

DELIMITAÇÃO DE REGIÕES DE SUSCETÍVEIS A DANOS POR CAVITAÇÃO EM UM VERTEDOURO EM DEGRAUS

Andressa Schumacher¹; Alba Valéria Brandão Canellas²; Marcelo Giulian Marques³; Eder Daniel Teixeira³; Mauricio Dai Prá³; Mariane Kempka⁴

Palavras-Chave: Vertedouro em Degraus. Danos por Cavitação.

RESUMO

A utilização de vertedouros em degraus tem se expandido sua aplicabilidade devido a praticidade de sua construção e a dissipação de energia que proporciona ao escoamento ao longo da calha. Contudo, estas estruturas estão sujeitas a fluxos de altas velocidades e isto pode gerar danos na superfície de concreto. Este trabalho apresenta uma metodologia para identificar as regiões críticas relacionadas ao fenômeno de cavitação em vertedouros em degraus (um dos principais fenômenos causadores de processos erosivos em estruturas de concreto), integrando aspectos geométricos, hidráulicos e de aeração. Estas regiões, por fim, delimitam os locais suscetíveis ou não aos danos por cavitação. Com isso, pode-se aumentar a segurança do empreendimento e, conseqüentemente, diminuir a necessidade de manutenção da estrutura. De maneira geral, percebe-se que é possível identificar as regiões de cavitação e possibilidade de dano pelo fenômeno de cavitação em protótipos com diferentes alturas de degraus. Detectou-se que maiores degraus produzem o fenômeno de cavitação em cargas hidráulicas menores. Em relação às vazões, o surgimento da cavitação teve uma mínima variação entre as diferentes características propostas. Pode-se concluir, também, que um aumento de vazão produz faixas de cavitação e possibilidade de dano cada vez maiores ao longo da calha, mas que, para ocorrerem, necessitam de uma calha mais longa.

INTRODUÇÃO

A utilização de vertedouros em degraus tem se expandido sua aplicabilidade devido a praticidade de sua construção e a dissipação de energia que proporciona ao escoamento ao longo da calha. Sabe-se que estas estruturas estão sujeitas a fluxos de altas velocidades e que isto pode gerar danos na superfície de concreto. Vieira e Gontijo (2011) confirmam que o número de estruturas hidráulicas danificadas por diferentes processos aumentou significativamente e que o desgaste é provocado, principalmente, por cavitação e tensões de cisalhamento.

Devido a rugosidade proporcionada pelos degraus durante o escoamento das altas velocidades, surgem zonas de baixa pressão na face vertical dos degraus, com a formação de bolhas de ar. Quando as pressões do líquido escoado diminuírem ao ponto de atingirem a pressão de vapor da água (-10,09 m.c.a., segundo Novakoski et al., 2018), ocorre a implosão das bolhas de ar formadas, o que caracteriza o fenômeno de cavitação. Estas implosões são capazes de gerar esforços por tração ou compressão na superfície hidráulica e, dependendo de sua intensidade e duração, podem causar danos.

Com o intuito de caracterizar as zonas de baixa pressão que ocorrem em vertedouros em degraus, Dai Prá (2004), Gomes (2006), Osmar (2016), Novakoski et al. (2018), Endres et al. (2019),

¹ Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, e-mail: andressaschumacher@hotmail.com

² Corpo Técnico, Furnas Centrais Elétricas, Rio de Janeiro/RJ, e-mail: alba@furnas.com.br.

³ Docentes do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre /RS, e-mail: mmarques@iph.ufrgs.br; eder.teixeira@ufrgs.br; mauricio.daipra@ufrgs.br

⁴ Docente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Guarapuava; e-mail: marianekempka@professores.utfpr.edu.br

Canellas (2020) estudaram a distribuição longitudinal das pressões ao longo de calhas em degraus, através de medições de pressões realizadas em modelos físicos (com alturas de degraus entre 3 cm a 9 cm e declividade de calhas de 1:1 e 1:0,75).

Schumacher (2020) estabelece equações que possibilitam determinar os comprimentos desde o primeiro degrau da calha até os pontos de menor pressão extrema mínima ($L_{e^{*0,1\%min}}$), de inicial aeração visual (L^*_v) e de aeração total (L_{en}^*) baseados nos resultados de Canellas (2020), conforme as Equações 1, 2 e 3, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Equações propostas para comprimento de calha de um vertedouro em degraus.

| | | |
|------------------------------|--|-----|
| Menor pressão mínima extrema | $\frac{L_{e^{*0,1\%min}}}{k} = 2,2309 \cdot F_r^*$ | (1) |
| Aeração visual inicial | $\frac{L^*_v}{k} = 2,710 \cdot F_r^*$ | (2) |
| Aeração total | $\frac{L_{en}^*}{k} = 4,122 \cdot F_r^*$ | (3) |

Onde: k – rugosidade dos degraus; $L_{e^{*0,1\%min}}$ – comprimento desde o primeiro degrau até o ponto de menor pressão mínima extrema; F_r^* – número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha; L_{en}^* – comprimento de aeração máxima a partir do primeiro degrau; L^*_v – comprimento de aeração visual inicial, a partir do primeiro degrau da calha.

A determinação dos comprimentos apresentados por Schumacher (2020) é explicada pelo fato de que, ao localizar o ponto de menor pressão mínima extrema na calha, a Equação 4, proposta por Canellas (2020), pode ser utilizada para identificar se a pressão mínima extrema atinja o valor da pressão de vapor da água, indicando o início do fenômeno de cavitação. Já as posições de aeração são fatores importantes para a proteção da superfície de concreto dos degraus.

$$\left(\frac{P_{0,1\%min}}{\gamma}\right) \frac{h_d}{Z_{0,1\%min}} \frac{h_c}{h_c} = 0,1601 \ln(F_r^*) - 0,5664 \quad (4)$$

Onde: $P_{0,1\%min}$ – menor pressão mínima extrema com 0,1% de probabilidade de não excedência; $Z_{0,1\%min}$ – energia total a montante até o ponto de menor pressão mínima extrema;

Complementando as análises de proteção da superfície dos degraus de Schumacher (2020), analisou-se também as investigações de Matos (1999), que demonstram que uma concentração de ar de 7% a 8% no fundo do escoamento é capaz de criar uma camada de proteção à superfície hidráulica contra os efeitos de cavitação. Para isso, o autor desenvolveu a Equação 5, capaz de determinar a porcentagem de concentração de ar próximo à superfície escalonada.

$$C_s = \frac{0,381}{\left(1 + \frac{s'}{14,189}\right)^{-1,2232}} \quad (5)$$

Onde: C_s – concentração média de ar no escoamento; s' – posição adimensional com valor 0 no ponto de início da aeração.

Os coeficientes adotados para delimitar a concentração de ar no contato da superfície hidráulica com o escoamento foram os localizados à 0,32 cm do fundo, pois é o local mais crítico observado pelo autor.

Assim, o objetivo deste trabalho foi elaborar uma metodologia para identificar as regiões críticas relacionadas ao fenômeno de cavitação em vertedouros em degraus, integrando aspectos geométricos, hidráulicos e de aeração. Estas regiões, por fim, delimitam os locais suscetíveis ou não aos danos por cavitação. Com isso, pode-se aumentar a segurança do empreendimento e, conseqüentemente, diminuir a necessidade de manutenção da estrutura.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para desenvolver o trabalho foram delimitadas três condições de risco de danos:

- Região sem risco de cavitação;
- Região sem ocorrência de dano por cavitação, e
- Região com possibilidade de dano por cavitação.

Para a definição das regiões foram utilizadas equações de localização de menor pressão mínima extrema com 0,1% de probabilidade de não excedência de Schumacher (2020), equações de identificação das pressões mínimas extremas de Canellas (2020) e de concentração de ar necessária para proteger os degraus contra os efeitos da cavitação de Matos (1999). Além disso, foram representadas as retas de menor pressão mínima extrema, aeração visual inicial, 8% de aeração e aeração total. As equações usadas para determinar as regiões estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo das equações utilizadas.

| | | |
|--|--|---|
| Escoamento Deslizante sobre Turbilhões (Fael e Pinheiro, 2003) | | $\frac{h_c}{h_d} = 0,824 \left(\frac{h_d}{h_L} \right)^{-0,227}$ |
| Menor pressão extrema mínima | Posição (Schumacher, 2020) | $\frac{L_{e0,1min}^*}{k} = 2,2309 * F_r^*$ |
| | Menor Pressão extrema (Canellas, 2020) | $\frac{\left(\frac{P_{0,1\%min}}{\gamma} \right) h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = 0,1601 \ln(Fr^*) - 0,5664$ |
| Estabilização das pressões/ Aeração total (Schumacher, 2020) | | $\frac{L_{en}^*}{k} = 4.122 * F_r^*$ |
| Aeração Visual Inicial (Schumacher, 2020) | | $\frac{L_v^*}{k} = 2.710 * F_r^*$ |
| 8% de aeração a 0,32 cm do fundo (Matos, 1999) | | $C_s = \frac{0,381}{\left(1 + \frac{s'}{14,189} \right)^{-1,2232}}$ |

As condições geométricas analisadas, expressas em termos de dimensões em protótipo, foram:

- espelho do degrau (h_d): 30, 60, 90 e 120 cm;
- inclinação (θ): 53,13°.

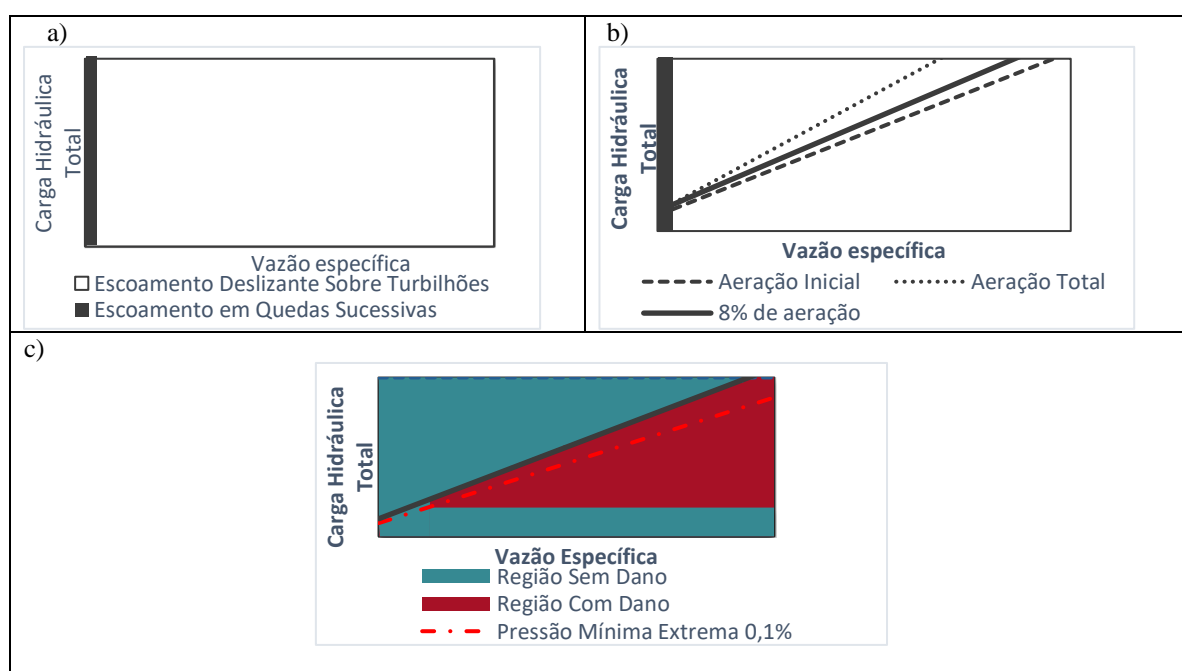
A elaboração das figuras que deu origem às regiões foi feita a partir de 4 etapas descritas abaixo, e ilustradas pela Figura 1:

- delimitação para o início do escoamento deslizante sobre turbilhões;

- b) delimitação dos pontos de aeração visual inicial e total, pois segundo Canellas (2020), o ponto de pressão mínima extrema ocorre ligeiramente antes do ponto de aeração visual inicial e o ponto de aeração total apresenta estabilização das pressões mínimas extremas. Delimitação do ponto de concentração de ar de 8% junto à calha, pois segundo Matos (1999) esta concentração pode evitar os danos por cavitação, quando $s' < 6$; e
- c) delimitação da vazão específica a partir da qual começam ocorrer pressões extremas mínimas próximas à pressão de vapor, sendo considerada como $P_{0,1\%}$ a pressão de vapor da água de -10,09 m.c.a., que desencadearia o processo de cavitação, a partir das metodologias propostas por Canellas (2020) e Schumacher (2020).

Deve-se ressaltar que na área azul (Regiões sem ocorrência de dano por cavitação) pode haver cavitação e quantidade de ar no fundo do escoamento suficiente para proteger os degraus da estrutura ou não ter cavitação devido ao aumento da pressão acima de -10,09 m.c.a.

Figura 1 – Regiões de cavitação e de danos em um vertedouro em degraus: a) início do escoamento deslizante sobre turbilhões, b) Aeração inicial, total e com 8% de concentração de ar, c) regiões com e sem dano.

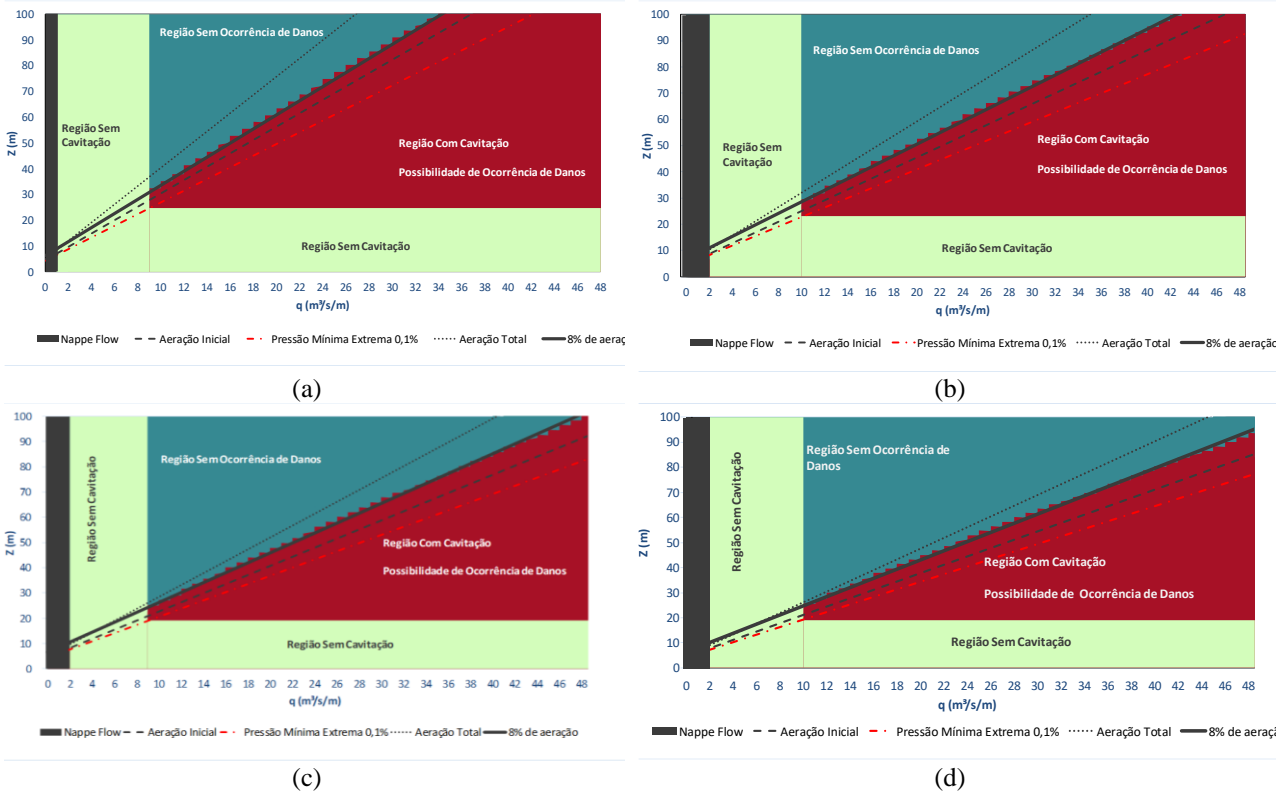


RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a metodologia proposta, a partir dos estudos de Fael e Pinheiro (2003), Matos (1999), Canellas (2020) e Schumacher (2020), e as condições de protótipo impostas, foram obtidas: i) região sem cavitação, ii) região sem ocorrência de dano por cavitação (seja ela devido a proteção dos degraus com 8% de aeração no fundo do canal ou retorno da pressão acima dos -10,09 m.c.a.); e iii) região com possibilidade de dano por cavitação.

A Figura 2 aborda calhas com $53,13^\circ$ de inclinação e alturas de degraus de 30, 60, 90 e 120 cm, sendo considerada como $P_{0,1\%}$ a pressão de vapor da água de -10,09 m.c.a., que desencadearia o processo de cavitação.

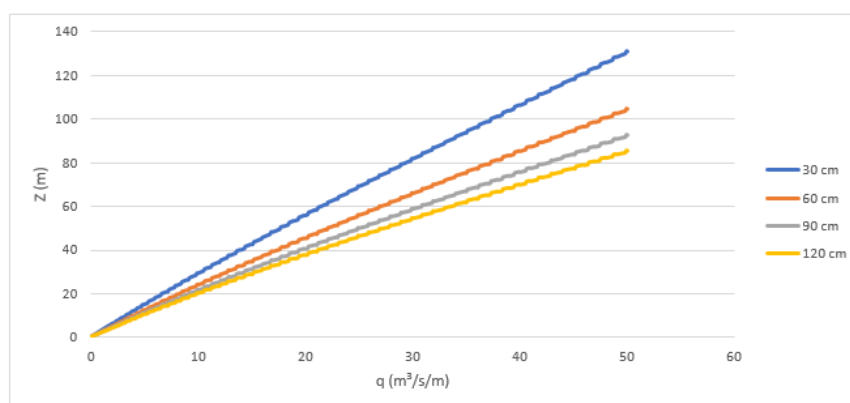
Figura 2 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para $\theta = 53.13^\circ$, $P_{0,1\%} = -10.09$ m.c.a. e respectivamente para $h_d = 30$ cm, $h_d = 60$ cm, $h_d = 90$ cm e $h_d = 120$ cm.



Avaliando o início do escoamento deslizante sobre turbilhões, verifica-se que maiores degraus necessitam de vazões maiores para iniciá-lo. Além disso, em média, este escoamento, seguindo a metodologia proposta por Fael e Pinheiro (2003), ocorre a partir uma vazão específica de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ para as condições de alturas e degraus e inclinação das calhas adotadas neste trabalho.

Considerando a curva de aeração visual inicial do escoamento (linha cinza tracejada) sobre as estruturas, foi verificado que quanto maior a altura do degrau, mais suave é a inclinação da curva (Figura 3). Isso ocorre devido a maior dissipação de energia obtida em maiores degraus, proporcionando maior aeração ao fluxo. Isso também foi concluído por Sanagiotto (2003).

Figura 3 – Comparação entre curvas de início de aeração visual para diferentes alturas de degraus e mesma inclinação da calha ($53,13^\circ$).



As vazões que indicam o início do fenômeno de cavitação (aquelas em que a pressão mínima extrema chegou a -10,09 m.c.a.) para as diferentes características utilizadas, ocorreram entre 8,9 e 10,6 m³/s/m, com cargas hidráulicas entre 16 a 24 m. Estudos de Gomes (2006), Novakoski (2018) e Endres et al. (2019) apontam para incipiência de cavitação em torno de vazões específicas de 10 m³/s/m.

Também se verifica que a variação da altura dos degraus não altera significativamente, a vazão e a localização da ocorrência que propiciam o fenômeno de cavitação. Isso pode ser observado a partir das vazões e das alturas que levam à condição de incipiência à cavitação nas Figuras 2 e 3. O desvio padrão das vazões obtidas para incipiência a cavitação para as diferentes geometrias apresentadas está na ordem de 0,6 m³/s/m. Já a carga hidráulica apresenta um desvio padrão de 3,1 m de altura para que sejam atingidos os mesmos valores de pressão relacionada a cavitação. Ainda, a diferença apresentada entre a menor e a maior vazão capazes de iniciar o fenômeno de cavitação, é de 1,7 m³/s/m. Em relação à carga hidráulica, a diferença fica em 8m.

Considerando, agora, a altura dos degraus, para que seja atingida a pressão do fenômeno de cavitação e a possibilidade de dano foram necessárias menores alturas de barragem para o degrau com maior altura, conforme Figura 2 e Figura 3. Isso pode ser atribuído ao fato de que maiores degraus apresentam maior rugosidade da calha e, com isso, há maior formação dos bolsões de ar no interior dos degraus e, conseqüentemente, as zonas de baixa pressão entre os degraus.

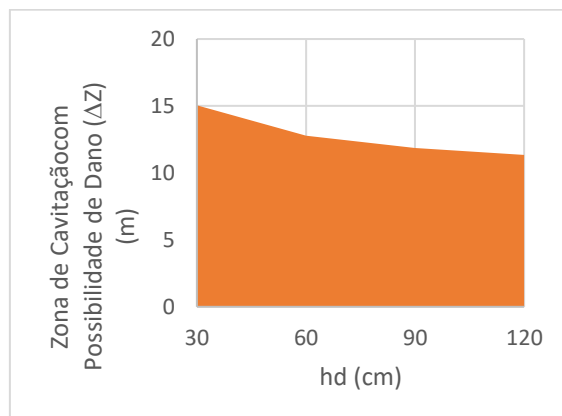
Ao se tratar da região de risco de danos por cavitação, percebe-se que ao atingir o valor mínimo de vazão para a ocorrência de cavitação, é observado que o fenômeno precisa de uma altura de barragem para que comece a ocorrer. Assim, para o limite de vazão também se estabelece um limite de altura de barragem para que o fenômeno possa se manifestar. Isso significa que nem toda vazão superior provocará cavitação na estrutura, se não possuir o comprimento de calha necessário. Ressalta-se, ainda, que quanto maior a vazão escoada sobre os degraus do vertedouro, maior é a zona de ocorrência de pressões extremas mínimas.

Este intervalo de localização (comprimento da calha) da ocorrência do fenômeno e possibilidade de dano ao longo da calha escalonada tornam-se cada vez maiores à medida que a vazão e a altura da estrutura crescem. Esta informação é coerente com as observações feitas nos estudos de Canellas (2020), que afirma que a partir da primeira pressão mínima observada para determinada vazão, as outras intensidades de vazão passarão por ela na mesma posição e percorrerão mais alguns degraus até atingir o seu valor mínimo para então voltarem a crescer e se estabilizar.

Pode-se observar que quanto maiores as alturas dos degraus da estrutura, menor é a vazão e a altura da barragem necessária para a ocorrência de dano. Além disso, a abrangência da região de possibilidade de dano por cavitação diminui conforme aumenta o tamanho dos degraus. Assim como todos os estudos apontam, quanto maior o degrau, maior a vazão necessária para a ocorrência do fenômeno de cavitação, quanto maior a altura do degrau, maior também é a distância necessária para que o fenômeno deixe de apresentar probabilidade de danos.

Apesar destas observações e dos esforços para diferenciar a estrutura geometricamente, a região de dano por cavitação teve uma oscilação de resultado insignificativa, obtendo diferenças menores do que 4 m de carga hidráulica total. Na Figura 4 estes resultados podem ser visualizados, onde ΔZ refere-se ao comprimento de abrangência da zona de cavitação, dado como zero o início do fenômeno na estrutura.

Figura 4 – Abrangência da região de cavitação com probabilidade de dano (ΔZ) para $q = 30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e para respectivamente diferentes alturas de degraus.



Vale ressaltar que a ocorrência da cavitação em uma estrutura, não significa intrinsecamente que ela sofrerá danos. Isto dependerá de outros fatores, como por exemplo, a resistência do concreto à tração, a concentração de ar no escoamento, dentre outros.

CONCLUSÃO

De maneira geral, percebe-se que é possível identificar as regiões de cavitação e possibilidade de dano pelo fenômeno de cavitação em protótipos com diferentes alturas de degraus.

Assim, percebe-se que maiores degraus produzem o fenômeno de cavitação em cargas hidráulicas menores, justificado pela formação de zonas instáveis nas rugosidades dos degraus. Ainda assim, a diferença apresentada entre a menor e a maior alturas capazes de iniciar o fenômeno de cavitação, é de 8 m.

Em relação às vazões, o surgimento da cavitação teve uma mínima variação entre as diferentes características propostas, sendo que a diferença apresentada entre a menor e a maior vazão capazes de iniciar o fenômeno de cavitação foi de $1,7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Pode-se concluir, também, que um aumento de vazão produz faixas de cavitação e possibilidade de dano cada vez maiores ao longo da calha, mas que, para ocorrerem, necessitam de uma calha mais longa. A existência do fenômeno de cavitação não ocorre apenas devido a vazão, como sugere a bibliografia até então, mas também de uma extensão de vertedouro compatível com a vazão.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais ao Laboratório de Obras Hidráulicas, onde foram realizadas as leituras, e toda a equipe que o compõe. Agradecimentos à Furnas Centrais Elétricas pelo investimento nas pesquisas da UFRGS e, principalmente, neste projeto. Ao CNPq e a CAPES por financiar parcialmente o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- CANELLAS, A.V.B. (2020). “*Pressões extremas atuantes nas proximidades das quinas dos degraus de vertedouros*”. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.
- DAI PRÁ, M. (2004). “*Características do Escoamento Sobre Vertedouros em Degraus de Declividade IV:1H*”. 134 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre - RS.

- ENDRES, L.A.M.; SCHUMACHER, A.; CANELLAS, A.V.B.; DA SILVA, F.A. (2019). “*Delimitação de vazões em função de pressões extremas sobre uma calha de vertedouro em degraus*”. XXXII Seminário Nacional de Grande Barragens. Salvador - BA.
- FAEL, C.; PINHEIRO, A. N. (2003). *Escoamentos em Quedas Sucessivas. Condições de Ocorrência e Energia Residual*. Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, v. 24, n.1, p. 39-50.
- GOMES, J. (2006). “*Campo de Pressões: Condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade $IV:0,75H$* ”. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.
- MATOS, J. S. G. (1999). “*Emulsioneamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus*”. Tese de Doutorado. Instituto Técnico Superior. Lisboa, Portugal.
- NOVAKOSKI, C. K.; et al. (2018). “*Extreme negative pressures and cavitation tendency on steeply sloping stepped spillways*”. III International Dam World Conference, Foz do Iguaçu - PR.
- OSMAR, F. M. (2016). “*Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade $IV:0,75H$* ”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.
- SANAGIOTTO, D.G. (2003). “*Características do escoamento sobre vertedouros em degraus com declividade $IV:0,75H$* ”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.
- SCHUMACHER, A. (2020). “*Identificação de regiões propícias a danos por cavitação na calha de um vertedouro em degraus: aspectos hidráulicos e geométricos*”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.
- VIEIRA JR., L. P.; GONTIJO, M. C. (2011). “*Deterioração, proteção e reabilitação de barragens de concreto*”. Revista Concreto e Construções – IBRACON, São Paulo - SP.