

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ABRASÔMETRO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO A QUENTE¹

Adriana Gómez Gómez²
Ediguer Enrique Franco³
Amilton Sinatora⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho foi projetar e construir uma máquina para estudar desgaste abrasivo a temperaturas de até 400°C. O projeto foi baseado na norma ASTM G-65 que descreve o procedimento para determinar a resistência ao desgaste abrasivo de materiais à temperatura ambiente. Foram realizadas modificações com a finalidade de realizar ensaios a temperaturas superiores. Foi construído um forno e envolta dele foram implementados: sistema de transmissão de potência do disco, sistema do braço de medição e sistema de alimentação do abrasivo. O braço de medição tem a função de sustentar porta-amostra e sistema de medição da força tangencial, e permitir a aplicação de carga normal. Além de determinar a perda de volume, o abrasômetro foi instrumentado com a finalidade de determinar o coeficiente de atrito. O comportamento térmico da máquina foi como esperado. Ensaio iniciais realizados com amostras de AISI D2 mostraram o sucesso do enfoque usado no projeto da máquina.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo; Temperatura; Abrasômetro.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ABRASIVE WEAR TESTER FOR ABRASIVE WEAR TESTS AT HIGH TEMPERATURES

Abstract

The aim of this work was to design and build a machine to study abrasive wear at temperatures up to 400 °C. The project is based on the ASTM G-65 standard that describes the procedure for determining the resistance of metallic materials to abrasive wear at room temperature. Proper modifications in the procedure were performed in order to consider higher temperature effects. A furnace was specially manufactured. The abrasive supply, power transmission and measuring arm systems were implemented outside this furnace. The measuring arm has two functions: to support the sample and the system for measuring the tangential load, and to allow the application of normal load. The wear tester permits to calculate the volume loss and was also instrumented to calculate the coefficient of friction. The thermal behavior of the equipment was as expected. Specimens of AISI D2 steel were used in preliminary tests, which showed the success of the approach used in the machine design.

Key words: Abrasive wear; Temperature; Abrasive wear tester.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Doutora em Engenharia de Materiais EP-USP*

³ *Doutorando em Engenharia Mecatrônica Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP)*

⁴ *Professor Titular, Engenharia Mecânica, EP-USP*

1 INTRODUÇÃO

O desgaste é uma consequência inevitável do movimento relativo entre superfícies, e representa um custo econômico significativo na indústria. O desgaste leva a uma diminuição na eficiência e confiabilidade de um dado sistema fazendo necessária a reparação ou reposição de peças. Contudo, o principal custo são as perdas ocasionadas pelos atrasos na produção devidos a paradas inesperadas para reparação e manutenção de peças e equipamento.

Uma das maneiras para diminuir o desgaste é a seleção dos materiais adequados para cada aplicação. Portanto, faz-se necessário realizar ensaios que permitam avaliar a resistência ao desgaste dos materiais, e poder relacioná-la com fatores como: composição, microestrutura e propriedades mecânicas.

O desgaste abrasivo, estudado neste trabalho, é definido como aquele desgaste devido a partículas ou protuberâncias duras, forçadas contra uma superfície sólida ou escorregando ao longo da mesma.⁽¹⁾ Um dos ensaios utilizados para determinar a resistência de materiais à abrasão é o ensaio de roda de borracha,⁽²⁾ que é utilizado não só para ensaiar materiais metálicos, mas também para outros tipos de materiais, como os cerâmicos.^(3,4)

Este ensaio é realizado a temperatura ambiente, mas é sabido que diversos materiais de engenharia estão submetidos a altas temperaturas. É o caso, por exemplo, das ferramentas de corte⁽⁵⁾ e de ferramentas para trabalho a quente, como matrizes para forjamento e moldes para injeção de metais líquidos. Componentes mecânicos importantes como camisas e anéis de pistão, freios e embreagens também sofrem desgaste e dissipam energia por atrito em temperaturas elevadas.

Os cilindros de laminação são outro exemplo. Durante a laminação a quente, a temperatura da superfície do cilindro aumenta devido ao contato com a chapa quente. O desgaste abrasivo em combinação com as altas tensões mecânicas e térmicas danificam a superfície do cilindro.

É amplamente conhecido que as propriedades dos materiais variam com a temperatura. Portanto a seleção de materiais para desgaste feita a temperatura ambiente pode não ser a mesma quando o ensaio for feito em temperaturas mais elevadas. Os exemplos citados acima mostram a importância de desenvolver métodos que permitam avaliar o desempenho e a seleção de materiais submetidos a desgaste envolvendo temperaturas superiores à temperatura ambiente. Na literatura são encontrados trabalhos que estudam desgaste a quente com configuração disco sobre disco^(6,7) e pin-sobre-disc,⁽⁸⁾ mas em ambos os casos não se considera a presença de um abrasivo no meio das duas superfícies. No Brasil, alguns pesquisadores lideraram a realização de ensaios a quente para estudar desgaste por deslizamento alternado.^(9,10) Diante do panorama apresentado nos parágrafos acima, o principal objetivo deste trabalho foi desenvolver uma máquina que possibilite o estudo de desgaste abrasivo a quente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Abrasômetro

Foi construída uma máquina para estudar desgaste abrasivo (abrasômetro) a quente. O projeto do abrasômetro foi baseado na norma ASTM G-65,⁽²⁾ equipamento comumente conhecido como “roda de borracha”, que descreve o procedimento para determinar a resistência de materiais metálicos ao desgaste abrasivo a temperatura

ambiente. O projeto típico do abrasômetro proposto na norma consiste de: um disco em rotação (contra-corpo) recoberto com borracha, um funil para carregar o abrasivo que passa entre o disco e a amostra, e um corpo de prova vinculado a um braço alavanca que tem a função de aplicar a carga normal do corpo de prova sobre o disco. Foram realizadas modificações para poder realizar ensaios a temperaturas de até 400°C. A principal modificação consistiu em utilizar como contra-corpo um disco de menor diâmetro fabricado em aço H13 ao invés de um disco recoberto com borracha. Em princípio, esta modificação pode ter duas implicações. A primeira que o abrasivo não passe entre o corpo-de-prova e o contra corpo, a segunda é que o mecanismo de desgaste não seja abrasão, isto devido à dureza do contra corpo. O comportamento geral da máquina, incluindo a comprovação da passagem do abrasivo na interface corpo-contra corpo e o mecanismo de desgaste, foi verificado mediante ensaios preliminares (seção 2.3).

Com este abrasômetro, além de medir a perda de massa, é possível determinar o coeficiente de atrito do sistema tribológico já que foi implementado um sistema de medição instrumentado que permite medir a força tangencial que o disco exerce sobre a amostra. A Figura 1 mostra um esquema geral da montagem mecânica, constituída por quatro subsistemas: Forno, sistema de transmissão de potência do disco, sistema de medição da força tangencial e sistema de alimentação do abrasivo. A seguir é feito o detalhamento de cada subsistema.

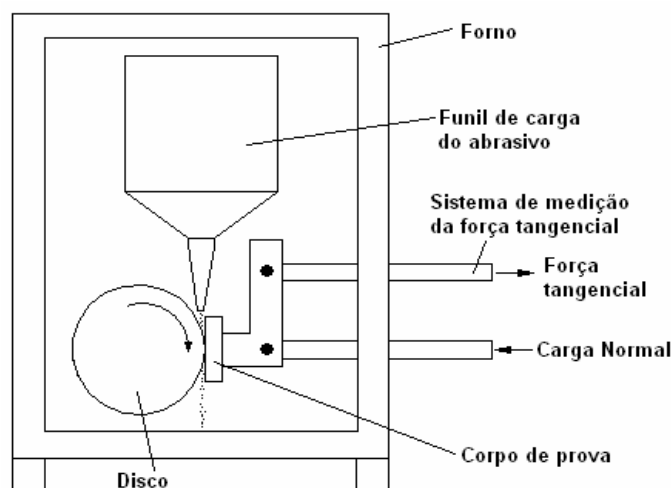


Figura 1. Esquema do abrasômetro.

2.1.1 Forno

A função do forno é aquecer o abrasivo, o corpo de prova e o contra-corpo. Foi construído um forno tipo câmara com aquecimento elétrico que trabalha a temperaturas de até 600°C, com controle de temperatura microprocessado, porta pantográfica e recirculador interno de ar para homogeneizar a temperatura da câmara. As dimensões internas da câmara são: 400 mm x 500 mm x 400 mm. Devido às características requeridas, principalmente os furos e suportes necessários para os sistemas de transmissão, medição e alimentação do abrasivo, o forno foi fabricado sob medida para este projeto pela empresa Industrial Heating Equipamentos e Componentes Ltda (Sumaré-SP).

2.1.2 Sistema de transmissão de potência do disco

Este sistema tem a função de transmitir a rotação ao disco (contra-corpo). O sistema consiste de um motor elétrico AC de 1.5 kW, uma transmissão de correia, um eixo de 60 mm de diâmetro com rolamentos e mancais e o disco ou contra-corpo. O motor é acionado por um variador de frequência que permite uma velocidade variável (0-500 rpm). O eixo foi especialmente desenvolvido para trabalhar com um extremo dentro do forno. O extremo externo ao forno é maciço e de aço ASTM A36, o extremo interno foi feito em aço inoxidável AISI 304 e oca para reduzir a transferência de calor. Ambas as partes foram unidas por soldagem. O eixo foi sustentado por dois rolamentos de esferas, com seus respectivos mancais, ambos fora do forno. A parte do eixo interna ao forno fica em balanço pela parte posterior e no extremo foi sustentado o disco. O disco com diâmetro externo de 100 mm foi feito de aço AISI H13, conhecido pelas suas boas propriedades para trabalho a quente, foi temperado e nitretado para obter máxima dureza. O disco foi fixado ao eixo por meio de uma porca, também de aço inoxidável. O disco foi projetado para ter menor diâmetro do que o disco da máquina de “roda de borracha”, isto foi devido a que um disco com o mesmo diâmetro desse equipamento requereria um forno muito maior.

2.1.3 Sistema de medição da força tangencial

O sistema de medição da força tangencial é o sistema mais complexo e delicado da máquina, porque é ele que sustenta a amostra e permite a medição da força tangencial, necessária no cálculo do coeficiente de atrito. Está constituído por porta-amostra, braço de suporte e braço de transferência da força tangencial. O braço de suporte com 25,4 mm de diâmetro foi unido num dos extremos ao patim de uma guia linear robusta e no outro extremo foi unido ao porta-amostra por meio de uma união pivotante. A guia linear suporta todo o mecanismo de medição e permite o deslocamento dele na direção da força normal. O braço de transferência da força tangencial foi unido ao patim da guia linear por intermédio da célula de carga e no outro extremo unido ao porta-amostra a través de outra união pivotante. O porta-amostra foi feito em forma de “L”, visando a transferência da força tangencial vertical à barra horizontal (braço de transferência) para ser medida com a célula de carga. Os braços de suporte e transferência saem do forno por um dois lados. Todas as partes submetidas a alta temperatura foram feitas de aço inoxidável AISI 304.

2.1.4 Sistema de alimentação do abrasivo

O sistema de alimentação de abrasivo consiste de um funil de aço AISI 304 que desliza sobre guias sustentadas no teto do forno, o que permite retirar o funil para carregá-lo com o abrasivo. O abrasivo escoar para a interface entre a amostra e o contra-corpo por meio de um bico plano e a saída do abrasivo é controlada por meio de uma peça cônica que se encaixa na parte interna do bico. O abrasivo, depois de passar entre a amostra e o contra-corpo, finalmente cai numa bandeja, também feita de aço inoxidável, onde se recolhe para ser descartado posteriormente.

2.2 Instrumentação

Nesta primeira etapa de desenvolvimento do protótipo, as grandezas a medir são a força tangencial e a temperatura do abrasivo. A força normal foi aplicada por

peso morto e a temperatura no interior do forno foi controlada pelos controles do próprio forno. Portanto, essas duas grandezas foram consideradas fixas.

A força tangencial foi medida por meio de uma célula de carga de 20 kgf e a aquisição de dados foi feita mediante uma placa da National Instruments (NI) especialmente desenvolvida para trabalhar com sinais provenientes de *strain gages* (NI9237). A taxa de amostragem usada foi 10S/s (medidas por segundo). A célula de carga foi calibrada na mesma máquina utilizando diferentes pesos conhecidos. A temperatura do abrasivo foi medida com um termopar tipo T e a aquisição foi feita usando uma placa da NI (NI9211) com compensação interna, com uma taxa de amostragem de 2 S/s.

As duas placas de aquisição de dados são parte do sistema CompactDAQ da NI (NI cDAQ-9172). Esse sistema consiste num gabinete com 8 soquetes para conexão de diferentes placas de aquisição de dados, de acordo às necessidades do usuário. O CompactDAQ conecta-se via USB com um PC e permite a medição simultânea de muitas grandezas. Foi desenvolvido um programa dedicado em linguagem C, usando os *drivers* fornecidos pela NI, para a realização da medição.

2.3 Metodologia Experimental

Com o intuito de avaliar o funcionamento do abrasômetro, foram feitos três ensaios com corpos de prova de aço AISI D2 sem tratamento térmico. Dois ensaios foram realizados às temperaturas de 23°C (ambiente) e 400°C. Um terceiro ensaio foi realizado à temperatura ambiente e sem abrasivo, isto com a finalidade de comparar as marcas deixadas pelo disco em ambos os casos. Cada corpo de prova foi pesado antes e depois do ensaio utilizando uma balança com precisão de 0,0001 g. Antes de cada pesagem foi feita a limpeza dos corpos de prova com solvente. O abrasivo utilizado foi areia ANB 100 fornecida pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). O coeficiente de atrito foi medido durante o ensaio. As características dos corpos de prova, assim como a temperatura de ensaio são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Característica dos corpos de prova e condições do ensaio.

Amostra	Dimensões (mm)	Dureza (HV)	Massa inicial (g)	Temperatura de ensaio (°C)
A1	49 x 25 x 11	103 ± 5	107.9607	23
A1-SA (sem abrasivo)				23
A2	50 x 24 x 11	95 ± 2	107.0264	400

Para todos os ensaios foi aplicada uma carga de 57,7 N, a rotação do disco foi de 200 rpm e o tempo de ensaio foi de 600 s (10 min). O fluxo de abrasivo determinado à temperatura ambiente foi de 200 g/min.

No caso do ensaio a 400°C, a temperatura do abrasivo foi medida para assegurar que este se encontrava à mesma temperatura da câmara do forno, isso devido à alta inércia térmica da areia. Atingir uma temperatura homogênea entre o abrasivo e o forno requer muitas horas de espera, portanto, uma diferença de 5°C foi tolerada, mesmo assim, o tempo de espera foi de 6 horas.

O coeficiente de atrito (μ) foi calculado utilizando a primeira lei do atrito:⁽¹¹⁾
$$N = \mu W , \quad (1)$$
onde N é a força tangencial medida, e W é a carga normal aplicada.

3 RESULTADOS

O comportamento térmico da máquina foi como esperado, a perda de calor a través do braço de medição e o eixo de transmissão das rotações foi baixa. Esperava-se que o ponto mais sensível fosse a barra de transferência da força tangencial devido a sua conexão direta com a célula de carga, que ao aquecer poderia perder a calibração, mas foi verificado durante o ensaio que a temperatura da célula de carga não aumentou significativamente. A temperatura dentro do forno se manteve na faixa de $\pm 2^\circ\text{C}$ a 400°C . O problema detectado foi a longa espera necessária para o abrasivo atingir a temperatura do forno.

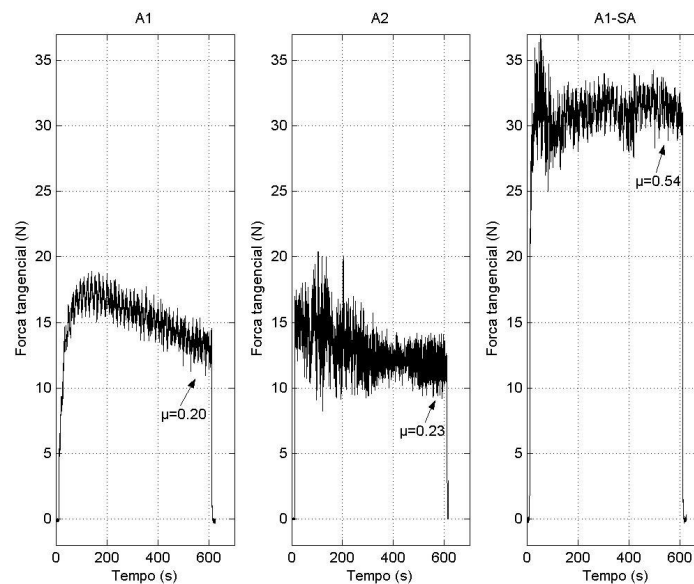


Figura 2. Resultados da força tangencial e o coeficiente de atrito para os ensaios a a) 23°C , b) 400°C e c) 23°C sem abrasivo

Na Figura 2 podem ser observados os resultados obtidos durante os ensaios realizados às diferentes condições. O coeficiente de atrito mostrado na Figura 2 corresponde ao coeficiente médio medido nos últimos 10 s do ensaio. Nota-se que os valores foram similares nas duas amostras onde foi utilizado o abrasivo. No ensaio onde o abrasivo não foi utilizado o coeficiente de atrito foi de 0,54, enquanto que nos ensaios com abrasivo não superou o valor de 0,23.

A tendência decrescente no coeficiente de atrito, como mostrado na Figura 2, pode ser devida a um pequeno desalinhamento observado entre a amostra e o disco. Esse desalinhamento, que apareceu na forma de uma marca de desgaste ligeiramente trapezoidal, ao invés de uma marca perfeitamente retangular. Este problema deverá ser removido uma vez que os ensaios precisam ter marcas homogêneas, pois elas indicam uma aplicação uniforme de força.

Pode-se ver uma alta dispersão dos resultados da força tangencial, ocasionada por vibração indesejada no braço de medição. Isso ocorreu devido à grande distância entre o ponto de apoio do braço e a amostra. Então, precisa-se de

um apoio adicional para a barra de suporte o que vai ser implementado adicionando um rolamento linear na parede do forno.

Os resultados de perda de volume são mostrados na Tabela 2. Embora os resultados do coeficiente de atrito foram similares, uma perda de massa notavelmente maior foi observada na amostra ensaiada a 400°C, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Perda de masa das amostras ensaiadas.

Amostra	Perda de volume (mm ³)
A1	28
A2	55
A1-SA	26

Como um dos principais objetivos do trabalho é a verificação do funcionamento do abrasômetro, um fator importante a ser analisado é o escoamento do abrasivo entre a amostra e o contra-corpo. No ensaio tipo “roda de borracha” (ASTM G65), o disco de borracha assegura que o abrasivo passe entre as duas superfícies, mas nas temperaturas usadas neste trabalho a borracha não pode ser usada, sendo a opção mais viável um disco metálico. Neste caso, existia dúvida com respeito a que o abrasivo realmente estivesse passando entre a amostra e o contra-corpo, o que levaria a desgaste por fricção metal-metal e não a desgaste por abrasão como desejado. Para esclarecer essa dúvida foi feito um teste adicional, onde uma das amostras (A1-SA) foi ensaiada sem abrasivo à temperatura ambiente.

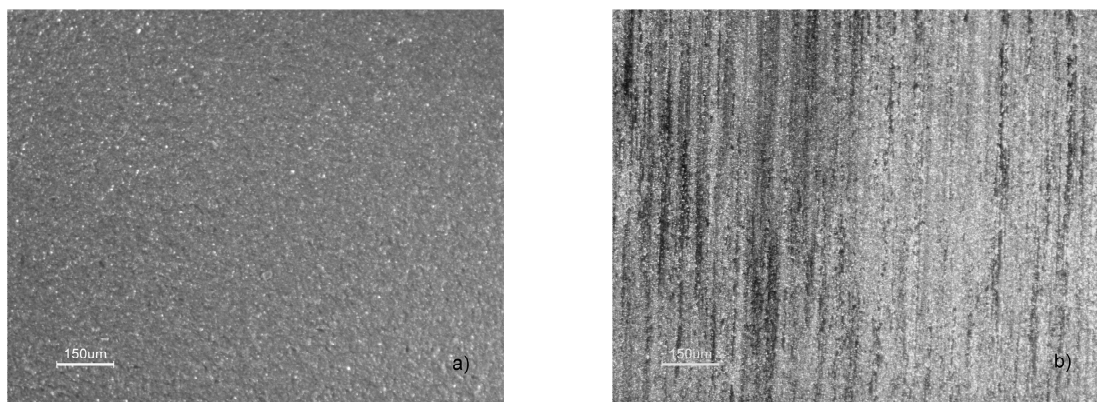


Figura 3. Marcas desgaste das amostras ensaiadas: a) A1 e b) A1-SA.

Na Figura 3 podem ser observadas as marcas de desgaste obtidas no ensaio a) com abrasivo e b) sem abrasivo. A diferença entre as duas marcas foi notável, este fato somado à diferença no coeficiente de atrito medido (Figura 2) deixou em evidência que o abrasivo passou entre o disco e o corpo de prova. Por outro lado, as marcas de desgaste obtidas durante os ensaios realizados com abrasivo (Figura 3 a)) não são típicas do desgaste abrasivo. O desgaste pareceu ser devido a múltiplas indentações, o que pode estar associado a movimento de rolamento das partículas abrasivas na interface corpo contra corpo.⁽¹²⁾ Para obter marcas por desgaste abrasivo deverão ser realizados ensaios adicionais, mudando a carga, o tamanho do abrasivo, ou utilizando um material mais duro como corpo de prova. No ensaio feito sem abrasivo ocorre desgaste por deslizamento entre as superfícies do corpo de

prova e o contra corpo, já que não há partículas abrasivas agindo na interface. Notam-se sulcos provavelmente decorrentes da movimentação de restos de desgaste (do corpo mais mole) na interface corpo contra corpo.

4 CONCLUSÕES

O comportamento térmico da máquina foi como esperado. Já no caso da dinâmica do braço de medição, ajustes devem ser feitos para reduzir a vibração indesejável e obter dados da força tangencial com menor dispersão. Além disso, o alinhamento entre a amostra e o disco deve ser garantido para obter uma marca de desgaste homogênea.

As diferenças entre os coeficientes de atrito e as marcas de desgaste, nos casos com e sem abrasivo, evidenciam que o abrasivo passou entre o disco e o corpo de prova, evitando o contato metal-metal.

Os resultados obtidos com as amostras de teste mostraram que ainda sendo muito parecidos os coeficientes de atrito medidos nos casos à temperatura ambiente e a 400 °C, a perda de massa na amostra ensaiada a alta temperatura foi quase o dobro. Isso evidenciou um forte decréscimo na resistência à abrasão do material nessa temperatura. Contudo, essa afirmação somente pode ser feita depois de realizar ensaios com um número maior de amostras.

Agradecimentos

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa DTI. Os autores agradecem ao Doutor Roberto Martins de Souza pela ajuda na revisão do texto.

REFERENCIAS

- 1 ASTM G40-99 American Standard for Testing Materials. Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, V03.02, ASTM, 2002, p.1-8.
- 2 ASTM G65-00 American Standard for Testing Materials. Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus, V03.02, ASTM, 2002, p.1-12.
- 3 SCHAUPERL, Z.; IVUSIC, V.; RUNJE, B. Wear resistance of chromium-nitride and diamond-like carbon thin hard coatings. MP MATERIALS TESTING-MATERIALS AND COMPONENTS TECHNOLOGY AND APPLICATION, v.50, n.6, p.326-331, 2008.
- 4 SURESHA, B. et al. Mechanical and three-body abrasive wear behavior of SiC filled glass-epoxy composites. POLYMER COMPOSITES, v.29, n.9, p.1020-1025, 2008.
- 5 ABUKHSHIM, N.A.; MATIVENGA, P.T.; SHEIKH, M.A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOL RESEARCH, v.10, n.1, p.1-10, 1966.
- 6 LEE, J. H.; OH, J.C.; PARK, J.W.; LEE, H.C.; LEE, S. Effects of Tempering Temperature on Wear Resistance and Surface Roughness of a High Speed Steel Roll. ISIJ International, v. 41, n. 8, p. 859-865, 2001.
- 7 PELLIZZARI, M.; MOLINARI, A.; STRAFFELINI, G. Tribological behaviour of hot rolling rolls. Wear, v. 259, p. 1281-1289, 2005.
- 8 BARRAU, O.; BOHER, C.; GRAS, R.; REZAI-ARIA, F. Analysis of the friction and wear behaviour of hot work tool steel for forging. Wear, n. 255, p. 1444-1454, 2003.
- 9 MILAN, J.C.G.; CARVALHO, M.A.; XAVIER, R.R.; FRANCO, S.D.; DE MELLO, J.D.B. Effect of temperature, normal load and pre-oxidation on the sliding wear of multi-component ferrous alloys. Wear, v. 259, p. 412-423, 2005.

- 10 MILAN, J.C.G; FRANCO, S.D.; CARVALHO, M.A.; XAVIER, R.R; DE MELLO, J.D.B.. Efeito da força normal no comportamento tribológico em alta temperatura de um aço rápido. Revista ABM - Tecnologia em Metalurgia e Materiais., São Paulo SP, v. 1, n. 1, p. 44-49, 2004.
- 11 HUTCHINGS, I.M. Tribology: Friction and wear of engineering materials. United Kingdom, 1992.
- 12 DUBE, N.B.; HUTCHINGS, I.M. Influence of the particle fracture in the high-stress and low-stress abrasive wear of steel. Wear, v.233-235, p.246-256, 1999.