



# ESTUDO COMPARATIVO DAS EQUAÇÕES DE FORMAÇÃO DE BRECHA EM BARRAGENS DE TERRA

**Palavras-Chave:** barragem de terra, formação de brecha, estudos de *dam break*

**Autores(as):**

**PEDRO MAIA TAVARES DE ALMEIDA [FT/UNICAMP]**

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> LAURA MARIA CANNO FERREIRA FAIS (orientadora) [FT/UNICAMP]**

**Prof. Dr. ANDRÉ LUÍS SOTERO SALUSTIANO MARTIM [FECFAU/UNICAMP]**

---

## INTRODUÇÃO:

As barragens são grandes obras de engenharia com alto grau de complexidade, e que trazem riscos associados à sua ruptura, principalmente devido à energia potencial da água armazenada nos reservatórios. Uma eventual ruptura pode provocar desastres que afetam a sociedade, meio ambiente e a economia.

Uma das exigências da Lei n. 12334/10, denominada Política Nacional de Segurança de Barragens, é que as barragens tenham seu Plano de Ação Emergencial, além do estudo de *dam break*, a partir do qual se determina a cheia induzida pelo rompimento de uma barragem. Assim, é possível a elaboração de um mapa de previsão da inundação das áreas de jusante impactadas, indicar locais/população mais vulneráveis diante da onda de inundação, além de determinar quais ações emergenciais devem ser tomadas.

Na Figura 1 mostra-se um fluxograma de um estudo de *dam break*, segundo Moon et al. (2019), sendo a determinação dos parâmetros de formação da brecha uma das etapas do estudo.

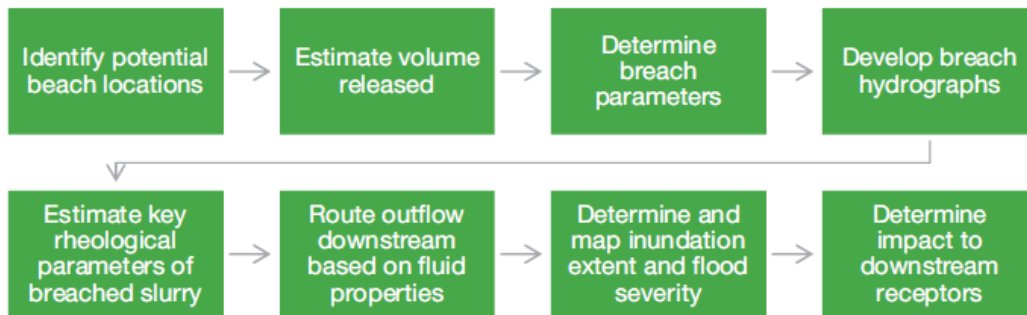
Várias características da barragem podem influenciar na determinação dos parâmetros da brecha, dentre elas podem ser citadas o tipo da barragem, material, erodibilidade do talude (em caso de galgamento), volume de saída (reservatório e vazão de cheia) e a dinâmica do escoamento a jusante da barragem (USBR, 2017; Tschiedel e Paiva, 2018; Froehlich, 2008).

Porém, uma das limitações dos modelos é justamente a formação da brecha, ou seja, a determinação de seu tamanho (largura, altura), forma e tempo de formação, já que há, de fato, poucos acidentes documentados para se trabalhar com modelos de previsão; dados são essenciais para calibração dos modelos (USBR, 1987; ICOLD, 1998)

Há na literatura vários métodos empíricos, baseados na análise estatística de dados obtidos de

falhas documentadas. Dentre eles, podem ser citados: MacDonald & Langridge - Monopolis (1984); Bureau dos EUA Reclamation (USBR-1988); Von Thun e Gillette (1990); Froehlich (1995a, 1995b, 2008).

**Figura 1.** Fluxograma de um estudo de Dam Break, segundo Moon et al. (2019)



Apesar de ser consenso que a configuração da brecha é importante, alguns autores ainda consideram outros fatores mais relevantes para a determinação da inundação do vale a jusante. Huokuna (2001) e Hooshyaripor, Tahershamsi e Razi (2017), mostram que a configuração da brecha é um dos principais determinantes da forma e intensidade do hidrograma formado a jusante, assim como o volume do reservatório (em caso do segundo autor). Porém, para Kuhlkamp (2016), Souza (2016) e Kim e Sanders (2016) os hidrogramas gerados a partir de diferentes configurações de brechas tendem a convergir para valores semelhantes no vale a jusante, com diferenças maiores para trechos próximos à barragem.

Assim, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre as equações de formação de brecha (largura e tempo de formação) para barragens de terra, encontradas na literatura. Para isso, serão utilizados dados reais de acidentes e os resultados comparados aos obtidos a partir das equações.

## **METODOLOGIA:**

Para a realização deste trabalho foram utilizados dados de acidentes de barragens, em que houve rompimento total da barragem. Foram avaliados os rompimentos em barragens de terra, já que estas são a maioria das barragens brasileiras. O banco de dados utilizado para o cálculo de largura média de brecha e tempo de formação de brecha foi o apresentado por Froehlich (2016).

A partir do levantamento realizado com o banco de dados, foi feito o cálculo da largura da brecha e do tempo de formação da brecha a partir das Equações mostradas na Tabela 1.

A partir do levantamento realizado, foi feito o cálculo da brecha a partir das equações e os resultados comparados aos resultados reais de rompimentos.

**Tabela 1:** Equações empíricas para determinação dos parâmetros da brecha, em barragens de terra.

Autor	Casos	Largura média da brecha	Tempo de formação
USBR, 1988	84	$B_b = 3H_w$	$t_f = 0,011 \times B_b$
Froehlich, 1995 <sub>a</sub>	63	$\bar{B} = 15k_{01} \times V_w^{0,32} \times H_d^{0,19}$	$t_f = 3,84V_w^{0,53} \times H_d^{-0,90}$
Froehlich, 2008	74	$\bar{B} = 0,27k_{02} \times V_w^{0,32} \times H_d^{0,04}$	$t_f = 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{gH_b^2}}$  $t_f = 0,015H_w$ $t_f = 0,020H_w$
Von Thun e Gillette, 1990	-	$B_b = 2,5H_w + C_b$	$t_f = \frac{\bar{B}}{4H_w + 61,0}$ $t_f = \frac{\bar{B}}{4H_w}$
Wahl, 1998 apud Grimaldi et al, 2010	-	$B_b = 4H_d$	-
Xu e Zhang, 2009	182	$\frac{\bar{B}}{H_b} = 0,787 \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0,133} \times \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w}\right)^{0,652} \times e^{B_3}$	$\frac{T_f}{T_r} = 0,304 \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0,707} \times \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w}\right)^{1,228} \times e^{B_5}$
Froehlich, 2016	110	$B_{avg} = 0,28 \times k_M \times k_H \times V_w^{1/3} \times W_{avg}^{-1/6} \times H_b^{1/6}$ $B_{avg} = 0,23 \times k_M \times V_w^{1/3}$	$t_f = 60,0 \times \sqrt{\frac{V_w}{gH_b^2}}$

**Fonte:** autoria própria

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Com intuito de utilizar as equações apresentadas neste trabalho, foram escolhidos 11 acidentes do banco de dados reais utilizado por Froehlich (2016). A partir destes dados, foram calculados a largura e o tempo de formação da brecha a partir das equações mostradas na Tabela 1. É importante ressaltar tais equações são equações empíricas, portanto, determinada para um intervalo de medições e características dos barramentos estudados pelos autores.

Observou-se que, tanto para a largura, quanto para o tempo de formação da brecha os valores encontrados pelas diferentes equações são coerentes. As maiores diferenças estão nas barragens com grandes volumes, sendo elas as barragens de Oros no Brasil e a barragem de Banqiao Henan na China. A equação empírica desenvolvida por Froehlich (2008) resulta em valores maiores de tempo de formação de brecha.

O tempo de formação de brecha é essencial para estudos de acidentes envolvendo barragens, já que, a partir da sua estimativa, é possível desenvolver de um plano de segurança de barragens efetivo,

definindo critérios para a evacuação da população que habita localidades a jusante da barragem. Sendo assim, a comparação de diversas equações empíricas agrega positivamente a este estudo, uma vez que valores maiores ou menores de tempo de formação da brecha podem nortear um plano de segurança eficiente ou não.

## **CONCLUSÕES:**

Este projeto teve como objetivo de comparar diferentes equações empíricas que regem a formação geométrica e temporal de brecha.

Algumas considerações devem ser feitas, como por exemplo a dificuldade de encontrar dados reais de acidentes, uma vez que tais eventos não são observáveis. Há também aqueles acidentes que ocorreram há muito tempo e pela diferença temporal, as preocupações para este tipo de acidente era diferente do que temos hoje.

Apesar da dificuldade de obtenção de dados reais, é importante a comparação das diferentes equações para cálculo da formação da brecha, já que estas são equações empíricas, obtidas a partir de um banco de dados limitado. Estas comparações norteiam decisões importantes relacionados a estudos futuros envolvendo a Lei n. 12334/10 que garante obrigatoriedade da definição do Plano de Ação Emergencial (PAE). Ter uma visão sistêmica, com diferentes resultados, garante um embasamento sólido para tomada de decisões.

As equações propostas citadas neste estudo garantem uma precisão maior com relação a incógnitas como a largura média de brecha e seu tempo de formação. A constante atualização, e talvez até uma padronização, de banco de dados envolvendo tais acidentes devem com o passar do tempo otimizar tais modelos, garantindo resultados cada vez mais precisos e calibrados.

## **BIBLIOGRAFIA**

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm).

FROEHLICH, D. C. 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, p. 887-891.

FROEHLICH, D. C. Empirical Model of Embankment Dam Breaching. **In: International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2016)**, 2016.

FROEHLICH, D. C. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 12, p. 1708-1721, 2008

HOOSHYARIPOR, F.; TAHERSHAMSI, A.; RAZI, S. Dam break flood wave under different reservoir's capacities and lengths. **Sadhana**, v. 42, n. 9, p. 1557-1569, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s12046-017-0693-x>.

KIM, B.; SANDERS, B. F. **Dam-break flood model uncertainty assessment: case study of extreme flooding with multiple dam failures in Gangneung, South Korea.** Journal of Hydraulic Engineering, v. 142, n. 5, p. 05016002, 2016. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001097](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001097).

KUHLKAMP, J. F. **Análise do efeito em cascata da propagação da onda de cheia gerada pelo rompimento hipotético de uma das barragens existentes no rio Irani-SC.** 2016. 76 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MACDONALD, T. C.; LANGRIDGE-MONOPOLIS, J.. Breaching characteristics of dam failures. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 110, n. 5, p. 567-586, 1984.

MOON, N; PARKER, M.; BOSHOF, H. J.J.; CLOHAN, D. 'Advances in non-Newtonian dam break studies. In: n AJC Paterson, AB Fourie & D Reid (eds), **Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings**, Australian Centre for Geomechanics, Perth, p.165- 172, [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1910\\_09\\_Boshoff](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1910_09_Boshoff)

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR). **Design of Small Dams**, 1987.

TSCHIEDEL, A. da F.; PAIVA, R. C. D. de; **Uncertainty in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 23, e30, 2018.

VON THUN, J. L.; GILLETTE, D. R. **Guidance on breach parameters.** US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1990.

WAHL, T. L. **Prediction of embankment dam breach parameters: A literature review and needs assessments** Dam Safety Rep. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, 1998.

XU, Y.; ZHANG, L. M. **Breaching parameters for earth and rockfill dams.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 135, n. 12, p. 1957-1970, 2009