

Aplicação da Técnica de Solo Grampeado para Estabilização de um Talude após um Evento de Ruptura

Jordana Furman

Engenheira Geotécnica, Head5 Engenharia, Curitiba, Brasil, jordana.furman@head5.com.br

Lucas Ghion Zorzan

Engenheiro Geotécnico, Head5 Engenharia, Curitiba, Brasil, lucas.zorzan@head5.com.br

Paulo Cezar da Silva Junior

Geólogo, Head5 Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, paulo.cezar@head5.com.br

Marcelo Rossi Campos

Engenheiro Civil, Head5 Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, marcelo.rossi@head5.com.br

RESUMO: Movimentos de massa em encostas de grandes inclinações são fenômenos frequentes, cuja importância do ponto de vista da engenharia é maior quando próximos a obras de infraestrutura significativas. Esse fenômeno pode ser desencadeado por fatores decisivos que intensificam a instabilidade de uma encosta, como escavações no terreno natural existente, que podem desestabilizar a massa de solo, eventos pluviométricos ou características hidrogeológicas particulares das massas. Este artigo apresenta o estudo de estabilização geotécnica de uma encosta localizada em uma região de inclinação acentuada, com mais de 200 m de altura, onde está instalado o circuito de alta pressão de uma Usina Hidrelétrica Brasileira. Esta é uma encosta geotecnicamente complexa, com a presença de três formações geológicas distintas típicas das encostas no estado do Paraná: a Formação Serra Geral, a Formação Botucatu e a Formação Pirambóia. Os projetos de estabilização foram desenvolvidos com o objetivo de minimizar impactos na operação do empreendimento, garantindo a segurança necessária durante sua vida útil. A técnica de estabilização adotada envolveu o uso de uma solução mista para contenção da encosta após os cortes necessários para a construção de estruturas associadas à Usina. A solução mista para estabilização de encostas consistiu no uso da técnica de solo grampeado associada a muro de gabião, que proporcionou o atendimento dos critérios de segurança estabelecidos. Este é um estudo de estabilização desafiador do ponto de vista geotécnico, realizado em uma encosta cuja segurança possui significativa importância técnico-econômica. Além dos aspectos teóricos que guiaram o desenvolvimento do projeto, são apresentados aspectos práticos relacionados à execução de obras em encostas íngremes, bem como as técnicas de controle tecnológico, especialmente no que diz respeito aos testes de arrancamento. Dado que o solo grampeado foi realizado em material predominantemente arenoso, com textura variada e às vezes encontrado em estado altamente friável, a definição de tensões de arrancamento desempenhou um papel único no projeto da solução. Para alcançar o objetivo do estudo proposto, foi necessário avaliar o levantamento topográfico da área de estudo, antes e depois do movimento de massa, o que permitiu retroanálises bastante assertivas da cinemática do movimento observado em campo.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Encostas, Contenções, Ensaio de Arrancamento.

ABSTRACT: Mass movements on steep slopes are frequent phenomena, whose engineering significance is greater when they occur near significant infrastructure projects. This phenomenon can be triggered by decisive factors that intensify the slope instability, such as excavations in the existing natural terrain, which can destabilize the soil mass, rainfall events, or specific hydrogeological characteristics of the masses. This article presents a study on the geotechnical stabilization of a slope located in a region with steep inclinations, over 200 meters high, where the high-pressure circuit of a Brazilian Hydroelectric Plant is installed. This is a geotechnically complex slope, with the presence of three distinct geological formations typical of slopes in the state of Paraná: the Serra Geral Formation, the Botucatu Formation, and the Pirambóia Formation. Stabilization projects were developed with the aim of minimizing impacts on the operation of the project, ensuring the necessary safety during its lifespan. The stabilization technique adopted involved the use of a mixed solution

for slope containment after the necessary cuts for the construction of structures associated with the plant. The mixed solution for slope stabilization consisted of using the soil nailing technique associated with gabion wall, which met the established safety criteria. This is a challenging geotechnical stabilization study, conducted on a slope whose safety is of significant technical and economic importance. In addition to the theoretical aspects that guided the project's development, practical aspects related to the execution of works on steep slopes are presented, as well as technological control techniques, especially regarding pull-out tests. Since the soil nailing was performed on predominantly sandy material, with varied texture and sometimes found in a highly friable state, the definition of pull-out stresses played a unique role in the solution design. To achieve the goal of the proposed study, it was necessary to evaluate the topographic survey of the study area, before and after the mass movement, which allowed for quite assertive retro-analyses of the kinematics of the observed movement in the field.

KEYWORDS: Slope Stability, Retaining Structures, Soil Nail, Back Analysis

1 INTRODUÇÃO

Taludes naturais têm sua estabilidade condicionada por diversos fatores: os parâmetros de resistência dos litotipos constituintes, fatores hidrogeológicos relacionados às condições de fluxo, influência da pluviometria e ações humanas, tais como obras de engenharia. As condições geométricas são, de forma geral, desfavoráveis, se tratando de taludes com condições de segurança muito próximas do equilíbrio limite.

Como apresentado por Gerscovich (2016), os taludes naturais são sempre sujeitos a problemas de instabilidade uma vez que as forças gravitacionais contribuem naturalmente para a deflagração de movimentos de massa. É comum observar ocorrência de instabilidades em taludes que se mantiveram estáveis por muitos anos, sendo os fatores que alteraram o estado de tensões na massa foco de estudos específicos há muito tempo, em especial nas regiões de solos tropicais no Brasil. As consequências associadas às rupturas variam a depender de sua localização, sendo maiores quando localizados próximos a regiões de ocupação humana ou implantação de importantes obras de infraestrutura.

Lu e Godt (2013) separam as condicionantes de estabilidade de encostas em “causas” e “gatilhos”. Dentre as causas, pode-se citar fatores morfológicos, geológicos ou topográficos, por exemplo, os quais tornam o local susceptível a um determinado evento. Dentre os gatilhos, cita-se fatores como alterações geométricas, alterações nos regimes de fluxo ou solicitações não previstas. A maior diferença entre as duas categorias se encontra na escala de tempo em que os processos ocorrem, sendo que os gatilhos são, em alguns casos, impossíveis de precisar. Em outros casos, é possível estabelecer hipóteses razoáveis para o fenômeno. Interessante exemplo é apresentado por Gerscovich et al. (1997), os quais avaliaram numericamente o regime de fluxo associado à uma instabilidade ocorrida na cidade do Rio de Janeiro em novembro de 1988 após intensos eventos pluviométricos, levando em consideração, inclusive, a possibilidade de avanço de frentes de saturação provenientes das fraturas do maciço rochoso.

Este artigo apresenta o estudo de caso de uma instabilidade observada em uma encosta de elevada declividade, com foco para a descrição do mecanismo detectado e a solução para estabilização.

2 ÁREA DE ESTUDO E DESCRIÇÃO DO EVENTO DE RUPTURA

A região de estudo faz parte do empreendimento de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) localizada na região central do estado do Paraná. A região da PCH tem topografia bastante acidentada e com taludes íngremes.

O talude foco desse estudo está localizado na direita hidráulica do Conduto Forçado da PCH. Devido a alterações na metodologia construtiva do Conduto Forçado, a qual passou a utilizar guindaste, foi necessário disponibilizar áreas para patolagem dos equipamentos. Esta necessidade demandou a definição de local e conformação de uma área específica para realização a operação, de modo a permitir a formação de um platô para o posicionamento do equipamento.

Como a etapa para execução do platô e patolagem do equipamento era provisória e necessitava de agilidade para o atendimento ao cronograma da obra, foi definida uma solução de terraplenagem, ou seja, um retaludamento e a execução de um aterro para permitir o posicionamento do guindaste.

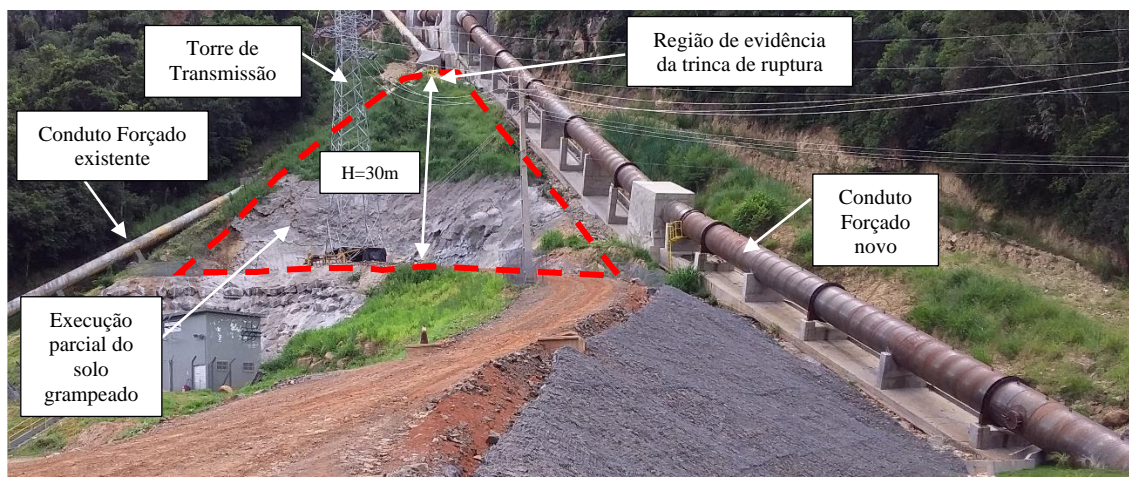
Após a finalização dos trabalhos de içamento das estruturas do Conduto Forçado e desmobilização do equipamento, foi elaborado o projeto executivo para estabilização do talude de escavação executado no local. O projeto inicial de estabilização previa a execução do solo grampeado na região inferior do talude, apenas na região em que havia sido realizada a escavação para execução do platô para patolagem do guindaste.

Com o início dos trabalhos de execução dos tratamentos, foram observadas algumas anomalias na região do talude da direita hidráulica do Conduto Forçado. Observou-se o aparecimento de trincas na região superior do talude de corte, manifestada por um abatimento de aproximadamente 50 cm na crista do talude, evidenciando a ruptura do talude. Frente a esse evento, os trabalhos de execução dos tratamentos foram paralisados e o projeto para estabilização do talude precisou ser reavaliado, conforme será apresentado ao longo deste trabalho.

Previamente ao evento de ruptura, haviam sido executados alguns chumbadores dos 160 previstos no Projeto Executivo, o qual previa a execução de solo grampeado. Também havia sido executada a primeira camada de concreto projetado, contudo a mesma apresentou-se seriamente comprometida em função da trinca/mobilização ocorrida na região da crista do talude. Dado o grau de comprometimento, os tratamentos executados foram desconsiderados no projeto de estabilização da encosta.

Após o evento de ruptura e a reavaliação das análises de estabilidade, constatou-se a necessidade de ampliar a região de tratamentos, conforme região destaca em vermelho na Figura 1.

Destaca-se que o talude em questão apresenta uma inclinação acentuada e muitas interferências que limitavam as soluções para estabilização do ponto de vista executivo. Observa-se, por exemplo, na Figura 1 que no platô foi executada uma torre de transmissão muito próxima ao pé do talude escavado. Soluções de retaludamento se mostraram inviáveis, uma vez que a região afetada está delimitada pelas estruturas dos condutos forçados e situada em uma encosta de elevada declividade.



3 GEOLOGIA LOCAL

A PCH está localizada na porção Centro-Oeste do Paraná cuja a área é marcada pela presença de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e rochas sedimentares do Grupo São Bento, além das coberturas recentes. A área alvo deste artigo permite a fácil visualização dos contatos litológicos entre essas unidades ao longo do acesso a Casa de Força da PCH.

Da base para o topo, tem-se as Formações Pirambóia e Botucatu (Grupo São Bento), sotopostas pela Formação Serra Geral e por coberturas cenozóicas recentes. A Formação Pirambóia contém arenitos esbranquiçados, amarelados ou avermelhados, de granulação fina a média, mal selecionados e com intercalações de material silto-argiloso, com estratificações cruzadas. A Formação Botucatu é constituída de arenitos rosados e avermelhados, de granulação predominantemente fina, com grãos bem selecionados e arredondados, com estratificações cruzadas plano-paralelas e acanaladas. O contato desta unidade com os derrames basálticos é gradual, com intercalações de arenito intertrapiano que exibem feições de metamorfismo de contato.

A Formação Serra Geral é representada por derrames basálticos que afloram em toda região centro-oeste do Estado do Paraná, no chamado Terceiro Planalto Paranaense, exceto o extremo noroeste do Estado. Os basaltos são rochas de composição básica (baixo teor de sílica) que, nas variedades maciças, apresentam coloração cinza escura a preta. Por fim, tem-se as coberturas cenozóicas recentes, constituídas por materiais soltos, tais como blocos de rocha e sedimentos, recobrendo boa parte das encostas e das margens e leito do rio. Ao sopé das escarpas há grande quantidade de blocos de rocha (predominantemente de basalto) em meio ao solo, possivelmente um depósito de tálus. Estes depósitos recobrem os arenitos nas cotas inferiores, junto ao leito do curso de água principal, e chegam a espessuras de 5,00 m.

O arenito friável da Formação Pirambóia ocorre por toda a área da Casa de Força e Canal de Fuga da PCH, cujo contato com a formação sobreposta se dá por volta da elevação 637,00 m. O arenito intemperizado apresenta granulometria de areia muito fina, matriz siltosa, cor branco acinzentada, sendo maciça. A rocha é facilmente escavável com a concha da escavadeira, mas apresenta uma coesão aparente. Em amostra de mão, a rocha não se esfarela facilmente à pressão dos dedos. A Figura 2–a apresenta a vista geral da área da Casa de Força da PCH, durante as escavações obrigatórias no local, com destaque ao paredão de afloramentos areníticos do Grupo São Bento e rochas vulcânicas da Formação Serra Geral em elevações superiores, recobertas pela vegetação. Na Figura 2–b, esse limite de contato é facilmente notado na estrada de acesso à casa de força. O traço vermelho ilustra o contato geológico aproximado, da base para o topo, entre os arenitos do Grupo São Bento e os basaltos da Formação Serra Geral.

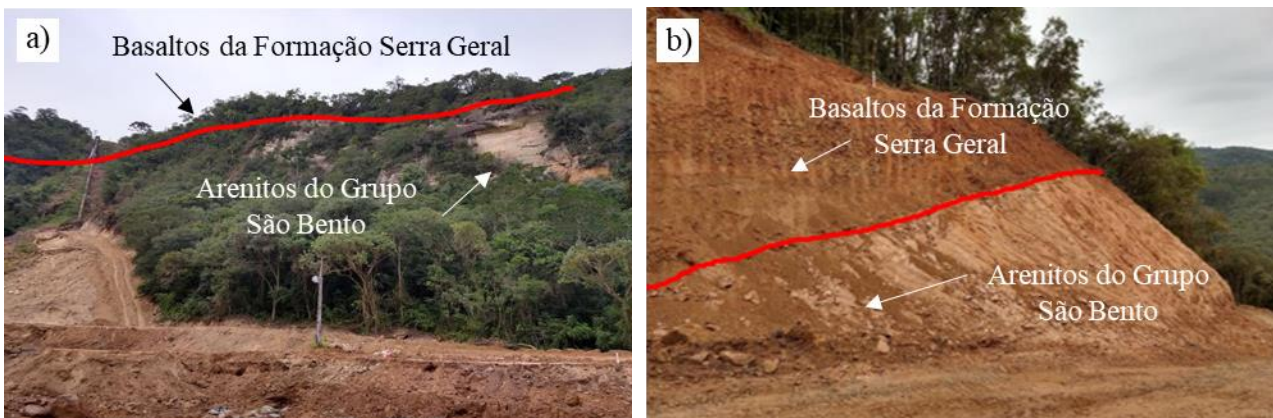


Figura 2. (a) Vista geral da área da Casa de Força/Conduto Forçado da PCH, durante as escavações obrigatórias no local. (b) Detalhe do contato entre Formação Serra Geral (basaltos, acima) e Grupo São Bento (arenitos, abaixo), na estrada de acesso à Casa de Força.

4 CONDIÇÕES TOPOGRÁFICAS

Para elaboração do Projeto Executivo inicial, contendo as soluções de engenharia para estabilização do talude, foi utilizado o levantamento primitivo de 2021, com a atualização do levantamento topográfico realizado ao final do ano de 2022. Após o início dos trabalhos de execução dos tratamentos (ano de 2023) e a deflagração do evento de ruptura, foi realizado novamente o levantamento topográfico da região de estudo, abrangendo também a parte superior do talude de corte. Para comparação entre os levantamentos topográficos, a Figura 3 apresenta a seção transversal típica utilizada para as análises efetuadas neste documento.

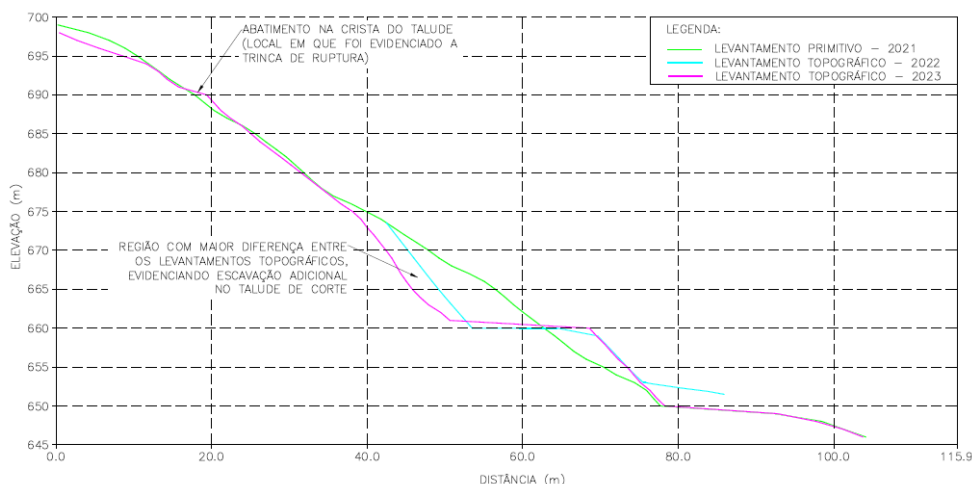


Figura 3. Comparativo entre levantamentos topográficos na região de estudo.

Observou-se em campo que houveram alterações da geometria do talude durante o período de obras, com escavação adicional principalmente na região próxima do pé do talude de corte, o que foi corroborado pelo comparativo entre os levantamentos topográficos. Esta situação pode ter sido um dos gatilhos para o evento de ruptura, uma vez que a remoção de massa no pé do talude é desfavorável para a estabilidade global da encosta. Adicionalmente, à época da ruptura ocorreram intensas chuvas no local, conforme observações realizadas em campo, uma vez que não foram realizados registros da intensidade da chuva devido à ausência de pluviógrafos na região de estudo. A ocorrência de chuvas intensas pode levar à perda de sucção do solo e significativa redução da coesão aparente, podendo conduzir à instabilização. A hipótese de que estes dois mecanismos atuaram no evento foi considerada nos estudos, embora as análises de estabilidade indiquem que as alterações geométricas tiveram forte impacto nos fatores de segurança.

5 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Por se tratar de uma região de difícil acesso, não foram realizadas sondagens a percussão e coleta de amostras indeformadas para realização de ensaios de laboratório na região da encosta alvo do estudo. Desse modo, os parâmetros geomecânicos adotados nas análises de estabilidade foram definidos a partir de estimativas empíricas. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais que compõem a estratigrafia do talude e que foram utilizados nas análises de estabilidade. Na região do talude observa-se a presença de uma camada superficial de material coluvionar sotopostas às camadas de arenito friável de resistência muito baixa (R0) a baixa (R1). Na região inferior do talude, foi utilizado para execução do platô um material composto por blocos de diâmetros variados denominado de random. Na Tabela 1 também se apresentam os parâmetros adotados para os materiais a serem utilizados na obra de estabilização (aterro compactado e muro de gabião)

Tabela 1. Parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados.

Material	Descrição	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
CO	Colúvio	16	5	32
AR-R0	Arenito com resistência muito baixa (R0) e friável	16	10	32
AR-R1	Arenito com resistência baixa (R1) e friável	23	50	35
RANDOM	Material composto por blocos de grandes diâmetros, utilizado no aterro para patolagem do guindaste	20	0	38
AT	Aterro compactado utilizado na estabilização do talude	17	12	28
GABIÃO	Material do muro de gabião	24	93	54

6 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DOS CHUMBADORES

O ensaio de arrancamento é realizado para definição do parâmetro de adesão na interface solo-chumbador (q_s). O ensaio consiste na execução de um chumbador na face do talude, e posterior aplicação de esforço de tração até que se atinja a capacidade última de carregamento do mesmo. Com base na medição deste esforço, encontra-se o valor real de q_s , para as condições impostas em campo.

A Equação 1, apresentada por Bustamante e Doix (1985), relaciona q_s com a capacidade última de carga obtida através de ensaios de arrancamento, levando em conta a dimensão do contato solo *versus* nata de cimento da bainha do chumbador:

$$q_s = \frac{T_{arranc}}{\pi d L_{anc}} \quad (1)$$

Sendo:

q_s - resistência de cisalhamento na interface solo-grampo (kPa);

T_{arranc} - carga última de arrancamento aferida no ensaio de campo (kN);

d - diâmetro da perfuração (m);

L_{anc} - comprimento do trecho ancorado do grampo (m).

Para a determinação do parâmetro q_s utilizado em projeto, foram realizados 8 ensaios de arrancamento em chumbadores de teste em regiões representativas do talude em estudo. Os ensaios foram realizados em material predominantemente arenoso, predominante na encosta em questão, tratando-se de um arenito altamente friável, com características geotécnicas de solo residual. Em função desta característica, especial atenção se deu para a definição do parâmetro de adesão da nata ao substrato do terreno natural uma vez que este parâmetro é essencial para o sucesso ou não de soluções com ancoragem (solo grampeado ou tirantes). Os ensaios de arrancamento foram realizados após a fase de reinjeção, executada em comprimento ancorado de 8 m. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de arrancamento, sendo que o carregamento máximo encontrado para o arrancamento foi então utilizado para determinação de q_s .

Tabela 2. Resultados dos ensaios de arrancamento.

Ensaio	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08
Carga de Ruptura (kN)	104,6	79,2	170,0	96,0	74,9	76,2	129,5	88,5
Adesão na interface solo-chumbador (kPa)	55	42	90	51	40	40	69	47

Os ensaios indicaram valores de adesão solo-chumbador entre 40 e 90 kN/m², com valor médio de 54 kN/m². Adotou-se para a adesão solo-chumbador o valor mínimo encontrado de 40 kN/m². Este valor é consideravelmente alto para materiais terrosos, sendo que esta determinação experimental do parâmetro q_s condicionou a tomada de decisão pela continuidade em soluções de estabilização envolvendo ancoragens.

7 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

As análises de estabilidade foram desenvolvidas a partir do *software Slide 8.0* da *Rocscience Inc.*, Toronto - Canadá. As análises de estabilidade foram realizadas utilizando-se o método de Spencer, que considera a atuação das forças normais e cisalhantes entre fatias e calcula o fator de segurança pela teoria do equilíbrio-limite, realizando o equilíbrio das forças e momentos atuantes.

A análise inicial realizada neste trabalho tomou como base as condições geométricas do talude, representada pela seção crítica (Figura 3), e os parâmetros geotécnicos dos materiais apresentados na Tabela 1 e que compõem a estratigrafia do talude e a superfície de ruptura. As análises foram realizadas sem a presença do lençol freático, uma vez que não foram constatadas surgências de água nos taludes de escavação, estimando-se que o nível do lençol freático na encosta é profundo.

Para as condições mencionadas, foi realizada a análise de estabilidade global para a condição do talude previamente a sua ruptura (Figura 4), a qual apresentou um fator de segurança de 1,1 e muito próximo da unidade, valor este coerente para uma encosta em seu estado próximo ao equilíbrio limite. Na sequência foi

verificada a estabilidade do talude para as condições após o evento de ruptura, observando-se um fator de segurança próximo da unidade, já que o talude se encontrava rompido. O resultado da análise (Figura 5–a) indicou que o talude se encontrava em condições próximas ao limite de estabilidade (FS=1,0), corroborando que o mecanismo principal associado a instabilidade foi a escavação realizada no pé. Esta análise de estabilidade permitiu corroborar os parâmetros de resistência inicialmente estimados, os quais se mostraram bastante assertivos na representação do comportamento geotécnico dos materiais.

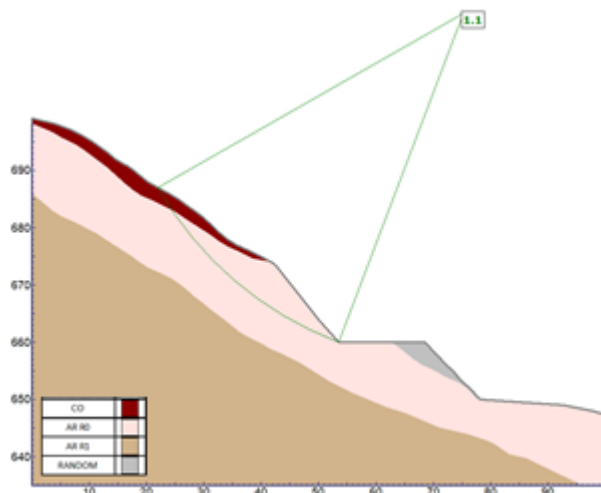


Figura 4. Resultado da análise de estabilidade para a condição do talude previamente ao evento de ruptura.

Dada as condições encontradas, foi imprescindível definir os tratamentos necessários para atender os critérios mínimos de segurança exigidos pelas normas vigentes (Figura 5 – b). A NBR 11682/2009 preconiza que, a depender dos riscos envolvidos, um projeto deve enquadrar-se em uma das classificações de nível de segurança, definidas segundo os riscos de perdas de vidas humanas e perdas materiais e ambientais. Para esta obra, considerou-se que as escavações permanentes demandavam um alto nível de segurança contra danos materiais e ambientais e um alto nível de segurança contra danos a vidas humanas, resultando num FS mínimo de 1,5.

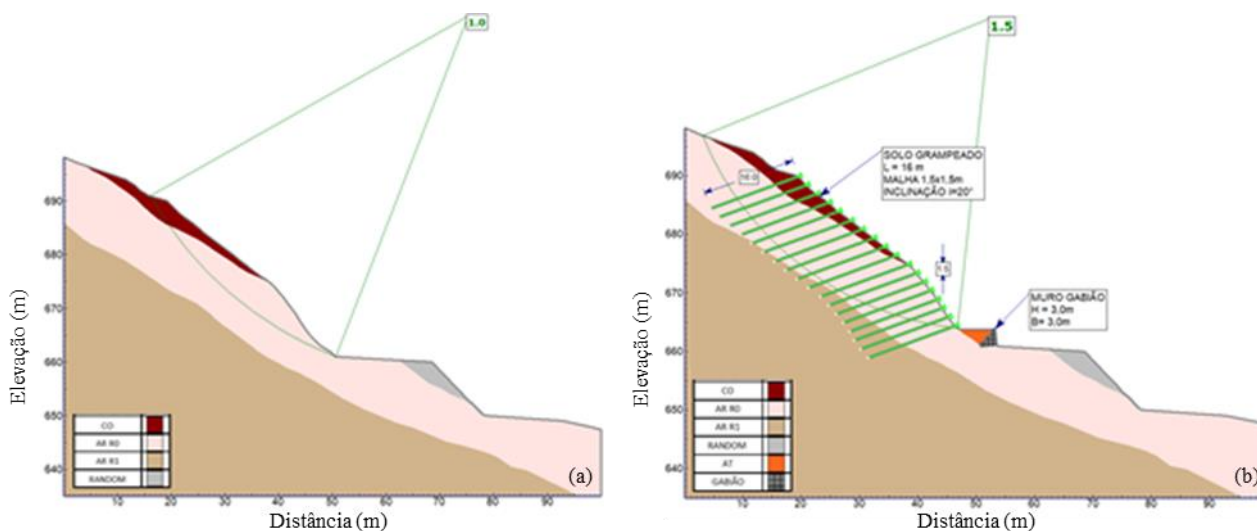


Figura 5. Resultados das análises de estabilidade para (a) condição do talude pós-ruptura e (b) solução de tratamentos propostos para estabilização do talude.

Foi proposta uma solução que atendesse o quesito da estabilidade global do talude, que fosse tecnicamente exequível para as condições locais impostas. A solução técnica adotada foi em solo grampeado e também muro de gabião na parte inferior do talude. A contenção é formada por chumbadores definitivos

com 16,0 metros de comprimento, distribuídos em uma malha de 1,50 x 1,50 m, com inclinação de 20° em relação a horizontal. Os chumbadores foram executados em furos de 75 mm de diâmetro e com uma reinjeção da calda de cimento, além do preenchimento da bainha. Para a solução de tratamentos proposta, o fator de segurança obtido nas análises de estabilidade foi de 1,5, compatível com as especificações da NBR 11.682/2009.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo de caso de estabilização de uma encosta íngreme, localizada na região do circuito de alta pressão de uma PCH no estado do Paraná. Um evento de ruptura foi identificado nesta encosta após a ocorrência de um intenso período de chuvas e quando algumas intervenções geométricas foram realizadas no talude em questão. Foram realizadas análises de estabilidade para as condições prévias à intervenção inicial, as quais indicaram fatores de segurança ligeiramente superiores à unidade, característicos de taludes naturais. A partir de uma escavação executada no pé da seção crítica do local, identificou-se um evento de ruptura global do talude. As análises de estabilidade realizadas para esta condição conduziram a fator de segurança de 1,0, caracterizando a ruptura. Isso permite concluir que o principal fator de gatilho para o movimento esteja associado à obra de escavação realizada no local, embora os autores não descartem eventual efeito da pluviometria intensa na região à época da ocorrência. Ademais, conclui-se que as análises de estabilidade para as condições pré e pós ruptura foram fundamentais para corroborar os parâmetros geotécnicos adotados.

Se tratando de um projeto de engenharia, destaca-se que as análises de estabilidade realizadas indicaram que o talude nas configurações existentes não atendia aos requisitos mínimos de segurança estabelecidos pela normatização nacional. Para tanto, as soluções propostas consideraram os tratamentos necessários para garantir estabilidade do talude dentro dos requisitos das normas vigentes (NBR 11682/2009). A definição da solução de estabilização dependeu em grande medida da realização de ensaios de arrancamento no material principal que ocorre na encosta, predominante arenoso. Neste sentido, os ensaios executados foram essenciais para que uma solução com solo grampeado, associado a um gabião no pé do talude fossem utilizadas para elevação dos fatores de segurança da encosta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Bustamante, M., Doix, B. (1985). *Une Méthode Pour le Calcul des Tirants et Micropieux Injectées*. In: Bulletin des Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, nº 140.
- Gerscovich, D. M. S (2016). Estabilidade de taludes. Oficina de Textos, São Paulo, 2º ed., 192 p.
- Gerscovich, D. M. S., E. A. Vargas Jr, and TMP de Campos (1997). *Modelagem tridimensional do regime de fluxo de um talude na cidade do Rio de Janeiro, Brasil*. Anais 3º Simp. Bras. de Solos Não Saturados (NSAT'97). ABMS, Rio de Janeiro: 281-293 p.
- Guidicini, G., Nieble, C. M. (1983) *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*, Edgard Blücher, São Paulo, 216 p.
- Lu, N., & Godt, J. W. (2013). *Hillslope hydrology and stability*. Cambridge University Press, 458 p.