

## Dados Técnicos e Erosão com o Dispositivo a Disco Rotativo

### Technical Data and Erosion with the Rotating Disk Test Rig

Gil Bazanini, Nicodemus Neto da Costa Lima

[gil.bazanini@udesc.br](mailto:gil.bazanini@udesc.br) , [nicodemus.lima@udesc.br](mailto:nicodemus.lima@udesc.br)

Universidade do Estado de Santa Catarina; Rua Paulo Malschitzki, 200 - Campus  
Universitário Prof. Avelino Marcante - Bairro Zona Industrial Norte - Joinville - SC -  
Brasil CEP: 89.219-710 - Fone:(47) 3481-7900.

**Resumo.** *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, com menor consumo de potência, 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*

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

**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.*

*Keywords: wear, erosion, cavitation.*

## **1. Introdução.**

A máquina de ensaio de erosão por cavitação foi desenvolvida com o objetivo de simular de modo acelerado em com relativo baixo consumo de energia (menor potência efetiva consumida) o fenômeno da cavitação em corpos de provas metálicos. Desta forma pode-se estudar o comportamento de diversos materiais metálicos quando expostos ao processo de erosão por cavitação. Este ensaio visa o estudo e o desenvolvimento de materiais resistentes à erosão por cavitação para aplicação na fabricação de diversos componentes metálicos que compõem os mais variados tipos de máquinas hidráulicas.

Através da análise da perda de massa do corpo de prova, após determinados períodos de ensaio, em conjunto com a análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV) da superfície exposta à erosão por cavitação, pode-se analisar e comparar diversos materiais quando submetidos a este ensaio e estudar os mecanismos e as alterações superficiais provocadas pelo fenômeno da erosão por cavitação.

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.

## **2. Características do Equipamento.**

A máquina de ensaio de erosão por cavitação trata de um equipamento que consiste de uma câmara de aço inox e um disco rotativo onde serão fixados os diversos corpos de prova a serem estudados. O disco é colocado dentro da câmara, onde fica imerso em água e é submetido a uma rotação através de um motor elétrico. A cavitação é provocada por furos ou pinos (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.

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.

O equipamento é constituído por um motor elétrico de 30 cv. Este motor é acionado através de um painel elétrico, onde através de um inversor de frequência pode-se controlar diversos parâmetros como a rotação, que durante o ensaio deve ser mantida constante; o controle da rotação é feito através de um botão no painel elétrico do inversor.

Acoplado ao eixo do motor elétrico é colocado um disco de aço inox de aproximadamente 250 mm de diâmetro. Neste disco pode-se colocar 2 pares de corpos de prova com 25,4 mm de diâmetro e 2 pares com 43,4 mm de diâmetro, totalizando 8 corpos de prova utilizados no ensaio, diametralmente opostos entre si para evitar desbalanceamento do disco durante o ensaio.

O disco de inox está confinado dentro da câmara, também de inox, que é um material mais resistente aos efeitos da cavitação. Esta câmara possui oito aletas internas igualmente espaçadas e soldadas na parte interior da câmara com objetivo de minimizar os efeitos da rotação do fluido. Na frente desta câmara há uma tampa de acrílico para visualização da formação das bolhas. A vedação da câmara entre a câmara e o intermediário é realizada por meio de um selo mecânico e um anel de vedação (o'ring), e entre a câmara e a tampa externa de acrílico por papelão hidráulico.

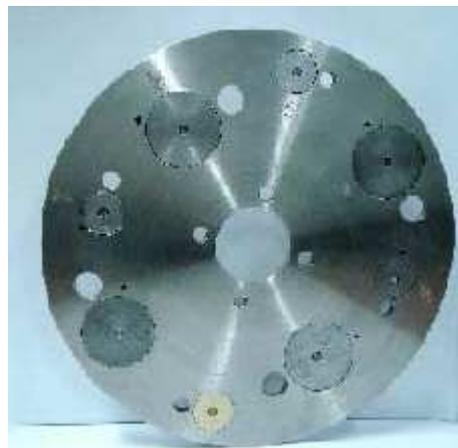
Como já mencionado, a câmara é preenchida com água corrente da rede de abastecimento. Para o suprimento constante de água é utilizada uma caixa de água onde, através de uma válvula instalada na parte superior e outra na parte inferior da câmara pode-se controlar o fluxo da entrada e saída de água da câmara, a fim de manter uma circulação de água constante na câmara, visando a refrigeração do sistema.

Na parte superior da câmara também há uma válvula para respiro e na lateral da câmara tem-se um termômetro para medição da temperatura da água durante o ensaio, e um manômetro para medição da pressão no interior da câmara.

Na figura 1 pode-se verificar o equipamento e seus acessórios e na figura 2 mostra-se a disposição dos corpos de prova no disco de aço inox. Também nota-se a presença dos furos indutores das bolhas; nestes furos podem ser fixados pinos que também possuem a função de induzir a formação das bolhas, através da formação de uma esteira a jusante dos mesmos.



**Figura 1. Foto do equipamento de ensaio de erosão por cavitação.**



**Figura 2. Disco de aço inox com disposição dos corpos de prova.**

A figura 3 mostra uma visão frontal do equipamento, onde pode-se visualizar a formação das bolhas. Nota-se também a presença das aletas.



Figura 3. Foto frontal do equipamento de ensaio de erosão por cavitação, com a formação das bolhas.

### 3. Dimensões do Disco Rotativo de Inox.

No desenho esquemático abaixo, figura 4, é possível visualizar as principais dimensões do disco de inox utilizado para alojar os corpos de prova do ensaio de erosão por cavitação.

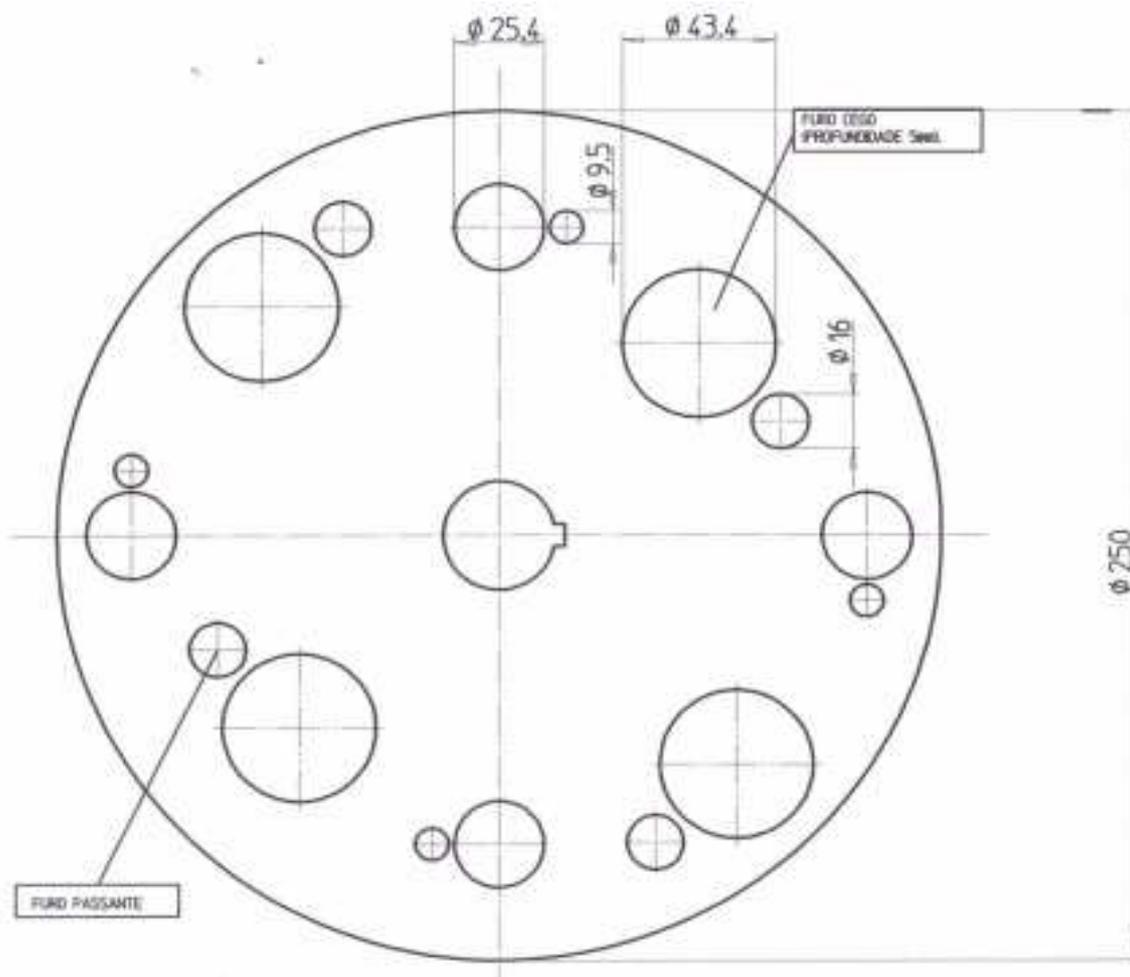


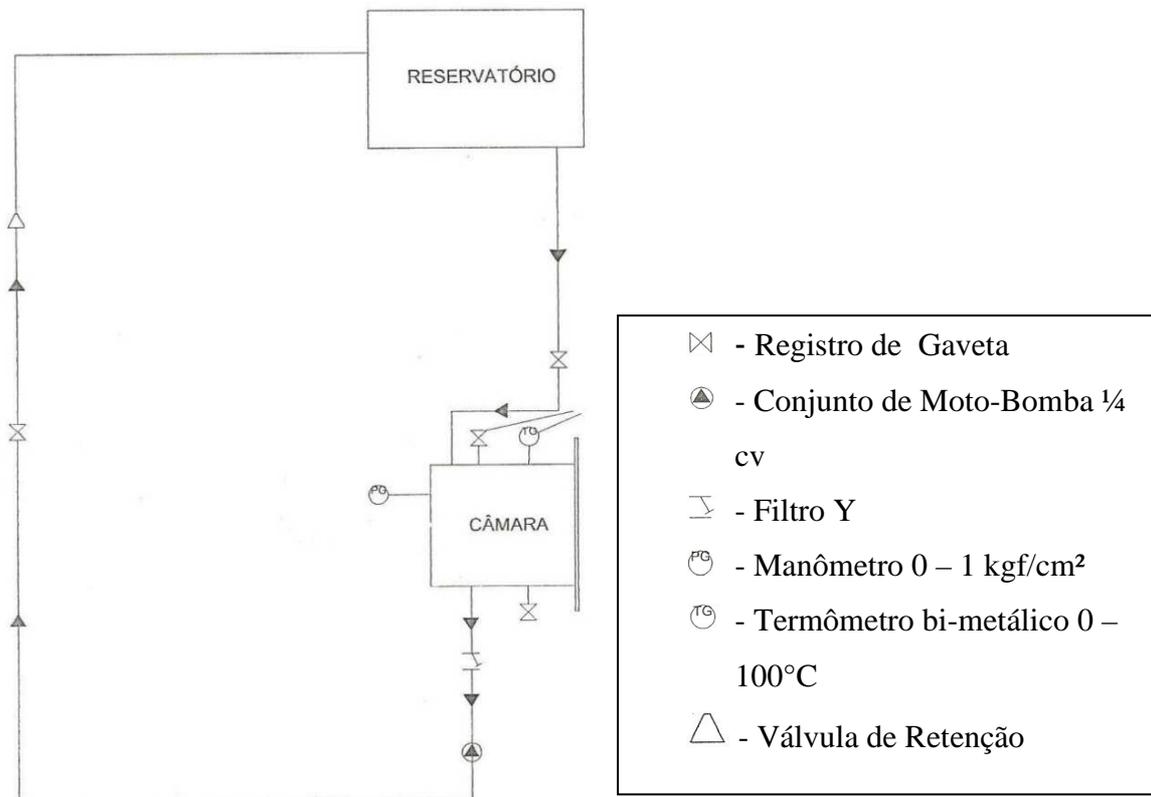
Figura 4. Dimensões (mm) do Disco de Inox.

Observa-se que os corpos de prova possuem posições equidistantes em relação ao centro do disco.

**Tabela 1. Comparação entre os dispositivos**

Trabalho	Rotação do motor elétrico (rpm)	Potência efetiva motor elétrico (kw)	Diâmetro da câmara (mm)	Comprimento da câmara (mm)
Atual	4400	22	273	245
Rao et al., 1980	2925	26	457	254
Vivekananda et al., 1983	2880	26	457	254
Zhiye, 1983	2950	30	462	280
Ramamurthy, Bhaskaran., 1975	1800	74.6	610	-
Zhang et al., 1996	3000	-	350	-

Na Figura 5 pode-se observar o esquema do sistema que realiza a refrigeração do dispositivo.



**Figura 5 – Esquema do sistema de refrigeração do dispositivo.**

**Tabela 2. Condições operacionais da máquina de ensaio de cavitação de disco com furos indutores de cavitação.**

Potencia total consumida (Kw)	Potencia efetiva consumida (Kw)	Velocidade do disco rotativo (rpm)	Fluxo de água de resfriamento (litros/min)	Temperatura média da água (°C)
10.2	9.6	3600	6	37
14.6	14.0	4400	6	37

**Tabela 3. Condições operacionais da máquina de ensaio de cavitação de disco com pinos indutores de cavitação.**

Potencia total consumida (Kw)	Potencia efetiva consumida (Kw)	Velocidade do disco rotativo (rpm)	Fluxo de água de resfriamento (litros/min)	Temperatura média da água (°C)
23.0	22.4	4400	8	50

#### 4. Altas Temperaturas.

O processo de compressão da bolha, ou cavidade, composta por ar e vapor provoca a elevação contínua da temperatura da mesma, tornando o processo um fenômeno de alta temperatura localizada. As altas temperaturas envolvidas no fenômeno, podendo chegar a 2500 K no interior da bolha [Bazanini et al., 2017], levam à formação de uma camada limite térmica de espessura variável com o tempo (subentenda-se com o raio da bolha). Esta camada limite térmica pode ser estimada pela Equação (1) a seguir [Frank;Michel, 2005]:

$$\delta_T = \sqrt{\frac{\alpha_l}{t}} \quad (1)$$

Onde  $\delta_T$  é a espessura da camada limite térmica,  $\alpha_l$  é a difusividade térmica do líquido e  $t$  é o tempo de duração do colapso.

#### 5. Resultados.

##### 5.1. Camada Limite Térmica.

Nos estágios finais do colapso da bolha, quando a mesma implode na superfície sólida, esta camada limite pode “marcar” a superfície do corpo de prova. Um cálculo típico seria o do colapso em água de uma bolha de raio inicial 3,5 mm, cujo tempo estimado de colapso é de 0,7 ms [Bazanini, 2003]. Com tais informações e utilizando a Equação

(1), chega-se a um valor aproximado de 15 mm para a camada limite, onde, no final da mesma, a temperatura chegaria próxima à temperatura ambiente de 300 K.

## 5.2. Perda de Massa.

A tabela abaixo mostra as perdas de massa obtidas nos ensaios de erosão com os respectivos corpos de prova. Note-se que a partir de certo instante, os corpos em ferro fundido passam a ter um ganho de massa devido à oxidação, sobrepondo-se à perda por erosão, não sendo possível determinar a perda exata por erosão. Os corpos em alumínio tiveram uma pequena perda de massa, enquanto que os de bronze sofreram maior perda de massa.

**Tabela 4. Variação de massa cumulativa perdida dos corpos de prova submetidos ao ensaio de cavitação, disco rotativo com furos indutores.**

Tempo (h)	Variação da massa dos CDP's (mg)							
	CDP 1 Alumínio -2	CDP 2 Ferro fundido cemen- ta do	CDP 3 Bronze	CDP 4 Ferro fundido	CDP 5 Alumínio -2	CDP 6 Ferro fundido cemen- ta do	CDP 7 Bronze	CDP 8 Ferro fundido
5	0,7	2,6	3,9	-0,2	0,4	2,3	3,8	-0,6
10	1,0	2,7	9,3	0,0	0,4	3,0	8,7	-1,4
15	1,7	2,7	13,8	-1,6	1,9	2,9	12,9	-0,7
20	1,9	2,7	18,1	-2,3	2,3	2,7	17,4	-1,8
25	2,1	3,1	23,6	-3,4	2,4	2,9	22,7	-2,5

## 5.3. Danos por Cavitação.

Nas Figuras 6 a 8, pode-se observar os resultados dos ensaios.

Para o alumínio (Figura 6), embora sem perda acentuada de massa devido à formação de alumina ( $Al_2O_3$ ), de alta dureza superficial, houve danos com a formação de crateras, ou "pits", resultados da erosão por cavitação.

Já o bronze (Figura 7) sofreu erosão acentuada, resultando em maior perda de massa, enquanto que para o ferro fundido (Figura 8) não foi possível determinar a perda de massa, devido ao ganho de massa por oxidação.

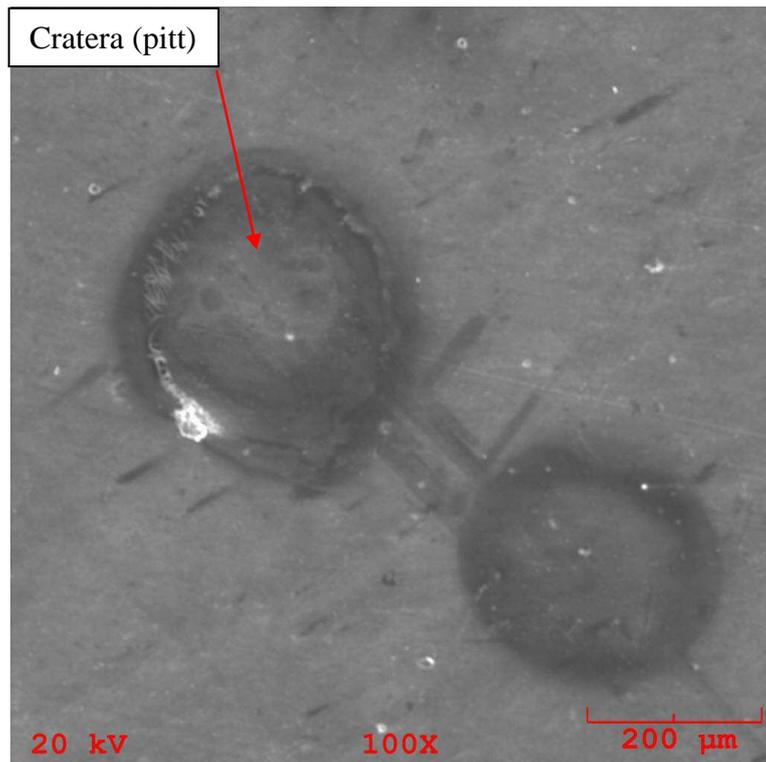


Figura 6. Alumínio após 5 horas de ensaio em condições de cavitação.

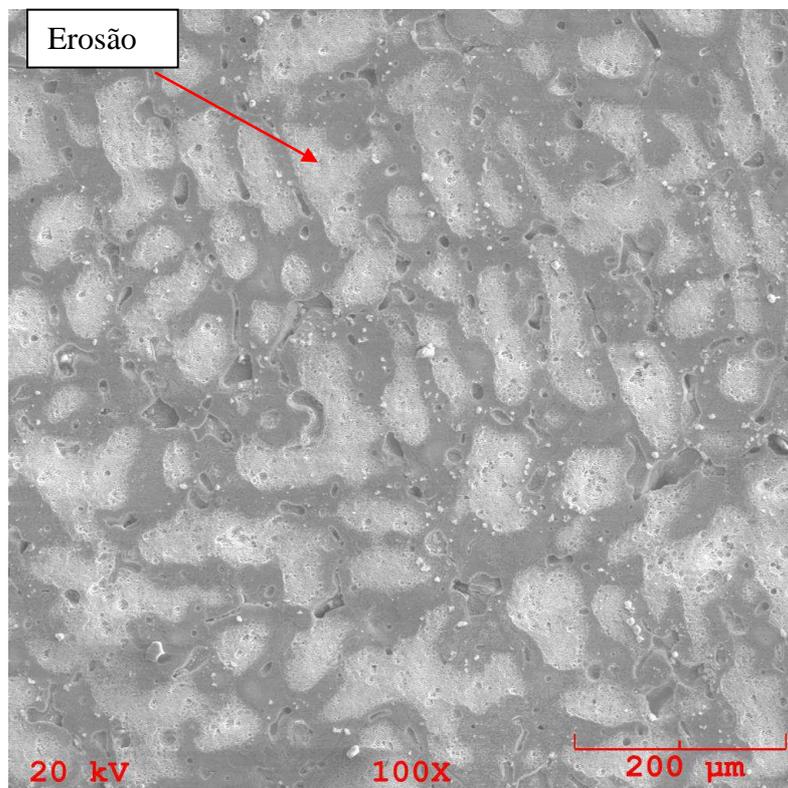
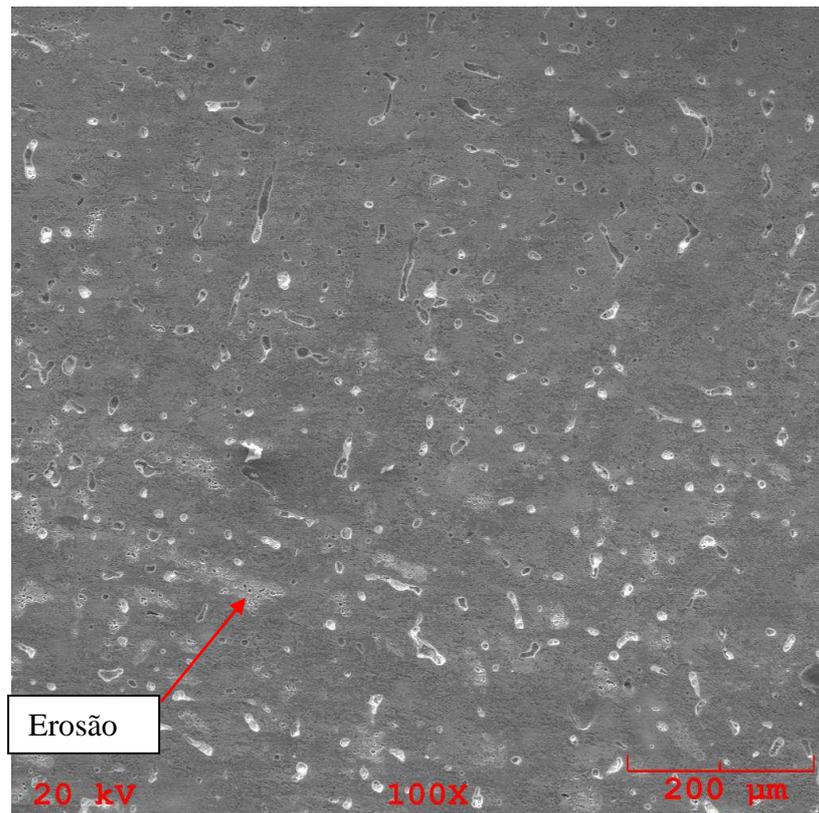


Figura 7. Bronze após 15 horas de ensaio em condições de cavitação.



**Figura 8. Ferro fundido cementado após 5 horas de ensaio em condições de cavitação**

## **6. Conclusões.**

O equipamento mostrou-se eficiente para os ensaios de erosão pretendidos com um consumo menor de potência para aos mesmos períodos de ensaios.

Após o colapso das bolhas, as influências da alta temperatura podem ser percebidas em regiões que vão desde o centro da bolha até um pouco além dos limites da mesma, estando contidas dentro da espessura da camada limite térmica.

A baixa taxa de perda de massa do alumínio deve-se à formação de alumina, de alta dureza superficial, resistente portanto, a fenômenos superficiais.

Para o ferro fundido não foi possível determinar a perda de massa correta devido à erosão, por causa do ganho de massa devido à oxidação.

No caso do bronze foi observada uma elevada perda de massa por erosão por cavitação, como esperado.

## **7. Referências.**

Bazanini, G. (2003). Temperature Calculation Inside Collapsing Bubbles in Compressible Liquids, *2<sup>nd</sup> Brazilian Congress on Manufacturing Engineering*, Uberlandia, Brazil.

Bazanini, G. (2017). Barbosa Jr., A.F., Lima, N.N.C. Erosion and Corrosion by Micro-jets and High Temperature Cavity Impaction on Metal Surfaces, *9<sup>th</sup> Brazilian Congress on Manufacturing Engineering*, Joinville, Brazil.

Frank, J.C., Michell, J. P. (2005) *Fundamentals of Cavitation*. Kluwer Publishers.

- Ramamurthy, A.S. and Bhaskaran, P., September. (1975). Source Size and Velocity Effects on Cavitation Damage, *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineeing*, 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.
- 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.
- 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.

## **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.