

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO NA VIBRAÇÃO INDUZIDA PELO ESCOAMENTO DE ÁGUA EM UM DISPOSITIVO DE CAVITAÇÃO COM INJEÇÃO DE AR

Cássio Teixeira dos Santos¹; Aline Saupe Abreu²; Guilherme Santana Castiglio³; Mauricio Dai Prá⁴; Edgar Fernando Trierweiler Neto⁵; Eder Daniel Teixeira⁶; Marcelo Giulian Marques⁷; Daniela Guzzon Sanagiotto⁸; Luiz Augusto Magalhães Endres⁹

Abstract – The problem caused by cavitation occurs due to the formation of bubbles resulting from the reduction of pressure which, when they implode in another region where the pressure is greater than the vaporization pressure of the fluid, generate shock waves with the potential to cause significant damage to nearby materials. Injecting air into these flows reduces the potential for damage caused by the phenomenon. In this work, a “cavitation machine” built in the *Laboratório de Obras Hidráulicas* of the *Instituto de Pesquisas Hidráulicas / UFRGS* was used, where piezoelectric accelerometers were mounted on a surface used as flow contour, with the objective of analyzing the behavior of induced vibration on this device when subjected to the occurrence of cavitation. This procedure is being proposed as a tool for the qualitative evaluation of the effects of cavitation in order to compare the occurrence of the phenomenon, when different concentrations of air are injected in the flow of water. In comparison with results found in the literature, the evaluation of the effect of cavitation through machine vibrations proved to be valid, when compared, for example, to dynamic pressure fluctuations, with the advantage of the high frequency responses normally provided by accelerometers. It was possible to identify percentages of air injection in the flow of water with a significant effect of reducing vibration and the consequent reductions in the cavitation shock waves and, hypothetically, in the erosive potential on the investigated materials.

Key Words – cavitation; vibrations; accelerometer

Resumo – O problema causado pela cavitação surge através da formação de bolhas resultantes da redução de pressão que, ao implodirem em outra região onde a pressão seja maior do que a pressão de vaporização do fluido, geram ondas de choque com potencial para ocasionarem danos significativos a materiais próximos. A injeção de ar nesses escoamentos permite reduzir este potencial

-
- 1) Graduando em Engenharia de Energia (UFRGS); cassiosts1998@gmail.com
 - 2) Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); alsaupe@gmail.com
 - 3) Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); guilhermecastiglio@gmail.com
 - 4) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS; mauricio.daipra@ufrgs.br
 - 5) Doutor Engenheiro Civil – Eletrobrás/FURNAS; edtrier@furnas.com.br
 - 6) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS; eder.teixeira@ufrgs.br
 - 7) Professor Doutor IPH/UFRGS; mmarques@iph.ufrgs.br
 - 8) Professor Doutor DHH/IPH/UFRGS; dsanagiotto@ufrgs.br
 - 9) Professor Doutor DHH/IPH/UFRGS; endres@ufrgs.br

de danos causados pelo fenômeno. Neste trabalho foi utilizada uma “máquina de cavitação” construída no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas / UFRGS, onde foram montados acelerômetros piezoelétricos sobre uma superfície usada como contorno do escoamento, com o objetivo de analisar o comportamento de vibração induzida sobre este dispositivo quando submetido à ocorrência da cavitação em sua vizinhança. Este procedimento está sendo proposto como ferramenta de avaliação qualitativa dos efeitos da cavitação visando comparar as manifestações do fenômeno, quando empregadas diferentes concentrações de ar inserido no escoamento de água. Na comparação com resultados encontrados na bibliografia, a avaliação do efeito da cavitação através das vibrações da máquina demonstrou ser válido, quando comparado às flutuações de pressão dinâmica, com a vantagem das altas respostas em frequência normalmente fornecidas por acelerômetros. Foi possível identificar percentuais de injeção de ar no escoamento com significativo efeito de redução da vibração e as consequentes reduções nas ondas de choque da cavitação e, por hipótese, no potencial erosivo sobre materiais investigados.

Palavras-Chave – cavitação; vibrações; acelerômetro.

INTRODUÇÃO

O fenômeno da cavitação é comumente verificado em regiões que apresentam valores de pressões significativamente baixas, na faixa das pressões de vapor como, por exemplo, em escoamentos verificados nos componentes de barragens e vertedouros. Esses baixos valores de pressão, associados à cavitação, podem resultar na deterioração dos materiais em contato com o escoamento de alta velocidade, em especial, o concreto, favorecendo seu desgaste físico. O problema causado pela cavitação surge através da formação de bolhas, que estão sendo vaporizadas por conta da redução de pressão e do aumento da velocidade do escoamento, que se direcionarão para outra região, onde a pressão deverá ser maior do que a pressão mínima em que ocorre a vaporização do fluido (P_v). Nessa região, então, ocorrerá a implosão dessas bolhas que, quando colapsadas, geram ondas de choque fortes o suficiente para ocasionarem danos significativos ao material (HENDERSON, 2019).

A fim de reduzir o potencial de danos causados por este fenômeno, estudos realizados por Peterka (1953) mostraram que a injeção de ar em tubos Venturi proporciona benefícios ao concreto sob exposição a um fluxo de água. Neste estudo, foi constatado que a perda de massa por erosão com concentrações de ar em cerca de $C = 1\%$ era, aproximadamente, metade da que ocorre no caso sem injeção de ar para velocidades de até 30 m/s, tornando-se insignificantes os estragos com concentrações de ar acima de $C = 7,8\%$ com velocidades de até 45 m/s (MAY, R, 1987).

Na pesquisa em que este trabalho está inserido foi utilizada uma “máquina de cavitação” originalmente empregada para avaliar o impacto deste fenômeno sobre materiais como o concreto, por exemplo, onde é simulado o efeito de escoamentos de água podendo atingir valores de velocidades médias de até 30 m/s. Usando este equipamento, o Laboratório de Obras Hidráulicas da UFRGS já publicou investigações quanto ao efeito da cavitação sobre a perda de massa de blocos de concreto (DIEFENBACH, G., et al, 2021) e sobre o comportamento das pressões na superfície dos blocos com a parceria do Hydraulic Laboratory of United States Bureau of Reclamation” (USBR) - Denver / EUA (ABREU, A. S., 2022).

No presente trabalho, foram montados acelerômetros piezoelétricos com elevada resposta em frequência sobre uma superfície metálica rígida, usada como contorno do escoamento, com o objetivo de analisar o comportamento de vibração induzida sobre este dispositivo quando submetido à ocorrência da cavitação em sua vizinhança. Este procedimento está sendo proposto como ferramenta de avaliação qualitativa dos efeitos da cavitação sobre a superfície metálica visando comparar as diferentes manifestações do fenômeno, quando empregadas diferentes concentrações de ar inserido no escoamento de água. A avaliação dos efeitos da cavitação através de medições de acelerações induzidas é uma técnica usual e ainda atual em trabalhos semelhantes como, por exemplo, em válvulas

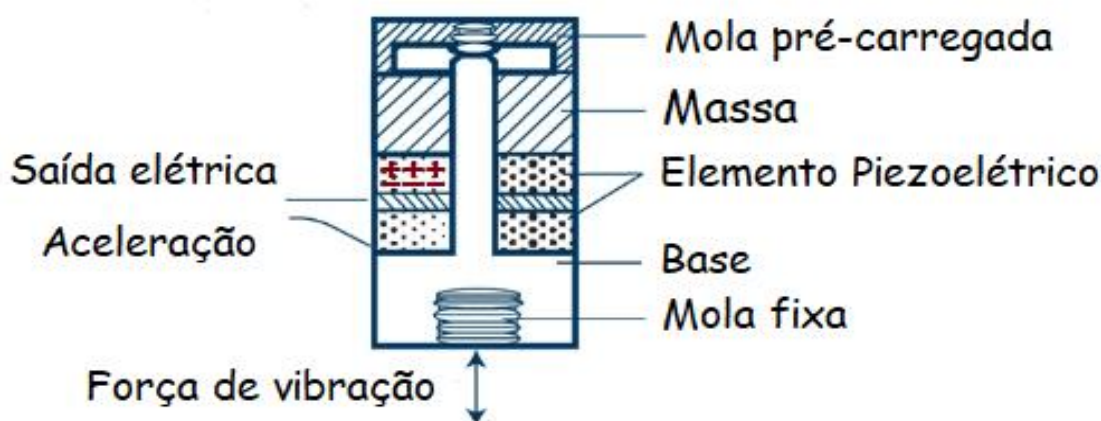
de controle e condutos forçados (KRISTIAN, A., 2021), bombas e turbinas hidráulicas (LAN, Y., et al, 2022 e VALENTÍN, D., et al, 2018).

MEDINDO A VIBRAÇÃO

Para medir vibração é necessário identificar a característica do fenômeno vibratório. Geralmente esse processo de medição envolve variáveis mecânicas (deslocamento, velocidade, aceleração ou força), que possuem equipamentos próprios para sua medição. No caso da aceleração, os sensores piezoelétricos são os mais comuns, visto que possuem alguns diferenciais como, por exemplo, a tolerância à temperatura, frequência de funcionamento, simplicidade no circuito de leitura, entre outras (AMIN et. al 2014).

Os acelerômetros, dependendo de sua aplicação, detectam as variações de velocidade no tempo em determinadas direções, dada uma excitação vibratória qualquer. Estes sensores podem medir a variação da velocidade em 3 direções espaciais. Seu princípio de funcionamento é baseado no efeito piezoelétrico, onde um sistema idealizado por massa-mola-amortecedor comprime um certo tipo de cristal, formando cargas de polaridades opostas em lados opostos do cristal, como mostrado na Figura 1 (SCHULER, 1997).

Figura 1 – Funcionamento de um acelerômetro piezoelétrico de compressão.



Estas cargas opostas serão transformadas em tensão elétrica proporcional de saída, associado a um fator de sensibilidade. Deste modo, os sinais elétricos serão emitidos e condicionados para permitir uma leitura adequada pelo equipamento de medição, registro ou análise (RIPPER, 2005).

Os acelerômetros podem ser classificados de acordo com a forma de saída do sinal em sensores analógicos e sensores digitais (PATSKO, 2006). A saída elétrica dos sensores analógicos, que é proporcional à aceleração sofrida pelo componente, deverá ser convertida em um sinal digital para análise computacional.

No processo de desenvolvimento de um sistema de medição de parâmetros físicos é necessário tratar os sinais dos sensores de modo a obter as informações requeridas dentro dos padrões esperados de precisão e exatidão (RAMOS, 2017). De acordo com Rodrigues (2010), a grandeza física de carga elétrica não é tão comum de se trabalhar; com isso faz-se necessário o uso de um circuito condicionador de sinais. Em geral, usa-se um amplificador de carga para converter a carga elétrica em um sinal de tensão elétrica e amplificar o sinal de saída.

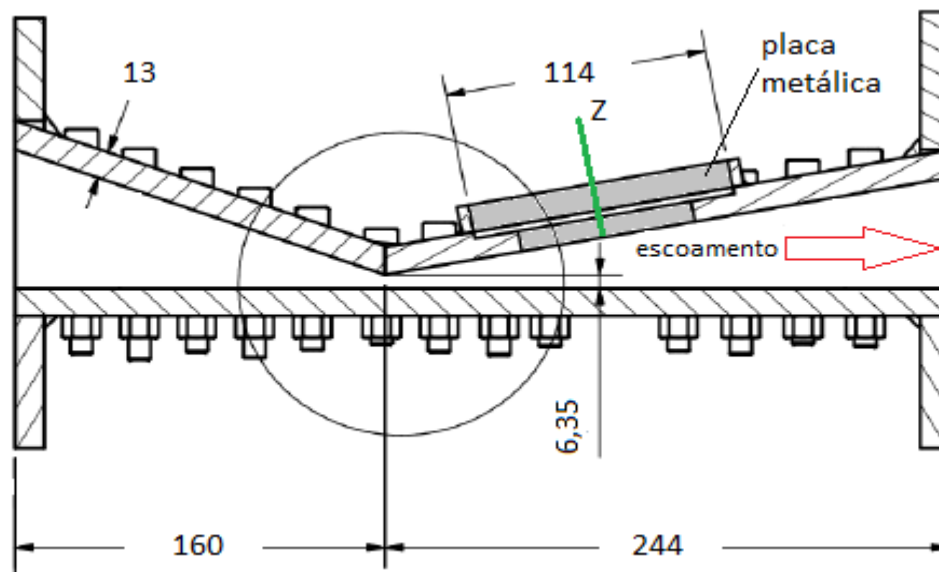
METODOLOGIA

Peterka (1953) escreveu sobre o efeito da entrada de ar em sistemas de cavitação, mostrando os benefícios da aeração através de testes laboratoriais e por meio de observações em diferentes tipos

de protótipos. A fim de continuar analisando as atividades erosivas em blocos de concreto, estudos realizados em Denver, Colorado (1953) propuseram a criação de uma nova máquina de cavitação que pudesse avaliar os efeitos causados por este fenômeno.

A estrutura adotada por este trabalho utiliza o mesmo princípio da que foi proposta pelos norte-americanos e está descrita em Dai Prá, M., et al, 2022, substituindo o bloco de concreto por uma placa metálica (aço inoxidável), conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Corte longitudinal da máquina de cavitação utilizada para estudo da cavitação (adaptada de ABREU, A. S., 2022 - medidas em mm e “z” indica a direção da aceleração medida).



O dispositivo está instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH), do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). O fluxo de água sofre uma redução de pressão ao atravessar a região com redução de áreas da seção transversal com a conseqüente elevação da velocidade média do escoamento. Desta forma, foi possível detectar e mensurar o efeito da cavitação sobre a placa metálica, utilizando dois acelerômetros de carga piezoelétricos unidirecionais do tipo-4393 da marca Brüel & Kjaer (Figura 3), que são posicionados em um suporte fixado acima da placa metálica. Cada acelerômetro indica a aceleração medida em uma direção. Neste trabalho, serão apresentados somente os resultados referentes à direção “z”, indicada na Figura 2, perpendicular à superfície molhada da placa metálica.

Juntamente com o acelerômetro, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Amplificador/condicionador da marca Brüel & Kjaer modelo NEXUS-2690 conectado ao acelerômetro;
- Conversor Analógico/Digital National Instruments modelo NI 9215; e
- Osciloscópio Tektronix modelo TDS-1012B;

A aquisição de dados com emprego do software LabView e o processamento dos dados medidos são realizados em computador.

Figura 3 – (a) acelerômetro piezoelétrico unidirecional NI-4393; (b) montagem do acelerômetro.



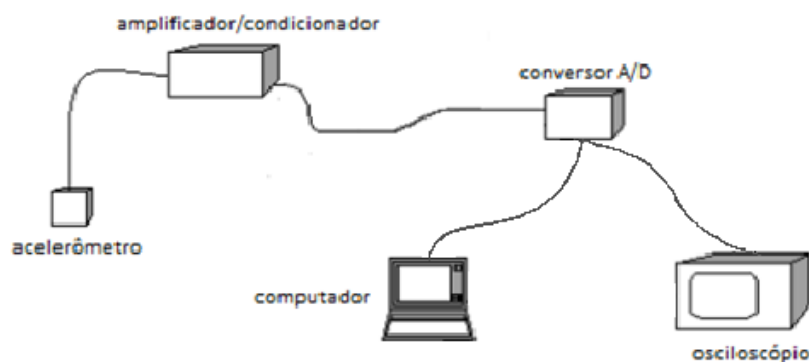
(a)



(b)

Na figura 4 é apresentada, de forma esquemática, como esses equipamentos estão conectados nos experimentos.

Figura 4 – Esquema de conexão dos equipamentos usados na medição e análise

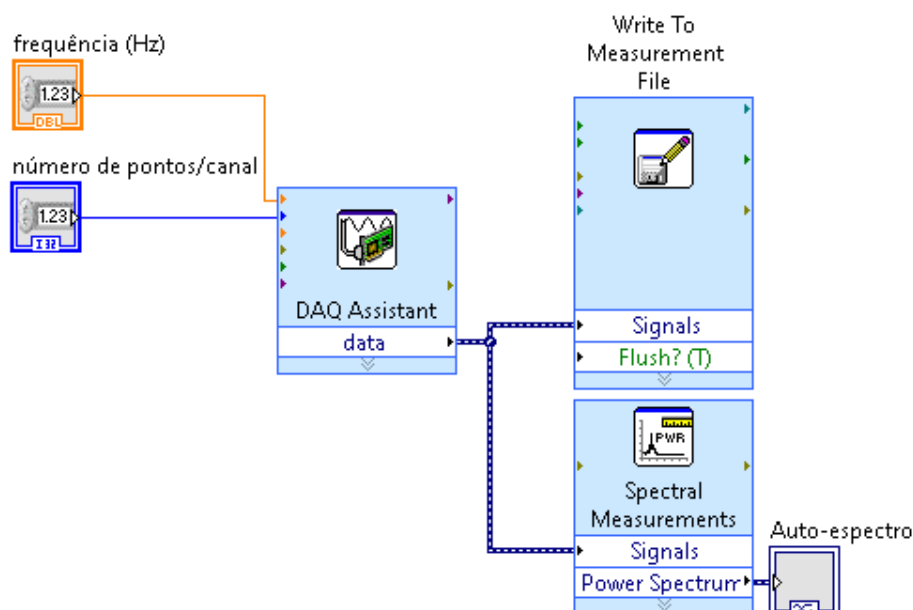


Os ensaios foram divididos de acordo com cada porcentagem de ar injetada no escoamento de água. Diferentemente dos estudos feitos por Peterka (1963), que utilizou porcentagens de ar entre 0,4% a 7,4% e, posteriormente, por Mortensen (2020), que trabalhou com 0%, 0,25%, 0,5%, 1% e 2% de ar inserido, neste trabalho foram utilizadas as seguintes porcentagens de ar em relação à vazão de água: 0,25%, 0,5%, 0,75%, 1%, 2%, 4%, 6% e 8%. Todos os ensaios foram realizados sob as mesmas condições ambientes e mesma velocidade média de fluxo, aproximadamente 30 m/s.

Cada ensaio teve um tempo de aquisição de dados de 3s a uma frequência de aquisição igual a 20 kHz, resultando um total de 60000 valores da aceleração em cada direção.

O software utilizado para aquisição de dados do acelerômetro e visualização preliminar foi o LABView. A figura 5 mostra o código simbólico utilizado na programação para aquisição e registro.

Figura 5 – Código simbólico utilizado na aquisição e registro de dados.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os resultados de vibração da máquina de cavitação, induzida por este efeito e conforme descrito anteriormente, a equipe de pesquisa do LOH/IPH/UFRGS procurou identificar diferentes modos e intensidades de ocorrência de ondas de choque, consequência da implosão de bolhas, causa do processo de erosão a que amostras de materiais estariam submetidas, quando montadas na seção de testes.

A pesquisa bibliográfica realizada mostrou ser bastante escassa quanto à utilização de acelerômetros em investigações de cavitação utilizando instalações semelhantes à deste trabalho. Buscando resultados análogos, visando comparação, estudos recentes realizados por Mortensen (2020) mostraram, empregando transdutores de pressão, resultados a respeito do fenômeno da cavitação em blocos de concreto. Segundo seu método de análise, foram colocados transdutores de pressão em diferentes localidades do objeto analisado. Na figura 6 é mostrado um resultado obtido por Mortensen (2020) do desvio padrão da pressão dinâmica em relação à percentagem de ar injetado no escoamento medido em posição análoga à que foi utilizada para a montagem do acelerômetro deste trabalho. É possível verificar que, conforme há um aumento da injeção de ar no escoamento, a variação da pressão em relação à média é reduzida.

Seguindo a forma de apresentação dos resultados de Mortensen (2020) foi construída uma relação semelhante ao do autor citado. A Tabela 1 e a Figura 7 mostram, respectivamente, resultados numéricos do desvio padrão da aceleração e o aspecto gráfico da relação proposta por este trabalho, utilizando os acelerômetros como sensores da vibração resultante das flutuações de pressão, considerando a injeção de ar no escoamento. Percebe-se semelhança com a tendência dos resultados nas figuras, ou seja, conforme há uma quantidade de ar maior no escoamento, a vibração transferida do escoamento para a máquina de cavitação será menor.

Figura 6 - Flutuação da pressão conforme a porcentagem de ar (adaptado de Mortensen, 2020).

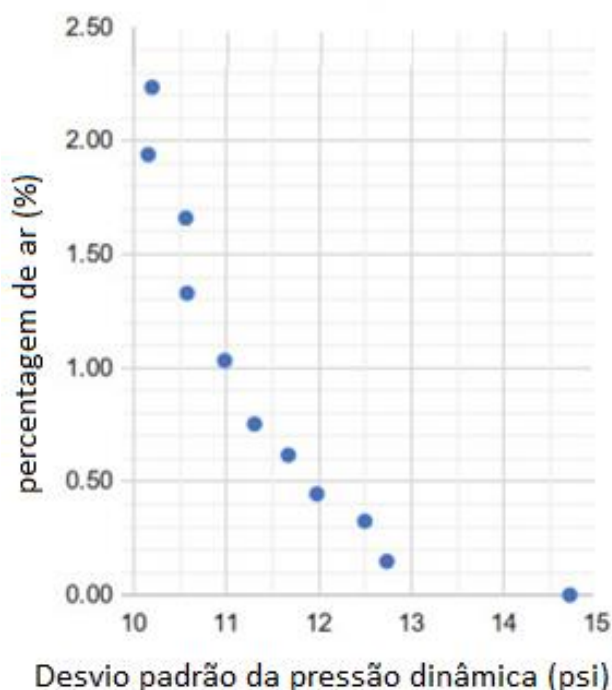
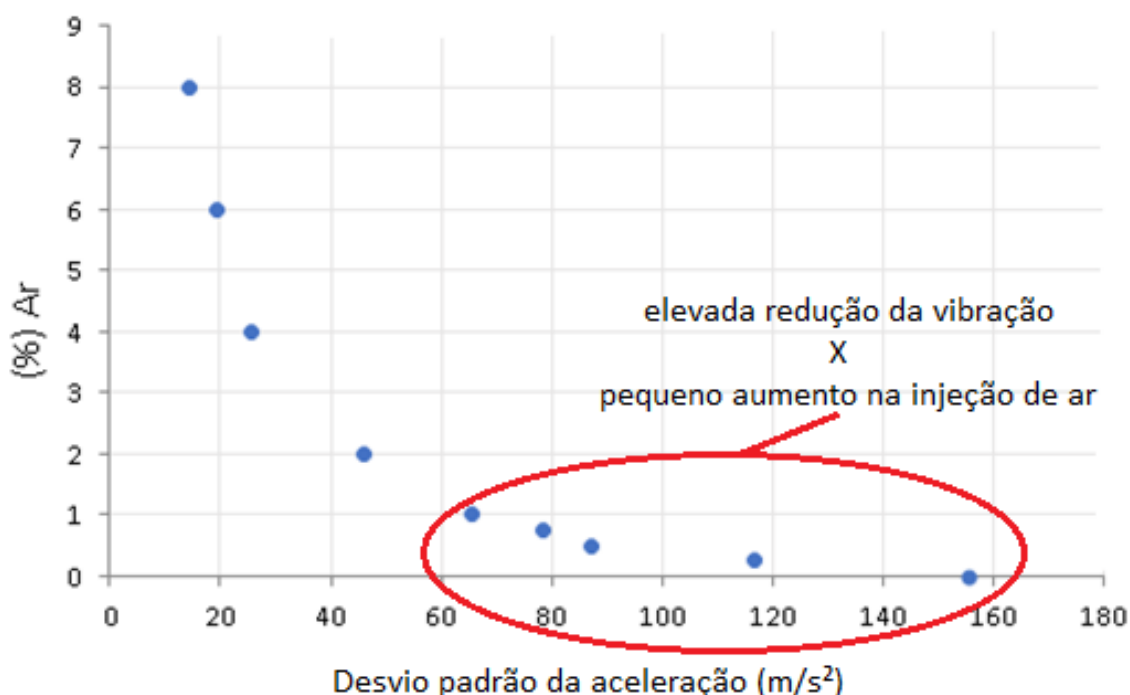


Tabela 1 – Resultados de desvio padrão da aceleração medida sobre a máquina de cavitação e reduções relativas, com diferentes percentuais de ar injetado no escoamento.

% ar	0,00%	0,25%	0,50%	0,75%	1,00%	2,00%	4,00%	6,00%	8,00%
Desvio padrão σ (m/s ²)	155,5	116,9	87,3	78,6	65,9	45,9	25,7	19,4	14,5
$(1-\sigma_{x\%} / \sigma_{0\%}) \cdot 100$ (%)	-	25	44	49	58	70	83	88	91

Conforme o esperado, o efeito da cavitação com a utilização da aeração diminuirá, apresentando uma região, indicada na figura 7, em que reduzidos incrementos na injeção de ar resultam em elevadas reduções na vibração da máquina e, conseqüentemente, reduções hipotéticas no efeito erosivo sobre materiais investigados. Conforme se verifica na Tabela 1, a redução no desvio padrão desde a situação sem injeção de ar até, apenas, 0,25% de ar, foi cerca de 25% e para 1% de injeção de ar a redução correspondente é de, aproximadamente, 58%.

Figura 7 – Desvio padrão da aceleração conforme a porcentagem de ar no escoamento.



CONCLUSÃO

Na continuidade da pesquisa, novos parâmetros estatísticos das acelerações estão sendo obtidos para caracterizar a ação da cavitação, na forma de vibrações, sobre a seção de testes da máquina e buscando relações com outros parâmetros do escoamento, tais como a pressão dinâmica, lançando mão da vantajosa resposta em altas frequências fornecida pelo acelerômetro em comparação com transdutores de pressão piezo-resistivos tradicionais.

Conforme a bibliografia, a avaliação dos efeitos da cavitação em bombas e válvulas através da medição de vibrações é um método usual, inclusive existem classificações referidas ao efeito principal ocorrendo no processo.

Na comparação com resultados encontrados na bibliografia, a avaliação do efeito da cavitação através das vibrações, realizada neste trabalho, mostrou-se válida.

Nesta primeira abordagem, foi possível identificar percentuais de injeção de ar no escoamento com significativo efeito de redução da vibração e as consequentes reduções nas vibrações provenientes das ondas de choque da cavitação e, por hipótese, do processo erosivo sobre materiais investigados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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. Ao CNPq pelo auxílio financeiro mediante concessão de bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. S. (2022). “*Fenômeno de cavitação em estruturas hidráulicas de concreto*”. Qualificação de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS.
- AMIN, S. et al. (2014). “*Preference and Placement of Vehicle Crash Sensors*”. Osijek, Sveučilište Josipa. pp. 23-25
- DAI PRÁ, M.; MARQUES, M. G.; TEIXEIRA, E. D.; ENDRES, L. A. M.; SANAGIOTTO, D. G.; ABREU, A. S.; BASSEGIO, P. G. M.; KIPPER, P. M.; TRIERWEILLER NETO, E. F.; CANELLAS, A. V. B. (2022). “*Implantação de dispositivo de cavitação em laboratório de hidráulica para estudo de superfícies de concreto*” in Anais do XXX Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Foz do Iguaçu, Nov. 2022.
- DIEFENBACH, G.; BASSEGIO, P. G. M.; ABREU, A. S.; NOVAKOSKI, C. K.; FERLA, R.; MARQUES, M. G.; DAI PRÁ, M.; TEIXEIRA, E. D.; MORTENSEN, J.; LUCERO, C.; CANELLAS, A. V. B. (2021). “*Análise de danos em superfícies de concreto através do dispositivo de cavitação do U.S. Bureau of Reclamation*” in Anais XXIX Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Cidade do México, Nov. 2021.
- HENDERSON, C.; SKAJA, A.; MORTENSEN, J. (2019). “*Evaluation of Field Repairable Materials and Techniques for Cavitation Damage*”. USBR, Denver. 39 p.
- KRISTIAN, A. (2022). “*Elimination of cavitation induced vibrations in orifice plates*”. Experimental and Computational Multiphase Flow v., pp. 310–317.
- LAN, Y.; LI, Z.; LIU, S.; HUANG, J.; NIU, L.; XIONG, X.; NIU, C.; WU, B.; ZHOU, X.; YAN, J.; AN, S.; LU, J. (2022). “*Experimental investigation on cavitation and cavitation detection of axial piston pump based on MLP-Mixer*”. Measurement 200, ELSEVIER.
- MAY, R. (1987). “*Cavitation in Hydraulic Structures: occurrence and prevention*”. Hydraulics Research. Wallingford, 236 p.
- MORTENSEN, J.; LUCERO, C.; BARTOJAY, K. (2020). “*Collaborative studies to reduce flow – induced damage on concrete hydraulic surfaces*”. Final Report No. ST-2020-1885-01, Hydraulic Laboratory Report HL-2020-05 – USBR.
- PATSKO, F. L. (2006) – *Tutorial Aplicações, funcionamento e utilização de sensores*. Maxwell Bohr Instrumentação Eletrônica. pp 2-3.
- PETERKA, J. A. (1953). “*The effect of entrained air on cavitation pitting*” in Minnesota International Hydraulic Convention. Minnesota, Set. 1953. pp. 5-12.
- RAMOS, J.D.P (2017). “*Desenvolvimento de um sistema multicanal para análise de pulsação de pressão em compressores alternativos visando a manutenção preditiva*”. Qualificação de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia. Salvador, Fev. 2017.

RIPPER, G.P. (2005) “*Padronização Primária em Metrologia de Vibração*”. Qualificação de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ.

RODRIGUES, J. R.; CAMPOS, A.N.; MATEUS, C.F.R.; SUTÉRIO, R. (2010) “*Identificação das principais componentes de incertezas de calibração de acelerômetro piezoelétrico pelo método da comparação: Uma revisão atual*” in Simposio Brasileiro de Engenharia Inercial, Rio de Janeiro – RJ, Out. 2010.

SCHULER, E. (1997) “*Equipamento de ensaio para acelerômetros piezoelétricos*”. Qualificação de Mestrado em Ciência dos Materiais ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Jan. 1997.

VALENTÍN, D.; PRESAS, A.; EGUSQUIZA, M.; VALERO, C.; EGUSQUIZA, E. (2018). “*Transmission of High Frequency Vibrations in Rotating Systems. Application to Cavitation Detection in Hydraulic Turbines*”. Applied Sciences 8(3), pp. 451.