

## TEXTO EXPLICATIVO: PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA

### Crescimento de Trincas por Fadiga

Em alguns casos, como as chapas finas rebitadas empregadas na fuselagem de aviões, a vida em fadiga é dominada pelo crescimento da trinca no Estágio II (Fig.1). Assim, existe a necessidade do desenvolvimento de uma modelagem para o fenômeno. Os modelos usuais levam em conta o Fator Intensidade de Tensão  $K$  da Mecânica da Fratura Elástica Linear, conforme já visto nesta disciplina, proposto inicialmente por Irwin ao estabelecer uma forma compacta para as expressões que descrevem o campo de tensões elásticas nas vizinhanças da ponta de uma trinca sujeita a carregamento estático.

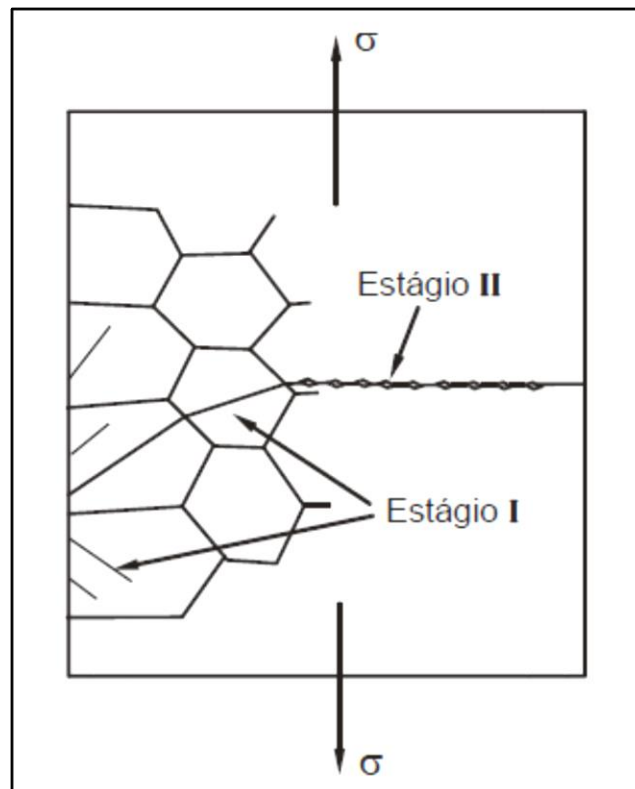


Figura 1 – Estágios da propagação de trinca por fadiga [Grosskreutz, 1971]..

A propagação da trinca por fadiga é descrita por meio da relação entre a taxa de crescimento  $da/dN$  e a variação do Fator Intensidade de Tensão num ciclo,  $\Delta K$ . Os gráficos log-log típicos  $da/dN$  versus  $\Delta K$  têm forma de sigmoide, como pode ser visto na Figura 2, e podem ser divididos em 3 regiões. A Região I mostra que cada curva se aproxima de um limiar  $\Delta K_{th}$  abaixo do qual a trinca não cresce. Convenciona-se determinar  $\Delta K_{th}$  como o valor de  $\Delta K$  correspondente à taxa de crescimento de  $10^{-10}$  m/ciclo e isto é feito por meio de um ensaio específico, em que a amplitude de carregamento é gradualmente reduzida, podendo levar vários dias para ser completado. A Região II corresponde ao regime estável de propagação, em que a taxa de crescimento da trinca é da ordem de  $10^{-8}$  a  $10^{-6}$  m/ciclo. A Região III é

associada ao crescimento rápido anterior à ruptura final, controlada por  $K_c$  (o valor crítico de  $K$ , relacionado à tenacidade à fratura do material). Uma parcela importante da vida é ocupada pelo regime subcrítico de crescimento da trinca (Região II) e o modelo clássico de Paris [Paris, 1963], dado pela equação (1), relaciona  $da/dN$  com  $\Delta K$  nesta região. Assim, as propriedades de resistência à propagação da trinca dos materiais são determinadas ao se ajustar os dados obtidos em ensaios de laboratório ao modelo matemático empregado para sua descrição que, no caso da equação (1), são representadas pelos valores de  $C$  e  $n$ . Uma das técnicas experimentais usuais consiste em impor carregamentos cíclicos estacionários ao corpo de prova com trinca, nos quais os valores máximo e mínimo da força aplicada são mantidos constantes, o que significa que o valor de  $\Delta K$  aumenta à medida que a trinca cresce.

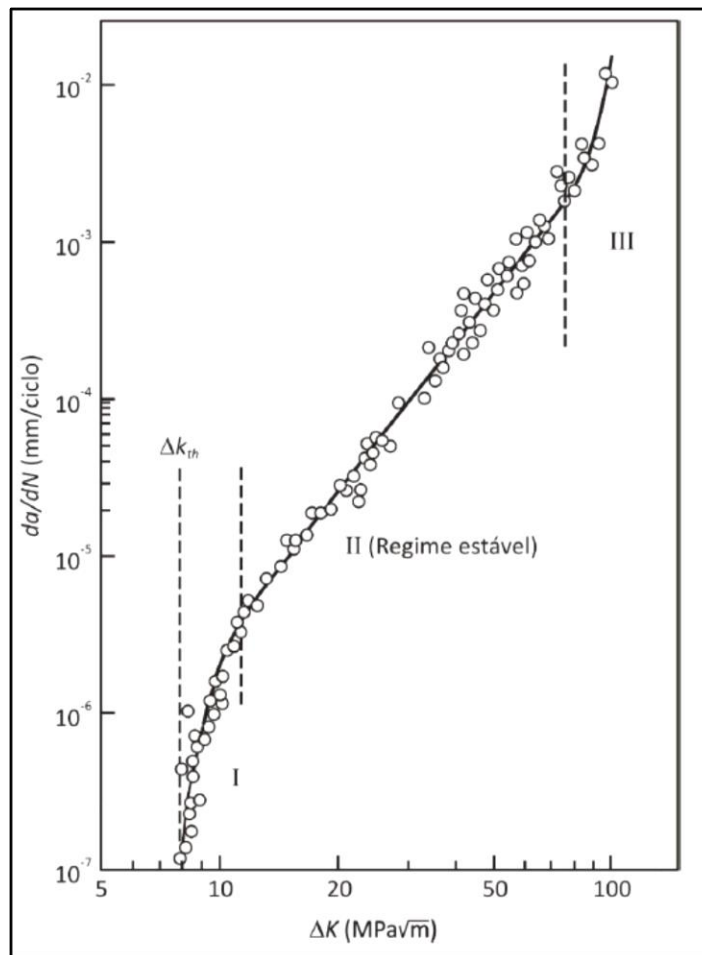


Figura 2 – Curva completa  $da/dN$ - $\Delta K$  em escala log-log. Os dados experimentais referem-se a um aço com  $LR = 627$  MPa, usado na fabricação de vasos de pressão [Dowling, 2018].

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (1)$$

Em um ensaio típico sob carregamento de amplitude constante, inicialmente é produzida uma pré-trinca no corpo de prova e em seguida o crescimento da trinca é monitorado registrando-se os pontos experimentais  $a$  versus  $N$  (comprimento da trinca pelo número de ciclos). As medições do tamanho da trinca podem ser feitas por métodos direto ou indiretos. A Figura 3 ilustra duas formas de se medir o comprimento da trinca: por método direto com emprego de uma lente e escala graduada (a) e pelo método da flexibilidade elástica (compliance) empregando-se um medidor de COD (*Crack Opening Displacement*) (b). Se um método indireto é adotado no ensaio, este deve ser previamente calibrado com medidas diretas num mesmo corpo de prova. A norma ASTM E647 inclui algumas recomendações a serem seguidas ao se adotar métodos indiretos como o da flexibilidade elástica ou queda de potencial elétrico.

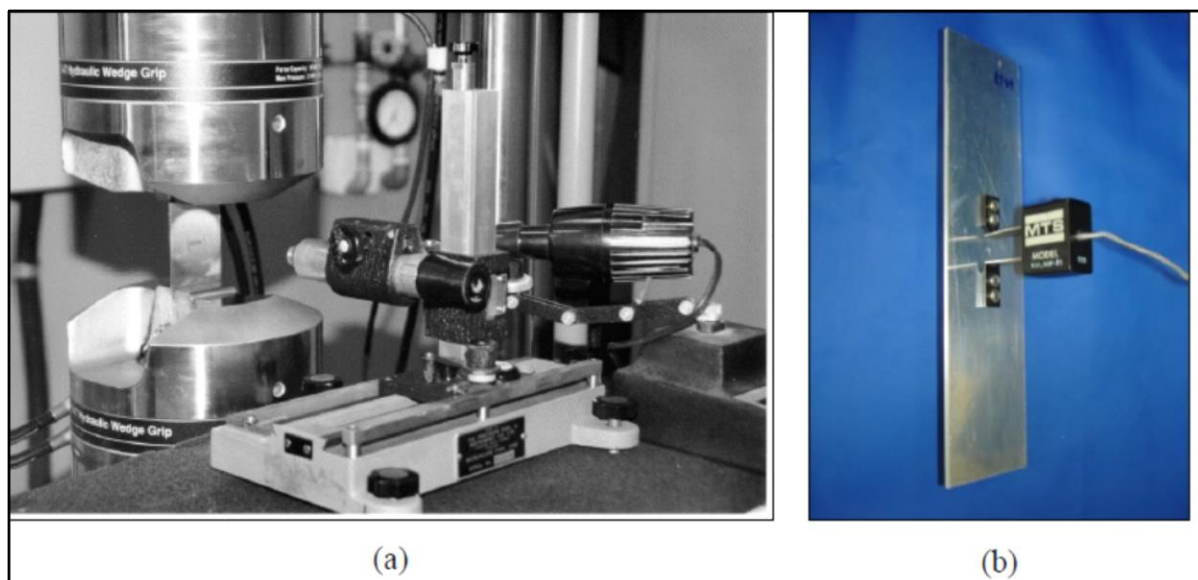


Figura 3 – Métodos de medição do comprimento da trinca: (a) por método direto com emprego de uma lente e escala graduada; (b) por medidas de flexibilidade elástica (compliance) empregando-se um *clip gage* ou COD (*Crack Opening Displacement*).

A partir dos pontos experimentais  $a$  versus  $N$  são calculados os valores de  $da/dN$  e  $\Delta K$ . Duas técnicas de derivação numérica podem ser adotadas para se calcular a taxa de crescimento da trinca: o método da secante e o método polinomial incremental, ambos descritos na norma ASTM E647. O segundo método envolve o ajuste de um polinômio de segundo grau a conjuntos de pontos sucessivos (3, 5, 7 ou 9 pontos), determinando-se a taxa da trinca pelo valor da derivada dessa parábola no ponto central de cada conjunto. O primeiro é o mais simples e consiste em determinar a inclinação da linha reta que conecta dois pontos experimentais adjacentes, como mostra a Figura 4. Assim,  $da/dN$  é dado pela equação (2) e o correspondente valor de  $\Delta K$  é calculado por meio da equação (3), onde  $a_{med}$  é o tamanho médio

da trinca, dado pela equação (4), e  $Y$  é um fator que depende da geometria do corpo de prova e do tamanho da trinca. Para os dados obtidos em um ensaio (tipicamente de 20 a 50 pontos experimentais) o cálculo dos valores de  $da/dN$  e  $\Delta K$  é facilmente automatizado em uma planilha. Além disso, fabricantes de máquinas de ensaio disponibilizam programas de computador que fazem isso em tempo real, permitindo acompanhar a evolução da curva  $da/dN-\Delta K$  durante o andamento do ensaio. Assim, para um dado material e determinada razão de carga  $R$ , os pontos  $da/dN$  versus  $\Delta K$  de diferentes ensaios na região de crescimento estável são representados por uma única reta na escala log-log, independentemente do nível de carregamento, tamanho da trinca e geometria da peça, ver Figura 5. Esta reta corresponde à equação (5), dada pelo logaritmo da equação (1).

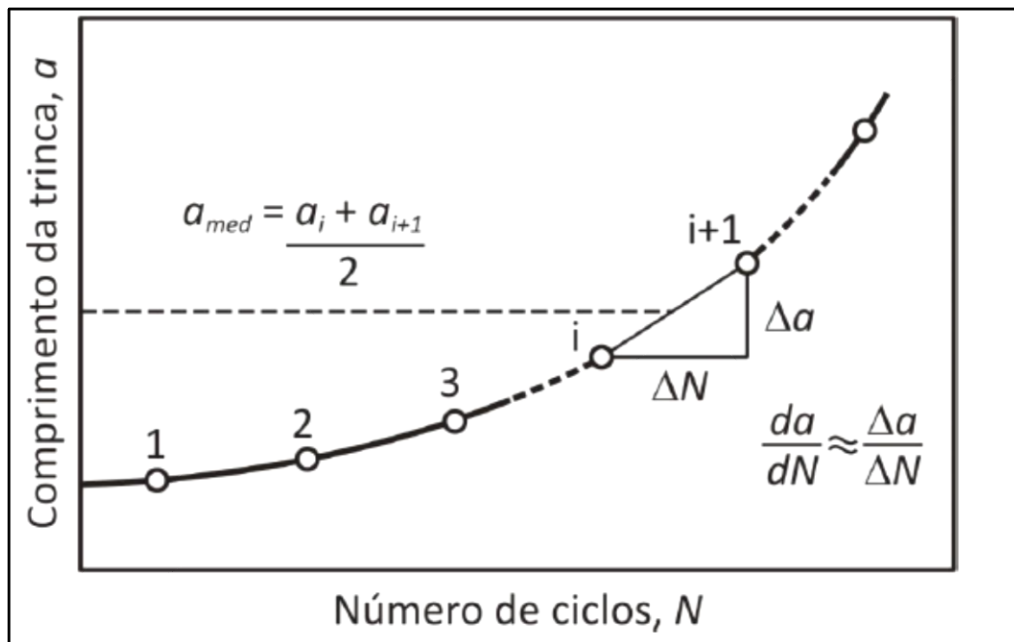


Figura 4- Cálculo da taxa de propagação da trinca pelo método da secante.

$$\left( \frac{da}{dN} \right) = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (2)$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cdot Y \sqrt{\pi a_{med}} = \sigma_{\max} (1 - R) \cdot Y \sqrt{\pi a_{med}} \quad (3)$$

$$a_{med} = \frac{a_i + a_{i+1}}{2} \quad (4)$$

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = \log(C) + n \cdot \log(\Delta K) \quad (5)$$

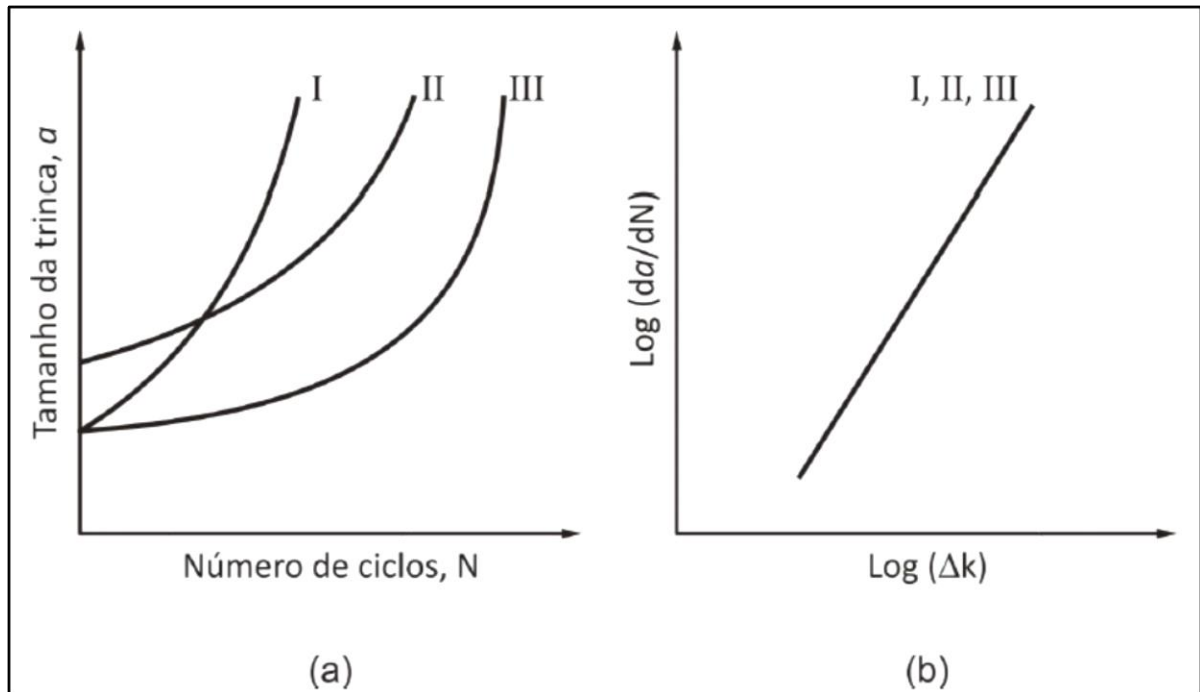


Figura 5 - Diferentes curvas  $a$  versus  $N$  do crescimento da trinca em regime estável em um mesmo material, com tamanhos de trinca e níveis de carregamento distintos, mas sob uma mesma razão de carga  $R$ , resultando em uma única reta  $da/dN-\Delta K$  em escala log-log.

Similarmente ao que ocorre com as curvas  $S/N$ , a razão de carga influencia os resultados do ensaio. Podem ser estabelecidas inúmeras funções “carga versus tempo” que, embora produzam um mesmo valor nominal de  $\Delta K$  na peça com trinca, resultam em diferentes valores de  $da/dN$ . Verifica-se que quanto maior o valor de  $R$ , maior o  $da/dN$  para um mesmo  $\Delta K$ , como mostra a Figura 6(a). Para explicar os efeitos de  $R$ , Elber (1971), partindo da observação de que as faces da trinca permanecem em contato durante parte do ciclo de carregamento, definiu os conceitos de fechamento da trinca e variação efetiva do Fator Intensidade de Tensão,  $\Delta K_{ef}$ . Embora o fechamento da trinca fosse inicialmente associado a tensões residuais devidas à deformação plástica à frente da trinca, os inúmeros estudos feitos desde então identificaram vários fatores que podem contribuir para este fenômeno, incluindo efeitos de rugosidade, detritos, desajuste e oxidação das superfícies de fratura. O valor de  $\Delta K_{ef}$  é dado pela equação (6), onde  $K_{max}$  é o Fator Intensidade de Tensão correspondente à carga máxima no ciclo de carregamento e  $K_{op}$  está relacionado à carga na qual a trinca começa a abrir.

Considerou-se então que a descrição da taxa de propagação da trinca em termos de  $\Delta K_{ef}$  (em lugar do valor nominal  $\Delta K$ ) representaria um comportamento intrínseco do material, o que conduziria a valores fixos para os parâmetros de ajuste C e n. A Figura 6(a) mostra conjuntos de pontos  $da/dN$ - $\Delta K$  obtidos a partir de ensaios com a liga de alumínio 2524 T3 feitos a 6 diferentes valores de R. Na Figura 6(b) esses mesmos ensaios são considerados em termos de  $\Delta K_{ef}$ , evidenciando que os resultados tendem a se sobrepor.

$$\Delta K_{ef} = K_{max} - K_{op} \quad (6)$$

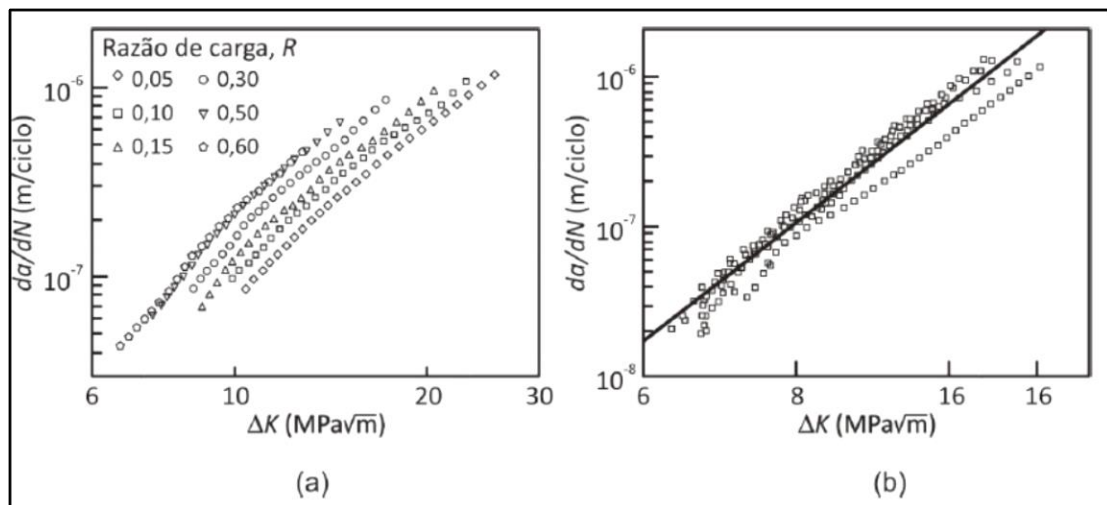


Figura 6 - Resultados de ensaios em 6 diferentes razões de carga com corpos de prova de alumínio 2524 T3: (a) pontos  $da/dN$ - $\Delta K$ ; (b) pontos  $da/dN$ - $\Delta K_{ef}$  [Baptista, 2012].

A forma mais comum de se avaliar o fechamento da trinca é por meio de medidas de COD (deslocamento de abertura da trinca), embora novas técnicas estejam sendo pesquisadas. A solução teórica para uma trinca afiada no centro de uma chapa de largura infinita mostra que o valor de COD é linearmente proporcional à tensão aplicada e ao comprimento da trinca. Experimentos feitos com placas entalhadas confirmam esta relação linear. Contudo, se um experimento semelhante é realizado numa placa contendo uma trinca de fadiga, o registro dos valores de  $\sigma$  versus COD conterá uma parte não-linear, conforme mostra a Figura 7 [Schijve, 1979]. Observa-se nesta figura um laço completo do registro “ $\sigma$  x COD” em um ciclo de carregamento. Embora a existência de uma parte não-linear seguida de uma parte linear seja facilmente observada, não é uma tarefa óbvia a determinação precisa do ponto A, no qual essa transição ocorre. O procedimento a ser adotado deve ser reproduzível e independente da interpretação de quem faz a medida. O método da *spline* linear-quadrática, consiste de uma rotina numérica automatizada que divide a curva em duas partes, modelando a primeira por uma equação de segundo grau, a segunda por uma expressão linear e impondo que ambas

tenham a mesma derivada no ponto em que se encontram. Toda a curva deve ser varrida, adotando sucessivos pontos como “ponto A tentativo” e calculando o erro total (diferença entre os valores experimentais e calculados) em cada tentativa. O ponto A é aquele que resulta no menor valor do erro.

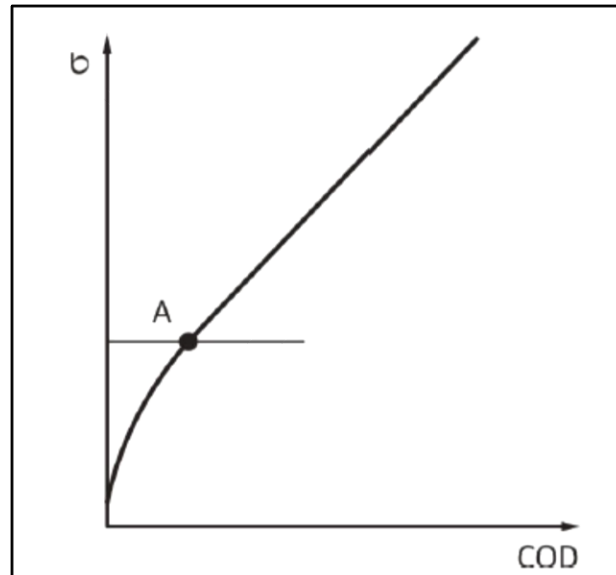


Figura 7 - Esquema de uma curva “ $\sigma$  x COD” (adaptado de [Schijve, 1979])

O Enfoque Unificado de Sadananda e Vasudevan [Sadananda, 2004] propõe a existência de duas forças motrizes,  $\Delta K$  e  $K_{max}$ , para o crescimento da trinca.

É importante ressaltar que a tentativa de descrever o crescimento de trincas por fadiga sob carregamentos de amplitude variável a partir de dados obtidos em ensaios com carregamento de amplitude constante não fornece bons resultados. Isto se deve aos chamados “efeitos de interação” entre a história do carregamento e a taxa de crescimento da trinca. **A ocorrência de picos ocasionais (ou seja, um ciclo de sobrecarga)** em carregamento que de outro modo teria amplitude constante é o tipo mais simples de carregamento de amplitude variável e pode resultar em curvas de crescimento da trinca como a mostrada na Figura 8. Apresenta-se também nesta figura um método para avaliar experimentalmente a extensão (em mm) e a duração (em ciclos) do retardo a partir da linha paralela à reta tangente à curva de crescimento da trinca imediatamente antes da aplicação da sobrecarga [Drew, 1988]. No caso específico do ensaio representado na Figura 8, **ciclos de sobrecarga** foram aplicados nos instantes em que o comprimento da trinca atingiu 14 mm e 20 mm, **causando reduções na taxa** de incremento da trinca [Baptista, 1993].

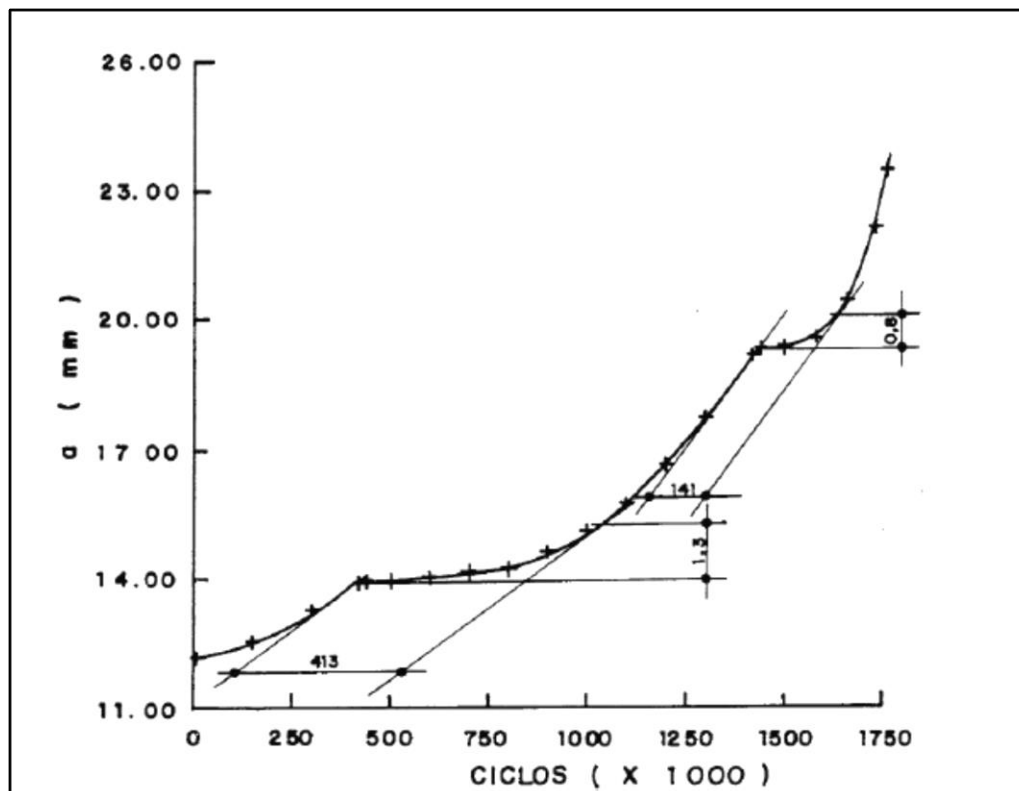


Figura 8 - Avaliação experimental do retardo causado por sobrecargas na curva de propagação da trinca por fadiga em um aço de baixo carbono com microestrutura bifásica [Baptista, 1993].

## Referências

- [Antunes, 2019] A.M.B.S. Antunes, C.A.R.P. Baptista, M.J.R. Barboza, A.L.M. Carvalho, N.V.V. Mogili. Effect of the interrupted aging heat treatment T6I4 on the tensile properties and fatigue resistance of AA7050 alloy. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v.41:319, 13p., 2019.
- [ASM, 1996] ASM Handbook, vol. 19: Fatigue and Fracture. Materials Park: ASM International, 1996, 2592p.
- [ASTM, 1974] Handbook of Fatigue Testing. Philadelphia: American Society for Testing and Materials (ASTM), 1974, 211p.
- [Baptista, 1993] C.A.R.P. Baptista. Estudo da Propagação da Trinca por Fadiga em um Aço de Baixo Carbono Submetido a Tratamentos Térmicos Intercríticos. Guaratinguetá: FEG/UNESP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), 1993, 114p.



- [Baptista, 2000] C.A.R.P. Baptista. Modelagem Preditiva do Comportamento de Trincas de Fadiga com Aplicação ao Titânio de Pureza Comercial. Lorena: FAENQUIL. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), 2000, 130p.
- [Baptista, 2004] C.A.R.P. Baptista, S.G. Schneider, E.B. Taddei, H.M. da Silva. Fatigue behavior of arc melted Ti-13Nb-13Zr alloy. *International Journal of Fatigue*, v.26, p.967-973, 2004.
- [Baptista, 2012] C.A.R.P. Baptista, A.M.L. Adib, M.A.S. Torres, V.A. Pastoukhov. Describing fatigue crack growth and load ratio effects in Al 2524 T3 with an enhanced exponential model. *Mechanics of Materials*, v.51, p.66-73, 2012.
- [Basinski, 1992] Z.S. Basinski, S.J. Bazinski. Fundamental aspects of low amplitude cyclic deformation in face-centered cubic crystals. *Progress in Materials Science*, v.36, p.89-148, 1992.
- [Boyer, 1986] H.E. Boyer. Atlas of Fatigue Curves. Metals Park: ASM International, 1986, 518p.
- [Branco, 2015] D.C. Branco. Sistema de Monitoramento de Vida em Fadiga de Aeronaves para Flexibilizar o Planejamento de Operação e Manutenção. São José dos Campos: ITA. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica), 2015, 80p.
- [Dowling, 2018] N.E. Dowling, S.L. Kampe, M.V. Kral. Mechanical Behavior of Materials. Hoboken: Pearson, 5th ed., 2018, 946p.
- [Drew, 1988] M.W. Drew, K.R.L. Thomson. The effect of overload cycles on fatigue crack propagation in two structural steels. *Engineering Fracture Mechanics*, v.30, p.579-593, 1988.
- [Grosskreutz, 1971] J.C. Grosskreutz. Fatigue Mechanisms in the Sub-Creep Range. In: *Metal Fatigue Damage - Mechanism, Detection, Avoidance and Repair*, ASTM STP 495. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, p.5-60, 1971.
- [Louat, 1993] N. Louat, K. Sadananda, M. Duesbery, A.K. Vasudevan. A theoretical evaluation of crack closure. *Metallurgical Transactions A*, v.24A, p.2225-2232, 1993.
- [Meggiolaro, 2003] On the dominant role of crack closure on fatigue crack growth modeling. *International Journal of Fatigue*, v.25, p.1157-1167, 2003.
- [Molent, 2011] L. Molent, S.A. Barter, R.J.H. Wanhill. The lead crack fatigue lifing framework. *International Journal of Fatigue*, v.33, p.323-331, 2011.

- [Newman, 2018] J.C. Newman Jr., K. Kota, T.E. Lacy. Fatigue and crack growth behavior in a titanium alloy under constant-amplitude and spectrum loading. *Engineering Fracture Mechanics*, v.187, p.211-224, 2018.
- [Paris, 1963] P. Paris, F. Erdogan. A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering (ASME)*, v.85, p.528-533, 1963.
- [Sadananda, 2001] K. Sadananda. Role of crack tip plasticity in fatigue crack growth. *Philosophical Magazine*, v.81, p.1283-1303, 2001.
- [Sadananda, 2004] K. Sadananda, A.K. Vasudevan. Crack tip driving forces and crack growth representation under fatigue. *International Journal of Fatigue*, v.26, p.39-47, 2004.
- [Schijve, 1979] J. Schijve. Four lectures on fatigue crack growth. *Engineering Fracture Mechanics*, v.2, p.167-221, 1979.
- [Schijve, 2004] J. Schijve. *Fatigue of Structures and Materials*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2004, 513p.
- [Zhang, 2019] J. Zhang, L. Muys, S. De Tender, N. Micone, S. Hertelé, W. De Waele. Constraint corrected cycle-by-cycle analysis of crack growth retardation under variable amplitude fatigue loading. *International Journal of Fatigue*, v.125, p.199-209, 2019.