



UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES EQUAÇÕES EMPÍRICAS NA PREVISÃO DE CARACTERÍSTICAS DE INUNDAÇÃO PROVENIENTE DO ROMPIMENTO DE BARRAGENS

Rute, FERLA¹; Priscila dos Santos, PRIEBE²; Carolina Kuhn, Novakoski³;
Roberta Ferrão, HAMPE⁴; Aloysio Portugal Maia, SALIBA⁵; Eder Daniel, TEIXEIRA⁶;
Marcelo Giulian, MARQUES⁷

¹ Eng. Civil, Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS, ruteferla@hotmail.com

² Eng. Hídrica, Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS, priscilaspriebe@gmail.com

³ Eng. Civil, Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS, carolkn04@gmail.com

⁴ Eng. Civil, Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS, roberta_hampe@hotmail.com

⁵ Docente, EE/UFGM, asaliba@ehr.ufmg.br

⁶ Docente, IPH/UFRGS, eder.teixeira@ufrgs.br

⁷ Docente, IPH/UFRGS, mmarques@iph.ufrgs.br

Resumo

O presente artigo busca analisar e comparar as estimativas obtidas utilizando-se diferentes equações empíricas de previsão da vazão de pico, proveniente do rompimento hipotético de barragens, na posterior determinação de características de inundação pelo vale a jusante da estrutura. As equações empíricas selecionadas para a previsão da vazão de pico do acidente são tanto função de características do maciço da barragem e da capacidade do reservatório, quanto das características da brecha de ruptura. A estimativa do amortecimento da vazão de pico, pelo vale a jusante da estrutura, e posterior definição das profundidades e larguras máximas atingidas se deram por meio do método simplificado indicado pelo pesquisador Melo, no ano de 2015 (*Simplified Dam-Break Flood Modeling*). A metodologia proposta foi aplicada em uma barragem existente, de maciço constituído por terra, sendo comparados os resultados obtidos de vazão, profundidade e largura máximas em seções transversais pelo vale a jusante. Para o caso analisado, os resultados demonstram que a utilização de diferentes equações empíricas de previsão da vazão de pico do acidente contribui com expressiva dispersão nos resultados, chegando a diferenças da ordem de 50% para os casos da vazão máxima, refletindo em diferenças de cerca de 30% e 20%, respectivamente, nos valores estimados de profundidades e larguras máximas.

Palavras-chave: Rompimento de barragens, vazão de pico, equações empíricas.

Tema: Água, Energia e Segurança de Barragens.

1. INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas de elevada importância para a sociedade, sejam elas construídas para fins de irrigação, abastecimento de água, geração de energia elétrica, entre outros. No mundo, estima-se que o número de grandes barragens existentes, com altura superior a 15 m, ultrapassa 50.000 (CBDB, 2011) e, por mais que a probabilidade de acidentes envolvendo essas estruturas seja muito pequena, o risco de rompimento nunca é nulo.

No Brasil, a Lei de Segurança de Barragens, Lei 12.334/2010, torna obrigatória a elaboração de Planos de Ação Emergencial (PAE) para barragens consideradas de risco elevado, segundo critérios dos órgãos fiscalizadores. Para a definição da classificação de risco da barragem e posterior elaboração do PAE, é necessário estabelecer os riscos causados a jusante em um possível rompimento. Sendo assim, é fundamental que sejam realizados estudos de rompimento de barragens, também conhecidos como *Dam-Break*, cujos resultados subsidiarão a elaboração do PAE e a atualização da classificação das barragens nacionais.

Para auxiliar e tornar possível os estudos de *Dam-Break* existem, atualmente, diversos modelos hidráulicos e hidrodinâmicos utilizados na simulação da ruptura de barragens, como os modelos HEC-RAS, LISFLOOD e DAMBREAK, por exemplo. Entretanto, a utilização de tais modelos requer, inicialmente, o conhecimento preciso de informações que servirão como dados de entrada nas análises, o que, do contrário, torna os resultados ainda mais imprecisos. Froehlich (2016) indica que o nível de detalhamento necessário às análises envolvendo a ruptura de barragens é função do risco potencial que o rompimento causa a jusante. Se não há risco de perdas de vidas humanas e os danos a propriedades são insignificantes, procedimentos mais simples podem fornecer uma descrição adequada dos danos causados devido à ruptura.

Nas últimas décadas, diversas metodologias simplificadas para definição de áreas inundadas em eventos de ruptura de barragens foram desenvolvidas, podendo-se destacar, por exemplo, as metodologias de USACE (1980), Wetmore e Fread (1983), Costa (1985) e Melo (2015). Todas estas metodologias, entretanto, requerem que a vazão máxima proveniente do rompimento, na seção da barragem, seja conhecida. Inúmeros pesquisadores de todo o mundo estabeleceram, a partir da análise de dados de eventos passados, equações empíricas responsáveis pela estimativa de vazões máximas provenientes de rompimentos de barragens, função das características das barragens e da brecha de ruptura. Existem, entretanto, incertezas inerentes a estas equações, função tanto da quantidade e das características dos eventos analisados, como também dos parâmetros de ajuste.

Sendo assim, este artigo busca analisar os resultados das principais equações utilizadas, nos últimos anos para previsão da vazão máxima efluente na seção da barragem, proveniente de um evento de ruptura da estrutura. Busca-se identificar, principalmente, qual o reflexo da diferença entre os resultados de vazão máxima, na seção da barragem, na posterior estimativa das larguras inundadas e profundidades máximas atingidas, no vale a jusante da estrutura, de acordo com metodologia simplificada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Pierce et al. (2010), desde o ano de 1970, diversas metodologias foram desenvolvidas para a estimativa da vazão máxima (ou vazão de pico) efluente de brechas em barragens. Estas relações são derivadas de um número limitado de dados, função principalmente de acidentes já ocorridos e observados, sendo assim, a confiança nos resultados é moderada.

A vazão de pico que ocorre em uma situação envolvendo o rompimento de barragens pode ser determinada tanto em função das características geométricas e do tempo de formação da brecha, quanto em função das características próprias da barragem e do reservatório.

Pierce et al. (2010) e Melo (2015) compilaram as principais equações utilizadas na previsão da vazão máxima efluente pela brecha em barragens de terra, enrocamento e/ou concreto, quando da ocorrência de um evento de ruptura. Pierce et al. (2010) indicam que, dentre as principais equações utilizadas nas análises de rompimento de barragens, a relação que melhor estima a vazão máxima efluente, quando comparada com eventos já ocorridos, é a equação proposta por Froehlich (1995), determinada segundo análise de 22 casos de rompimento e representada na Equação 1.

Pierce et al. (2010), expandindo o número de casos estudados para 87, somando-se aos dados compilados por Pierce até 2008 os dados de Wahl (1998), propuseram a Equação 2, apresentada a seguir.

$$Q_{max} = 0,607 (V_w^{0,295} H_w^{1,24}) \quad (1)$$

$$Q_{máx} = 0,038 (V_w^{0,475} H_w^{1,09}) \quad (2)$$

Sendo, para as Equações 1 e 2:

Q_{max} : vazão de pico do acidente, independente do tempo de falha (m^3/s); V_w : volume do reservatório no momento da ruptura (m^3); H_w : altura da água no momento da ruptura (m).

Froehlich (2016), após analisar dados de 41 casos de rompimento de barragens, apresentou duas equações responsáveis pela estimativa da vazão máxima efluente em tais eventos. De acordo com o autor, a primeira equação foi determinada de modo puramente empírico, enquanto a segunda fundamenta-se em uma abordagem semiteórica e é função não apenas das características da barragem e da brecha de ruptura, como também do tempo de formação desta. Estas equações estão representadas, respectivamente, na Equação 3 e Equação 4.

Conforme pode ser analisado por meio da Equação 4, esta considera a influência do tempo de falha, ou tempo de formação da brecha de ruptura (t_f), nas análises, o que, de acordo com o autor, é responsável pela redução do valor da vazão máxima possível. Ademais, atenta-se para o fato de que, diferentemente do caso das Equações 1 e 2, as Equações 3 e 4 são, também, função da estimativa da brecha de ruptura formada no evento. Froehlich (1995) observa que, para barragens de terra e enrocamento, a base da brecha geralmente se encontra na base da barragem ou na fundação, uma vez que esta é, em suma, mais resistente à erosão do que o material da barragem em si.

$$Q_{max} = 0,0175 k_M k_H \sqrt{\frac{g V_w H_{wb} H_b^2}{W_{avg}}} \quad (3)$$

Onde:

$$k_M = \begin{cases} 1,85 & \text{para falha por galgamento} \\ 1,00 & \text{para outras causas} \end{cases} \quad k_H = \begin{cases} 1,00 & \text{para } H_b \leq H_s \\ \left(\frac{H_b}{H_s}\right)^{1/8} & \text{para } H_b > H_s \end{cases}$$

$$H_s = \begin{cases} 6,10 \text{ m} & \text{(Sistema Internacional de unidades)} \\ 20 \text{ ft} & \text{(Sistema Inglês de unidades)} \end{cases}$$

$$Q_p = Q_{max} \left(\frac{1}{1 + \alpha t_f \sqrt{\frac{g}{H_b}}} \right)^\beta \quad (4)$$

Onde:

$$Q_{max} = \frac{8}{27} \left(\frac{L_a}{B_{avg}} \right)^{0,28} \left[B_{avg} - m \left(H_b - \frac{4}{5} H_{wb} \right) \right] \sqrt{g H_{wb}^3} ; \text{ para } H_{wb} \leq H_b$$

$$B_{avg} = 0,27 k_M V_w^{1/3}$$

$$k_M = \begin{cases} 1,30 & \text{para falha por galgamento} \\ 1,00 & \text{para outras causas} \end{cases} \quad m = \begin{cases} 1,00 & \text{para falha por galgamento} \\ 0,70 & \text{para outras causas} \end{cases}$$

$$t_f = 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{g H_b^2}} \quad \alpha = 0,000045 \quad \beta = 500 \left[\frac{W_{avg} H_b^2}{V_w} \right]^{2/3}$$

Sendo, para as equações 3 e 4:

Q_{max} : vazão máxima do acidente, independente do tempo de falha (m^3/s); W_{avg} : Largura média do barramento em corte transversal (m); V_w : volume de água acima da base da brecha no momento da ruptura (m^3); H_{wb} : Altura de água acima da base da brecha no momento da ruptura (m); H_b : Altura da brecha (m); L_a : Largura de aproximação do escoamento (m); Q_p : vazão máxima do acidente dependente do tempo de falha (m^3/s); t_f : tempo de formação da brecha de ruptura, ou tempo de falha (s); g : aceleração da gravidade (m/s^2); B_{avg} : largura média da brecha de ruptura, em vista frontal (m).

De acordo com Melo (2015), considerando que estimativas que possibilitem a classificação de risco da barragem sejam o principal objetivo da utilização de metodologias simplificadas em estudos de rompimento, qualquer aproximação capaz de estimar os níveis máximos atingidos em seções a jusante do maciço podem ser consideradas válidas ou adequadas. Isso indica que o hidrograma de ruptura e o tempo de chegada da onda, por exemplo, podem ser informações adicionais, porém não primordiais, quando da necessidade de se analisar a classificação de risco da estrutura em um fenômeno de falha.

Neste sentido, Melo (2015) organizou o chamado *Simplified dam-break flood modeling*, metodologia simplificada de análise de ruptura de barragens que, de acordo com o autor, surgiu da necessidade de se estudar um grande número de barragens brasileiras sujeitas ao cumprimento de prazos estabelecidos na legislação nacional e que dispunham de dados escassos. Na metodologia descrita por Melo (2015), após o estabelecimento da vazão máxima na seção da barragem, é possível estimar a descarga de pico, ou vazão máxima, referente a cada uma das seções transversais analisadas ao longo do rio, estabelecendo o amortecimento da vazão de pico ao longo do vale analisado. Para tal, apenas o parâmetro do volume do reservatório é considerado nas expressões semi-empíricas que determinam tal característica, provendo uma estimativa da vazão de pico máxima em cada seção analisada. Esta análise utiliza as equações propostas por Bureau of Reclamation (1989) e Dams Sector (2011), sendo elas apresentadas a seguir, respectivamente, na Equação 5 e Equação 6.

$$\frac{Q_x}{Q_{maxb}} = 10^{-0,01243x} \quad \text{para } V_{max} > 6.2 \text{ hm}^3 \quad (5)$$

$$\frac{Q_x}{Q_{maxb}} = a \cdot e^{b \cdot x} \quad \text{para } V_{max} \leq 6.2 \text{ hm}^3 \quad (6)$$

$$a = 0,002 \ln(V_{max}) + 0,9626$$

$$b = -0,20047 (V_{max} + 25000)^{-0,5979}$$

Sendo, para as Equações 5 e 6:

Q_x : vazão observada na seção em questão (m^3/s); Q_{maxb} : vazão máxima na seção da barragem (m^3/s); x : distância da seção em questão até a seção da barragem (km para a Equação 5 e m para a Equação 6); V_{max} : volume do hidrograma de entrada (m^3).

Após definidas as vazões máximas nas seções de interesse analisadas, o estabelecimento da profundidade máxima atingida, de acordo com a metodologia proposta por Melo (2015), é feito utilizando-se a Equação de Manning. Melo (2015) sugere que, dado que a vazão de cada seção é conhecida, é usual, quando da necessidade de se estabelecerem as profundidades máximas, utilizar valores de coeficiente de Manning elevados, uma vez que, dessa forma, as profundidades d'água resultarão maiores, favoráveis à segurança. Da mesma forma, Viseu (2013) indica que a conversão de vazão em profundidade d'água nas seções transversais pode ser feita utilizando-se a Equação de Manning, de modo que a

declividade da linha de energia pode ser tomada como sendo igual, por aproximação, à declividade do talvegue do rio.

3. METODOLOGIA

As análises foram realizadas considerando uma barragem de terra, com 30 metros de altura e volume do reservatório de aproximadamente 1.000.000 m³, da qual se dispõe de levantamento cadastral de 14 seções transversais do vale a jusante, em um trecho total de 7.200 m de comprimento, cuja declividade média corresponde a 2,6 cm/m, conforme indicado na Tabela 1. A declividade média do talvegue, informação a qual a Tabela 1 faz referência, corresponde à estimativa de inclinação do leito do rio considerando as seções transversais imediatamente anterior e posterior à seção na qual se está analisando.

O vale analisado neste estudo de caso possui características compatíveis a vales encaixados, conforme pode ser observado na Figura 1, que ilustra uma das seções transversais analisadas.

Inicialmente, supõe-se o rompimento hipotético da barragem em questão e determina-se a vazão máxima atingida na ruptura, na seção da barragem, segundo as equações propostas por Froehlich (1995), Pierce et al. (2010) e Froehlich (2016) empírica e semiteórica, representadas, respectivamente, nas equações 1, 2, 3 e 4. A utilização destas equações justifica-se uma vez que são parte das equações mais utilizadas e exploradas na bibliografia, tratando-se da estimativa de vazões máximas em rompimento de barragens.

Tabela 1. Informações das seções e talvegue a jusante da barragem analisada.

Seção	Distância da barragem (m)	Declividade média do talvegue (m/m)
A	125	0.034
B	750	0.031
C	1125	0.023
D	1725	0.021
E	2325	0.031
F	2925	0.043
G	3325	0.038
H	3575	0.023
I	3950	0.025
J	4325	0.037
K	4700	0.028
L	5450	0.018
M	6200	0.011
N	7200	0.006

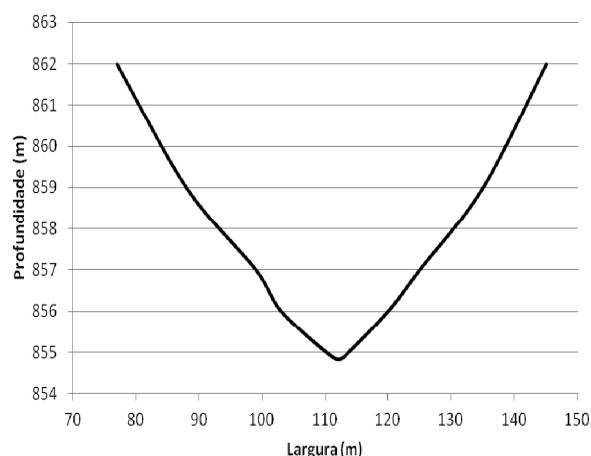


Figura 1. Exemplo de seção transversal do vale analisado.

Nas análises apresentadas neste documento, indica-se que a altura da brecha (H_b) foi tomada como sendo equivalente à altura da barragem (H_d), de acordo com as observações

presentes em Froehlich (1995). Sendo assim, o volume de água acima da base da brecha, no momento da ruptura (V_w) será considerado equivalente à capacidade total do reservatório.

O modo de falha utilizado é o galgamento, considerando que a barragem iniciará seu processo de ruptura imediatamente após o início do processo de galgamento. Dessa forma, a altura de água acima da base da brecha (H_{wb}) será considerada como equivalente à altura da brecha (H_b) e, conseqüentemente, à altura da barragem (H_d).

De posse dos resultados de vazão máxima na seção da barragem, analisa-se o comportamento da propagação desta em cada uma das 14 seções transversais a jusante da estrutura, de acordo com a metodologia descrita por Melo (2015), para as estimativas de vazão máxima provenientes de todas as equações utilizadas na etapa anterior. O estabelecimento da profundidade e largura máximas atingidas em cada seção transversal se deu utilizando-se a equação de Manning, conforme sugerido por Melo (2015) e Viseu (2013). O coeficiente de Manning utilizado, idêntico para todas as metodologias, foi determinado segundo análises preliminares da configuração do vale a jusante da barragem em questão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, a seguir, apresentam-se os resultados, bem como os valores utilizados nos termos das equações propostas por Froehlich (1995), Pierce et al. (2010) e Froehlich empírica (2016) e Froehlich semiteórica (2016) para determinação da vazão máxima na seção da barragem, segundo as características do estudo de caso.

Os resultados adquiridos para a vazão máxima em cada uma das 14 seções transversais a jusante da estrutura (Q_x), de acordo com o exposto por Melo (2015), podem ser observados na Tabela 3 e Figura 2, segundo cada uma das metodologias, bem como a média entre as metodologias testadas. Na Figura 2, os pontos nas curvas correspondem às seções transversais indicadas na Tabela 3.

Analisando a Figura 2 e Tabela 3, indica-se que as metodologias de Froehlich (1995) e Froehlich (2016) empírica apresentaram resultados de vazão máxima nas seções (Q_x) muito semelhantes, diferentemente de Froehlich (2016) semiteórica que obteve, conforme observação do autor, valores inferiores por considerar o tempo de falha (t_f) nas análises. A equação indicada por Pierce et al. (2010), por sua vez, resultou no menor valor para a vazão máxima na seção da barragem (Q_{max}) e, conseqüentemente, para as seções transversais a jusante da estrutura.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para largura e profundidade máximas atingidas nas seções transversais em análise, e a Figura 3 e Figura 4 apresentam, de forma gráfica, os valores apresentados na Tabela 4. Neste caso, o coeficiente de Manning utilizado em todas as análises, de acordo com as características do local, foi igual a 0,06.

Tabela 2. Resultados dos termos das equações utilizadas.

Termo (unidade)	Equação			
	Froehlich (1995)	Pierce et al (2010)	Froehlich empírica (2016)	Froehlich semiteórica (2016)
H_d (m)	30,00	30,00	-	-
V_w (m ³)	1.000,000,00	1.000,000,00	1.000,000,00	1.000,000,00
H_s (m)	-	-	6,10	-
H_b (m)	-	-	30,00	30,00
H_{wb} (m)	-	-	30,00	30,00
W_{avg} (m)	-	-	70,00	70,00
K_m (adimensional)	-	-	1,85	-
K_h (adimensional)	-	-	1,22	-
L_a (m)	-	-	-	210,00
K_m	-	-	-	1,30
B_{avg} (adimensional)	-	-	-	35,10
m (adimensional)	-	-	-	1,00
t_f (s)	-	-	-	673
α (adimensional)	-	-	-	0,000045
β (adimensional)	-	-	-	79,16
Q_{max} (m ³ /s)	2.426	1.096	2.430	7.321
Q_p (m ³ /s)	-	-	-	1.882

Tabela 3. Vazão máxima nas seções transversais – Q_x (m³/s)

Seção	Distância até a barragem (m)	Froehlich (1995)	Pierce et al. (2010)	Froehlich empírica (2016)	Froehlich semiteórica (2016)	Média
Barragem	0	2.426	1.096	2.430	1.882	1.958
A	125	2.387	1.078	2.391	1.852	1.927
B	750	2.312	1.045	2.316	1.794	1.866
C	1.125	2.268	1.025	2.272	1.760	1.831
D	1.725	2.199	994	2.203	1.706	1.776
E	2.325	2.133	964	2.137	1.655	1.722
F	2.925	2.069	935	2.072	1.605	1.670
G	3.325	2.027	916	2.030	1.572	1.636
H	3.575	2.001	904	2.004	1.553	1.616
I	3.950	1.963	887	1.966	1.523	1.585
J	4.325	1.926	870	1.929	1.494	1.555
K	4.700	1.889	854	1.893	1.466	1.525
L	5.450	1.818	822	1.821	1.411	1.468
M	6.200	1.750	791	1.753	1.358	1.413
N	7.200	1.663	751	1.666	1.290	1.342

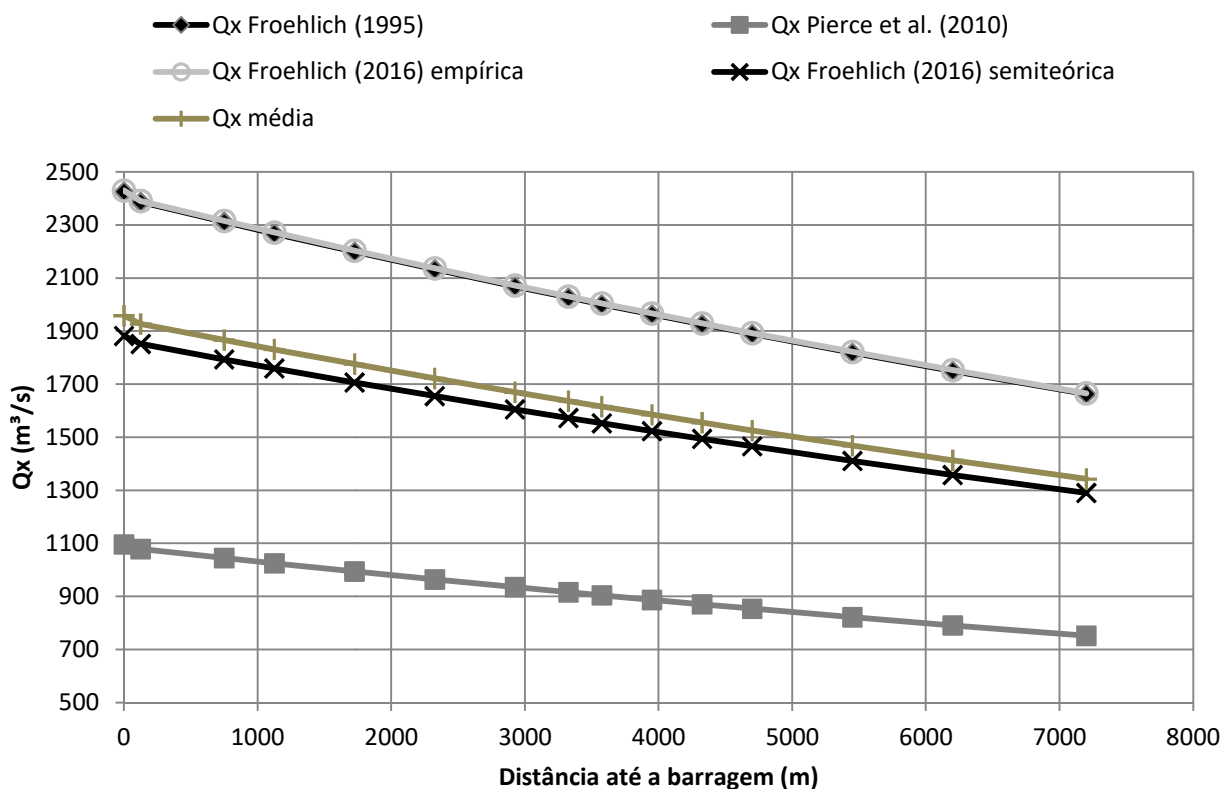


Figura 2. Vazão máxima Q_x (m³/s) nas seções transversais a jusante da barragem.

Tabela 4. Profundidade e largura máximas nas seções transversais.

Seção	Distância até a barragem (m)	Profundidade máxima (m)					Largura máxima (m)				
		Froehlich (1995)	Pierce et al (2010)	Froehlich empírica (2016)	Froehlich semiteórica (2016)	Média	Froehlich (1995)	Pierce et al (2010)	Froehlich empírica (2016)	Froehlich semiteórica (2016)	Média
A	125	4,66	3,26	4,66	4,16	4.18	133	105	133	123	124
B	750	5,18	4,00	5,18	4,74	4.78	128	123	128	126	126
C	1125	4,47	3,00	4,48	3,93	3.97	117	104	118	112	113
D	1725	4,41	2,88	4,41	3,84	3.89	100	94	100	97	98
E	2325	6,04	4,43	6,05	5,46	5.50	96	78	96	89	89
F	2925	4,62	3,42	4,62	4,19	4.21	133	105	133	123	124
G	3325	6,74	4,88	6,74	6,07	6.11	65	52	65	61	61
H	3575	5,42	4,02	5,42	4,93	4.95	155	112	155	140	140
I	3950	5,56	4,06	5,56	5,02	5.05	119	92	119	109	110
J	4325	4,46	3,24	4,46	4,04	4.05	112	95	112	108	107
K	4700	4,54	3,14	4,55	4,03	4.06	93	83	93	89	90
L	5450	5,17	3,79	5,17	4,69	4.70	174	121	174	155	156
M	6200	3,30	2,37	3,30	2,96	2.98	335	270	335	311	313
N	7200	4,24	2,99	4,25	3,79	3.82	304	219	304	269	274

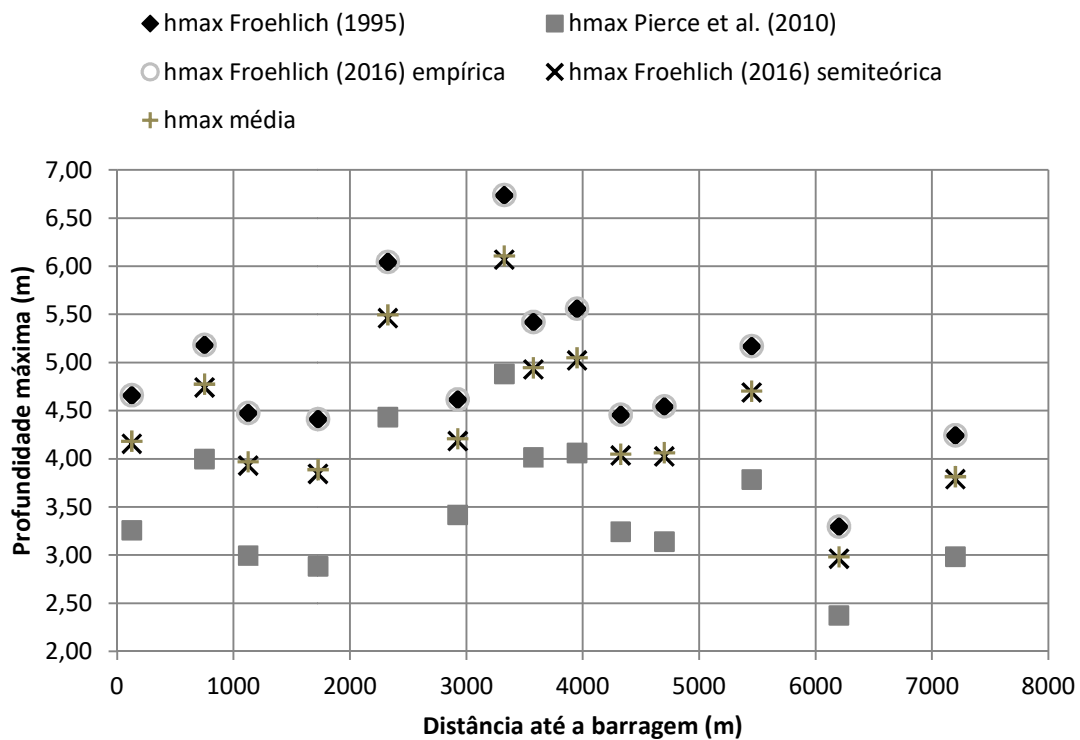


Figura 3. Profundidade máxima atingida nas seções transversais – h_{max} (m).

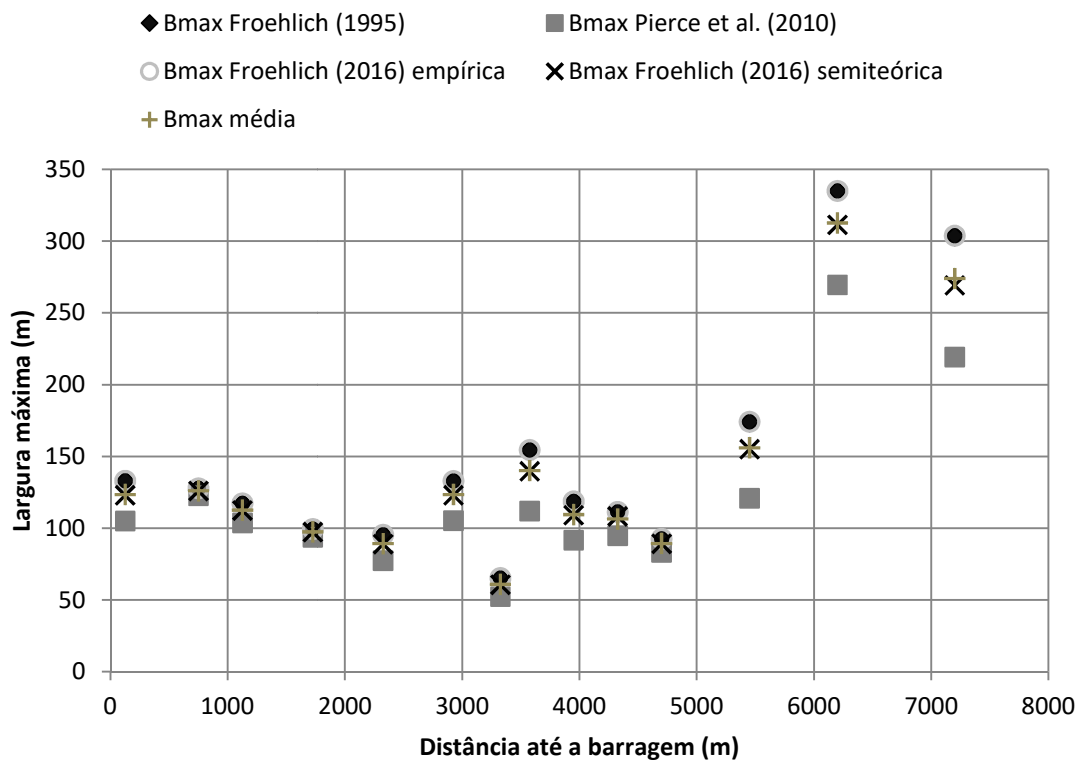


Figura 4. Largura máxima atingida nas seções transversais – B_{max} (m).

Uma vez que os resultados de vazão máxima obtidos segundo Pierce et al. (2010) apresentaram os menores valores na presente análise, as larguras e profundidades máximas obtidas segundo metodologia de Melo (2015) aplicada a esta equação apresentaram, conforme esperado, os valores mais baixos. Da mesma forma, os valores de profundidade e largura máxima para as equações de Froehlich (1995) e Froehlich (2016) empírica foram muito semelhantes, em conformidade com o comportamento obtido nas vazões máximas em cada seção transversal (Tabela 3 e Figura 2), para estas equações.

Tanto para as vazões máximas nas seções transversais, quanto para profundidades e larguras máximas, a equação proposta por Froehlich (2016) semiteórica apresentou os valores mais próximos da média entre todas as equações analisadas, conforme pode ser observado, respectivamente, na Figura 2, Figura 3 e Figura 4.

De modo a possibilitar melhores comparações entre os valores obtidos, optou-se por apresentar os resultados de vazão, profundidade e largura máxima atingidos em função do quociente destes com os resultados indicados por Froehlich (1995), uma vez que esta é uma das equações mais utilizadas nas análises envolvendo ruptura de barragens no meio técnico, quando da necessidade de estimativa da vazão máxima na seção da barragem. Estas relações podem ser observadas, de forma gráfica, na Figura 5, Figura 6 e Figura 7, onde o eixo vertical corresponde ao quociente entre as vazões máximas nas seções transversais a jusante da barragem (Q_x), com relação a Froehlich (1995), e o eixo horizontal corresponde à distância entre a seção analisada e a seção da barragem, sobre a altura da barragem em questão (H_d).

Analisando-se a Figura 5 percebe-se que os valores de vazão máxima obtidos segundo Froehlich (2016) semiteórica apresentam resultados da ordem de 80% dos valores obtidos segundo Froehlich (1995), ao passo que Pierce et al. (2010) apresentaram valores da ordem de 45%.

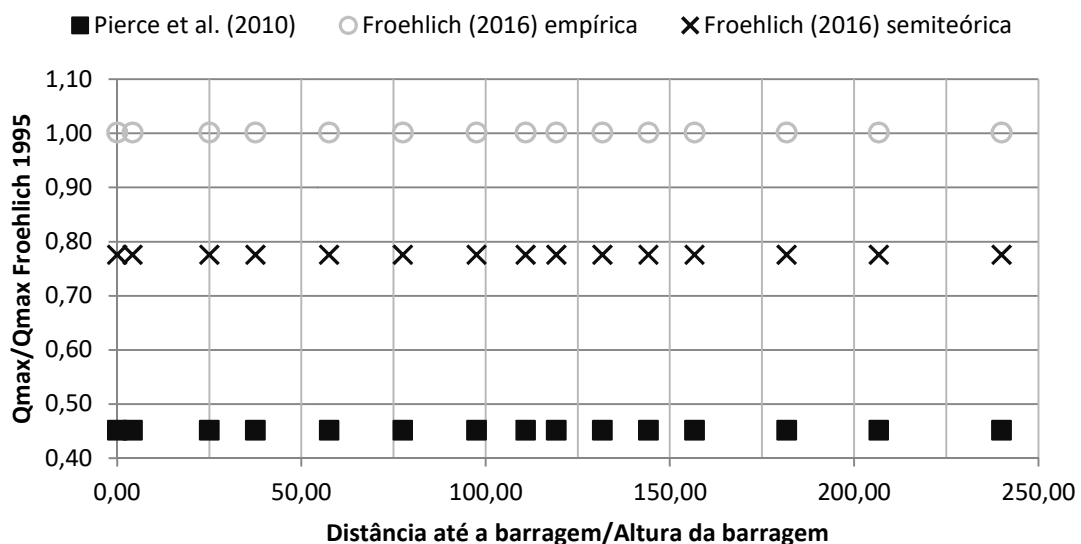


Figura 5. Quociente entre vazões máximas das metodologias analisadas e Froehlich (1995).

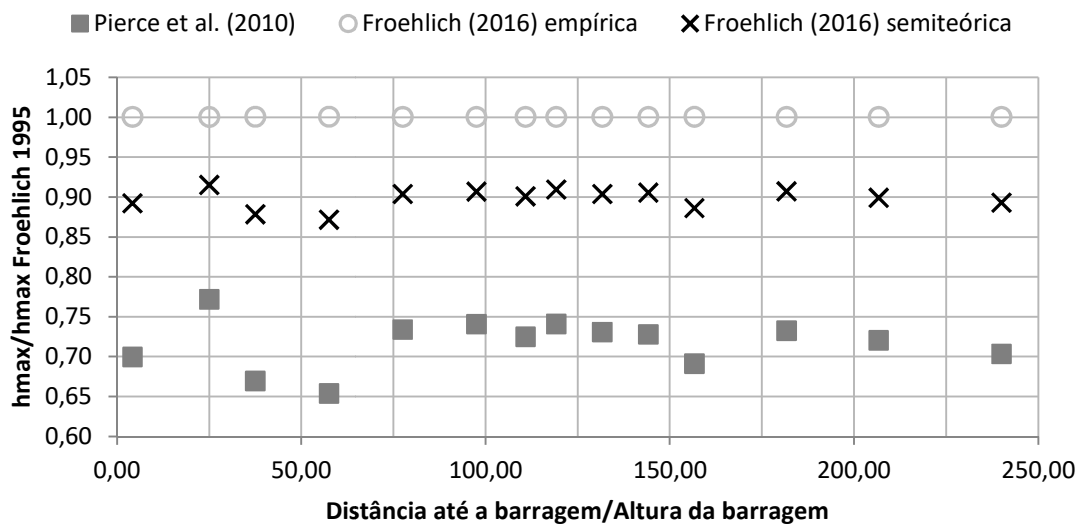


Figura 6. Quociente entre profundidades máximas das metodologias analisadas e Froehlich (1995).

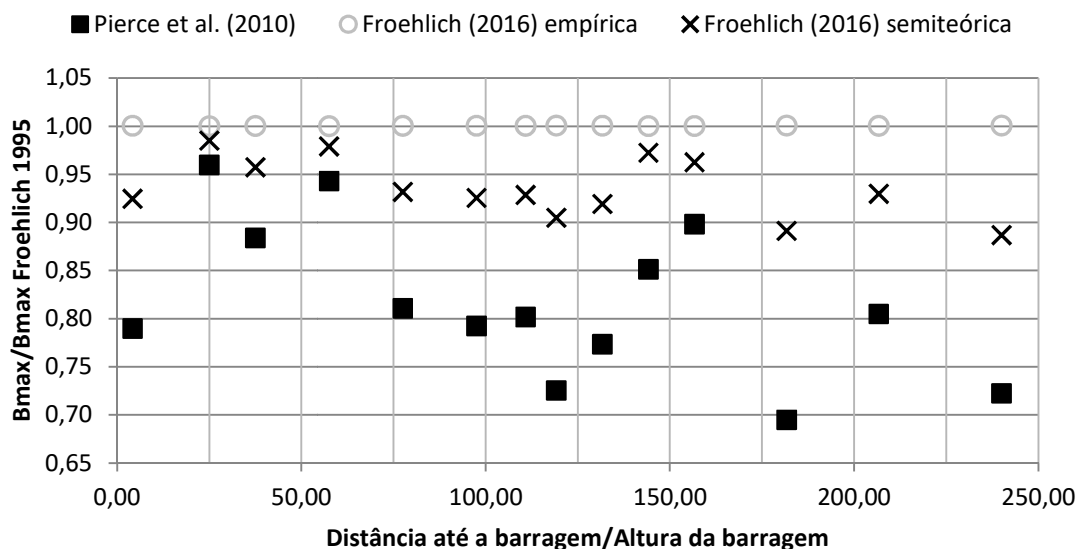


Figura 7. Quociente entre larguras máximas das metodologias analisadas e Froehlich (1995).

Quando analisados os quocientes das profundidades máximas, conforme apresentado na Figura 6, indica-se que a relação de Froehlich (2016) semiteórica apresentou resultados da ordem de 90% quando comparados com os obtidos segundo a equação de Froehlich (1995), enquanto a equação de Pierce et al. (2010) apresentou valores da ordem de 65% a 75%.

Os quocientes entre larguras máximas, indicados na Figura 7 apresentaram, para a equação proposta por Pierce et al. (2010) resultados que variaram de 70% a 95%, quando comparados com os resultados obtidos pela equação de Froehlich (1995), ao passo que a equação de Froehlich (2016) semiteórica apresentou resultados de largura de 90% a 97% daqueles obtidos pela equação indicada por Froehlich (1995).

Os quocientes para as vazões, profundidades e larguras máximas obtidos entre as equações de Froehlich (2016) empírica e Froehlich (1995) apresentaram, conforme esperado e indicado na Figura 5, Figura 6 e Figura 7, valores próximos da unidade.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este artigo propôs analisar os resultados obtidos segundo a utilização das equações de Froehlich (1995), Pierce et al. (2010), Froehlich (2016) empírica e Froehlich (2016) semiteórica para estimativa da vazão máxima atingida na ruptura de barragens, juntamente com a metodologia simplificada organizada por Melo (2015) para a propagação das vazões e posterior estimativa de profundidades e larguras máximas atingidas ao longo do vale a jusante.

As análises indicam que, para este caso analisado, a equação proposta por Pierce et al. (2010) apresentou os resultados mais baixos, tanto para vazão máxima quanto, conseqüentemente, para profundidades e larguras máximas atingidas. Os resultados obtidos segundo a equação semiteórica proposta por Froehlich (2016) estão próximos da média entre os resultados de todas as equações utilizadas no presente artigo, ao passo que os resultados das equações empíricas propostas por Froehlich (2016) e Froehlich (1995) obtiveram resultados muito semelhantes, além de serem os maiores valores encontrados.

Conforme indicado, dependendo da equação utilizada, observaram-se reduções de aproximadamente 50% nos resultados de vazão, e estes refletiram, em média, em 30% e 20% de redução dos resultados de profundidades e larguras máximas atingidas, respectivamente.

Indica-se que a diferença entre as estimativas de vazões resultantes da utilização das equações empíricas é devido às distinções e peculiaridades dos estudos de caso utilizados por cada um dos autores em suas análises. Ademais, assume-se que a equação semiteórica proposta por Froehlich (2016) levou a resultados inferiores uma vez que insere, em suas análises, as características da brecha e seu tempo de formação.

Recomenda-se, em estudos futuros, utilizar as equações de Froehlich (1995), Pierce et al. (2010) e Froehlich (2016) em outros estudos de caso, para barragens de diferentes alturas e capacidades de reservatório, de modo a estabelecer melhores critérios e indicações acerca das diferentes estimativas encontradas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições e empresas que contribuíram com apoio financeiro parcial para realização da pesquisa relacionada ao presente artigo, sendo elas a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/Brasil), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP/Brasil), a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS/Brasil), Furnas Centrais Elétricas S.A., a Fundação de Apoio Universitário (FAU/UFPel) e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Presidência da República. Casa Civil. Brasília, DF, 20 de Setembro de 2010.
- Bureau of Reclamation. (1989). (Colorado). Policy and Procedures for Dam Safety Modification Decision-making. Denver: Department of Interior. 302 p.
- Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB). (2011). A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: Cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: Sindicato Nacional dos Editores de Livros. 533 p.
- Costa J.E. (1985). Floods from dam failures. Denver. 59 p.
- Dams Sector. (2011). Estimating Loss of Life for Dam Failure Scenarios. U. S. Department of Homeland Security. 94 p.
- Froehlich D. C. (1995). First International Conference Water Resources Engineering, 1995, New York. Embankment dam breach parameters revisited. New York: American Society of Civil Engineers. 5 p.
- Froehlich D. C. (2016). Predicting Peak Discharge from Gradually Breached Embankment Dam. Journal of Hydrologic Engineering, [s.l.], v. 21, n. 11. American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Melo J. F. (2015). Dam-Break Flood Risk Assessment. Second International Dam World Conference. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, Lisboa, Portugal, pp. 47 – 56.
- Pierce M. W., Thornton C. I., Abt S. R. (2010). Predicting Peak Outflow from Breached Embankment Dams. Journal of Hydraulic Engineering, v. 15, n. 5, p. 338-349.
- USACE (Org.). (1980) Dimensionless Graphs of Floods from Ruptured Dams. Davis. 76 p.
- Viseu M. T. (2013). Planos de Ação de Emergência e a Política Nacional de Segurança de Barragens. Bento Gonçalves: Visual. 35 slides, color.
- Wahl T. L. (1998). Prediction of Embankment Dam Breach Parameters. [S. l.]: Water Resources Research Laboratory. 67 p.
- Wetmore J. N, Fread D. L. (1983). The NWS Simplified Dam-break Flood Forecasting Model. Maryland, 24 p.