

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES MÉDIAS DE ESCOAMENTOS COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE AR EM UM DISPOSITIVO DE CAVITAÇÃO TIPO VENTURI

Aline Saupe Abreu¹ ; Maurício Dai Prá² ; Guilherme Santanna Castiglio³ ; Luiz Augusto Magalhães Endres⁴ ; Eder Daniel Teixeira⁵ ; Marcelo Giulian Marques⁶ ; Daniela Guzzon Sanagiotto⁷ ; Carolina Kuhn Novakoski⁸ ; Pedro Guido Mottes Bassegio⁹ ; Edgar Fernando Trierweiler Neto¹⁰;

Resumo: A cavitação é um fenômeno de alta complexidade e que representa um problema em diversas obras hidráulicas pois implica na ocorrência de danos oriundos da implosão de bolhas de vapor geradas por uma redução brusca nas pressões e/ou aumento nas velocidades do escoamento. Para reduzir ou eliminar os danos por cavitação, pode-se inserir determinada concentração de ar no escoamento, próximo à região onde ocorrem os danos. O ar inserido funciona como um amortecimento para o jato gerado na implosão das bolhas. Alguns trabalhos também sugerem que a inserção de ar amplia as pressões desenvolvidas no escoamento. O presente trabalho visa a aquisição e análise de pressões obtidas por transdutores de pressão instalados em um dispositivo de cavitação tipo Venturi e a comparação desses resultados com os obtidos em um equipamento semelhante localizado no US Bureau of Reclamation. Concluiu-se que os resultados dos ensaios em ambos os dispositivos apresentaram mesma tendência, de aumento de pressões com o aumento da concentração de ar a partir da distância de 8,45cm da seção contraída das máquinas de cavitação avaliadas. De maneira geral, a inserção de ar favoreceu o aumento das pressões médias, incluindo as pressões médias negativas responsáveis pelo desenvolvimento da cavitação.

Palavras-Chave – Cavitação; Pressão Média; Escoamentos aerados

Abstract: Cavitation is a highly complex phenomenon that represents a problem in several hydraulic works, as it implies the occurrence of damages arising from the implosion of steam bubbles generated by a sudden reduction in pressures and/or increase in flow velocities. To reduce or eliminate cavitation

1) Doutoranda do Programa e Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: alsaupe@gmail.com

2) Professor Adjunto, Departamento de Obras Hidráulicas, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: mauricio.daipra@ufrgs.br

3) Doutorando do Programa e Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: guilhermecastiglio@gmail.com

4) Professor titular, Departamento de Hidromecânica e Hidrologia, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: endres@ufrgs.br

5) Professor Adjunto, Departamento de Obras Hidráulicas, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: eder.teixeira@ufrgs.br

6) Professor Doutor, Departamento de Obras Hidráulicas, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: mmarques@iph.ufrgs.br

7) Professora Adjunta, Departamento de Hidromecânica e Hidrologia, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: dsanagiotto@ufrgs.br

8) Professora Adjunta, Universidade Federal de Santa Maria, Rod. Taufik Germano, 3013, Cachoeira do Sul, Brasil. E-mail: carolkn04@gmail.com.

9) Mestrando do Programa e Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: pedroguido33@hotmail.com.

10) Engenheiro, Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil e Hidráulica, Eletrobras FURNAS, Estrada do Pau da Fome 819, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: edtrier@furnas.com.br

damage, a certain concentration of air can be inserted into the flow, close to the region where the damage occurs. The inserted air works as a damping for the jet generated in the implosion of the bubbles. Some works also suggest that the insertion of air amplifies the pressures developed in the flow. The present work aims at the acquisition and analysis of pressures obtained by pressure transducers installed in a Venturi type cavitation device and the comparison of these results with those obtained in a similar equipment located at the US Bureau of Reclamation. It was concluded that the results of the tests on both devices showed the same tendency, of increasing pressures with the increase in air concentration from a distance of 8.45 cm from the contracted section of the evaluated cavitation machines. In general, the insertion of air favored the increase in mean pressures, including negative mean pressures responsible for the development of cavitation.

Key-words: Cavitation; Mean Pressures; Aerated Flows

INTRODUÇÃO

O fenômeno da cavitação é bastante complexo, frequentemente encontrado em sistemas e máquinas hidráulicas operando com líquidos, bem como, em estruturas hidráulicas quando submetidas a altas velocidades e baixas pressões. Pela sua importância prática, têm sido objeto de diversos estudos de natureza teórica, numérica e principalmente experimental. Caracterizada como sendo o processo de formação e posterior implosão de bolhas de vapor, a partir de uma redução brusca e localizada da pressão, em temperatura ambiente, até a pressão de vaporização da água em um escoamento. A cavitação resulta de uma variação extrema de pressão em um trecho curto do sistema em que o escoamento ocorre, gerando vibrações e perturbações capazes de formar desgastes e erosões a componentes metálicos de turbo máquinas ou em superfícies hidráulicas de concreto de contato com o líquido durante sua ocorrência.

De acordo com Gal'perin (1971), as superfícies submetidas a escoamentos com velocidade superior a 20 m/s, são suscetíveis a ocorrência de regiões de vácuo, resultando no processo de cavitação e num alto dano ao concreto adjacente assim como nos equipamentos próximos a ele. Ocorrido o fenômeno da cavitação, se faz necessário estimar a possível extensão do dano e, em casos que tal dano não seja admissível, medidas devem ser tomadas para evitá-lo. Um dos métodos mais promissores para proteger elementos de estruturas hidráulicas contra cavitação é a aeração da camada limite (Gal'perin, 1971).

Dong e Su (2006) e Dong et al. (2007, 2008 e 2010) desenvolveram suas pesquisas através de um dispositivo tipo Venturi (Figura 1), similar ao utilizado por USBR (1963; 2020) e Peterka (1953), verificando o comportamento das pressões médias do escoamento sobre o efeito de diferentes concentrações de ar, durante a ação do fenômeno da cavitação, e os danos gerados em diferentes corpos de prova em concreto.

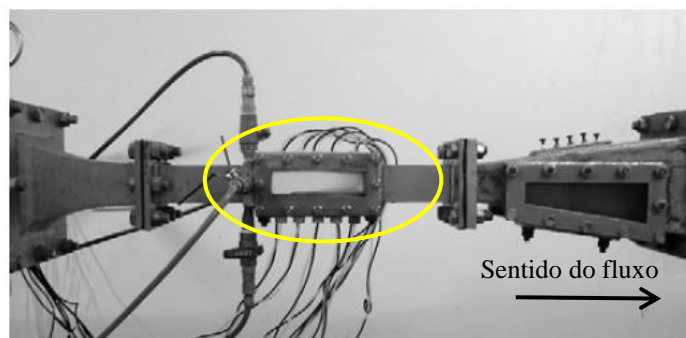


Figura 1: Aparato experimental utilizado por Dong e Su (2006) e Dong et al. (2007, 2008, 2010), em amarelo a indicação da seção de ensaio.

Dong (2008), investigou o comportamento das pressões médias ao longo da instalação experimental, na parte superior e inferior do dispositivo de cavitação. As pressões médias foram coletadas a partir de sensores de pressão para diferentes concentrações de ar. Na Figura 2 podemos

observar o aumento da variação das pressões médias através da inserção de ar no escoamento, reduzindo assim, a ocorrência de registros de pressões extremamente negativas no sistema, dificultando assim a incidência do fenômeno da cavitação e dos danos gerados as superfícies em contato com o escoamento.

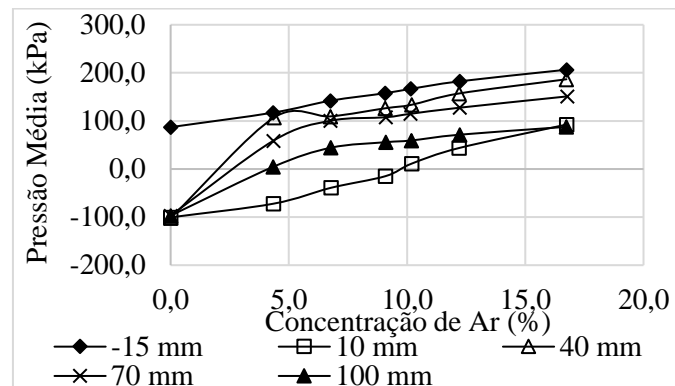


Figura 2: Variações entre as pressões médias coletadas na parte superior e superior no dispositivo de cavitação, considerando diferentes concentrações de ar no escoamento. Fonte: Dong (2008).

Com o objetivo de fomentar estudos relacionados a influência da aeração no fenômeno da cavitação, como ferramenta de redução de danos as superfícies de concreto, ao longo do presente trabalho foram realizados estudos do comportamento das pressões médias do escoamento em um dispositivo de cavitação considerando distintas concentrações de ar no sistema.

METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados na instalação experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas IPH-UFRGS, composta por um sistema de bombeamento de água, um dispositivo de cavitação e um sistema de inserção de ar. O sistema de bombeamento possui um conjunto motobomba de 100 cv de potência capaz de garantir vazão constante para o adequado funcionamento do sistema. O dispositivo de cavitação é construído em aço inox nas dimensões aproximadas de 200 mm de altura e 405mm de largura, possuindo uma seção de estrangulamento de 6,38 mm x 305,0 mm, neste ponto, são produzidas elevadas velocidades acarretando na ocorrência da cavitação. Utilizou-se um sistema composto por compressor e vaso de pressão para inserção de ar no escoamento, de forma que o ar se misture gradualmente com o fluxo de água na tubulação.

O dispositivo de cavitação possui uma abertura para o posicionamento dos sensores de pressão próximos a zona de formação do fenômeno da cavitação, ou seja, onde são concentradas as implosões das cavidades de vapor ocasionadas pela variação brusca de velocidade e pressão. A Figura 3(a e b) apresenta os dois posicionamentos utilizados para a coleta das pressões médias através dos sensores de pressão, dispostos na parte superior e inferior da máquina de cavitação, a uma distância de 84,5 e 113,2 mm da seção contraída da máquina de cavitação (Figura 3 c).

Os transdutores de pressão utilizados são da marca Keller modelo PP-21Y BR, e a frequência de aquisição considerada foi de 2.000Hz durante um tempo de aquisição de 10 minutos, todos instalados num orifício de ½" pol de diâmetro (Figura 3c).

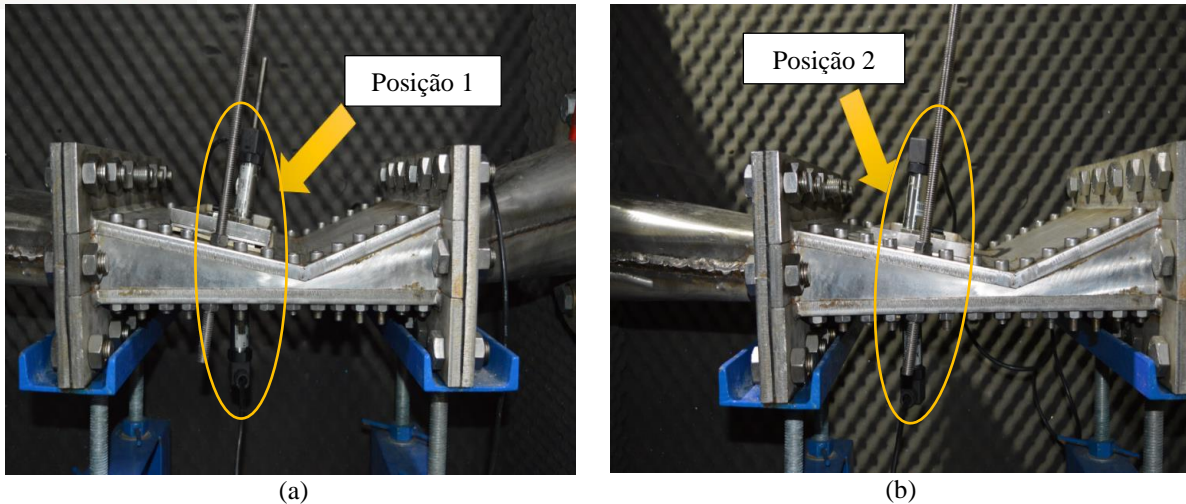
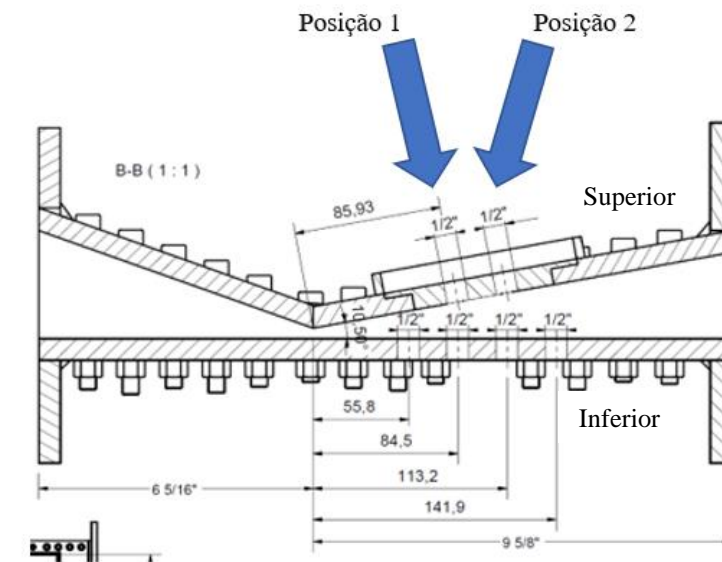


Figura 3: Posicionamento dos transdutores de pressão, Posição 1 (a); Posição 2 (b), e; vista de corte do dispositivo de cavitação (c).



Obs: As dimensões apresentadas são em “mm”, salvo as indicadas com unidades distintas.

(c)

Os transdutores de pressão são alimentados por uma fonte de 24V e geram um sinal de corrente de 4 a 20 mA proporcional à pressão aplicada no sensor. O sinal é enviado para um sistema de aquisição de dados da marca National Instruments modelo cDAQ-9178/NI9203. Os dados de corrente, são convertidos em pressão por intermédio da curva de calibração do sensor de pressão para valores que variaram entre -1,0 a 30,0 bar (Figura 4).

O ensaio era iniciado após o acionamento do conjunto motobomba para uma vazão de aproximadamente 60 l/s, estabilizada a vazão de água no sistema, acionava-se o compressor de ar responsável por inserir ar no escoamento de água. O controle de vazão de ar foi realizado por meio de válvulas gaveta e de leituras realizadas em rotômetros instalados ao longo da tubulação de ar comprimido.

Após a parametrização das vazões de água e de ar na instalação experimental, iniciava-se a coleta das pressões instantâneas por meio dos transdutores instalados nas duas posições (1 e 2), inferior e superior, do dispositivo de cavitação. Transcorridos o tempo de 10 min para aquisição do sinal dos transdutores de pressão, encerrava-se a coleta atual e parametrizava-se nova vazão de ar, reiniciando o processo, de maneira que, ao fim do ensaio fossem registradas as séries de pressões para todas as concentrações de ar avaliadas nesse estudo.

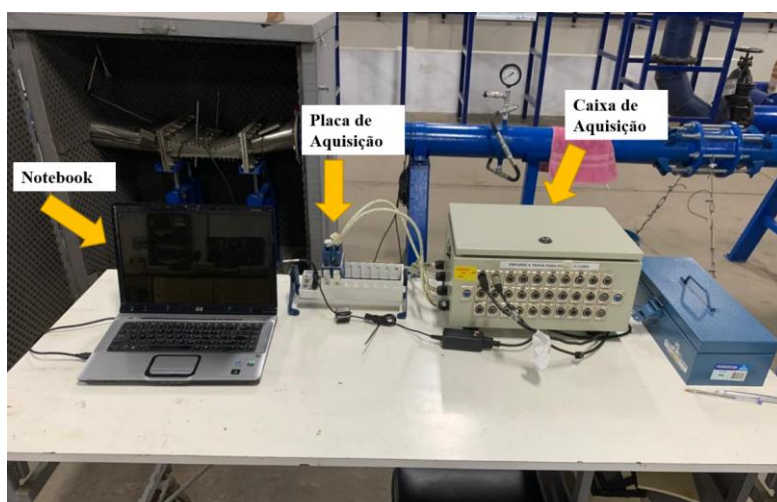


Figura 4: Sistema de aquisição dos dados de pressão dos sensores piezoelétricos.
Fonte: Autores (2023).

As concentrações de ar ensaiadas foram de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0% sendo a vazão de água mantida constante na ordem de 60L/s.

A partir das séries de pressões instantâneas foram determinados os valores das pressões médias e seus respectivos desvios padrão, visto que os sensores de pressão utilizados não apresentaram sensibilidade de resposta suficiente para registrar valores máximos e mínimos adequados com a amplitude gerada pelas implosões das bolhas durante o fenômeno da cavitação.

RESULTADOS

Avaliando as séries de pressões instantâneas coletadas nos ensaios com o dispositivo de cavitação, foi possível identificar o comportamento dos sinais adquiridos para as posições 1 e 2, Figura 5 e Figura 6, respectivamente. Em ambos os ensaios, tanto os transdutores instalados na parte superior quanto na parte inferior da máquina de cavitação apresentaram alterações em seus registros a partir do acréscimo de ar no sistema.

Na Figura 5a é possível observar que as pressões registradas até o $t = 0,05s$ concentraram-se em valores inferiores, entre -5 e 10m.c.a., aproximadamente, enquanto que para a posição 2, para o mesmo intervalo de tempo, os valores variaram entre 5 e 20 m.c.a aproximadamente (Figura 6a).

Também foram verificadas diferenças de comportamento entre as pressões instantâneas registradas no teto (TSup.) e na base (TInf.) do dispositivo, sendo as pressões na parte inferior da máquina de menor amplitude (Figura 5b e Figura 6b) do que as encontradas próximas a zona de formação e implosão das bolhas de vapor (Figura 5a e Figura 6a). Esse comportamento corrobora com o esperado, uma vez que as perturbações registradas pelos sinais de pressão foram superiores exatamente na região onde os danos por cavitação foram observados em investigações com corpos de prova em concreto.

Através das séries de pressões instantâneas, foram determinados os valores médios e os desvios padrão de cada ensaio (Figura 7). Os resultados obtidos foram analisados em função das vazões de ar inseridas no escoamento, bem como, seu comportamento em relação a disposição dos transdutores na máquina de cavitação. O aumento da concentração de ar no escoamento resultou no acréscimo das pressões médias extraídas pelos sensores instalados na posição 1, tanto no teto quanto na base do dispositivo (Figura 7a), indicando que a inserção de ar, mesmo em baixas concentrações (< 2,0%) no sistema pode reduzir as condições que favorecem a ocorrência do fenômeno da cavitação, similar ao constatado pelos estudos de Dong (2008). Em contrapartida, as pressões médias extraídas na posição 2 para o transdutor superior, apresentaram reduções significativas em seus valores médios até a concentração de ar de 6,0% (Figura 7a). Pode-se destacar ainda que, na posição 1, onde verificou-se

a ampliação das pressões médias com o aumento da concentração de ar, se encontram os valores de pressão mais críticos, ou seja, as pressões negativas.

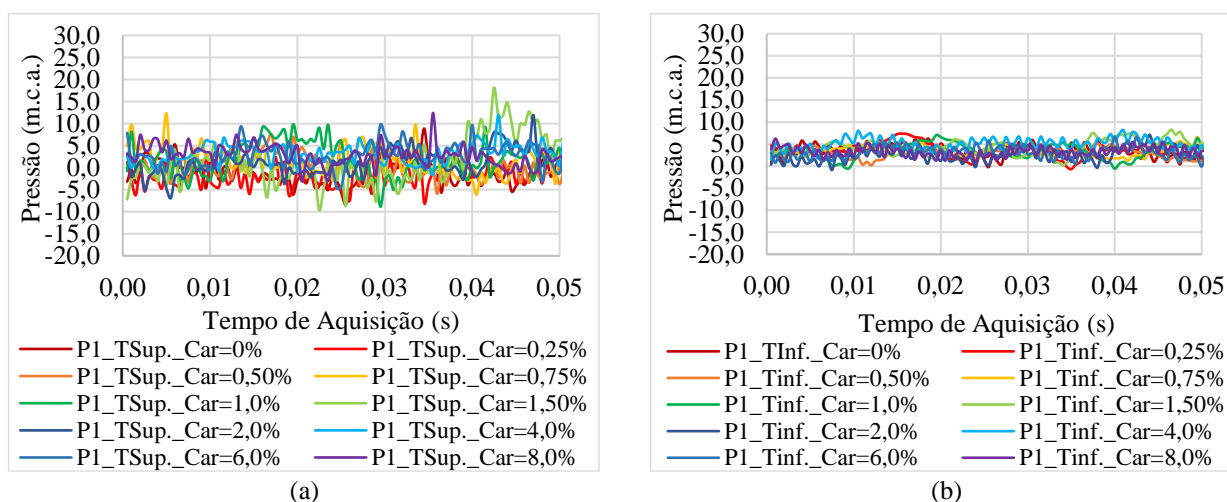


Figura 5: Pressões instantâneas aquisitadas na Posição 1, durante $t = 0,05s$, na parte superior (a), e; inferior do dispositivo de cavitação (b), para diferentes concentrações de ar.

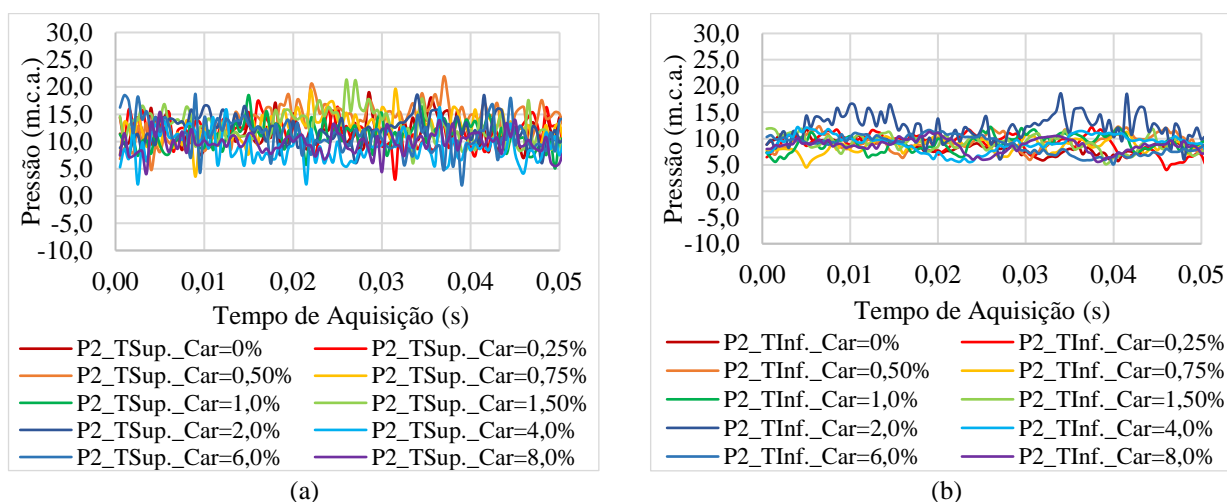


Figura 6: Pressões instantâneas aquisitadas na Posição 2, durante $t = 0,05s$, na parte superior (a), e; inferior do dispositivo de cavitação (b), para diferentes concentrações de ar.

Ao serem verificados os desvios padrões das pressões médias, Figura 7b, foi possível observar que as maiores dispersões se encontram na parte superior do dispositivo (P1 TSup. e P2 TSup.), indicando a interferência ocasionada pela zona de implosão das bolhas de vapor na proximidade dos sensores de pressão utilizados, principalmente ao transdutor localizado na distância $d = 8,45$ cm.

Devido à similaridade de dispositivos, tendo sido a máquina de cavitação do LOH projetado a partir das dimensões e características do dispositivo do USBR, foram comparadas as pressões médias entre os dois sistemas de maneira a verificar o comportamento das pressões em função da concentração de ar no escoamento e da distância dos sensores utilizados em ambos os aparatos experimentais (Figura 8). As informações de pressão média do sistema do USBR foram extraídas a partir de ensaios realizados em parceria com o Laboratory of Hydraulic and of Concrete do US Bureau of Reclamation (USBR) e o Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH), sendo todas as informações apresentadas no Report intitulado: “*Collaborative Studies to Reduce Flow – Induced Damage on Concrete Hydraulic Surfaces*”.

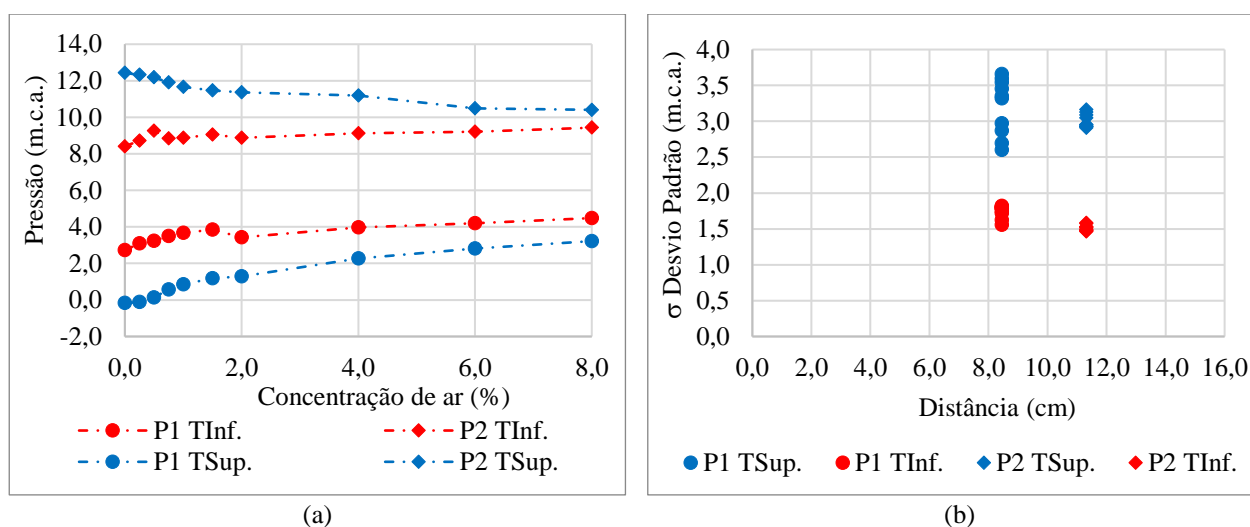


Figura 7: Resultados das pressões médias para as diferentes concentrações de ar (a), e; desvios padrão (b), das séries de pressões instantâneas considerando as distâncias a partir da seção contraída do dispositivo de cavitação ($d=0\text{cm}$).

Desta forma, a Figura 8 apresenta o comportamento das pressões médias tendo em $d=0\text{cm}$ o ponto de maior velocidade do dispositivo tipo Venturi e, portanto, a seção de formação do fenômeno em estudo. No sistema do USBR foram medidas as pressões médias em 10 (dez) pontos no teto e ao longo do dispositivo, já para o sistema do LOH foram utilizados 2 (dois) pontos, na parte superior e inferior da máquina de cavitação, com a mesma frequência (2.000Hz) e tempo de aquisição dos dados (10min) do USBR. As concentrações de ar avaliadas nos ensaios do USBR foram de 0; 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75; 1,05; 1,35; 1,65; 1,95 e 2,25%, ao passo que no LOH foram verificadas as concentrações de ar igual e superiores a essas, sendo elas: 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0%, as concentrações acima de 2,0% foram adicionadas em caráter de investigativo, visto que seriam as mesmas utilizadas nos estudos de Gal'perin (1971).

Na Figura 8 podemos observar que os pontos P1 ao P5 e P7 ao P9 não demonstram variações significativas nas pressões médias com a inserção de ar no sistema, justificado por seus distanciamentos em relação a seção de maior velocidade do escoamento, cerca de 30 m/s em $d = 0$ cm. O ponto P1 e P10 foram utilizados pela equipe do USBR somente como locais de controle do aparato experimental, não representando, de fato, as alterações bruscas ocorridas no fluido pela contração pontual gerada ao escoamento.

Já os pontos P5 e P6, de interesse nesse estudo, apresentaram semelhanças com as pressões médias aquisitadas pelos sensores utilizados no LOH, ou seja, o aumento da pressão média com o acréscimo da concentração de ar foi identificado no ponto P5 do USBR e na posição P1, no teto e na base do LOH. A medida em que há o distanciamento dos sensores da zona de implosão das bolhas há inversão do comportamento das pressões médias e a ocorrência de reduções nos valores médios através da inserção de ar no escoamento, P6 (USBR) e P2 TSup e TInf (Figura 8).

As pressões médias registradas na posição 1 (LOH) no teto do dispositivo foram inferiores as expressas pelo USBR no ponto P6, sendo as pressões coletadas na posição 2, tanto no teto quanto na base da máquina de cavitação, superiores, de 12,3 m.c.a. a 10,4 m.c.a., as extraídas pelo USBR no P6, de 9,2 a 6,6 m.c.a. (Figura 8).

Em suma, a evolução das pressões médias ao longo de ambos os dispositivos de cavitação (USBR e LOH), apresentou comportamento semelhante tanto em função do acréscimo de ar no escoamento quanto em relação ao distanciamento dos transdutores da seção de formação das cavidades de vapor. Mesmo se tratando de instalações experimentais com suas distintas peculiaridades foi possível identificar através sensores de pressão o aumento das pressões médias a partir do ponto de maior velocidade do escoamento acompanhado da inversão de comportamento dos resultados de pressões obtidos nos dois dispositivos de cavitação.

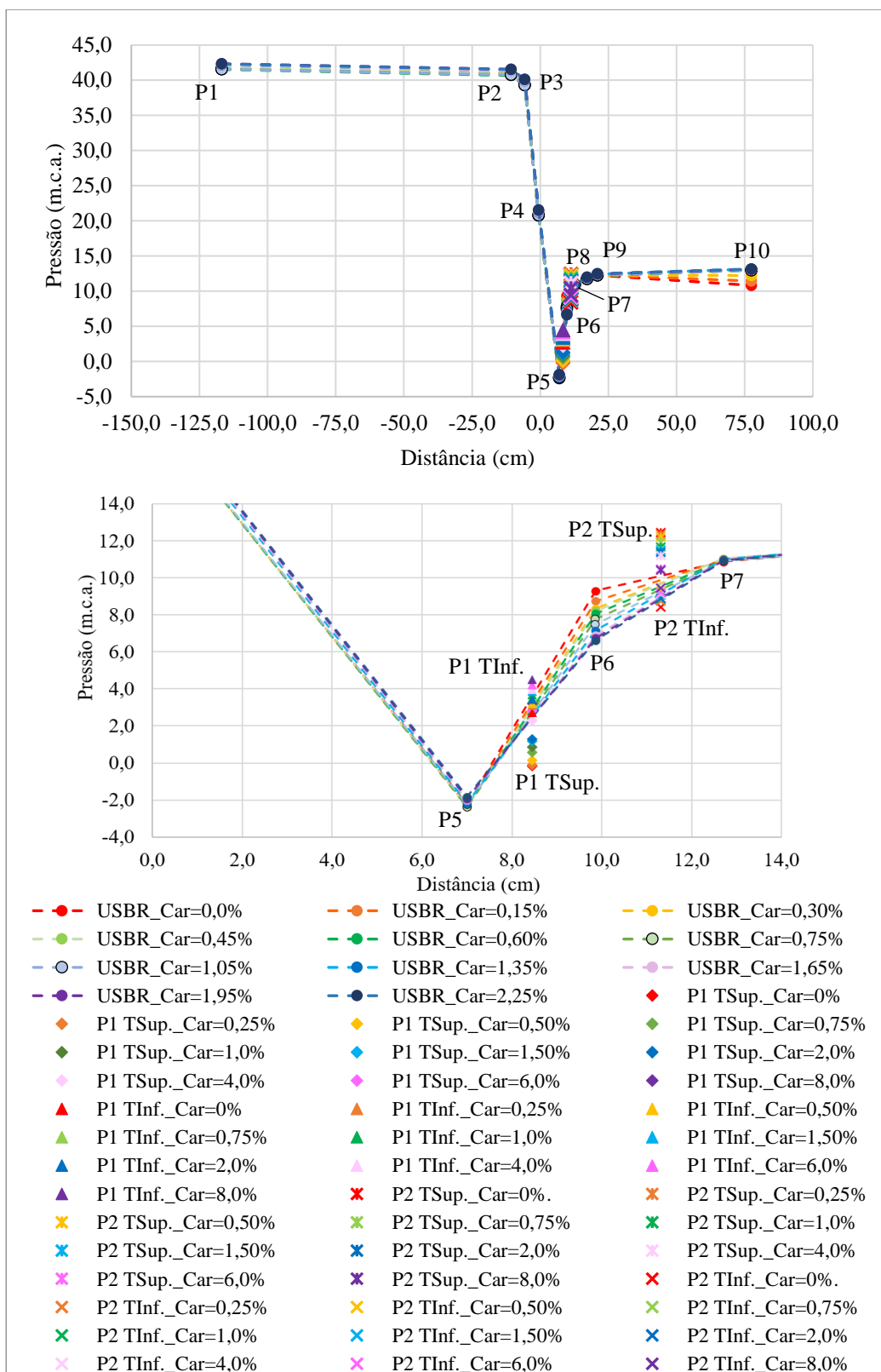


Figura 8:Comportamento das pressões médias ao longo do dispositivo de cavitação, consideração a distância da seção de controle (d=0cm), dados do USBR e LOH.

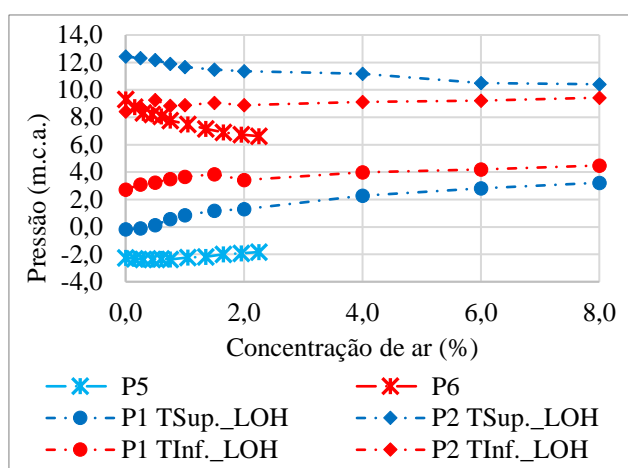


Figura 9: Resultados das pressões médias para as diferentes concentrações de ar.

Tendo em vista a proximidade entre os pontos P5 ($d = 7,0$ cm) e P6 ($d = 9,86$ cm) do USBR e os locais de posicionamento dos sensores do LOH ($d = 8,45$ e $11,32$ cm), foram então, avaliadas as pressões médias para diferentes concentrações de ar de ambos os sistemas. Desta forma, na Figura 9 foi possível observar que, as maiores influências ocasionadas pelo acréscimo de ar no escoamento foram registradas pelas pressões médias extraídas principalmente até a concentração de ar de 2,0%. As maiores reduções de pressão foram evidenciadas no ponto P6 do USBR, 9,26 para 6,62 m.c.a. quando comparadas aos demais sensores (LOH e USBR).

CONCLUSÃO

Considerando os ensaios realizados no dispositivo de cavitação do LOH se pode concluir que as maiores amplitudes de pressões médias verificadas, incluindo o registro de pressões médias negativas e os maiores desvios padrões entre as séries avaliadas, ocorreram na posição 1 ($d = 8,45$ cm), local mais próximo da zona de formação e, posterior impacto das bolhas de vapor formadas pelo fenômeno da cavitação.

Quando comparados os ensaios realizados em dispositivos de cavitação semelhantes, USBR e LOH/UFRGS, foram observadas mesmas tendência de comportamento das pressões médias em relação as concentrações de ar verificadas. Em ambos os casos, constatou-se o aumento da pressão média com o acréscimo da inserção de ar no sistema, principalmente, nos pontos de medição dispostos a partir da distância $d = 8,45$ cm e com concentrações de ar de até 2,0%, excluindo-se essa análise para as pressões verificadas no transdutor inferior da posição 2 do LOH.

Em aspectos gerais, e em concordância com o observado por Dong (2008), a inserção de ar favoreceu o aumento das pressões médias, incluindo as pressões médias negativas responsáveis pelo desenvolvimento da cavitação. Como recomendação para trabalhos futuros, indica-se a investigação, da influência da aeração também em pressões extremas, máximas e mínimas atreladas aos percentis de 99,9% e 0,01%, utilizando o dispositivo de cavitação do LOH e sensores de pressão de maior sensibilidade dos que utilizados nesta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a 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. e ao Laboratory of Hydraulic do United States Bureau of Reclamation(USBR) pela contribuição neste projeto.

REFERÊNCIAS

- BUREAU OF RECLAMATION (1963). *Design and construction of new cavitation machine*.
- COELHO W. R. “*Análise do Fenômeno de Cavitação em Bomba Centrífuga*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) – Ilha solteira: Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2006.
- DONG, Z., WU, Y., ZHANG, D. (2010) “*Cavitation characteristics of offset-into-flow and effect of aeration*”, Journal of Hydraulic Research, v. 48, n. 1. p. 74-80.
- DONG, Z., LIU, Z., WU, Y., ZHANG, D. (2008). “*An experimental investigation of pressure and cavitation characteristics of high velocity flow over a cylindrical protrusion in the presence and absence of aeration.*” J. Hydrodynamics, v. 20, n. 1. p. 60–66
- DONG, Z.; CHEN, L.; JU, W. “*Cavitation characteristics of high velocity flow with and without aeration on the order of 50 m/s*”. Journal of Hydrodynamics, v. 19, n. 4. p. 429-433, 2007.
- DONG, Z.; SU, P.; “*Cavitation control by aeration and its compressible characteristics.*” Journal of Hydrodynamics, v. 18, n. 4. p. 499-504, 2006.
- GAL'PERIN, R. S. et al. (1971) “*Cavitation in elements of hydraulic structures and methods of controlling it.*” Hydrotechnical Construction, v. 5, n. 8, p. 726-732.
- MORTENSEN, J. (2020). “*Collaborative Studies to Reduce Flow – Induced Damage on Concrete Hydraulic Surfaces*”. USBR, Denver.
- PETERKA, A. J. (1953). “*The effect of entrained air on cavitation pitting*” International Association for Hydraulic Research and Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers, Minneapolis, Set. 1953.