

Início da Aeração e Pressões ao Longo de Vertedouros em Degraus

Paulo Henrique Povh, Edie Roberto Taniguchi, José Junji Ota

Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza – CEHPAR / LACTEC / UFPR, Caixa Postal 1309

e-mail: povh@lactec.org.br, edie@lactec.org.br, ota@lactec.org.br

Marcos José Tozzi

Universidade Federal do Paraná – UFPR e Centro Universitário Positivo – UNICENP, Rua Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300

e-mail: tozzi@unicenp.br

Recebido: 19/11/02 – revisado: 19/09/03 – aceito: 30/03/04

RESUMO

A configuração característica de calhas em degraus favorece a ocorrência de pressões negativas na face vertical dos degraus. Portanto a necessidade de assegurar a estabilidade da estrutura torna importante o conhecimento do campo de pressões na região dos degraus. Este estudo, o qual foi parcialmente financiado pela FINEP (RECOPE/REHIDRO/SUB REDE 2) na compra de equipamentos, foi desenvolvido em um modelo reduzido de um vertedouro em degraus construído na escala geométrica 1:25. O vertedoruro, que possui uma calha com declividade de 1V:0,75H e degraus com 0,60 m de altura, foi estudado para vazões específicas compreendidas entre $4,2 \text{ (m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ e $31,7 \text{ (m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{)m}^{-1}$. O estudo das características físicas do escoamento num degrau padrão é considerado válido, mas este estudo mostrou a importância da aeração do escoamento nas pressões ao longo da calha. Portanto, para o regime de escoamento denominado *skimming flow*, é necessário relacionar o padrão de aeração do fluxo com a pressão. Foi observado que o início da aeração assume um papel importante na pressão mínima. A posição de início de aeração do escoamento varia com a vazão, deslocando-se para jusante à medida que a vazão específica aumenta. É importante destacar que não há um bom critério para definir o início da aeração do fluxo em modelos. Uma sugestão de critério a ser utilizado no modelo é apresentado neste trabalho. Este artigo apresenta, também, um aspecto interessante de flutuação de pressão medida por transdutores..

Palavras-chave – vertedouro em degraus; início de aeração; flutuação de pressão.

INTRODUÇÃO

O fluxo ao longo de vertedouros em degraus foi subdividido por Essery e Horner (1978) em dois regimes: o regime de escoamento em lâmina (*nappe flow*) e o regime de escoamento deslizante (*skimming flow*). Segundo Chanson (1994) uma situação típica do regime *nappe flow* consiste de uma série de quedas livres do fluxo proveniente de cada degrau chocando-se contra o degrau seguinte. A passagem de um escoamento em regime *nappe flow* para o regime *skimming flow* é obtida por meio do aumento da vazão específica ou da declividade da calha. Chanson (1994) definiu o início do regime *skimming flow* como sendo a situação em que desaparece a cavidade de ar abaixo da queda livre do jato e a água passa a escoar como um fluxo quase homogêneo.

Formulações apresentadas por Rajaratnam (1990), Yasuda e Ohtsu (1999) e Chinnarasri (2002) aplicadas em uma calha com declividade 1V:0,75H e degraus com 0,60 m de altura H mostram que uma vazão específica da or-

dem de $1 \text{ (m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ conduz ao início do regime *skimming flow*.

Essery e Horner (1978) observaram que a entrada de ar no fluxo é um fator dominante do regime *skimming flow* desenvolvido no modelo. Bindo *et al.* (1993) descreveram que a macro turbulência criada pelos degraus no interior do fluxo favorece o desenvolvimento da camada limite, cuja espessura aumenta muito mais rapidamente que em calhas lisas. Segundo Boes (1999) a principal vantagem da aeração relativamente maior que a da calha lisa é a capacidade de diminuir o risco potencial de cavitação dos degraus. De acordo com Peterka (1953), uma concentração de ar em torno de 7% é suficiente para evitar o risco de cavitação em superfícies de concreto porque a compressibilidade da mistura ar-água pode absorver o impacto do colapso das bolhas vaporizadas.

Os degraus ao longo da calha constituem uma geometria que favorece a flutuação das pressões e pode induzir ao registro de pressões negativas significativas. O conhecimento dessas pressões pode assegurar a durabilidade do concreto utilizado na construção da calha. Trabalhos recentes como os de Sánchez-Juny *et al.* (2000b) e Olinger

(2001), desenvolvidos com a utilização de equipamentos eletrônicos no registro de pressões instantâneas, têm demonstrado o atual interesse no conhecimento desse assunto.

No estudo apresentado neste artigo, desenvolvido em uma calha em degraus com inclinação igual a 53,13° e escoamento em regime *skimming flow*, foram realizados registros de pressões instantâneas e das posições de início da aeração do fluxo ao longo da calha.

BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A aeração do escoamento ao longo da calha em degraus em regime *skimming flow* foi subdividida por Matos e Quintela (1996) em quatro diferentes regiões descritas na sequência e ilustradas na figura 1:

- zona sem aeração do fluxo: localizada no trecho de montante da calha, no interior da qual desenvolve-se a camada limite turbulenta, até atingir a superfície livre da água;
- zona com aeração parcial do fluxo: trecho em que o ar atmosférico incorpora-se ao escoamento, sem contudo atingir o fundo da calha;
- zona com aeração total do fluxo: trecho em que o ar, embora ocupando a totalidade da seção transversal, apresenta uma concentração média variável no sentido do escoamento;
- zona com regime uniforme do fluxo: a concentração média de ar e a velocidade média da água não variam ao longo da calha.

Definições da posição onde o escoamento ao longo de calhas em degraus inicia o processo de aeração da superfície livre da água foram apresentadas por Tozzi (1992) e Chanson (1994).

Tozzi (1992) propôs, com base nos seus resultados experimentais, a equação (1) para a determinação da espessura da camada limite turbulenta ao longo da calha em degraus com declividade 1V:0,75H.

$$\frac{\delta}{L_A} = 0,080 \cdot \left(\frac{L_A}{k} \right)^{-0,233} \quad (1)$$

em que:

δ = espessura da camada limite;

L_A = distância, ao longo da calha do vertedouro, entre a posição de início do desenvolvimento da camada limite e o início da aeração do fluxo;

k = altura de rugosidade ($k = H \cdot \cos \alpha$);

H = altura do degrau;

α = ângulo de inclinação do fundo da calha com a horizontal.

O cálculo das profundidades do escoamento ao longo da calha associado ao conhecimento das respectivas espessuras da camada limite permitem definir a posição de início da aeração do fluxo. Tozzi (1992) sugeriu a utilização do método das diferenças finitas para o cálculo das profundidades a montante da posição onde a camada limite atinge a superfície livre da água.

Chanson (1994) apresentou as equações (2) e (3) que definem, respectivamente, a distância do início do desenvolvimento da camada limite ao ponto de início da aeração do fluxo (L_A) e a profundidade do escoamento nesta posição (d_A). Essas equações foram obtidas a partir de resultados de modelos reduzidos de vertedouros em degraus com declividades das calhas compreendidas entre 27° e 52°.

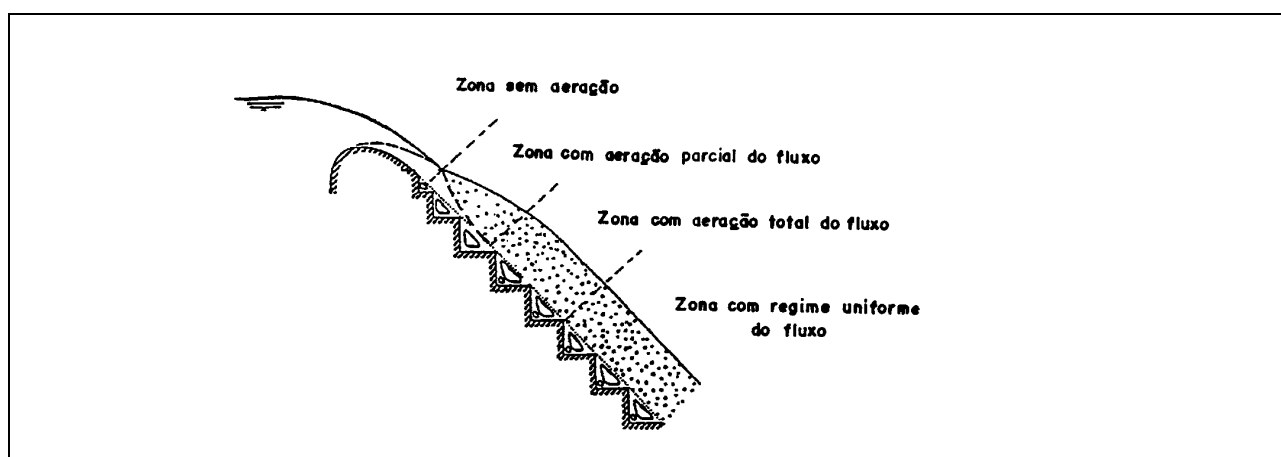


Figura 1 - Regiões do escoamento ao longo de um vertedouro em degraus com regime *skimming flow* segundo Matos e Quintela (1996).

$$\frac{L_A}{k} = 9,719 \cdot (\sin \alpha)^{0,0796} \cdot (F_*)^{0,713} \quad (2)$$

$$\frac{d_A}{k} = \frac{0,4034}{(\sin \alpha)^{0,04}} \cdot (F_*)^{0,592} \quad (3)$$

em que:

$$F_* = \frac{q}{\sqrt{g \cdot \sin \alpha \cdot k^3}};$$

q = vazão específica.

A necessidade de escoar altas vazões específicas tem aumentado o interesse pelo estudo das pressões instantâneas ao longo de calhas em degraus. Os estudos publicados têm abordado aspectos específicos de cada estrutura.

Em um teste realizado por Elviro e Mateos (1995) com um vertedouro em degraus escoando uma vazão específica de $10 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ a mínima pressão registrada no modelo resultou igual a -10,6 m.c.a. Essa pressão foi registrada na extremidade do vértice externo de um degrau.

Sánchez-Juny *et al.* (2000b) comentaram que não foram registradas pressões médias negativas no trecho a jusante da posição de início da aeração do escoamento.

Sánchez-Juny *et al.* (2000a) registraram pressões negativas abaixo à de cavitação principalmente na região próxima à aresta externa do paramento vertical do degrau.

Olinger (2001) realizou uma investigação experimental das pressões instantâneas a montante do trecho onde ocorre o início da aeração do escoamento, estabelecendo um critério de projeto para se evitar riscos de cavitação.

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

O presente estudo foi realizado no CEHPAR – Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza - em um modelo bidimensional de um vertedouro em degraus implantado em um canal com 0,80 m de largura. O sistema de alimentação do modelo é constituído por uma tubulação com 300 mm de diâmetro dotado de um medidor de vazão do tipo Venturi. A parede lateral esquerda do canal, na região da estrutura, é constituída por placas de acrílico transparentes, que permitem a visualização do fluxo ao longo da calha e da bacia de dissipação do vertedouro. O estabelecimento dos níveis de água a jusante do vertedouro foi realizado através de uma comporta metálica basculante.

O vertedouro em degraus, construído na escala geométrica 1:25, tem uma altura H_v de 43,5 m (1,74 m no

modelo) e degraus com 0,60 m de altura (2,4 cm no modelo) no trecho da calha com declividade constante (1V:0,75H). A calha do vertedouro possui uma largura de 20 m (0,80 m no modelo) e foi construída em acrílico.

A calha do vertedouro possui 61 degraus, sendo 50 degraus com altura H igual a 0,60 m e comprimento L igual a 0,45 m (altura de rugosidade k igual a 0,36 m). Os demais degraus, com dimensões menores, encontram-se no trecho localizado a montante da calha com declividade de 1V:0,75H.

Durante a realização dos testes as pressões instantâneas foram registradas com o uso de um sistema de aquisição de dados conectado a transdutores de pressão instalados nas tomadas de pressão ao longo da calha. O sistema de aquisição permite atingir uma taxa de aquisição de até 250.000 leituras/segundo.

Destaca-se que todos os resultados do presente estudo apresentados neste artigo encontram-se em dimensões de protótipo, os quais foram transpostos dos valores experimentais em acordo com o critério de semelhança de Froude.

POSIÇÃO DE INÍCIO DA AERAÇÃO DO ESCOAMENTO

Os testes realizados demonstraram que o registro da posição do início da aeração do fluxo exige uma definição da natureza da aeração que se considera, pois pôde-se perceber, no modelo, quatro posições ao longo da calha com características diferentes de aeração. A observação das posições de início da aeração do escoamento foi realizada junto à parede lateral esquerda do modelo em testes que contemplaram vazões específicas compreendidas entre $4,21 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ e $27,11 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$. A vista lateral do escoamento ao longo do vertedouro em degraus observada no teste realizado com a vazão específica de $10,11 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ está ilustrada na figura 2.

As quatro posições de aeração do fluxo identificadas ao longo da calha em degraus encontram-se caracterizadas na sequência:

a) Aeração da superfície livre da água

O início da aeração da superfície livre da água foi identificado na posição onde o perfil da linha da água começou a ter oscilações provocadas pela incorporação de ar no escoamento. A montante dessa posição a superfície livre da água possui uma aparência lisa, e no interior do fluxo, incluindo os degraus, não se observou a presença de ar. Essa posição, que coincide com o local onde a camada limite atinge a superfície livre da água, foi identificada pela distância L_1 . A figura 3 ilustra que a aeração da superfície livre da água iniciou no degrau 18 no teste realizado com a vazão específica de $10,11 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$.



Figura 2 - Aeração do fluxo ao longo da calha em degraus - vazão específica = 10,11 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) m^{-1} .

b) Aeração intermitente dos degraus

A jusante da posição onde houve a aeração da superfície livre da água observou-se a ocorrência de vórtices na zona de separação a jusante do espelho de cada degrau, visualizados pela presença intermitente de ar. Foi registrado como característico desse item o degrau localizado mais a montante da calha, no interior do qual foi observada a ocorrência intermitente de ar. A posição da aeração intermitente dos degraus foi identificada pela distância L_2 .

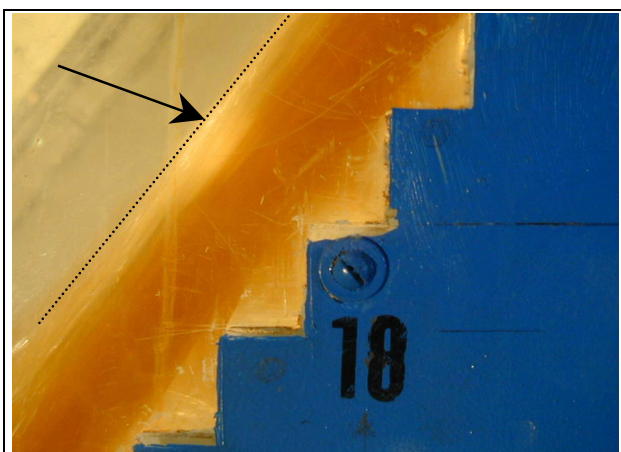


Figura 3 - Aeração da superfície livre da água no degrau 18.

c) Aeração contínua dos degraus

A aeração contínua dos degraus foi identificada como a posição onde foi visualizada a formação de vórtice no interior de sua cavidade através da circulação contínua de ar (distância L_3). Entre os degraus identificados como de início da aeração contínua e intermitente, observou-se que o fluxo na superfície livre da água foi continuamente aerado e no interior da cavidade dos degraus foi também aerado, porém de forma intermitente. A figura 4 ilustra a posição de início da aeração contínua dos degraus observada no teste realizado com a vazão específica de 10,11 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) m^{-1} .

d) Fluxo totalmente aerado ao longo da profundidade

A jusante da posição onde foi identificado o início da aeração da superfície livre da água ocorre o desenvolvimento da aeração do escoamento em direção aos degraus da calha. Principalmente a jusante da posição onde foi observada a aeração contínua dos degraus houve um aumento da aeração do fluxo a partir dos degraus em direção à superfície livre da água. A posição onde a aeração do fluxo proveniente da superfície livre da água e dos degraus se encontraram de uma forma praticamente permanente conduziu à identificação do fluxo totalmente aerado (distância L_4).

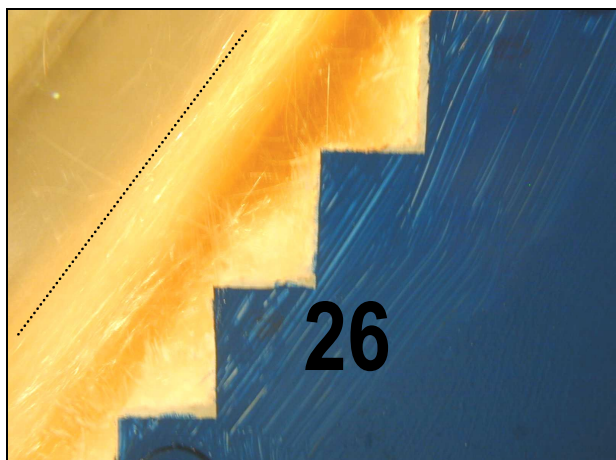


Figura 4 - Aeração contínua do degrau 26.

As posições de início da aeração obtidas pelos métodos sugeridos por Tozzi (1992) e Chanson (1994) e por Povh (2000), definidas pelas distâncias L_1 a L_4 , constam dos quadros 1 e 2, respectivamente e são ilustradas na figura 5. Essas distâncias correspondem aos comprimentos medidos ao longo da soleira e da calha do vertedouro a partir da posição de início do desenvolvimento da camada limite considerada logo a montante do primeiro trecho curvo da soleira vertedoura.

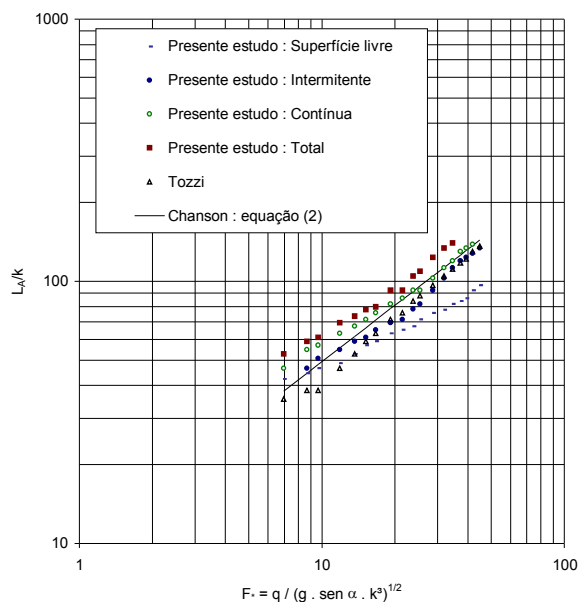


Figura 5 - Início da aeração do escoamento obtidas por Povh (2000) e pelas proposições de Tozzi (1992) e Chanson (1994) aplicadas na calha utilizada neste estudo

As posições de início da aeração do escoamento (distâncias L_1 , L_2 , L_3 e L_4) obtidas no presente estudo foram comparadas com as obtidas pelas proposições de

Tozzi (1992) e Chanson (1994), conforme identificado na figura 5. O cálculo do quociente L_A/k foi realizado considerando uma altura de rugosidade k igual a 0,36 m e inclinação α da calha igual a 53,13°. As comparações ilustradas na figura 5 que relaciona o quociente L_A/k com F_* conduziram às seguintes considerações:

- Cálculos teóricos da distância L_A realizados utilizando-se o método proposto por Tozzi (1992) aplicado à calha do presente estudo conduziram a resultados muito próximos aos obtidos com o início da aeração intermitente dos degraus (distância L_2) nos testes realizados com vazões específicas maiores ou iguais a 9,19 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) m^{-1} . Os valores de L_A/k calculados, principalmente, para vazões específicas menores ou iguais a 5,84 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) m^{-1} foram influenciados pelo início da aeração ter ocorrido sobre o trecho constituído por degraus com alturas H menores que 0,60 m. Os cálculos foram realizados considerando a ocorrência da profundidade crítica na crista (el. 94,50 m), altura de rugosidade k do trecho liso da calha igual a 0,0006 m (Chow - 1959) e coeficiente de Coriolis $\alpha_1 = 1,10$ (Tozzi - 1992). As posições L_A calculadas pela proposição de Tozzi (1992) e apresentadas no quadro 1 correspondem ao local onde a profundidade h do fluxo é igual à espessura da camada limite δ - equação (1);
- A equação (2), proposta por Chanson (1994), conduziu a distâncias L_A muito próximas às obtidas com as posições de início da aeração contínua dos degraus (distância L_3), nos testes realizados com vazões específicas maiores ou iguais a 11,63 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) m^{-1} . Os valores de L_A/k obtidos, principalmente nos testes realizados com vazões específicas menores ou iguais a 5,84 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) m^{-1} , foram influenciados pela proximidade do trecho constituído por degraus com alturas menores que 0,60 m ($k < 0,36$ m).

PRESSÕES AO LONGO DA CALHA EM DEGRAUS

Os degraus favorecem o aumento da turbulência do fluxo que possibilita condições de uma maior flutuação das pressões ao longo da calha. O conhecimento das flutuações de pressão pode ser obtido mediante o registro de pressões instantâneas com o uso de transdutores de pressão ligados a um sistema de aquisição de dados. Esses resultados podem ser de grande importância para a garantia de um projeto seguro.

Para a verificação do vertedouro em degraus do presente estudo, no que diz respeito às pressões instantâneas, foi necessária a compra dos equipamentos já citados com a participação da FINEP como órgão financiador.

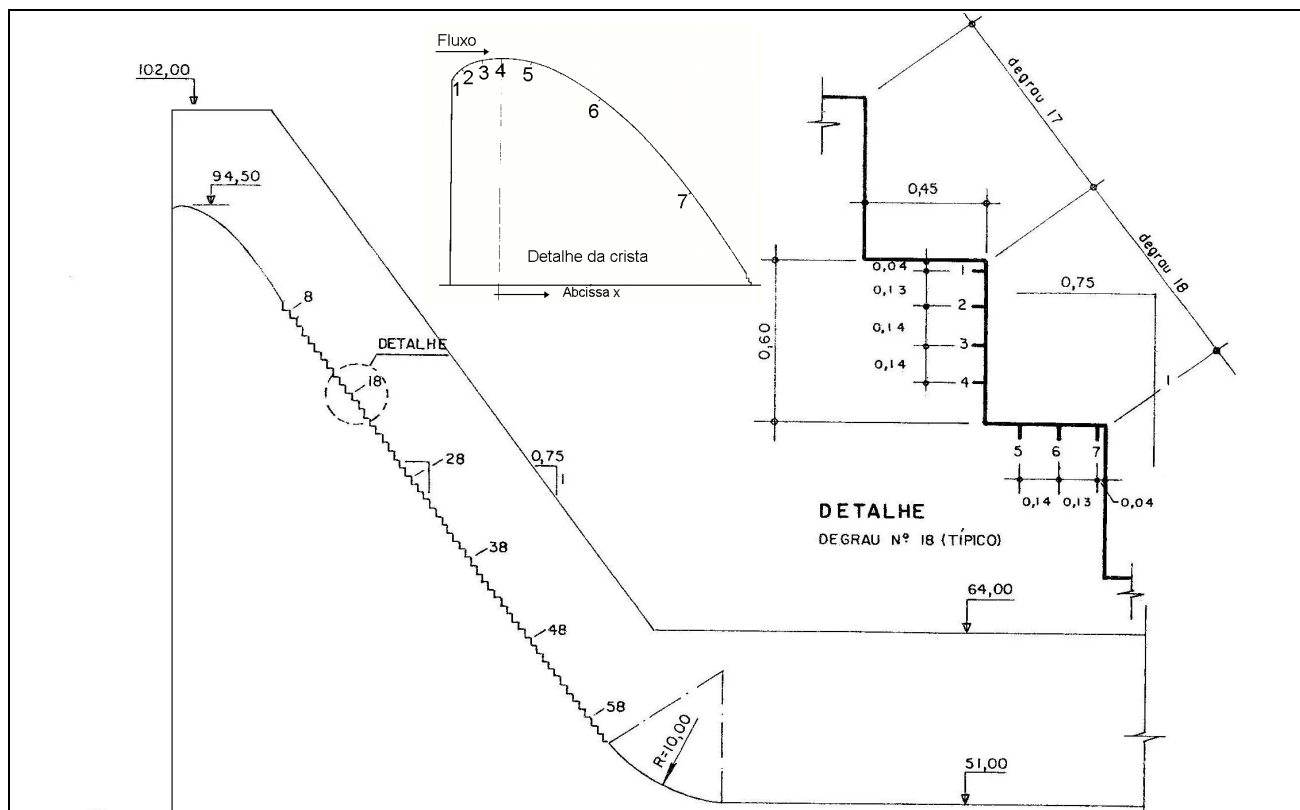


Figura 6 - Localização das tomadas de pressão ao longo da calha em degraus e da ogiva.

Neste estudo, as pressões instantâneas foram medidas em 49 tomadas de pressão ao longo do vertedouro, compreendendo 7 tomadas de pressão ao longo da ogiva e 42 tomadas de pressão ao longo da calha vertedoura. A calha vertedoura foi instrumentada em 6 degraus (degraus nº 8, 18, 28, 38, 48 e 58), sendo 7 tomadas de pressão em cada degrau, identificados de 1 a 7 (4 na face vertical e 3 na face horizontal). A figura 6 ilustra as posições dessas tomadas de pressão.

A verificação da estrutura foi realizada para quatro vazões específicas: $10,99 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)}\text{m}^{-1}$, $16,72 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)}\text{m}^{-1}$, $22,39 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)}\text{m}^{-1}$ e $31,70 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)}\text{m}^{-1}$. Em cada tomada de pressão foram realizadas 3 aquisições de 3.500 leituras a uma taxa de 256 leituras por segundo no modelo. Exemplos de leituras ilustrando a flutuação das pressões instantâneas ao longo do tempo obtidas em diferentes tomadas de pressão encontram-se ilustradas nas figuras 7 e 8.

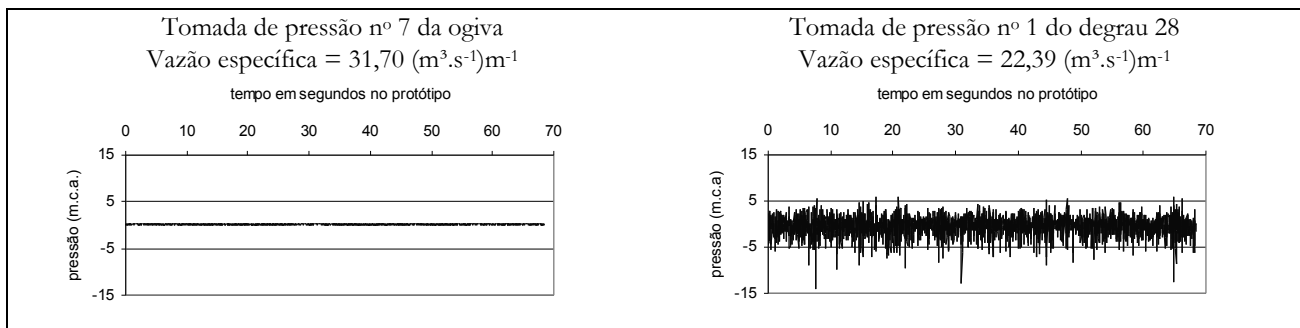


Figura 7 - Pressões instantâneas registradas na ogiva e no degrau 28 do vertedouro.

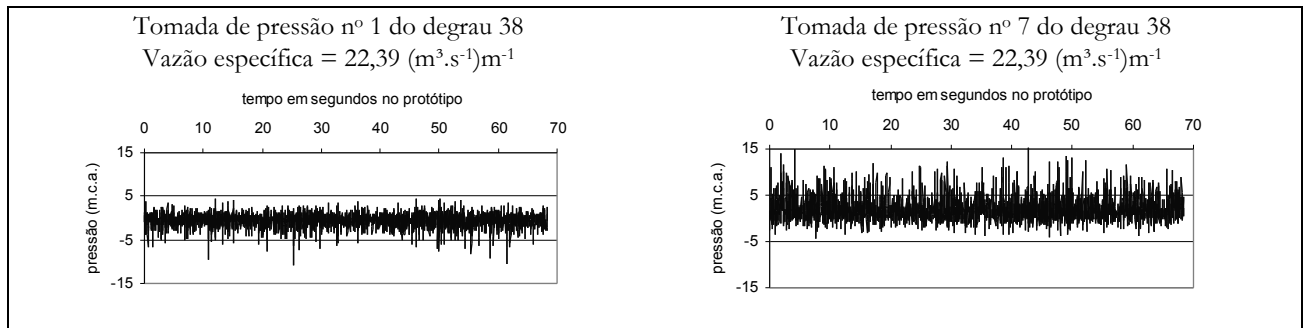


Figura 8 - Pressões instantâneas registradas no degrau 38 do vertedouro.

A comparação entre as aquisições de pressão ilustradas na figura 7 realizadas na tomada de pressão nº 7 da ogiva (trecho liso) e na tomada de pressão nº 1 do degrau 28, permite visualizar como os degraus intensificam as flutuações de pressão ao longo da calha. Dessa forma, os registros das pressões instantâneas ao longo da calha em degraus torna-se um aspecto importante no seu projeto.

A aquisição realizada na tomada de pressão nº 1, localizada no paramento vertical dos degraus, teve um comportamento tal que as maiores flutuações são de tração (redução das pressões em relação à média). Por outro lado, a aquisição registrada na tomada de pressão nº 7 teve um comportamento tal que as maiores flutuações são de compressão (aumento das pressões em relação à média). Os gráficos da figura 8 ilustram esses comentários relativos às tomadas de pressão nº 1 e 7.

Uma das características do escoamento utilizadas para a análise foi a pressão média calculada pela média das pressões instantâneas registradas em cada tomada de pressão associada à aeração do escoamento. As posições de início da aeração do escoamento ao longo da calha e as médias das pressões instantâneas constam dos quadros 3 e 4, respectivamente. Os resultados apresentados no quadro 4 confirmam que as menores pressões ocorrem no trecho superior do paramento vertical do degrau (tomada de pressão nº 1). Assim sendo, foi realizada uma análise das pressões médias registradas na tomada de pressão nº 1 ao longo da calha em degraus. Observou-se que houve uma redução da pressão à medida que a tomada de pressão esteve localizada mais a jusante. Para as vazões específicas de $10,99 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ e $16,72 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ a redução das pressões médias atingiu um valor mínimo no degrau 28. Nos degraus 38 e 48 não houve redução das pressões médias em relação aos valores registrados no degrau 28, cujo motivo deve estar associado à aeração do fluxo observada nessas vazões a jusante do degrau 28. A figura 9 ilustra as pressões médias registradas ao longo do vertedouro na tomada de pressão nº 1 com as vazões específicas de $10,99 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ e $16,72 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$.

Outro fato observado foi o aumento das pressões médias registradas nos degraus 48 e 58 nos testes realizados com as vazões específicas de $22,39 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ e $31,70 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$. Registra-se, porém, que esse aumento ocorreu devido à influência dos níveis de água a jusante do vertedouro (afogamento dos degraus). Para as vazões específicas de $10,99 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ e $16,72 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ a influência dos níveis de água a jusante do vertedouro sobre as pressões registradas somente foi perceptível no degrau 58, conforme ilustra a figura 9.

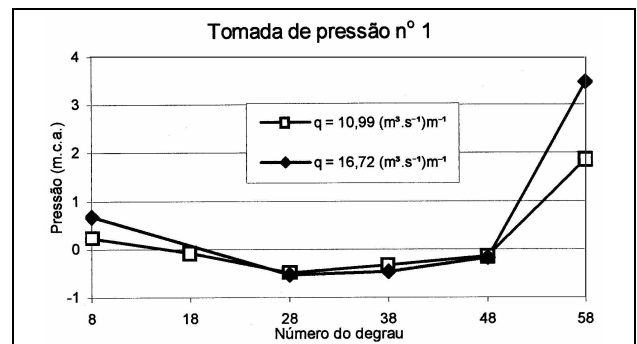


Figura 9 - Pressões médias registradas na tomada de pressão nº 1 dos degraus 8 e 58.

Os registros das pressões mínimas em cada tomada de pressão estão apresentados no quadro 5. Da mesma forma que observado com as pressões médias, a tomada de pressão nº 1 foi a posição mais desfavorável no que diz respeito às pressões mínimas. Em todos os testes realizados foram registradas no modelo pressões que transpostas para o protótipo conduziriam a pressões abaixo da pressão de vapor da água ($\sim -10 \text{ m.c.a.}$). Destaca-se que as pressões mínimas inferiores a $-10,3 \text{ m.c.a.}$ apresentadas no quadro 5 não têm significado físico e que não foram corrigidas para tornar possível saber os valores registrados no modelo.

Como valores próximos aos da pressão de vapor da água ($\sim -10 \text{ m.c.a.}$) podem induzir ao processo da cavi-

tação, foi realizada uma análise de probabilidade das pressões registradas. Essa análise correspondeu ao cálculo da ocorrência de pressões instantâneas inferiores a -7 m.c.a. e -9 m.c.a. Os resultados obtidos, apresentados nos quadros 6 e 7, mostram que a tomada de pressão nº 1 do degrau 28 é a posição mais desfavorável da calha.

Os resultados comprovaram que a geometria dos degraus favorece a redução de pressão no seu vértice superior (tomada de pressão nº 1), onde existe uma condição favorável para a separação do fluxo. No trecho onde o fluxo não está aerado, essa redução de pressão pode provocar danos à estrutura caso as pressões instantâneas atinjam a pressão de vapor da água (~ -10 m.c.a.). Porém, o colapso das bolhas decorrentes da cavitação ocorre a jusante da posição onde a bolha foi formada, em um local de alta pressão. Devido à geometria da calha em degraus, o colapso dessas bolhas pode não ocorrer junto à superfície dos degraus, reduzindo a possibilidade de efeito erosivo no paramento vertical desse degrau. Porém, experiências adicionais de laboratório são necessárias para comprovação desses comentários.

CONCLUSÕES

Os testes realizados mostraram que se deve ter um critério bem definido quanto ao registro da ocorrência do fenômeno da aeração do fluxo no modelo. Neste trabalho foi apresentado um método que caracteriza quatro diferentes regiões ao longo da calha no que diz respeito à aeração do fluxo.

Os resultados ilustrados na figura 5 mostram que a posição de início da aeração do superfície livre da água observada no presente estudo ocorreu a montante dos resultados obtidos com as proposições de Tozzi (1992) e Chanson (1994). Os métodos propostos por Tozzi (1992) e Chanson (1994) para o cálculo da distância L_A conduziram, respectivamente, às seguintes posições de início da aeração do fluxo no presente estudo: aeração intermitente dos degraus (distância L_2) e aeração contínua dos degraus (distância L_3). Porém, considera-se que esses métodos sejam adequados para a definição das posições onde a aeração do fluxo atinge a superfície dos degraus ao longo da calha.

Tabela 1 - Resultados obtidos com as proposições sugeridas por Tozzi (1992) e Chanson (1994) na determinação da posição de início da aeração do escoamento ao longo da calha em degraus.

q ($(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{m}^{-1}$)	F*	Tozzi			Chanson		
		degrau nº	L_A (m)	L_A/k	degrau nº	L_A (m)	L_A/k
4,21	6,96	6	12,80	35,56	9	13,70	38,07
5,25	8,68	8	13,81	38,36	11	16,04	44,56
5,84	9,65	8	13,81	38,36	13	17,31	48,07
7,16	11,83	12	16,78	46,61	17	20,01	55,59
8,26	13,65	14	19,03	52,86	19	22,16	61,56
9,19	15,19	18	21,28	59,11	20	23,91	66,42
10,11	16,71	20	22,78	63,28	23	25,59	71,10
11,63	19,22	24	25,78	71,61	28	28,28	78,56
13,01	21,50	26	27,28	75,78	30	30,64	85,10
14,38	23,76	30	30,28	84,11	33	32,90	91,40
15,37	25,40	32	31,78	88,28	36	34,50	95,84
17,36	28,69	36	34,74	96,61	39	37,63	104,53
19,30	31,90	40	37,78	104,94	43	40,58	112,74
20,93	34,59	43	40,03	111,19	47	43,00	119,45
22,56	37,28	46	42,28	117,44	50	45,36	126,01
23,82	39,36	48	43,78	121,61	54	47,15	130,98
25,28	41,78	52	46,78	129,94	56	49,20	136,66
27,11	44,80	55	49,03	136,19	58	51,71	143,64

Notas:

- $F^* = q / (g \cdot \sin \theta \cdot k^3)^{1/2}$
- L_A = Distância que identifica o início da aeração do escoamento;
- k = altura de rugosidade, considerada igual a 0,36 m;
- Os resultados de Tozzi (1992) foram obtidos através da localização onde a camada limite atingiu a superfície livre da água. A equação (1) foi utilizada para a determinação da espessura da camada limite turbulenta;
- Os resultados de Chanson (1994) foram obtidos pela equação (2).

Tabela 2 - Resultados obtidos por Povh (2000) na determinação da posição de início da aeração do escoamento ao longo da calha em degraus.

q	F*	Presente estudo											
		Superfície livre			Intermitente			Contínua			Total		
		degrau n°	L ₁ (m)	L ₁ /k	degrau n°	L ₂ (m)	L ₂ /k	degrau n°	L ₃ (m)	L ₃ /k	degrau n°	L ₄ (m)	L ₄ /k
4,21	6,96	10	15,28	42,44	-	-	-	12	16,78	46,61	15	19,03	52,86
5,25	8,68	11	16,03	44,53	12	16,78	46,61	16	19,78	54,94	18	21,28	59,11
5,84	9,65	12	16,78	46,61	14	18,28	50,78	17	20,53	57,03	19	22,03	61,19
7,16	11,83	13	17,53	48,69	16	19,78	54,94	20	22,78	63,28	23	25,03	69,53
8,26	13,65	15	19,03	52,86	18	21,28	59,11	22	24,28	67,44	25	26,53	73,69
9,19	15,19	17	20,53	57,03	19	22,03	61,19	24	25,78	71,61	27	28,03	77,86
10,11	16,71	18	21,28	59,11	21	23,53	65,36	26	27,28	75,78	28	28,78	79,94
11,63	19,22	20	22,78	63,28	23	25,03	69,53	29	29,53	82,03	33/35	33,28	92,44
13,01	21,50	21	23,53	65,36	24	25,78	71,61	31	31,03	86,19	33/35	33,28	92,44
14,38	23,76	22	24,28	67,44	28	28,28	78,56	33/35	33,28	92,44	40	37,78	104,94
15,37	25,40	24	25,78	71,61	29	29,53	82,03	33/35	33,28	92,44	42	39,28	109,11
17,36	28,69	26	27,28	75,78	33/35	33,28	92,44	39	37,03	102,86	49	44,53	123,69
19,30	31,90	27	28,03	77,86	39	37,03	102,86	43	40,58	112,72	54	48,28	134,11
20,93	34,59	29	29,53	82,03	43	40,58	112,72	47	43,03	119,53	57	50,53	140,36
22,56	37,28	30	30,28	84,11	47	43,03	119,53	52	46,78	129,94	-	-	-
23,82	39,36	31	31,03	86,19	49	44,53	123,69	54	48,28	134,11	-	-	-
25,28	41,78	33/35	33,28	92,44	51	46,03	127,86	56	49,78	138,28	-	-	-
27,11	44,80	36	34,78	96,61	54	48,28	134,11	-	-	-	-	-	-

Notas:

- q = vazão específica em (m³.s⁻¹)m⁻¹;
- F* = q/(g . sen . k³)^{1/2};
- L₁ = Distância que identifica a posição de início da aeração da superfície livre do escoamento observado no presente estudo;
- L₂ = Distância que identifica a posição de início da aeração intermitente do fluxo no interior dos degraus da calha (presente estudo);
- L₃ = Distância que identifica a posição de início da aeração contínua do fluxo no interior dos degraus da calha (presente estudo);
- L₄ = Distância que identifica a posição de início da aeração total do fluxo ao longo da profundidade (presente estudo);
- k = altura de rugosidade, considerada igual a 0,36 m;
- 33/35 : corresponde à ocorrência de aeração entre os degraus 33 e 35. A distância igual a 33,28 m é relativa ao degrau 34.

Tabela 3 - Posição de início da aeração do escoamento ao longo do vertedouro.

Vazão específica (m ³ .s ⁻¹)m ⁻¹	Número do degrau onde foi observado o início da aeração do fluxo		
	Aeração da superfície livre da água	Aeração contínua dos degraus	Fluxo totalmente aerado
10,99	21	28	32
16,72	25	38	46
22,39	30	48	-
31,70	-	-	-

Tabela 4 - Pressões médias ao longo da ogiva e dos degraus.

Posição	Tomada de pressão	Abscissa x (m)	Cota da tomada (m)	Pressão média (m.c.a.)			
				$10,99(\text{m}^3.\text{s}^{-1})\text{m}^{-1}$	$16,72(\text{m}^3.\text{s}^{-1})\text{m}^{-1}$	$22,39(\text{m}^3.\text{s}^{-1})\text{m}^{-1}$	$31,70(\text{m}^3.\text{s}^{-1})\text{m}^{-1}$
Ogiva	1	-1,21	94,00	1,02	-0,35	-2,04	-5,66
	2	-1,00	94,23	1,47	0,78	-0,30	-2,30
	3	-0,50	94,45	0,67	-	-0,94	-2,91
	4	0,00	94,50	0,47	-0,01	-0,74	-2,24
	5	0,71	94,40	0,55	0,07	-0,51	-1,40
	6	2,50	93,49	-0,30	-0,55	-0,98	-1,69
	7	4,75	91,15	0,15	0,38	0,34	0,17
Degrau 8	1	7,05	87,46	0,22	0,68	1,28	1,90
	2	7,05	87,33	1,29	1,64	2,05	2,54
	3	7,05	87,19	-	-	-	-
	4	7,05	87,05	-	-	-	-
	5	7,20	86,90	1,76	2,19	2,65	3,16
	6	7,34	86,90	2,49	2,86	3,20	3,72
	7	7,47	86,90	3,18	3,66	3,94	4,45
Degrau 18	1	11,50	81,46	-0,08	-	0,38	0,88
	2	11,50	81,33	0,53	0,78	0,94	1,50
	3	11,50	81,19	0,99	1,11	1,15	1,50
	4	11,50	81,05	1,06	1,24	1,47	2,31
	5	11,64	80,90	0,68	0,89	1,34	2,97
	6	11,78	80,90	2,17	2,44	2,68	3,49
	7	11,91	80,90	3,00	3,10	3,54	4,25
Degrau 28	1	16,00	75,46	-0,50	-0,53	-0,51	-0,30
	2	16,00	75,33	0,18	0,36	0,33	0,59
	3	16,00	75,19	0,37	0,41	0,64	0,80
	4	16,00	75,05	0,36	0,48	0,60	0,82
	5	16,14	74,90	0,87	0,99	1,17	1,46
	6	16,28	74,90	2,01	2,11	2,34	2,62
	7	16,41	74,90	3,58	4,03	4,06	4,16
Degrau 38	1	20,50	69,46	-0,33	-0,47	-0,51	-0,31
	2	20,50	69,33	-0,20	-0,13	-0,16	-0,01
	3	20,50	69,19	-0,02	-0,03	0,08	0,26
	4	20,50	69,05	0,11	0,15	0,23	0,30
	5	20,64	68,90	0,30	0,49	0,59	0,84
	6	20,78	68,90	0,96	1,14	1,23	1,33
	7	20,91	68,90	1,93	2,15	2,17	2,36
Degrau 48	1	25,00	63,46	-0,15	-0,17	0,71	3,53
	2	25,00	63,33	0,21	0,44	1,16	4,04
	3	25,00	63,19	0,37	0,59	1,34	4,27
	4	25,00	63,05	-0,01	0,30	1,43	4,61
	5	25,14	62,90	0,30	0,94	2,64	5,61
	6	25,28	62,90	2,21	3,53	4,16	7,05
	7	25,41	62,90	2,95	3,74	4,69	6,96
Degrau 58	1	29,50	57,46	1,86	3,47	5,31	8,90
	2	29,50	57,33	2,18	3,91	5,85	9,39
	3	29,50	57,19	2,46	4,26	6,22	9,69
	4	29,50	57,05	2,20	4,10	6,40	9,71
	5	29,64	56,90	2,86	5,05	7,23	10,64
	6	29,78	56,90	3,84	5,98	8,47	11,90
	7	29,91	56,90	4,36	6,39	8,83	12,17

Tabela 5 - Pressões mínimas ao longo da ogiva e dos degraus.

Posição	Tomada de pressão	Abscissa x (m)	Cota da tomada (m)	Pressão mínima (m.c.a.)			
				$10,99(\text{m}^3.\text{s}^{-1})\text{m}^{-1}$	$16,72(\text{m}^3.\text{s}^{-1})\text{m}^{-1}$	$22,39(\text{m}^3.\text{s}^{-1})\text{m}^{-1}$	$31,70(\text{m}^3.\text{s}^{-1})\text{m}^{-1}$
Ogiva	1	-1,21	94,00	0,87	-0,82	-2,57	-7,74
	2	-1,00	94,23	1,31	0,43	-0,63	-3,35
	3	-0,50	94,45	0,62	-	-1,15	-3,39
	4	0,00	94,50	0,41	-0,10	-0,91	-2,55
	5	0,71	94,40	0,46	-0,05	-0,68	-1,66
	6	2,50	93,49	-0,48	-0,73	-1,19	-2,00
	7	4,75	91,15	0,00	0,23	0,22	0,04
Degrau 8	1	7,05	87,46	-4,48	-3,99	-3,95	-1,99
	2	7,05	87,33	-1,31	-0,69	-0,18	0,14
	3	7,05	87,19	-	-	-	-
	4	7,05	87,05	-	-	-	-
	5	7,20	86,90	-0,02	0,40	0,12	1,10
	6	7,34	86,90	-2,45	-1,47	-1,70	-1,74
	7	7,47	86,90	-3,61	-3,08	-2,83	-1,08
Degrau 18	1	11,50	81,46	-11,18	-	-9,44	-10,12
	2	11,50	81,33	-8,84	-8,68	-9,21	-10,36
	3	11,50	81,19	-4,69	-4,83	-4,40	-3,65
	4	11,50	81,05	-3,37	-3,25	-3,13	-2,22
	5	11,64	80,90	-3,89	-5,37	-3,31	-3,14
	6	11,78	80,90	-2,49	-2,57	-3,55	-2,44
	7	11,91	80,90	-5,40	-4,67	-5,28	-3,67
Degrau 28	1	16,00	75,46	-16,89	-16,90	-14,48	-17,07
	2	16,00	75,33	-9,55	-13,11	-10,89	-11,19
	3	16,00	75,19	-6,48	-6,67	-7,22	-7,09
	4	16,00	75,05	-6,36	-6,82	-5,91	-7,09
	5	16,14	74,90	-4,44	-6,32	-6,39	-5,81
	6	16,28	74,90	-3,79	-5,12	-4,08	-5,94
	7	16,41	74,90	-4,14	-3,80	-3,76	-4,01
Degrau 38	1	20,50	69,46	-6,93	-11,32	-10,82	-11,91
	2	20,50	69,33	-3,97	-7,32	-7,79	-10,14
	3	20,50	69,19	-3,55	-4,55	-6,39	-6,21
	4	20,50	69,05	-2,47	-4,45	-5,38	-4,35
	5	20,64	68,90	-2,25	-4,24	-4,02	-4,26
	6	20,78	68,90	-2,49	-4,10	-4,05	-4,20
	7	20,91	68,90	-4,02	-4,51	-5,37	-8,50
Degrau 48	1	25,00	63,46	-5,27	-9,30	-11,26	-8,72
	2	25,00	63,33	-2,67	-9,20	-4,57	-3,50
	3	25,00	63,19	-3,69	-7,12	-6,28	-4,25
	4	25,00	63,05	-2,49	-5,38	-7,04	-4,53
	5	25,14	62,90	-2,81	-4,54	-2,40	-0,85
	6	25,28	62,90	-3,05	-3,97	-5,75	-4,02
	7	25,41	62,90	-1,71	-1,93	-1,82	0,30
Degrau 58	1	29,50	57,46	-1,42	-1,36	-5,40	0,11
	2	29,50	57,33	-3,70	-7,84	-9,50	-4,23
	3	29,50	57,19	3,77	-4,43	-9,90	-4,56
	4	29,50	57,05	-2,90	-2,13	-2,84	-0,68
	5	29,64	56,90	-1,29	-0,66	-1,87	0,65
	6	29,78	56,90	-6,21	-2,19	-2,89	-0,52
	7	29,91	56,90	-2,63	-2,02	-1,17	1,88

Tabela 6 - Porcentagem de ocorrência de pressões inferiores a – 7 m.c.a.

Posição	Tomada de pressão	Abscissa x (m)	Cota da tomada (m)	Porcentagem de ocorrência (%)			
				10,99(m ³ .s ⁻¹)m ⁻¹	16,72(m ³ .s ⁻¹)m ⁻¹	22,39(m ³ .s ⁻¹)m ⁻¹	31,70(m ³ .s ⁻¹)m ⁻¹
Ogiva	1	-1,21	94,00	0	0	0	1,47
	2	-1,00	94,23	0	0	0	0
	3	-0,50	94,45	0	-	0	0
	4	0,00	94,50	0	0	0	0
	5	0,71	94,40	0	0	0	0
	6	2,50	93,49	0	0	0	0
	7	4,75	91,15	0	0	0	0
Degrau 8	1	7,05	87,46	0	0	0	0
	2	7,05	87,33	0	0	0	0
	3	7,05	87,19	0	0	0	0
	4	7,05	87,05	0	0	0	0
	5	7,20	86,90	0	0	0	0
	6	7,34	86,90	0	0	0	0
	7	7,47	86,90	0	0	0	0
Degrau 18	1	11,50	81,46	0,06	0,07	0,22	0,09
	2	11,50	81,33	0,01	0,01	0,05	0,02
	3	11,50	81,19	0	0	0	0
	4	11,50	81,05	0	0	0	0
	5	11,64	80,90	0	0	0	0
	6	11,78	80,90	0	0	0	0
	7	11,91	80,90	0	0	0	0
Degrau 28	1	16,00	75,46	0,70	0,97	0,98	1,07
	2	16,00	75,33	0,13	0,12	0,18	0,14
	3	16,00	75,19	0	0	0,01	0,01
	4	16,00	75,05	0	0	0	0,01
	5	16,14	74,90	0	0	0	0
	6	16,28	74,90	0	0	0	0
	7	16,41	74,90	0	0	0	0
Degrau 38	1	20,50	69,46	0	0,24	0,29	0,22
	2	20,50	69,33	0	0,02	0,04	0,10
	3	20,50	69,19	0	0	0	0
	4	20,50	69,05	0	0	0	0
	5	20,64	68,90	0	0	0	0
	6	20,78	68,90	0	0	0	0
	7	20,91	68,90	0	0	0	0
Degrau 48	1	25,00	63,46	0	0,07	0,17	0,03
	2	25,00	63,33	0	0,06	0,01	0
	3	25,00	63,19	0	0,01	0	0
	4	25,00	63,05	0	0	0,01	0
	5	25,14	62,90	0	0	0	0
	6	25,28	62,90	0	0	0	0
	7	25,41	62,90	0	0	0	0
Degrau 58	1	29,50	57,46	0	0	0,04	0
	2	29,50	57,33	0	0,01	0,02	0
	3	29,50	57,19	0	0	0	0
	4	29,50	57,05	0	0	0	0
	5	29,64	56,90	0	0	0	0
	6	29,78	56,90	0	0	0	0
	7	29,91	56,90	0	0	0	0

Tabela 7 - Porcentagem de ocorrência de pressões inferiores a – 9 m.c.a.

Posição	Tomada de pressão	Abscissa x (m)	Cota da tomada (m)	Porcentagem de ocorrência (%)			
				10,99(m ³ .s ⁻¹)m ⁻¹	16,72(m ³ .s ⁻¹)m ⁻¹	22,39(m ³ .s ⁻¹)m ⁻¹	31,70(m ³ .s ⁻¹)m ⁻¹
Ogiva	1	-1,21	94,00	0	0	0	0
	2	-1,00	94,23	0	0	0	0
	3	-0,50	94,45	0	-	0	0
	4	0,00	94,50	0	0	0	0
	5	0,71	94,40	0	0	0	0
	6	2,50	93,49	0	0	0	0
	7	4,75	91,15	0	0	0	0
Degrau 8	1	7,05	87,46	0	0	0	0
	2	7,05	87,33	0	0	0	0
	3	7,05	87,19	0	0	0	0
	4	7,05	87,05	0	0	0	0
	5	7,20	86,90	0	0	0	0
	6	7,34	86,90	0	0	0	0
	7	7,47	86,90	0	0	0	0
Degrau 18	1	11,50	81,46	0,01	0,04	0,03	0,04
	2	11,50	81,33	0	0	0,01	0,01
	3	11,50	81,19	0	0	0	0
	4	11,50	81,05	0	0	0	0
	5	11,64	80,90	0	0	0	0
	6	11,78	80,90	0	0	0	0
	7	11,91	80,90	0	0	0	0
Degrau 28	1	16,00	75,46	0,18	0,34	0,30	0,38
	2	16,00	75,33	0,02	0,04	0,04	0,03
	3	16,00	75,19	0	0	0	0
	4	16,00	75,05	0	0	0	0
	5	16,14	74,90	0	0	0	0
	6	16,28	74,90	0	0	0	0
	7	16,41	74,90	0	0	0	0
Degrau 38	1	20,50	69,46	0	0,04	0,09	0,06
	2	20,50	69,33	0	0	0	0,02
	3	20,50	69,19	0	0	0	0
	4	20,50	69,05	0	0	0	0
	5	20,64	68,90	0	0	0	0
	6	20,78	68,90	0	0	0	0
	7	20,91	68,90	0	0	0	0
Degrau 48	1	25,00	63,46	0	0,01	0,06	0
	2	25,00	63,33	0	0,02	0	0
	3	25,00	63,19	0	0	0	0
	4	25,00	63,05	0	0	0	0
	5	25,14	62,90	0	0	0	0
	6	25,28	62,90	0	0	0	0
	7	25,41	62,90	0	0	0	0
Degrau 58	1	29,50	57,46	0	0	0	0
	2	29,50	57,33	0	0	0,01	0
	3	29,50	57,19	0	0	0,01	0
	4	29,50	57,05	0	0	0	0
	5	29,64	56,90	0	0	0	0
	6	29,78	56,90	0	0	0	0
	7	29,91	56,90	0	0	0	0

Os resultados obtidos comprovaram que a geometria dos degraus favorece a redução de pressão no seu vértice superior (tomada de pressão nº 1), onde existe uma condição favorável para a separação do fluxo. Essa tendência foi observada tanto com as pressões médias como com as pressões mínimas.

Foi realizada uma análise das pressões instantâneas registradas na tomada de pressão nº 1 associada à observação da aeração do fluxo ao longo da calha. Observou-se que no trecho da calha sem aeração do fluxo houve redução das pressões à medida que a tomada de pressão nº 1 esteve localizada mais a jusante. Nos testes realizados com as vazões específicas de $10,99 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ e $16,72 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ a redução das pressões médias atingiu um valor mínimo no degrau 28. Nesses testes observou-se que nos degraus 38 e 48, localizados a jusante do degrau 28, as pressões médias não resultaram inferiores às registradas no degrau 28. O motivo disso deve estar associado à aeração do fluxo observada a jusante do degrau 28

REFERÊNCIAS

- BINDO, M., GAUTIER, J.; LACROIX, F. *The stepped spillway of M'Bali dam. International Water Power & Dam Construction*, Sutton, v. 45, n. 1, p. 35-36, Jan. 1993.
- BOES, R. *Physical model study on two-phase cascade flow : student paper. In: CONGRESS IAHR, 28., 1999, Graz-Austria. Proceedings* : abstract volume, papers on CD Rom. Graz : IAHR, 1999. 7p.
- CHANSON, H. *Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways*. New York: Elsevier, 1994. 261p.
- CHINNARASRI, C. *Assessing the resistance of skimming flow on the step faces of stepped spillways. Dam Engineering*, Sidcup, v.12, n.4, p.303-321, Febr. 2002.
- CHOW, Ven Te. *Open channel hydraulics*. New York : McGraw-Hill, 1959. 680 p.
- ELVIRO, V., MATEOS, C. *Spanish research into stepped spillways. The International Journal on Hydropower & Dams*, Sutton, v. 2, n. 5, p. 61-65, 1995.
- ESSERY, I. T. S.; HORNER, M. W. *The hydraulic design of stepped spillways. 2. ed.* London : Ciria, 1978. 45 p. (Construction Industry Research and Information Association, Report 33)
- MATOS, J. S. G.; QUINTELA, A. C. *Emulsão de ar e energia específica residual do escoamento em descarregadores de cheias em degraus. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 3., Lisboa, 1996; SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL-SILUBESA, 7., Lisboa, 1996. [Anais] Lisboa : APRH, ABES, 1996. v.2, p. 495-503.*
- OLINGER, J. C. *Contribuição ao estudo da distribuição de pressões nos vertedouros em degraus. São Paulo : USP, 2001. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo.*
- PETERKA, A. J. *The effect of entrained air on cavitation pitting. In: MINNESOTA INTERNATIONAL HYDRAULICS CONVENTION, 1953, Minneapolis. Proceedings.* Minneapolis : IAHR/ASCE, 1953. p.507-518.
- POVH, P. H. *Avaliação da energia residual a jusante de vertedouros em degraus com fluxos em regime skimming flow. Curitiba : UFPR, 2000. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.*
- RAJARATNAM, N. *Skimming flow in stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, New York, v.116, n.4, p.587-591, Apr. 1990.
- SÁNCHEZ-JUNY, M. *et al. Pressiones negativas sobre los peldaños de un aliviadero escalonado, y su relación con la aireación del flujo. In : CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, 19., 2000, Córdoba. Memórias...* Córdoba: IAHR, 2000a. v. 3, p. 263 –269.
- SÁNCHEZ-JUNY, M. *et al. Análisis de las presiones sobre las huellas de los escalones de un aliviadero escalonado em presas de hormigón compactado. In : CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, 19., 2000, Córdoba. Memórias...* Córdoba: IAHR, 2000b. v. 3, p. 271-278.
- TOZZI, M. *Caracterização / comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus. São Paulo : USP, 1992. 302 p. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo.*
- YASUDA, Y.; OHTSU, I. *Flow resistance of skimming flow in stepped channels. In: CONGRESS IAHR, 28., 1999, Graz-Austria. Proceedings* : abstract volume, papers on CD Rom. Graz : IAHR, 1999. 6 p.

Incipient aeration and pressure in stepped spillways

ABSTRACT

The characteristic configuration of stepped flumes leads to the establishment of negative pressure on the vertical face of steps. Therefore, the need to assure the safety of the structure makes it important to know the pressure field around the steps. This study - which was partially funded by FINEP (RECOPE / REHIDRO / SUB REDE 2) to provide equipment - was developed in a scale model (1:25 scale) of a spillway. A spillway with a slope of 1V:0.75H and step heights of 0.60 m was considered for discharges in the range of $4.2 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$ and $31.7 \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)m}^{-1}$. The study of the physical characteristics of the flow on a standard step is considered valid but this study revealed an additional aspect focusing on the importance of flow aeration in pressure through the flume. Therefore, for so-called skimming flow, it is necessary to correlate the aeration pattern to the pressure. It was observed that the beginning of aeration plays an important role in minimum pressure. The beginning of aeration varies with the discharge; its position moves downstream as the specific discharge increases. It should be pointed out that there is no good criterion to define the beginning of flow aeration in models. This paper provides a suggestion to establish such a criterion. This

paper also shows an interesting aspect of pressure fluctuation measured by transducers.

Key words: stepped spillway; incipient aeration; pressure fluctuation