

ESTUDOS LABORATORIAIS PARA A ANÁLISE DO FENÔMENO DE EROÇÃO INTERNA

Gabriela Rodrigues Moreira*

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental /Brasília/Brasil

André Luís Brasil Cavalcante

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental /Brasília/Brasil

Katherin Rocio Cano Bezerra da Costa

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental /Brasília/Brasil

RESUMO

As falhas em projetos de barragens, apresentam sérias consequências sociais, ambientais e econômicas, sendo o fenômeno de erosão interna ou *piping* a segunda principal causa responsável por estas falhas. Segundo a literatura, o *piping* representa 46% dos casos de rupturas em barragens, evidenciando assim a importância do estudo deste fenômeno físico. A análise do *piping*, é feita comumente através de simulações numéricas, onde é possível incorporar as características do maciço. No entanto, neste trabalho, é proposta uma metodologia para a análise do potencial de erosão interna em laboratório, desenvolvendo um modelo reduzido que represente a geometria, o tipo de barragem e as características físicas e hidráulicas do material. Como caso de estudo, nesta pesquisa, foi considerada uma barragem de gravidade hipotética, com uma fundação composta por um material granular, o qual foi caracterizado em laboratório. Foi implementada uma metodologia de seis etapas para a montagem do modelo, garantindo uma padronização dos ensaios e da reprodução de cada teste. O modelo reduzido foi construído em um aquário de vidro onde se empregou um protótipo de acrílico para simular a barragem de gravidade. Cada ensaio realizado no sistema construído, precisou de algumas horas em funcionamento para a visualização das linhas de fluxo e da erosão interna no contato aterro-fundação. Foi possível então, implementando a metodologia proposta, o monitoramento visual do fenômeno de erosão interna e, também, a erosão no centro do pé da barragem. A montagem deste sistema permitiu representar satisfatoriamente as linhas de fluxo, as quais foram validadas no software *SEEP/W* do *GeoStudio*, confirmando que uma barragem construída em solos porosos é muito susceptível a geração de erosão interna, trazendo como consequência inevitável, a falha de barragem. Assim, torna-se este trabalho, uma metodologia inicial para aprimorar futuramente a modelagem em laboratório de diferentes tipos de barragens com o objetivo de avaliar antecipadamente o potencial de desenvolvimento de *piping*.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão Interna, Barragem de Gravidade, Linhas de Fluxo, Modelo Reduzido.

ABSTRACT

The failures in dam projects present serious social, environmental, and economic consequences, with the internal erosion phenomenon or piping being the second cause responsible for these failures. According to the literature, piping represents 46% of the cases of dam failures, thus highlighting the importance of studying this physical phenomenon. The analysis of piping is commonly done through numerical simulations, where it is possible to incorporate the characteristics of the massif. However, in this work, a methodology is proposed for the analysis of the potential for internal erosion in the laboratory, developing a reduced model that represents the geometry, the type of dam, and the physical and hydraulic characteristics of the material. As a case study, in this research, a hypothetical gravity dam was considered, with a foundation composed of a granular material, which was characterized in the laboratory. A six-step methodology was implemented for the assembly of the model, ensuring standardization of the tests and the reproduction of each test. The reduced model was built in a glass tank where an acrylic prototype was used to simulate the gravity dam. Each test performed on the constructed system required a few hours of operation to visualize the flow lines and internal erosion in the embankment-foundation

*Autor correspondente: grmoreira6@gmail.com



contact. It was then possible, by implementing the proposed methodology, to visually monitor the internal erosion phenomenon and also the erosion at the foot of the dam. The assembly of this system allowed for a satisfactory representation of the flow lines, which were validated in the GeoStudio software SEEP/W, confirming that a dam built on porous soils is very susceptible to internal erosion generation, bringing as an inevitable consequence, dam failure. Thus, this work becomes an initial methodology to improve future laboratory modeling of different types of dams in order to evaluate in advance the potential for piping development.

KEYWORDS: Internal Erosion, Gravity Dam, Flow Lines, Reduced Scale Mode.

1. INTRODUÇÃO

Barragens são obras de engenharia construídas transversalmente ao um curso d'água com o objetivo de deter uma grande quantidade de água para fins de produção energética, controle de vazão para navegação, irrigação, abastecimento urbano, entre outras atividades que se beneficiam de grandes reservatórios (CHIOSSI, 2013).

Por ser uma obra de grande dimensão, uma possível falha no projeto gera inúmeras consequências sociais, ambientais e econômicas. Segundo dados estatísticos, a erosão interna é responsável por 46% das falhas em barragens, o *overtopping* é responsável por 48% e as falhas estruturais são responsáveis por 6% (CALDEIRA, 2018). Diferente do *overtopping* e das falhas na elaboração do projeto estrutural, a detecção da erosão interna normalmente ocorre já em um estágio de ruptura avançado da barragem, pois é um fenômeno interno e progressivo, sendo assim, difícil de identificar a olho nu e necessitando de sistemas sofisticado para sua detecção. A erosão interna consiste no carreamento de partículas de solo devido ao fluxo de água no corpo da barragem, na fundação, ou entre aterro e fundação (MOURÃO & TORRES, 2019).

Este trabalho terá como foco o estudo da erosão interna em fundações de barragens, com reprodução de ensaios em ambiente controlado com possibilidade da análise da influência das linhas de fluxo no fenômeno da erosão interna.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Barragens

Para projetar uma barragem, algumas condições devem ser atendidas de acordo com o tipo de barragem e da função desempenhada no período de operação. Os três principais tipos de barragens são

barragem de terra, barragem de enrocamento e barragem de concreto (CRUZ, 2004).

As barragens de terra normalmente possuem taludes mais suaves, com isso, apresentam bases mais largas, aumentando o volume do maciço. Essas barragens podem ser homogêneas ou zonadas, sendo indicado a construção de filtros internos para o escoamento da água que percola no interior do maciço.

As barragens de enrocamento são compostas predominantemente por material rochoso, podendo ter uma face impermeável, seja de concreto, material asfáltico ou outros materiais e possuem núcleos impermeáveis compostos por material argiloso. Normalmente, este tipo de barragem apresenta base menor que as barragens de terra e taludes mais inclinados (TONUSSI, 2017).

Por fim, as barragens de concreto são, entre os tipos apresentados, a de menor volume e são classificadas em dois tipos: barragens de gravidade e barragens de contrafortes.

As barragens de concreto tipo gravidade, apresentam uma seção levemente trapezoidal e depende das condições topográficas. Por outro lado, as barragens de concreto tipo contrafortes, tem uma placa de concreto armado que cumpre a função de contraforte em direção a jusante para direcionar a carga até as fundações. Este último tipo de barragem, disponibiliza a estrutura com maior resistência na parte a jusante, resistindo à pressão da coluna d'água com seu próprio peso transmitindo-a para a fundação (TONUSSI, 2017).

2.2 Fenômeno de Fluxo em Barragens

De acordo com a geotecnia clássica, os vazios do solo podem ser preenchidos por água e/ou ar, que sob diferença de potenciais, as partículas de água se deslocam num único sentido pelo interior do solo, conhecido como fluxo unidimensional. A análise desse fenômeno é de extrema importância para prever o comportamento e resolver problemas

práticos da engenharia geotécnica (PINTO, 2011).

Segundo a Lei de Darcy, a velocidade de infiltração da água por uma determinada área é definida por:

$$v = ki \quad (1)$$

onde, v é a velocidade de descarga [m/s], k é a coeficiente de permeabilidade [m/s] e i é o gradiente hidráulico [adimensional].

Destaca-se a relação linear entre a velocidade e o gradiente hidráulico, sendo assim o coeficiente de permeabilidade é uma constante característica do material (DAS, 2019).

Por fim, outro conceito importante que será abordado no ensaio são as redes de fluxo, que em um meio poroso, são compostas pelo conjunto das linhas de fluxo e linhas equipotenciais, como observado na Figura 1. Sendo, as linhas de fluxo o caminho que a água percorre no meio e as linhas equipotenciais são a união de pontos com a mesma carga hidráulica.

Algumas formas para determinar as linhas de fluxo são através da construção de modelos físicos ou de modelos reduzidos em escala, como também com a utilização de softwares comerciais numéricos.

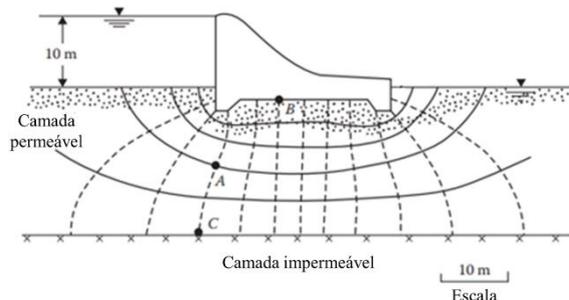


Figura 1. Formação das linhas de fluxo em uma barragem (modificado de Das, 2019).

2.3 Erosão Interna em Barragens

Segundo a NBR 13028 (ABNT, 2017), para garantir a segurança em uma barragem durante seu projeto, deve-se analisar os riscos de ocorrer erosão interna, também conhecida como *piping*. A erosão interna pode ocorrer tanto no maciço, quanto na fundação de uma barragem quando a força de percolação for alta o suficiente para mover partículas do solo criando uma espécie de canal para passagem da água.

Segundo ASDSO (2019), erosão interna ocorre

mais frequentemente perto de tubos e vertedouros, em rachaduras, itens associados a barragem ou na fundação.

Uma das formas de analisar o risco de uma barragem desenvolver *piping* é por meio de ensaios laboratoriais, a fim de conhecer as propriedades dos materiais que compõem o maciço e a fundação. Assim, é necessário determinar os parâmetros físicos e hidráulicos dos materiais.

De acordo com Das (2019), é possível determinar a formação do fenômeno de erosão interna quando há um fluxo ascendente e o gradiente hidráulico for igual ao gradiente crítico. O gradiente crítico pode ser determinado de acordo com:

$$i_{cr} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} \quad (2)$$

onde, i_{cr} é o gradiente hidráulico crítico [adimensional], γ_{sub} é peso específico saturado do solo [kN/m³], γ_w é peso específico da água [kN/m³].

O coeficiente de permeabilidade do solo, conhecido também como condutividade hidráulica, deve ser determinado através de ensaios laboratoriais de acordo com a NBR 13292 (ABNT, 2021), pois com os valores obtidos é possível realizar análises de estabilidade de barragens, por exemplo, e avaliar as estruturas de contenção de maciços sujeitos a forças de percolação (DAS, 2019).

Observa-se que a erosão interna pode ocorrer de três formas: (1) através do aterro como apresentado na Figura 2, (2) através da fundação como apresentado na Figura 3 e (3) através do contato aterro e fundação apresentado na Figura 4 (USACE, 2015).

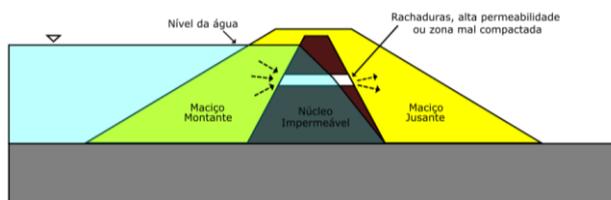


Figura 2. Fenômeno da erosão interna através do aterro (modificado de USACE, 2015).

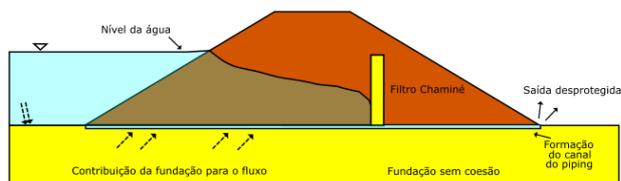


Figura 3. Fenômeno da erosão interna através da fundação (modificado de USACE, 2015).

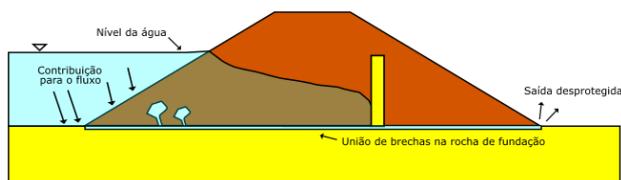


Figura 4. Fenômeno da erosão interna através do contato aterro e fundação (modificado de USACE, 2015).

Segundo USACE (2015), a principal causa de ruptura em uma barragem de concreto deve-se a falhas na fundação gerada pela erosão regressiva, principalmente quando são construídas sobre solo ou aluviões, que será o modelo reproduzido no ensaio laboratorial.

A erosão regressiva inicia em uma zona de escoamento livre e sem filtros, tanto no aterro quanto na fundação, acarretando no carreamento de partículas do material poroso de modo progressivo e regressivo (no sentido de jusante para montante). Em solos homogêneos esse fenômeno progride para uma erosão tubular (*piping*) quando os gradientes hidráulicos e a velocidade de percolação atingem valores críticos (CALDEIRA, 2008).

3. METODOLOGIA

A metodologia aplicada para montagem do modelo reduzido e para a simulação do fluxo foi aplicada em seis etapas (Figura 5). Seguir as etapas apresentadas a seguir foi importante para padronização dos ensaios.



Figura 5. Fluxograma da metodologia aplicada.

Inicialmente, os materiais foram escolhidos em função de sua granulometria. O recipiente utilizado para representar o meio ensaiado foi um aquário de vidro com dimensões de 0,60 x 0,26 x 0,24 m, assim foi utilizada uma areia média de construção (Figura 6) para representar a fundação analisada.



Figura 6. Material poroso selecionado.

Outro material utilizado na montagem do experimento, foi o protótipo da barragem de gravidade totalmente vedada, feita em acrílico com uma geometria hipotética típica deste tipo de barragem de concreto. As dimensões da barragem são doze centímetros de altura, sete centímetros de base e dois centímetros de largura da crista. Dentro, o acrílico foi preenchido com um pedregulho com granulometria entre 2 mm e 4,75 mm, para gerar uma resistência à carga d'água a montante e melhor visualização do ensaio. A imagem ilustrativa do protótipo de acrílico está apresentada na Figura 7.

A segunda etapa consiste na realização dos ensaios para caracterização física e hidráulica dos materiais. Para caracterizar a areia média de construção foram realizados o ensaio de distribuição granulométrica segundo a NBR 7181 (ABNT, 2016) e o ensaio de permeabilidade de carga constante segundo a NBR 13292 (ABNT, 2021).

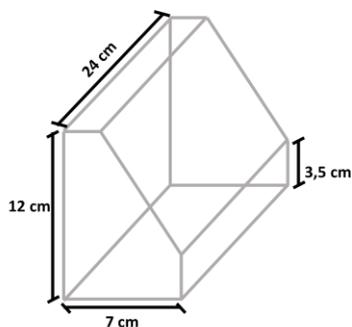


Figura 7. Protótipo de acrílico.

Após a determinação dos parâmetros geotécnicos, na etapa seguinte foi realizada a montagem da barragem e do sistema de umedecimento. Na montagem, foi realizada a compactação por percussão manual do maciço em quatro camadas de 3,8 cm, para manter a homogeneidade da compactação. Na última camada, foi posicionado com devida cautela o protótipo de acrílico mantendo a densidade homogênea como apresentado na Figura 8.



Figura 8. Montagem do sistema.

O sistema de umedecimento desenvolvido para manter o fluxo de água constante no ensaio está apresentado na Figura 9.

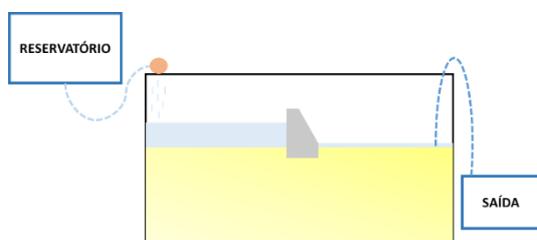


Figura 9. Esquema do sistema de umedecimento.

Na quarta etapa, com o reservatório abastecido, foi ligado o sistema de umedecimento até a saturação do material poroso e obtenção do equilíbrio da carga constante a montante, como

apresentado na Figura 10.



Figura 10. Sistema com fluxo equilibrado.

Após atingir o equilíbrio do fluxo de água através do meio poroso, foi injetado corante de cor verde na lateral do vidro para visualização da formação das linhas de fluxo. Adotou-se uma distância igual entre os três pontos que foi aplicado o corante, como apresentado na Figura 11.

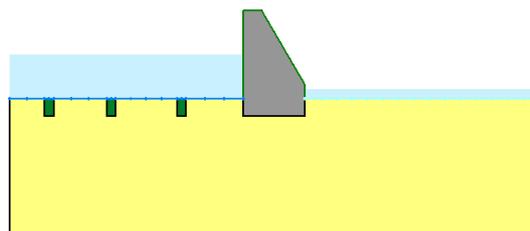


Figura 11. Esquema da aplicação do corante a montante da barragem.

Por fim, coletaram-se os dados relacionados ao processo de erosão através da fundação e formação das linhas de fluxo. Os dados serão apresentados no formato de imagens na seção a seguir, mas também foi realizado captura em vídeos.

4. RESULTADOS

De acordo com a metodologia apresentada, foi simulado o fluxo d'água de um modelo reduzido de uma barragem de gravidade. Utilizou-se para representar a fundação, uma areia de construção de granulometria média e foram realizados ensaios de granulometria e permeabilidade para caracterizá-lo.

O ensaio de granulometria foi realizado seguindo a NBR 7181 (ABNT, 2016). Observa-se na Figura 12, que o solo tem distribuição uniforme, ou seja, a maioria das partículas possuem seu diâmetro dentro de um mesmo intervalo. Um meio poroso composto por um material uniforme, gera um meio com poros maiores pelo rearranjo das partículas. Para compor a fundação do ensaio foi descartada a parte retida na

peneira nº10, assim o solo apresentaria uma maior homogeneidade (Figura 12).

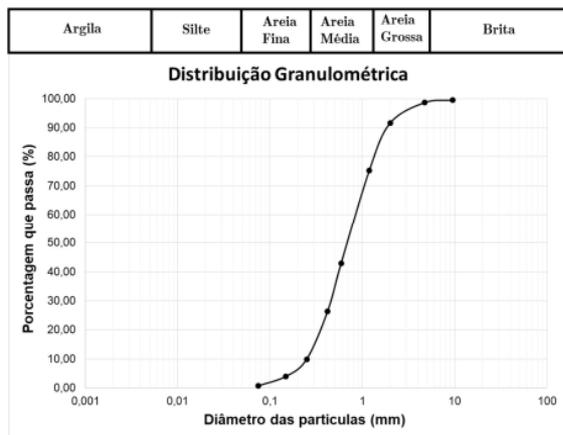


Figura 12. Distribuição Granulométrica para o material granular.

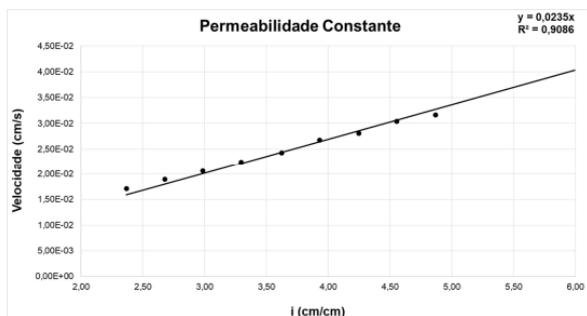


Figura 13. Ensaio de condutividade hidráulica de carga constante para solo arenoso.

A condutividade hidráulica de um solo é diretamente influenciada pela densidade. Assim, foi realizado o ensaio de permeabilidade hidráulica com uma massa específica similar ao definido para a construção da fundação da barragem no aquário de vidro.

O ensaio de permeabilidade foi executado de acordo com a NBR 13292 (ABNT, 2021), os dados obtidos estão apresentados na Figura 13.

O coeficiente de permeabilidade para a areia é igual a $2,35 \times 10^{-4}$ m/s, com um R-quadrado de 0,9, indicando que o ajuste apresenta uma ótima estimativa.

4.1 Observação das linhas de fluxo

Nos ensaios realizados, foi aplicado um fluxo constante para o preenchimento do reservatório da barragem e para o seu funcionamento. Após o preenchimento do reservatório, e da saturação da

fundação, foi aplicado um corante verde, próximo à uma das paredes laterais do aquário de vidro para a visualização das linhas de fluxo geradas no sistema (Figuras 14, 15, 16 e 17).

Para analisar a formação das linhas de fluxo, foram necessários em média de 3 horas a 4 horas de ensaio, assim é apresentado nas figuras 14, 15, 16 e 17 uma sequência de fotos para observar o fenômeno. O corante utilizado não fixou no material a montante. Assim, não foi possível observar por completo o fenômeno, porém é possível observar todo o fenômeno simulado no GeoStudio (Figura 18).



Figura 14. Início da observação das linhas de fluxo.



Figura 15. Segunda captura da formação das linhas de fluxo.



Figura 16. Terceira captura da formação das linhas de fluxo.



Figura 17. Quarta captura da formação das linhas de fluxo

No *software GeoStudio*, por meio da análise de percolação utilizando o *SEEP/W*, foi validado o resultado obtido nos testes experimentais, observando assim a formação das linhas de fluxo por meio de uma abordagem teórica, que correspondem ao visualizado no ensaio proposto neste trabalho. Na Figura 18, ressalta-se que os resultados são apresentados por meio de: setas que indicam o fluxo gerado, linhas esverdeadas que representam as linhas de fluxo e as condições de subpressão que estão identificadas acima do terreno na cor azul clara.

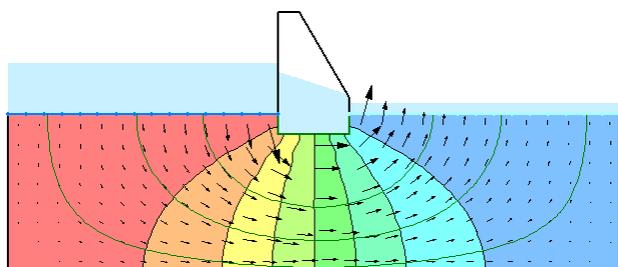


Figura 18. Análise das linhas de fluxo no *software SEEP/W*.

De acordo com a Equação (2), foi determinado o valor do gradiente hidráulico crítico com base na massa específica obtida para o material arenoso ($1,35 \text{ g/cm}^3$), o valor obtido para o i_{cr} é igual a 0,35.

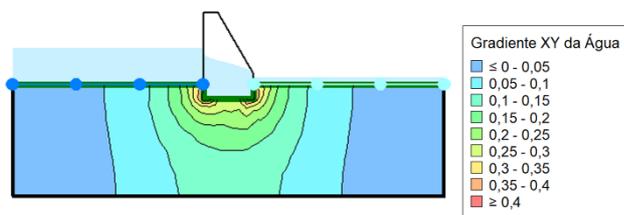


Figura 19. Gradiente hidráulico obtido através do *SEEP/W*.

Como observado na Figura 19, o gradiente

hidráulico na região mais próximo do contato aterro-fundação foi igual ou superior a 0,35. Ou seja, nessa região a tensão efetiva é nula e o material arenoso se comporta como líquido, iniciando um processo de erosão.

4.2 Fenômeno de erosão interna

A partir do momento da saturação do solo e da formação da carga d'água a montante, inicia-se um processo de erosão na fundação da barragem. Na primeira hora, começou a observar-se o carreamento de partículas nas laterais do ensaio, como apresentado na Figura 20.

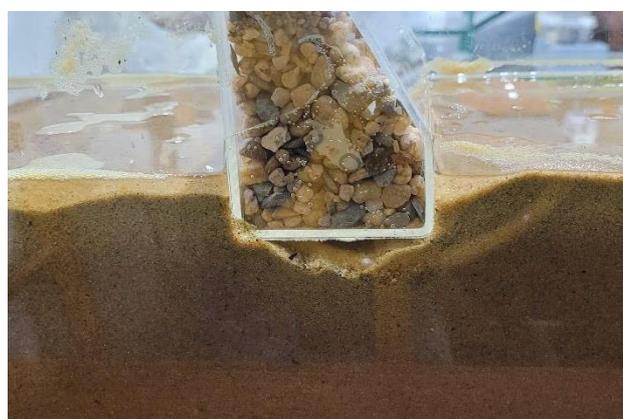


Figura 20. Observação do fenômeno da erosão interna na lateral.

Por volta da segunda hora de análise, foi observada a erosão interna no centro do pé da barragem a jusante, com a formação de tubo, iniciando uma erosão similar ao fenômeno conhecido como areia movediça, apresentado na Figura 21.

Segundo observado nos ensaios, dentro de algumas horas com o fluxo d'água constante, a progressão da erosão interna acarretava na ruptura da fundação, aumentando a passagem de água e o carreamento do material de fundação em alta velocidade.



Figura 21. Observação do fenômeno da erosão interna no meio do pé da barragem.

5. CONCLUSÃO

A montagem do modelo reduzido permitiu a observação da formação das linhas de fluxo e do fenômeno da erosão interna, proposto no início desta pesquisa.

Comprovou-se que a construção de barragens em solos porosos é muito susceptível a geração da erosão interna, como no modelo ensaiado, acarretando na ruptura da barragem. Para isto, segundo a literatura, indica-se o tratamento da fundação como medida preventiva para o desenvolvimento do fenômeno de erosão interna nesses casos. Uma forma de tratamento de fundação, é o *cut-off*, como medida de prevenção, o qual é feito através da escavação de uma parte do solo da fundação, preenchendo-o com o mesmo material compactado do maciço.

A observação das linhas de fluxo através da aplicação do corante foi muito instrutiva, propõe-se o uso deste tipo de modelos laboratoriais para melhor entender o fenômeno de fluxo em diferentes tipos de fundações e de barragens, visando diferentes alternativas para o tratamento da fundação e na previsão de possíveis desafios construtivos que podem ser gerados em função da carga piezométrica e o tipo de barragem.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos, pelo suporte dado a esta pesquisa, à Universidade de Brasília (UnB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq Projeto 305484/2020-6), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF) e à

ANEEL/Neoenergia/CEB Distribuição S.A. (Projeto PD-05160-1904/2019, contrato CEBD782/2019).

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 13028: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos de contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 2021.
- ASDSO (2019). Dam Failures and Incidents. In: <https://damsafety.org/dam-failures>.
- Caldeira, L. (2018). Internal Erosion in Dams. *Soils and Rocks*, São Paulo, 41(3): 237-263.
- Caldeira, L. & Santos, R. (2008). Processos de erosão interna em barragens de aterro e suas fundações. XI Congresso Nacional de Engenharia. Coimbra, Portugal. Em: <http://repositorio.inec.pt:8080/jspui/handle/123456789/12267>.
- Chiossi, N.J. (2013). *Geologia de engenharia*. 3.ed, Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil. Em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/162912/epub/246>.
- Cruz, P. T. (2004). *100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto*. 2. ed. Oficina de Textos. São Paulo, SP, Brasil.
- Das, B. M. & Sobhan, K. (2019). *Fundamentos de engenharia geotécnica*. 9. ed., Cengage Learning, São Paulo, SP, Brasil.
- Mourão, B.G. & TORRES, C.O. (2019). *Análise Probabilística de Piping em Barragens*, Publicação G.PF-001/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 75 p.
- Pinto, C.S. (2011) *Curso básico de mecânica dos solos*. 3 ed. Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil.
- USACE (2015). *Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis*. Department of the Interior, Bureau of Reclamation e U.S. Army Corps of Engineers. U.S.
- Tonussi, A.P. (2017). *Estudo de ruptura de barragem por piping*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. 65 p.