

Estabilidade de talude: determinação de estimativa de nível freático crítico a partir de instrumentação

Emily Quevedo

Acadêmica, SF Engenharia, Porto Alegre, Brasil, emily@souzafloriano.com

Cleber Floriano

Diretor, SF Engenharia, Porto Alegre, Brasil, cleber@souzafloriano.com

RESUMO: As chuvas extremas no Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024 causaram diversos movimentos de massa, evidenciando a vulnerabilidade de taludes na região. Este estudo aborda a ruptura de um talude rodoviário em Pouso Novo/RS, com ênfase na influência da presença de água na instabilidade. A investigação utilizou dados de campo, como levantamentos topográficos, sondagens, ensaios geofísicos e instrumentações (INAs, inclinômetros e pluviômetros). A análise do comportamento geomecânico do solo permitiu estimar os níveis d'água no momento da ruptura, indicando que a elevação do nível freático foi o principal fator desencadeante. Os gráficos obtidos correlacionam os índices pluviométricos ao aumento do nível freático, possibilitando definir níveis de alerta e propor limites críticos nos INAs para antecipar instabilidades. Subsidiando medidas para manter a segurança do talude, destacando a importância do monitoramento contínuo e da integração entre investigação geotécnica, instrumentação de campo e modelagem preditiva em projetos de contenção. O estudo ressalta a necessidade de aprofundar a compreensão dos mecanismos de instabilidade em taludes sujeitos a eventos extremos, contribuindo para o aprimoramento de estratégias de prevenção e mitigação em contextos geológicos e climáticos semelhantes.

PALAVRAS-CHAVE: Instabilidade de taludes, Retroanálise geotécnica, Monitoramento piezométrico.

ABSTRACT: The extreme rainfall events in Rio Grande do Sul between April and May 2024 triggered several mass movements, highlighting the vulnerability of slopes in the region. This study focuses on the failure of a highway slope in Pouso Novo/RS, emphasizing the role of water infiltration in the instability process. The investigation was based on field data, including topographic surveys, direct investigations, geophysical tests, and installed instrumentation (piezometers, inclinometers, and rain gauges). The geomechanical behavior analysis allowed the estimation of groundwater levels at the time of failure, identifying the rise of the water table as the main triggering factor. Graphs developed from the instrumentation data correlated rainfall indices with groundwater level increases, enabling the definition of alert thresholds and critical limits for piezometers to anticipate future instabilities. The back-analysis supported the proposal of safety measures for the slope, reinforcing the importance of continuous monitoring and the integration of geotechnical investigation, field instrumentation, and predictive modeling in slope stabilization and retention projects. The study highlights the need to deepen the understanding of instability mechanisms in slopes exposed to extreme events, contributing to the improvement of preventive and mitigation strategies in similar geological and climatic contexts.

KEYWORDS: Slope instability, Geotechnical back-analysis, Piezometric monitoring.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo foi compilado a partir do desenvolvimento de estudos para projeto (SF Engenharia, 2024) e culminou em estudos acadêmicos de trabalho de conclusão (Quevedo, 2024).

As intensas chuvas que atingiram o estado do Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024 desencadearam inúmeros movimentos de massa em áreas urbanas e rurais, revelando a vulnerabilidade dos taludes à elevação abrupta do nível freático. Neste contexto, o presente artigo apresenta um estudo de caso de ruptura de talude rodoviário no município de Pouso Novo/RS, uma das regiões mais afetadas. A análise concentra-se na influência da infiltração de água como fator determinante para a instabilização da massa de

solo. O estudo baseou-se em dados obtidos por levantamentos topográficos, sondagens, ensaios geofísicos e instrumentação de campo, com destaque para indicadores de nível d'água (INAs), inclinômetros e registros pluviométricos. A partir da correlação entre a precipitação e o comportamento do nível freático, foi possível estimar as condições críticas no momento da ruptura. O trabalho reforça a importância do monitoramento contínuo e da integração entre dados empíricos e modelos numéricos na gestão de riscos geotécnicos em taludes submetidos a eventos extremos.

2 ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O talude analisado neste estudo localiza-se no município de Pouso Novo, região central do estado do Rio Grande do Sul, em trecho rodoviário sujeito a escavações e aterros associados à implantação da plataforma viária. O talude, em vista aérea, está apresentado na Figura 1 (a). A ruptura ocorreu em 29 de abril de 2024, em meio ao evento climático extremo que afetou amplamente o estado, resultando em acumulados pluviométricos superiores a 700 mm em poucos dias, ultrapassando médias trimestrais em diversas localidades, conforme apresentado por Wongchuig (2024).



Figura 1. (a) foto do local, vista aérea, (b) trincas de tração abertas no local.

A instabilidade se manifestou por meio de trincas de tração longitudinais, conforme apresentado na Figura 1(b), degraus de recalque e deslocamentos visíveis no corpo do talude comprometendo a segurança da infraestrutura e exigindo interdição parcial da via. A geometria da encosta, a presença de solos heterogêneos — incluindo aterros rodoviários, solos residuais e materiais de bota-fora — e a ausência de controle efetivo do escoamento superficial contribuíram para o agravamento da situação.

Diante da magnitude da movimentação e da possibilidade de reativações, foi instalada instrumentação geotécnica com o objetivo de monitorar o comportamento do talude. Indicadores de nível d'água (INAs), inclinômetros e medidores pluviométricos foram utilizados para investigar a evolução das condições hidráulicas e mecânicas do maciço, viabilizando a análise do evento e a estimativa dos níveis críticos de água associados à ruptura.

3 PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO INTERPRETADO

Para que se fosse possível compreender a ruptura, desenhou-se a seção topográfica nessa região. Combinando os dados obtidos de levantamento topográfico, sondagens geofísicas, sondagens SPT's, sondagens mistas, e dados levantados em campo, foi possível definir as camadas de solo presentes no local. A Figura 2, demonstra em planta os eixos utilizados e o perfil de SIG L4 que está sob a seção em estudo.

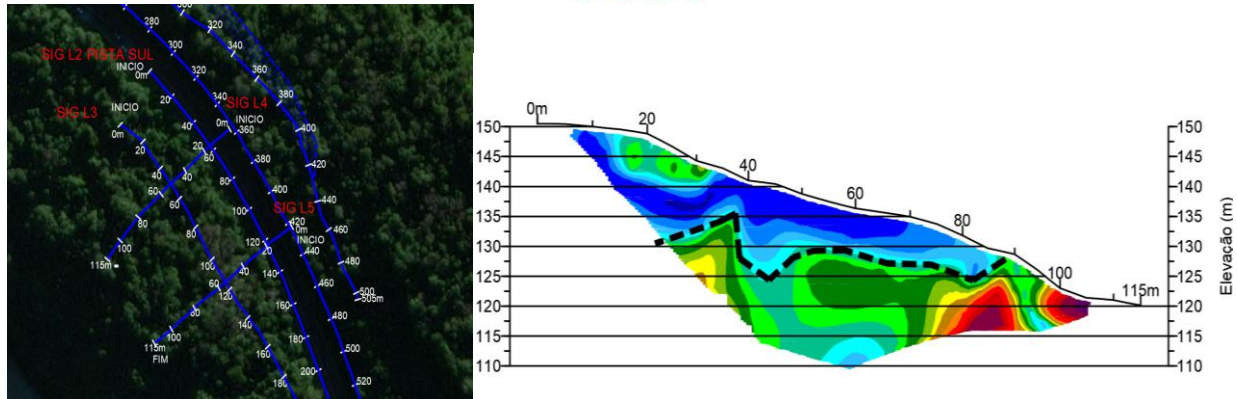


Figura 2. Eixos de imageamento geolétrico e exemplo de uma Seção geofísica.

Com os dados da geofísica foi possível obter a estratigrafia do terreno, que foi confirmada com dados de visita de campo e de sondagem SPT. Com os dados em mãos, observou-se que a rodovia, neste trecho, possui um aterro de boa qualidade e abaixo deste, encontra-se um solo também competente, que não foi interceptado pela superfície de ruptura. Além disso, sabe-se, por observações em vistoria de campo, que o solo na lateral da rodovia é remanescente de bota-fora. Esses materiais são depósitos ocorridos durante obras na rodovia e que não foram devidamente compactados, essas informações são representadas na estratificação apresentada na Figura 3. A superfície de ruptura foi também determinada por dados de campo, o início da superfície é resultado das trincas observadas em campo, apresentadas na Figura 4, apontadas também em levantamento topográfico. Uma ruptura com deslocamentos desta magnitude permite a observação do soerguimento do material no pé, embora não seja de fácil identificação em campo. Além disso, a partir dos inclinômetros foi possível estimar a profundidade da ruptura, com isso tem-se uma boa identificação do mecanismo de ruptura.

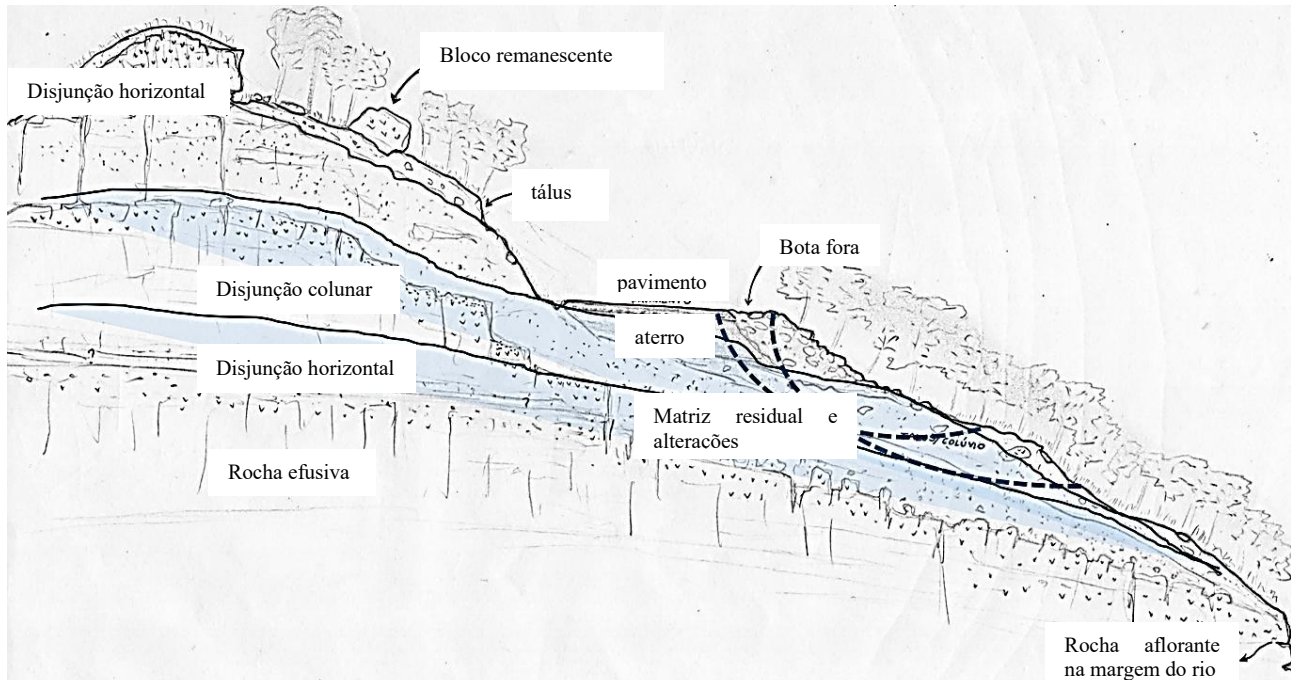


Figura 3. Seção geológico-geotécnica interpretada.

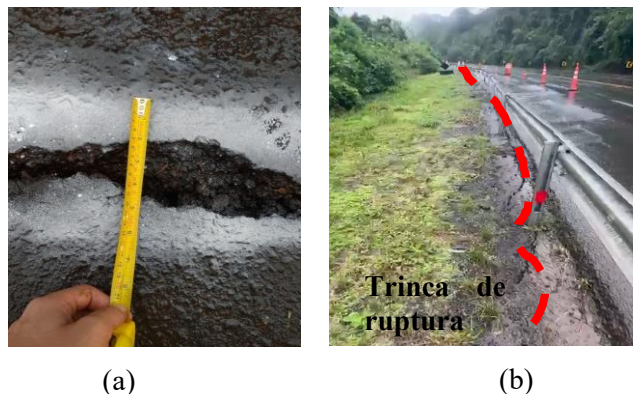


Figura 4. (a) foto em detalhes da trinca de ruptura aberta na rodovia, (b) foto de parte do caminho da trinca de ruptura.

4 ESTIMATIVA DE NÍVEL D'ÁGUA E INSTRUMENTAÇÃO

Sabe-se que no momento da ruptura havia um volume de chuvas atípico na região de estudo, evidenciando a importância do nível d'água na estabilidade do talude. Logo, após a movimentação de massa, foram instalados INAs, pluviômetros e inclinômetros no local da ruptura. O intuito da instalação destes instrumentos foi de efetivamente monitorar o comportamento mecânico do talude. A distribuição de instrumentos foi dada conforme Figura 5.

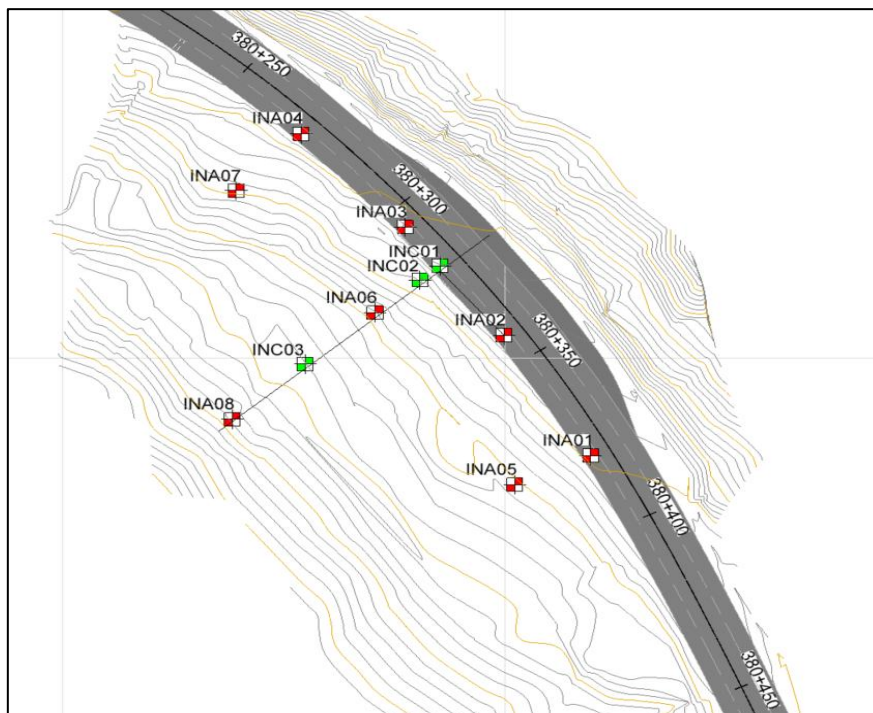


Figura 5. Instrumentação de campo.

Os pontos pertinentes a esse estudo foram o INA8 e INA02 visto que apresentam mais tempo de registro em campo, ou seja, maior quantidade de informações para interpretação, além de estarem próximos a seção de estudo. O fato crucial desta instrumentação de deslocamentos é a observação de que durante o tempo de monitoramento (até o presente) não houve deslocamentos significativos, indicando que não ocorreu remobilização de ruptura.

Inicialmente buscou-se comparar os dados de pluviometria coletados em campo com a estação pluviométrica mais próxima, sendo essa a do centro da cidade de Fontoura Xavier, a 40 km do trecho, de código 430830001A. Após verificar pouca discrepância entre os dados do ponto e da estação de Fontoura

Xavier concluiu-se que essa estação pode ser uma base confiável de dados. Logo, buscou-se relacionar os dados de nível d'água coletados nos dias, após o rompimento, com as chuvas da estação pluviométrica, para que fosse possível encontrar uma tendência (chuva x subida de nível d'água) no talude. Com essa relação, foi possível estimar o nível d'água no momento da ruptura, já que se tem o conhecimento dos índices pluviométricos nesse período.

A Figura 6 apresenta o gráfico do acumulado de chuvas do mês junho da estação de Fontoura Xavier.



Figura 6. Acumulado de chuvas do mes de junho, Estação Fontour Xavier.

A Figura 7 mostra os dados (dia do mês versus leitura no instrumento INA) coletados pelo INA2 no mês de junho de 2024. A leitura nos INAs é a medida da distância do nível d'água até a superfície. Logo, quanto menor a leitura, mais elevado está o nível d'água em relação ao terreno. Então, para fins representativos, o eixo das ordenadas está invertido nos gráficos apresentados.

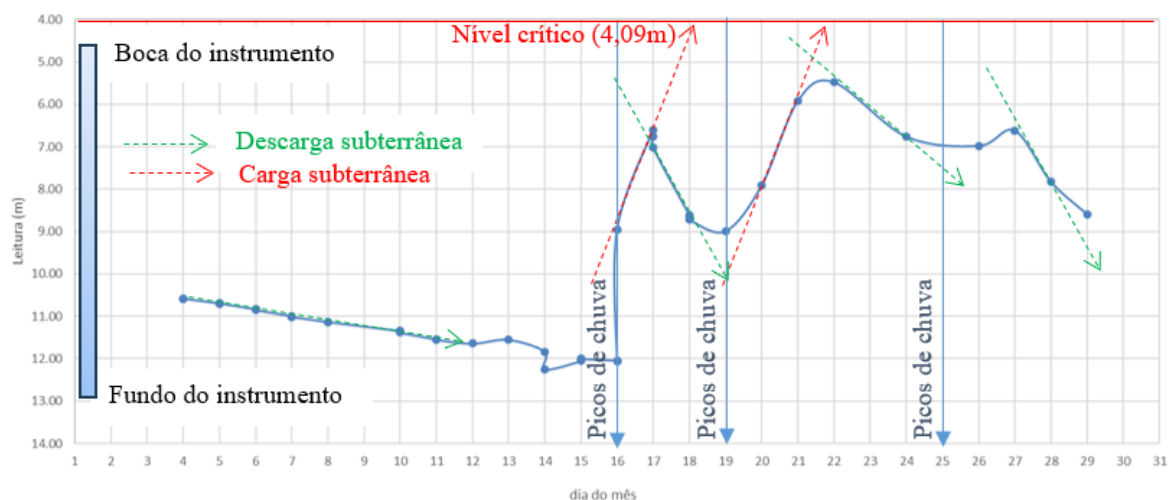


Figura 7. Dados coletados do INA2 no mês de junho/2024.

No gráfico, portanto, é possível notar que nos primeiros dias do mês, até o dia 15 de junho o nível de água estava com uma tendência de queda, após alguns dias de seca. O nível d'água começa a subir apenas no dia 16 de junho. Os primeiros dados coletados nesse dia foram às 07:30h e 12:00h e não registraram aumentos significativos de nível d'água, apenas na coleta de dados das 16:40 foi demonstrado aumento significativo no nível d'água. Ao analisar as chuvas medidas pela estação pluviométrica é possível notar que a chuva começou no dia 15 de junho, às 16h e seguiu por alguns dias. Ao comparar a hora de início da chuva e o horário de subida do nível d'água é possível notar que a resposta efetiva da descarga de água é evidenciada no INA entre 20h e 24h depois do início da chuva. A partir deste fato, considerou-se que existe uma tendência de retardo de crescimento do nível de água, sendo extrapolado para as chuvas posteriores. Ao relacionar cada subida de nível de água (em metros) com a precipitação do dia anterior (em milímetros) obteve-se valores de subidas unitárias, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Pontos de subida INA2 x chuvas de junho/2024.

Pontos de subida INA2 x chuvas			
dia	Subida (m)	Precipitação dia anterior (mm)	subida unitária (m/mm)
16-16	3.09	27.4	0.11
16-17	2.34	95	0.02
19-20	1.08	6.4	0.17
20-21	1.99	43.6	0.05
21-22	0.44	20	0.02
26-27	0.36	29.4	0.01

Ao analisar a Figura 7 em conjunto com a Tabela 1 é possível observar um padrão na subida do N.A. Inicialmente, com o solo mais seco, o nível d'água sobe com maior facilidade, à medida que a chuva continua, esse aumento passa a ser mais lento, devido a tendência de saturação do solo. Ao observar o referido padrão de variação nos dados do mês de junho, tendo-se os dados de chuvas do mês de maio, buscou-se, a partir das relações encontradas, estimar qual foi o nível de água gerado pelas precipitações que atingiram o gatilho da ruptura. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Estimativa do INA2 no momento de ruptura.

chuva	subida de NA gerada	razão	dia	chuva	subida de NA projetada	NA projetado
27.4	3.09	0.11	26/04/2024	9.8	1.11	10.93
			27/04/2024	11.4	0.28	11.78
95	2.34	0.02	28/04/2024	24.25	0.60	8.35
			29/04/2024	102.2	2.52	4.09

Segundo os relatos, a ruptura ocorreu no dia 29/04, então foram estimados os níveis para esse dia, responsáveis por disparar a ruptura. O mesmo processo foi feito para o INA08, que se encontra mais ao pé do talude, mostrado na Figura 8.



Figura 8. Dados coletados do INA8 no mês de junho.

Ao analisar o INA8 é possível verificar uma sensibilidade muito maior em resposta as chuvas, comparado ao INA2. Na primeira coleta do dia 15 a leitura estava em 2,30 m e até as 16 h subiu apenas 3cm.

Como descrito para INA2, a chuva do dia 15 iniciou as 16 h, junto com a última leitura do INA8 desse dia, e se seguiu por alguns dias, logo na leitura seguinte, do dia 16 às 08 h da manhã já notou-se um aumento significativo de 56 cm no nível d'água. Ao verificar a subida unitária de N.A, o mesmo padrão de INA2 se repete. A subida começa de forma mais rápida quando o terreno está mais seco e diminui conforme o solo tende a saturar. A Tabela 3 apresenta a razão encontrada entre subida do nível de água e aumento do índice pluviométrico.

Tabela 3. Subida de nível d'água de acordo com a chuva.

dia	subida	precipitação dia (mm)	Subida unitária (m/mm)
15-16	0.56	27.4	0.02
16-16	0.39	66.6	0.01
17-17	0.19	28.6	0.01

A partir das relações encontradas para o INA8, estimou-se qual seria o nível d'água no dia da ruptura, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Estimativa de nível d'água na ruptura.

chuva	subida de NA gerada	razão	dia	chuva	subida de NA projetada	NA projetado
27.4	0.56	0.02	26/04/2024	9.8	0.20	2.13
66.6	0.39	0.01	27/04/2024	11.4	0.07	1.70
28.6	0.19	0.01	28/04/2024	24.25	0.14	1.29
			29/04/2024	102.2	0.60	0.78

Com a estimativa dos níveis do lençol freático no INA2 e INA8, foi possível posicioná-los na seção de estudo, conforme apresentado na Figura 9. Estes níveis são considerados críticos, ou seja, a partir desta elevação, estima-se que potencialmente os deslocamentos seriam reativados.

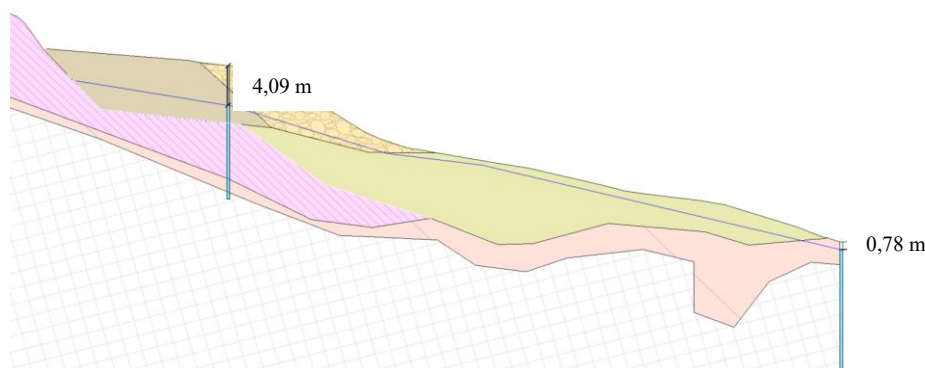


Figura 9. Estimativa de nível d'água na ruptura.

6. CONCLUSÃO

A análise desenvolvida permitiu compreender os fatores determinantes para a ruptura do talude rodoviário em Pouso Novo/RS, ocorrida durante as chuvas extremas de abril de 2024. A investigação com base em dados topográficos, geofísicos, pluviométricos e de instrumentação geotécnica demonstrou a correlação direta entre a elevação do nível freático e a instabilização da massa de solo.

A análise dos dados dos INAs evidenciou que níveis críticos de água subterrânea foram atingidos nos dias que antecederam o colapso, com destaque para os valores estimados de 4,09 m no INA2 e 0,78 m no



INA8. Tais níveis foram considerados limiares para a perda de estabilidade do maciço, sendo fundamentais para o diagnóstico do mecanismo de ruptura.

Com os dados de nível d'água é possível partir para uma retroanálise, que buscará estimar os parâmetros do solo no momento de sua ruptura e possibilitará um diagnóstico preciso e a indicação de uma solução de estabilização.

A ausência de deslocamentos significativos após a instalação dos instrumentos confirmou que o talude permaneceu estável durante o período de monitoramento, reforçando a importância do acompanhamento contínuo como medida preventiva. A metodologia adotada neste estudo pode ser aplicada em contextos similares para definição de níveis de alerta e planejamento de ações corretivas. Recomenda-se, portanto, a continuidade do monitoramento e o desenvolvimento de projeto definitivo de estabilização, com base nas condições críticas identificadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CCR Via Sul e a SF Engenharia e a todos que contribuíram e possibilitaram a construção deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Quevedo, Emily (2024). *Estabilidade de talude: determinação de estimativa de nível freático crítico a partir de instrumentação*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10923/27030>. Acesso em: 20 jul. 2025.
- SF Engenharia. (2024). *Relatório diagnóstico de ruptura*. Porto Alegre: SF Engenharia. Projeto executivo. Documento interno.
- Wongchuig, F.; Breda, S. (2024). *Chuvas sem precedentes de abril a maio de 2024 no Sul do Brasil definem novo recorde*. SciELO Preprints. DOI: 10.1590/SciELOPreprints.9773. Disponível em: <https://preprints.scielo.org/index.php/scielo/preprint/view/9773>. Acesso em: 8 ago. 2025.