

Retroanálise e Modelagem Numérica de Estabilidade de Talude Rodoviário da PR-170: Estudo de Caso após Rompimento e Análise da Solução em Chave de Enrocamento

Maria Eduarda Bus

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, busmariaeduarda@gmail.com

Maria Eduarda Hass

Discente do curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, dudahass@hotmail.com

Eleandro Campos Pereira

Engenheiro Civil, Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná, Ponta Grossa, Brasil, eleandrop@gmail.com

Bianca Penteado de Almeida Tonus

Professora Doutora do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, bpatonus@uepg.br

Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, cerlautenschlager@uepg.br

RESUMO: Deslizamentos em taludes rodoviários são frequentes e causam impactos sociais, ambientais e econômicos. Este artigo realiza uma retroanálise e modelagem numérica da estabilidade de um talude na PR-170, avaliando o fator de segurança e os parâmetros de resistência ao cisalhamento, tanto no momento do deslizamento quanto após a implementação de uma chave de enrocamento, complementada por uma análise tensão-deformação. Utilizou-se o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price, com parâmetros do solo estimados por correlação entre sondagens e dados da literatura. Os resultados indicaram parâmetros de resistência próximos aos da literatura para o solo coluvionar, enquanto a análise da chave granular mostrou fator de segurança acima do exigido e desempenho satisfatório em termos de tensão-deformação, comprovando a eficácia do enrocamento. Concluiu-se que a provável causa da ruptura foi a alta pluviosidade, e a solução adotada mostrou-se eficiente tanto em estabilidade quanto em resistência.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de talude, Chave enrocamento, Retroanálise, Tensão deformação.

ABSTRACT: Landslides in road slopes are frequent and cause social, environmental, and economic impacts. This paper presents a back-analysis and numerical modeling of the stability of a slope along PR-170, evaluating the safety factor and shear strength parameters, both at the time of failure and after the implementation of a rockfill berm solution, complemented by a stress-strain analysis. The Morgenstern-Price limit equilibrium method software was used, with soil parameters estimated through correlations between field tests and literature data. The results indicated strength parameters close to those reported in the literature for the local colluvial soil, while the analysis of the granular berm showed a safety factor above the required standard and satisfactory stress-strain performance, confirming the effectiveness of the rockfill solution. It was concluded that the probable cause of the slope failure was high rainfall, and the adopted solution proved efficient in terms of both stability and resistance.

KEY WORDS: Slope Stability, Rockfill berm, Back-analysis; Stress-Strain

1 INTRODUÇÃO

Dentre os fatores que influenciam a instabilidade de encostas, a alta pluviosidade, seja prolongada ou concentrada em um único dia, é o mais significativo para deslizamentos, alterando o equilíbrio de forças do talude antes da ruptura (Guidicini; Nieble, 2019). Segundo o Inmet (2023), o Sul do Brasil registrou chuvas acima da média histórica em outubro de 2023, devido ao El Niño e a sistemas de baixa pressão. O maior volume em 24 horas ocorreu no Paraná, com registros entre 190 mm e 204 mm. No dia 29 de outubro de 2023, o DER-PR emitiu um boletim informando 8 bloqueios totais e 5 parciais em rodovias estaduais.

Entre os incidentes, a PR-170, objeto deste estudo, foi interditada parcialmente devido a rachaduras causadas pelo deslizamento de um talude no KM 467, trecho entre Pinhão e a Usina Foz do Areia. O avanço nos estudos sobre rupturas de taludes contribui para melhor compreensão e desenvolvimento de medidas de segurança. O objetivo geral do presente trabalho é realizar a análise, em termos de fator de segurança e parâmetros de resistência ao cisalhamento, da estabilidade de encosta localizada rodovia PR-170, no KM 467, considerando o momento do deslizamento e sua condição atual, após a implementação de obras de estabilização. Para isso tem-se como objetivos específicos a modelagem numérica da situação do talude no momento de ruptura da encosta, a fim de obter os parâmetros coesão e ângulo de atrito do solo natural por retroanálise, empregando equilíbrio limite. Assim como a análise da estabilidade da encosta através de modelagem pelo método do equilíbrio limite após estabilização com aterro de enrocamento do tipo chave. E por fim a análise do comportamento em termos de tensão e deformação, através de modelagem em elementos finitos, da encosta estabilizada.

Um talude está sujeito a três forças: peso dos materiais e fluxo d'água (que promovem movimento descendente) e resistência ao cisalhamento (que equilibra essas forças, evitando ruptura) (Fiori; Carmignani, 2009). Pelo método de equilíbrio limite (Kulhawy, 1969 apud Das, 2013), a ruptura ocorre quando o fator de segurança atinge a unidade, igualando forças atuantes e resistência do solo. Uma solução para estabilização é a chave granular, aplicada pela FGS Geotecnia (2018). Gobbi e Sachetti (2018) destacam que essa solução controla a movimentação de solos coluvionares (como os do talude da PR-170), aumentando o fator de segurança.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização do local

O objeto de estudo do presente trabalho está localizado na PR-170, no KM 467, entre a cidade de Pinhão (PR) e a UHE Governador Bento Munhoz. No dia 03 de novembro de 2023 houve o deslizamento da encosta a jusante da rodovia, segundo relatório disponibilizado pelo DER-PR, o corpo estradal sofreu uma subsidência devido ao deslizamento, ensejando o bloqueio e a interrupção total da pista. A ruptura ocorreu após duas chuvas que ultrapassaram a média histórica local.

A solução de estabilização adotada foi a inserção de uma chave granular adjacente ao pé da ruptura. A chave possui 5 metros de largura na base e 12 metros de profundidade, visando ultrapassar a camada de colúvio. Para a execução da chave, devido a situação emergencial, optou-se pela execução da base sobre solo natural, no primeiro platô a jusante do material escorregado, procurando garantir maior estabilidade à estrutura de contenção.

2.2 Parâmetros Geotécnicos do Solo do Talude em Estudo

Quanto a descrição do solo, de acordo com o relatório disponibilizado pelo DER-PR, foi identificada a presença de depósitos gravitacionais, de natureza coluvionar, característico da cor avermelhada local, e também a presença do argilomineral esmectita, que dá a característica amarelada do solo local. Após o evento de instabilidade, foram realizadas 9 sondagens mistas no local. As sondagens selecionadas para estudo se basearam na proximidade dos furos com as seções mapeadas e fornecidas pelo DER-PR, além de sua proximidade com o centro do talude, principal local de ruptura.

Os boletins de sondagem mostram que o solo local apresenta uma camada superficial de argila siltosa (NSPT 3-5), seguida por uma camada intermediária de silte argiloso/arenoso (NSPT 5-8) e uma camada inferior de basalto em diferentes graus de fraturamento. As sondagens também registraram a presença de areia fina a montante do talude e diversos matacões rochosos, que foram desconsiderados nas análises de estabilidade por sua baixa representatividade nos parâmetros de resistência do solo. Este perfil geológico



condiz com a descrição do DER-PR sobre colúvio, caracterizado pela intercalação de camadas de argila, areia e silte, além da presença de material pétreo envolto pela matriz sedimentar.

Para a etapa de retroanálise, os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram adotados com base em Joppert (2007) e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de resistência ao cisalhamento para retroanálise

Material	Peso específico (kN/m ³)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
Argila siltosa (Colúvio)	18	23	15

Os parâmetros para a análise da solução de chave enrocamento foram adotados com base no estudo de Gobbi e Sachetti (2018) e no resultado da retroanálise.

Tabela 2. Parâmetros de resistência ao cisalhamento para análise da solução.

Material	Peso específico (kN/m ³)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
Colúvio	18	22,25	12
Rachão	20	34	2

Para a análise de tensão-deformação, os parâmetros foram adotados com base nos estudos de Vallejo (2002).

Tabela 3. Parâmetros para análise de tensão-deformação.

Material	Peso específico (kN/m ³)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
Colúvio	18	22,25	12	15	0,30
Rachão	20	34	2	50	0,30
Basalto (rocha)	20	40	200	75	0,25

2.3 Retroanálise do Talude no Momento de Ruptura

O procedimento de retroanálise será realizado utilizando-se de duas seções transversais centrais a área de ruptura. Para a análise, será utilizado o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price no software Slide, da Rocscience. A análise será feita sobre o modelo numérico representado na Figura 1, o qual é composto pela geometria do talude antes do rompimento e pelas camadas de solo de acordo com a sondagem e relatório do DER-PR.

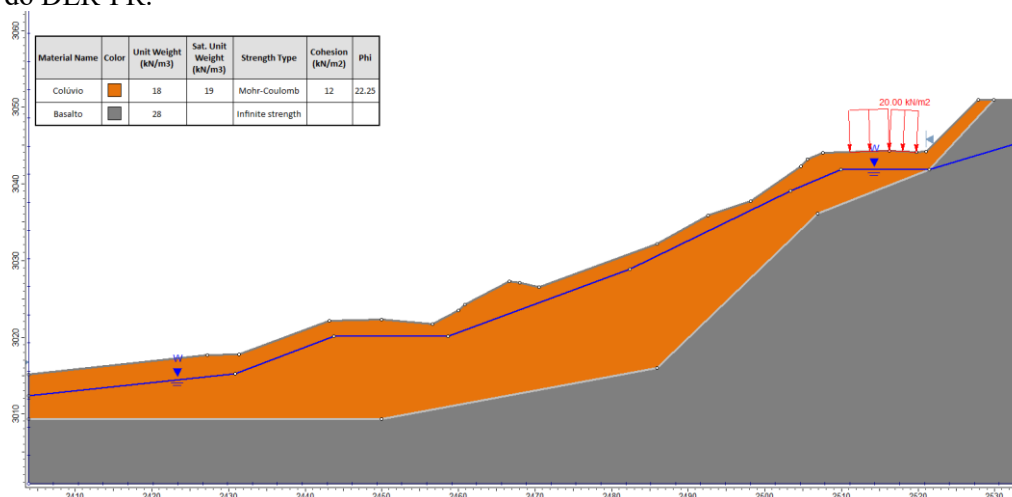


Figura 1 – Modelo numérico para retroanálise

O método a ser seguido é proposto por Gomes (2003), com adequações a solução em específico. Inicialmente fixam-se as condições de contorno, como a geometria inicial e posição do nível d'água. A partir disso utiliza-se o modelo numérico para o cálculo do fator de segurança inicial. Com o resultado inicial, fixam-se o ângulo de atrito e varia-se a coesão até que seja atingido proximidade ao fator de segurança unitário. Por fim, fixa-se a nova coesão, variando o ângulo de atrito até atingir o fator de segurança unitário.

2.4 Análise de Estabilidade do Talude com a Solução de Chave Granular

Para o talude estabilizado com a solução de chave granular, será realizada uma análise de estabilidade em termos de fator de segurança. Para a análise, será utilizado também o método de Morgenstern-Price no software Slide, utilizando a mesma seção adotada para a retroanálise com a geometria inicial do talude, porém com a geometria representando a solução de chave de enrocamento, tal como executado no local de estudo (Figura 2).

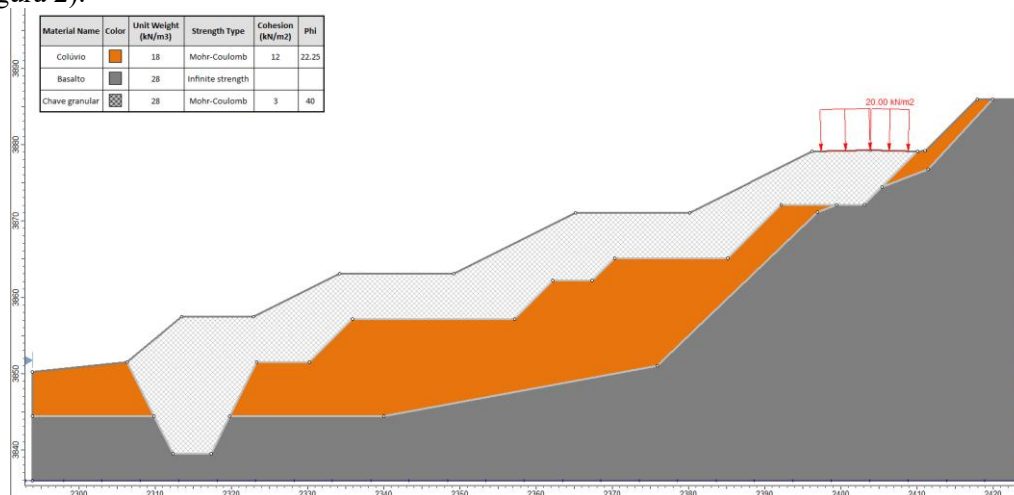


Figura 2 – Modelo numérico para análise da solução de chave granular

2.5 Análise de Tensão-Deformação do Talude em Elementos Finitos

Para entender o comportamento da chave granular no maciço, é proposta uma análise de tensão deformação utilizando a ferramenta Sigma/W, da GeoStudio (2024). A análise em elementos finitos permite a verificação dos deslocamentos da encosta estabilizada, verificando regiões de plastificação e deslocamento do material de estabilização.

O modelo numérico (Figura 3) a ser utilizado na análise considera também a geometria da encosta a montante, de forma a avaliar como a implantação da solução de chave enrocamento afeta as movimentações que já ocorreram e poderiam evoluir na encosta a montante.

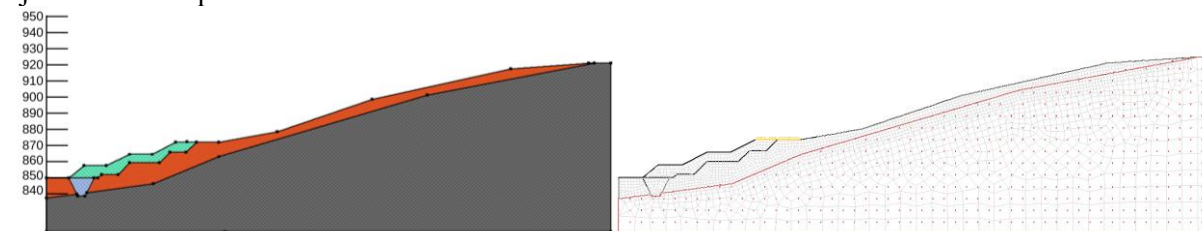


Figura 3 – Modelo numérico para análise tensão-deformação

A geometria da encosta geral foi estimada, adotando como talude a jusante a geometria da encosta estabilizada, a plataforma da rodovia considerada plana com as dimensões obtidas por meio do projeto básico fornecidos pelo DER-PR (2023) e por fim o talude a montante tendo a geometria obtida pelas curvas de níveis presentes no projeto básico da solução de estabilização.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Retroanálise do talude no momento de ruptura

O procedimento de retroanálise iniciou-se fixando os parâmetros de resistência ao cisalhamento previstos na literatura. Fixou-se o nível d'água nas condições observadas pela sondagem, observando o comportamento da encosta ainda seguindo os parâmetros definidos pela literatura, os quais resultaram em um fator de segurança de 1,106. Em seguida, fixou-se o ângulo de atrito, variando os valores de coesão, como pode ser observado na Tabela 4



Tabela 4. Fatores de segurança conforme a variação da coesão.

Peso específico (kN/m ³)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Fator de Segurança
18	23	15	1,106
18	23	14	1,079
18	23	12	1,025
18	23	10	0,966
18	23	5	0,822
18	23	0	0,449

Fixando a coesão no valor resultante mais próximo de 1, variou-se o ângulo de atrito, até obter um fator de segurança unitário, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5. Fatores de segurança conforme a variação da coesão.

Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Fator de Segurança
18	12	23	1,025
18	12	22,5	1,008
18	12	22,4	1,004
18	12	22,25	1,000
18	12	22	0,991

A superfície de ruptura final e os gráficos que ilustram a variação do fator de segurança com a variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento são ilustrados na Figura 4.

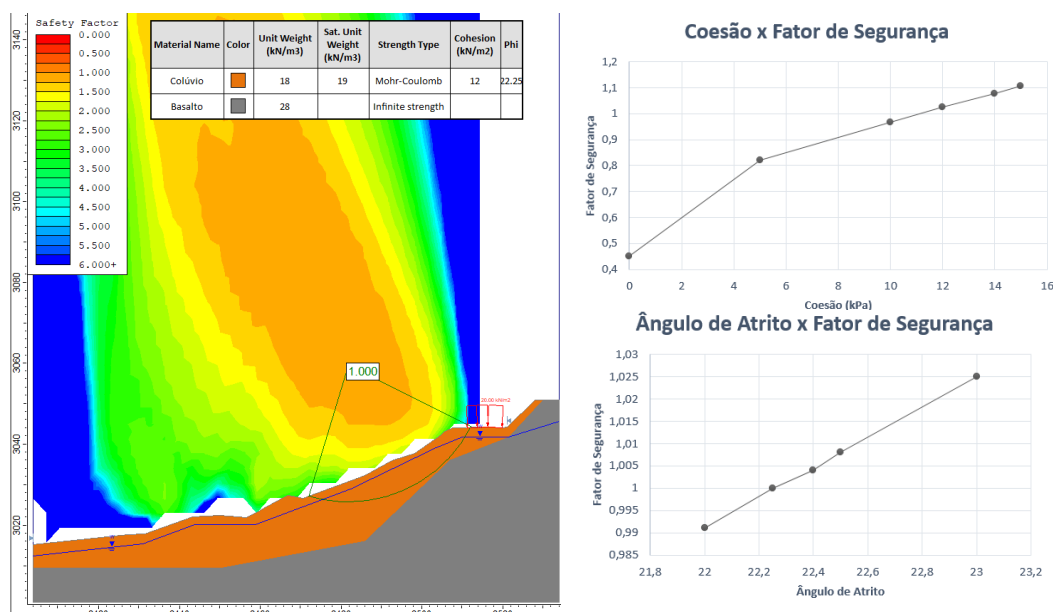


Figura 4 – Retroanálise e gráficos de variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento

A superfície de ruptura encontrada na retroanálise é compatível com a ruptura circular esperada em solos coluvionares, sendo resultado de deformações profundas e com direção paralela a base do colúvio, gerando movimentos associados aos conjuntos de trincas de tração. Além disso, a localização da superfície é compatível com o dano identificado no pavimento, motivo pelo qual o tráfego foi interditado pelo DER-PR no momento do deslizamento.

3.2 Análise de estabilidade do talude com a solução de chave granular

A análise de estabilidade utilizou-se dos parâmetros encontrados pela retroanálise em termos de coesão e ângulo de atrito do solo, e em parâmetros sugeridos por literatura para o enrocamento.

Inicialmente foi analisada a estabilidade da encosta sem a influência de nível d'água ou cargas adjacentes, apenas a massa de solo, a qual resultou em um fator de segurança de 2,204. Dando sequência às análises, considerou-se uma carga estimada de tráfego de 20 kN/m², ao longo de 8 metros no topo do talude,

onde se situa a plataforma da rodovia, além do nível d'água na cota encontrada nas sondagens, considerando a propriedade drenante do rachão, resultando em um fator de segurança global de 1,856, como pode ser observado na Figura 5.

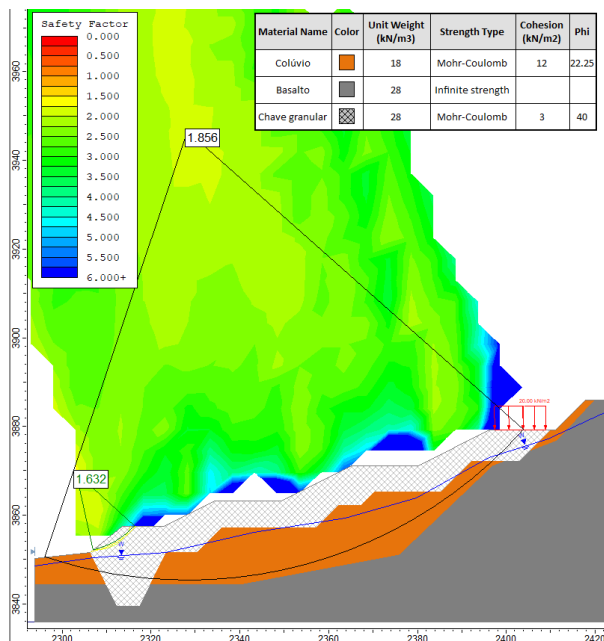


Figura 5 – Análise de estabilidade da solução em chave granular

Considerando que o principal fator apontado para a ruptura do talude sem a solução de estabilidade implementada foi o alto nível pluviométrico a qual o talude foi exposto, testou-se a estabilidade da solução com diferentes níveis d'água. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5. Fatores de segurança conforme a variação do nível d'água.

Profundidade aproximada em relação a superfície (m)	Fator de segurança
15	2,150
10	2,126
5	1,929
2	1,698
0	1,364

Percebe-se que os valores de fator de segurança se estabilizam conforme a maior profundidade do nível d'água, exemplificando o efeito que o aumento de poropressão causa nas tensões efetivas e consequentemente na resistência ao cisalhamento do talude. Para agrupar os dados obtidos nas análises de estabilidade, os valores são ilustrados no gráfico abaixo (Figura 6).

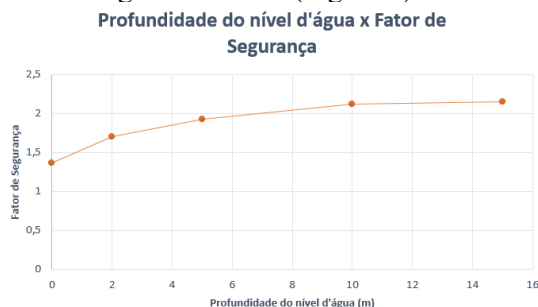


Figura 6 – Variação do fator de segurança em relação a profundidade do nível de água

Quanto ao período de execução da obra, considerando o caráter emergencial, optou-se por empregar a técnica de aterro de conquista com rocha detonada, com escavação imediata e preenchimento sucessivo, de modo que o talude não permanecesse exposto por longos períodos. A adoção de tal método, assim como a presença constante de uma equipe de monitoramento, equipamentos de monitoramento e acesso restrito à área de risco, minimizaram os riscos de instabilidade, permitindo a execução controlada mesmo com o fator de segurança temporário inferior ao convencional, admissível em obras emergenciais com ressalvas.

3.3 Análise de tensão-deformação da encosta geral

Foi analisada a estabilidade da encosta apenas com a carga adjacente provida do tráfego, sem a presença de nível d'água, considerando os parâmetros geotécnicos encontrados em literatura. A distribuição de tensões encontrada é ilustrada na Figura 7.

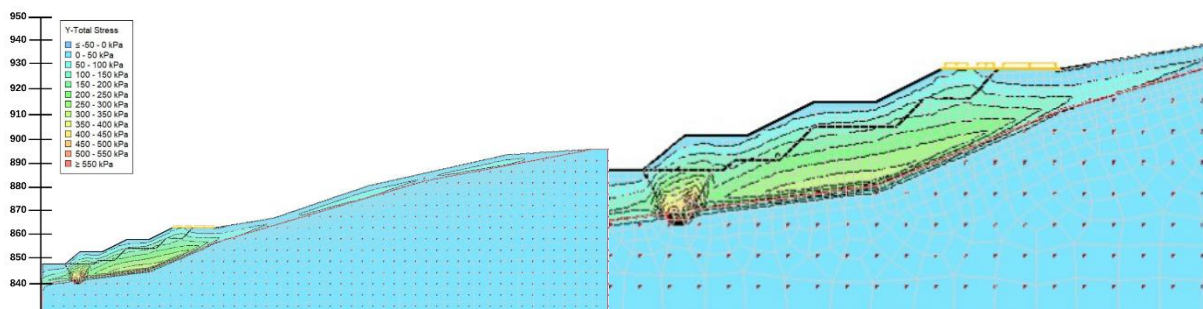


Figura 7 – Distribuição de tensões na encosta com enfoque na chave granular

A distribuição de tensões mostra uma concentração de esforços na chave de enrocamento, comportamento compatível com sua função de estabilização. O intertravamento dos rachões absorve os esforços da encosta, com as maiores tensões (tons de vermelho) localizadas na base da chave. O ponto crítico apresenta tensão principal horizontal de 157,23 kPa, vertical de 585,56 kPa e cisalhante de 87,21 kPa. Na análise de deformação (Figura 8), as maiores deformações ocorrem na região da sobrecarga de 20 kN/m² (rodovia com tráfego de veículos).

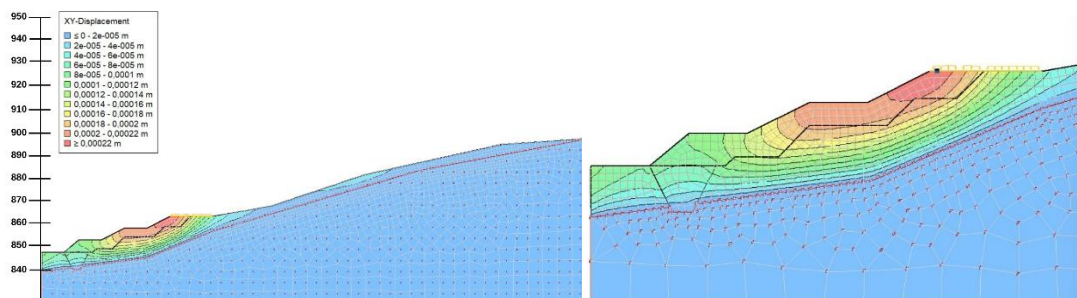


Figura 8 – Distribuição de deformações na encosta com enfoque na chave granular

Tal análise é satisfatória para a relação tensão-deformação da encosta pois indica que as maiores tensões se encontram na chave de enrocamento, mas os maiores deslocamentos não ocorrem na região da chave, demonstrando o intertravamento e segurança que esta oferece para a encosta.

4 CONCLUSÃO

O estudo realizou uma retroanálise da ruptura, estimando parâmetros de resistência ao cisalhamento com base na literatura. Os resultados confirmaram a hipótese de ruptura devido às chuvas intensas, apresentando coesão e ângulo de atrito compatíveis com a literatura, além de superfície de ruptura e nível d'água condizentes com o caso real. Após a retroanálise, analisou-se a solução de estabilização já implementada (chave de enrocamento), obtendo fatores de segurança satisfatórios: 2,204 (sem água) e 1,364 (maciço saturado), comprovando sua eficácia. Na análise de tensão-deformação, as maiores tensões ocorreram na base da chave, evidenciando seu papel no travamento da camada instável. As deformações foram mínimas na base da chave, com deslocamentos maiores apenas na rodovia, absorvidos pelo asfalto sem comprometer a encosta. Concluiu-se que a ruptura foi causada pelo excesso de chuvas, destacando a necessidade de monitoramento hídrico em taludes. A solução de chave de enrocamento mostrou-se eficaz em segurança e desempenho, sendo uma opção viável.

AGRADECIMENTOS



2025

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER-PR) pelo fornecimento dos dados e informações essenciais que serviram de base para esta pesquisa. Também manifestamos nosso reconhecimento à empresa Solution-IPD pela disponibilização da licença do software Slide da RocScience, que foi fundamental para as análises realizadas neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, M. F. P. *Estudo da estabilidade de um colúvio na Serra do Mar por elementos finitos*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2008

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Taludes*. Rio de Janeiro.

Caputo, H. P. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6. ed. Editora Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, vol. 1, 1988..

Das, B. M. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 610 p. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER PR). *Execução emergencial dos serviços de recuperação da rodovia PR-170, KM 467 - AC. PINHÃO – Barragem Foz de Areia*, Pinhão/PR. VOLUME 01: RELATÓRIO DE ANTEPROJETO. Curitiba, 2023

Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER PR). *DER-PR informa situação das rodovias estaduais e pede cautela aos motoristas*. 29 de outubro de 2023. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/DER-PR-informa-situacao-das-rodovias-estaduais-e-pede-cautela-aos-motoristas> Acesso em 03 maio 2024

Fernandes, I. S.; Trichês, G. *Contribuição à caracterização do comportamento mecânico da camada de brita graduada “in situ”*. II Seminário Nacional de Modernas Técnicas Rodoviárias, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

Fiori, A. P., & Carmignani, L. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas*. (1 ed.). Curitiba: UFPR, 2001.

Fonini, A.; Silveira, F.; Gobbi; Valcarenghi, C.; Rosa, B. D.; Daudt, J. C. M. Análise de estabilidade de talude: estudo de caso da Rua Victor Sopelsa na cidade Concórdia/SC. In: *ANAIS DO XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul GEOSUL, 2019*, Joinville. Anais eletrônicos... Joinville, 2019. Disponível em: <https://conferencias.ufsc.br/index.php/geosul2019/2019geosul/paper/downloadSuppFile/295/271>

Gobbi, F.; Sachetti, A. (FGS Geotecnia). (2018). *Projeto Básico de Estabilização e Contenção do KM 82+000 da ERS 020: entre São Francisco de Paula e o acesso à Três Cordas, RS*. Porto Alegre: FGS Geotecnia

Gomes, C. L. R. *Retroanálise em Estabilidade de Taludes em Solo: Metodologia para Obtenção dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento*. 2003. 167 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

Guidicini, G.; Nieble, C. M. *Estabilidade de taludes naturais*. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2019.

Inmet. *Eventos extremos: outubro/2023 foi marcado por chuva acima da média nas regiões Sul e Sudeste e calor extremo*. 3 de novembro de 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/eventos-extremos-outubro-2023-foi-marcado-por-chuva-acima-da-m%C3%A9dia-nas-regi%C3%B5es-sul-e-sudeste-e-calor-extremo> Acesso em 03 maio 2024

Joppert J., I. *Fundações e contenções de edifícios*. São Paulo. 2007.

Leão, M. F.; Paiva, G. V. C.. *Mecânica dos Solos Avançada e Introdução a Obras de Terra*. 1. ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018

Vargas, M. *Introdução à mecânica dos solos*. 1. ed. Editora Makron, São Paulo, 1978.