

# Estudo da Eficiência Hidráulica de Dissipadores de Energia tipo Flaring Piers

Rafael de Lara; André Luiz Tonso Fabiani; José Junji Ota; Fernando Ribas Terabe, Rodrigo Kern;

Nelson do Canto Oliveira Saks<sup>1</sup>

**Resumo** – Há quatro décadas, os engenheiros chineses têm desenvolvido estruturas especiais com o intuito de reduzir os efeitos erosivos provocados no leito do rio por jatos efluentes de vertedouros de alta queda. São estruturas chamadas de defletores em fenda e pilares alargados. Elas constituem-se basicamente de deflexões dos muros ou pilares que delimitam os vãos de um vertedouro de forma a promover uma contração do fluxo na calha. O efeito produzido por estas estruturas são jatos esbeltos com grande dispersão longitudinal. No entanto, fora da China pouco se sabe a respeito do real desempenho dessas estruturas. No presente estudo, além da pesquisa bibliográfica, foram realizados ensaios no modelo reduzido da Usina Hidrelétrica Mauá, utilizada como caso piloto, a fim de avaliar as principais características do comportamento hidráulico dessas estruturas e sua eficiência na redução de efeitos erosivos. Os resultados mostraram que a adoção de pilares alargados com razão de contração próxima de 50% seria adequada para mitigar os efeitos erosivos relacionados à operação do vertedouro em uma obra semelhante.

**Palavras-chave** — Defletores em Fenda - Dissipação de energia - Pilares Alargados - Vertedouros

## I. INTRODUÇÃO

Na implantação de uma barragem, o projeto do vertedouro é uma das etapas que requer muito cuidado, exigindo estudos, investigações de campo e laboratório criteriosos e abrangentes. O fato de constituir dispositivo de segurança para a obra obriga que esse projeto considere condições de operação adversas onde a transferência eficiente de grandes quantidades de energia para o leito do rio configura-se como

---

<sup>1</sup> Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI CITENEL, realizado de 17 a 19 de agosto em Fortaleza, no Ceará.

André L. T. Fabiani, Fernando Ribas Terabe e Rodrigo Kern trabalham no LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mails: [andre@lactec.org.br](mailto:andre@lactec.org.br); [fernando.terabe@lactec.org.br](mailto:fernando.terabe@lactec.org.br); [rodrigo.kern@lactec.org.br](mailto:rodrigo.kern@lactec.org.br)).

José Junji Ota trabalha na UFPR - Universidade Federal do Paraná (e-mail: [ota.dhs@ufpr.br](mailto:ota.dhs@ufpr.br)).

Rafael de Lara e Nelson C. O. Saks trabalham na COPEL – Companhia Paranaense de Energia ([rafael.lara@copel.com](mailto:rafael.lara@copel.com); [nelson.saks@copel.com](mailto:nelson.saks@copel.com)).

um dos grandes obstáculos da engenharia.

As soluções que utilizam ressalto hidráulico são comuns, mas os defletores do tipo salto de esqui (*flip bucket*) têm sido preferidos sempre que as condições locais, principalmente topográficas e geológicas, permitem sua adoção.

Entre os problemas associados à operação desse tipo de estrutura podem ser citados a ocorrência de erosão no leito e nas margens do rio, o surgimento de ondas de grandes amplitudes e, o transporte e deposição de material erodido a jusante, configurando a chamada barra de blocos, que podem prejudicar a geração de energia.

O presente estudo teve como finalidade avaliar o desempenho de estruturas especiais em utilização pelos chineses há algumas décadas, chamadas de *flaring piers* e *slit buckets*, as quais se constituem basicamente de contrações da calha do vertedouro que visam reduzir alterar a geometria do jato efluente, reduzindo sua capacidade sobre o leito e margens do rio.

Para tanto, avaliou-se em modelo reduzido as características do escoamento e da fossa de erosão formada para diferentes configurações geométricas desses defletores e diferentes vazões. Esses resultados foram comparados com aqueles obtidos em ensaios com um vertedouro convencional sob as mesmas condições.

Em que pese a necessidade de ajustes na geometria dos defletores e da própria calha do vertedouro, pode-se concluir que a utilização de pilares alargados poderia ser adotada em um vertedouro com características semelhantes aquele utilizado nos ensaios, que necessitasse de mitigação dos efeitos erosivos.

Considera-se que o uso de *flaring piers* e *slit buckets* poderá ter aplicação em futuros aproveitamentos hidráulicos em locais onde são necessários vertedouros para grandes quedas e grandes vazões específicas, principalmente, em locais cujas características geológicas não são favoráveis à implantação de vertedouros convencionais.

Este projeto de P&D ANEEL com nº 6491-017/2007, intitulado “Estudo da Eficiência Hidráulica de Dissipadores de Energia tipo Flaring Piers”, cujo código COPEL é Projeto CGeT022-017, teve o LACTEC como entidade executora e a Copel Geração e Transmissão S.A. como suporte financeiro, encontrando-se concluído.

## II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A expressão *flaring piers* significa pilares alargando. Na

verdade, trata-se dos pilares que delimitam os vãos dos vertedouros controlados por comportas. O referido alargamento ocorre na direção do fluxo, no trecho final dos pilares.

Com esse alargamento da seção dos pilares a área disponível para passagem do fluxo é estreitada, gerando ondas de choque que se chocam modificando a seção transversal do jato, incorporando ar e melhorando a distribuição do seu impacto sobre o leito. A consequência positiva dessas alterações é a diminuição na erosão ocasionada pela operação do vertedouro. No presente estudo essas estruturas serão chamadas de pilares alargados.

Quando este estreitamento do vão é implantado no final da calha, sobre a concha do defletor do tipo salto de esquí, ele é chamado de *slit bucket*, o qual foi chamado de defletor em fenda.

#### A. Erosão Causada por Vertedouros em Salto de Esqui

Um dos casos brasileiros mais conhecidos de erosão relacionada a vertedouros em salto de esquí é o ocorrido na UHE Jaguará, no rio Grande, na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo. Nessa obra foi desenvolvida fossa de erosão ao longo de toda a extensão do vertedouro, logo após a sua entrada em operação, em fevereiro de 1971. O ponto mais baixo dessa fossa atingiu 31,00 m de profundidade a partir da superfície rochosa, a menos de algum material solto nela depositado. Destaca-se que no início da operação o jato impactou diretamente sobre o maciço rochoso, levemente pré-escavado, sem nenhum colchão hidráulico amortecedor.

Por ocasião da operação do vertedouro ocorreu acúmulo de diferentes espécies de peixes nas locas formadas que com o aumento da temperatura da água e consequente diminuição do oxigênio dissolvido ocasionaram a mortalidade de peixes. Este fato obrigou a empresa responsável a investir na construção de canal para saída dos peixes.

Um caso semelhante ocorreu na barragem da UHE Salto Caxias, onde a operação do vertedouro provocou a formação de uma barra de blocos de rocha, o que obrigou a abertura de canais para evitar o aprisionamento de peixes.

#### B. Defletores em Fenda

Os defletores em fenda apareceram pela primeira vez na década de 50 na Barragem de Cabril em Portugal e constituem-se de deflexões dos muros das calhas dos vertedouros de forma a contrair o fluxo. Entretanto, o seu desenvolvimento ao longo das últimas quatro décadas deve-se exclusivamente aos chineses.



Figura 1 – Defletores em fenda sendo utilizados na barragem de Geheyan.

Os principais parâmetros geométricos dessa estrutura estão mostrados na Figura 2 são:

- B: Largura da calha a montante da contração (m);
- b: Largura da calha na seção mais estreita da contração (m);
- a: Largura do alargamento do pilar (m);
- L: Comprimento do alargamento do pilar (m);
- $\eta$ : Razão de Contração (adimensional ou percentual);

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

$\theta$ : Ângulo de Deflexão (graus).

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

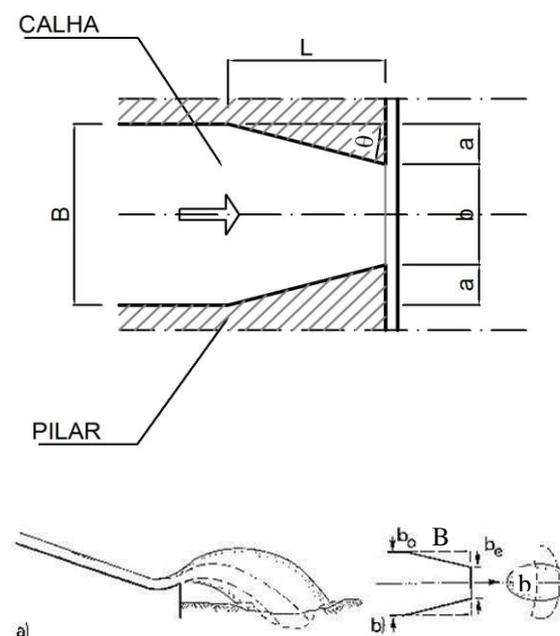


Figura 2 - Geometria dos defletores em fenda.

Sua seção transversal pode ser retangular, em formato de “Y”, “V” simétrica, ou “V” assimétrica e a razão de contração está normalmente entre 1/6 e 1/3. O ângulo vertical de lançamento deve estar entre  $-10^\circ$  e  $+45^\circ$ .

São indicados para vertedouros de médias e altas quedas, especialmente em vales estreitos, e podem promover alta eficiência na dissipação de energia, reduzindo a erosão causada para algo entre 1/3 e 2/3 da erosão original.

#### C. Pilares Alargados

Nos pilares alargados (Figura 4), as estruturas que delimitam os vãos onde estão instaladas as comportas sofrem um alargamento que se inicia próximo à viga-munhão e se prolonga variando linearmente ao longo da calha. A diferença entre esta estrutura e a anterior é que, nesta, boa parte das alterações no escoamento ocorrem ainda sobre a calha do vertedouro.

A implantação dos pilares alargados ocorre sempre em associação com outras estruturas (Figura 3). Essas associações alteram o escoamento e melhoram o processo de dissipação de energia em relação às estruturas convencionais. No presente estudo identificou-se as seguintes combinações:

- Pilares alargados com salto de esqui;
- Pilares alargados (submersos ou não) com bacia de dissipação;
- Pilares alargados com descarregadores de fundo e bacia de dissipação;
- Pilares alargados com calha em degraus e bacia de dissipação.

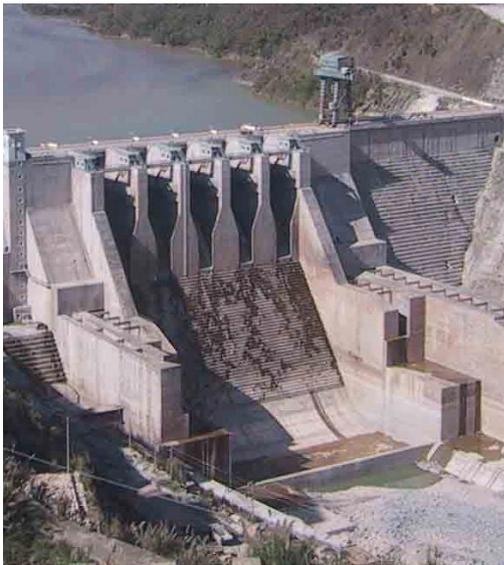


Figura 3 – Vertedouro da baragem de Shuidong.

Este dispositivo é indicado para vazões específicas entre 200 e 300 m<sup>3</sup>/s/m, tem padrão de escoamento tridimensional e alta eficiência na dissipação de energia. Cita-se que o comprimento da bacia de dissipação no projeto de Ankang foi reduzido em aproximadamente 1/3 através da adoção desse tipo de estrutura.

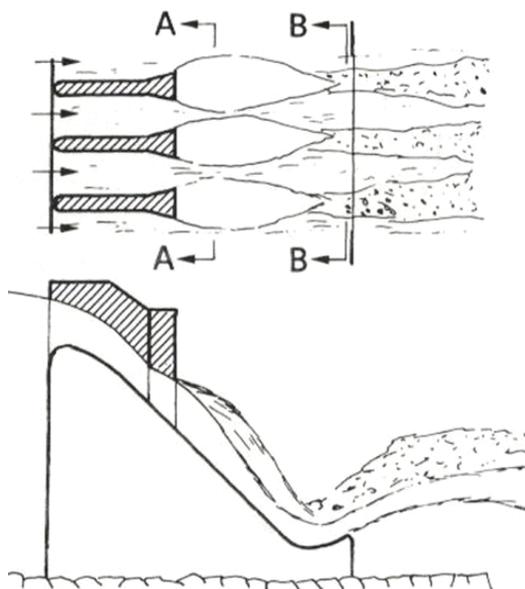


Figura 4 - Geometria dos pilares alargados.

## II. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL – RESULTADOS OBTIDOS

Para avaliar a eficácia e eficiência da implantação de pilares alargados e defletores em fenda foram realizados ensaios no modelo reduzido da barragem da Usina Hidrelétrica Mauá, construído pelo CEHPAR/LACTEC [1], mostrado na Figura 5, que serviu como caso piloto deste estudo.

O vertedouro dessa barragem foi projetado para descarregar uma vazão de 7.173 m<sup>3</sup>/s com o reservatório na elevação 636,50 m (nível máximo maximorum) e terá quatro vãos controlados por comportas segmento medindo 11,40 m de largura por 16,00 m de altura, com soleira na elevação 619,00 m. O raio dessas comportas será de 19,00 m, estando o munhão posicionado na elevação 627,00 m e a 22,45 m da crista. Os pilares terão largura de 4,00 m (Figura 6).

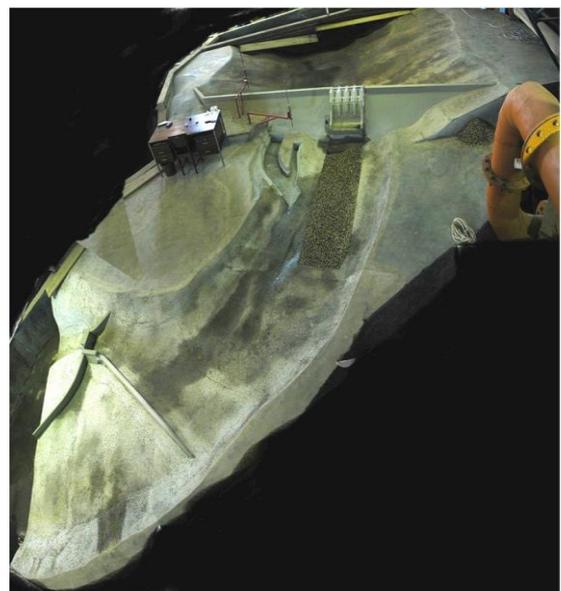


Figura 5 – Modelo reduzido da UHE Mauá.

Para avaliação da erosão construiu-se de um fosso de 253 m de comprimento por 63 m de largura e fundo na elevação 495 m, iniciando-se a 32 m do pé da estrutura do vertedouro. O material utilizado nas simulações de erosão foi pedregulho de granulometria uniforme, com diâmetro médio correspondente a 1,1 m.

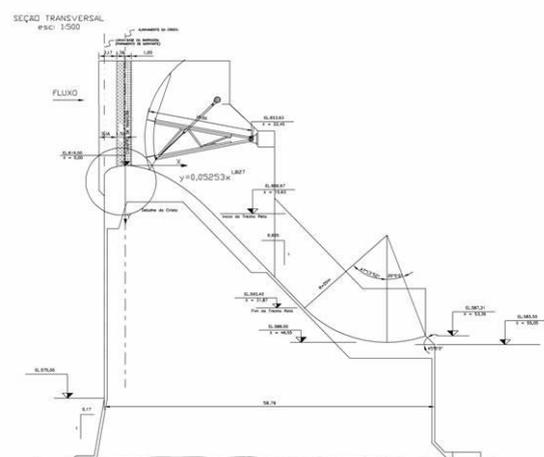


Figura 6 – Corte longitudinal do vertedouro da UHE Mauá

Esse vertedouro foi adaptado através da instalação de cunhas de forma a simular a geometria dos pilares alargados e defletores em fenda e possibilitar sua comparação com o vertedouro original. Cada alternativa ensaiada e suas principais características geométricas estão mostradas na Figura 7.

Considerou-se que toda a alteração na geometria do vertedouro, seja de tipo (pilares alargados ou defletores em fenda), de razão de contração, ou ainda, de ângulo de deflexão, define uma estrutura particular. Logo, a elaboração do programa de ensaios objetivou avaliar a fossa de erosão formada pela operação do vertedouro adaptado para diferentes estruturas.

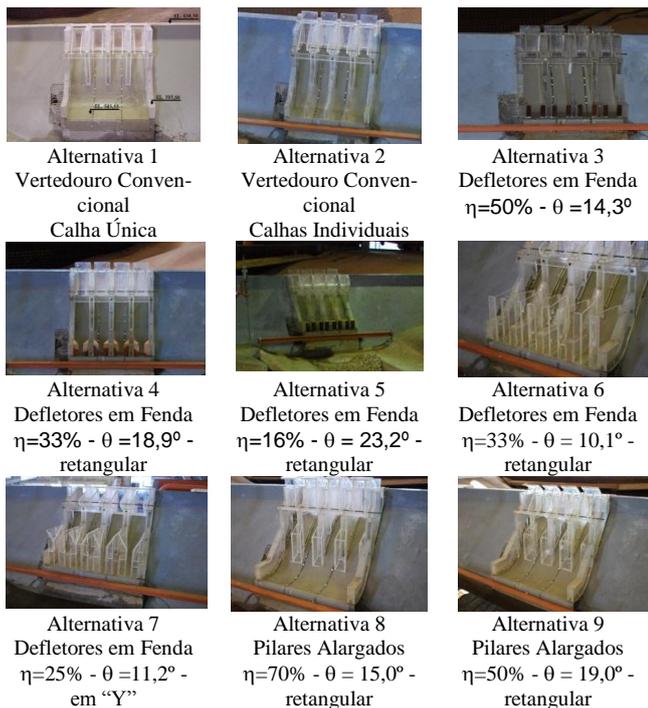


Figura 7 – Alternativas de defletores em fenda e pilares alargados ensaiados.

Cada estrutura foi ensaiada para cinco vazões diferentes. ( $T_r = 5, 25, 100, 500$  e  $10.000$  anos). Além do comportamento hidráulico, avaliou-se a fossa de erosão formada após cada ensaio. Os dados básicos utilizados em cada ensaio estão mostrados na Tabela I. Para todas estruturas ensaiadas, o ensaio com a vazão correspondente ao tempo de recorrência de 5 anos foi realizado sobre o fosso de erosão preenchido e aplainado. Os demais ensaios foram realizados sobre o resultado do ensaio anterior.

Considera-se esse procedimento adequado, pois simula o que ocorre na operação de um vertedouro durante uma cheia. Nessa situação, a abertura das comportas é feita de forma gradual, acompanhando o hidrograma de cheia, de forma a evitar uma situação mais severa do que a gerada pela cheia em si. Dessa forma, pode-se considerar que o último resultado de erosão de cada estrutura ensaiada simula a operação de um vertedouro ao longo de 100 horas, com aberturas graduais e crescentes com durações de 20 horas para as vazões equivalentes aos tempos de recorrência de 5, 25, 100 e 500 anos.

Tabela I – Parâmetros utilizados nos ensaios.

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão (m³/s)	Nível do Reservatório (m)
5	2.070	635,00
25	3.371	635,00
100	4.491	635,00
500	5.792	635,00
10.000	7.173	636,50

Os ensaios mostraram que quando o fluxo passa pela contração são originadas ondas de choque que se propagam na direção do eixo da calha. Quando as ondas se encontram, ocorre a formação de rabo de galo superior de grande dimensão e com comportamento instável (Figura 8).



Figura 8 - Aspecto do jato dos ensaios utilizando defletores em fenda.

Os pilares alargados, diferentemente dos defletores em fenda, geram ondas de choque que se encontram ainda sobre a calha do vertedouro, formando rabos de galo nesse ponto de encontro dos jatos. Além desse encontro de ondas de choque, esse tipo de vertedouro continua promovendo os rabos de galo tradicionais, provenientes do encontro dos fluxos de vãos adjacentes que ocorre após o término dos pilares (Figura 9).

As observações de ensaio confirmaram a bibliografia sobre o aspecto tridimensional do escoamento, o qual fornece indício de haver grande dissipação de energia dentro da calha.



Figura 9 - Aspecto do jato dos ensaios utilizando pilares alargados.

Outro aspecto interessante verificado nos ensaios é o formato transversal do jato, contendo lâminas que crescem lateralmente em formato de véu (Figura 10).



Figura 10 – Aspecto transversal do jato dos ensaios utilizando pilares alargados.

### III. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios para as diferentes alternativas ensaiadas foram avaliados segundo dois aspetos: comportamento hidráulico verificado nos ensaios e capacidade erosiva. Esta última foi avaliada segundo a profundidade máxima da fossa de erosão formada após os ensaios e os volumes de material erodido e depositado.

#### A. Comportamento Hidráulico

Nos ensaios com defletores em fenda, observou-se comportamento hidráulico inadequado. Entre os problemas pode-se citar o encontro dos rabos de galo dentro da estrutura, que caracteriza um funcionamento inadequado, conforme cita a bibliografia, e que ocorreu na maioria dos ensaios desses defletores. Entre outros fenômenos que prejudicariam a implantação dessas estruturas para vertedouros com as características semelhantes pode-se citar o fato de o jato efluente ultrapassar o topo dos pilares e a instabilidade verificada nos rabos de galo. Esses efeitos aumentam para as vazões maiores.

No entanto, o maior problema verificado foi a ocorrência de afogamento, com a estagnação dos rabos de galo nas estruturas com razão de contração de 33 e 16% (Alternativas 4 e 5), o que condena a utilização dessas estruturas para vertedouro com características semelhantes. Essa estagnação pode ser vista na Figura 11.



Figura 11 – Ocorrência de estagnação dos rabos de galo.

Henderson [4] apresentou duas possibilidades de afogamento para escoamento supercrítico ocorrendo dentro da

contração de um canal, o que pode explicar os efeitos supracitados. A primeira leva em conta a condição de energia mínima necessária para a passagem do escoamento e a segunda considera a influência de um ressalto hidráulico imediatamente a montante da contração. Essas curvas são descritas pelas equações a seguir, utilizadas por Yarnell [7] e [8] para distinguir entre escoamento não afogado (classe “A”) e afogado (classe “B”).

$$\varphi^2 = \frac{27 \cdot Fr_1^2}{(2 + Fr_1^2)^3} \quad [7]$$

$$\varphi = \frac{(2 + 1/\varphi)^3 Fr_3^4}{(1 + 2Fr_3^2)^3} \quad [8]$$

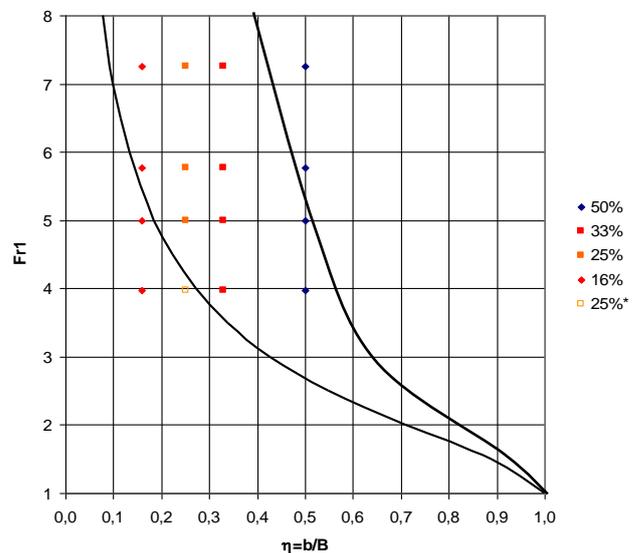


Figura 12 - Afogamento no escoamento supercrítico devido a contração - defletores em fenda.

A plotagem da razão de contração  $\eta$  e do número de Froude calculado a montante das contrações para cada ensaio, conforme a Figura 12 explica a ocorrência de afogamento nos defletores em fenda ensaiados.

Os ensaios com pilares alargados, por sua vez, mostraram um comportamento adequado até a vazão com tempo de recorrência de 100 anos. Para as vazões superiores, a instabilidade do escoamento dentro da calha gerou borrfios e transbordamentos que aumentaram significativamente, condenando a sua utilização nessas condições. Isto mostrou que estas estruturas são mais sensíveis para a mudança de vazões. A Figura 13 explica a menor propensão ao afogamento verificada nos ensaios com pilares alargados.

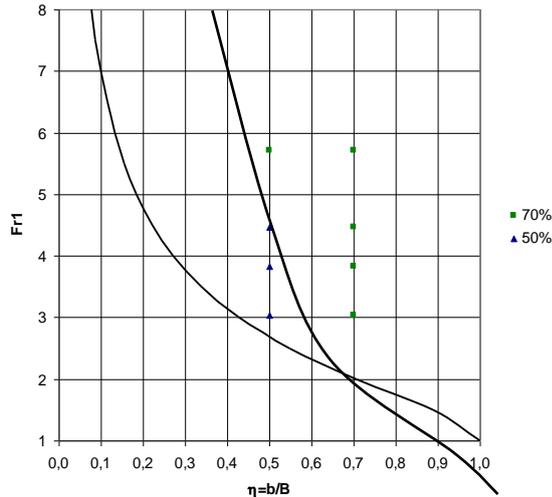


Figura 13 - Afogamento no escoamento supercrítico devido a contração - pilares alargados

### B. Capacidade Erosiva

As medições realizadas das fossas de erosão formadas após os ensaios com defletores em fenda demonstraram uma pequena redução da profundidade. No entanto, os perfis longitudinais de erosão têm formato triangular, caracterizando taludes de montante e jusante, aproximadamente planos, diferentemente do perfil obtido nos ensaios utilizando-se os vertedouros convencionais, os quais têm perfis arredondados.

A barra formada a jusante foi consideravelmente mais baixa e abatida em relação ao teste com vertedouro convencional (Figura 14). Como consequência, o volume de material depositado resultante foi menor.

As fossas de erosão formadas nos ensaios utilizando-se pilares alargados foram bem mais rasas do que aquelas formadas nos ensaios das demais alternativas. No entanto, houve erosão para jusante até os limites da fossa de erosão, como pode ser visto na Figura 15. Nessa mesma figura pode ser notado o formato abatido da barra de blocos formada a jusante.

Conforme já citado, a capacidade erosiva de cada estrutura para as diferentes vazões ensaiadas foi avaliada através de dois métodos: (i) avaliação das profundidades máximas de erosão através da equação de Veronese [6] e (ii) avaliação do volume total de material erodido e depositado entre os perfis medidos.



Figura 14 – Fossa de Erosão formada após ensaio com da Alternativa 7 com a vazão decamilenar.



Figura 15 - Fossa de erosão formada após ensaio da Alternativa 9 com a vazão decamilenar.

A equação de Veronese [6] relaciona a profundidade máxima de erosão “D” com a vazão específica “q” e a queda do vertedouro “H”. O coeficiente angular de 1,9 dessa equação foi obtido em ensaios em modelo reduzido para material fino sem coesão, portanto, tende a ser um limite máximo de erosão.

$$D = 1,9 \cdot q^{0,54} \cdot H^{0,225} \quad [6]$$

A partir dos dados de profundidade máxima, vazão e queda, medidos nos ensaios, calculou-se o coeficiente angular “a” correspondente e elaborou-se gráfico para avaliar se havia relação entre a profundidade máxima de erosão e a razão de contração para as diferentes configurações de defletores em fenda e pilares alargados, mas o comportamento dos dados foi razoavelmente disperso. Esse gráfico está mostrado na Figura 16.

Quando então, se elaborou um gráfico para avaliar se havia relação entre a profundidade máxima de erosão e o ângulo de deflexão dos muros, verificou-se que os dados plotados para os defletores em fenda obedeciam a uma reta com coeficiente de correlação igual a 0,996 (Figura 17).

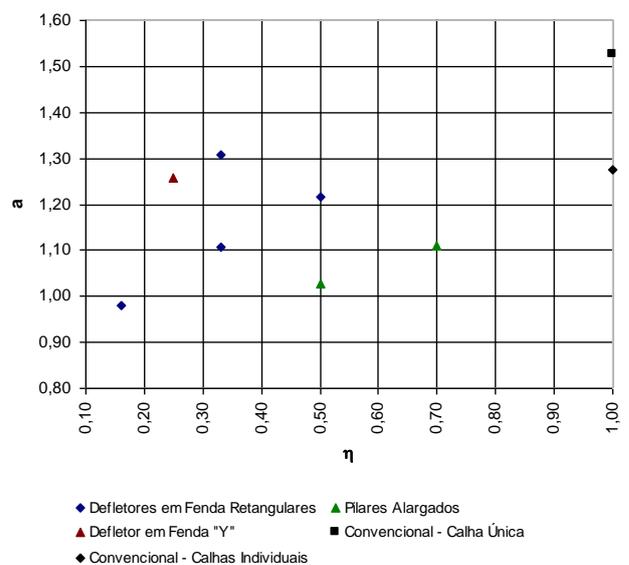


Figura 16 - Coeficientes da equação de Veronese para diferentes defletores em fenda versus razão de contração.

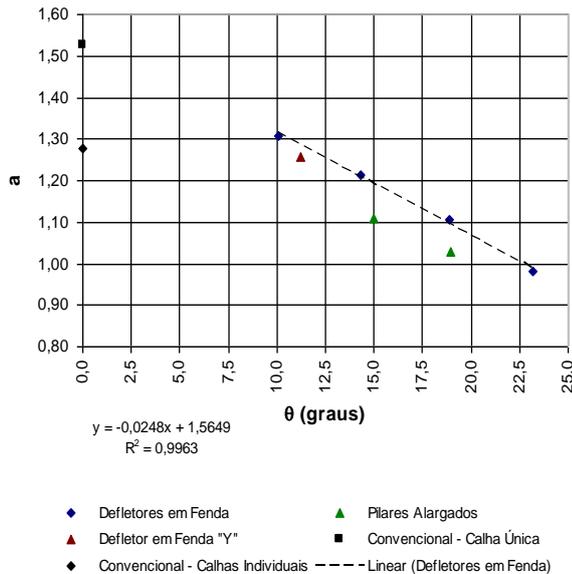


Figura 17 - Coeficientes da equação de Veronese para diferentes defletores em fenda versus ângulos de deflexão.

Baseando-se nesses resultados, pode-se afirmar que, para o projeto de defletores em fenda, a redução da profundidade máxima de erosão depende do ângulo de deflexão. É importante ressaltar que apenas o fato de se separar o escoamento em calhas distintas (Alternativa 2) foi suficiente para reduzir o coeficiente angular em aproximadamente 16%. Os benefícios resultantes dos ensaios com defletores em fenda são secundários se comparados ao benefício da simples separação do escoamento.

Para os pilares alargados a correlação entre o coeficiente angular da equação de Veronese [6] e a razão de contração ou ângulo de deflexão não foi calculada devido ao fato de terem sido realizados ensaios para apenas duas alternativas desse tipo de estrutura.

A avaliação dos volumes totais de material erodido e depositado foi realizada com base nos dados das medições da fossa de erosão efetuadas após cada ensaio e está mostrada na Figura 18. Essas medições constituíram-se da tomada das elevações da fossa de erosão em cinco eixos longitudinais.

A redução do volume de material erodido em relação à Alternativa 1, que utiliza o vertedouro convencional com calha única, ocorreu para todas as alternativas. Da mesma forma que na avaliação da profundidade máxima de erosão, o simples fato de se separar o jato em calhas independentes foi responsável pela maior redução no volume total de material erodido. A redução provocada pelos defletores em fenda, para o vertedouro em estudo, pode ser considerada de ordem secundária.

As alternativas com pilares alargados, por sua vez, resultaram nos menores volumes de material erodido entre todas as alternativas. Ressalta-se ainda, que para a Alternativa 9, pode ser observada uma tendência de redução na taxa de variação de volume com o aumento da vazão. Todas as demais alternativas têm essa taxa de variação crescente, evidenciada pela concavidade das curvas mostradas nessa figura.

O gráfico da Figura 19 mostra o volume de material depositado a jusante da fossa de erosão. Nos ensaios utilizando o vertedouro convencional com calha única (Alternativa 1) foi

constatada maior volume desse material próximo do ponto correspondente à vazão centenária.

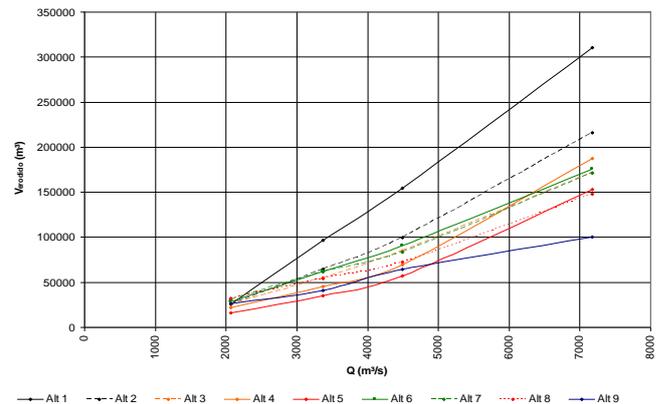


Figura 18 – Volumes totais de material erodido para cada alternativa.

Para as vazões além desse ponto o escoamento carrega o material que havia sido depositado. Isso é evidenciado pelo trecho descendente do gráfico. As curvas para os defletores em fenda das Alternativas 3, 6 e 7 tiveram comportamentos muito parecidos com o da Alternativa 1, porém com um pico menor. Já para a Alternativa 4, a curva tem uma tendência de estabilização do volume depositado e para as demais alternativas a tendência foi ascendente para as últimas vazões ensaiadas. As Alternativas 5 e 9 foram as que menos formaram volumes de material depositado até uma vazão com tempo de recorrência de 25 anos.

É importante ressaltar que não há um comportamento distinto do volume de material depositado entre os tipos de estruturas ensaiadas (vertedouro convencional, defletores em fenda e pilares alargados).

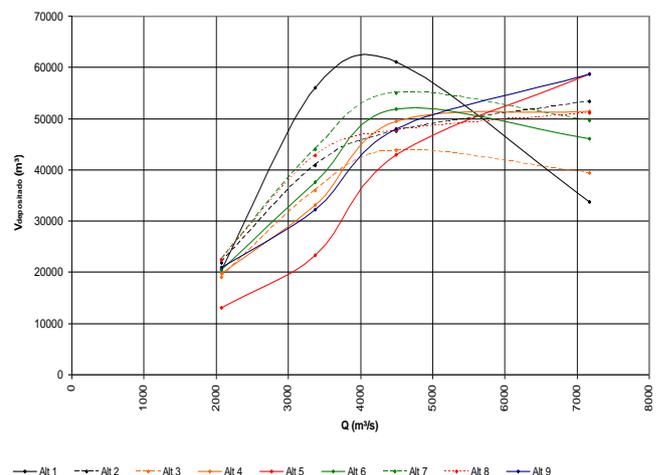


Figura 19 – Volumes totais de material depositado para cada alternativa.

#### IV. CONCLUSÕES

Segundo a bibliografia disponível [2] e [3], a redução do efeito erosivo de vertedouros, promovida através da utilização de defletores em fenda e pilares alargados, possibilitou a implantação de barragens de grande altura em vales encaixados e de geologia com baixa capacidade para suportar os esforços hidrodinâmicos envolvidos.

Os ensaios realizados no LACTEC/CEHPAR para defletores em fenda não obtiveram sucesso. O comportamento hidráulico dessas estruturas foi inadequado, com transbordamento dos muros, estagnação dos rabos de galo e, até mesmo, afogamento do fluxo. As alternativas 6 e 7, desenvolvidas após a fase de ensaios exploratórios, tiveram um comportamento razoavelmente adequado, mas não surtiram efeitos significativos na redução da erosão. Isso pode ser explicado pelo fato de que os defletores em fenda existentes estão implantados em barragens com alturas maiores que 150 m e desníveis até os defletores maiores que 70 m (Tabela II). No presente estudo os defletores em fenda foram ensaiados num vertedouro onde essas grandezas são de 85 m e 48 m, respectivamente, o que pode explicar seu mau desempenho.

Com relação aos pilares alargados, a análise da bibliografia [2] e [3] indicou serem adequados a vertedouros de barragens com altura entre 50 e 150 m e, portanto, com desníveis menores que aqueles indicados para os defletores em fenda.

Sobre os ensaios realizados com pilares alargados, pode-se afirmar que a alternativa com razão de contração de 50% resultou em uma redução de 40% na profundidade máxima da fossa de erosão e 67% no volume de material erodido, em relação ao vertedouro convencional, conforme mostrado na Figura 20.

Esse benefício necessita de investigações complementares, pois a erosão formada, apesar de pouco profunda, alcançou o limite de montante da fossa implantada no modelo. A explicação para esse fato reside no perfil longitudinal alongado do jato efluente, o qual abrangeu aproximadamente 75 m do leito para a maior vazão.

Tabela II – Barragens onde os pilares alargados e os defletores em fenda foram adotados.

Barragem	Queda do vertedouro (m)	Queda até o defletor (m)	Vazão (m³/s)	Estrutura utilizada
Geheyuan	151	-	17.060	Pilares alargados
Ankang	128	-	37.000	Pilares alargados
Dachaoshan	115	-	23.800	Pilares alargados
Wuqiangxi	84,5	-	55.962	Pilares alargados
Yantan	76	60,40	32.760	Pilares alargados
Shuidong	57	-	8.232	Pilares alargados
Shuibuya	234	171,00	15.243	Defletores em fenda
Hongjiadu	182	-	6.996	Defletores em fenda
Longyangxia	178	-	2.247*	Defletores em fenda
Dongfeng	162	77,78	1.080*	Defletores em fenda
Dongjiang	157	99,25	1.450*	Defletores em fenda
Lijixia	155	113	2.155*	Defletores em fenda
Geheyuan	151	77,1	1.013*	Defletores em fenda
Xibeikou	95	78,89	2.233*	Defletores em fenda

\*vazão total de um vão.

Em que pese a necessidade de ajustes na geometria dos defletores e da própria calha do vertedouro, pode-se concluir que a solução utilizando pilares alargados com razão de contração próxima a 50% poderia ser adotada em um vertedouro com características semelhantes aquele utilizado nos ensaios, que necessitasse de mitigação dos efeitos erosivos.

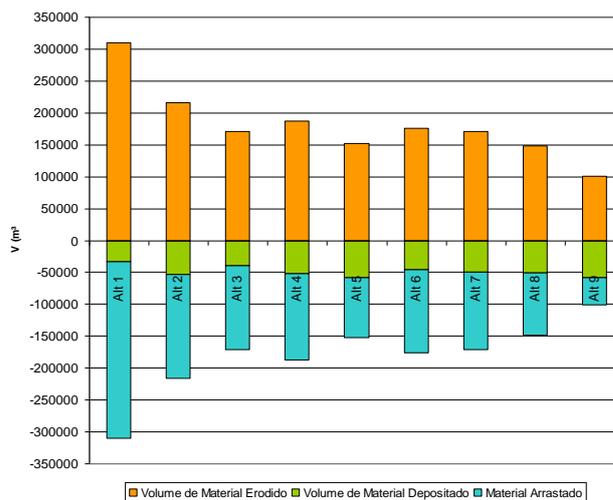


Figura 20 - Gráfico comparativo dos volumes de material erodido, depositado e arrastado.

Deve ser ressaltado o fato de que parte importante do benefício promovido pelos defletores em fenda e pilares alargados deve-se a incorporação de ar pelo jato efluente [2] e [3]. No entanto, o efeito de escala devido à tensão superficial impediu a avaliação desse aspecto no presente estudo.

Tendo em vista as dúvidas ainda remanescentes e o cronograma de obras, esta solução não foi adotada na obra de Mauá, sendo o vertedouro desta usina de projeto convencional.

## V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio dado pela COPEL Geração e Transmissão S.A. e ao programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, que permitiram a realização desta pesquisa.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CEHPAR – Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza – Projeto HL 186 – Estudos Hidráulicos em Modelo Reduzido da Usina Hidrelétrica Mauá. Curitiba: 2006.
- [2] GAO, J., LIU, Z. & GUO, J. Energy Dissipation For High Dams. Large Dams in China – A Fifty Year Review. Chinese National Committee on Large Dams, 2000.
- [3] GUO, J., WU, Y., ZHANG, D., LIU, J. & SUN, S. Recent Achievements on Hydraulic Research in IAHR In: International Association of Hydro Environment Engineering and Research Meeting, 2006. Anais
- [4] HENDERSON, F. M. Open Channel Flow. Upper Saddle River: Prentice-hall, 1966.
- [5] PEREIRA, G. M.; BRITO, S. N. A.; GONÇALVES, E. S. Considerações sobre a Utilização de Dissipadores de Energia em Salto de Esqui em Maciços Rochosos Sãos Muito Fraturados – O Caso da UHE Jaguará. XIX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Aracaju, 1985.
- [6] VERONESE, A. Erosioni Di Fondo a Valle di Uno Scarico. "Annali dei Lavori Pubblici, 75(9), 717-726, 1937.
- [7] YARNELL, D. L. Pile Trestles as Channel Obstructions. U. S. Department of Agriculture. Tech. Bull. n. 429, 1934.
- [8] YARNELL, D. L. Bridge Piers as Channels Obstructions. U. S. Department of Agriculture. Tech. Bull. n. 429, 1934.