

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ÍNDICE DE CAVITAÇÃO EM VERTEDOUROS DE CALHA LISA

Daniela Guzzon Sanagiotto¹; Aline Saupe Abreu²; Mauricio Dai Prá¹; Edgar Fernando Trierweiler Neto³; Luiz Augusto Magalhães Endres¹; Eder Daniel Teixeira¹ & Marcelo Giulian Marques¹

Abstract: Spillways are essential structures for the safety of dams. The surfaces of spillways are susceptible to damage from the occurrence of cavitation due to the high velocities that the flow can reach. The cavitation index has been a good indicator to evaluate the potential occurrence of cavitation in hydraulic structures. In this work, results of the cavitation index and the characterization of the flow for the spillways of Furnas HPP and Luiz Carlos Barreto de Carvalho HPP are presented. Computational fluid dynamics were used to characterize the flow. Throughout the evaluations, a sensitivity analysis was performed for the discharges and for the roughness of the spillway surface. The results indicate that, for the simulated scenarios and for the limit criteria considered, the flow has no potential for the occurrence of cavitation damage.

Keywords: cavitation, computational fluid dynamics, spillways.

Resumo: Os vertedouros são estruturas essenciais para a segurança das barragens. As superfícies das calhas vertedouras são suscetíveis a danos pela ocorrência de cavitação devido às elevadas velocidades que o escoamento pode alcançar. O índice de cavitação tem sido um bom indicador para avaliar o potencial de ocorrência da cavitação em estruturas hidráulicas. Neste trabalho são apresentados resultados do índice de cavitação e da caracterização do escoamento para os vertedouros das barragens da UHE Furnas e da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho. Foram utilizados recursos de fluidodinâmica computacional para a caracterização do escoamento. Ao longo das avaliações foi realizada a análise de sensibilidade para as vazões e para a rugosidade da calha. Os resultados indicam que, para os cenários simulados e para os critérios limites considerados, o escoamento não tem potencial para a ocorrência de danos por cavitação.

Palavras-Chave: cavitação, fluidodinâmica computacional, descarregadores de cheias.

INTRODUÇÃO

Os vertedouros são estruturas essenciais para a segurança das barragens, pois são responsáveis pela liberação das vazões excedentes que não são armazenadas ou turbinadas. É muito frequente nestas estruturas a ocorrência de elevadas velocidades associadas a regiões de baixa pressão. A presença de irregularidades na superfície de concreto favorece a ocorrência de baixas pressões.

1) Professor pesquisador do Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre. Fone: (51) 3308-7930 – dsanagiotto@ufrgs.br, mauricio.daipra@ufrgs.br, endres@ufrgs.br, eder.teixeira@ufrgs.br, mmarques@iph.ufrgs.br

2) Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - IPH – UFRGS, alsaupe@gmail.com

3) Doutor Engenheiro Civil - Furnas Centrais Elétricas, edtrier@fumas.com.br

Pressões que sejam iguais ou inferiores a pressão de vapor são responsáveis pela vaporização do líquido e a ocorrência do fenômeno da cavitação. Quando as pressões se mantêm próximas da pressão de vapor, o vapor se acumula em cavidades que podem explodir quando atingirem um diâmetro crítico. Geralmente, o escoamento em vertedouros está associado a altas velocidades e a cavidade formada pela vaporização do líquido, na região de baixa pressão, tende a colapsar rapidamente quando se desloca para as zonas de alta pressão. Nestes casos ocorre a implosão das bolhas de vapor, resultando em um choque intenso e quando esse fenômeno ocorre próximo à superfície de concreto do vertedouro podem causar danos graves, como o desgaste do material.

O índice de cavitação tem sido um bom indicador para avaliar o potencial de ocorrência da cavitação em estruturas hidráulicas. O índice de cavitação crítico (Eq. 1) pode ser calculado por

$$\sigma_c = \frac{P_0 - P_v}{\rho \frac{V_0^2}{2}} \quad (1),$$

onde: σ_c é o índice de cavitação crítico, P_0 é a pressão absoluta no ponto em análise, P_v é a pressão de vapor da água, ρ é a massa específica da água e V_0 é a velocidade de referência. Em relação a velocidade utilizada para o cálculo do índice de cavitação, tem sido utilizada a velocidade média do escoamento (SAMADI-BOROUJENI et al., 2019). Valores inferiores ao índice de cavitação crítico indicam condições que causam danos na estrutura pela ocorrência do fenômeno da cavitação.

Para o caso de vertedouros de superfície lisa, Falvey (1990) indica a utilização do índice de cavitação crítico igual a 0,20. Esse valor foi obtido a partir de casos históricos de danos ocorridos nesse tipo de estrutura. No entanto, a presença de irregularidades na superfície do concreto favorecerá a ocorrência de pressões negativas e nestes casos são esperados valores mais elevados para o índice de cavitação crítico. Por exemplo, quando da presença de um degrau em uma calha lisa o índice de cavitação crítico recomendado é de 1,80 (FALVEY, 1990).

Neste trabalho, é investigado o índice de cavitação ao longo da calha de dois vertedouros a partir da caracterização do escoamento utilização fluidodinâmica computacional. São investigados os efeitos da rugosidade do concreto e das vazões na avaliação do índice de cavitação. As análises buscam verificar se danos (imperfeições na superfície) observados na calha dos vertedouros podem ter ocorrido por efeito de cavitação.

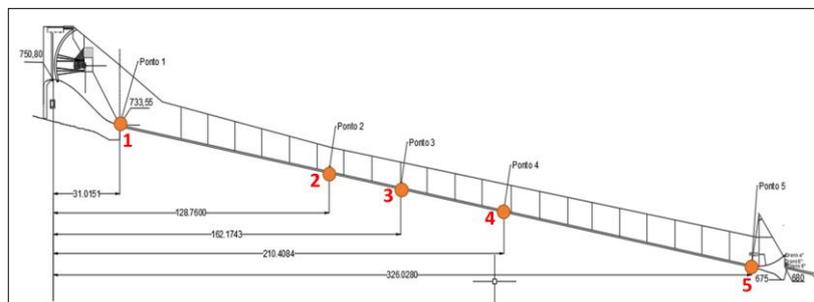
METODOLOGIA

Descrição dos vertedouros avaliados

As duas estruturas analisadas neste trabalho são vertedouros com salto esqui com comportas do tipo segmento. O vertedouro da UHE Furnas (Figura 1a) é composto por 7 vãos de 11,5 m de largura e vazão de projeto de 13.000 m³/s. O desnível entre a cota da crista do vertedouro e o ponto mais baixo da calha é de cerca de 70 m. O vertedouro da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho (Figura 1b) é composto por 6 vãos de 11,5 m de largura e vazão de projeto de 13.000 m³/s. O desnível entre a cota da crista do vertedouro e o ponto mais baixo da calha é de cerca de 43 m.

Os pontos indicados na Figura 1 são pontos selecionados para análise a partir da inspeção dos vertedouros onde se mapearam regiões com danos na superfície da calha.

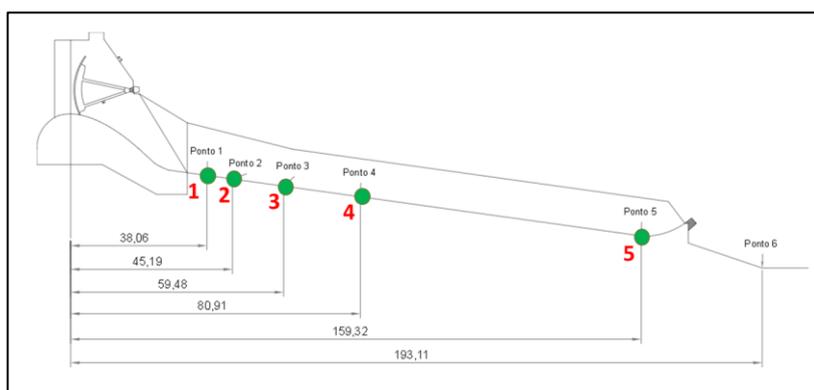
Figura 1 – Perfis dos vertedouros avaliados: a) UHE Furnas e b) UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho.



(a)

Coordenadas dos pontos para
UHE Furnas

Ponto	X (m)	Y (m)
1	31,02	733,55
2	128,76	715,94
3	162,17	709,92
4	210,41	701,23
5	326,03	680,40



(b)

Coordenadas dos pontos para
UHE LCBC

Ponto	X (m)	Y (m)
1	38,06	589
2	45,19	588
3	59,48	586
4	80,91	583
5	159,32	572
6	193,11	563

Simulação numérica do escoamento

Foram realizadas simulações tridimensionais do escoamento em regime permanente utilizando o software Ansys CFX, que utiliza o método dos volumes finitos para resolver as equações da continuidade e momentum (Ansys, 2013). A turbulência foi modelada a partir das equações da média de Reynolds para Navier-Stokes (RANS) em três dimensões, com o modelo de turbulência $k-\epsilon$, apresentado em Launder e Spalding (1974) e com histórico de aplicações em simulação numérica de escoamentos sobre vertedouros. As equações da continuidade e de momentum resolvidas pelo programa são, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (3),$$

onde: ρ é a massa específica; U representa a série temporal de velocidade, que pode ser decomposta em uma parcela média e uma parcela de flutuação, que é variável no tempo t ; μ é a viscosidade dinâmica; μ_t é a viscosidade turbulenta; p' é a pressão modificada ($p' = p + 2/3 \cdot \rho \cdot k$, com k igual a energia cinética da turbulência) e S_M é o somatório das forças gravitacionais (Ansys, 2013).

O modelo multifásico adotado foi o homogêneo, com modelo de superfície livre na interface. O modelo homogêneo corresponde ao método VOF (Volume of Fluid), proposto por Hirt e Nichols (1981). Neste método, as equações do escoamento são resolvidas, armazenando o volume das duas fases fluidas em cada célula computacional. Nas células, a soma das frações de volume de ar e água é igual a unidade.

Para a discretização do domínio geométrico foram definidas malhas não estruturadas, tetraédricas. Foi utilizada a adaptação de malha na interface ar-água para melhorar a definição da superfície livre. A malha possui maior detalhamento na região da calha. Foram realizadas simulações prévias para avaliar a adequação da malha utilizada. Foram testadas malhas mais grosseiras, com volumes com dimensões variando entre 0,01 m e 0,80 m; malhas intermediárias com dimensões variando entre 0,005 m e 0,50 m e malhas mais refinadas com dimensões variando entre 0,001 m e 0,25 m.

O domínio da simulação incluiu o perfil do vertedouro, um trecho a montante representando o reservatório e um trecho a jusante. Para reduzir o custo computacional a simulação foi realizada para vertedouros de largura unitária. Como condições de contorno, foi utilizada uma condição de entrada de vazão mássica; uma condição de saída de pressão atmosférica; condições de parede (no-slip); condições de simetria nas partes laterais do domínio e; condições de abertura na parte superior. Foi realizada uma análise de sensibilidade para avaliar o efeito da rugosidade da superfície do vertedouro nas características do escoamento.

A validação do modelo foi realizada a partir da comparação dos níveis de montante e jusante do vertedouro obtidos nas simulações com os valores esperados (observados). Essa etapa não é apresentada neste artigo.

Condições simuladas e grandezas avaliadas

Foram realizadas simulações do escoamento para vazões vertidas durante a operação das usinas, com a respectiva abertura de comporta e para a vazão de dimensionamento do vertedouro. A tabela 1 apresenta vazões utilizados nas simulações para cada uma das estruturas. No total foram realizadas 17 simulações, além das simulações iniciais para avaliação da malha a ser utilizada.

Tabela 1 – Vazões máximas vertidas e vazão de projeto dos vertedouros das UHEs avaliadas

UHE	Vazão simulada (m ³ /s)	Abertura de comporta (m)	Rugosidade da superfície e (mm)	Observação
Furnas	2089,0	2,18	0, 1 e 2	Vazão vertida
Furnas	1671,2 (2089 – 20%) 1880,1 (2089 – 10%) 2297,9 (2089 + 10%) 2402,35 (2089 + 15%) 2506,8 (2089 + 20%)	2,18	1	Vazões para a análise de sensibilidade
Furnas	3800,0	3,80	1	Vazão vertida
Furnas	3040,0 (3800 – 20%) 3230,0 (3800 – 15%) 4370,0 (3800 + 15%) 4560,0 (3800 + 20%)	3,80	1	Vazões para a análise de sensibilidade
Furnas	13000,0	Comporta completamente aberta	1	Vazão de projeto
Luiz Carlos Barreto Carvalho	2586,0	3,40	0, 1 e 2	Vazão vertida

Em uma análise de sensibilidade para a vazão vertente, a vazão foi alterada em relação ao valor de referência em diferentes proporções (-20%, -15%, -10%, -5%, +5%, +10%, +15%, +20%), conforme apresentado na Tabela 1. Essa análise foi restrita às simulações para o vertedouro da UHE

Furnas. Esta análise foi motivada pela incerteza que muitas vezes está associada à quantificação da vazão vertida.

As grandezas avaliadas nas simulações foram pressão e velocidade na superfície da calha, velocidade média em seção transversal, profundidade do escoamento e tensão cisalhante no fundo da calha. Estas grandezas foram obtidas para posições definidas em visitas realizadas às calhas dos vertedouros das barragens. Estes pontos definidos em campo geralmente indicam alguma imperfeição observada na superfície do concreto da calha (IPH, UFRGS, 2020) que tornam a região mais suscetível a ocorrência de cavitação.

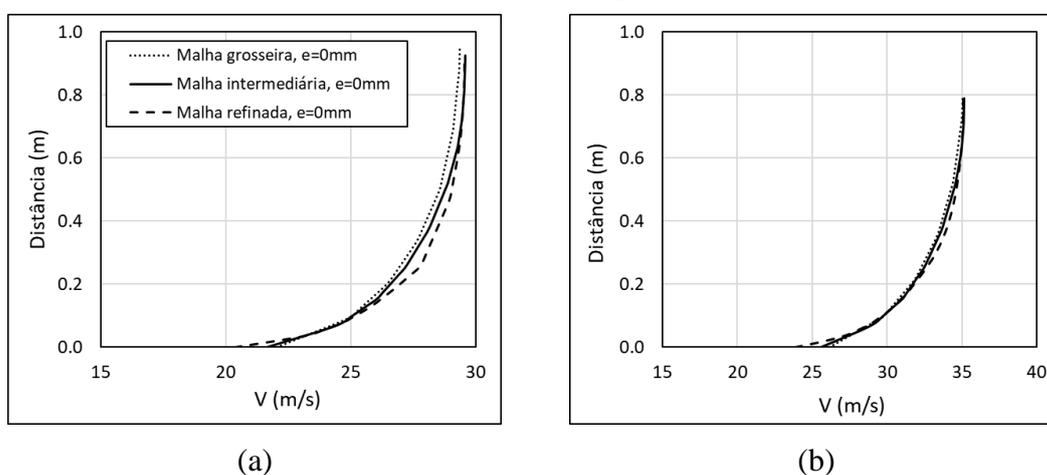
RESULTADOS

Na sequência são apresentados os resultados obtidos para verificar a influência das malhas nos resultados; os resultados relacionados ao efeito da rugosidade considerada para a superfície do concreto e; os resultados obtidos para as diferentes vazões de escoamento.

Avaliação da malha de cálculo

Foram testadas três malhas de cálculo para verificar a influência da malha nos resultados e para selecionar uma malha adequada para as demais simulações. A Figura 2 mostra resultados de perfis de velocidade do escoamento obtidos com simulações realizadas com três malhas diferentes: uma mais grosseira, uma intermediária e uma mais refinada.

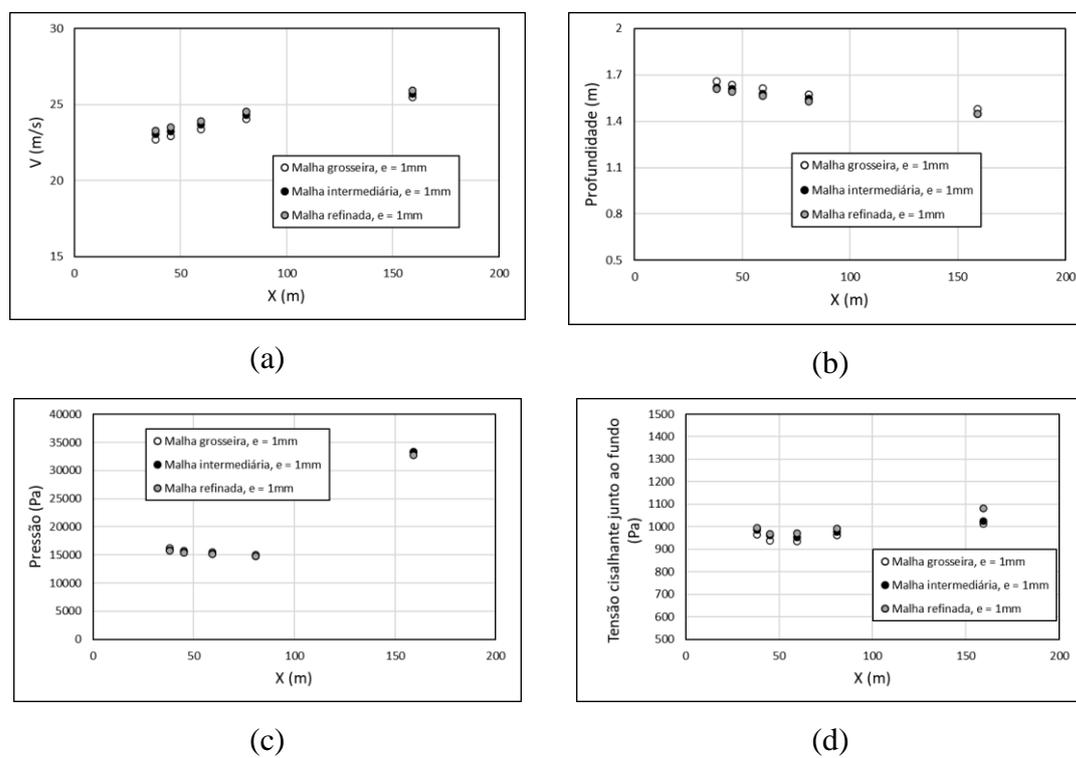
Figura 2 – Perfis de velocidade do escoamento para as posições a) 2 e b) 5 na UHE Furnas para a vazão de $2089\text{m}^3/\text{s}$, abertura de comporta 2,18 m, obtidos com a utilização de diferentes graus de refinamento da malha. As posições 2 e 5 estão indicadas na Figura 1a.



Além dos perfis de velocidade, outras grandezas foram avaliadas, como pressão, profundidade e tensão cisalhante junto ao fundo. A análise indica que as diferenças nos valores obtidos com as diferentes malhas testadas são muito pequenas. Na Figura 3 são apresentados resultados para algumas grandezas obtidas nas simulações do vertedouro da UHE LCBC utilizando malhas com diferentes graus de refinamento.

As avaliações de velocidade, profundidade, pressão e tensão cisalhante variam em média 2,2%, 2,8%, 2,4% e 3,9%, respectivamente, ao comparar os resultados obtidos com a malha grosseira e a malha refinada. Quando comparados os resultados obtidos com a malha intermediária e a malha refinada, as variações em média são 1,0%, 0,7%, 1,0% e 2,1%, respectivamente.

Figura 3 – a) Velocidades médias, b) Profundidade, c) Pressão e d) Tensão cisalhante junto ao fundo obtidos para o vertedouro da UHE LCBC para a vazão de 2586m³/s, abertura de comporta 3,4 m, com a utilização de diferentes graus de refinamento da malha. X medido a partir da crista do vertedouro, conforme Figura 1b.



Com base neste tipo de comportamento observado nas figuras 2 e 3, se optou por utilizar para as demais simulações a malha intermediária ou a malha mais grosseira por representarem menores custos computacionais e não comprometerem a qualidade dos resultados obtidos.

Avaliação da rugosidade da superfície da calha do vertedouro

Foi avaliada a influência da rugosidade considerada para a superfície do concreto nos resultados. Nas Figuras 4 e 5 são apresentados resultados obtidos em simulações onde foram assumidos diferentes valores para a rugosidade do concreto. O índice de cavitação foi calculado a partir da equação (1), considerando a velocidade de referência igual a velocidade média na seção transversal.

Figura 4 – a) Velocidade, b) Pressão e c) Índice de cavitação para o vertedouro da UHE Furnas para a vazão de 2089m³/s, abertura de comporta 2,18 m, obtidos com a utilização de diferentes rugosidades da superfície de concreto. X medido a partir da crista do vertedouro, conforme Figura 1a.

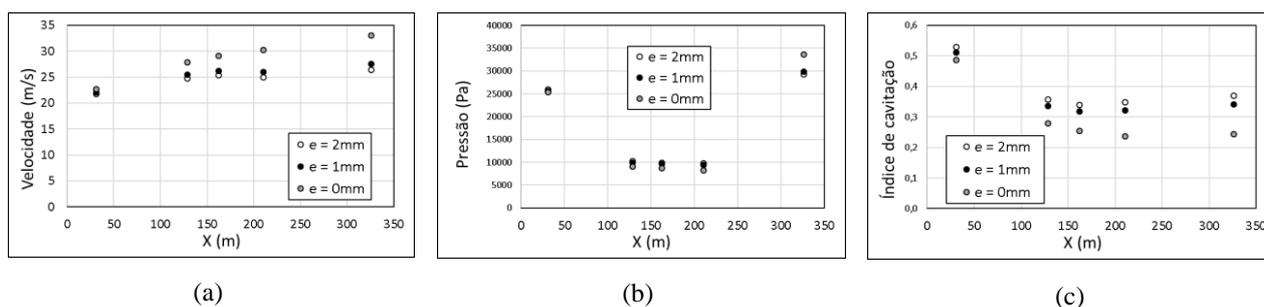
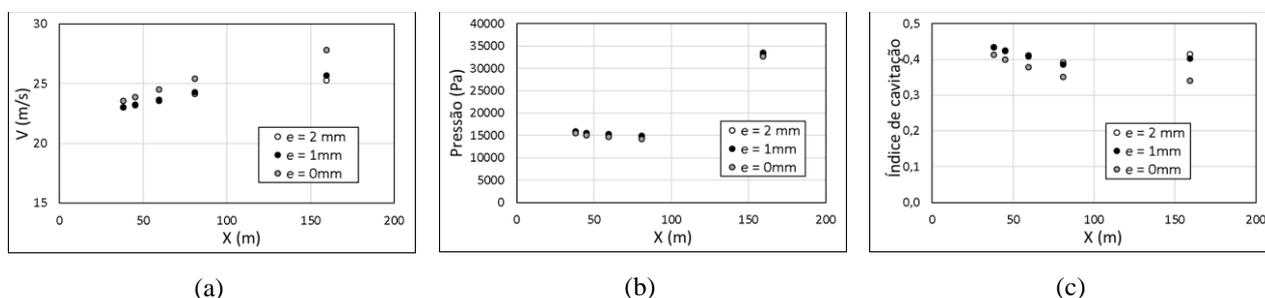


Figura 5 – a) Velocidade, b) Pressão e c) Índice de cavitação para o vertedouro da UHE LCBC para a vazão de $2586\text{m}^3/\text{s}$, abertura de comporta $3,4\text{ m}$, obtidos com a utilização de diferentes rugosidades da superfície de concreto. X medido a partir da crista do vertedouro, conforme Figura 1b.



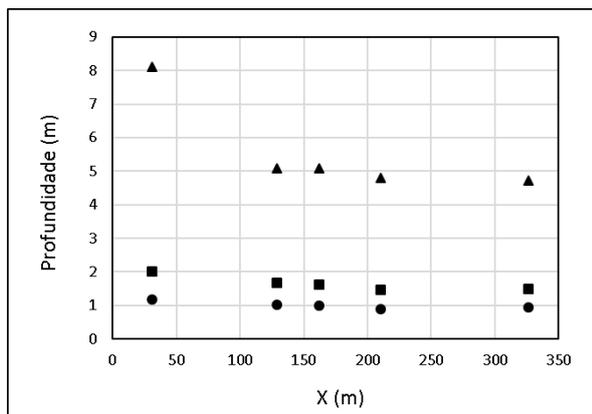
Nas Figuras 4 e 5 observa-se que a rugosidade da superfície de concreto interfere na estimativa dos índices de cavitação. Para as situações em que se desprezou a rugosidade da superfície ($e=0$), as velocidades médias em cada seção foram até 20% superiores às obtidas com a rugosidade de 1 mm para o vertedouro da UHE Furnas e até 8,4% superiores para o vertedouro da UHE LCBC. As pressões junto à calha dos vertedouros foram bem menos sensíveis a rugosidade da calha, sendo observadas, de forma geral, menores pressões para as menores rugosidades. Em relação ao índice de cavitação, como esperado, as superfícies com rugosidade nula apresentaram valores menores. Para o vertedouro da UHE Furnas, a rugosidade $e=1\text{ mm}$ resultou em índices de cavitação até 29% superiores aos obtidos com a rugosidade nula e para a rugosidade $e=2\text{ mm}$ o índice de cavitação foi até 34% superior. A mesma análise para a UHE LCBC resulta em índices de cavitação 18% e 22% superiores aos obtidos com a rugosidade nula. As maiores diferenças foram observadas nas posições mais distantes da crista do vertedouro, onde as velocidades são maiores.

Características do escoamento e Índice de cavitação

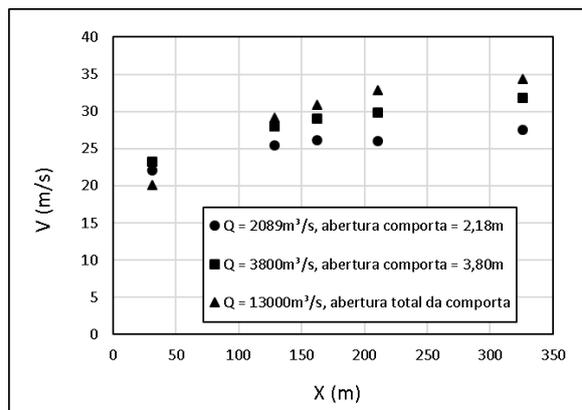
A Figura 6 apresenta características do escoamento ao longo da calha do vertedouro da UHE Furnas para três descargas diferentes: a vazão de projeto ($13000\text{m}^3/\text{s}$) e outras duas vazões que foram observadas em períodos de vertimento do descarregador ($2089\text{m}^3/\text{s}$ e $3800\text{m}^3/\text{s}$). Para a vazão de projeto tanto as velocidades quanto às pressões são superiores ao comportamento associado às vazões observadas. No entanto, comparando os resultados obtidos para a máxima vazão vertida e para a vazão de projeto, tem-se que ao passo que a pressão é até 270% superior para as condições de projeto em relação à condição de máximo vertimento, a velocidade média é apenas até 8% superior para as condições de projeto. Isso explica que em relação ao índice de cavitação, a vazão de projeto não é mais severa do que os valores obtidos para as vazões vertidas, já que o aumento da pressão é bem mais expressivo do que o aumento da velocidade.

As Figuras 7 e 8 mostram uma análise de sensibilidade da vazão na avaliação das características do escoamento e índice de cavitação para o vertedouro da UHE Furnas. Nos dois casos se observa que as maiores descargas estão associadas às maiores velocidades e pressões e aos menores índices de cavitação.

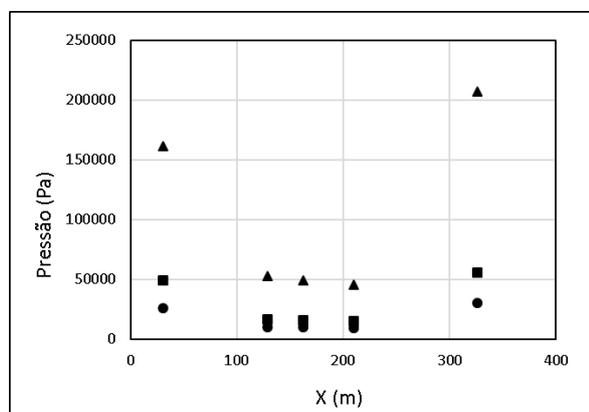
Figura 6 – a) Profundidade, b) Velocidade, c) Pressão e d) Índice de cavitação para o vertedouro da UHE Furnas para diferentes descargas. Os pontos 1 a 5 estão indicados na Figura 1a.



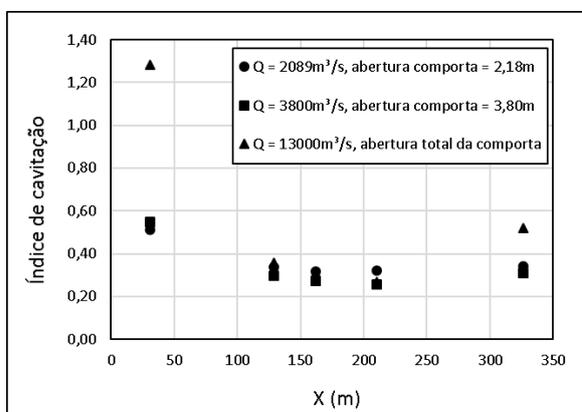
(a)



(b)

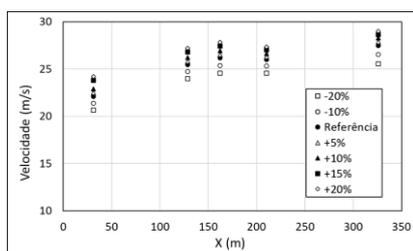


(c)

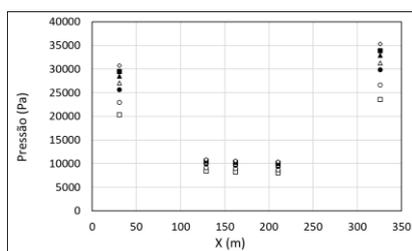


(d)

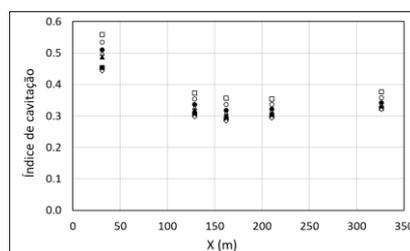
Figura 7 – a) Velocidade, b) Pressão e c) Índice de cavitação para o vertedouro da UHE Furnas para a vazão de referência 2089m³/s, abertura de comporta 2,18 m, e variações percentuais de vazão em relação a vazão de referência. Os pontos 1 a 5 estão indicados na Figura 1B.



(a)

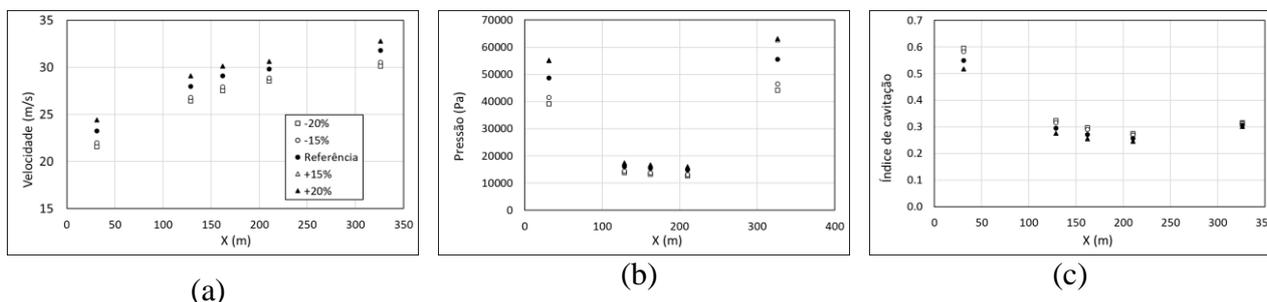


(b)



(c)

Figura 8 – a) Velocidade, b) Pressão e c) Índice de cavitação para o vertedouro da UHE Furnas para a vazão de referência 3800 m³/s, abertura de comporta 3,8 m, e variações percentuais de vazão em relação a vazão de referência. Os pontos 1 a 5 estão indicados na Figura 1B.



CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que a rugosidade da superfície de concreto interfere substancialmente na avaliação das velocidades médias do escoamento e nos valores do índice de cavitação. Comparando resultados das velocidades médias obtidas com rugosidade nula (calha lisa) e com rugosidade igual a 1 mm, para o vertedouro da UHE Furnas os valores são até 20% superiores para a calha lisa e para a UHE LCBC até 8,4% superiores. A mesma comparação considerando o índice de cavitação resultou em valores 29% inferiores para a calha lisa da UHE Furnas e 18% para a calha lisa da UHE LCBC. Estes resultados indicam que, para a avaliação do índice de cavitação, as análises considerando a calha lisa são mais conservadores, já que estes estão associados aos menores valores. No entanto, não foram investigados neste artigo o efeito de irregularidades e singularidades que podem estar presentes nas calhas dos vertedouros, como imperfeições localizadas e juntas de dilatação.

As maiores velocidades e menores índices de cavitação foram observados nas posições mais distantes da crista dos vertedouros para o vertedouro da UHE Furnas. Esse resultado era esperado, já que o vertedouro da UHE Furnas tem um maior desnível entre a crista e a saída em comparação com o vertedouro da UHE LCBC.

A análise dos resultados obtidos das simulações para o vertedouro da UHE Furnas, mostram que os menores índices de cavitação ocorreram para a máxima vazão vertida (3800 m³/s) e não para a vazão de projeto (13000 m³/s). Esse fato pode ser explicado pela comparação da proporção de aumento da pressão e da velocidade quando comparados valores obtidos para a máxima vazão vertida e a vazão de projeto: enquanto a pressão aumenta 270%, a velocidade aumenta apenas 8%.

A análise da sensibilidade da vazão mostrou que variações da vazão entre $\pm 20\%$ afetam pouco a avaliação do índice de cavitação.

Os resultados dos índices de cavitação em ambas as estruturas e para as diversas vazões e condições testadas indicam que não há riscos de ocorrência de danos por cavitação. Os mínimos valores encontrados para o índice de cavitação foram sempre superiores a 0,20. Ressalta-se que a calha vertedoura, em ambas as estruturas, foi modelada como uma superfície perfeita, sem irregularidades e singularidades e os resultados devem ser considerados apenas para essas condições. Análises complementares devem ser realizadas para avaliar o potencial de ocorrência de cavitação considerando irregularidades nas superfícies das calhas.

Os resultados encontrados indicam que simulações RANS podem ser utilizadas para a avaliação do escoamento em vertedouros com vistas a identificar regiões suscetíveis da ocorrência de cavitação através da valoração do índice de cavitação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LOH/IPH/UFRGS, à Foz do Chapecó Energia e à Eletrobrás-Furnas pelo apoio à pesquisa que está sendo desenvolvida de maneira cooperada com o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) no âmbito do programa de P&D ANEEL através do projeto de P&D Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas (P&D ANEEL N° 00394-1706/2017).

REFERÊNCIAS

- Ansys, C. F. X. (2013). “C.F.X. Ansys, Solver theory guide.” Release 15(November), 209.
- FALVEY, Henry T. (1990). *Cavitation in chutes and spillways*. Denver: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). *Volume of Fluid (VOF) methods for the dynamics of free boundaries*. Journal of Computational Physics, 39, 201–225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- IPH, UFRGS. (2020). “*Relatório de Produto: Etapa 2 – Análise Bibliográfica (R2.1) Versão 1/Parte 1*”. P&D ANEEL N° 00394-1706/2017.
- Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269–289.
- SAMADI-BOROUJENI et al. (2019). *Numerical and Physical Modeling of the Effect of Roughness Height on Cavitation Index in Chute Spillways*. International Journal of Civil Engineering, 19p. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00479-2>