

ESTABILIDADE DE TALUDE: DETERMINAÇÃO DE ESTIMATIVA DE NÍVEL FREÁTICO CRÍTICO A PARTIR DE INSTRUMENTAÇÃO

Autor: Emily Quevedo da Silva (silva.emily22@edu.pucrs.br)

Orientador: Prof. MSc. Cleber Floriano (cleber@pucrs.br)

Resumo

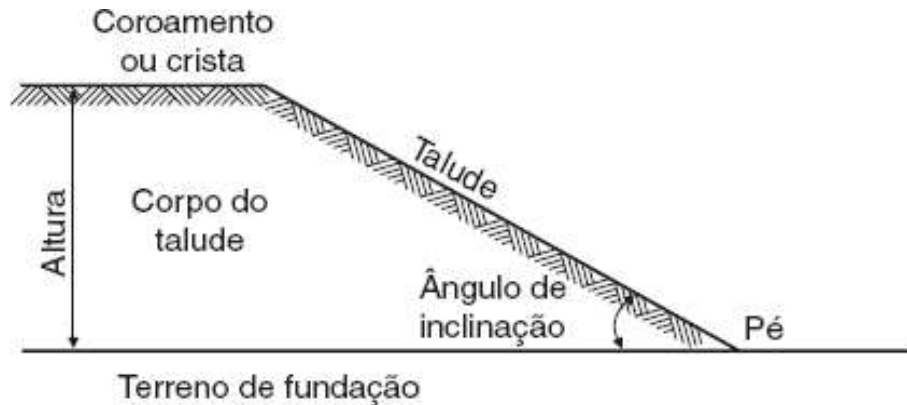
As fortes chuvas que atingiram o Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024 provocaram diversos movimentos de massa, tanto em rodovias quanto em áreas urbanas e rurais, evidenciando a vulnerabilidade de taludes e encostas à ação de chuvas intensas. Esse cenário destacou a necessidade de um estudo mais aprofundado dos fatores que contribuem para rupturas. O presente trabalho aborda um estudo de caso sobre a ruptura de um talude rodoviário no município de Pouso Novo, RS. O foco é investigar os fatores que contribuíram para a instabilidade e ruptura do talude, com ênfase na influência da presença de água na massa de solo, visando elaborar um diagnóstico do problema. Foram utilizados dados de investigações de campo para construir um modelo matemático, a partir de levantamento topográfico e instrumentações como indicadores de nível d'água (INAs), inclinômetros e índices pluviométricos. Dessa forma, foi possível analisar o comportamento geomecânico da massa de solo com a entrada de água em subsuperfície. O estudo propôs estimar o nível d'água nos INAs no momento da ruptura, concluindo que o aumento do nível d'água foi o fator desencadeante da falha.

Palavras-chave: movimento de massa, instrumentação de talude, diagnóstico de ruptura.

1. INTRODUÇÃO

Segundo CAPUTO (2022) dá-se o nome genérico de “taludes” a toda e qualquer superfície inclinada que delimita um maciço, seja de rocha e/ou terra. Podem ser tanto naturais, chamados de encostas, quanto artificiais, taludes de cortes e aterros gerados pela ação antrópica, a Figura 1 ilustra a terminologia adotada em taludes.

Figura 1: Terminologia usualmente adotada em taludes



Fonte: Caputo (2022)

A instabilidade de taludes, sejam encostas naturais ou taludes de aterro, é um problema recorrente dentro da engenharia civil e atinge a sociedade como um todo. Os escorregamentos, quando ocorrem em grande escala, geram diversos problemas para comunidades inteiras, tornando o problema não apenas de caráter geotécnico, mas também governamental. No Brasil é comum a ocupação de várias áreas montanhosas por comunidades irregulares (inicialmente), como é o caso da cidade do Rio de Janeiro que tem diversos desmoronamentos em períodos de chuva frequente, causando desde perdas materiais até perdas de vida humana, o mesmo acontece em diversas outras localidades no país. Além disso, também são atingidas as rodovias, que tendo deflagração de rompimento, frequentemente precisam ser bloqueadas parcialmente e as vezes interrompidas totalmente até que se tenha intervenção para estabilização, isolando cidades ou tornando frequente a necessidade de trajetos mais longos. Logo, torna-se uma temática que precisa de ampla abordagem, discussão e principalmente, intervenção com conhecimento técnico aplicado uma vez que o volume financeiro dependido é de grande relevância para o erário.

Segundo GERSCOVICH (2016) são diversos os fatores que contribuem para a instabilidade de taludes, eles podem ser antrópicos, como alterações e vazamentos em redes de drenagem, uso e ocupação desordenada do solo com a eliminação de coberturas vegetais e intensa impermeabilização do solo, construção de taludes mal dimensionados, entre outros. Além dos fatores antrópicos, ainda deve-se considerar os fatores internos, como a ação da água, principalmente em períodos de chuva intensa ou prolongada, que gera variação na pressão interna de água do solo, o que o torna mais suscetível a deslizamentos, o que explica os diversos desmoronamentos após os períodos chuvosos.

Segundo Collischonn et al (2024), a precipitação ocorrida no Rio Grande do Sul, entre o fim do mês de abril e início do mês de maio de 2024, foi provavelmente, a precipitação mais intensa ocorrida no Brasil, considerando áreas afetadas de 2.000 a 100.000 km² em períodos de 3 a 14 dias. Estas áreas são consideradas grandes, o que elevou o fenômeno climático a Catástrofe.

Uma vez entendida que houve uma catástrofe climática sem precedentes no estado do Rio Grande do Sul, este trabalho propõe estudar um talude rompido, no município de Pouso Novo, zona afetada durante chuvas de abril e maio, que atingiram o estado provocando milhares de deslizamentos. O trabalho fundamenta-se na coleta e interpretação de dados topográficos, investigações invasivas e não invasivas. Além disso, instrumentações, como indicadores de nível d'água (INAs), inclinometria (deslocamentos no maciço), bem como a coleta de dados da chuva, contribuíram para estimar o nível d'água no instante da ruptura. Por fim, foi possível diagnosticar o problema ocorrido. Salienta-se que o presente artigo não tem a proposta de indicar uma solução para a estabilização do talude avaliado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo MASSAD (2010) os métodos atualmente empregados para analisar a estabilidade de taludes são fundamentados na suposição de equilíbrio em uma massa de solo, tratada como um corpo rígido-plástico prestes a iniciar um processo de escorregamento. Por isso, esses métodos são geralmente denominados como "métodos de equilíbrio-limite". Sabendo-se quais as forças atuantes, descobrem-se as tensões de cisalhamento geradas, por meio de equações de equilíbrio. Comparando-se a resistência ao cisalhamento do solo com as tensões atuantes tem-se o fator de segurança do talude.

Segundo o autor, são várias as causas que podem levar a ruptura, dentre as mais importantes:

- a) alteração da geometria de taludes naturais;
- b) colocação de sobrecargas no topo de encostas;
- c) infiltração de água de chuvas no talude, que podem levar ao aumento das pressões neutras e redução na resistência do solo;
- d) desmatamento e poluição.

1.1. Instrumentação de Taludes

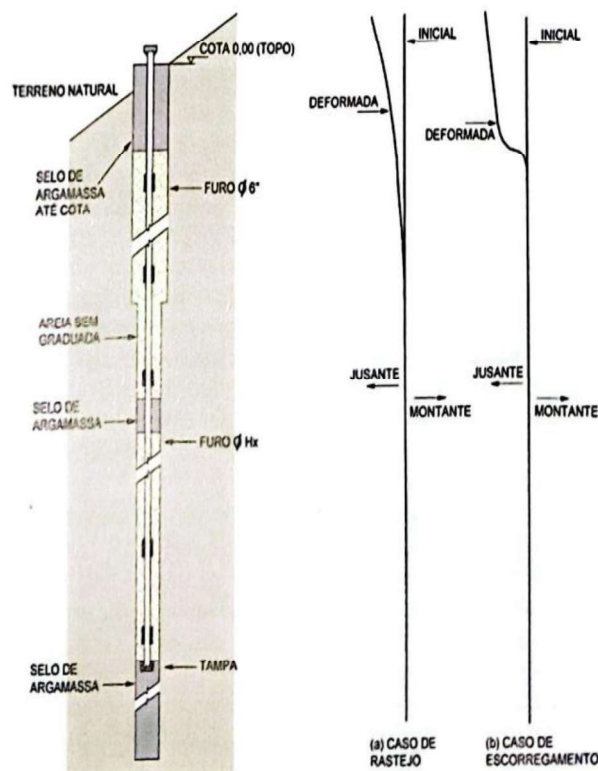
Segundo MANOEL (2018) a instrumentação ou monitoramento de maciços utiliza diversos dispositivos para observar e registrar mudanças em parâmetros cruciais que afetam a

estabilidade de taludes. Os dados coletados por meio desses instrumentos não apenas monitoram os movimentos, mas também fornecem informações essenciais para estudos de estabilidade em casos de movimentação dos maciços. São alguns deles:

a) Inclinômetros

Dispositivos utilizados para medir deformações em subsuperfície, fornecendo dados detalhados sobre possíveis movimentações internas do maciço em duas direções ortogonais ao longo da profundidade. Para isso, um tubo especial de alumínio flexível é inserido em um furo de sondagem vertical, composto por segmentos unidos por luvas fixadas com rebites, e o espaço entre o tubo e o furo é preenchido com material granular. À medida que o maciço se movimenta, o tubo flexível acompanha esses movimentos. Essa movimentação é detectada por um sensor elétrico introduzido no tubo, que fornece um valor correspondente ao ângulo de inclinação em relação à vertical, permitindo identificar a profundidade onde ocorre o maior deslocamento. A Figura 2 apresenta um esquema típico de instalação de um inclinômetro em um furo de sondagem, juntamente com curvas de deformação que ilustram rastejo e ocorrência de ruptura do solo.

Figura 2: Instalação de inclinômetro e gráfico de deformação.



Fonte: Geologia de engenharia (2018)

b) Medidores de nível d'água

Dispositivos utilizados para verificar e monitorar a hidrologia subterrânea de taludes e encostas naturais em observação, empregando medidores de nível d'água do tipo "*stand-pipe*" e piezômetros do tipo Casagrande. Ambos os dispositivos são feitos de tubos de PVC e instalados em furos de sondagem.

O medidor ou indicador de nível d'água (INA) é perfurado radialmente ao longo de quase toda sua extensão, envolvido com uma manta geotêxtil ou tela de nylon, e o espaço anelar é preenchido com areia, como ilustrado na Figura 3. Esse arranjo permite determinar a profundidade do nível d'água durante as leituras.

Figura 3: Medidor de nível d'água



Fonte: Geologia de engenharia (2018)

1.2. Infiltração de água no solo

De acordo com Kashef (1986), a quantidade de água que infiltra no solo, devido à precipitação tem influência direta na disponibilidade e o manejo dos recursos hídricos subterrâneos. Influenciando diretamente no dimensionamento de projetos de estruturas de drenagem subterrânea, como as utilizadas em túneis, taludes de rodovias e sistemas de coleta de lixiviados em aterros sanitários. A infiltração é influenciada por diversos fatores, como o tamanho e tipo dos vazios intergranulares, o grau de intercomunicação entre eles, a presença ou

ausência de obstáculos na superfície, as condições de umidade e o estado das tensões capilares na zona de aeração. Além disso, o movimento nessa zona acontece principalmente por gravidade (MANOEL et al., 2018).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1. Método de Pesquisa

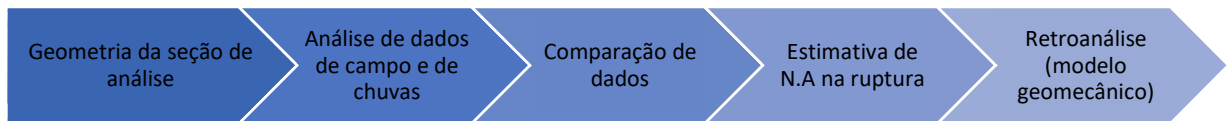
O presente estudo tem uma abordagem de pesquisa aplicada, já que visa gerar conhecimentos voltados a aplicação prática na solução de problemas específicos. Ao trabalhar com dados de um talude rompido e instrumentado, presume-se que os conhecimentos gerados serão pertinentes a solução de problemas dentro do mesmo contexto. Quanto a abordagem, a pesquisa se classifica como qualitativa, aquela que visa a interpretação de fenômenos e atribuição de significados, já que visa interpretar os dados coletados em campo e atribuir sentido a eles.

O Método de pesquisa a ser utilizado possui caráter explicativo, já que pretende identificar os fatores que contribuem para a ocorrência de um fenômeno: a ruptura do talude, e desenvolve hipóteses a respeito do acontecimento. De acordo com Gil (1991), o estudo de caso envolve uma análise aprofundada e minuciosa de um ou poucos objetos, de modo a permitir um conhecimento amplo e detalhado, algo que dificilmente seria alcançado com outros tipos de delineamentos já existentes, assim, essa será a abordagem adotada para o estudo.

2.2. Método de Trabalho

As análises iniciaram com a caracterização do solo do local, com auxílio de modelo digital do terreno a partir de levantamento topográfico e dados de sondagem, de modo a proporcionar uma seção transversal com as camadas de solo definidas. A etapa seguinte consistiu na análise de dados coletados por INAs e inclinômetros, instalados em campo. Em seguida, comparou-se os dados coletados em campo com dados de chuvas de estações pluviométricas próximas ao local. Com isso, encontrou-se um padrão no comportamento geomecânico do solo em resposta a determinada chuva e este dado foi utilizado para estimar o N.A gerado no instante da ruptura durante a catástrofe de 2024 no estado do Rio Grande do Sul. Por fim, foi possível fazer uma retroanálise e encontrar os parâmetros do solo no momento de sua ruptura e assim estabelecer um modelo geomecânico com diagnóstico para a ruptura ocorrida.

Figura 4: Fluxograma de etapas do trabalho



Fonte: Autor (2024)

4. DESENVOLVIMENTO

O talude estudado neste trabalho está localizado no município de Pouso Novo - RS, com extensão de 180 m, conforme Figura 5.

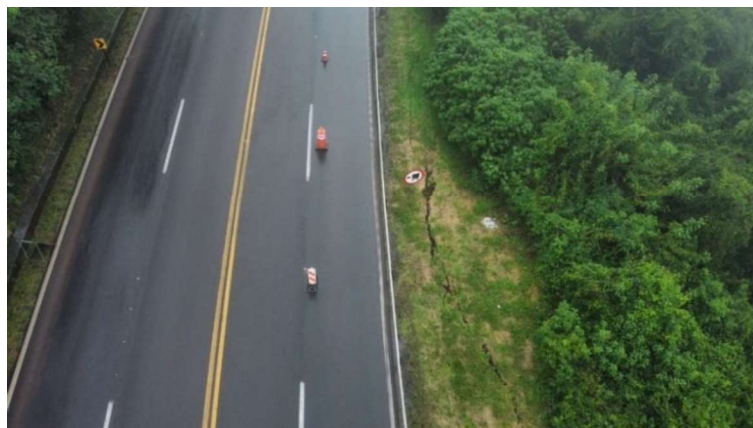
Figura 5: Talude estudado com indicação de trincas.



Fonte: SF Engenharia (2024)

Foi registrada a ruptura deste talude no dia 29 de abril de 2024, durante as fortes chuvas que atingiram o estado do Rio Grande do Sul. A ruptura se caracterizou por conta de notórios deslocamentos com aberturas de trincas e degraus de ordem decimétrica, conforme Figura 6.

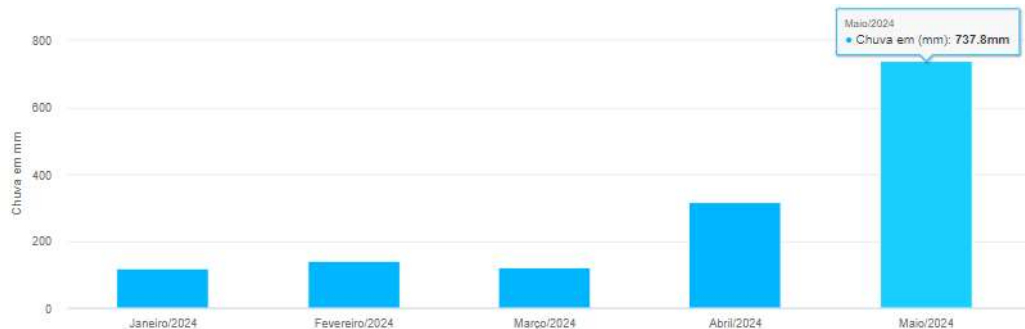
Figura 6: Trincas de ruptura no talude.



Fonte: SF Engenharia (2024)

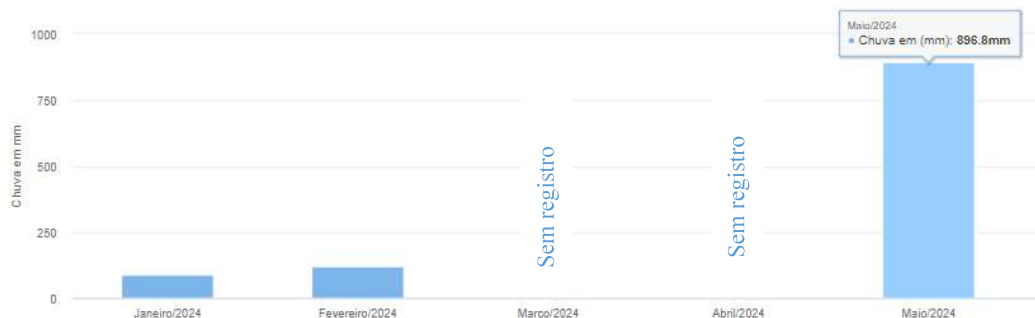
Quanto aos índices pluviométricos, o evento foi tão incomum que, em algumas regiões, as precipitações superaram as médias trimestrais e até anuais. A Figura 7, Figura 8 e Figura 9 mostram as chuvas acumuladas nos meses do sinistro, abril e maio, e nos meses anteriores nas proximidades do município de Pouso Novo/RS.

Figura 7: Dados de chuva, estação meteorológica A837 - INMET.



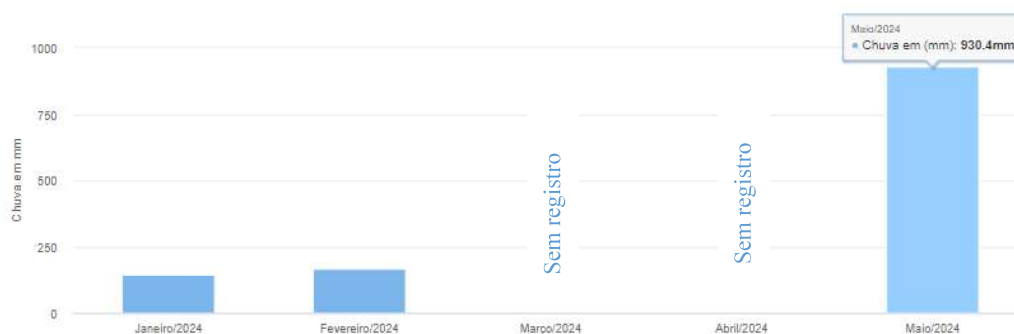
Fonte: INMET (2024)

Figura 8: Dados de chuva, estação meteorológica D3244 - CEMADEN.



Fonte: CEMADEN (2024)

Figura 9: Dados de chuva, estação meteorológica D7669 - ANA



Fonte: ANA (2024)

As chuvas que deram início ao rompimento iniciaram no final do mês de abril, e continuaram com ocorrências volumosas nos primeiros dias do mês de maio. A estação meteorológica da cidade de Fontoura Xavier, controlada pelo CEMADEN, registrou acumulado de 757,4 mm em

oito dias, com destaque para o acumulado de 29 a 02 de maio com 671 mm, período do rompimento. Esta foi uma chuva completamente atípica, sendo o registro acima de 200 mm sequencialmente. Essa estação foi escolhida para o estudo por estar localizada mais próxima ao trecho de estudo e com aspectos mais próximos das condicionantes orográficas da área afetada.

4.1 Seção geológica

Para que se fosse possível fazer uma retroanálise para 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 10 demonstra em planta os eixos utilizados para gerar os perfis de imageamento geoeletrico.

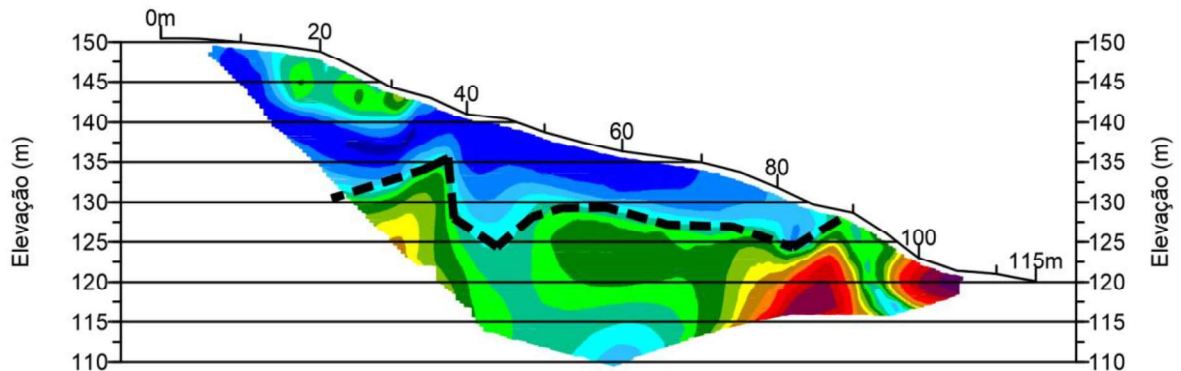
Figura 10: Localização dos eixos de sondagem geoeletrico.



Fonte: Sf Engenharia (2024)

A seção analisada está sob o eixo SIG L4 da Figura 4. A Figura 5 demonstra o perfil de SIG L4, utilizada no desenvolvimento da seção transversal. É importante destacar que a seção geofísica foi feita em sentido contrário ao da seção, da direita para a esquerda, logo está espelhada em comparação com a seção transversal analisada.

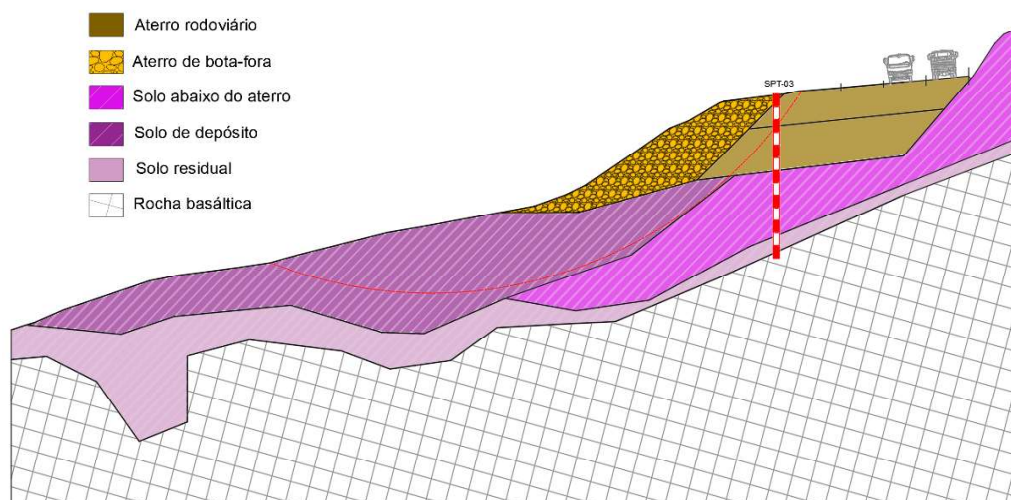
Figura 11: Seção geofísica SIG L4.



Fonte: SF Engenharia (2024)

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. A sondagem SPT realizada no bordo da pista, teve por objetivo a identificação do solo de aterro da rodovia (em marrom na seção da Figura 12) e do solo subjacente (cor rosa na mesma seção). 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 12.

Figura 12: Seção transversal de análise.



Fonte: SF Engenharia (2024)

Já a superfície de ruptura representada na Figura 12, que deve convergir com a do modelo geomecânico, foi também determinada por dados de campo, o início da superfície é resultado das trincas observadas em campo e apontada em levantamento topográfico, vistas na Figura 13. Além disso, a partir dos inclinômetros foi possível estimar a profundidade da ruptura. A ruptura com deslocamentos desta magnitude permite a observação do soerguimento do material no pé, embora não seja de fácil identificação em campo.

Figura 13: Trinca de ruptura

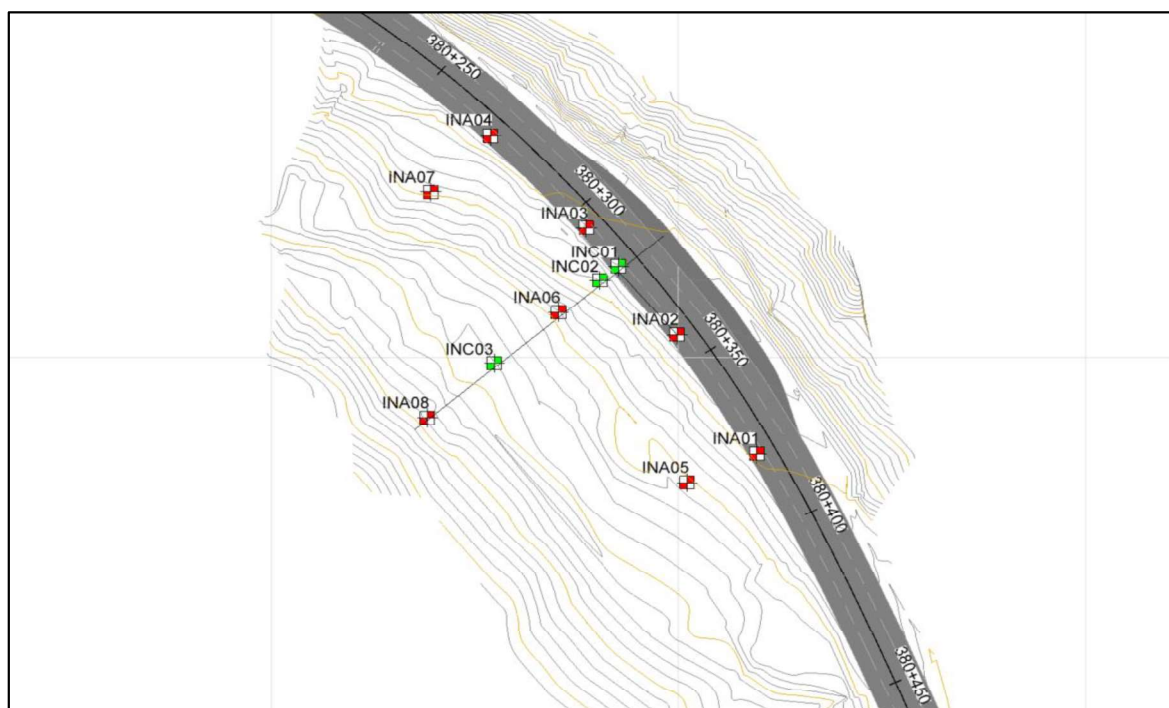


Fonte: Sf Engenharia (2024)

4.2 Estimativa de lençol freático no instante da ruptura

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 14.

Figura 14: Instrumentação de campo.



Fonte: Sf Engenharia (2024)

Os pontos pertinentes a esse estudo foram o INA8 e INA02 visto que constituem os 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 culminou a observação de que durante o tempo de monitoramento (até o presente) não houve deslocamentos significativos, indicando que não ocorreu remobilização de ruptura.

Sendo assim, buscou-se relacionar os dados de nível d'água coletados nesses dias, após o rompimento, com as chuvas da estação pluviométrica mais próxima ao local, para que fosse possível encontrar uma tendência (chuva x subida de nível d'água) no talude. Com isso, foi

possível estimar o nível d'água na ruptura, já que se tem o conhecimento dos índices pluviométricos nesse período.

A estação pluviométrica utilizada, de código 430830001A, foi a do centro da cidade de Fontoura Xavier, a 40 km do trecho da ruptura em tela. Esta estação é a mais próxima com registros ativos.

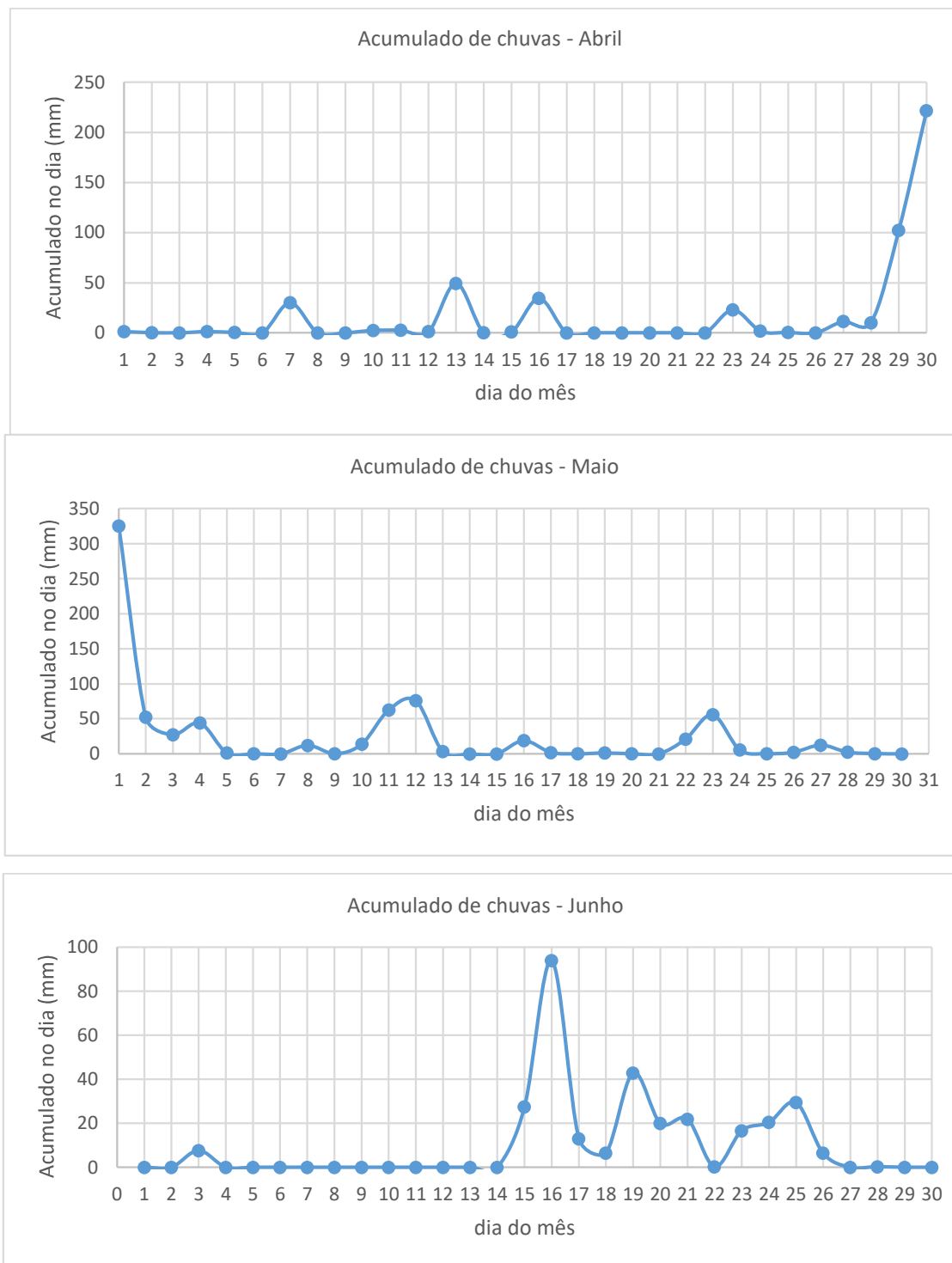
Tendo o conhecimento dos dados de chuva do mês de junho de 2024, decidiu-se comparar os dados da estação pluviométrica com o nível de água medido em campo, apresentado no Gráfico 2. Assim foi possível relacionar o comportamento da variação do nível do lençol freático em resposta ao regime de chuvas. Foram gerados os dados de abril, maio e junho, o Gráfico 1 apresenta os dados (dia x pluviometria/hora) e o Gráfico 2 apresenta os acumulados de chuva a cada dia do mês.

Gráfico 1: Chuvas em mm a cada hora (a): chuvas de abril; (b) chuvas de maio; (c) chuvas de junho.



Fonte: SF Engenharia (2024)

Gráfico 2: Acumulado de chuvas dos meses de abril, maio e junho.

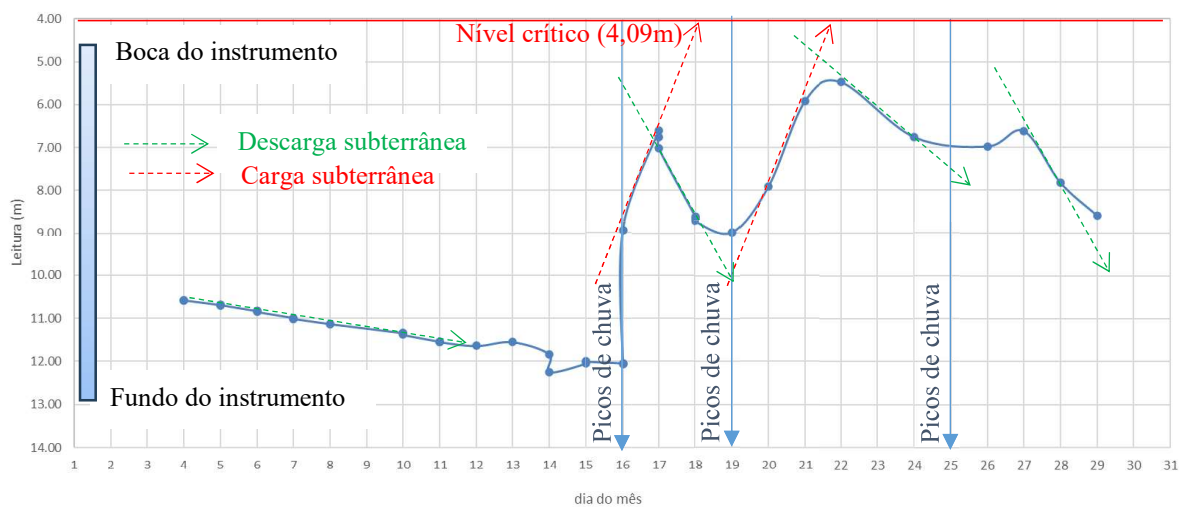


Fonte: SF Engenharia (2024)

Inicialmente foi feita uma verificação comparando os dados coletados em campo pelos pluviômetros com os dados de chuva coletados pela estação de Fontoura Xavier. Verificou-se

que no geral não há grandes discrepâncias em chuvas de volumes mais significativos. Logo, a partir dos dados dessa estação foi possível estabelecer uma relação chuva versus subida do nível d'água nos instrumentos INAs. O Gráfico 3 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.

Gráfico 3: Dados coletados do INA2 no mês de junho/2024.



Fonte: Sf Engenharia (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 às 16:40 foi demonstrado aumento significativo no nível d'água.

Ao analisar as chuvas medidas pela estação pluviométrica, conforme demonstrado no Gráfico 1 (c), é possível notar que a chuva começou no dia 15 de junho, às 16h da tarde 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.

A Tabela 1 relaciona cada subida de nível de água, em metros, com a precipitação do dia anterior, em milímetros, fazendo uma razão entre elas para que seja possível a partir dos dados estimar qual a subida do nível de água no aumento do índice pluviométrico.

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

Fonte: Autor (2024)

Ao analisar o Gráfico 3 em conjunto com a Tabela 1 é possível observar um padrão na subida do N.A, inicialmente, com o solo um pouco 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.

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

Fonte: Autor (2024)

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 no gráfico 4.

Gráfico 4: Dados coletados do INA8 no mês de junho.



Fonte: SF Engenharia (2024)

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 3 cm, e 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 se notou um aumento significativo de 56 cm. Ao verificar a subida unitária de nível d’água 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.

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

Fonte: Autor (2024)

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

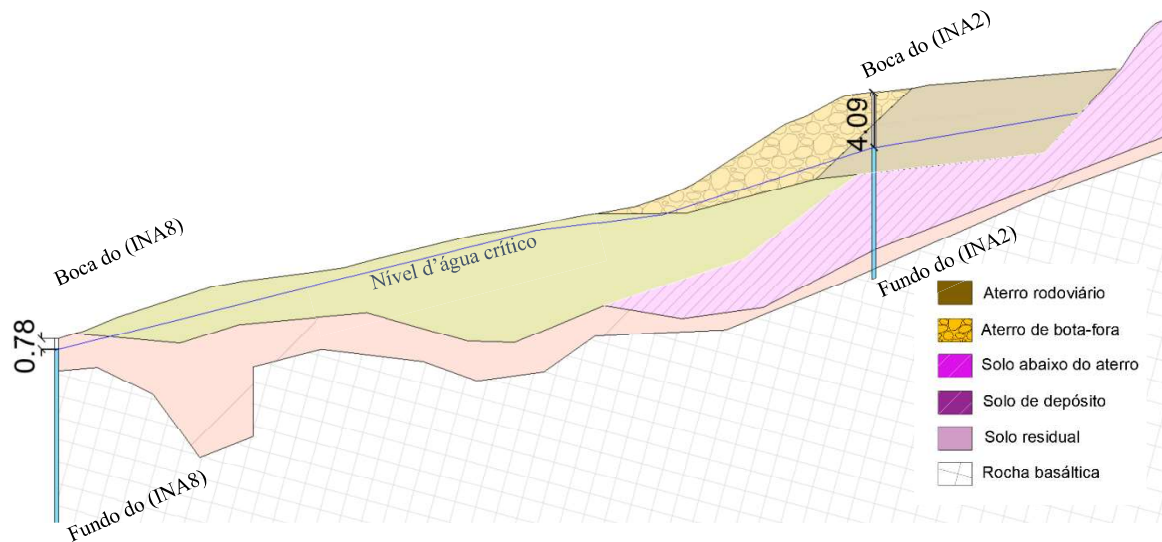
Tabela 4: Estimativa de nível d'água na ruptura.

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

Fonte: Autor (2024)

Com a estimativa dos níveis do lençol freático no INA2 e INA8, foi possível posicioná-los na seção de análise, conforme Figura 15. Estes níveis são considerados críticos, ou seja, a partir desta elevação, estima-se que potencialmente os deslocamentos seriam reativados.

Figura 15: Estimativa de nível d'água na ruptura.



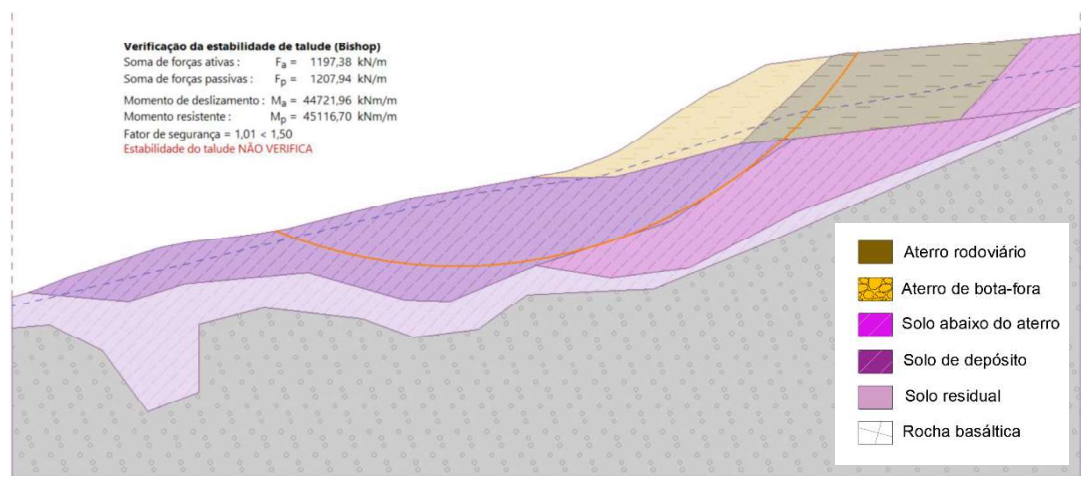
Fonte: Autor (2024)

4.3 Retroanálise

Tendo o nível d'água crítico estimado para a ruptura foi possível fazer a retroanálise, com o uso do software GEO-5, em seu módulo de estabilidade de taludes, utilizando o método de Bishop para análise do equilíbrio limite. A geometria utilizada foi aquela definida na Figura 12 e o nível d'água utilizado foi aquele representado na Figura 15. Com base nas investigações geotécnicas, permitiu-se boa definição estratigráfica, identificando o aterro, a plataforma rodoviária, e o solo subjacente. Logo, o objetivo da retroanálise foi encontrar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo do talude, onde se encontra a superfície de ruptura,

denominado de “solo de depósito”. Foram feitas retroanálise variando os parâmetros até encontrar os parâmetros do solo no instante da ruptura, conforme Figura 16.

Figura 16: Retroanálise.



Fonte: Autor (2024)

Os parâmetros de resistência e demais propriedades índices importantes para a análise por equilíbrio limite de cada estrato estão resumidos na tabela 5.

Tabela 5: Propriedades índice e parâmetros de resistência na retroanálise.

Material	$\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$\gamma \text{ sat (kN/m}^3\text{)}$	$\Phi^\circ \text{ (}^\circ\text{)}$	Coesão (kPa)
Aterro rodoviário	20	21	30	10
Aterro de bota fora	17	18	35	2
Solo de depósito	16	17	9	5
Solo residual	18	19	28	15
Rocha basáltica	27	27	45	50
Solo abaixo do aterro	18	19	28	23

Fonte: Autor (2024)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo detalhado foi principalmente motivado pela necessidade de se obter um diagnóstico para a ruptura do talude. A abordagem metodológica mista adotada incluiu pesquisa bibliográfica, pesquisa de campo e análise de dados. A instalação de indicadores de nível d'água (INAs) e inclinômetros após o rompimento permitiu a coleta de dados empíricos essenciais. Os resultados indicaram que a elevação do nível de água no solo foi um fator crítico para a instabilidade, com convergência de valores observados para níveis específicos.

A respeito da influência das chuvas, estas desempenham um papel crucial no aumento de pressão neutra no solo, contribuindo significativamente para a instabilidade do talude. Cabe destacar a importância da instrumentação, que foi fundamental para monitorar e entender as condições do talude na modelagem e análise de dados, bem como a utilização de softwares especializados em modelagem geotécnica que permitiu a identificação parâmetros do solo e a estimativa convergente da superfície de ruptura teórica.

A variação de níveis d'água observada nas medições dos INAs no período de avaliação que culminou este trabalho, não foi o suficiente para gerar a ruptura, nem mesmo promover deslocamos, uma vez que não foram registrados deslocamentos nos inclinômetros.

Portanto, para a mobilização da massa de solo, já parcialmente saturada, chegou-se à conclusão que seria necessário (ou estima-se que tenha ocorrido no dia 29 de abril de 2024) uma chuva de 102 mm/dia, antecedida de pelo menos 45 mm nos três dias anteriores, para que o nível freático no INA2 subisse até a posição 4,09 m e o INA8 a 0,78 m em relação a superfície, o que seria suficientemente para engatilhar a ruptura. Embora, é importante salientar que essa estimativa de chuva deve ser válida na existência de umedecimento crescente do solo, uma vez que as chuvas nos dias que antecederam a ruptura continuavam a aumentar os índices segundo os registros dos postos pluviométricos avaliados.

O solo se comporta de diferentes maneiras a depender da chuva (volume versus tempo), já que o solo seco tem uma taxa de infiltração de água maior, quando parcialmente saturado, essa taxa diminui, ou seja, a água entra com maior dificuldade no solo, então são necessários volumes maiores para disparar a ruptura. Por isso, considerando uma situação de solo parcialmente saturado como essa, uma chuva de 102 mm ou mais pode novamente mobilizar a massa de solo.

Sugere-se que o talude deve permanecer sendo instrumentado e um projeto de engenharia deve ser realizado considerando esta condição atípica.

Para novos estudos e desenvolvimento de conhecimento seria ainda mais interessante manter o talude instrumentado e monitorado mesmo após a execução de uma solução de engenharia, de modo que se controle a eficiência da solução adotada.

REFERÊNCIAS

- CAPUTO, Homero P.; CAPUTO, Armando N. Mecânica dos Solos: Obras de Terra e Fundações. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2022.
- GERSCOVICH, D. M. S. Estabilidade de taludes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016
- COLLISCHONN, W.; CABELEIRA, R.; RAMALHO, N.; RUHOFF, A.; PAIVA, R.; FAN, F.; WONGCHUIG, S.; BREDAS, J. Chuvas sem precedentes de abril a maio de 2024 no Sul do Brasil definem novo recorde. SciELO Preprints, 2024. DOI: 10.1590/SciELOPreprints.9773. Disponível em: <https://preprints.scielo.org/index.php/scielo/preprint/view/9773>. Acesso em: 2 nov. 2024.
- MASSAD, Façal. Obras de terra. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- INMET:: MAPA DAS ESTAÇÕES. Disponível em: <<https://mapas.inmet.gov.br/>>.
- Mapa Interativo. Disponível em: <<https://mapainterativo.cemaden.gov.br/>>.
- MANOEL, A. et al. Geologia de engenharia. São Paulo: Associação Brasileira De Geologia De Engenharia, 1998.
- KASHEF, A.A.I Groundwater engineering. New York: McGraw-Hill.
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.