

Estabilidade de talude diante de eventos pluviométricos intensos na BR-376 – Serra do Mar, Paraná - Brasil

Heloísa Neres Lopes

Mestranda, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, heloisanereslopes@ufpr.br

Ariane Cecato Cajaiba dos Santos

Mestranda, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, arianecajaiba@ufpr.br

Larissa de Brum Passini

Professora, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, larissapassini@ufpr.br

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo estudar a estabilidade de um talude rodoviário localizado em Guaratuba, Paraná, Brasil, que faz parte da rodovia federal concessionada BR-376. Essa região está situada na Serra do Mar, caracterizada por mudanças abruptas de altitude e altos índices pluviométricos ao longo do ano. Em novembro de 2022, eventos pluviométricos intensos na região provocaram acidentes geotécnicos nos taludes da rodovia. Assim, este estudo visa compilar esses dados pluviométricos, registrados por um pluviógrafo instalado e avaliar sua influência na estabilidade do talude de estudo. A modelagem leva em consideração um estudo geológico-geotécnico prévio, baseado em dados de ensaios de campo e ensaios geofísicos considerados representativos da região. Utiliza-se as abordagens determinística e probabilística para a análise de estabilidade, empregando os métodos de Morgenstern-Price e Monte-Carlo. As simulações revelam fatores de segurança abaixo do indicado pela norma nacional, mas ainda indicam a estabilidade do talude no método determinístico para as condições de contorno elencadas. Ao incorporar as incertezas dos parâmetros de resistência do solo no método probabilístico, tem-se uma probabilidade de ruptura elevada.

PALAVRAS-CHAVE: Acidentes geotécnicos, abordagem determinística, Morgenstern-Price, abordagem probabilística, Monte-Carlo.

ABSTRACT: This work aims to study the stability of a roadside slope located in Guaratuba, Paraná, Brazil, which is part of the federal concession highway BR-376. This region is situated in the Serra do Mar, characterized by abrupt changes in altitude and high rainfall rates throughout the year. In November 2022, intense rainfall events in the region caused geotechnical accidents on the highway slopes. Thus, this study aims to compile these rainfall data, recorded by a rain gage installed, and assess their influence on the stability of the study slope. The modelling considers a previous geological-geotechnical study, based on field test data and geophysical tests considered representative of the region. Both deterministic and probabilistic approaches are used for stability analysis, employing the Morgenstern-Price and Monte Carlo methods. The simulations reveal safety factors below those indicated by the national standard, but still indicate slope stability in the deterministic method for the listed boundary conditions. By incorporating uncertainties in soil strength parameters in the probabilistic method, there is a high probability of failure.

KEYWORDS: Geotechnical accidents, deterministic method, Morgenstern-Price, probabilistic method, Monte-Carlo.

1 INTRODUÇÃO

O trecho da rodovia federal BR-376, identificado pelos marcos quilométricos de 614 a 682 localizados na região da Serra do Mar, é responsável pelo escoamento de cargas, em especial aos portos de Santana Catarina, além de ser a principal rota de acesso de Curitiba-PR a Joinville-SC e, através da conexão com a BR-101, a Florianópolis-SC, duas influentes cidades da região Sul do Brasil (IBGE, 2018). A região apresenta uma variação altimétrica de mais de 900 m, e atualmente é concessionado e sua praça de pedágio registrou a passagem de mais de 14 milhões de veículos no ano de 2023 (ANTT, 2024).

A região da Serra do Mar é caracterizada por alta precipitações, encostas com elevada declividade e redes de drenagem compostas pelo fraturamento dos maciços rochosos. Esse conjunto de característica torna

a região naturalmente instável e susceptíveis a intervenções antrópicas, como construção de obras que geram sobrecargas e movimentações de terra, sendo a região brasileira com maior probabilidade de ocorrência de acidentes geotécnicos (Kormann *et al.*, 2016; Dias *et al.*, 2022).

Conforme divulgado pela Agência Estadual de Notícias do Governo do Estado do Paraná (AEN-PR), ocorreram dois deslizamentos consecutivos no km 668+800 Sul da BR-376 em novembro de 2022, ilustrados pela Figura 1, e associado a esse acidente geotécnico, tem-se o registro de 185,4 mm de chuva em 24h.

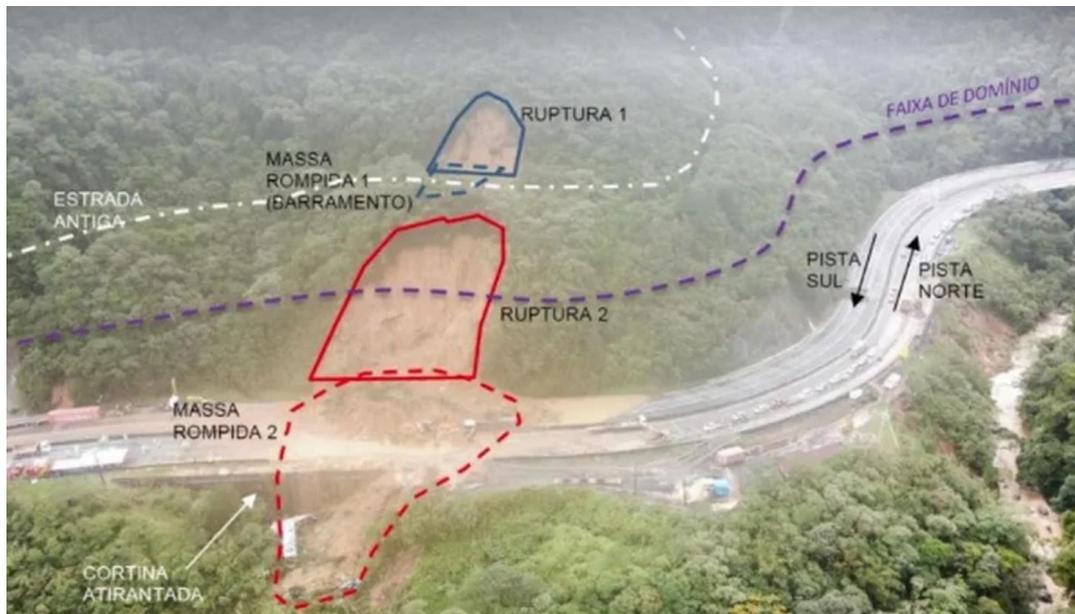


Figura 1. Croqui esquemático do acidente geotécnico na BR-376. Fonte: AEN-PR, 2022.

Dessa forma, a análise dos eventos pluviométricos e sua influência na estabilidade de taludes é necessária para orientar a gestão operacional da rodovia, assim como para guiar invenções de engenharia nas encostas, como obras de contenção e drenagens. Assim, esse trabalho tem como objetivo compilar os dados pluviométricos de novembro de 2022 e avaliar a influência da precipitação registrada na estabilidade em 2D de um talude típico da rodovia a partir das abordagens determinística e probabilística, aplicando os métodos de Morgenstern-Price e Monte-Carlo.

2 ÁREA DE ESTUDO

O talude estudado neste trabalho, Figura 2, está localizado na rodovia federal BR-376, no município de Graratuba, estado do Paraná, e sob a concessão da empresa Autopista Litoral Sul (ALS), do grupo Arteris. A encosta possui declividade aproximada de 45° e sua altura é de cerca de 400 m. O histórico revela que o talude registrou dois incidentes de deslizamentos, em 2008 e 2011, sem outros registros publicados até 2023. O evento de 2011 foi relacionado a um evento pluviométrico de alta intensidade de 184 mm em 24h, 305 mm e 48h e 389 mm em 72h, e registrou ruptura de 130 m de extensão, 80 m de comprimento transversal e 4 m de profundidade (Victorino *et al.*, 2017).

Este trabalho se fundamentou em perfil geológico-geotécnico definido a partir dos dados obtidos em campanha de investigação geotécnica (três sondagens mistas com ensaios SPT e recuperação de testemunhos pelo método rotativo e nove sondagens com penetrômetro dinâmico leve - DPL) e geofísica (eletrorresistividade e sísmica de refração) realizada pela Fugro e incluídos no relatório de Recursos de Desenvolvimento Tecnológico da Autopista Litoral Sul em 2019. A topografia de referência corresponde ao levantamento realizado durante os caminhamentos geofísicos e corresponde a cerca de 50% de toda a encosta natural.

O perfil geológico-geotécnico assumido para esse trabalho apresenta quatro diferentes materiais: uma camada superficial de aterro, localizada nos primeiros 60 m de altura, em área que passou por obras de retaludamento em 2011; outra camada superficial de colúvio, visualizada ao longo da encosta e no platô logo

acima da área de retaludamento; solo saprolítico, a qual varia de 2 m a 8 m, a depender da declividade da encosta; e, por fim, uma camda de rocha metamórfica de resistência mediana a baixa, alto grau de alteração e elevado índice de fraturamento.



Figura 2. Talude de estudo e localização na BR-376 Fonte: ALS, 2019.

3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para esse trabalho está segmentada em análises de fluxo e análises de estabilidade. Para a análise de fluxo foram compilados os dados pluviométricos registrados para novembro de 2022 por pluviógrafo instalado no talude de estudo e incorporados como condição do contorno de fluxo unitário (m/s) no módulo SEEP/W do *software* GeoStudio, e através do regime transiente como forma a avaliar a mudança das poropressões ao longo do mês de interesse. Além disso, para consideração dos parâmetros foram adotados os obtidos em curvas de retenção e ensaios de permeabilidade por Victorino (2015) a partir de ensaios em amostras coletadas em uma encosta da região para solo coluvionar e residual na composição das camadas do talude.

As análises de estabilidade foram conduzidas em duas dimensões (2D) através das abordagens determinística e probabilística, nas condições de evento pluviométrico intenso e modeladas no módulo SLOPE/W do *software* GeoStudio. Na análise determinística, aplicou-se o método de Morgenstern-Price e se obteve o fator de segurança (FS) crítico, além da profundidade máxima de superfície de ruptura. Já na análise probabilística foram utilizadas 2000 simulações pelo método de Monte-Carlo e se tem como resultado a probabilidade de falha (P_f), essa representada pela porcentagem de simulações em que se tem um FS abaixo de 1,0. A variação dos parâmetros de resistência (Tabela 1) é determinada a partir valores médios estabelecidos pelo JCSS (2006), sendo igual a 15% para o ângulo de atrito e 30% para o intercepto coesivo. A fim de se avaliar a influência das propriedades assumidas na modelagem, foram considerados análises separadas, considerando valores de intercepto coesivo como variáveis ou como nulo. Os métodos aplicados foram avaliados como satisfatório para outros trabalhos da Serra do Mar, como Trevizolli *et al.* (2017) e Furman *et al.* (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de fluxo

O nível d'água inicial foi definido a partir do nível d'água medido após 24h da finalização das sondagens mistas realizadas no talude e foi extrapolado com o auxílio de ensaios geofísicos de eletroresistividade. De toda forma, salienta-se que o monitoramento a partir de indicadores de nível d'água em diversos pontos da encosta seria a melhor opção para estabelecer o nível d'água do terreno.

A partir disso foi assumida como condição de contorno os valores de precipitação registrados em novembro de 2022, apresentados na Figura 3. Os dados de novembro revelam que mais 22 dias do mês registraram menos de 10 mm de chuva, considerada uma intensidade baixa para os meses de verão, mas que pode ser justificada pelo evento La Niña. Entretanto, verifica-se uma progressão na intensidade pluviométrica a partir do dia 22 de novembro, a qual atingiu seu auge com 144,6 mm de 28 de novembro. Assim verificam-

se precipitações acumuladas de 283,2 mm em 48h, 326,2 mm em 72h e 369,2 mm em 96h. Tais eventos foram responsáveis por um registro de anomalia de mais de 300 mm pelo Instituto Nacional de Meteorologia (2024).

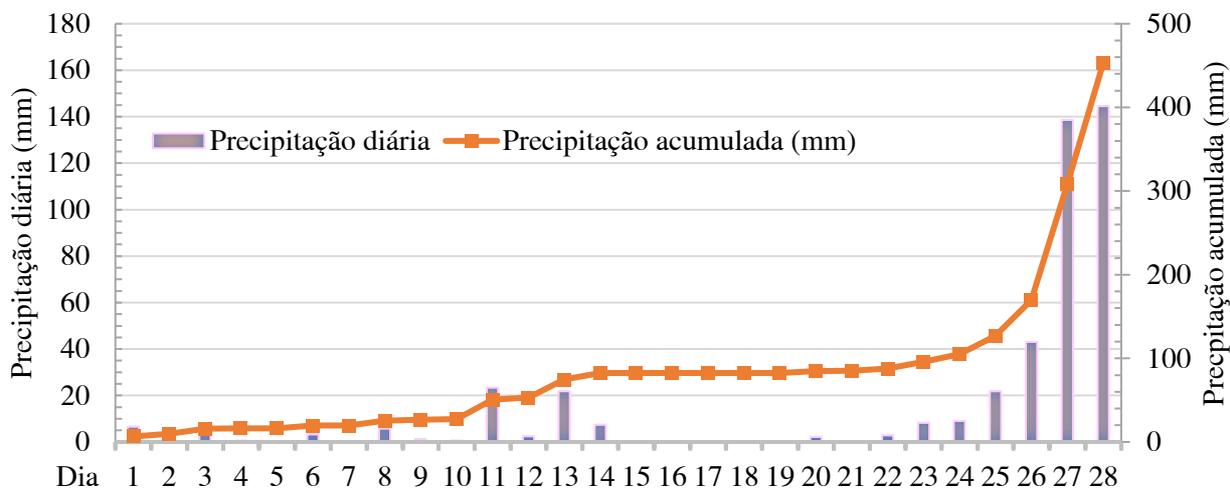


Figura 3. Dados pluviométricos de novembro de 2022. Fonte: As autoras.

Com isso, foi possível simular o fluxo para o dia 28 de novembro, contabilizando todos os dias prececentes do mês, ilustrado pela Figura 4. Não foram observadas mudanças expressivas no nível d'água original, mas se pode verificar o direcionamento do fluxo para o pé do talude. A partir do perfil de poropressão, também é possível observar que o talude apresenta sucção equivalente a 100 kPa acima do nível d'água, valor também observado na literatura (Victorino, 2015; Trevizolli *et al.*, 2017; Furman *et al.*, 2018). Por fim, constata-se que o estudo pluviométrico e de fluxo assume significativa importância, uma vez que a sazonalidade influi diretamente no risco de ruptura de taludes da Serra do Mar, tal como apontado por Trevizolli *et al.* (2017).

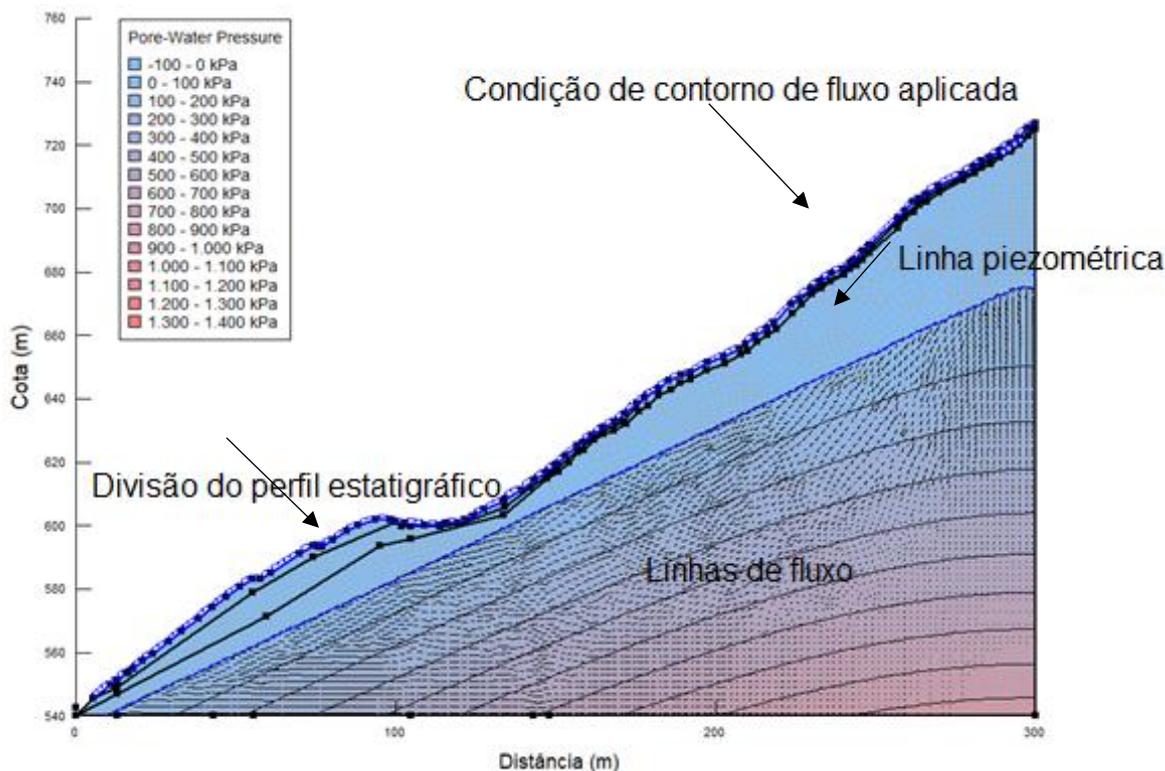


Figura 4. Perfil de fluxo para o talude de estudo. Fonte: As autoras.

4.2 Análise de estabilidade

A primeira etapa para consolidação das análises de estabilidade foi a definição dos limites ao longo da extensão do talude para se obter as superfícies de ruptura e esses foram fundamentados pelo perfil geológico-geotécnico, ilustrado pela Figura 5. A identificação das camadas de solo e rocha também contribuíram para a definição desses limites entre: área de retaludamento (Figura 6) e a encosta natural (Figura 7). A primeira delimitação, designada como área de retaludamento está associada ao aterro proveniente da obra realizada até a ruptura do talude no ano de 2011, abrangendo uma elevação de aproximadamente 60 metros, Já a segunda delimitação, a qual será referenciada como encosta, englobará toda a extensão topográfica mapeada na campanha de geofísica, estendendo-se a aproximadamente 200 metros de altura, representando cerca de 2/3 da elevação total da encosta natural presente no local.

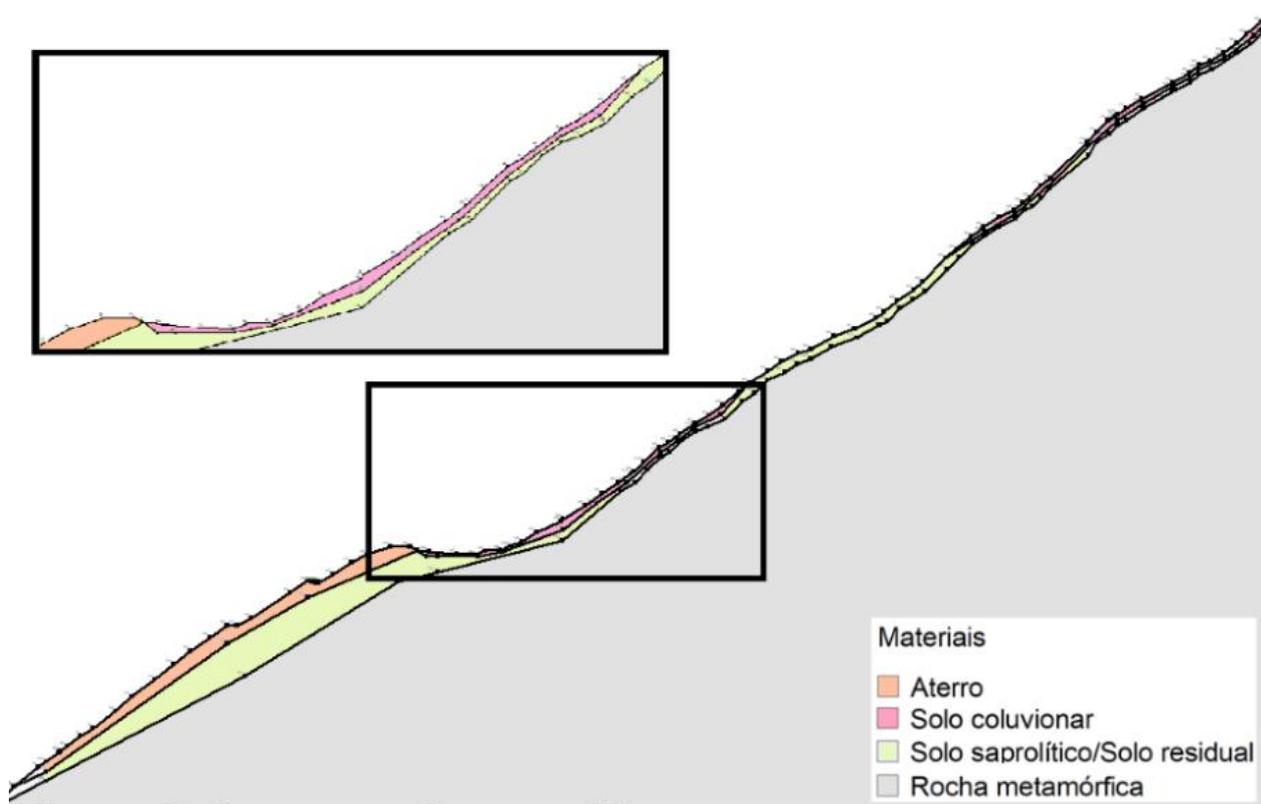


Figura 5. Perfil geológico-geotécnico e delimitações dos limites para obtenção das superfícies de ruptura.

Fonte: As autoras.

4.2.1 Método determinístico

A Tabela 1 apresenta os fatores de segurança obtidos para as diferentes condições dos parâmetros impostas nas modelagens, assim como para as duas delimitações de extensão para se obter a potencial superfície de ruptura.

Tabela 1. Resultados da análise determinística

Parâmetros de cada camada	Delimitação da superfície de ruptura	Fator de segurança (FS)
Aterro $\phi = 32,78^\circ$ e $c = 9,81$ kPa	Retaludamento	1,194
Solo coluvionar $\phi = 30,95^\circ$ e $c = 6,24$ kPa	Encosta	1,301
Solo residual $\phi = 30,04^\circ$ e $c = 3,93$ kPa	Retaludamento	1,137
Aterro $\phi = 32,78^\circ$ e $c = \text{zero}$	Encosta	1,210
Solo coluvionar $\phi = 30,95^\circ$ e $c = \text{zero}$		
Solo residual $\phi = 30,04^\circ$ e $c = \text{zero}$		

Pode-se verificar que todos os fatores de segurança calculados estão acima de 1,00, indicando a estabilidade da estrutura, porém também estão abaixo de 1,50, fator de segurança requerido pela ABNT NBR 11682 (2009) para encostas com alto risco de perda de vidas humanas, além de danos materiais e ambientais. Também é possível observar a influência do intercepto coesivo na estabilidade, uma vez que, ao assumir esse parâmetro de resistência como nulo, observa-se redução de até 13% do fator de segurança. Com isso, também se destaca que a obtenção do intercepto coesivo através de métodos de alta confiabilidade, como ensaios laboratoriais, permite modelagens mais fidedignas dos solos analisados, uma vez que aqui os parâmetros foram obtidos através da compilação de valores médios de ensaios triaxiais e cisalhamento direto, e equações empíricas formuladas para resultados de SPT. Além disso, tem-se valores do FS brandamente superiores para a área da encosta em comparação com a delimitação da área retalhada. Isso revela a importância da escolha dos materiais e da qualidade de obras de retaludamento após acidentes, uma vez que podem se tornar áreas de menor estabilidade na estrutura.

Na sequência, tem-se a representação das superfícies de ruptura críticas obtidas para a delimitação da extensão de interesse, denominada retaludamento (Figura 6) e encosta (Figura 7). Ao avaliar a superfície de ruptura, modeladas no formato circular, visualiza-se que essas se encontram nas camadas de solo saprolítico, a qual pode ainda favorecer o cisalhamento dada as superfícies de fraqueza preferenciais causadas pelas estruturas reliquias, como avaliado por Conte *et al.* (2017). As superfícies de ruptura não atingiram o nível d'água, situação também verificada por Riselo *et al.* (2022) e, com isso pequenas variações no lençol freático, mesmo que não usuais, tem baixa probabilidade de interferir na estabilidade da ruptura.

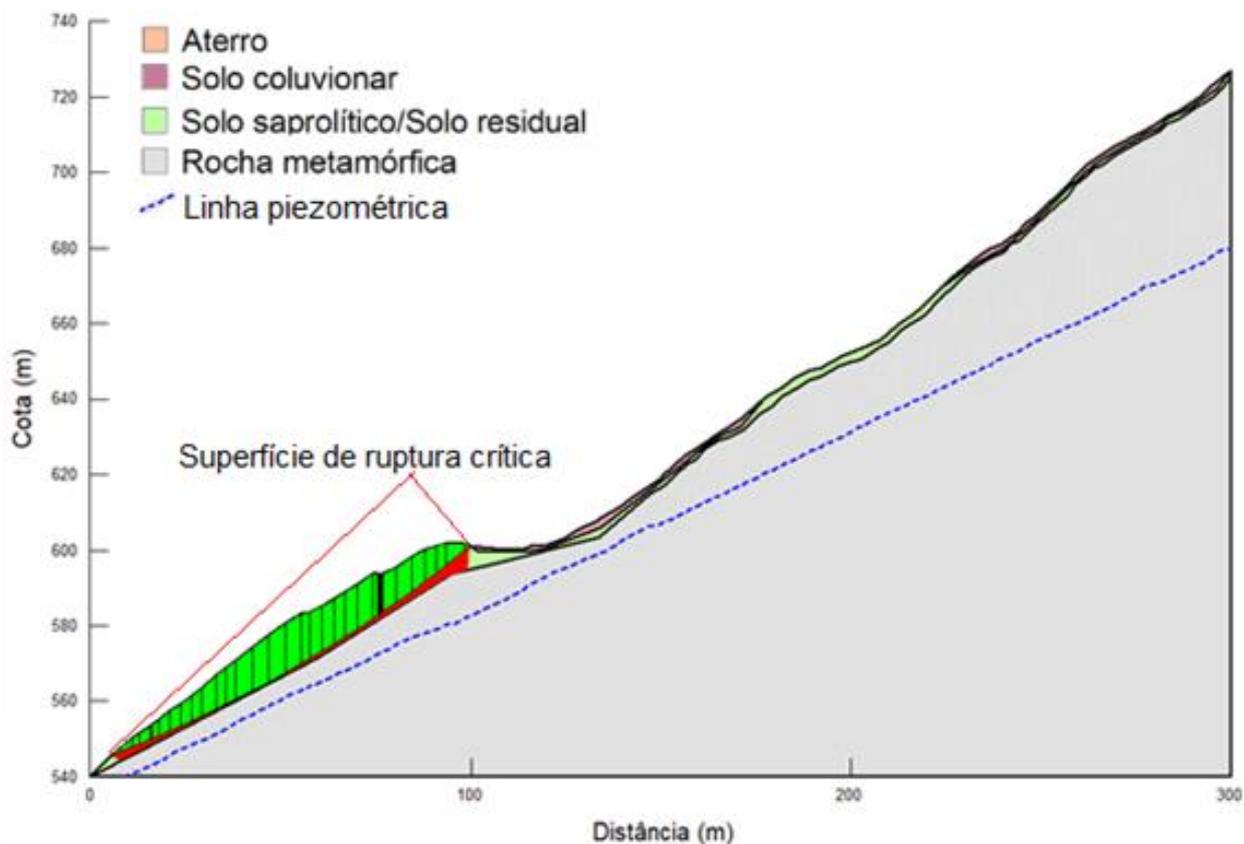


Figura 6. Superfícies de rupturas críticas - retaludamento. Fonte: As autoras.

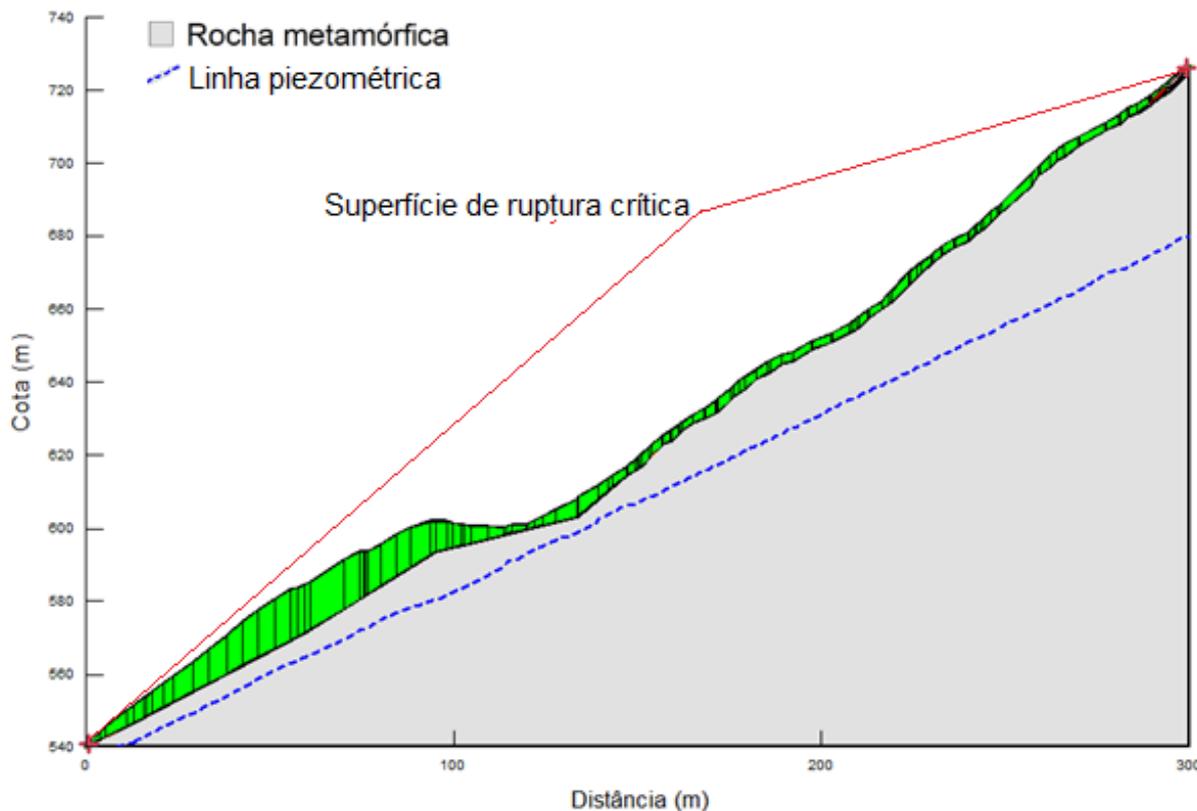


Figura 7. Superfícies de rupturas críticas - encosta natural. Fonte: As autoras.

Além disso, tem-se profundidades variando entre 10 m e 15 m, o que não reflete as características da região registradas por González *et al.* (2017), na ordem de 3,00 m; por Vieira & Gramani (2015), como variando entre 1,00 m e 2,50 m e, por Coelho *et al.* (2022), 1,00 m de profundidade. Todavia, ao se avaliar as imagens divulgadas do acidente geotécnico de novembro de 2022, pode-se estimar uma profundidade de ruptura na ordem de 10 m, diferentemente do esperado, mas similar aos resultados obtidos nesse trabalho. Sendo assim, conclui-se que é cabível a inclusão de análises de superfícies circulares com maiores profundidades de ruptura em taludes da Serra do Mar.

4.2.2 Método probabilístico

Na sequência são apresentados os resultados da análise probabilística na Tabela 2. Para cada condição de modelagem e delimitação de superfície de ruptura apresenta-se o fator de segurança médio, a probabilidade de falha (P_f), o desvio padrão do fator de segurança, assim como seus valores mínimo e máximo. Verifica-se probabilidade de ruptura de até 14,30% ao assumir intercepto coesivo nulo, corroborando a relevância desse parâmetro averiguada na análise determinística. Além disso, também de forma análoga à análise determinística, tem-se menores probabilidades de ruptura verificadas para toda a encosta, revelando mais uma vez que o trecho que passou por retaludamento se demonstra mais crítico quanto à estabilidade.

Por outro lado, diferentemente da aplicação do primeiro método, na abordagem probabilística se tem fatores de segurança abaixo de 1,00, relevando a existência de cenários hipotéticos onde o talude não se encontra estável. Essa situação demonstra a importância da comparação das duas abordagens e principalmente a consideração também da análise probabilística, uma vez que essa incorpora as incertezas referentes inerentes a modelagens de solos e rochas.

Tabela 2. Resultados da análise probabilística

Parâmetros de cada camada	Delimitação da superfície de ruptura	FS méd.	P _f (%)	Dev. FS	FS mín.	FS máx.
Aterro - $\phi = 32,78^\circ$ e $c = 9,81$ kPa	Retaludamento	1,1995	2,60	0,11926	0,97083	1,4407
Solo coluvionar - $\phi = 30,95^\circ$ e $c = 6,24$ kPa	Encosta	1,3285	0,00	0,13147	1,0749	1,5984
Solo residual - $\phi = 30,04^\circ$ e $c = 3,93$ kPa						
Aterro - $\phi = 32,78^\circ$ e $c = \text{zero}$	Retaludamento	1,1420	14,30	0,1190	0,93018	1,3697
Solo coluvionar - $\phi = 30,95^\circ$ e $c = \text{zero}$	Encosta	1,2240	0,80	0,12746	0,9970	1,4679
Solo residual - $\phi = 30,04^\circ$ e $c = \text{zero}$						

Concomitantemente a essas análises, Arruda Silva *et al.* (2019) ressaltam que o mapeamento de risco de um talude deve considerar a avaliação dos planos de descontinuidade, tais como sua orientação, direção de mergulho, ângulo de mergulho e relação geométrica com outras descontinuidades, uma vez que todos esses fatores são contribuintes para o desenvolvimento de processos erosivos e evolução de movimentações de massa. Com isso, é possível inclusive diminuir as incertezas e se obter fatores de segurança superiores na análise probabilística. Todavia, ressalta-se que para análises que embasem intervenções de engenharia deve-se também considerar obras já existem, como escadas hidráulicas e drenos horizontais profundos, assim como um maior estudo da influência de linhas de fraqueza causadas pela presença de estruturas reliquias no solo saprolítico e a consideração de estruturas de contenção e estabilização, como muros de gabião e solos grampeados.

5 CONCLUSÕES

A partir das análises de estabilidade determinísticas conclui-se que, para as condições impostas neste trabalho, o talude apresenta fator de segurança inferior ao requerido por norma ($FS = 1,50$), mas acima de 1,00, possibilitando a interpretação de que diante de eventos pluviométricos o talude mantém a condição de estabilidade. Por outro lado, a análise probabilística, ao fazer considerações quanto a incertezas, revela que existem probabilidades de falha, com valores superiores ao delimitarmos a superfície de ruptura na área de retaludamento. Observa-se também que, por mais que a superfície de ruptura circular com profundidades acima de 10 m não seja o que a literatura frequentemente apresenta para a Serra do Mar, esse tipo de análise também pode ser relevante, dado os acidentes geotécnicos recentes ocorridos na região. Por fim, reafirma-se que o intercepto coesivo tem influência na estabilidade de taludes, dada a sensibilidade nesse parâmetro no cálculo do fator de segurança e, por conseguinte, na probabilidade de falha, e se destaca a importância da obtenção desse parâmetro por métodos de alta confiabilidade para análises com mais acurácia.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná e à empresa Autopista Litoral Sul pela disponibilização de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Estadual de Notícias do Paraná. Gabinete de crise divulga primeiro boletim sobre a situação na BR-376. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Gabinete-de-crise-divulga-primeiro-boletim-sobre-situacao-na-BR-376>. Acesso em: jul. 2024.
- Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Tráfego nas praças de pedágio. Disponível em: <https://dados.antt.gov.br/dataset/volume-trafego-praca-pedagio/>. Acesso em: mar. 2024.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

- Autopista Litoral Sul (ALS) – Arteris. 2019. Projeto 04 – Riscos geológicos-geotécnicos em talude rodoviários: desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento digital de informações para a BR-376, trecho da Serra do Mar (PR-SC) – Fase 3.
- Arruda Silva, M., Salah, I. C., González, A. A. M., Sestrem, L. P., Faro, V. P., Kormann, A. C. M., PASSINI, L. B. Kinematic analysis applied to a study of stability from a Brazilian slope located at the “Serra do Mar”. In: 14th ISRM Congress, Foz do Iguaçu, Brazil, 2019.
- Coelho, R. D.; Gramani, M. F.; Vieira, B. C. Soil physical properties and slope stability in Serra do Mar, Southeastern Brazil. Universidade de São Paulo. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, 2022.
- Conte, M. A. G., Bressani, L. A., Strauss, M. Estudo de ruptura de um talude rodoviário em solo residual de migmatito em São José/SC. In: XII COBRAE, Florianópolis, SC, 2017.
- Dias C. D., McDougall S., Vieira B. C. 2022. Geomorphic analysis of two recente debris flows in Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 113, dez. 2021, 1-14.
- González A. A. M., Passini L. B., Kormann, A. C. M. 2017. Rainfall effects on pore pressure changes in a costal slope of the Serra do Mar in Santa Catarina. *Soil and rocks*, 40, 3, sep-dec. 2017, 263-278.
- Instituto Nacional de Meteorologia. Clima. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/progp/0>. Acesso em: jan. de 2024.
- JCSS – Joint Committee on Structural Safety. *Probabilistic model code - Section 3.7: Soil properties*. Technical University of Denmark. Denmark. 2006.
- Kormann A, Sestrem L. P., Lazarim T. P., Passini L.B., Asakawa, S. S. 2016. Integração de modelos geológico-geotécnicos e dados de instrumentação : um caso desafiador de refoço de maciço na Serra do Mar brasileira. *Geotecnica* 138, nov. 2016, 61-84.
- Riselo, B.; Passini, L. B.; Kormann, A. C. M. Stability analysis of a slope and runout analysis movement of the mobilized-mass volume. *Soils and Rocks*. 45. 1-12. 2022.
- Furman, J., Pontes, C. V., Trevizolli, M. N. B., Passini, L. B., Faro, V. P. (2018) Análise probabilística de rupturas de um talude da Serra do Mar PR/SP através de diferentes cenários de sucção para as camadas de solo não saturado. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador.
- Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística (IBGE). Diretoria de Geociências, Coordenação de Geografia, Regiões de Influência das Cidades 2018. 2. ÁREAS dos municípios 2018. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.
- Victorino, M. M. Influência da chuva nas propressões e estabilidade dos taludes rodoviários de um trecho da BR-376 na Serra do Mar Paranaense. 2015. Dissertação de mestrado, PPGEC, UFPR, Curitiba, PR.
- Vieira, B. C.; Gramani, M. F. Serra do Mar: The most “tormented” relief in Brazil. *Landscapes and landforms of Brazil*. Springer, Dordrecht, p. 285-297, 2015.
- Victorino M. M., Sestrem L. P., Kormann, A. C. M. 2017. Definição de uma faixa pluviométrica crítica para deflagração de movimentos de terra em taludes rodoviários localizados no trecho da serra do mar da rodovia BR-376/PR. *Transportes* 25, 1, 113-120, 2017.
- Trevizolli, M. N. B., Kormann, A. C. M., Faro, V. P., Sestrem, L. P., Passini, L. B., Teixeira, S. H. C. (2017) Gestão de riscos rodoviários: avaliações paramétricas da propressão e de resistência na estabilidade de um talude da Serra Do Mar PR/SP. In: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), Florianópolis.