

Texturização por Laser Nd:YAG e comportamento tribológico de um revestimento de cromo

Juliano A. Araujo

Eng. Met.; M. Sc.; Mahle Metal Leve S. A. São Paulo - SP
E-mail: jaraujo@mahle.com.br

Flávio S. L. Cassino

Eng. Met.; D. Sc.; Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Física - Ouro Preto - MG
E-mail: fcassino@iceb.ufop.br

Adilson R. da Costa

Eng. Met; D. Sc.; Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas
Departamento de Eng. Metalúrgica e de Materiais/REDEMAT - Ouro Preto - MG
E-mail: adilson@em.ufop.br

Resumo

Com o intuito de melhorar a condição de lubrificação na superfície de revestimentos de cromo eletrodepositado em aços-carbono, elaborou-se uma rede regular de furos utilizando um Laser Nd:YAG pulsado. Essa rede de furos foi projetada de modo que cada furo individual funcionasse como reservatório adicional de óleo em condições limítrofes de lubrificação.

Técnicas de análise metalográfica e dimensional foram utilizadas para a caracterização das superfícies estudadas. Complementarmente, com o auxílio de uma interpretação analítica da condição limítrofe de lubrificação, foi possível descrever o comportamento tribológico dos revestimentos texturizado e convencional, quando estes foram ensaiados no teste de pino-sobre-disco.

A texturização do revestimento de cromo levou-o a um significativo aumento da resistência ao “scuffing”, sendo até três vezes maior que o revestimento de cromo convencional, e a um melhor comportamento em relação ao desgaste (perda de massa).

Palavras-chave: Laser Nd:YAG, revestimento eletrodepositado, teste pino-sobre-disco, engripamento.

Abstract

A regular spaced array (texture) consisting of holes produced by pulsed Nd:YAG laser was designed in order to improve lubricant conditions of chromium eletro deposited layer upon mild steel. This surface textured was designed so that any hole behaves as an additional lubricant reservoir in boundary lubricant conditions.

Metallographic and topographic analysis were performed and an analitical interpretation was proposed to describe tribological behaviour of this laser patterned (regular holes distribution) and conventional (no laser treated) coatings. Tribological tests were performed accordingly to pin-on-disc procedure.

A relevant increase in scuffing resistance was observed for texture coating: three times compared with conventional eletro deposited chromium layer. Better behaviour in wear tests (loss of mass) was also observed.

Keywords: Nd: YAG laser, chromium eletro-deposited layer, pin-on-disc test, scuffing.

1. Introdução

O processo usual de elaboração do recobrimento de cromo conduz a uma textura final, lisa, pouco adequada à retenção de óleo lubrificante durante os períodos de lubrificação marginal [1]. Grande atenção tem sido dada ao tipo de textura superficial de componentes cromados, impondo-lhes tratamentos superficiais adicionais visando à retenção de óleo lubrificante nas suas superfícies durante o período de condição limítrofe de lubrificação.

Como em qualquer sistema mecânico, a durabilidade desse recobrimento depende fortemente da espessura mínima de filme de óleo lubrificante. Inúmeros são os processos para obtenção de uma superfície mais rugosa, permitindo incorporar "reservatórios" de óleo lubrificante em diversos sistemas mecânicos, como, por exemplo, cilindros de laminação, mancais, anéis de pistão, etc.

Nos últimos anos, a texturização por laser tem se apresentado como uma opção competitiva para a produção de furos e ou alteração da textura superficial prévia [2]. Exemplos estão presentes na indústria aeronáutica, que tem empregado essa técnica em componentes de turbina (aletas), na câmara de combustão [3], e em microtecnologia, onde os problemas de lubrificação permanente de componentes miniaturizados, devido à mínima quantidade de lubrificante e à dificuldade de confiná-lo nas superfícies em contato constituem um desafio [4, 5].

De acordo com a Figura 1, que representa a resistência ao desgaste dos principais recobrimentos utilizados em componentes da indústria automobilística, destaca-se o recobrimento de cromo eletrodepositado pela sua resistência ao desgaste. Contudo esse recobrimento tem uma limitação: não retém óleo em sua superfície e, em períodos de falta ou deficiência de lubrificação, o desgaste adesivo e, posteriormente, "scuffing" podem ocorrer (Figura 2).

Entende-se por "scuffing" o desgaste adesivo severo com transferência de material.

No esforço de melhorar a lubrificação localizada na superfície do recobri-

mento de cromo, concebeu-se uma rede regular de furos utilizando um laser Nd:YAG pulsado. Essa texturização propiciou uma contínua e eficaz lubrificação por (i) servir como um reservatório que aumenta a disponibilidade de lubrificante e (ii) manter o lubrificante nos locais desejados.

2. Método experimental

O equipamento utilizado é um laser Nd:YAG *Q-switched*, que emite pulsos de energia de 240 a 550 mJ com comprimento de onda do infravermelho próximo (1,064 μ m) e perfil de distribuição de energia supergaussiano.

Para traçarmos a rede de furos nos corpos de prova, utilizamos uma mesa

XY encarregada de movimentá-los conforme rotina predefinida garantindo, assim, ao processo, a reprodutibilidade desejada.

Os parâmetros operacionais do laser usados nesse trabalho e que têm relevância para a texturização de materiais são: o comprimento de onda do laser, fixado em 1,064 μ m, a velocidade de varredura da mesa, a distribuição de energia dos pulsos e a desfocalização do feixe. A Tabela 1 mostra as principais especificações técnicas do laser utilizado nesse trabalho.

Para a realização dos ensaios de texturização nos corpos de prova com recobrimento de cromo, as amostras são deslocadas em relação ao feixe de laser que é fixo.

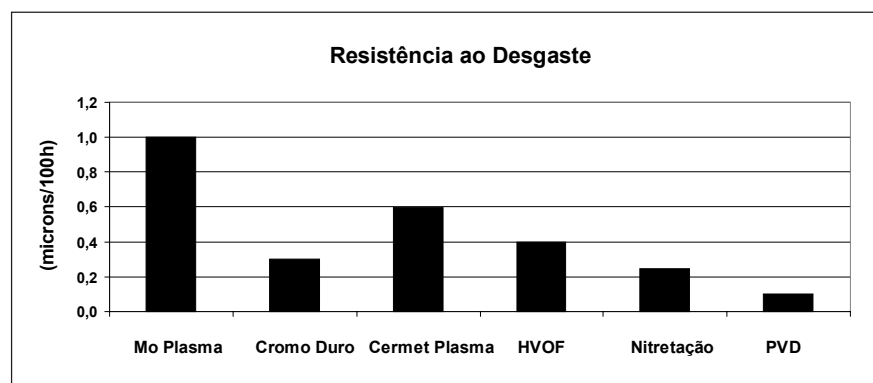


Figura 1 - Desgaste para diferentes tratamentos de superfície. Motor a gasolina. Fonte: Nippon Piston Rings - Catálogo/90.

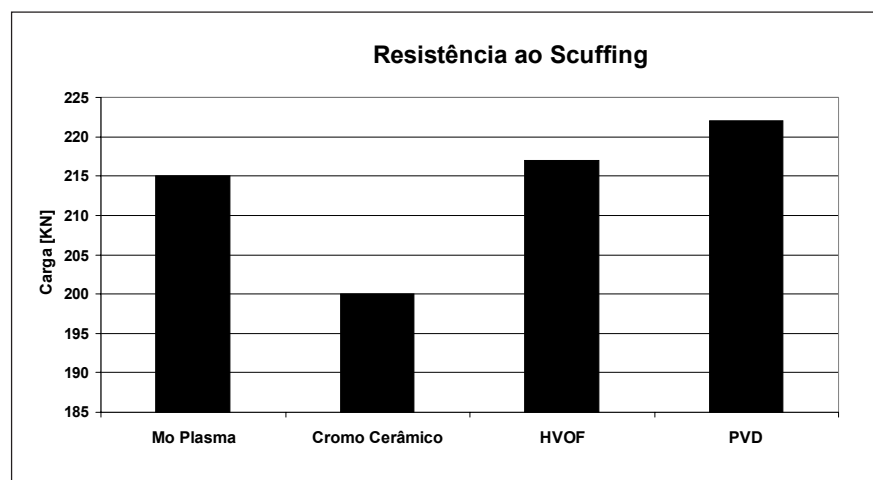


Figura 2 - Resistência ao "Scuffing" de diferentes tratamentos e coberturas. "Cameron Plint - teste de scuffing em anéis". Fonte: SAE 2002-01-0489 (Federal Mogul Burscheid GmbH).

A Figura 3 mostra um desenho esquemático do processo desenvolvido para executar o deslocamento da amostra plana em relação ao feixe de laser.

A Figura 4 mostra os furos circulares com diâmetros e espaçamentos regulares, obtidos segundo a técnica desenvolvida.

Nesse trabalho, foram realizados dois padrões de textura diferenciados pelo diâmetro e espaçamento dos furos. Os parâmetros de operação do laser, do programa de varredura da mesa, juntamente com os diâmetros dos furos e os espaçamentos alcançados na texturização, encontram-se na Tabela 2. A partir desses dados, observa-se, também, que, para uma mesma frequência, quanto menor a velocidade de deslocamento da mesa, menor é o espaçamento entre os furos e, para um valor de desfocalização maior, como na textura 2, o diâmetro de furo é, conseqüentemente, maior.

Segundo o modelo matemático proposto por Etsion [7], em superfícies texturizadas com uma estrutura regular de furos circulares, com diâmetros variando de 5 a 200 micrômetros e a porcentagem de área ocupada pelos furos entre 2,5 a 20%, foi mostrado que a melhor performance em termos de menores coeficientes de atrito pode ser alcançada

com a seleção apropriada do diâmetro dos furos e a porcentagem de área ocupada. Nesse caso, o valor ideal de área ocupada por furos foi da ordem de 20%. Valores menores, implicam queda nos índices de melhoria.

O tamanho ótimo dos furos depende da viscosidade, da pressão de contato entre as superfícies atritantes e da proporção da área ocupada por eles. Em geral, o diâmetro ótimo de furo decres-

ce com a diminuição da viscosidade, com o aumento da pressão de contato e com o aumento da proporção da área ocupada pelos furos.

Referindo-se ainda ao modelo proposto por Etsion, para as duas texturas apresentadas na Tabela 2, a textura 1 seria a mais otimizada em relação ao coeficiente de atrito, por apresentar um menor diâmetro de furo e uma razão de área ocupada por furos maior.

Tabela 1 - Principais especificações técnicas do laser [6].

Dados	Unidade	Especificação
Comprimento de onda	nm	1064
Duração do pulso	ns	3 a 5
Energia do pulso	mJ	550
Estabilidade da energia do pulso (90% dos pulsos)	-	2%
Taxa de repetição	Hz	10 (e 10/N)
Polarização	-	Vertical
Vida útil da lâmpada	Pulsos	> 10 ⁶
Consumo de água (20 Co)	l/min	8
Perfil de intensidade de energia	-	Supergaussiano
Divergência do feixe	mr	< 0,7
Dimensões	mm	455 x 105 x 120

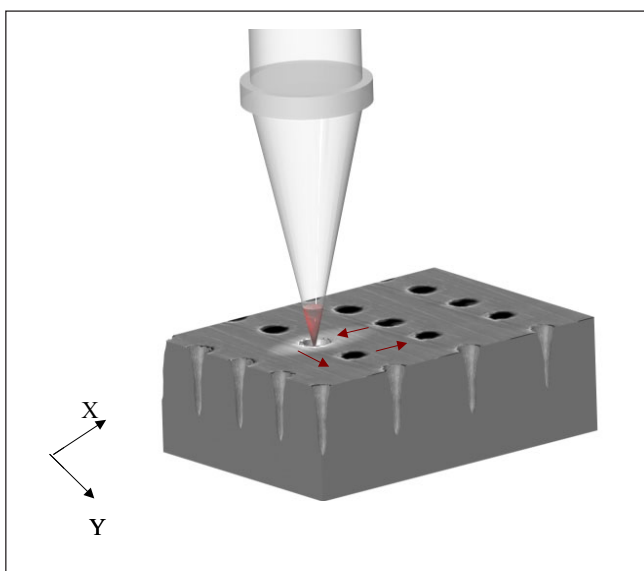


Figura 3 - Desenho esquemático mostrando a trajetória imposta pelo programa de varredura da mesa onde são apoiadas as amostras. As setas indicam a direção e o sentido das trajetórias.

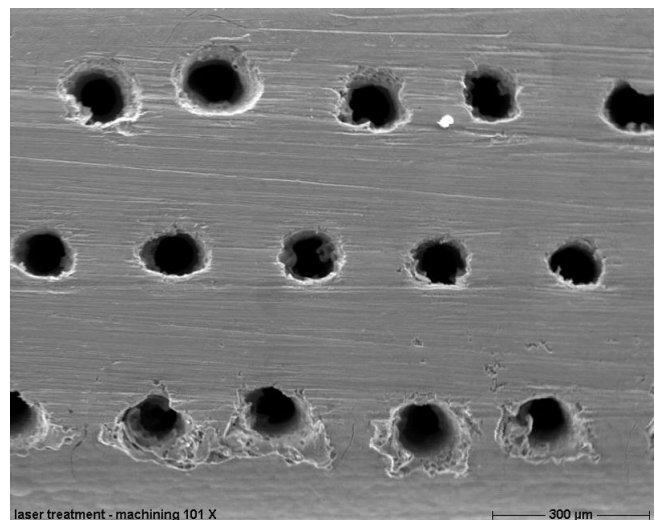


Figura 4 - Vista em detalhe da superfície texturizada.

3. Resultados experimentais

Ensaio de pino-sobre-disco foram realizados de modo a permitir a avaliação da resistência ao desgaste e ao "scuffing" de amostras texturizadas por laser.

No teste de "scuffing" definido, verificou-se a capacidade de carga da amostra ensaiada. A Figura 5 mostra a carga para a qual ocorreu engripamento para os diferentes recobrimentos texturizados e o recobrimento convencional. Para esse teste, o cromo texturizado 1 suporta um carregamento três vezes maior do que o cromo convencional.

Para o cromo texturizado 2, temos um comportamento duas vezes melhor, sob o ponto de vista da carga suportada e que é justificado por, basicamente, dois motivos:

- Aumento da espessura do filme de óleo lubrificante em condições limites de lubrificação [5, 8].
- O fato de os furos atuarem como reservatórios de lubrificante [4, 5, 9].

Segundo Osborne Reynolds [10], "duas superfícies paralelas podem deslizar uma sobre a outra com baixo coeficiente de atrito, até mesmo sob alta pressão normal, contanto que um filme de fluido viscoso seja mantido entre elas". O problema é que, em casos práticos, isto não é efetuado automaticamente quando há um aumento da pressão exercida sobre as placas. Ainda segundo o mesmo pesquisador, consegue-se a manutenção do filme lubrificante quando a disposição da superfície das placas for tal, que o espaçamento entre as duas superfícies seja variável, levando a uma tendência do movimento relativo do fluido arrastar continuamente uma provisão do lubrificante da porção mais abundante para a mais escassa.

Essa situação é a proposta da texturização por laser na superfície do recobrimento de cromo e é o que, de fato, ocorre.

Para descrevermos, qualitativamente, o contínuo movimento do fluido dentro do furo para a área de interface entre o disco e o corpo de prova, são utilizadas algumas ferramentas analíticas.

Tabela 2 - Parâmetros do Programa ACSPL e do laser Nd:YAG para a texturização dos corpos de prova.

Parâmetros		Textura 1	Textura 2
ACSPL	Velocidade do eixo X e Y (mm/s)	2,30	2,50
	Espaçamento em Y (mm)	0,23	0,30
	Vazão do gás (PSI)	0,4	0,4
	Frequência dos pulsos (Hertz)	10,00	10,00
Laser Nd:YAG Pulsado	Valor de tensão (V)	1500	1600
	Desfocalização (mm)	0,5	2,5
Característica Texturização	Diâmetro do furo (mícrons)	96,0 +-3,0	124,0 +-3,0
	Espaçamento eixo X (mícrons)	220,5 +- 20,0	262,0 +- 11,0
	Espaçamento eixo Y (mícrons)	213,0 +- 22,0	256,0 +- 15,0
	Área ocupada por furos (%)	27,3 +-1,5	17,9 +-2,0

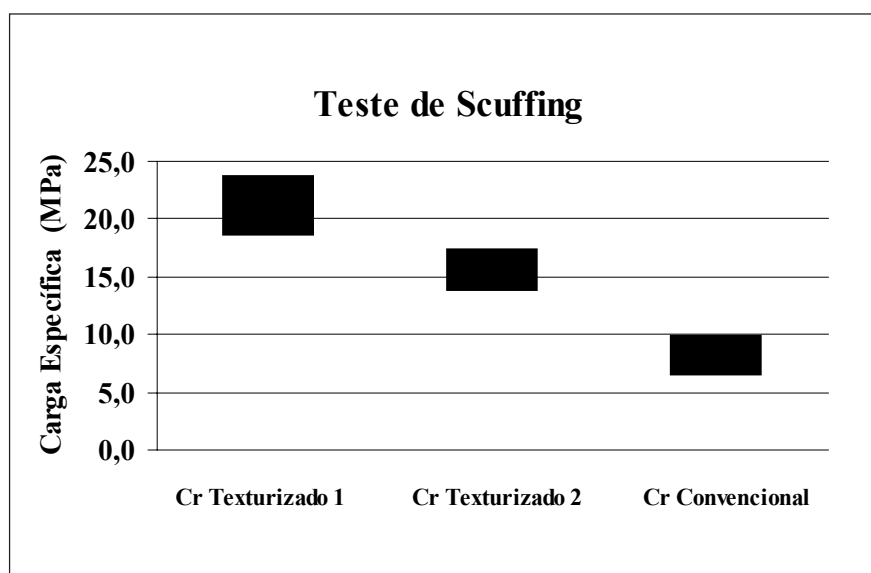


Figura 5 - Carga específica para o engripamento - Valor médio com o desvio-padrão da amostragem.

Um desenho esquemático do furo gerado pela texturização a laser (Figura 6) nos dá uma visão realista das proporções do furo em relação à espessura do filme de óleo na condição mista de lubrificação, ou seja, espessura de filme de óleo variando de uma a três vezes a rugosidade combinada. Define-se essa grandeza de acordo com a expressão:

$$\text{Rugosidade Combinada} = (Rq_1^2 + Rq_2^2)^{1/2}$$

na qual Rq é o valor médio quadrático de todos os desvios do perfil de rugosidade da reta média dentro do comprimento de medição realizado. Sendo,

$$Rq_1 = Rq \text{ do disco} \Rightarrow 0,11 \text{ a } 0,14 \text{ micrômetros.}$$

$$Rq_2 = Rq \text{ do corpo de prova} \Rightarrow 0,12 \text{ a } 0,14 \text{ micrômetros, tem-se:}$$

$$\text{Rugosidade Combinada} \approx 0,16 \text{ a } 0,20 \text{ micrômetros}^{[11]}$$

Landau ^[12], propõe uma solução analítica de fluxo de fluidos viscosos em canais convergentes e divergentes.

Basicamente, ele analisa um fluxo de líquido viscoso entre dois planos encontrando-se no ponto 0 com um ângulo α (Figura 7a); o fluxo de fluido passa

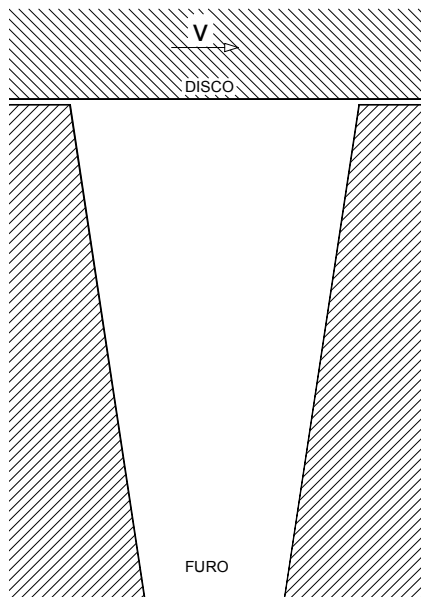


Figura 6 - Esquema das proporções do furo no recobrimento de cromo em relação à espessura de filme de óleo na condição limítrofe de lubrificação.

pela linha de interseção de dois planos: situação análoga à do nosso problema (Figura 7b).

Quando o fluxo é convergente, temos a distribuição de velocidade conforme mostra a Figura 8a. Para o caso dos testes realizados nesse trabalho, te-

mos que um dos planos é o disco e está em movimento. Diante disso, pela equação de Reynolds para fluidos viscosos, a velocidade do fluido na superfície do disco é a mesma deste. A Figura 8b mostra a adaptação, para a nossa realidade, do esquema feito por Landau.

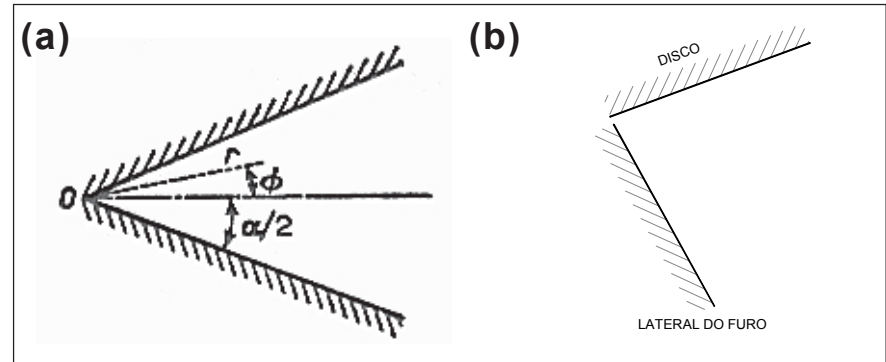


Figura 7 - (a) Desenho esquemático para solução da equação de movimento de um fluido viscoso em canais divergentes e convergentes; (b) vista da borda do furo e da superfície do disco, tendo como intersecção a camada de filme lubrificante.

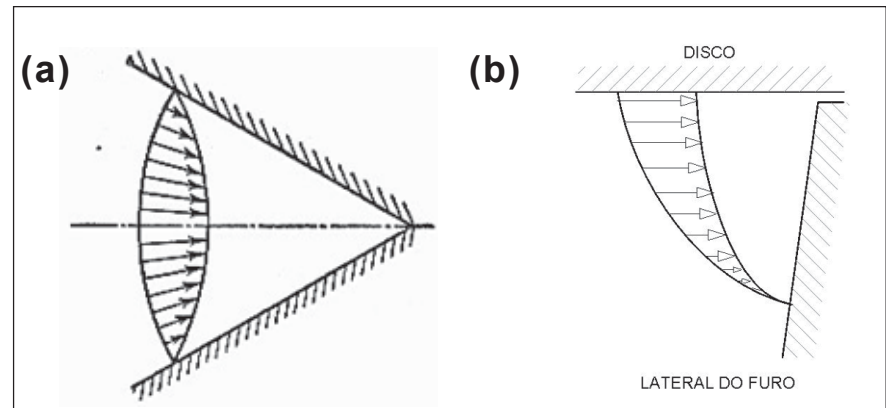


Figura 8 - Fluxo em canal convergente: (a) Distribuição de velocidade em planos fixos; (b) Distribuição de velocidades considerando o movimento do disco.

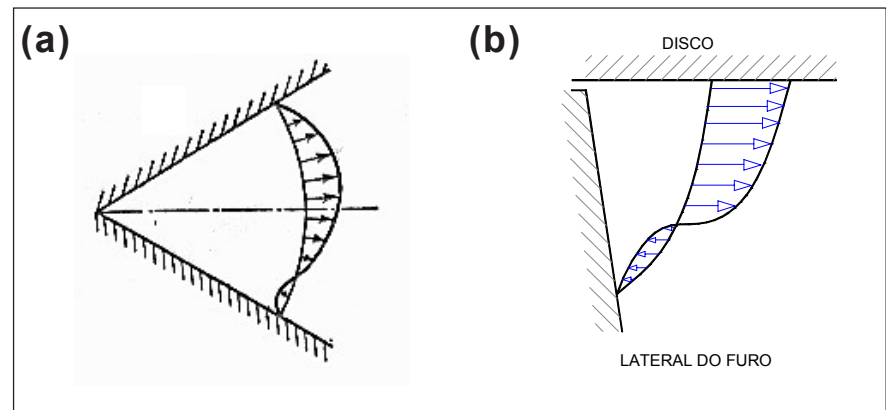


Figura 9 - Fluxo em canal divergente: (a) Distribuição de velocidade em planos fixos; (b) Distribuição de velocidades considerando o movimento do disco.

Quando o fluxo é divergente, temos a distribuição de velocidade conforme mostra a Figura 9a. Como uma das placas está em movimento, temos, conforme mostrado na Figura 9b, um vetor-velocidade diferente de zero na superfície da placa, ou seja, do disco.

Os perfis de velocidade para um fluido viscoso, deslocando em um canal convergente e num canal divergente conforme determinados por Landau, podem ser combinados no sistema tribológico estudado: recobrimento de cromo texturizado - disco, conforme ilustrado na Figura 10.

Da combinação desses movimentos, resulta um perfil de velocidades (linha pontilhada vermelha, Figura 10), que faz com que as partículas de lubrificante no interior do furo sejam arrastadas para a interface disco-recobrimento por turbilhonação. Deste modo, o furo atua como "reservatório de óleo" para uma contínua provisão de lubrificante em condições limítrofes de lubrificação.

Esse acréscimo de lubrificante no sistema prolonga a vida do recobrimento texturizado em condições de desgaste deslizante sob crescente aumento da pressão normal, como mostra o gráfico da Figura 5 (análise do torque).

Evolução do Torque com o Tempo. Com o acréscimo de carga durante o teste, podemos acompanhar o aumento do torque (força de atrito vezes a distância do centro do disco ao corpo de prova), até o momento em que este atinge o valor de 0,6 N/m, caracterizando o "scuffing". A Figura 11 é um gráfico, representativo, da evolução do torque com o tempo para o recobrimento de cromo texturizado e o recobrimento de cromo convencional.

Note-se que, as variações nos valores do torque para pequenas cargas são mais acentuadas para o cromo convencional e o valor médio do torque numa mesma carga é maior para os ensaios com esse recobrimento.

Segundo Masuda et all. [5] e Etsion [7], a espessura do filme de óleo em superfícies texturizadas aumenta em relação à não texturizada, chegando a ser 4 (quatro) vezes maior. Quando o recobrimento de cromo texturizado tem uma espessura de filme de óleo maior para uma mesma carga normal, a porcentagem de picos em contato rugoso é menor, justificando o comportamento mostrado na Figura 11.

Para cargas próximas da condição de "scuffing", tanto o recobrimento texturizado, como o convencional apresentaram maiores variações no valor do torque, se comparado às cargas menores, caracterizando condições de lubrificação limítrofe, representada pela curva de Stribeck (Figura 12).

Na condição de lubrificação limítrofe, a carga é suportada pelas asperezas existentes nessas superfícies. Com o rompimento do filme de óleo, a força tangencial para romper essas junções (asperezas) é muito alta, levando a valores inaceitáveis de atrito, desgaste e dano superficial.

Nessa condição limite, os furos na superfície do cromo texturizado funcionam como reservatórios de óleo, mantendo

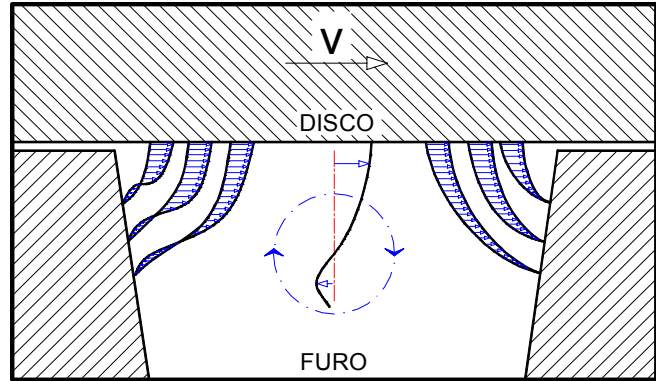


Figura 10 - Vista geral da região do furo do recobrimento de cromo sob teste no Pino-sobre-disco, ilustrando os perfis de velocidade e o movimento do fluido lubrificante dentro do furo.

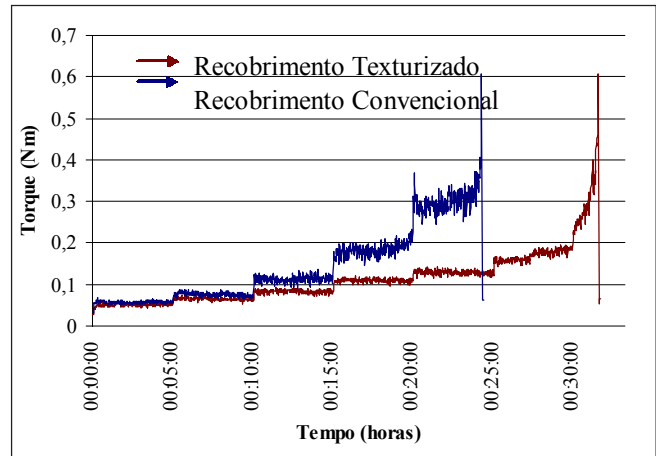


Figura 11 - Gráfico de torque para o corpo de prova com recobrimento texturizado e recobrimento convencional (não texturizado).

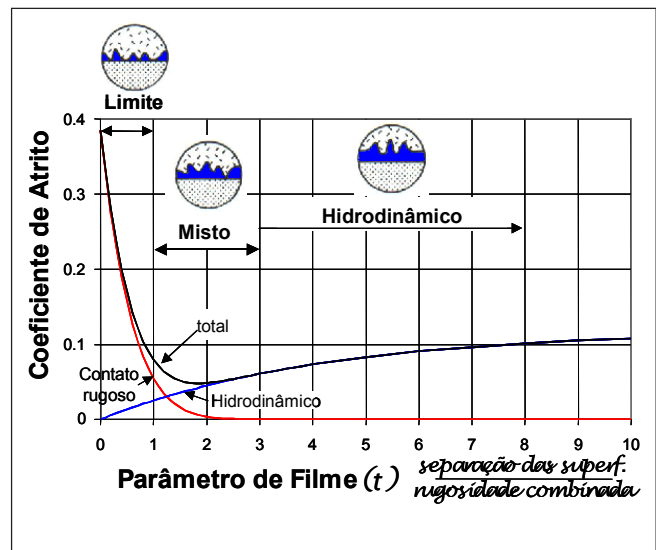


Figura 12 - Curva de Stribeck em função de t (extraído de E. Tomanik - Tese de Doutorado [11]).

o filme a cargas de teste maiores e, assim, garantindo uma sobrevida ao corpo de prova texturizado.

Evolução do Coeficiente de Atrito com o Tempo. Os recobrimentos texturizados apresentaram comportamento da curva de coeficiente de atrito diferente do encontrado para o cromo convencional, que, seguindo a tendência do gráfico de torque, apresentou maior coeficiente de atrito para uma mesma carga e maior variação em cada ponto. Comportamento similar foi encontrado por Etsion [7, 13] e por Blatter et al. [4], justificado pela maior espessura de filme lubrificante no recobrimento texturizado e provisão adicional de lubrificante em condições limítrofes de lubrificação (Figura 13).

Análise Metalográfica. Para a caracterização de "scuffing", realizou-se a análise das superfícies das amostras por perfilometria, tanto para o texturizado, como para o convencional antes (Figura 14) e depois (Figura 15) dos testes. A transferência de metal do disco para o recobrimento de cromo do corpo de prova ficou evidente.

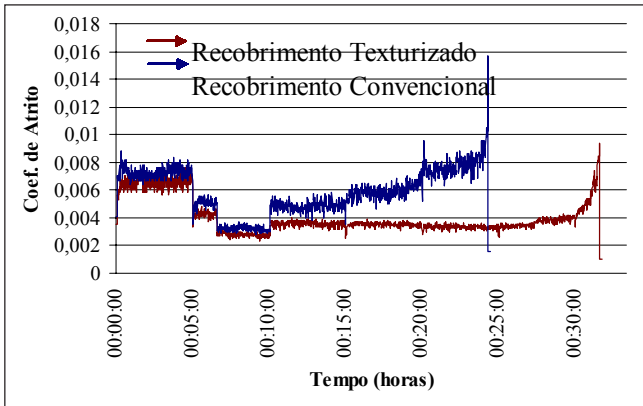


Figura 13 - Gráfico do coeficiente de atrito para um corpo de prova com recobrimento texturizado e com recobrimento convencional (não texturizado).

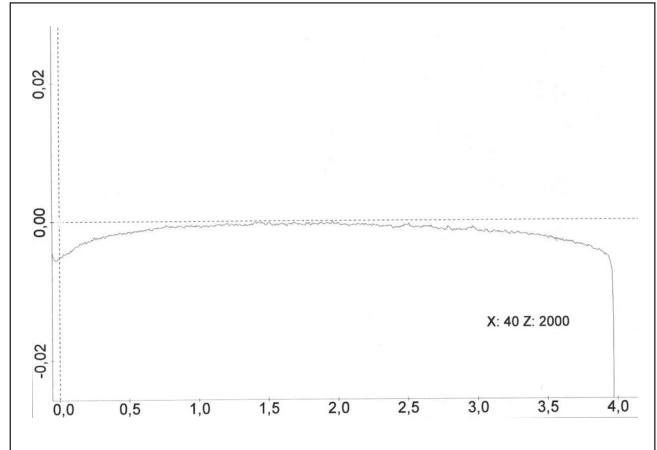


Figura 14 - Perfilometria realizada na superfície do corpo de prova antes do teste de "scuffing".

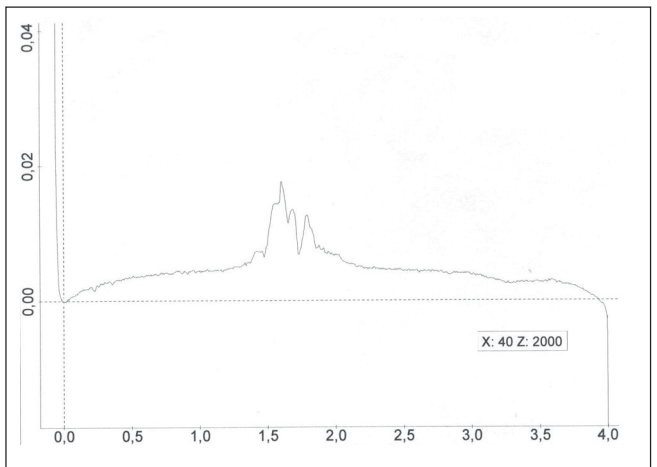


Figura 15 - Perfilometria realizada na superfície do corpo de prova depois do teste de "scuffing".

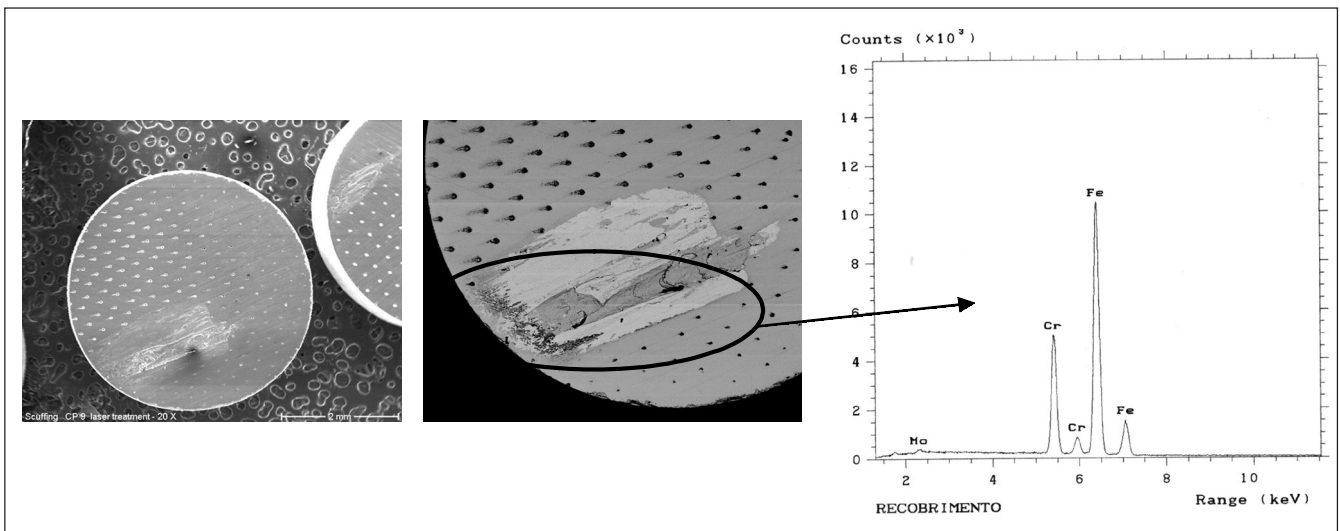


Figura 16 - (a) Microscopia eletrônica de varredura na superfície do corpo de prova texturizado após o teste de Scuffing; (b) Detalhe - Foto de composição (imagem por elétrons retroespalhados); (c) Espectro com as raiais típicas dos elementos Cr e Fe da região onde ocorreu a transferência de material.

A Figura 16 mostra uma foto, obtida por microscopia eletrônica de varredura da superfície do corpo de prova após o teste, juntamente com o espectro que comprova a afirmação de transferência de metal do disco (aço - 18% Cr) para o corpo de prova.

Na Figura 17, obtida por microscopia eletrônica de varredura da transversal do corpo de prova ensaiado, observa-se: a incorporação de metal do disco (a) sobre recobrimento íntegro (b).

Ensaio de desgaste. A Figura 18 mostra, com 90% de confiabilidade, que a média dos resultados dos ensaios de desgaste realizados no teste pino-sobre-disco, para os recobrimentos de cromo texturizado 1, cromo texturizado 2 e cromo convencional, está sob a área hachurada. O recobrimento convencional de cromo apresentou maior desgaste (perda de massa) em relação aos recobrimentos texturizados.

Como o teste de desgaste é realizado com uma mesma carga, e essa carga é cinco vezes menor que o primeiro "step" colocado para o teste de "scuffing", é provável que desgaste significativo só ocorra até que os picos mais salientes sejam arrancados ou se deformem plasticamente.

Segundo a literatura, a espessura de filme maior, numa mesma condição de teste, para a superfície texturizada, diminui a probabilidade de contato rugoso e, conseqüentemente, a taxa de desgaste.

4. Conclusões

A partir da criação de uma rede regular de furos na superfície de um recobrimento de cromo eletrodepositado sobre aço visando à melhoria das condições de lubrificação, pôde-se concluir que:

- O laser Nd:YAG pulsado é um equipamento confiável para efetuar a texturização, com reprodutibilidade assegurada.
- O recobrimento de cromo texturizado apresentou uma resistência ao "scuffing" três vezes maior que aquela apresentada pelo recobrimento de cromo convencional.
- O comportamento do recobrimento texturizado, em relação ao desgaste, foi melhor que o do recobrimento convencional.
- A área do recobrimento ocupada por furos influi diretamente na sua resistência ao "scuffing".

5. Agradecimentos

Mahle Metal Leve S. A. e Laboratório de Engenharia de Superfícies e Técnicas Afins. Escola de Minas/UFOP.

6. Referências bibliográficas

- [1] KOVACH, T.J., WONG, L.T., TSAKIRIS, E.A. *Engine friction reduction for improvement fuel economy*. In: SAE Paper 820085.
- [2] LOW, D.K.Y., LI, L., CORFE, A.G., BYRD, P.J. Spatter-free laser percussion drilling of closely spaced array holes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 41, p. 361 - 377, 2001.
- [3] CORFE, A.G. Laser drilling of aero engine components. In: PROCEEDINGS

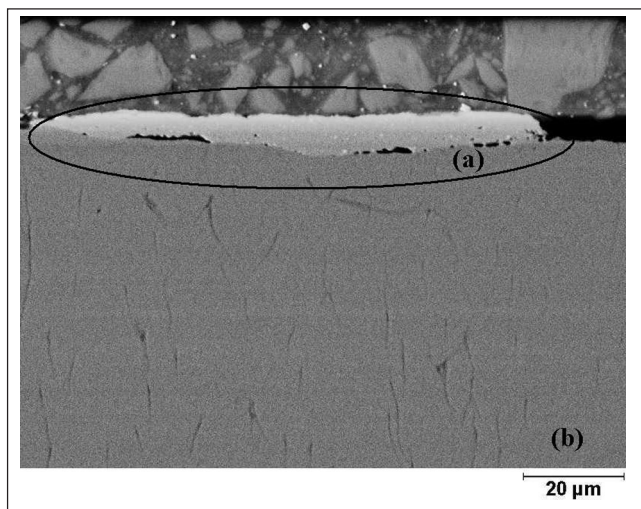


Figura 17 - Corte transversal do corpo de prova após o teste de "scuffing".

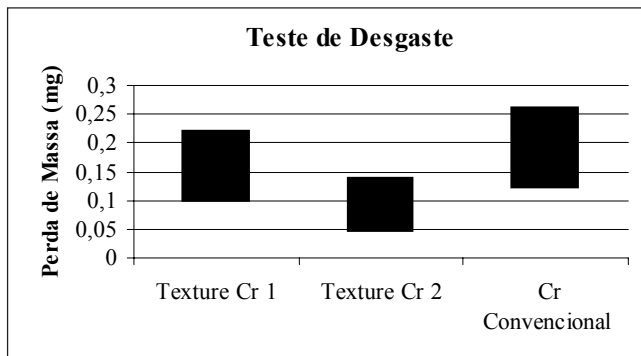


Figura 18 - Resultado dos testes de desgaste realizados no equipamento Pino-sobre-Disco.

- OF THE 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON LASERS IN MANUFACTURING. Brighton, East Sussex, p. 31-40, 1983.
- [4] BLATTER, A., MAILLAT, M., PIMENOV, S.M., SHAFEEV, G.A., SIMAKIN A.V., LOUBNIN E.N. Lubricated sliding performance of laser-patterned sapphire. *Wear*, v. 232, p. 226-230, 1999.
- [5] WATANABE K., NATSUME, J., HASHIZUME, K., OZASA, TOSHIHIRO O., NADA, T., MASUDA, Y. Theoretical analysis of bearing performance of microgrooved bearing. *JSAE Review*, 21, p. 29-33, 2000.
- [6] EKSPILA. Pulsed Nd:YAG Laser NL 302. In: TECHNICAL DESCRIPTION & USER'S MANUAL, p. 2-32. 1998
- [7] ETSION, I., BURSTEIN, L. A model for mechanical seals with regular micro surface structure. *Tribology Transactions*, v. 39, p. 677-683, 1996.
- [8] ANTONIOU, S.S., PANTAZOPOULOS, G., PANTELIS, D.I. Wear behavior of anti-galling surface textured gray cast iron using pulsed-CO₂ laser treatment. *WEAR*, n. 205, p. 178-185, 1997.
- [9] YU, T.X., KIM, J.K., HOULT, A.P., WONG, R.C.P. Improvement of adhesive bonding in aluminum alloys using a laser surface texturing process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 63, p. 579-584, 1997.
- [10] SIR LAMB H. *Hydrodynamics: viscosity*. 6 ed. New York: Dover Publications, 1980. 585p.
- [11] TOMANIK, E. *Modelamento do desgaste por deslizamento em anéis de pistão de motores de combustão interna*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. 198 p. (Tese de Doutorado).
- [12] LANDAU, L.D., LIFSHITZ, E.M. *Fluid mechanics: course of theoretical physics*. 2 ed. Pergamon Press, 1995. v. 6
- [13] ETSION, I., HALPERIN, H., GREENBERG, Y. Increasing mechanical seals life with laser-textured seal faces. In: BRH GROUP FLUID SEALING. 1997. 11 p.

Artigo recebido em 07/10/2003 e aprovado em 28/02/2004.