

RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DO AÇO 34 CrAlNi 7 NITRETADO A PLASMA

Flávio José da Silva (ltm-fjsilva@mecanica.ufu.br)

Eduardo Boccardo Alves (boccardo@alunos.ufu.br)

Sinésio Domingues Franco (ltm-sdfranco@ufu.br)

Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

Ricardo Reppold Marinho (reppold@petrobras.com.br)

Marcelo Torres Piza Paes (mtp@cenpes.petrobras.com.br)

Cenpes/Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil,

Resumo: A cavitação é um fenômeno que consiste na formação e subsequente colapso de bolhas contendo vapor e/ou gás dentro de fases líquidas. Quando o colapso acontece próximo a uma superfície sólida, este fenômeno pode levar a perdas significativas de matéria e até ao sucateamento de peças e componentes. No caso da nitretação, os efeitos da camada sobre os mecanismos e desgaste não estão bem claros. Neste trabalho apresenta-se um estudo sistemático realizado no aço DIN 1.8550 (34 CrAlNi 7) nos estados recozido e temperado/revenido. Os testes de cavitação foram conduzidos pelo método ultra-sônico, segundo a norma ASTM G32-98. Discutem-se as influências da camada branca sobre os mecanismos de degradação, bem como os efeitos dos tratamentos térmicos de recozimento e têmpera/revenimento. Os mecanismos de desgaste foram avaliados através de técnicas que incluem: microscopia ótica e eletrônica de varredura, difratometria de raios-X e interferometria Laser. Os resultados obtidos mostram que a presença da camada branca resulta em uma redução do período de incubação. Adicionalmente, sua presença impõe uma elevada taxa de remoção nos estágios iniciais, passando por um máximo. A seguir, esse valor se estabiliza, porém, ainda acima dos valores medidos na zona de difusão. O principal mecanismo de degradação na camada branca é microtrincamento.

Palavras-chave: Cavitação, nitretação, camada branca, microestrutura.

1. INTRODUÇÃO

A cavitação é um fenômeno que consiste na formação e subsequente colapso de bolhas contendo vapor e/ou gás dentro de fases líquidas (Czichos and Habig, 1992). Quando o colapso acontece próximo a uma superfície sólida, este fenômeno pode levar a perdas significativas de matéria, e até ao sucateamento de peças e componentes. Como exemplo de peças sujeitas a esse tipo de desgaste, citam-se: pás de turbinas hidráulicas, rotores de bombas, dentre outros. Em projetos de componentes hidráulicos, por razões práticas e econômicas, é essencial a escolha de materiais adequados e/ou a aplicação de tratamentos ou revestimentos superficiais, que resultem numa maior resistência à cavitação desses componentes. Dentre os procedimentos de engenharia de superfície empregados na redução do desgaste por cavitação, citam-se: revestimentos por solda a arco-elétrico, revestimentos aspergidos termicamente, refusão e modificação superficial a laser, evaporação térmica e implantação iônica. Os efeitos de parâmetros de produção desses revestimentos sobre a resistência à cavitação têm sido estudados com frequência (Münsterer and Kohlhof, 1995; Tomlinson and Talks, 1990; Chang et al., 2003; Han et al., 2002; Man et al., 2001; Zhou and Herman, 1982; Mana et al., 2003). Todavia, relativamente pouco pode ser encontrado na literatura técnica sobre o comportamento de camadas nitretadas em aços.

De modo geral, a nitretação resulta em um aumento da resistência à cavitação, como mostrado por Zhou e Herman (1982) em Ti e Ti-6Al-4V. Resultados semelhantes foram encontrados por Mana e co-autores nesses mesmos materiais (Mana et al., 2003). Talks e Tomlison, por sua vez, não encontraram nenhum efeito benéfico devido à nitretação em ferros fundidos brancos de alto Cromo (Tomlinson and Talks, 1990). Segundo esses autores, a nitretação eliminaria os efeitos benéficos da refusão superficial a laser. Resultados mais recentes mostram que a nitretação pode aumentar significativamente a resistências à cavitação de aços de baixa liga (Huang et al., 2002). Esse comportamento foi atribuído à elevada resistência a danos de origem mecânica das zonas de difusão e de compostos. Esses efeitos distintos da nitretação sobre a resistência à cavitação podem estar associados a vários fatores, dentre os quais citam-se: a microestrutura original do material nitretado, a presença de camada branca, bem como sua constituição (diferentes tipos de nitretos). Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar de forma sistemática os efeitos da camada branca no desgaste por cavitação. Além disso, os efeitos da microestrutura original são analisados, tomando-se um aço típico de nitretação, a saber, o 34 CrAlNi 7.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 Materiais e Preparação de Amostras

De uma barra cilíndrica do aço DIN 1.8550 (34 CrAlNi 7) foram retirados e tratados termicamente corpos de prova com 27 mm diâmetro e 15 mm de altura. A composição química do aço empregado é mostrada na Tab. (1). As amostras foram retiradas de barras tratadas termicamente. Dois tratamentos foram empregados, a saber: a) têmpera (890°C/30 min/óleo) seguido de revenimento (640°C/30 min) e b) recozimento (890°C/resfriamento ao forno). Parte das amostras foram nitretadas ionicamente em uma mistura gasosa de 76%N₂/24%H₂ (% em volume) por um período de 9 horas a uma temperatura de 550 °C.

Tabela 1 : Composição química do aço DIN 1.8550 (34 CrAlNi 7).

Elemento	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Nb	V
% em peso	0.32	0.031	0.011	0.28	0.74	1.71	0.94	0.17	1.06	0.23	0.01	0.02

As amostras foram submetidas a análises metalográficas (microscopia ótica e eletrônica de varredura), medições de dureza e perfil de microdureza e topografia em um interferômetro laser da UBM. Também foram feitas análises das camadas com técnicas de difração de raios-X.

Após a determinação dos valores de espessura de camada branca via metalografia, elas foram removidas mecanicamente em algumas amostras em uma lapidadora de precisão em duas etapas. A primeira etapa de desbaste foi realizada com abrasivos de SiC com granulometria média de 15 µm e a segunda, de acabamento, com abrasivos de Al₂O₃ com granulometria média de 9µm. O controle da retirada da camada branca foi feito com um relógio comparador com 1µm de resolução (rugosidade final de Ra = 0.3 µm).

A seguir sintetizam-se as amostras produzidas para o desenvolvimento deste trabalho: a) sem nitretação (recozidas e temperadas/revenidas), b) nitretadas (com e sem camada branca, tendo como microestrutura original de nitretação amostras recozidas e temperadas/revenidas), totalizando 6 diferentes tipos de amostras.

2.2 Ensaios de Cavitação

Os ensaios de cavitação foram realizados segundo a norma da ASTM G32-98 modificado para o método indireto. Os ensaios foram conduzidos em um equipamento Sonic Mills (ver Fig. 1). A representação esquemática do teste de cavitação é mostrada também na Fig. 1. A amostra a ser ensaiada é colocada em um porta amostra e posicionada a uma distância de 0.5 mm do contra-corpo de aço inoxidável AISI 316 (Fig.1b) com o auxílio de um micrômetro com resolução de 0.01 mm.

A frequência de vibração do sonotrodo foi de 19.3 ± 0.1 kHz. A amplitude de oscilação foi mantida em $45 \mu\text{m}$ pico a pico, sob uma temperatura de ensaio de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ em água destilada.

Na determinação do desgaste, o ensaio era interrompido em intervalos de tempo regulares e amostras limpas em ultra-som. A perda de massa foi determinada por meio de balança analítica com resolução de 0.1 mg. Nestas interrupções, a evolução das superfícies de desgaste foi analisada através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e interferometria a laser. Os parâmetros de rugosidade foram calculados e imagens de perfil e área das superfícies foram geradas.

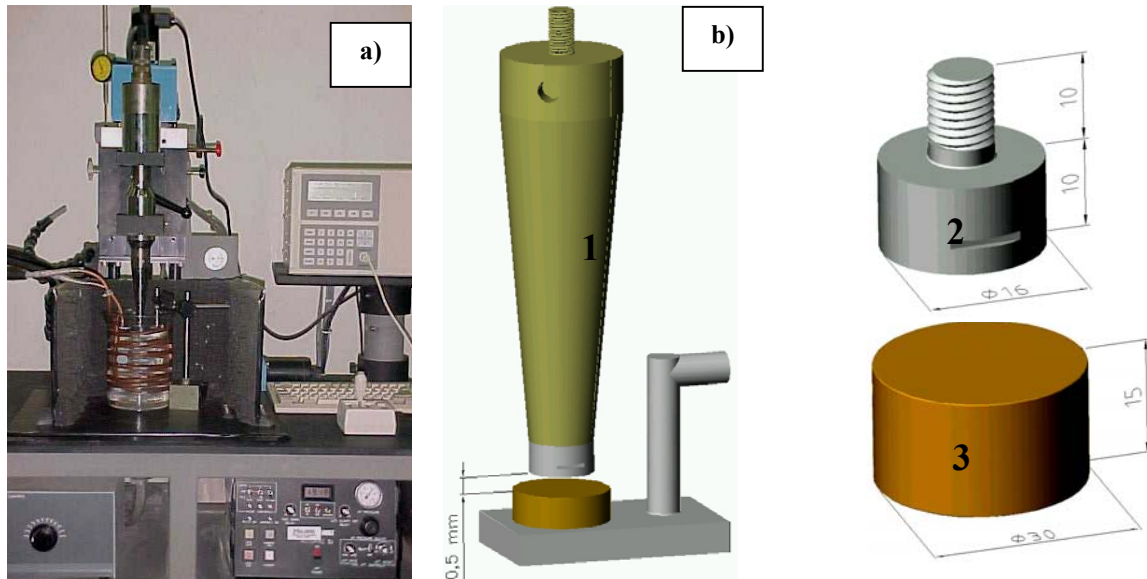


Figura 1 : Bancada experimental, (a) vista geral, (b) detalhe da montagem do ensaio. 1 - sonotrodo, 2 – contra-corpo em aço inoxidável (AISI 316) e 3 - amostra.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura (2) apresenta a microestrutura típica das amostras nitretadas, tendo-se como microestrutura de partida ferrita/perlita. Nota-se nestas figuras a presença de uma camada branca de cerca de $30 \mu\text{m}$.

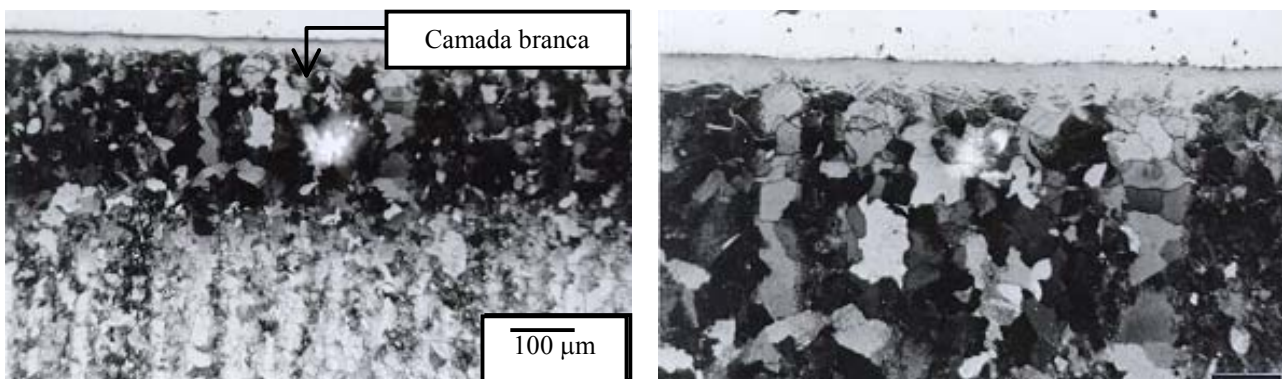


Figura 2 : Amostra recozida e nitretada com atmosfera contendo 76% N_2 , 9 horas.

A zona de difusão atinge uma profundidade de mais de $350 \mu\text{m}$. As camadas nitretadas obtidas em amostras temperadas/revenidas não apresentaram variações significativas em relação às obtidas em amostras recozidas (ver espessuras de camada branca na Tab. 2).

Tabela 2 : Espessura da camada branca das amostras nitretadas e dureza do aço antes da nitretação.

Amostras	HV30 antes da nitretação	Camada branca (μm)
Recozida	195	$29,9 \pm 0,7$
Temperada/Rev.	310	$31,5 \pm 0,8$

Os perfis de microdureza são apresentados na Fig. (3a). Os valores de microdureza são também muito semelhantes, diferindo apenas nas durezas da região não nitretada. A constituição das camadas nitretadas é apresentada na Fig. (3b). Os nitretos observados correspondem ao esperado para esse aço, ϵ e γ' (Chatterjee-Fischer *et al.*, 1995).

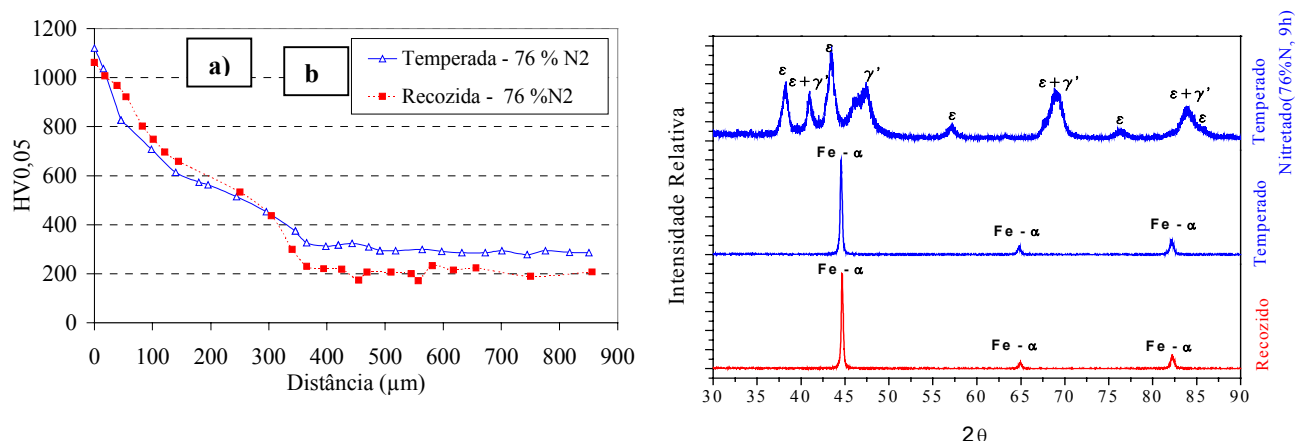


Figura 3 : Camadas nitretadas, a) Perfis de microdureza das amostras temperada/revenida e recozida e b) difratogramas das amostras estudadas.

Os resultados de cavitação são apresentados na Fig. (4). Nota-se dessa figura, que a amostra recozida é que apresenta as maiores perdas de massa. As menores perdas de massa foram medidas nas amostras temperadas e nitretadas sem camada branca. Essa redução é considerável, mesmo se esses valores forem comparados com as amostras temperadas e não nitretadas. O melhor desempenho das amostras temperadas e revenidas em relação às recozidas pode ser atribuído à maior resistência mecânica da martensita revenida em relação à microestrutura ferrítica/perlítica.

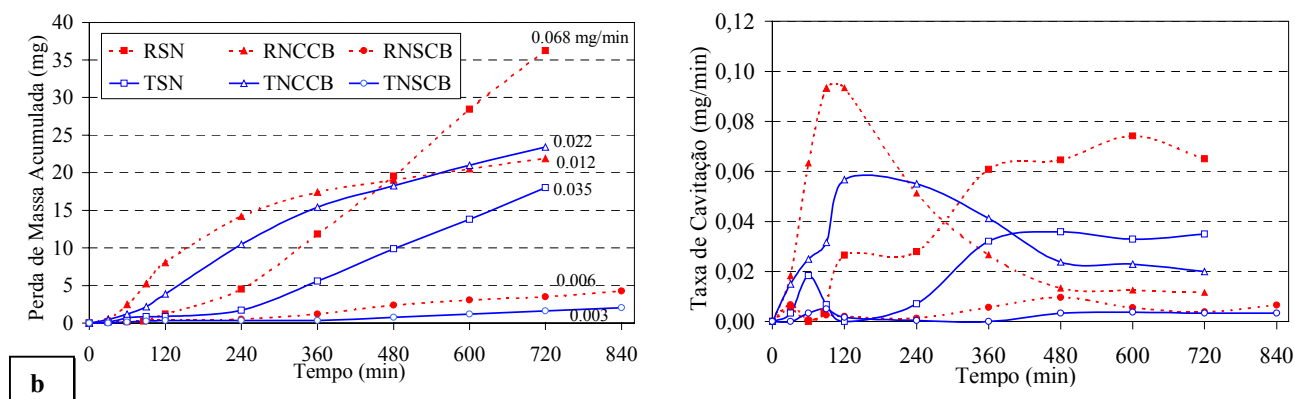


Figura 4 – Evolução do desgaste em função do tempo, a) perda de massa acumulada e b) taxa de desgaste. RSN=Recozida Sem nitretação, RNCCB=Recozida Nitretada Com Camada Branca, RNSCB=Recozida Nitretada Sem Camada Branca, TSN=Temperada Sem nitretação, TNCCB=Temperada Nitretada Com Camada Branca, TNSCB= Temperada Nitretada Sem Camada Branca

Comparando-se os desempenhos das amostras com e sem camada branca, nota-se que a o período de incubação é consideravelmente inferior nas amostras com camada branca (ver Fig. 4a). Além disso, as amostras com camada branca apresentam após a incubação um rápido crescimento da perda de massa, que, após um certo tempo, acaba se estabilizando. Na Figura (4a) são

apresentadas ainda as taxas de desgaste por cavitação, e, observa-se, também, que a taxa de desgaste é consideravelmente inferior nas amostras com microestrutura ferrítica/perlítica.

Para maior facilidade na análise dos resultados de cavitação, apresenta-se na Fig. (4b) a dinâmica da taxa de desgaste para as diferentes amostras estudadas. Dessa figura, é notório a presença de picos na velocidade de remoção de matéria nos estágios iniciais para as amostras contendo camada branca. Após cerca de 8 h (480 min), a taxa de desgaste estabiliza-se em valores muito inferiores aos observados no início. As amostras nitretadas e sem camada branca não desenvolveram picos significativos de taxa de desgaste. Essa diferença de comportamento pode ser atribuída à presença de camada branca. Os resultados de acompanhamento dos mecanismos de degradação via Microscopia Eletrônica de Varredura corroboram esses resultados (ver Fig. 5). Após 1 h de teste, a superfície das amostras com camada branca desenvolvem cavidades apreciáveis, mesmo em baixos aumentos. Essas cavidades são formadas pelo desenvolvimento de microtrincas dentro da camada branca, como mostrado na Fig. (5). Após 12 h de teste, a superfície volta a apresentar uma topografia menos rugosa. As amostras temperadas e sem camada branca não apresentaram cavidades após 1 h de teste. Após 12 h, algumas pequenas depressões podem ser notadas, todavia, em dimensões muito inferiores as observadas nas amostras com camada branca.

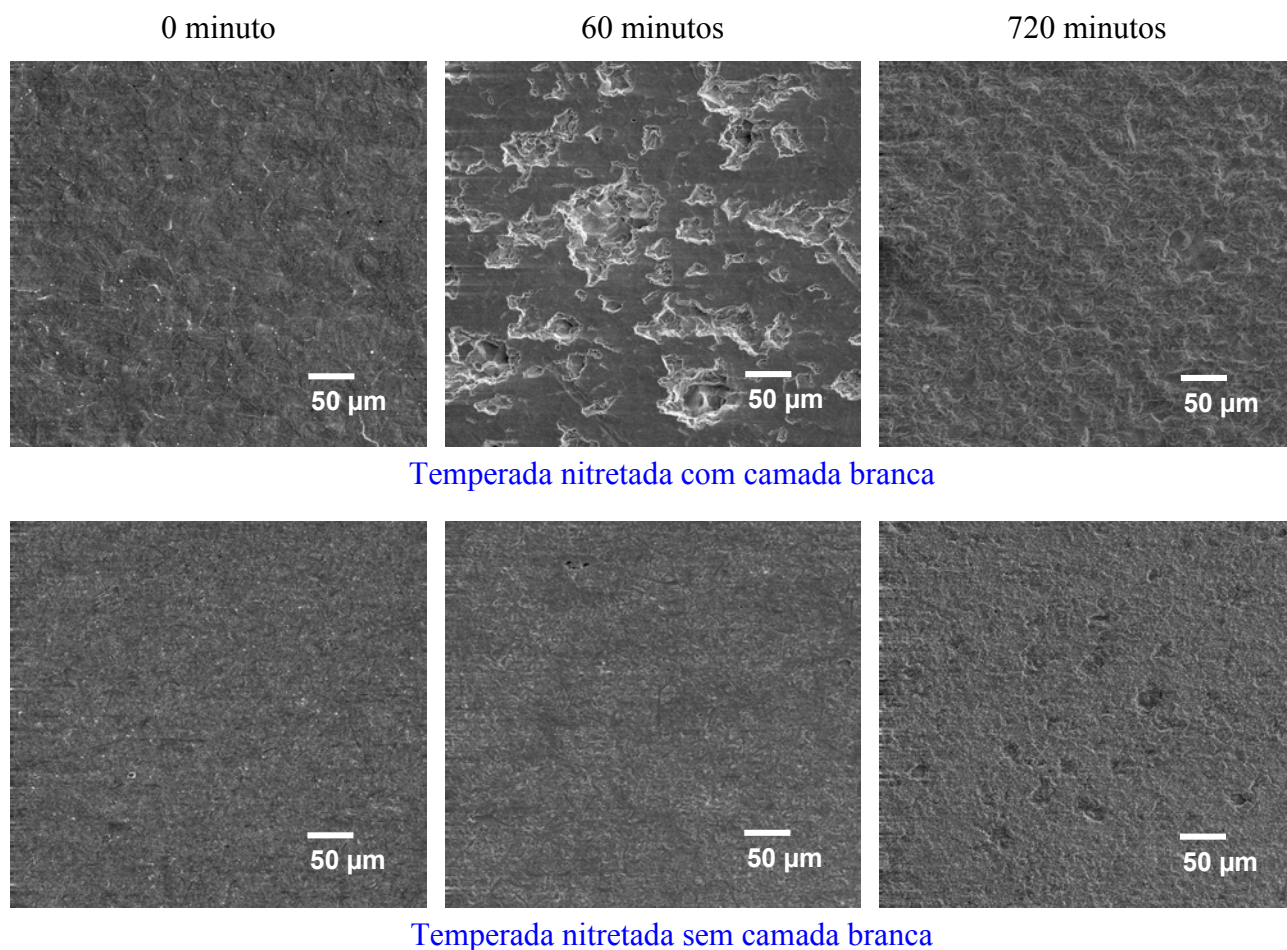


Figura 5 : Evolução do desgaste em amostras recozidas e temperadas, nitretadas, com e sem a presença de camada branca.

O melhor desempenho das amostras que tiveram suas camadas brancas removidas é evidente na análise da profundidade da região danificada pela cavitação (Fig. 6). A profundidade da região desgastada é uma ordem de grandeza inferior nas amostras sem camada branca. Esses resultados evidenciam o efeito maléfico da camada branca na cavitação, podendo-se sugerir, que, na medida do possível, ela seja evitada, ou então removida.

A profundidade média na região desgastada da amostra nitretada com camada branca é de 23.1 μm . Como a espessura da camada branca dessas amostras é de cerca de 30 μm , os valores obtidos de taxa de desgaste da Fig. (4b) para as amostras recozidas e temperada/revenida com camada branca correspondem a valores da camada branca. Esses valores são consideravelmente superiores aos observados nas amostras sem camada branca. Assim, acredita-se que as taxas de desgaste das amostras com camada branca tendam aos valores das amostras sem camada branca. De qualquer modo, seja nos instantes iniciais ou no regime estacionário da taxa de desgaste da camada branca, a sua presença é maléfica.

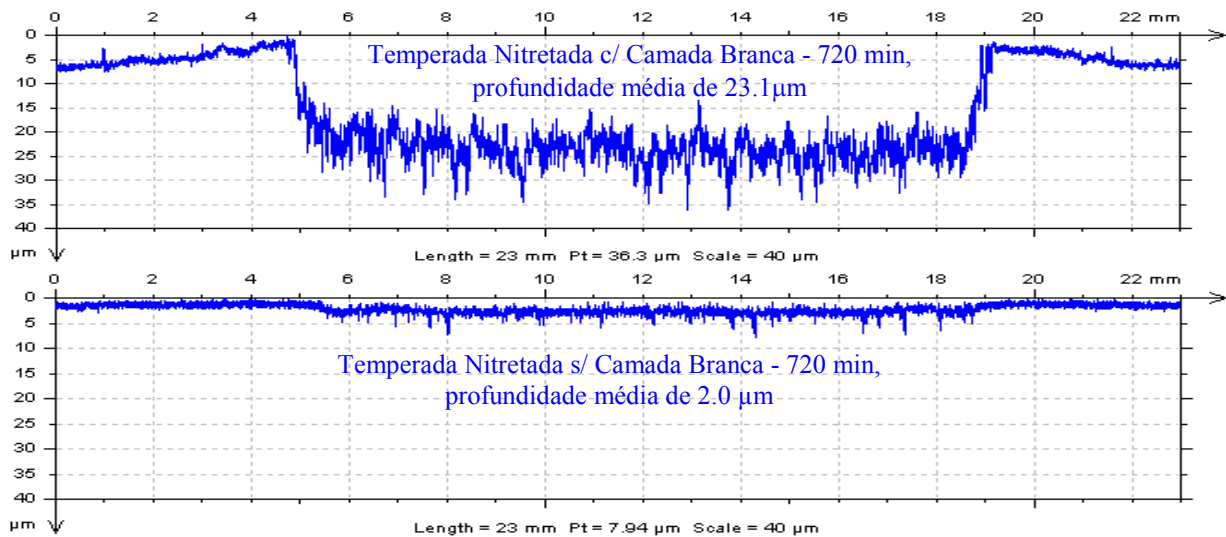


Figura 6 : Perfis de rugosidade ao longo da região desgastada para amostras com e sem camada branca com microestruturas temperadas e revenidas após 720 min de teste.

Os efeitos da microestrutura original do aço 34 CrAlNi 7 podem ser observados da Figura (4). Nas amostras sem camada branca, as taxas de desgaste por cavitação são muito próximas, mas nas amostras com camada branca há uma nítida superioridade das amostras com microestrutura ferrítica/perlítica. Essa superioridade pode estar associada à maior capacidade da microestrutura ferrítica/perlítica reter trincas de maiores dimensões. As reais razões para esse comportamento estão em fase de investigação e deverão ser apresentados em breve.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram avaliados os desempenhos de amostras do aço 34 CrAlNi 7 com relação à cavitação nos seguintes estados: temperado/revenido e recozido, nitretado ionicamente com e sem camada branca, totalizando 6 diferentes estados. Os resultados obtidos permitem concluir que:

- a) a têmpera seguida de revenimento a uma dureza de cerca de 300HV30 melhora consideravelmente o desempenho desse aço em relação ao estado ferrítico/perlítico.
- b) a presença da camada branca leva a um período de incubação bastante reduzido e a taxas de remoção bastante elevadas nos estágios iniciais. A seguir, essa taxa é reduzida, todavia, seu valor é significativamente superior aos medidos nas amostras sem camada branca;
- c) recomenda-se, na medida do possível, a supressão da camada branca em aplicações que envolvam cavitação;
- d) o desempenho das zonas de difusão foi o mesmo nas amostras beneficiadas e recozidas. Há indicações de um desempenho superior da camada branca nas amostras recozidas. Acredita-se que esse melhor desempenho possa estar relacionado à maior capacidade da microestrutura ferrítica/perlítica reter trincas originadas dentro da camada branca.

5 . AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes pela bolsa de doutorado concedida a F.J. da Silva e à Petrobras pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM G32-98, 1998, American Society for Testing and Materials.
 Chang, J.T., Yeh, C.H., He, J.J. and Chen, K.C., 2003, Wear, *in press*.
 Chatterjee-Fischer, R. *et al.*, 1995, “Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen – Nitrieren und Nitrocarburieren”, Expert Verlag, Berlin.
 Czichos, H. and Habig, K.H., 1992, Tribologie Handbuch - Reibung und Verschleiß, Vieweg Verlag, Braunschweig
 Han, S., *et al.*, 2002, Surface Coatings and Technology, vol. 161, pp. 20-25.
 Huang, W.H., Chen, K.C. and He, J.L., 2002, Wear, vol. 9052, pp. 1-8.
 Man, H.C., *et al.*, 2001, Surface and Coatings Technology, vol. 148, pp. 136–142
 Mana, H.C., *et al.*, 2003, Materials Science and Eng. A00, pp. 1-7.
 Münsterer, S. and Kohlhof, K., 1995, Surface and Coatings Technology, vol. 74-75, pp.642-647.
 Tomlinson, W.J., and Talks, M.G., 1990, Wear, vol. 139, pp. 269-284.
 Zhou, K.S. and Herman, H., 1982, Wear, vol. 80, pp. 101-113.

THE CAVITATION BEHAVIOUR OF PLASMA NITRIDED 34 CrAlNi 7 STEEL

Abstract: Cavitation is a phenomenon that consists of the formation and of the subsequent collapse of cavities or bubbles that contain vapour or gas, or both, within a liquid. The effect of cavitation is termed cavitation damage or cavitation erosion. It occurs when the bubbles or cavities collapse on or close to a solid surface. In mechanical design of hydraulic machines, for feasible and economical reasons, both the correct materials selection and the application of surface treatments are essential to improve the cavitation resistance of the components. In this investigation the effects of the compound layer on the cavitation erosion of ion-nitrided 34 CrAlNi 7 steel were analysed. The cavitation tests were carried out according to the ASTM G32-98 standard method. The results showed that, in both microstructure (annealed and quenched and tempered), the compound layer has a negative effect. It leads to reduction in the incubation time and to a high wear rate at the beginning of the test. Afterwards, the wear rate stabilizes, but is higher than those measured on samples without compound layer. The mainly wear mechanism in the compound layer was microcracking.

Keywords: Cavitation erosion, Ion nitriding, Compound layer, Microstructure.