

ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO AÇO AISI H13 SUBMETIDO A DIFERENTES TRATAMENTOS SUPERFICIAIS¹

Anael Krelling²
Jeferson Dallmann²
Júlio César Giubilei Milan³
César Edil da Costa³

Resumo

Tratamento termoquímico de boretção sólida foi realizado em aço AISI H13 com o objetivo de se comparar as propriedades tribológicas em relação a tratamentos de nitretação (sólida, gasosa e plasma). Testes de desgaste por deslizamento do tipo pino-sobre-disco foram realizados para avaliar a resistência ao desgaste e coeficiente de atrito. Após o teste de desgaste as amostras foram cortadas em sua seção transversal para avaliar a espessura e morfologia da camada boretada através de microscopia óptica e ensaio de microdureza Vickers. Difração de raios-X foi utilizada para comprovar a formação das fases FeB e Fe₂B na camada de boretos. A boretção por via sólida apresentou resultados satisfatórios em comparação com os tratamentos de nitretação, tanto no volume de material removido quanto no valor do coeficiente de atrito. A camada boretada apresentou formação das fases FeB e Fe₂B, favorecendo a formação e propagação de trincas na interface entre as fases.

Palavras-chave: Boretção sólida; Teste de desgaste pino-sobre-disco; Comportamento ao desgaste; Aço AISI H13.

STUDY OF TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF AISI H13 STEEL SUBMITTED TO DIFFERENT SURFACE TREATMENTS

Abstract

Solid boriding thermochemical treatment was carried out on AISI H13 steel in order to compare the tribological properties compared to the nitriding treatments (solid, gas and plasma). Sliding wear pin-on-disc tests were carried out to evaluate the wear resistance and the friction coefficient. After the wear test, samples were cut in cross section to evaluate the thickness and morphology of borided layer by optical microscopy and Vickers microhardness testing. X-ray diffraction was used to verify the formation of FeB and Fe₂B phases in the borided layer. Solid boriding showed satisfactory results in comparison with the nitriding treatment, both in the volume of material removed as the coefficient of friction. The borided layer showed the formation of FeB and Fe₂B phases favoring the formation and propagation of cracks at the interface between the phases.

Key words: Solid boriding; Pin-on-disc wear test; Wear behavior; AISI H13 steel.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Mecânico. Mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais, UDESC.

³ Engenheiro Mecânico. Doutor Prof.Dr. Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC.

1 INTRODUÇÃO

O uso desses processos de tratamento superficial nos materiais de engenharia pode melhorar suas propriedades tribológicas (aumento da resistência ao desgaste e diminuição do coeficiente de atrito), aumentar a resistência à oxidação e corrosão, entre outros fatores. A maioria dos elementos de máquinas usados hoje operam sob severas condições envolvendo desgaste adesivo e abrasivo, erosão por partículas sólidas, corrosão e oxidação que podem diminuir sua durabilidade e performance.⁽¹⁾

O processo de boretação é, nesse sentido, uma boa alternativa de melhoria de propriedades superficiais em materiais ferrosos e não-ferrosos.

Boretação é um tratamento termoquímico no qual átomos de boro se difundem para o interior da matriz metálica. Por ser de pequeno tamanho, os átomos de boro difundem-se em uma variedade de materiais como metais ferrosos, ligas de níquel e cobalto, ligas refratárias, ligas de titânio e materiais sinterizados como WC – TiC com Co ou Ni como ligantes etc.⁽²⁻⁴⁾

O tratamento termoquímico de boretação é geralmente aplicado na indústria em ligas ferrosas para melhorar sua dureza superficial e resistência ao desgaste.⁽⁵⁾ A boretação, tipicamente, ocorre na faixa de temperaturas entre 840°C e 1.050°C e pode ser realizada em uma variedade de meios como: pós, sais, óxidos fundidos, gases e pastas.⁽⁵⁻⁸⁾ Dentre estes meios para realização da boretação, os agentes boretantes sólidos têm suas vantagens sobre outros processos em termos toxicológicos e econômicos.^(9,10)

Na boretação com pó, as peças a serem tratadas são colocadas em caixas feitas de aço refratário de 3 mm a 5 mm de espessura e as superfícies a serem boretadas são cobertas com aproximadamente 10 mm a 20 mm de pó boretante, responsável pelo fornecimento de boro. As caixas são então aquecidas entre 840°C a 1.050°C. O resfriamento é feito ao ar. Os pós boretantes são compostos de uma substância responsável pelo fornecimento de boro (B₄C, ferro-boro, boro amorfo ou bórax [Na₂B₄O₇.10H₂O]), como diluentes são utilizados, geralmente SiC ou Al₂O₃, não tomando parte na reação e um ativador (cloreto de amônia, fluoreto duplo de boro e potássio, etc.). Existem marcas comerciais de pós para boretação, como as várias classes de Ekabor.⁽¹⁰⁻¹³⁾

A difusão de boro na superfície de ligas ferrosas leva a formação de boretos metálicos, como FeB (16,23%p B, ortorrômbica) e Fe₂B (8,83%p B, tetragonal).^(13,14) A formação desses boretos depende da temperatura, composição da liga, tempo de tratamento e potencial de boro na vizinhança da superfície.⁽¹⁵⁾

O efeito do potencial de boro é refletido, principalmente, na diminuição da energia de ativação, facilitando a difusão de boro na direção [0 0 1] nas fases FeB e Fe₂B.⁽¹⁶⁾ A presença de uma camada da fase Fe₂B é mais desejável do que uma camada mista de FeB e Fe₂B. A fase mais rica em boro (FeB) é mais frágil do que a camada de Fe₂B. Além disso, as camadas de FeB e Fe₂B são formadas sob tensões de tração e compressão, respectivamente, facilitando a formação e propagação de trincas na interface dessas fases.⁽¹¹⁾ A formação de trincas pode ser explicada pelo fato das fases FeB e Fe₂B apresentarem coeficientes de expansão volumétrica diferentes para a mesma temperatura ($\alpha_{FeB} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_{Fe_2B} = 7,85 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).⁽⁶⁾

Pelo fato da boretação se tratar de um processo difusional, quanto maior a temperatura e o tempo de tratamento, maiores serão as camadas boretadas já que a mobilidade dos átomos de boro no interior do metal base aumenta.

Outro fator de grande influência, não só na espessura da camada, mas também na morfologia desta são os elementos de liga do substrato. Normalmente, quanto maior

o teor de elementos de liga, mais fina e lisa será a interface entre a camada boretada e o substrato.⁽⁵⁾ Os elementos de maior influência são C, Cr e Ni. Com o aumento do teor de C a espessura da camada diminui e a dureza aumenta. O C não se dissolve significativamente nas fases FeB e Fe₂B, sendo “empurrado” à frente da camada boretada e formando, assim, uma zona rica em carbeto e borocarbeto (Fe₃C, Cr₂₃C₆, Fe₇C₃ e Fe₃(B,C)) na interface entre a fase Fe₂B e a matriz. Isso pode explicar a menor adesão da camada de boreto em substratos com maior quantidade de elementos de liga. O Cr, por sua vez, tende a aumentar a quantidade de FeB na camada boretada, aumentando sua dureza e fragilidade. O Ni favorece a formação de uma camada mais regular e fina.⁽³⁾ Os elementos de liga servem como barreiras à difusão das camadas de boreto. A espessura da camada boretada, dessa forma, diminui com o aumento da quantidade de elementos de liga.⁽¹⁷⁾ A morfologia da camada de boreto também é afetada pela presença de elementos de liga.

O aço para trabalho a quente AISI H13 apresenta morfologia da camada de boreto com menor formação de interface “dente-de-serra” do que um aço comum ao carbono.⁽¹⁸⁾ Esse tipo de aço é adequado e muito utilizado para tratamentos superficiais como nitretação e boretação.⁽¹⁹⁾ Nesse tipo de aço é possível perceber a formação de uma subcamada entre a camada de boreto e o substrato não afetado pelo tratamento. Essa subcamada é rica em Si, formador de ferrita, sendo, portanto, mole se comparada com o restante do material. Assim como o Cr, o Si também apresenta baixa solubilidade na camada de boreto, sendo difundido para o interior da amostra.⁽¹⁰⁾

Se a peça tratada for submetida a carregamentos superficiais elevados essa subcamada pode levar à trincas como resultado do efeito “casca de ovo”.⁽¹⁵⁾ As camadas de boreto podem ser fraturadas, levando a uma mudança no mecanismo de desgaste devido às partículas duras geradas pela presença da camada de boreto. Essas partículas mudam o mecanismo de desgaste de adesivo para abrasivo. Em comparação com o tratamento termoquímico de cementação, a boretação apresenta resistência ao desgaste de 5 a 10 vezes maior. Os aços boretados são extremamente resistentes à abrasão e adesão quando submetidos a carregamentos suaves em virtude de sua grande dureza, podendo ser substituídos de aços cementados ou nitrocementados.⁽²⁰⁾

O objetivo deste estudo é realizar uma comparação entre as características tribológicas do aço AISI H13 submetido ao tratamento de boretação por via sólida e tratamentos termoquímicos de nitretação sólida, gasosa e iônica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foi utilizado o aço para trabalho a quente AISI H13. A Tabela 1 mostra a composição química desse aço. As amostras foram cortadas de barras com 30 mm de diâmetro e 6 mm de espessura.

As amostras foram lixadas e polidas até 1 µm e submetidas a tratamento termoquímico de boretação sólida, sendo acomodadas em um cadinho selado contendo pó para boretação da marca Ekabor 1-V2[®]. O tratamento de boretação foi realizado em uma temperatura de 1.000°C durante 2 horas.

Tabela 1. Composição química das amostras

	% C	%Cr	%Mn	%Si	%Mo	%V	%Ni	%Al
AISI H13	0,32	4,75	0,20	0,80	1,10	0,80	Máx
	0,45	5,50	0,50	1,20	1,75	1,20	0,30

Os tratamentos de nitretação foram realizados por Milan⁽²¹⁾ e apresentam as seguintes condições:

A nitretação gasosa foi realizada na Empresa Brasimet, sediada na cidade de Joinville, SC. Através do processo denominado Deganit, com atmosfera de 50% NH₃, 50% N₂, e CO₂ em pequena quantidade. A temperatura de nitretação foi 560°C por 10 h.

A nitretação a plasma, realizada no Laboratório de Plasma e Tratamento de Superfícies do Departamento de Física, da Udesc. Foi realizado em uma atmosfera de 20% N₂ e 80% H₂ a 560°C por 3 horas.

A nitretação sólida foi realizada no Laboratório de Tratamentos Térmicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Udesc. Este tipo de nitretação utiliza um granulado sólido denominado pelo fabricante de Turbonit k-20[®]. Neste método, as amostras são imersas neste granulado em um recipiente vedado para garantir o máximo de isolamento. As amostras foram dispostas no recipiente com o granulado de nitretação sólida. A nitretação sólida foi realizada a 560°C por 3 horas e 10 horas. Para avaliação das propriedades tribológicas, as amostras foram submetidas ao ensaio de desgaste por deslizamento do tipo pino-sobre-disco sem lubrificação, de acordo com a norma ASTM G99/2010.⁽²²⁾ Os ensaios foram realizados em ambiente com umidade controlada e menor do que 30%, o contra-corpo utilizado era de alumina com 6 mm de diâmetro. A carga aplicada foi de 10N, a velocidade de deslizamento de 0,1 m/s e a distância de deslizamento de 1.000 m.

O volume de material removido foi obtido com o auxílio de um Perfilômetro CV-2000 Contrace Mitutoyo e uma rotina computacional. O coeficiente de atrito foi medido no tribômetro fabricado na própria Udesc.

Para caracterização da camada boretada, as amostras foram submetidas à microscopia ótica e ensaio de microdureza Vickers.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O perfil aproximado de dureza para o aço H13 boretado é mostrado na Figura 1. O valor médio de dureza da camada boretada atingiu 1.420 HV_{0,1}, sendo esta camada da ordem de 60 μm (Figura 2a). Abaixo da camada boretada pode-se observar uma subcamada mole (Figura 2b), com dureza na ordem de 368 HV_{0,1}, essa subcamada, de acordo com Heck,⁽¹⁰⁾ é rica em silício (formador de ferrita) e portanto adquire valores de dureza mais baixos do que o núcleo do material (620 HV_{0,1}). Em comparação com o trabalho de Milan,⁽²¹⁾ os valores obtidos por microdureza Vickers apresentaram-se maiores para o tratamento de boretção do que para os tratamentos de nitretação.

Na Figura 2a ainda é possível notar a presença de uma camada mais externa (escura) de FeB, além da camada mais clara de Fe₂B. Devido a formação dessa camada dupla observa-se a formação de trincas nas regiões de interface entre as camadas devido aos diferentes valores de coeficiente de dilatação volumétrica e tensões nessas fases.^(6,11)

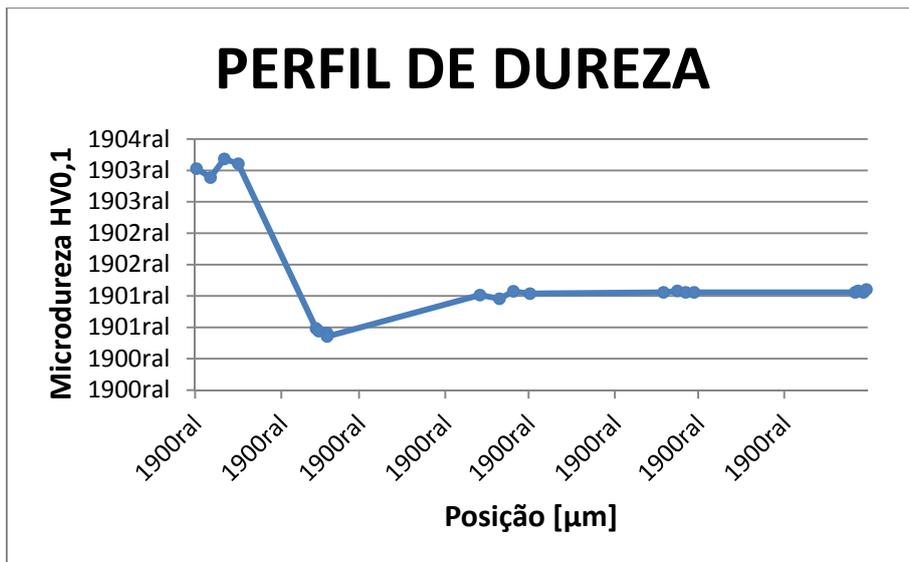


Figura 1. Perfil de dureza para o aço AISI H13 boretado a 1.000°C por 2 horas.

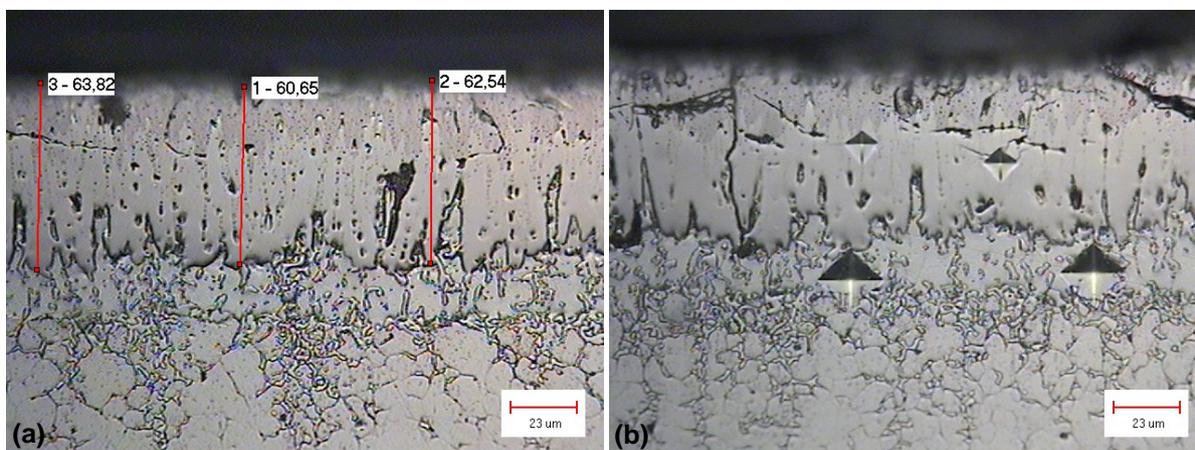


Figura 2. Micrografias do aço H13 boretado. (a) Espessura média da camada boretada; e (b) detalhe da subcamada mole.

Para comprovar a formação de camada mista de FeB e Fe₂B foi realizada análise por difração de raios-X. O espectro é apresentado na Figura 3 e mostra a formação das fases FeB e Fe₂B.

A Figura 4 mostra a comparação entre o tratamento termoquímico de boretção e os tratamentos de nitretação realizados por Milan⁽²¹⁾ para os resultados dos ensaios de desgaste por deslizamento do tipo pino-sobre-disco sem lubrificação em termos do volume de material removido.

Pode-se observar que, em se tratando do aço H13, os tratamentos de nitretação são estatisticamente iguais entre si no que diz respeito à resistência ao desgaste. Nota-se, porém, a melhora significativa da resistência ao desgaste quando da realização do tratamento de boretção por via sólida.

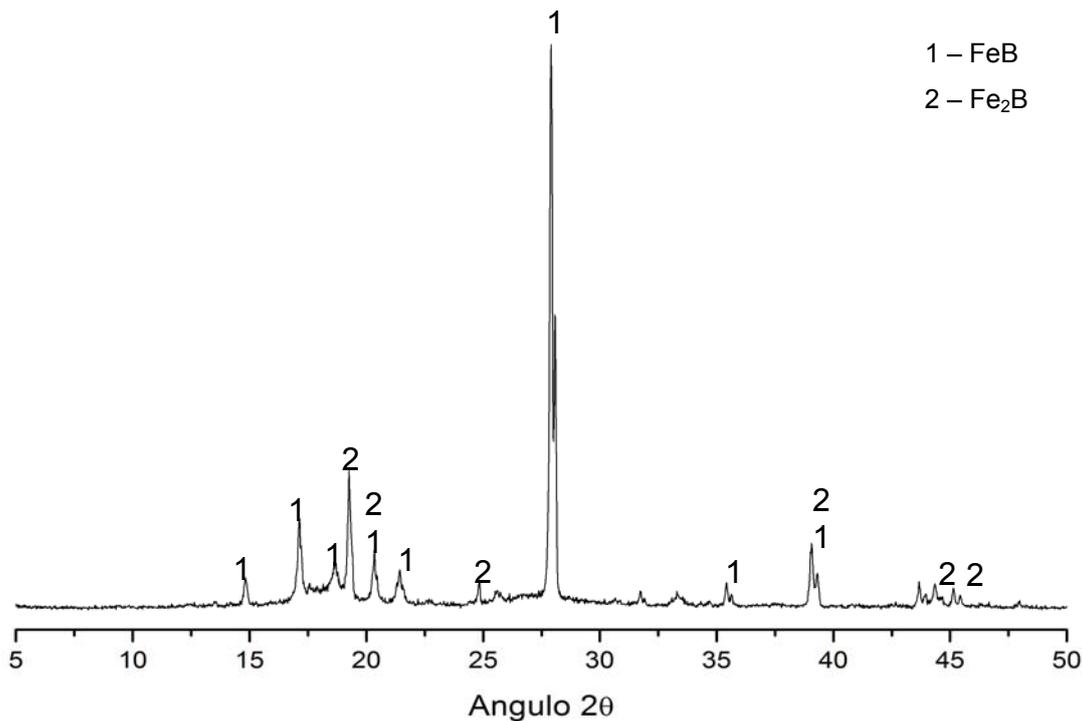


Figura 3. Espectro de difração de raios-X para amostra boretada.

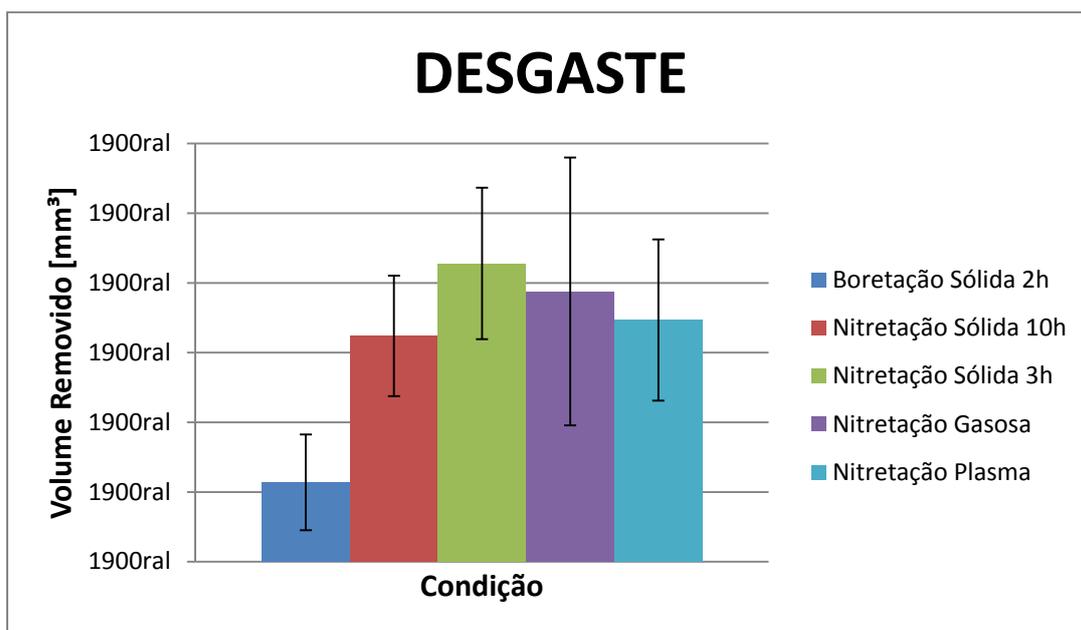


Figura 4. Comparação do volume de material removido, para aço H13, submetido a diferentes tratamentos termoquímicos.

Os resultados do coeficiente de atrito são mostrados na Figura 5. Percebe-se uma ligeira diminuição do coeficiente de atrito para as amostras boretadas, em comparação com o processo de nitretação. Porém, a comparação direta entre a boretação e a nitretação sólida por 3 horas apresentam resultados de coeficiente de atrito estatisticamente iguais.

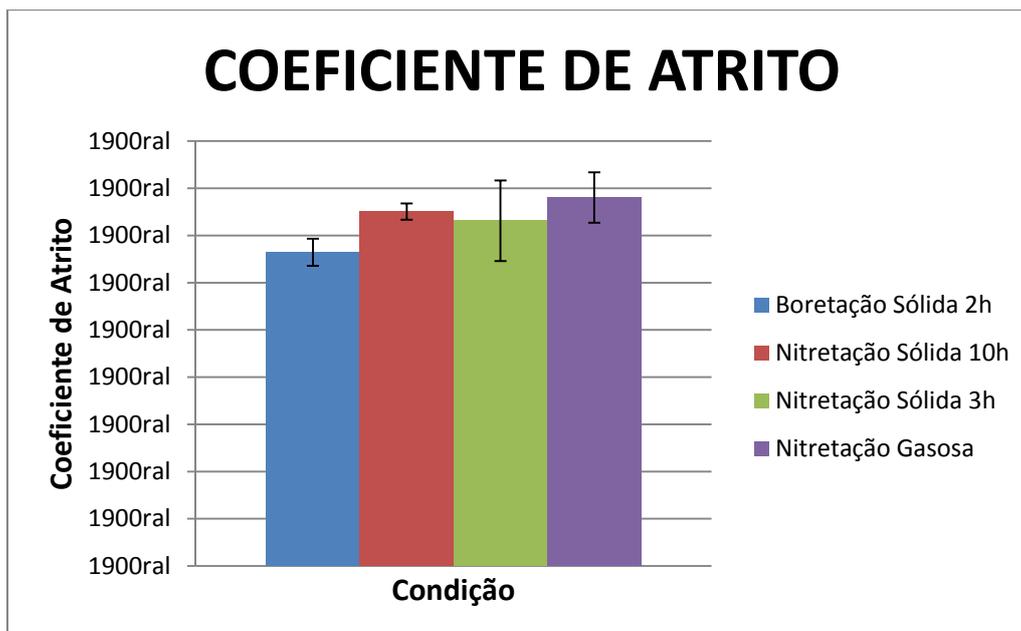


Figura 5. Valores médios do coeficiente de atrito das amostras de aço H13 submetidas a diferentes tratamentos termoquímicos. Ensaio pino-sobre-disco em contra-corpo de alumina.

4 CONCLUSÃO

Analisando-se os resultados obtidos pode-se concluir que:

- o tratamento de boretação por via sólida proporcionou melhores resultados de resistência ao desgaste em comparação com os tratamentos de nitretação;
- em comparação com os tratamentos de nitretação sólida por 10 h e nitretação gasosa, o tratamento de boretação sólida apresentou menores valores para o coeficiente de atrito;
- a microdureza da camada superficial para o tratamento de boretação foi superior aos valores encontrados para os tratamentos de nitretação;
- a camada boretada apresentou a presença das fases FeB (externa) e Fe₂B (interna), favorecendo a propagação de trincas; e
- a espessura da camada boretada foi condizente com os resultados apresentados na literatura para as mesmas condições de tratamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Capes pelo auxílio financeiro da bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- 1 KARTAL, G. TIMUR, S. ERYILMAZ, O. L.; ERDEMIR, A. Influence of process duration on structure and chemistry of borided low carbon steel. **Surface and Coatings Technology**, v. 205, n. 5, p. 1578-1583, 2010. Elsevier B.V.
- 2 ATIK, E. The effects of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels. **Tribology International**, v. 36, n. 3, p. 155-161, 2003.
- 3 BEJAR, M.; MORENO, E. Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 173, n. 3, p. 352-358, 2006.

- 4 MU, D. SHEN, B.-LUO; ZHAO, X. Effects of boronizing on mechanical and dry-sliding wear properties of CoCrMo alloy. **Materials & Design**, v. 31, n. 8, p. 3933-3936, 2010. Elsevier Ltd.
- 5 CAMPOS, I. RAMIREZ, G. VILLAVELAZQUEZ, C. FIGUEROA, U.; RODRIGUEZ, G. Study of microcracks morphology produced by Vickers indentation on AISI 1045 borided steels. **Materials Science and Engineering: A**, v. 475, n. 1-2, p. 285-292, 2008.
- 6 JAIN, V.; SUNDARARAJAN, G. Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel. **Surface and Coatings Technology**, v. 149, n. 1, p. 21-26, 2002.
- 7 SAHIN, S. Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 4, p. 1736-1741, 2009.
- 8 PETROVA, R. S. SUWATTANANONT, N.; SAMARDZIC, V. The Effect of Boronizing on Metallic Alloys for Automotive Applications. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 17, n. 3, p. 340-345, 2008.
- 9 KEDDAM, M.; CHENTOUF, S. A diffusion model for describing the bilayer growth (FeB/FeB) during the iron powder-pack boriding. **Applied Surface Science**, v. 252, n. 2, p. 393-399, 2005.
- 10 HECK, S. C. **Influência da boretação com pó na resistência ao desgaste, corrosão e oxidação dos aços AISI 1060 e AISI H13**, 2010. Universidade de São Paulo.
- 11 ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook V. 4 - Heat Treating**. 1991.
- 12 CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- 13 MARTINI, C. PALOMBARINI, G. POLI, G.; PRANDSTRALLER, D. Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings. **Wear**, v. 256, p. 608-613, 2004.
- 14 ALLAQUI, O. BOUAOUADJA, N.; SAINDERNAN, G. Characterization of boronized layers on a XC38 steel. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, n. 6, p. 3475-3482, 2006.
- 15 GENEL, K. Boriding kinetics of H13 steel. **Vacuum**, v. 80, n. 5, p. 451-457, 2006.
- 16 CAMPOS, I. TORRES, R. RAMIREZ, G. GANEM, R.; MARTINEZ, J. Growth kinetics of iron boride layers: Dimensional analysis. **Applied Surface Science**, v. 252, n. 24, p. 8662-8667, 2006.
- 17 PETROVA, R. S.; SUWATTANANONT, N. Surface modification of ferrous alloys with boron. **Journal of Electronic Materials**, v. 34, n. 5, p. 575-582, 2005.
- 18 TAKTAK, SUKRU; TASGETIREN, S. Identification of Delamination Failure of Boride Layer on Common Cr-Based Steels. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 15, n. 5, p. 570-574, 2006.
- 19 TAKTAK, S. Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels. **Materials & Design**, v. 28, n. 6, p. 1836-1843, 2007.
- 20 SELÇUK, B. A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 141, n. 2, p. 189-196, 2003.
- 21 MILAN, J. C. G.; ALMEIDA, E. A. DOS S. DE; OLIVEIRA, R. D. DE; PEREIRA, J. B.; COSTA, D. E. DA. Efeito de Diferentes Métodos de Nitretação: Sólida, Gasosa e a Plasma sobre o Comportamento ao desgaste de Aços Ferramentas. 64^o Congresso Anual da ABM. **Anais...**, 2009. Belo Horizonte.
- 22 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. Reapproved, p. 1-5, 2010.