

ESTUDOS PRELIMINARES DE UM TRIBÔMETRO AUTOMATIZADO ¹

José Divo Bressan²
William Carlos Fernandes³
Karina Lopez⁴
André Luis Leite⁴

Resumo

Instrumentação e operação de uma máquina de ensaio de atrito e desgaste do tipo pino-sobre-disco para testes em metais, polímeros e cerâmicas sob temperatura e umidade ambientes controlada. O equipamento é útil para levantar e ranquear em laboratório a resistência ao desgaste e o coeficiente de atrito de materiais e revestimentos, simulando o processo de desgaste brando ou severo, em baixa ou alta velocidade, semelhante às condições que ocorrem nos processos industriais ou componentes mecânicos. Consiste de um pino carregado na vertical com pesos e está fixo por um braço que contém uma célula de carga que mede a força de atrito na ponta do pino. O pino ou esfera atua contra a superfície de um disco que gira e está preso por um cabeçote e castanha. Tanto a esfera como o disco pode servir de amostra do ensaio de desgaste ou atrito. A máquina tem as seguintes especificações: capacidade de carga máxima no pino ou esfera é de zero a 150 N, rotação do disco de 80 a 1000 rpm, velocidade de deslizamento de 0,1 a 6,3 m/s, câmara para controle da temperatura e umidade ambiente, suficientes para simular as condições de atrito e desgaste brando ou severo. A máquina opera com uma placa de aquisição de dados de força via célula de carga, programa em Labview e computador que registram on-line as oscilações instantâneas da força e do coeficiente de atrito. Foram apresentados gráficos experimentais da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de teste para discos de aço 1005 e esfera de aço 52100 nitretado a plasma e revestido com alumina pelo processo MOCVD. Os resultados preliminares da instrumentação e operação do tribômetro do tipo pino-sobre-disco foram excelentes. O coeficiente de atrito médio variou com a distância percorrida, em geral, diminuindo com a distância percorrida. O coeficiente de atrito médio para a carga de 30 N foi de $\mu = 1,05$ e para a carga de 20 N foi $\mu = 0,80$. Para a carga de 5,2 N o coeficiente de atrito foi de apenas $\mu = 0,26$. O coeficiente de atrito oscilou instantaneamente com amplitude média de 0,2 para carga de 30 N e amplitude de 0,1 para a carga de 20 N.

Palavras-chave: Ensaio de desgaste; Atrito; Aço 52100; Nitretação; MOCVD.

PRELIMINARY STUDIES OF AN AUTHOMATIZED TRIBOMETER

Abstract

Instrumentation and operation of a friction and wear test apparatus of type pin-on-disc for tests in metals, polymers and ceramics under controlled environment temperature and humidity. The equipment is useful for obtaining in laboratory the wear resistance and friction coefficient of materials and coatings, simulating the mild and the severe wear process, in low or high velocities, similarly to the conditions that occurs in industrial process or mechanical components. The apparatus has a loaded pin in the vertical position by weights and is fixed in a horizontal load cell bar that measure the friction force at the pin tip. The pin or sphere slide against a disc surface that is hold by a turning chuck jaw that rotates. The sphere as well as the disc or counter-face can be used as test specimens for wear or friction measurements. The equipment has the following specifications: the maximum load capacity on the pin or sphere can vary from zero to 150 N, disc rotation speed from 80 to 1000 rpm, sliding velocity from 0,1 to 6,3 m/s, a chamber to control the environment temperature and humidity, which are enough to simulates the friction and mild wear or severe wear conditions. The machine operates with a data acquisition electronic plate of force via load cell, Labview program and computer that reports on-line the instantaneous oscillations of force and friction coefficient. Experimental results of friction coefficient variations as function of time test for 1005 steel discs and 52100 steel sphere plasma nitrided and coated with alumina by MOCVD were presented. The preliminary experimental results from the instrumentation and operation of the pin-on-disc tribometer were excellent. The mean friction coefficient varied along the sliding distance, generally, diminishing with the distance. The mean friction coefficient for the load of 30 N was $\mu = 1,05$ and for the load of 20 N was $\mu = 0,80$. However, for the load of 5,2 N the friction was only $\mu = 0,26$. The mean instantaneous amplitudes oscillations were 0,2 for the load of 30 N and amplitudes of 0,1 for the load of 20 N.

Key words: Wear test; Friction coefficient; 52100 steel; Plasma nitriding; MOCVD.

¹ Contribuição técnica ao 5º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 22 e 23 de agosto de 2007, São Paulo – SP, Brasil.

² Departamento de Engenharia Mecânica - CCT - Udesc Joinville – Campus Universitário, 89.223-100 - Joinville/SC - Brasil. e-mail: dem2jdb@joinville.udesc.br

³ Departamento de Engenharia Elétrica - CCT - Udesc Joinville

⁴ Departamento de Engenharia Mecânica - CCT - Udesc Joinville; kakau_lopez@yahoo.com.br

1 INTRODUÇÃO

As pesquisas científicas e tecnológicas sobre atrito e desgaste são um relevante tópico na seleção de materiais e no design de um produto, conseqüentemente, um grande número de testes de laboratório foram desenvolvidos com o objetivo de se medir o atrito e a resistência ao desgaste sob condições controladas semelhantes às condições em serviço e de se poder classificar um elenco de materiais para as aplicações tribológicas. A associação *American Society for Testing Materials – ASTM*, descreve mais de 30 métodos experimentais para se medir o desgaste.^[1]

A correlação entre os ensaios de simulação de laboratório e sua aplicação no projeto de um componente é de grande importância para a tribologia prática. Entretanto, as diversas variáveis que influenciam no desgaste tornam esta correlação um tanto difícil. A resistência ao desgaste e o coeficiente de atrito não são propriedades características de um material, mas dependem tanto das propriedades do material e da topografia da superfície quanto dos parâmetros de processo como carga, temperatura, velocidade de deslizamento e meio ambiente.

A resistência ao desgaste e o atrito dos materiais é usualmente obtida através da realização de ensaios num equipamento de laboratório chamado Tribômetro. Um dos ensaios padrão de laboratório que simula as condições brandas ou severas do desgaste em componentes é o ensaio de “pino-sobre-disco”, de acordo com a norma ASTM G99-95.^[2] Neste equipamento, o ensaio é realizado com um pino que desliza sobre um disco a uma distância total e velocidade selecionadas constantes, um valor constante de carga normal sobre o pino^[3,4] e condições de temperatura e umidade controladas. A seguir, é feita uma breve revisão da filosofia ou metodologia científica dos ensaios de desgaste de laboratório.

2 ENSAIOS DE DESGASTE EM LABORATÓRIO

A pergunta que é necessária se fazer é: pode-se obter informações confiáveis, importantes para as aplicações práticas, sobre atrito e resistência ao desgaste de materiais e lubrificantes usando bancadas de teste de laboratório?

Atrito e desgaste não são exclusivamente propriedades do material, mas dependem dos parâmetros do processo. Portanto, o teste definitivo de qualquer material, revestimento ou lubrificante deve ser na aplicação em serviço ou em campo. A vantagem principal dos ensaios de bancada em laboratório é a redução no custo e tempo de teste. Outra vantagem é o ganho na compreensão do atrito e do processo de desgaste, eliminando-se os materiais candidatos não apropriados.

Para simular a condição em serviço, os ensaios devem ter as mesmas condições reais em serviço como materiais, pressão de contato, temperatura, meio ambiente, velocidade de deslizamento, intensidade da potência de atrito, pulso de energia. O coeficiente de atrito, tanto para deslizamento como para rolamento, é dado por:

$$\mu = \frac{F_t}{F_N} \quad (1)$$

onde: F_N = força normal e F_t é a força tangencial ou força de atrito. A intensidade da potência de atrito na área de contato é dada por:

$$Q_{atr} = \mu.(F_N/A).v \quad (\text{watts/mm}^2) \quad (2)$$

onde: F_N = força normal
A = área nominal de contato
v = velocidade de deslizamento

A potência de atrito Q_{atr} varia entre 5.000 a 20.000 watts/mm² nos contatos práticos. Essa potência pode ser medida com um wattímetro.

O Pulso de energia no contato transitório é calculado por:

$$E = \mu.(F_N/A).v. t \quad (\text{J/mm}^2) \quad (3)$$

onde t = intervalo do tempo transitório. Em geral, é milissegundos.

Na escolha da técnica ou método adequado, devemos responder a seguinte pergunta: o que pretendemos obter e o que podemos esperar conseguir obter ?

Existem 4 motivações básicas na pesquisa em Tribologia:

1. Estudos fundamentais do atrito e desgaste,
2. Controle de qualidade do produto,
3. Solução de problemas, simulando as condições operacionais,
4. Desenvolvimento de novo produto.

Em geral, as medidas principais de um equipamento de ensaio são a perda de massa ou de volume da superfície e o coeficiente de atrito. Entretanto, outros parâmetros são importantes como a carga normal, a distância de deslizamento, a dureza, a umidade relativa, a topografia da superfície ou rugosidade, a temperatura, a velocidade, a frequência e amplitude das vibrações, afinidade e composição química da superfície. Resumindo, as medidas diretas principais utilizadas são:

1. Desgaste (perda de massa ou de volume e área de desgaste)
2. A carga normal
3. Dureza
4. Coeficiente de atrito
5. Distância de deslizamento
6. Velocidade de deslizamento
7. Temperatura
8. Umidade relativa
9. Resistência do contato elétrico
10. Potência dissipada.

As medidas indiretas calculadas a partir dos resultados dos ensaios são:^[5]

1. Taxa de desgaste:

$$Q = \frac{V}{S} = K \frac{F_N}{H} \quad (\text{mm}^3/\text{m}) \quad (4)$$

onde Q é o parâmetro que mede a razão de desgaste ou “taxa de desgaste” (volume perdido acumulado V ou massa perdida por unidade de deslizamento S), F_N é a carga normal aplicada, H é a dureza do material mais mole e K é o coeficiente de desgaste: é adimensional e menor que 1.

2. Coeficiente de desgaste K:

$$K = \frac{Q \cdot H}{F_N} = K_S \cdot H \quad (5)$$

3. Coeficiente específico de desgaste:

$$K_S = \frac{Q}{F_N} = \frac{K}{H} \quad (\text{mm}^3/\text{N.m}) \quad (6)$$

Quanto à natureza do fenômeno do atrito, atualmente é reconhecido que a superfície real de contato ocorre entre os picos das rugosidades superficiais e, portanto, a área real é muito menor que a área nominal. O atrito é devido aos mecanismos de deformação e aderência dos picos das rugosidades das superfícies em movimento relativo, ou seja: deformação elástica, deformação plástica e adesão,

$$\mu = \mu_{\text{elástica}} + \mu_{\text{plástica}} + \mu_{\text{adesão}} \quad (7)$$

Além disso, durante a fase inicial do deslizamento ou “rodagem inicial”, ocorre o aplainamento dos picos das rugosidades, alterando o coeficiente de atrito. Nos metais, se a pressão de contato entre as rugosidades for suficiente, pode ocorrer a quebra do filme de óxido metálico e acontecer o contato direto metal-metal, surgindo aderência com aumento drástico do coeficiente de atrito. Também, no deslizamento, sempre ocorre a formação de uma terceira camada de transferência de material ou camada de difusão ou o assim chamado “tribomaterial” que é produzido nas superfícies de sólidos sob contato deslizante contínuo a seco.^[5] Este material é produzido pelo deslizamento e afeta o desgaste por deslizamento. É chamado também de camada de transferência, camada fragmentada, camada Beilby, terceiro corpo, camada de aderência, camada altamente deformada ou camada nanocristalina. Simulações por dinâmica molecular^[6] mostraram a evolução dessa camada com o tempo de deslizamento. Vários exemplos foram mostrados dessa evolução para dois materiais sólidos distintos A e B em deslizamento, apresentando o efeito da vortividade ou da instabilidade da interface na mistura mecânica dos materiais A e B na interface. O fenômeno é semelhante ao escoamento de fluidos. Portanto, a simulação por dinâmica molecular permitiu prever a geração na camada de transferência de nanocristais, o aumento de volume livre, a instabilidade da interface de deslizamento e a vortividade da mistura mecânica na interface.

Por sua vez, no desgaste, os mecanismos podem ser a *deformação plástica* (fenômeno mecânico) das rugosidades superficiais, produzindo a micro-sulcagem ou micro-riscamento, a micro-usinagem, o micro-lascamento ou formação de microflocos, a fadiga superficial, o *micro-trincamento* e a *aderência* (fenômeno químico) de material na superfície, transferindo material de um corpo para o outro.

O *desgaste* é geralmente definido como sendo a “*perda progressiva de massa da superfície de um sólido em movimento relativo sobre outra, levando ao dano ou falha da superfície*”.^[5] Pode ser tanto brando como severo, dependendo das condições de contato entre as superfícies, da pressão e temperatura de contato, e das durezas dos materiais. A severidade do desgaste pode ser definida por meio das características do processo e parâmetros tais como coeficiente de atrito e desgaste, taxa de desgaste, tamanho das partículas ou debris e mecanismos de desgaste.

A Tabela 1 mostra um resumo das características que identificam o desgaste brando ou suave e o desgaste severo.

Tabela 1: Características do desgaste brando e severo.^[5,7,8]

Desgaste Brando	Desgaste Severo
Coeficiente de atrito baixo $\mu < 0.4$	Coeficiente de atrito alto $\mu > 0.4$
Coef. de desgaste baixo $K < 10^{-4}$	Coef. de desgaste alto $K > 10^{-4}$
Formação de partículas ou debris da ordem de décimos de milímetros	Formação de micro-cavacos, debris e flocos da ordem de milímetros
Mecanismo de desgaste: micro-trincas, indentação, micro-sulcamento, micro-lascamento, adesão.	Mecanismo de desgaste: micro-usinagem, micro-lascamento, adesão, oxidação.

3 EQUIPAMENTO PINO-SOBRE-DISCO

O tribômetro pino-sobre-disco automatizado desenvolvido no Laboratório de Tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica da UDESC está mostrado na Figura 1. A força de atrito é transmitida ao micro-computador por meio da célula de carga de 30 kgf que suporta o pino e uma placa de aquisição de dados da *National Instruments*. A célula de carga mede somente a força tangencial. Com o auxílio de um programa em Labview, a força de atrito e o coeficiente de atrito é registrado num gráfico on-line na tela do micro-computador. A rotação do disco preso por uma castanha pode ser selecionada no inversor de frequência, variando entre 80 rpm a 1000 rpm, permitindo velocidades de deslizamento entre 0,1 m/s a 2 m/s. A carga normal aplicada no pino pode variar de 100 g a 15 kg (1 N a 150 N).

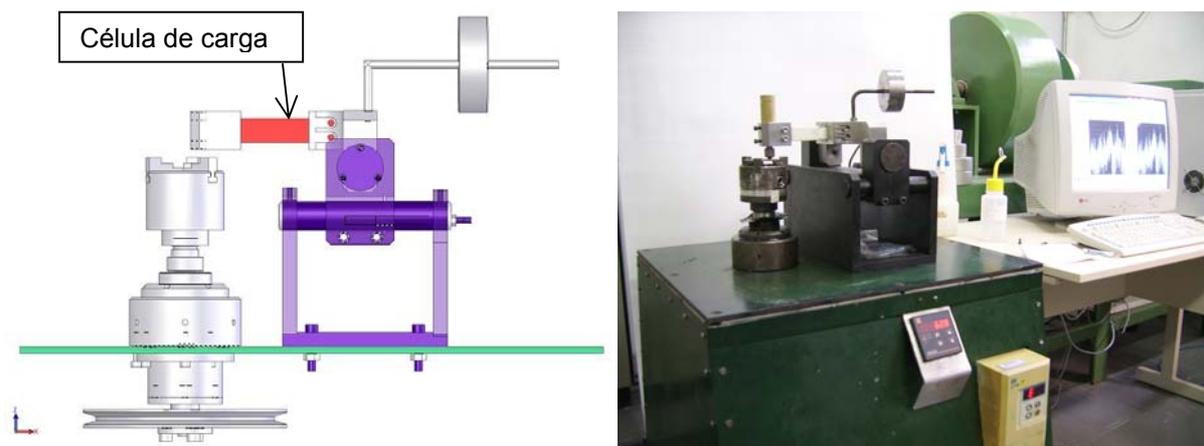


Figura 1. Esquema do equipamento pino-sobre-disco e bancada automatizada com micro-computador para aquisição de dados.

O equipamento está equipado com uma campânula de vidro que serve para o controle da umidade do ar.

O tribômetro pino-sobre-disco geralmente é empregado para determinar a resistência ao desgaste por deslizamento. Entretanto, utilizando-se um disco abrasivo de cerâmica com partículas duras finas, é possível fazer também ensaios de desgaste por abrasão.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E MATERIAIS

Os resultados do coeficiente de atrito de chapas de aço 1005 foram obtidos por meio da realização de ensaios num tribômetro tipo pino-sobre-disco conforme norma ASTM G99.^[2] Em cada ensaio, a distância total foi selecionada constante, mas o ensaio foi interrompido a cada 200 m para as medidas de perda de massa. A carga normal aplicada no pino e a velocidade de deslizamento foram constantes. A Tabela 2 mostra os parâmetros empregados nos ensaios de desgaste.

Tabela 2. Parâmetros empregados na realização dos ensaios de desgaste.

Velocidade deslizamento (m/s)	Carga normal no pino (N)			Distância total Percorrida (m)	Raio da pista (mm)
	30	20	5,2		
0,45	30	20	5,2	3000	14,5

Pinos: Foram utilizadas esferas de aço 52100 nitretado a plasma e com revestimento posterior de alumina pelo processo MOCVD. A esfera tinha diâmetro de 9,5 mm e foi presa na ponta do pino. A dureza média da alumina foi de 1200 mHV.

Discos: A contra-face ou disco foi obtido pelo corte de chapas de aço 1005 na condição de como recebido e com o diâmetro médio de 56 mm e espessura de 2,88 mm. Estes discos foram ensaiados como recebido e tinham dureza média superficial de 116 mHV (microdureza Vickers).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2 apresenta-se o registro on-line da força de atrito e do coeficiente de atrito nos primeiros 3 m, 10 segundos, antes do ensaio de desgaste, usando-se uma carga normal F_N pequena de 5,2 N com a finalidade de se ter um desgaste do tipo brando ou suave. Obteve-se um coeficiente médio de atrito de $\mu = 0,26$ com pequenas oscilações devido as rugosidades da chapa de aço e força atrito F_t média de 1,35 N. Nessa fase do teste, certamente não ocorreu rompimento do filme de alumina da esfera. O coeficiente de atrito segue as mesmas variações ou perfil da curva da força de atrito F_t , pois a força normal F_N é considerada constante. Portanto, as variações no coeficiente de atrito são devido as variações na força de atrito.

Aumentando-se a carga normal na esfera para 30 N, o coeficiente de atrito aumentou para 0,94 no início dos 600 m de deslizamento, caindo para $\mu = 0,68$ próximo dos 800 m de deslizamento como visto na Figura 3. O gráfico mostra grandes amplitudes de 0,2 nas oscilações do coeficiente de atrito e pico de 1,18, devido ao aumento da rugosidade superficial e mecanismos de desgaste presentes. Nesta fase do ensaio, tanto o filme protetivo de alumina da esfera como a nanocamada de óxido da chapa de aço 1005 romperam-se e houve contato direto metal-metal, produzindo o mecanismo de desgaste adesivo além da micro-usinagem.

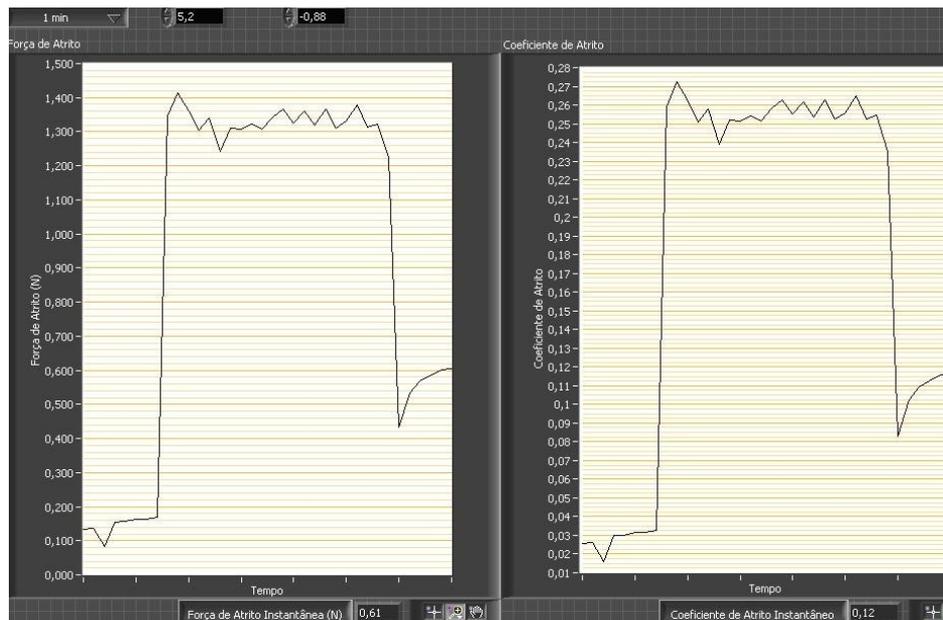


Figura 2. Registro on-line da força de atrito e do coeficiente de atrito nos primeiros 3 m, antes do ensaio de desgaste e com uma carga normal de 5,2 N.

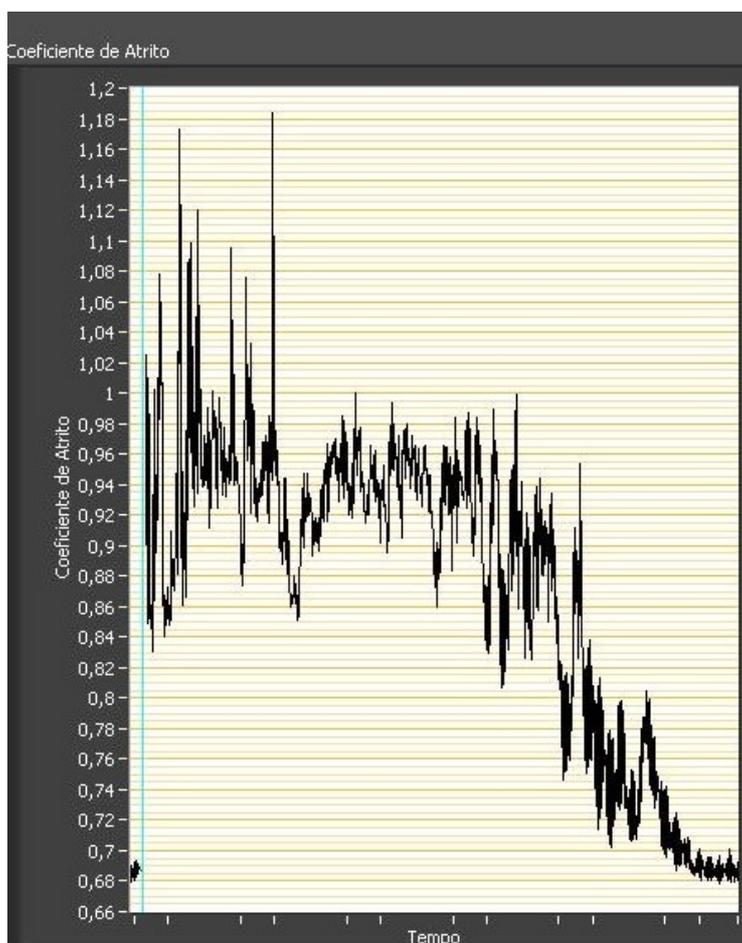


Figura 3. Variação do coeficiente de atrito entre 600 m e 800 m de distância de deslizamento. Carga normal de 30 N.

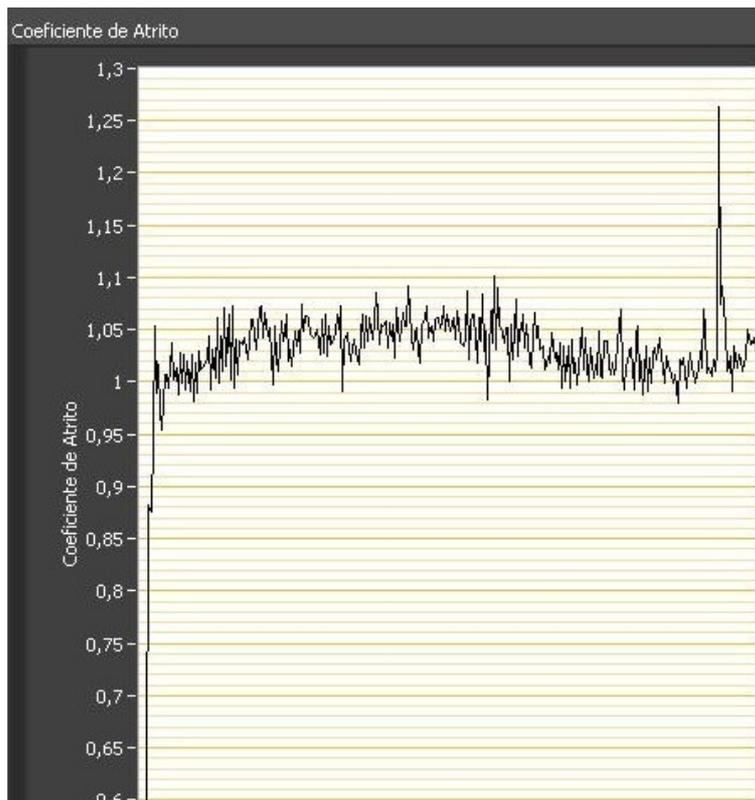


Figura 4. Variação do coeficiente de atrito a 2800 m de distância de deslizamento. Carga normal de 30 N.

No estágio final do ensaio, a 2800 m de deslizamento, o coeficiente de atrito subiu novamente a 1,05, oscilando entre 1,0 e 1,1, pico de 1,25 como visto na Figura 4.

Num outro ensaio de desgaste com carga normal na esfera de 20 N, o coeficiente de atrito diminuiu para $\mu = 0,65$ na fase inicial dos primeiros 150 m de deslizamento. O ensaio começou com atrito de $\mu = 0,95$, caindo para 0,70 nos primeiros 50 m e diminuindo para 0,65 no final dos 150 m de deslizamento como visto na Figura 5. O gráfico mostra oscilações menores de 0,1 que são inferiores as amplitudes do início do ensaio de desgaste com carga de 30 N. Na Figura 6, mostra-se a evolução do coeficiente de atrito aos 2600 m para a carga de 20 N, subindo novamente a $\mu = 0,87$ e caindo a aproximadamente $\mu = 0,70$. Além disso, as amplitudes das oscilações no atrito são inferiores a 0,1.

Na Figura 7, apresenta-se o volume cumulativo perdido da esfera de aço 52100 revestido com alumina versus distância percorrida contra disco de chapa de aço 1005. Conforme se observa, a taxa de desgaste aumenta consideravelmente com o aumento da carga normal de 20 N para 30 N. As taxas de desgaste da esfera são respectivamente de $1,11 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ e $9,4 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$, ou seja, um aumento de aproximadamente 9 vezes na taxa de desgaste.

O volume perdido cumulativo dos discos estão mostrados na Figura 8. A taxa de desgaste é elevada na fase inicial do ensaio ou fase de rodagem (run in) até os primeiros 200 m. Para o disco 1, a fase inicial prolongou-se até os 1000 m. A taxa de desgaste foi muito superior ao disco 2 para a mesma carga de 30 N devido a menor dureza (110 mHV) em relação ao disco 2 (120 mHV) e maior taxa de desgaste da esfera. A taxa média de desgaste do disco 2, carga de 30 N, foi de $1,17 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{m}$ e para carga menor de 20 N, disco 3, foi de $0,40 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{m}$.

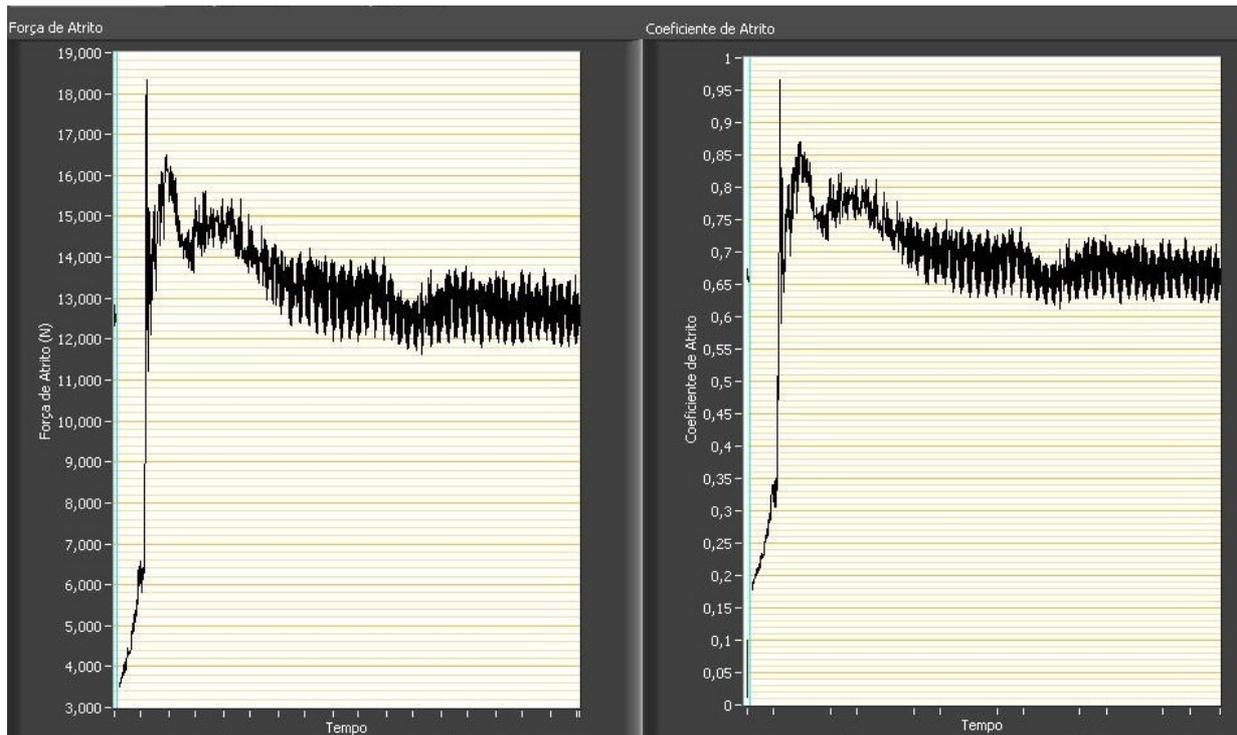


Figura 5. Registro on-line da força de atrito e do coeficiente de atrito nos primeiros 150 m do ensaio de desgaste com uma carga normal de 20 N.

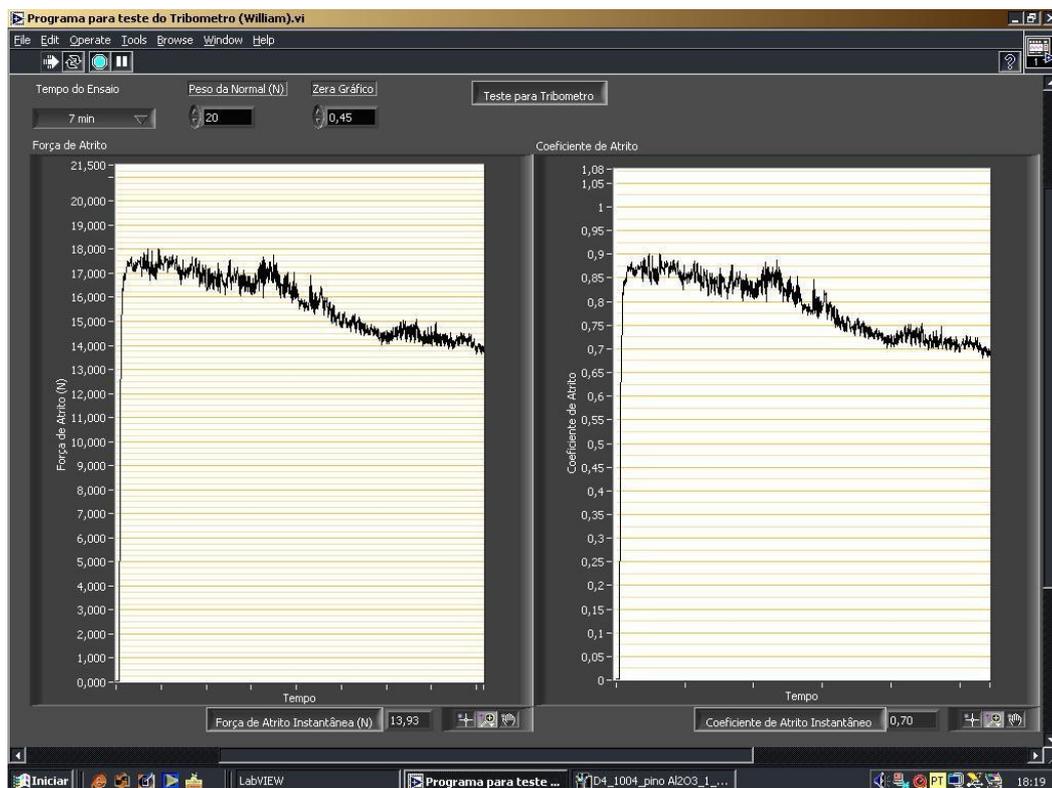


Figura 6. Registro on-line da força de atrito e do coeficiente de atrito nos últimos 2600 m do ensaio de desgaste com uma carga normal de 20 N.

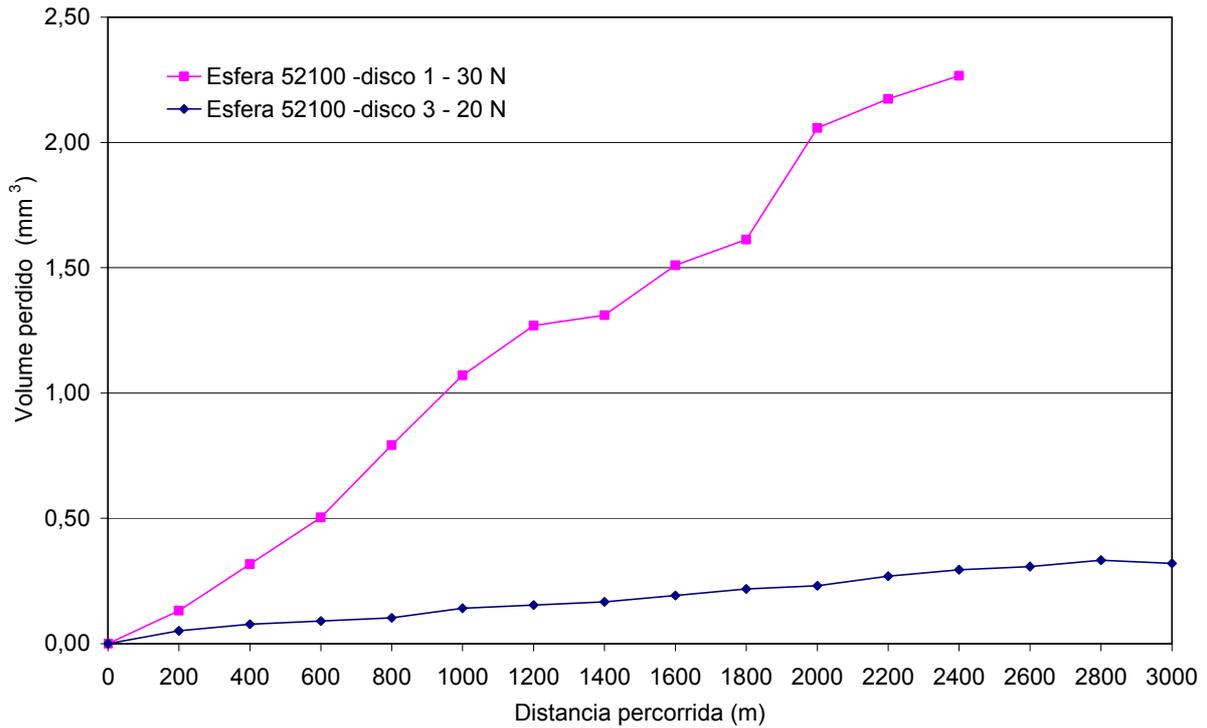


Figura 7. Volume cumulativo perdido da esfera de aço 52100 versus distância percorrida contra disco de chapa de aço 1005. Cargas normais de 20 N e 30 N.

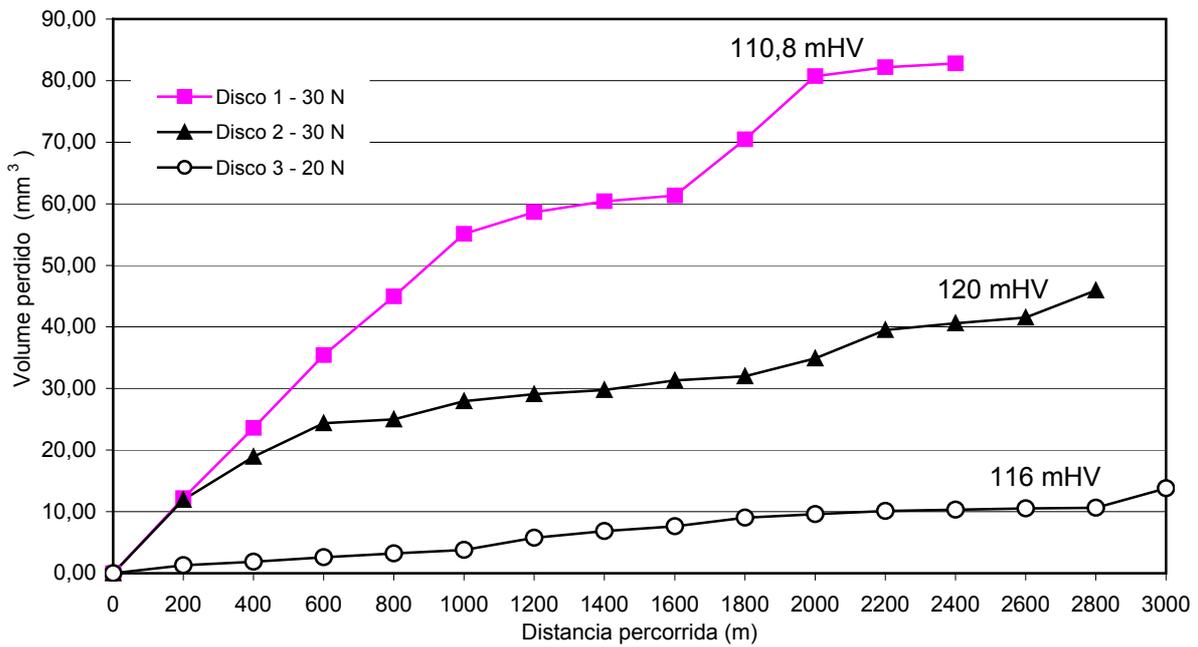


Figura 8. Volume cumulativo perdido do disco de chapa de aço 1005 versus distância percorrida pela esfera. Cargas normais de 20 N e 30 N.

6 CONCLUSÕES

Da análise dos gráficos experimentais dos ensaios de desgaste realizados no tribômetro automatizado pino-sobre-disco, apresentando o coeficiente de atrito e do volume perdido medido versus distância de deslizamento de esfera de aço 52100 nitretado a plasma e revestidos com filme de alumina por MOCVD contra discos de aço 1005, pode-se concluir com as seguintes afirmações :

1. O registro on-line do coeficiente de atrito e da força de atrito permite uma análise quantitativa mais precisa da evolução do atrito e dos mecanismos de desgaste,
2. O coeficiente de atrito oscilou instantaneamente com amplitude média de 0,2 para carga de 30 N e amplitude de 0,1 para a carga de 20 N,
3. O coeficiente de atrito médio variou com a distância percorrida, em geral, diminuindo com a distância percorrida. O coeficiente de atrito médio para a carga de 30 N foi de $\mu = 1,05$ e para a carga de 20 N foi de $\mu = 0,80$. Para a carga de 5,2 N o coeficiente de atrito foi de $\mu = 0,26$,
4. O coeficiente de atrito instantâneo mostrou grandes amplitudes das oscilações instantâneas no início do ensaio, amortecendo as oscilações no final aos 2800 m de distância percorrida,
5. Essas oscilações no coeficiente de atrito estão possivelmente associadas as mudanças nas rugosidades e dureza na pista durante o processo de desgaste.
6. As taxas de desgaste da esfera foram respectivamente de $1,11 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ e $9,4 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ para as cargas de 20 N e 30 N.
7. As taxas de desgaste dos discos foram respectivamente de $0,40 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{m}$ e $1,17 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{m}$ para as cargas de 20 N e 30 N.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro recebido do CNPq na forma de auxílio e bolsas de pesquisa, como também da FAPESC, da Universidade do Estado de Santa Catarina-UDESC e da EMBRACO pelo material do disco doado.

REFERÊNCIAS

- 1 Williams, J.A., The laboratory simulation of abrasive wear. Tribotest Journal, 3-3, p.267-306, 1997.
- 2 ASTM, Designation: G99-95; 1995, Standard test method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, p. 386-390.
- 3 Bressan, J.D. e Hesse, R., Construction and validation tests of a pin-on-disc equipment. In. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM 2001, Uberlândia/MG, dezembro/2001.
- 4 Hutchings, I.M., Tribology: Friction and wear of engineering materials. Arnold, 1995.
- 5 Rigney, D. A., Flow and mechanical mixing in near surface layers. In: 16th International Conference on Wear of Materials – WOM 2007, Montreal/Canada, abril/2007.
- 6 Zum Gahr, K.H., Wear by hard particles. Tribology International, 31, p.587-596, 1998
- 7 Lim, S.C. e Ashby, M.F., Wear mechanism maps. Acta Metall., vol. 35, n.1, p. 1-24, 1987.