



## INFLUÊNCIA DO TEOR DE HUMIDADE NA ROTURA DE BARRAGENS DE ATERRO POR GALGAMENTO

Teresa ALVAREZ<sup>1,2</sup>, Solange VALENTE<sup>1</sup>, Silvia AMARAL<sup>1</sup>, Teresa VISEU<sup>1</sup>, Rui M.L. FERREIRA<sup>2</sup>

1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC); Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal  
talvarez@lneec.pt, svmendes@lneec.pt, samaral@lneec.pt, tviseu@lneec.pt

2. CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa; Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal  
teresa.alvarez@tecnico.ulisboa.pt, ruimferreira@ist.utl.pt

### RESUMO

O presente trabalho consiste na comparação de dois ensaios experimentais de rotura por galgamento de barragens de aterro homogéneas com diferentes teores de humidade. As barragens foram construídas em condições idênticas de composição do solo (mesma curva granulométrica), condições de material de aterro (grau de compactação e teor em água) e dimensões. Num dos ensaios, após a construção, encheu-se totalmente a albufeira da instalação experimental, permitindo a total saturação do aterro a ensaiar.

A análise dos ensaios baseou-se na comparação da evolução do processo de rotura, tanto em termos de taxa de evolução lateral da erosão ao nível da brecha como na evolução do hidrograma efluente. A reconstrução 3D da barragem erodida, durante o processo de evolução da rotura, serviu igualmente como forma de comparação de resultados entre os dois ensaios.

A informação necessária para a análise da morfologia da brecha foi obtida por ferramentas de análise de imagem, nomeadamente aplicadas a informação de imagens digitais adquiridas com câmaras HD e com um sensor de movimento (Kinect). O hidrograma efluente foi obtido por balanço de massa na albufeira, onde são monitorizados quer o caudal afluente, quer os níveis de água com sondas ultrasónicas.

O efeito do teor de humidade sobre a evolução do processo de rotura e desenvolvimento da brecha foi bastante evidente. A saturação do aterro conduziu a um processo de rotura significativamente mais lento, tendo o tempo de rotura sido estendido para aproximadamente o triplo do que ocorreu no ensaio onde o aterro não se encontrava saturado.

**Palavras-Chave:** barragens de aterro; rotura por galgamento; teor de humidade

### 1. INTRODUÇÃO

A rotura de barragens pode causar perdas de vidas e danos materiais elevados (Wahl, 2004; Yochum et al., 2008). O estudo da rotura de barragens de aterro é de particular relevância já que estas totalizam cerca de 3/4 das grandes barragens a nível mundial (ICOLD, 2003), sendo o galgamento responsável por cerca de 34% dos acidentes (ASCE, 2011).

Estudos experimentais anteriores permitiram caracterizar os principais mecanismos de rotura em barragens de aterro, evidenciando as diferenças entre o comportamento de aterros com solos coesivos e não coesivos (Morris et al., 2009). Estudos anteriores verificaram também que a taxa de erosão e a evolução da rotura está diretamente relacionada com as propriedades do material do aterro, nomeadamente com a densidade, teor de humidade e grau de compactação (Hanson et al., 2005; Morris et al., 2009).

No que respeita à monitorização dos ensaios, as variáveis mais comumente estudadas são a caracterização do hidrograma efluente da rotura e do processo de erosão da brecha. A morfologia 2D da brecha foi caracterizada por vários autores com base em perfis longitudinais e/ou transversais e pela largura da brecha (Hanson et al., 2005; Walder et al., 2015). A reconstrução 3D da superfície em rotura foi caracterizada por recurso a sensores de inclinação, de deformação e através de técnicas de pós-processamento aplicado a imagens com câmaras de alta velocidade (Yusof et al., 2018), à deteção digital de traçadores incluídos no corpo da barragem (Cestero et al., 2015), a varrimentos 3D de laser (Rifai et al., 2017) e à utilização de sensores KINECT (Amaral et al., 2018).

# 14.º SILUSBA

No presente trabalho avalia-se a influência do teor de humidade no início do ensaio no processo de rotura de barragens de aterro, pela comparação dos resultados de dois ensaios realizados em condições idênticas de composição do solo, compactação e geometria do corpo da barragem. Esta análise é efetuada com recurso à reconstrução 3D da brecha, utilizando um sensor de movimento (KINECT), e ao hidrograma efluente da brecha.

## 2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram realizados numa instalação de média escala, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. As barragens de aterro, com 0,45 m de altura e 1,20 m de largura são construídas no canal principal da instalação (Fig. 1). A montante do aterro é criada uma albufeira com cerca de 2,1 m<sup>3</sup>. Na zona da albufeira, existe um orifício de fundo, DN200, que permite o seu esvaziamento rápido.

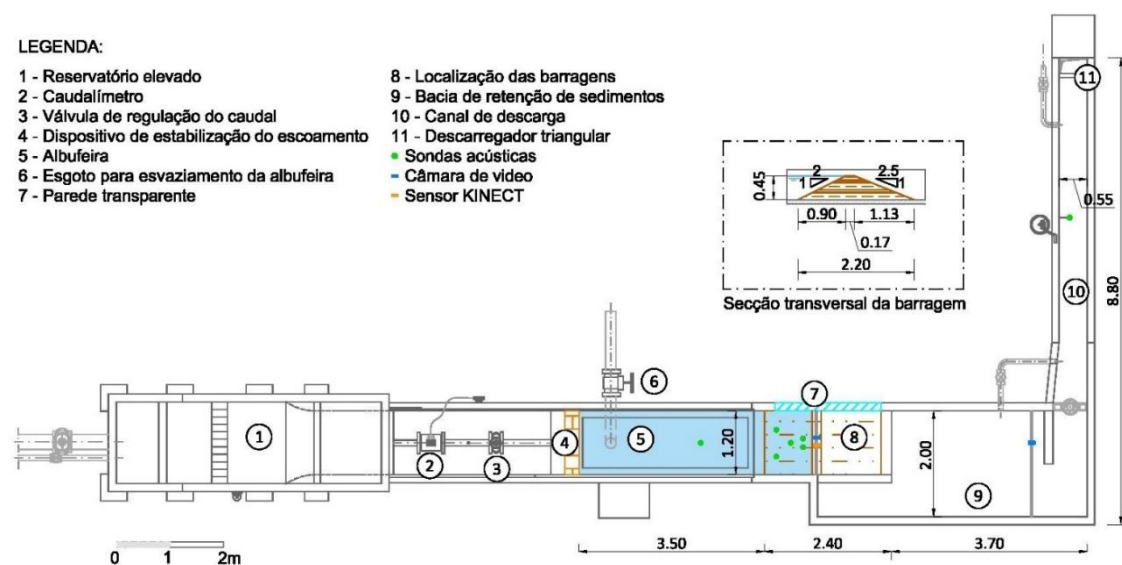


Fig. 1. Planta da instalação experimental e secção transversal da barragem.

Os aterros ensaiados são constituídos por uma areia siltosa (SM – ASTM D2487-11) com 25% de finos; foram compactados com 90% e um teor em água de -2,1% dos valores de referência do Proctor Standard. Num dos ensaios, após a construção, encheu-se a albufeira da instalação experimental até ao coroamento da barragem e aguardou-se 24h até à realização do ensaio, permitindo a total saturação do aterro a ensaiar. Os ensaios foram conduzidos com nível da albufeira constante, igual à cota de coroamento da barragem, mantido através da regulação manual do caudal afluente.

Durante os ensaios foram monitorizadas as seguintes variáveis: i) caudal afluente ao canal, com recurso a um caudalímetro digital; ii) níveis de água na albufeira, com recurso a sondas de nível acústicas; iii) caudal efluente do canal de descarga, através da medição do nível neste canal com recurso a uma sonda acústica; iv) evolução da morfologia da brecha, com recurso a duas câmaras de vídeo HD, uma instalada sobre o aterro e outra a jusante; v) caracterização 3D da morfologia da brecha em diversos instantes com recurso a dois sensores de movimento KINECT. A monitorização das variáveis i) e ii) permite a obtenção dos hidrogramas efluentes da brecha através do balanço de massa na albufeira.

Para a realização de v) os ensaios foram interrompidos três vezes, de forma quase instantânea, através do corte de caudal afluente e esvaziamento da albufeira. Os sensores KINECT apesar de permitirem uma medição não intrusiva das superfícies da brecha, não conseguem fazer leituras sob o escoamento da barragem em rotura, uma vez que a elevada turbidez do escoamento originada pelos sedimentos em suspensão não permite a visualização das superfícies submersas. A reconstrução 3D da morfologia da brecha foi conseguida através da aquisição de várias imagens de topo e vistas de jusante que permitiram a total visualização das cavidades de erosão e dos diversos pontos alvo de coordenadas conhecidas para efeitos de alinhamento e georreferenciação.

### 3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Em ambos os ensaios realizados foi observado o processo de rotura de barragens de terra homogéneas descrito na literatura: numa primeira fase formam-se pequenas ravinas e sulcos, após as quais a brecha tende a alargar por infraescavação com erosão regressiva, originada pelas cavidades que se formam no interior do corpo da barragem por ação do escoamento fortemente turbulento e tridimensional que se gera quando a erosão atinge a fundação da barragem (Fig. 2).



Fig. 2. Evolução da brecha no Ensaio 1.

Ambos os ensaios foram interrompidos para a caracterização 3D na morfologia da brecha em instantes com características semelhantes, sendo que o primeiro instante de paragem corresponde a uma fase inicial de erosão regressiva e ligeiro alargamento da brecha. A segunda e terceira paragens foram feitas com a formação da queda vertical e com o término do ensaio, quando a superfície da queda vertical atinge o coroamento da barragem. Na Fig. 3 apresentam-se os modelos digitais do terreno obtidos através da reconstrução 3D da morfologia da brecha para o início e para os instantes de paragem dos ensaios. Na

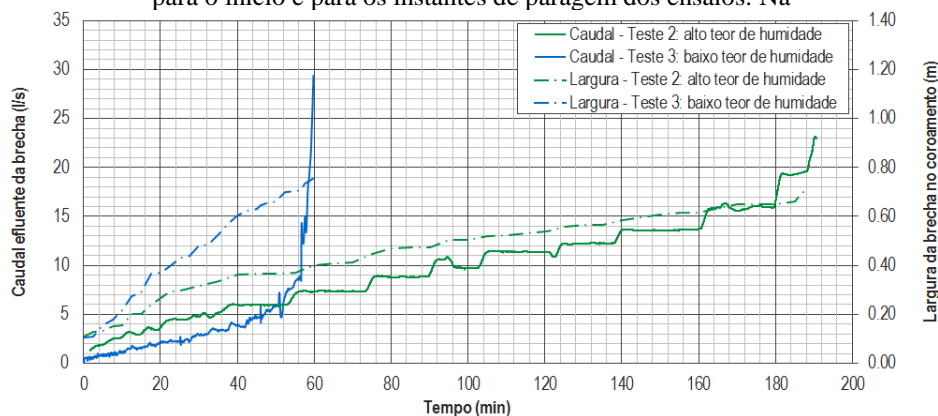


Fig. 4 apresentam-se os hidrogramas efluentes da brecha e a evolução da largura da brecha medida no coroamento.

Nos dois ensaios foram observados processos de rotura idênticos, no entanto com evolução temporal bastante distinta: a erodibilidade do aterro saturado diminuiu bastante, conduzindo a uma evolução do processo de rotura bastante mais lenta. O tempo de rotura no caso do aterro saturado foi cerca de três vezes superior ao do ensaio em que o aterro não se encontrava saturado

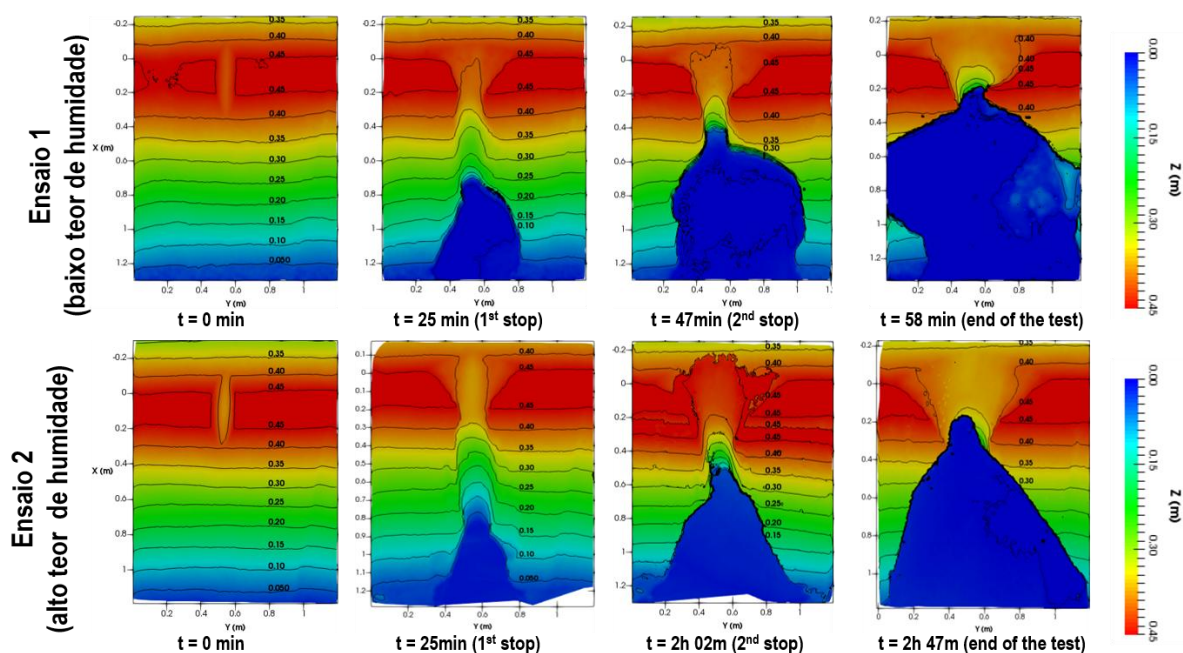


Fig. 3. Reconstrução 3D da brecha: modelo digital da brecha e das curvas de nível obtidas.

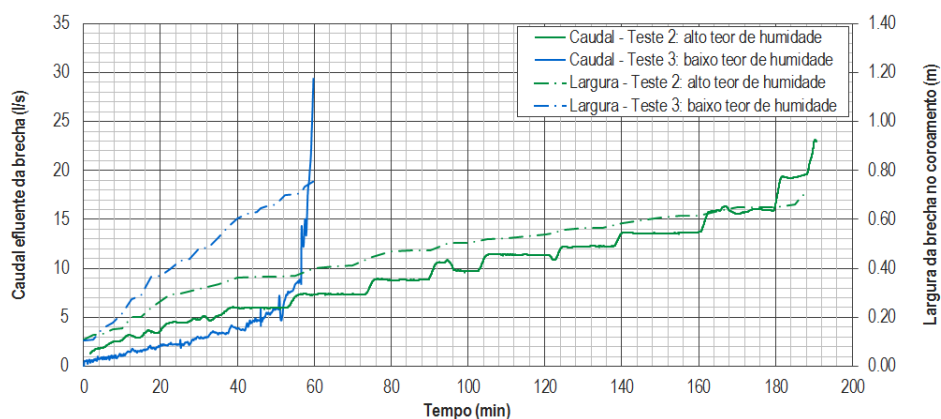


Fig. 4. Hidrograma efluente da brecha e largura da brecha no coroamento.

#### 4. CONCLUSÃO

O presente trabalho refere-se à influência do teor de humidade na rotura por galgamento em barragens de aterro coesivas. Para este efeito comparam-se os resultados experimentais de dois ensaios de rotura de aterros homogéneos, construídos com uma areia siltosa com 25% de finos, em condições idênticas de compactação.

Foram obtidos hidrogramas efluente da brecha por balanço de massa na albufeira e realizada a caracterização 3D da morfologia da brecha em instantes seleccionados (com características de evolução da rotura semelhantes), com recurso a sensores de movimento, KINECT. Para esta caracterização foi necessária a interrupção dos ensaios.

Em ambos os ensaios realizados foi possível reproduzir experimentalmente os principais mecanismos de rotura geralmente observados em barragens de terra homogéneas, nomeadamente, nos instantes iniciais do galgamento, a erosão ravinosa. Após a formação das primeiras ravinas e sulcos, a brecha tende a alargar, essencialmente por infraescavação com erosão regressiva (para montante). Esta última é originada pelas cavidades que se formam no interior do corpo da barragem por ação do escoamento fortemente turbulento e tridimensional que se gera quando a erosão atinge a fundação da barragem.



Nos dois ensaios observou-se uma evolução temporal da rotura bastante diferente. O aterro saturado apresenta uma menor erodibilidade, condicionando o desenvolvimento da brecha por erosão regressiva e diminuindo a sua susceptibilidade para a infra-escavação. Neste caso, o processo de rotura foi significativamente mais lento, tendo o tempo total de rotura aumentado cerca de três vezes.

#### **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho é parcialmente financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto PTDC/ECI-EGC/31618/2017 e das bolsas de doutoramento SFRH/BD/47694/2008 e PD/BD/127801/2016.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ASCE. (2011). Earthen embankment breaching. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(12), 1549–1564.
- Hanson, G. J., Cook, K. R., & Hunt, S. L. (2005). Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments. *Transactions of The ASAE*, 48(5), 1783–1794.
- ICOLD. (2003). World Register of Dams.
- Morris, M., Hassan, M., Kortenhaus, A., & Visser, P. (2009). *Breaching Processes: A state of the art review. FLOODsite Report T06-06-03*.
- Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(5), 389–397.
- Yochum, S. E., Goertz, L. A., & Jones, P. H. (2008). Case study of the Big Bay Dam failure: accuracy and comparison of breach predictions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9), 1285–1293.