

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ESTUDO DOS FATORES INTERVENIENTES NA EROSÃO INTERNA DE BOMBAS HIDRÁULICAS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Bruno de Oliveira Lázaro ¹, Alice Rosa da Silva ² & Thaís Cristina de Jesus Fábio Santos ³

Abstract: Hydraulic pumps play an essential role in several engineering and industrial sectors, being widely used in supply systems, booster stations, industrial plants and water treatment plants. However, their operation is subject to phenomena that compromise the performance and durability of the equipment, such as internal erosion. This study aimed to review the national and international scientific literature on the main factors that influence this type of wear in hydraulic pumps, with emphasis on multiphase flows. The methodology adopted was based on a systematic review of the literature, which resulted in a robust set of theoretical, normative and experimental studies. The analysis showed that internal erosion results from the interaction between multiple factors, such as the characteristics of solid particles (size, shape and hardness), fluid properties (viscosity, velocity, density), operating conditions (pressure, temperature, turbulence) and constructive aspects of the pumps (geometry and materials). Recent studies also highlight the importance of chemical reactivity between the fluid and the pump materials, which can enhance synergistic corrosion and abrasion processes. Advances in computational fluid dynamics (CFD) simulations have enabled more accurate and predictive modeling of internal wear, incorporating multiphase effects and transient variables. It is concluded that an in-depth understanding of these factors is crucial to optimize efficiency, extend equipment life, and reduce operating costs. The research also highlights relevant gaps to be explored, especially in contexts related to basic sanitation and the use of raw water with high sediment load.

Key word: Internal erosion. Hydraulic pumps. Multiphase flow.

Resumo: As bombas hidráulicas desempenham um papel essencial em diversos setores da engenharia e da indústria, sendo amplamente utilizadas em sistemas de adução, estações de recalque, plantas industriais e estações de tratamento de água. No entanto, sua operação está sujeita a fenômenos que comprometem o desempenho e a durabilidade dos equipamentos, como a erosão interna. Este trabalho objetivou realizar uma revisão da literatura científica nacional e internacional sobre os principais fatores que influenciam esse tipo de desgaste em bombas hidráulicas, com ênfase em escoamentos multifásicos. A metodologia adotada baseou-se em uma revisão sistemática da literatura, o que resultou em um conjunto robusto de estudos teóricos, normativos e experimentais. A análise evidenciou que a erosão interna decorre da interação entre múltiplos fatores, como as características das partículas sólidas (tamanho, forma e dureza), propriedades do fluido (viscosidade, velocidade, densidade), condições operacionais (pressão, temperatura, turbulência) e aspectos construtivos das bombas (geometria e materiais). Estudos recentes destacam ainda a importância da reatividade química entre o fluido e os materiais da bomba, o que pode potencializar processos sinérgicos de corrosão e abrasão. O avanço das simulações por fluidodinâmica computacional (CFD) tem permitido modelagens mais precisas e preditivas do desgaste interno, incorporando efeitos multifásicos e

1) Laboratório de Mecânica dos Fluidos, Hidráulica e Hidrologia. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y Sala 1Y113. Uberlândia/MG, Brasil. E-mail: bruno.lazaro@ufu.br

2) Laboratório de Mecânica dos Fluidos, Hidráulica e Hidrologia. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y Sala 1Y113. Uberlândia/MG, Brasil. E-mail: alicers@ufu.br

3) Instituto de Ciências Agrárias. Universidade Federal de Uberlândia. Estudante de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. E-mail: ther.fabio@ufu.br.

variáveis transientes. Conclui-se que o entendimento aprofundado desses fatores é crucial para otimizar a eficiência, prolongar a vida útil dos equipamentos e reduzir custos operacionais. A pesquisa também evidencia lacunas relevantes a serem exploradas, especialmente em contextos relacionados ao saneamento básico e ao uso de águas brutas com alta carga de sedimentos.

Palavras-Chave – Erosão interna. Bombas hidráulicas. Escoamento multifásico.

INTRODUÇÃO

Bombas hidráulicas são máquinas de fluxo de enorme importância para a engenharia e para a indústria visto possuírem uma vasta aplicabilidade em diversos setores atividade humana. De forma geral, essas máquinas funcionam de modo a facilitar o escoamento de um dado fluido contra a aceleração da gravidade, de um ponto topograficamente mais baixo para um ponto mais elevado e podem ser encontradas, por exemplo, em plantas industriais, em plataformas para a prospecção de óleo e gás, em estações elevatórias de esgoto e em adutoras de água.

Neste sentido, percebe-se que o projeto, o dimensionamento, a instalação e a operação de bombas hidráulicas são processos que devem ser desenvolvidos com a sistemática apropriada, de modo a garantir a eficiência dessas máquinas de fluxo. Além disso, esses processos devem ser consonantes com a promoção de estudos e pesquisas que intencionem a otimização do funcionamento e a minimização ou solução da ocorrência de problemas associados a estes equipamentos.

Nesta perspectiva, tem-se que um dos principais problemas relacionados a máquinas de fluxo é a erosão interna de bombas hidráulicas. Este fenômeno refere-se ao desgaste progressivo e à perda de material das superfícies internas da bomba devido à ação contínua de partículas sólidas, líquidas ou gasosas agressivas presentes no fluido bombeado. Esta erosão pode comprometer significativamente a eficiência e a vida útil da bomba, levando a falhas prematuras e necessidade de manutenção frequente.

Assim, é de fundamental importância a promoção de estudos que objetivem compreender os processos de erosão interna de bombas hidráulicas. Estas pesquisas podem ser úteis na oferta de ferramentas capazes de aprimorar a eficiência operacional e a longevidade desses equipamentos. Além disso, compreender os mecanismos e fatores que contribuem para a erosão permite a adoção de medidas preventivas e corretivas, prolongando a vida útil das bombas e otimizando a operação de diversos sistemas hidráulicos.

Somado a isso, evidencia-se que o estudo da erosão interna é circunstancial para a segurança e a sustentabilidade ambiental. Em setores como o de tratamento de águas residuais, a integridade das bombas é crucial para prevenir contaminações e garantir a qualidade do efluente tratado. Sendo assim, investigar e mitigar a erosão interna é fundamental para evitar incidentes ambientais e assegurar que as operações industriais cumpram com as regulamentações ambientais e padrões de segurança vigentes.

Por fim, a análise dos processos de erosão interna em bombas hidráulicas impulsiona a inovação tecnológica e a melhoria contínua nos projetos de engenharia. Neste contexto, nota-se que o conhecimento detalhado dos mecanismos de desgaste pode orientar o desenvolvimento de novos materiais e revestimentos mais resistentes à abrasão, bem como a otimização dos *designs* de bombas para minimizar zonas de alta turbulência e impacto de partículas.

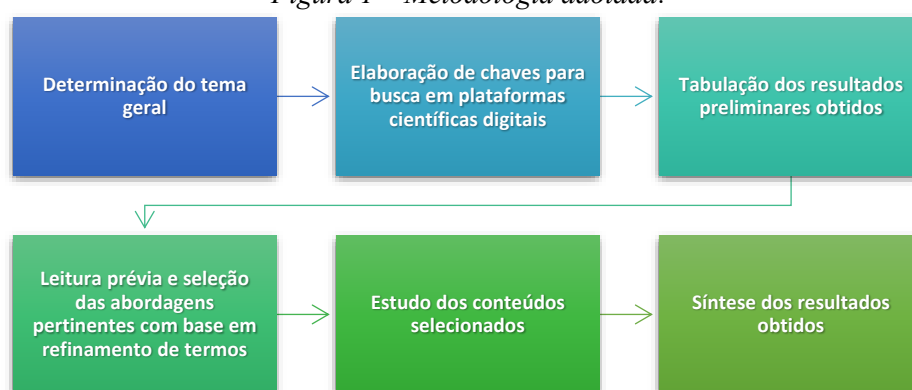
Com base nessa problemática, o presente trabalho objetivou realizar um estudo de revisão da literatura sobre a erosão interna em bombas hidráulicas. Os resultados dessa pesquisa podem ser úteis

na identificação de lacunas no tema em questão, bem como destacar tendências emergentes, fornecer novas perspectivas sobre os principais fatores que contribuem para a erosão interna e apresentar recomendações para futuras pesquisas e práticas na engenharia e na indústria.

MÉTODOS

A metodologia deste trabalho se baseou no desenvolvimento de uma revisão da literatura sobre a temática geral da erosão interna em bombas hidráulicas. A Figura 1 ilustra, por meio de um fluxograma, as etapas adotadas para a elaboração dessa pesquisa.

Figura 1 – Metodologia adotada.



Após a determinação do tema geral da pesquisa, foram elaboradas chaves de busca para pesquisa nas principais plataformas científicas digitais contemporâneas. Foram utilizados operadores booleanos para garantir uma maior abrangência de busca, como por exemplo: ("erosão interna" E "bombas hidráulicas") OU ("erosão interna" E "máquinas de fluxo") OU ("desgaste interno" E "bombas hidráulicas") OU ("desgaste interno" E "máquinas de fluxo") OU ("abrasão interna" E "bombas hidráulicas") OU ("abrasão interna" E "máquinas de fluxo"). Essas chaves também foram pesquisadas com termos sinônimos e em inglês e espanhol para se buscar produções científicas de relevância internacional.

Os resultados preliminares obtidos correspondiam a diversos materiais científicos, tais como artigos, dissertações, teses, notas técnicas, livros, entre outros. Estas referências foram tabuladas em uma planilha eletrônica e, posteriormente, filtradas de acordo com a área do conhecimento. Assim, foram selecionados materiais vinculados às áreas de mecânica dos fluidos, tecnologia, ciência dos materiais e engenharias de forma geral.

Feito isso, os materiais selecionados foram novamente filtrados, de modo a buscar uma relação com a ocorrência de erosão interna em bombas hidráulicas em redes de adução de água bruta. Por fim, os resultados obtidos dessa última seleção foram estudados de modo aprofundado como objetivo de serem posteriormente sintetizados, confrontados e correlacionados, de maneira a se elaborar um diagnóstico do atual estado da arte sobre o tema em questão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme exposto anteriormente, tem-se que a erosão interna em bombas hidráulicas é um processo complexo e que se desenvolve influenciado por diversos fatores inter-relacionados. A compreensão detalhada desses fatores, especialmente sob a perspectiva da mecânica dos fluidos, é

essencial para o desenvolvimento de bombas mais eficientes e duráveis para diversas aplicações industriais, sanitárias e de abastecimento e distribuição de água para a população.

Neste contexto, diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de se compreender os mecanismos da erosão interna em máquinas de fluxo hidráulico. De modo geral, estas pesquisas convergem na aplicação de conceitos básicos da fluidodinâmica para se modelar e caracterizar a fenomenologia da abrasão interna nas bombas.

Estado da arte sobre o tema

O estudo científico e técnico da erosão interna em bombas hidráulicas e máquinas de fluxo em geral é um tema recorrente na literatura desde a segunda metade do século XX. Em termos de literatura normativa, a norma ASTM D32-77 (1977) foi a primeira a instituir, formalmente, os conceitos de erosão interna e de cavitação em bombas, parametrizando as metodologias oficiais para se realizar testes de durabilidade e cavitação em motores de bombas. Atualmente, essa norma de aplicabilidade internacional foi revisada pelas ASTM G32-16 (2016) e ASTM G134-17 (2017), incorporando novas tecnologias para a execução dos testes de abrasão interna.

No cenário acadêmico, as pesquisas de Thiruvengadam e Preseir (1964), Wood, Knudsen e Hammit (1967), Arndt (1989), Zhao *et al.* (1993), Zhong e Minemura (1996) se destacaram em meados e no final do século XX por focarem no detalhamento teórico dos mecanismos pelos quais a erosão se desenvolvia nas bombas. De modo mais específico, estes autores buscaram compreender, teoricamente, a influência de partículas sólidas carregadas durante o escoamento na perda de eficiência dos motores de máquinas de fluxo, perfazendo assim a ideia inicial para um futuro aprofundamento em aspectos multifásicos do escoamento.

De modo complementar aos estudos teóricos desenvolvidos no período supracitado, as pesquisas de Huang *et al* (1996), Gandhi, Singh e Seshadri (2001) e Llewellyn, Yick e Dolman (2004) contribuíram significativamente para o estado da arte sobre o tema por meio de experimentos que buscavam modelar materialmente os efeitos sistêmicos da cavitação e da erosão por sedimentos. Os trabalhos laboratoriais desses autores foram focados na utilização de diferentes aparatos para acelerar a abrasão interna e seus resultados forneceram dados empíricos essenciais para a validação de diversos modelos teóricos e simulações numéricas desenvolvidos até então.

No final da primeira década do século XXI, percebe-se um incremento significativo nas pesquisas de modelagem computacional da erosão interna em máquinas de fluxo. Nesse contexto, os trabalhos de Zhao *et al* (2008), Lin e Ebadian (2008), Pagalthivarthi *et al* (2011), por exemplo, trouxeram importantes contribuições no que diz respeito à utilização de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) para o estudo da erosão interna em bombas hidráulicas.

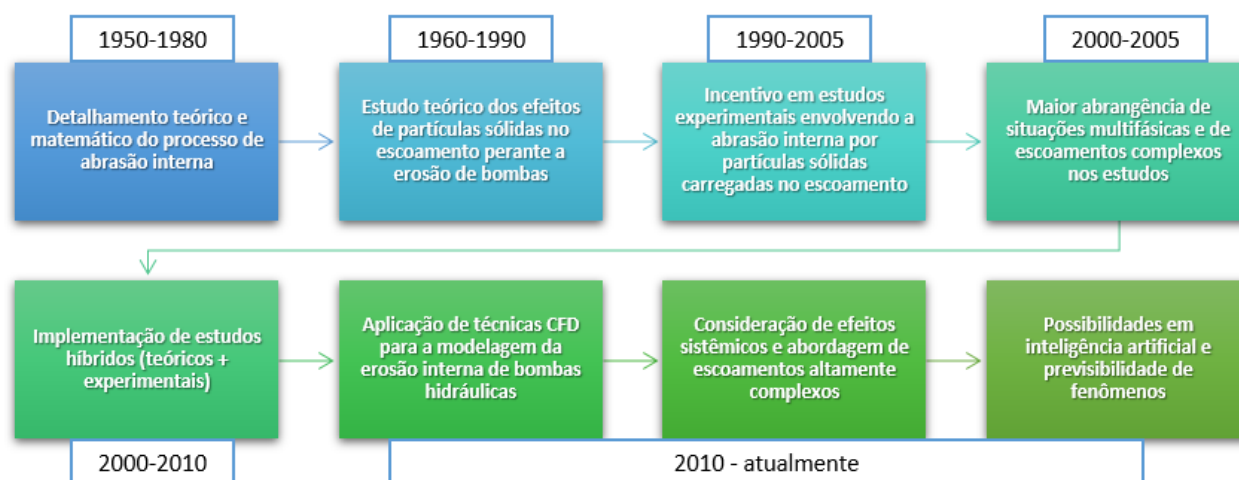
A utilização das técnicas CFD abriu campo para uma abordagem mais sistêmica e variada dos mecanismos causadores e que influenciam a erosão interna das máquinas de fluxo. Com isso, incentivou-se a promoção de estudos mais aprofundados que consideram características multifásicas, transientes, reativas e turbulentas dos escoamentos e a interação dessas características e efeitos com a abrasão nas bombas hidráulicas. Além disso, a abordagem CFD permite uma maior otimização e assertividade das análises desenvolvidas, bem como abre precedentes para estudos de previsibilidade e aplicação de inteligência artificial em modelagens mais precisas e eficientes da problemática envolvendo o desgaste de bombas.

Nesse sentido, trabalhos como os desenvolvidos por Amarendra, Chaudhari e Nath (2012), Chaudhari e Nath (2012), Steller e Gireñ (2015), Teran *et al* (2018), Zhang *et al* (2019), Su, Wu e Xia (2021) demonstraram a importância de se considerar o efeito da turbulência no escoamento do fluido no interior dos estágios da máquina de fluxo. Além disso, esses autores pesquisaram como a relação entre esses efeitos e as características multifásicas do próprio escoamento são circunstanciais para a ocorrência da abrasão interna nas bombas devido ao choque das partículas sólidas transportadas contra a superfície das pás rotativas.

Somado a isso, estudos recentes têm apontado a importância de se analisar os efeitos reativos do escoamento para a erosão interna de bombas hidráulicas. Assim, sabe-se que alguns tipos de fluidos tendem a ser agressivos para determinados materiais metálicos, de modo a colaborar com o processo de erosão e degradação da superfície das máquinas de fluxo.

Perante o exposto, a Figura 1 sintetiza as principais contribuições encontradas na literatura científica, ao longo dos anos, para a temática da erosão interna em máquinas de fluxo.

Figura 2 – Principais contribuições científicas ao longo do tempo para o estudo da erosão interna em bombas.

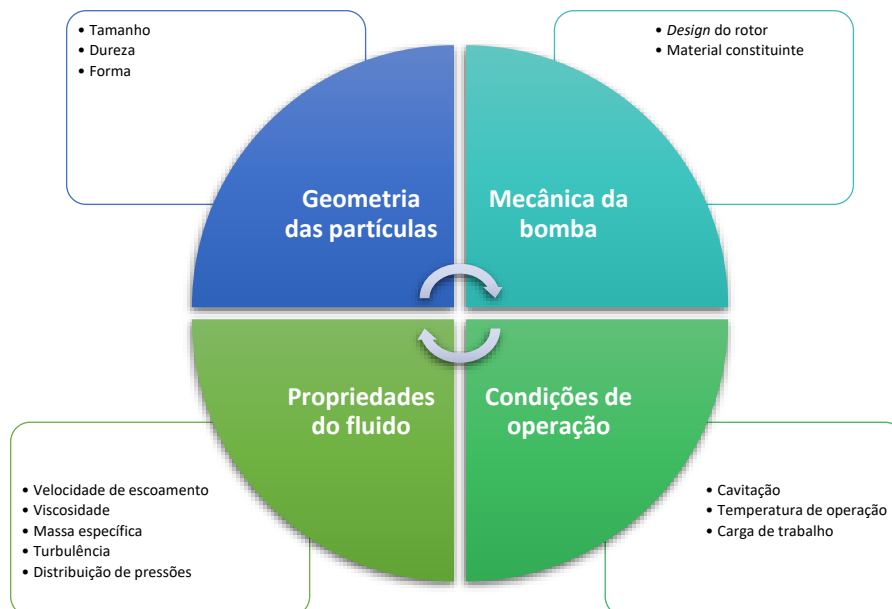


Da Figura 2, torna-se importante salientar que grande parte dos estudos encontrados na literatura se desenvolveram de maneira simultânea ao redor do mundo. Desse modo, as datas apresentadas são apenas um indicativo da época na qual houveram as maiores contribuições sobre a temática e demonstram que o assunto ainda é de grande relevância para a comunidade técnica e científica em nível internacional na contemporaneidade.

Principais fatores intervenientes na erosão interna de bombas hidráulicas

Conforme disserta a literatura, a erosão interna em bombas hidráulicas é um fenômeno altamente complexo e influenciado por uma variedade de fatores que podem ser analisados sob a ótica da mecânica dos fluidos e das características dos materiais envolvidos. Esses fatores incluem, de modo geral, a natureza das partículas sólidas transportadas pelo fluido escoado, as propriedades do fluido, a geometria da bomba e as condições de operação da mesma. A Figura 3 apresenta, de maneira resumida, esses fatores.

Figura 3— Principais fatores associados ao processo de erosão interna em bombas hidráulicas.



Em relação às partículas sólidas transportadas pelo fluido durante o escoamento, tem-se que o tamanho, a forma e a dureza desses materiais são as principais características que influenciam na abrasão e no desgaste interno das bombas. No caso do tamanho, observa-se que partículas maiores tendem a possuir maior massa e, quando transportadas pelo fluido, impactam as superfícies internas da bomba com maior força de colisão, o que aumenta a taxa de desgaste por abrasão (STELLER e GIREÑ, 2015).

Já em relação à forma, nota-se que partículas angulares e irregulares causam mais danos quando comparadas a partículas esféricas, pois as bordas afiadas tendem a escavar e raspar o material da superfície interior das bombas. Por fim, sobre a dureza das partículas, tem-se que sedimentos mais duros que o material da máquina de fluxo tendem a promover um desgaste mais rápido e severo (LIN e EBADIAN, 2008).

No que diz respeito às propriedades do fluido escoado pela máquina de fluxo, tem-se que a velocidade, a viscosidade e a massa específica são os fatores mais intervenientes na erosão interna. Deste modo, a literatura disserta que altas velocidades aumentam a energia cinética das partículas, resultando em impactos mais energéticos nas superfícies internas. A relação entre a velocidade do fluido e a taxa de erosão é, geralmente, não linear, de forma que pequenos aumentos na velocidade tendem a gerar aumentos significativos na taxa de desgaste (TERAN *et al*, 2018).

Sobre a viscosidade, observa-se que fluidos de menor viscosidade permitem que as partículas se movam mais livremente e com maior velocidade. Analogamente, fluidos viscosos tendem a amortecer o movimento das partículas, reduzindo o impacto e, conseqüentemente, a erosão. De modo complementar, observou-se empiricamente que fluidos com maior massa específica apresentam a capacidade de transportar partículas com maior energia cinética, favorecendo assim a severidade do

impacto entre essas partículas e a superfície interna da bomba (LLEWELLYN, YICK e DOLMAN, 2004; AMARENDRA, CHAUDHARI e NATH, 2012).

Ainda em relação às propriedades do fluido, a literatura discorre sobre a influência da turbulência e dos campos de pressão na ocorrência da abrasão interna. Assim, turbulências locais tendem a aumentar a velocidade relativa das partículas em relação às superfícies, intensificando a erosão. Já os campos de pressão, quando distribuídos de maneira instável ao longo do motor da máquina de fluxo, tendem a ocasionar a cavitação e, com isso, incrementar o colapso de bolha de vapor e aumentar o desgaste interno (ZHANG *et al*, 2019).

Sobre a mecânica da bomba hidráulica, em um primeiro momento, a literatura científica discorre que a geometria dos componentes internos, como o rotor e o estator, influencia a trajetória das partículas e a localização das zonas de impacto. Assim, áreas com curvas acentuadas ou mudanças bruscas na direção do fluxo são mais suscetíveis à erosão. Além disso, o material constituinte da bomba se faz um importante fator que influencia, significativamente, na ocorrência e no desenvolvimento da erosão interna. De modo geral, materiais com maior dureza e resistência à abrasão, tais como ligas metálicas especiais ou revestimentos cerâmicos, tendem a resistir melhor à erodibilidade (ZHAO *et al*, 2008).

Ainda no contexto das bombas, as condições de operação às quais essas máquinas são submetidas também influenciam drasticamente na ocorrência da erosão interna. Operações com variações frequentes na carga de trabalho da bomba, por exemplo, podem induzir flutuações na velocidade do fluido e nas condições de pressão, exacerbando a erosão. Somado a isso, altas temperaturas de trabalho podem afetar a viscosidade do fluido e a dureza dos materiais da bomba, potencialmente aumentando a taxa de erosão (PAGALTHIVARTHI *et al*, 2011).

Por fim, estudos recentes têm apresentado particular interesse em questões envolvendo a reatividade dos escoamentos e a relação da mesma com a erosão interna. Em comum, estas pesquisas apontam que a reatividade química desempenha um papel crucial na ocorrência de erosão interna em bombas hidráulicas.

De maneira generalizada, a literatura disserta que os materiais que compõem as bombas, como ligas metálicas, podem reagir com os fluidos de trabalho, especialmente se esses fluidos forem corrosivos ou contiverem contaminantes químicos agressivos, como no caso de bombas instaladas em estações de tratamento de esgoto ou plantas industriais de óleo e gás. Essa interação pode levar à corrosão química, que enfraquece a superfície dos componentes internos, tornando-os mais suscetíveis à erosão mecânica provocada pelo movimento contínuo do fluido. Além disso, a formação de produtos de corrosão pode aumentar a abrasividade do fluido, acelerando o processo de desgaste e erosão das superfícies internas da bomba.

CONCLUSÃO

A partir da revisão da literatura realizada, verificou-se que a erosão interna em bombas hidráulicas é um fenômeno complexo, multifatorial e ainda amplamente investigado no âmbito da engenharia mecânica e da mecânica dos fluidos. A interação entre partículas sólidas abrasivas, características do fluido escoado, geometria e materiais constituintes das bombas, além das condições operacionais, configura um cenário dinâmico e desafiador para o desenvolvimento de soluções eficazes que visem mitigar os efeitos do desgaste interno. A literatura consultada também evidencia a crescente aplicação de ferramentas de simulação por fluidodinâmica computacional (CFD) como recurso promissor para a modelagem preditiva da erosão, permitindo análises mais precisas e customizadas para diferentes contextos operacionais.

Além disso, os avanços nos estudos sobre os efeitos da reatividade química do fluido sobre os materiais da bomba indicam que processos corrosivos e erosivos devem ser considerados de forma integrada, especialmente em sistemas de bombeamento de águas brutas, esgoto e efluentes industriais. Assim, compreende-se que o enfrentamento da erosão interna em bombas hidráulicas requer uma abordagem interdisciplinar, que envolva desde a seleção adequada de materiais até o aprimoramento do projeto e operação das máquinas. Por fim, destaca-se a necessidade de novos estudos experimentais e computacionais aplicados à realidade brasileira, em especial aos sistemas de saneamento, onde o uso de águas com alta carga de sedimentos ainda representa um desafio significativo para a durabilidade e a eficiência desses equipamentos.

REFERÊNCIAS

- AMARENDRA, H. J., CHAUDHARI, G. P. e NATH, S. K. (2012). *Synergy of cavitation and slurry erosion in the slurry pot tester*. Wear 290, 25–31. doi:10.1016/j.wear.2012.05.025
- ARNDT, R. E. (1981). *Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures*. Annu. Rev. Fluid Mech. 13 (1), 273–326. doi:10.1146/annurev.fl.13.010181.001421
- ASTM D32-77 (1977). *D32-77 Standard method of vibratory cavitation erosion test*. Philadelphia, United States: ASTM Stand.
- ASTM G134-17 (2017). *G134-17 Standard test method for erosion of solid materials by a cavitating liquid jet*. Philadelphia, United States: ASTM Stand, 1–17.
- ASTM G32-16 (2016). *G32-16 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus*. Philadelphia, United States: ASTM Stand, 1–20.
- GANDHI, B.K.; SINGH, S.N.; SESHADRI, V. *Performance Characteristics of Centrifugal Slurry Pumps*. J. Fluid. Eng. 2001, 123, 271–280
- HUANG, S., IHARA, A., WARANABE, H., e HASHIMOTO, H. (1996). *Effects of solid particle properties on cavitation erosion in solid-water mixtures*. J. Fluids Eng. 118, 749–755. doi:10.1115/1.2835505
- LIN, C.X. EBADIAN, M.A. (2008). *A numerical study of developing slurry flow in the entrance region of a horizontal pipe*. Comput. Fluids 2008, 37, 965–974.
- LLEWELLYN, R.J.; YICK, S.K.; DOLMAN, K.F. (2004). *Scouring erosion resistance of metallic materials used in slurry pump service*. Wear 2004, 256, 592–599.
- PAGALTHIVARTHI, K.V., GUPTA, P.K., TYAGI, V.P., RAVI, M.R. (2011). *CFD Prediction of Erosion Wear in Centrifugal Slurry Pumps for Dilute Slurry Flows*. J. Comput. Multiph. Flows 2011, 3, 225–246.
- SREEDHAR, B. K., ALBERT, S. K., E PANDIT, A. B. (2017). *Cavitation damage: Theory and measurements - A review*. Wear 372-373, 177–196. doi:10.1016/j.wear.2016.12.009
- STELLER, J., GIREÑ, B. G. (2015). *International cavitation erosion test final report*. Report.
- SU, K., WU, J., XIA, D. (2021). *Dual role of microparticle in synergistic cavitation-particle erosion: Modeling and experiments*. Wear 203633, 470–471. doi:10.1016/j.wear.2021.203633
- TERAN, L. A., RODRÍGUEZ, S. A., LAÍN, S., E JUNG, S. (2018). *Interaction of particles with a cavitation bubble near a solid wall*. Phys. Fluids 30, 123304. doi:10.1063/1.5063472

- THIRUVENGADAM, A., PRESEIR, H. S. (1964). *On testing materials for cavitation damage resistance*. J. Ship Res. 8, 39–56. doi:10.5957/jsr.1964.8.5.39
- WOOD, G. M., KNUDSEN, L. K., HAMMITT, F. G. (1967). *Cavitation damage studies with rotating disk in water*. J. Basic Eng. 89, 98–109. doi:10.1115/1.3609577
- ZHANG, Y., XIE, X., ZHANG, Y., e DU, X. (2019). *Experimental study of influences of a particle on the collapsing dynamics of a laser-induced cavitation bubble near a solid-wall*. Exp. Therm. Fluid Sci. 105, 289–306. doi:10.1016/j.expthermflusci.2019.04.005
- ZHAO, K., GU, C., SHEN, F., LOU, B. (1993). *Study on mechanism of combined action of abrasion and cavitation erosion on some engineering steels*. Wear 162-164, 811–819. doi:10.1016/0043-1648(93)90082-w
- ZHAO, B.A.; YUAN, S.B.; LIU, H.B.; HUANG, Z.C.; TAN, M.B. *Simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in double-channel pump based on Mixture model*. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng. 2008, 24, 7–12.
- ZHAO R-J, ZHAO Y-L, ZHANG D-S, LI Y, GENG L-L. (2021). *Numerical Investigation of the Characteristics of Erosion in a Centrifugal Pump for Transporting Dilute Particle-Laden Flows*. Journal of Marine Science and Engineering. 9(9):961. <https://doi.org/10.3390/jmse9090961>
- ZHONG, Y., MINEMURA, K. (1996). *Measurement of erosion due to particle impingement and numerical prediction of wear in pump casing*. Wear 199, 36–44. doi:10.1016/0043-1648(96)06974-8