

Solução Geotécnica de Mitigação para Ruptura em Talude Rodoviário da BR-116/RS

Alisson Silveira Sachetti

Gerente de Engenharia, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, alisson@fgs.eng.br

Felipe Gobbi

Diretor Técnico, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, felipe@fgs.eng.br

Ana Paula Somenzzi

Engenheira Civil, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, ana@fgs.eng.br

Fabiano Garcia Madrid

Geólogo, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, madrid@fgs.eng.br

William Costa Nunes

Auxiliar de Engenharia, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, nunes@fgs.eng.br

RESUMO: O presente trabalho trata da solução adotada para a mitigação de movimento de massa ocorrido em um talude rodoviário localizado na rodovia BR-116, próximo ao município de Nova Petrópolis, RS. O movimento consistiu em uma ruptura planar em solo ocorrida durante as fortes chuvas que se alastraram pelo estado durante o mês de maio de 2024, gerando diversos pontos de interdição. Este tipo de movimentação está associada a terrenos com elevadas declividades e que apresentam contato solo-rocha bem definidos, cujo gatilho é o aumento do nível de poropressão no interior da camada de solo e consequente diminuição da resistência ao cisalhamento mobilizada. A área rompida corresponde a um talude natural em solo residual de arenito com extensão da ordem de 150m. A ruptura ocorreu no contato solo-rocha, expondo o leito rochoso ao longo da face da movimentação, restando uma escarpa verticalizada na região superior do talude com alta suscetibilidade a novos eventos. De forma a subsidiar o desenvolvimento do estudo geotécnico, foram realizados ensaios de laboratório em amostra indeformada, além de sondagens mistas posicionadas junto ao pé do talude. A partir do diagnóstico e dos resultados dos ensaios, foi realizada a simulação de movimentação ocorrida através da ferramenta RAMMS, a fim de validar o modelo de cálculo e os parâmetros obtidos nos ensaios, bem como estimar o volume de material movimentado e a geometria do terreno pré-ruptura. A partir destas análises foram projetadas estruturas de proteção para a rodovia, através de barreiras flexíveis e rígidas.

PALAVRAS-CHAVE: Mitigação de Risco Geotécnico, Ruptura Planar, Barreiras Rígidas e Flexíveis.

ABSTRACT: This paper presents the solution adopted to mitigate a mass movement that occurred on a highway slope along BR-116, near the municipality of Nova Petrópolis, Rio Grande do Sul, Brazil. The event consisted of a planar failure that took place during the heavy rainfall that affected the state in May 2024, resulting in several road closures along the highway. This type of movement is typically associated with steep slopes characterized by well-defined soil-rock interfaces, where the triggering mechanism involves an increase in pore water pressure within the soil layer and the consequent reduction in the mobilized shear strength. The affected area corresponds to a natural slope composed of residual sandstone soil, approximately 150 meters in length. The failure developed along the soil-rock contact, leaving a near-vertical scarp at the upper portion of the slope, which remains highly susceptible to further instability. To support the geotechnical assessment, laboratory tests were performed on undisturbed samples, complemented by mixed-type borings conducted at the slope toe. Based on the diagnostic investigation and laboratory results, the event was simulated using the **RAMMS** numerical tool to validate the computational model and the parameters obtained from testing, as well as to estimate the displaced material volume and reconstruct the pre-failure topography. From these analyses, protective structures for the highway were designed, including both flexible and rigid barriers.

KEYWORDS: Geotechnical Risk Mitigation, Planar Failure, Rigid and Flexible Barriers.

1 INTRODUÇÃO

Em maio de 2024 o estado do Rio Grande do Sul foi acometido por fortes chuvas que acarretaram em inúmeros acidentes geotécnicos em rodovias, principalmente nas regiões da serra gaúcha. Neste contexto, foram observadas rupturas em taludes de corte e aterro, com mecanismos variados, com grande recorrência de rupturas planares por vezes associadas a corridas detriticas.

Neste contexto, foram observadas várias rupturas nos taludes da BR-116 entre os municípios de Caxias do Sul e Nova Petrópolis, estes eventos interditaram a rodovia e dificultaram o trânsito de veículos por um grande período de tempo. Este tipo de evento, além de trazer um alto risco ao usuário da rodovia, acarreta em prejuízos econômicos afetando principalmente, nesta região, o turismo e a agricultura familiar.

Para mitigar a suscetibilidade a novos eventos semelhantes, foi realizado um estudo de alternativas para entender o mecanismo de ruptura ocorrido, modelagem geotécnica e proposta de solução de proteção para os usuários da rodovia. Deste modo, serão apresentados neste artigo o estudo geotécnico/geológico, o diagnóstico obtido e a solução de mitigação dimensionada.

2 ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS

2.1 Geologia

A região de estudo está na interface entre as formações Serra Geral (Fácies Gramado) e a Formação Botucatu.

A Fácies Gramado, corresponde aos primeiros eventos vulcânicos da Formação Serra Geral (CPRM, 2006) e se manifesta-se de maneira descontínua por meio de derrames básicos à intermediários do tipo "*pahoehoe*", que são derrames de lava fluida e que solidifica formando uma estrutura que se enrola a semelhança de um rolo de corda. Em exposições geológicas, podem ser encontrados, basaltos e andesitos, essas rochas exibem uma tonalidade cinza-escuro, frequentemente sujeitas a alterações que conferem uma coloração marrom-avermelhada. A presença de zonas vesiculares é notável, caracterizadas por vesículas centimétricas preenchidas predominantemente por quartzo, zeolita e carbonatos. Nas condições do maciço, frequentemente ocorrem disjunções esferoidais, bem como disjunções horizontais e colunares à depender da posição do derrame. Peperitos na base e diques de arenito também podem observadas, devido a interação do vulcanismo com as rochas sedimentares da Formação Botucatu.

A Formação Botucatu é constituída por arenitos provenientes de areias quartzosas finas e com grânulos bem classificados. Sua formação é proveniente de relevo pouco acidentado formado principalmente por rochas cristalinas e sedimentares preexistentes. Seu transporte e deposição ocorreram de forma lenta e em clima semiárido ou árido. Sua constituição é formada por arenitos de granulação fina a média, de coloração vermelha, rósea ou amarelo-clara, bem selecionados e maduros, apenas localmente feldspáticos. Como estrutura característica desses arenitos, ocorre estratificação cruzada tangencial de grande porte, cuja origem indica deposição desértica. No Rio Grande do Sul, a Formação Botucatu tem espessuras bastante variadas, desde espessuras de poucos metros na região central até cerca de 100 metros nas regiões periféricas (Scherer, 2000). O deserto Botucatu foi, em grande parte, coberto pelo magmatismo da Formação Serra Geral com grandes espessuras, gerando falhas e dobramentos bem como presença de diques e soleiras e presença de *intertraps* (camadas de arenito encontradas intercaladas com derrames de basalto).

2.2 Visita de Campo

A área rompida apresenta largura de aproximadamente 15 a 20m, enquanto que a extensão é da ordem de 150m, terminando no nível da BR-116. A Figura 1 (a) apresenta uma vista geral da área e (b) um croqui transversal. A ruptura ocorreu em solo residual de arenito no contato com a rocha, sendo que na porção superior do talude junto a crista da escarpa da mobilização, o talude possui ~1,50m de altura aproximadamente vertical, sendo este material com potencial risco de queda. Ao longo da área mobilizada a rocha está exposta com pouco material solto depositado junto a face rochosa. Na sequência ocorre o abatimento da inclinação para

aproximadamente 35° , ainda com a exposição de rocha. Neste trecho foi observado a deposição de solo e blocos sobre a superfície rochosa.

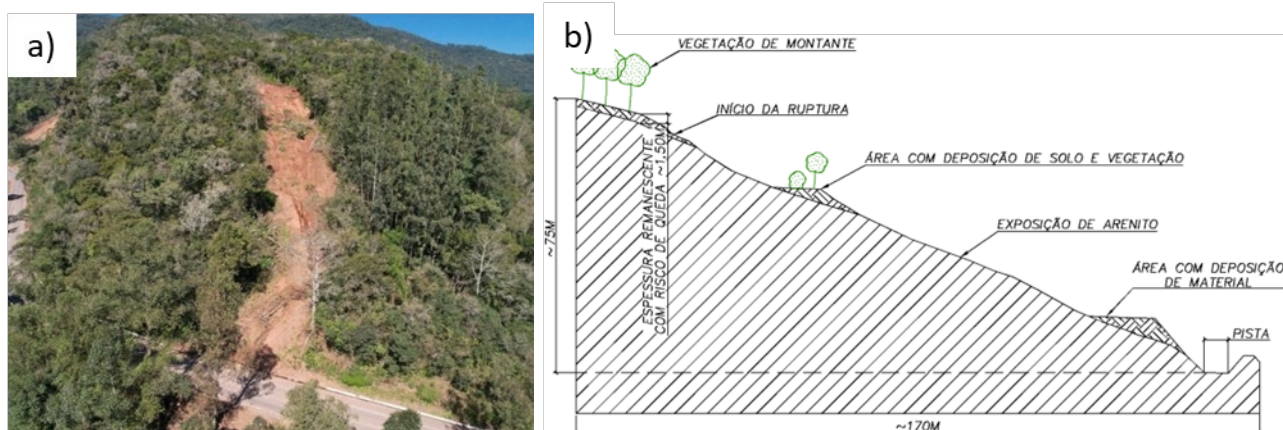


Figura 1: a) Vista geral da área mobilizada e b) croqui transversal do talude.

Conforme supracitado, o perfil observado do solo é composto por um embasamento de rocha sedimentar (arenito), precedido por uma camada de transição rocha alterada/solo residual, e, superficialmente, solo com características orgânicas, com coloração mais escuras e presença de vegetação (de espessura centimétrica). De forma geral, é observado que a camada de material caracterizado como solo (residual ou superficial) possui espessura da ordem de 2,0m (condição mais crítica utilizada nas análises). A Figura 2 apresenta locais com presença de solo e superfície do arenito exposta pela ruptura.



Figura 2: Locais com presença de solo e rocha e locais com surgência de água.

Durante a inspeção foi verificado que alguns pontos do contato solo rocha apresentavam surgimento de água na face do talude. Este surgimento pode estar associado à diferença de condutividade hidráulica entre a camada de solo residual e a camada de arenito.

2.2 Plano de Investigação

O plano de investigação geotécnica para o local previa a retirada de uma amostra de solo indeformada (solo residual) para a execução de ensaios de laboratório (caracterização básica e ensaios de resistência), além da execução de 3 sondagens mistas para reconhecimento do terreno (Figura 3), sendo que, por questões de dificuldade de acesso com equipamento, não foi possível realizar a sondagem SM-01.

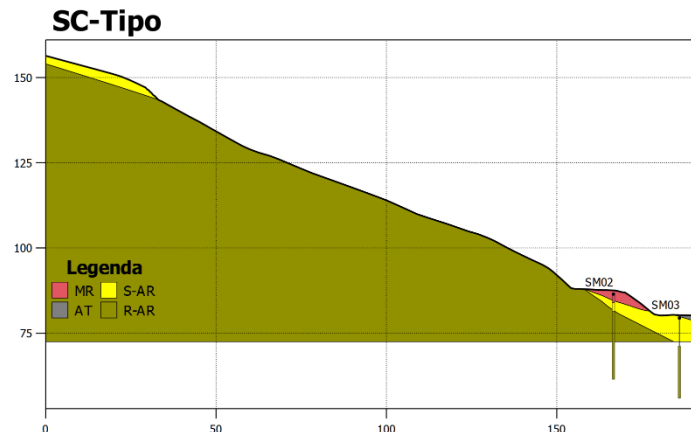


Figura 3: Na esquerda, plano de investigação previsto para a área. Na direita, seção tipo elaborada com base nos resultados obtidos.

2.2.1 Principais Resultados dos Ensaios de Laboratório

Quanto a caracterização Geotécnica do residual presente ao longo da região da crista da ruptura, material alvo deste estudo, apresenta granulometria predominantemente arenosa (83,5%, sendo destes 60,5% de areia fina, 22,9% areia média e 0,1% areia grossa), com cerca de 7,4% de argila e 9,1% de silte, não apresentando pedregulhos. Quanto aos limites de Atterberg, ambos os ensaios resultaram em “não líquido” e “não plástico”, o que é justificado pela expressiva fração de areia presente na amostra. O teor de umidade médio da amostra retirada de campo é de aproximadamente 12%. A massa específica dos grãos obtida é de 2,69 g/cm³. O peso específico natural obtido foi de 18 kN/m³.

Para a amostra indeformada foi realizada uma campanha de ensaios de cisalhamento direto inundados e drenados para a obtenção da envoltória de resistência (tensões normais de 50kPa, 100kPa, 200kPa e 400kPa). As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (com e sem correção da área) e as curvas do deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal estão apresentadas na Figura 4. Foram avaliadas as envoltórias de resistência para tensões cisalhantes de pico, deslocamento horizontal de 1 mm e 3mm, abrangendo o comportamento mecânico para deformações horizontais distintas. A partir disto foi realizada a média dos parâmetros de resistência obtidos, sendo eles: $c' = 8$ kPa (intercepto coesivo efetivo) e $\phi' = 27^\circ$ (ângulo de atrito interno efetivo).

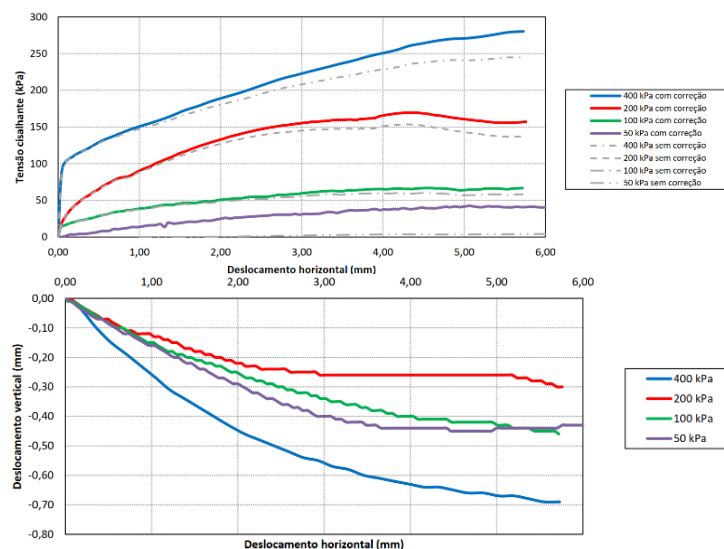


Figura 4: Comportamento mecânico do solo residual de arenito.

2.2.2 Principais Resultados dos Ensaios de Campo

Para este ponto estava prevista a execução de 3 sondagens mistas no talude, sendo duas na região do pé e uma na região da crista, entretanto, durante a fase executiva foram feitas somente as duas devido a condições de acesso de equipamentos. De forma geral, a sondagem SM 02 indicou a presença de solo de aterro e blocos de rocha até a profundidade de 5,0m (material depositado e camada de arenito com baixa recuperação). Após essa profundidade foi observado a presença de arenito, rocha sã com maior recuperação. Na SM 03, foi observado a presença de rocha basáltica nos primeiros metros, até aproximadamente 8,0m de profundidade, este material faz parte de um dique que foi observado no corte da rodovia. O dique tem extensão de no máximo 5,0m e não reaparece no restante do corte. A presença de arenito ficou abaixo da profundidade de 8,0m. Não foi observado nível d'água nas sondagens realizadas.

2.3 Modelo Geotécnico

A partir do cruzamento entre as informações de mapeamento geológico de superfície e dados disponibilizados quanto a topografia e sondagens, foi elaborado o modelo geotécnico do local com a utilização do software *Leapfrog*. O modelo elaborado e a posição da seção geotécnica para o eixo da ruptura, estão representadas na Figura 5 e exibem camada de arenito e o solo residual/alteração. De maneira a simplificar o modelo, não foi adicionado o dique de basalto entre o corpo do arenito, observado nas sondagens. Isto se justifica, pois além da estrutura ser pontual, de pequena largura, embora possa ter uma participação importante na dinâmica da água subterrânea no trecho, não altera a cinemática de movimentação do fluxo de detritos a ser contido pela estrutura de contenção projetada, onde os materiais importantes são a camada de solo residual de arenito, material depositado e leito rochoso de arenito.

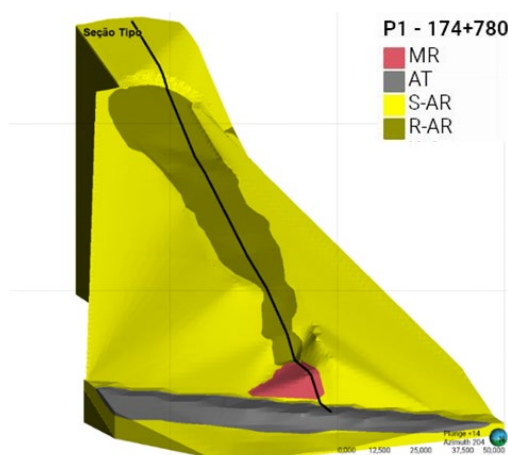


Figura 5: Modelo geotécnico elaborado.

3 DIAGNÓSTICO DO MOVIMENTO

Pelas observações de campo do evento ocorrido, o gatilho da movimentação de massa foi a saturação do terreno induzindo uma ruptura planar que por consequência da supersaturação gerou neste caso a ocorrência de fluxo, ou uma corrida de detritos (solo, rocha e vegetação). A Figura 6 apresenta um esquema típico de uma corrida de detritos. Neste estudo específico, o trecho de erosão e tranposte possui ~130m, o desnível entre a zona de iniciação e deposição é de ~55m, e a bacia de contribuição é de ~10.000m². Embora as dimensões sejam relativamente pequenas para um evento de corrida detrítica, o volume de material transportado no evento já ocasionou o bloqueio da rodovia e a suscetibilidade frente a novos eventos é alta visto as condições geotécnicas do talude remanescente. Deste modo, a solução do problema leva a dois caminhos distintos: a estabilização do talude com estruturas de contenção (com foco em combater rupturas planares) ou a proteção da rodovia frente a novos eventos (foco na retenção de material proveniente destas rupturas).

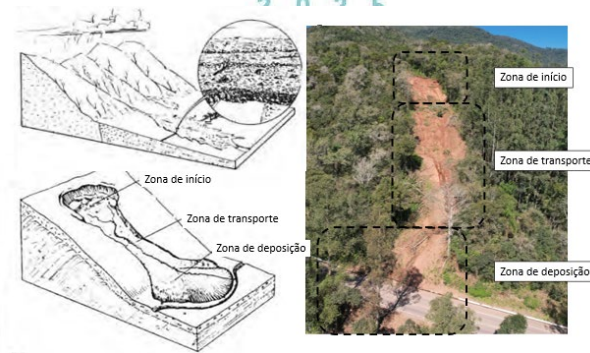


Figura 6: Representação esquemática de uma corrida de detritos (adaptado de: Cruden & Varnes, 1996).

3.1 Retroanálise

A partir do diagnóstico, seguindo o conceito de solução de proteção da rodovia, foi realizada a simulação da movimentação de massa ocorrida no talude. Esta foi realizada utilizando o modelo de Vollmy-Salm (Salm et al 1990, apud Salm 1993) a partir do *software* RAMMS (*Rapid Mass Movements Simulation*) tendo como objetivo retroanalisar o evento ocorrido na ótica de corrida detrítica. De posse dos dados de entrada, é possível estimar as velocidades de fluxo, altura e pressão em determinados pontos do terreno. Essas informações são utilizadas para melhor entendimento do evento ocorrido, permitindo avaliar a melhor forma de conter eventos futuros de mesma característica.

Para realização da simulação são necessárias informações do terreno a partir de um modelo digital (MDT), sendo para isso utilizado o levantamento topográfico realizado. Além disso, é necessário ter o conhecimento do volume de massa rompida, da zona fonte e dos parâmetros de atrito interno do fluxo e peso específico do material. Como zona fonte foi definida a região próxima à crista da ruptura observada em campo e imagens aéreas, considerada como local de início do evento ocorrido (provável ruptura planar). Este local possui alta declividade e transição entre solo e rocha em pequenas profundidades. Na análise inicial foram simulados cerca de 412m³ de material, sendo este volume estimado, reconstituindo-se a geometria do terreno.

Já para os parâmetros de atrito interno, inicialmente foram considerados os valores de μ igual à 0,20 e ξ igual à 300 m/s². Estes parâmetros representam o comportamento do fluxo, a interação do fluxo com o terreno e a interação interna das partículas, respectivamente. Como peso específico do material utilizou-se inicialmente o valor médio de referência de 18kN/m³. Os parâmetros utilizados foram balizados pela experiência dos autores em simulações de fluxo de detritos e referências bibliográficas pertinentes, tais como: Simoni & Graf (2012).

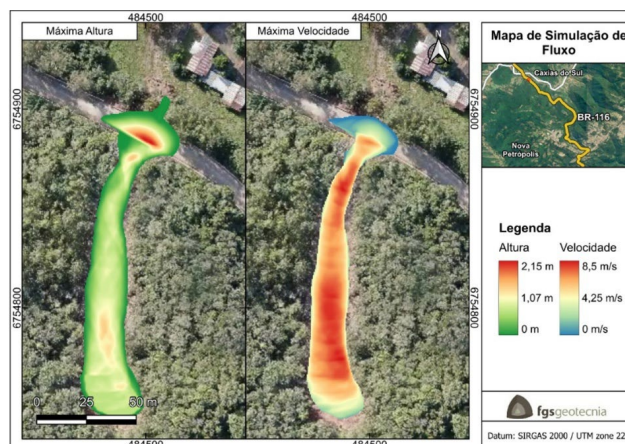


Figura 7: Resultado da simulação de fluxo.

4 SOLUÇÃO DE PROTEÇÃO

Seguindo o conceito de solução de proteção da rodovia foram dimensionadas estruturas rígidas e flexíveis como alternativas para amortecer o impacto de um possível novo evento, sendo estas soluções

2 0 2 5

posicionadas ao longo de toda a região do pé do talude com o intuito de conter o material mobilizado, bem como, evitar que grandes volumes de material venham a atingir a rodovia. Destaca-se que este tipo de solução não é de estabilização do talude, mas sim de convivência e mitigação de possíveis danos ao sistema rodoviário.

Com a definição da posição da barreira de proteção, passou-se para a verificação geométrica da estrutura para que esta seja capaz de conter possíveis fluxos semelhantes ao ocorrido. Para isso, foram executadas simulações de fluxo novamente com a utilização do *software* RAMMS. Para as simulações foram utilizados os parâmetros anteriormente definidos na retroanálise. O volume de material rompido foi considerado semelhante ao evento ocorrido, tendo sido utilizado 410 m³ de material. Com a utilização da barreira de proteção com altura de 3,50m acima do nível do terreno na posição anteriormente apresentada, é possível conter todo o volume de material mobilizado, conforme mostra a Figura 8 abaixo, resultado da simulação de fluxo. Destaca-se ainda que, com base nesta configuração geométrica, a estrutura de proteção reteve o volume aproximado de 457m³ de material, conforme resultado da simulação de fluxo.

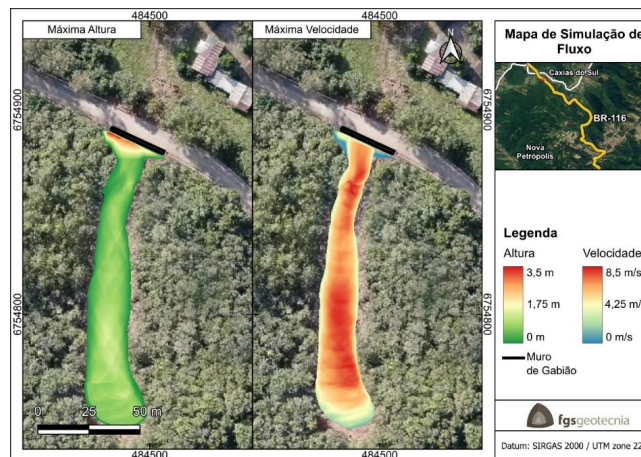


Figura 8: Resultado da simulação de fluxo com estrutura de proteção.

Para o correto dimensionamento da barreira flexível é necessário o emprego de uma metodologia que permita determinar o carregamento na estrutura. Para tanto, foi empregada a metodologia desenvolvida por Wendeler (2016). O desenvolvimento da metodologia apoiou-se em ensaios de campo (em verdadeira grandeza), ensaios de laboratório (em escala) e modelagem numérica.

Quando uma estrutura é impactada por uma massa em movimento, o esforço é dependente de duas parcelas, segundo Wendeler (2016): Parcela estática e Parcela dinâmica. Conforme pode ser visualizado na equação abaixo, enquanto a primeira parcela depende fundamentalmente da altura da onda e do peso específico da massa, a segunda parcela, além de também depender do peso específico da massa, é diretamente proporcional com o quadrado da velocidade de impacto e o coeficiente de fluxo/material que deve ser determinado experimentalmente em ensaios de escala real. Importante ressaltar que o modelo foi concebido para barreiras flexíveis, e o parâmetro de coeficiente de impacto deve ser determinado com base em ensaios em escala real, pois depende tanto da natureza do fluxo (corrida) como das propriedades de amortecimento da estrutura de proteção. Para fluxos de lama e barreiras flexíveis Wendeler mediu o coeficiente de 0,7. Para estruturas semirígidas não há registro publicado na literatura que corrobore a adoção de valores para este coeficiente. Algumas normas internacionais indicam valores para coeficientes de amplificação em estruturas rígidas, variando de 2,0 a 6,0 tipicamente. Neste projeto foi realizado o estudo de barreira flexível e semirígida, e os parâmetros adotados são apresentados abaixo:

$$P = \frac{1}{2} \gamma \cdot (h + \Delta h) + C_w \cdot V^2 \cdot \rho \quad (1)$$

Onde:

γ – peso específico da massa mobilizada – 18 kN/m³;

h – altura da onda (adotado como nula);

Δh – altura galgamento (obtida pela análise de fluxo, adotado como 1,50 para a parcela dinâmica e 3,50 para a parcela estática);



C_w – coeficiente 1,0 para barreira flexível e 3,0 para barreira rígida;
 v – velocidade do fluxo (obtida pela análise de fluxo, adotado como 6,5 m/s);
 ρ – densidade (ton/m³) – adotado 1,8ton/m³.

De posse da formulação apresentada, é possível passar à verificação dos esforços atuantes sobre a estrutura de proteção. Para tanto, é preciso determinar o esforço ao longo de sua altura, considerando impacto de ondas de fluxo com a velocidade e altura de cálculo através do diagrama de pressões (estáticas e dinâmicas) oriundos do fluxo. As simulações resultaram em pressões de impacto máximas de 146 kPa considerando barreiras flexíveis e de 260 kPa considerando barreiras semirrígidas.

Com estes resultados foi possível dimensionar a estrutura de proteção, podendo ela ser rígida ou semirrígida (muros de concreto e gabião ancorados) ou flexível (barreiras dinâmicas com redes de anéis e cabos de aço), desde que a estrutura suporte as tensões calculadas da parcela estática e dinâmica provenientes do fluxo. Para o estudo de alternativas elaborado foram propostas duas soluções: (i) barreira flexível contra escorregamentos superficiais para pressão de impacto de até 150kPa e (ii) muro de gabião associado a estrutura de concreto armado ancorada no terreno por grampos verticais e horizontais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo trata do estudo de um movimento de massa do tipo planar com posterior ocorrência de fluxo ocorrido em um talude as margens da BR-116, próximo ao município de Nova Petrópolis/RS. O diagnóstico envolveu a vistoria de campo, caracterização dos mecanismos envolvidos no processo, investigação de campo e laboratório.

O presente trabalho apresentou a retroanálise do fluxo/corrida originado a partir deste deslizamento, cujos parâmetros balizados foram empregados para as simulações que definiram as solicitações a serem suportadas pelas estruturas de proteção projetadas. Na fase de estudo de alternativas foram estudadas estruturas de proteção flexíveis e semirrígidas para mitigação dos riscos.

Portanto, frente aos eventos de chuvas intensas ocorridas em maio de 2024 no Rio Grande do Sul são necessárias soluções geotécnicas para os taludes e encostas que afetam diretamente as rodovias, principalmente na região da serra gaúcha, onde as soluções de proteção quando cabíveis se mostram tecnicamente e financeiramente viáveis frente a soluções mais onerosas de estabilização de taludes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a toda a equipe da FGS Geotecnia e LCM Construções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. *Relatório de atividades de mapeamento de áreas de risco*. Brasília: CPRM, 2006.
- Cruden, D.M.; Varnes, D.J. 1996. Landslide types and processes. In: Turner, A.K.; Schuster, R.L. (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., pp. 36–75.
- Scherer, C. M. S. *Evolução de sistemas eólicos na Bacia do Paraná durante o Mesozóico: o arenito Botucatu*. Porto Alegre: UFRGS, 2000. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.
- Salm, B. (1993) Flow, Flow Transition and Runout Distances of Flowing Avalanches. *Annals of Glaciology*, Vol.18 1993.
- Simoni, A.; GRAF, C. Performance of 2D debris flow simulation model RAMMS. *Geophysical Research Abstracts*, v. 14, EGU2012-7390, 2012.
- Wendeler, C. Projeto de pesquisa desenvolvido no WSL (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft – Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research) e na ETHZ (Swiss Federal Institute of Technology). 2016.