

Danos por Micro-Jatos de Cavitação em Rotores de Bombas em Alumínio

Damages by Cavitation Micro-jets in Pumps Aluminum Impellers

Gil Bazanini, Nicodemus Neto da Costa Lima

gil.bazanini@udesc.br , nicodemus.lima@udesc.br

Resumo. No presente trabalho são estudados a formação e a ação de micro-jatos oriundos do colapso de bolhas, ou cavidades, em água. Na parte teórica, este estudo aborda desde a física e a geometria de sua formação até os resultados da ação destes micro-jatos em superfícies de corpos de prova em alumínio utilizados na fabricação de rotores de bombas centrífugas radiais, notadamente a erosão por cavitação. Para a parte experimental, um equipamento a disco rotativo, mais compacto e eficiente que seus precedentes, foi projetado e montado no Departamento de Engenharia Mecânica da Udesc. Os resultados experimentais são comparados com o modelo teórico proposto, visando uma explicação para as formas resultantes da erosão por cavitação. O equipamento foi utilizado em conjunto com um microscópio eletrônico de varredura. Observou-se que os corpos de prova sofreram danos na forma de crateras em sua superfície, condizentes com o modelo de micro-jatos cônicos proposto aqui.

Palavras-chave: erosão, cavitação, alumínio.

Abstract. In the present work, are studied the formation and action of micro-jets form the collapse of bubbles, or cavities, in water. In the theoretical section, are studied the physics and geometry of the jets until its action on the surface of aluminum used on centrifugal pump impellers, such as the erosion by cavitation. Experimental studies are also performed using the new compact rotating disk device, more efficient than the preceding ones, designed and assembled at the Department of Mechanical Engineering of the Santa Catarina State University. Experimental results are compared to the theoretical ones, seeking for an explanation to the forms of the cavitation erosion in metals. The device was used with a scanning electronic microscope. The damages in the form of craters observed on the surface of the specimens fit with the theoretical model proposed here for the micro-jets.

Keywords: erosion, cavitation, aluminum.

1. Introdução.

Quando as bolhas de ar e vapor sofrem colapso próximo a superfícies sólidas, podem ocorrer danos às mesmas. Dois são os mecanismos de danos conhecidos: incidência de micro-jatos de líquidos, e ondas de choque [Fujikawa; Akamatsu, 1980] e [Hammit, 1980]. Estes micro-jatos ocorrem nos estágios finais do colapso das bolhas, devido a deformação das mesmas, causada pela proximidade de uma superfície sólida. Nos estágios finais, a bolha assume o formato toroidal, através da qual o micro-jato escoo em direção à superfície, atingindo-a a uma velocidade de aproximadamente 100 m/s [Frank; Michel, 2005]. Já as ondas de choque são causadas por oscilações (“rebound”) das bolhas afastadas da superfície sólida, antes de seu colapso final, resultando em ondas de pressão e de choque. A duração destes fenômenos é da ordem de milisegundos [Bazanini, 2003].

Com a finalidade de se estudar experimentalmente os efeitos da cavitação em superfícies sólidas, diversos dispositivos têm sido desenvolvidos ao longo das últimas décadas. Os mais importantes são: dispositivos por impacto de jato (descrito por [Janakiram, 1973]), que consiste de jatos de água atingindo corpos de prova fixos num disco rotativo; o equipamento vibratório [Kapp et al., 1970] onde os corpos de prova vibram no líquido de ensaio; o dispositivo a disco rotativo com eixo vertical, utilizado por [Wood et al. 1967], onde um disco com corpos de prova fixados em sua superfície gira na água para provocar escoamento em condições de cavitação; e finalmente o dispositivo a disco rotativo com eixo horizontal, utilizado por [Rao et al., 1980] e [Vivekananda et al. 1983]. No presente trabalho, este dispositivo, projetado e montado na Universidade do Estado de Santa Catarina, será utilizado para se obter danos na superfície de corpos de prova em alumínio utilizado na fabricação de rotores de bombas centrífugas radiais (SAE 335), fornecidos pela Franklin Electric (antiga Schneider), os quais serão analisados com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), com o objetivo de se observar os danos causados pela ação dos micro-jatos oriundos da cavitação. A estes resultados experimentais (“pits” de cavitação ou crateras), será feita uma associação com as formas de jatos obtidas pelo escoamento potencial e pela mecânica dos fluidos.

Na formação das bolhas, um raio característico inicial é o de 1 mm [Frank; Michel, 2005], [Bazanini, 2003], [Miksis; Ting, 1984]. O diâmetro do jato deixando a bolha é de aproximadamente 10% do raio inicial da bolha, ou seja 0,1 mm [Frank; Michel, 2005].

2. Análise Teórica e Experimental.

2.1. Parte Experimental.

Para produzir as bolhas que serão responsáveis pela geração dos micro-jatos responsáveis pela formação dos “pits”, ou crateras, na superfície dos corpos de prova metálicos, foi utilizado o dispositivo a disco rotativo [Bazanini; Lima, 2017].

A câmara dispõe de conexões para entrada e saída de água, respiro e conexões para medições de temperatura e pressão. A rotação do disco é controlada por um inversor de frequência. A água é abastecida por um reservatório situado num plano superior através de um sistema de tubulações de entrada e saída, válvulas, e filtro de água. Para prevenir problemas oriundos de vibrações, o disco é balanceado antes dos ensaios, e os suportes do dispositivo são providos de amortecedores de vibrações. Pela mesma razão, os corpos de prova e os indutores de cavitação são posicionados diametralmente opostos.

A temperatura e a pressão são monitoradas por um termômetro e um manômetro de escalas 0-100 °C e 0-3 bar, respectivamente, sendo que o dispositivo foi operado à

temperatura ambiente e pressão atmosférica local. A rotação do motor e o consumo de potência são registrados pelo inversor de frequência. Foi utilizado um motor de 30 cv de potência a uma rotação de 4400 rpm.

A cavitação é provocada por indutores de cavitação, existentes no disco, com a função de formar as bolhas, ou cavidades, sendo que o colapso das mesmas ocorrerá na superfície dos corpos de prova fixados neste disco.

Os corpos de prova, em alumínio SAE 335, em formato de discos de diâmetro 4,34 centímetros, ficaram submetidos a um período de 10 horas em condições de escoamento cavitante, após os quais foram retirados, limpos por ultra-som, e analisados no microscópio eletrônico de varredura.

A máquina está instalada sobre uma bancada com uma estrutura metálica, onde amortecedores foram montados nos pés da estrutura para absorver as vibrações causadas pelo equipamento, quando em operação.

Antes dos ensaios, foi determinada a composição química dos corpos de prova, vista na Tabela 1, assim como sua micro-dureza Vickers, já que a erosão por cavitação é um fenômeno superficial. O valor medido da dureza foi de 67,25 para uma carga de 200 gf.

Tabela 1. Composição Química dos Corpos de Prova.

Elemento	Al	Cu	Si	Mg	Zn	Fe
Composição (% Peso)	92,95	1,30	5,10	0,43	0,10	0,12

2.2. Parte Teórica.

Sabe-se que nos estágios finais de colapso, as bolhas próximas a uma superfície sólida deformam-se, assumindo a forma toroidal [Bazanini et al., 2017]. Nas imagens oriundas de filmagens de experimentos disponíveis na literatura ([Brennen, 1995], [Goh et al., 2012] e [Syafiqah, 2012]) não é possível distinguir o formato dos micro-jatos. Entretanto, conforme [Landau; Lifshitz, 1959], baseados em ensaios experimentais, o jato saindo de um tubo vertical estreito teria um formato cônico com um ângulo de 12,5 a 15 graus em relação à vertical. Então será feita aqui uma analogia entre o micro-jato saindo de um tubo fino vertical e o micro-jato saindo de uma bolha toroidal. Para efeito de cálculos será considerado aqui um ângulo de 15 graus em relação à vertical (Figura 1).

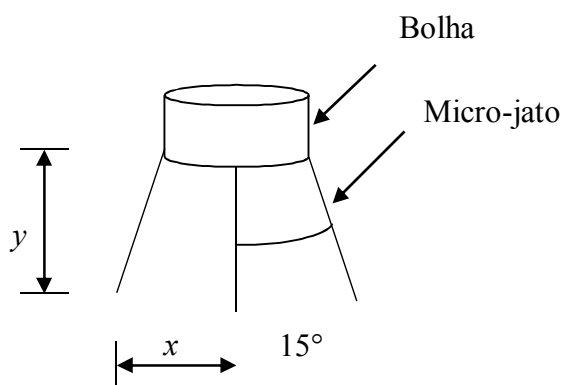


Figura 1. Micro-jatos cônicos através da bolha toroidal.

A cota x da Figura 1 será, portanto, igual à metade do diâmetro do pit de cavitação ϕ_{pit} obtido experimentalmente neste trabalho, ou seja:

$$x = \frac{\phi_{pit}}{2} \quad (1)$$

A cota y representa a distância da bolha ao corpo de prova.

3. Resultados.

A seguir, na Figura 2, o resultado obtido para a amostra em alumínio SAE 335, para uma ampliação de 13 vezes.

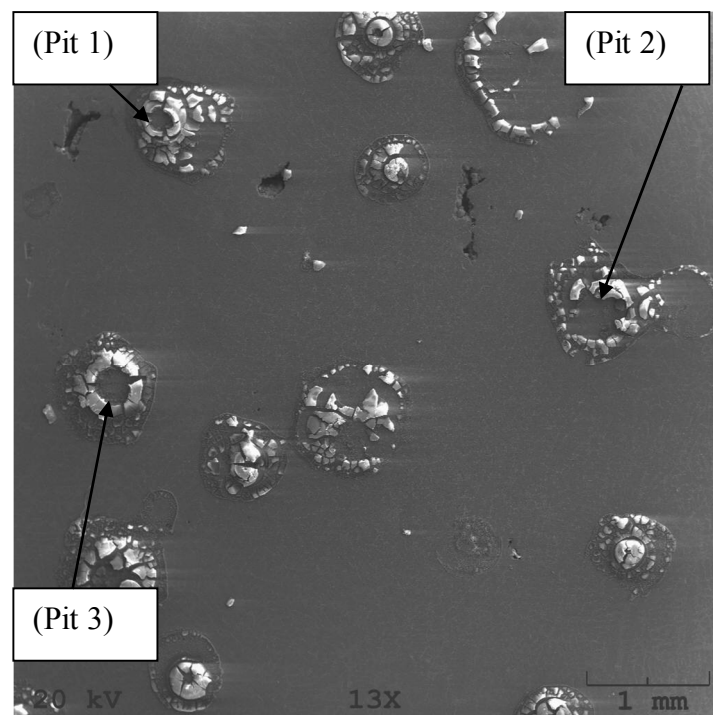


Figura 2. Alumínio SAE 335 após 10 hs de ensaio.

Alguns destes pites (nomeados Pit 1, 2 e 3, respectivamente) de cavitação foram utilizados neste estudo. Os mesmos estão ampliados na Figura 3.

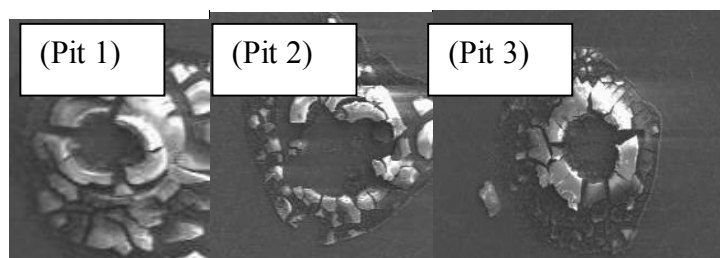


Figura 3. Destaque ampliado de alguns pites de cavitação da Figura 4.

Outra imagem analisada do mesmo material é a da Figura 4 abaixo, a qual foi nomeada Pit 4 nas medições e cálculos.

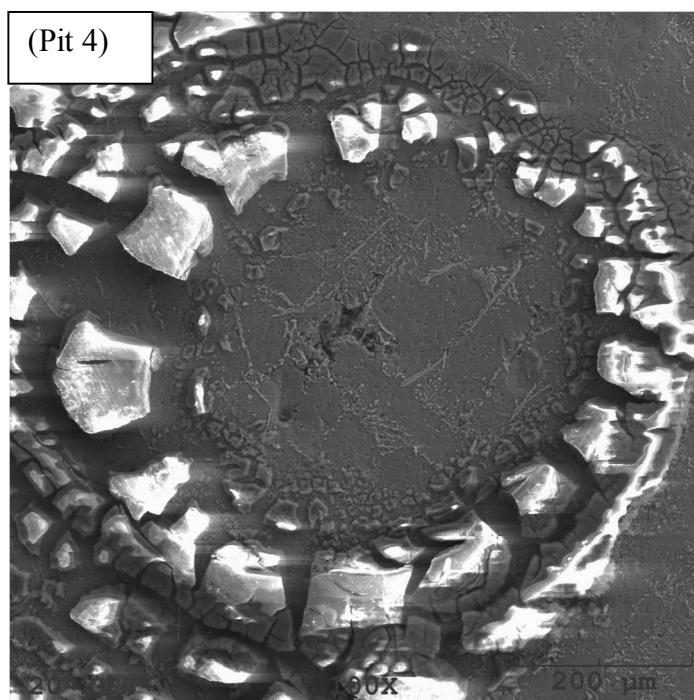


Figura 4. Amostra 2 de alumínio SAE 335 em ampliação de 100 x.

Através de uma análise EDX (energy dispersive spectrometer), para se determinar a composição química superficial da região “quebradiça” (áreas em branco nas imagens acima), constatou-se a presença de elevados teores de oxigênio, sugerindo a formação de alumina (Al_2O_3), a qual possui elevada dureza superficial, e portanto mais resistente ao fenômeno da erosão por cavitação, o qual atua essencialmente na superfície dos rotores de bombas centrífugas.

O resultado da análise EDX é mostrado na Figura 5, onde pode-se constatar as elevadas concentrações de oxigênio na superfície do corpo de prova.

Foram medidos os diâmetros dos pits e calculados as distâncias x e y em μm , bem como o intervalo de tempo Δt , em μs , que o jato levaria para alcançar a superfície sólida do corpo de prova, considerando uma velocidade de jato de 100 m/s [Frank;Michel, 2005]. Na Tabela 2 estão os resultados medidos e calculados.

Tabela 2. Medições e Cálculos de Pits, Distâncias e Tempos.

Pit	1	2	3	4
\varnothing_{pit} (medido), em μm	175	250	300	215
x (calculado), em μm	87,5	125	150	107,5
y (calculado), em μm	140	280	373	215
Δt (calculado), em μs	1,40	2,80	3,73	2,15

Nas imagens obtidas por [Brennen, 1995], pode-se observar valores aproximados de 170 μm para y e de 2 a 4 μs para Δt .

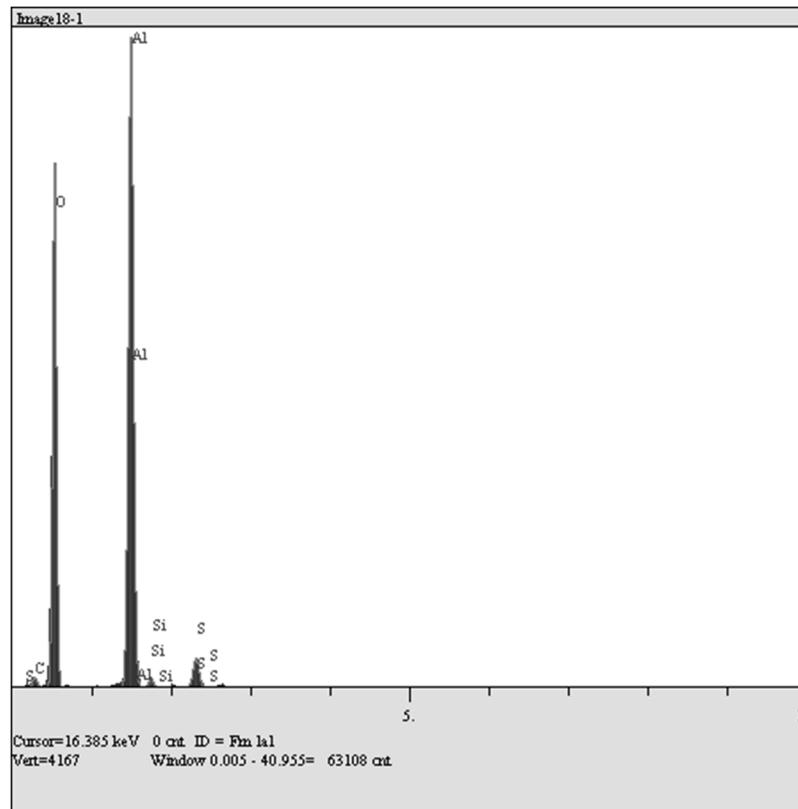


Figura 5. Análise EDX das regiões “brancas” dos corpos de prova.

6. Conclusões.

Embora tenha se verificado danos devido a cavitação no alumínio utilizado na fabricação de rotores de bombas centrífugas radiais, não se constatou acentuada perda de massa, possivelmente devido a formação de alumina, de elevada dureza superficial, tornando o material mais resistente a efeitos superficiais. Isto se deve ao fato da água utilizada (da rede) possuir oxigênio dissolvido em seu interior.

Embora pelas imagens existentes na bibliografia disponível não seja possível distinguir o formato dos micro-jatos, já que se considera que exista para o mesmo uma simetria aproximada na direção x (circunferencial) durante a ação deste micro-jato, o modelo de jato cônico estudado mostrou resultados de distâncias e tempos próximos aos valores disponíveis na literatura existente.

Porém, mesmo sem elevadas perdas de massa, constatou-se danos nas superfícies dos corpos de prova ensaiados, após 10 horas sob escoamento cavitante. Sob tais circunstâncias, tais danos tendem a aumentar com o passar do tempo, levando inevitavelmente à substituição dos rotores em algum momento, reforçando a idéia de que o mais prudente é prevenir a ocorrência do fenômeno ainda em fase de projeto, pela utilização do conceito de NPSH (Net Positive Suction Head).

7. Referências.

- Bazanini, G. (2003). Temperature Calculation Inside Collapsing Bubbles in Compressible Liquids, *2nd Brazilian Congress on Manufacturing Engineering*, Uberlandia, Brazil.
- Bazanini, G. Barbosa Jr., A.F., Lima, N.N.C. (2017). Erosion and Corrosion by Micro-jets and High Temperature Cavity Impaction on Metal Surfaces, *9th Brazilian Congress on Manufacturing Engineering*, Joinville, Brazil.
- Bazanini, G., Lima, N.N.C., Setembro (2017). Dados Técnicos e Erosão com o Dispositivo a Disco Rotativo. *2º Congresso Nacional de Inovação e Tecnologia*, São Bento do Sul, Brasil.
- Brennen C.E. (1995). *Cavitation and Bubble Dynamics*. Oxford University Press, New York, USA.
- Frank, J.C., Michel, J. P. (2005) *Fundamentals of Cavitation*. Kluwer Publishers.
- Fujikawa, S., Akamatsu, T., (1980), On the Mechanisms of Cavitation Bubble Collapse, *IAHR Symposium*, Tokyo, Japan.
- Goh, B.H.T., Ohl, S.W., Klaseboer, E. and Khoo, B.C., (1996) Assessment of Resistance of Non-Metallic Coatings to Silt Abrasion and Cavitation Erosion in a Rotating Disk Test Rig, *Wear* 194, pp. 149-155.
- Hammit, F.G., (1980), *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*, McGraw-Hill Book Company.
- Janakiram, K. S., (1973), *Studies on Erosion Due to Liquid Jet Impingement*. MSc. Thesis, Indian Institute of Science, Bangalore.
- Knapp, R.P., Daily, J. W., Hammit, F.G., (1970), *Cavitation*, McGraw-Hill.
- Landau L D., Lifshitz E.M., (1959), *Course of Theoretical Physics, vol. 6. Fluid Mechanics*. Edition, Pergamon Press, Great Britain.
- Miksis, M.J.; Ting, L., September (1984). Nonlinear Radial Oscillations of a Gas Bubble Including Thermal Effects. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 76, No. 3, pp. 897-905.
- Ramamurthy, A.S. and Bhaskaran, P., September. (1975). Source Size and Velocity Effects on Cavitation Damage, *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, pp. 384-386.
- Rao, P.V., Rao, B.C.S. and Rao N.S.L. (1980). Erosion and Cavity Characteristics in Rotating Components. *Journal of Testing and Evaluation. American Society of Testing and Materials*, pp. 127-142.
- Syafiqah, N., Kumazawa, Y., Koike, Y., Kawashima, H. and Ishima, T. (2012) Influence of Collapse Pressure Control on Bubble Radial Motion, *Eightth International Symposium on Cavitation*. pp. 172-177, Singapore.
- Vivekananda, P. (1983). *Mechanism of Cavitation Damage Influence of Stacking Fault Energy on Erosion and Erosion Resistance of Steels and Coatings*. Ph.D. Thesis, Dept. Of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India.
- Wood, G.W., Knudsen, L.K., Hammit, F.G., (1967), Cavitation Damage Studies with Rotating Disk in Water. *Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering*.

8. Agradecimentos.

Os autores desejam agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Santa Catarina (FAPESC), bem como às Indústrias Schneider/Franklin Electric, pela parceria neste projeto.