

RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420 CEMENTADO A ALTA TEMPERATURA.

Fabiane da Silva Severo

Cristiano José Scheuer*

Rodrigo Perito Cardoso**

Silvio Francisco Brunatto

Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Grupo de Tecnologia de Fabricação Assistida por Plasma e Metalurgia do Pó, 81531-990, Curitiba, PR, Brasil.

*Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia Mecânica, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

**Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil.

severo.fabiane@gmail.com, cristiano.scheuer@mail.ufsm.br, rodrigo.perito@labmat.ufsc.br, brunatto@ufpr.br

Resumo. Este trabalho apresenta o comportamento à erosão por cavitação do aço inoxidável martensítico AISI 420 após tratamento de cementação por plasma a 500 °C. A partir de dados coletados e analisados segundo a norma ASTM G32-16, verificou-se que o tratamento aplicado nesta condição de temperatura relativamente elevada resulta em perda da resistência à erosão por cavitação do material estudado, quando comparado ao aço em sua condição de temperado-revenido, um efeito provavelmente resultante da precipitação de carbonetos de cromo no material, resultando numa possível sensibilização do mesmo, a qual é favorecida para temperaturas e tempo de tratamento elevados.

Palavras chave: Aço inoxidável martensítico. Cementação por plasma. AISI 420.

1. INTRODUÇÃO

Em razão das propriedades mecânicas, tribológicas e comportamento à corrosão apresentadas pelos aços inoxidáveis martensíticos, estes encontram aplicação na produção de componentes de sistemas hidráulicos (turbinas, impulsores de bombas, hélices válvulas, eixos, tubulações, etc.) (ESPITIA et al., 2013; FIGUEROA et al., 2005; LO, CHENG, F. T. e MAN, 2003). Neste meio, uma forma de degradação de componentes que se apresenta de maneira recorrente é a erosão por cavitação, a qual se trata da remoção de material devido ao ataque repetitivo de ondas de choque e microjatos (Wang e Zhang, 2021; Duraiselvam et al., 2006), os quais resultam da formação e colapso de bolhas em um líquido (cavitação) (ASTM G32-16).

Entre os tratamentos aplicados para melhorar o desempenho destes aços estão os tratamentos termoquímicos assistidos por plasma (GARCIA et al., 2016; LI; BELL, 2007; XI et al., 2008), cuja aplicação fornece superfícies homogêneas e com características reprodutíveis. Além disto, os tratamentos termoquímicos por meio do plasma possuem, entre outras vantagens, a redução no consumo de energia e gás e na quantidade de gases lançadas no meio ambiente, o que tem sido considerado crucial para a sua seleção (BELL et al., 1990; BELL; DEARNLEY, 1994; STAINES; BELL, 1981). Neste âmbito, alguns trabalhos têm reportado a melhoria de propriedades mecânicas e tribológicas de aços inoxidáveis martensíticos tratados a elevadas temperaturas (SUN; BELL; WOOD, 1994; ALLENSTEIN et al., 2013; COHEN; ROSEN, 1986; MARCHEV; COOPER; GIESSEN, 1998).

Sabe-se, de trabalhos anteriores (Severo et al., 2019 e Severo et al., 2017), que o tratamento de cementação por plasma pode ser aplicado no aço inoxidável martensítico AISI 420 para melhoria do seu desempenho à erosão por cavitação. Nestes trabalhos, foi verificado que o tratamento a baixas temperaturas promove tanto a redução da máxima taxa de erosão quanto o aumento do período de incubação do material estudado. Considerando estes resultados prévios, satisfatórios acerca do tratamento de cementação, bem como o relatado pelos autores supracitados em termos da aplicação de tratamentos termoquímicos a elevadas temperaturas, este trabalho visa identificar e analisar a resposta do aço inoxidável martensítico AISI 420 cementado por plasma a alta temperatura (ou superior a 450 °C) frente à erosão por cavitação.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As amostras utilizadas neste ensaio foram obtidas a partir de uma barra laminada a quente do aço AISI 420 na condição recozida, apresentando o diâmetro de 50,8 mm e o comprimento de 1000 mm. A composição química deste aço é constituída por: 0.305% C, 0.33% Si, 0.33% Mn, 0.019% P, 0.005% S, 12.21% Cr, 3.89% Ni, 0.49% Mo, 0.045% Cu, 0.011% Al, 0.093% V e 0.055% Nb, em peso (resultados obtidos através do ensaio de espectrometria de emissão ótica). Todas as amostras foram temperadas. Neste caso, a austenitização das mesmas ocorreu em forno a vácuo a 1050 °C durante 0,5 h, sendo que o resfriamento se deu ao ar. A amostra utilizada para referência foi revenida a uma temperatura de 220°C. Após finalizados os tratamentos térmicos, as superfícies receberam acabamento com lixamento com lixas de

SiC até a granulometria 1200 e polimento com Al_2O_3 em suspensão abrasiva na granulometria de 1 μm . Antes do tratamento de cementação, as amostras foram limpas em banho ultrassônico e secas sob fluxo de ar quente. O tratamento de cementação assistido por plasma foi realizado em amostras na condição como-temperadas, à temperatura de 500 °C por 12 h empregando-se uma mistura de gases contendo 99,5% (80% H_2 + 20% Ar) + 0,5% CH_4 , vazão de 100 sccm e pressão de 400 Pa. Durante a cementação por plasma, as amostras foram concomitantemente revenidas para a mesma temperatura de tratamento.

A caracterização de todas as amostras foi realizada por meio da difratometria de raios X, utilizando-se um difratômetro Shimadzu, modelo XDR 7000 com tubo de raios X Cu Ka, na configuração Bragg-Brentano (θ - 2θ) e medidas de microdureza utilizando-se um microdurômetro Shimadzu, modelo HMV-2T, com aplicação de uma carga de 300 gf (amostra não cementada) 25 gf (amostra cementada), tendo estas indentações a duração de aplicação da força de 15 s). Os ensaios de erosão por cavitação foram realizados em dispositivo vibratório ultrassônico e os procedimentos para identificação e análise de perda de massa conforme a norma ASTM G32-10, empregando-se o método indireto. A perda de massa cumulativa dos corpos de prova foi determinada por meio de balança de precisão de 0,1 mg. As características das superfícies ensaiadas foram analisadas por meio da técnica microscopia eletrônica de varredura, com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura modelo Tescan LMU Vega 3.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As amostras do aço AISI 420 alcançaram a dureza de $612 \pm 13 \text{ HV}_{0,3}$ após têmpera e revenimento e de $1133 \pm 69 \text{ HV}_{0,25}$ após tratamento de cementação. Os padrões de difração de raios-X obtidos (Figura 1) demonstraram que após o revenimento, a estrutura cristalina permanece martensítica, tendo a baixa temperatura e curto tempo de tratamento promovido difusão (apenas) para alívio de tensões. Amostras tratadas a 500 °C por outro lado, apresentam além da presença da fase martensita revenida cúbica (ferrita, α), carbonetos do tipo cementita (Fe_3C) e, possivelmente, carboneto Cr_{23}C_6 , coincidente com o pico de Fe_3C a $37,77^\circ$. A transformação da matriz de martensítica para martensita revenida (ferrítica), juntamente com a formação dos carbonetos de cromo são favorecidos pela difusão promovida devido à alta temperatura e ao elevado tempo de tratamento.

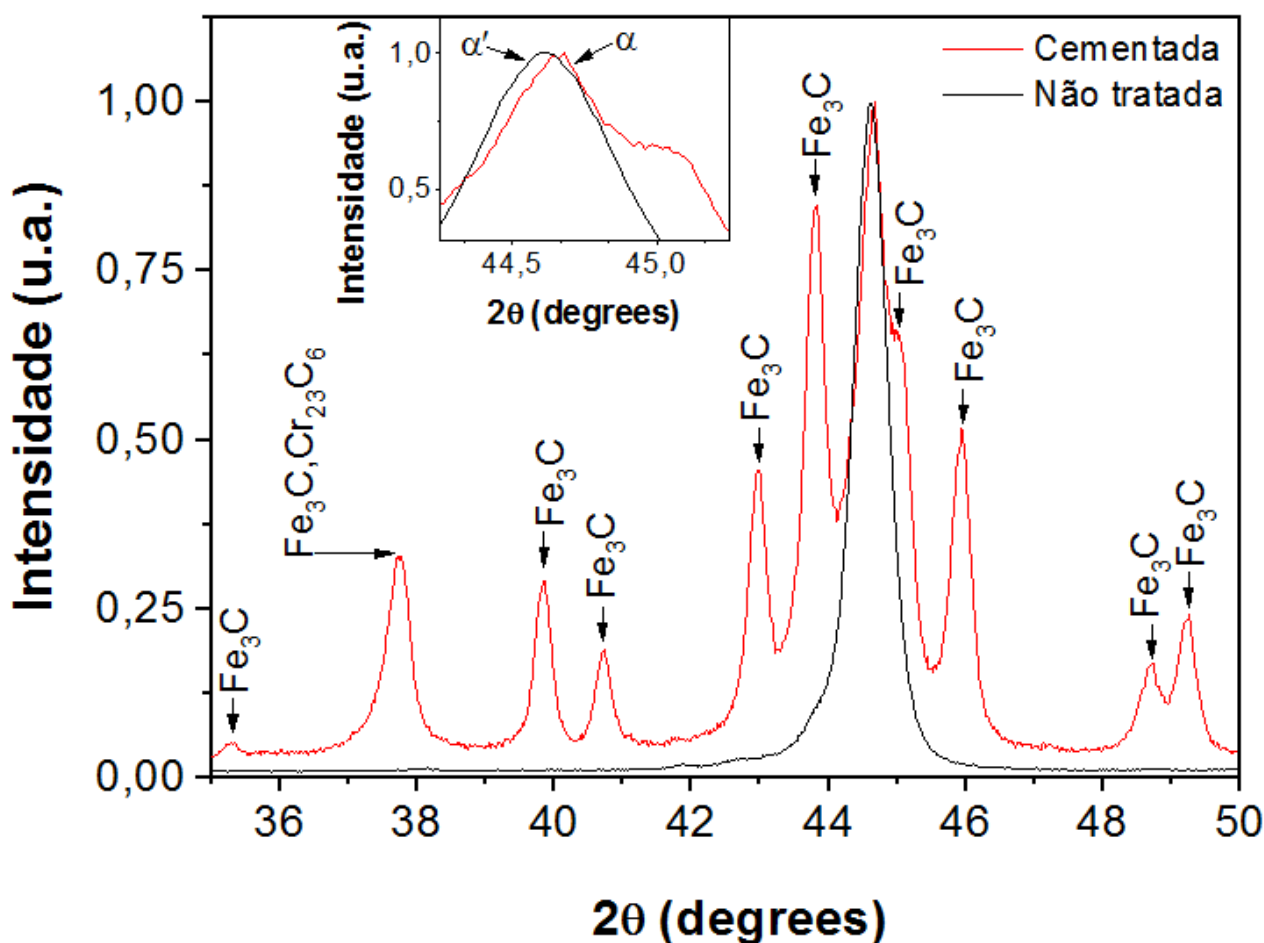


Figura 1. Difração de raios-X para amostras cementadas e não tratadas.

Na Figura 2 é possível verificar a redução da resistência a erosão por cavitação da amostra cementada à 500 °C. Diferentemente da amostra não tratada que apresentou início da perda de massa em um período superior a 6h, a amostra cementada a 500 °C não apresentou período de incubação, de modo que perda de material ocorreu logo na primeira medição. Em relação à velocidade de erosão, verifica-se que a superfície cementada apresentou redução da taxa de erosão ao longo do período ensaiado (efeito oposto ao da superfície não tratada), de modo que, vencido o período de incubação da amostra não tratada, com o prolongamento do tempo de ensaio, esta vem a superar a perda de material apresentada pela amostra cementada (perda de massa acumulada). Os valores de taxa de erosão máxima, determinados de acordo com a norma ASTM G32-16 para ambas as amostras foi de 0,4 para a amostra não tratada termoquimicamente e de 0,13 para a amostra cementada.

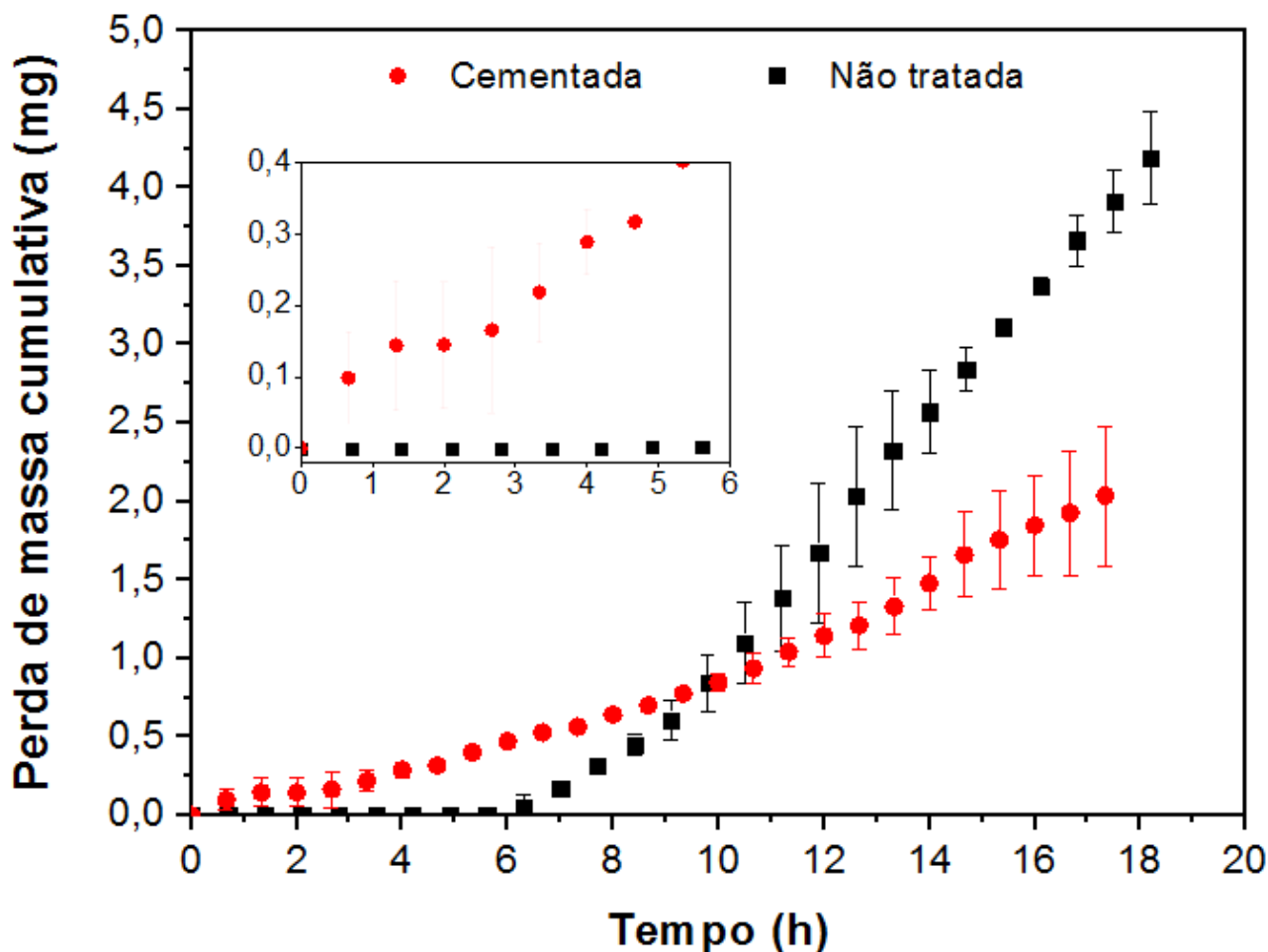


Figura 2. Comparativo de perda de massa cumulativa x tempo

Na Figura 3a pode-se visualizar a superfície da amostra não cementada previamente ao ensaio de erosão por cavitação. Nesta imagem pode-se verificar as falhas superficiais, as quais são provavelmente oriundas das operações de preparo mecânico da amostra (lixamento e polimento). Com excessão a estas falhas, a superfície é uniforme antes do ensaio de erosão por cavitação. Após 4 h de ensaio (ainda no período de incubação) (Figura 3b), a superfície apresenta relevos, os quais têm maior destaque em regiões de contornos de grão. Estes relevos indicam que a deformação plástica é o principal modo pelo qual o aço AISI 420 tratado termicamente suporta os esforços resultantes da cavitação. Após 9h de ensaio (Figura 3c), o contraste entre as regiões superficiais que se mantém intactas, frente às regiões onde a erosão se tornou mais severa, evidencia que a perda de material ocorre principalmente por fraturamento com remoção de debris, arrancados das regiões previamente deformadas. Na Figura 3d pode-se verificar a superfície do aço não tratado após 18 h de ensaio (totalmente danificada).

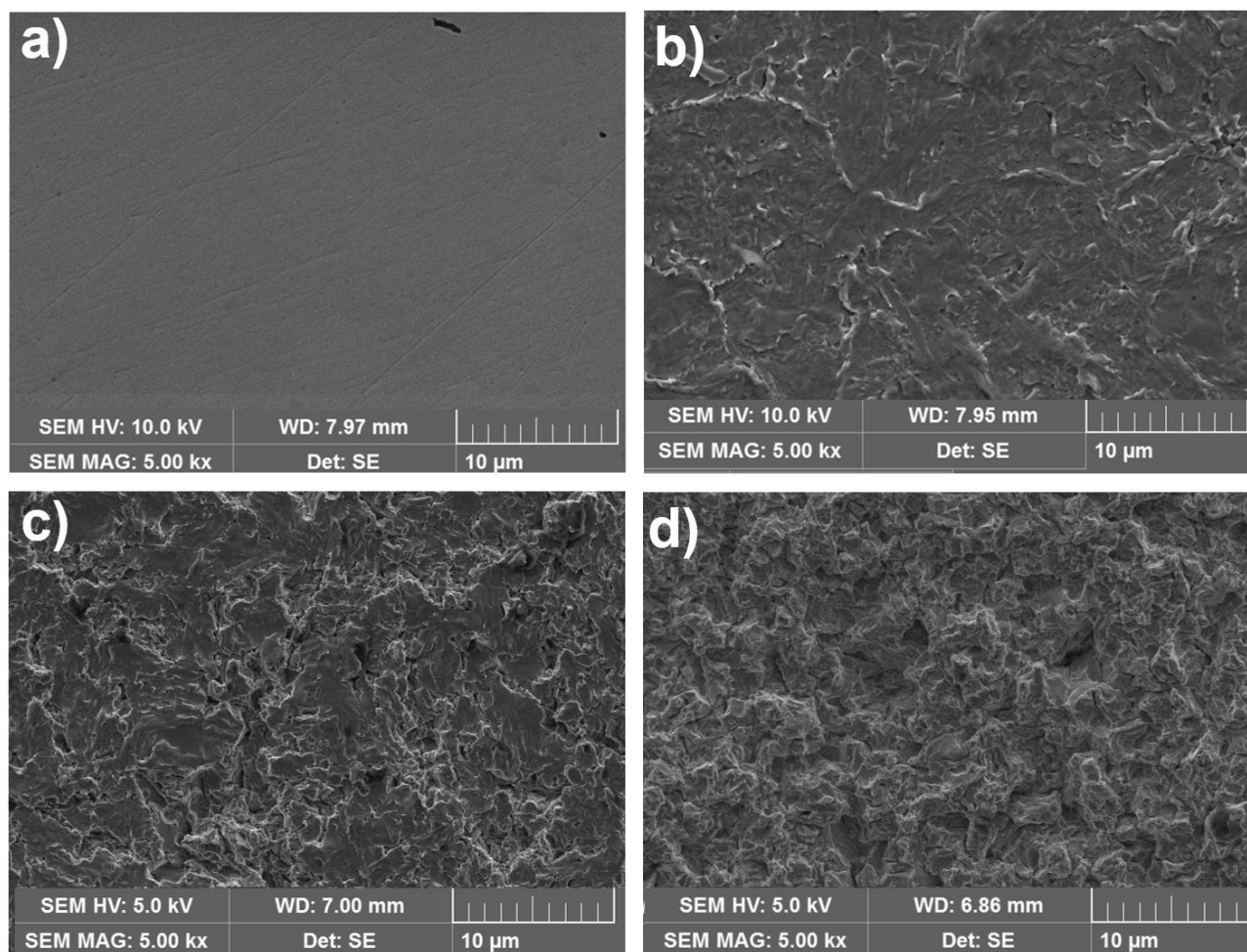


Figura 3. Evolução da perda de material para o aço AIS 420 não tratado termoquimicamente.

Conforme demonstrado na curva perda de massa cumulativa x tempo (Figura 2), a amostra cementada a 500 °C apresentou perda de massa desde o início. A Figura 4a demonstra a aparência da superfície cementada antes de se iniciar o ensaio de cavitação. As imagens registradas após 80 min de exposição ao ensaio de erosão por cavitação (Figura 4b e Figura 4c) demonstram a presença de trincas aparentemente originadas de crateras aprofundadas. Estes primeiros vestígios de perda de material podem estar relacionados à presença de carbonetos, identificados através dos difratogramas exibidos na Figura 1. Com a existência de trincas internas e radiais na superfície, a formação destas crateras com trincamento podem ser resultantes do arrancamento de precipitados promovidos pela diferença entre os módulos de elasticidade e plasticidade da matriz de martensita revenida cúbica (ferrítica) e das fases secundárias precipitadas. Os danos sofridos após 13 h e após 20 h de ensaio podem ser visualizados na Figura 4d e na Figura 4e, respectivamente. As imagens indicam que a evolução do dano ocorre também por faturamento com remoção de debris.

Com base nestas imagens, pode-se verificar que diferentemente do que ocorre com a amostra de referência, a superfície cementada não apresenta nenhuma deformação plástica, o que está de acordo com a elevada dureza alcançada com o enriquecimento superficial de carbono promovido pelo tratamento. Além disto, através destas mesmas imagens, verifica-se que o principal mecanismo pelo qual a perda de material progride é o fraturamento por remoção de debris, que se inicia nas extremidades das crateras formadas durante a perda de massa inicial causada ou pelos defeitos de superfícies já existentes na superfície antes do tratamento termoquímico ou pela remoção de carbonetos formados durante o tratamento. Além disto, não se descarta que a alta taxa de perda de massa apresentada pela superfície tratada já no início do ensaio possua uma componente de erosão relacionada a um efeito corrosivo a que estaria submetida a superfície cementada. Tendo-se em consideração o sistema analisado, onde se tem um corpo metálico submerso em água, não se exclui a possibilidade da presença do fenômeno corrosivo, ainda que em velocidade e proporções reduzidas. Neste sentido, supõe-se que uma vez existindo tal fenômeno, seu efeito seja mais significativo no material cementado, devido à formação do carboneto de cromo em sua superfície, o que atua de forma a reduzir o teor de cromo em solução sólida ao redor deste, levando esta superfície à sensitização. Neste sentido, um possível efeito sinérgico mais expressivo entre danos por corrosão e cavitação estaria relacionado à elevada perda de material.

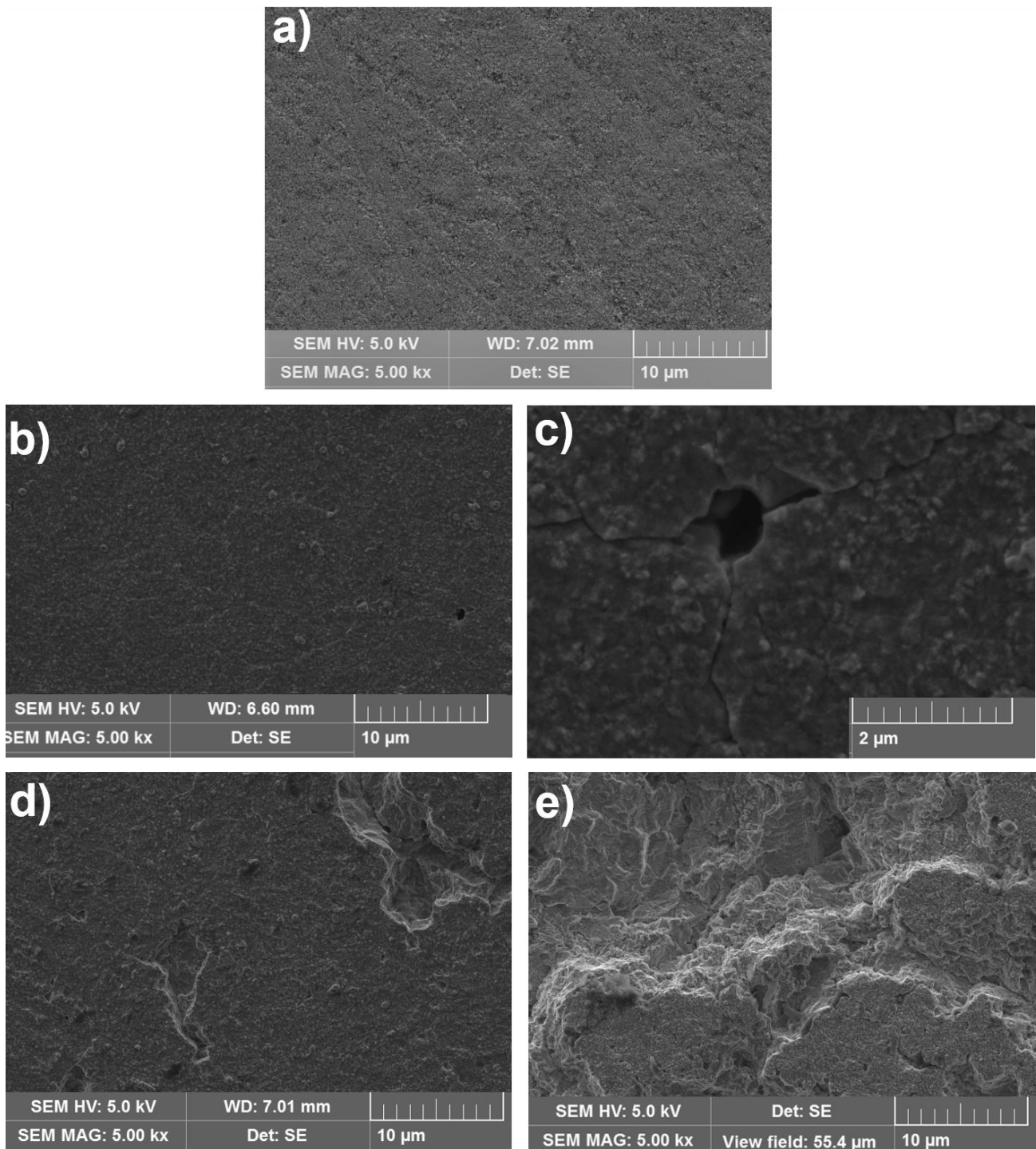


Figura 4. Evolução da perda de material para o aço AISI 420 cementado a 500 °C.

4. CONCLUSÃO

Verifica-se que o tratamento de cementação por plasma à temperatura de 500 °C (e supõe-se deste modo, à temperaturas acima desta), não é indicado para o aço inoxidável martensítico estudado para aplicações onde a erosão por cavitação ocorre. A inexistência do período de incubação do material tratado é, aparentemente, devida à presença de precipitados de segunda fase na sua matriz martensítica revenida (ferrítica). A perda de material pode estar relacionada tanto à remoção mecânica destes logo no início do ensaio, gerando cavidades com trincamento radial e ao possível efeito corrosivo que sofrem as amostras como consequência da formação de carbonetos de cromo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da CAPES, do CNPq, CNPq-Universal Grant N. 482380/2012-8 e do MCTI/CNPq/CT-Aquaviário Grant N. 456347/2013-5. Aproveitam ainda para declarar gratidão ao Laboratório de Óptica de Raios X e Instrumentação (LORXI) – UFPR e ao Centro de Microscopia Eletrônica (CME) - UFPR pela utilização dos equipamentos, bem como a Flávio Stramare Ribeiro e à empresa Aquacort pelo corte das amostras.

6. REFERÊNCIAS

- ALLENSTEIN, A. N. et al., 2013. "Plasma nitriding using high H₂ content gas mixtures for a cavitation erosion resistant steel". *Applied Surface Science*, v. 277, p. 15-24.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS., 2016. ASTM G32-16: "Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus". Conshohocken.
- BELL, T., 1990. "Surface engineering: past, present, and future". *Surface Engineering*, v. 6, n. 1, p. 31-40.
- BELL, T. e DEARNLEY, P. A., 1994. "Environmental issues in surface engineering and related industrial sectors". *Surface engineering*, v. 10, n. 2, p. 123-128.
- COHEN, A. e ROSEN, A., 1986. "The influence of the nitriding process on the dry wear resistance of 15-5 PH stainless steel". *Wear*, v. 108, n.2, p. 157-168.
- DURAISELVAM et al., 2006. "Cavitation erosion resistance of AISI 420 martensitic stainless steel laser-clad with nickel aluminide intermetallic composites and matrix composites with TiC reinforcement". *Surface and Coatings Technology*, v. 201, n. 3-4, p. 1289-1295.
- ESPITIA L. A. et al., 2013. "Cavitation erosion resistance of low temperature plasma nitrided martensitic stainless steel". *Wear*, v. 301, n. 1-2, p. 449-456.
- FIGUEROA, C. A. et al., 2005. "Structural modifications and corrosion behavior of martensitic stainless steel nitride by plasma immersion ion implantation". *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, v. 23, n. 4, p. 693-698.
- GARCIA, M. V. et al., 2016. "Critical pitting temperature on low temperature plasma carburized AISI 410 stainless steel". *Blucher Chemistry Proceedings*, v. 4, n. 1, p. 57-69.
- LI, C. X. e BELL, T., 2007. "A comparative study of low temperature plasma nitriding, carburising and nitrocarburising of AISI 410 martensitic stainless steel". *Materials Science and Technology*. v. 23, n.3, p. 355-361.
- LO, K. H.; CHENG, F. T.; MAN, Hau Chung, 2003. "Laser transformation hardening of AISI 440C martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance". *Surface and Coatings Technology*, v. 173, n. 1, p. 96-104.
- MARCHEV, F.G.; COOPER, C.V.; GIESSEN, B.C., 1998. "Observation of a compound layer with very low friction coefficient in ion-nitrided martensitic 410 stainless steel". *Surface and Coatings Technology*, v. 99, p. 229-233.
- SEVERO et al., 2019. "Cavitation erosion resistance enhancement of martensitic stainless steel via low-temperature plasma carburizing". *WEAR*, v. 428-429, p. 162-166.
- SEVERO et al., 2017. "FIRST RESULTS OF THE CAVITATION EROSION BEHAVIOR FOR LOW-TEMPERATURE PLASMA CARBURIZED MARTENSITIC STAINLESS STEEL". In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Curitiba. Proceedings of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering.
- STAINES, A. M. e BELL, T., 1981. "Technological importance of plasma-induced nitrided and carburized layers on steel". *Thin solid films*, v. 86, n. 2-3, p. 201-212.
- SUN, Y.; BELL, T.; WOOD, G., 1994. "Wear behaviour of plasma-nitrided martensitic stainless steel". *Wear*, v. 178, n. 1-2, p. 131-138.
- WANG, Z. e ZHANG, B., 2021. "Cavitation erosion behavior of high-nitrogen austenitic stainless steel: Effect and design of grain-boundary characteristics". *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109496>.
- XI, Y. T. et al., 2008. "Improvement of mechanical properties of martensitic stainless steel by plasma nitriding at low temperature". *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, v. 21, n. 1, p. 21-29.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

CAVITATION RESISTANCE OF THE AISI 420 STEEL CARBURIZED AT HIGH TEMPERATURE

Resumo. *This Work presents the cavitation erosion behavior of the AISI 420 martensitic stainless steel after plasma carburizing treatment at 500 °C. From compiled and analysed data which are in accordance to ASTM G32-16 Standard, it was verified that the treatment employed in this relatively high temperature condition, results the lost in cavitation erosion resistance of the studied material, when compared to the same steel in its quenched and tempered condition, an effect probably resultant of the chromium carbide precipitation in the material, resulting in its possible sensitization, which is favored at high temperature and time conditions.*

Keywords: *Martensitic stainless steel. Plasma carburizing. AISI 420.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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