

INFLUÊNCIAS A JUSANTE CAUSADAS PELO USO DE DIFERENTES EQUAÇÕES EMPÍRICAS DE PREVISÃO DE VAZÃO MÁXIMA PROVENIENTE DA RUPTURA DE BARRAGENS

INTRODUÇÃO

Barragens são obstáculos artificiais que visam à retenção de fluidos. Essas estruturas são utilizadas para geração de energia, irrigação, contenção de rejeitos de minérios, entre outros usos. As barragens são utilizadas desde a antiguidade pelos mais diferentes povos. Ao longo do tempo, essas estruturas foram ganhando importância e contribuíram para a geração de progresso. Em contrapartida, impactos acabam sendo gerados, principalmente para as sociedades atingidas, de alguma forma, por sua construção.

CAUSAS DE RUPTURA

O rompimento de barragens pode ocorrer pelos mais variados motivos. Barragens de terra e enrocamento tendem a ter causas de rompimento da estrutura diferentes de barragens construídas com concreto (COLLISCHONN, 1997). Dentre os mais variados problemas que podem levar ao colapso de estruturas de terra e enrocamento, destacam-se: *Pipping* (infiltração) e *Overtopping* (galgamento).

Overtopping: Quando a altura d'água do reservatório supera a altura da barragem, extravasando por cima da estrutura, sem que se tenha sido projetada para este fim. Geralmente, este problema se origina pela insuficiência na liberação de grandes vazões pelos equipamentos extravasadores da barragem.

Pipping: Ocorre quando as forças de percolação da água superam as forças resistivas do material constituinte da estrutura, ocasionando, assim, infiltrações no maciço.

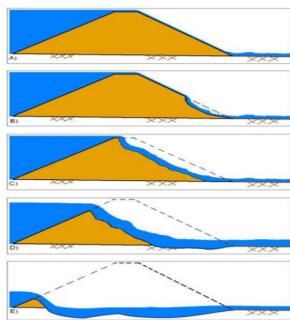


Figura 1: Desenvolvimento de *Overtopping* na estrutura (USACE 2014).

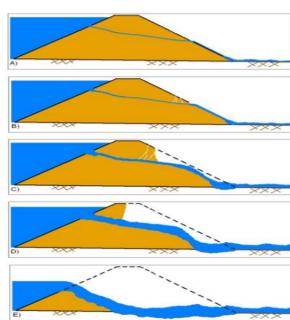


Figura 2: Desenvolvimento de *Pipping* na estrutura (USACE, 2014).

OBJETIVO

Analisar a influência que o uso de diferentes equações empíricas de previsão de vazão máxima na seção da barragem exerce nos resultados de vazão e profundidade máxima para cada seção ao longo de um vale a jusante da estrutura.

METODOLOGIA DE CÁLCULO SIMPLIFICADA

O Plano de Segurança de Barragens (PSB), instituído pela Lei 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e como deve ser o desenvolvimento de estudos de rompimento de barragens. Tais estudos estão atrelados à necessidade de grande número de dados, o que demanda tempo de trabalho considerável, além de análises detalhadas. A metodologia simplificada busca diminuir a quantidade de dados necessária e de tempo de análise, de modo a permitir uma perspectiva dos potenciais danos causados em um possível rompimento, buscando alcançar resultados aceitáveis, próximos daqueles resultantes de análises completas.

A metodologia simplificada proposta por Melo, Melo (2015) analisou uma barragem em território português, com 41m de altura e comparou com os resultados obtidos pelo software HEC-RAS, obtendo resultados concordantes. O escoamento após a ruptura da barragem foi considerado permanente uniforme, ou seja, não alterando suas propriedades no tempo e no espaço e não havendo dissipação de energia. Essas hipóteses adotadas estão a favor da segurança de barragens em seu desenvolvimento de cálculo.

ESTUDO DE CASO

No presente estudo, para fins de cálculo, foi utilizada uma barragem de terra que possui 30m de altura e 1 hm³ de volume do reservatório. Conhecia-se o perfil transversal ao curso de água e a distância de 14 seções a jusante da barragem, a inclinação entre as seções e o respectivo coeficiente de rugosidade médio de Manning ($n=0,06 \text{ s/m}^{1/3}$) para o rio em questão. Esse estudo foi dividido em quatro etapas, buscando melhor aproveitamento e entendimento do leitor.

1.ª Etapa: A distância máxima da onda de cheia proveniente da ruptura da barragem obteve-se através da seguinte equação desenvolvida por Melo (2015), apresentada a seguir como equação 1:

$$D_{\text{máx}} = 8,870 \cdot 10^{-8} \cdot V_r^3 - 2,602 \cdot 10^{-4} \cdot V_r^2 + 2,648 \cdot 10^{-1} \cdot V_r + 6,737 \quad \text{Equação 1}$$

(para $V_r \leq 1000 \text{ hm}^3$)

Sendo: $D_{\text{máx}}$ = distância máxima que a onda de cheia atinge a jusante da barragem (Km); V_r = Volume do reservatório (hm^3).

2.ª Etapa: Determinar a vazão máxima no momento da ruptura. Para isso foram selecionadas três equações que visam determinar a vazão máxima e dar prosseguimento aos próximos passos, seguindo a metodologia proposta por Melo (2015). Entre as diversas equações de onda de cheia se destacam duas que são amplamente difundidas na literatura da área: Froehlich (1995) e Pierce et al. (2010), sendo as equações 2 e 3 apresentadas, respectivamente, a seguir:

$$Q_{\text{máx}} = 0,607 \cdot (V_w)^{0,295} \cdot H_w^{1,24} \quad \text{Equação 2}$$

$$Q_{\text{máx}} = 0,038 \cdot (V_w)^{0,475} \cdot H_w^{1,09} \quad \text{Equação 3}$$

Sendo: $Q_{\text{máx}}$ = Vazão no momento da ruptura da barragem (m^3/s); H_w = Altura da coluna de água no momento da ruptura (m); V_w = do reservatório no momento da ruptura (m^3)

A equação de Froehlich (1995) foi desenvolvida com base na análise de 22 casos de rompimento tanto por *pipping* como por *overtopping*, enquanto, a equação proposta por Pierce et al. (2010), foi determinada analisando 87 casos de rompimento por *pipping* e *overtopping*. Para fazer um comparativo com as equações descritas, desenvolveu-se no Laboratório de Obras Hidráulicas uma equação com base em 39 casos de rompimento de barragem por *overtopping*, tanto em barragens de terra como de enrocamento.

Esta equação desenvolvida no laboratório foi denominada LOH nos gráficos e nos resultados, e será apresentada a seguir como equação 4:

$$Q_{\text{máx}} = 1/3 \cdot (V_w)^{0,56} \cdot H_w^{0,45} \quad \text{(Equação 4)}$$

Sendo: $Q_{\text{máx}}$ = Vazão no momento da ruptura da barragem (m^3/s); H_w = Altura da coluna de água no momento da ruptura (m); V_w = Volume do reservatório no momento da ruptura (m^3).

3.ª Etapa: Seguindo a metodologia proposta por Melo (2015) busca-se agora determinar a vazão para cada seção a jusante da barragem, a partir das equações de vazão máxima definidas na segunda etapa. A equação definida por Dams Sector (2011) denominada de Equação 5, será apresentada a seguir:

$$Q_{\text{seção}} = Q_{\text{máx}} \cdot a \cdot e^{b \cdot d} \quad \text{(Equação 5)}$$

para $(V_{\text{máx}} < 6,2 \text{ hm}^3)$
 $a = 0,002 \cdot \ln(V_{\text{máx}}) + 0,9626$
 $b = -0,20047 \cdot (V_{\text{máx}} + 250000)^{-0,5979}$

Sendo: $Q_{\text{seção}}$ = Vazão na seção a jusante da barragem analisada (m^3/s); $Q_{\text{máx}}$ = Vazão no momento da ruptura da barragem (m^3/s); $V_{\text{máx}}$ = Volume do reservatório no momento da ruptura (m^3); d = Distância da seção a jusante até a barragem (m).

4.ª Etapa: Determinou-se a altura da onda de cheia para cada seção a jusante da barragem analisada. Essa altura obteve-se através da Equação de Manning, que será apresentada a seguir como equação 6:

$$Q_{\text{seção}} = (1/n) \cdot R_h^{2/3} \cdot A \cdot I^{1/2} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo: $Q_{\text{seção}}$ = Vazão na seção a jusante da barragem analisada (m^3/s); n = coeficiente de rugosidade de Manning ($\text{s/m}^{1/3}$); R_h = Raio hidráulico (m); A = Área (m^2); I = declividade da seção (adimensional).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distância máxima atingida pela onda cheia a jusante foi de 7km. Os resultados de vazão máxima no momento da ruptura da barragem serão apresentados a seguir no quadro 1.

Vazão máxima no momento da ruptura da barragem (m^3/s)	
FROELICH	2426
PIERCE	1096
LOH	1122

Quadro 1: Determinação da vazão máxima no momento da ruptura da barragem.

Os resultados de vazão e altura máxima para cada seção a jusante da barragem, utilizando as diferentes equações empíricas, serão apresentados nas figuras 3 e 4, respectivamente.

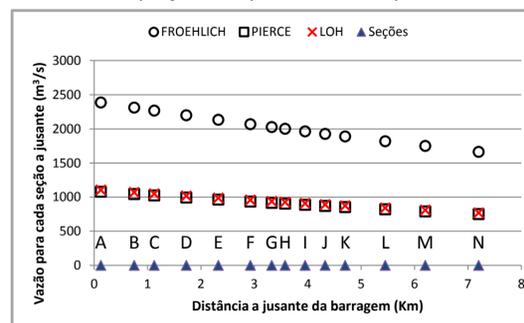


Figura 3: Determinação da vazão para cada seção a jusante da barragem

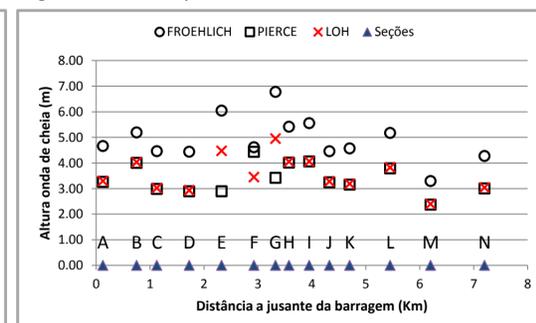


Figura 4: Determinação da altura da onda de cheia nas seções a jusante.

A equação proposta por Froehlich (1995), neste estudo de caso mostrou-se a mais favorável à segurança da barragem, resultando em maiores impactos potenciais causados pela altura mais elevada da onda de cheia proveniente da ruptura da estrutura da barragem. A equação LOH, em comparação com a equação de Pierce et al. (2010), apresentou resultados equivalentes, tanto na vazão em cada seção como na altura. Esses resultados próximos podem ser explicados pelas características particulares da barragem (volume e altura) neste estudo de caso.

A equação desenvolvida pelo LOH, utilizou somente barragens de terra e enrocamento, como base para o estudo de caso na determinação da equação, enquanto as outras equações envolvem, também, barragens de concreto e as mais variadas causas de ruptura. Entretanto, seria recomendável o desenvolvimento de equações específicas para cada tipo de material como a proposta pelo LOH, resultando em uma melhor estimativa dos impactos a jusante da barragem para fundamentar projetos mais detalhados como planos de segurança, por exemplo.

AGRADECIMENTOS

Destino meus agradecimentos aos meus colegas e professores do Laboratório de Obras Hidráulicas.

REFERÊNCIAS: MELO, J. F. de. *Dam-Break Flood Risk Assessment*. Second International Dam World Conference. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, Lisboa, Portugal, p. 47 – 56, 2015.
 DAMS SECTOR. *Estimating Loss of Life for Dam Failure Scenarios*. U. S. Department of Homeland Security, 2011. 94 p.
 FERLA, Rute et al. *Utilização de diferentes equações empíricas na previsão de características de inundação proveniente do rompimento de barragens*. In: XIII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, 2017. Porto: 2017.
 COLLISCHONN, Walter. *Análise do rompimento hipotético da Barragem de Ernestina-RS*. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 1997.
 COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). *Guia Básico de Segurança de Barragens*. São Paulo: 1999. 78 p.
 PIERCE, Michael W. et al. *Predicting Peak Outflow from Breached Embankment Dams*. *Journal of Hydrologic Engineering*, p. 338-349, Maio 2010.
 FROELICH, David. C. *First International Conference Water Resources Engineering*. New York: *Embankment dam breach parameters revisited*. New York: American Society of Civil Engineers, 1995a. 5 p.
 FERLA, Rute. *Metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em rompimentos de barragens*. 223 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

Autor: Pedro Guido Mottes Bassegio

Orientador: Luiz Augusto Magalhães Endres