

PARTE I MECÂNICA DA FRATURA

1. Introdução

Definição: Mecânica da Fratura é um estudo sobre a lei de propagação de trincas em materiais e a resistência de estruturas contendo trincas.

Micro defeitos (*flaws* em inglês) (tamanho $< 0,05$ mm) podem ser micro fissuras, micro poros e discordâncias etc. e geralmente são **distribuídos continuamente** em materiais. Para estudar eles, precisa introduzir uma variável intrínseca.

Macro trincas (tamanho $\geq 0,05$ mm, que pode ser visto por olho nulo) aparecem em materiais **isoladamente**, podendo ser intrínseca ou nucleada por desenvolvimento de micro defeitos sob carregamentos, fadigas, erosões e radiação.

Histórico de Fraturas Catastróficas

1876 Ashtabula, Michigan: Ponte de ferro-fundido de 23 m de altura que desaba quando da passagem de um trem com 159 pessoas a bordo. 92 mortos (48 irreconhecíveis). Ruptura por fadiga e falha de projeto.

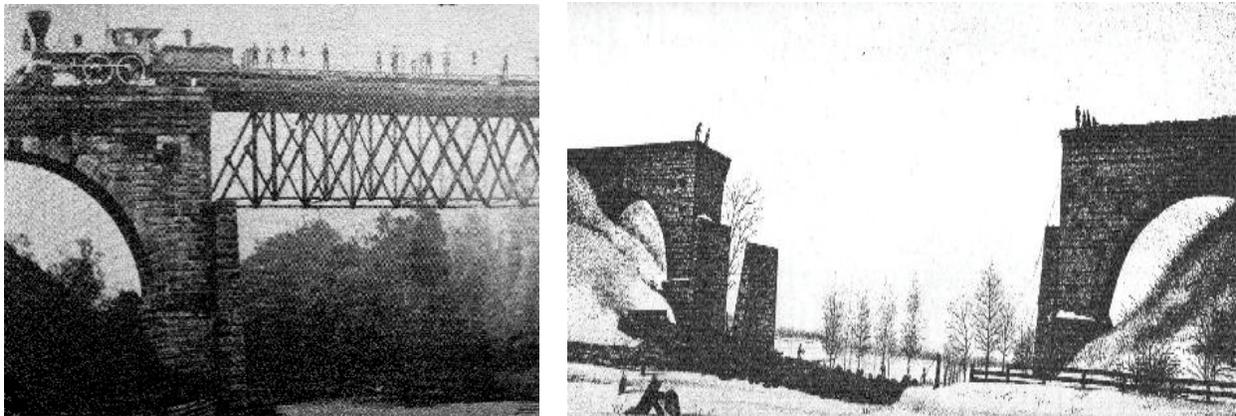


Fig. 1 Ponte Ashtabula, antes e depois do desastre.

1919 Boston: Tanque de ferro-fundido de uma destilaria de álcool com 9 milhões lts de melaço se rompe. Uma onda de 5 metros de altura de melaço se forma, viajando a uma velocidade de 35 Km/h por aproximadamente duas quadras. 150 pessoas feridas e 21 mortas. As causas da ruptura teriam sido sobrecarga e

problemas construtivos do tanque. Foi um dos primeiros casos na história em que a companhia responsável teve que pagar indenizações pelas mortes e danos.



Fig. 2 Tanque, de mais de 16 metros de altura, antes da ruptura.

1944 Cleveland: Ruptura de um tanque de gás natural liquefeito. Com a ruptura, houve a vaporização do gás que se incendiou, causando uma gigantesca bola de fogo. Uma milha quadrada foi completamente destruída, deixando 79 casas, 2 fábricas, 217 carros destruídos. 131 pessoas mortas, 300 feridas



Fig. 3 Destroços nas proximidades do tanque de gás liquefeito, em Cleveland, 1944.

1942-52: Ruptura dos navios Liberty-ships. Os Liberty ships eram navios de carga, usados na II guerra mundial. Tornaram-se lendários por terem sido pioneiros no uso da solda substituindo rebites. As causas das rupturas foram a inexistência de barreiras a propagação das trincas, como o fim das chapas, existentes no caso de cascos rebitados; falta de experiência dos soldadores (não havia tempo hábil para treiná-los em função da guerra) e uso de metais de baixa tenacidade.



Fig. 4 Liberty ship.



Fig. 5 Navio tanque (Liberty-ship) que fraturou de maneira frágil. (CALLISTER, 2015).

1953-54: Queda de 3 aviões Comets (de Havilland 106 Comet). Ele foi o primeiro avião a jato comercial, introduzido em 1949 e colocado em operação em 1952 . Posteriormente descobriu-se que as quedas ocorreram por propagação de trincas que se originaram nas proximidades dos cantos das janelas – quadradas – do avião (na verdade no furo de um rebite), e que se propagavam por fadiga causada pela pressurização/despressurização da cabine. Após a descoberta, nenhum avião pressurizado usaria janelas sem cantos arredondados.



Fig. 6 O DH 106 Comet em voo.



Fig. 7 Ensaio hidrostático à fadiga, após a ruptura.

1967 Point Pleasant, W. Virginia: Silver Bridge ligando o estado W. Virginia a Ohio. Vão central tinha mais de 130 metros. Em lugar de cabos, a ponte era suspensa por correntes ligadas por pinos. Um dos elos de corrente se rompeu por clivagem devido ao clima frio e sobre-carga, causando a ruptura dútil de um dos pinos. Com a ruptura de uma das correntes, toda a estrutura colapsou, causando a morte de 46 pessoas. A ruptura foi causada por microtrincas que cresceram por fadiga e corrosão combinados.



Fig. 8 Silver Bridge



Fig. 9 Silver Bridge após colapso.

O desastre da Silver bridge tornou-se um marco pois foi a primeira estrutura civil a ter o colapso investigado com aplicação dos conceitos modernos da mecânica da fratura.

Marcos da Mecânica da Fratura

Abaixo coloca-se os três desenvolvimentos mais importantes que levaram a Mecânica da Fratura moderna:

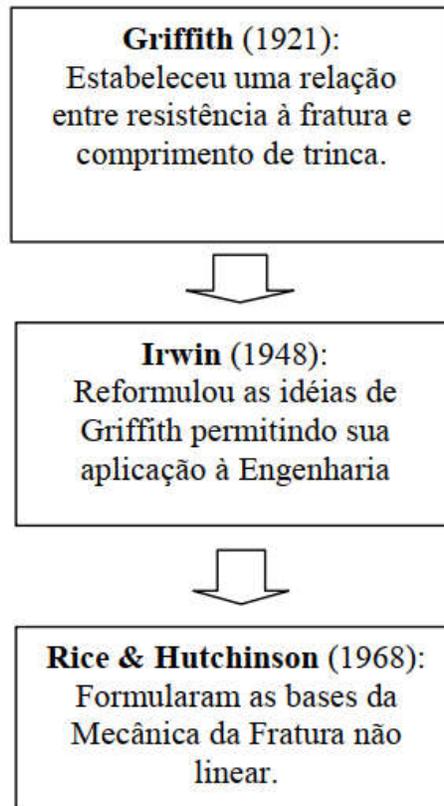


Fig. 10 Três marcos da mecânica da fratura.

2. Concentração de Tensões, Trinca e Teoria de Equilíbrio de Energia de Griffith

2.1 Concentração de tensões e conceito de trinca

Pela teoria de elasticidade, pode obter a tensão perto da ponta de uma elipse num placa infinita submetida uma tensão remoto (Fig. 11):

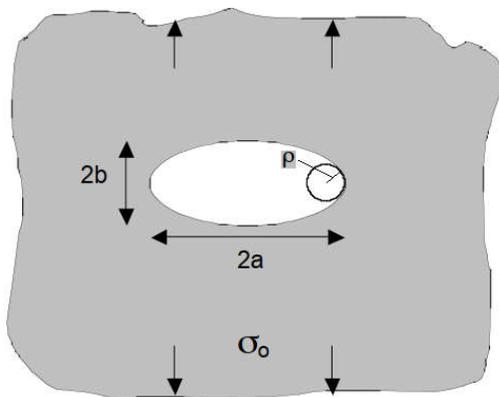


Fig. 11 Uma placa infinita contendo um orifício elipse submetido uma tensão remoto σ_0

$$\sigma_{max} = \sigma_0 \left(1 + \frac{2a}{b} \right) \text{ or } \sigma_{max} = \sigma_0 \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad 2.1$$

onde $\rho = b^2 / a$ é o raio da curvatura na ponta da elipse. Podemos expressar:

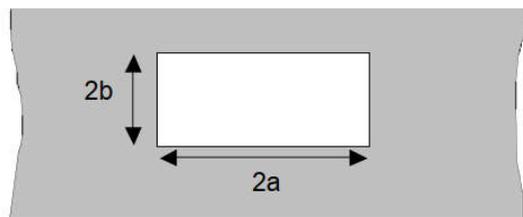
$$\sigma_{max} = K_t \sigma_0$$

onde $K_t = 1 + 2\sqrt{a/\rho}$ se chama o *fator de concentração de tensões locais*. Claramente se

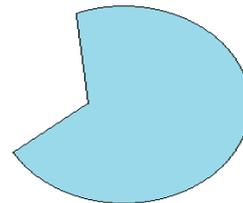
$b \rightarrow 0$, então, $\rho \rightarrow 0$, em conseqüência, $K_t \rightarrow \infty$ e

$$\sigma_{max} \rightarrow \infty.$$

Definição de trinca: Se um defeito tem uma ponta com raio de curvatura nulo, então, o defeito pode ser considerado uma trinca. Na ponta da trinca, a tensão é infinita. Se o raio de curvatura de um defeito não é nulo, há uma alta concentração na ponta, mas a tensão não será infinita. Quando a alta tensão passar a limite de resistência do material, a falha do material acontecerá. A fronteira da falha geralmente possui o raio de curvatura nulo, então, o defeito se muda como uma trinca. Por isso, um orifício retangular é uma trinca que contém 4 pontas da trinca (Fig. 12).



(a) trinca retangular com 4 pontas



(b) trinca côncava com uma ponta

Fig. 12 Exemplos de trincas.

Matematicamente um raio de curvatura nulo (ou seja, a ponta é muito fiada) implica que a derivada ao longo da superfície da trinca não se existe na ponta da trinca.

2.2 Teoria de equilíbrio de energia de Griffith e conceito de taxa de alívio de energia

Sabe-se pela física que a formação de qualquer nova superfície é precisa consumo de energia, cujo valor é dado por

$$\Delta R = \gamma_s \Delta s \quad 2.2$$

onde γ_s é a energia consumida por superfície unitária.

No 1921 Griffith realizou experimentos com tubos e bolas de vidro, nos quais produziu trincas de comprimento de 4 até 23 mm usando uma faca de vidro. Bombeou um líquido ao tubo ou bola até ele falha. Assim obteve a relação entre o comprimento da trinca e a tensão atuando perpendicularmente à trinca.

Teoricamente estabeleceu a relação de equilíbrio de energia. O modelo físico é mostrado como a Fig. 13.

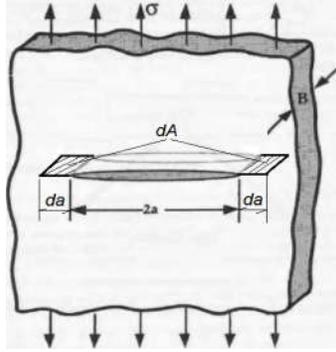


Fig. 13 Uma trinca passante de comprimento $2a$ num placa infinita submetida à uma tensão remoto.

Na dedução a tensão σ é considerada constante. O balanço de energia para um incremento de área fraturada dA sob condição de equilíbrio pode ser expressado por seguinte maneira:

$$\frac{dT}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = 0 \quad 2.3$$

ou

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{dW_s}{dA} \quad 2.4$$

onde T é a energia total, Π a energia potencial oferecida pela de deformação interna e pelas forças externas, e W_s a energia necessita para criar novas superfícies.

Griffith usou a análise de tensões obtida por Inglis (1913) e mostrou que

$$\Pi = \Pi_0 - \frac{\pi\sigma^2 a^2 B}{E} \quad 2.5$$

onde Π_0 é a energia potencial de uma placa sem trinca e B é a espessura da placa.

Assim temos

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{d}{dA} \left(\frac{\pi\sigma^2 a^2 B}{E} \right) = \frac{1}{2B} \frac{d}{da} \left(\frac{\pi\sigma^2 a^2 B}{E} \right) = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad 2.6$$

Facilmente sabemos que

$$W_s = 4aB\gamma_s = 2(2aB)\gamma_s = 2A\gamma_s \quad 2.7$$

Então temos

$$\frac{dW_s}{dA} = 2\gamma_s \quad 2.8$$

Pelas (2.4), (2.6) e (2.8), podemos obter a tensão para a fratura:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad 2.9$$

Geralmente anotamos

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} = 2\gamma_s \quad 2.10$$

se chama **a taxa de alívio de energia** devido a propagação de trinca. Ela é considerada como força motriz que tende empurrar a propagação de trinca.

No 1948 Orowan e Irwin propôs independentemente uma modificação da (2.10) para metais dúcteis:

$$G = 2w_f = 2(\gamma_s + \gamma_p) \quad 2.11$$

$$w_f = \gamma_s + \gamma_p \quad 2.12$$

onde γ_p é o trabalho de deformação plástica sobre unitária superfície fraturada e w_f é a energia de fratura consumida por unitária área ruptura, que representa a resistência à fratura do material e é um parâmetro mecânico do material, se chama **a resistência à propagação de trinca**. Fig. 14 mostra w_f de diferentes materiais.

Com essa modificação, a tensão para a fratura também será modificada como:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2Ew_f}{\pi a}} \quad 2.13$$

<p>(a) material frágil ideal $w_f = \gamma_s$</p>	<p>(b) material elasto-plástico $w_f = \gamma_s + \gamma_p$</p>	<p>(c) material frágil com trinca zigzag e ramificações $w_f = \gamma_s \left(\frac{\text{área real}}{\text{área projetada}} \right)$</p>

Fig. 14 Propagação de trinca em vários tipos de materiais, com as energias de fraturas correspondentes.

Exemplo 1.

Maximum Flaw Length Computation

A relatively large plate of a glass is subjected to a tensile stress of 40 MPa. If the specific surface energy and modulus of elasticity for this glass are 0.3 J/m² and 69 GPa, respectively, determine the maximum length of a surface flaw that is possible without fracture.

Solution

To solve this problem it is necessary to employ Equation 8.3. Rearrangement of this expression such that a is the dependent variable, and realizing that $\sigma = 40$ MPa, $\gamma_s = 0.3$ J/m², and $E = 69$ GPa, leads to

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2} \\
 &= \frac{(2)(69 \times 10^9 \text{ N/m}^2)(0.3 \text{ N/m})}{\pi(40 \times 10^6 \text{ N/m}^2)^2} \\
 &= 8.2 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.0082 \text{ mm} = 8.2 \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

Exercício 1:

Qual é a magnitude da tensão máxima que existe na ponta de um defeito interior tendo o raio de curvatura de $2,5 \times 10^{-4}$ mm e o tamanho do defeito de $2,5 \times 10^{-2}$ mm quando uma tensão de 170 MPa é aplicada?

BIBLIOGRAFIA BÁSICA (mínimo 03 títulos)

1. Anderson, T. L., Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications, 3rd Ed., CRC press (2005).
2. Rosa, E., Análise de Resistência Mecânica, UFSC (2004).
3. Budynas, Richard G.; Keith Nisbett, J. Elementos de Máquinas de Shigley - Projeto de Engenharia Mecânica - 8ª Ed. , Amgh Editora, 2011.
4. Collins, J.A., Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention, 2ª ed., John Wiley and Sons (1993).

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

1. Perez, N., Fracture mechanics, Prentice Hall, Inc. (2000).
2. Dowling, N.E., Mechanical behavior of materials - Engineering methods for deformation, fracture and fatigue, 2ª ed., CRC Press, (2000)
3. Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Metal Fatigue in Engineering, Wiley-Interscience; 2 edition, 2001.
4. John M. Barsom, Stanley T. Rolfe, Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics, 3th ed., Butterworth Heinemann, 1999.