



MODELAGEM DE BRECHAS DE RUPTURA EM BARRAGENS DE TERRA

Alexandre Ângelo Carmo Luiz da Silva¹ ; Julian Cardoso Eleutério²

Palavras-Chave – Dam-Break, Hidrograma de ruptura, Inundação

INTRODUÇÃO

Rupturas de barragens são classificadas como desastres podendo ser oriundos de causas naturais como cheias e terremotos, ou antrópicas, como manutenção inadequada e ações terroristas. O repentino desprendimento do volume armazenado, ocasionado por uma falha estrutural, pode apresentar grande potencial de danos por inundação nas áreas a jusante. Dessa forma, barragens são obras de infraestrutura que precisam ser gerenciados. Considerando que não há risco zero, sempre haverá uma possibilidade, mesmo que remota, da ocorrência de falhas, o que torna necessária a implementação de um plano de ações para corrigi-las ou alertar a população potencialmente atingida e evacuar a área em risco. O estudo de ruptura hipotética de barragem é a ferramenta mais indicada para análise de riscos e, portanto, representa um subsídio fundamental para o desenvolvimento de outros instrumentos utilizados na gestão desse risco, como os Planos de Ação de Emergência (PAE), Planos de Contingência, Planos de Evacuação e Sistemas de Alerta.

A etapa de definição das brechas de ruptura é uma das etapas mais sensíveis do estudo, sendo até mesmo mais relevante do que coeficientes de atrito para previsão de profundidades de inundação (Morris & Hassan, 2005). Essa etapa fundamenta a predição da taxa de esvaziamento dos reservatórios e, consequentemente, a estimativa do hidrograma defluente em caso de falha. Dessa forma, entende-se que a simulação do processo de formação das brechas de ruptura deve ser realizada com grande cautela e fortemente embasada em conceitos teóricos que regem o processo. O presente trabalho resume aspectos conceituais dos modelos de formação de brecha de ruptura com o intuito de promover uma discussão sobre o uso desses e sobre as incertezas envolvidas na simulação de brechas e consequente síntese dos hidrogramas associados a rupturas hipotéticas.

MODELOS DE BRECHA

A modelagem de uma brecha de ruptura de barragem tem como objetivos a previsão de seu desenvolvimento ao longo do tempo e estimativa de sua geometria final. Existem diferentes metodologias para se alcançar esses objetivos, podendo ser agrupadas nas categorias apresentadas na Tabela 1. Em função da existência de diferentes tipos de modelos, é importante o entendimento dos conceitos teóricos envolvidos em cada um deles, para que não sejam feitas considerações equivocadas na etapa de configuração e aplicação desses.

A análise comparativa foi um dos primeiros recursos para se desenvolver estudos de ruptura hipotética. Casos reais de ruptura de barragens são registrados desde o início da utilização dessas estruturas pela humanidade, dando origem a uma base de dados com diversos casos históricos. Johnson & Illes (1976), foram dos primeiros autores a publicarem uma base de classificação quanto à forma das brechas de ruptura de barragens em terra, gravidade e arco a partir da análise de registros de casos reais de ruptura (Wahl, 1998). Em função da singularidade de cada barragem, a modelagem

1) Aluno no programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais e Engenheiro na Pimenta de Ávila Consultoria, Brasil. alexandreangelo89@yahoo.com.br;

2) Professor pesquisador no Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, e no programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. 31-34091882; julian.eleuterio@gmail.com.



baseada na simples análise comparativa é considerada limitada e incerta, estando em desuso e fora das guias de diretrizes para elaboração dos estudos de ruptura hipotética (FEMA, 2013 e ANA, 2016).

Tabela 1 – Tipos de modelos de brecha de ruptura de barragem (adaptado de Wahl, 1998)

Categoria	Descrição
Análise Comparativa	Caso a barragem em análise seja muito similar em tamanho e modo construtivo a um caso de ruptura bem documentado na literatura, pode-se estimar os parâmetros da brecha de ruptura simplesmente a partir da análise comparativa entre os casos.
Equação de Previsão	Estimativa dos parâmetros de brecha a partir de equações empíricas baseadas na análise de regressão das informações obtidas em casos históricos.
Modelos Paramétricos	Simulação temporal do processo de formação da brecha a partir de parâmetros estimados com base em estudos de caso (equações de previsão ou análise comparativa).
Modelos Fisicamente Baseados	Simulação do desenvolvimento da brecha de ruptura com base nos princípios da hidráulica, transporte de sedimentos e mecânica dos solos.

Mais robustas, as equações de previsão de brecha são modelos baseados em expressões algébricas resultantes da análise de regressão, linear ou múltipla, de casos históricos de ruptura de barragem, nos quais as características geométricas dos reservatórios são utilizadas como variáveis explicativas dos parâmetros de brecha observados. Usualmente, a carga hidráulica e o volume desprendido do reservatório são as variáveis explicativas utilizadas, porém, existem alguns modelos que consideram efeitos da erodibilidade dos maciços, acrescentando características físicas das barragens à estimativa dos parâmetros de brecha. Os modelos de predição de brecha baseados em dados empíricos apresentam a vantagem de serem de mais fácil aplicação. Para definição dos parâmetros da brecha, utilizam-se características das barragens que podem ser obtidas de maneira direta como a altura e capacidade volumétrica do barramento. Dessa forma, esses modelos têm sido os mais utilizados na definição dos parâmetros de brecha necessários à elaboração de estudos de ruptura (Wahl et al., 2008; Zenz e Goldgruber, 2013). Segundo FEMA (2013), as equações propostas por MacDonald & Langridge-Monopolis (1984), Froehlich (1995 e 2008), Von Thun & Gillette (1990) e Xu & Zhang (2009) constituem os principais modelos de predição de brecha descritos na literatura. Esses modelos apresentam comportamentos distintos e é difícil prever qual dos modelos empíricos é o mais indicado para a estimativa dos parâmetros de uma brecha de ruptura no caso de um estudo hipotético. Autores como Ferentchak & Jamieson (2008) propõem uma metodologia para validação da forma final da brecha baseada em cinco critérios para facilitar a escolha do modelo de formação de brecha considerando a factibilidade das dimensões encontradas, as taxas de erosão, análise técnica dos hidrogramas resultantes, tempo mínimo de formação da brecha e as condições de contorno da modelagem. Outros autores propõem, com base nos casos históricos registrados, valores limites para os parâmetros das brechas conforme apresenta Wahl (1998) e FEMA (2013).

Já os modelos paramétricos foram desenvolvidos a partir da necessidade de simular o processo de abertura das brechas de ruptura de maneira mais direta ao se comparar com a complexidade envolvida na aplicação de modelos de brecha fisicamente baseados. Os modelos paramétricos consistem, basicamente, na parametrização do processo de abertura da brecha de ruptura ao longo do tempo, tendo como referência a geometria final e o tempo de formação da brecha, que podem ser estimados a partir dos modelos empíricos de predição ou por análises comparativas. Esses modelos simulam a progressão temporal dos parâmetros das brechas de forma linear, não-linear ou senoidal. A taxa de progressão da abertura da brecha pode ser representada pelo parâmetro β , no qual a relação proposta por Fread e Lewis (1998) representa a forma de progressão linear e não-linear, enquanto a forma de desenvolvimento senoidal foi proposta por Brunner (2002). A partir da taxa de progressão de brecha é possível estabelecer uma relação paramétrica para simular o processo de abertura da brecha de ruptura, avaliando a evolução temporal dos parâmetros de brecha.



Finalmente, os modelos fisicamente baseados combinam conceitos chaves de hidráulica e geotecnia, como a avaliação do regime de escoamento, processos erosivos e estabilidade de taludes, para predizer, analiticamente ou numericamente, o processo de formação de brecha em barragens de terra. Segundo Morris (2013), para a simulação dos processos envolvidos na formação de uma brecha de ruptura em barragens de terra são propostas duas abordagens teóricas, uma baseada no conceito do estado de Equilíbrio do Transporte de Sedimentos (ETS) e outra baseada na dinâmica erosiva dos solos. As relações estabelecidas pelo ETS normalmente foram desenvolvidas a partir da análise de longo termo do comportamento morfológico dos leitos de rios, adotando a premissa da ocorrência de um escoamento na calha em estado permanente, aquele em que a vazão não se altera ao longo do tempo. Esse conceito está baseado no balanço de massa dos sedimentos na entrada e na saída da seção de controle, sendo a diferença resultante correspondente ao volume erodido. Ao contrário do ETS, a abordagem a partir do conceito de erosão dos solos é aplicável a condições de não-equilíbrio, estando relacionada com a taxa de remoção de sedimentos a partir da tensão de arraste exercida pela superfície sobre a superfície do solo. Morris (2013) argumenta que o uso de equações de erosão apresenta duas vantagens: a primeira é que a equação reflete o processo erosivo de forma dinâmica, ao invés do estado de equilíbrio o qual claramente não é aplicado; a segunda é a utilização do parâmetro de erodibilidade, que pode representar as variações na erosão como uma função de estado do solo. Identificado como um dos principais aspectos para a modelagem da brecha, o coeficiente de erodibilidade pode ser determinado por testes de laboratório e campo a partir de diferentes metodologias, como o EFA (Briaud et al., 2001), JET (Hanson, 1991) ou por meio de equações como a proposta por Temple e Hanson (1994), ou a desenvolvida por Hanson (2007) *apud* Morris (2013).

CONCLUSÕES

Observa-se que há na literatura uma gama de alternativas para o desenvolvimento de modelos de formação de brechas de ruptura de barragens de terra. Wahl et al. (2008) indicam que a modelagem paramétrica é a metodologia mais empregada no desenvolvimento de estudos de ruptura hipotética de barragens. Estudos mais recentes, como o benchmark proposto pelo ICOLD e editado por Zenz e Goldgruber (2013), demonstram que os modelos paramétricos seguiram sendo os mais aplicados no desenvolvimento de estudos de ruptura hipotética. Isso, apesar do aumento na aplicação de outras técnicas mais refinadas, como a modelagem fisicamente baseada, que buscam aumentar a precisão e confiabilidade na predição de brecha de ruptura de barragens de terra. Dada o contexto apresentado, ressalta-se a importância do desenvolvimento científico dos modelos de formação de brechas, com os objetivos de aumentar a precisão das estimativas e quantificar as incertezas envolvidas, permitindo uma gestão do risco de inundações associadas a ruptura de barragens com base em melhores e maiores informações.

REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas (2016). “*Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE*”. Volume IV. 129 p. Brasília, 2016.
- BRIAUD, J-L., TING, F. C., K. CHEN, H. C., CAO, Y., HAN, S. W., KWAK, K. W (2001). “*Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions*”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Reston, v. 127, n. 2, p.105-113, 2001.
- BRUNNER, G. L. (2002). “*HECRAS—River analysis system user’s manual, version 3.1.*” Rep. No. CPD-68, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California.
- FEMA – Federal Emergency Management Agency (2013). “*Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures*”. FEMA P-946.



- FERENTCHAK, J. A., JAMIESON S. L., (2008). “Using Erosion Rate to Refine Earth Dam Breach Parameters”. The Journal of Dam Safety, Vol. 6, No. 4, 2008, pgs 14-24.
- FREAD, D. L.; LEWIS, J. M. (1998). “NWS FLDWAV Model: Theoretical Description and User Documentation”. National Weather Service – NWS (NOAA). Office of Hydrology, Hydrologic Research Laboratory, Silver Springs, Maryland. 1998, 335 p.
- FROEHLICH, D. C. (1995). “Embankment Dam Breach Parameters Revisited” Water Resources Engineering, Proceedings of the 1995 ASCE Conference on Water Resources Engineering, San Antonio, Texas, August 14-18, 1995, 887-891 p.
- FROEHLICH, D. C. (2008). “Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties”. Journal of Hydraulic Engineering, v. 134, 1708-1721 p.
- HANSON, G. J. & HUNT, S. L. (2007). “Lessons Learned Using Laboratory Jet Testing Method to Measure Soil Erodibility of Compacted Soils”. Journal of applied engineering in agriculture (ASABE), Vol. 23 (No.3).305-312 p.
- HANSON, G.J. (1991). “Development of a Jet Index to Characterize Erosion Resistance Of Soils in Earthen Spillways”. Transactions ASAE, vol. 34, no. 5, pp. 2015–2020.
- JOHNSON, F.A., AND P. ILLES (1976). “A Classification of Dam Failures”. International Water Power and Dam Construction, December 1976, p. 43-45.
- MACDONALD, T. C., LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. (1984). “Breaching Characteristics of Dam Failures”. Journal of Hydraulic Engineering, v. 110. 567-586 p.
- MORRIS, M. (2013). “Breaching of Embankments and Dams”. Tese (Doutorado) – Open University.
- MORRIS, MARK W.; HASSAN, M. (2005). “Conclusions and Recommendations from IMPACT Project WP5: Combined Risk and Uncertainty”. Technical Report, European Commission.
- SCS – UNITED STATES. SOIL CONSERVATION SERVICE (1985). “National Engineering Handbook. Section 19”. Construction Inspection. Washington, D.C. :U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service.
- TEMPLE, D. M. & HANSON, G. J. (1994). “Headcut Development in Vegetated Earth Spillways”. Applied engineering in agriculture, Vol. 10 (Issue 5). 677-682 p.
- VON THUN, J. L., GILLETTE, D. R. (1990). “Guidance on Breach Parameters”. Unpublished internal document, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, March 13, 1990, 17 p.
- WAHL, T L., HANSON, G.J., COURIVAUD, J., MORRIS, M.W., KAHAWITA, R., McCLENATHAN, J.T., GEE, D.M (2008). “Development of Next-Generation Embankment Dam Breach Model’s”. United States Society on Dams, 28th Annual USSD Conference, Portland, OR. 767-779 p.
- WAHL, T. L (1998). “Prediction of Embankment Dam Breach Parameters. A Literature Review and Needs Assessment”. Water Resources Research Laboratory. U. S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. DSO. Dam Safety Office. DSO-98-004, 1998, 67 p.
- XU, Y., ZHANG, L.M. (2009). “Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(12):1957-1970 p.
- ZENZ, G., GOLDGRUBER, M (2013). “Computational Challenges in Consequence Estimation for Risk Assessment: Numerical Modelling, Uncertainty Quantification, and Communication of Results”. In:12th International benchmark workshop on numerical analysis of dams. ICOLD, Austrian National Commission on Large Dams (ATCOLD). Graz, Austria. 221-254 p.