

# ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO SUBCRÍTICA DE TRINCAS SOB CARREGAMENTO CÍCLICO <sup>(1)</sup>

Viktor Pastoukhov <sup>(2)</sup>

Carlos Antonio Reis Baptista <sup>(3)</sup>

## **Resumo**

As equações cinéticas convencionais para propagação subcrítica de trincas sob carregamento cíclico são analisadas. As constantes dessas equações, geralmente, não podem ser consideradas como características de material, por depender também das condições de carregamento, o que dificulta a utilização dos dados experimentais para avaliação da vida útil de componentes mecânicos. Um novo conceito foi proposto com a finalidade de diminuir o número de parâmetros necessários para caracterizar a resposta do material em um amplo espectro de carregamento cíclico e de facilitar a comparação da resistência dos materiais à propagação de trincas por fadiga. Neste conceito, a taxa de propagação da trinca é analisada em função de dois parâmetros independentes do carregamento cíclico, o que torna as constantes da equação cinética invariantes no espectro considerado. Para um grupo de materiais semelhantes a característica individual da performance pode ser reduzida a uma constante, considerando as outras como gerais para este grupo. A aplicação do modelo biparamétrico aos dados disponíveis sobre propagação de trincas em aços bifásicos e em ligas de alumínio mostrou que o erro na previsão da vida útil, embora tenha em geral aumentado em relação às equações individuais, esteve sempre inferior a 8 %. Os resultados obtidos permitem prever também o comportamento da trinca para qualquer outra combinação dos parâmetros de carregamento na faixa considerada e classificar os materiais pela resistência à propagação de trincas.

## **Palavras-Chave**

fadiga cíclica; propagação de trincas; equações cinéticas

---

(1) - trabalho a ser apresentado no 1º Seminário sobre Mecânica da Fratura, Ouro Preto, MG, 1 e 2 de junho de 1995.

(2) - Ph.D. em mecânica dos sólidos, Departamento de Engenharia de Materiais, FAENQUIL;

(3) - Mestre em engenharia mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais, FAENQUIL;

## Introdução

A propagação subcrítica de trincas sob carregamento periódico pode levar à falha os diferentes componentes mecânicos. Para analisar a integridade e a vida útil de elementos com trincas e outros concentradores de tensão, é necessário investigar a resistência dos materiais à propagação de trincas em várias condições de carregamento e de geometria.

O carregamento externo periódico de um elemento de estrutura mecânica pode ser uniaxial ou multiaxial, com forma de ciclo simples (máximo e mínimo único) ou mais complexa (múltiplos máximos e mínimos locais). No caso considerado básico, o ciclo simples de carregamento uniaxial é caracterizado por uma função periódica “carga versus tempo”. É bem conhecido que a forma dessa função (senoidal, linear em partes etc.), bem como a frequência numa certa faixa, não têm influência significativa no processo da propagação de trinca. Nesta situação, a vida útil é relacionada ao número de ciclos de carregamento e aos dois parâmetros principais do ciclo: carga máxima e carga mínima. Esses últimos, normalmente, são apresentados em termos da tensão nominal na direção da carga e determinam os parâmetros dependentes: tensão média (entre máxima e mínima do ciclo), amplitude de tensão (máxima menos mínima) e a razão de tensão (mínima por máxima).

As condições geométricas são apresentadas pela forma do elemento mecânico, pela orientação da trinca ou defeito em relação à direção de carregamento e pela sua posição no elemento. De um ponto de vista geral, o crescimento da trinca altera constantemente a geometria do corpo, o que resulta em incremento da taxa da propagação sem alterações de carregamento externo. Considerando elementos com trinca de modo I sob carregamento tração-tração ou tração-compressão aplicado distante de trinca, este incremento é sempre positivo. Em determinado momento, a aceleração da propagação subcrítica da trinca torna o processo instável, resultando na fratura global.

As observações experimentais mostram, com evidência, o efeito de dois parâmetros de carregamento na taxa da propagação de trinca. Comparando os processos subcríticos em corpos de prova semelhantes sob mesma carga mínima, a propagação mais rápida corresponde à carga máxima maior. Quando a carga máxima é igual, o aumento da carga mínima, diminuindo a amplitude de carregamento, diminui também a taxa de propagação da trinca [1].

Essas tendências claras estão parcialmente compensadas, quando comparar os processos com mesma amplitude da carga externa, pois o aumento da carga máxima, que acelera a propagação de trinca, é acompanhado pelo aumento da carga mínima, que tem o efeito contrário. Talvez por isso, a amplitude de carregamento tenha sido considerada o parâmetro controlador da propagação subcrítica da trinca.

No modelo mais conhecido proposto por Paris e Erdogan, a taxa da propagação da trinca é relacionada à amplitude de tensão nas vizinhanças da sua ponta representada pelo fator de intensidade de tensão [2]:

$$\frac{da}{dN} = CAK^n \quad (1)$$

onde “C”, “n” são consideradas como constantes de material. Estes parâmetros podem ser determinadas através de regressão linear de pontos experimentais em termos “logaritmo da taxa de propagação versus logaritmo da amplitude do fator de intensidade de tensão”.

Entretanto, a aplicação direta desta equação cinética mostra uma variação significativa dos dois parâmetros da regressão linear com carga média, para corpos de prova semelhantes e mesma amplitude de carregamento. Frequentemente, a variação de cada um reflete tendências contrárias, por exemplo, o aumento de fator “C”, que corresponde à taxa maior, é acompanhado pelo diminuição de índice “n”, que corresponde à taxa menor. A situação quando as constantes da equação cinética não representam características de material independentes do carregamento demanda desenvolver considerações adicionais com objetivo de comparar a performance de materiais e de aplicar os resultados de testes para previsão de vida útil sob outras combinações de parâmetros de carregamento.

A análise acoplada de variações em “C” e “n” mostra, em alguns casos, a dependência linear de “log C versus n”, implicando em cruzamentos próximos de linhas que correspondem a diferentes parâmetros de carregamento. Esta área, chamada “ponto pivot” pode ser interpretada como uma característica da resistência à propagação subcrítica de trincas [3]. Entretanto, este conceito e outras considerações análogas ainda não forneceram um método seguro e universal para classificação de materiais.

Considerando as necessidades práticas de se prever o processo sob uma outra combinação de parâmetros de carregamento a partir dos dados experimentais disponíveis, resolve-se parcialmente o problema através da simplificação da equação cinética (1). O método mais conhecido adota um valor típico de parâmetro “n” como constante prefixada (por exemplo  $n=2$  ou  $n=3$ ) em toda faixa considerada de carregamentos, para calcular os valores de “C” para todos testes e interpolá-los em função de um parâmetro investigado de carregamento [4]. Geralmente, o erro na previsão da vida útil aumenta em comparação com aplicação de “C” e “n” individuais e apresenta uma forte dependência do valor pre-fixado de “n”. Esta dependência será eliminada, ao se adotar a regressão linear acoplada para um conjunto de curvas experimentais, considerando “n” como um dos parâmetros de otimização além de massivo dos valores de “C” [5]. Nesta área ainda existe a necessidade de investigar o efeito de vários parâmetros de carregamento e de desenvolver métodos gerais para previsão do crescimento de trincas em elementos mecânicos com concentradores de tensão a partir dos ensaios padronizados.

As deficiências mencionadas são naturais também para outros modelos com equação cinética que relaciona a taxa de propagação da trinca a um só parâmetro de carregamento. Em geral, a influência de algum outro parâmetro independente desconsiderado no modelo pode causar variações significativas e direcionadas nas constantes da equação quando mesma é aplicada em situações diferentes de carregamento. Numerosas tentativas de levar em consideração, além da amplitude do fator de intensidade de tensão, a razão “R” de carga mínima/máxima foram analisadas [6]. Matematicamente, apesar de empregar hipóteses diferentes, a maioria destes modelos [7-15] apresenta a análise de parâmetro “C” da equação (1) em termos de “R”, assumindo a forma linear, polinomial ou fraccionária-linear da função  $C(R)$ , com uso ou não das propriedades estáticas de material, como limite de resistência, limite de escoamento, tenacidade à fratura etc. Nestes métodos é imposto um carácter da

dependência  $V(R)$  vinculado ao carácter da dependência  $V(\Delta K)$ , que traz restrições significativas na qualidade da aproximação dos dados experimentais. Para melhorar essa qualidade utilizam-se parâmetros de ajuste, normalmente prefixados e algumas vezes numerosos, o que complica a análise de dados experimentais e aplicações práticas.

O modelo [16] chegou, provavelmente, mais próximo à consideração de dois parâmetros independentes de carregamento, considerando a equação cinética

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^n (1-R)^{(m-1)n} \quad (2)$$

onde “ $m$ ” é uma constante prefixada de ajuste. Para obter um modelo geral, falta apenas assumir a variação independente dos índices dos parâmetros  $\Delta K$  e  $(1-R)$  ou de outros dois parâmetros independentes de carregamento e determinar corretamente estes índices e o fator “ $C$ ” para um material em amplo espectro de carregamento.

Os objetivos do presente trabalho são: desenvolver o modelo de propagação da trinca por carregamento cíclico baseado em equação cinética biparamétrica com constantes invariantes de carregamento e algoritmo para determinar essas constantes; generalizar o modelo para um grupo de materiais semelhantes, considerando apenas uma constante como característica individual de material; testar o método aplicando aos dados experimentais disponíveis.

### *Considerações gerais*

Considera-se o processo subcrítico de propagação da trinca de modo I em material elástico ideal sob carregamento cíclico simples de carga máxima e carga mínima fixas ( $F_{\max}=\text{cte}$ ;  $F_{\min}=\text{cte}$ ). Os valores máximo e mínimo de tensão em seção distante de trinca são:  $\sigma_{\max}=F_{\max}/(tw)$ ;  $\sigma_{\min}=F_{\min}/(tw)$ , onde “ $t$ ” é a espessura e “ $w$ ” é a largura da seção transversal.

A evolução de tensão nas vizinhanças da ponta da trinca em função de seu comprimento “ $a$ ” é descrito completamente por dois parâmetros fator intensidade de tensão correspondente a carga máxima

$$K_{\max}(a) = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} Y(a/w) \quad (3)$$

e fator de intensidade de tensão correspondente a carga mínima

$$K_{\min}(a) = \sigma_{\min} \sqrt{\pi a} Y(a/w) \quad (4)$$

onde  $Y(a/w)$  é uma função adimensional conhecida para cada tipo de corpo com trinca [17]. Para conveniência, podem ser utilizadas outras combinações de dois parâmetros com participação da amplitude de fator de intensidade de tensão

$$\Delta K(a) = K_{\max}(a) - K_{\min}(a) \quad (5)$$

de fator médio de intensidade de tensão

$$K_m = [K_{\max}(a) + K_{\min}(a)] / 2 \quad (6)$$

e de razão

$$R = K_{\min}(a) / K_{\max}(a) = F_{\min} / F_{\max} \quad (7)$$

### *Equação cinética biparamétrica*

A taxa de propagação de trinca é considerada como uma função de dois parâmetros de carregamento:

$$V = da/dN = G(f, h) \quad (8)$$

onde  $f, h$  são parâmetros não-idênticos de grupo

$$\{K_{\max}, K_{\min}, \Delta K, K_m, (1-R)\} \quad (9)$$

(o último foi modificado para evitar valores nulos que pode ser prejudicial ao cálculo).

Vamos esboçar uma forma simples não-linear da função  $G$  - forma potencial:

$$V = G(f, h) = C f^\alpha h^\beta \quad (10)$$

onde “ $\alpha$ ”, “ $\beta$ ”, “ $C$ ” são constantes de material independentes de carregamento.

### *Algoritmo para cálculo das constantes*

As constantes “ $\alpha$ ”, “ $\beta$ ”, “ $C$ ” serão determinadas minimizando o erro logarítmico na previsão da taxa de propagação para todos os pontos experimentais disponíveis de dois ou mais ensaios com regimes diferentes de carregamento. Considerando “ $k$ ” programas de carregamento, este erro em ponto número “ $i$ ” da curva número “ $j$ ”, que tem no total  $p(j)$ , pontos é

$$Er_{ij} = \log V_{ij} - \log C - \alpha \log f_{ij} - \beta \log g_{ij} \quad (11)$$

onde  $j=1, \dots, k$ ;  $i=1, \dots, p(j)$ . A funcional de erro total quadrático tem a forma:

$$Er_o = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{p(j)} Er_{ij}^2 \quad (12)$$

As condições de erro mínimo são determinadas pelo sistema de equações de Euler:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \text{Er}_o(\alpha, \beta, \gamma)}{\partial \alpha} = 0 \\ \frac{\partial \text{Er}_o(\alpha, \beta, \gamma)}{\partial \beta} = 0 \\ \frac{\partial \text{Er}_o(\alpha, \beta, \gamma)}{\partial \gamma} = 0 \end{array} \right. \quad (13)$$

onde  $\gamma = \log C$ .

No caso considerado as três equações do sistema (13) são lineares em respeito de “ $\alpha$ ”, “ $\beta$ ”, “ $\gamma$ ”, com coeficientes determinadas por expressões em termos de  $\log f_{ij}$ ,  $\log g_{ij}$  e  $\log V_{ij}$ , e o cálculo dos parâmetros procurados não apresenta dificuldades.

### **Generalização para grupo de materiais**

Para comparar a performance de “ $q$ ” materiais em um mesmo programa de ensaios, vamos considerar que “ $\alpha$ ” e “ $\beta$ ” são constantes gerais e apenas “ $C$ ” é relacionada a um material particular. A equação (10) toma a forma

$$V = C_m f^{\alpha} h^{\beta} \quad (14)$$

onde  $m = 1, \dots, q$  é o número de material.

A funcional de erro total quadrático neste caso é calculada através de somatório triplo, incluindo também a variação por índice “ $m$ ” de 1 até “ $q$ ”. Finalmente, a sistema de equações de Euler contém  $(q+2)$  equações lineares para  $(q+2)$  parâmetros:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \text{Er}_o(\alpha, \beta, \gamma_1, \dots, \gamma_q)}{\partial \alpha} = 0 \\ \frac{\partial \text{Er}_o(\alpha, \beta, \gamma_1, \dots, \gamma_q)}{\partial \beta} = 0 \\ \frac{\partial \text{Er}_o(\alpha, \beta, \gamma_1, \dots, \gamma_q)}{\partial \gamma_1} = 0 \\ \dots \dots \dots \\ \frac{\partial \text{Er}_o(\alpha, \beta, \gamma_1, \dots, \gamma_q)}{\partial \gamma_q} = 0 \end{array} \right. \quad (15)$$

onde  $\gamma_m = \log C_m$ ,  $m = 1, \dots, q$ .

## Exemplos de aplicação

O pacote de aplicativos para análise de dados experimentais e previsão de vida útil em elementos padronizados com base no algoritmo desenvolvido inclui:

1) conversão de dados “a versus N” em “da/dN versus N” através de regressão parabólica de grupos de 5 pontos com passo de um ponto, cálculo de derivadas em todos pontos de grupo, cálculo da média entre valores de derivadas disponíveis para cada ponto (de 1 até 5);

2) visualização de cada curva experimental em coordenadas “log V versus log  $\Delta K$ ” com opção de desconsiderar alguns pontos iniciais e finais que não correspondem à tendência linear (esta tendência é suposta não apenas pela equação (1), mas também e pela equação generalizada (14) qualquer seja escolha de funções (f, g) dentro da lista (9)); cálculo de parâmetros individuais da equação (1);

3) cálculo de parâmetros da equação (14) utilizando massivos de dados experimentais processados nos aplicativos 1 e 2; comparação das curvas “a versus N” calculadas através da equação (14) com pontos experimentais e com curvas individuais calculadas através da equação (1);

4) simulação do processo para outras combinações de tensão máxima, tensão mínima e tamanho inicial de trinca.

Os massivos disponíveis de dados experimentais para liga de alumínio [18-19] e para aço bifásico [20] correspondem ao caso de amplitude fixa da carga externa, que, para corpos de prova semelhantes, determina mesma história de  $\Delta K$  em todos ensaios. Nesta situação, é mais adequado escolher para modelagem da propagação de trinca os parâmetros que apresentam uma variação de ensaio para ensaio, por exemplo:  $f = K_{\max}$ ;  $g = (1-R)$ .

O cálculo para série de três ensaios com liga de alumínio 7475-T761 apresentados em [18] (amplitude de tensão 42,5 MPa para todos; razão de tensão: 0,5; 0,7; 0,84 respectivamente) determinou seguintes valores da equação (14) (que para caso particular de um material só é reduzida para forma (10)):  $\alpha=1,93$ ;  $\beta=0,79$ ;  $C=5,23 \cdot 10^{-11} \text{ m}^{1-n/2} \text{ MPa}^{-n}$  por ciclo. O erro em previsão de vida utilizando estes três constantes e equação geral fica na faixa de 6%, porém é maior do que erro da simulação individual com uso de 6 parâmetros da equação (1) dependentes de carregamento (1%). A comparação das curvas calculadas e experimentais é apresentada nas Figuras 1 e 2.

Boa qualidade da simulação com próximos valores das constantes foi obtida também para outra série de três ensaios com mesmo material e outra amplitude de tensão [19]. A consideração de duas série de ensaios como um massivo de dados fornece 3 constantes de material, que descrevem 6 curvas experimentais de ampla faixa de carregamentos cíclicos com erro dentro de 8%.

As maiores vantagens do modelo proposto foram observadas em análise de dados para 3 aços bifásicos [20], com diferentes frações volumétricas de martensita (23, 30, 51%; respectivamente condições 1, 2 e 3 do material) considerando três

ensaios com amplitude de tensão 55,6 MPa para cada (razão de tensão 0,2; 0,33; 0,5). A aplicação individual da equação (1) resulta em 18 parâmetros dependentes de carregamento que garante o erro da simulação dentro de 4 %. A equação (14) descreve este massivo de dados com erro até 7 % empregando apenas 5 parâmetros sendo 2 constantes absolutas de material ( $\alpha=1,57$ ;  $\beta=2,31$ ) e 3 constantes individuais relacionadas ao estado da microestrutura bifásica ( $C_1=2,12 \cdot 10^{-11}$ ;  $C_2=2,30 \cdot 10^{-11}$ ;  $C_3=2,02 \cdot 10^{-11} \text{ m}^{1-n/2} \text{ MPa}^{-n}$  por ciclo). O parâmetro  $C_m$  apresenta uma característica completa da resistência à propagação de trincas por fadiga cíclica relacionada à microestrutura, que permite facilmente comparar a performance dos materiais analisados. A aproximação deste parâmetro em função de fração volumétrica de martensita fornece a equação cinética para previsão da vida útil de elementos com trincas invariante da microestrutura e do carregamento cíclico. Os exemplos da simulação da propagação de trinca em comparação com dados experimentais são apresentadas nas Figuras 3 a 6.

Analisando em geral a margem de erro em previsão da vida útil pela equação (14) e pela equação (1), deve ser notado o carácter estatístico da fadiga cíclica e da propagação de trincas em particular. O espalhamento dos dados obtidos em condições semelhantes pode ser significativo mas este fato não prejudica a qualidade de aproximação com parâmetros individuais da equação (1). Pelo contrário, as constantes da equação (14) são invariantes das condições de carregamento e refletem as tendências gerais. Isso exige que essas tendências sejam reveladas de melhor maneira em cada curva experimental utilizada, aperfeiçoando a qualidade de leitura e diminuindo “ruído” de espalhamento em ensaio particular. Evidentemente, a repetição de ensaios em condições semelhantes e tratamento preliminar estatístico dos dados experimentais podem aumentar a confiança de previsões pelo modelo desenvolvido.

## **Conclusões**

Neste trabalho foi proposta a equação cinética bipolarométrica de propagação subcrítica de trinca sob carregamento cíclico simples uniaxial. O algoritmo desenvolvido permite calcular as constantes de material relacionadas à resistência à propagação de trincas e invariantes dos parâmetros de carregamento. Os testes com dados experimentais disponíveis mostram que este método fornece avaliações universais da vida útil com uma margem de erro apropriada. Esta margem pode ser reduzida mais se considerar as curvas médias estatísticas “a versus N” com repetição de ensaios para cada combinação dos parâmetros de carregamento. A aplicação do método para grupo de materiais permite comparar explicitamente a performance destes na faixa considerada de carregamentos.



## Referências

- [1] CHAWLA, K.K.; MEYERS, M.A. *Princípios de Metalurgia Mecânica*. São Paulo: Edgard Blucher, 1982. 505p.
- [2] PARIS, P.; ERDOGAN, F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *J. Basic Eng.*, *Trans. ASME*, p.459-464, 1967.
- [3] TANAKA, K.; MATSUOKA, S. A Tentative Explanation for Two Parameters, C and m, in Paris Equation of Fatigue Crack Growth. *Int. J. Fracture*, v.13, p.563-584, 1977.
- [4] LIU, H.W. A Review of Fatigue Crack Growth Analyses. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, v.16, p.91-108, 1991.
- [5] BAPTISTA, C.A.R.P.; PASTOUKHOV, V.A.; VOORWALD, H.J.C., Investigation of Fatigue Resistance of Dual-Phase Steels in Function of Microstructural Parameters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIALS, 7, 1995, The Hague (Holanda). *Book of Abstracts (a ser publicado)*.
- [6] GODEFROID, L.B.; BASTIAN, F.L. Efeito da Razão R entre Tensões na Propagação de Trinca de Fadiga em Ligas de Alumínio da Indústria Aeronáutica: Comparação entre Modelos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 11, 1991, São Paulo. *Anais*. p. 17-20.
- [7] FORMAN, R.G.; KEARNEY, V.E.; ENGLE, R.M. Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures. *J. Bas. Eng.*, v.89, p.459-464, 1967.
- [8] ELBER, W. Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension. *Eng. Frac. Mech.*, v.2, p.37-45, 1971.
- [9] SCHIJVE, J. Some Formulas for the Crack Opening Stress Level. *Eng. Fract. Mech.*, v.14, p.461-465, 1981.
- [10] De KONING, A.U. A Simple Crack Closure Model for Prediction of Fatigue Crack Growth Rates under Variable Amplitude Loading. ASTM, p.255-277, 1982. *ASTM STP 761*,
- [11] CHAND, S.; GARG, B.L. Crack Closure Studies under Constant Amplitude Loading. *Eng. Fract. Mech.*, v.18, p.333-347, 1983.
- [12] IBRAHIM, F.K. The Effects of Stress Ratio, Compressive Peak Stress and Maximum Stress Level on Fatigue Behavior of 2024-T3 Aluminium Alloy. *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, v.12, p.1-8, 1989.
- [13] NEWMAN, J.C. A Crack Opening Stress Equation for Fatigue Crack Growth. *Int. J. Fract.*, v.24, p.R131-R135, 1984.
- [14] NEWMAN, J.C. Prediction of Fatigue Crack Growth under Variable-Amplitude and Spectrum Loading using a Closure Model. ASTM, P.255-277, 1982. *ASTM-STP 761*
- [15] ARAD, S.; RADON, J.C.; CULVER, L.E. Design Against Fatigue Failure in Thermoplastics. *Eng. Fract. Mech.*, v.4,n.3, p.511-522, 1972.

- [16] WALKER, K. The Effect of Stress Ratio during Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminium. ASTM, p.1-14, 1970. *ASTM STP 462*,
- [17] MURAKAMI, Y., ed., *Stress Intensity Factors Handbook* . Oxford (Inglaterra): Pergamon Press, 1987. 2v.
- [18] PEREIRA, C.P.M.; PASTOUKHOV, V.A., VOORWALD, H.J.C., PERES, M.P. Análise da Acumulação de Dano e Propagação de Trincas por Fadiga em Liga de Alumínio 7475-T761. In: CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 11, 1994, Águas de São Pedro-SP, *Anais*. p.183-186.
- [19] CAMARGO, J.A.M.; VOORWALD, H.J.C.; BAPTISTA, C.A.R.P.; TORRES, M.A.S.; BARBOZA, M.J.R. Estudo da Taxa de Propagação de Trincas por Fadiga sobre uma Liga de Alumínio de Alta Resistência (7475-T761), Usada na Indústria Aeronáutica. In:CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 10, 1992, Águas de Lindóia-SP, *Anais*. p.586-589.
- [20] BAPTISTA, C.A.R.P., *Estudo da Propagação da Trinca por Fadiga em um Aço de Baixo Carbono Submetido a Tratamentos Térmicos Inter-críticos*. Guaratinguetá: FEG, 1993. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia , Unesp.

# **ANALYSIS OF RESISTANCE TO SUBCRITICAL CRACK PROPAGATION UNDER CYCLIC LOADING**

## ***Abstract***

The conventional kinetic equations of subcritical crack propagation under cyclic loading are analyzed. In general, their constants can't be considered as material parameters, because the significant dependence from load conditions is observed. In this situation, the application of experimental data to lifetime evaluation of structural elements and comparison of fatigue crack resistance of materials are related to methodological difficulties. The new concept is proposed in order to reduce a number of parameters necessary for characterization of material performance in wide range of loading conditions. The crack growth rate is analyzed in terms of both independent parameters of cyclic load and constant of kinetic equation are real invariants in considered range. For group of similar materials, the individual characteristic can be reduced to one constant, assuming others to be common for this group. The application of biparametric model to available experimental data for dual-phases steels and for aluminium alloys has shown some increasing of error in lifetime prediction in comparison with individual equations, however this error is still acceptable (under 8 per cent). The obtained results gives a prediction of crack behaviour under any other combination of loading parameters in considered range as well as the classification of materials with respect to fatigue crack resistance.

## ***Key-Words***

cyclic fatigue; crack propagation; kinetic equations

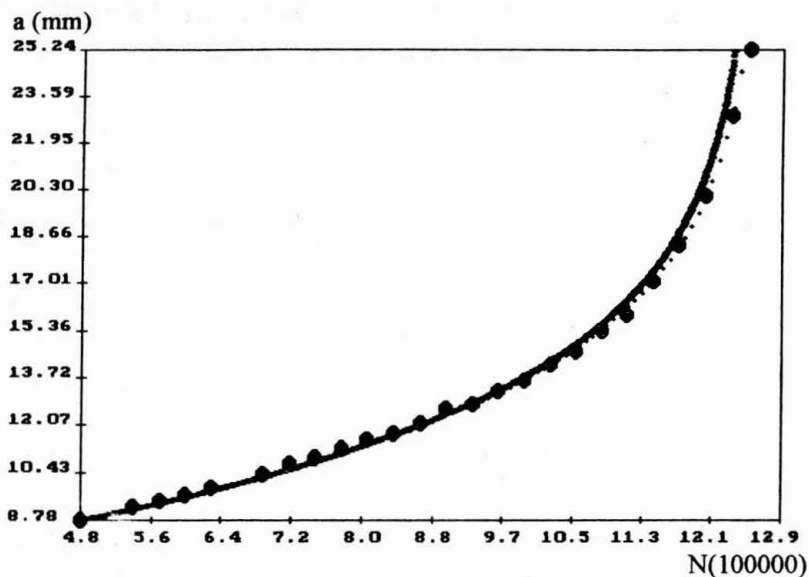


Figura 1. Simulação dos Dados Experimentais (Pontos Discretos) pela Equação (1) Individual (Curva Pontilhada) e pela Equação (10). Liga 7475-T761;  $R=0,5$ .

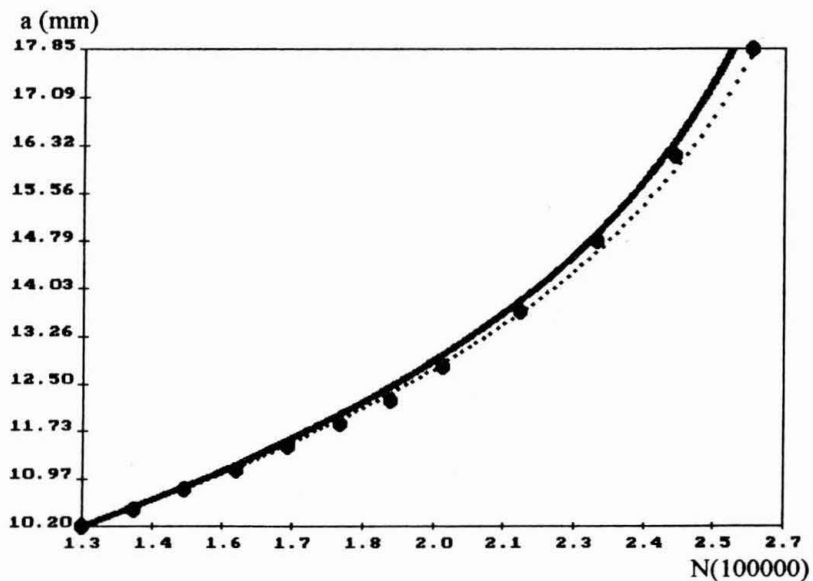


Figura 2. Simulação dos Dados Experimentais (Pontos Discretos) pela Equação (1) Individual (Curva Pontilhada) e pela Equação (10). Liga 7475-T761;  $R=0,84$ .

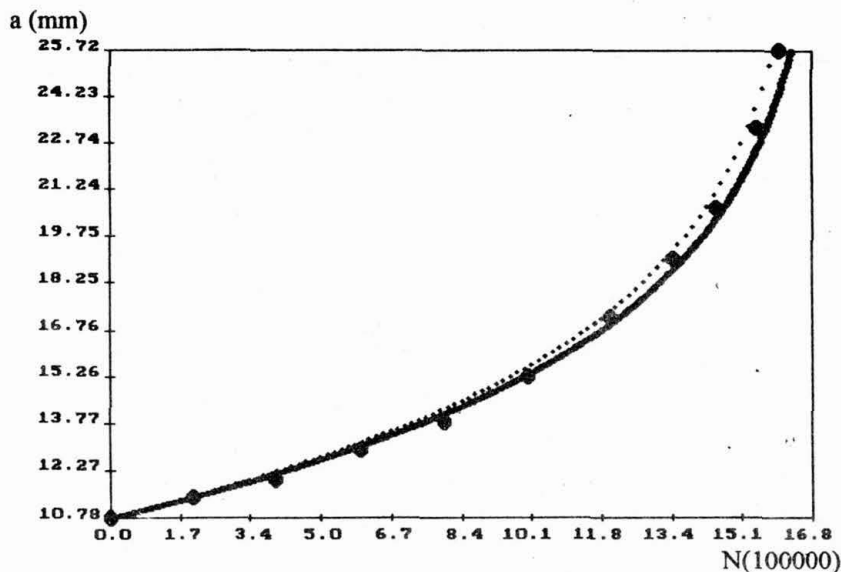


Figura 3. Simulação dos Dados Experimentais (Pontos Discretos) pela Equação (1) Individual (Curva Pontilhada) e pela Equação (14). Aço em Condição 1;  $R=0,2$ .

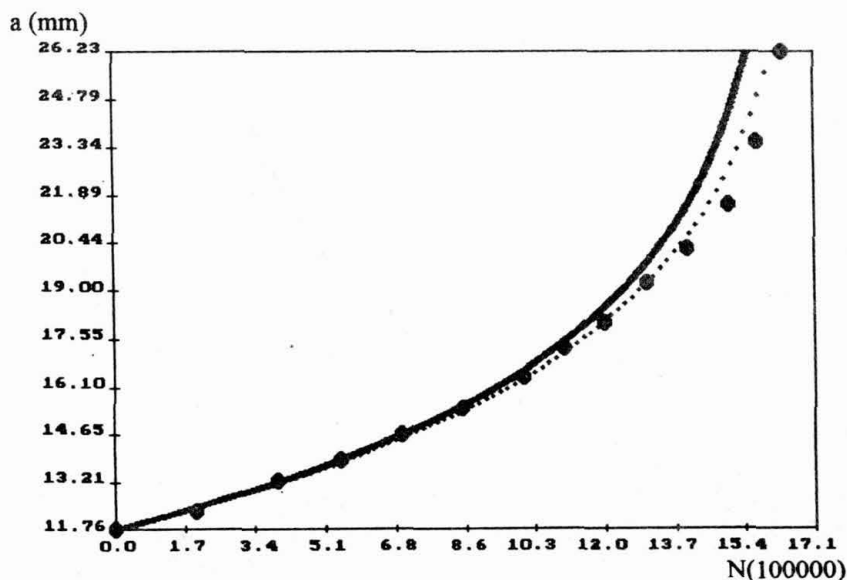


Figura 4. Simulação dos Dados Experimentais (Pontos Discretos) pela Equação (1) Individual (Curva Pontilhada) e pela Equação (14). Aço em Condição 1;  $R=0,33$ .

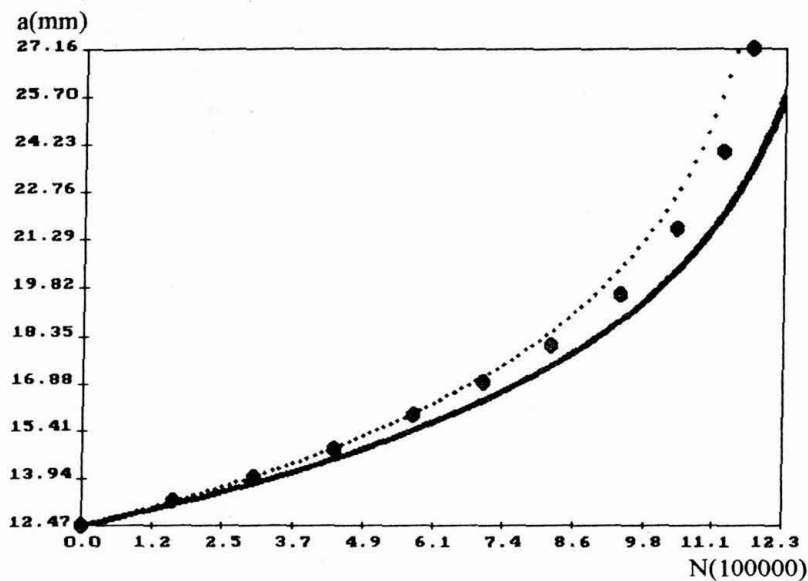


Figura 5. Simulação dos Dados Experimentais (Pontos Discretos) pela Equação (1) Individual (Curva Pontilhada) e pela Equação (14). Aço em Condição 2;  $R=0,33$ .

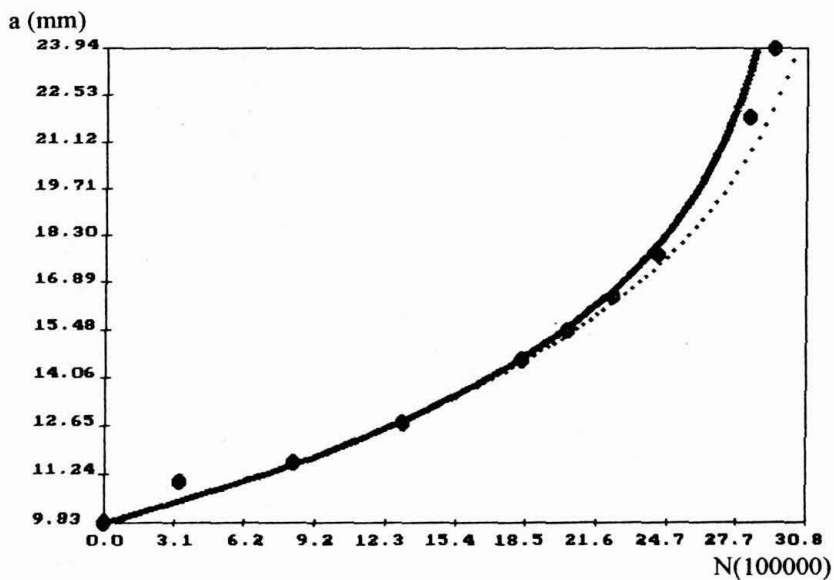


Figura 6. Simulação dos Dados Experimentais (Pontos Discretos) pela Equação (1) Individual (Curva Pontilhada) e pela Equação (14). Aço em Condição 3;  $R=0,5$ .