

Transição do desgaste moderado-severo do par aço inoxidável nitretado e ferro fundido cinzento¹

Marcia M. Maru²
Deniol K. Tanaka³
Amilton Sinatora⁴

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de ensaios realizados em um equipamento de bancada tipo pino-sobre-placa, com movimento relativo alternado, em condições severas de ensaio. Os materiais utilizados foram pinos de aço inoxidável martensítico, nitretados a gás e placas de ferro fundido cinzento.

As condições de ensaio foram frequência de oscilação de 0,5 Hz e 3,2 Hz, carga normal de 20 N e 600 N e temperaturas de 100 °C e 150 °C.

Foi observado transição do desgaste moderado para severo em todos os ensaios realizados. Um fato observado na transição do desgaste foi uma modificação repentina do ruído emitido durante o ensaio.

1998
Serviço de Bibliotecas
Biblioteca de Engenharia Mecânica, Naval e Oceânica

¹ Trabalho apresentado no II Workshop "DESAFIOS E EXPERIÊNCIAS EM TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE VISANDO RESISTÊNCIA AO DESGASTE - UMA ABORDAGEM COOPERATIVA", realizado no Departamento de Eng. Mecânica, EPUSP, 24 de novembro de 1998.

² Engenheira Mecânica, Doutoranda do Departamento de Eng. Mecânica, Laboratório de Fenômenos de Superfície, EPUSP

³ Engenheiro Mecânico, Professor Associado do Depto. de Eng. Mecânica da EPUSP, Laboratório de Fenômenos de Superfície.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Professor Associado do Depto. de Eng. Mecânica da EPUSP, Laboratório de Fenômenos de Superfícies. Coordenador da sub-rede Melhoria das Propriedades das Superfícies.

INTRODUÇÃO

Um dos fatores de maior importância no desenvolvimento de motores de combustão interna é a preocupação em minimizar a poluição e o consumo de óleo, e aumentar a potência. Diante desse quadro, o par tribológico formado pelo anel de pistão e parede do cilindro é sujeito a condições críticas de deslizamento, como alta carga de contato, interface com reduzida quantidade de lubrificação e alta temperatura, particularmente o par formado pelo anel de primeiro canalete do pistão e a parede do cilindro, o que facilmente acarreta conseqüências de transição do regime de desgaste, passando de moderado para severo, o que pode levar à situação de engrupamento do motor.

Nesse sentido, materiais resistentes ao desgaste para anéis de pistão e cilindros constituem um foco de desenvolvimento dos mais importantes quando se objetiva a melhoria e o aperfeiçoamento dos motores de combustão interna.

A pesquisa e o desenvolvimento de superfícies resistentes ao desgaste compreende a realização de ensaios tribológicos, cujos resultados permitem estudar e caracterizar o comportamento quanto ao desgaste, atrito e lubrificação, que o par de materiais ensaiado possui em um determinado tribossistema.

Usualmente, para os ensaios de pares de materiais utilizados em anéis de pistão e cilindros de motores de combustão interna são utilizados equipamentos de bancada de laboratório com movimento alternado, que permitem aproximar as condições de movimento da situação real de operação.

Esses equipamentos são freqüentemente utilizados para realizar classificações preliminares de vários materiais em uma determinada condição de ensaio, bem como para simular o desgaste e atrito como visto nos motores.

No que tange à simulação do desgaste como visto em condições reais de operação através de um equipamento de laboratório, deve-se levar em consideração uma similaridade de ensaio quanto às variáveis mais influentes, pois as características de desgaste e atrito sofrem influência não só do par de materiais, mas também das características do tribossistema, ou seja, interface, meio de trabalho e tipo de contato e movimento relativo determinado pelo par.

Entretanto, embora operem em condições mais simples que a situação real, os equipamentos de laboratório permitem, através da monitoração das variáveis, obter resultados de influências de parâmetros como carga, velocidade e temperatura quanto a mecanismos ou causas do comportamento tribológico de um par de materiais observado em uma determinada aplicação tecnológica.

Para um estudo detalhado do comportamento tribológico e suas causas ou mecanismos, nota-se a necessidade de dois fatores: do conhecimento dos resultados nas condições reais de operação e do conhecimento dos resultados em função dos parâmetros de ensaio.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi estudar o atrito e o desgaste em condições severas de ensaio de deslizamento lubrificado do par de materiais aço inoxidável nitretado a gás e ferro fundido cinzento.

MECANISMOS DE DESGASTE DESLIZANTE

O desgaste por deslizamento pode ser classificado em severo e moderado^{1,2}. O par anel-cilindro, que constitui um sistema deslizante com movimento alternado, apresenta um desgaste com característica moderada, que está relacionado à durabilidade dos componentes, e severa, relacionada ao engrupamento do motor.

Relativo à observação de mecanismos de desgaste atuantes, nota-se que após ensaios realizados em motor em bancada dinamométrica as superfícies de contato dos anéis e do cilindro apresentam-se polidas, com quantidade mínima de riscos e baixa taxa de desgaste. HAYNES e colaboradores³ atribuem a aparência polida a um destacamento de material da superfície em escala atômica. De acordo com QUINN², o desgaste moderado em sistemas deslizantes implica em ocorrência de reações triboquímicas, produzindo filmes de óxido em sistemas a seco e filme superficial em sistemas lubrificadas.

Já no desgaste severo, é observado em geral grande perda de material, levando à produção de fragmentos metálicos^{3,4}. Os possíveis mecanismos ou causas do destacamento desses fragmentos são fadiga de superfície, abrasão e *scuffing*. O primeiro produz trincas e destacamentos, estes denominados *spalls*⁵, e o segundo, riscamento severo. Já o terceiro não é considerado um mecanismo de desgaste, mas um dano de superfície repentino, que envolve deformação plástica superficial severa, localizada em regiões dentro da superfície de deslizamento, e posterior soldagem das superfícies⁶. Há controvérsias quanto a uma definição do termo *scuffing*^{7,8}. Em sistemas lubrificadas, a origem do dano é relacionada à fadiga plástica da superfície, causada pela deformação sucessiva das camadas superficiais⁸.

Na referência ASM HANDBOOK⁹ enfatiza-se que o termo *scuffing* não é adequado do tipo específico de dano superficial ocorrente.

Quanto à observação de indicações de ocorrência de *scuffing* em ensaios de laboratório, LEE & CHENG¹⁰ observaram um aumento repentino na força de atrito, com aumento da vibração.

De um modo geral, é conhecido que os mecanismos de desgaste são fortemente influenciados pelos parâmetros do tribossistema¹¹, como condições de operação do ensaio e características tribológicas do meio ambiente e das superfícies contactantes¹².

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

MATERIAIS - O material utilizado para os pinos (Tabela 1) foi aço inoxidável martensítico nitretado a gás, usinados no diâmetro de 3 mm e comprimento de 23 mm a partir de fitas utilizadas para confecção de anéis de pistão. Após a usinagem, os pinos foram nitretados a gás e jateados para a remoção da camada branca da nitretação. Um raio de arredondamento de 0,2 mm foi produzido na extremidade de ensaio (Figura 1A).

Tabela 1: Composição química nominal do aço utilizado na confecção dos pinos.

Elemento	%
C	0,85
Si	0,40
Mn	0,30
Cr	17,0
Mo	1,00
V	0,10

A Figura 1A mostra uma seção longitudinal do pino, próximo à região de ensaio. A espessura média da camada medida foi de 74 µm.

A placa foi usinada nas dimensões de 38 mm x 58 mm x 5 mm, de ferro fundido perlítico, com grafitas tipo A e B e dureza média de 250 HB. A Tabela 2 mostra os valores de rugosidade da placa.

Tabela 2: Valores de rugosidade da placa.

Ra	Rz	Rmax
0,46 ± 0,10 µm	3,70 ± 0,71 µm	4,47 ± 0,98 µm

O lubrificante utilizado foi o SAE 15W40, API CF, para motores Diesel.

EQUIPAMENTO - O equipamento foi um do tipo pino-sobre-placa de movimento relativo alternado (Plint & Partners, modelo TE67), que permite controle e monitoração de parâmetros de ensaio, como carga normal, frequência de oscilação e temperatura. O curso total do pino sobre a placa foi de 50 mm. Valores médios do coeficiente de atrito foram adquiridos a cada 10 segundos. A Figura 1B mostra o equipamento utilizado próximo à região de ensaio.

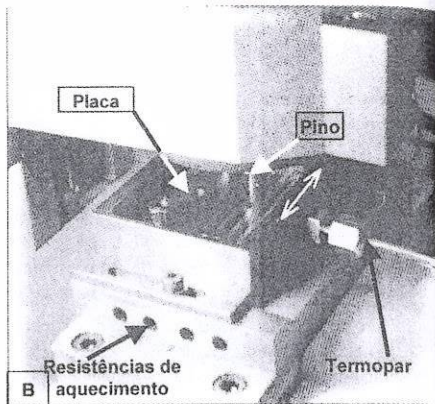
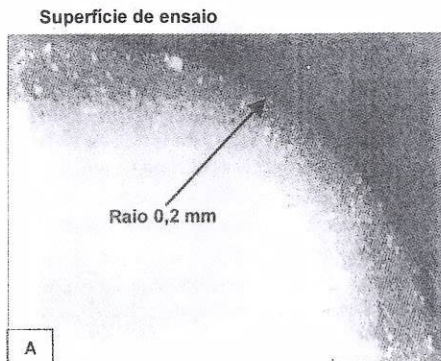


Figura 1: A) Corte longitudinal do pino nitretado a gás, ataque Nital 3 %, 200x. B) Equipamento pino-sobre-placa com movimento alternado.

ENSAIOS - As temperaturas de ensaio foram ambiente (não aquecido), 100 e 150 °C. A lubrificação foi feita no início dos ensaios por gotejamento (0,26 ml) uniforme sobre a trilha de ensaio na placa. Os ensaios foram realizados em etapas, a primeira para aquecimento (taxa de aquecimento de 3 °C/s, frequência de oscilação de 0,5 Hz e carga normal constante de 20 N) e a segunda para aplicação do carregamento (taxa de carregamento de 2 N/s até 600 N e frequência oscilação de 3,2 Hz).

Uma parte dos ensaios foram finalizados mediante a observação de um aumento repentino do coeficiente de atrito e outra parte através da identificação de uma mudança repentina no ruído emitido no ensaio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra que os valores de massa e comprimento dos pinos aumentaram após o ensaio, indicando que houve depósito de material. A Figura 2A confirma essa indicação.

Tabela 3: Variações no comprimento e massa dos pinos ensaiados.

	Não aquecido		100 °C		150 °C			
	variação		variação		variação			
	(mm)	(g)		(mm)	(g)		(mm)	(g)
1	0,014	0,000	1	0,028	0,001	1	0,056	0,002
2	0,002	-0,001	2	0,004	0,000	2	0,019	0,001
			3	0,002	0,000	3	0,060	0,002
			4	0,034	0,001	4	0,036	0,002
			5	0,038	0,002			
			6	0,000	-0,001			
M	+0,008	-0,001	M	+0,018	+0,001	M	+0,040	+0,002

Obs.: M: média; variação = [final - inicial].

Depósito de material sobre a superfície do pino

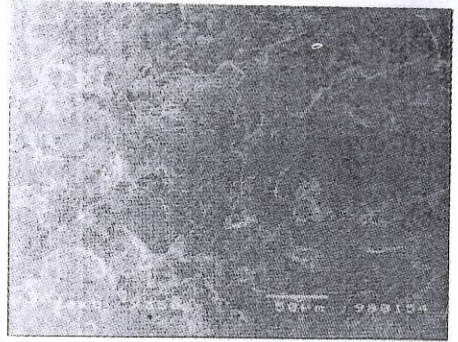
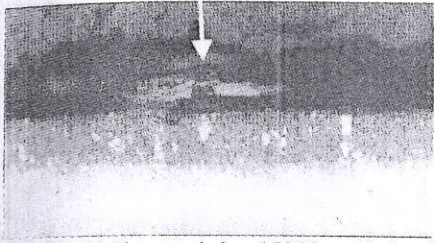


Figura 2: A) Pino ensaiado a 150 °C, seção longitudinal, ataque Nital 3%, 200x.

B) Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino ensaiado a 150 °C, área com severa deformação plástica. 350x. Imagem por elétrons secundários.

A superfície dos pinos ensaiados a 150 °C foram examinadas por microscópio eletrônico de varredura e observou-se intensa deformação plástica (**Figura 2B**).

Desde que camada nitretada é conhecida muito dura e frágil, a deformação plástica observada sobre o pino foi atribuída como material aderido, originário da placa de ferro fundido.

O depósito de material sobre a superfície de ensaio do pino foi caracteristicamente dependente da temperatura, ou seja, temperaturas de ensaio mais baixas produziram depósitos em menor quantidade, porém mais espalhados.

A **Figura 3A** mostra a superfície de um pino ensaiado a 100 °C, próximo à região da borda.

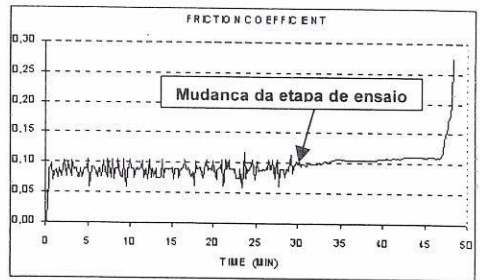
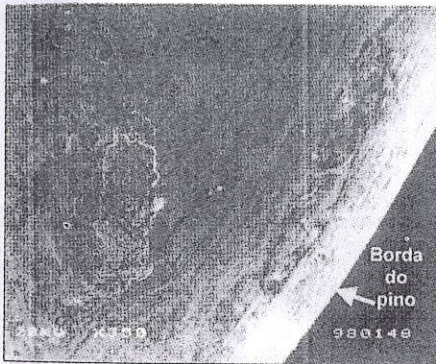


Figura 3: A) Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino ensaiado a 100 °C, área próxima à borda. 350x. Imagem por elétrons secundários.

B) Comportamento típico da coeficiente de atrito médio monitorado durante o ensaio.

O coeficiente de atrito médio do par pino e placa foi de 0,10. O coeficiente de atrito foi monitorado durante os ensaios, a **Figura 3B** mostra uma curva típica.

O valor do coeficiente de atrito arbitrariamente escolhido para a finalização do ensaio foi de 0,30. Com este critério de finalização, notou-se que a superfície da placa obtida para a transição do desgaste ficou fortemente danificada, com severa deformação plástica (**Figura 4A**), não sendo possível notar regiões com destacamento de material. Os fragmentos de desgaste produzidos foram metálicos e macroscópicos.

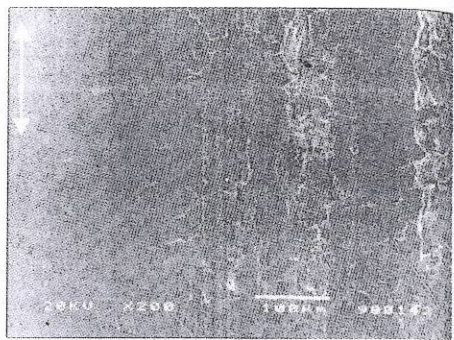
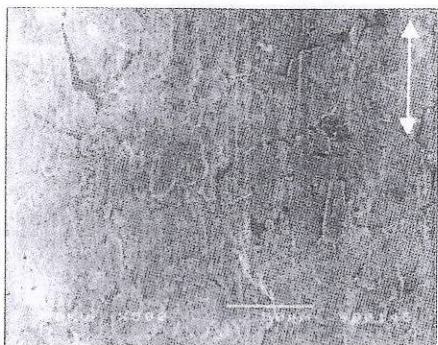


Figura 4: Microscopia eletrônica de varredura da superfície de desgaste de duas placas, ensaiadas a 100 °C, imagem por elétrons secundários.

A) utilizando-se o critério de parada do ensaio até atingir um valor de coeficiente de atrito pré-determinado. 500x.

B) utilizando-se o critério de parada do ensaio com a identificação de uma mudança repentina no ruído emitido no ensaio no instante da transição. 200x.

Com o critério de parada do ensaio no momento da modificação repentina do ruído emitido no instante da transição do desgaste, obteve-se a superfície vista na **Figura 4B**, onde pode se observar pontos de arrancamento de material, o que pode confirmar a transferência de material da placa para a superfície do pino. Nesse caso, não houve detecção de fragmentos de desgaste macroscópicos na maioria dos ensaios.

O coeficiente de atrito médio obtido com este critério de finalização do ensaio foi por volta de 0,23.

SUMÁRIO

Como pontos principais, pode-se destacar que:

- Todos os ensaios apresentaram transição do desgaste moderado para severo, em todas as temperaturas utilizadas.
- Foi observado um aumento repentino do coeficiente de atrito associado ao instante da transição do desgaste moderado para severo.
- A transição do desgaste pode ser atribuída a um processo de transferência de material, da placa de ferro fundido para o pino nitretado.
- A influência da temperatura nos resultados esteve relacionada com as características da região de deformação plástica observada sobre os pinos, constituindo, portanto, um parâmetro de importância para ensaios de desgaste visando transição.
- O critério de parada do ensaio por um coeficiente de atrito pré-determinado não permitiu observar com clareza os mecanismos de transferência de material e adesão envolvidos na transição do desgaste.
- A transição do desgaste leva a uma modificação repentina no ruído emitido no ensaio. Com a parada do ensaio no instante desta modificação, obteve-se uma melhor visualização dos mecanismos envolvidos na transição do desgaste moderado para severo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP, à FAPESP e à CAPES pelo apoio recebido para a pesquisa, e à COFAP pelo apoio na confecção, preparação e caracterização das amostras de ensaio.

REFERÊNCIAS

- [1] ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. Elsevier Science Publishers, USA, 1987
- [2] QUINN, T.F.J. Review of oxidational wear. Part I: the origins of oxidational wear. **Tribology International**, v.16, n.5, p.257-71, 1983
- [3] HAYNES, G. Accelerated chromium plate ring wear associated with liner pitting. SAE 831280. In: **State of the art on design and performance of Diesel power cylinder components**. SP552, 1983
- [4] HUTCHINGS, I.M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Edward Arnold, Great Britain, 1992
- [5] YOSHIDA, H.; KUSAMA, K.; KOBAYASHI, H.; WOLF, G. E. Method to improve wear resistance of nitrided rings. SAE 973102, 1997
- [6] LEE, S. C., CHENG, H. S. Correlation of scuffing experiments with EHL analysis of rough surfaces. **Journal of Tribology**, v. 113, 1991, p.318
- [7] LEE, Y.; LUDEMA, K.C. J. **Tribology**, 113 (2), 1991, p. 195-302. *Apud* PARK, K.B., LUDEMA, K.C. Evaluation of the plasticity index as a scuffing criterion. **Wear** 175, 1994, p. 123
- [8] LUDEMA, K. C. A review of scuffing and running-in of lubricated surfaces, with asperities and oxides in perspective. **Wear** 100, 1984, p.315
- [9] American Society for Metals International. Handbook Committee, **ASM HANDBOOK**, V. 18 – Friction, Lubrication and Technology, Metals Park, ASM, 1992
- [10] LEE, S. C.; CHENG, H. S. Scuffing theory modeling and experimental correlations. **Journal of Tribology**, transactions of the ASME, v.113, n2, p327-334, 1991
- [11] CZICHOS, H. Systematic diagnosis of friction and wear test data. In: **ASM Handbook**, v.18, Friction, Lubrication and Wear technology, 1992
- [12] EYRE, T.S., et. al. Characterization and simulation of wear occurring in the cylinder bore of the internal combustion engines. **Tribology International**, v.23, n.1, p.11-6, 1990

Patrocínio

RECOPE



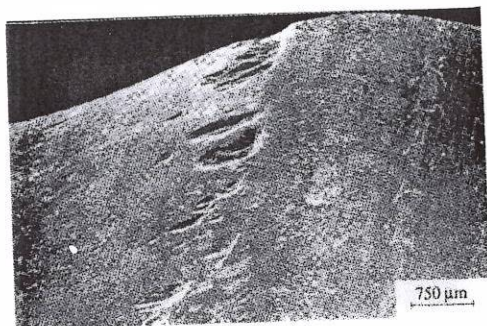
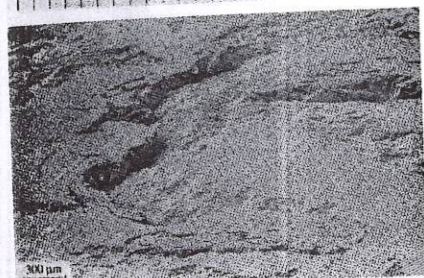
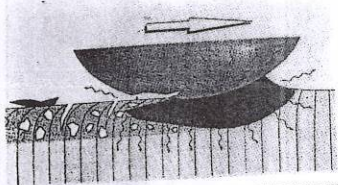
FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

arotec

Serviço de Biblioteca de Engenharia Mecânica

WORKSHOP RECOPE

DESAFIOS, EXPERIÊNCIAS E EXPECTATIVAS
SOBRE
TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIES
NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA



Bibliotecas
Mecânica, Naval e Oceânica

621.7.015
W892d
2º



ESCOLA POLITÉCNICA - USP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE FENÔMENOS DE SUPERFÍCIE

SÃO PAULO, 24 DE NOVEMBRO DE 1998