

## MECANISMOS DE FADIGA DE CONTATO EM DISCOS DE AÇO AISI 52100

**João Telésforo Nóbrega de Medeiros** - [jtelesforo@yahoo.com](mailto:jtelesforo@yahoo.com)

UFRN, Professor do Dep. Eng. Mecânica - Natal - Rio Grande do Norte, Brasil

EPUSP, Aluno de Doutorado do Lab. de Fenômenos de Superfície - São Paulo, Brasil

**Deniol Katsuki Tanaka** - [dktanaka@usp.br](mailto:dktanaka@usp.br)

**Amilton Sinatora** – [sinatora@usp.br](mailto:sinatora@usp.br)

Prof. Associado Doutor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica - Laboratório de Fenômenos de Superfície – São Paulo, Brasil

### ABSTRACT

The contribution of this paper is to discuss some of the damages and mechanisms that can promote the contact fatigue. Two distinct groups of damage are conceptualized, according with Tallian [1992]: *spalling* and *surface distress*. Experimental results obtained to a life range of  $1.53 \times 10^6$  and  $1.25 \times 10^7$  cycles (rolling distances between 721 and 5890 km), from disc-disc testings of heat treated AISI 52100 specimens (58 to 141 km/h, 2.23 to 2.81 GPa) are used to illustrate some of these mechanisms. The composition of steel specimens was 1.121%C, 0.268%Si, 0.384%Mn, 0.016%P, 0.014%S, 1.423%Cr, 0.035%Ni, 0.003%Cu, 0.005% Ti, 0.005%Mo, 0.005%N. It was identified the presence of inclusions such as undissolved carbides, sulfites and nitrides in the martensitic matrix. Are shown damaged surfaces and detached debris during a test and thermal crack patterns associated with the contact fatigue, analyzed by SEM and EDS.

*Key-words: Tribology - Contact fatigue - Mechanisms - Spalling - AISI 52100 Steel*

### 1. INTRODUÇÃO

Em 1998, a Comissão de Fadiga de Materiais da Sociedade Francesa de Metalurgia e Materiais ([sfmm@wanadoo.fr](mailto:sfmm@wanadoo.fr)) promoveu sua 17ª Jornada de Primavera, que naquele ano enfocou a Fadiga de Contato. No prólogo dos anais, A. BIGNONNET e P. MERRIEN justificam a crescente atenção dispensada ao tema pela constatação de que “40% das rupturas de sistemas mecânicos devidas à fadiga decorrem do contato entre duas superfícies”. Esse dado, convertido em custo, é elevado e tem desafiado pesquisadores em torno de vários aspectos do problema do contato entre superfícies sólidas que, segundo DANG VAN e MAITOURNAM [1998:1(1)], situam-se entre os mais importantes e difíceis de estudar.

O objetivo deste trabalho é apresentar mecanismos de falha atuantes na fadiga de contato de rolamento com pequenos deslizamentos (inferiores a 1,0 %) e alguns danos típicos.

### 2. CONCEITUAÇÃO E FENOMENOLOGIA DO CONTATO CÍCLICO

*Fadiga de contato* é o processo de gênese e propagação de danos superficiais e subsuperficiais nos materiais, induzido pelo sistema que os confina, sob solicitações e deformações cíclicas devidas ao contato de rolamento e/ou deslizamento entre superfícies.

Na solução obtida por Hertz, as tensões e as deformações na superfície e subsuperfície de contato, ambas compondo a *região hertziana*, são função da carga, geometria e propriedades elásticas dos dois corpos em contato. A essa visão, cresceu Way [1935] a importância da microestrutura dos materiais e fez escola entre os metalurgistas. Daí a observação de Pronikov [1981: 122-3], ao avaliar danos relativos a diversos tipos e concepções de contato:

*“em muitos casos, a influência dos fatores de projeto sobre a forma de uma superfície desgastada, mostra-se maior do que a influência da natureza do desgaste em materiais”.*

Gras e Inglebert [1998] também destacam a importância do conhecimento da geometria do contato (concepção, construção e funcionamento), carga, velocidade, materiais, estado das superfícies e lubrificantes, interagentes na vida à fadiga de contato das superfícies envolvidas.

A teoria hertziana, intrinsecamente elástica e estática, tem sido extrapolada ao regime plástico ou ao *contato cíclico* de rolamento ( GOLDSMITH [1960: 82-90] e JOHNSON [1989: 90-106] ). Algumas correções teóricas ou experimentais vêm sendo incorporadas à modelagem original de Hertz, como discutem Voskamp [1985] e Jiang e Sehitoglu [1996].

A predição de falha por fadiga de contato e a compreensão dos mecanismos nela interagentes têm desafiado pesquisadores ao longo do tempo. Weibull [1951, 1962] justifica esse tipo de dificuldade à ocorrência de tensões extremamente elevadas concentradas em pequenos volumes caracterizados por um conjunto de variáveis, aleatórias por natureza. Nesse sentido, considera a etapa experimental indispensável à complementação e evolução da base teórica já desenvolvida.

Littman e Widner [1966], apesar de reconhecerem que os seus *“mecanismos não são bem compreendidos”*, atribuem aos fatores abaixo a origem da maioria desse tipo de falha:

- a) Presença de inclusões (frequência e severidade de óxidos ou outras inclusões duras);
- b) Concentração geométrica de tensões (desalinhamentos e deflexões; possíveis efeitos da espessura do filme lubrificante);
- c) Origem em superfícies pontuais, PSO (lubrificante com baixa viscosidade, filmes finos EHL relativamente às asperezas das superfícies em contato, relação deslizamento / rolamento, magnitude da força tangencial);
- d) *Pitting* superficial (baixa pressão hidráulica do filme lubrificante, lubrificante com baixa viscosidade, filmes finos EHL relativamente às asperezas das superfícies em contato);
- e) Falha subsuperficial em componentes cementados ( núcleo com baixa dureza, pequena espessura da camada cementada em relação ao raio de curvatura dos corpos em contato).

### **3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Utilizou-se uma máquina de ensaio de fadiga de contato, do tipo disco contra disco, de procedência inglesa, marca PLINT, modelo TE73. A Tabela 1 apresenta os parâmetros adotados durante um conjunto de quatro ensaios, em que um disco motor, com perfil esférico, largura de 8,0 mm e diâmetro de 150,00 mm acionava, por atrito, um disco movido de igual diâmetro.

O máximo desvio de batida radial dos discos ensaiados e retificados com rebolo de perfil foi 12 µm. A rugosidade superficial pode ser avaliada através das fotos ( MEV ) da microestrutura. O deslizamento, inferido dos tacômetros, situou-se abaixo de 0,5%.

Utilizaram-se dois esquemas distintos de tratamento térmico para o aço AISI 52100 (Tabela 1), resultando em dureza compreendida entre 58 e 63 Rockwell C. Antes de cada ensaio, os discos eram desmagnetizados e limpos com acetona.

As figuras 1 e 2 apresentam as superfícies das pistas dos discos motores e movidos após ensaiadas. As Tabelas 1 e 2 associam essas figuras a cada disco e condições de ensaio.

**Tabela 1** - Variáveis medidas ou avaliadas nos ensaios disco-disco

Ensaio	Material Disco Motor	Material Disco Movido	Rotação (RPM)	Pressão Hertz (GPa)	Vida (milhões ciclos)
01	Aço AISI 52100 temperado em óleo (850°C) e revenido (170°C) <b>Fig. 1(a, b, c)</b>	Aço AISI 52100 temperado (850°C) em banho de sais (220°C) e revenido (170°C) <b>Figuras 1(d, e, f)</b>	2050 a 3000 rpm até 6,5 milhões de ciclos; 4100 rpm até o final	2,23 até 5,7m.ciclos; 2,58 a 2,81 até 7,0 milh..ciclos após, 2,23	11,82  Distância percorrida pelos discos: <b>5574 km</b>
02	Aço AISI 52100 temperado (850°C) em banho de sais (220°C) e revenido (170°C) <b>Fig. 1(g, h, i)</b>	Aço AISI 52100 temperado (850°C) em banho de sais (220°C) e revenido (170°C) <b>Fig. (1j, k, l)</b>	5000 rpm até 700 mil ciclos; Entre 2000 e 2500 até 1,2 milhões de ciclos; Entre 5000 e 2500 rpm até o final	2,23	12,45  Distância percorrida pelos discos: <b>5867 km</b>
03	Aço AISI 52100 temperado em óleo (850°C) e revenido (170°C) <b>Fig. 2(a, b, c)</b>	Aço AISI 52100 temperado em óleo (850°C) e revenido (170°C) <b>Fig. 2(d, e, f)</b>	5000 rpm até o final	2,23	12,5  Distância percorrida pelos discos: <b>5890 km</b>
04	Aço AISI 52100 temperado (850°C) em banho de sais (220°C) e revenido (170°C) <b>Fig. 2(g, h)</b>	Aço AISI 52100 temperado em óleo (850°C) e revenido (170°C) <b>Fig. 2 (j, k)</b>	5000 rpm até o final	2,23  <b>“Debris”: Figuras 2(i, l)</b>	1,53 [devido à poligonização do disco movido] Distância percorrida pelos discos: <b>721 km</b>

Variaram, durante os ensaios, a umidade relativa do ar (42 a 70%) , a temperatura ambiente ( 16 a 30 °C ) e a temperatura na circunvizinhança do contato ( em um diâmetro da ordem de 22 mm ), medida por pirômetro ótico, variou numa faixa de 63 a 134 °C.

O ensaio número 1 foi exploratório para o aço AISI 52100. Desejava-se observar o comportamento da máquina disco-disco, e seu nível de vibração em função da carga e velocidade dos discos, através de um captador de vibração que equipa o tribômetro e pára o ensaio sob valores limites de amplitude de vibração.

Registraram-se várias paradas no ensaio número 1 comandadas pelo captador, ao que se elevava o seu *threshold*. *Beynon et al.* [1996], em Sheffield, citam haver usado em máquina disco-disco um sensor de correntes parasitas para registrar a evolução de microtrincas.

O ruído médio aumentou progressivamente com o número de ciclos. O ensaio era encerrado a níveis intoleráveis de ruído continuado ( sinal flutuando entre 115 e 120 dB).

#### 4. ASPECTOS DAS SUPERFÍCIES APÓS ENSAIADAS

Cada pista de rolamento apresentada girava de baixo para cima da foto. As estrias regulares paralelas que aparecem em algumas fotos [ 1 (a, b, c, d, e, h) e 2 (d, g) ] advêm do processo de retificação das superfícies, em que se utilizou um rebolo de perfil com reentrância circular e raio de  $75 \pm 3$  mm, de modo a assegurar aos discos um perfil aproximadamente esférico.

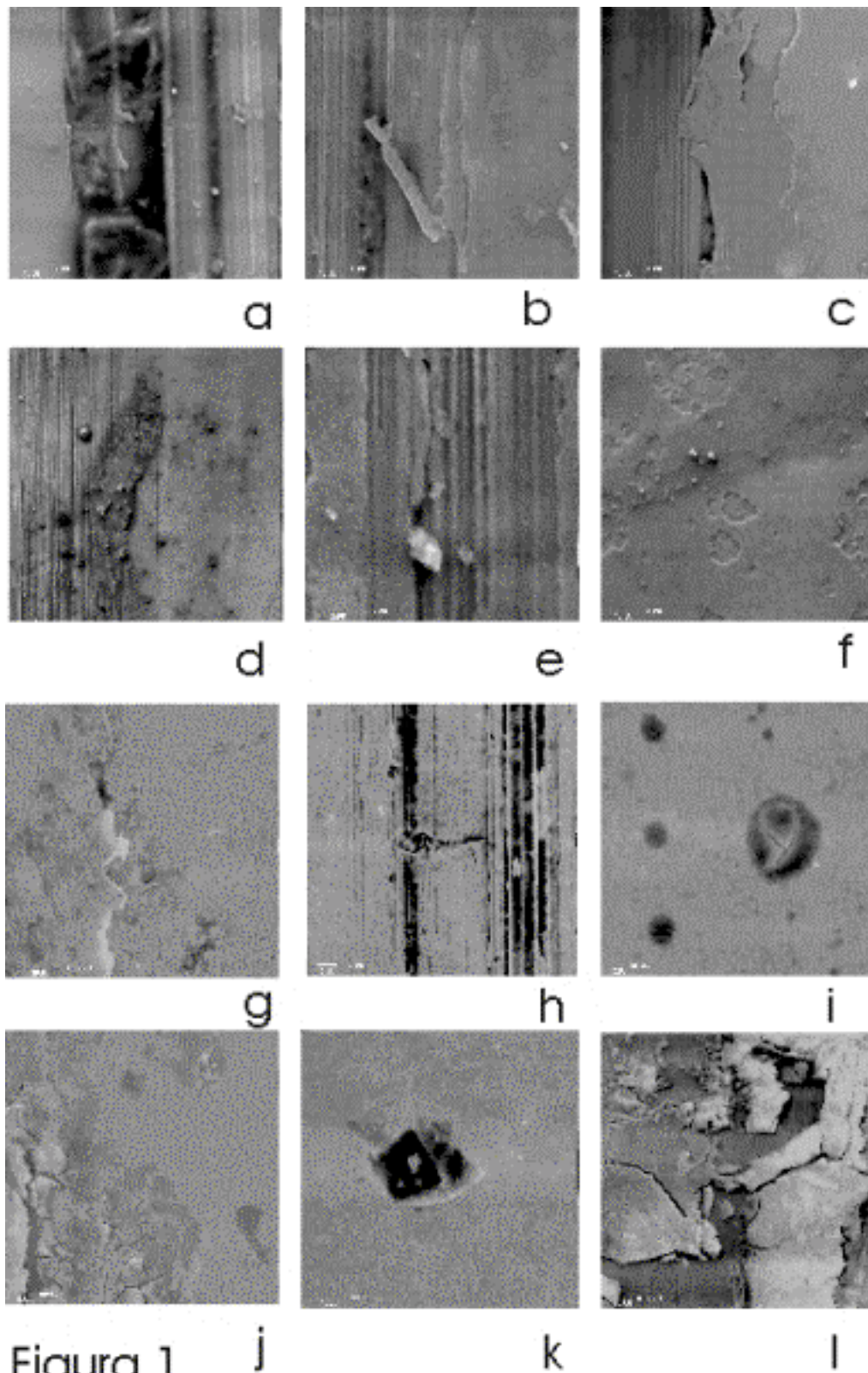


Figura 1 Os discos motores estão nas fotos 1 (a, b, c, g, h, i) e 2 (a, b, c, g, h); os contracorpos respectivos, os discos movidos, encontram-se nas fotos 1 (d, e, f, j, k, l) e 2 (d, e, f, j, k) e *debris* do ensaio número 4 mostram-se nas fotos 2 (i, l). A Tabela 2 descreve os tipos de falha e cita possíveis mecanismos atuantes.

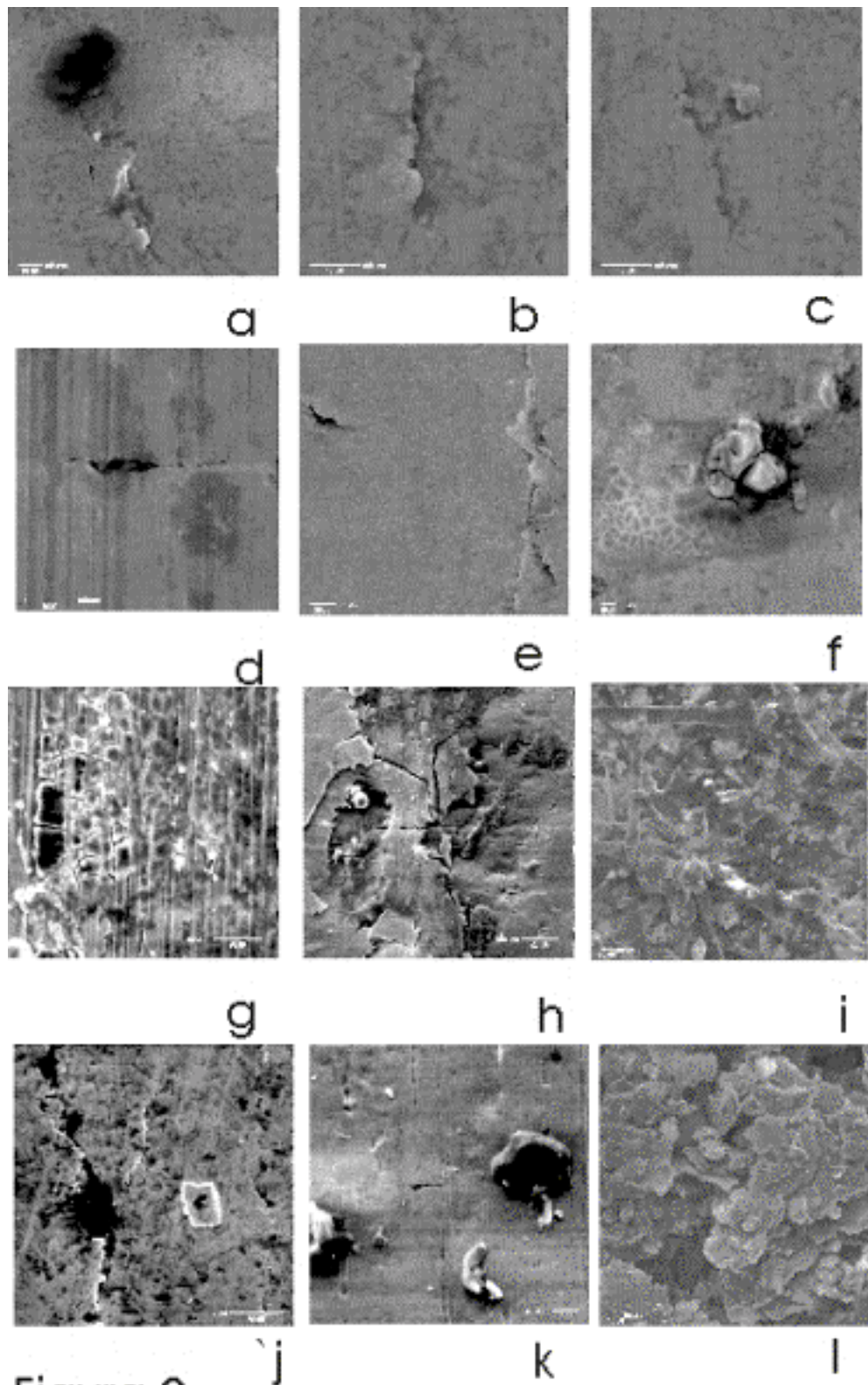


Figura 2

**Tabela 2** - Identificação de trincas e/ou danos nas superfícies ensaiadas

	<b>Figura 1</b>	<b>Figura 2</b>
<b>a</b>	A região escura e larga, central, cerca de 30 $\mu\text{m}$ de espessura, é a interface entre a pista, sob contato cíclico, e sua borda direita, onde não	Pista se deforma plasticamente de acordo com o Modo I e encrua, atinge o limite de resistência à fadiga do material e se habilita a



	há contato. A concentração de tensões é intensificada, na etapa de surgimento de trincas, CFS, pela rugosidade superficial, desvios de forma, inclusões e tensões residuais oriundas da retificação, promovendo o dano mostrado.	formar <i>debris</i> lamelares, como na foto (c) à direita. Há um ângulo da ordem de 15° que sugere uma distorção do plano tangente ao contato nos discos motor e movido em relação ao plano que contém os dois discos
<b>b</b>	Pista se deforma plasticamente do centro para as bordas, encrua, tem comportamento frágil, atinge o limite de resistência à fadiga do material (Modo I da Mecânica da Fratura) e, na borda, formam-se <i>debris</i> lamelares na interface pista / borda esquerda.	Falha de mesma natureza que da foto anterior, mas na direção do movimento do disco
<b>c</b>	Dano cíclico na subsuperfície da borda da pista e, sobre ele, há deformação plástica da superfície da pista, encruamento, trinca, interação com contornos de grãos (CGI e CCG) e <i>debris</i> .	Idem à foto (a) acima, na fase final de desprendimento de <i>debris</i> após atuação cíclica da tensão de cisalhamento na subsuperfície da pista de rolamento, provocando <i>microspalling</i> de 10 µm
<b>d</b>	Subsuperfície íntegra e fusão superficial de material de <i>debris</i> denota solitação termomecânica na interface pista/borda	Microtrinca transversal de 35 µm na borda da pista movida, similar àquela do disco motor da foto 1(h)
<b>e</b>	Abrasivo (SiC) encravado no disco movido, provável resquíio da retificação, promove microtrinca e sulco na borda da pista	Microtrinca de 40 µm na região de P <sub>máx</sub> de Hertz (esq) geradora de <i>spalling</i> e delaminação em curso (à direita)
<b>f</b>	<i>Microspallings</i> (SDS) na pista de rolamento devidos à tensão de cisalhamento máximo na subsuperfície, superando o valor local da resistência do material	Dano promovido por inclusão de partícula dura saliente apresentando, adicionalmente, malha de trincas térmicas na superfície da pista, com <i>mesh</i> entre 5 e 10 µm (disco movido)
<b>g</b>	Deformação plástica da superfície da pista, encruamento, trinca, interação com contornos de grãos (CGI e CCG) e <i>debris</i> na pista de contato entre as superfícies	Malha de trincas térmicas na superfície retificada (borda esquerda da pista ) com <i>mesh</i> entre 5 e 20 µm (disco motor)
<b>h</b>	Microtrinca transversal de 15 µm na borda da pista, possível de ser promovida por intensificadores de tensão e pela amplitude de deflexão do disco em torno do plano vertical, combinada com abrasão a três corpos, ao longo da vida e	<i>Spalling</i> de 0,18 mm na pista de rolamento do disco motor, , apresentando trincas em processo em várias direções e danos na superfície e nas camadas subsuperficiais
<b>i</b>	Sucessão de <i>pittings</i> de 2,0 µm de diâmetro na direção circunferencial da pista do disco motor, e, à direita, trincas de fadiga térmica no fundo de um <i>pitting</i> - gênese de <i>microspalling</i>	Aspecto dos <i>debris</i> formados até 1,13 milhões de ciclos de rolamento, a 5000 rpm, 131°C, 2,23 GPa, constatando-se partículas em bastonetes e “ <i>platelets</i> ”
<b>j</b>	Transição de comportamento dútil / frágil regulada pela combinação e variação do carregamento termomecânico na zona de Hertz (CFP)	Trincas em torno de uma inclusão retangular de 10x20 µm recém expulsa da matriz (à direita)
<b>k</b>	Indentação por partícula dura do contracorpo ou vice-versa	Trincas transversal de 10 µm e longitudinais em pista “suja”
<b>l</b>	<i>Spalling</i> com propagação do dano (CFP) até a superfície da pista, de acordo com os Modos I, II e III da Mecânica da fratura, na região de máxima solitação mecânica	Aspecto dos <i>debris</i> formados entre 1,13 e 1,53 milhões de ciclos de rolamento, a 5000 rpm, 131°C, 2,23 GPa, constatando-se partículas em “ <i>platelets</i> ” - houve poligonização do disco

## 5. DISCUSSÃO DOS MECANISMOS INTERAGENTES

Investigaram-se diversas fontes tradicionais na literatura e buscou-se a confirmação experimental, ou não, de danos e/ou mecanismos relacionados à fadiga de contato.

Bower [1988] afirma que desde que Way [1935] mostrou ser possível produzir trincas de fadiga de contato em laboratório rolando dois discos, um contra o outro, sob carga, os experimentos têm demonstrado que as trincas:

- i) apenas se propagam se um fluido lubrificante for aplicado às superfícies em contato;*
- ii) sempre se propagam na direção do movimento da carga sobre a superfície e, uma vez alterada essa direção, o crescimento das trincas também mudará a sua direção;*
- iii) se houver algum deslizamento relativo entre as duas superfícies em contato, apenas se propagam na superfície movida”.*

As superfícies ensaiadas neste trabalho, sem lubrificação, desautorizam as três assertivas:

- i) houve propagação de trincas sem a presença de lubrificante (figuras 1 e 2);
- ii) o movimento é grandeza vetorial, como também o crescimento das trincas e, assim, dependem de “*driving forces*” locais, como mostram os casos em que as trincas são acionadas por tensões térmicas cíclicas atuando em regiões mecanicamente (micro) confinadas (figuras 1 [i] e 2[f, g]), por mecanismo de abrasão a dois ou três corpos (figuras 1[e, h] e 2[d, e, j, k]), ou, ainda, por associação de mecanismos concentradores de tensão (partículas de segunda fase, como carbonetos e nitretos, inclusões de óxidos, vazios, asperezas), tamanho de grão, fases presentes na matriz (martensita e austenita retida, em aços eutetóides temperados), amplitudes flexionais e torcionais relativas entre as superfícies pontuais, pressão de Hertz local elevada e resistência à fadiga local (figuras 1[a, c, j, l] e 2[a, b, c, h, k]);
- iii) são registros de trincas em discos movidos as figuras 1(a, c, g, h, i) e 2(a, b, c, g, h).

Cheng *et al* [1994] afirmam que as duas etapas seqüenciais constituintes do mecanismo de desenvolvimento de *trincas por fadiga de contato* são o seu início, CFS, e a sua propagação, CFP, caracterizadas, respectivamente, por:

CFS) Uma elevada concentração de tensões cisalhantes associada a microdeformações plásticas em torno de micro-heterogeneidades ou defeitos do material induzem a um acúmulo local de discordâncias nos corpos em contato, provocando o início de microtrincas, que pode surgir na superfície ou na subsuperfície, a uma profundidade rasa ou profunda;

CFP) Um carregamento cíclico solicitante e inferior à tensão de ruptura do material provoca a propagação das microtrincas, cuja taxa de evolução depende do tipo de comportamento de cada material em contato, do campo de tensões aplicadas e das peculiaridades do corte efetuado pelas microtrincas.

Os mecanismos de abrasão a dois e três corpos (figuras 1[e, h] e 2[d]), destacamento e remoção de *debris* da zona de contato interagem em ambas as etapas, CFS e CFP descritas, ampliando os mecanismos relatados por Cheng.

McClintock [1966: 534-5] afirma que os parâmetros associados à concentração de tensões e sua história controlam a zona plástica no entorno de uma microtrinca. À medida em que se detalha a região de uma microtrinca, encontram-se heterogeneidades aos níveis de contorno de grão e subgrãos, discordâncias e átomos. Pode acontecer que a zona plástica no seu entorno seja grande demais, nada afetando na estrutura do material, ou pequena demais, de modo a afetar intensamente essa estrutura.

Segundo SURESH [1996: 296-7], efeitos transientes do crescimento de microtrincas, podem ser associados aos seguintes mecanismos:

CGI) *Interações contorno de grão - ponta da microtrinca*, a qual parará de crescer enquanto houver uma zona plástica mensurável na vizinhança do grão (figura 1[c]) ou voltará a crescer (figuras 1(l) e 2[a, b, c]) quando bandas de escorregamento emanadas de sua ponta possuírem energia suficiente para se entranharem no contorno do grão;



CCG) *Intensificação do fechamento da trinca* com um aumento de seu comprimento (figuras 1(h), 2[d, k]) e com a sua deflexão.

Tallian [1992], *apud* Dumont [1997: 29], distingue a presença de dois grupos de danos identificados nos contatos e que evidenciam a fadiga de contato:

SPA) *spalling* (ing.), *écaillage* (fr.), *abnutzung* (ger.), onde as deformações plásticas indutoras do surgimento e propagação de trincas decorrentes do campo de tensões hertzianas promovem a formação de crateras macroscópicas;

SDS) *surface distress* ( também reportada como *peeling, micro-spalling, delamination wear, micro-pitting, fatigue wear*), *micro-écaillage* (fr.), *mikroabnutzung* (ger.), onde crateras e microtrincas têm ordem de grandeza similar à do perfil de rugosidade superficial, além do contato apresentar superfícies lustrosas.

No que concerne ao material, há consenso entre os estudiosos de fadiga de contato que as trincas que originam o processo podem ser precedidas por, ou seguidas de, transformações microestruturais nos materiais em contato, caracterizadas nos aços por:

DER) uma região de coloração escura ( *dark etching region, der* ) identificada na superfície ou na subsuperfície de contatos fortemente solicitados após uma certa vida;

WER) uma região de coloração branca ( *white etching region, wer* ) identificada na superfície ou na subsuperfície, onde se observa escoamento plástico no material;

WCB) em aços que se caracterizem por uma forte presença de inclusões, uma região de borboletas de coloração branca na vizinhança da região de coloração branca e identificada por Denning e Rice [1963] *apud* Littman e Widner [1966] e por Sanchette [1993] *apud* Dumont [1997] na região subsuperficial do material.

Segundo Voskamp [1985], regiões de coloração escura (DER) e branca (WER) surgem na microestrutura do material após carregamento sob altas tensões, durante um número suficientemente alto de ciclos de tensão. Esse autor credita o surgimento das regiões (DER), de coloração escura, às micromigrações de átomos de carbono provocadas por movimentos de discordâncias, sugerindo uma dependência inerente entre o estado de tensão de cisalhamento e as alterações microestruturais. Em dentes de engrenagens, segundo Clarke [ 1985 ], após ataque com Nital, na região (DER) visualiza-se uma primeira decomposição da estrutura martensítica do aço.

Tallian [1992] em seu *Failure Atlas for Hertz Contact Machine Elements*, reeditado pela ASME [ <http://www.asme.org> ], caracteriza as regiões de fase branca (WER) e as borboletas de fase branca (WCB).

Estudando aços-liga, Nélias *et al.* [1998] citam que o principal mecanismo de fadiga de contato por rolamento iniciada na subsuperfície - *zona hertziana* - advém do surgimento (CFS) e propagação (CFP) das microtrincas em torno de inclusões, sejam de óxidos - as mais severas - sejam de carbonetos ou nitretos, sob o efeito de incompatibilidades entre a sua deformação e a da matriz martensítica. Ao longo dos ciclos, em função da magnitude, direção e sentido da pressão de contato, atingido um *limite crítico* de densidade de discordâncias, podem surgir microtrincas sob a forma de uma borboleta (WCB) de fase branca (WER).

Interagem no surgimento (CFS) e propagação (CFP) de trincas na fadiga de contato:

a) Número de ciclos, relação entre deslizamento e rolamento dos corpos em contato, módulo, direção e sentido da força de atrito entre eles;

b) Geometria do contato, carregamento termomecânico, processo de fabricação, definidor da rugosidade superficial, desvios de forma e posição de cada sólido em contato, materiais, massa, rigidez e comportamento dinâmico do sistema, definidores do movimento relativo entre os corpos rolantes.

## 6. CONCLUSÃO

Sob pressão de contato hertziana, dois corpos sólidos, ao rolarem com ou sem deslizamento, submeter-se-ão ao *início e propagação* de falhas, após N ciclos.

As falhas superficiais ou subsuperficiais por fadiga de contato dependem da pressão de contato de Hertz, velocidade, geometria do contato, intensificadores de tensão, limites pontuais de resistência, escoamento e fluência, dureza e processo de fabricação dos materiais e componentes (módulo de elasticidade dos materiais em contato, tratamento térmico, presença, morfologia e densidade de carbonetos e nitretos e inclusões constituídas por óxidos, rugosidade superficial e ondulações nas superfícies de contato).

Este estudo possibilitou:

- 1) Discutir alguns mecanismos de fadiga de contato em corpos sob rolamento e rolamento com pequenos deslizamentos;
- 2) Verificar evidências experimentais que apoiam a discussão de Suresh [1996] sobre microtrincas, ampliar o escopo dos mecanismos apresentados por Cheng *et al.* [1994] e contradizer algumas assertivas de Bower [1988];
- 3) Mostrar que superfícies de aço AISI 52100, rolando por atrito, submetidas a uma pressão de contato inicial de 2,23 a 2,81 GPa e a velocidades constante ou variáveis de até 141 Km/h, após vidas limites compreendidas entre 721 e 5890 Km, apresentaram defeitos nas bordas e margens esquerda e direita da região hertziana, com deformações similares àquelas diretamente submetidas às solicitações termomecânicas da região hertziana do contato;
- 4) Apresentarem-se fotos de danos superficiais (*surface distress*) e subsuperficiais (*spalling*) presentes nos materiais em contato, evidenciando-se que a região das bordas esquerda e direita do contato hertziano são solicitadas termomecanicamente, com deformações similares àquelas diretamente submetidas na região hertziana do contato.
- 5) Mostrar alguns *debris*, partículas desgastadas expelidas da região do contato, parte delas oriundas de um processo de poligonização de um dos discos movidos.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores são agradecidos à CAPES, pela concessão de bolsa a um dos autores, ao professor Dr. André Tchepchin e à física Maria de Fátima Ferreira Neto, do Departamento de Metalurgia-EPUSP, por permitirem a utilização de seu Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise, ao técnico em metalurgia Leandro José de Paula e à equipe da divisão de Metalurgia do IPT, pelo auxílio na preparação dos corpos-de-prova após os ensaios.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- BEYNON, J.H.; GARNHAM, J.E.; SAWLEY, K.J. [1996] Rolling Contact Fatigue of Three Perlitic Rail Steel. *Wear*, v.192: 94-111.
- BOWER, A. F. [1988] The influence of Crack Face Friction and Trapped Fluid on Surface Initiated Rolling Contact Fatigue Cracks. *Journal of Tribology*, v. 110: 704-711.
- CHENG, W.; CHENG, H.S.; MURA, T.; KEER, L.M. [1994] Micromechanics Modeling of Crack Initiation Under Contact Fatigue. *Journal of Tribology*, v. 116: 2-8.
- DANG VAN, K.; MAITOURNAM, H.M.[1998] Modelisation des endommagements de contact. 17<sup>e</sup> Journées de Printemps: Fatigue de Contact. Commission de Fatigue des Matériaux, *SFMM - Société Française du Métallurgie et Materials*.1(1) -1(9).
- DEMKIN, N.B. [1981] The contact of Solids. In: KRAGELSKY, I.V.; ALISIN, V.V. *Friction, Wear, Lubrication - Tribology Handbook*. Moscow, Edit Mir. V. 1. 384 p.

- DUMONT, M.L. [1997] *Etude des endommagements de surface induits par la fatigue de roulement dans les contacts élastohydrodynamiques pour des aciers M50 et 100Cr6*. PhD Thesis. Laboratoire de Mécanique des Contacts, INSA de Lyon, France. 197 p.
- GOLDSMITH, W [1960] *Impact: the theory and physical behaviour of colliding solids*. London, Edward Arnold Publishers Ltd. 379 p.
- GRAS, R.; INGLEBERT, G. [1998] Fatigue de Contact: Endommagements et Simulation. 17<sup>e</sup> Journées de Printemps: Fatigue de Contact. Commission de Fatigue des Matériaux, *SFMM - Société Française du Métallurgie et Materials*. p. 8(1) -8(12).
- JIANG, Y.; SEHITOGLU, H. [1996] Rolling contact stress analysis with the application of a new plasticity model. *Wear*, v.191: 35-44.
- JOHNSON, K.L. [1989] *Contact Mechanics*. Cambridge, C. Univ. Press. 452 p.
- LITTMANN, W.E.; WIDNER, R.L. [1966] Propagation of Contact Fatigue from Surface and Subsurface Origins. *ASME Journal of Basic Engineering*, v. 88: 624 - 636.
- McCLINTOCK, F.A. [1966] The mechanics of elastic-plastic fracture. In: \_\_\_\_\_; ARGON, A. A. [1966] *Mechanical Behavior of Materials*. Reading-MA, Addison-Wesley Publishing. P. 534 - 540.
- NÉLIAS, D.; DUMONT, M.L.; COUHIER, F.; DUDRAGNE, G.; FLAMAND, L. [1998] Experimental and Theoretical Investigation on Rolling Contact Fatigue of 52100 and M50 Steels Under EHL or Micro-EHL Conditions. *J. of Tribology*, v. 120: 184-190.
- PRONIKOV, A.S. [1981] Calculation of tribological Joints for Wear. In: KRAGELSKY, I.V.; ALISIN, V.V. [1981] *Friction, Wear, Lubrication- Tribology Handbook*. Moscow, Editorial Mir. Volume 1. 384 p.
- SURESH, S. [1996] *Fatigue of materials*. Massachusetts, Cambr. Univ. Press. 617 p.
- TALLIAN, T.E. [1992] Simplified Contact Fatigue Life Prediction Model - Part I: Review of Published Models. *Journal of Tribology*, v. 114: 207-213.
- VOSKAMP, A.P [1985] Material Response to Rolling Contact Loading. \_\_\_\_v.107:359-66
- WEIBULL, W. [1951] A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics*, v. 18: 293 - 297.
- WEIBULL, W. [1962] Efficient Methods for Estimating Fatigue Life Distributions of Roller Bearings. In: BIDWELL, J. B. [1962] (ed.) *Rolling Contact Phenomena*. Amsterdam, Elsevier Publishing Co.. p. 252 - 265.