

# MONITORAMENTO POR PERFILOMETRIA DA EROSÃO CAVITACIONAL EM AÇOS DE DIFERENTES TEORES DE CARBONO<sup>1</sup>

*Robson Leandro Silva<sup>2</sup>  
Geralda Cristina Durães de Godoy<sup>3</sup>*

O presente trabalho tem como objetivo monitorar a perda de massa de aços com diferentes teores de carbono e a mudança da textura superficial quando submetidos à cavitação. Para isso fez-se ensaios de cavitação, análise de rugosidade através de testes de perfilometria e análise de imagens obtidas com a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foram usados dois tipos de aços carbono: ABNT 1010 e ABNT 1045, ambos recozidos. Com o teste de cavitação obteve-se um gráfico da perda acumulada de massa em função do tempo de ensaio e através deste gráfico foi possível determinar a existência de uma relação linear correspondente a um período de incubação para ambos os aços. Com o teste de perfilometria obteve-se imagens topográficas em 3D da superfície dos aços podendo-se realizar uma comparação da mudança da textura superficial com o tempo de cavitação. Também foi possível observar os parâmetros de rugosidade e ressaltar o período de incubação característico encontrado no teste de cavitação. Com as imagens do MEV, observou-se que, com o avanço do tempo de cavitação a região da ferrita pro-eutetóide vai sendo consumida, deixando assim a região perlítica mais nítida. Essas imagens e os demais testes comprovaram que o aço com um maior teor de carbono, e que conseqüentemente possui maior quantidade de perlita, resiste um tempo maior ao efeito da cavitação.

Palavras-chave: cavitação, perfilometria, período de incubação, aço-carbono.

- 1- 5º ENEMET- Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 26 a 29 de Julho de 2005, Belo Horizonte - MG.
- 2- Graduando UFMG.
- 3- Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> UFMG.

## 1. Introdução

Os materiais em geral estão sujeitos a diversos tipos de desgaste de acordo com as suas aplicações. Esses desgastes podem ser corrosivo, abrasivo, por oxidação, e por outros métodos de contato. Um dos tipos de desgaste de grande importância na indústria é a erosão [1]. Erosão é um modo de desgaste causado pela colisão de partículas duras que podem ser carregadas por um jato de gás ou por um líquido fluindo contra uma superfície [2,3]. Em vários ramos industriais, como em turbinas hidrelétricas e no setor petroquímico, existe um tipo de erosão de grande relevância, conhecido como cavitação. Cavitação é o desgaste provocado em uma superfície metálica devido a ondas de choque do líquido, oriundas do colapso de bolhas gasosas (cavidades). Este fenômeno surge em zonas de baixa pressão onde o líquido entra em ebulição formando bolhas, as quais ao tomarem contato com zonas de pressão mais alta são destruídas instantaneamente criando as ondas de choque que provocam a remoção de material na superfície [4]. Um dos materiais mais usados onde este está sujeito à cavitação é o aço. Por esse motivo o estudo do efeito da cavitação nos aços se faz importante. Os aços têm um determinado comportamento inicial ao desgaste conhecido como período de incubação.

Sendo assim este trabalho tem como objetivo utilizar a técnica de perfilometria para determinar o período de incubação e também estudar o comportamento de aços-carbono em relação à cavitação.

## 2. Materiais e métodos.

Foram usados dois tipos de aços: ABNT 1010 e ABNT 1045, sendo que ambos os aços tiveram o tratamento de recozimento. Os corpos de prova de aço foram usinados e polidos para a realização dos testes e está ilustrado na figura 1. Os corpos de prova têm formato cilíndrico com 15,2mm de altura e 16mm de diâmetro da base

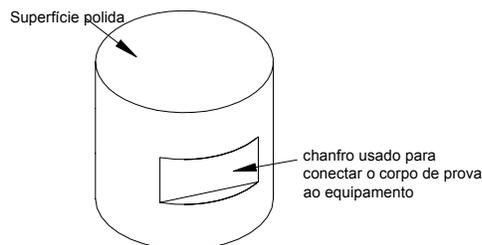


Figura 1 – Corpo de prova de aço utilizado nos ensaios.

O teste de microdureza Vickers foi realizado com o Microdurômetro da marca TESTER da FUTURE-TECH. Foi utilizada uma carga de 9,8N durante um tempo de 15s na indentação [5]. Para a realização do teste de cavitação, o equipamento utilizado foi o TELSONIC. Este equipamento usa um transdutor ultra-sônico de 20KHz e com potência de saída entre 250W e 500W. Este transdutor é ligado a um transformador de velocidade, onde a amostra é fixada. A superfície da amostra é imersa em um recipiente com água destilada e a temperatura da água durante o teste é mantida em torno de 22 °C [6]. A figura 2 esquematiza o teste de cavitação. Foi utilizada também para este teste uma balança digital com medida em gramas e com cinco algarismos significativos.

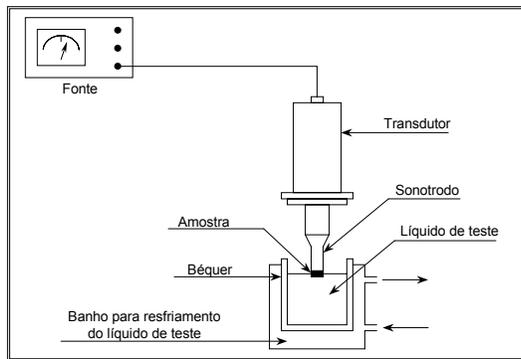


Figura 2 – Esquema de um equipamento utilizado no ensaio de cavitação [6].

A caracterização da superfície dos aços se faz através da técnica de “perfilometria”. O perfilômetro utilizado no teste de perfilometria é da Hommelwerke T4000. A área varrida foi de 8mm x 8mm, com velocidade de medição de 0,5mm/s.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado foi: Modelo JEOL JSM 6360LV.

Primeiramente pesou-se os corpos de prova antes dos testes para obter a massa correspondente ao tempo inicial. Varreu-se a superfície destes corpos de prova, obtendo o perfil superficial inicial. Após o teste de perfilometria, realizou-se então o primeiro teste de cavitação com duração de 10min. Depois do primeiro teste de cavitação, as amostras foram pesadas e varridas novamente. Este ciclo de pesagem, perfilometria e cavitação foram realizados repetidamente em intervalos de 10 em 10min até um tempo de 2h de teste. Após este tempo o intervalo foi de 30min até 3h e daí em diante fez-se os experimentos em intervalos de 1h até atingir o tempo de 5h de teste para o aço 1010 e de 9h de teste para o aço 1045.

### 3. Resultados e discussões.

Um valor de microdureza igual a 205HV foi determinado para o aço 1010 enquanto para o aço 1045 obteve-se microdureza igual a 277HV. Como ambos os aços tinham o mesmo tratamento térmico inicial (recozimento completo), conclui-se que o aço 1045 é mais duro do que o aço 1010, desde que apresentou uma quantidade maior de perlita.

Através do ensaio de cavitação, a perda de massa foi monitorada sendo possível determinar o período de incubação. O período de incubação é definido como sendo o estágio inicial do ensaio de cavitação [7], onde não há uma perda acelerada de massa. Esse estágio inicial ainda não é muito bem determinado, pois depende muito do procedimento matemático utilizado para determiná-lo. Uma das formas de estimar este período é utilizando a função distribuição de Weibull [7] para estabelecer uma função de ajuste aos pontos experimentais e a partir da mesma determinar o tempo associado a uma profundidade de 1µm de erosão. Neste trabalho utilizou-se uma nova metodologia para a sua determinação. A partir de análises estatísticas de regressão não linear segmentada [8] determinou-se os diferentes regimes de desgaste existentes no processo cavitacional assim como o tempo de duração de cada um e sua taxa de desgaste relativa. Fazendo uso desse método de regressão utilizando o programa STATISTICA [9], estimou-se a taxa de cavitação e o período de incubação. A relação entre a perda de massa devido ao desgaste e o tempo de cavitação obtida neste teste foi utilizado para a construção do gráfico mostrado na

Figura 3. Os valores estimados também estão mostrados na mesma figura. A Tabela 1 mostra as taxas encontradas e o ponto de quebra, que quer dizer o fim do período de incubação, estimados pelo programa STATISTICA, para os dois tipos de aços, para um intervalo de confiança de 95%.

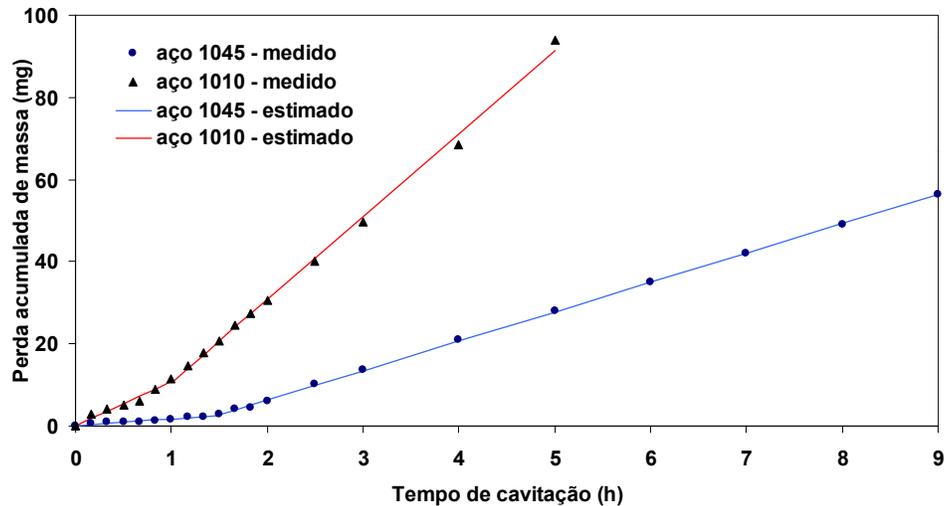


Figura 3 – Gráfico da perda acumulada de massa em função do tempo de cavitação para o aço 1010 e 1045.

Tabela 1 – Valores das taxas e do ponto de quebra obtidas no teste de cavitação.

	Aço 1010	Aço 1045
1ª inclinação (mg/hora)	10,5 ± 0,5	1,75 ± 0,06
Ponto de quebra (hora)	0,97 ± 0,06	1,48 ± 0,02
2ª inclinação (mg/hora)	20 ± 1	7,2 ± 0,1

Como mostrado na tabela 1 e no gráfico da figura 3, observa-se que o período de incubação para o aço 1045 é maior do que para o aço 1010, indicando que o início do regime de erosão cavitacional acelerado é encontrado em um período menor para o aço de menor teor de carbono. Comparando as taxas de desgaste (perda de massa/tempo) de material com o tempo exposto ao desgaste, que são as inclinações relativas ao segundo regime determinado pela análise de regressão segmentada, verifica-se que o aço 1010 perde massa de uma maneira mais acelerada que o aço 1045, indicando uma resistência menor ao desgaste.

### Monitoramento da Erosão Cavitação por Perfilometria Tridimensional

Esta técnica permite caracterizar se uma superfície é rugosa ou lisa, e ainda fornece algumas outras informações úteis para aplicações em engenharia como, por exemplo, o número de picos, quantidades de vales, se existem mais vales ou mais picos, etc [10,11]. Obtém-se como resposta alguns parâmetros, como por exemplo: parâmetros de rugosidade, de ondulação e estatísticos. Estes parâmetros são utilizados para definir as características e a textura da superfície [10,11]. Os parâmetros obtidos com o perfilômetro utilizados neste trabalho foram: Sa, Sq, Sz, Sku, Ssk e Sbi.

**Sa, Média aritmética:** Definido como a média aritmética dos valores absolutos dos desvios do plano médio (acima e abaixo) dentro da área de varredura.

**Sq, Desvio Quadrático Médio (RMS):** É a medida dos desvios de amplitude de uma superfície do plano de mínimos quadrados em uma área de amostragem utilizado para indicar rugosidade de uma forma estatística. Não depende dos intervalos de varreduras ( $\Delta x$  e  $\Delta y$ ) selecionados, mas depende da área de amostragem.

**Sz, Altura dos Dez pontos de uma superfície:** Parâmetro definido como a média das alturas dos 05 maiores picos e a profundidade dos 05 maiores vales dentro de uma área de amostragem. Depende da definição do que é pico ou vale (summit). É um parâmetro mais dependente da área de amostragem que Sq.

**Sku, Curtose (Kurtosis) da distribuição das amplitudes de uma superfície, coeficiente de momento de Kurtose:** A curva de distribuição de amplitudes de um perfil será considerada uma curva de distribuição Normal se possuir as propriedades de uma distribuição Normal ( $Sku=3$ ). Valores associados a este parâmetro estão indicados na Figura 4.

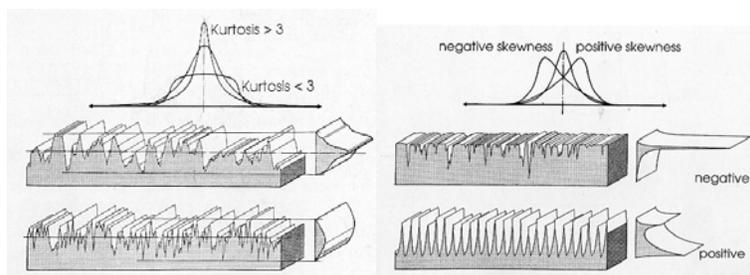


Figura 4 – Curva de Distribuição de Amplitudes.

**Ssk, Assimetria (Skewness) de uma distribuição de alturas de uma superfície:** É uma medida da assimetria da curva de distribuição das amplitudes de um perfil. Se negativo, as amplitudes de maior frequência possuem valores menores que a média (plano de referência dos mínimos quadrados) e implicará em um perfil com uma maior quantidade de material próximo da superfície (perfil do tipo platô); se Ssk for maior que zero existirá uma maior frequência de amplitudes de valores muito maiores que a média e o perfil será caracterizado por uma quantidade maior de material abaixo do plano de referência de mínimos quadrados e o perfil será caracterizado pela presença de picos com baixa densidade de material. Se a superfície estudada possui Ssk é zero, a curva de distribuições de amplitudes é simétrica, diz-se que se tem uma superfície de perfil Gaussiano.

O parâmetro **Sbi** é definido como a razão do desvio padrão RMS (Sq) e a altura da superfície com 5% de área de suporte,  $h_{0,05}$  (bearing area). Maiores valores de Sbi significam que a uma distância menor do maior pico, encontrou-se maior quantidade de material. Para uma Superfície Gaussiana (que possui uma distribuição simétrica de amplitudes em torno da média), este índice é cerca de 0,608. Para superfícies consideradas como boas propriedades de suporte Sbi é maior que 0,7 [12].

Após varreduras tridimensionais por perfilometria, obteve-se esses parâmetros (figuras 5, 6, 7 e 8) que se comparado com a curva de perda de massa acumulada com o tempo (figura 3) observa-se algumas correlações. Os parâmetros de

amplitude apresentaram também dois regimes de comportamento: um primeiro correspondente ao período de incubação de cavitação, onde se observa crescimento acelerado da rugosidade (crescimento de Sa, Sq e Sz). E um segundo regime, que associado ao tempo de cavitação acelerada, observa-se praticamente valores constantes dos parâmetros de amplitude. Este resultado revela que o tempo de incubação é um tempo de mudança radical da rugosidade do perfil e, que atingido uma certa profundidade de cavitação, tem-se ao decorrer de uma erosão acelerada nenhuma mudança na amplitude do perfil superficial da amostra. O parâmetro Sbi, indicado nas figuras 6 e 8, sofre oscilações de acréscimo e decréscimo durante o período de incubação. Após este período valores constantes deste parâmetro são observados. Estes resultados apontam que no tempo de incubação eventos isolados de desgaste ocorrem (por exemplo, erosão de picos isolados), a medida que a erosão ocorre, tem-se uma maior quantidade de material próximo à superfície constante.

Observa-se também maiores variações nos valores de Ssk e Sku no tempo de incubação, e após este período estes parâmetros se tornam constantes e com valores próximos a de uma superfície Gaussiana. Ou seja, a evolução destes parâmetros reforça a hipótese que na incubação tem-se mudanças de forma de perfil, devido principalmente a arrancamento de picos isolados, obtendo-se depois uma região de regime de desgaste uniforme ao longo do material superficial.

Este processo de desgaste superficial foi mais acentuado para o aço de menor teor de carbono, que apresentou um maior acréscimo dos parâmetros de rugosidade durante o período de incubação, até atingir a etapa de erosão acelerada. O fato da resistência à cavitação entre os aços ser diferente é evidenciado pelas figuras 9 e 10. Observa-se que o perfil topográfico 3D de rugosidade do aço 1010 tornou-se de maior rugosidade (amplitude) do que a do aço 1045 após 4 horas de cavitação. A evolução da superfície ao longo do período exposto à cavitação foi observada através de imagens do MEV analisando a microestrutura encontrada após certo tempo de cavitação. A Figura 11, a e b, ilustra a superfície dos aços após 1 hora de cavitação. Analisando as imagens do MEV, após 1 hora de cavitação e com aumento de 2000x, nota-se que as regiões contendo perlita apresentaram maior resistência à cavitação que as regiões contendo ferrita apenas (Figura 12). Pelo fato do aço 1045 ter um teor maior de carbono que o aço 1010, e que ambos tiveram o mesmo tratamento de recozimento, o aço 1045 tem uma quantidade maior de perlita, e este fato foi responsável pela maior resistência deste aço à erosão por cavitação. Estas imagens reforçam que uma maior dureza é essencial para se atingir maiores resistências ao desgaste cavitacional.

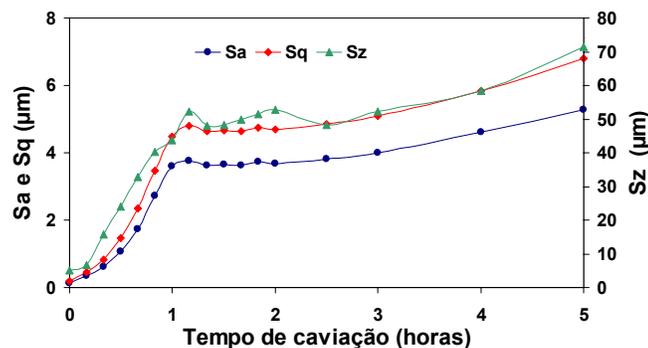


Figura 5 – Parâmetros de Amplitude Sa, Sq e Sz do aço 1010.

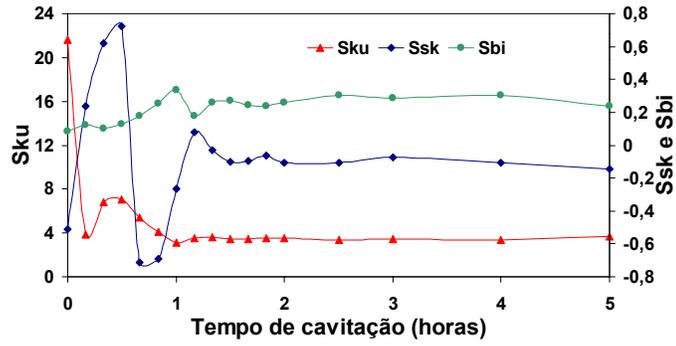


Figura 6 – Parâmetros Sku, Ssk e Sbi do aço 1010

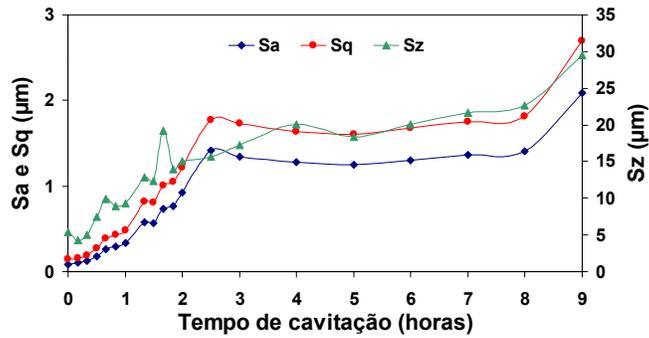


Figura 7 – Parâmetros de Amplitude Sa, Sq e Sz do aço 1045.

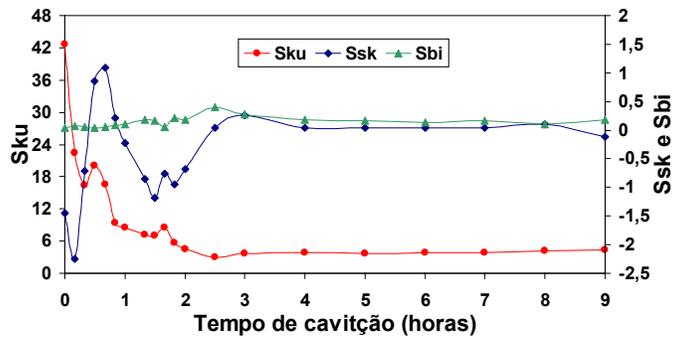


Figura 8 – Parâmetros Sku, Ssk e Sbi do aço 1045.

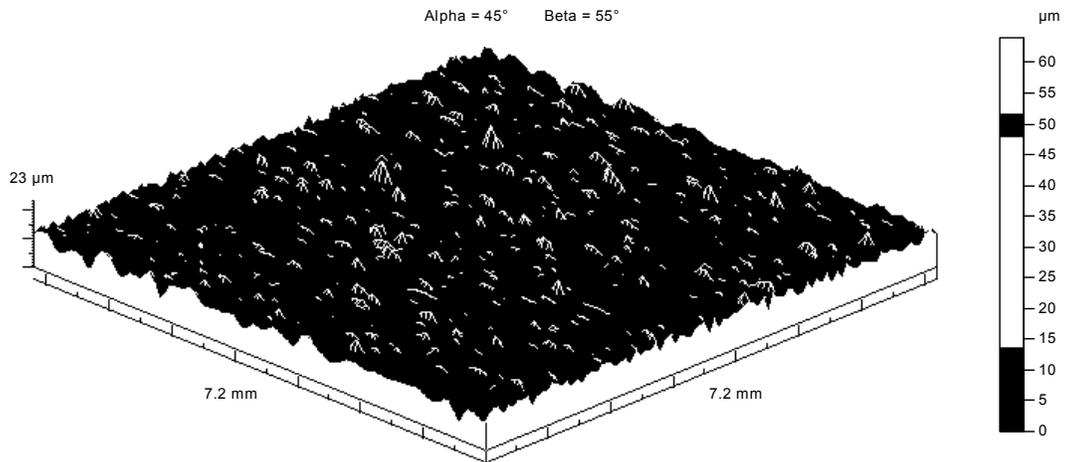


Figura 9 – Perfil de rugosidade da superfície do aço 1045 após 4 horas de cavitação

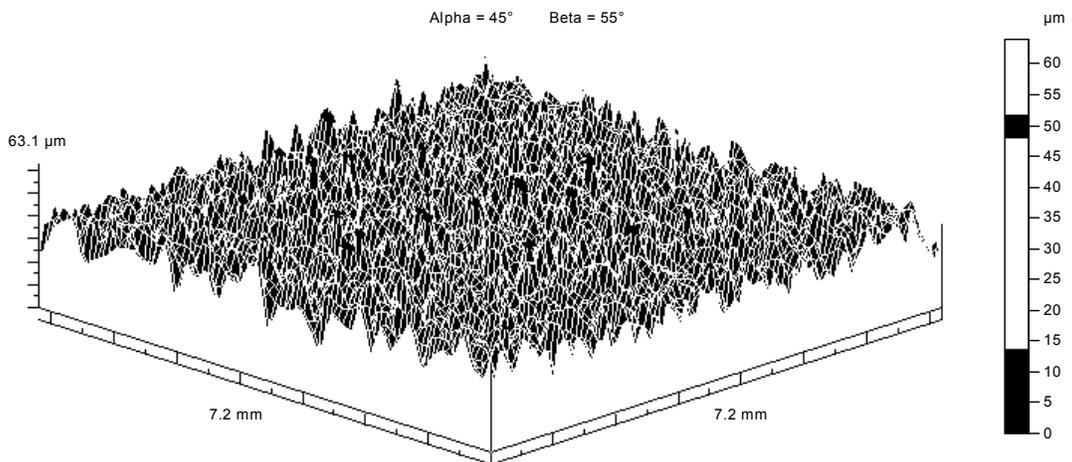


Figura 10 – Perfil de rugosidade da superfície do aço 1010 após 4 horas de cavitação

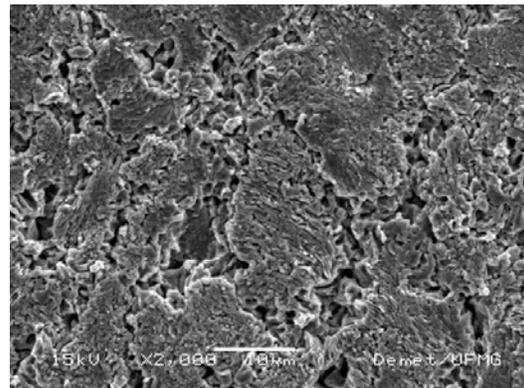
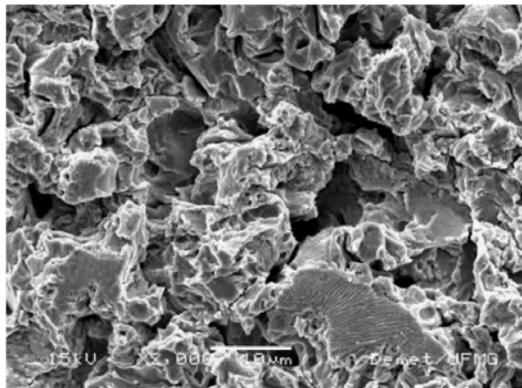


Figura 11 – (a) Imagem da superfície do aço 1010 após 1h de cavitação; (b) imagem da superfície do aço 1045 após 1h de cavitação.



Figura 12 – Imagem da perlita com um aumento de 5000 vezes após 1h de cavitação.

#### **4. Conclusões:**

O período de incubação para a erosão cavitacional foi determinado ser menor para o aço ABNT 1010 do que para o aço ABNT 1045. A taxa de desgaste associada ao regime de cavitação acelerada também foi maior para o aço ABNT 1010.

A análise estatística de regressão segmentada é uma ferramenta poderosa para distinguir diferentes regimes de desgaste em um processo de erosão cavitacional.

Análises topográficas 3D por perfilometria produziram parâmetros de rugosidade que apresentaram correlação com a curva de perda de massa com o tempo. Desta forma indicaram um procedimento de monitorar o processo cavitacional, indicando com exatidão a transição entre tempo de incubação e cavitação acelerada. Para análise de componentes de engenharia sujeitos a este tipo de desgaste, torna-se uma ferramenta essencial no monitoramento da etapa onde se tem desgaste não acelerado.

#### **5. Agradecimentos**

Agradeço ao doutorando Rafael Mancosu por ajudar na análise dos resultados, ao Técnico Bruno, do laboratório de Caracterização de Superfície, pelos testes de perfilometria e a Marília M. Lima, pós-doutoranda que ajudou na análise de regressão.

#### **6. Referências Bibliográficas**

- [1] - SUNDARARAJAN, G., SEN, D., SIVAKUMAR, G. The tribological behaviour of detonation sprayed coatings: the importance of coating process parameters, *Wear*, v. 258, n. 1-4, p. 377-391, 2005.
- [2] HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, London, pp. 171-197, 1992
- [3] LIMA, M. M., *Recobrimentos Tribológicos para Aplicação em Meios Mecânicos e Quimicamente Agressivos*. 06/2002. 298 f. Tese de Doutorado CPGEM/UFMG, orient: G.C.Godoy.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO.  
<http://www.abraco.org.br/corros17.htm>>. Acesso em: 01 fev. 2005.

- [5] LIMA, M.M.; GODOY, C.; MODENESI, P.J.; AVELAR-BATISTA, J.C.; DAVISON, A.; MATTHEWS, A. Coating fracture toughness determined by Vickers indentation: an important parameter in cavitation erosion resistance of WC-Co thermally sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, v.177-178, p.489-496, 2004.
- [6] ASTM G 32-85, Standard method of vibratory cavitation erosion test, p. 116-121, 1985
- [7] MEGED, Y. Modeling of the initial stage in vibratory cavitation erosion test by use of a Weibull distribution. *Wear*, v. 253, p. 914-923, 2002.
- [8] Montgomery, C.D., Peck, E.A., Introduction to linear regression analysis, 2th edition, New York: John Wiley & Sons, 1992, p. 210
- [9] Statistica DX for Windows, Version 7, 2005, StatSoft South America
- [10] MUMMERY, L. Surface Texture Analysis; The Hand Book. 1. ed. West Germany: Hommelwerke GmbH, 1992. 105p.
- [11] Stout, K.J. Development of Methods for the Characterization of Roughness in Three Dimensions, Penton Tresc, 1993, 358 p.
- [12] Apostila "Caracterização Topográfica 3D de uma superfície", G. Cristina Godoy, a ser publicada.

## **7. Abstract**

This work analyzed the cavitation erosion resistance of steels, which have different percentages of carbon and analyzed the evolution of superficial texture when they are subjected to cavitation. Then it was made cavitation tests, analyze of roughness by perfilometry tests and analyze of images from Scanning Electron Microscopy (SEM). It was used two kinds of steels: ABNT 1010 and ABNT 1045, which they were annealed. It was obtained a graphic of mass loss versus cavitation time of test and through this graphic it was observed a first wear regime with minimum erosion rate that means an incubation time for the two steels. With topography images in 3-D of the steels surface obtained by tests of perfilometry, it was possible to compare the evolution of superficial texture with the evolution of the mass loss for different cavitation times. It was also observed an increase in the roughness parameters for the incubation time. After this stage, constant roughness parameters were observed. SEM images have indicated the function of the perlite in the cavitation resistance. These images and the other results have showed that the steel, which has more percentage of carbon, can bear more time of cavitation.

Keywords: cavitation, roughness profile, incubation time, carbon-steel.