

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise da Previsão de um Evento de Escorregamento de Talude Através de Leituras de Monitoramento de Deslocamentos Utilizando o Método de Saito

Brunella Casagrande Brunelli Santos

Muniz & Spada Engenheiros Consultores LTDA, Cachoeiro de Itapemirim-ES, Brasil,
brunella@munizspada.com.br

Raissa Borges Louvise

Muniz & Spada Engenheiros Consultores LTDA, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, raissa@munizspada.com.br

Luiz Francisco Muniz da Silva

Muniz & Spada Engenheiros Consultores LTDA, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, muniz@munizspada.com.br

Ulysses Nery do Nascimento

VALE, São Luís-MA, Brasil, ulysses.nascimento@vale.com

Rapahel Maia

VALE, São Luís-MA, Brasil, raphael.maia@vale.com

RESUMO: Trabalhos e estudos sobre a utilização de métodos para previsão de rupturas de taludes são encontrados comumente. Entretanto, pouco se dispõe de dados de monitoramento antes e por ocasião da ruptura para se assegurar sua precisão e acurácia. O presente trabalho propõe-se a discutir a previsão de evento de ruptura de um talude através da retroanálise de dados de instrumentação obtidos em campanha de monitoramento utilizando-se prismas de controle topográfico. O monitoramento iniciou-se ao se observar o primeiro indício de trincas no talude, e foi continuado até o evento extremo da ruptura. O método permitiu uma rápida atualização dos dados e interpretação durante as análises. Identificou-se uma influência, com relação direta, da precipitação pluviométrica com a velocidade de deslocamento. Com base no histórico do caso em questão, entende-se que o método traz um útil indicativo do grau de instabilidade, mostrando uma tendência para a data da ruptura do talude.

PALAVRAS-CHAVE: Saito, Previsão de Escorregamento, Estabilidade de Taludes, Instrumentação.

ABSTRACT: Works and studies regarding the use of methods for predicting slope failures are commonly found. However, there is limited monitoring data available before and at the time of the failure to ensure its accuracy. The present work proposes to discuss the prediction of a slope failure event through back-analysis of data obtained in a monitoring campaign using topographic control prisms. Measurements began when the first sign of cracks on the slope was observed and was continued until the extreme event of failure. The method allowed a quick update of the data and interpretation during the analyses. It was observed a direct relation between the pluviometric precipitation and the displacement velocity. Based on the case history studied, it is understood that the method brings a useful indication of instability that shows a tendency for slope failure.

KEYWORDS: Saito, Landslide Forecasting, Slope Stability, Instrumentation.



1 Introdução

Os casos de deslizamento, frequentemente, estão associados ao aumento do índice pluviométrico, sendo comuns em períodos chuvosos intensos. Em janeiro de 2011 ocorreu uma série de eventos de instabilidade expressivos na Região Serrana do Rio de Janeiro deixando milhares de mortos e desabrigados. Em março de 2013, mais de 100 escorregamentos ocorreram nas encostas de Petrópolis-RJ, causando 33 mortes, segundo Relatório Técnico do Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro (DRM-RJ).

Na maioria das ocorrências deste tipo, antes dos escorregamentos, é possível observarem-se sinais de instabilidade, como trincas e patologias nas estruturas ao redor das áreas instáveis. Para taludes que apresentam sinais de instabilidade, é desejável prever-se o tempo esperado para a ruptura a fim de serem tomadas medidas necessárias no tempo cabível.

Dentre os métodos disponíveis na literatura para previsão de ruptura de taludes, destacam-se os métodos de Saito por serem de mais simples aplicação. Pode-se citar três métodos de Saito (Saito e Uesawa, 1961; Saito, 1969 e Saito, 1980).

O presente trabalho apresenta um estudo de caso de ruptura em talude de corte na região do Norte brasileiro, no Estado do Pará, localizado na Estrada de Ferro Carajás (EFC). Após indícios de instabilidade, foi implantado um sistema de monitoramento com instalação de prismas em pontos estratégicos do talude a fim de se monitorar a movimentação do terreno. Com os dados obtidos pelas medições da posição dos prismas foi possível se aplicar a primeira metodologia de Saito para previsão da tendência de ruptura e, com razoável precisão e acurácia, a data de sua ocorrência.

2 Contextualização e histórico de ocorrências

A EFC possui cerca de 892 km de extensão e liga a mina de Carajás, no Município de Parauapebas (PA), ao porto de São Luís (MA). A ruptura em análise ocorreu em um talude de corte inserido no domínio geomorfológico Grupo Itapecuru, pertencente à Bacia do Parnaíba, de expressivas espessuras de depósitos sedimentares da Era Terciária. O maciço de corte é constituído mais superficialmente por uma camada de solo residual maduro, identificado como produto de intemperismo de arcóseo, apresentando alta cimentação e resistência, resultando em menor suscetibilidade a erosões e rupturas; em sequência, ocorre um estrato em solo residual jovem/saprolito, oriundo de arenito, onde se observa uma disseminação de ocorrências de instabilidades caracterizadas por processos erosivos com feições localizadas até cicratizes mais significativas em diversas porções da face do talude de corte. A fim de serem contidos os processos erosivos, foi implantada, na primeira banquetta do corte, uma estrutura de cerca de 12 m de altura máxima constituída por aterro reforçado com geogrelhas e paramento de face em um muro de gabiões-caixa. A geometria da estrutura de reforço é apresentada na Figura 1.

Um conjunto expressivo de não conformidades executivas foi reportado acerca da implantação da obra do reforço, envolvendo geogrelhas com resistência característica inferior à de projeto, comprimentos dos reforços abaixo do especificado e espaçamentos verticais entre reforços superiores ao preconizado.

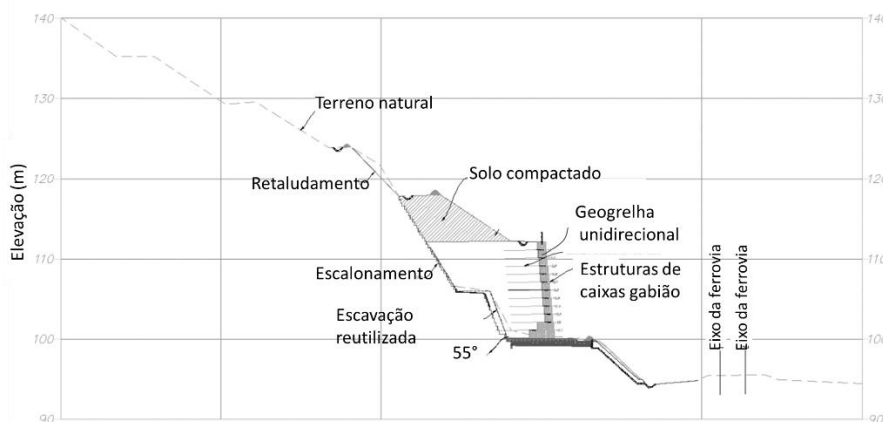


Figura 1 – Seção transversal típica da estrutura de contenção instabilizada (Fonte: VALE adaptado).

No início de 2021, após a implantação da estrutura apresentada na Figura 1, sobreveio um processo progressivo de ruptura, como se descreve cronologicamente nas imagens e no texto apresentados a seguir.

Em 12 de Janeiro de 2021 observou-se a presença de uma trinca longitudinal contínua com extensão de aproximadamente 120 m, apresentada na Figura 2. Com a finalidade de se acompanhar a movimentação do talude, foi implantado um sistema de monitoramento por prismas topográficos. Em 04/03/2021 ocorreu o colapso de parte da estrutura no lado São Luís, conforme mostrado na Figura 3 (a). No dia 15/03/2021 foi observado novo colapso de outra parte da estrutura, pelo lado Carajás, mostrado na imagem da Figura 3 (b). As rupturas não implicaram em perdas de vida ou danos diretos à ferrovia.

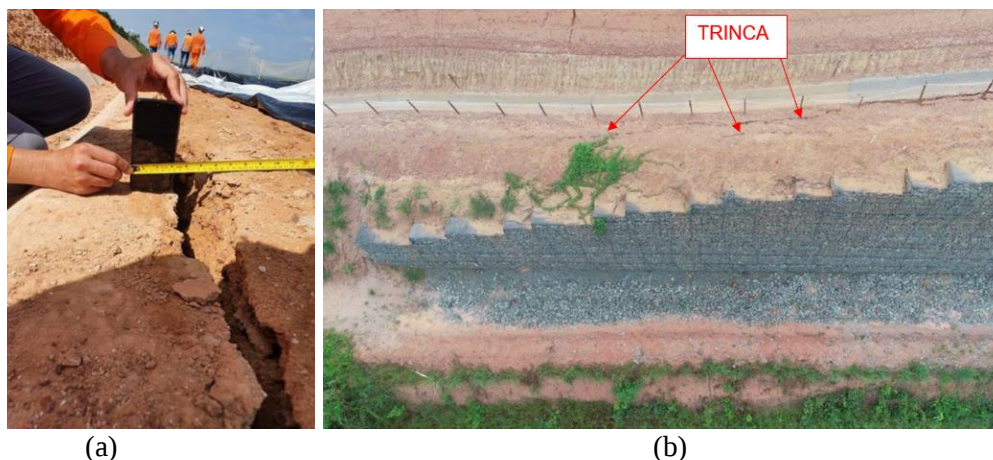


Figura 2 – Trinca na crista do aterro reforçado observada em 12/01/2021, (a) detalhe, (b) vista superior (Fonte: VALE).



Figura 3 – Vista geral da ruptura (a) lado São Luís (b) lado Carajás (Fonte: VALE).

3 Metodologia

3.1 As Metodologias de Saito

As metodologias desenvolvidas por Saito tomam por base o conceito de ruptura por fluência, segundo o qual as deformações de um material ocorrem sob tensões constantes até a ruptura. Além de Saito (em Saito e Uesawa, 1961, Saito 1965, 1969 e 1980), outros pesquisadores se utilizaram do mesmo conceito para determinação de métodos ligados à previsão de rupturas em maciços de solos (Fin e Shead, 1973; Kawamura, 1985).

O fenômeno de fluência se desenvolve em três estágios: primário, secundário e terciário. É apresentado na Figura 4, o desenvolvimento típico da deformação ao longo do tempo de um material submetido a ensaio de fluência.

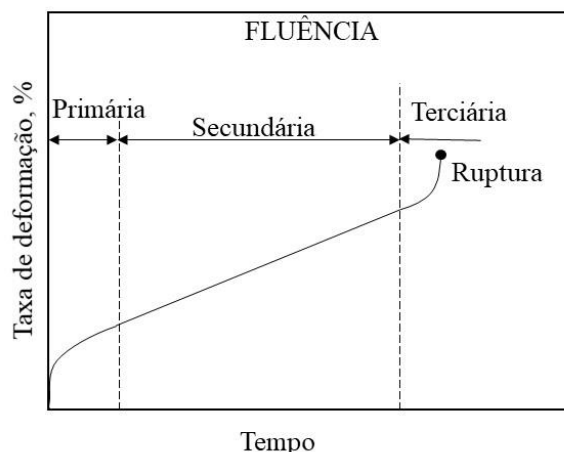


Figura 4 – Estágios de fluência (Fonte: adaptado de Guimarães e Spada, 1997).

Saito e Uesawa (1961) analisaram o fenômeno de fluência em ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais realizados em diferentes tipos de solo e observaram que, ao se plotar a taxa de deformação *versus* o tempo em escala log-log, os resultados tendem a cair sobre uma faixa retilínea estreita. Deste gráfico foi ajustada uma reta aos pontos lançados, obtendo-se a equação:

$$\log_{10} t_r = 2,33 - 0,96 \log_{10} \dot{\epsilon} \pm 0,59 \quad (1)$$

Onde,

$\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação específica, dada em $10^{-4}/\text{min}$;

t_r é a estimativa de tempo até a ruptura, dada em minutos.

Assumindo que 0,96 seja arredondado satisfatoriamente para 1, é possível reescrever-se a equação do Primeiro Método como:

$$\dot{\epsilon} t_r = 214 \quad (2)$$

Os autores plotaram no gráfico resultados de ensaios disponíveis na literatura com solos de diferentes regiões do mundo (Casagrande e Wilson, 1951; Murayama e Shibata, 1956; Goldstein e Ter-Stepanian, 1957) e resultados de ensaios em escala real realizados no entorno de ferrovias japonesa (ferrovia Hokuri-ku, 1949 e Toho-ku, 1959). A equação proposta pelos autores foi capaz de calcular, com precisão considerada razoável, o tempo remanescente para a ruptura. O artigo original não apresenta sugestão acerca de como transformar deslocamentos em deformações. Saito (1965), ao aplicar o método proposto em 1961 ao caso de ruptura de um muro de contenção na Estrada de Ferro Ooigawa, Japão, relata ter utilizado a distância entre a encosta (que permaneceu após o colapso) e o muro de contenção como comprimento inicial, l_0 .

Saito (1969) relata que o primeiro método pode apresentar dados inconsistentes quando aplicado a deformações no terceiro estágio de fluência. Desta forma, ao contrário do esperado, previsões realizadas com dados aferidos em datas mais próximas à ruptura, tendem a apresentar resultados menos representativos. Saito (1969) adaptou sua metodologia original, para ser aplicada a materiais que estejam em estágio de fluência terciária. A partir de modificações na Equação (1), o autor propôs a Equação (3), que relaciona o deslocamento relativo entre dois pontos conhecidos (Δl) com o lapso de tempo até a ruptura, estabelecendo assim a equação do Segundo Método:

$$\Delta l = l_0 a \log \frac{t_r - t_0}{t_r - t} \quad (3)$$

Onde,

l_0 é a distância inicial entre dois pontos;

a é uma constante;



t_r é o tempo de ruptura por fluência;

t_0 é o tempo em que a deformação é nula ou tempo no início das aferições;

t é o tempo no qual é feita a previsão.

Frente à dificuldade de aplicação do Segundo Método, Saito (1980) o aprimorou, estabelecendo, então, o denominado “Terceiro Método”, sugerindo uma nova forma de ajuste gráfico que, de maneira simplificada, consiste em: plotar o deslocamento Δl versus tempo restante até a ruptura ($t_r - t$), ambos em escala logarítmica, estimando-se um valor para t_r e, por tentativa e erro, se obter a data mais provável de ruptura, de forma que se obtenha uma linha reta no gráfico. Valores de t_r diferentes da data de ruptura devem gerar uma curva com concavidade para baixo ou para cima.

3.2 Instrumentação e monitoramento

O talude em estudo foi instrumentado com prismas de controle topográfico para monitoramento dos deslocamentos *in-situ* ao indício das primeiras trincas, obtendo-se leituras constantes entre os dias 11/02/2021 e 14/03/2021.

O croqui com a disposição dos prismas no talude é apresentado na Figura 5. Foram implantados 24 prismas no total: 12 na berma do aterro reforçado, 6 na crista do muro de gabião e 6 no pé do muro.

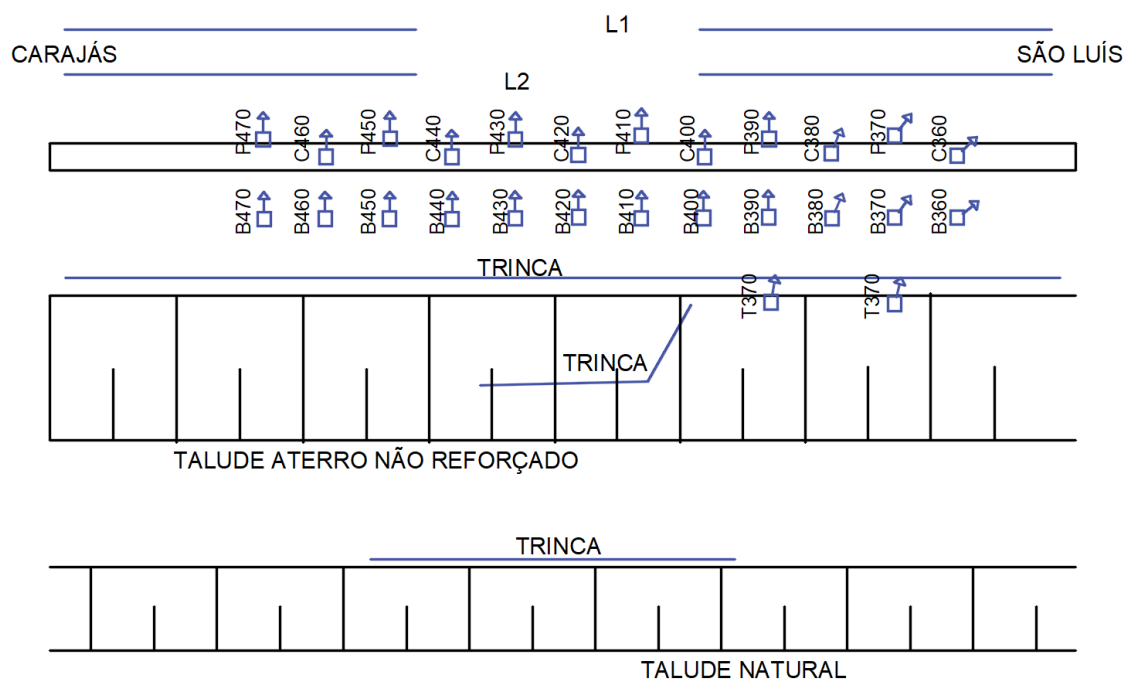


Figura 5 – Croqui de instalação – prismas e vetores de deslocamento (Fonte: VALE).

Foram ainda realizadas medições de precipitação pluviométrica, que seguem apresentadas junto aos resultados da análise (ver Figura 6).

3.3. Aplicação do Primeiro Método de Saito (1961)

Neste estudo, foram avaliados prismas localizados no talude de aterro reforçado, mais especificamente o prisma B420, representativo do talude de aterro reforçado. Utilizaram-se intervalos de tempo e incrementos de deslocamento, verticais e transversais ao aterro, a cada leitura, e determinou-se o vetor-velocidade para cada instante de monitoramento.

Seguindo-se os relatos de Saito (1965), para cálculo da deformação, o comprimento inicial, l_0 , foi considerado como o comprimento da superfície crítica de ruptura, obtida por análise baseada em método de



equilíbrio limite, conduzida para uma seção da situação inicial, visto que o monitoramento teve seu início com esta seção. A deformação específica foi calculada para cada aferição, dividindo-se o incremento de deslocamento pelo comprimento inicial da superfície de ruptura.

A taxa de deformação específica foi obtida dividindo-se o vetor-velocidade calculado para cada leitura e o comprimento inicial da superfície de ruptura. O tempo remanescente para ruptura do talude foi estimado aplicando-se a Equação (2). As medidas de deformação obtidas foram relacionadas graficamente com o tempo remanescente de ruptura e confrontadas com os dados de pluviometria com base nas leituras até o evento extremo.

4 Resultados e Análises

Apresenta-se, na Figura 6, os dados de tempo de ruptura calculados pelo Primeiro Método de Saito confrontados com os dados de pluviometria baseados nas aferições realizadas até 13 de março de 2021. De acordo com os valores fornecidos, observa-se que no dia 04/03/2021 (data da ruptura no lado São Luís) e em 13/03/2021 (data da ruptura no lado Carajás), houve uma indicação de tempo de ruptura zero (0), logo após ocorrências de eventos de precipitação intensa. A ruptura do lado São Luís não atingiu a região do prisma B420, mas teve reflexos medidos nesse prisma. O aumento da precipitação manteve relação direta com as deformações observadas e, por conseguinte, com a redução do tempo até a ruptura.

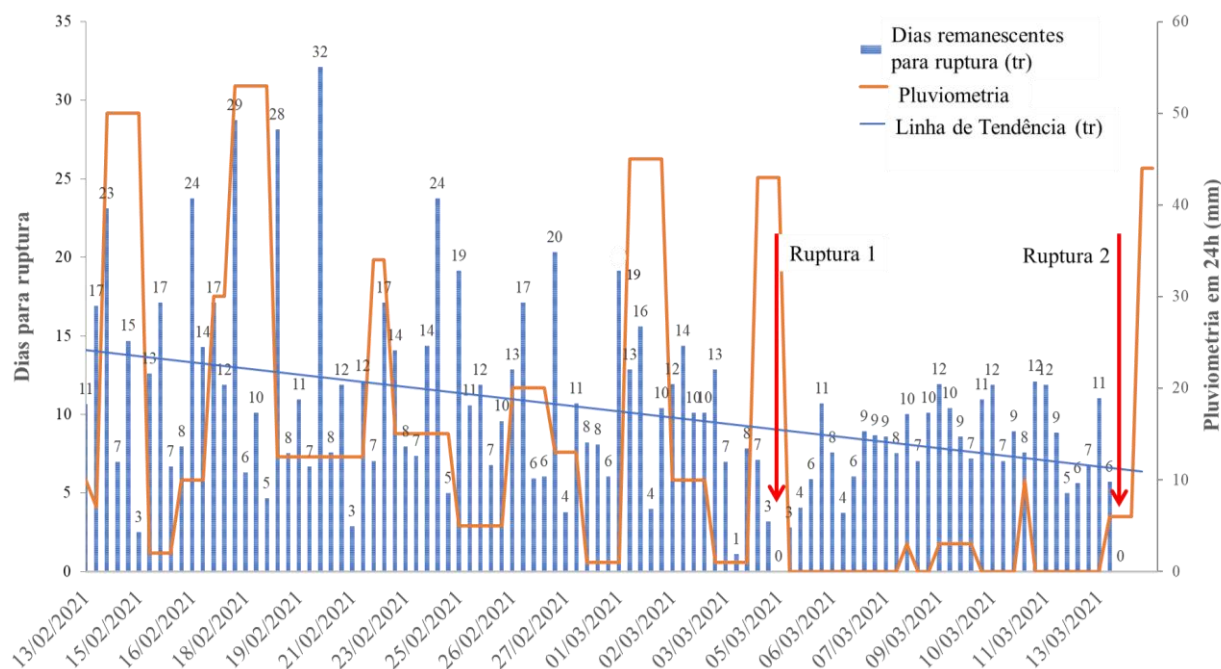
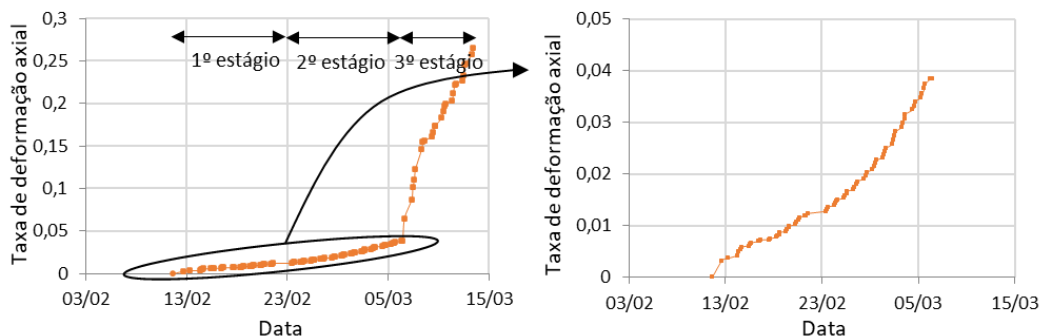


Figura 6 - Tempo de ruptura, confrontados com os dados de pluviometria.

Em paralelo à aplicação da metodologia de Saito (1961), foram realizadas as análises que se seguem, com o objetivo de se analisar o enquadramento nos diferentes estágios de fluência a partir das deformações calculadas. A Figura 7 apresenta a relação entre o tempo em minutos, desde o início da medição, relacionado com a deformação axial. É possível observar-se que a relação entre tempo e deformação axial, para o caso estudado, pode ser caracterizada enquadrando-se nos três estágios preconizados por Saito: fluência primária, fluência secundária e fluência terciária. O primeiro estágio, ou de fluência primária, corresponde ao trecho da curva onde a velocidade de deformação tende a diminuir ou até mesmo tornar-se nula com o tempo. O segundo estágio ou de fluência secundária corresponde a um trecho aproximadamente linear com inclinação constante. O terceiro e último estágio ou de fluência terciária caracteriza-se por apresentar deformações crescentes de forma exponencial até a ruptura. Ao se analisar a Figura 7 (a) observa-se que, possivelmente, as deformações após o dia 05 representam o estágio da fluência terciária por apresentar deformações crescentes de forma exponencial até a ruptura. Na Figura 7 (b) são apresentados os resultados entre o dia 13/02/2021, data de início

das medições, e o dia 05/03/2021, data da primeira ruptura. A forma do gráfico se assemelha ao apresentado na Figura 4. No caso estudado, o monitoramento teve início quando já havia sinais de movimento do maciço, portanto a posição inicial considerada para aplicação do método foi a do início das medições e não a do início dos deslocamentos significativos do talude.



(a) Período total de monitoramento
(t=0 até 2ª ruptura)

(b) Período de monitoramento (t=0 até 1ª ruptura)

Figura 7 – Tempo acumulado de monitoramento *versus* taxa de deformação.

Como relatado acima, Saito (1969) reporta que as previsões realizadas com aferições próximas da data de ruptura tendem à imprecisão, pois as deformações se enquadram no terceiro estágio de fluência. Em concordância, ainda que o gráfico tenha refletido a data de ambas as rupturas, nas vésperas das ocorrências, a previsão de t_r era de, aproximadamente, uma semana. Em contrapartida, ao se analisar o gráfico apresentado na Figura 7, entende-se que é possível se considerar a deformação poucos dias antes da primeira ruptura no segundo estágio de fluência. Deve-se ter em mente que, os dados do monitoramento são aqui analisados após a ruptura dos taludes. Torna-se assim mais complexo analisar-se a curva tempo *versus* deformação enquanto ela está em desenvolvimento.

Os resultados oriundos da aplicação do método suscitam a discussão quanto à sua precisão e acurácia. No desenvolvimento do método, Saito e Uesawa (1961) consideraram que o erro na Equação (1), de $\pm 0,59$, seria razoável. Aplicando-se tal margem de erro aos dados computados do prisma B420, para previsão de ruptura em 13/03/2021, obteve-se o gráfico apresentado na Figura 8.

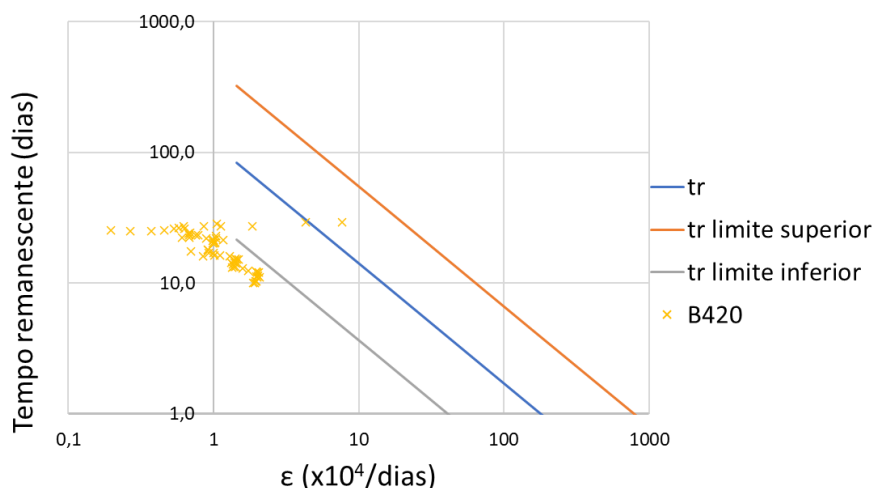


Figura 8 – Aplicação do método de Saito considerando-se os limites conforme erro previsto no método.

Analisando-se os resultados obtidos, observou-se que as previsões apresentaram uma tendência indicativa de ruptura. No entanto, em termos de precisão, esta é de difícil julgamento dada a elevada variação dos índices pluviométricos, que influenciam diretamente na deformação e no cálculo de t_r . Assim grandes



variações foram observadas para estimativa de t_r em dias subsequentes, dificultando o processo de tomada de decisão quanto à paralisação das atividades possivelmente afetadas pelo evento de ruptura. Em termos de acurácia, após a análise de toda a série de medições e conhecidos os eventos de ruptura, teria havido um erro da ordem de 10 dias.

Acredita-se que a aplicação do Terceiro Método, por utilizar toda a série e não medições isoladas dia a dia, tenda a oferecer melhores resultados.

5 Conclusão

Tendo em vista a retroanálise realizada pelo Método de Saito neste artigo, com medições de deslocamento e dados de pluviometria, observou-se que a relação entre tempo e deformação axial pôde ser caracterizada em três estágios: fluência primária, fluência secundária e fluência terciária. Adicionalmente, constatou-se a existência de uma tendência indicativa da data esperada para ruptura. Entretanto, o nível de acurácia sinaliza para um contexto de risco elevado para valores de t_r inferiores a 10 dias, ensejando que não há necessidade de dias subsequentes com esta tendência para que fosse indicada a interrupção ou paralisação das atividades que seriam afetadas pelo evento de colapso. Além disso, observou-se uma relação inversamente proporcional entre o índice pluviométrico e o número de dias remanescentes até a ruptura, relação que já é de conhecimento consolidado no meio técnico.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à VALE por autorizar a publicação das informações apresentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Casagrande, A. e Wilson, S. D. (1951) Effect of rate of loading on strength of clays and shales at constant water content. *Géotechnique* 2, pp. 251-263.
- Finn, W. D. L. e Shead, D. (1973) Creep and creep rupture of an undisturbed sensitive clay. 8th International Congress of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, p. 135-142.
- Goldstein, M. e Ter-Stepanian, G. (1957) The long-term strength of clays and depth creep of slopes. *Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng'g.*, II, pp. 311-314,
- Guimarães, R. B., Spada, J. L. G. (1997) Creep and prediction of slides in soils. In: 2nd Pan American Symposium on Landslides 2nd COBRAE, Rio de Janeiro. *Proceedings...* 10 p.
- Kawamura, K. (1985) Methodology for landslide prediction, In: proc. 12th International Congress of Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol 3, pp. 1155-1158.
- Murayama, S. e Shibata, T. (1956) On the rheological characteristics of clay (in Japanese). *Trans. Japan Society of Civil Engineers*, 40, pp. 1-31
- Relatório Técnico – Petrópolis – RJ 03/2013, Governo do Estado do Rio de Janeiro - SEDEIS Departamento de Recursos Minerais – DRM-RJ
- Saito, M., Uesawa, H. (1961) Failure of oil due creep. In: 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris. *Proceedings...* 4 p.
- Saito, M. (1965) Forecasting the time of occurrence of a slope failure. In: 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montréal. *Proceedings...* 5 p.
- Saito, M. (1969) Forecasting time of slope failure by tertiary creep. In: 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico. *Proceedings...* 7 p.
- Saito, M (1980) Semi-logarithmic representation for forecasting slope failure, New Delhi, Vol 1 pp. 321-324.