



Ancoragem de um conduto forçado em uma encosta

Paola Dutra

Engenheira Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, paola_dutra@outlook.com

Isabela Grossi da Silva

Engenheira Civil, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, isa.grossisilva@gmail.com

Marcelo Lauro de Oliveira

Engenheiro Civil, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, mlo@g5engenharia.com.br

Sidnei Helder Teixeira

Engenheiro Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, sidnteix@outlook.com

Cícero José Alberton

Engenheiro Eletricista, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, cja@g5engenharia.com.br

RESUMO: A geração de energia em hidrelétricas é obtida através da queda bruta existente do desnível entre o nível do reservatório e o nível a jusante da casa de força. No empreendimento estudado, este desnível é obtido, principalmente, através de um conduto forçado ancorado em uma encosta de cerca de 200 m de altura, com uma condição geológico-geotécnica complexa. A geologia local é marcada pela presença de rochas da Bacia Sedimentar do Paraná do Grupo São Bento (arenitos) e rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (basaltos). O objetivo deste trabalho é analisar a encosta natural com atuação das cargas de um dos blocos de ancoragem implantado em um maciço brando da encosta. As cargas foram obtidas através do fabricante do conduto forçado metálico e distribuídas em estacas, através do Método dos Elementos Finitos e do *Software* SAP2000. As análises de estabilidade foram executadas em 2D, por meio do Método de Equilíbrio Limite no *Software* Slide2 da empresa Rocscience. Como resultado, foi obtido o número de estacas e profundidade necessária para reduzir a influência destes carregamentos na estabilidade da encosta, considerando as premissas da ABNT NBR 11682/2009.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de talude, hidrelétrica, conduto forçado, fundações profundas.

ABSTRACT: The power generation in hydroelectric plants is obtained through the existing unevenness between of the level of the reservoir and the level downstream of the powerhouse. In the project studied, this unevenness is obtained mainly through a penstock anchored on a slope of about 200 m in height, with a complex geological-geotechnical condition. The local geology is marked by the presence of rocks from the Paraná Sedimentary Basin of the São Bento Group (sandstones) and volcanic rocks from the Serra Geral Formation (basalts). The objective of this work is to analyze the natural slope with load action of one of the anchor blocks deployed in a soft slope massif. The loads were obtained from the metallic penstock manufacturer and distributed in piles, using the Finite Element Method and the SAP2000 Software. The stability analyzes were performed in 2D, using the Limit Equilibrium Method in Slide2 Software from Rocscience. As a result, the number of piles and depth necessary to reduce the influence of these loads on slope stability were obtained, considering the premises of ABNT NBR 11682/2009.

KEYWORDS: Slope stability, hydroelectric, penstock, deep foundations.



1 Introdução

1.1 Empreendimentos Hidrelétricos

As hidrelétricas são empreendimentos construídos com o objetivo de produzir energia através do aproveitamento hidráulico dos rios. A energia potencial gravitacional da água é transformada em energia cinética e convertida em energia elétrica. A matriz energética brasileira é predominantemente provinda da energia gerada pelas usinas hidrelétricas, correspondendo a cerca de 65% (EPE, 2020).

As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) são hidrelétricas de tamanho e potência entre 5 e 30 MW e menos de 13 km² de área de reservatório, respectivamente. As PCHs hoje são responsáveis por cerca de 3,5% de toda a capacidade instalada do sistema interligado nacional (ABRAPCH, 2021).

1.2 Estruturas de Concreto

Segundo a Eletrobrás (2003), a segurança das obras de concreto é conceituada pelos princípios estabelecidos na norma brasileira ABNT NBR 8681/2004 – Ações e segurança das estruturas. Em projetos de estruturas de concreto as verificações, relacionadas ao estado limite último, correspondem a análises associadas a movimentos de um corpo rígido, como deslizamento, tombamento e flutuação.

Define-se como fundação profunda aquela que transmite a carga proveniente da estrutura para o maciço pela base (resistência de ponta) e por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou pela combinação das duas. Em fundações profundas a profundidade de assentamento deve ser maior que o dobro de sua menor dimensão em planta (ABNT NBR 6122/1996). Fundações profundas são utilizadas, normalmente, quando o maciço superficial não apresenta capacidade de suporte, está sujeito a processos erosivos, quando existe a possibilidade de realização de uma escavação futura ou quando há uma estrutura de concreto na proximidade (Maragon, 2018).

Algumas situações podem causar esforços laterais em estacas, tais como terremotos, ondas, forças relacionadas a vento ou pressões laterais de solos. A segurança dessas estruturas depende da capacidade de suporte das estacas em relação às forças laterais resultantes (Velloso e Lopes, 2016). A ABNT NBR 6122/2019 indica que quando estacas são submetidas a esforços horizontais ou momentos, pode ocorrer plastificação do solo ou do elemento estrutural, por esse motivo, estes esforços devem ser analisados no dimensionamento, assim como as respectivas deformações.

1.3 Geologia Local

A Bacia do Paraná é dividida em 5 superseqüências, sendo a região do empreendimento contemplada na Superseqüência Gondwana III, representada pelas unidades sedimentares da Formação Botucatu, Formação Pirambóia e do magmatismo da Formação Serra Geral.

Soares (1975) subdividiu os arenitos da Bacia do Paraná em Formação Pirambóia, de gênese predominantemente fluvial, e Formação Botucatu, de gênese predominantemente eólica. A Formação Pirambóia é constituída por litologias predominantemente arenosas, arenitos médios a finos, siltosos, brancos, avermelhados, arroxeados e com estratificações cruzadas. Os arenitos eólicos da Formação Botucatu são constituídos por arenitos finos a médios, de cores róseo avermelhadas, bastante litificados, predominantemente quartzosos, sem matriz argilosa, com grãos foscos e bem arredondados, com estratificações cruzadas (Roisenberg et al., 2007).

1.4 Estabilidade de Talude

A ABNT NBR 11.682/2009 é a norma que preconiza a estabilidade de taludes, definindo o fator de segurança de acordo com o risco gerado pela ruptura da estrutura quanto aos prejuízos ambientais, materiais e perda de vida humana. Adicionalmente, a Eletrobrás (2003) também apresenta, no Item 10.3.5, fatores de segurança para estabilidade de maciços de terra e enrocamento.

De acordo com Massad (2003) os métodos de equilíbrio limite levam em consideração a hipótese de equilíbrio de uma massa de solo na iminência de estar em um processo de instabilidade, com um



comportamento rígido-plástico do material. O fator de segurança de um talude pode ser calculado como a razão entre a resistência de cisalhamento, estabilizadora, e a tensão cisalhante, instabilizadora, atuando ao longo da superfície de ruptura.

2 Metodologia

2.1 Descrição da Estrutura de Análise

Quando a Casa de Força não é incorporada ao barramento, é necessário direcionar a vazão através de um canal, conduto ou túnel, a depender das condições topográficas e geológico-geotécnicas. Nesta Pequena Central Hidrelétrica, o circuito de adução é composto por uma tomada de água de baixa pressão e por um canal a céu aberto. No final do canal encontra-se a tomada de água de alta pressão, a partir da qual há um conduto forçado metálico, exposto, que alimenta duas turbinas na casa de força.

O empreendimento em questão está sendo ampliado, portanto a potência instalada de 8 MW atingirá, no ano de 2022, 24 MW. A queda bruta, para geração da energia elétrica, corresponde ao desnível entre o nível do reservatório e o nível a jusante da casa de força.

Neste empreendimento, os condutos forçados, ancorados em uma encosta, são os principais dispositivos responsáveis pelo desnível e queda bruta para geração de energia. O conduto projetado possui 2,0 m de diâmetro e 463,0 m de extensão, sendo posicionado através de seis (6) blocos de ancoragem de concreto armado.

A Figura 1 apresenta a locação em planta do conduto existente e do conduto atualmente projetado.

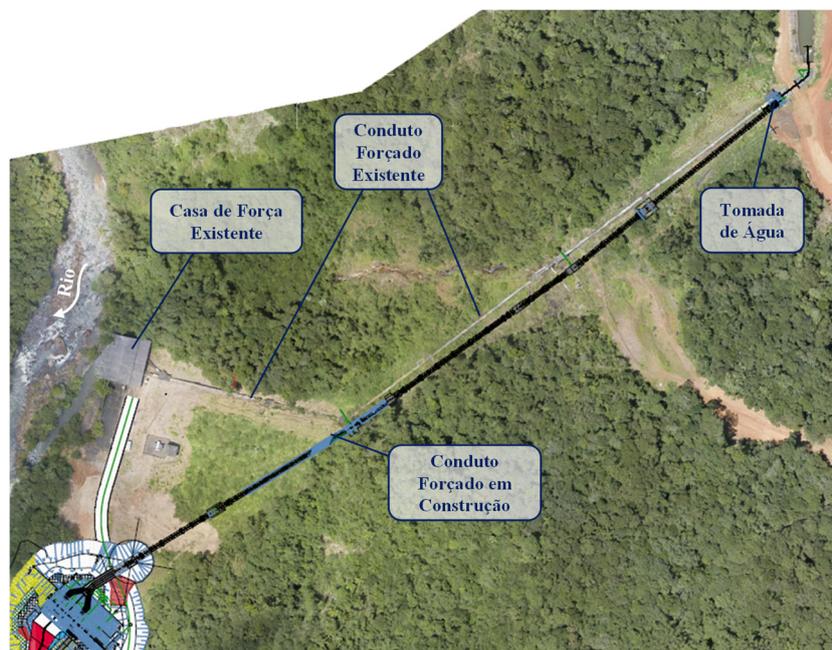


Figura 1 – Localização em planta do conduto existente e do conduto em execução

2.2 Perfil Geológico-Geotécnico e Parâmetros

O perfil geológico-geotécnico da encosta foi definido através das sondagens executadas, durante o projeto básico e executivo. Sendo identificados, em cotas superiores da encosta, derrames basálticos da Formação Serra Geral, pertencente ao Grupo São Bento, e em cotas inferiores, arenitos da Formação Botucatu e da Formação Pirambóia.

Por ser uma encosta íngreme e de altura considerável, aproximadamente 200 m, em cotas inferiores, houve a identificação de depósitos de material, como tálus (blocos de basalto envolvidos em uma matriz de material fino) e colúvio (depósito composto de material originado de arenitos/basalto). Os depósitos recentes identificados, em cotas inferiores, correspondem aos materiais transportados provenientes da encosta e do rio.



O conduto forçado foi instalado em formações geológicas distintas, sendo o bloco analisado executado na Formação Botucatu. O perfil geológico-geotécnico definido para realização do projeto do bloco em estudo (denominado bloco 6) é apresentado na Figura 2.

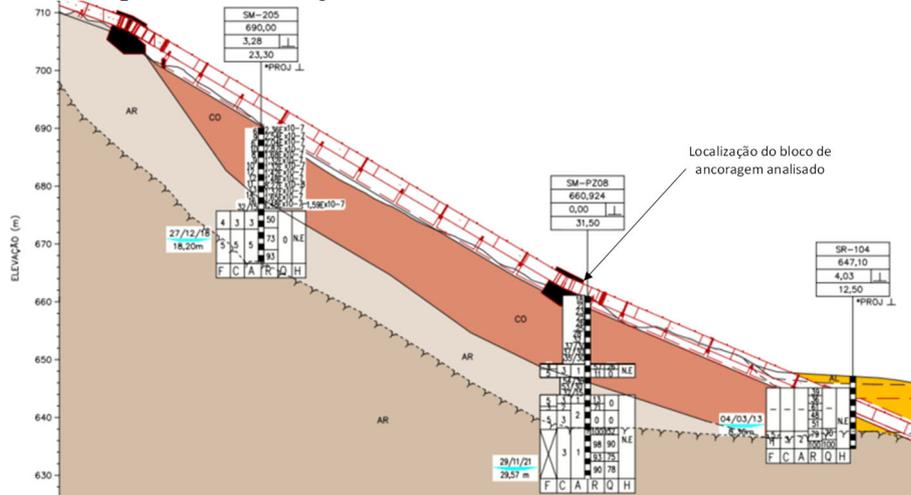


Figura 2 – Perfil longitudinal da região de análise do conduto forçado

Os parâmetros foram definidos através do N_{SPT} , recuperação, consistência e RQD do maciço, indicado nos boletins das sondagens próximas executadas, correlações empíricas e dados da bibliografia técnica. As correlações empíricas utilizadas, para definição do ângulo de atrito efetivo (ϕ') e coesão efetiva (c'), através do N_{SPT} são apresentadas nas Equações (1) e (2).

$$\phi' = \sqrt{20 \times N_{SPT}} + 15^\circ \quad (\text{Teixeira, 1996}) \quad (1)$$

$$c' = \frac{N_{SPT}}{0,35} \quad (\text{Berberian, 2015}) \quad (2)$$

Para o solo coluvionar, foi considerado N_{SPT} médio de 15, resultando em 35° de ângulo de atrito e 57 kPa de coesão em termos efetivos. A coesão efetiva ainda foi reduzida em 50%, em função do maciço apresentar porções arenosas.

Tabela 1 – Valores de coesão e ângulo de atrito, considerando a qualidade do maciço (Fonte: González de Vallejo, 2002)

Classe do maciço	I	II	III	IV	V
RMR	>80	61-80	41-60	21-41	<20
Coesão (MPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito ($^\circ$)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

González de Vallejo (2002) indica para o arenito são, peso específico entre 23-26 kN/m³, coesão e ângulo de atrito de 8.000-35.000 kPa e 30-50 $^\circ$, respectivamente.

O cálculo dessas componentes depende do modelo constitutivo considerado como representativo do maciço analisado. Neste caso de análise, o modelo adotado para representar o comportamento do talude foi o de Mohr-Coulomb. Assim, os parâmetros geomecânicos a serem considerados para cada litotipo são: peso específico, ângulo de atrito e coesão.

Considerando as referências apresentadas acima e os resultados das sondagens, foram definidos os parâmetros utilizados nas análises de estabilidade, conforme observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros geológico-geotécnicos adotados no modelo de análise

Material	Peso específico natural (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)
Colúvio	21	23	35



Material	Peso específico natural (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
Rocha alterada	22	25	37
Rocha sã - Arenito	24	100	45

Os fatores de segurança mínimos requeridos, para o empreendimento em questão, combinam a ABNT NBR 11.682/2009 e os critérios da Eletrobrás (2003). Será considerado fator de segurança de 1,20, para final de construção e condição excepcional sísmica, e 1,50 para condição de operação normal.

2.3 Modelagem Estrutural

As cargas atuantes no Bloco de Ancoragem são oriundas do concreto (peso próprio do bloco de ancoragem), do conduto forçado (indicadas pelo fornecedor) e da reação da laje de concreto que está apoiada a montante do bloco de ancoragem. As cargas referentes ao conduto forçado são: peso próprio do conduto metálico e forças hidráulicas (peso de água, forças devido a mudança de direção do fluxo de água e forças devido ao fechamento de emergência da turbina).

Na maioria das situações em fundações, os esforços horizontais não são significativos, entretanto, quando são representativos, as tensões no lado oposto ao da aplicação da carga aumentam, enquanto no lado da aplicação, diminuem. Para reduzir os esforços horizontais, as estacas foram inclinadas em duas direções, para montante (na direção da tomada de água de alta pressão) e para jusante (na direção da casa de força).

Para avaliar os esforços solicitantes nas estacas e deslocamento do bloco de ancoragem, foi elaborado um modelo numérico através do software SAP2000. As estacas foram modeladas como elementos unidirecionais e na condição de contorno foram considerados apoios elásticos. Devido a magnitude da força tangencial aplicada no bloco de ancoragem, as estacas foram rotacionadas (em duas direções), de modo que as forças tangenciais sejam transmitidas às estacas através de forças axiais e cortantes, e não somente como forças cortantes.

Para os elementos estruturais (estacas) essa condição de ajuste na inclinação é bastante favorável, no entanto, para o dimensionamento geotécnico as estacas à jusante podem ser desfavoráveis, afinal, ficam localizadas em regiões mais superficiais do maciço, menos resistentes, e na direção de esforços instabilizantes, atuantes na cunha crítica de ruptura. Esta condição levou a necessidade de realização de análises de estabilidade, através do Método de Equilíbrio Limite.

Os esforços solicitantes obtidos, através do Software SAP2000, são apresentados na Figura 3.

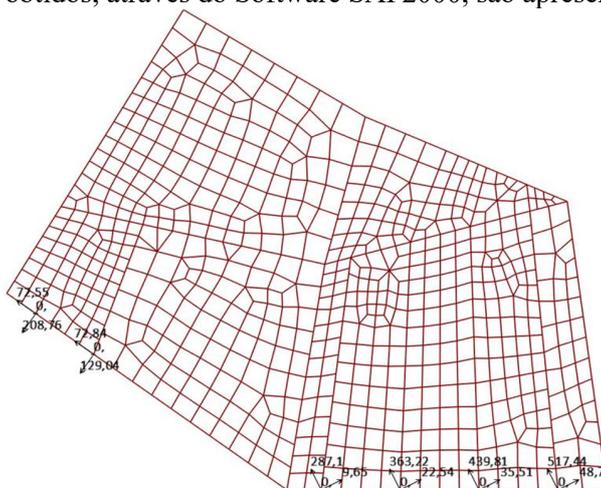


Figura 3 – Esforços solicitantes resultantes

Para as análises de estabilidade podem ser utilizados métodos baseados em análise de deslocamento, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), e métodos que utilizam o estado de equilíbrio limite. Neste trabalho foi utilizado o método de equilíbrio limite para o cálculo do fator de segurança, por meio do método de Spencer.



Foram realizados três casos de análise: para atual condição da encosta, com a instalação do bloco de ancoragem e para condição sísmica (acelerações de 0,05g, na direção horizontal, 0,03g na direção vertical). O fator de segurança, a ser atingido, deve ser maior ou igual a 1,50, para a condição de operação normal da estrutura, e de 1,20 para a condição atual e excepcional sísmica.

Não foi considerado nível de água atuante, pois as investigações indicaram nível de água somente em profundidade, distante da área de influência do bloco de ancoragem. Adicionalmente, para o controle do nível de água atuante na encosta, foram instalados piezômetros elétricos, sendo um destes instalado na proximidade do bloco apresentado neste trabalho.

Na análise de estabilidade não houve a consideração de parâmetros de resistência relacionados ao concreto armado, na projeção das estacas, com o objetivo de verificar a imposição dos esforços para a estabilidade do talude, sem a contribuição do concreto na resistência da cunha crítica de ruptura.

Para esta análise de estabilidade de talude foi considerada a seção mais crítica, portanto com a inclinação das estacas para jusante, conforme é possível verificar na Figura 4.

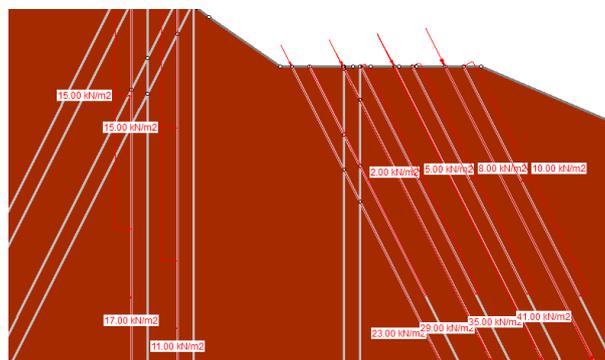
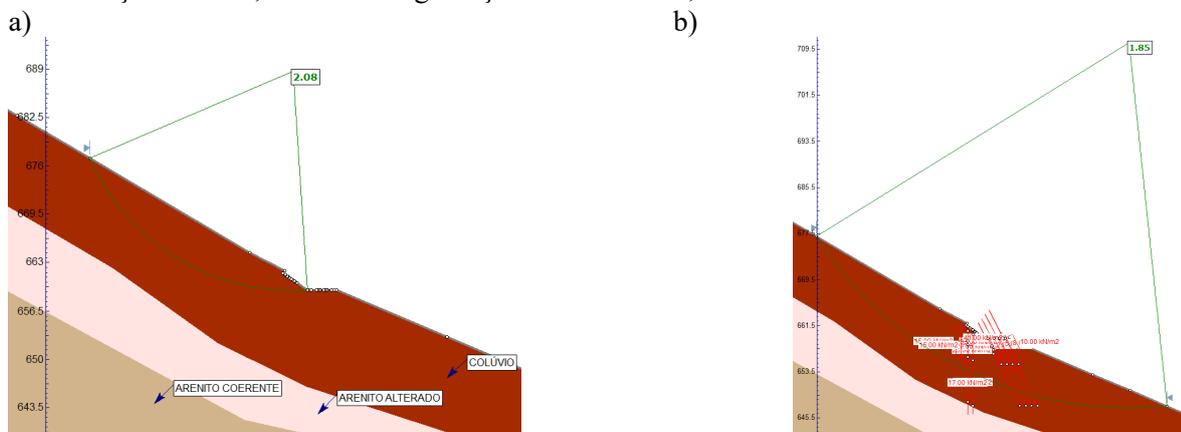


Figura 4 – Projeção das estacas e cargas axiais e transversais transmitidas ao maciço

3 Resultados e Análises

As estacas foram instaladas em um maciço muito alterado (colúvio) resultante de depósito de materiais da encosta (arenito e basalto), região na qual foi executada a sondagem a percussão. Portanto, os resultados das análises têm influência direta com os parâmetros de resistência considerados na primeira camada estratigráfica (colúvio) do perfil geológico.

As análises foram executadas através do Método de Equilíbrio Limite, cujos resultados são apresentados na Figura 5. O fator de segurança obtido, para a encosta natural, foi de 2,08, sendo o fator de segurança reduzido para 1,51 com os esforços impostos pelo bloco de ancoragem. Para um caso excepcional, ou seja, em uma condição sísmica, o fator de segurança obtido foi de 1,46.



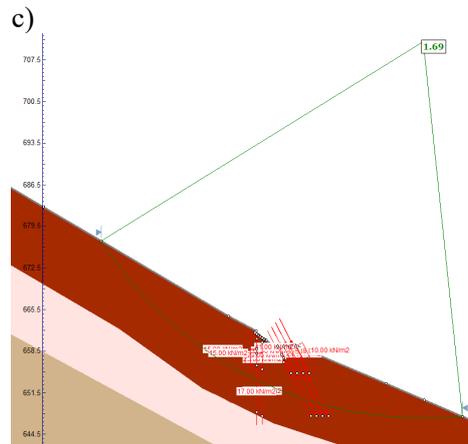


Figura 5 – Análise de estabilidade da encosta natural: a) Sem implantação do bloco de ancoragem; b) Com a implantação do bloco de ancoragem; c) Com a implantação do bloco de ancoragem e imposição de carga sísmica

As análises de estabilidade indicaram que os esforços nas estacas podem contribuir na redução do fator de segurança da encosta, todavia, a redução não gera fatores de segurança menores aos mínimos requeridos, indicando que é possível inclinar as estacas para jusante e redistribuir os esforços em 13,0 m de profundidade das estacas.

Por ser uma obra especial, não convencional, foi executada uma prova de carga à compressão em uma das estacas deste bloco, com ensaio de carregamento rápido. O ensaio consiste na aplicação de esforços de carregamento à estaca com o registro de deslocamentos (recalques) produzidos pela aplicação dos esforços. A prova de carga foi realizada até 114 tf, sendo a carga de trabalho da estaca (compressão) de 57 tf, produzindo um deslocamento máximo de 3,52 mm e um deslocamento residual de 0,14 mm (descarregamento), portanto, um encurtamento medido de 3,38 mm.

4 Conclusão

A execução de sondagens profundas, não restringindo a investigação somente nas camadas superficiais, é fundamental para o conhecimento do perfil geológico local e aferição da capacidade de suporte das distintas camadas da encosta, permitindo a realização de análises de estabilidade.

O estudo e discussão das especificidades desta estrutura foi fundamental para a definição das condições de contorno e direcionamento das análises executadas. A interação entre áreas distintas da engenharia civil, como estruturas e geotecnia, permitiram a execução de análises específicas e globais, de modo a garantir a segurança e reduzir riscos de instabilidade.

Para a confirmação da capacidade de suporte das estacas, foi executada uma prova de carga estática, indicando um deslocamento máximo total reduzido e dentro do regime elástico, portanto, comportamento expectável e satisfatório.

As análises indicaram que a definição de fundação profunda, ao invés de superficial, permitiu a distribuição dos esforços em uma área maior do maciço, evitando a possibilidade de rupturas localizadas. Adicionalmente, a inclinação das estacas permitiu a redistribuição dos esforços, consequentemente otimização do dimensionamento estrutural, e não comprometendo a estabilidade do talude.

O bloco de ancoragem foi executado com 28 estacas, tipo raiz, com 13,0 m de comprimento, 310 mm de diâmetro e resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) de 20 MPa, apresentando comportamento satisfatório.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa G5 Engenharia, pelos dados e informações disponibilizadas, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAPCH. Disponível em: <https://abrapch.org.br/faq/o-que-e-uma-pch/> Acesso em: 12 de dezembro de 2021.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 8681. *Ações e segurança nas estruturas - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). NBR 6118. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- BERBERIAN, D. (2015). *Engenharia de fundações*. Brasília, DF. INFRASOLO, 2ª EDIÇÃO. Vol único, 906p.
- Eletrobrás. *Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*. 2003.
- Empresa De Pesquisa Energética (EPE). *Matriz Energética e Elétrica*. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- González De Vallejo, Luis I. et al. *Ingeniería geológica*. Pearson Educación. 2002.
- Lopes, Francisco R.; Velloso, Dirceu A. *Fundações-Volume único*. Oficina de Textos. 2016.
- Massad, F. *Obras de Terra*. Editora Oficina de Textos. São Paulo. 2003.
- Maragon, M. *Geotecnia de fundações*. Disponível em: <https://www.ufjf.br/nugeo/ensino/graduacao/publicacoes-academicas-livre/geotecnia-de-fundacoes-e-obras-de-terra>. Acesso em: 12 de dezembro de 2021.
- Resolução Normativa ANEEL. N° 875/2020 de 20 de março de 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-normativa-n-875-de-10-de-marco-de-2020-248070610>. Acesso em: 27 novembro de 2021.
- Roisenberg, A., et al. *Nota explicativa da Folha Gravataí (SH.22-X-C-V)*. Rio Grande do Sul: UFRGS/CPRM, 2007.
- SOARES, P. C. *Divisão estratigráfica do mesozóico do Estado de São Paulo*. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 5, p. 229-251, 1975.
- TEIXEIRA, A. H. *Projeto e execução de fundações*. Seminário: Engenharia De Fundações Especiais E Geotecnia. Anais. v. 1. p. 33-50. São Paulo, 1996.