

# ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE BORDA LIVRE RESULTANTE DA AÇÃO DOS VENTOS PARA DIMENSIONAMENTO DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO

Mariana Sampaio Barrozo<sup>1</sup>, Nathália Couto Machado<sup>2</sup>, Gladstone Rodrigues Alexandre<sup>3</sup>  
y André William Lauriano<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Engenheira da Pimenta de Ávila Consultoria.

<sup>2,3,4</sup> Engenheira da Pimenta de Ávila Consultoria, Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

E-mail: Mariana.barrozo@pimentadeavila.com.br, nathalia.couto@pimentadeavila.com.br,  
gladstone.alexandre@pimentadeavila.com.br, andre.lauriano@pimentadeavila.com.br

## Introdução e objetivo

Para o projeto de Barragens de Rejeito são preconizados pelas normas nacionais e internacionais critérios de dimensionamento de segurança hidrológica e hidráulica.

A Norma Brasileira ABNT NBR 13.028 (ABNT, 2017), especifica os requisitos mínimos para elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos de beneficiamento, contenção de sedimentos e reservação de água, em mineração, visando atender às condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação, minimizando os impactos ao meio ambiente.

De acordo com essa norma, as dimensões dos sistemas extravasores devem ser definidas a partir do estudo das vazões máximas, que consiste em calcular a vazão de cheia para determinado período de retorno (TR), a ser utilizada no dimensionamento hidrológico-hidráulico destes, garantindo a segurança dos sistemas decorrente de eventos extremos de cheia. O período de retorno deve ser definido a partir das consequências de falha estrutural e obediência à fase da vida útil da estrutura (fase operacional ou de fechamento) e após a vida útil.

Vale frisar que outras referências, mesmo para etapas operacionais, recomendam a adoção de uma cheia com tempo de retorno de 10.000 anos, com borda livre remanescente de 1,0 m durante a passagem da cheia. Esse critério para a cheia de projeto é fixado em função das dimensões das barragens e do nível de risco a jusante, em caso de acidente com ruptura do maciço, conforme critérios definidos pelo USBR (1977) e recomendados para a aplicação no caso de barragens de mineração (Pinheiro, 2011).

Já o ANCOLD (2012) preconiza que a chuva de projeto deve ser determinada em relação a categoria de consequência de falha da barragem. O dimensionamento do extravasor deve ser baseado nos volumes necessários para laminar a cheia extrema, assim como conter a onda eólica acima do nível máximo maximorum do evento chuvoso, de modo a evitar o galgamento da estrutura.

Entende-se como Borda Livre Operacional a distância vertical entre o nível operacional do reservatório (soleira do extravasor) e a crista da barragem. Este valor representa a capacidade da barragem para laminar um evento de chuva extremo considerando a combinação da capacidade de armazenamento da chuva, a capacidade de descarga vertedouro e a altura para conter ondas provenientes do vento (Borda livre remanescente), com o intuito de evitar o galgamento da barragem, conforme ilustrado na Figura 1. O ANCOLD (2012) descreve a Borda Livre eólica, nomeada no presente estudo como borda livre remanescente, como a altura disponível para absorver as ondas provocadas pelos ventos a partir do nível de água máximo maximorum, proveniente da chuva de projeto.

Neste contexto das diversas abordagens acerca dos critérios para dimensionamento de bora livre das barragens de rejeito, o objetivo do presente trabalho é apresentar as diferentes metodologias de cálculo de borda livre resultante da ação dos ventos e comparar os resultados obtidos na aplicação de uma estrutura hipotética de barragens.

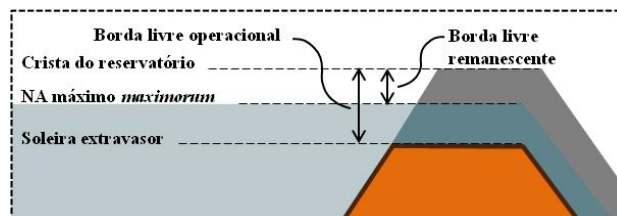


Figura 1.- Croqui esquemático da borda livre.

## Metodologia

No cálculo da borda livre tem sido aplicado a verificação da amplitude da onda passível de ser formada na superfície de água do reservatório associada a ação dos ventos. A metodologia para cálculo é proposta por diversos autores, como: Saville et. al (1962), Pinheiro (2011) e USBR (2012).

De acordo com Pinheiro (2011), para a determinação da borda livre eólica é necessário o cálculo do *fetch* e da amplitude da onda eólica conforme metodologia a seguir. O *fetch* é calculado a partir da ponderação dada pela Equação 1:

$$F = \frac{\sum d \cdot \cos \theta}{\sum \cos \theta} \quad [1]$$

Sendo: “F” o *fetch* ou extensão da superfície líquida sobre a qual atua o vento (km); “d” a distâncias medidas das margens do lago em relação ao maciço (km); “θ” o ângulo das projeções das distâncias em relação a perpendicular do maciço.

Na presente metodologia o diagrama típico para o cálculo do *fetch* considera o intervalo angular entre as projeções das distâncias de 10°.

O cálculo da amplitude da onda eólica decorre de uma adaptação da metodologia formulada por Saville et. al. (1962) proposta por Naghettini (1999), conforme Equação 2.

$$h_0 = 0,005 * V_v^{1,06} * F^{0,47} \quad [2]$$

Na qual, “h<sub>0</sub>” amplitude da onda eólica em metros; “V<sub>v</sub>” a velocidade do vento 7,60 m acima do N.A do reservatório em km/h; e “F” o *fetch* ou extensão da superfície líquida sobre a qual atua o vento (km).

Segundo Pinheiro (2011), na ausência de estudos estatísticos para a determinação da frequência e velocidade dos ventos, tem sido comum a adoção da velocidade de 80 km/h.

Ainda de acordo com Pinheiro (2011), para as barragens de terra ou enrocamento, o valor da borda-livre (B.L) a ser adotado deve seguir a Equação 3.

$$B.L = 1,4 * h_0 \quad [3]$$

Já, de acordo com USBR (2012), para a determinação da borda livre eólica necessária para as Barragens deve ser aplicada a metodologia descrita a seguir:

### Cálculo do Fetch:

O *fetch* é calculado a partir da soma dos comprimentos das linhas radiais dividido pelo número de linhas (9 linhas),

conforme demonstrado na Equação 4.

$$F = \frac{\sum_{n=1}^9 \text{Comprimento das linhas radiais}}{9} \quad [4]$$

#### Altura da Onda Eólica:

A altura da onda eólica é função do *fetch* calculado e da velocidade média do vento sobre a água, determinada a partir da AEP de projeto, conforme a Equação 5.

$$H_s = 0,0245 * F^{\frac{1}{3}} * V (1,1 + 0,0156 * V)^{\frac{1}{2}} \quad [5]$$

Na qual, “ $H_s$ ” é amplitude da onda eólica em metros; “ $V$ ” a velocidade do vento sobre o reservatório;

#### Comprimento e período da Onda:

As Equações 6 e 7 representam o cálculo do período da onda ( $T$ ) e o comprimento ( $L$ ), respectivamente.

$$T = 0,464 * F^{\frac{1}{3}} * V^{\frac{1}{3}} * (1,1 + 0,0156 * V)^{\frac{1}{6}} \quad [6]$$

$$L = 5,12 T^2 \quad [7]$$

#### Wave Runup:

A partir cálculo do período da onda, da altura da onda eólica e da determinação da inclinação do talude de jusante, o coeficiente do Wave Runup ( $R$ ) pode ser determinado, a partir das Equações 8 e 9.

$$\varepsilon_p = 2,26 * T \frac{(\tan \alpha)}{H_s^{1/2}} \quad [8]$$

$$R = H_s (A \varepsilon_p + C) \gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta \quad [9]$$

No qual, “ $\varepsilon_p$ ” é o fator de similaridade da superfície; “ $\alpha$ ” a inclinação do talude de montante; “ $A$ ,  $C$ ” os coeficientes em função de  $\xi_p$ ; “ $\gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta$ ” fatores de redução.

#### Wind Setup:

O parâmetro de Wind Setup ( $S$ ) é calculado a partir da equação 10.

$$S = \frac{V * F}{1400 * d} \quad [10]$$

Sendo “ $d$ ” a profundidade média do reservatório.

Borda livre eólica: *Wave Runup* + *Wind Setup* =  $R$  +  $S$

Por fim, a altura necessária para garantir a borda livre eólica corresponde a maior das duas alturas: (i) altura de 3 pés e (ii) a soma da parcela do *Wave Runup* e do *Wind Setup*.

## Descrição do estudo de caso

Para a aplicação das diferentes metodologias supracitadas são avaliadas duas configurações de reservatório: (a) reservatório com formato alongado e retangular do tipo *Pond* e (b) para reservatórios irregulares, formados por vários afluentes do tipo barragem de fechamento de vale. Ambas as configurações adotadas no presente estudo representam geometrias hipotéticas de reservatório, representadas esquematicamente na Figura 2.

Como forma de parametrização da análise comparativa foi considerado que ambos os reservatórios possuem características semelhantes, como: área de espelho de água, inclinação do talude de montante, altura da superfície líquida do reservatório em contato com o maciço e revestimento do talude de montante e/ou jusante.



Figura 2.- Croqui esquemático dos tipos de reservatórios analisados: a) reservatórios irregulares; b) alongados/retangulares.

## Resultados

As metodologias de cálculo possuem diferenças quanto aos níveis de detalhamento nos dados de entrada, como: ângulo das projeções para cálculo do *fetch*, revestimento e inclinação do talude de montante, profundidade do reservatório. Observou-se que estas variáveis impactam diretamente nos valores de amplitude eólica calculados.

Vale destacar também a importância do parâmetro de velocidade do vento nos cálculos. Esse parâmetro pode ser tratado a partir de uma análise probabilística dos dados monitorados na região do estudo. Contudo, em muitos casos, esses dados não são monitorados e/ou disponibilizados para consulta pública, sendo recomendado pelos autores a adoção de valores de referência. Observa-se, entretanto, que este é um parâmetro extremamente sensível para a determinação da amplitude eólica e, conseqüente, da borda livre.

Este artigo visa trabalhar de maneira paramétrica cada uma dessas variáveis abordadas nas distintas metodologias, com o intuito de ilustrar a variação das bordas livres calculadas e conseqüentemente a implicação na determinação da elevação de projeto da crista das barragens.

Contudo, frente as incertezas associadas à definição das cheias de projeto, seja por questões relacionadas ao uso e ocupação do solo ou pelo aumento, cada dia mais evidente, das intensidades de chuva, é de suma importância a definição adequada da borda livre em reservatórios, visando absorver essas incertezas. Nesse sentido, em virtude das discrepâncias entre as metodologias para o cálculo da borda livre, conforme demonstrado no presente estudo, é evidente a importância de um apurado julgamento de engenharia do especialista na definição dos critérios que melhor se enquadram no problema em questão.

## Referencias bibliográficas

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017) Requisitos Mínimos para Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água, em Mineração, Visando Atender às Condições de Segurança, Operacionalidade, Economicidade e Desativação, Minimizando os Impactos ao Meio Ambiente. ABNT NBR 13028, 3a edição.
- ANCOLD – Australian National Committee on Large Dams Incorporated. (2012) Guidelines on Tailings Dams. Planning, Construction, Operation and Closure.
- Pinheiro, M.C. (2011) Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração. 1ª Edição, 171p.
- Saville, T.; McClendon, E. W.; Cochran, A. L. (1962) Freeboard Allowances for Waters in Inland Reservoirs, ASCE Journal of Waterways and Harbours Division.
- USBR – U.S. Bureau of Reclamation. (1977) Design of Small Dams, A Water Resources Technical Publication.
- USBR – United States Department of the Interior. (2012) Bureau of Reclamation. Design Standards N°. 13 – Embankment Dams. Chapter 6: Freeboard. Phase 4 (Final).