

# EROSÃO-CORROSÃO DO AÇO ABNT 8550 NITRETADO

Flávio José da Silva <sup>1</sup>  
 Diogo Santana Soares <sup>2</sup>  
 Samuel Deoterônio da Silva <sup>2</sup>  
 Ricardo Reppold Marinho <sup>3</sup>  
 Marcelo Torres Pizza Paes <sup>3</sup>  
 Sinésio Domingues Franco <sup>5</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da microestrutura e da nitretação na resistência à erosão e erosão-corrosão, bem como o efeito sinérgico. Amostras do aço ABNT 8550 foram tratadas termicamente por têmpera/revenido e recozimento e, termoquimicamente, por nitretação a plasma. Os testes de erosão foram realizados com água de torneira e os de erosão-corrosão com água do mar sintética, ambos contendo areia com granulometria entre 300  $\mu\text{m}$  e 600  $\mu\text{m}$ . Os parâmetros de teste foram: velocidade média de impacto de 15 m/s, concentração de areia 6%, ângulos de impacto 30° e 90°. A taxa de desgaste foi avaliada através de perda de massa. Os resultados mostraram que a microestrutura do aço sem nitretação não influenciou significativamente na resistência a erosão-corrosão. As perdas de massa em condições de impacto normal à superfície de teste foram sistematicamente menores do que as medidas com incidência oblíqua, indicando um comportamento dúctil do material. Nas amostras nitretadas, verificou-se um comportamento frágil devido à presença da camada branca mais externa. Abaixo desta, na zona de difusão, o comportamento passa ser dúctil. Devido à severidade da erosão, não foi possível identificar nenhum efeito sinérgico com a corrosão. A nitretação aumentou significativamente a resistência à erosão.

**Palavras-chave:** Erosão; Corrosão; Nitretação por plasma; Sinergia.

## ON THE CORROSION-EROSION OF PLASMA NITRIDED ABNT 8550 STEEL

### Abstract

ABNT 8550 steel samples were heat treated by quenching and tempering at 890°/640°C and annealed at 890°C. These samples were plasma nitrided and tested in respect to its erosion and corrosion-erosion resistance by using substitute sea water with sand particles. The wear tests were carried out in a test rig specially developed for this purpose, where a jet of sea water with sand is impinged against the test specimen. The impingement velocity was 15 m/s at angles of 30° a 90° and the sand concentration 6%. All tests were performed at room temperature. In order to measure the synergic effects between corrosion and erosion, pure erosion and corrosion tests were done. The wear mechanisms were evaluated with the aid of scanning electron microscopy and laser interferometry. The results showed that the steel microstructure did not have any significant effect on the corrosion-erosion performance and the wear mass lost at normal impingement was systematic lower than those at oblique ones, suggesting a ductile wear behavior. On the nitrided samples a fragile behavior was observed, where the white layer has a negative effect on the wear performance. After removal of this layer the wear was observed to be in the ductile mode. Despite of this the plasma nitriding increased substantially the corrosion-erosion resistance of the ABNT 8550 steel.

**Key words:** Erosion; Corrosion; Plasma nitriding; Synergic effects.

### I INTRODUÇÃO

Nos diferentes setores da indústria, muitos componentes e equipamentos estão sujeitos à ação erosiva de partículas sólidas em meios líquidos, principalmente no transporte de meios lamacentos. No caso de líquidos quimicamente agressivos, como por exemplo,

na indústria petrolífera, além do efeito da erosão, a corrosão também pode levar a danos, principalmente quando estes dois fatores interagem sinergeticamente produzindo taxas de desgaste maior do que a soma dos seus efeitos separadamente.<sup>(1)</sup> Nestes casos é importante a seleção de

<sup>1</sup> Professor, Departamento de Engenharia Mecânica – UFES, Vitória-ES, Brasil.

<sup>2</sup> Graduando na Faculdade de Engenharia Mecânica – UFU, Uberlândia-MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro da Petrobrás, CENPES – RJ, Rio de Janeiro, Brasil.

<sup>4</sup> Professor Doutor, Faculdade de Engenharia Mecânica – UFU, Uberlândia-MG, Brasil.

materiais ou processos térmicos e termoquímicos que garantam uma maior resistência à erosão, corrosão e erosão-corrosão em aplicações envolvendo estes fenômenos.

O processo de nitretação tem sido amplamente usado para melhorar as propriedades de superfície de uma extensa variedade de materiais. Normalmente, a camada nitretada é composta de duas regiões, uma superficial, denominada de camada de compostos ou camada branca, e a outra, logo abaixo desta, de zona de difusão ou precipitação. Nos aços, a camada de compostos é formada essencialmente por nitretos de ferro ( $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>N e/ou  $\epsilon$ -Fe<sub>2,3</sub>N). A zona de difusão pode ser descrita como a microestrutura original do núcleo do metal, onde o nitrogênio pode ser encontrado intersticialmente dissolvido dentro da ferrita ou sob a forma de precipitados de nitretos de ferro ou de outros elementos de liga presente no aço tratado. As distorções introduzidas pelo nitrogênio no reticulado aumentam sensivelmente a dureza da peça.<sup>(2)</sup> Dentre as propriedades conferidas aos aços nitretados são citadas o aumento da dureza superficial, da resistência ao desgaste, da resistência à fadiga e da resistência à corrosão.<sup>(3)</sup> Com relação à corrosão, a nitretação pode aumentar a resistência à corrosão, dependendo do tipo de metal e do meio corrosivo.<sup>(4)</sup> No caso de aços não ligados ou de baixa liga, em geral, a proteção contra corrosão é melhorada significativamente com a nitretação. Já como relação à erosão, poucos trabalhos são encontrados na literatura abordando o desempenho de amostras nitretadas. O enfoque principal dos trabalhos sobre camadas nitretadas é direcionado basicamente para a caracterização das propriedades físicas, mecânicas e tribológicas, envolvendo a abrasão e o deslizamento.

Considerando que a microestrutura do substrato pode desempenhar um papel importante nas propriedades mecânicas e eletroquímicas, bem como na resistência à erosão, neste trabalho apresenta-se um estudo realizado no aço ABNT 8550, nos estados beneficiado e recozido com posterior nitretação. O objetivo é adquirir informações acerca do efeito da microestrutura e da nitretação na resistência à erosão e erosão-corrosão, bem como o efeito sinérgico.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado nos testes foi o aço ABNT 8550, cujos teores, expressos em % em peso dos elementos químicos estão apresentados na Tabela I.

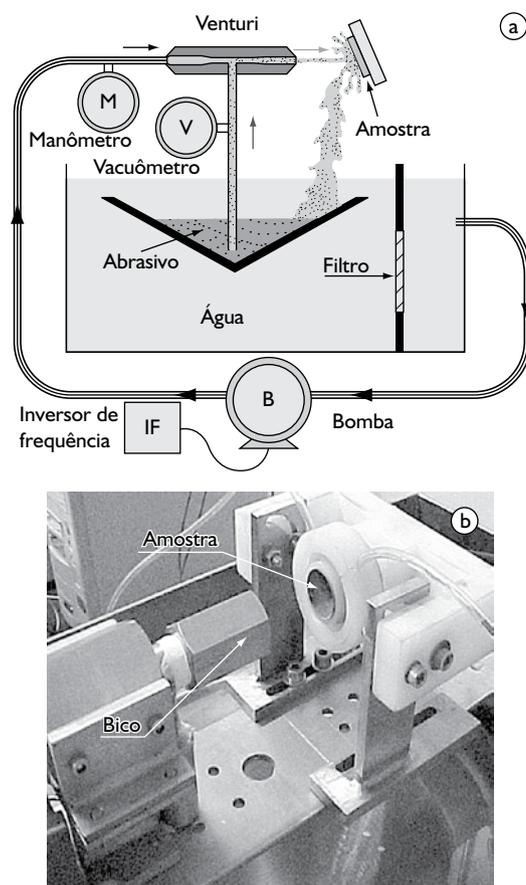
**Tabela I.** Composição química (% em peso) ABNT 8550.

	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Nb	V
Análise	0,32	0,03	0,01	0,28	0,74	1,71	0,94	0,17	1,06	0,23	0,01	0,02

Os tratamentos térmicos realizados foram: têmpera (890°C/30 min/óleo) seguida de revenimento (640°C/30 min); e recozimento (890°C/resfriamento ao forno), como o objetivo de se obter uma microestrutura martensítica e uma estrutura ferrítica-perlítica, respectivamente. Parte das amostras foi submetida à nitretação a plasma, a qual foi realizada na temperatura de 550°C, tempo de nove horas com mistura gasosa de 76%N<sub>2</sub>/24%H<sub>2</sub>. Esta condição de nitretação promove a formação da camada branca e

da zona de difusão. As amostras foram submetidas a análises metalográficas. A composição das fases foi identificada por difração de Raios X.

Os testes de erosão e erosão-corrosão foram realizados em um equipamento no qual um jato da mistura erosiva (fluido+particulado sólido) é direcionado contra a amostra de teste.<sup>(5)</sup> O fluido é circulado através de uma bomba que o impulsiona de um tanque de cerca de 120 litros para um bico. No corpo do bico ejetor uma região de baixa pressão é formada devido o efeito venturi. Por sucção as partículas abrasivas são misturadas ao fluido resultando em um jato abrasivo homogêneo sobre a superfície da amostra. Após a incidência do fluxo sobre a amostra, as partículas abrasivas e o fluido são separados por decantação e filtragem e, então, recirculadas. A Figura 1 apresenta detalhes construtivos do equipamento de erosão utilizado nos testes.



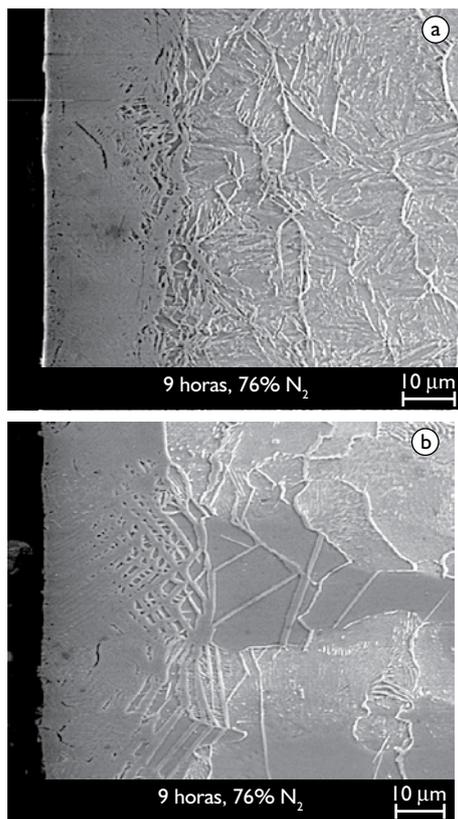
**Figura 1.** Detalhes construtivos do equipamento, a) representação esquemática do método jato; e b) detalhes de bico e do porta amostra.

Utilizou-se água de torneira nos testes de erosão e água do mar sintética segundo a norma ASTM D1141-98 nos ensaios de erosão-corrosão. Os parâmetros de teste foram: velocidade de impacto de 15 m/s, concentração de areia 6%

com granulometria de 300  $\mu\text{m}$ -600  $\mu\text{m}$ , ângulos de impacto de 30° e 90°. A temperatura mantida em 25°C através de um sistema de refrigeração. Durante os testes, o pH foi controlado entre 8,15 e 8,25. Para cada condição de teste foram realizadas três repetições, e a cada teste a areia foi trocada. Os testes tiveram duração máxima de duas horas e 30 minutos com paradas de 15 minutos em 15 minutos para a determinação da perda de massa. A taxa de desgaste (gramas de material removido /gramas de abrasivo) foi determinada dividindo-se a perda de massa pelo fluxo de partículas erosivas. Os mecanismos de desgaste foram avaliados através de microscopia eletrônica de varredura.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras beneficiadas apresentaram dureza média de 308 HV30 e as amostras recozidas uma dureza média de 188 HV30. Na análise da constituição das camadas nitretadas, verificou-se que esta é formada basicamente por nitretos do tipo  $\epsilon$  e  $\gamma'$ , que correspondem ao esperado para esse aço.<sup>(6)</sup> Verificou-se que a microestrutura original do substrato não influenciou no tipo de nitreto de ferro formado, ou seja, as microestruturas ferrítica-perlítica e martensítica apresentaram as mesmas fases. A dureza máxima obtida após a nitretração foi de 1.100 HV0,05. A Figura 2 mostra o aspecto típico das amostras nitretadas. Foi possível observar, tanto para as amostras recozidas quanto para as temperadas, a presença de uma densa camada branca de aproximadamente 25  $\mu\text{m}$ . Logo abaixo desta camada, observa-se uma

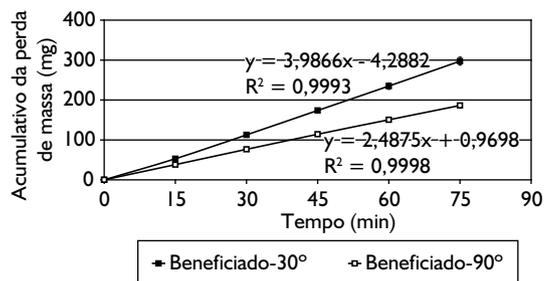


**Figura 2.** Fotomicrografias das amostras nitretadas (MEV). a) Temperada revenida; e b) recozida.

rede grosseira de precipitados aciculares, indicando o início da zona de difusão que teve uma profundidade de no máximo 400  $\mu\text{m}$ . A seguir serão analisados e discutidos os resultados dos testes de erosão e erosão-corrosão.

#### 3.1 Erosão

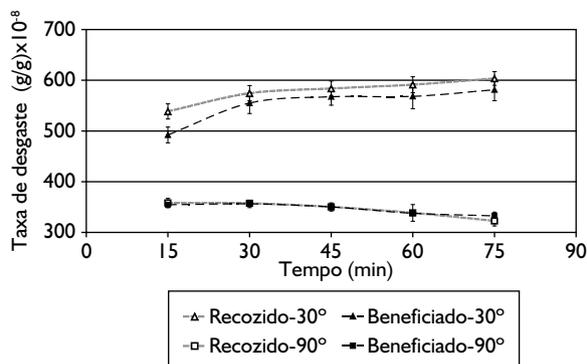
Na Figura 3 apresenta-se a variação da perda de massa em função do tempo para testes de erosão nas amostras beneficiadas. Nota-se uma relação perfeitamente linear, com índices de correlação  $R^2$  superiores a 0,999.



**Figura 3.** Evolução da perda de massa acumulada em amostras do aço ABNT 8550 beneficiado – Teste de erosão com ângulo de incidência de 30° e 90°, concentração média de areia 6% (peso) e velocidade média de impacto de 15 m/s.

A erosão de materiais dúcteis depende fortemente do ângulo de impacto e tipicamente apresenta as maiores taxas de erosão entre 20° e 30°.<sup>(7)</sup> Observa-se nos resultados, que as taxas de erosão foram bem distintas para os ângulos de incidência testados. As maiores taxas de erosão para o ângulo de incidência de 30° e as menores taxas para o ângulo de 90° indicam um comportamento dúctil do material testado. Igual comportamento foi observado nas amostras recozidas.

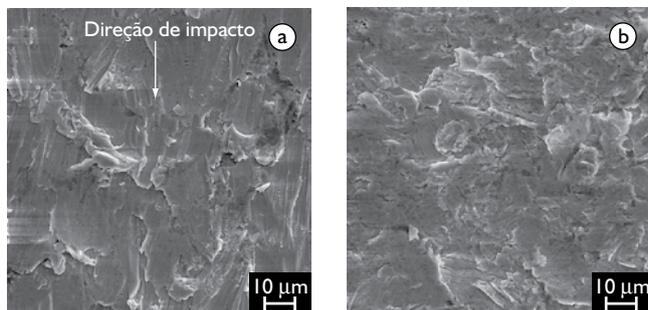
Observa-se, na Figura 4, que não existem diferenças na taxa média de desgaste entre microestrutura ferrítica-perlítica e microestrutura martensítica, principalmente para o ângulo de incidência de 90°. Segundo Hutchings,<sup>(7)</sup> o endurecimento por tratamento térmico ou por deformação mecânica não leva a mudança significativa na resistência à erosão. No caso do ângulo de incidência de 90°, o possível encruamento da superfície erodida causado pelo impacto das partículas se sobrepõe a qualquer diferença de dureza entre as amostras beneficiadas e recozidas. Já para o ângulo de 30°, o encruamento pelo impacto é menor e as partículas atuam riscando ou sulcando a superfície. Neste caso, um aumento na dureza poderia levar a uma contribuição maior na resistência à erosão, como o observado nas amostras beneficiadas.



**Figura 4.** Evolução da taxa de desgaste em amostras do aço ABNT 8550 beneficiado e recozido – Teste de erosão com ângulo de incidência de 30° e 90°, concentração média de areia 6% (peso) e velocidade média de impacto de 15 m/s.

Observa-se, na Figura 4, uma pequena tendência a uma menor resistência ao desgaste de amostras recozidas, de menor dureza, a 30°, porém, estatisticamente esta diferença não é significativa. Segundo Wang,<sup>(8)</sup> um aumento na dureza do material resulta em uma maior resistência à erosão. Ele testou vários materiais com diferentes durezas obtidas por tratamentos térmicos. Ele sugere um mecanismo em que a partícula erosiva penetra e corta o material, o que acontece em ângulos de incidência rasos. Acredita-se, que para ângulos menores que 30° este efeito seja bem mais evidente e significativo.

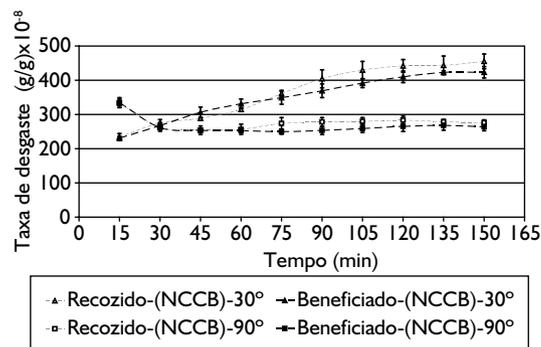
O aspecto típico das superfícies desgastadas é mostrado na Figura 5. Microcorte e microsulcamento são os mecanismos principais sugeridos quando a partícula erosiva atua em ângulos de incidência rasos.



**Figura 5.** Aspecto topográfico típico de amostras do aço ABNT 8550 beneficiado submetidas à erosão com ângulos de incidência de a) 30°; e b) 90°, areia com granulometria 0,3 mm-0,6 mm e velocidade média de impacto de 15 m/s.

Observa-se o deslocamento de matéria por deformação plástica resultando em protuberâncias nas laterais e nos finais dos sulcos/riscos, as quais são removidas nos impactos subsequentes. A incidência oblíqua resulta em uma superfície deformada e encruada formada por crateras decorrentes do impacto sucessivo das partículas erosivas. Os tamanhos dos eventos observados são praticamente os mesmos com o tempo de erosão

Os resultados dos testes de erosão nas amostras nitretadas são mostrados na Figura 6. Primeiramente, observa-se que as taxas de desgaste são sistematicamente menores que aquelas observadas nas amostras sem nitretação (Figura 4 e Figura 6).

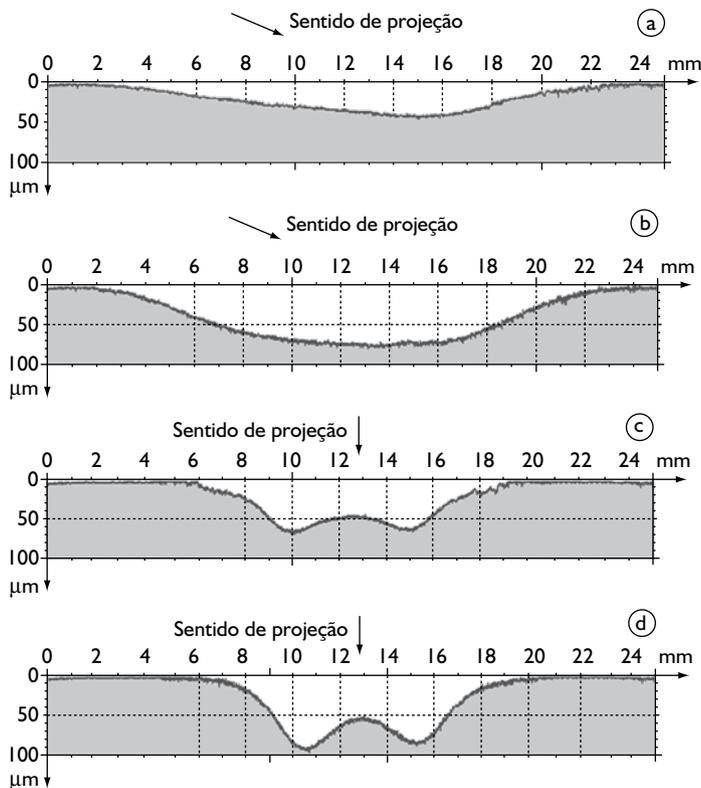


**Figura 6.** Evolução da taxa de desgaste em amostras nitretadas, com a presença de camada branca, do aço ABNT 8550 recozido e beneficiado – Teste de erosão com ângulos de incidência de 30° e 90°, concentração média de areia 6% (peso) e velocidade média de impacto de 15 m/s.

Este resultado pode ser associado aos efeitos benéficos do nitrogênio, o qual aumenta a dureza dos materiais, propriedade importante para a resistência ao desgaste, a resistência à fadiga e a resistência à corrosão. Diferentemente dos resultados da Figura 4, onde a taxa de erosão é praticamente constante com o tempo, a taxa de erosão das amostras nitretadas varia com o tempo. Isto se deve às mudanças nas propriedades do material ao longo da camada nitretada, a qual é composta pela camada branca mais externa e logo abaixo dela, tem-se a zona de difusão, seguida do substrato do material. Inicialmente observa-se um comportamento frágil do material testado, isto é, uma maior taxa de erosão para a incidência oblíqua das partículas, onde praticamente toda energia de impacto é usada na destruição da camada branca.

Uma análise feita por interferometria da profundidade da cratera de desgaste mostra que nos primeiros 15 minutos a camada branca teve uma remoção quase total. A profundidade máxima da cratera de desgaste foi, em média, 43 µm para o ângulo de incidência de 30° e 64 µm para o ângulo de incidência de 90°, valores estes bem superiores à espessura média da camada branca que foi de 25 µm. Os perfis das crateras de desgaste são apresentados na Figura 7. As crateras de desgaste das amostras sem nitretação tiveram profundidades superiores a 80 µm.

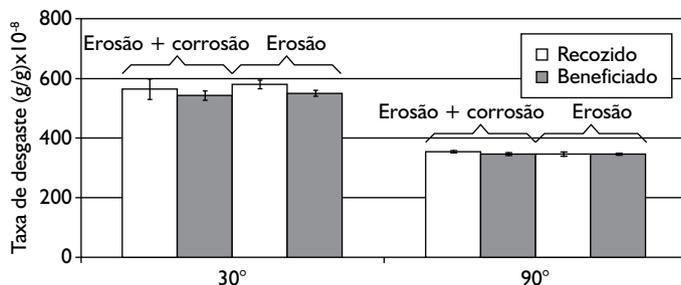
Com 30 minutos de teste, a resistência ao desgaste é a mesma para os diferentes ângulos de impacto. Na seqüência, a região solicitada é composta, basicamente, pela zona de difusão e, a partir dela, observa-se um comportamento dúctil, onde as menores taxas de desgaste são observadas para o ângulo de incidência de 90°.



**Figura 7.** Perfil topográfico das superfícies erodidas por 15 minutos passando pelo centro de impingimento. Amostras nitretadas 30° e 90° (a e c) e sem nitretação 30° e 90° (b e d).

### 3.2 Erosão-corrosão

O gráfico da Figura 8 apresenta os resultados dos testes de erosão e erosão+corrosão realizada nas amostras sem nitretação. Observa-se, que para o mesmo ângulo de incidência a taxa de desgaste envolvendo a erosão e erosão+corrosão é a mesma, indicando que nestas condições de teste não houve nenhum efeito sinérgico significativo. A interação entre erosão e corrosão tem sido abordada em dois regimes diferentes.<sup>(9)</sup> Um quando a erosão aumenta a taxa de corrosão, chamado de efeito aditivo, e outra quando a corrosão aumenta a erosão chamada de efeito sinérgico. Quando a corrosão impede a erosão, pela formação de uma camada



**Figura 8.** Comparação da média de desgaste entre testes puramente erosivos e testes de erosão+corrosão em amostras do aço ABNT 8550, beneficiado e recozido. Testes com ângulos de incidência de 30° e 90°, concentração média de areia 6% (peso) e velocidade média de impacto de 15 m/s (testes com 60 minutos de duração).

protetora, o efeito sinérgico é dito negativo. O domínio da erosão e da corrosão vai depender de muitas variáveis, tais como velocidade de impacto, ângulo de incidência, concentração e tamanho de partículas erosivas, tipo de fluido (pH, viscosidade, temperatura, potencial eletroquímico), dentre outros. Uma forma de determinar estes domínios é verificar a razão entre as taxa de erosão e a corrosão e quando esta razão é maior que 10, o processo é basicamente governado pela erosão.<sup>(9)</sup> Mapas de erosão-corrosão para o ferro puro em soluções contendo NaCl, indicam que para velocidades de impacto superiores a 7 m/s a erosão é dominante.<sup>(9)</sup> Nas condições de testes usadas neste trabalho, onde a velocidade de impacto média foi de 15 m/s, a taxa de erosão foi muito superior a taxa de corrosão em água do mar. Desta forma, a ausência de efeitos sinérgicos observada nos resultados deste trabalho provavelmente se deve à severidade da erosão imposta frente à corrosão.

Os testes de erosão e erosão-corrosão realizados nas amostras nitretadas também não indicaram nenhum efeito sinérgico. Acredita-se, que o motivo foi o mesmo verificado para os testes realizados nas amostras sem nitretação.

### 4 CONCLUSÕES

- A microestrutura do aço sem nitretação não influenciou significativamente na resistência à erosão e erosão-corrosão;
- as perdas de massa em condições de impacto normal à superfície de teste foram sistematicamente menores quando comparadas com as observadas na incidência oblíqua, indicando um comportamento dúctil do material;
- a nitretação aumentou significativamente a resistência à erosão; e
- a camada branca apresentou um comportamento frágil nas condições testadas; e
- devido à severidade da erosão, não foi possível identificar nenhum efeito sinérgico com a corrosão.

Recomenda-se o uso da nitretação em aplicações envolvendo erosão-corrosão.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobrás pelo apoio financeiro e ao LAMEF/UFRGS pela realização dos tratamentos termoquímicos e pelos ensaios de difração de Raios X.

## REFERÊNCIAS

- 1 WATSON, S. W.; FRIEDERSDORF, F. J.; MADSEN, B. W.; CRAMER, S. D. Methods of measuring wear-corrosion synergism. **Wear**, v. 181-3, n. 1, p. 476-84, feb. 1995.
- 2 SUN, Y.; BELL, T. A numerical model of plasma nitriding of low alloy steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 244, n. 2, p. 419-34, apr. 1997.
- 3 MENTHE, E.; BULAK, A.; OLFE, J.; ZIMMERMANN, A.; RIE, K.T. Improvement of the mechanical properties of austenitic stainless steel after plasma nitriding. **Surface and Coatings Technology**, v. 133-4, p. 259-63, nov. 2000.
- 4 CHYOU, S. D.; SHIH, H. C. Structure and electrochemical properties of plasma-nitrided low alloy steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 129, n. 1, p. 109-17, oct. 1990.
- 5 FRANCO, S. D.; PAES, M. T. P.; SILVA, F. J.; MORAES, J. O.; FRANCO JÚNIOR, M. R., SOUZA, R. J. Desenvolvimento e avaliação de infraestrutura para estudo da corrosão-erosão em equipamentos da indústria petrolífera. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 22., 2002, Salvador. Local de publicação: Editora, 2002. v. 1. p. 1-10.
- 6 CHATTERJEE-FISCHER, R.; EYSEL, F.-W.; HOFFANN, R.; LEIDTKE, D.; MALLENER, H.; REMBGES, K.; SCHREINER, A.; WELKER, G. **Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen** – Nitrieren und Nitrocarburieren. Berlin: Expert, 1995.
- 7 Hutchings, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. London: British Library, 1992.
- 8 WANG, Q. Wear resistance of steels under wet-abrasive erosion conditions. **Wear**, v. 112, n.2, p. 207-16, nov. 1986.
- 9 STACK, M.M.; PUNGWIWAT, N. Erosion–corrosion mapping of Fe in aqueous slurries: some views on a new rationale for defining the erosion–corrosion interaction. **Wear**, v. 256, n. 5, p. 565–76, Mar. 2004.
- 10 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1141-98**: standard practice for the preparation of substitute ocean water. Philadelphia, 2003.

Recebido em: 4/04/07

Aceito em: 12/07/07

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro. São Paulo: ABM, 2006.