

DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE CAVITAÇÃO AO LONGO DE UM VERTEDOIRO DE CALHA LISA ATRAVÉS DO SOFTWARE SPILLWAYPRO

Matheus Kunrath Oliveira¹; Fabiane Aquino da Silva²; Aline Saupe Abreu³; Carolina Kuhn Novakoski³; Rute Ferla³; Marcelo Giulian Marques⁴; Maurício Dai Prá⁵; Luiz Augusto Magalhães Endres⁵; Eder Daniela Teixeira⁵; Daniela Guzzon Sanagiotto⁵; Alba Valéria Brandão Canellas⁶; Edgar Fernando Trierweiler Neto⁶.

RESUMO

Vertedouros sofrem esforços hidrodinâmicos significativos devido ao fluxo de água em altas velocidades. Determinadas características do escoamento e da superfície do vertedouro favorecem a ocorrência da cavitação, sendo esta responsável por parte dos danos observados nestas estruturas. O presente artigo tem por objetivo determinar os índices de cavitação, ao longo da calha do vertedouro da usina hidrelétrica de Furnas, a partir do uso do software SpillwayPro. O vertedouro estudado consiste na estrutura presente na UHE Furnas, no qual foi realizada uma visita de inspeção em setembro de 2019, avaliando o estado do concreto e identificando danos superficiais, sendo estes escolhidos como seções de interesse. Para a obtenção dos índices de cavitação ao longo da calha foi utilizado o software SpillwayPro (USBR). As vazões simuladas no software foram a vazão média e três vazões máximas para períodos distintos da série histórica de vertimentos. Como resultados, identificou-se que na calha de regime rápido observou-se relação inversa entre o índice de cavitação e a vazão simulada. Os menores valores para o índice de cavitação ao longo da calha correspondem a, aproximadamente, 0,24, sendo obtidos para as maiores vazões e nas proximidades da concha de lançamento. Embora os valores obtidos para o índice de cavitação nas seções de interesse tenham sido superiores ao índice crítico indicado na bibliografia, os menores índices observados estiveram próximos ao índice crítico.

Palavras-Chave – Vertedouro, Cavitação, SpillwayPro.

INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção de obras hidráulicas em todo o mundo. Entretanto, quando empregado na estrutura de vertedouros, onde são submetidos a esforços hidrodinâmicos significativos, pode estar sujeito ao fenômeno da cavitação. A partir do fluxo de água em altas velocidades sobre a superfície de concreto, a estrutura pode vir a sofrer solicitações que propiciam a ocorrência de danos superficiais.

O fenômeno da cavitação consiste no surgimento de bolhas de vapor devido à diminuição das pressões atuantes até um valor crítico, sem que haja mudança de temperatura no fluido. Essas bolhas, ao implodirem próximas à superfície do concreto, tendem a ocasionar sua degradação, trazendo

1) Graduando do Curso de Engenharia Hídrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, email:matheuskunrath92@gmail.com;

2) Graduanda do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre /RS, e-mail: fabianeaquino7@gmail.com;

3) Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre /RS, e-mail: alsaupe@gmail.com; carolkn04@gmail.com; rufeterla@hotmail.com.

4) Docente Colaborador do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre /RS, e-mail: mmarques@iph.ufrgs.br;

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

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

possíveis prejuízos estruturais (FALVEY, 1990). A intensidade do dano depende de diversos fatores, tais como intensidade dos esforços hidrodinâmicos, das velocidades, do tempo de duração o qual a estrutura ficou exposta aos esforços hidrodinâmicos, do tipo e qualidade do acabamento (rugosidade e imperfeições da superfície) e da resistência do concreto.

A ocorrência de parte dos danos às superfícies de concreto pode ser vinculada ao fenômeno de cavitação nessas estruturas. Desta forma, o presente artigo tem por objetivo verificar os índices de cavitação que ocorreram ao longo da calha do vertedouro da usina hidrelétrica de Furnas, a partir do uso do software SpillwayPro, desenvolvido pelo Laboratory of Hydraulics do United States Bureau of Reclamation (USBR), Denver/EUA. O objetivo seria o de verificar em que condições ocorreram danos incipientes (leves) na superfície do concreto e comparar com os valores da literatura.

O material apresentado neste artigo encontra-se inserido no projeto de P&D “Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas”, financiado por Foz do Chapecó Energia, em parceria com Furnas Centrais Elétricas e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), através do Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH). Este projeto ainda conta com a colaboração do Laboratory of Hydraulic do United States Bureau of Reclamation (USBR).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Kormann et al. (2001), a cavitação se trata de um dos fenômenos mais complexos de se definir e estudar na hidráulica. Essa afirmação é facilmente justificável devido à elevada quantidade de parâmetros e características que influenciam sua ocorrência e, também, pela dificuldade de observá-lo em laboratório, em função da escala.

Em vertedouros de calha lisa, os principais fatores que favorecem à cavitação consistem na presença de impurezas na água e, principalmente, nas irregularidades na superfície de concreto associadas às velocidades naquele ponto. No caso de irregularidades na estrutura, estas ocasionam a projeção do escoamento sobre a superfície imediatamente a jusante, favorecendo a ocorrência de pressões negativas (sucção) na região e, conseqüentemente, de cavitação (FALVEY, 1990; KEMPKA, 2014; SCHUMACHER, 2020).

Ainda com relação às irregularidades que podem estar presentes nas superfícies hidráulicas de vertedouros e que elevam o risco de cavitação, Quintela e Ramos (1980) listaram algumas possibilidades, as quais são aqui apresentadas:

- Irregularidades superficiais como fissuras, rachaduras e outras patologias do concreto;
- Elementos estruturais como juntas de dilatação, blocos de queda e amortecimento, etc.;
- Uso de materiais inadequados no acabamento das superfícies de concreto.

Segundo Falvey (1990), o índice de cavitação (σ) pode ser utilizado para identificar as regiões propícias a ocorrência de cavitação. Esse índice pode ser calculado a partir da equação (1).

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\rho \frac{V_m^2}{2}} \quad (1)$$

Onde:

P_0 = Carga de pressão de referência (pressão local + pressão atmosférica) (m.c.a);

P_v = Carga de pressão de vapor da água (m.c.a);

ρ = Massa específica da água (kg/m³);

V_m = Velocidade de referência (m/s).

Com a obtenção do índice de cavitação deve-se atentar que, quanto menor for seu valor, mais crítico pode se tornar o problema com a cavitação. Desta forma, visando proporcionar uma estimativa de previsão relacionada com as pressões e velocidades que favorecem este fenômeno, foram propostos valores de índices de cavitação críticos (σ_{cr}). Para superfícies de vertedouros de calha lisa, os valores correspondentes ao índice de cavitação crítico, são:

- $\sigma_{cr} \leq 0,20$ (BALL, 1959; ARNDT, 1977 e FALVEY, 1982);
- $\sigma_{cr} \leq 0,25$ para irregularidade (ranhuras, juntas, ...) na superfície (FALVEY, 1990).

METODOLOGIA

O vertedouro estudado consiste na estrutura presente na usina hidrelétrica (UHE) de Furnas (Figura 1), localizada entre os municípios de São José da Barra e São João Batista do Glória (Minas Gerais/Brasil).

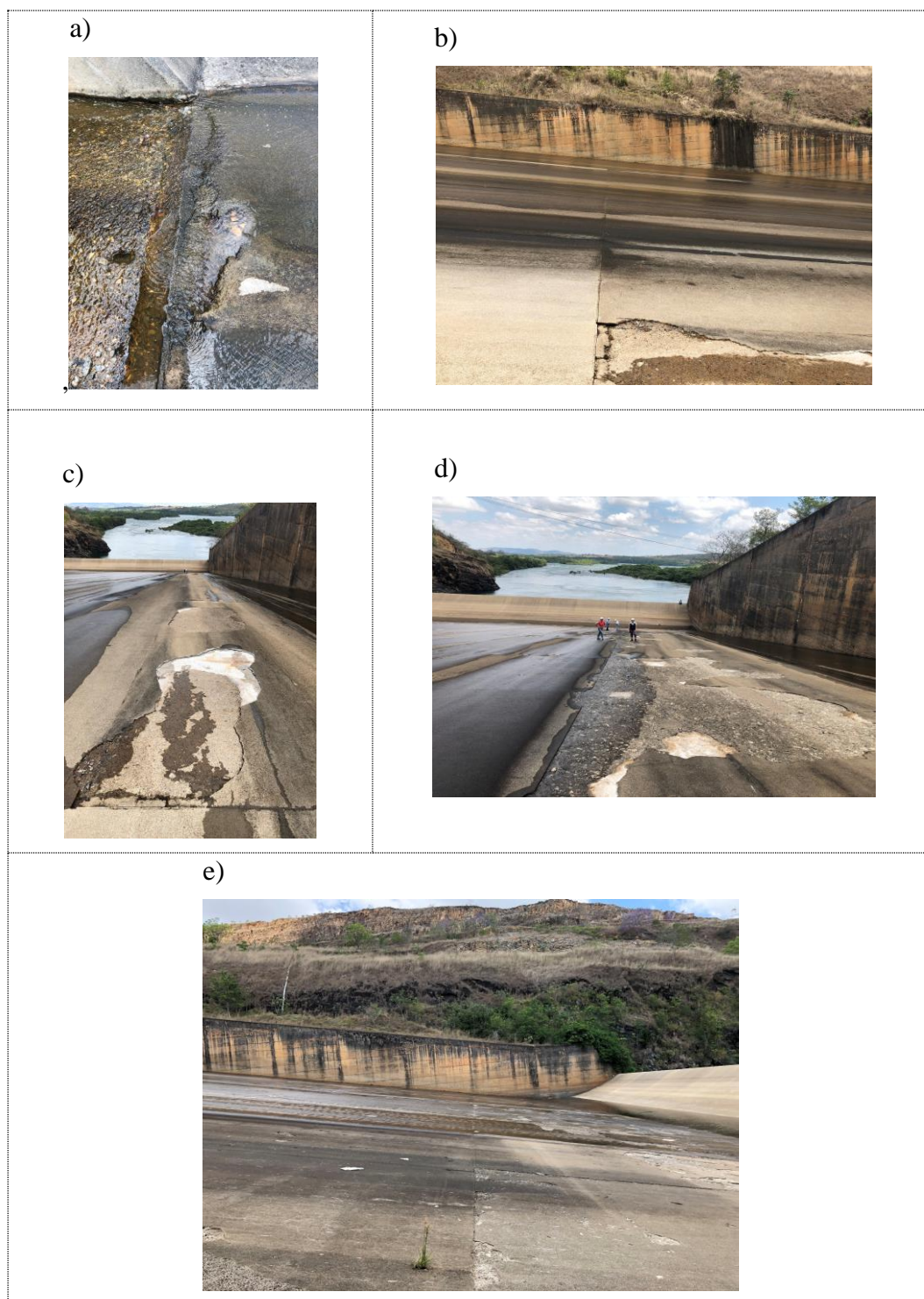
Figura 1 – Usina Hidrelétrica de Furnas. Disponível em:
https://www.revistafatorbrasil.com.br/imagens/fotos2/furnas_conquista. Acesso em: 29/05/2021.



Em setembro de 2019 foi realizada uma visita de inspeção no vertedouro da UHE Furnas, tendo como objetivo avaliar as condições do concreto utilizado na estrutura do vertedouro. Durante a visita, foram identificados alguns danos na camada superficial do concreto ao longo da calha que, embora não comprometam o empreendimento funcional e estrutural, podem vir a favorecer e ampliar os danos devido à ocorrência de cavitação. A Figura 2 ilustra os danos registrados na superfície de concreto do vertedouro, ordenados de montante para jusante.

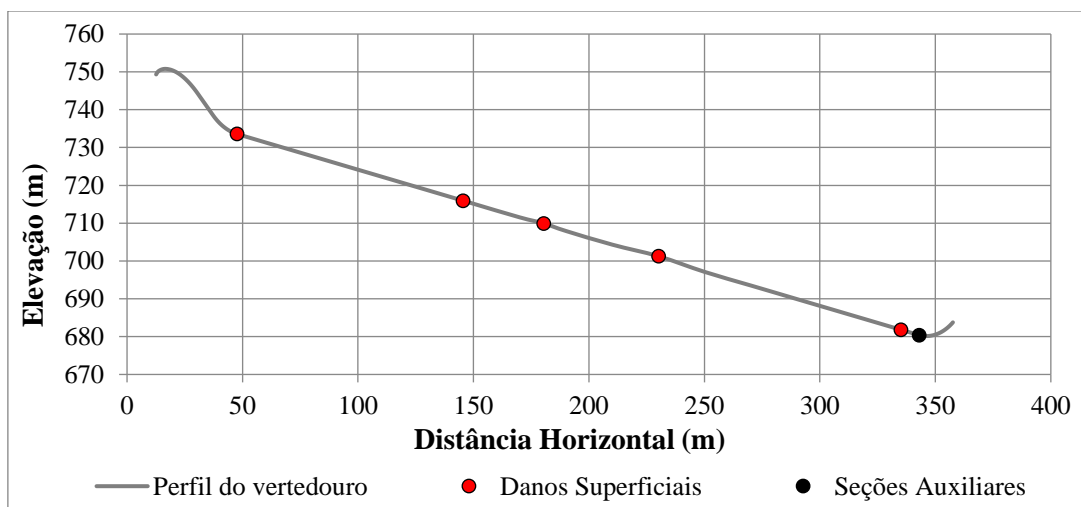
Figura 2 – Danos superficiais observados durante a visita técnica, ordenados de montante para jusante, sendo: a)

Primeiro dano; b) Segundo dano; c) Terceiro dano; d) Quarto dano e e) Quinto dano. Fonte: Autores.



A UHE Furnas possui um vertedouro do tipo salto esqui projetado para uma vazão máxima de 13.000 m³/s, ou 161,49 m³/s/m. Ao todo, durante a inspeção realizada, foram identificados cinco locais, ao longo da calha, que apresentaram danos superficiais no concreto. Desta forma, a análise realizada neste artigo visou o conhecimento dos índices de cavitação ao longo de toda a calha, principalmente nas seções onde os danos foram identificados. A Figura 3 apresenta uma esquematização do perfil do vertedouro estudado, bem como a localização aproximada dos danos superficiais observados e de seções auxiliares, inseridas para complementar a análise da última seção de interesse.

Figura 3 - Esquema do perfil longitudinal do vertedouro da UHE Furnas com a localização dos danos superficiais e seções auxiliares. Fonte: Autores.



Neste trabalho, para a obtenção das condições hidráulicas e determinação dos índices de cavitação, será utilizada a metodologia apresentada em Falvey (1990) e a planilha de cálculo SpillwayPro desenvolvida pelo Laboratory of Hydraulic do United States Bureau of Reclamation (USBR), que possui licença livre. Nas simulações realizadas, é adotada a simplificação de um fluxo unidimensional e, além dos índices de cavitação, torna-se possível a obtenção de inúmeros parâmetros hidráulicos, tais como altura da lâmina de água, velocidade, pressão, dentre outros. Para a determinação dos índices de cavitação, o SpillwayPro faz uso da equação (1).

Para o emprego do SpillwayPro e o posterior cumprimento dos objetivos propostos no estudo, foram utilizadas as características hidráulicas do vertedouro como parâmetros de entrada. O layout do programa aqui utilizado, adaptado para ser executado em planilha eletrônica, é dividido em abas de entrada de dados e abas com dados de saída dos parâmetros do escoamento. A Figura 4, apresentada a seguir, exibe o layout inicial do SpillwayPro, detalhando parte da aba *Input Geometry*, onde são inseridos os dados de entrada para obtenção dos índices de cavitação, bem como a disposição das demais abas supracitadas.

Figura 4 – Layout inicial do software SpillwayPro. Fonte: Autores.

INPUT - Spillway Geometry									
Highlight Input Cells	FURNAS					Compute Invert Curvatures	Compute Flow Profile & Cavitation Properties		
Clear Highlights						Show Section Help			
Discharge	Initial Depth	Initial Slope	Computation Direction	Units	Default Rugosity	Crest Station	Crest Elevation	Reservoir Elevation	
m³/s	m				m	m	m	m	
428.5714286	2.18377019	-0.0213592	DS	Metric	0.001	866.5975	750.8001	767.73	
Section	Station	Invert Elevation	Width, Diameter, or Invert Radius	Side Slope, Upper Fillet or Crown Radius	Height or Side Radius	Lower Radius or Height of Crown Radius	Pier Width or Height of Side Radius	Invert Curvature Radius	Rugosity
-	m	m	m	- or m	m	m	m	m	m
Rectangular	867.098	750.776	11.500					-627.3	0.001
Rectangular	867.598	750.751	11.500					-6.7	0.001
Rectangular	868.098	750.689	11.500					-232.7	0.001
Rectangular	868.598	750.625	11.500					-8.6	0.001
Rectangular	869.098	750.531	11.500					-18.7	0.001
Rectangular	869.598	750.423	11.500					-16.9	0.001
Rectangular	870.098	750.299	11.500					-16.5	0.001
Rectangular	870.598	750.158	11.500					-18.9	0.001
Rectangular	871.098	750.002	11.500					-18.1	0.001
Rectangular	871.598	749.830	11.500					-19.9	0.001
Rectangular	872.098	749.643	11.500					-20.9	0.001
Rectangular	872.598	749.441	11.500					-21.0	0.001
Rectangular	873.098	749.224	11.500					-22.3	0.001

Dentre os parâmetros de entrada fornecidos pelo SpillwayPro para as simulações encontram-se parâmetros hidráulicos, como a vazão do escoamento, e parâmetros estruturais do vertedouro, como todas as coordenadas “x” e “y” do perfil apresentado na Figura 3. Os dados de entrada utilizados estão expostos, a seguir, na Tabela 1.

Tabela 1 - Alguns dados de entrada no software SpillwayPro. Fonte: Autores.

Parâmetro	Valor	Unidade
Vazões (Q)	788,88; 2.089,00; 3.000,00 e 3.800,00	(m ³ /s)
Vazões específicas (q)	9,80; 25,95; 37,26 e 47,21	(m ³ /s/m)
Cota da crista	750,80	(m)
Posição “x” da crista	16,60	(m)
Cota do nível normal	768,00	(m)
Largura do vão	11,50	(m)
Nº de vãos	7	(unid.)
Declividade inicial	-0,0214	(m/m)
Rugosidade	0,001	(m)
Idade da Obra	56	anos
Número de dias de vertimento	25	dias

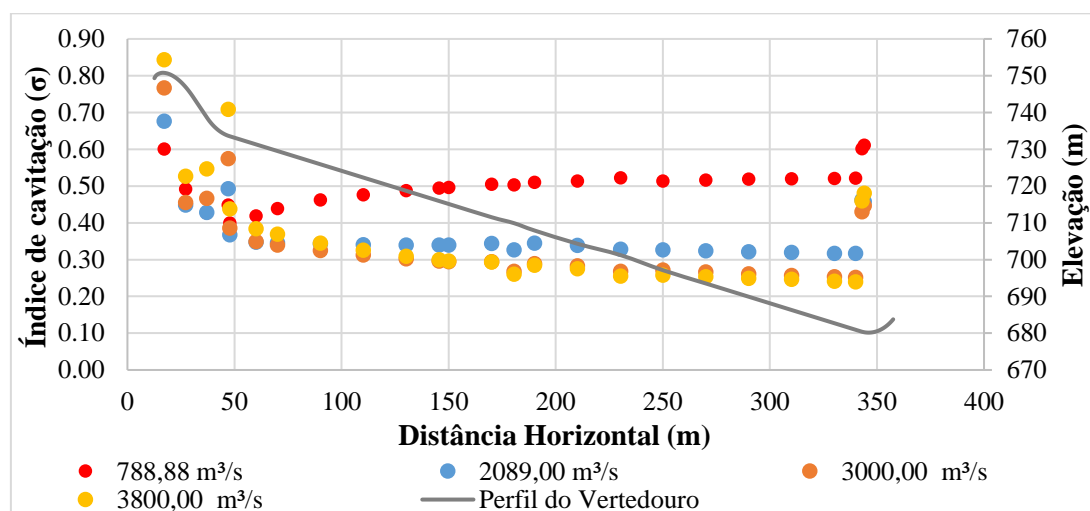
Além dos parâmetros já mencionados, o software faz uso dos parâmetros de profundidade inicial, dependente da vazão do escoamento e do raio de curvatura invertido (1/raio de curvatura) para cada seção transversal. Em relação às vazões analisadas, optou-se pela utilização da vazão média (788,88 m³/s), da vazão máxima vertida (3.800,00 m³/s), da máxima horária vertida (2089,00 m³/s) e da vazão máxima ocorrida entre os anos de 2001 e 2019 (3.000,00 m³/s).

Nas seções onde foram identificados danos superficiais ocorrem velocidades na faixa entre 18 e 22 m/s, 24 e 25 m/s, 24 e 28 m/s e 24 e 29, para as vazões de 788,88; 2089,00; 3000,00 e 3800,00 m³/s, respectivamente.

RESULTADOS

Com a realização das simulações de escoamento para cada vazão analisada, tornou-se possível a obtenção dos índices de cavitação para diferentes seções ao longo da calha do vertedouro. Os resultados obtidos são apresentados, a seguir, na Figura 5. Visando o melhor entendimento referente à posição longitudinal de cada seção analisada, o perfil do vertedouro é apresentado juntamente aos índices de cavitação com o objetivo de demonstrar as posições verificadas na estrutura.

Figura 5 – Índices de cavitação ao longo da calha do vertedouro. Fonte: Autores.

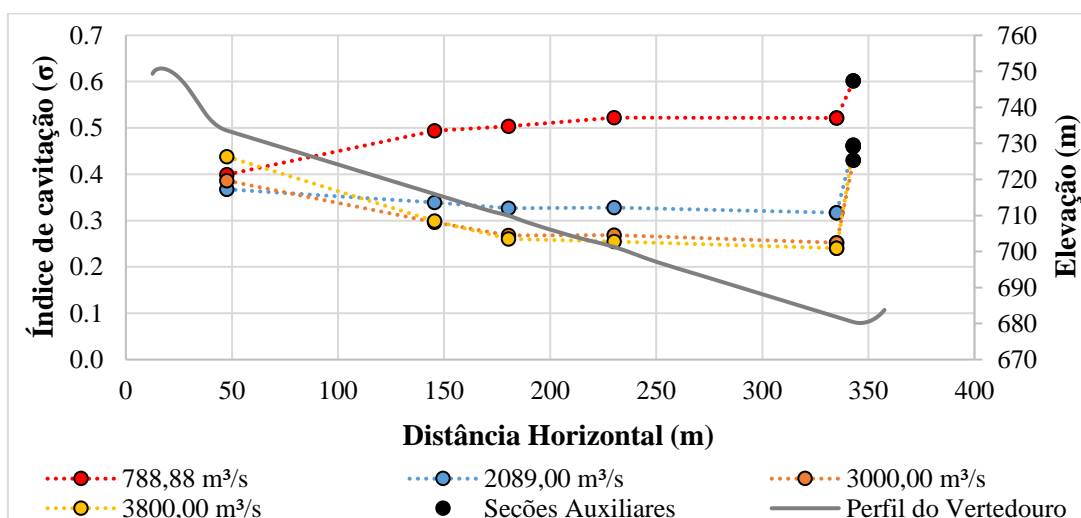


Através do gráfico da Figura 5 pode-se analisar o desenvolvimento dos índices de cavitação definidos ao longo da estrutura, para diferentes vazões. Observa-se que com o aumento da vazão, os índices tendem a diminuir quando considerada uma mesma posição da estrutura. A menor vazão específica verificada ($q = 9,80 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$) apresenta um comportamento diferente das demais vazões principalmente no trecho correspondido pelo canal de regime rápido do vertedouro. A partir da posição de $\approx 60 \text{ m}$, o índice de cavitação para essa vazão aumenta, vindo a se estabilizar na posição de $\approx 150 \text{ m}$ ($\sigma \approx 0,50$). Para a vazão de $2.089,00 \text{ m}^3/\text{s}$ ($q = 25,95 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$), também, a partir da mesma posição, $\approx 60 \text{ m}$, os índices de cavitação tendem a se estabilizar em $\sigma \approx 0,32$. Para as demais vazões específicas de $37,26$ e $47,21 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, o índice tende a diminuir assintoticamente para um valor de $\sigma \approx 0,24$ para todas as seções transversais compreendidas entre as distâncias horizontais de 50 a 340 m , anteriores a entrada da concha de lançamento.

Conforme pode ser observado, na concha de lançamento do vertedouro os índices de cavitação apresentam um aumento abrupto dos valores. Isto se deve ao aumento da pressão devido a curvatura (côncava) da concha. Junto a ogiva do vertedouro, os resultados encontrados podem ser justificados pelas variações de declividade locais da estrutura (curvatura convexa) que ocasionam subpressões devido ao descolamento do escoamento junto a superfície de concreto.

A Figura 6 apresenta os índices de cavitação estimados pelo SpillwayPro para as 6 (seis) seções transversais onde foram registrados os danos superficiais do concreto ao longo da estrutura. Os danos constatados durante a inspeção da UHE caracterizam-se por irregularidades locais próximas as juntas e por zonas de exposição de agregados na região que antecede o salto esquí. Pode-se observar que a ordem de grandeza do índice de cavitação nas regiões onde ocorreram danos variou entre $0,30$ e $0,24$ para a vazão de $3.800,00 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo que a extensão dos danos é inversamente proporcional ao índice de cavitação. A região onde foram verificados os menores índices de cavitação situa-se antes da entrada da concha de lançamento, coincidindo com o local de maior velocidade e onde ocorreu a maior extensão de danos na estrutura. Outro aspecto a se considerar, é que os danos que ocorreram mais para montante, onde as velocidades são menores, situaram-se próximos às juntas de concretagem, que apresentam uma descontinuidade na superfície. O menor índice encontrado para as vazões vertidas nos 56 anos de existência e 25 dias de vertimento foi de $\approx 0,24$. Se comparados com os valores indicados por Falvey (1982 e 1990), observa-se que eles estão bem próximos dos valores sugeridos pela literatura ($0,20$ a $0,25$) para calhas lisas.

Figura 6 – Índices de cavitação nas seções onde foram identificados danos superficiais. Fonte: Autores.



CONCLUSÕES

Em conclusão, destaca-se que:

- O coeficiente de cavitação (σ) diminui com o aumento da vazão específica (q) à medida que avança para jusante da estrutura, até a entrada da concha de lançamento;
- Os menores coeficientes de cavitação ($\sigma \approx 0,24$) ocorreram para as vazões específicas de 37,26 e 47,21 m³/m, respectivamente;
- A região de menor coeficiente de cavitação (σ) se situa na região de maior velocidade;
- Alguns dos danos superficiais identificados situam-se nas proximidades de juntas de concretagem, que podem atuar como irregularidades na superfície do concreto (Quintela e Ramos, 1980). Os coeficientes de cavitação variaram entre 0,30 e 0,26, valores superiores aos indicados por Falvey em 1982 e 1990 (0,25 e 0,20).
- Embora os valores obtidos para o índice de cavitação nas seções com danos tenham sido superiores ao índice crítico indicado na bibliografia, os menores índices observados estiveram significativamente próximos ao índice crítico (σ_{cr}). Assim, torna-se importante o monitoramento dessas seções, bem como a continuidade dos estudos referentes ao índice de cavitação nestas regiões.

Visando a melhor compreensão dos resultados obtidos e, conseqüentemente, do fenômeno estudado, a continuidade das análises referentes aos índices de cavitação está sendo efetuada para o caso do sistema extravasor da UHE Furnas, bem como para outras usinas hidrelétricas de propriedade de Furnas Centrais Elétricas e Foz do Chapecó Energia. Objetiva-se com este trabalho analisar os índices de cavitação, onde ocorreram os eventuais danos, e desenvolver uma proposta de metodologia que vise estimar as condições as quais propiciem a ocorrência de danos por cavitação. Estudos paralelos a este estão sendo realizados para o entendimento completo do fenômeno nessas estruturas, considerando principalmente as características dos concretos empregados nos vertedouros de cada usinas, das velocidades máximas, etc.

REFERÊNCIAS

ARNDT, R. E. A. (1977) Discursion on “cavitation from surface irregularities in high velocity” ASCE Jnl of Hyd Div. April 1977,103(HY4) .

BALL, J. W. (1959) Hydraulic Characteristic of Gate Slots. ASCE Jnl Hyd Div. October 1959, 85(HY10).

FALVEY, H. T. (1982). Predicting Cavitation in Tunnell Spillways, Water Power an Dam Construction, August 1982.

FALVEY, H. T. (1990). Cavitation in Chutes and Spillways. Bureau of Reclamation Engineering Monograph, n. 42, Denver, EUA.

KEMPKA, M. (2014). Estimativa da Distribuição Longitudinal das Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre - RS.

KORMANN, A. C. et al. (2001). Processos erosivos em superfícies de concreto de barragens – Mecanismo e recuperação. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Fortaleza - CE. 11p.

QUINTELA, A. C., RAMOS, C. M. (1980). Protecção Contra a Erosão de Cavitação em Obras Hidráulicas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Ministério de Habilitação e Obras Públicas. Lisboa.

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. UFRGS, Porto Alegre – RS.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LOH/IPH/UFRGS, à Foz do Chapecó Energia e à Furnas Centrais Elétricas, pelo apoio à pesquisa e ao Laboratory of Hydraulic do United States Bureau of Reclamation (USBR) pela troca de informações sobre o assunto. Estendemos os agradecimentos ao apoio financeiro parcial da CAPES – Brasil e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).