

ESTUDO DA TAXA DE DESGASTE E DO COEFICIENTE DE ATRITO DOS AÇOS HARDOX 450 E QUARD 400 DESLIZANDO CONTRA METAL DURO (WC/Co) POR MEIO DE ENSAIOS DE PINO SOBRE DISCO

Walter Mota Da Fonseca, waltmec@gmail.com¹

Verner Petersen Pereira, vernerpereira@demai.ufmg.br¹

Rodrigo Abrantes Couy Baracho, rbaracho@hotmail.com¹

Anderson Júnior Dos Santos, ndersonsantos@hotmail.com¹

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹

Universidade Federal De Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte – MG, Brasil

Resumo: Ensaios de desgaste são práticas muito importantes para realizar a caracterização dinâmica do par de materiais em atrito, com o intuito de prever a vida útil de componentes em uma determinada aplicação, pois é possível fazer um estudo da taxa de desgaste, mecanismos de desgaste atuantes para um determinado meio e coeficiente de atrito para uma determinada carga. O presente trabalho avaliou a taxa de desgaste e coeficiente de atrito para os aços Hardox 450 e Quard 400 deslizando contra esfera de metal duro WC/Co, materiais de elevada resistência à abrasão e alta dureza. Executaram-se trabalhos de corte, usinagem, polimento superficial e o controle da rugosidade dos corpos de prova para obter uma rugosidade média conforme norma ASTM G99-05 (2010). Foram feitos os ensaios pino sobre disco com cargas de 2 e 20 N na temperatura ambiente de 25° Celsius, utilizando uma esfera de metal duro (WC/Co) sem revestimento em contato com os materiais Hardox 450 e Quard 400, simulando uma condição de desgaste. Verificou-se a influência da redução da dureza superficial nas taxas de desgaste e coeficiente de atrito no início do deslizamento e na condição de regime permanente durante o experimento. A investigação das pistas desgastadas foi analisada com auxílio de um microscópio óptico. Os aços apresentaram comportamento distintos das taxas de desgaste e coeficiente de atrito em função das cargas aplicadas. O Hardox 450 obteve menor taxa de desgaste em comparação com o Quard 400, para cargas mais elevadas. Com cargas menores o comportamento de ambos os aços foi similar.

Palavras-chave: Pino sobre disco, Hardox 450 e Quard 400, desgaste.

1. INTRODUÇÃO

Com a finalidade de determinar as taxas de desgastes e o coeficiente de atrito de materiais que possuem boa resistência ao desgaste e à abrasão, foi realizado ensaio pino sobre disco entre o par tribológico metal duro WC/Co e os materiais Hardox 450 e Quard 400. Segundo Hon do (1996) a configuração pino sobre disco é comumente usada para ensaio de desgaste em laboratórios devido ao seu arranjo simples. Sendo que devido à sensibilidade do tribômetro os resultados são influenciados por mínimas mudanças nas condições ensaiadas como temperatura, umidade e vibração, o que é um problema para a repetitividade, reprodutibilidade dos ensaios e aplicação em ambientes que não tenham atmosfera controlada. O ensaio de desgaste pino sobre disco segue a norma internacional ASTM G99-05 (2010). O ensaio é realizado a velocidade constante, sendo constituído de um pino e geralmente um disco, com uma força normal estática exercida através de massas de valores conhecidos. A aquisição de dados normalmente é feita através de um software instalado em um computador acoplado ao tribômetro.

O desgaste de componentes e equipamentos ocorre em diversos sistemas, sendo um fator de grande relevância para a indústria, pois limita a vida útil do maquinário e eleva os custos do processo produtivo. Os custos de manutenção e de troca de componentes são muito elevados e soluções tecnológicas que promovem o prolongamento da vida útil de equipamentos e componentes sempre são foco de pesquisas. Assim, as chapas de desgastes foram desenvolvidas para a proteção de equipamentos tendo como vantagem o emprego de materiais de maior resistência. Um exemplo de chapas resistentes ao desgaste são as chapas dos materiais Hardox e Quard que possuem diversas aplicações como: britadores, peneiras, alimentadores, cuba, caçambas, engrenagens, rodas dentadas etc.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito dos aços Hardox 450 e Quard 400 contra metal duro (WC/Co) durante o ensaio pino sobre disco.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A seleção dos materiais utilizados para realização dos ensaios de pino sobre disco deste trabalho foi baseada na necessidade de investigação de taxas de desgaste e coeficientes de atrito dos aços Hardox 450 e Quard 400 deslizando

contra esfera de metal duro (WC/Co) a determinadas cargas, neste caso, 2 e 20 N. A partir de amostra preparada de cada material, os ensaios com o tribômetro e verificação das pistas de desgaste, foi possível um estudo das taxas de desgaste, coeficientes de atrito e a observação dos mecanismos de desgaste impostos os corpos de prova.

2.1 Aço Hardox

Segundo Jan Komenda et al (2009) a gama básica do aço Hardox possui códigos de três números para a determinação da dureza Brinell: 400, 450, 500 e 600. O número do código crescente significa maior dureza e resistência à abrasão, por outro lado, significa também diminuição da ductilidade, tenacidade e soldabilidade. Neste trabalho, foi realizado o estudo do aço Hardox 450 com dureza Brinell (HB) variando entre 420- 475 HB, com valor médio de 450 HB, destinada a aplicações onde é requisitada resistência a abrasão em combinação com boas propriedades de dobramento a frio.

O material Hardox 450 tem sido aplicado na indústria mecânica principalmente na mineração. Além disso, o Hardox 450 tem sido tema de diversos trabalhos científicos com estudos relacionados com soldabilidade, revestimentos e até mesmo em barreiras balísticas para utilização militar. De acordo com Ulewicz et al (2014), as análises executadas em chapas de aço Hardox 450 apresentam estrutura martensítica acicular. A composição química especificada de acordo com o fabricante é apresentada na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química aço Hardox 450. Fonte: SSAB Special Steels.

Elemento Químico	C Max%	Si Max %	Mn Max%	P Max%	S Max%	Cr Max%	Ni Max%	Mo Max%	B Max%
%	0,23	0,50	1,60	0,025	0,010	1,20	0,25	0,25	0,005

2.2 Aço Quard

O aço Quard é um aço martensítico resistente à abrasão e pode suportar desgaste intensivo em uma ampla gama de aplicações, tais como: trituradoras, moedoras, escavadeiras de mineração e túneis, máquinas agrícolas, etc. O Quard 400 possui uma dureza que varia de 300 a 430 HB. Devido à sua versatilidade em termos de alta tenacidade, boa conformação a frio, excelente soldabilidade, resistência ao impacto e facilidade ao corte. A composição química especificada de acordo com o fabricante é apresentada na Tab. (2).

Tabela 2. Composição química aço Quard 400. Fonte: NLMK Europe Plate.

Elemento Químico	C Max. %	Si Max. %	Mn Max. %	P Max. %	S Max. %	Cr Max. %	Ni Max. %	Mo Max. %	Bo Max. %
%	0,17	0,60	1,60	0,025	0,010	1,30	0,50	0,50	0,005

3. MÉTODOS

Para realização dos ensaios de pino sobre disco foram preparados Fig. 1 “A” corpos de prova com as dimensões de 53 x 53 x 7 mm (Aço Quard 400) e 40 x 40 x 15 mm (Aço Hardox 450), (Fig. 1 “B” e 1 “C” respectivamente). As superfícies dos corpos de prova foram preparadas para se ter rugosidade conforme norma ASTM G99-05 (2010): Ra < 0,8 µm. (1).

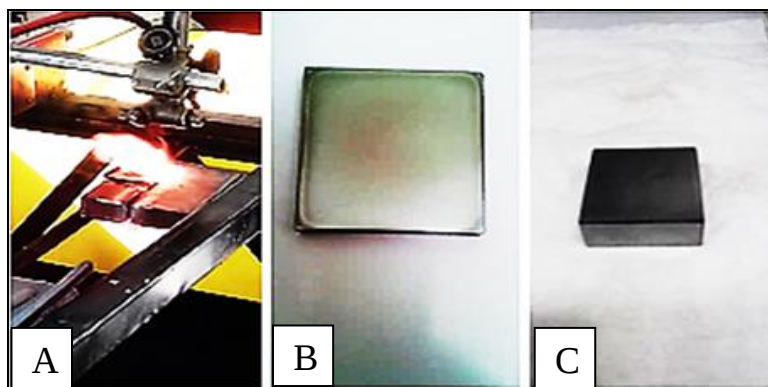


Figura 1. Corte (A), superfícies preparadas do Quard 400 (B) e Hardox 450 (C).

As massas das amostras foram medidas utilizando a balança da marca Shimadzu, modelo AX200, carga máxima 200 g e resolução de 0,1 mg. A medição de dureza foi feita com durômetro Brineell Wolpert, com carga de 187,5 kgf. Ensaios de desgaste pino sobre disco foram realizados, com velocidade de deslizamento constante de 0,5 m/s, à temperatura ambiente de 25° C e em condições de deslizamento a seco. Utilizou-se para o deslizamento nos ensaios de desgaste, uma esfera de metal duro com diâmetro de 6 mm sob cargas normais de 2 N e 20 N. Durante os ensaios de desgaste, o coeficiente de atrito foi registrado continuamente pelo software Nanovea Tribometer V 1.5 acoplado ao tribômetro fabricado pela Micro Photonics Inc. Modelo MT 60, Fig. (2). Após os testes de desgaste, as pistas de desgaste geradas nas superfícies foram analisadas com ampliação de 400 x por um microscópio Shimadzu HMV, de acordo com a Fig. (3).



Figura 2. Imagem do equipamento utilizado para os ensaios de desgaste.

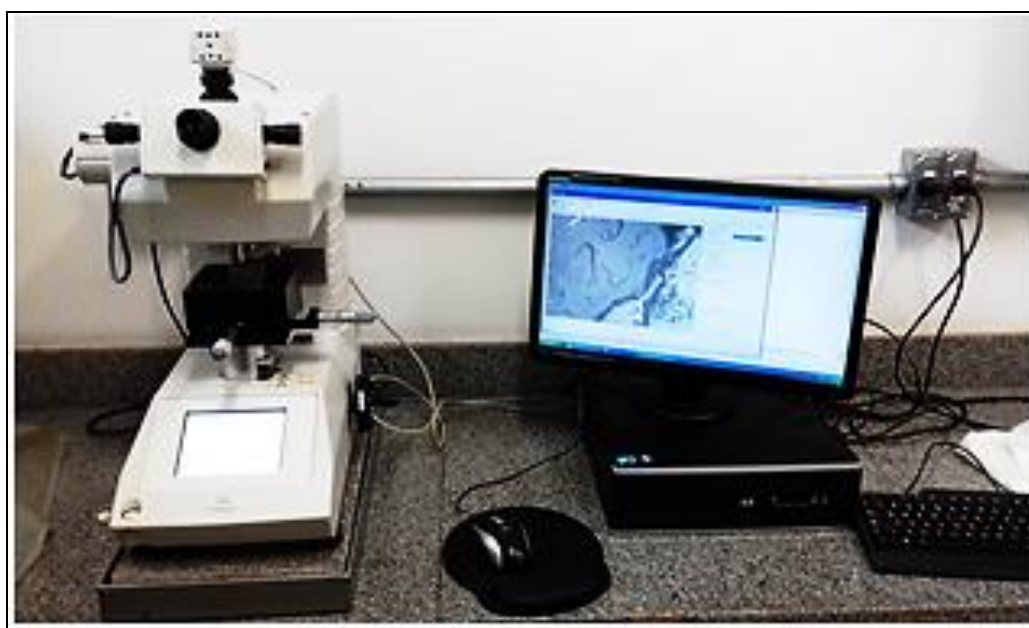


Figura 3. A imagem mostra o microscópio e o monitor utilizados.

As medições das massas dos corpos de prova foram feitas antes e depois dos ensaios. Os resultados dos ensaios de desgaste foram quantificados em termos de taxa de desgaste (mm^3/m), considerando a massa de desgaste das pistas dividindo pela densidade do aço ($7,85 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$), as cargas de ensaio em (N) e a distância de deslizamento em (m). A Figura (4) mostra os corpos de prova após os ensaios, Quard 400 (a) e Hardox 450 (b).

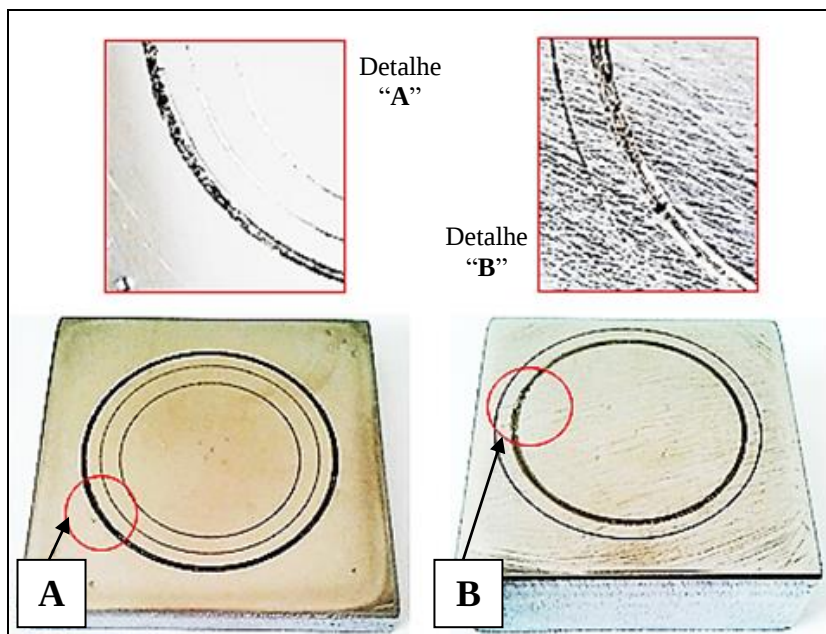


Figura 4. Amostras após os ensaios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variações da taxa de desgaste foram encontradas para as amostras avaliadas pelo ensaio pino sobre disco mostrado no gráfico da Fig. (5).

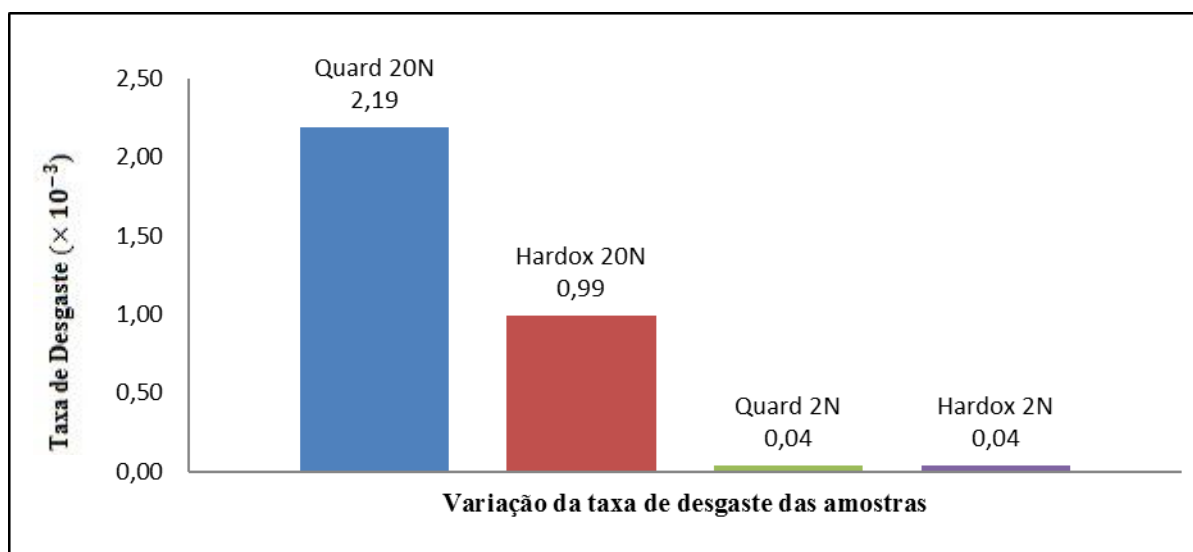


Figura 5. Resultados das taxas de desgaste pelo ensaio pino sobre disco com velocidade de 0,5 m/s em contato com uma esfera de metal duro.

Para carga normal de 2 N foram observadas taxas de desgaste de $0,04 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$, não havendo diferença significativa desta taxa para os aços Hardox 450 e Quard 400.

Com a carga normal de 20 N, as taxas de desgaste foram mais acentuadas, o Hardox 450 apresentou taxa de $0,99 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$, e o Quard 400 taxa de $2,19 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$, cerca de 2,2 vezes maior que o Hardox 450. Esta variação das taxas pode ser atribuída pela diferença de dureza dos materiais (Hardox 464 HB e Quard 337 HB). Comparada à carga 2 N, a carga normal de 20 N, causa maior pressão que por sua vez eleva a temperatura, que reduz a dureza do material. Pode ser observado na Fig. 6 que a carga de 20 N praticamente não apresentou variação do coeficiente de atrito após o período *running-in*.

Esta variação do coeficiente de atrito causada pela redução de dureza é apresentada no gráfico da Fig. (6) para cargas de 2 N, após distância de aproximadamente 200 m percorridos o coeficiente de atrito diminuiu e se manteve constante ao longo do tempo.

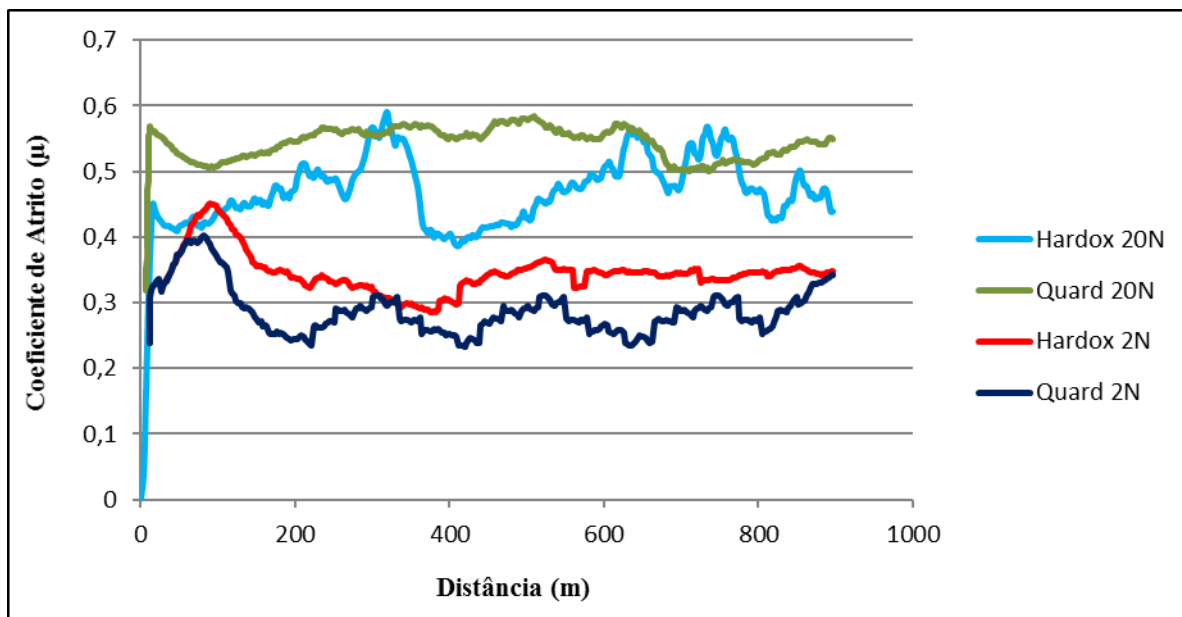


Figura 6. Resultados do coeficiente de atrito em função da distância percorrida no ensaio pino sobre disco com velocidade de 0,5 m/s em contato com uma esfera de metal duro.

Embora a 1ª lei do atrito lei de Amontons (1699) afirme que o coeficiente de atrito independe da carga, o gráfico da Fig. (6) mostra que ocorreu um aumento do coeficiente de atrito com o aumento da carga para ambos os aços. Para o aço Hardox 450 o coeficiente de atrito médio elevado de 0,36 para 0,47 já para o aço Quard 400, o aumento foi ainda mais expressivo de 0,27 para 0,54, ver Tab. (3). Algumas explicações podem ser apresentadas para esta variação. Com o aumento da carga, a área real de contato aumenta e com isso a parcela de adesão do coeficiente de atrito tende a aumentar no caso do atrito severo. O aumento da temperatura com a carga maior, provocada pelo maior volume de deformação, reduz a dureza do aço e implica em maior deformação, devido à menor resistência do aço se comparado ao aço encruado, tendendo a aumentar também o coeficiente de atrito por deformação.

Welsh N. C. apud Hutchings (1992) comparou a variação da taxa de desgaste no ensaio pino sobre disco para um aço médio carbono e encontrou também uma variação abrupta da taxa de desgaste e consequentemente do coeficiente de atrito para cargas entre aproximadamente 5 N e 80 N. Para cargas mais baixas existe uma camada de óxido entre as superfícies, portanto, menor coeficiente de atrito e taxa de desgaste, com aumento da carga e também com a variação da temperatura, esta camada pode não estar mais presente e o atrito se torna mais severo, para temperaturas mais elevadas pode se formar outra camada de óxido FeO, acima de 570° C, tornando a proteger o aço.

Tabela 3. Variação do coeficiente de atrito médio.

Coeficiente de atrito médio		
Carga Normal	Hardox 450	Quard 400
2 N	0,36	0,27
20 N	0,47	0,54

As pistas de deslizamentos das amostras com a carga de 2 N, Fig. (8), têm um aspecto mais áspero se comparado com as amostras com a carga de 20 N, Fig. (9). Pode se deduzir que houve desgaste adesivo mais acentuado para maior carga, já para menor carga pode ser observado desgaste abrasivo.

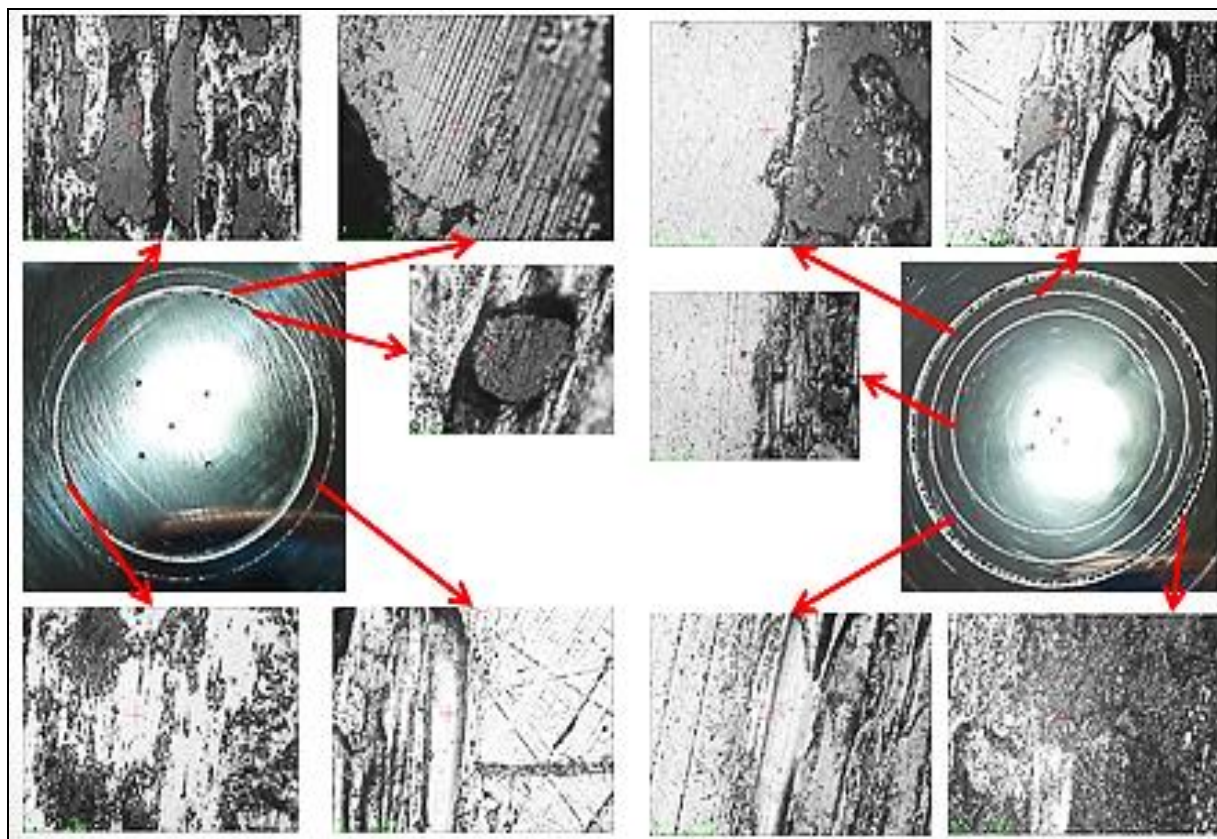


Figura 7. Imagens das regiões das pistas das amostras. Imagem esquerda: Hardox 450 e imagem direita: Quard 400. Ampliação de 400x.

As imagens ampliadas das pistas de deslizamento para este caso, Fig. (8), mostraram que houve deformação plástica das pistas.

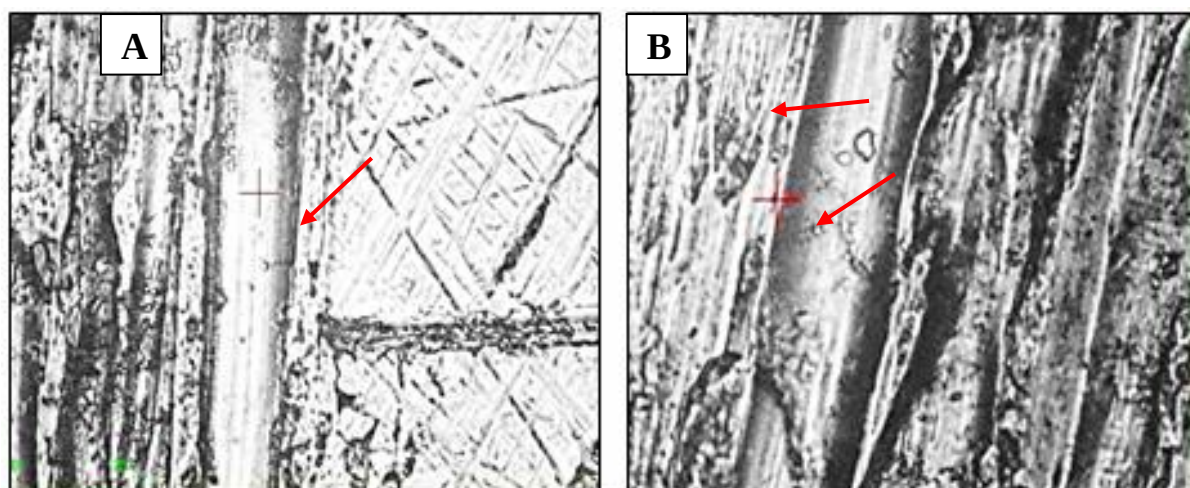


Figura 8. (A) Lateral da pista de deslizamento do aço Hardox 450 contra esfera de metal duro, carga de 2 N e (B) centro da pista de deslizamento do aço Quard 400 contra esfera de metal duro, carga de 2 N. Ampliação de 400x.

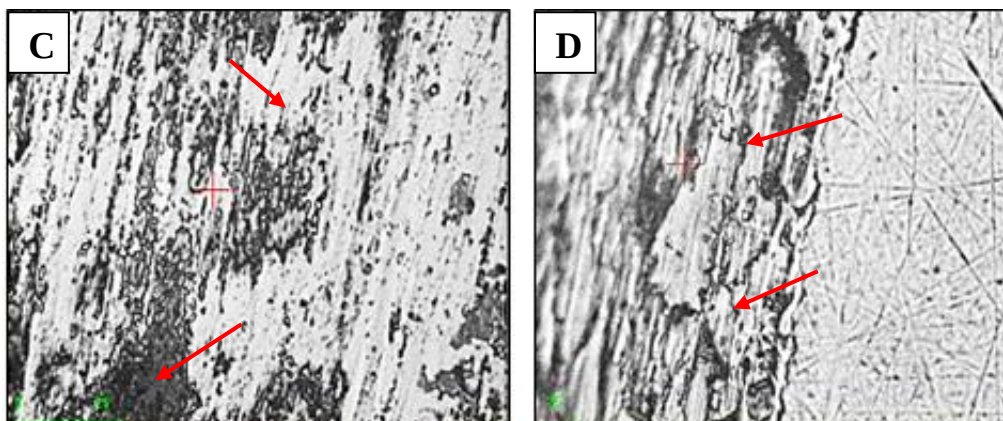


Figura 9. (C) Centro da pista de deslizamento do aço Hardox 450 contra esfera de metal duro, carga de 20 N e (D) lateral da pista de deslizamento do aço Quard 400 contra esfera de metal duro, carga de 20 N. Ampliação de 400x.

5. CONCLUSÕES

Para pequenas cargas normais, estes aços não apresentam diferença significativa da taxa de desgaste, apresentando um desgaste suave. Com cargas mais elevadas, ambos os aços apresentaram desgaste severo, sendo que o Quard 400 apresentou taxa 2,2 vezes maior que o Hardox 450. Assim é justificável, no caso o Hardox, sua utilização em aplicações onde se trabalha com cargas mais elevadas e atrito severo.

Duas justificativas foram apresentadas para as diferenças entre as taxas de desgaste e coeficiente de atrito das amostras ensaiadas. Contudo deverão ser feitos em trabalhos futuros, outras análises por ensaios metalográficos, difração por raios X e visualização por microscopia eletrônica de varredura, sobre a pista desgastada e os debris de desgaste, para melhor compreender os mecanismos de desgaste destes aços e também comprovar tais justificativas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais-campus Contagem e a Universidade Federal de Minas Gerais por disponibilizar os laboratórios e os equipamentos necessários para a execução deste trabalho. Agradecimentos a FAPEMIG, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq e a Capes pelo auxílio à publicação deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- H. Mindivan, 2013. "Effects of Combined Diffusion Treatments on the Wear Behaviour of Hardox 400 Steel".
- Hutchings, I. M., 1992. "TRIBOLOGY Friction and Wear of Engineering Materials". Ed. Edward Arnold, London, pp. 94-105.
- H. So, 1996. "Characteristics of wear results tested by pin-on-disc at moderate to high speeds".
- J. Komenda, J. Hub, 2009. "Ballistic Resistance of Steel Plate Hardox upon Impact of Non-Penetrating Projectiles" qt.nlmk.com/en/products/quard/. "Site do fabricante do aço Quard 400, NLMK Europe Plate, acessado em setembro de 2016".
- ssab.com/products/brands/hardox. "Site do fabricante do aço Hardox 450, SSAB Special Steels, acessado em setembro de 2016".
- Ulewicz, R., Mazur, M., Bokuvka, O. 2014, "Structure and mechanical properties of fine-grained steels", Periodica Polytechnica Transportation Engineering, Vol. 41, pp. 111-115.
- W. Grzesik, Z. Zalisz, P. Nieslony, 2002. "Friction and wear testing of multilayer coatings on carbide substrates for dry machining applications".

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

STUDY OF WEAR AND BACK OF STEELS HARDOX 450 AND QUARD 400 BY THE INFLUENCE OF THE ROOF AND OXIDE LAYER DURING THE TEST PIN ON DISC

Walter Mota Da Fonseca, waltmec@gmail.com¹

Verner Petersen Pereira, vernerpereira@demai.ufmg.br¹

Rodrigo Abrantes Couy Baracho, rbaracho@hotmail.com¹

Anderson Júnior Dos Santos, ndersonsantos@hotmail.com¹

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹

Universidade Federal De Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte – MG, Brasil

Abstract: Wear tests are very important practices to perform the dynamic characterization of the pair of materials in friction, predicting the useful life of components in a given application, it is possible to make a study of the wear rate, wear mechanisms acting for a given environment e coefficient of friction for a given load. The present work evaluated the wear rate and coefficient of friction for Hardox 450 and Quard 400 steels sliding against tungsten carbide sphere WC/Co, materials with high abrasion resistance and high hardness. Cutting, machining, surface polishing and the control of the roughness of the specimens were performed to obtain a medium roughness according to standard ASTM G99-05 (2010). The pin-on-disk tests with 2 N and 20 N loads were performed at 25 ° Celsius ambient temperature using an uncoated tungsten carbide sphere in contact with the Hardox 450 and Quard 400 materials, simulating a wear condition. The influence of the reduction of the surface hardness on the wear rates and friction coefficient at the beginning of the slip and in the steady state condition during the experiment was verified. The investigation of the worn tracks was analyzed using an optical microscope. The steels showed different behavior of the wear rates and coefficient of friction as a function of the applied loads. The Hardox 450 achieved a lower wear rate compared to the Quard 400 for higher loads. At lower loads the behavior of both steels was similar.

Keywords: Pin-on-disk, Hardox 450 and Quard 400, wear.