

# APLICAÇÃO DA MECÂNICA DA FRACTURA AO ESTUDO DE CONTACTOS ELASTOHIDRODINÂMICOS

Claro, J.\*; Ferreira, L. A.\*\*

\* INEGI, CETRIB, Leça do Balio, Portugal

\*\* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, DEMEGI, Porto, Portugal

## RESUMO

*Num ensaio à fadiga entre dois sólidos em rolamento, surgem, ao fim de alguns milhares de ciclos, escamas formadas devido às elevadas cargas existentes nos contactos lubrificadas elastohidrodinamicamente. O aparecimento deste fenómeno é largamente dependente da pressão de Hertz existente no contacto e, conseqüentemente, da tensão de corte máxima. Deste modo, a profundidade das escamas formadas corresponde, normalmente, à profundidade onde ocorre a tensão de corte máxima,  $Z_s$ .*

*A mecânica da fractura estuda a propagação das fissuras no interior dos sólidos. Estas fissuras surgem em consequência de defeitos existentes no material propagando-se mais ou menos rapidamente, consoante a intensidade das tensões existentes, características do material e comprimento inicial das fissuras existentes.*

*O objectivo deste trabalho consiste em estudar uma possível aplicação da mecânica da fractura ao contacto elastohidrodinâmico entre dois corpos e relacionar a espessura específica de filme com o tipo de regime de propagação de fissuras que poderia resultar.*

## 1. BREVE INTRODUÇÃO À MECÂNICA DO CONTACTO [7]

Quando duas superfícies estão em contacto, as solicitações mecânicas transmitidas através desse contacto são impostas ao maciço, podendo provocar localmente a degradação dos componentes.

Com o intuito de compreender e caracterizar o tipo de degradação imposta, ao nível da formação de defeitos criados pelas solicitações mecânicas, importa conhecer a natureza

e a amplitude das acções que se fazem sentir sobre os sólidos em contacto.

A Mecânica do Contacto pretende dar resposta ao modo como se comportam os sólidos em contacto, quando submetidos a uma dada solicitação, isto é, determinar os correspondentes deslocamentos, deformações e tensões instaladas, quer na superfície quer no maciço.

Na Tribologia os conhecimentos da Mecânica do Contacto são fundamentais para a determinação das tensões e deformações na zona de contacto entre vários elementos mecânicos, nomeadamente, em engrenagens, rolamentos, etc., sob condições cinemáticas de rolamento puro ou de rolamento com deslizamento, em contacto seco ou lubrificado. Na figura 1 mostra-se um exemplo típico de um contacto pontual.

Quando dois sólidos de revolução elásticos são postos em contacto, um contra o outro, eles tocam-se inicialmente num único ponto ou segundo uma linha. Se solicitados por uma determinada carga, mesmo de pequena intensidade, eles deformam-se na vizinhança do ponto inicial de contacto, originando uma área de contacto de pequena dimensão. O contacto sem atrito entre dois corpos de revolução elásticos produz, no caso mais geral, uma área de contacto elíptica, como se mostra na figura 1.

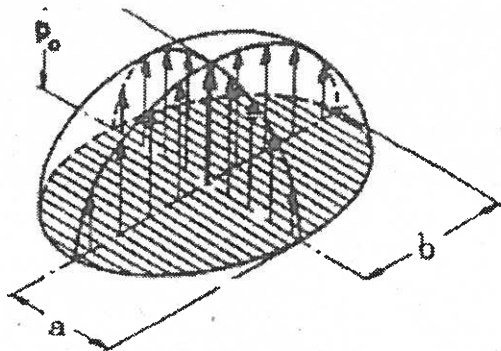


Fig. 1 – Pressão de Hertz aplicada sobre uma área elíptica [7]

Para que seja possível analisar este problema é necessário uma teoria de contacto, que permita determinar a forma da área de contacto e a sua evolução com o aumento da solicitação, da intensidade e da distribuição de pressões, transmitidas através da superfície de contacto. Por fim, uma vez conhecida a distribuição de pressões

superficiais, torna-se necessário determinar os campos de deslocamentos, deformações e tensões a que está submetido cada um dos sólidos na vizinhança dessa área de contacto.

Num problema de contacto, a transmissão dos esforços é realizada através da interface entre os dois corpos. Logo, a geometria dessas superfícies tem influência sobre o próprio contacto, sendo necessário definir a sua geometria com detalhe antes de formular o problema de elasticidade.

A teoria de Hertz tem a seguinte formulação:

$$Ax^2 + By^2 - \delta + \omega_1 + \omega_2 \geq 0 \quad (1)$$

$$p(x, y) = \sigma_n = \sigma_{zz} \geq 0 \quad (2)$$

$$\iint p(x, y) dx dy = F_n \quad (3)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 = 0 \quad (4)$$

onde

$\delta = \delta_1 + \delta_2$  : penetração entre os dois sólidos em contacto

$\omega_1 + \omega_2$  : deslocamentos elásticos dos pontos da superfície dos dois sólidos segundo z;

$a, b$  : semi-eixos da elipse de contacto.

A primeira expressão estabelece que após a deformação elástica dos sólidos, devida à aplicação da solicitação normal  $F_n$ , a distância entre dois pontos da superfície de cada um dos sólidos, situados sobre a mesma normal ao plano tangente comum, é maior ou igual a zero (modelo de contacto), como se mostra na figura 2.

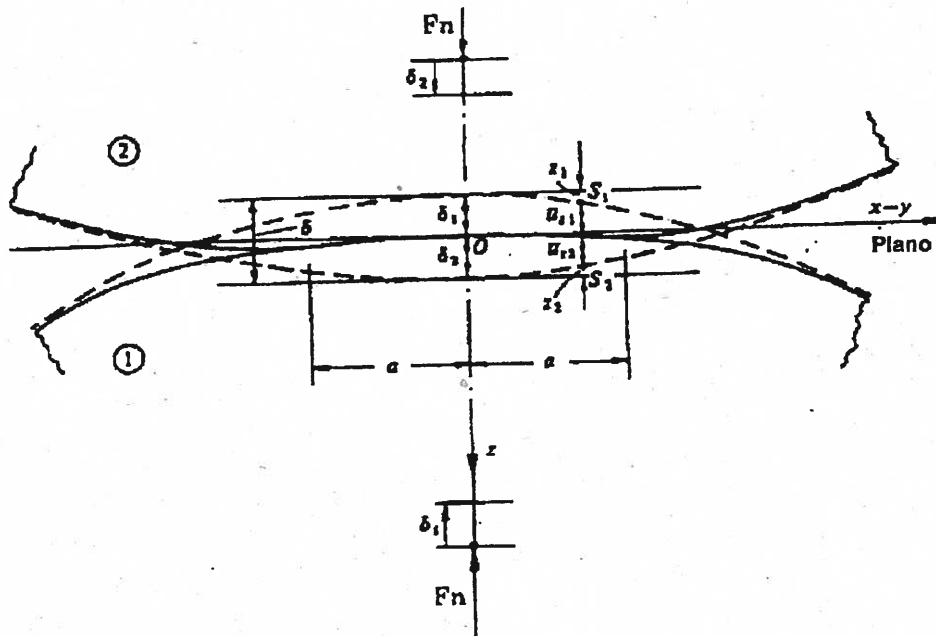


Fig. 2 – Distância entre pontos das superfícies em contacto após deformação elástica [7]

A inequação (2) estabelece que as pressões no interior da superfície de contacto, resultantes da solicitação aplicada, são desconhecidas, mas necessariamente normais à superfície, compressivas e maiores que zero. No exterior da área de contacto as tracções superficiais são nulas.

As pressões desenvolvidas no interior da área de contacto têm, por uma questão de equilíbrio, de igualar a solicitação aplicada como estabelece a equação (3).

Os pontos de ambas as superfícies que entram em contacto à medida que a solicitação é aplicada, correspondem a pontos situados à mesma distância entre si, ou seja, pontos para os quais  $z = Ax^2 + By^2 = \text{Constante}$ .

Este conjunto de pontos forma uma elipse, sendo então a superfície de contacto definida pela equação (4).

A resolução simultânea das duas inequações, (1) e (2), e das duas equações, (3) e (4), permite obter a solução do problema.

## 2. TIPOS DE AVARIAS DE FADIGA [7]

A fadiga pode ocorrer à superfície ou em profundidade, tratando-se, aparentemente, de uma avaria causada pela aplicação repetitiva de ciclos de tensão-deformação a um pequeno volume de material, provocando a sua falha.

O dano por fadiga pode-se iniciar devido a um defeito superficial, uma inclusão, um carboneto, rugosidades ou indentações, ataque químico pontual ou contaminação do lubrificante.

Os sucessivos ciclos de tensão/deformação aplicados ao material vão provocar a iniciação e propagação das fissuras, sendo a sua direcção de propagação função das direcções de rolamento e escorregamento.

A fadiga envolve a consideração de múltiplos parâmetros mecânicos associados aos sólidos e ao lubrificante (rugosidade, propriedades elásticas dos materiais, carga, velocidade, escorregamento, viscosidade, espessura de filme, ...), químicos (natureza dos óleos, aditivos, ...) e metalúrgicos

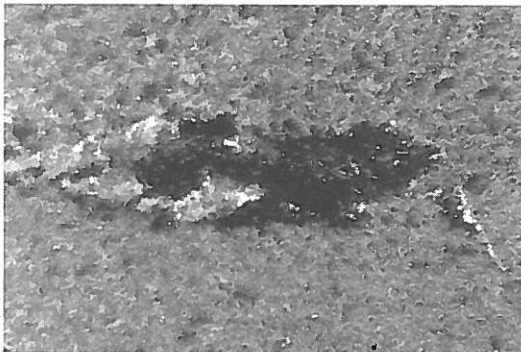
(tratamentos térmicos do material, inclusões, ...).

Há três tipos de avaria por fadiga que podem ocorrer em contactos EHD:

- Spalling ou escamas
- Pitting ou picadas superficiais
- Micropitting ou micropicadas

O pitting é um modo de avaria de fadiga que se desenvolve à superfície, para carregamentos relativamente elevados (próximos de 2GPa). O seu aparecimento é devido principalmente à interacção de rugosidades, logo o parâmetro que mais influencia o seu aparecimento é a espessura específica de filme, para além do lubrificante.

As características principais do pitting são a sua baixa profundidade (10 – 25 $\mu$ m) e pequena área superficial (0,2 – 2 mm<sup>2</sup>). A figura 3 mostra o aspecto da superfície de um disco que sofreu pitting.



**Fig.3** – Superfície com pitting ( $A \approx 0,8 \text{ mm}^2$ )  
Ampliação: x130 [7]

A existência de partículas soltas no lubrificante pode ser determinante no aparecimento de pitting, se passarem no interior do contacto na fase inicial do funcionamento, pois podem induzir deformações plásticas na superfície que, por sua vez, podem funcionar como focos de iniciação de fissuras de fadiga.

O spalling é uma avaria profunda, acompanhada de levantamento de material, que induz o aparecimento de crateras nas superfícies em contacto. Estas crateras – spalls – têm algumas

décimas de milímetro de profundidade e alguns milímetros quadrados de superfície.

O spalling surge drasticamente após um período de incubação de algumas dezenas de milhão de ciclos.

A formação de spalls é precedida do aparecimento de muitas fissuras que, após se juntarem, provocam o levantamento de material. A figura 4 ilustra o aspecto típico de uma spall.



**Fig.4** – Aspecto típico de uma escama de fadiga ( $A \approx 1,5 \text{ mm}^2$ ); Ampliação: x130 [7]

O spalling ocorre predominantemente em contactos elastohidrodinâmicos muito carregados, sendo função essencialmente da pressão de Hertz, logo das tensões de corte no interior dos sólidos.

O spalling é acelerado pela presença de óleo lubrificante, pois como este é mais rígido que o material dos sólidos em contacto, introduz-se nas fissuras, fomentando o seu crescimento.

O aumento da pressão de Hertz e a diminuição da espessura específica de filme, isto é, o aumento da rugosidade, fazem com que a probabilidade de ocorrer spalling aumente.

O micropitting surge principalmente quando existem fortes contactos metálicos entre as superfícies em

contacto, estando, por isso, fortemente relacionado com as suas rugosidades.

O micropitting é uma forma progressiva microscópica de desgaste por fadiga caracterizado pela formação de numerosas microfissuras com origem na superfície ou muito próximo desta. Estas microfissuras dão origem a pequenas crateras com profundidades que variam entre 2,5 e 25  $\mu\text{m}$ .

Durante o micropitting ocorre deformação plástica das superfícies em contacto, mais acentuada que no pitting e no spalling, como se mostra na figura 5.

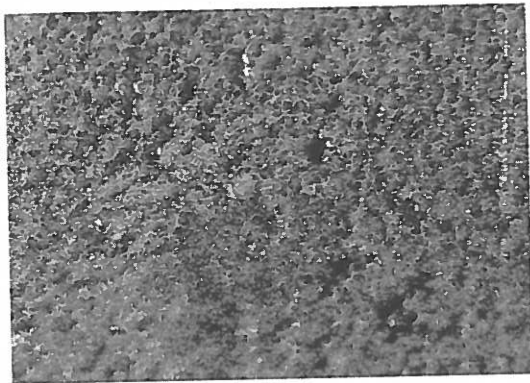


Fig.5 – Superfície com micropitting; Ampliação: x130 [7]

O micropitting ocorre em contactos EHD com cargas moderadas e elevadas, sendo dependente da carga e da espessura específica de filme. Aumentando a carga e diminuindo a espessura específica de filme, aumenta a taxa de desgaste por micropitting.

### 3. APLICAÇÃO DA MECÂNICA DA FRACTURA AO DIMENSIONAMENTO À FADIGA DE CONTACTOS EHD

Existem vários critérios para o dimensionamento à fadiga de contactos elastohidrodinâmicos. O objectivo deste artigo foi estudar cada um destes critérios para posterior aplicação prática.

#### 3.1 Iniciação à fadiga [1, 2, 3, 4, 5]

O critério de Dang Van é normalmente utilizado no estudo da iniciação à fadiga. Este critério postula que o dano por fadiga ocorre quando num determinado plano de corte, uma ou ambas das seguintes condições se verificam:

$$\tau_{EQ1} = \tau_a(t) + a_{DV} * \sigma_h(t) > \tau_e$$

$$\tau_{EQ2} = \tau_a(t) - a_{DV} * \sigma_h(t) < -\tau_e$$

em que:

$\tau_a(t)$  : valor da tensão de corte num ponto específico do material e num determinado plano de corte. Representa a amplitude da tensão de corte e é igual à diferença entre a sua amplitude no instante  $t$  especificado e a amplitude média durante o ciclo de tensão aplicado.

$\sigma_h(t)$  : valor da tensão hidrostática no ponto considerado

$\tau_e$  : parâmetro do material (positivo), normalmente considerado igual ao limite de fadiga do material, quando solicitado em corte puro.

$a_{DV}$  : parâmetro material, adimensional, que representa a influência da tensão hidrostática.

O parâmetro  $a_{DV}$  pode ser determinado através da expressão seguinte:

$$a_{DV} = \frac{\tau_e - \sigma_e / 2}{\sigma_e / 3}$$

em que  $\sigma_e$  é o limite de vida à fadiga em flexão alternada.

O critério de Tresca pode também ser utilizado. Neste caso apenas é identificado o maior dano existente no ponto considerado. O critério passa a ser definido por:

$$\tau_{EQ3} = \tau_{a,Tresca}(t) + a_{DV} * \sigma_h(t) > \tau_e$$

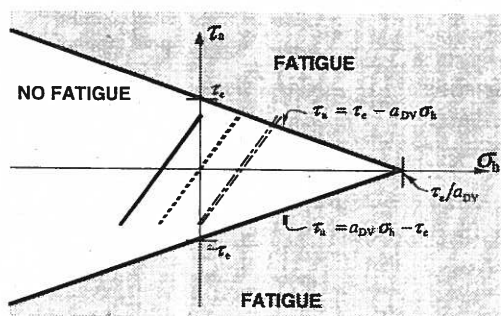


Fig.6 - Critério de Dang Van [1]

Graficamente este critério tem o aspecto ilustrado na figura 6.

### 3.2 Propagação de fissuras [8]

A mecânica da fractura pode, em princípio, ser aplicada à propagação de fissuras de fadiga superficial desde que a zona plástica seja pequena comparativamente à dimensão da fenda.

A propagação de fissuras tem normalmente a seguinte representação gráfica:

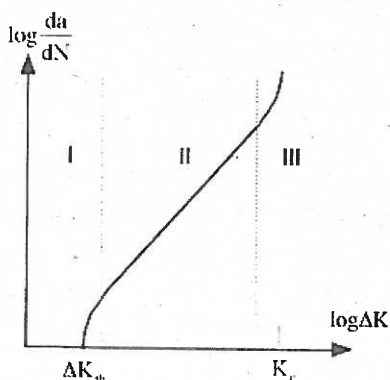


Fig.7 - Aspecto típico da relação  $da/dn=f(\Delta K)$  [8]

A lei de Paris é normalmente aplicada na zona II e é expressa do seguinte modo:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m$$

em que C e m são parâmetros do material, determinados experimentalmente.

Esta equação não considera a história de carga a que o material em estudo esteve sujeito.

Da análise da figura anterior ressalta a existência de um valor do factor intensidade de tensão abaixo do qual não ocorre propagação de fissuras,  $K_{th}$ , e de um valor crítico,  $K_c$ , que provoca a rotura do material.

A lei de Paris considera apenas o regime elástico. De modo a se poder considerar a deformação plástica pode-se utilizar o integral J, sendo o crescimento da fissura descrito pela seguinte expressão:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta J^m$$

A mecânica da fractura linear elástica é aplicável apenas quando a zona de deformação plástica é de dimensões reduzidas e está contida numa região elástica.

## 4 APLICAÇÃO À MECÂNICA DO CONTACTO

A aplicação do critério de Dang Van e da lei de Paris a um contacto elastohidrodinâmico não é simples pois vários problemas se colocam:

- i) Comprimento inicial da fenda e local onde se inicia
- ii) Modo como se propaga
- iii) Campo de tensões gerado pelas pressões de contacto e pela existência da fenda
- iv) Tipo de regime a considerar: elástico ou plástico

A determinação do tipo de regime a considerar num contacto elastohidrodinâmico está relacionado com a espessura específica de filme no interior do contacto, definida do seguinte modo:

$$\Lambda = h_m / \sigma$$

em que:

$h_m$  - espessura média de filme

$\sigma$  - rugosidade RMS composta das superfícies em contacto:

$$\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$$

A espessura específica permite caracterizar os regimes de lubrificação existentes:

- $\Lambda > 3$ : lubrificação por filme completo
- $1 \leq \Lambda \leq 3$ : lubrificação mista ( ocorre contacto entre as rugosidades das superfícies, mas existe também lubrificação )
- $\Lambda < 1$ : Lubrificação limite (os efeitos do lubrificante são muito baixos, havendo grande contacto entre as rugosidades ).

Os modos de avaria são também fortemente dependentes da espessura específica. Assim, tem-se que:

- $\Lambda < 1$ : a fadiga ocorre principalmente à superfície, facilitando o aparecimento de pitting. Se  $\Lambda < 0,4$  a probabilidade de ocorrer micropitting é elevada, pois as interacções metálicas entre os picos de rugosidade das superfícies deformam plasticamente a zona superficial dos sólidos em contacto, propiciando a formação de micropitting.
- $\Lambda > 3$ : a fadiga ocorre principalmente no interior dos sólidos em contacto, sendo mais provável o aparecimento de spalling. O campo de tensões gerado no interior de cada sólido é predominantemente devido ao contacto de Hertz, o que implica que as tensões máximas, que ocorriam na camada mais superficial dos sólidos devido às rugosidades, passem a existir no interior dos sólidos a uma profundidade  $Z_s$ , correspondente àquela onde ocorre a tensão de corte máxima. Assim sendo, as fissuras iniciar-se-ão e propagar-se-ão no interior dos sólidos. Logo

o modo de avaria predominante é o spalling.

- $1 \leq \Lambda \leq 3$ : pode ocorrer pitting e spalling de forma pontual ao longo da zona de contacto. Neste caso, o lubrificante e sua contaminação, a carga no contacto, o acabamento superficial e as propriedades do material têm grande importância, pois influenciam o modo de avaria que predominará.

## 5. CONCLUSÕES

Da análise teórica efectuada ao longo deste artigo resulta que a aplicação da mecânica da fractura a contactos elastohidrodinâmicos não é simples, sendo necessário ter em conta não só as cargas e tensões instaladas, mas também as características do próprio contacto, como a espessura específica de filme. Só assim se pode prever o tipo de regime instalado – elástico ou plástico – e quais as leis da mecânica da fractura a aplicar.

A aplicação prática dos critérios apresentados ao longo deste artigo, irá ser efectuada numa máquina de discos, partindo do pressuposto que no interior dos sólidos em contacto existe uma fenda de pequenas dimensões, e tendo origem a uma profundidade correspondente àquela onde ocorre a tensão de corte máxima no contacto,  $Z_s$ . Seguidamente ir-se-á verificar o modo como se dá a propagação da fenda, desde  $Z_s$  até à superfície, em função do número de ciclos aplicado, utilizando para tal a lei de Paris.

O critério de Dang Van irá também ser testado para um contacto elastohidrodinâmico, em função das tensões máximas existentes no contacto, de modo a verificar a sua aplicabilidade à mecânica do contacto.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Ekberg,A., Rolling contact fatigue of railway wheels – computer modeling and in-field data, Chalmers University of Technology, division of Solid Mechanics, 1996
- [2] Ekberg,A., Fatigue Initiation – Some Notes, Chalmers University of Technology, division of Solid Mechanics, 1997.
- [3] Ekberg,A., Fatigue Propagation – Some Notes, Chalmers University of Technology, division of Solid Mechanics, 1997.
- [4] Ekberg,A., Fracture Mechanics – Some Notes, Chalmers University of Technology, division of Solid Mechanics, 1997.
- [5] Ekberg,A., Rolling contact fatigue of railway wheels, Chalmers University of Technology, division of Solid Mechanics.
- [6] Ekberg, A., Bjarnehed, H., Rolling contact fatigue of wheel/rail systems – a literature survey, Chalmers University of Technology, division of Solid Mechanics, 1998
- [7] Silva, Pedro Miguel da Silva Moreira, Influência da rugosidade no comportamento à fadiga de um contacto elastohidrodinâmico, 1997
- [8] Branco, C. Moura, Fernandes, A. Augusto, Castro, Paulo M. S. Tavares, Fadiga de estruturas soldadas, 2ª edição, 1999