

Análise de Estabilidade da Barragem do Lago Norte em Palmas – TO

Anderson Nonato Pereira, Estudante, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins - IFTO, Palmas - TO, Brasil, anderson.pereira@estudante.edu.br

Paulo Vittor Evangelista da Silva, Estudante, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins - IFTO, Palmas - TO, Brasil, paulovittor27@gmail.com

Paulo Victor Bido Gellen, Estudante, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins - IFTO, Palmas - TO, Brasil, paulo.gellen@estudante.ifto.edu.br

Orlando Machado de Oliveira Neto, Estudante, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins - IFTO, Palmas - TO, Brasil, orlando.neto@estudante.ifto.edu.br

Flávio da Silva Ornelas

Professor, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins - IFTO, Palmas - TO, Brasil, flavioornelas@ifto.edu.br

RESUMO: Palmas, a capital mais nova do Brasil, enfrenta problemas de drenagem, com talvegues que acumulam água e promovem grandes acúmulos de água pluvial. Um antigo barramento agora cercado pela cidade, começou a acumular parte dessa drenagem, causando preocupação entre os moradores próximo a jusante devido a processos erosivos iniciados na barragem. Esta pesquisa verificou a conformidade dimensional da barragem com diretrizes do Plano Nacional de Segurança de Barragens, analisou os sistemas de monitoramento e obteve parâmetros de resistência por meio de ensaios laboratoriais e análises computacionais, determinando a estabilidade do talude. As análises preliminares indicaram ruptura por instabilidade gerada por erosão, após transbordamentos e fortes chuvas, confirmada posteriormente, mesmo com medidas de mitigação implementadas.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, Análise de estabilidade, Monitoramento

ABSTRACT: Palmas, Brazil's newest capital, has been experiencing drainage issues due to exponential urban growth. Previously isolated sloughs are now surrounded by the city, accumulating significant rainwater and causing concern among downstream residents due to erosion processes near an old dam. This study conducted dimensional verification, bathymetry, and classification according to the National Dam Safety Plan guidelines. Monitoring systems were examined, and resistance parameters were obtained through laboratory tests and computational analyses to determine the dam slope stability. Preliminary field analyses indicated a downstream slope rupture due to instability generated by erosion, after overtopping and heavy rains, which was later confirmed, even efforts with mitigation measures implemented.

KEYWORDS: Dam, Stability analysis, Monitoring

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia, desde os primórdios, as obras de terras denominadas atualmente como barragens, sempre tiveram um papel crucial no que tange a benefícios para sociedade. Paralelo a isso, algumas rupturas de barragens podem ocorrer devido aos sistemas construtivos sem critérios científicos, controle de riscos, ausência de projetos, gestão e relatórios operacionais, que são os responsáveis por identificar e mitigar possíveis falhas estruturais. Diante do exposto, é evidente a grande importância da análise de risco e mitigação de potenciais desastres, causados por

infraestruturas em perigo, como é o caso da barragem em questão na cidade de Palmas-TO. Em face disso, a capital mais nova do Brasil, enfrenta desafios decorrentes de sua rápida expansão urbana, incluindo problemas relacionados aos sistemas de drenagem que se destinam a talvegues, e que se tornaram barramentos de grandes volumes de água. Neste contexto, um antigo alagado, antes isolado em áreas rurais, foi atravessado por uma barragem, que também é uma via vicinal. Atualmente a estrutura construída sem projeto e com apenas um sistema de extravasamento, se encontra cercada pela cidade em expansão e acumula parte da drenagem urbana. Este cenário levou à preocupação dos moradores a jusante da barragem, que enfrentam o risco iminente de colapso, especialmente após o início de processos erosivos no talude à jusante, devido à falta de manutenção, monitoramento e excesso de chuvas.

A Lei 14066/2010 no artigo 2º, descreve que: “para os efeitos desta Lei, são estabelecidas as seguintes definições: I – barragem: qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.

Segundo dados (SNISB) Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens: Quase um milhão de pessoas vivem perto de barragens potencialmente perigosas no Brasil, esse número se refere à quantidade de pessoas que vive a até um quilômetro de distância de uma das 1.220 barragens do país, classificadas como de alto risco e com alto potencial de dano. Diante deste panorama, o presente trabalho realizou uma análise abrangente da situação da barragem. Inicialmente, foram verificados dados cruciais, como batimetria, dimensões da barragem, galeria pluvial e nível da água retirados in loco, para determinar se a estrutura já se enquadra nos padrões de segurança estabelecidos pelo Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e pela Lei 14.066/2020. Em seguida, foi executado um estudo detalhado da estabilidade do talude da barragem, empregando ensaios laboratoriais, análises computacionais e modelagem da barragem, com intuito de identificar possíveis pontos de fragilidade para o desenvolvimento de estratégias de mitigação.

Este trabalho destaca a importância de uma abordagem proativa e holística, na gestão de riscos geotécnicos, para proteger vidas, meio ambiente, edificações e infraestruturas e segurança para as comunidades de Palmas. A premissa deste trabalho foi a análise do talude de jusante, quanto a segurança que ele oferecida à população que reside próximo a sua localidade, e ainda, às pessoas que usam a crista da barragem como via de acesso aos bairros e chácaras. A Figura 1.1 apresenta a vista aérea da barragem e a ocupação urbana ao redor.



Figura 1.1. Vista aérea da barragem e a ocupação urbana ao redor (Google Earth, 2024)

2 METODOLOGIA

Com a informação prévia de erosão no talude da barragem, foram realizadas visitas para confirmar os danos existentes. Além de erosões pontuais, duas grandes árvores (uma próxima do extravasor), caíram e causaram rupturas do corpo do talude de jusante, deixando praticamente sem inclinação. Manchas excessivas de umidade e de óxidos de ferro nos taludes da jusante indicam fluxo de percolado. Outras árvores grandes nos taludes e marcas de inundação, indicam galgamento recente.

Foi averiguado a inexistência de sistemas de monitoramento como: piezômetros, sistema de drenagem, filtros, marcos topográficos etc. As dimensões do barramento foram medidas e a profundidade e nível do reservatório, determinados com batimetria. Os sinais de recentes transbordamentos foram confirmados por entrevistas aos moradores próximos, que relataram inclusive reincidências. Na tentativa de evitar a ruptura e possíveis consequências, o proprietário lançou blocos de rochas na erosão frente ao extravasor.

Os dados das dimensões do barramento, inclinação dos taludes, batimetria e níveis do reservatório e a topografia da jusante, foram utilizados para elaboração do modelo geométrico da barragem, que não existia. Estas informações foram utilizadas também para realização da modelagem em *softwares*, e a determinação do fator de segurança do talude na seção mais comprometida e na condição crítica.

Os parâmetros do material que compõe a estrutura do barramento, foram determinados a partir da retirada amostras indeformadas e amostras do solo para caracterização. Os locais da retirada destas amostras são próximos aos pontos erodidos, mas, distantes o suficiente, para não comprometer ainda mais a estrutura e a segurança pessoal. Foi realizada escavação manual cuidadosa e cravação de cilindro metálico, para que as amostra não sofresse amolgamento, com cuidado extremo para não causar avaria no talude. O material coletado foi levado para o laboratório do IFTO Campus Palmas, onde foram determinados por ensaios o teor de umidade, granulometria, limites de consistência e peso específico dos grãos. Posteriormente, para determinação da estabilidade dos taludes da barragem, os resultados dos ensaios laboratoriais realizados, foram utilizados em análises da modelagem numérica.

A Figura 2.1 apresenta, os pontos de erosão 1 e 2 (a), o registro da árvore antes da erosão (b) no ponto 1 frente ao extravasor (c), lançamento de blocos de rocha para conter a erosão (d) e retirada de amostras para análise no ponto 1 (e).

Com as amostras indeformadas, foram realizados os ensaios de cisalhamento direto, no laboratório da empresa Técnica Engenharia, que deu todo o suporte em seu laboratório. Os ensaios de cisalhamento direto, seguiram as prescrições da ASTM D3080M-11(2014). As amostras indeformadas foram esculpadas no molde da caixa de cisalhamento. Após pesagem, transposta para caixa bipartida dotada de placas dentadas e perfuradas, pedras porosas de topo e base, e quepe para transmissão de carga. A velocidade de aplicação da tensão cisalhante é aplicada conforme a classificação do solo com valor de 0,05 mm/min. A figura 2.2, apresenta da esquerda para a direita, a moldagem da amostra indeformada do solo e o ensaio de cisalhamento direto em andamento.



Figura 2.1. Pontos de erosão 1 e 2 (a), registro da árvore antes da erosão (b) no ponto 1 frente ao extravasor (c), lançamento de blocos de rocha para conter a erosão (d) e retirada de amostras para análise próxima erosão no ponto 1 (e).

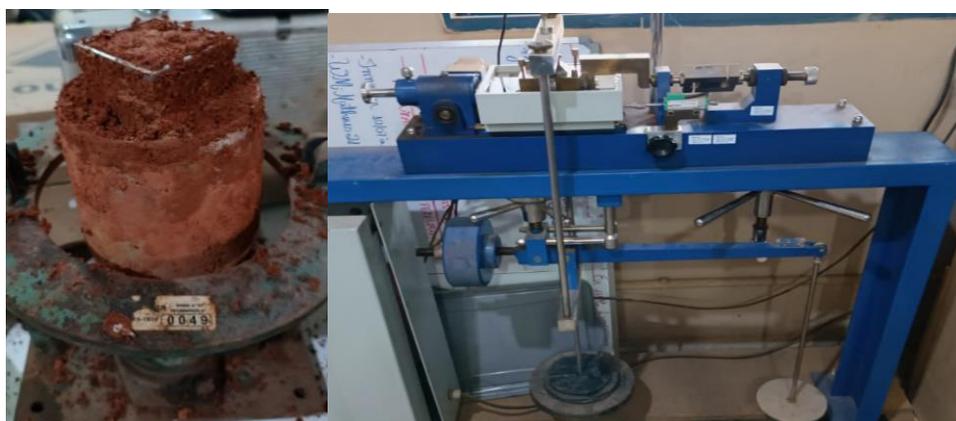


Figura 2.2 Moldagem da amostra indeformada, ensaio de cisalhamento direto

3 RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

Os ensaios de granulometria e limites de consistência, e posteriormente a classificação, seguiram conforme descritos por Das e Sobhan (2014), onde foi determinado que o material do barramento é um solo areno-siltoso (SM), classificado com a carta de plasticidade onde o limite de liquidez foi igual a 35% e o índice de plasticidade igual a zero. Também o teor de umidade natural igual a 33% e o peso específico dos grãos, determinado por ensaios com o picnômetro, conforme ASTM D854-14, foi de 2,67 g/cm³. O peso específico aparente natural das amostras igual a 1,9 g/cm³.

Os ensaios de cisalhamento direto, tiveram de ser repetidos. Algumas amostras cisalharam antes do ensaio. A forma da coleta, que tentou preservar ao máximo o talude em colapso, possivelmente os pontos já estavam em processos de desconfinamento e cisalhamento. Novas amostras foram coletadas agora com cilindro de 20 cm de diâmetro, onde a amostra esculpida tinha 5cm x 5 cm, e após ensaiadas, os resultados obtidos, indicaram o ângulo de atrito de $24,36^\circ$ e coesão de 0,3 kPa. Na Figura 3.1, são apresentados os gráficos dos ensaios de cisalhamento direto e parâmetros de resistência gerados pelo equipamento.

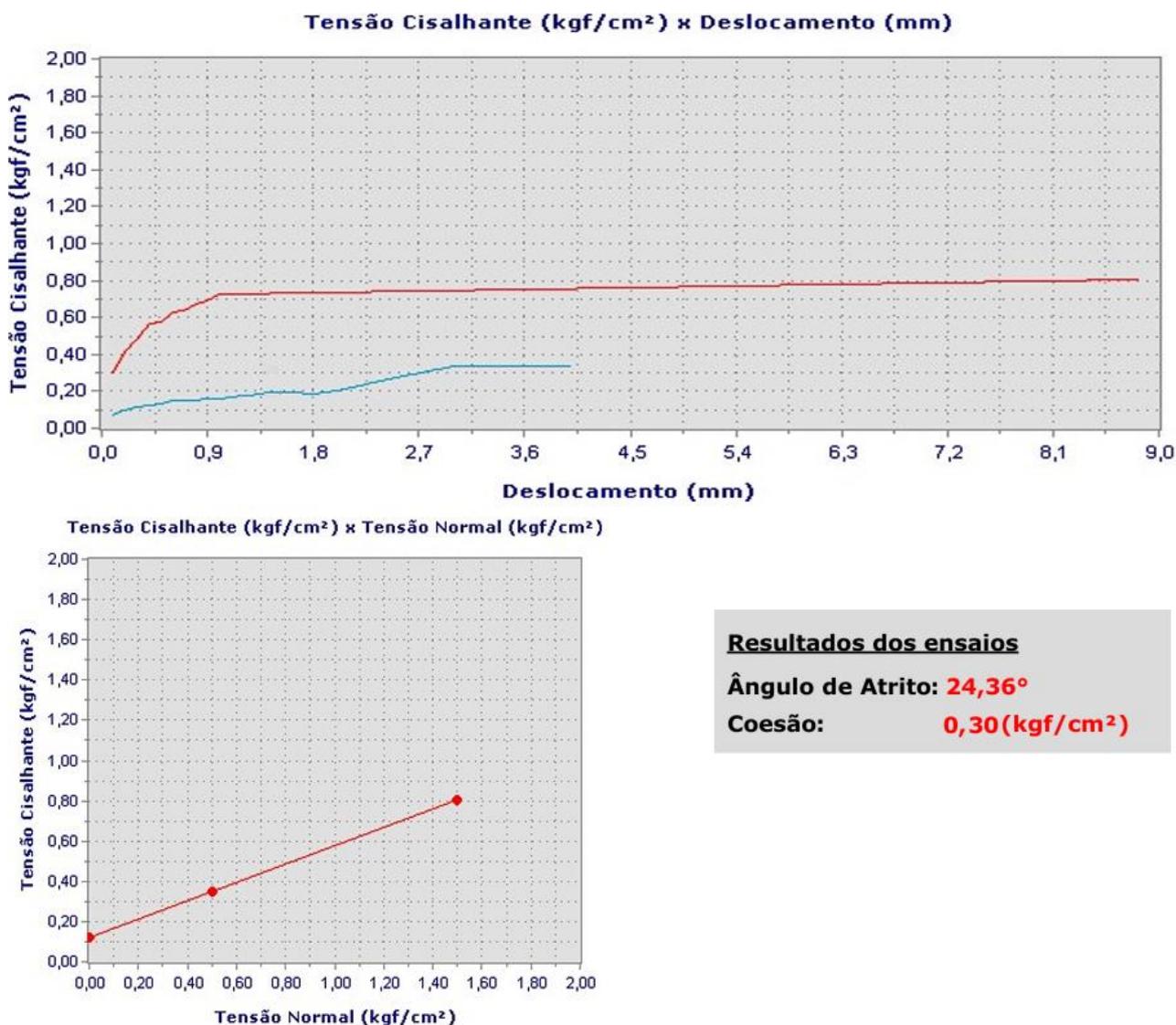


Figura 3.1 Gráficos dos ensaios de cisalhamento direto e parâmetros gerados pelo equipamento

Com a obtenção dos parâmetros do solo e de resistências, foi realizada a modelagem numérica através do *software Slide2* (Rocscience), e foi analisado o fator de segurança do talude a jusante, levando em consideração regime permanente da barragem. Primeiramente, foram estabelecidos o modelo geométrico, por intermédio dos dados retirados *in loco*, e as condições de contorno possíveis. Posteriormente, realizadas as análises de percolação e então a estabilidade do talude, por meio do método de Equilíbrio Limite em Fatias. Conforme Faïçal (2010), a análise da estabilidade de solos e taludes envolve a avaliação das condições geotécnicas e das forças atuantes e resistentes, utilizando métodos de equilíbrio limite para calcular fatores de segurança e prever o comportamento do solo em

situações diversas. Os resultados demonstraram que o FS estava abaixo do mínimo para a estabilidade, conforme figura 3.2.

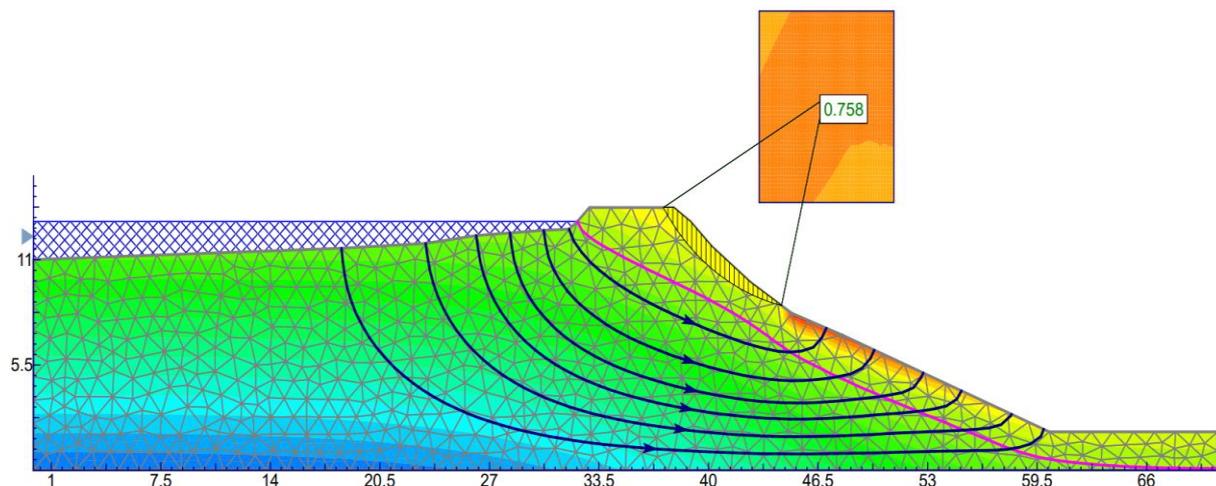


Figura 3.1 - Análise Determinística Estabilidade do Talude a Jusante

As análises foram realizadas com o método de Morgenstern-Price, uma vez que, pertence ao grupo dos métodos rigorosos, onde realizam todas as condições de equilíbrio. Segundo Ferreira (2012), destaca que o método em questão é vantajoso por integrar as hipóteses de outros métodos de análise de estabilidade, adaptando-as conforme necessário para cada situação específica. Essa abordagem possibilita que os fatores de segurança calculados sejam equivalentes aos obtidos pelos métodos de Bishop, Janbu, Morgenstern-Price e Spencer em análises isoladas. Ademais, pela seção crítica analisada ser composta de um mesmo tipo de solo, foi utilizado superfície circular como parâmetro da modelagem numérica. Por fim, para determinar o ponto crítico de ruptura foi utilizado a opção de grades e raios.

Não conformados com o valor abaixo do mínimo para a estabilidade ainda presente, foi realizada a modelagem numérica com os *softwares* do GeoStudio: SEEP para obtenção do fluxo e SLOP/W para estabilidade do talude. Nas análises do fator de segurança do talude de jusante, levando em consideração o regime permanente normal da barragem, os resultados foram aproximadamente os mesmos. Paralelamente a isso, no talude que após a erosão estava muito íngreme, era perceptível e provável que as raízes e o enrocamento lançado emergencialmente, contribuíram para estabilidade momentânea. Na figura 3.3 é apresentado, a simulação no SEEP do Geostúdio, com o fluxo estabelecido. E na Figura 3.4, o Fator de Segurança, determinado também pelo método Morgenstern-Price, no SLOP/W.

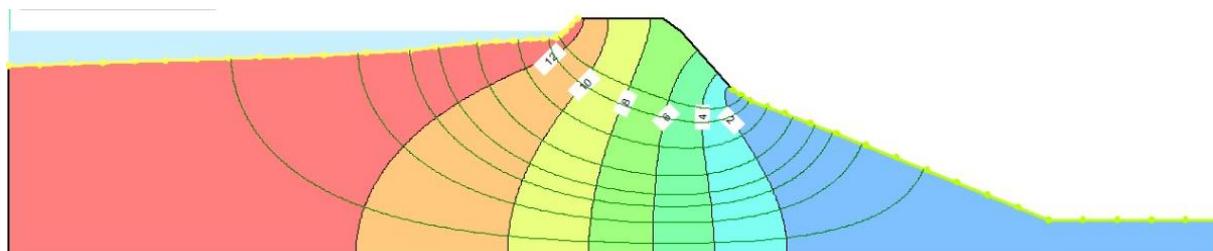


Figura 3.3 - Análise da percolação

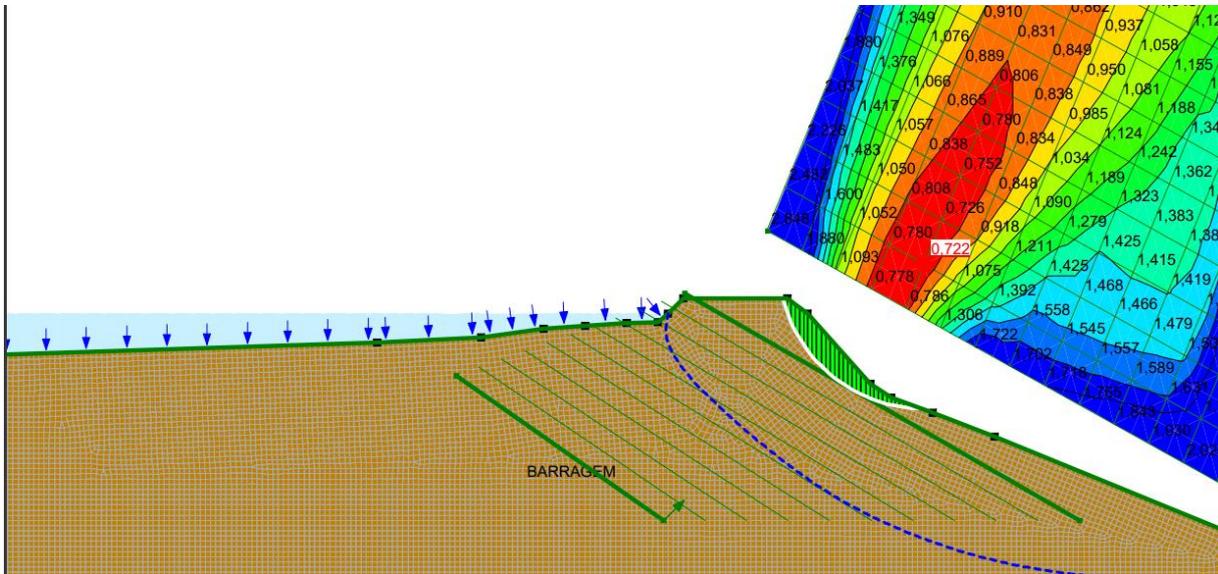


Figura 3.4 - Análise Determinística Estabilidade do Talude a Jusante

A barragem já estava apresentando vários processos de deterioração com o excesso de chuvas, e com a passagem de veículos. Conforme previsto nas primeiras análises, a barragem rompeu no dia 21 de fevereiro de 2024, após uma forte chuva, a erosão abriu uma vala e transportou os extravasores e parte do enrocamento lançado. A via que existia sobre o barramento foi interditada, e os moradores agora devem contornar por vias informais e distantes. A Figura 3.4 mostra a falha no ponto de erosão 1 (local do extravasor). Os blocos de rocha lançados serviram para minimizar a onda de cheia. Assim, o escoamento foi controlado sem causar maiores danos as residências próximas.



Figura 3.4 - Falha da barragem no ponto de erosão 1.

3.1 Classificação no PNSB

A análise da barragem do lago norte quanto ao enquadramento no (PNSB), determinado pela Lei n.º 12.334, de 20 de setembro de 2010, que instituiu a PNSB, em seu art. 9º estabelece que as inspeções de segurança regulares e especiais terão sua periodicidade, qualificação da equipe responsável, conteúdo mínimo e nível de detalhamento definidos pelo órgão fiscalizador, em função da categoria do risco e do dano potencial associado a barragem. O barramento serve como via de acesso frequente. Não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto à mesma se enquadra nas descrições e classificação relativa ao Dano Potencial Associado (DPA), baixo, por não causar danos significativos à população ou ao meio ambiente.

4 CONCLUSÃO

A pesquisa na barragem do Lago Norte em Palmas - TO demonstrou a importância da análise geotécnica para a segurança de barragens. As medições, modelagem geométrica e ensaios laboratoriais, permitiram prever a ruptura, que ocorreu conforme antecipado, destacando a eficácia dos métodos empregados e a necessidade de monitoramento contínuo. Também, permitiu a aplicação prática dos conhecimentos acadêmicos sobre geotecnia, barragens e estabilidade de taludes. Foram realizadas medições e modelagem geométrica, batimetria, coleta de amostras indeformadas, ensaios de caracterização e determinação de parâmetros de resistência, e com estes dados, uma modelagem numérica, que determinou a condição de instabilidade. Por último, conforme as diretrizes do Plano Nacional de Segurança de Barragens, foi classificada com DPA baixo.

O foco da pesquisa era avaliar a segurança da barragem, que já apresentava sinais de instabilidade, buscar soluções para garantir a estabilidade e para mitigação dos riscos possíveis. Três meses após o término dos estudos no local, a barragem rompeu, confirmando as previsões e destacando o ponto mais vulnerável a falhas. Isso demonstrou a eficácia dos processos de investigação e de determinação de parâmetros do material constituinte do aterro e o fator de segurança do talude e proporcionou a aplicação da teoria em prática.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a empresa Técnica Engenharia, que gentilmente realizou os ensaios de cisalhamento direto com todo o acompanhamento do processo e explicações aos estudantes, também a nosso professor Orientador Dr. Flavio Ornelas, que sempre esteve presente orientando e ajudando em nosso trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional do Águas (Brasil) (2016). Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem / Agência Nacional das Águas. - Brasília: ANA, 218 p. il. – (Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, 2)
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181. Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2014). ASTM D854-14: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
- ASTM International (2014). ASTM D3080M-11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)
- BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília, DF: Presidência da República.
- Das, B.M., Sobhan, K. (2014). Fundamentos de engenharia geotécnica. Tradução da 8. Ed norte-americana. São Paulo: Cenagage Learning, 562p
- FAIÇAL, Massad. (2010); Obras de Terra: Curso básico de geotecnia 2ª edição, 216p.
- SCHANAID, F. Ensaios de Campo e suas aplicações à engenharia de fundações. Editora Oficina de Textos. 224p, 2012
- FERREIRA, F. L. J. Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer. Fevereiro de 2012. Acessado em: Acesso em: 11/04/2024.