

ASSESSING CAVITATION EROSION ON SOLID SURFACES USING A CAVITATION JET APPARATUS

S.M. MOHAMMADIZADEH, J. G. DALFRÉ FILHO, C. S. DESCOVI, L. F. MURILLO-BERMÚDEZ, D. A. SIERRA, G. CORZO.

State University of Campinas (UNICAMP)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6995-066X>*

mohammadizadeh@fec.unicamp.br*

Submitted June 5, 2023 - Accepted September 11, 2023

DOI: 10pts.15628/holos.2023.16306

ABSTRACT

This study is dedicated to the examination of cavitation-induced erosion, a critical factor in optimizing the efficiency of hydraulic systems, including hydropower plants and pumping systems. To accomplish this, we conducted a sensitivity analysis utilizing a cavitation jet apparatus (CJA) and an experimental configuration that featured a vertical cylindrical test tank, a submerged nozzle, and an aluminum sample (specifically, alloy 6351 T6). The study maintained a consistent standoff distance of 5 cm and an orifice diameter of 2×10^{-3} m. Two distinct

nozzle geometries were tested to assess their influence on cavitation erosion. The outcomes revealed that the 20° conical sharp-edged nozzle resulted in the highest erosion rates, while the commercial nozzle (MEG 2510) caused comparatively less erosion. By standardizing the test duration to 1200 seconds and using a cavitation index of 0.14, the researchers avoided overlapping pits. In summary, the CJA, with these adjustments, demonstrated its effectiveness as a tool for evaluating the resistance of solid surfaces to cavitation.

KEYWORDS: Cavitation; Cavitation Erosion; Submerged Cavitation Jet; Nozzle Geometry; Cavitation Jet Apparatus (CJA).

AVALIAÇÃO DA EROÇÃO POR CAVITAÇÃO EM SUPERFÍCIES SÓLIDAS USANDO UM APARATO DE JATO DE CAVITAÇÃO

RESUMO

Este estudo é dedicado a avaliação da erosão induzida por cavitação, um fator crítico na otimização da eficiência de sistemas hidráulicos, incluindo usinas hidrelétricas e sistemas de bombeamento. Para isso, realizamos uma análise de sensibilidade utilizando um aparato de jato de cavitação (CJA) e uma configuração experimental que apresentava um tanque de teste cilíndrico vertical, um bocal submerso e uma amostra de alumínio (especificamente, liga 6351 T6). O estudo manteve uma distância do bocal a amostra de 5 cm e um diâmetro de orifício de 2×10^{-3} m. Duas geometrias distintas de bocais

foram testadas para avaliar sua influência na erosão por cavitação. Os resultados revelaram que o bocal cônico com bordas retas de 20° resultou nas maiores taxas de erosão, enquanto o bocal comercial (MEG 2510) causou comparativamente menos erosão. Ao padronizar a duração do teste para 1.200 segundos e usar um índice de cavitação de 0,14, os pesquisadores evitaram a sobreposição de pits. Em resumo, o CJA, com esses ajustes, demonstrou sua eficácia como ferramenta de avaliação da resistência de superfícies sólidas à cavitação.

Palavras chave: Cavitação; Erosão por Cavitação; Jato de Cavitação Submerso; Geometria do Bocal; Aparato de jato de cavitação (CJA).

1 INTRODUÇÃO

A cavitação é um fenômeno complexo que abrange aspectos hidrodinâmicos e materiais, conhecido por levar a consequências desastrosas, como a erosão por cavitação. (Arabnejad et al., 2020; Franc & Michel, 2006; Genovez & Dalfré Filho, 2008; Gualtieri & Chanson, 2021; Peng et al., 2020; Soyama et al., 2020). Hidrodinamicamente, envolve a formação de bolhas de vapor em regiões de baixa pressão de fluxo cavitante, que colapsam violentamente ao entrar em áreas de recuperação de pressão, resultando na erosão de superfícies sólidas. (Arabnejad et al., 2020; Franc & Michel, 2006; Genovez & Dalfré Filho, 2008; Gualtieri & Chanson, 2021; Peng et al., 2020; Soyama et al., 2020). Fisicamente, a erosão por cavitação é caracterizada pela perda de material devido a colapsos agressivos de cavidades perto de superfícies, submetendo as superfícies adjacentes a altas cargas mecânicas e níveis de tensão que ultrapassam o rendimento do material ou a tensão de fadiga, levando, em última análise, à remoção de material. (Arabnejad et al., 2020; Genovez & Dalfré Filho, 2008).

Os efeitos adversos da erosão por cavitação influenciam significativamente o projeto de estruturas e máquinas hidráulicas, como vertedouros, usinas hidrelétricas e sistemas de bombeamento, levando à redução da vida útil operacional e ao aumento dos custos de manutenção (Asnaghi et al., 2021; Gavidia, Chinelatto, et al., 2023; Gensheng et al., 2005; Jahangir et al., 2021; Nikeghbali et al., 2014; Back et al., 2023). Por outro lado, as capacidades destrutivas da cavitação encontram aplicações valiosas em indústrias como tratamento de águas residuais, limpeza de tubulações marítimas e perfuração de poços de petróleo. (Descovi et al., 2023a; Franc & Michel, 2006; Gavidia, Mohammadizadeh, et al., 2023; Fonseca, et al., 2017; Soyama, 2020a). Além disso, é utilizado em aplicações médicas, incluindo ultrassom focado de alta intensidade com microbolhas, para ablação de tumores (Descovi et al., 2023b; Ma et al., 2021; Murillo Bermudez et al., 2023; Peng et al., 2020; Sierra et al., 2023; Soyama, 2020b, 2020a, 2020b; Soyama et al., 2011).

Os pesquisadores exploraram vários métodos experimentais para abordar o impacto da cavitação em superfícies sólidas e identificar materiais adequados para revestimentos e polimento (ASTM G134-17, 2017; Zhao et al., 2020). Por exemplo, Zhao et al. propuseram um método de polimento de fluxo abrasivo rotativo por cavitação usando múltiplos canais de cavitação Venturi (Zhao et al., 2020). No entanto, os métodos de teste existentes podem não ser ideais para avaliar o desgaste de materiais aeroespaciais não metálicos (ASTM G134-17, 2017). A geometria do bocal influencia significativamente as taxas de erosão, levando à realização de experimentos com vários tipos e parâmetros de bocais (El Hassan et al., 2021; Hutli et al., 2016, 2017; Yamauchi et al., 1995). No entanto, algumas limitações do equipamento impedem o cumprimento integral das normas de ensaio (tais como ASTM G134), necessitando de melhorias nos ajustes de impasse e utilização de pressão (ASTM G134-17, 2017; Hutli et al., 2016, 2017; Yamauchi et al., 1995).

Neste estudo, os autores pretendem realizar uma análise de sensibilidade da erosão por cavitação usando um aparato de jato de cavitação (CJA) e geometrias variadas de bocais. O objetivo é alcançar o desgaste em estado estacionário em um tempo mais curto usando bombas de deslocamento positivo mais fracas e de baixo custo e avaliar a erosão por cavitação em cenários de fluxo por um tanque de superfície livre, que tem relevância prática para estruturas hidráulicas. (S. Mohammadizadeh et al., 2021; Soyama et al., 2020; Yan et al., 2015). Dado o foco limitado em

testes de baixa pressão e durações curtas em estudos anteriores, considera-se necessária uma investigação mais aprofundada sobre diferentes geometrias de bocais.

2 METODOLOGIA

Este estudo emprega uma técnica de teste de jato de cavitação submersa, em que um jato de líquido sofre cavitação e impacta uma amostra sólida estacionária submersa no líquido. O impacto das bolhas de cavitação na amostra sólida leva à erosão. Para avaliar a erosão por cavitação de superfícies sólidas, utilizamos um aparato experimental especializado denominado como aparato de jato de cavitação (CJA), conforme mostrado na Figura 1. Ele compreendia vários componentes críticos, começando com uma bomba de deslocamento positivo (1) gerando uma pressão operacional de 14,50 MPa e vazão de $4,84 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta bomba era acionada por um motor elétrico (2) com potência de 12,33 CV a 1200 rpm, operando em 220 V/3 fases. Uma tubulação (3) conectada à saída da bomba conduzia a um bocal (4) posicionado no interior de um tanque de ensaio cilíndrico vertical com diâmetro de 0,68 m e altura de 0,74 m. O tanque foi equipado com duas janelas circulares de vidro (5) de 0,12 m de diâmetro para fins de observação. Um dreno superior (6) com diâmetro de $\Phi = 6,35 \times 10^2 \text{ m}$ facilitou a descarga de líquido, enquanto um dreno inferior (7) de $\Phi = 1,27 \times 10^2 \text{ m}$ permitiu operações de manutenção. No fundo do tanque, foi cuidadosamente colocada uma amostra sólida (8) composta de liga de alumínio 6351 T6. O tanque foi abastecido com água de abastecimento pelo dreno superior, mantendo a temperatura constante de $26 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

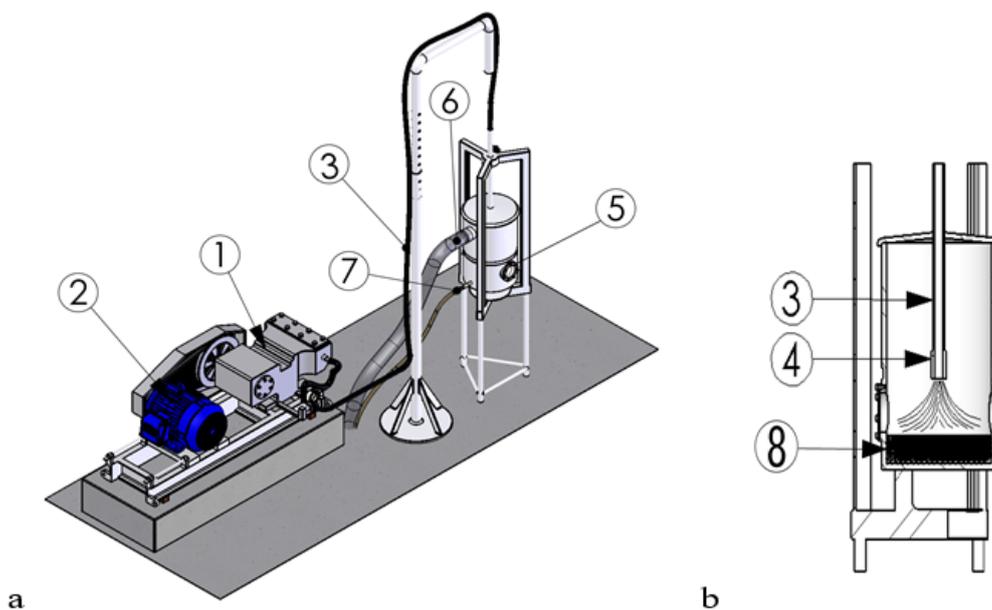


Figura 1: CJA; (a) Esquema do aparato de jato de cavitação, (b) Detalhe do tanque de teste cilíndrico (dimensões sem escala)

Uma vantagem significativa da configuração CJA foi a capacidade de ajuste do diâmetro do orifício do bocal, da geometria do bocal e da distância entre o bocal e a amostra. Esse recurso permitiu um controle preciso do processo de cavitação, possibilitando diversas condições experimentais e aumentando a precisão dos resultados.

A intensidade da erosão por cavitação é influenciada por vários parâmetros cruciais, nomeadamente o índice de cavitação (σ), o diâmetro do orifício do bocal (D), a distância entre o

bocal e a amostra (S) e a geometria do bocal. De acordo com a pesquisa de Falvey (Falvey, 1990), valores de índice de cavitação (σ) na faixa de 0,10 a 0,20 indicam cavitação desenvolvida, com presença de pequenas bolhas no líquido. À luz deste estudo e para reduzir a duração do teste, um valor de índice de cavitação adequado de 0,14 foi escolhido para avaliar a erosão por cavitação.

Para investigar o impacto do diâmetro do orifício do bocal na quantidade de erosão, cinco diâmetros diferentes (2×10^{-3} , 2.5×10^{-3} , 3×10^{-3} , 3.25×10^{-3} , and 3.50×10^{-3} m) foram empregados em estudos anteriores (Filho & Genovez, 2009; Genovez & Dalfré Filho, 2008; S. M. Mohammadizadeh et al., 2023). Os resultados demonstraram que a utilização de um diâmetro de orifício de $2 \pm 0,05$ mm resultou na maior quantidade de erosão em comparação aos demais diâmetros, por isso foi adotado para esta pesquisa.

A distância entre o bocal e a amostra (S) foi fixado em 0,05 m ($\pm 0,005$). No entanto, este parâmetro requer uma investigação mais aprofundada em pesquisas futuras para determinar outras suscetibilidades.

Além disso, para alcançar a erosão máxima por cavitação, foram testadas duas geometrias distintas de bocais para identificar a mais suscetível. Estes incluíam um bocal cônico de 20° com bordas retas e um bocal disponível comercialmente conhecido como MEG 2510 WASH JET SPRAY, conforme mostrado na Figura 2.

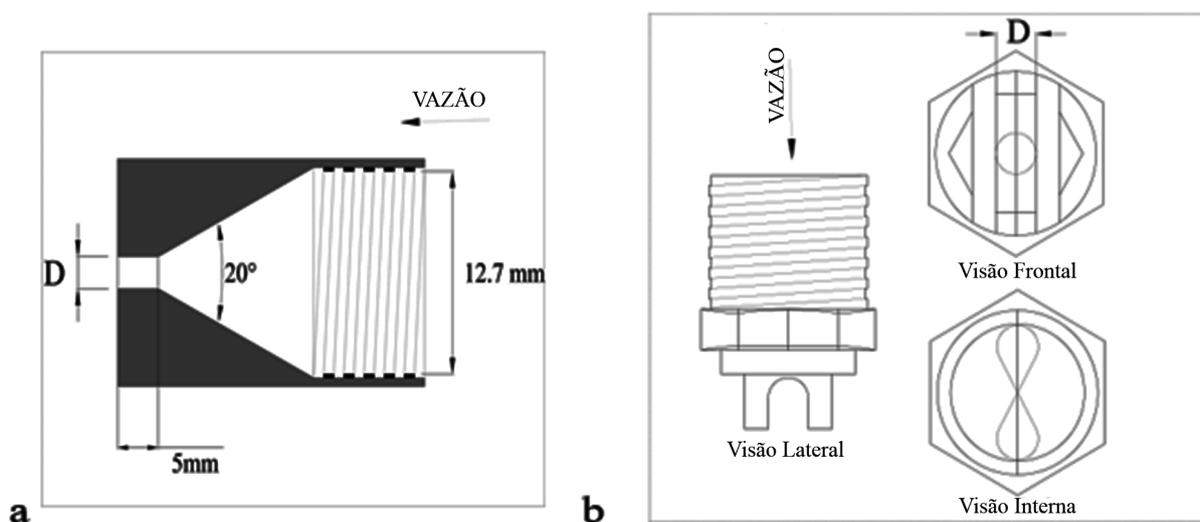


Figure 2: Esquemas dos bocais usados no aparato de jato de cavitação; (a) bocal cônico de 20° , (b) MEG 2510 WASH JET SPRAY

Estudos anteriores usaram consistentemente amostras de alumínio para avaliar a corrosão por pits e medir a erosão por cavitação (Kadivar et al., 2021; Lv et al., 2018; Nagalingam et al., 2019; Soyama et al., 2020; Takahashi et al., 2018). O alumínio foi escolhido não como objeto de avaliação da erosão, mas sim como um meio de registrar a intensidade do colapso das bolhas de cavitação. Qualquer implosão que causasse danos suficientes ao material levaria à deformação permanente do alumínio. Nesta pesquisa, uma amostra de alumínio (liga 6351 T6) com diâmetro de 0,15 m e espessura de $6,5 \times 10^{-3}$ m foi colocada no fundo do tanque como amostra sólida. As Tabelas 1 e 2 listam as propriedades mecânicas, físicas e químicas da amostra de alumínio.

Tabela 1: Propriedades mecânicas e físicas da amostra

Propriedades mecânicas e físicas do alumínio (liga 6351)	
Massa específica (g/cm ³)	2.71
Dureza Brinell	95
Dureza Knoop	130
Módulo de Elasticidade (GPa)	68.9
Resistência à fadiga (MPa)	89.6
Razão de Poisson	0.33
Resistência à tração final (MPa)	310
Resistência à tração, rendimento	283
Alongamento na ruptura (%)	14
Módulo de cisalhamento (GPa)	26
Resistência ao cisalhamento (MPa)	200
Condutividade Térmica (W/m-K)	176

Tabela 2: Propriedades químicas da amostra de alumínio

Propriedades dos elementos componentes de alumínio	
Alumínio, Al	95.9 - 98.5 (%)
Cobre, Cu	<= 0.10 (%)
Ferro, Fe	<= 0.50 (%)
Magnésio, Mg	0.40 - 0.80 (%)
Manganês, Mn	0.40 - 0.80 (%)
Outro, cada	<= 0.05 (%)
Outros, total	<= 0.15 (%)
Silício, Si	0.70 - 1.3 (%)

A erosão por cavitação foi avaliada criando um anel concêntrico com duas regiões distintas, uma exibindo cavitação intensa e outra apresentando cavitação moderada, ao redor de uma área central danificada da amostra. Utilizando um microscópio estereoscópico trinocular (microscópio OPTON) com capacidade de zoom (1X a 4X) e faixa de ampliação (10X a 160X), o número de depressões na superfície intensamente cavitada da amostra de alumínio polido foi contado para exame visual. A quantificação da erosão por cavitação (desgaste) envolveu o cálculo do número de pits por centímetro quadrado na região caracterizada por cavitação intensa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O papel da geometria do bocal na influência da intensidade dos jatos de cavitação tem sido objeto de interesse na área, com diversos estudos realizados por pesquisadores como Gensheng (2005), Soyama (2020b, 2020a), Soyama et al. (2020), e Hulti (2016, 2017) que esclarecem seu significado. Para aprofundar esta área, conduzimos uma investigação experimental com o objetivo

de compreender o impacto do emprego de duas geometrias distintas de bocais, mantendo uma distância constante de 0,05 m (com uma tolerância de $\pm 0,005$). O diâmetro do orifício foi fixado em 2×10^{-3} m e o índice de cavitação foi fixado em $\sigma = 0,14$. Cada experimento foi repetido rigorosamente no mínimo três vezes, utilizando amostras idênticas para verificar a precisão da medição. O desvio padrão das medidas pode ser observado nas Figuras 3 e 4.

O objetivo central deste estudo foi medir o diâmetro da região intensamente cavitada, que descobrimos ser de 0,04 metros com precisão de $\pm 0,002$ metros. Posteriormente, investigamos os efeitos da erosão por cavitação em uma amostra de alumínio durante um período de 1.200 s, com observações feitas em intervalos de 60 s até a marca de 1.200 s. O resultado de nossas investigações revelou que a utilização de um bocal com geometria cônica de 20° e arestas vivas resultou na erosão mais significativa dentro do Aparato de Jato de Cavitação (CJA). As taxas de erosão foram documentadas como 27,67 pits/cm² nos 60 s iniciais, seguidas por 48,54, 72,81, 95,19, 178,88 e 258,55 pits/cm² em 120, 180, 240, 300 e 1200 s, respectivamente.

Esta pesquisa esclarece o profundo impacto da geometria do bocal na dinâmica do jato de cavitação e oferece análises críticas sobre os efeitos da erosão, que podem ter implicações abrangentes para aplicações industriais e projetos de engenharia. Estudos adicionais neste domínio podem produzir informações valiosas para otimizar sistemas de jatos de cavitação.

Além disso, a Figura 3 indicou que quando o MEG 2510 foi usado durante diferentes períodos de teste, a erosão medida foi menos da metade do mesmo cenário usando o bico cônico de bordas retas de 20° . Além disso, é evidente que a erosão está diretamente ligada à passagem do tempo até $t = 1200$ s. O bocal comercial (MEG 2510) apresentou menor desgaste, indicando seu pior desempenho. Esta observação sugere que o bocal cônico com bordas retas de 20° resulta em um declínio mais rápido na pressão e um aumento simultâneo na velocidade em comparação com o MEG 2510. Esses fatores contribuem significativamente para o aumento da erosão observada com o bocal cônico de 20° com bordas retas.

Além disso, vale a pena notar que todas as curvas exibiram um padrão distinto em forma de joelho, aparecendo visivelmente no intervalo de tempo de $t = 180$ a $t = 300$ s. Esta região em forma de joelho correspondeu a um aumento repentino e substancial na atividade erosiva. Após este pico inicial, houve uma melhoria gradual no comportamento erosivo que se estendeu até o culminar do período de exposição em $t = 1200$ segundos. Este comportamento específico alinha-se com as descobertas detalhadas na ASTM G134 (2017), uma norma que discute extensivamente este padrão em forma de joelho e a subsequente inclinação suave na taxa de erosão.

Em consonância com os conhecimentos fornecidos pela ASTM G134 (2017), que elabora meticulosamente o padrão em forma de joelho e o declínio gradual na taxa de erosão, a nossa investigação em curso harmoniza-se com estas observações. Esta confirmação dá credibilidade à noção de que um tempo de exposição de $t = 1200$ s é de fato a duração ideal para alcançar a estabilidade ao desgaste e avaliar a erosão no contexto do CJA. Estender o teste além deste limite de 1.200 s não apenas fornece um período substancial para observação, mas também serve ao propósito de aumentar a clareza das formações individuais das fossas de erosão. Esta abordagem mitiga eficazmente o risco de potencial sobreposição de pits, permitindo uma avaliação mais precisa e detalhada dos efeitos erosivos, o que é crucial para uma compreensão abrangente dos fenômenos de desgaste induzidos por cavitação. Consequentemente, este tempo de exposição recomendado facilita uma investigação mais completa e precisa sobre o comportamento de

materiais sujeitos à cavitação, com aplicações que abrangem vários campos, incluindo ciência de materiais, engenharia e projeto de equipamentos industriais.

A Figura 4 do estudo fornece uma análise abrangente da erosão, levando em consideração tanto a quantidade de pits quanto a densidade de pits por unidade de área (pits/cm²) dentro de uma região altamente cavitada, em relação a duas geometrias distintas de bocais. Os dados são apresentados especificamente em um ponto de tempo fixo, $t = 1.200$ s, que marca a conclusão do período de teste.

Os resultados da análise demonstram que o bocal cônico de 20° de borda reta produz as maiores taxas de erosão, em forte contraste com o bocal comercial (MEG 2510), o que resulta, relativamente, em menor erosão. Como resultado, o CJA prova ser um método adequado e preciso para avaliar a erosão por cavitação em superfícies sólidas. Vale ressaltar que o uso de bocal cônico de 20° de borda reta, diâmetro de orifício de 2×10^{-3} m, distância entre bocal e amostra de 0,05m e índice de cavitação de 0,14 são identificados como as condições experimentais ideais para esta avaliação. Esta informação estabelece informações valiosas sobre os mecanismos de erosão e destaca a importância da geometria do bocal em estudos de erosão por cavitação.

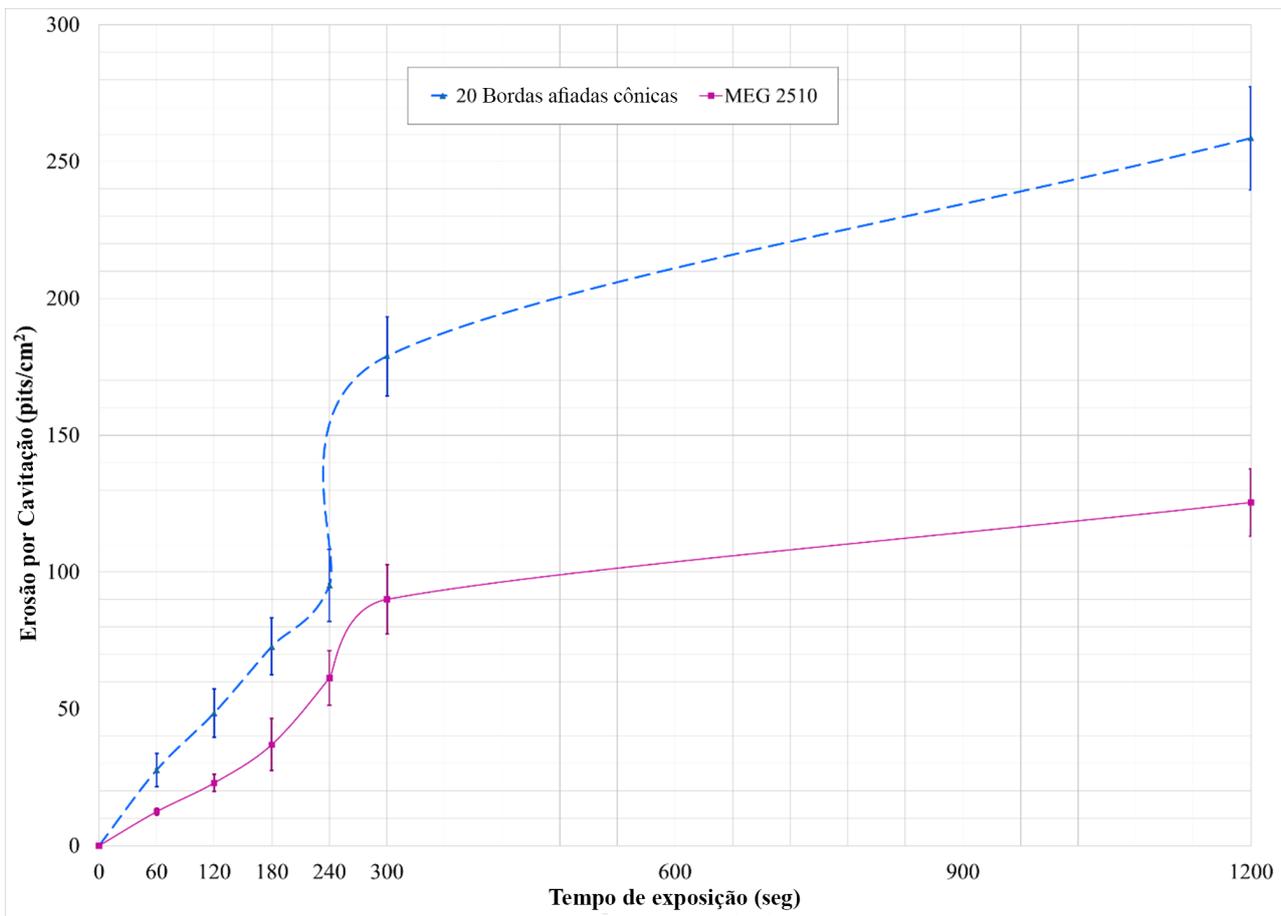


Figura 3: Efeitos de diferentes geometrias de bocais na erosão por cavitação em relação ao tempo de exposição (diâmetro de orifício do bocal = 2 mm, distância entre bocal e amostra = 5 cm e diâmetro da amostra intensamente cavitada = 4 cm). As barras de erro representam o desvio padrão.

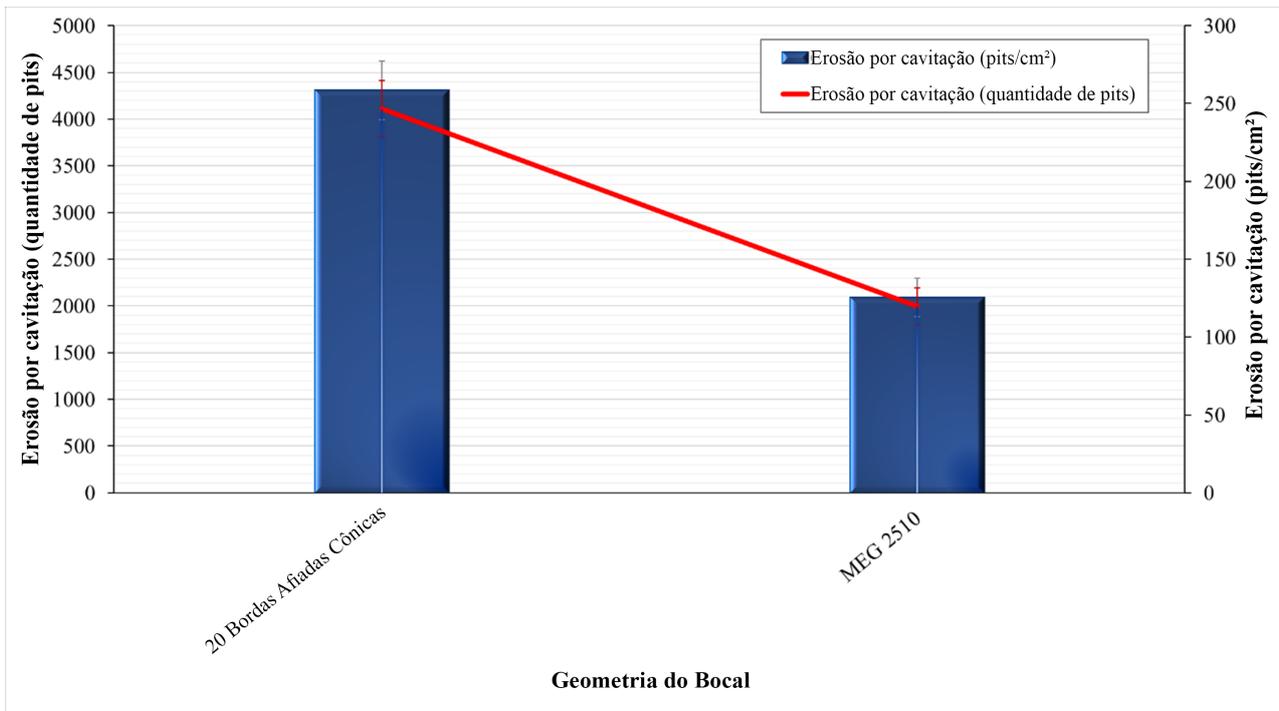


Figura 4: Efeito de diferentes geometrias de bocais na quantidade de erosão por cavitação em 1200 s (distância entre bocal e amostra = 5 cm, diâmetro do orifício do bocal = 2 mm e diâmetro intensamente cavitado da amostra = 4 cm).

4 CONCLUSÃO

Esta pesquisa tratou da utilização de um método de teste de jato de cavitação submerso para a avaliação da erosão por cavitação em superfícies sólidas. O aparato de jato de cavitação (CJA) mostrou-se uma ferramenta indispensável na condução desses experimentos. Sua adaptabilidade e componentes modificáveis melhoraram muito as capacidades experimentais do estudo. Os conhecimentos obtidos através da aplicação do CJA aprofundaram a compreensão dos fenômenos de erosão provocados pela cavitação e das suas aplicações potenciais nas disciplinas de engenharia e ciência dos materiais.

Os resultados aqui apresentados, representam uma contribuição substancial para a compreensão da erosão por cavitação e são promissoras para impulsionar avanços em inúmeras aplicações industriais onde a cavitação é um fator significativo. Os parâmetros experimentais ideais para o emprego do CJA envolvem a instalação de um bocal cônico de bordas retas de 20° com diâmetro de orifício de 2×10^{-3} m, distância entre bocal e amostra de 0,05 m e índice de cavitação de 0,14, sendo os testes realizados por uma duração de 20 minutos. Estas recomendações são fundamentais para garantir a eficácia do CJA na avaliação da erosão por cavitação.

5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) [números de bolsas 88887.701529/2022-00, 88887.497812/2020-00, 88887.

701389/2022-00 e 88887.805051/2023-00] e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) [números de bolsas 2002/10348-0 e 2019/12166-7], que agradecemos.

6 REFERÊNCIAS

Arabnejad, M. H., Amini, A., Farhat, M., & Bensow, R. E. (2020). Hydrodynamic mechanisms of aggressive collapse events in leading edge cavitation. *Journal of Hydrodynamics*, 32, 6–19.

Asnaghi, A., Svennberg, U., Gustafsson, R., & Bensow, R. E. (2021). Propeller tip vortex mitigation by roughness application. *Applied Ocean Research*, 106, 102449.

Back, A. J., da Silva Souza, G., Galatto, S. L., Corseuil, C., & poletto, C. (2023). EROSIVITY INDEX FOR BRASIL BASED ON CLIMATOLOGICAL NORMALS FROM 1991 TO 2020. *HOLOS*, 3(39). DOI: 10pts.15628/holos.2023.16329

Descovi, C. S., Zuffo, A. C., Mohammadizadeh, S. M., Murillo Bermudez, L. F., & Sierra, D. A. (2023a). Utilizing Long Short-Term Memory (LSTM) Networks for River Flow Prediction in the Brazilian Pantanal Basin. *HOLOS*, 5(39). <https://doi.org/10.15628/holos.2023.16315>

Descovi, C. S., Zuffo, A. C., Mohammadizadeh, S. M., Murillo Bermudez, L. F., & Sierra, D. A. (29/11-01/12/2023). *Modeling River Flows in the Brazilian Pantanal Basin Using Long Short-Term Memory (LSTM) Networks*. 7th SSS, Porto Alegre, Brazil. In Press.

El Hassan, M., Bukharin, N., Al-Kouz, W., Zhang, J.-W., & Li, W.-F. (2021). A Review on the Erosion Mechanism in Cavitating Jets and Their Industrial Applications. *Applied Sciences*, 11(7), 3166.

Falvey, H. T. (1990). *Cavitation in chutes and spillways*. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation Denver, CO, USA.

Filho, J. G. D., & Genovez, A. I. (2009). Alternative apparatus to evaluate cavitation damage. *Journal of materials in civil engineering*, 21(12), 797–800.

Fonseca, R. A., Olegario Júnior, F. das C., Lino, H. F., & Bergerman, M. G. (2017). TECHNICAL EVALUATION OF REAGENT DOSING PUMPING SYSTEMS IN FLOTATION CIRCUITS. *HOLOS*, 6, 92–99. <https://doi.org/10.15628/holos.2017.6525>

Franc, J.-P., & Michel, J.-M. (2006). *Fundamentals of cavitation* (Vol. 76). Springer science & Business media.

Gavidia, J. C. R., Chinelatto, G. F., Basso, M., Souza, J. P., Soltanmohammadi, R., Vidal, A. C., Goldstein, R. H., & Mohammadizadeh, S. M. (2023). Utilizing integrated artificial intelligence for characterizing mineralogy and facies in a pre-salt carbonate reservoir, Santos Basin, Brazil, using cores, wireline logs, and multi-mineral petrophysical evaluation. *Geoenergy Science and Engineering*, 231, 212303. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212303>

Gavidia, J. C. R., Mohammadizadeh, S. M., Chinelatto, G. F., Basso, M., Souza, J. P. da P., Vidal, A. C., & Goldstein, R. H. (2023). Bridging the Gap: Integrating Static and Dynamic Data for Improved Permeability Modeling and Super K Zone Detection in Vuggy Reservoirs. *Journal of Geoenergy Science and Engineering*. In Press.

- Genovez, A., & Dalfré Filho, J. (2008). Efficiency evaluation of cavitating jet apparatus. *Efficiency Evaluation of Cavitating Jet Apparatus*, 107–112.
- Gensheng, L., Zhonghou, S., Changshan, Z., Debin, Z., & Hongbing, C. (2005). Investigation and application of self-resonating cavitating water jet in petroleum engineering. *Petroleum science and technology*, 23(1), 1–15.
- Gualtieri, C., & Chanson, H. (2021). Physical and numerical modelling of air-water flows: An Introductory Overview. *Environmental Modelling & Software*, 143, 105109.
- Hutli, E., Nedeljkovic, M. S., Bonyár, A., & Légrády, D. (2017). Experimental study on the influence of geometrical parameters on the cavitation erosion characteristics of high speed submerged jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 80, 281–292.
- Hutli, E., Nedeljkovic, M. S., Radovic, N. A., & Bonyár, A. (2016). The relation between the high speed submerged cavitating jet behaviour and the cavitation erosion process. *International Journal of Multiphase Flow*, 83, 27–38.
- Jahangir, S., Ghahramani, E., Neuhauser, M., Bourgeois, S., Bensow, R. E., & Poelma, C. (2021). Experimental investigation of cavitation-induced erosion around a surface-mounted bluff body. *Wear*, 480, 203917.
- Kadivar, E., Moctar, O. el, Skoda, R., & Löschner, U. (2021). Experimental study of the control of cavitation-induced erosion created by collapse of single bubbles using a micro structured riblet. *Wear*, 486–487, 204087. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204087>
- Lv, D., Lian, Z., & Zhang, T. (2018). Study of Cavitation and Cavitation Erosion Quantitative Method Based on Image Processing Technique. *Advances in Civil Engineering*, 2018, e5317578. <https://doi.org/10.1155/2018/5317578>
- Ma, J., Gnanaskandan, A., Hsiao, C.-T., & Chahine, G. L. (2021). Message Passing Interface Parallelization for Two-Way Coupled Euler–Lagrange Simulation of Microbubble Enhanced HIFU. *Journal of Fluids Engineering*, 143(8), 081105.
- Mohammadizadeh, S. M., Filho, J. G. D., Descovi, C. S., Murillo-Bermúdez, L. F., Sierra, D. A., & Perez, G. A. C. P. (29/11-01/12/2023). *Cavitation Jet Apparatus for the Evaluation of Cavitation Erosion of Solid Surfaces*. 7th SSS, Porto Alegre, Brazil. In Press.
- Mohammadizadeh, S., Moghaddam, M. A., & Talebbeydokhti, N. (2021). Analysis of flow in porous media using combined pressurized-free surface network. *Journal of Porous Media*, 24(10). <http://dx.doi.org/10.1615/JPorMedia.2021025407>
- Murillo Bermudez, L. F., Abreu, A. E. S. de, Pereira, S. Y., Mohammadizadeh, S. M., Descovi, C. S., Sierra, D. A., & Martim, A. L. S. S. (29/11-01/12/2023). *CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS POR ESGOTO SANITÁRIO: COMO AVALIAR A FONTE DA CONTAMINAÇÃO?* 7th SSS, Porto Alegre, Brazil. In Press.
- Nagalingam, A. P., Thiruchelvam, V. C., & Yeo, S. H. (2019). A novel hydrodynamic cavitation abrasive technique for internal surface finishing. *Journal of Manufacturing Processes*, 46, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.08.014>

Nikeghbali, P., Omidvar, P., Akbari, G., & Mohammadizadeh, S. M. (2014). THE STUDY ON SEDIMENT MOTION AND THE MODEL OF DAM BREAK ON THE MOVABLE BED BY SPH METHOD. *THE STUDY ON SEDIMENT MOTION AND THE MODEL OF DAM BREAK ON THE MOVABLE BED BY SPH METHOD*. INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTS, PORTS AND MARINE STRUCTURES (ICOPMAS). <https://sid.ir/paper/948560/en>

Peng, C., Tian, S., Li, G., & Wei, M. (2020). Enhancement of cavitation intensity and erosion ability of submerged cavitation jet by adding micro-particles. *Ocean Engineering*, 209, 107516.

Sierra, D. A., Luvizotto Jr, E., Mohammadizadeh, S. M., Descovi, C. S., Murillo Bermudez, L. F., & Filho, J. G. D. (29/11-01/12/2023). *TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS EM LINHAS DE RECALQUE DE ESGOTO - REVISÃO DA LITERATURA*. 7th SSS, Porto Alegre, Brazil. In Press.

Soyama, H. (2020a). Cavitating jet: A review. *Applied Sciences*, 10(20), 7280.

Soyama, H. (2020b). Cavitation peening: A review. *Metals*, 10(2), 270.

Soyama, H., Kikuchi, T., Nishikawa, M., & Takakuwa, O. (2011). Introduction of compressive residual stress into stainless steel by employing a cavitating jet in air. *Surface and Coatings Technology*, 205(10), 3167–3174.

Soyama, H., Simoncini, M., & Cabibbo, M. (2020). Effect of cavitation peening on fatigue properties in friction stir welded aluminum alloy AA5754. *Metals*, 11(1), 59.

Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by Cavitating Liquid Jet. ([s.d.]). Recuperado 15 de outubro de 2023, de <https://www.astm.org/g0134-17.html>

Takahashi, K., Osedo, H., Suzuki, T., & Fukuda, S. (2018). Fatigue strength improvement of an aluminum alloy with a crack-like surface defect using shot peening and cavitation peening. *Engineering fracture mechanics*, 193, 151–161.

Yamauchi, Y., Soyama, H., Adachi, Y., Sato, K., Shindo, T., Oba, R., Oshima, R., & Yamabe, M. (1995). Suitable region of high-speed submerged water jets for cutting and peening. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 38(1), 31–38.

Yan, R., Monaghan, J. J., Valizadeh, A., & Xu, F. (2015). The effect of air on solid body impact with water in two dimensions. *Journal of Fluids and Structures*, 59, 146–164.

Zhao, J., Jiang, E., Qi, H., Ji, S., & Chen, Z. (2020). A novel polishing method for single-crystal silicon using the cavitation rotary abrasive flow. *Precision Engineering*, 61, 72–81.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

MOHAMMADIZADEH, S., Dalfré Filho, J. G., Sampaio Descovi, C., Murillo Bermúdez, L. F., Alfonso Sierra, D., & Corzo Perez, G. A. Avaliação da erosão por cavitação em superfícies sólidas usando um aparelho a jato de cavitação. HOLOS, 5(39). Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/16306>

ABOUT THE AUTHORS



S. MOHAMMADIZADEH

Ph.D. Candidato à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brasil. Ele recebeu um MS.c (2013) pela Universidade de Sistan e Baluchestan (USB), Irã, na área de Engenharia Civil – Estruturas Hidráulicas. Seus principais interesses de pesquisa são cavitação, aeração, meios porosos, dinâmica de fluidos computacional (CFD), estruturas e equipamentos hidráulicos, concreto.

E-mail: mohammadizadeh@fec.unicamp.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6995-066X>

J. G. DALFRÉ FILHO

Professor associado da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brasil. Ele recebeu um Ph.D. (2005) e mestrado (2002) em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Os seus principais interesses de investigação centram-se principalmente em estruturas e equipamentos hidráulicos, abastecimento de água, perdas, cavitação e transientes hidráulicos.

E-mail: dalfre@unicamp.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8105-6177>

C. S. DESCOVI

Mestre em Ensino de Engenharia Civil, na área de recursos hídricos, energéticos e ambientais, pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e atualmente cursa doutorado na mesma faculdade. Áreas de pesquisa: modelagem hidrológica, hidrologia, hidráulica.

E-mail: cassianodescovi@fec.unicamp.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2847-2064>

L. F. M. BERMÚDEZ

Mestre em Ensino de Engenharia Civil, na área de recursos hídricos, energéticos e ambientais, pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e atualmente cursa doutorado na mesma faculdade.

E-mail: luismurillo@fec.unicamp.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7564-487X>

D. A. SIERRA

Mestre em Ensino de Engenharia Civil, área de recursos hídricos, energéticos e ambientais, pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e doutorando pela mesma faculdade. Áreas de pesquisa: transientes hidráulicos, algoritmos bioinspirados, dispositivos de mitigação de transientes.

E-mail: d192229@dac.unicamp.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0699-4512>

G. A. CORZO

Pesquisador sênior com amplo conhecimento em TIC e suas aplicações em problemas de recursos hídricos. Concluiu engenharia civil com estudos em teleinformática e possui mestrado e doutorado em aplicações de hidroinformática utilizando modelos de aprendizado de máquina. Geralmente tem experiência de pós-doutorado usando análise de Big Data para extremos de mudanças climáticas na Universidade de Wageningen.

E-mail: g.corzo@un-ihe.org

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2773-7817>

Editor : Francinaide de Lima Silva Nascimento

Ad Hoc Reviewer: Giovanni Chaves Penner e Maurício Andrades Paixão





Submitted June 5, 2023
Accepted September 11, 2023
Published December 18, 2023

