

EROSÃO POR CAVITAÇÃO EM CORPOS DE PROVA DE BRONZE E FERRO FUNDIDO NODULAR UTILIZANDO O DISPOSITIVO A DISCO ROTATIVO

Gil Bazanini, dem2gb@joinville.udesc.br¹
José Divo Bressan, dem2jdb@joinville.udesc.br²
Charles Zanini Miranda, charles_zanini@hotmail.com³

¹Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Campus Universitário – 89223-100 – Joinville – SC, Brasil

²Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Campus Universitário – 89223-100 – Joinville – SC, Brasil

³Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Campus Universitário – 89223-100 – Joinville – SC, Brasil

Resumo: Sempre que há o colapso de bolhas próximo a superfícies sólidas, podem ocorrer danos à mesma. São dois os mecanismos de danos conhecidos: micro-jatos de líquido e ondas de choques. Os micro-jatos são causados pela divisão da bolha em duas partes, próximo à superfície sólida, e influenciada pela proximidade da mesma nos estágios finais do colapso. As ondas de choque são ocasionadas por variações bruscas no campo de pressões (já que a duração do colapso é da ordem de milissegundos) e oscilações das bolhas após seu primeiro colapso (“rebound”). Estes micro-jatos e ondas de choque são responsáveis pelo desprendimento de material da superfície.

No equipamento a disco rotativo, um disco com os corpos de prova fixos em sua superfície e indutores de cavitação gira na água, provocando o escoamento cavitante. Neste trabalho, uma nova versão do equipamento utilizando disco com eixo horizontal é apresentada e discutida, assim como os resultados obtidos. A finalidade do equipamento é a formação de bolhas que, ao colapsar, serão responsáveis pela erosão dos corpos de prova fixos no disco, nas proximidades dos indutores (furos ou pinos no disco) de cavitação. Para prevenir problemas de vibração, os furos (ou pinos) e os corpos de prova estão situados em posições diametralmente opostas no disco.

Após várias horas operando em condições de cavitação, os corpos de prova foram pesados para se verificar a massa perdida por erosão no processo. Depois os corpos de prova foram observados nos microscópios eletrônico e ótico para se observar a formação de crateras ou “pittings”. Foram observadas a erosão e a formação de crateras em corpos de prova de bronze e ferro fundido nodular, bem como perda de massa devido a erosão por cavitação para o bronze, já que o ferro fundido apresentou ganho de massa devido à oxidação, inviabilizando a elaboração dos gráficos de perda de massa.

Palavras-chave: desgaste, erosão, cavitação, bronze.

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno da cavitação, que é a formação, crescimento e colapso de bolhas de ar e vapor em líquidos é, como já se sabe, responsável por danos em materiais e estruturas, metálicos ou não, quando em contato com meios líquidos, principalmente a água. Tais bolhas, ou cavidades, formam-se a partir de micro-bolhas de ar presentes no líquido. Este processo de formação de bolhas é chamado “cavitação incipiente” (Hammit, 1980). À medida que vai crescendo, a bolha vai sendo preenchida pelo vapor do líquido presente, quando a temperatura e a pressão da mistura estão próximas da temperatura e pressão de vapor do líquido, até atingir um raio de equilíbrio, conforme pode ser visto em Young (1989). Depois, as bolhas iniciam seu colapso e podem desaparecer ou iniciar um novo ciclo de crescimento e colapso, o qual pode se repetir diversas vezes até que as bolhas desapareçam (Young, 1989).

Quando as bolhas sofrem colapso próximo a superfícies sólidas, podem ocorrer danos às mesmas. Dois são os mecanismos de danos: incidência de micro-jatos de líquidos, e ondas de choque (ver Fujikawa; Akamatsu, 1980 e Hammitt, 1980). Estes micro-jatos são causados pela divisão da bolha em duas partes nos estágios finais do colapso, influenciada pela presença de uma superfície sólida próxima (este fenômeno pode ser bem visualizado em Shervani-Tabar, 2003). Já as ondas de choque são causadas pela rápida variação dos campos de pressão já que a duração do colapso é da ordem de milisegundos; Bazanini, 2003) e oscilações das bolhas após seu primeiro colapso (“rebound”). Estes micro-jatos e estas ondas de choque são os responsáveis pelo desprendimento da material da superfície sólida.

Com a finalidade de se estudar 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, um novo modelo deste dispositivo é apresentado e discutido, bem como alguns dos primeiros resultados obtidos.

2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento a disco rotativo com eixo horizontal tem sido utilizado esporadicamente ao longo dos últimos anos para o estudo da erosão por cavitação em corpos de prova. Algumas versões deste equipamento foram utilizados por Ramamurthy; Bhaskaran (1975), Rao et al. (1980), Zhiye (1983), e mais recentemente por Zhang et al. (1996) em experimentos com materiais não-metálicos. O dispositivo consiste de uma câmara com água onde um disco metálico com os corpos de prova está em movimento de rotação. Na superfície do disco, além dos corpos de prova estão os indutores de cavitação, responsáveis pela formação das bolhas que causarão a erosão dos corpos de prova. Estes indutores podem ser furos no disco ou pinos montados sobre o mesmo. A máquina usada nos experimentos deste trabalho permite a utilização de ambos os tipos de indutores.

Alguns autores, tais como Rao et al. (1980); e Vivekananda et al.(1983) utilizaram a câmara em ferro fundido, e pinos indutores montados sobre o disco. Na versão atual, tanto o disco como a câmara são de aço inoxidável, que é um material mais resistente a erosão por cavitação. O disco com os pinos indutores pode ser visto na Fig. 1.

A versão atual, (Bazanini; Bressan, 2007) é mais compacta que as anteriores: a câmara e o disco são menores. O disco possui um diâmetro de 250 mm, e o eixo é mais curto. Pela utilização do dispositivo denominado “intermediário” pode-se eliminar o mancal e o acoplamento, reduzindo as perdas por transmissão e evitando problemas de alinhamento de eixo. Este “intermediário” é usualmente empregado como elemento de ligação entre a bomba e o motor elétrico. No equipamento atual, a câmara substitui a bomba, resultando numa condição mais realista para se estudar o fenômeno da erosão por cavitação. A tampa frontal é feita de acrílico para visualizar a formação das bolhas e o escoamento. A parte frontal da câmara bem como a formação das bolhas pode ser vista na Fig. 2.

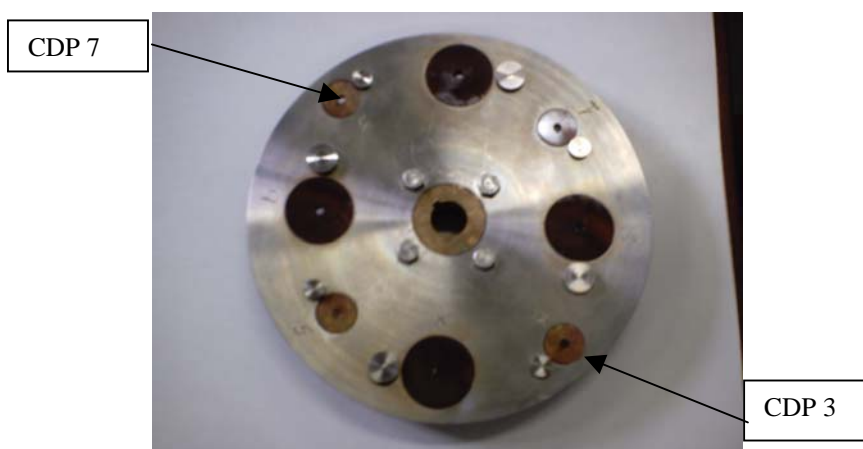


Figura 1. Disco rotativo com pinos indutores. CDP3 = corpo de prova 3. CDP7 = corpo de prova 7.

Foram soldadas oito chicanas igualmente espaçadas ao longo da câmara, a uma distância de 18 mm do disco, com a função de minimizar os efeitos de rotação do fluido, confinando a maioria das bolhas na região de colapso (sobre os corpos de prova). Estas chicanas podem ser parcialmente vistas na Fig. 2.



Figura 2. Parte frontal da câmara e bolhas.

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. Uma vista geral do equipamento está mostrada na Fig. 3. O inversor de frequência pode ser visto ao fundo.

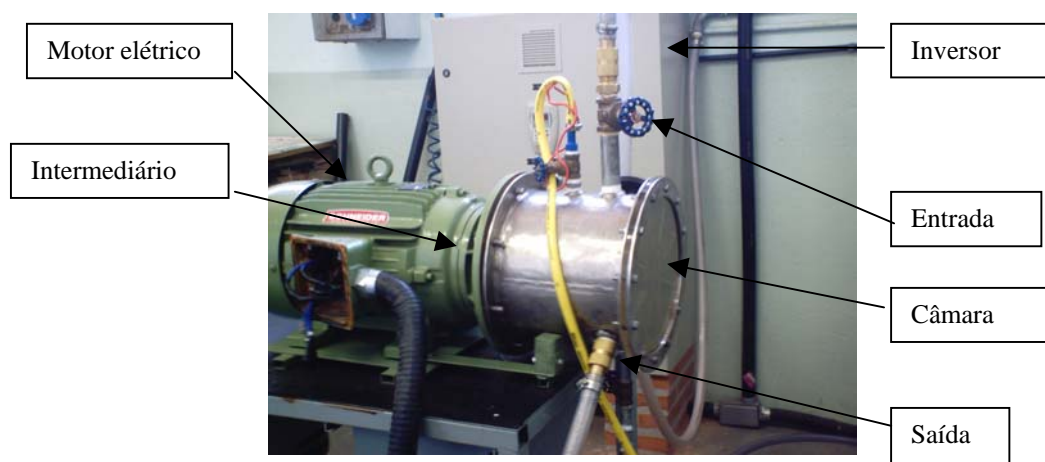


Figura 3. Vista geral do dispositivo.

Para controlar a vazão de água de resfriamento da câmara, são utilizadas válvulas de entrada e saída. A temperatura e a pressão são monitoradas por um termômetro e um manômetro de escalas 0-100 °C e 0-3 bar, respectivamente. A rotação do motor e o consumo de potência são registrados pelo inversor de frequência.

A cada 5 horas de operação em condições de cavitação, os corpos de prova são retirados, limpos por ultrassom, secados e pesados para se obter a perda de massa ocorrida no processo utilizando uma balança digital de resolução 0,1 mg. A precisão nas medidas de $\pm 0,2$ mg.

Foram efetuados gráficos de perda de massa em função do tempo para os corpos de prova em bronze.

Os “pits” de erosão foram observados através com auxílio de um microscópio eletrônico. Os corpos de prova analisados são de bronze e ferro fundido nodular. Ambos os tipos de indutores foram utilizados: pinos e furos.

3. RESULTADOS

Nestes experimentos foram ensaiados bronze e ferro fundido nodular, num total de até 30 horas de ensaio. A rotação utilizada nos ensaios foi de 4400 rpm, o que resultou numa velocidade de escoamento de 47,9 m/s sobre os corpos de prova. Os experimentos foram conduzidos à pressão atmosférica, e foram registradas temperaturas na câmara de 37 °C quando operando com furos indutores, e de 50 °C com pinos indutores. As condições de ensaio e operação estão descritas na Tab. 1. Nestes primeiros ensaios comparativos, pôde-se observar um consumo de potência maior ao se utilizar os pinos indutores, sem um aumento aparente na taxa de erosão. Tal fato deve-se ao coeficiente de arraste adicional dos pinos indutores, bem como de eventual aumento da turbulência causada pelos mesmos no escoamento.

Tabela 1. Condições operacionais do dispositivo a disco rotativo, operando com pinos e furos como indutores de cavitação.

Indutores de cavitação	Potencia total consumida (Kw)	Potencia efetiva consumida (Kw)	Rotação do disco (rpm)	Fluxo de água de resfriamento (litros/min)	Temperatura média da água (°C)
pinos	23.0	22.4	4400	8	50
furos	14.6	14.0	4400	6	37

Os corpos de prova de bronze utilizados no ensaio foram submetidos a uma caracterização através de um espectrômetro (Optical Emission Spectrometer OES-5500 II), para identificação dos elementos químicos predominantes. Também realizou-se ensaio de microdureza antes do ensaio de cavitação, utilizando um durômetro de microdureza Vickers (mHV). Os valores encontrados para o bronze podem ser vistos na tabela 2.

Tabela 2. Composição química e microdureza do bronze.

Elementos	Pb	Zn	Sn	Ni	Fe	P	Si
%	14,900	5,603	3,066	0,191	0,089	0,012	0,005
Total Elem.				23,866 %			
% de Cu				76,134 %			
Total				100,000 %			
Microdureza Vickers (mHV(0,300))				88,02			

Uma das imagens obtidas para o ferro fundido nodular está mostrada na Fig. 4, e para o bronze as imagens estão nas Figuras 5 e 6. Na Fig. 4, é possível visualizar a formação de óxido e uma cratera (pit) causada pela erosão por cavitação, fundamentalmente por um micro-jato (Fujikawa; Akamatsu, 1980). Esta oxidação mascara a análise de perda de massa para o ferro fundido, pois se por um lado se tem perda de massa por erosão, por outro existe um ganho devido a oxidação do ferro fundido. Assim sendo, nossa atenção estará focada nos corpos de prova de bronze, os quais apresentaram perda de massa contínua com o tempo.

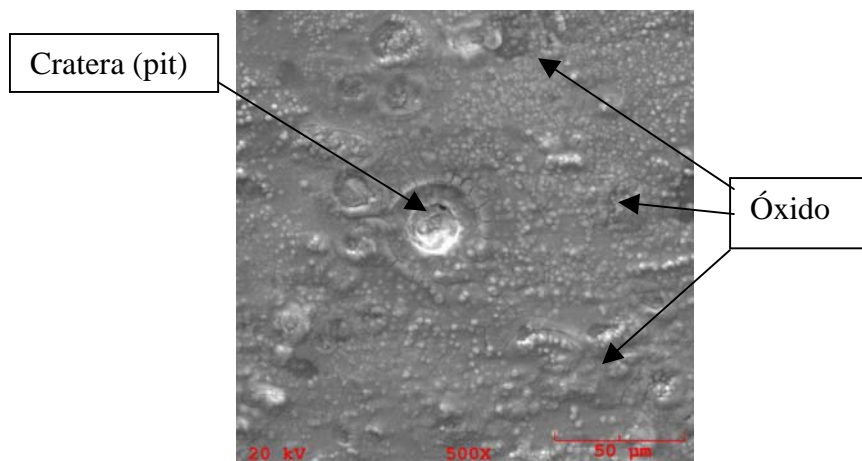


Figura 4. Ferro fundido nodular após 10 hs de ensaio, ampliação: 500 x, furo indutor.

As figuras 5 e 6 a seguir foram obtidas para o bronze. Nelas pode-se observar as áreas que sofreram erosão por cavitação, utilizando pino e furo como indutores da cavitação, respectivamente. Tanto o pino como o furo mostraram-se eficientes na produção das bolhas e da erosão por cavitação.

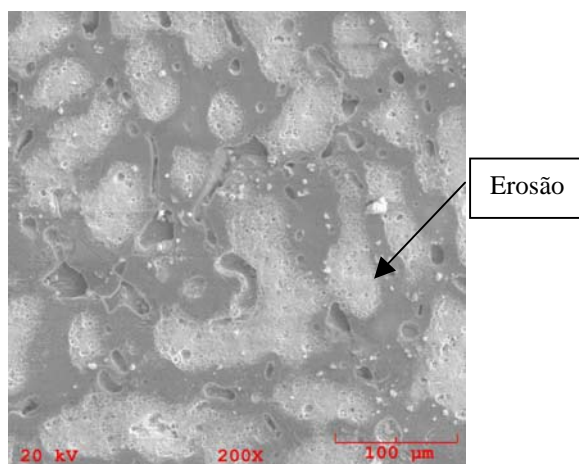


Figura 5. Bronze, após 15 hs de ensaio, ampliação: 200 x, pino indutor.

A partir das imagens obtidas com auxílio do microscópio eletrônico, pode-se observar o fenômeno de erosão por cavitação (mais claramente nas Figuras 5 e 6, para o bronze), causados por ondas de choque e micro-jatos, resultantes do colapso das bolhas. No ferro fundido nodular, estas observações são dificultadas pela oxidação dos corpos de prova, muito embora uma cratera (ou “pit”) possa ser observada na Figura 4.

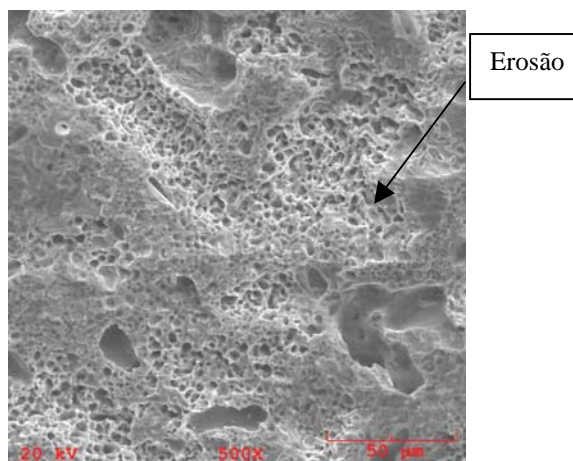


Figura 6. Bronze, após 25 hs de ensaio, ampliação: 500 x, furo indutor.

Gráficos de perda de massa em função do tempo foram elaborados apenas para o bronze. Foram utilizados os dois tipos de indutores de cavitação: pinos e furos. Estes gráficos estão sintetizados na Figura 7 abaixo. Ambos os indutores mostraram-se eficientes, de tal forma que ainda não se pode afirmar se algum tipo de indutor é mais eficiente em causar erosão por cavitação nos corpos de prova. O gráfico mostrado na Figura 7 não é conclusivo neste aspecto.

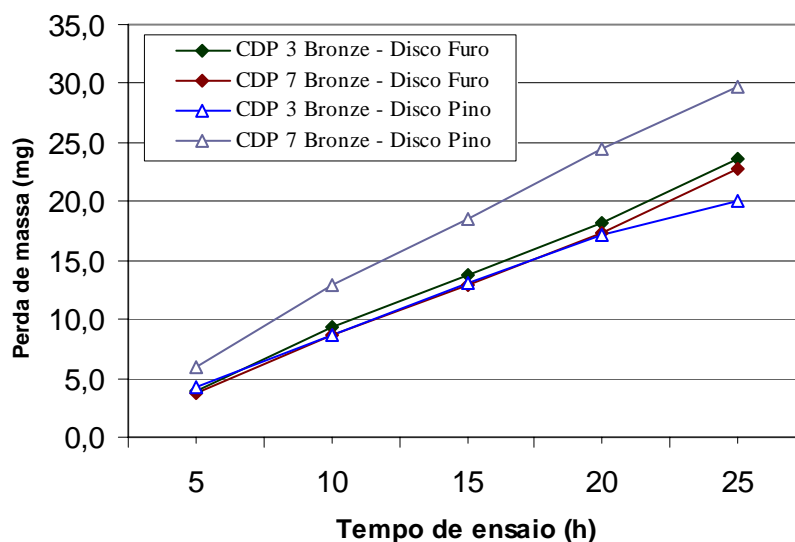
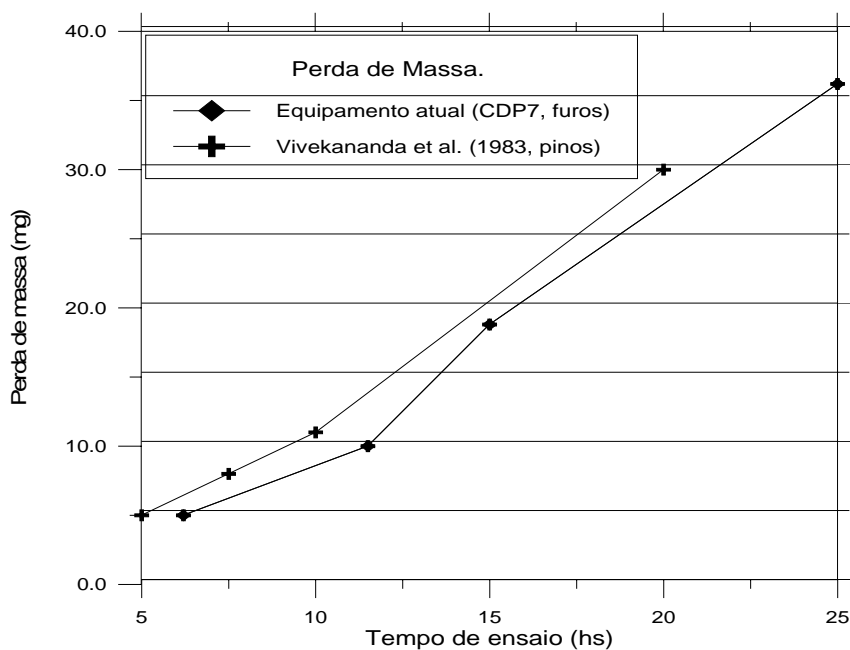


Figura 7. Comparação entre curvas experimentais do bronze obtidas na máquina de ensaio de erosão por cavitação, disco rotativo com furos e com pinos indutores.

Embora não se disponha na literatura de dados para o bronze utilizando o disco rotativo, existem alguns dados envolvendo material de composição química e dureza similar, tal como o latão. Estes dados, juntamente com os realizados com o equipamento apresentado aqui podem ser vistos na Tabela 3 e na Figura 8 abaixo, a título de comparação.

Tabela 3. Perda de massa em corpos de prova de latão.

Trabalho	Massa perdida (mg)/horas de ensaio	Vel. tangencial (m/s)	Tipo de indutor	Diâmetro do corpo de prova (mm)
Atual:	6.2/5 37/25	47.9	pinos e furos	25.4
Rao et al., 1980	42.5/25	53.8	pinos	63.5
Zhiye, 1983	5.8/4.2	43.2	furos	não informado
Vivekananda et al., 1983	30/20	38.0	pinos	63.5

**Figura 8. Perda de massa para o latão obtida em equipamentos a disco rotativo, para efeito de comparação.**

Nestes primeiros ensaios com furos e pinos, os furos apresentaram menor desvio padrão para os valores de perda de massa em função do tempo, devido a menor uniformidade dos dados obtidos com os pinos indutores. A perda de massa obtida está dentro do esperado, embora ainda não seja possível dizer qual indutor produz uma taxa maior de erosão, já que os resultados obtidos não foram determinantes neste aspecto. Talvez um número maior de ensaios possa apontar algo nesta direção.

4. CONCLUSÕES

O equipamento mostrou-se eficaz na produção da erosão por cavitação, (sabidamente ocasionada por ondas de choque e micro-jatos), à exceção de materiais com alto poder de oxidação, pois esta oxidação mascara a perda de massa por erosão. Assim, contribuição da formação de óxido não pôde ser avaliada. Poderia ter sido utilizado inibidores de corrosão na água de ensaio, mas isto teria levado a um desvio das condições reais de operação de uma bomba d'água.

Ambos os tipos de indutores de cavitação, pinos e furos, mostraram-se eficientes na geração das bolhas e na produção de erosão por cavitação.

Embora não exista na literatura dados nas condições exatas e para os mesmos materiais do ensaio atual, os valores de perda de massa podem ser considerados dentro do esperado, pois apresentam valores próximos para materiais de composição similar. Mas para uma comparação mais acurada, dever-se-ia dispor de dados nas mesmas condições de velocidade tangencial, composição química, diâmetro de corpo de prova, etc. Por exemplo, embora o tamanho do corpo de prova tem a tendência de aumentar a perda de massa por ter uma região maior exposta ao escoamento cavitante, uma menor velocidade tangencial tende a reduzir a retirada de material da superfície do corpo de prova por cavitação.

Devido a menor uniformidade dos dados obtidos com os pinos indutores, os furos apresentaram menor desvio padrão para os valores de perda de massa em função do tempo.

Observou-se um consumo de potência maior ao se utilizar os pinos indutores, sem um aumento aparente na taxa de erosão. Um número maior de ensaios com pinos e furos se faz necessário para se determinar qual o indutor mais eficiente na produção da erosão por cavitação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar sua gratidão ao Sr. Roberto Schneider e às Indústrias Schneider S.A., nossa parceira neste projeto, tanto pelo suporte técnico como pelas valiosas sugestões apresentadas no decorrer do projeto. Também gostaríamos de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelos recursos liberados para este projeto.

6. REFERÊNCIAS

- Bazanini, G., 2003, Temperature Calculation Inside Collapsing Bubbles in Compressible Liquids, 2nd Brazilian Congress on Manufacturing Engineering, Uberlândia, Brazil.
- Bazanini, G. and Bressan, J.D., 2007, Preliminary Experience With a New Compact Disk Apparatus For Cavitation Erosion Studies, *Wear* 263, pp. 251-257.
- Fujikawa, T. Akamatsu, 1980, On the Mechanisms of Cavitation Bubble Collapse, IAHR Symposium, Tokyo, Japan, pp. 91-102.
- Hammitt, 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, June.
- Knapp, R.P., Daily, J.W. and Hammitt, F.G., 1970, Cavitation. McGraw-Hill.
- Wood, G.M., Knudsen, L.K. and Hammitt, F.G., March, 1967, Cavitation Damage Studies with Rotating Disk in Water. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering. pp. 98-110.
- 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.
- Shervani-Tabar, M.T., Rezaee-Barmi, A. and Mahmoudi, S.M.S., 2003, Velocity Field and Pressure Distribution Around Two Parts of a Cavitation Bubble After its Splitting Near a Rigid Boundary, Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan.
- 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.
- Young, F.R., 1989, Cavitation, McGraw-Hill Book Company.
- Zhiye, J., 1983, An Experimental Investigation on Cavitation Erosion for Propeller Alloys, China Ship Scientific Research Center Report, China.
- Zhang, J., Richardson, M.O.W., Wilcox, G.D. and Wang, X., 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.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

CAVITATION EROSION IN BRONZE AND CAST IRON SPECIMENS USING THE ROTATING DISK DEVICE

Gil Bazanini, dem2gb@joinville.udesc.br¹

José Divo Bressan, dem2jdb@joinville.udesc.br²

Charles Zanini Miranda, charles_zanini@hotmail.com³

¹Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Campus Universitário – 89223-100 – Joinville – SC, Brasil

²Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Campus Universitário – 89223-100 – Joinville – SC, Brasil

³Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Campus Universitário – 89223-100 – Joinville – SC, Brasil

Abstract. *In the rotating disk device, a steel disk with cavitation inducers and specimens fixed on it rotates inside a water chamber to provide the cavitating flow and erosion. In this work, a new concept of the horizontal axis rotating disk device is presented and discussed as well as some preliminary results obtained from its operation. The purpose of the device is to generate the bubbles that will erode the specimens fastened in the disk surface and close to the bubbles inducers. To prevent vibration problems, each pair of holes or protruding pins and specimens are diametrically opposite.*

When bubbles collapse near solid surfaces, damage may occur. Two are the already known damage mechanisms: liquid micro-jets impingement and shock waves. The micro-jets are caused by the bubble splitting in two parts near the solid surface (influenced by the surface proximity) in the final stages of the collapse and the shock waves are caused by instant variable pressure fields (the time necessary for the collapse is about few milliseconds). These micro-jets and shock waves are responsible for loss of material from the surface, basically by wear failure. After several hours of device operation in cavitating conditions, the specimens were weighted to obtain the mass loss by erosion, comparing it to the initial weight. Pitting formation resulting from the erosion process could also be seen with the aid of a scanning electronic microscope. Erosion and pitting formation were observed in cast iron and bronze specimens, as well as the mass loss due to the cavitation erosion process for the bronze specimens.

Keywords: *wear, erosion, cavitation, bronze.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.