

## ESTUDOS DE FLARING PIERS EM MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO DESENVOLVIDOS NO BRASIL

Carolina Fontanelli<sup>1</sup>, Carlos Olavo Slota Ovelar<sup>2</sup>, José Junji Ota<sup>3</sup>, Maurício Dziedzic<sup>4</sup>,  
Rafael de Lara<sup>5</sup> e Sabrina Torchelsen Cruz<sup>6</sup>

<sup>1,5,6</sup> Companhia Paranaense de Energia – Copel, Endereço: Rua José Izidoro Biazeto, 158, Bloco A sala 277,  
Mossunguê – CEP 81200-240 - Curitiba – PR, Brasil.

<sup>2</sup>Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC CEHPAR, Endereço: Centro Politécnico da UFPR, Rodovia BR-116,  
Km 98, nº 8813, Jardim das Américas, CEP 81531-980 - Curitiba – PR – Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal do Paraná, Endereço: Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100 - Jardim das Américas,  
CEP: 81530-900 - Curitiba – PR – Brasil.

<sup>4</sup>Universidade Positivo, Rua Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300, 81280-330, Curitiba – PR – Brasil.  
E-mail: carolina.fontanelli@copel.com (telefone: +55 041 33314056); carlos.ovelar@lactec.org.br (telefone: +55 041 3361-6302);  
ota.dhs@ufpr.br (telefone: +55 041 3361-3145); dziedzic@up.edu.br (telefone: +55 041 3317-3273);  
rafael.lara@copel.com (telefone: +55 04133314384), sabrina.cruz@copel.com (telefone: +55 041 33314378)

### Introdução

O Brasil é o país da América do Sul com maior potencial hidrelétrico (EPE, 2011) e grande parte desse potencial ainda não foi explorado. Diante disso, a busca por soluções que minimizem impactos ambientais e permitam criar um modelo de desenvolvimento sustentável assume de grande importância.

Os empreendimentos hidrelétricos incluem barramentos e estruturas hidráulicas, como os vertedouros, que são estruturas de descarga empregadas nos aproveitamentos hidrelétricos para garantir a segurança do barramento, pois possibilitam extravasar de forma controlada as vazões excedentes do reservatório (PEREIRA, 2015).

O projeto e a operação dos vertedouros são motivo de grande preocupação no setor elétrico, especialmente quando se considera que existe um grande potencial hidrelétrico na região amazônica, que possui um contexto geológico mais suscetível a processos erosivos. Diante disso, são importantes soluções que busquem a redução do potencial erosivo do jato efluente do vertedouro. Neste sentido a China tem protagonizado o estudo e aplicações de estruturas alternativas para dissipação de energia, entre as quais figuram os *flaring piers*.

Os *flaring piers* são alargamentos dos pilares do vertedouro que estreitam a calha melhorando a dissipação de energia (GAO *et al*, 2000). Essas estruturas estão sendo desenvolvidas e aplicadas em várias obras na China. No entanto, fora daquele país, existem poucos estudos a respeito do funcionamento e desempenho dessas estruturas.

Esse fato ensejou a busca pelo conhecimento dessas estruturas pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC CEHPAR e Companhia Paranaense de Energia – COPEL (localizados no sul do Brasil), os quais vêm desenvolvendo pesquisas conjuntas sobre esse assunto desde 2011.

### Definição das estruturas Flaring Piers

Os *flaring piers*, ou *flaring gate piers*, foram empregados pela primeira vez no vertedouro da usina hidrelétrica Ankang (LIN *et al*, 1987). Desde então, a aplicação dessa solução tem se tornado comum em projetos de vertedouros naquele país.

O mecanismo para dissipação de energia nos *flaring piers* ocorre por meio do alargamento da seção dos pilares que contraem a seção do escoamento, provocando jatos tridimensionais que se chocam ainda na calha do vertedouro, conforme ilustra a Figura 1.

Tem vasta aplicação podendo ser associados com salto de esqui, bacias de dissipação, vertedouros em degraus, entre outros.

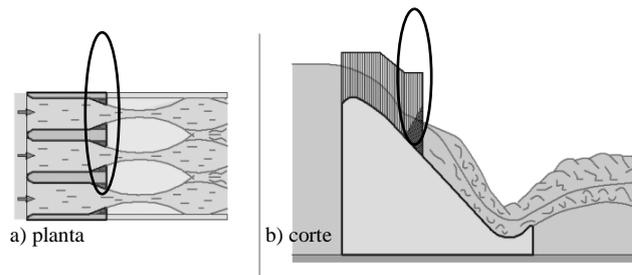


Figura 1. – Ilustração do vertedouro provido de *flaring piers*.

Variáveis geométricas como a razão de contração ( $\eta$ ), o ângulo de deflexão ( $\theta$ ), conforme definidos nas Equações 01 e 02 e ilustrados na Figura 2, o início da contração e forma geométrica dessas estruturas, modificam o comportamento do escoamento a jusante (LARA, 2011). Para isso há a necessidade de se estabelecer critérios para definição desses parâmetros.

$$\eta = \frac{b}{B_c} \quad [1]$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{a}{L_c}\right) \quad [2]$$

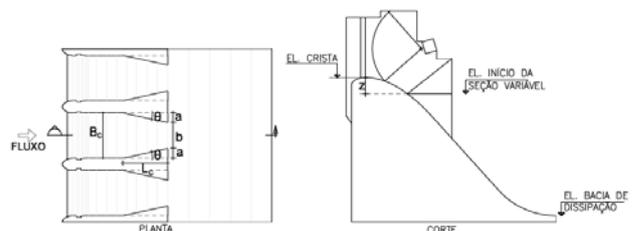


Figura 2.- Ilustração das variáveis geométricas dos *flaring piers* para determinar a razão de contração ( $\eta$ ) e o ângulo de deflexão ( $\theta$ ).

Onde:

$a$  = Largura do incremento do *flaring pier* (m);

$b$  = Largura do vão da calha a jusante do *flaring pier* (m);

$B_c$  = Largura do vão da calha a montante do *flaring pier* (m);

$L_c$  = Comprimento da variação do *flaring pier* (m).

$Z$  = Distância vertical entre a elevação da crista do vertedouro e a elevação onde o início do alargamento intercepta a superfície/perfil/ calha do vertedouro (m).

## Estudos realizados no Brasil

No Brasil, os *flaring piers* foram objeto de estudo de quatro trabalhos que buscaram elucidar detalhes do funcionamento dessas estruturas: Lara (2011), Cruz (2016), Fontanelli (2017) e Ovelar (2018). Todos os trabalhos foram realizados em modelos hidráulicos reduzidos desenvolvidos no laboratório de hidráulica do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento LACTE/CEHPAR, em Curitiba.

O objetivo do estudo de Lara (2011) foi avaliar a redução dos processos erosivos no leito do rio e as principais características do comportamento hidráulico em *flaring piers* associados a vertedouros em salto de esqui.

Lara (2011) avaliou a fossa de erosão formada a jusante do vertedouro, volume de material erodido, e volume de material depositado. O autor concluiu que para os casos analisados, os pilares de seção variável mostraram ser uma alternativa aplicável em locais com geologia pouco resistente. A alternativa ensaiada com  $\eta=50\%$  e  $\theta=19^\circ$ , comparando com a alternativa convencional  $\eta=100\%$  e  $\theta=0$ , resultou em uma redução de 40% na profundidade máxima da fossa de erosão e 67% no volume de material erodido. Porém, é válido lembrar que Lara (2011) ensaiou somente uma altura de vertedouro para as alternativas, o que impede a generalização das conclusões daquele trabalho.

Cruz (2016) ensaiou, em um canal experimental, quatro alternativas de *flaring piers* em um descarregador de fundo, variando a razão de contração. O objetivo desse estudo foi analisar as velocidades junto ao fundo do canal, que desempenham papel preponderante nos processos de erosão e transporte de sedimentos. Este estudo mostrou que os *flaring piers*, para as alternativas ensaiadas no descarregador de fundo, reduzem as velocidades no fundo do canal, responsável pelos processos de erosão e transporte de sedimentos. Porém, Cruz (2016) aponta que a velocidade nas margens do canal, para algumas alternativas ensaiadas, pode ser maior com o uso dos *flaring piers*, o que pode aumentar a erosão nas margens, levaria à necessidade de proteções, e demonstrou a necessidade de novos estudos para que os *flaring piers* sejam considerados uma alternativa ambiental para redução da erosão.

Fontanelli (2017) deu prosseguimento aos ensaios realizados por Cruz (2016), utilizando o mesmo canal experimental e o mesmo modelo reduzido de descarregador de fundo, inserindo leito móvel não coesivo no canal, além de ampliar as alternativas ensaiadas, implantando diferentes parâmetros ( $\eta$  e  $\theta$ ) com o objetivo de avaliar o mecanismo de dissipação de energia dessas estruturas e a influência dos parâmetros geométricos na erosão a jusante da estrutura. A partir desses ensaios a autora apresentou análise qualitativa do escoamento, comparação entre os comprimentos aparentes do ressalto hidráulico, a profundidade máxima da fossa de erosão e o volume total de material erodido, em cada uma das alternativas ensaiadas e comparadas à alternativa de pilares convencionais. Fontanelli (2017) observou que houve redução de profundidade máxima de erosão e de volume de material erodido em todas as alternativas com *flaring piers* em relação à alternativa com pilares de seção convencional.

Por fim, Ovelar (2018) avaliou o desempenho hidráulico de vertedouros providos de *flaring piers* associados com bacia de dissipação em modelo hidráulico reduzido com fundo móvel, onde observou o potencial erosivo do escoamento, os volumes e a profundidades de erosão do leito a jusante das estruturas, em comparação com vertedouro de pilares convencionais. O autor avaliou oito alternativas variando o comprimento da bacia de dissipação e os parâmetros geométricos dos *flaring piers*.

Como resultado, Ovelar (2018) notou que a utilização de *flaring piers* em vertedouros com bacia de dissipação, modifica as características do rolo superficial do ressalto hidráulico,

reduzindo seu comprimento, se comparado ao vertedouro convencional. Com relação à erosão, observou menores profundidades e volumes de erosão nos ensaios com vertedouro provido de *flaring piers*, se comparados com os ensaios de pilares retos e mesma bacia de dissipação.

## Conclusão

A utilização dos *flaring piers* em vertedouros e descarregadores de fundo analisadas nos estudos em modelo hidráulico desenvolvidos no Brasil, demonstrou influenciar diretamente o escoamento a jusante, tornando a dissipação de energia do vertedouro mais eficiente e consequentemente reduzindo as velocidades do escoamento próximas ao fundo do canal e a erosão no canal de restituição. Configurando-se como uma alternativa com menor impacto ambiental, pois pode reestabelecer o escoamento do canal em menores distâncias.

O presente trabalho apresenta uma consolidação dos estudos sobre os *flaring piers* desenvolvidos pelo LACTEC CEHPAR e COPEL apontando que tais estruturas apresentam significativo potencial de aplicação em futuros aproveitamentos hidrelétricos. Todavia, há ainda necessidade de estudos adicionais que permitam desenvolver critérios de projeto que permitam sua aplicação segura, incluindo avaliações estruturais, de flutuações de pressão e cavitação das estruturas de concreto.

## Referências bibliográficas

- Cruz, S. T.** (2016). *Avaliação do Escoamento com Superfície Livre a Jusante de Descarregadores de Fundo providos de Pilares de Seção Variável – Estudo em Modelo Hidráulico Reduzido*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Positivo, Curitiba, Brasil.
- EPE.** (2017). *Plano Nacional de energia 2030 – Ministério de Minas e Energia MME do Brasil*. Copyright, Rio de Janeiro, Brasil.
- Fontanelli, C.** (2017). *Utilização de Pilares de Vertedouros com Seção Variável para Redução de Processos Erosivos a Jusante de Estruturas Hidráulicas*. Dissertação de Mestrado. UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, Brasil.
- Gao, J.; Liu, Z.; Guo, J.** (2000). *Energy Dissipation For High Dams. Large Dams in China – A Fifty Year Review*. Chinese National Committee on Large Dams, China.
- Lara, R.** (2011). *Utilização de Defletores em Fenda e Pilares Alargados para Redução da Erosão Provocada por Vertedouros com Salto de Esqui*. Dissertação de Mestrado, UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, Brasil.
- Lin, B. B.; Li, G.; Chen, H.** (1987) *Hydraulic Research in China. Journal of hydraulic Engineering*, v. 113, n. 1, p. 47–60, Estados Unidos.
- Pereira, G. M.** (2015). *Projeto de Usinas Hidrelétricas Passo a Passo*. São Paulo: Oficina de Textos, Brasil.
- Ovelar, C. O. S.** (2018). *Vertedouros com pilares alargados e bacia de dissipação: avaliação do potencial erosivo e comprimento da bacia com modelo hidráulico reduzido*. Dissertação de Mestrado, UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, Brasil.