

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS INDUZIDAS POR DESGASTE EM AÇO AISI 4340

^{1,2}Ítalo V. Tomaz; ¹Mateus C. Martins; ³Hector M. Costa; ⁴Ivan N. Bastos;

¹Maria Cindra Fonseca

(1) UFF; (2) IFF; (3) CEFET-RJ; (4) IPRJ-UERJ

UFF – Universidade Federal Fluminense – Departamento de Engenharia Mecânica/ PGMEC, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, CEP 24210-240, Niterói, RJ. E-mail: mcindra@vm.uff.br

RESUMO

Como resultado da fricção entre superfícies que se encontram em movimento relativo, os componentes mecânicos e estruturas sofrem desgaste. O presente trabalho tem como objetivo estudar a influência das tensões residuais no desgaste em ensaios pino-no-disco, realizados a seco com o contracorpo de aço AISI E 52100 de 6,0 mm de diâmetro. Foram estudadas amostras de aço AISI 4340 com diferentes tratamentos: temperado e revenido, e temperado e revenido com tratamento de shot peening. Os ensaios de desgaste foram realizados em seis etapas e as tensões residuais nas trilhas desgastadas foram analisadas por difração de raios-X usando o método de $\text{sen}^2\psi$. A taxa de desgaste das amostras submetidas ao tratamento de shot peening foi consideravelmente menor do que das outras amostras. Também foi possível perceber que as tensões residuais compressivas introduzidas pelo shot peening contribuíram para este efeito, apesar de terem sido alteradas pelas tensões induzidas ao longo dos ensaios pino-no-disco.

Palavras-chave: Tensões residuais, Difração de raios-X, Aço AISI 4340, Desgaste, Ensaio pino-no-disco.

INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios do século XXI é o desenvolvimento sustentável, que vem mudando não só os hábitos das pessoas como também os processos produtivos das indústrias. Dentro deste modelo de desenvolvimento sustentável, o foco das indústrias é a utilização racional de

energia e de recursos naturais. Apesar de estar geralmente associada ao uso de água e energia, a utilização racional de recursos naturais, envolve também, a utilização de máquinas e equipamentos com maior durabilidade, já que a fabricação destes também consome recursos. Logo, o desenvolvimento de equipamentos com maior vida útil evita o desperdício e o aumento da durabilidade está, na maioria das vezes, associada ao desgaste de seus componentes. Portanto, o desenvolvimento de componentes capazes de resistir ao desgaste por mais tempo é fundamental neste novo modelo de indústria, que busca mais eficiência e menos desperdício (6).

Desta forma, além das propriedades como resistência mecânica e tenacidade, a resistência ao desgaste é outro parâmetro essencial para a seleção de componentes mecânicos. Porém, diferente de outras propriedades, a resistência ao desgaste é muito difícil de ser mensurada devido à atuação de vários mecanismos. A dependência do desgaste em relação a vários fatores como velocidade relativa entre as superfícies, pressão de contato e acabamento superficial dificulta o total entendimento deste fenômeno.

As tensões residuais têm grande influência na vida útil de diversos componentes quando submetidos a carregamentos cíclicos. Porém, a influência das tensões residuais nos mecanismos e nas taxas de desgaste ainda não está bem estabelecida.

Totik *et al.*(6), introduziram tensões residuais compressivas em amostras de aço AISI 4140 por tratamento térmico de endurecimento por indução. Yakimets *et al.*(7) e Sánchez-Santana *et al.*(4) utilizaram um tratamento de *laser peening* em aço AISI E52100 e em liga de alumínio 6061, respectivamente, para obter o mesmo efeito. Nestes estudos, o calor gerado durante os tratamentos foi suficiente para alterar a dureza e/ou a microestrutura com relação às amostras não tratadas. Assim, não foi possível isolar a contribuição isolada das tensões residuais na taxa de desgaste, que de acordo com Tang *et al.*(8) e Narayanaswamy *et al.*(4), também é afetada pela dureza e microestrutura.

Entretanto, Llanea e Belzunce (2) usaram o tratamento mecânico de *shot peening* para introduzir tensões residuais compressivas no material e afirmam que este tratamento não produz alterações na microestrutura e na

dureza do material tratado, sugerindo que esta variação é sempre inferior a 10 %.

O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento do aço AISI 4340 em ensaios de desgaste do tipo pino-no-disco e analisar a influência das tensões residuais, nos mecanismos e nas taxas de desgaste de amostras tratadas termicamente e por *shot peening*.

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foi estudado o aço AISI 4340 fornecido na forma de barra redonda, laminada, com diâmetro de 50,8 mm, cuja composição química, fornecida pelo fabricante, é apresentada na Tabela 1. De acordo com o certificado fornecido pelo fabricante, o material não foi submetido a nenhum tratamento térmico após a laminação.

Tabela 1: Composição química do aço AISI 4340 (% em massa, Fe em balanço, Fabricante).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0,39	0,25	0,72	0,01	0,025	0,75	1,72	0,24

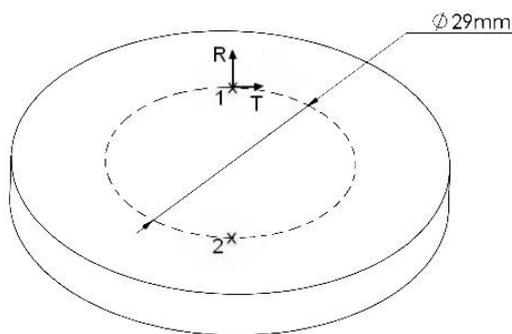
Foram preparadas 8 amostras por corte em cortadora metalográfica na forma de discos de (\varnothing 50,8 mm) e 6,0 mm de espessura a partir da barra redonda laminada (Figura 1). Todas as amostras foram submetidas aos tratamentos térmicos de têmpera e revenido, porém, apenas metade das amostras foi submetida ao tratamento superficial de *shot peening* com o objetivo de introduzir tensões residuais compressivas em sua superfície e nas camadas subsuperficiais. Após os tratamentos térmicos foi feita a análise microestrutural por microscopia óptica. Assim sendo, foram testadas quatro amostras para cada condição. A nomenclatura das amostras e os tratamentos estão listados da Tabela 2. Como contracorpos dos ensaios tribológicos foram utilizadas esferas de aço de alto carbono AISI E 52100 de 6,0 mm de diâmetro e dureza variando entre 697 e 895 HV adquiridas da empresa Só Esferas, Brasil. Para cada ensaio foi utilizado uma nova superfície

do contra-corpo. Os ensaios tribológicos foram realizados a seco, em temperatura ambiente, utilizando uma carga de 10,18 N e rotação de 60 rpm. Foi usado um tribômetro do tipo pino-no-disco desenvolvido no Instituto Politécnico, IPRJ/UERJ.

Para que fosse possível avaliar a evolução das tensões residuais ao longo dos ensaios, eles foram interrompidos a cada 328 m percorridos para a medição das tensões, perfazendo um total de seis etapas e 1968 m percorridos. O contracorpo foi posicionado a um raio de 14,5 mm de distância em relação ao centro da amostra, o que resultando em uma velocidade linear de 91,1 mm/s.

Tabela 2: Tratamentos das amostras.

Amostras	Tratamentos
A1, A2, A3, A4	Têmpera em óleo (860 °C / 60 min) e Revenido (300 °C / 90 min)
SP1, SP2, SP3, SP4	Têmpera em óleo (860 °C / 60 min), Revenido (300 °C / 90 min) e <i>Shot Peening</i>



(a)



(b)

Figura 1: Amostra circular para os ensaios de desgaste: a) Dimensões; b) Amostra com a trilha de desgaste.

A força de atrito foi medida ao longo de todos os testes por uma célula de carga acoplada ao tribômetro. O coeficiente de desgaste foi calculado

utilizando a equação de Archard (1):

$$k = \frac{V}{NL} \quad (A)$$

Em que, k é o coeficiente de desgaste, V o volume de desgaste, N a carga normal aplicada durante o ensaio e L , a distância percorrida. O volume de desgaste foi calculado tomando-se a área do perfil da trilha de desgaste e a coroa circular das trilhas. Para cada amostra, foram feitas duas medições da seção transversal da trilha de desgaste, afastadas entre si de 180°. A área foi determinada como sendo a média das integrais matemáticas obtidas em cada uma das medições.

As tensões residuais foram analisadas por difração de raios-X, utilizando o método do $\text{sen}^2\psi$. no Laboratório de Análise de Tensões – LAT, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFF, utilizando um analisador de tensões XStress3000 da marca Stresstech. Os parâmetros utilizados nas análises são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros utilizados no sistema de análise das tensões residuais.

Diâmetro do Colimador (mm)	1,0
Ângulo de incidência (2θ) (°)	156,8
Plano de difração (hkl)	(211)
Radiação	CrK α
Comprimento de onda (λ) CrK α (Å)	2,29092
Corrente (mA)	6,7
Tensão (kV)	30
Inclinação ψ (°)	0, 18, 27, 33 e 45
Tempo de exposição (s)	10

Foram realizadas medições em dois pontos de cada amostra, nas direções radial e tangencial (Figura 1). As tensões residuais foram medidas em todas as amostras, após tratamento térmico, após *shot peening* (para as amostras SP1-SP4) e após cada interrupção do ensaio pino-no-disco. Por fim, avaliou-se as características das trilhas de desgaste por meio de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise microestrutural apresentou uma microestrutura composta de martensita revenida em baixa temperatura (Figura 2). Após os tratamentos térmicos, as amostras apresentaram dureza média de 470 HV. Após os ensaios tribológicos (1968 m), um rugosímetro de contato foi usado para obter o perfil transversal das trilhas desgastadas, apresentado na Figura 3 para as amostras A2 e SP2.

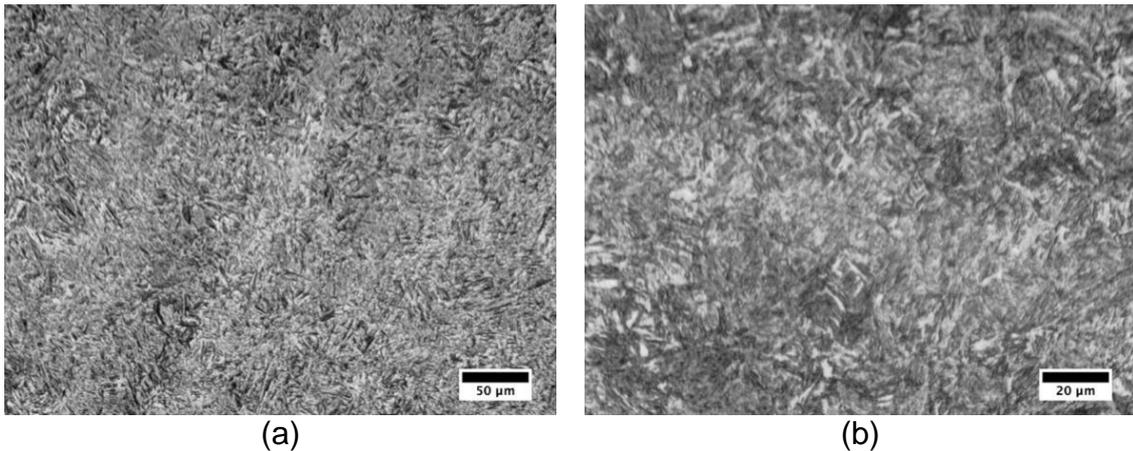


Figura 2: Microscopia óptica do aço AISI 4340 após têmpera em óleo e revenido: (a) Aumento de 400X; (b) Aumento de 1000X.

A área transversal foi determinada pelo cálculo da integral dos perfis em relação à altura da superfície não desgastada. O volume desgastado foi estimado pela multiplicação desta área pelo perímetro médio da trilha circular.

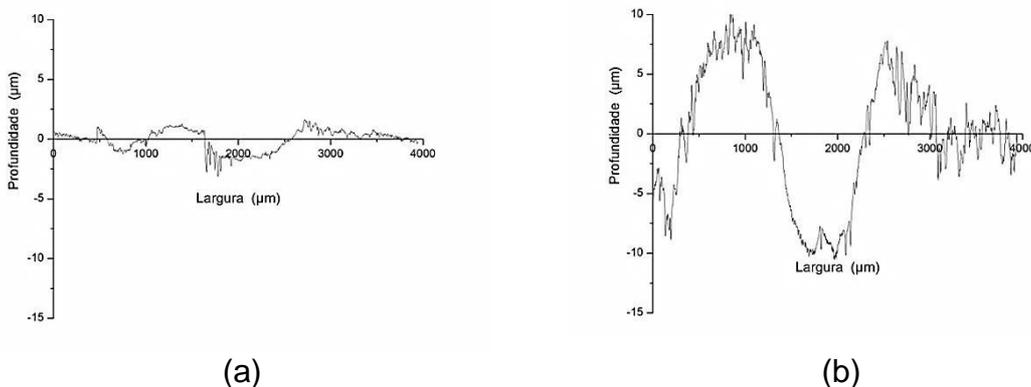


Figura 3: Perfil da trilha de desgaste após 1968 m percorridos no ensaio pino-disco: (a) Amostra A2; (b) Amostra SP2.

A partir do volume desgastado foi possível aplicar a equação de Archard (1) e calcular a taxa de desgaste para cada uma das amostras. Na Tabela 4 é possível observar que os valores da taxa de desgaste foram consideravelmente menores nas amostras submetidas ao *shot peening*.

Estes resultados indicam que o tratamento de *shot peening* foi capaz de reduzir o desgaste das amostras atritadas a seco contra uma esfera de aço no ensaio pino-no-disco. Sánchez-Santana *et al.*(5) obtiveram um resultado similar em estudo comparando o desgaste em amostras de liga de alumínio 6061 com e sem tratamento de *laser peening*. Os autores atribuíram a diferença entre as taxas de desgaste obtidas nos dois grupos à presença das tensões residuais compressivas introduzidas no tratamento de *laser peening*.

Tabela 4: Taxa de desgaste dos ensaios tribológicos (k).

	Amostra	Taxa de desgaste (10 ⁻⁴ mm ³ /N.km)	Taxa de desgaste média (10 ⁻⁴ mm ³ /N.km)
Sem tratamento de <i>shot peening</i>	A1	6,93	8,95 ±2,1
	A2	7,41	
	A3	10,50	
	A4	10,97	
Com tratamento de <i>shot peening</i>	SP1	3,91	4,82 ±1,1
	SP2	4,27	
	SP3	4,79	
	SP4	6,31	

Para confirmar a significância estatística dos dados de volume de desgaste, foi empregado um teste t (t-Student) com um nível de confiança de 95 %. Como o t calculado é maior que o t crítico, este teste confirmou a existência de diferenças significativas entre as taxas de desgaste dos dois grupos (Tabela 5).

Os resultados da Tabela 5 estão coerentes com os obtidos por Llana e Belzunce (2), que usaram o mesmo tratamento e afirmam que esta variação é sempre inferior a 10 %. Assim, foi possível associar a redução das taxas de desgastes as tensões residuais em cada uma das amostras.

Tabela 5: Cálculo do t-Student para volume de desgaste.

Grupos	Média	Variância	t	t _c bi-caudal
Sem <i>shot peening</i>	8,95	4,31	3,55	2,78
Com <i>shot peening</i>	4,82	1,12		

A evolução das tensões residuais ao longo dos ensaios pode ser observada nas Figuras 4 e 5.

Cabe ressaltar que existe grande diferença entre os valores de tensões residuais entre os grupos de amostras, jateadas e não jateadas. Porém, ao longo dos ensaios tribológicos, os valores de tensões residuais convergiram, de forma que as tensões residuais analisadas nas amostras jateadas se aproximaram das tensões encontradas nas amostras não jateadas, como mostrado nas Figuras 4 e 5. A convergência nos valores das tensões é mais perceptível na direção tangencial, a direção de deslizamento do ensaio pino-no-disco. Mesmo assim, todas as amostras jateadas permaneceram com tensões residuais tangenciais mais compressivas do que as amostras não jateadas. Esta variação das tensões residuais ao longo dos ensaios tribológicos indica que as tensões residuais induzidas pelo atrito entre o pino e o disco não foram capazes de sobrepor às tensões residuais pré-existentes.

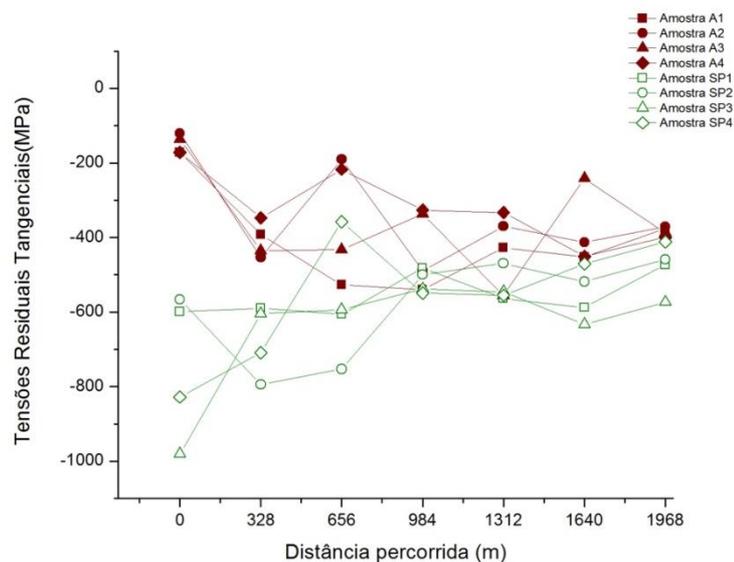


Figura 4: Tensões residuais tangenciais ao longo do ensaio pino-no-disco

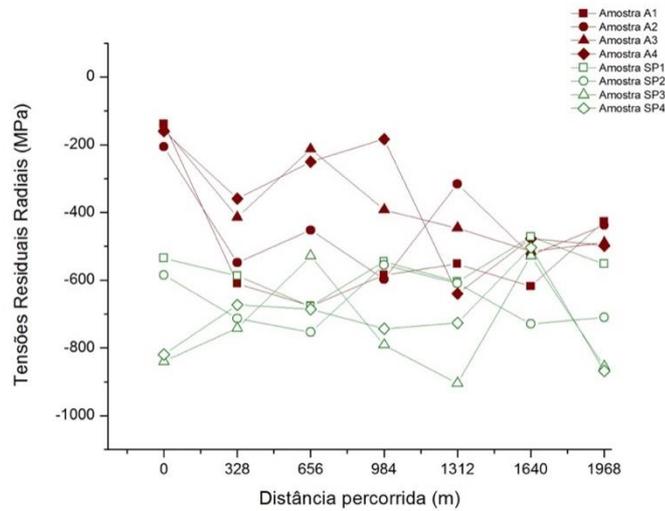


Figura 5: Tensões residuais radiais ao longo do ensaio pino-no-disco.

A caracterização qualitativa das trilhas de desgaste realizada após a última etapa de ensaios, por microscopias óptica e eletrônica de varredura, está apresentada nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

Observando a Figura 6 pode-se perceber que nas amostras sem *shot peening* existem sulcos mais profundos, características de mecanismo de desgaste abrasivo, alguns resquícios de filme aderido e regiões que sofreram delaminação, semelhante ao resultado obtido por Lorenzo-Martin e Ajayi (3). Nas amostras com *shot peening* há uma grande quantidade de filme aderido nas bordas da trilha, o que caracteriza o mecanismo adesivo de desgaste, como observado por Totik *et al.*(6).

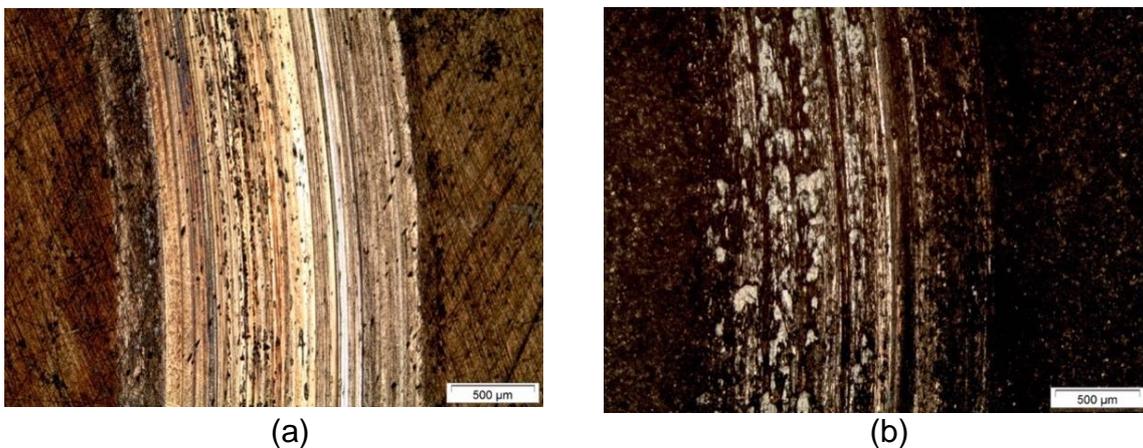


Figura 6: Trilha de desgaste após 1968 m percorridos no ensaio pino-no-disco:

(a) Amostra A2; (b) Amostra SP2.

A Figura 7 apresenta as imagens de MEV das trilhas de desgaste das amostras A3 e SP4. A amostra A3 apresenta trincas de delaminação, enquanto na amostra SP4 é possível observar sulcos menos profundos e maior quantidade de filme aderido.

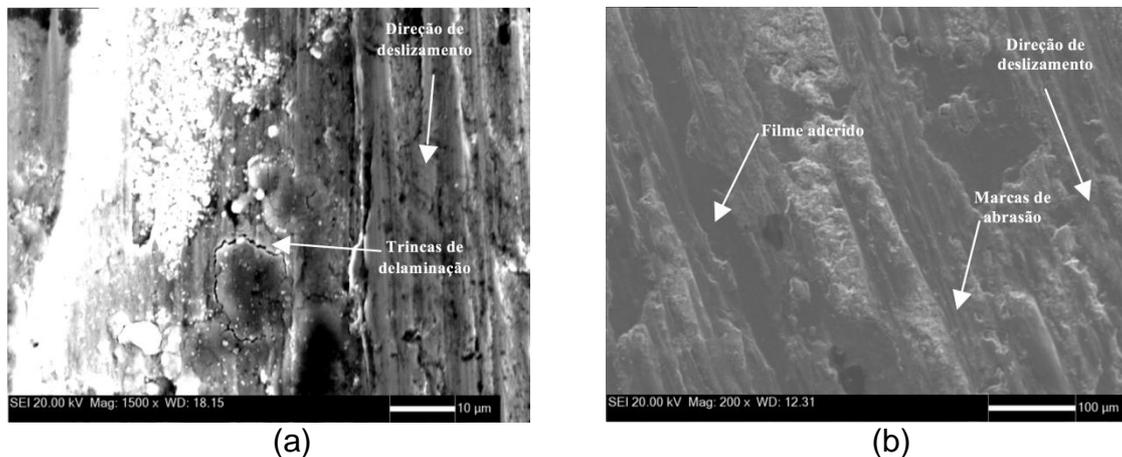


Figura 7: Trilha de desgaste após 1968 m percorridos no ensaio pino-no-disco:

(a) Amostra A3; (b) Amostra SP4.

CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve como objetivo estudar a influência das tensões residuais no desgaste realizado em ensaios a seco pino-sobre-disco em amostras de aço AISI 4340 contra esferas de aço AISI 52100, em duas condições, permite as seguintes conclusões:

1. O tratamento mecânico de *shot peening* reduziu a intensidade do mecanismo de desgaste abrasivo, reduzindo a profundidade dos sulcos de abrasão, e propiciou a formação de camadas de filme aderido, principalmente nas bordas da trilha.
2. As tensões residuais presentes devido ao tratamento de *shot peening* reduziram a taxa de desgaste, na média de $8,95 \times 10^{-4}$ para $4,82 \times 10^{-4}$ $\text{mm}^3/\text{N.km}$.
3. Apesar da influência nas taxas de desgaste, a evolução das tensões residuais ao longo do ensaio de desgaste indica que quanto maior a distância percorrida no ensaio pino-no-disco menor a influência das tensões residuais na taxa de desgaste. Assim, as tensões residuais

prévias foram sendo modificadas pelas tensões residuais induzidas pelo desgaste.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES, à Faperj e ao IFFluminense pelo apoio financeiro que permitiu a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

(1) ARCHARD, J. F., “Single Contacts and Multiple Encounters”, *Journal of Applied Physics* 32, pp. 1420, 1961.

(2) LLANEZA, V.; BELZUNCE F. J., “Study of the effects produced by shot peening on the surface of quenched and tempered steels: roughness, residual stresses and work hardening”, *Applied Surface Science* 356, pp. 475–485, 2015.

(3) LORENZO-MARTIN, C.; AJAYI, O. O., “Rapid surface hardening and enhanced tribological performance of 4140 steel by friction stir processing”, *Wear* 332-333, pp. 962–970, 2015.

(4) NARAYANASWAMY, B.; HODGSON, P.; BELADI, H., “Comparisons of the two-body abrasive wear behaviour of four diferente ferrous microstructures with similar hardness levels”, *Wear* 350-351, pp.155–165, 2016.

(5) SANCHEZ-SANTANA, U.; RUBIO-GONZ´ALEZ, C.; GOMEZ-ROSAS, G.; OCAÑA, J. L.; MOLPECERES, C.; PORRO, J.; MORALES, M., “Wear and friction of 6061-T6 aluminum alloy treated by laser shock processing”, *Wear* 260, pp. 847–854, 2006.

(6) TOTIK Y.; SADELER R.; ALTUN H.; GAVGALI M., “The effects of induction hardening on wear properties of AISI 4140 steel in dry sliding conditions”, *Materials and Design* 24, pp. 25–30, 2002.

(7) YAKIMETS, I.; RICHARD, C.; BÉRANGER, G.; PEYRE, P., "Laser peening processing effect on mechanical and tribological properties of rolling steel 100Cr6", *Wear* 256, pp.311–320, 2004.

(8) TANG, L.; GAO, C.; HUANG, J.; ZHANG, H.; CHANG, W., "Dry sliding friction and wear behaviour of hardened AISI D2 tool steel with different hardness levels", *Tribology International* 66, pp. 165–173, 2013.

EVALUATION OF RESIDUAL STRESS INDUCED BY WEAR IN AISI 4340 STEEL

ABSTRACT

Mechanical components and structures wear out as a result of friction between surfaces in relative motion. The objective of this work is to evaluate the residual stress induced during a pin-on-disk wear test against a counter-body of steel AISI E 52100 with 6.0 mm diameter. The disk specimens were quenched and tempered AISI 4340 with different mechanical treatment; shot-peened and not shot peened. The pin-on-disk tests were made in six steps and the residual stress were evaluated after each one by X-ray diffraction with $\sin^2\psi$ method. Wear track profile was obtained using contact profilometry. The wear rate of the shot peened samples was considerably lower than the wear rate of the other conditions. It was also possible to notice that compressive residual stresses induced by shot peening treatment contributed to this effect even though they were modified by the residual stress induced during the pin-on-disk test.

Keywords: *Residual stress, X-ray diffraction, AISI 4340 steel, Wear, Pin-on-disk test.*