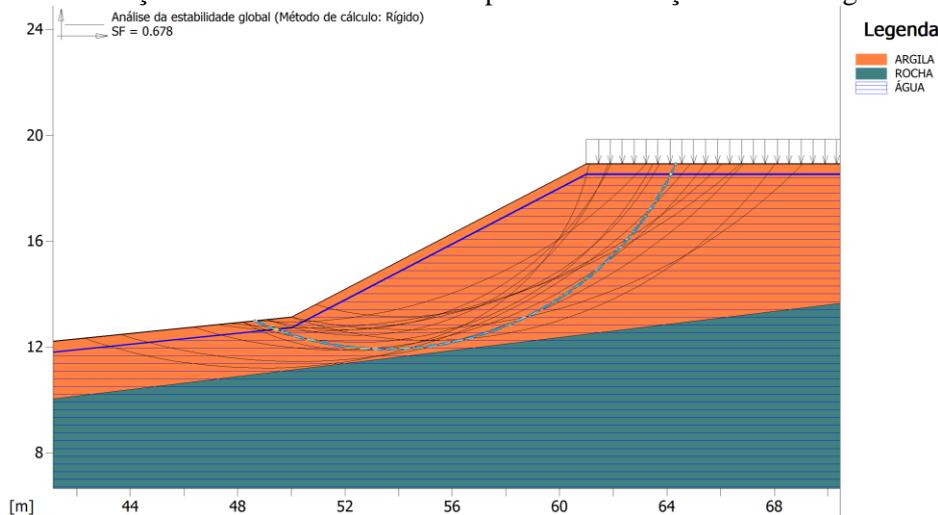


Figura 7. Avaliação do fator de segurança pelo método de Bishop.

4.5 Solução Adotada para as Fundações e para o Talude

Uma sugestão seria fazer o ensaio de integridade PIT da estaca. Esse ensaio tem por objetivo de determinar a variação ao longo da profundidade das características do concreto de estacas de fundação. Porém, ao que tudo indica as causas da deformação do solo estão associadas ao movimento do talude, e também a um possível apoio em uma cota do solo em decomposição, ou seja, não sendo diretamente na rocha. Vale ressaltar também, que em uma rocha com um horizonte inclinado, pode ocorrer devido ao movimento do solo um deslizamento da estaca, mesmo estando apoiada na rocha. O ideal seria embutir a estaca na rocha, para uma possível movimentação do talude não movimentar a base da estaca.

Para o talude, as soluções são em três pontos fundamentais: instalação de drenos, execução de uma estrutura de arrimo na base do talude, plantação de gramíneas. A Figura 8 ilustra a localização da contenção e dos drenos. A Figura 9 detalha o muro de contenção.

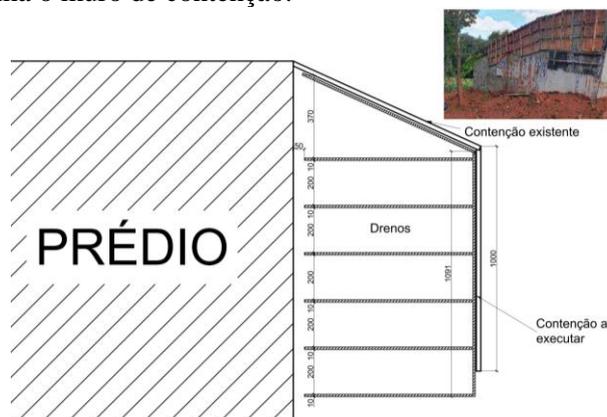


Figura 8. Proposição do local dos drenos e estrutura de contenção.

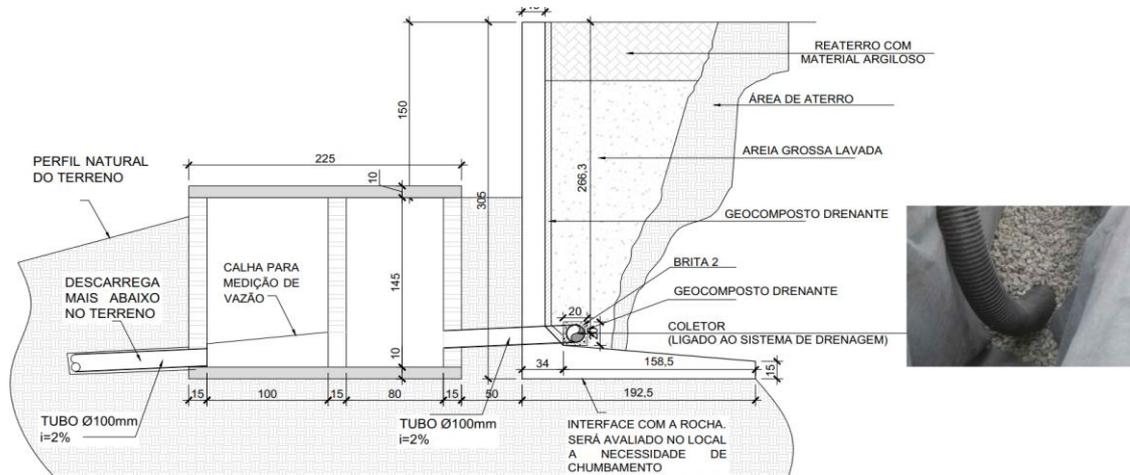


Figura 9. Estrutura de contenção.

5. CONCLUSÕES

Após o desenvolvimento do trabalho, constatou-se que o controle de execução de um talude é crucial para a segurança do próprio talude e das edificações sobre ele. A falta de controle de compactação aumenta os riscos de instabilidade, especialmente devido à incerteza nos teores de compactação em cada camada. A presença de água na percolação pode causar colapsos no talude.

O estudo de caso revelou várias patologias que só foram identificadas após movimentações intensas do talude, algumas poderiam ter sido evitadas com uma execução adequada. A falta de controle nas fundações também foi evidente, destacando a importância de avaliar tanto a carga vertical quanto a horizontal. Em camadas finas de solo e rocha inclinada, há risco de deslizamento da estaca sobre o solo saprolítico próximo à rocha sã.

Após análises, o fator de segurança do talude foi de 0,678, abaixo do mínimo de 1,50 da norma ABNT NBR 11682 (2009). Considerando o efeito das fundações, o fator subiu para 1,07, ainda insuficiente. Somente ao simular um muro de contenção na base do talude, atingiu-se um coeficiente de segurança satisfatório acima de 1,50. O monitoramento dos deslocamentos horizontais mostrou uma tendência de estabilização, reforçando a importância de sistemas de drenagem eficientes e a plantação de gramíneas para prevenir erosão e estabilizar o solo. Em conclusão, projetos adequados e monitoramento de recalques são essenciais ao lidar com taludes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEOTTI, P., & CHOWDHURY, R. (1999). *Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58(1), 21-44.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- _____. (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- _____. (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- _____. (2017). NBR 6459. *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- _____. (2016). NBR 7180. *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- _____. (2020). NBR 7182. *Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- _____. (2018). NBR 7181. *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- _____. (2020). NBR 6484. *Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-PRO 003/94 – *Coleta de amostras deformadas de solos*. 1994.
- GERSCOVICH, Denise M. S. *Estabilidade de Taludes*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- DUNCAN, J. M., & WRIGHT, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons, Inc.
- FREDLUND, D. G., RAHARDJO, H., & FREDLUND, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.
- GRIFFITHS, D. V., & LANE, P. A. (1999). *Slope stability analysis by finite elements*. *Geotechnique*, 49(3), 387-403.
- HUNGR, O., LEROUEIL, S., & PICARELLI, L. (2014). *The Varnes classification of landslide types, an update*. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- TERZAGHI, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.