

## SISTEMATIZAÇÃO DA ANÁLISE DA DISSIPAÇÃO À JUSANTE DE VERTEDOUROS SALTO ESQUI

*Mendonça, J. M. F.<sup>1</sup>; Veiga, B. V.<sup>2</sup>*

**RESUMO** – Este artigo tem como objetivo a apresentação e sistematização de metodologias conceituais e empíricas mais utilizadas para a avaliação da distribuição de pressões em fossas de dissipação a jusante de vertedouros tipo salto esquí. O estudo acerca da distribuição de pressões em fossas de erosão é de suma importância, pois impactam diretamente na profundidade de erosão, podendo acometer a segurança e estabilidade da barragem. Assim, o trabalho busca estudar as metodologias existentes, com enfoque especial na estimativa de pressões hidrodinâmicas e sua caracterização junto ao fundo da bacia.

**ABSTRACT** – This article aims to present and systematize the most used conceptual and empirical methodologies for the evaluation of pressure distribution in dissipation pits downstream of ski-jump spillways. The study about the distribution of pressures in erosion pits is of paramount importance, as they directly impact the erosion depth, which can affect the safety and stability of the dam. Thus, the work seeks to study existing methodologies, with a special focus on the estimation of hydrodynamic pressures and their characterization along the basin bottom.

**Palavras-Chave** – Dissipação de energia; vertedouro salto-esquí; pressões hidrodinâmicas;

### INTRODUÇÃO

Com o objetivo de conduzir o excesso de água em períodos de cheia para a parte jusante da barragem de forma segura, o vertedouro é considerado um dos componentes mais indispensáveis de uma barragem, atuando como um sistema de escape, a fim de evitar o galgamento e uma possível falha da barragem (USACE, 1995).

Juntamente com os avanços da tecnologia na engenharia de barragens, surgiram novos problemas, como a dissipação de energia e a erosão. Um dos métodos mais eficazes e econômicos para dissipação de energia hidráulica de barragens mais altas é o vertedouro de soleira vertente com dissipador salto esquí. Esse tipo de dissipador vem sendo cada vez mais utilizado em grandes barragens, devido a sua capacidade de transportar com segurança um escoamento de alta velocidade superiores a 30 m/s (NALE, 2020).

No caso de sistemas dissipadores compostos por vertedouro salto esquí seguido de uma fossa de dissipação, sua caracterização se dá pelo lançamento de um jato após o escoamento ganhar

---

1) Graduando, Engenharia Civil, UFPR, Curitiba – PR, Brasil. Tel.: (41) 99583-2024. E-mail: j.mauricio598@gmail.com

2) Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS), UFPR, Curitiba – PR, Brasil. Tel.: (41) 98848-9420, E-mail: bvveiga@ufpr.br

velocidade em uma calha rápida, lançando-o no ar, e posteriormente se chocando sobre o leito do rio em um local afastado da fundação da barragem. Dessa maneira, condições topográficas favoráveis ao lançamento do jato longe da estrutura são de suma importância.

De acordo com Borja (2012), o jato impactante na bacia de dissipação pode gerar diferentes estruturas hidrodinâmicas, dependendo da geometria da bacia e das condições a jusante, ou seja, do nível do colchão d'água em regime permanente, alterando assim a distribuição de pressões no leito.

Este artigo apresenta as abordagens mais usadas para a avaliação da capacidade de dissipação da energia em fossas de dissipação a jusante de vertedouros em salto de esqui, trazendo a conveniência de utilização de cada uma delas com sugestões de avaliações futuras.

## **REVISÃO DE LITERATURA**

Ao se considerar a dissipação do jato na fossa de jusante, o principal interesse de projeto e construção é avaliar se a profundidade escavada ou futuramente produzida é suficiente para conter a energia de modo controlado.

Para a avaliação dessa condição de funcionamento é necessária a revisão dos conceitos físicos envolvidos no processo, antes de considerar a abordagem empírica mais tradicional.

### **Difusão do jato no colchão d'água**

De acordo com Manso (2006), o primeiro passo para analisar a interação dinâmica entre a morfologia da bacia e a difusão do jato, é a análise em bacias com fundo plano. Em consonância, Ervine e Falvey (1987) compilaram alguns estudos sobre a influência de jatos turbulentos livres e o arrasto de ar no processo de difusão, apresentando um esquema da difusão de jatos em piscinas de imersão com colchão de água infinito, tanto para casos sem, quanto com entrada de ar (Figura 1).

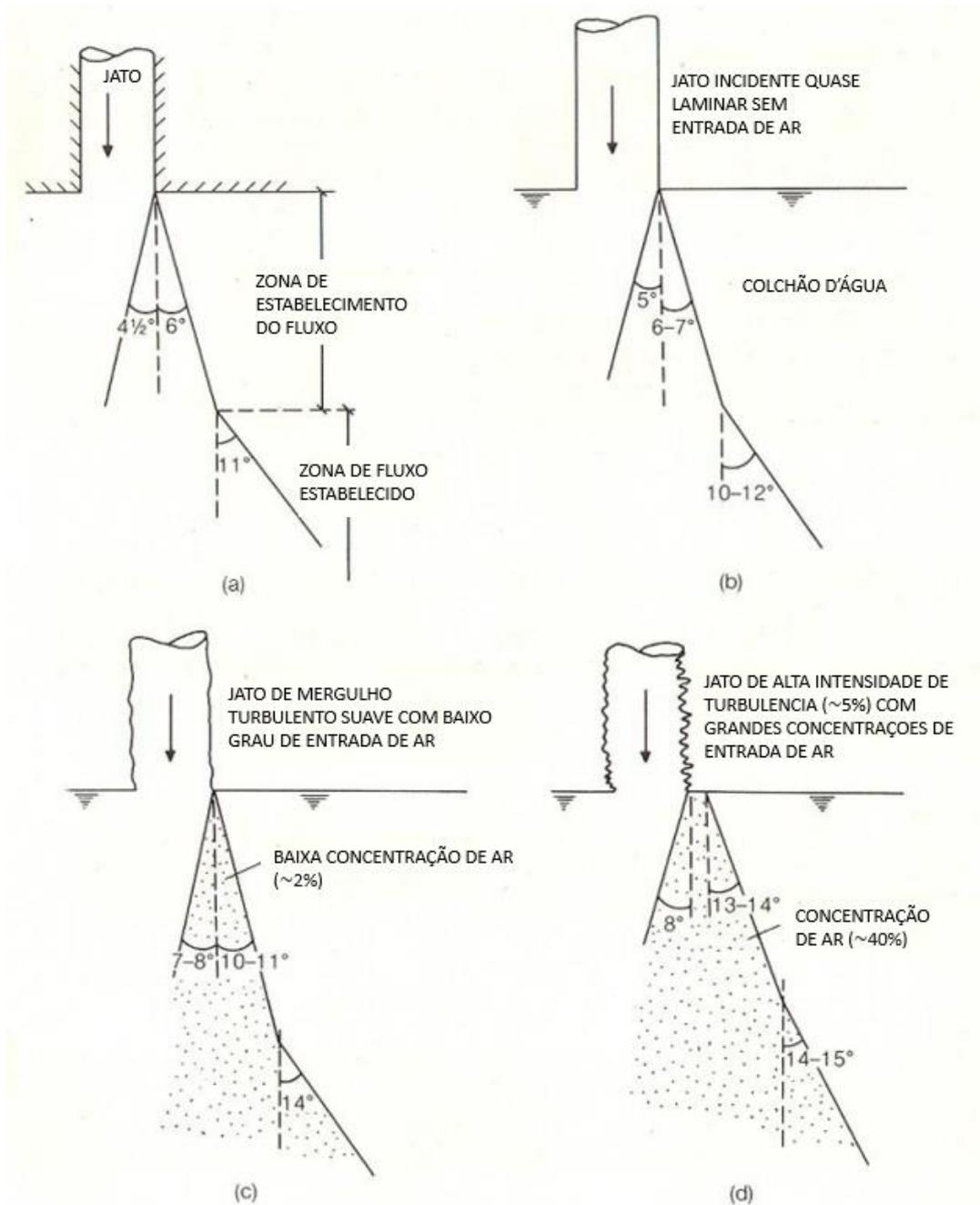


Figura 1 – Difusão de jato em colchão infinito – Adaptado de Ervine e Falvey, 1987.

Onde: (a) representa o jato submerso; (b) o jato quase laminar; (c) o jato turbulento suave; e (d) representa o jato altamente turbulento.

Conforme Bollaert (2002) e Pinto (2004, apud BUFFON, 2016), as cavidades de ar que entram na camada de mistura turbulenta do fluxo se dividem em bolhas menores, dando origem a três regiões de difusão de naturezas diferentes, como na Figura 2.

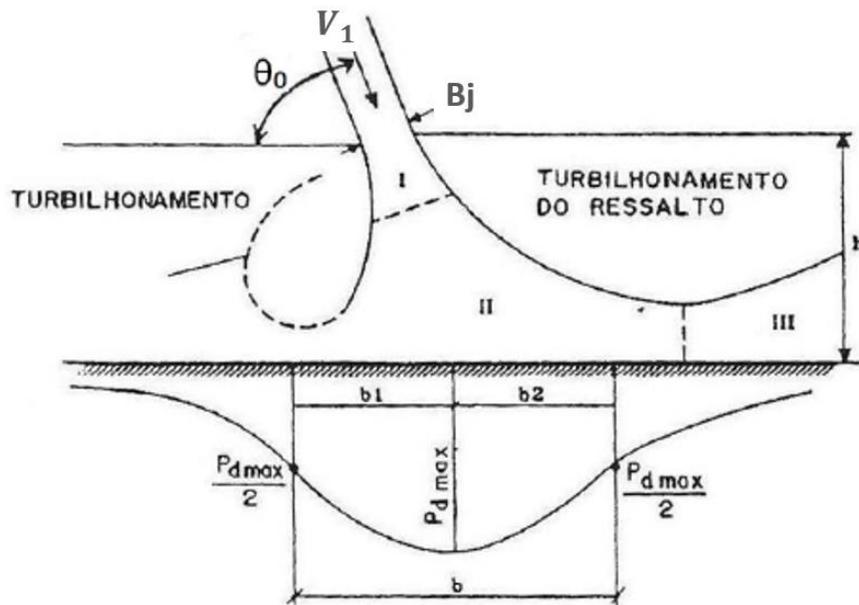


Figura 2 – Regiões de difusão do jato dentro de um colchão d'água – Pinto, 2004 (apud BUFFON, 2016).

a) Região de Lâmina Livre (I): Com características similares ao de queda livre, o escoamento apresenta um alargamento aproximadamente linear, com um ângulo maior que o correspondente no ar. Devido à ação de sucção dos turbilhões, há a formação de ondulações adjacentes ao fluxo.

b) Zona de Choque (II): As linhas de corrente são refletidas no leito, a velocidade reduz e aparecem pressões e gradientes de pressões relativamente elevados junto ao fundo. Em razão da mistura de ar arrastado pelo deslocamento na atmosfera, e posteriormente o impacto com o leito, uma turbulência acentua surge, originando grande flutuações de pressão junto ao fundo.

c) Região de Jato de Parede (III): Região é caracterizada pela ocorrência de um ressalto hidráulico, com o escoamento se comportando como um jato de parede. Além de que, à medida que o nível a jusante se eleva, as flutuações de pressões são dissipadas.

### Pressão média e pressão dinâmica junto ao fundo

Segundo Kempka (2017), a pressão média ( $P_m$ ) pode ser compreendida como a pressão hidrostática do colchão d'água com valor igual à espessura do mesmo, que somada com mais uma parcela adicional de pressão, traduz a ação do jato sobre o leito. Já a pressão dinâmica ( $P_d$ ) representa a diferença entre a pressão de estagnação do escoamento, em um ponto específico de uma linha de corrente onde a velocidade seja nula, e a pressão hidrostática em um ponto distinto da mesma linha de corrente, para jatos verticais. Pinto (1994), explica que para a obtenção de um ( $P_d$ ) no interior de

um ponto no colchão d'água, deve-se descontar a espessura da coluna d'água ( $h$ ) acima do ponto, resultando na Equação 1:

$$P_d = P_{medida} - h \text{ [m. c. a]} \quad (1)$$

Levando em conta a velocidade média de incidência do jato sobre o colchão d'água, Hartung e Hausler (1973 apud CASTILLO, 1989) desenvolveram um método de estimativa de pressão dinâmica em qualquer ponto no interior do fluxo do jato mergulhante. Método esse, baseado na teoria da turbulência do jato livre, considerando um jato de seção retangular, e possuindo aplicação delimitada para região onde o núcleo do jato está plenamente desenvolvido ( $y \geq y_k$ ) conforme a Equação 2.

$$P_X = \rho \cdot g \cdot \frac{V_u^2}{2g} \cdot \frac{y_k}{y} \cdot e^{-\frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{x \cdot y_k}{B_u \cdot y}\right)^2} \quad (2)$$

Sendo que,  $P_X$  é a carga de pressão dinâmica calculada [m.c.a.];  $V_u$  é a velocidade média de incidência do jato sobre o colchão d'água [m/s];  $B_u$  a espessura do bocal que emite o jato sobre o colchão d'água [m];  $y_k$  o comprimento de convergência do núcleo; e  $y$  a distância percorrida pelo jato no interior do colchão.

Já para o cálculo da pressão dinâmica observada no eixo do jato ( $P_{d,eixo}$ ), a equação 2 é restringida de modo que  $r = 0$ , resultando na Equação 3:

$$P_{d,eixo} = \frac{V_u^2}{2g} \cdot \frac{y_k}{y} \quad (3)$$

Segundo Manso (2006), a distribuição de pressões na soleira não obedece a uma distribuição normal, visto que o jato não atinge a soleira perpendicularmente, seja pelo o ângulo de incidência do jato no colchão d'água, ou pela inclinação do leito. No entanto, vários autores propõem uma distribuição exponencial simétrica, representada pela Equação 4.

$$P_{y/h} = P_{dmáx} \cdot e^{-\varphi} \quad (4)$$

Para identificar a pressão em determinado ponto da soleira, Hartung e Hausler (1973 apud CASTILLO, 1989) sugerem uma combinação da Equação 4 e a Equação 5.

$$\varphi = \frac{\pi}{16} \cdot \left(2 \cdot \frac{x_c}{B_j} \cdot \frac{y}{h}\right)^2 \quad (5)$$

Onde,  $P_{y/h}$  é a pressão dinâmica média na posição  $y/h$  (m);  $P_d$  a pressão dinâmica máxima (m);  $y/h$  a posição adimensional em relação ao ponto de estagnação;  $h$  a espessura do colchão de água (m);  $y$  é a abcissa medida a partir do ponto de estagnação (m);  $B_j$  o diâmetro do jato na entrada do colchão de água (m); e  $x_c$  é o comprimento do núcleo (m).

De forma resumida, os autores definem  $\varphi$  como (Equação 6 e Equação 7):

$$\varphi = -19,6 \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^2, \text{ para } x_c = 5B_j \quad (6)$$

$$\varphi = -40,71 \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^2, \text{ para } x_c = 7,2B_j \quad (7)$$

Baseado em estudos realizadas com jatos de ar, considerando um fluxo incompressível, Beltaos (1976 – apud CASTILLO, 1989), propõem uma expressão de análise das pressões dinâmicas médias com jato desenvolvido (Equação 8). No entanto, a expressão somente é válida para ângulos de incidência que variem entre 20° a 90° (Equação 8).

$$\varphi = -42,01 \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^2 \quad (8)$$

Seguindo a mesma linha, Cola (1965 – apud CASTILLO, 1989) estudou jatos em colchões de altura finita, desconsiderando a perda de carga devido à entrada de ar e o seu emulsionamento na zona de impacto, propondo a seguinte expressão (Equação 9):

$$\varphi = -40,51 \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^2 \quad (9)$$

Já Aki (1969 – apud CASTILLO, 1989) sugeriu uma combinação da Equação 4 com a Equação 10, para o intervalo  $[h_2, 5B_j]$ .

$$\varphi = -12,56 \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^2 \quad (10)$$

Conforme citado por Castillo (1989), esse ajuste proposto se difere um pouco numericamente dos anteriores, pois as diferentes metodologias e as condições reais dos ensaios realizados pelos pesquisadores chineses (Aki, 1969) são pouco conhecidas. No entanto, outros autores chineses propuseram uma correção de  $b = 0,23h$  (Xu Duo-Ming, 1986 – apud CASTILLO, 1989).

Para tornar a expressão de Aki equivalente as demais, os valores do comprimento de influência do jato ( $b$ ) foram substituídos pelos propostos por Beltaos (1976 – apud CASTILLO, 1989)  $b = 0,13h$ , e Xu Duo Ming (1986 – apud CASTILLO, 1989)  $b = 0,23h$ , obtendo as seguintes expressões (Equação 11 e Equação 12):

$$\frac{P_d}{P_{d,eixo}} = e^{-0,212\left(\frac{x}{b}\right)^2}, \text{ para } b = 0,13h \quad (11)$$

$$\frac{P_d}{P_{d,eixo}} = e^{-0,664\left(\frac{x}{b}\right)^2}, \text{ para } b = 0,23h \quad (12)$$

Dessa forma, as equações da pressão dinâmica média no ponto de estagnação, propostas pelos diferentes autores e analisadas anteriormente, podem ser representadas de forma geral em duas equações: uma em função da largura de influência do jato ( $b$ ) (Equação 13), e a outra, em função da altura do colchão de água ( $h$ ) (Equação 14) (CASTILLO, 1989).

$$\frac{P_d}{P_{dmáx}} = e^{-\varphi\left(\frac{x}{b}\right)^2} \quad (13)$$

$$\frac{P_d}{P_{d\max}} = e^{-\varphi' \left(\frac{x}{h}\right)^2} \quad (14)$$

Onde,  $b$  é a largura de influência do jato (m);  $h$  é a profundidade do colchão de água (m); e  $x$  é a medida longitudinal ao jato, medida a partir do lançamento (m).

Os valores dos parâmetros para cada equação estão indicados no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros das equações de cálculo das pressões dinâmicas médias nas proximidades do ponto de estagnação

Autor	$\varphi$	$\varphi'$	$b$	$y_k$
Hartung e Hausler (1973)	0,331*	19,60*	0,13h <sup>(1)</sup>	5B <sub>j</sub> <sup>(2)</sup>
	0,688**	40,71**	0,13h <sup>(1)</sup>	7,2B <sub>j</sub> <sup>(4)</sup>
Beltaos (1976)	0,693	42,01	0,13h	-
Cola (1965)	0,685	40,51	0,13h <sup>(1)</sup>	-
Aki (1969)	0,212	12,56	0,13h	-
	0,664	12,56	0,23h <sup>(3)</sup>	-

\*Situação com núcleo do jato desintegrado;

\*\*Presença do núcleo do jato

(1) valor obtido por Beltaos (1976)

(2) valor obtido por Hartung e Hausler (1973)

(3) valor obtido por Xu Duo-Ming (1986)

(4) valor proposto por Castillo (1989)

## Abordagem empírica para a determinação da profundidade de erosão

A determinação da profundidade de erosão pode ser calculada por meio de diversas expressões de vários autores, que foram obtidas através de estudos empíricos, e podem ser agrupadas de acordo com as variáveis que consideram influenciar na erosão. Mason e Arumugan (1985) realizaram uma análise crítica comparativa detalhada dessas fórmulas.

A equação geral do grupo 1, possui uma forma geral, sendo (Equação 15):

$$D \cong K \frac{q^{xH^y}}{d^z} \quad (15)$$

Onde,  $K$ ,  $x$ ,  $y$  e  $z$  são constantes para cada uma das fórmulas;  $D$  é a profundidade de erosão (m);  $H$  a carga total (m);  $d$  o diâmetro do bloco característico (m); e  $q$  é a vazão específica (m<sup>3</sup>/s/m).

Os autores do grupo 1, segundo Mason e Arumugan (1985), parecem ter derivado suas fórmulas de experimentos em que os parâmetros foram modificados para traduzir o efeito erosivo observado.

Dentre as expressões estudadas, Veronese (1937) analisou em seus experimentos a erosão gerada por um jato em queda livre sobre o leito sem coesão (de seixos), recomendando que o diâmetro

médio do material seja obtido através amostras do leito do rio em estudo. A fórmula Veronese B surgiu a partir da observação em ensaios que a partir de um determinado diâmetro, a erosão se tornava independente desse fator (MAGELA, 2020).

As fossas de erosão medidas através de diversos protótipos são apresentadas na Figura 3, comparando-as com as fossas estimadas por fórmulas de diferentes autores. Ilustração esta, que foi utilizada para tentar definir os valores do coeficiente K em função das características da rocha na bacia de mergulho (MAGELA E BRITO, 1996).

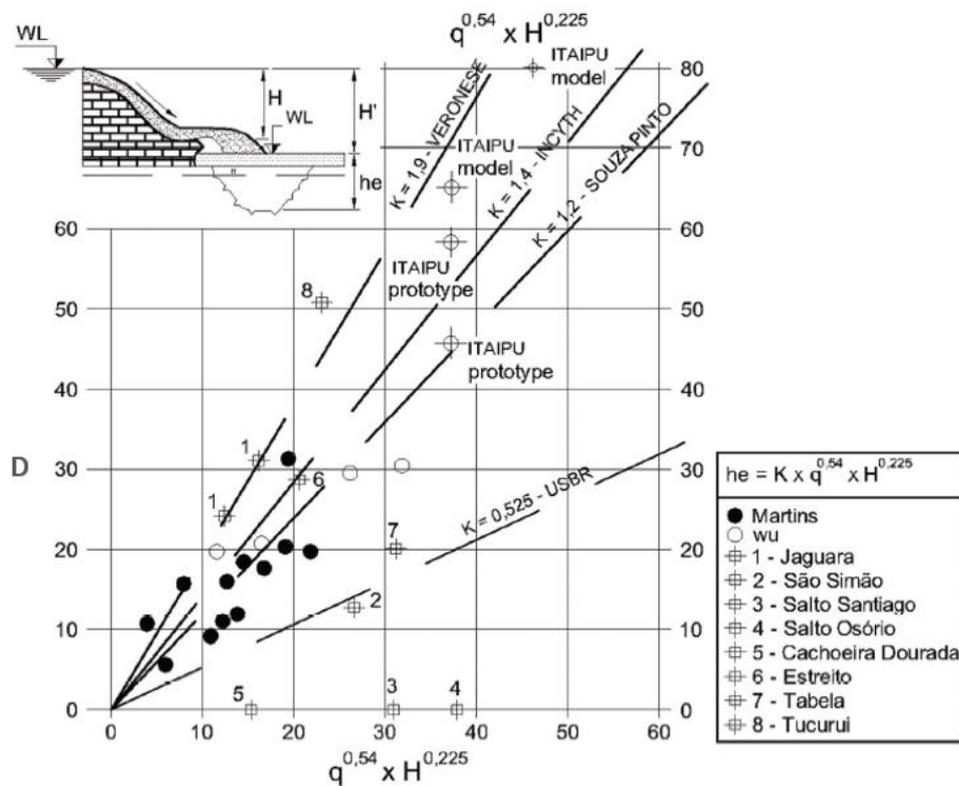


Figura 1 - Erosão medida a jusante de vários vertedouros x estimativas de erosão usando formulações de vários autores – CBDB, 2002.

## CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DAS FORMULAÇÕES

As avaliações dos processos erosivos são realizadas em modelos reduzidos, através de dois tipos de testes, um com fundo móvel solto e outro com fundo móvel com algum grau de coesão. O conhecimento do processo erosivo nos protótipos, sua associação com as condições operacionais que as ocasionaram e o levantamento geológico, que vai desde suas características geotécnicas, grau de

faturamento até o comportamento dos planos de clivagem no material, são informações valiosas para avaliar a qualidade do projeto elaborado, como também para possibilitar um melhor planejamento e orientar futuros estudos de projetos. Além de que, as medições de flutuação de pressão e sua associação com a resistência do maciço rochoso e com as tensões hidrodinâmicas, podem ser outra forma de prever a erosão (MAGELA, 2020).

As proposições de abordagens consideradas têm as suas vantagens e desvantagens para a aplicação em várias fases de projeto. Enquanto a abordagem empírica tem a seu favor a simplicidade e facilidade de aplicação, as estimativas de pressão são mais precisas ao considerar fatores importantes como ângulo de incidência e geometria do jato. Além disso, essa última, por ter uma base conceitual, permite a consideração de aspectos como flutuação de pressões e evolução da erosão a longo prazo.

Assim, o uso das metodologias pode ser valioso em diversas fases do projeto, à medida que se evolui no conhecimento das condições de contorno do problema.

## REFERÊNCIAS

BOLLAERT, E. (2002). *Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact*. Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

BORJA, J. G. (2012). de. *Considerações sobre dissipação de energia a jusante de vertedouros salto esqui*. 322 p. Dissertação de Mestrado – IPH/UFRGS, Porto Alegre.

BUFFON, F. T. (2016). *Determinação de pressões em fossas de erosão a jusante de dissipadores tipo salto esqui*. 2016. 106 p. Dissertação de Mestrado – IPH/UFRGS, Porto Alegre.

CASTILLO, L. G. E. (1989). *Metodologia experimental y numérica para la caracterización del campo de presiones em los dissipadores de energia hidráulica. Aplicación al vertido libre em presas boveda*. 241 p. Tese de Doutorado - Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona.

ERVINE, D. A. & FALVEY, H. T. (1987). *Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 83, 295-314.

KEMPKA, M. (2017). *Caracterização do escoamento provocado pela incidência de um jato vertical em fundo plano*. 179 p. Tese de Doutorado – IPH/UFRGS, Porto Alegre.

MAGELA, G. P. & Brito, S. N. (1996). *Erosion in Stilling Basins: Hydraulic and Geotechnical Aspects*. CBGB Magazine, Publication n. 03/96, Rio de Janeiro, Brazil.

MAGELA, G. P. (2020). *Spillway Design – Step by Step*. Londres, UK: Taylor & Francis Group.

MANSO, P. (2006). *The influence of pool geometry and induced flow patterns in rock scour by high-velocity plunging jets*. Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

MASON, P.J. e ARUMUGAM K. (1985). *Free jet scour below dams and flip buckets*. Journal of Hydraulic Engineering. 111(2): 220-235.

NALE, A. (2020). et al. *Hydraulic Analysis of Ski Jump as As Energy Dissipator*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 9.

PINTO L. C. S. (1994). Luis Cesar de Souza. *Estudo teórico-experimental das pressões dinâmicas desenvolvidas no fundo de pré-escavações a jusante de estrutura tipo salto esquí*. 1995. Universidade de São Paulo, São Paulo.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. (1995). EM 1110-2-2200: *Engineering and Design – Gravity Dam Design*. Washington, DC: Department of the Army.

VERONESE, A. (1937). *Erosioni di fondo a valle di uno scarico*. Annali dei Lavori Pubblici, 75(9), 717- 726.