

Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de barragens

Fábio L F Faria*, Matheus B Silva, Marcelo de M Reis, José C C Amorim
Academia Militar das Agulhas Negras
Rodovia Presidente Dutra Km 306 S/N, 27534-970, Resende, RJ, Brasil.
*fabiofaria82@gmail.com

RESUMO: Os danos consequentes de eventos de ruptura de barragens normalmente têm resultados catastróficos. A simulação computacional do rompimento de barragens tem como um dos parâmetros de entrada um hidrograma de ruptura. Tradicionalmente, esse hidrograma de ruptura é confeccionado a partir de equações empíricas para determinação da vazão de pico (Q_p) e de valores de tempo de pico (T_p) definidos em função das características da barragem e da evolução da brecha de ruptura. As diversas equações empíricas encontradas na literatura geram resultados muito discrepantes para a mesma barragem. Como alternativa à metodologia tradicional esse artigo propõe a definição do hidrograma de ruptura a partir da vazão de pico determinada através do volume escoado do reservatório para um tempo de pico (T_p) pré-estabelecido. A metodologia proposta agiliza os cálculos e chega a resultados mais confiáveis em função da certeza topográfica do volume escoado até a cota do ponto mais baixo a jusante da ruptura.

PALAVRAS-CHAVE: Rompimento. Barragem. Hidrograma de Ruptura.

ABSTRACT: The dam break event usually has catastrophic results. The hydrograph of rupture is one of the inputs for a computational dam break simulation. Traditionally this hydrograph is made using empirical equations to determine the peak flow and values of peak time, these values depend on the dam characteristics and the evolution of the rupture breach. The different empirical equations found in the literature generate very different results of peak flow for the same dam. As an alternative to the traditional methodology, this article proposes the preparation of the hydrograph of rupture from the peak flow that was determined by the volume drained from the reservoir and the pre-established peak time. The proposed methodology accelerates the calculations and have reliable results, since, according to the topography, the drained volume will move to the lowest point downstream of the rupture.

KEYWORDS: Dam break. Rupture hydrograph

1. INTRODUÇÃO

Grandes barragens ultrapassam geralmente outras construções em volume e em custo, bem como em importância social e em risco. O rompimento de uma estrutura desse porte, ou de barragens de resíduos perigosos, quase sempre apresenta grandes impactos tanto materiais quanto relacionados à perda de vidas. Somente no século XX foram registrados no mundo cerca de 200 acidentes graves com barragens com altura superior a 15 metros, que causaram a morte de mais de 8.000 pessoas e deixaram outras milhares desabrigadas [1]. Os acidentes recentes de maior magnitude são as rupturas da Barragem de Sítu Gintung, na Indonésia, em março de 2009, no caso de barragens de rejeito, há o destaque negativo brasileiro das Barragens do Fundão no subdistrito de Bento Rodrigues, a 35 km do município de Mariana, e da Barragem do Córrego do Feijão no Município de Brumadinho ambas no estado de Minas Gerais.

Nos estudos mais antigos, quando os conhecimentos e pesquisas sobre o assunto eram ainda bastante incipientes, admitia-se a hipótese de que o rompimento das barragens se dava de forma completa e instantânea. De acordo com [2], tal hipótese é razoável nos casos de estruturas de concreto em forma de arco ou sustentadas por contrafortes, entretanto, ela se torna inadequada quando a análise envolve o colapso de barragens de concreto tipo gravidade (concreto massa ou compactado de diversas formas) ou ainda nas barragens de aterro. Nesse caso deve ser modelada uma ruptura gradual.

Uma brecha de ruptura é caracterizada por três parâmetros: a sua configuração geométrica, as suas dimensões (nomeadamente a largura) e o tempo de ruptura, fatores que, no seu conjunto, influenciam os valores das vazões, dos níveis e dos tempos de chegada da onda de inundação às diferentes

planícies de inundação.

Atualmente reconhece-se a necessidade de se avaliar, sobretudo nos casos onde a ruptura é gradual, os efeitos gerados pela liberação dos volumes retidos de forma mais lenta, e que resultam em inundações a jusante com elevado tempo de permanência, causando danos tão importantes quanto os causados nas situações hipotéticas de ruptura instantânea.

A geometria e o tempo de abertura da brecha são parâmetros fundamentais para estimar o hidrograma que deve efluir da barragem em uma eventual ruptura. A escolha adequada destes parâmetros é de crucial importância quando se trata de barragens cuja região de estudo de jusante se encontra em distâncias consideradas pequenas, menores que 25 km. Para regiões situadas em distâncias maiores, os resultados de vazão e nível de água tendem a convergir, independentemente dos parâmetros utilizados [3].

Segundo [4], para simular o evento de ruptura, é necessário primeiramente elaborar o hidrograma da vazão efluente no momento da ruptura. As características principais a serem determinadas referem-se à forma da brecha e ao tempo de formação da mesma. O hidrograma de ruptura representa graficamente a variação da vazão efluente da barragem no tempo, sendo que a vazão de pico está caracterizada no topo do hidrograma em um determinado instante.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RUPTURA DE BARRAGENS

Barragens podem romper de forma gradual ou instantaneamente. O tipo de ruptura depende principalmente da causa da falha e do tipo da barragem. Os principais mecanismos de

rompimento são citados a seguir:

- ruptura da fundação (fratura da rocha, deslizamento de camadas, etc.);
- overtopping ou galgamento, normalmente por um evento hidrológico extremo;
- piping ou ruptura por entubamento, em função de falhas no corpo da barragem.

As falhas ocorridas nas fundações das barragens são consideradas falhas estruturais oriundas das acomodações geológicas quando da saturação do material da fundação por infiltração [5]. O terreno sobre o qual a barragem está e a ligação da barragem ao terreno podem deslizar sob o efeito das acomodações geológicas que resultam do enchimento do reservatório ou da saturação do material da fundação por infiltração. Outra ameaça às fundações são as cheias extraordinárias que causam o galgamento, quando a água que passa sobre a barragem provoca a erosão da base da estrutura.

Segundo [2], o piping corresponde ao fenômeno de erosão interna de uma massa de solo, iniciada sob condições de gradiente hidráulico crítico, provocando a abertura progressiva de canais dentro da massa de solo em sentido contrário ao do fluxo d'água. O processo erosivo provoca a remoção de partículas do interior do solo ou da estrutura, formando "tubos" vazios que resultam em colapsos e escorregamentos laterais do terreno. Fatores determinantes como o grau de compactação do solo, o adequado dimensionamento do sistema de drenagem interna do maciço e o monitoramento de parâmetros geotécnicos são importantes para evitar o processo de formação de piping em barragens de terra [6].

A Figura 1 mostra o mecanismo de progresso do piping, passando à formação de entubamento concentrado no maciço até o progresso e o alargamento na forma de brecha, com consequente ruptura da barragem.

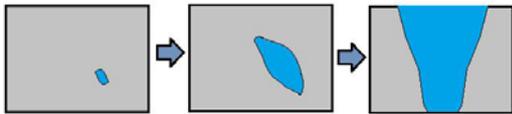


Fig 1: Formação de brecha por piping

O overtopping corresponde ao fenômeno de galgamento ou transbordamento da barragem, ou seja, a passagem das águas sobre a estrutura da mesma, resultado da chegada de uma onda de cheia excepcional ou de uma falha operacional do reservatório. Este fenômeno está normalmente associado a um evento hidrológico extremo, onde o volume do reservatório e as estruturas de descarga da barragem não são suficientes para armazenar e extravasar a quantidade de água [7]. Pode-se citar ainda como situações que levam ao galgamento de uma estrutura de barramento problemas operacionais oriundos do mau funcionamento de comportas e válvulas de descarga e obstrução das mesmas por material de assoreamento.

A Figura 2 descreve a formação da brecha por overtopping na sequência: início em um ponto mais fraco, brecha em forma de "V", aprofundamento da brecha, aumento lateral por erosão seguida de ruptura.



Fig 2: Formação de brecha por overtopping

Além dos mecanismos de ruptura citados também podem ser considerados outros mecanismos como: sismos, terremotos, falhas de projeto, construção e operação bem como ações de guerra.

2.2 HIDROGRAMA DE RUPTURA

Segundo [4], para simular o evento de ruptura, é necessário primeiramente elaborar o hidrograma da vazão efluente no momento da ruptura. As características principais a serem determinadas referem-se à forma da brecha e ao tempo de formação da mesma. O hidrograma de ruptura representa graficamente a variação da vazão efluente da barragem no tempo, sendo que a vazão de pico está caracterizada no topo do hidrograma em um determinado instante. Pelas Figuras 3, 4 e 5 observa-se que esses hidrogramas são construídos a partir dos valores de vazão de pico (Q_p) e do tempo de pico (T_p).

Para obter a vazão de pico efluente devido à ruptura, vários autores estabeleceram expressões matemáticas relacionando a máxima vazão de descarga com características da barragem (altura do barramento, comprimento da crista, volume do reservatório, etc.). A Tabela 1 apresenta algumas das equações utilizadas para o cálculo da vazão de pico.

Tab 1: Diferentes formulações matemáticas para a determinação da vazão de pico [4]

AUTOR	VAZÃO DE PICO	CARACTERÍSTICA
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	$Q_p = 7,683H_d^{1,909}$	Equação baseada na análise de 19 diferentes casos de ruptura de natureza diversa.
Hagen (1982)	$Q_p = 1,205(H_dV)^{0,48}$	Equação baseada em observações de valores relativos a casos já ocorridos de ruptura.
Saint-Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (1997)	$Q_p = \frac{8}{27} B_d \sqrt{g} V_{\text{médio}}^{\frac{3}{2}}$	Equação desenvolvida por Saint-Venant para o caso de remoção instantânea e total do barramento.
Schoklitsch (1917) apud ICOLD (1998)	$Q_p = \frac{8}{27} \left(\frac{B_d}{B_b}\right)^{1/2} B_b \sqrt{g} V_{\text{médio}}^{\frac{3}{2}}$	Equação considerando a situação em que a ruptura ocorre em parte da crista de uma barragem.
Bureau of Reclamation (1982) apud Bureau of Reclamation (1987)	$Q_p = 19H_d^{1,85}$	Equação baseada em dados coletados de vazões de pico históricas e da profundidade da lâmina d'água no reservatório no momento da ruptura.
Vertedor de Soleira Espessa (Singh, 1996)	$Q_p = 1,7B_b H_b^{3/2}$	De acordo com Singh, o escoamento que passa pela brecha pode ser assumido como análogo ao escoamento que passa por um vertedor retangular de soleira espessa.
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	$Q_p = 1,7B_b \left\{ \frac{1,94 \frac{A_s}{B_b}}{T_p + \left[\frac{1,94A_s}{(B_b \sqrt{H_d})} \right]} \right\}^3$	Equação considerando a formação de uma brecha retangular, desenvolvendo-se em um intervalo de tempo (t).

Onde: Q_p = vazão máxima defluente da barragem em ruptura (m^3/s);

V = volume máximo do reservatório para o nível de água máximo (m^3);

A_s = área do reservatório para o nível de água máximo (m^2);

B_d = largura da barragem (m);
 H_d = altura da barragem (m);
 B_b = largura final da brecha (m);
 H_b = altura final da brecha (m);
 $Y_{\text{médio}}$ = profundidade média no reservatório no instante da ruptura (m); e
 T_p = tempo para desenvolvimento da brecha (s).

O tempo de pico está relacionado ao tempo de evolução da brecha e normalmente é definido a partir de tabelas relacionadas as características das barragens e do tipo da brecha, baseado em casos históricos similares ou formulações mais robustas que consideram o desenvolvimento da brecha com base em princípios da hidráulica, do transporte de sedimentos e da mecânica dos solos [11]. A Tabela 2 apresenta um resumo de parâmetros propostos, onde H corresponde à altura da barragem e L ao comprimento de crista da mesma.

Tab 2: Possíveis valores para as características das brechas [12]

Tipo de Barragem	Comprimento da brecha (Bb)	Componente horizontal da declividade dos taludes da brecha (H):1V	Tempo de ruptura t_f (horas)	Referência
Concreto Gravidade	Blocos monolíticos	Vertical	0,1 a 0,5	USACE (1980)
	Usualmente <0,5L	Vertical	0,1 a 0,3	FERC (1988)
	Usualmente <0,5L	Vertical	0,1 a 0,2	Fread (2006)
	Usualmente <0,5L	Vertical	0,1 a 0,3	ELETROBRÁS (2003)
Concreto em arco	L	Declividade do vale	<0,1	USACE (1980)
	L	Entre 0 e declividade do vale	<0,1	FERC (1988)
	0,8L a L	Entre 0 e declividade do vale	<0,1	Fread (2006)
	L	Entre 0 e declividade do vale	<0,1	ELETROBRÁS (2003)
Terra/Enrocamento	(0,5 a 0,3) x H	Entre 0 e 1	0,5 a 4,0	USACE (1980)
	(1,0 a 5,0) x H	Entre 0 e 1	0,1 a 1,0	FERC (1988)
	(2,0 a 5,0) x H	Entre 0 e 1	0,1 a 1,0	Fread (2006)
	(2,0 a 4,0) x H	Entre 0,25 e 1	0,1 a 1,0	ELETROBRÁS (2003)

De posse da vazão de pico, tempo de pico e tempo de base, pode-se confeccionar o hidrograma de ruptura. De acordo com [8] pode-se utilizar os seguintes tipos de hidrogramas para simulação da propagação da onda de cheia:

1) *Hidrograma Simplificado* é o método mais simples, em que um hidrograma de ruptura é obtido a partir das estimativas de vazão de pico, tempo de esvaziamento e volume do reservatório. Pode adequar-se para o caso de ruptura instantânea, possuindo forma triangular, sendo que a área do hidrograma deve igualar-se com o volume total do reservatório;

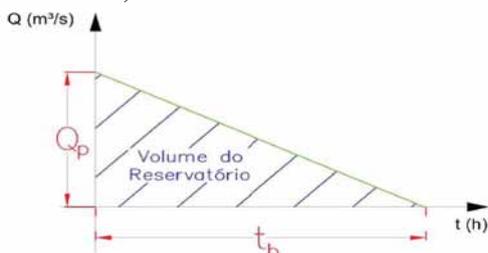


Fig 3: Hidrograma simplificado [9]

$$t_b = \frac{2V}{Q_p} \quad (1)$$

Onde: V = volume total do reservatório no momento do rompimento; e
 Q_p = Vazão de pico.

2) *O Hidrograma para ruptura gradual linear* permite a representação do tempo de formação da brecha que é caracterizado pelo tempo de pico (t_p). Por esse motivo adequa-se melhor à ruptura não instantânea, possuindo duas equações de reta que o caracterizam, uma ascendente (até o tempo de pico) e outra descendente;

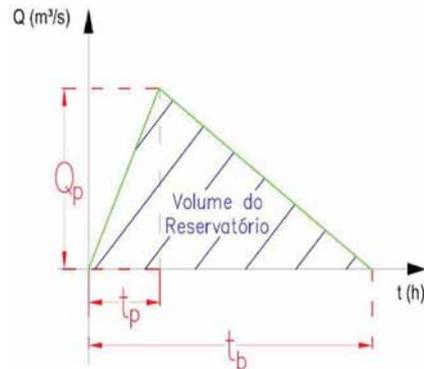


Fig 4: Hidrograma de ruptura gradual linear [9]

$$Q(t) = \begin{cases} Q_p \left(\frac{t}{t_p} \right), & 0 \leq t \leq t_p \\ Q_p - Q_p \left(\frac{t - t_p}{t_b - t_p} \right), & t > t_p \end{cases} \quad (4)$$

Onde: Q_p = Vazão de pico;
 t_p = tempo de pico; e
 t_b = tempo de base;

1) *O Hidrograma com Decaimento Parabólico*, foi introduzido por [10] e representa o tempo de esvaziamento de forma mais gradual que o triangular, sendo mais condizente com casos já ocorridos em barragens de terra, em que os trechos de descida procuram representar um decaimento aproximadamente exponencial.

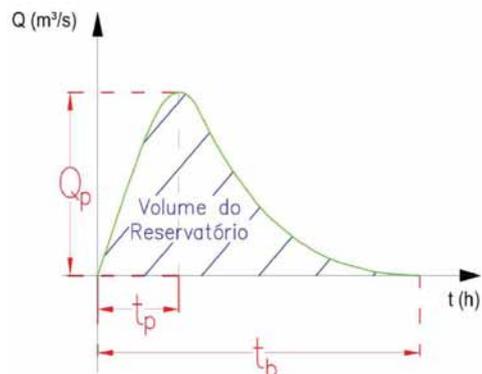


Fig 5: Hidrograma de decaimento parabólico [9]

$$Q(t) = Q_p \left[\left(\frac{t}{t_p} \right) e^{\left(1 - \frac{t}{t_p} \right)} \right]^k \quad (3)$$

Onde: Q_p = Vazão de pico;
 t_p = tempo de pico; e

k varia de 0,1 a 0,5 sendo calibrado de tal modo que o volume do hidrograma de ruptura seja igual ao volume do reservatório no momento do rompimento.

Pela análise dos tipos de hidrogramas e estudos de outros autores conclui-se que para um rompimento gradual da barragem onde são simuladas brechas originadas por piping e galgamento (formação gradual), o hidrograma com decaimento parabólico representa de forma mais próxima da realidade o fenômeno de formação da brecha e é utilizado para o desenvolvimento da metodologia proposta.

Como alternativa à solução tradicional esse artigo propõe o procedimento descrito no item 3.

3. METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida teve como premissa buscar um parâmetro para obter a vazão de pico de modo que ela esteja relacionada somente ao volume total, ou volume útil do reservatório, e ao tempo de pico. O volume total do reservatório será o volume propagado à jusante, e de acordo com o tempo de pico essa propagação será mais ou menos lenta. Considerando que o hidrograma com decaimento parabólico é o que melhor representa o esvaziamento do reservatório, parte-se da Equação (3) para obtenção da vazão de pico.

De acordo com o hidrograma com decaimento parabólico a área do gráfico sob a curva, deve ser igual ao volume total do reservatório, ou seja, a integral definida da função $Q(t)$ no intervalo de zero até o final do tempo de base é igual ao volume do reservatório. A função $Q(t)$ é exponencial e tem seu valor máximo quando $t = t_p$, independentemente do valor de k .

$$V = \int_0^{t_b} Q(t) = \int_0^{t_b} Q_p \left[\left(\frac{t}{t_p} \right) e^{\left(1 - \frac{t}{t_p} \right)} \right]^k \quad (4)$$

De acordo com a formulação matemática para confecção do hidrograma, k varia entre 0,1 e 0,5 de modo a ajustar a área do gráfico ao volume do reservatório. Conclui-se que para um mesmo volume de reservatório e mesmo tempo de pico, variando-se a vazão de pico, alcança-se a maior vazão de pico com $k=0,5$ como pode ser visto no exemplo a seguir, para um reservatório com volume de 53,45 hm³, sendo que os tempos de pico usados a seguir são para fins de exemplificação.

Tab 3: Variação do parâmetro k e para um mesmo T_p

TEMPO DE PICO (s)	k	Q_p (m ³ /s)
360	0,1	11.615
	0,2	20.275
	0,3	27.412
	0,4	33.543
	0,5	38.943
720	0,1	5.700
	0,2	9.828
	0,3	13.168
	0,4	16.005
	0,5	18.488

Com o valor máximo de k obtém-se as maiores vazões de pico com menores tempos de base, como pode ser exemplificado nas *Figura 6* e *Figura 7*, para hidrogramas com mesmo tempo de pico de 720 segundos.

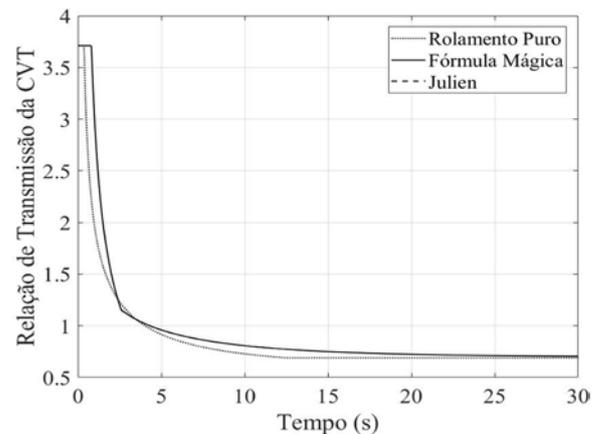


Fig 6: Hidrograma para $k=0,1$

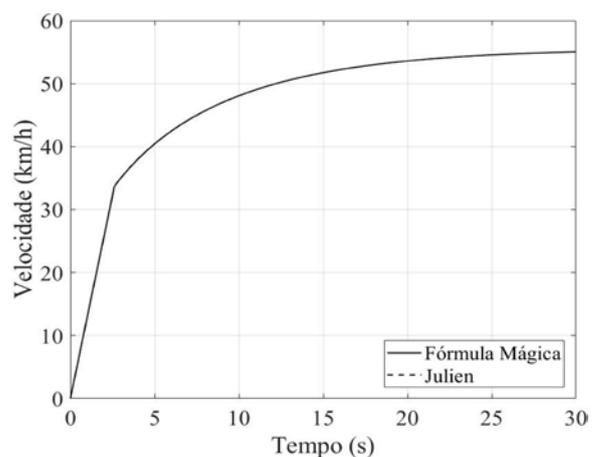


Figura 7: Hidrograma para $k=0,5$

Uma informação relacionada à barragem que possui exatidão é o volume do reservatório, esse mesmo volume será propagado, total ou parcialmente, à jusante com o rompimento. Diante do exposto, para obter a vazão de pico propõe-se que seja fixado um tempo de pico (T_p), e um k , e varie-se a vazão de pico (Q_p) até que a área do gráfico coincida com o volume do reservatório. Para um pior cenário, onde tem-se a maior vazão com menor tempo de base, usamos $k=0,5$ e variamos Q_p .

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de iniciar a aplicação da metodologia proposta no item 3, será feito o cálculo da vazão de pico utilizando-se os métodos empíricos, já mencionados, para fins de posterior comparação. Observando-se as equações da *Tabela 1* para obtenção da vazão de pico, percebe-se que essas podem ser bastante discrepantes em relação ao resultado final (Q_p) considerando os mesmos parâmetros de entrada. Para ilustrar a referida afirmação pode-se utilizar dados reais de barragens para obtenção de Q_p e verificar os valores obtidos. Serão utilizadas as Barragens do Funil, localizada no município de Itatiaia-RJ, e a barragem de Capoeira, localizada no município de Santa Teresinha-PB, como objeto de estudo.

As *Tabela 4* e *Tabela 5* descrevem respectivamente os dados de entrada utilizados para cálculo de Q_p para as barragens do Funil e de Capoeira.

Tab 4: Dados de entrada Barragem do Funil

V(m ³)	Volume máximo reservatório	605.700.000
A _s (m ²)	Área do reservatório para altura máxima	39.730.000
B _d (m)	Largura da barragem na Crista	385
H _d (m)	Altura da barragem	85
B _p (m)	Largura final da brecha(80%)	308
H _p (m)	Altura final da brecha (considerada 80%)	68
Y _{medio} (m)	Profundidade média (considerado 33.3%)	28,3
T _p (s)	Tempo desenvolvimento da brecha	360

Tab 5: Dados de entrada Barragem de Capoeira

V(m ³)	Volume máximo reservatório	53.000.000
A _s (m ²)	Área do reservatório para altura máxima	5.110.000
B _d (m)	Largura da barragem na Crista	104
H _d (m)	Altura da barragem	36
B _p (m)	Largura final da brecha (considerada 90%)	93,6
H _p (m)	Altura final da brecha (considerada 90%)	32,4
Y _{medio} (m)	Profundidade média (considerado 50%)	18
T _p (s)	Tempo desenvolvimento da brecha	1800

A seguir temos as *Tabela 6* e *Tabela 7* que trazem os valores de Q_p obtidos para as duas barragens utilizando-se as equações apresentadas na *Tabela 1*.

Tab 6: Obtenção da vazão de pico pelas equações empíricas - Funil

EQUAÇÃO	VAZÃO DE PICO – Q _p (m ³ /s)
Lou	37.050
Hagen	166.952
Saint Venant	53.762
Schoklistch	60.108
Bureau of Reclamation	70.498
Singh	293.604
Wetmore e Fread	394.422

Tab 7: Obtenção da vazão de pico pelas equações empíricas - Capoeira

EQUAÇÃO	VAZÃO DE PICO – Q _p (m ³ /s)
Lou	7.186
Hagen	34.329
Saint Venant	7.367
Schoklistch	7.765
Bureau of Reclamation	14.385
Singh	29.346
Wetmore e Fread	25.684

Para Barragem do Funil, considerou-se a remoção de 80% do barramento no rompimento com tempo de desenvolvimento da brecha de 0,1 horas ou 360 segundos. Observa-se que as vazões de pico obtidas variam muito sendo a menor 37.050 m³/s e a maior 394.422 m³/s, uma variação de 1065%. As vazões que se aproximaram mais foram as de Saint Venant e Schoklistch, visto que a diferença entre a formulação de ambas é a multiplicação de uma relação entre a largura final da brecha e a largura da barragem na equação de Schoklistch. No caso de remoção total onde a largura final da brecha é igual à largura da barragem, ambas as equações chegarão ao mesmo resultado. Na formulação de Singh, obtém-se vazões muito grandes quando a porcentagem removida do barramento for próxima de 100% por se considerar o

escoamento análogo ao que passa por um vertedor retangular de soleira espessa. A formulação de Wetmore e Fread leva em consideração o tempo de formação da brecha, logo, para tempos pequenos, como no exemplo estudado, tem-se vazões muito grandes.

Para Barragem de Capoeira, considerou-se a remoção de 90% do barramento no rompimento com tempo de desenvolvimento da brecha de 0,5 horas ou 1800 segundos. As vazões de pico variaram em uma proporção menor do que na Barragem do Funil devido ao maior tempo de pico e menor volume do reservatório, mas, ainda assim, há uma diferença considerável entre a menor vazão de 7.186 m³/s e a maior de 25.684 m³/s, uma variação de 357%.

Nas *Tabelas 8 a 11*, a seguir, segue uma demonstração feita em planilha de cálculo utilizando a metodologia proposta e os dados da barragem de Capoeira, com posterior explicação.

Tab8: Situação inicial para determinação da vazão de pico

Q _p (m ³ /s)	T _p (s)	k	Área total do Gráfico	Volume total (m ³)
0	1440	0,5	0	53.450.000

Tab 9: Situação inicial da planilha para o cálculo das áreas e confecção do hidrograma

Q (t)	t (h)	Áreas Parciais
0	0	0
0	0,2	0
0	0,4	0
0	0,6	0
0	0,8	0
0	1	0
0	1,2	0
0	1,4	0
0	1,6	0
0	1,8	0
0	2	0
0	2,2	0
0	2,4	0
0	2,6	0
0	2,8	0
0	3	0
0	3,2	0
0	3,4	0
0	3,6	0
0	3,8	0
0	4	0
0	4,2	0
0	4,4	0
0	4,6	0
0	4,8	0
0	5	0

Tab 10: Planilha após o cálculo da vazão de pico

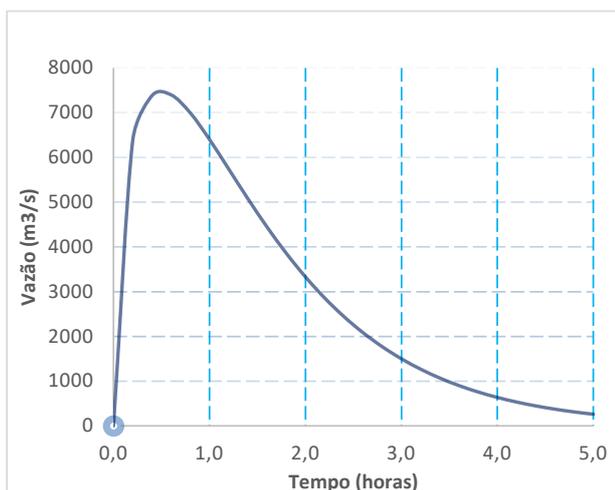
Qp (m ³ /s)	Tp(s)	k	Área total do Gráfico	Volume total (m ³)
7464	1800	0,5	53.450.000	53.450.000

Tab 11: Planilha após o cálculo das áreas para confecção do hidrograma

Q (t)	t (h)	Áreas Parciais
0	0,0	2294025
6372	0,2	4950185
7378	0,4	5319588
7398	0,6	5181403
6994	0,8	4822851
6402	1,0	4372061
5742	1,2	3895259
5078	1,4	3428114
4445	1,6	2989507
3860	1,8	2588602
3331	2,0	2228823
2860	2,2	1910211
2446	2,4	1630872
2084	2,6	1387873
1771	2,8	1177804
1501	3,0	997132
1269	3,2	842401
1071	3,4	710362
902	3,6	598034
759	3,8	502727
638	4,0	422050
535	4,2	353895
448	4,4	296424
375	4,6	248039
314	4,8	207363
262	5,0	94396

Na Tabela 8, tem-se a situação inicial do cálculo, onde os campos T_p , k e *Volume total* devem ser preenchidos. O campo Área Total do gráfico é preenchido automaticamente com a soma das Áreas parciais provenientes da Tabela 9. O campo Q_p será variável sendo alterado automaticamente de modo a fazer com que a Área total do gráfico seja igual ao *Volume total*. Na Tabela 9 tem-se o campo da função $Q(t)$ que corresponde a Equação (4) sendo que os valores de t são as frações de tempo, discretizado em períodos de 0,2 horas. As áreas parciais são as integrais definidas de cada intervalo, calculadas pelo método dos trapézios. Para obter-se o valor de Q_p aplica-se o teste de hipóteses, que é uma ferramenta que testa vários valores para as fórmulas da planilha, até que a igualdade proposta seja atingida, gerando as Tabelas 10 e 11, sendo que a Tabela 11 já permite a confecção do hidrograma (Figura 8). Observa-se que o valor encontrado para vazão de pico, $Q_p=7.464\text{m}^3/\text{s}$ é próximo aos valores encontrados nas formulações empíricas de *Lou*, *Saint Venant* e *Schoklistch*.

Fig 8: Hidrograma gerado



5. CONCLUSÃO

O estudo do rompimento de barragens é um assunto muito amplo que abrange diversas áreas do conhecimento. A metodologia proposta no presente artigo para determinação da vazão de pico e confecção do hidrograma de ruptura é parte integrante de um estudo maior que abrange não só o rompimento estrutura bem como seus efeitos no vale a pena jusante e ações emergenciais a serem desencadeadas.

A utilização das equações empíricas para determinação da vazão de pico pode ser problemática devido à grande variação de valores finais encontrados para os mesmos parâmetros de entrada, o que dificulta a escolha de qual equação utilizar para simular um rompimento. Ao utilizarmos como parâmetro a equação do hidrograma com decaimento parabólico, considerando o tempo de pico e o volume a ser escoado, temos características que podem ser mensuradas de maneira mais prática. Pode-se criar vários cenários com diferentes hidrogramas de ruptura, variando o tempo de pico e o volume a ser escoado, podendo ser mais ou menos conservador de acordo com a quantidade de informações que se possui. A montagem do hidrograma é simples e feita em planilha de cálculo, que depois é exportada para o software de simulação.

A metodologia proposta busca promover o desenvolvimento de ferramentas que podem facilitar o processo de simulação de rompimento, podendo ser amplamente utilizadas, e ser um fator contribuinte para o aumento da segurança dessas estruturas de elevada importância nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Z. Zhang, "Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges", *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, vol. 8, nr. 1, 2006, pg 24-37.
- [2] SINGH, V. P. *Dam Breach Modeling Technology*. Kluwer Academic Publishers. Louisiana, 1996, 242 p.
- [3] UEMURA, S. *Instrumentos de Avaliação e Gestão de Impactos Gerados por Rupturas de Barragens*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009, 160 p.
- [4] USACE - U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center (HEC), Version 4.1, 2010, 417 p.
- [5] LAURIANO, A. W., PALMIER, L. R., MONTE-MOR, R. C. A., BRASIL, L. S. S., NASCIMENTO, N. O., SOUZA, N. E CANELLAS, A. V. B. *Mapeamento de áreas Potencialmente Inundáveis Face à Ruptura Hipotética de Barragens - Estudos de Caso: Barragem de Funil e Barragem de Manso*. In: XXIII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, Cartagena de Indias, Colúmbia, 2008b, 15 p
- [6] COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M., *Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina-RS*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 1997, vol. 2, nº 2, 191-206p.
- [7] LADEIRA, J. E. R. *Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos. O Caso UHE - São Simão*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007, 210 p.
- [8] UEMURA, S. *Instrumentos de Avaliação e Gestão de Impactos Gerados por Rupturas de Barragens*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009, 160 p.
- [9] MASCARENHAS, F. C. B. *Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1990, 291 p.
- [10] SILVA JUNIOR J. C. *G. Estudo Comparativo Entre Modelos Unidimensionale Pseudo-bidimensional para Simulação da*

- Propagação de Ondas Provocadas Pela Ruptura de Barragens. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro 2013, 147p.
- [11] BARFIELD, B. J.; WARNER, R. C.; HAAN, C. T. Applied Hydrology and Sedimentology for Disturbed Areas. Oklahoma Technical Press, 1981, pp. 104-108.
- [12] WAHL, T. L. The Uncertainty of Embankment Dam Breach Parameter Predictions Based on Dam Failure Case Studies in USDA/FEMA, Workshop on Issues, Resolutions and Research
- [13] Needs Related on Dam Failure Analysis. Oklahoma, Jun. 2001, 16 p.
- [14] LAURIANO, A. W. Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação entre os Modelos FLDWAV e HEC-RAS. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009, 251p.