



EVOLUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM DISCOS DESGASTADOS POR ROLAMENTO CÍCLICO NÃO LUBRIFICADO

João Telésforo Nóbrega de Medeiros

Aluno de Doutorado do LFS-PME-EPUSP - São Paulo, Brasil

Prof. Adjunto - Dep. Eng. Mecânica - UFRN-Natal - Rio Grande do Norte, Brasil – jtelesforo@yahoo.com

Luis Gallego Martinez

Pesquisador MSc. do Inst. de Pesquisas Energéticas e Nucleares – São Paulo, Brasil - lgallego@net.ipen.br

Roberto Martins de Souza

Prof. Dr. do LFS-PME-EPUSP - São Paulo, Brasil - rsouza_csm@hotmail.com

Deniol Katsuki Tanaka

Prof. Associado Dr. do LFS-PME-EPUSP - São Paulo, Brasil - dktanaka@usp.br

ABSTRACT. *Currently, many studies have been conducted towards the development of self-lubricated contact surfaces, in order to avoid the contamination of products and processes by fluid lubricants. In this work, a PLINT disc-on-disc testing machine was used to investigate the evolution of the residual stress fields during the contact of two discs rolling by friction and without lubrication. The rolling tests were conducted at a velocity of $40,0 \pm 0,5$ m/s, with loadings in the range between 1.1 and 8.4 kN. A vibration trip sensor was previously calibrated to command the stop of machine in each test step according to the dominant wear mechanism. The residual stresses were measured in a RIGAKU diffractometer, using a Stress attachment, by X-Rays Diffraction (XRD) method and the $\sin^2\psi$ technique. The main wear mechanisms were the moderate rolling wear, characterized by a thin oxide layer in the contact track, and the rolling contact fatigue wear, with subsurface microcracks, parallel or inclined with respect to surface, and/or microcracks and/or plastic deformations oriented along angles in the range between 15° and 165° with respect to the contact surface. Wear debris, surface and subsurface zones of rolling contact races were investigated by Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-rays Electron Dispersion Spectroscopy (EDS) micro-analysis.*

Keywords: Wear; Rolling; Residual stress; Mechanical damage; Contact Fatigue.

1. INTRODUÇÃO

Mura [1982] define tensões residuais como sendo “as tensões internas de auto-equilíbrio atuantes em um corpo livre sem a presença de forças externas ou fronteiras de confinamento ou restritoras”. O estudo experimental de tensões residuais, mesmo para materiais convencionais, inclui “mecanismos discutíveis e ainda não completamente compreendidos” (Cullity, 1967). Esse autor descreveu o uso do método de difração de raios-X (XRD) para análise de estados de tensão residual através da Lei de Bragg. Correlacionou, assim, as variações fracionais na distância interplanar, $\Delta d/d$, com as flutuações na largura e posição da linha de difração de Debye.

Cullity [1967], Noyan e Cohen [1987] e Perry e colaboradores [1996] classificam as tensões residuais em *macrotensões*, intrinsecamente homogêneas, como algumas resultantes do contato em movimento de rolamento, e *microtensões*, localmente homogêneas - a nível máximo de tamanho de grãos - com ordem de grandeza de micrometros, como aquelas advindas de discordâncias, ou ainda de microdeformações plásticas, como as resultantes de processos de fabricação por usinagem.

Segundo Scholtes e Scholtes [2000], superfícies após se submeterem às elevadas pressões de contato de processos de fabricação por usinagem, caracterizam-se por deformações plásticas localizadas, com topografias peculiares associadas, distribuições de tensões residuais, encruamento e, possivelmente, mudanças de fase, microtrincas e estados próprios de textura.

No trabalho de Perry e colaboradores [1996] descreve-se a técnica de $\text{sen}^2\psi$ na difração por raios-X e discute-se a variação da profundidade do feixe incidente com a variação do ângulo ψ , afetado pelos gradientes de tensão residual na direção radial das subsuperfícies.

Tensões residuais desenvolvidas em elementos estruturais submetidos a contato de rolamento podem ter a mesma ordem de grandeza que as solicitações externas. Johnson [1989: 295], Finstermann e colaboradores [1998] e Voskamp [2000] apresentaram resultados nesse sentido, estudando rolos de duralumínio, pares roda-trilho ferroviário e rolamentos de aço, respectivamente.

O objetivo desta investigação é determinar os efeitos do contato cíclico não lubrificado de rolamento sob compressão, entre pares de discos aço-aço e cobre-aço, sobre o estado de tensões residuais nas pistas de rolamento. Este trabalho se propõe também a medir e comparar tensões residuais nas pistas de rolamento dos discos ainda íntegros e após seccionamentos pré-estabelecidos. Pretende-se, com isso, compreender melhor o processo de extração de corpos-de-prova em corpos rolantes de grandes dimensões e sua representatividade concernente à medida de tensões residuais. Embora fundamentados na teoria da elasticidade e em resultados computacionais de simulação numérica, a especificação das dimensões e geometria desses corpos-de-prova sempre suscita dúvidas, dadas as limitações ou fenômenos locais impostos pelos materiais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para investigar a evolução do estado de tensões no centro da pista de contato, ensaiaram-se pares de discos sólidos rolando por atrito, sem lubrificação, em uma máquina Plint de ensaio disco-disco, modelo TE73HSHT.

Os materiais dos discos eram cobre eletrolítico UNS C11000 (99,9 %) retificados a partir de estado recozido, dureza $70,2 \pm 1,5$ HB (62,5 kgf, ϕ 2,5 mm) e aço AISI 52100 (dureza $66,0 \pm 1,1$ HRC), com têmpera e revenimento descritos por Medeiros *et alii* [2000]. Os discos, na superfície de contato, foram retificados com rebolo de perfil, de modo a ter uma pista de rolamento com uma forma esférica. Obtiveram-se rugosidades $R_a = 0,2$ e $0,4 \mu\text{m}$, nas direções de rotação (circunferencial) e perpendicular à direção de rotação (axial), respectivamente.

Um par de discos motor e movido em operação é apresentado na Fig. 1. Cada disco era fixado por um conjugado de aperto de 68 N.m (50 lbf.ft) na extremidade de um eixo-árvore suportado por dois mancais de rolamento, um de rolos e um de esferas. A distância entre centros dos discos variou de 148,95 a 151,00 milímetros, conforme os pares de diâmetros dos discos: Cobre-aço: [160,02-139,93 mm, relação de transmissão $i=1:1,144$]; [160,02-141,64 mm, $i=1:1,130$]; Aço-aço: (150,00-150,00 mm, $i=1:1,000$) e (150,02-151,98 mm, $i=1:1,013$).

Os ensaios foram efetuados à velocidade de $40,0 \pm 0,5$ m/s, com cargas normais entre 1,1 e 2,8 kN, para os pares de disco cobre-aço e 5,0 e 8,4 kN para os pares de disco aço-aço.

Os discos possuíam 8,2 mm de espessura na região de contato. As pressões máximas de Hertz, calculadas conforme descrito por Johnson [1987] para as condições geométricas de início dos ensaios (esfera-esfera), ficaram compreendidas entre 1,08 e 1,48 GPa, (discos cobre-aço) e 2,08 a 2,49 GPa (discos aço-aço).

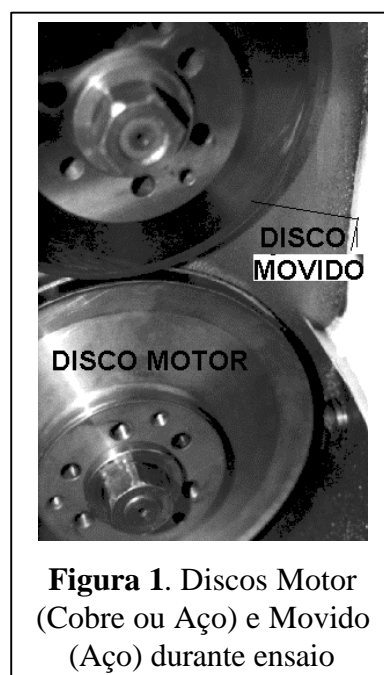


Figura 1. Discos Motor (Cobre ou Aço) e Movido (Aço) durante ensaio

As paradas foram programadas para níveis de sensibilidade associados a mecanismos dominantes de desgaste e a níveis de ruído emitidos devido à degradação do contato de rolamento (Medeiros *et alii* [2001]). Tais mecanismos foram: i) o *desgaste moderado*, associado à formação de uma fina camada de óxidos na trilha de contato; ii) o *desgaste severo*, em que houve deformação plástica com delaminação e conseqüente alteração do contato cobre-aço de esfera-esfera para cilindro-cilindro, e iii) o *desgaste por fadiga de contato*, com microtrincas subsuperficiais, paralelas à superfície, e microtrincas e/ou deformações plásticas formando ângulos compreendidos entre 15° e 165° com a superfície de contato.

Examinaram-se, adicionalmente, partículas oriundas do desgaste, zonas superficiais e subsuperficiais das pistas de contato através de microscopia eletrônica de varredura (SEM) e microanálise por espectroscopia de raios-X (EDX).

As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X (XRD) através da técnica de $\sin^2\psi$ versus 2θ , para valores positivos e negativos de ψ ($0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ$), em difratômetro Rigaku D-Max2000, com módulo “Stress”. Utilizou-se uma geometria de feixe paralela, detetor de cintilação, radiação Cr-K α ($\lambda = 0,2291000$ nm), sem monocromador, com tensão elétrica de 40 KV e corrente de 20 mA. O sistema referencial de medida de tensão residual (S_R), dado na Fig. 2, estabelece valores positivos de ψ para o sentido horário (S.H.) de giro dos discos, observados de frente, como na Fig. 1, ou anti-horário, S.A.H., observados pela parte traseira [Fig.5(a)]. Assim, as medidas de S_R relativa a valores negativos de ψ concernem a varreduras efetuadas no sentido oposto ao de ψ positivo. A direção normal à pista de rolamento equivale a $\psi = 0^\circ$.

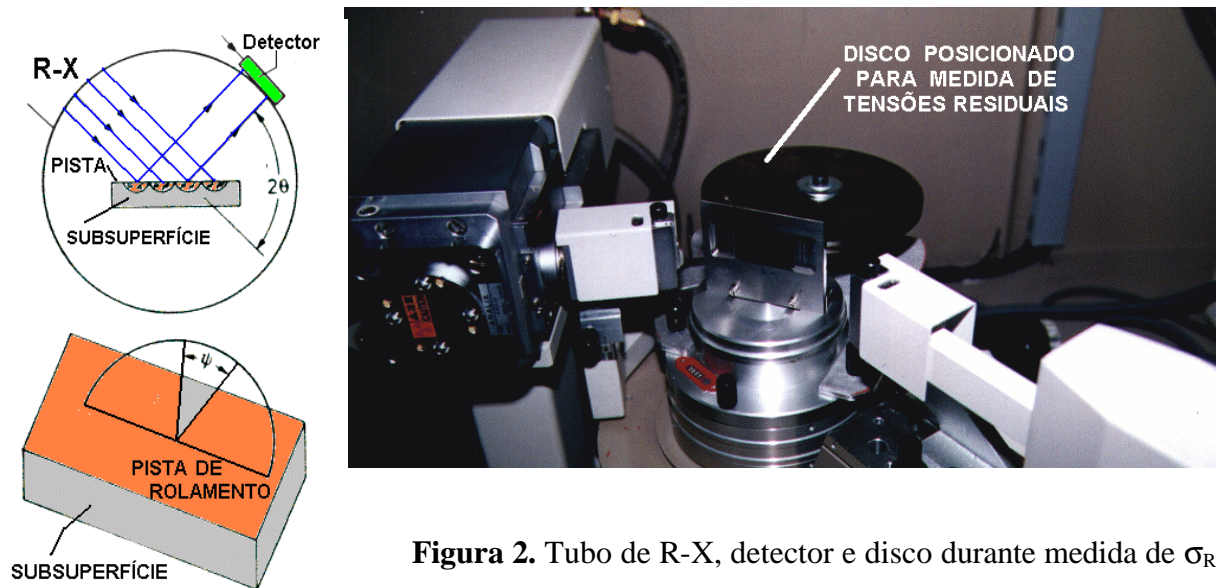


Figura 2. Tubo de R-X, detector e disco durante medida de σ_R

Os valores medidos de tensão residual para o aço dizem respeito à reflexão da martensita $\{hkl\} = \{211\}$, com picos em torno de $2\theta = 154,250^\circ$. Para o cobre, analisaram-se os planos $\{hkl\} = \{220\}$, com picos em torno de $2\theta = 127,209^\circ$. Foram feitas varreduras, com passo de $0,1^\circ$, em um tempo que assegurasse um mínimo de 10.000 contagens, para o aço, na faixa de $148,0^\circ \leq 2\theta \leq 157,7^\circ$ e, para o cobre, na faixa de $124,5^\circ \leq 2\theta \leq 130,5^\circ$.

Na determinação da tensão residual, empregaram-se módulos de Young $E_{aço211} = 215,75$ GPa e $E_{Cobre220} = 130$ GPa e coeficientes de Poisson $\nu_{aço211} = 0,300$ e $\nu_{Cobre220} = 0,364$.

As medidas foram realizadas na zona central das superfícies de contato, em uma janela de 2×2 mm². De acordo com a teoria de Hertz, uma área dessa magnitude submetida à pressão de contato entre superfícies não-conformes, como duas esferas, desenvolve gradientes de tensão nas direções axial e radial das pistas.

A Fig. 3 apresenta a seqüência de discos e respectivos seccionamentos para as quais foram determinadas tensões residuais. As geometrias utilizadas foram : i) **disco íntegro** (Fig. 3a); ii) **anel**

com perímetro 360° (Fig. 3b), eletroerodido a partir do disco (a); iii) **anel com perímetro 330°** ou **anel “C”** e iv) **anel com perímetro 30°** ou **anel AB**, após o seccionamento do anel (c) nos *locii* A e B (Fig. 3c). A seção transversal do disco é mostrada na Fig. 3(d), um disco de aço entalhado em 3(e) e 3(f) mostra o seccionamento de um disco de aço em quatro calotas esféricas truncadas, definindo-se os pontos de medida dos estados de tensão residual **1A, 1B, 2, 3, 4**, a $-2^\circ, +2^\circ, 180^\circ, 90^\circ, 270^\circ$, respectivamente, de modo a mapeá-los circunferencialmente.

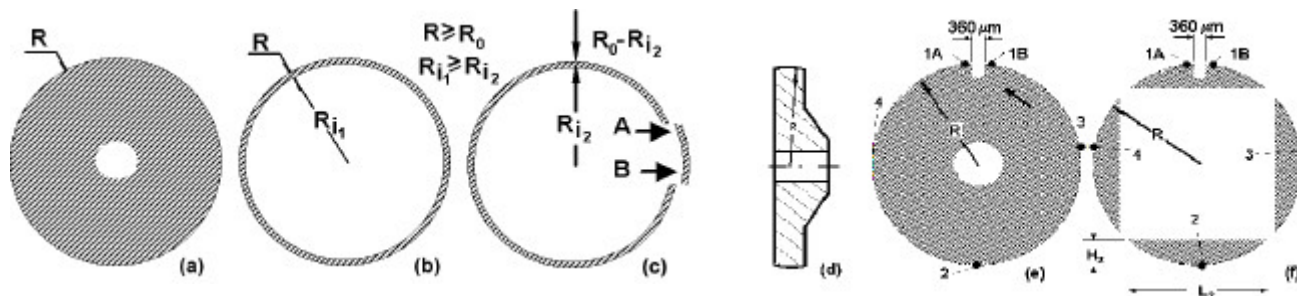


Figura 3. (a) Disco de ensaio íntegro; (b) Anel, extraído por eletroerosão, do disco (a); (c) Corte do anel (b), resultando em Anel C (perímetro = 330°) e Anel AB (perímetro = 30°); (d) Seção transversal dos discos ensaiados, com superfície esférica de contato; (e) disco de aço com entalhe; (f) após ensaio, esquema de seccionamento de quatro calotas esféricas truncadas, extraídas por eletroerosão do disco (e).

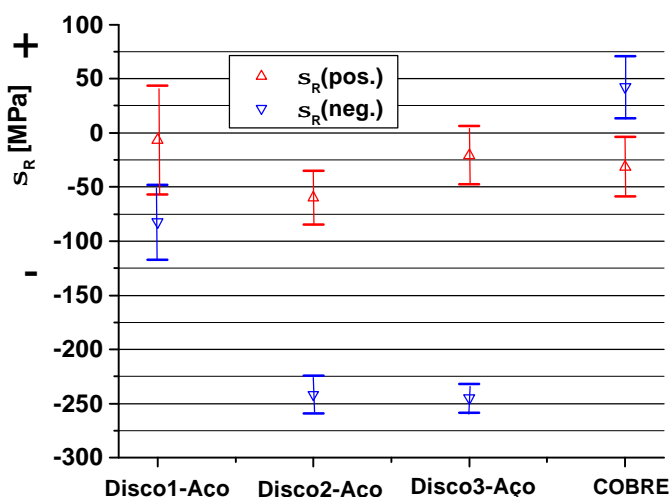
Observe-se que as zonas de medida 1A e 1B estavam separadas pelo entalhe mostrado nas Fig. 3(a) e 3(b). As configurações selecionadas para o seccionamento caracterizavam-se por diferentes valores de rigidez, as quais teoricamente afetam as macrotensões residuais.

3. RESULTADOS OBTIDOS

3.1. Estados de tensão residual para pistas novas de cobre e aço

Os valores medidos de tensão residual (σ_R) na condição “disco novo”, após retificação das pistas dos discos de cobre e aço acham-se na Fig. 4. Na varredura sob ψ negativos, estados de σ_R eminentemente de tração foram medidos nos discos de cobre e de compressão nos discos de aço.

Figura 4. Estado de tensões residuais ($\pm \psi$) em pistas de discos novos de cobre e aço



3.2. Resposta de σ_R nas pistas após contato de rolamento cobre-aço

A Fig. 5(a) apresenta deformações observadas nas partes frontal e posterior dos discos de cobre ensaiados, numa coroa circular subsuperficial à pista de rolamento. Percebem-se deformações com

diferentes inclinações em relação à direção radial, onde atua a carga normal. Essas inclinações estão orientadas nos sentidos horário, S.H. [F], anti-horário, S.A.H. [D] e misto [E]. Neste último caso, há superposição de deformações inclinadas em ambos os sentidos. A Fig. 5(b) mostra o aspecto macroscópico das pistas de um dos pares de discos de aço (A) e cobre (B) ao final dos respectivos ensaios. A Fig. 6 apresenta os valores medidos de σ_R na pista de rolamento, de acordo com as zonas D, E e F mostradas na Fig. 5(a).

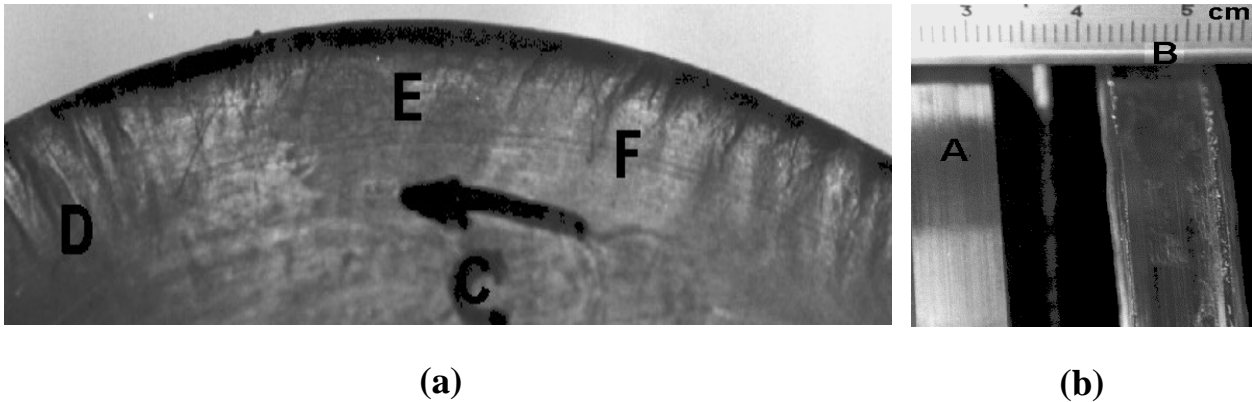
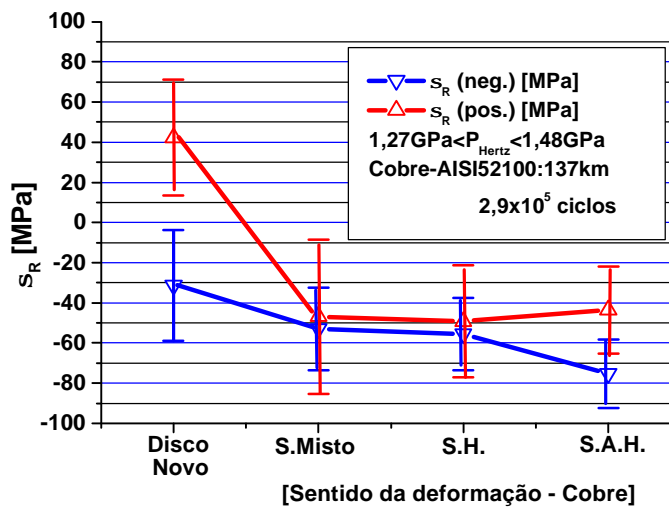


Figura 5. (a) Parte posterior do disco de cobre evidenciando deformações abaixo da zona de contato nos sentidos anti-horário (S.A.H.), formando proa a montante do contato (D); horário S.H., formando proa a jusante do contato (F) e no sentido misto (E); (b) zonas de contato - *pistas* - dos discos de aço (A) e cobre (B). Seta (C) indica sentido de giro do disco.

Figura 6. Evolução do estado de tensões residuais ($\pm \psi$) em disco de cobre: formação de proa a montante do contato (S.A.H.), a jusante do contato (S.H.) e em sentido misto, como definido na Fig.5.

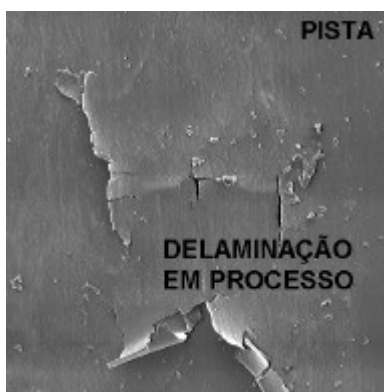
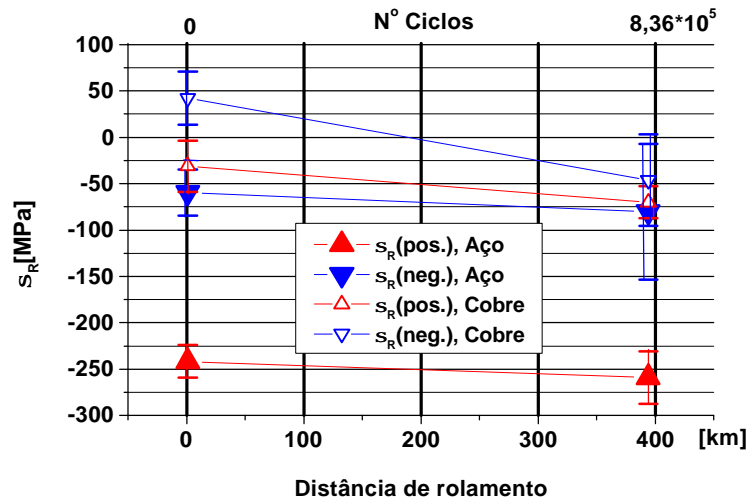


As zonas identificadas na Fig. 5(a) como “a montante do contato”, com deformações S.A.H, apresentam, aos $2,9 \times 10^5$ ciclos (137 km), estado de tensões residuais em que os gradientes de tensão, representados pela diferença entre σ_R (neg.) e σ_R (pos.) são mais acentuados (Fig.6) e, portanto, têm deformações mais severas que as “a jusante do contato”, S.H.. As deformações no sentido misto apresentam médias similares às do S.H. mas dispersões compatíveis às do S.A.H.

Os estados de tensões residuais de um par de discos cobre-aço, antes e após rolarem $8,36 \times 10^5$ ciclos (394 km), acham-se na Fig. 7. Os gradientes de tensão na zona de contato do disco de aço mostram-se mais acentuados após o contato de rolamento do que os gradientes observados no disco de cobre.

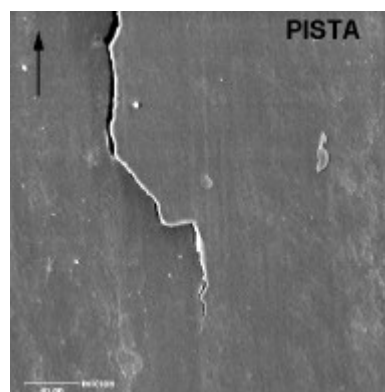
As Fig. 8 e 9 apresentam fotos obtidas por SEM (eletrons secundários, S.E.) com evidências dos mecanismos de desgaste no disco de cobre por *delaminação*, *fratura frágil*, *extrusão* e *malhas térmicas*. Mostra-se ainda o aspecto de cavacos desprendidos.

Figura 7. Evolução σ_R (ψ positivos e negativos) em discos cobre-aço submetidos a $1,27 \text{ GPa} \leq P_{\text{Hertz}} \leq 1,48 \text{ GPa}$ e distância de rolamento = 394 km, $8,36 \times 10^5$ ciclos



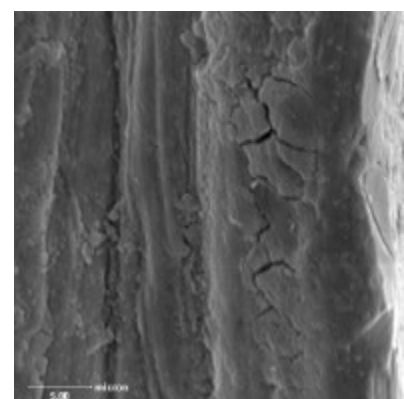
SEM (S.E.) 100 X
Mecanismo: delaminação

(a)



SEM (S.E.) 1530 X
Mecanismo: fratura frágil e delaminação em processo

(b)



SEM (S.E.) 3300 X
Malha de trinca térmica no fundo de um sulco na pista de cobre

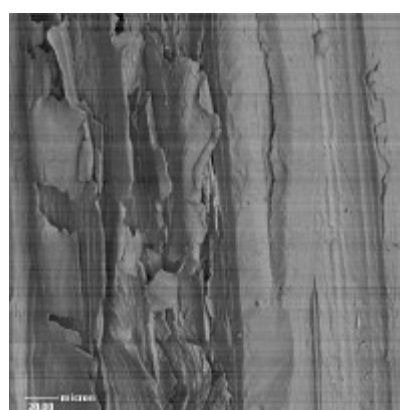
(c)

Figura 8. Morfologia de *superfícies ensaiadas* e fundo de sulcos na pista de cobre (disco motor), após rolar 137 km contra disco (movido) de aço. A seta indica o sentido de rotação da pista.



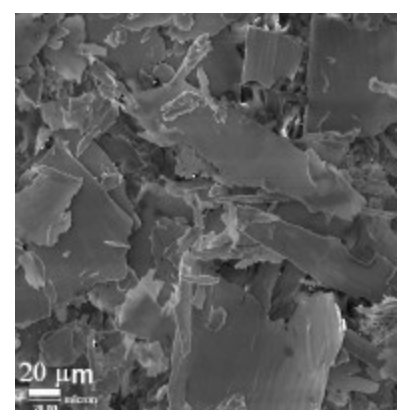
SEM (S.E.) 100 X
Borda esquerda da pista:
Delaminação

(a)



SEM (B.S.E.) 400 X
Borda direita da pista:
Extrusão

(b)



SEM (S.E.) 400 X
Microcavacos oriundos da pista de cobre

(c)

Figura 9. Morfologia das bordas de pista de cobre e microcavacos desprendidos durante ensaio

3.3. Resposta de σ_R nas pistas após contato de rolamento aço-aço

A pista do disco de aço, esboçada na Fig. 3(e), no quadrante de 0° a 90° após o entalhe, é mostrada na Fig. 10, apresentando mecanismo de desgaste por *abrasão a três corpos*, dominante na pista entalhada, movida, na faixa de tensões Hertzianas nominais entre 2,08 e 2,21 GPa. Esse par de discos, com diâmetros de 150,02 mm (movido) e 152,00 mm (motor), possuía relação de transmissão **1:1,01** e objetivava equalizar desvios de forma e posição, e desgaste, ao longo da vida em rolamento dessas pistas. Destaque-se o papel do carboneto de 50x160 μm^2 (aumentos de 100X e 600X) caracterizado por EDX, Fig. 10, que se desgarrou da borda do entalhe e, aos 4,03x10⁶ ciclos, era um dos terceiros corpos responsáveis pelo desgaste abrasivo circunferencial na pista entalhada.

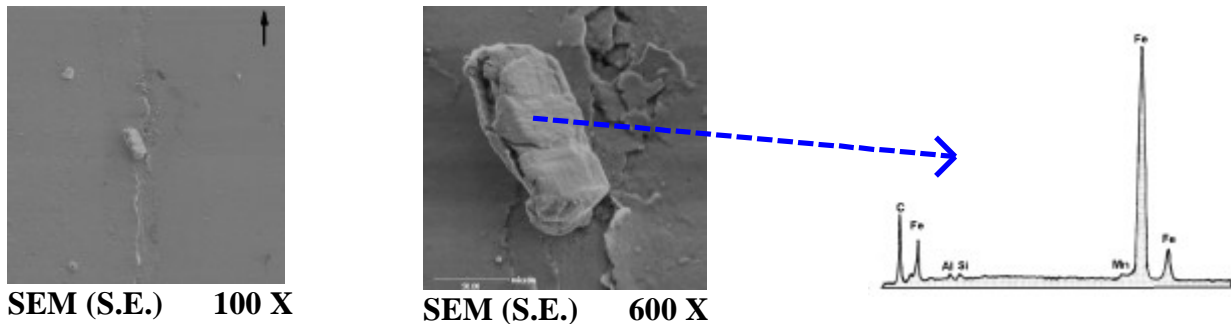


Figura 10. Desgaste abrasivo no *locus 3* da pista, definido na Fig. 3(a), provocado por carboneto.

A Fig. 11 mostra resultados de σ_R antes e após o seccionamento desse disco movido, de acordo com a Fig. 3(b). Na Fig. 12, acham-se os valores de σ_R para a pista nas configurações íntegra e seccionada em anéis, como apresentados na Fig. 3 (a), (b) e (c), relação de transmissão **1:1,00**.

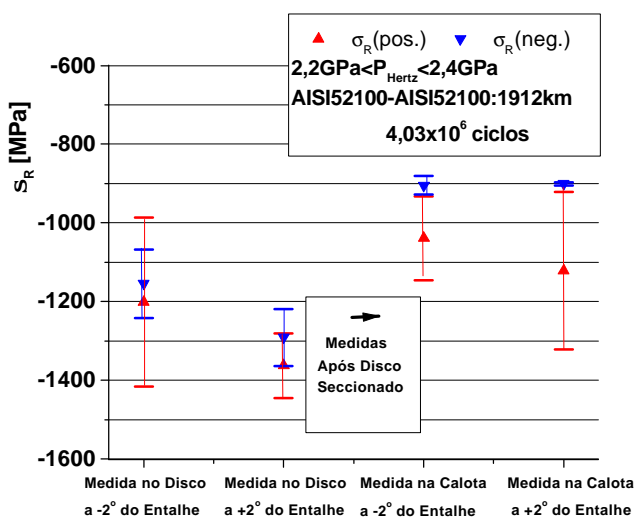


Figura 11 – σ_R da pista de disco entalhado, antes e após seccionamento

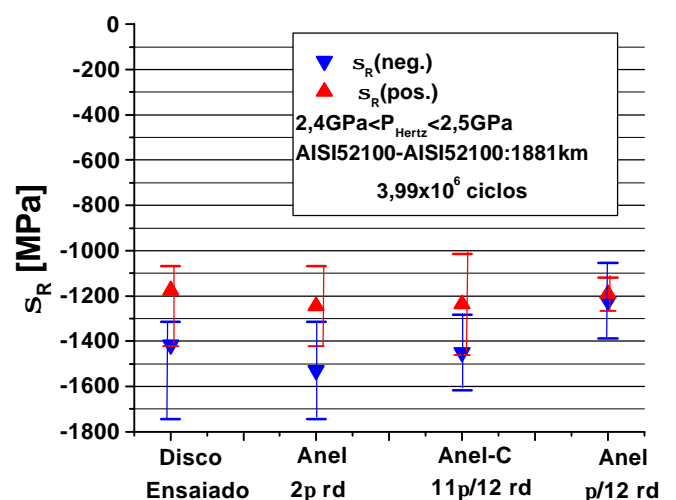


Figura 12 – σ_R da pista de disco ensaiado de aço e após seccionado, 1881 km, 3,99x10⁶ ciclos

4. DISCUSSÃO

Mediram-se os estados de tensão residuais em um disco de cobre e um de aço após retificação dos discos, condição designada por “disco novo”. O de cobre apresentou tensões residuais *médias* de tração de 5,48 MPa (σ_R médio para ψ positivos e negativos) e um desvio *médio* de $\pm 28,24$ MPa ($\pm 415,3$ %), ou seja, apresentou uma superfície de contato onde tensões de tração e compressão

coexistiam. O de aço apresentou tensões residuais *médias* compressivas de -132,89 MPa e um desvio *médio* de $\pm 21,16$ MPa ($\pm 15,9$ %).

Discos novos de aço e cobre apresentaram valores de σ_R (ψ negativos), em módulo, maiores que os valores de σ_R correspondentes a ψ positivos, denotando gradientes de tensão na direção radial do disco, conforme mecanismo descrito por Perry *et al.* [1996]. Tais gradientes foram detectados e medidos em anéis internos de mancais de rolamento de aço por Voskamp [2000].

Apesar das deformações provocadas nas pistas de rolamento do disco de cobre pelo rebolo abrasivo, os valores de pressões nominais de Hertz utilizados nos ensaios provocaram, ao final dos 394 km ($8,36 \times 10^5$ ciclos), S_R mais uniforme na zona de contato do disco de cobre (Fig. 7). Microcavacos lamelares com dimensões variando desde unidades até centenas de micrometros (Fig. 9(c), 8(a)) confirmam o mecanismo de delaminação descrito por Suh [1973].

Os deslocamentos cumulativos de material “*formando proa a montante do contato*” descritos por Johnson [1989] foram obtidos neste trabalho e relatados como zona “D”, Fig. 5[a] e “*formando proa a jusante do contato*” constituem a zona “F”, Fig. 5[a], sugerindo flutuação da pressão de contato devido a “*sticking*” e “*slip*” na área de contato. As distâncias de rolamento registradas para os ensaios cobre-aço e aço-aço, equivalentes à parada final controlada pelo sensor de vibração, ficaram defasadas em uma ordem de grandeza que, associadas aos estados de deformação apresentados no disco de cobre (Fig. 5) reforçam a hipótese da presença de *stick-slip* no contato cíclico de rolamento entre cobre e aço durante as presentes condições de ensaio, caracterizado por microzonas de adesão e deslizamento, como descrito por Halling [1983].

As modificações no estado de tensões residuais nas pistas dos discos do aço AISI52100, mesmo rolando contra disco de cobre recozido, testemunham microdeformações, ratificando Scholtes e Scholtes [2000]. Coexistiram simultaneamente, em discos de cobre, tensões de tração e de compressão, reveladas pela dispersão dos resultados.

As superfícies de contato de rolamento não-lubrificado aço-aço, nas configurações descritas neste trabalho, apresentaram estados de tensão residual cuja relação $P_{\text{Hertz}}/\sigma_R$ resultou em mediana = 2,0, média = 2,1 e desvio-padrão 0,38. A ausência de lubrificante intensificou os estados de tensão residual das pistas – e de seu desgaste, portanto - mais rapidamente que nos sólidos dos ensaios lubrificadas de Voskamp [2000] que, em pistas do anel interno de mancais de rolamento de aço AISI 52100, com oito esferas que giravam lubrificadas, obteve relações entre a máxima pressão de Hertz e tensão residual $P_{\text{Hertz}}/\sigma_R = 10$ (aos 10^7 ciclos), $P_{\text{Hertz}}/\sigma_R = 6$ (aos 4×10^8 ciclos) e $P_{\text{Hertz}}/\sigma_R = 4,2$ (aos 2×10^9 ciclos).

Dommarco e Kozaczek [1996], utilizando máquina de fadiga de contato em sistema lubrificado com cinco esferas e um eixo (com defeitos introduzidos por indentação Rockwell-C) de aço temperado e revenido AISI 52100 (58,5 RC), mediram $\sigma_R = -280$ a -380 MPa na superfície de pistas de rolamento novas ($R_a = 0,11$ μm) e $P_{\text{Hertz}}/\sigma_R = 10$ (100 ciclos) e $P_{\text{Hertz}}/\sigma_R = 4$ (10^7 ciclos).

Por outro lado, os resultados obtidos assemelham-se à relação $P_{\text{Hertz}}/\sigma_R$ de Hanus e Ericsson [1995], utilizando um compósito de matriz metálica constituído por liga de alumínio AA2014 reforçada por SiC. Esses autores constataram também que, na condição de tratada termicamente, as macrotensões mostraram-se desprezíveis. Isso leva à constatação de que o aço AISI 52100 descrito, sob contato cíclico seco, tem comportamento semelhante ao de compostos.

Hanus e Ericsson [1995], investigando o efeito da pressão Hertziana sobre o estado de tensões residuais em cilindros de liga de alumínio AA2014 reforçada por 15,5 % (em volume) de partículas ($9,3 \pm 1,0$ μm) de SiC, obtiveram $P_{\text{Hertz}}/\sigma_R = 2$ e estados de altas tensões compressivas na fase SiC e trativas na fase alumínio. Esses autores constataram também que, na condição do material tratado termicamente, as macrotensões mostraram-se desprezíveis.

Os estados de tensões residuais nas pistas de rolamento dos discos de aço usados neste trabalho, na condição inicial retificada, revelaram tensões desde $-44,49 \pm 43,16$ MPa até $-150,66 \pm 21,47$ MPa. Como os discos foram tratados termicamente e retificados em um mesmo lote, sob condições iguais ou semelhantes de pressão nominal de corte e velocidade de usinagem, atribuiu-se ao número de

passes e à pressão real de corte essa variação no estado de tensão residual. Sob a condição de recém-dressado para ajuste do raio de perfil, o rebolo impingia à pista de rolamento uma condição de σ_R diferente da condição imposta à pista após a usinagem de cinco discos anteriores.

Após 137 km ($2,91 \times 10^5$ ciclos) de rolamento cíclico, o estado de tensões residuais da pista de aço mostrou-se compressivo e com aspecto geral “como polido”, enquanto a zona de contato do disco-contracorpo de cobre, em estado compressivo, desgastou-se por delaminação, fratura frágil, extrusão e malhas térmicas. Essa resposta térmica do contato pode ter sido a responsável pelo aumento na dispersão de σ_R dos discos de aço que rolaram contra o cobre, como mostra a Fig. 7.

Constataram-se, nos ensaios aço-aço, as seguintes tendências:

- a) Os discos motores de aço que não apresentaram sinais de microabrasão como os discos movidos, registraram *dispersões* menores, ou eventualmente iguais, nos valores da tensão residual do que seus respectivos contracorpos movidos;
- b) No disco de aço entalhado, Fig. 3(b), o quadrante da pista imediatamente subsequente ao entalhe, com evidências de desgaste abrasivo e presença de terceiro corpo, caracterizou-se pela maior taxa de evolução cíclica da tensão residual;
- c) Por se caracterizarem como tendo maior rigidez na máquina de ensaio utilizada e haverem apresentado desgaste final menos severo do que os discos movidos, constata-se que a *média* e a *dispersão* dos valores das taxas de evolução da tensão residual (MPa/km) dos discos motores são menores, sugerindo uma sensibilização do *regime de desgaste* à rigidez do disco.

A influência das macrotensões foi verificada no presente trabalho através do seccionamento dos discos, como apresentado nas Fig. 2 e 3. Os valores expressos na Fig. 11 mostram que as *calotas truncadas* cujas medidas foram efetuadas a $\pm 2^\circ$ das bordas do entalhe, nas posições **1A** e **1B**, tiveram variação nos seus estados de σ_R para menor, em relação aos valores medidos para o disco íntegro de, respectivamente, 17,5 % e 23,8%, enquanto a dispersão da medida diminuiu em 1A (53,1%) e aumentou em 1B (82,3%). Esses valores ratificam a necessidade de correção dos dados de σ_R para amostras extraídas segundo essa configuração de sólidos maiores, como sugerido por Voskamp [2000]. Entretanto, em relação aos anéis de aço extraídos de um mesmo disco, Fig. 3, anel 360°, anel C (330°) e anel AB (30°), os valores *médios* de σ_R medidos e apresentados na Fig. 13 variaram +7,0 %, +3,6% e -6,5%, enquanto a dispersão variou -5,2%, -4,9% e -40,0%, respectivamente. Em relação às medidas de σ_R da calota esférica truncada, as variações não foram desprezíveis, possivelmente devido à janela de medida utilizada próxima ao entalhe. Já as medidas de σ_R pertinentes aos anéis de aço (com espessura mínima de duas vezes a zona Hertziana de contato) extraídos dos discos por eletroerosão, apresentaram variações desprezíveis face aos erros experimentais – contradizendo Voskamp [2000].

4. CONCLUSÕES

Nas condições descritas de contato cíclico de rolamento e para os materiais utilizados,

- 1) As tensões residuais atuantes em um material de comportamento dúctil e um frágil evoluem segundo mecanismos e taxas diferentes ;
- 2) A energia utilizada pelo material no desenvolvimento dos processos de deformação na zona de contato atenua o desenvolvimento das tensões residuais;
- 3) O parâmetro $P_{\text{Hertz}}/\sigma_R$ impõe mecanismos de desgaste diferentes a materiais de comportamento dúctil e frágil, sob número de ciclos diferentes;
- 4) As coroas circulares, ou anéis, de perímetro igual a 360°, 330° e 30°, extraídos de corpos rolantes esféricos de aço AISI 52100, não apresentaram diferenças significativas nos valores médios de tensão residual, ao contrário do que afirma Voskamp [2000], enquanto as calotas esféricas tiveram variações médias para menos nos estados de σ_R , da ordem de 1:5;
- 5) Constataram-se deslocamentos cumulativos de material nos discos de cobre que rolaram contra aço, sugerindo formação de proa a montante e a jusante do contato, com estado de σ_R mais severo a montante, em condições de *stick-slip* análogas às de Johnson [1989].

REFERÊNCIAS

- CULLITY, B.D. [1967] *Elements of X-Ray Diffraction*. Reading-Ma, Addison-Wesley. 514 p.
- DOMMARCO, R.C.; KOZACZEC, K.J. [1996] Residual Stresses and Retained Austenite Distribution and Evolution in SAE 52100 Steel under Rolling Contact Loading. *ASME PVP-Vol.322/NDE-Vol.15*, NDE Eng. Codes and Standards and Materials Characterization, p.63-70.
- FINSTERMANN, G.; FISCHER, F.D.; SHAN, G., SCHLEINZER, G. [1998] Residual stresses in rails due to roll straightening. *Steel Research*, **69**, p. 272-278.
- HALLING [1983] *Principles of Tribology*. London, The MacMillan Press. p. 193-8.
- HANUS, E. ERICSSON, T. [1995] Effect of pressure rolling on the residual stress state of a particulate-reinforced metal matrix composite. *Mat. Science and Engineering A*, **190**:155-163.
- HUTCHINGS, I.M. [1992] *Tribology*. Cambridge, Edward Arnold. 273 p.
- JOHNSON, K.L. [1989] *Contact Mechanics*. Cambridge, Cambridge University Press. 452 p.
- MEDEIROS, J.T.N.; SINATORA, A.; TANAKA, D.K. [2000] Mecanismos de fadiga de contato em discos de aço AISI 52100 (DIN100Cr6). In: *ABCM: Anais (CD-rom) do CONEM-2000, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Natal-Brasil, UFRN.
- MEDEIROS, J.T.N.; SINATORA, A.; TANAKA, D.K. [2000] Audible noise, contact temperature, life and microfracture of dry rolling surfaces using DIN100Cr6 Steel. In: *Port. Soc. of Materials -. Proc Ist. International Materials Symposium.*. Coimbra, Univ. Coimbra, paper MatLif10.
- MURA, T. [1982] *Micromechanics of Defects in Solids*. Netherlands, Martinus Nijhoff Publ. 494 p.
- NOYAN, I. C.; COHEN, J. B. [1987] *Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation*. New York, Springer-Verlag. 276 p.
- PERRY, A.J.; SUE, J.A.; MARTIN, P.J. [1996] Practical measurement of the residual stress in coatings. *Surface and Coating Technology*, **81**: 17-28.
- SCHOLTES, SCHOLTES [2000] Recent development in Mechanical Surface Optimization. *Materials Science Forum*, **347-349**: 382-398.
- SUH, N.P. [1973] The Delamination Theory of Wear. *Wear*, **25**: 111-124.
- VOSKAMP, A.P. [2000] Subsurface Residual Stress Concentrations during Rolling Contact Fatigue. *Materials Science Forum*, **347-349**: 346-351.

RESUMO. *Em aplicações de vanguarda, há uma tendência atual em se desenvolver superfícies de contato autolubrificadas, evitando-se a contaminação de processos ou produtos por lubrificantes fluídicos. Para investigar a evolução do estado de tensões residuais na zona de contato Hertziano, ensaiaram-se pares de discos sólidos rolando por atrito, sem lubrificação. Para isso, utilizou-se um equipamento PLINT de ensaios tribológicos disco-disco. Os ensaios foram feitos à velocidade de $40 \pm 0,5$ m/s, com cargas entre 1,1 e 8,4 kNewtons e o critério de parada de cada uma das duas etapas de cada ensaio foi através da utilização de um sensor de vibração previamente calibrado para comandar a parada de máquina mediante o mecanismo de desgaste dominante. As tensões residuais foram medidas através de difração de Raios-X (XRD) e da técnica de $\sin^2 \psi$ em difratômetro RIGAKU. Os mecanismos de desgaste proeminentes foram o desgaste moderado, constatando-se uma fina camada de óxidos na trilha de contato, e o desgaste por fadiga de contato, com microtrincas subsuperficiais, paralelas à superfície, e/ou microtrincas e/ou deformações plásticas formando ângulos compreendidos entre 15° e 165° com a superfície de contato. Examinaram-se, adicionalmente, partículas oriundas do desgaste, zonas superficiais e subsuperficiais das pistas de contato através de microscopia eletrônica de varredura (SEM) e microanálise por espectroscopia de difração de Raios-X (EDS).*