

# PROJETO MECÂNICO DE ESTRUTURAS TRINCADAS UTILIZANDO CURVAS EFETIVAS DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA <sup>1</sup>

Jorge Alberto Rodríguez Durán<sup>2</sup>

## Resumo

Neste trabalho se faz uma avaliação do uso do  $\Delta K_{\text{eff}}$  para projeto mecânico a fadiga utilizando as definições de Elber ( $\Delta K_{\text{eff}} = K_{\text{máx}} - K_{\text{op}}$ ) e de Donald ( $\Delta K_{\text{eff}} = K_{\text{máx}} - 2/\pi K_{\text{op}}$ ). Durán et al. mediram cargas de abertura em diferentes tamanhos de trinca em ensaios de propagação sob  $\Delta K_{\text{ap}}$  crescente e decrescente em espécimes de aço SAE-4340. Alguns pontos experimentais do referido trabalho (principalmente da fase I e sob  $\Delta K_{\text{ap}}$  crescente), são utilizados agora como referência para avaliar o uso do  $\Delta K_{\text{eff}}$  em projeto. Dispõe-se então das curvas  $da/dN \times \Delta K_{\text{ap}}$  e  $da/dN \times \Delta K_{\text{eff}}$ , esta última por Elber e Donald. Para avaliar o uso das curvas aplicada e efetiva no projeto simula-se um problema no qual se conhecem o  $\Delta K_{\text{ap}}$  e o  $\Delta K_{\text{eff}}$  solicitantes e se deseja determinar a curva de tamanho de trinca (a) versus o número de ciclos (N) a partir das curvas aplicada e efetiva de propagação do material. É possível também comparar as curvas  $a \times N$  experimentais e as obtidas integrando as curvas de propagação. Os resultados confirmam que o projeto baseado no  $\Delta K_{\text{eff}}$  é menos conservativo em  $\Delta K$ 's baixos. A situação se inverte quando o  $\Delta K_{\text{ap}}$  cresce pois a relação  $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K_{\text{ap}}$  aumenta, diminuindo o fechamento das trincas, o que provoca previsões não conservativas quando se utiliza a curva efetiva de propagação em  $\Delta K$ 's altos. Em qualquer caso, e também como esperado já que retorna um  $\Delta K_{\text{eff}}$  menor, a correção  $2/\pi$  de Donald fornece resultados mais conservativos quando comparados com as previsões baseadas no  $\Delta K_{\text{eff}}$  de Elber.

**Palavras-chave:** Propagação de trincas por fadiga; Fechamento de trincas.

## MECHANICAL DESIGN OF CRACKED STRUCTURES USING EFFECTIVE FATIGUE CRACK PROPAGATION CURVES

### Abstract

This work shows an evaluation on the use  $\Delta K_{\text{eff}}$  for mechanical design, using Elber's ( $\Delta K_{\text{eff}} = K_{\text{máx}} - K_{\text{op}}$ ) and Donald's ( $\Delta K_{\text{eff}} = K_{\text{máx}} - 2/\pi K_{\text{op}}$ ) definitions. Durán et al. measured opening loads in different crack sizes during fatigue crack propagation (FCP) tests under  $\Delta K_{\text{ap}}$  increasing and decreasing in SAE-4340 steel specimens. Some experimental points of that paper (mainly from phase I and under  $\Delta K_{\text{ap}}$  increasing) are now used as reference to test the use of  $\Delta K_{\text{eff}}$  in design. Curves  $da/dN \times \Delta K_{\text{ap}}$  and  $da/dN \times \Delta K_{\text{eff}}$ , the last one obtained by Elber and Donald, are then available. To evaluate the use of the applied and effective curves in design, a problem where the  $\Delta K_{\text{ap}}$  and  $\Delta K_{\text{eff}}$  solicitants are known and it is necessary to find the crack size (a) versus number of cycles (N) curve from effective FCP curve of material, was simulated. It is possible too to compare the experimental  $a \times N$  curves and those from the integration of FCP curves. The results confirm that design based on crack closure is less conservative in low  $\Delta K$ 's. The situation is reversed when the  $\Delta K_{\text{ap}}$  grows. In this case the ratio  $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K_{\text{ap}}$  grows and the crack closure diminishes. It causes not conservative previsions when the effective FCP curve is used. Anyway, and to as waited therefore it returns a lesser  $\Delta K_{\text{eff}}$ , it was realize that Donald correction gives results more conservatives when compare with the  $\Delta K_{\text{eff}}$  of Elber.

**Key-words:** Fatigue crack propagation; Crack closure.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup> D.Sc., Professor Adjunto da Universidade Federal Fluminense

## 1 INTRODUÇÃO

Peças e estruturas solicitadas por cargas de serviço de caráter cíclico são propensas à formação de trincas por fadiga. Muitas vezes as trincas estão presentes antes mesmo de submeter a peça ao carregamento cíclico, como resultado de próprio processo de fabricação. O crescimento subcrítico das trincas durante a vida útil dos elementos ocorre principalmente por dois mecanismos: fadiga e corrosão sob tensão. A resistência residual das peças trincadas diminui como resultado deste crescimento o que pode provocar a fratura catastrófica sob tensões nominais pequenas em comparação com as tensões de projeto.

A maior parte da vida de uma trinca propagando por fadiga ocorre sob tensões nominais predominantemente elásticas. Por este motivo as zonas plásticas que sempre acompanham estas trincas são pequenas em relação às dimensões da peça, o que possibilita utilizar a gama do fator de intensidade das tensões (elástico)  $\Delta K$  para descrever o campo de tensões na frente da trinca. Paris<sup>(1)</sup> foi o primeiro a utilizar o  $\Delta K$  para descrever o crescimento das trincas por fadiga. Em geral a relação  $da/dN \times \Delta K$  (taxa de propagação  $da/dN$  versus  $\Delta K$ ) apresenta comportamentos diferentes dependendo do valor do  $\Delta K$  aplicado. Numa fase de crescimento contínuo e uniforme, geralmente denominada fase II, a seguinte equação ajusta relativamente bem os dados experimentais:

$$da/dN = C \Delta K^m \quad (1)$$

O “C” e o “m” são constantes de ajuste, onde o “C” é o intercepto com o eixo das ordenadas, enquanto que “m” é a inclinação da reta obtida uma vez que os dados sejam representados em escala log-log. Dados experimentais típicos ( $da/dN \times \Delta K$ ) de materiais estruturais costumam apresentar um desvio de linearidade observada na fase II (em escala log-log), para baixas e altas taxas  $da/dN$ . Para modelar estes comportamentos e com o objetivo de utilizar as curvas de propagação para fins de projeto, foram desenvolvidas uma série de relações semi-empíricas que levam em consideração os efeitos de outras variáveis, tais como a carga média (que pode ser considerada através do parâmetro  $R = K_{\min}/K_{\max}$ ) e o limiar de propagação  $\Delta K_{th}$ .

Em 1970, Elber<sup>(2)</sup> propôs que apenas uma parte da gama do  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ , que ele chamou de efetiva ( $\Delta K_{eff} = K_{\max} - K_{op}$ ), onde  $K_{op}$  é o fator  $K$  que permite a abertura completa das faces da trinca, seria responsável pela propagação. O fenômeno ficou conhecido como fechamento das trincas por fadiga. Elber baseou suas observações no fato de que a flexibilidade de espécimes utilizados nos ensaios de propagação não permanecia constante quando se variava a carga aplicada  $P$  entre  $P_{\min}$  e  $P_{\max}$ . O fechamento elberiano foi explicado pela existência de um volume de material plasticamente deformado em tração nas faces posteriores da trinca, daí o nome de fechamento induzido por plasticidade.

O fechamento elberiano é mais evidente na região próxima ao limiar  $\Delta K_{th}$  (fase I). Vários autores, e.g. Durán e Castro,<sup>(3)</sup> reportam um aumento da relação  $K_{op}/K_{\max}$  em ensaios onde o  $\Delta K$  foi sendo gradativamente diminuído (de acordo com as recomendações da ASTM E647-99) a partir da fase II e até bem perto do limiar  $\Delta K_{th}$ . É precisamente na fase I (devido aos baixos valores de  $da/dN$ ) que ocorre uma parcela importante do processo de trincamento das estruturas reais. O projeto a fadiga por equações que não ajustam bem os dados de propagação na fase I pode ser extremamente conservativo, como demonstrado por Medeiros e Durán.<sup>(4)</sup>

Donald e Paris<sup>(5)</sup> mostraram que o  $K_{op}$  não deve ser calculado apenas com a trinca completamente aberta. Eles não questionaram a existência do fechamento, mas afirmaram que o verdadeiro  $\Delta K_{eff}$  deveria ser maior do que o proposto por Elber. Para isto fizeram testes de propagação em ligas de alumínio e mostraram que o  $\Delta K_{eff}$  (Elber)  $< \Delta K_{app}$  ( $R = 0.7$ ) sendo o  $\Delta K_{eff}$  obtido por diferentes métodos de determinação da  $P_{op}$  para um mesmo conjunto de dados carga-deslocamento ( $P \times \delta$ ). Em  $R = 0.7$ ,  $\Delta K_{app}$  constitui uma referência do verdadeiro  $\Delta K_{eff}$  atuante, toda vez que o fechamento não existe para esse valor de  $R$ . No modelo de fechamento parcial<sup>(6)</sup> o  $K$  de abertura diminui para  $(2/\pi) K_{op} \approx 0.64 K_{op}$ :

$$\Delta K_{eff} = K_{m\acute{a}x} - \frac{2}{\pi} K_{op} \quad (2)$$

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Ensaio de Propagação

Seguindo a mesma idéia de Durán e Castro,<sup>(3)</sup> os ensaios de fadiga aqui referenciados, sob amplitude de carga  $\Delta P$  constante,<sup>(7)</sup> foram conduzidos de forma a aumentar e diminuir o  $\Delta K_{ap}$  por repetidas vezes, com o objetivo de medir as cargas de abertura em diferentes tamanhos de trinca e em espécimes de espessuras diferentes. Os ensaios foram realizados em um sistema servo hidráulico Instron, de laço fechado, com uma capacidade de carga de até **100 KN**. Para o presente estudo se utilizam apenas alguns pontos experimentais de um dos ensaios com  $\Delta K_{ap}$  crescente ( $\Delta P_{exp} = 15.4 \text{ KN}$ ). A largura e espessura do espécime de aço **SAE 4340** foram **B = 24 mm** e **W = 55 mm**, respectivamente. O corpo de prova utilizado foi do tipo compacto de tração na forma de disco **DC(T)**. A razão de carga baixa **R = 0.05**, garante a presença do fechamento induzido por plasticidade, principalmente na região do limiar de propagação.

### 2.2 Medição das Cargas de Abertura $P_{op}$

A diferença de Durán e Castro<sup>(3)</sup> em que as cargas de abertura foram determinadas em ciclos de carga de deformação adquiridos sem interromper os ensaios, em Durán, Castro e Meggiolaro<sup>(7)</sup> as cargas de abertura foram medidas em diferentes tamanhos de trinca (ensaio detido) e submetendo os espécimes a uma rampa de carregamento entre  $P_{min}$  e  $P_{m\acute{a}x}$  com uma taxa aproximada de **0.04 KN/s**. O número de pares de pontos (carga x deformação) adquiridos em cada um destes ensaios, somando as rampas de subida e descida, chegou a **6000**. O sinal de carga foi adquirido diretamente da célula de carga do sistema Instron enquanto que o sinal de deformação era proveniente de um strain gage colado na face traseira do espécime e cuja excitação e leituras foram feitas utilizando as facilidades do sistema Instron. Para determinar as cargas de abertura a partir destes dados foi utilizado o procedimento recomendado na **ASTM E647**. Foi desenvolvido um pequeno código em Maple<sup>TM</sup> 8.0 para implementar este procedimento. A Figura 1 mostra uma das curvas típicas de carga (**P [KN]**) x deformação da face traseira ( $\epsilon$  [ $\mu s$ ]), bem como a curva carga x mudança de flexibilidade (resultado da implementação computacional do método) que permite, para este conjunto de dados, definir a carga de abertura  $P_{op}$ . É notável a mudança na inclinação da curva da esquerda da figura 1 no que

constitui um claro indicador da presença do fechamento induzido por plasticidade. A reta vertical na curva da direita da figura 1 corresponde ao valor de 2 %. De acordo com o método, uma mudança de flexibilidade maior do que 2 % identifica o  $P_{op}$  no eixo das ordenadas. Para o exemplo mostrado  $P_{op} = 8.3 \text{ KN}$ .

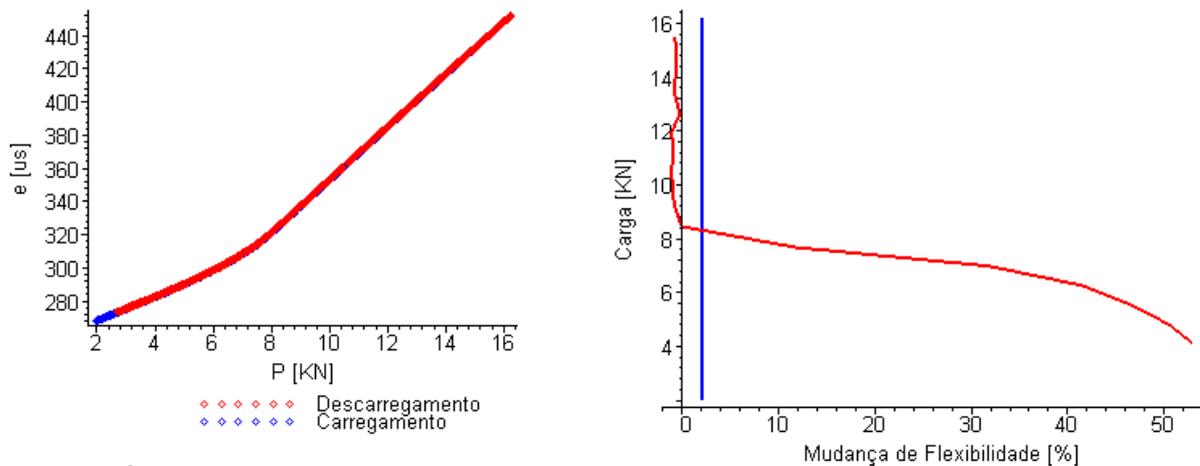


Figura 1 – À esquerda uma das curvas típicas de carga ( $P$  [KN]) x deformação da face traseira ( $\epsilon$  [ $\mu\text{s}$ ]), obtidas durante o carregamento e descarregamento. À direita a curva carga x mudança de flexibilidade que permite definir a carga de abertura  $P_{op}$ .

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Curvas de Propagação e Ajuste dos Dados

A equação 3 mostra a expressão do  $\Delta K_{ap}$  para espécimes do tipo **DC(T)**,<sup>(8)</sup> bem como a função de geometria  $f(a/w)$ . Esta equação é necessária para conduzir os ensaios de propagação, para transformar os dados  $a \times N$  em  $da/dN \times \Delta K_{ap}$  e também na simulação do crescimento sob  $\Delta P$  constante.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B W^{1/2}} f(a/W) \quad (3)$$

$$f(a/W) = \frac{2 + a/W}{(1 - a/W)^{3/2}} \left[ \begin{array}{l} 0.7 + 4.8(a/W) - 11.58(a/W)^2 + .. \\ .. + 11.43(a/W)^3 - 4.08(a/W)^4 \end{array} \right]$$

A Figura 2 mostra os pontos experimentais  $da/dN \times \Delta K_{ap}$ ,  $da/dN \times \Delta K_{eff\_Elber}$  e  $da/dN \times \Delta K_{eff\_Donald}$ , juntamente com ajustes do tipo Paris  $da/dN = C \Delta K^m$ , que na figura são chamados de Potências. Como dito anteriormente, o  $\Delta K_{eff\_Elber} = K_{m\acute{a}x} - K_{op}$  e  $\Delta K_{eff\_Donald} = K_{m\acute{a}x} - 2/\pi K_{op}$ . Equações do tipo Paris não ajustam bem os dados na fase I, mas os coeficientes de correlação mostrados na figura 2 se consideram satisfatórios para os objetivos do presente trabalho.

#### 3.2 Projeto à Fadiga de um DC(T) Trincado a Partir das Curvas Aplicadas e Efetivas de Propagação

Com o objetivo de avaliar o uso das curvas efetivas de propagação no projeto e compará-las com o tradicional projeto baseado nas curvas aplicadas, considera-se uma situação de um espécime **DC(T)** de aço **SAE-4340** com uma trinca inicial (por

fadiga) de tamanho  $a_i = 18.7 \text{ mm}$ . Deseja-se determinar a curva  $a \times N$  desta trinca submetida a certa gama de  $K$  inicial ( $\Delta K_i$ ). O tamanho final da trinca  $a_f = 24.5 \text{ mm}$  foi determinado pelos pontos experimentais disponíveis. O  $\Delta P$  deverá ser mantido constante, mas não pode ser o mesmo para o projeto baseado nas diferentes curvas da Figura 2. Ele deve ser escolhido de forma a garantir o  $\Delta K_i$  desejado para o tamanho inicial de trinca. Para o projeto baseado na curva  $da/dN \times \Delta K_{ap}$  como  $\Delta K_{inicial} = \Delta K_{ap\_inicial}$  o  $\Delta P = \Delta P_{exp} = 15.4 \text{ KN}$ . Já para o projeto baseado nas curvas efetivas, é preciso definir a gama de carga  $\Delta P$  que produz o  $\Delta K_{eff\_inicial}$ . A Tabela 1 resume estas idéias.

**Tabela 1** – Resumo dos  $\Delta P$ 's utilizados para a simulação do crescimento da trinca por fadiga no espécime **DC(T)** bem como as gamas  $\Delta K_{inicial}$  para cada curva de projeto.

Curva	$\Delta P$ [KN]	$\Delta K_i$ [MPa.m <sup>1/2</sup> ]
$da/dN \times \Delta K_{ap}$	15.4	17.3
$da/dN \times \Delta K_{eff\_Elber}$	5.7	6.4
$da/dN \times \Delta K_{eff\_Donald}$	9.4	10.6

Para calcular a curva  $a \times N$  “basta” integrar a curva de propagação do material:

$$N = \frac{1}{C} \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{\Delta K^m} \quad (4)$$

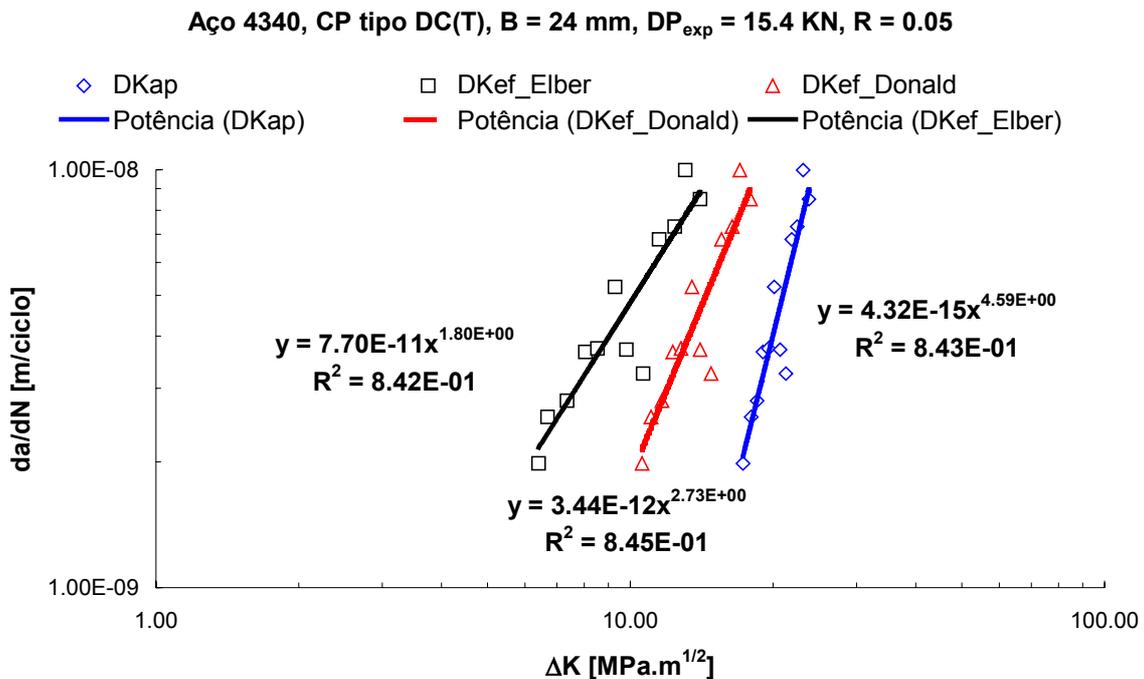
Logicamente que não é trivial integrar simbolicamente com relação ao tamanho da trinca a equação (4), sobretudo depois de substituir o  $\Delta K$  de (3) em (4). Um pequeno código também desenvolvido em Maple™ 8.0 permite efetuar a integração de forma numérica para cada um dos ajustes da Figura 2 e obter as curvas mostradas na Figura 3.

#### 4 DISCUSSÃO

É claro que o projeto de peças trincadas baseado no  $\Delta K_{eff}$  não é comum na prática, pois o comportamento do material se expressa geralmente mediante as curvas  $da/dN \times \Delta K_{ap}$ . A maioria das regras de propagação sob amplitude constante ignora o efeito do fechamento. O objetivo dessas regras é descrever as três fases das curvas  $da/dN \times \Delta K_{ap}$  e os efeitos das cargas médias usando um único conjunto de parâmetros. No entanto, o fechamento existe e o projeto convencional gera previsões conservativas.

Surge então uma pergunta óbvia: por que não medir curvas  $da/dN \times \Delta K_{eff}$  e aplicá-las em projeto? Primeiramente deve-se mencionar que não existe consenso quanto à técnica experimental mais acurada para medir as cargas de abertura. Porém um dos principais motivos está no fato de que para que o  $\Delta K_{eff}$  e não o  $\Delta K_{ap}$  seja a força motriz da propagação deve-se demonstrar que as cargas de abertura  $P_{op}$ , e conseqüentemente, o  $K_{op}$  independem de fatores não embutidos no conceito de  $\Delta K$  como as tensões nominais ( $\sigma_n$ ), o tamanho da trinca ( $a$ ) e a função de geometria ( $f(a/w)$ ). O fechamento das trincas é causado pela reação de tensões elásticas atuantes no ligamento residual da peça sobre o envelope de deformações residuais trativas que envolve as faces da trinca. Como este envelope depende do tamanho

da zona plástica  $z_p$  e esta pela sua vez depende do estado de tensões (tensão plana ou deformação plana), das tensões aplicadas e do limite de escoamento do material  $z_p = f(K_{m\acute{a}x}/S_E)^2$ ,  $\Delta K_{eff}$  deve variar com a espessura da peça, com o nível de tensões nominais atuantes e com o as propriedades do material. Obviamente que a espessura e o tipo de material não são fatores considerados no conceito de  $\Delta K$  e conseqüentemente utilizar o  $\Delta K_{eff}$  para projeto significa invalidar a aplicabilidade da mecânica da fratura linear elástica à propagação de trincas por fadiga.

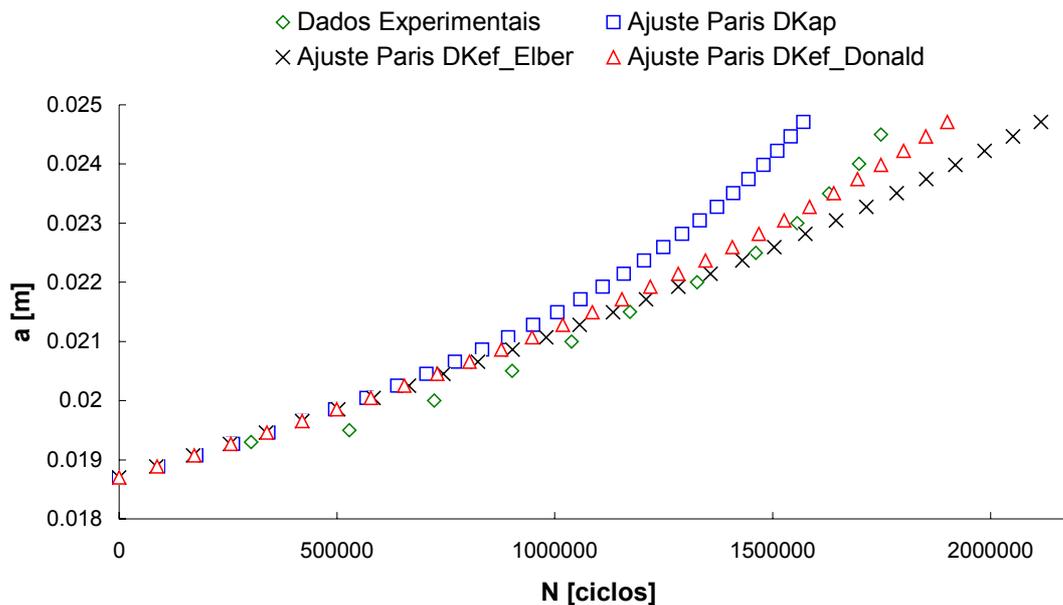


**Figura 2** – Alguns pontos experimentais da curva de propagação  $da/dN \times \Delta K_{ap}$  do aço **SAE-4340**, os correspondentes pontos  $da/dN \times \Delta K_{eff}$  como resultado da medição das cargas de abertura e os respectivos ajustes do tipo Paris.<sup>(7)</sup>

Numa tentativa experimental de demonstrar a impossibilidade da utilização do  $\Delta K_{eff}$  no projeto mecânico devido à sua dependência com fatores tais como a espessura do material e o tamanho de trinca, Durán et. al.,<sup>(7)</sup> efetuaram testes de  $\Delta K_{ap}$  crescente e decrescente em espécimes de duas espessuras bem diferentes (**3.2 mm** e **24 mm**), medindo as taxas de propagação  $da/dN$  em 4 comprimentos de trinca diferentes porém sob o mesmo  $\Delta K_{ap}$  (o **R = 0.05** foi mantido fixo nestes ensaios). Os resultados mostraram uma melhor correlação entre os dados  $da/dN \times \Delta K_{ap}$ , como mostrado na Figura 4.

No presente trabalho supõe-se que o  $\Delta K_{eff}$  controle a propagação e que as curvas  $da/dN \times \Delta K_{ap}$  e  $da/dN \times \Delta K_{eff}$  estejam disponíveis para projeto. Como se simula o crescimento de uma trinca por fadiga no próprio espécime que deu origem às curvas de propagação, além de ter a calibração do  $\Delta K$  (equação (2)), tem-se a curva  $a \times N$  experimental que serve de referência para avaliar o uso do  $\Delta K_{eff}$  (por Elber e por Donald) no projeto à fadiga.

Aço 4340, CP tipo DC(T), B = 24 mm,  $\Delta P_{exp} = 15.4$  KN, R = 0.05



**Figura 3** – Curvas  $a \times N$  experimentais e de projeto do crescimento de uma trinca em um espécime DC(T) sob  $\Delta P$  constante.

As curvas  $a \times N$  da Figura 3 mostram que, para o caso em estudo, o projeto considerando o fechamento é menos conservativo que a metodologia tradicional para qualquer tamanho de trinca. A taxa de crescimento do  $\Delta K_{eff}$  com relação ao  $\Delta K_{ap}$  é maior do que 1, especificamente 1.2 para o  $\Delta K_{eff\_Elber}$  e 1.14 para o  $\Delta K_{eff\_Donald}$ , como mostrado na Figura 5, o que implica em uma maior inclinação da curva  $da/dN \times \Delta K_{ap}$  com o conseguinte aumento na previsão das taxas de propagação mostrado na Figura 2. O aumento do  $\Delta K_{eff}$ , à medida que a trinca cresce, se explica pela diminuição da relação  $P_{op}/P_{máx}$  (onde  $P_{máx}$  é a carga máxima).

Como a diminuição do fechamento (aumento do  $\Delta K_{eff}$ ) quando a trinca cresce não ocorre com a mesma taxa que o aumento do  $\Delta K_{ap}$ , a inclinação das curvas  $da/dN \times \Delta K_{eff}$  será menor que a inclinação dos dados experimentais e o projeto baseado no  $\Delta K_{eff}$  passa a ser não conservativo acima dos 22.5 mm de tamanho de trinca para o fechamento por Elber e dos 23.5 mm para o fechamento usando a correção  $2/\pi$  de Donald.

Aço 4340, CP tipo DC(T), R = 0.05

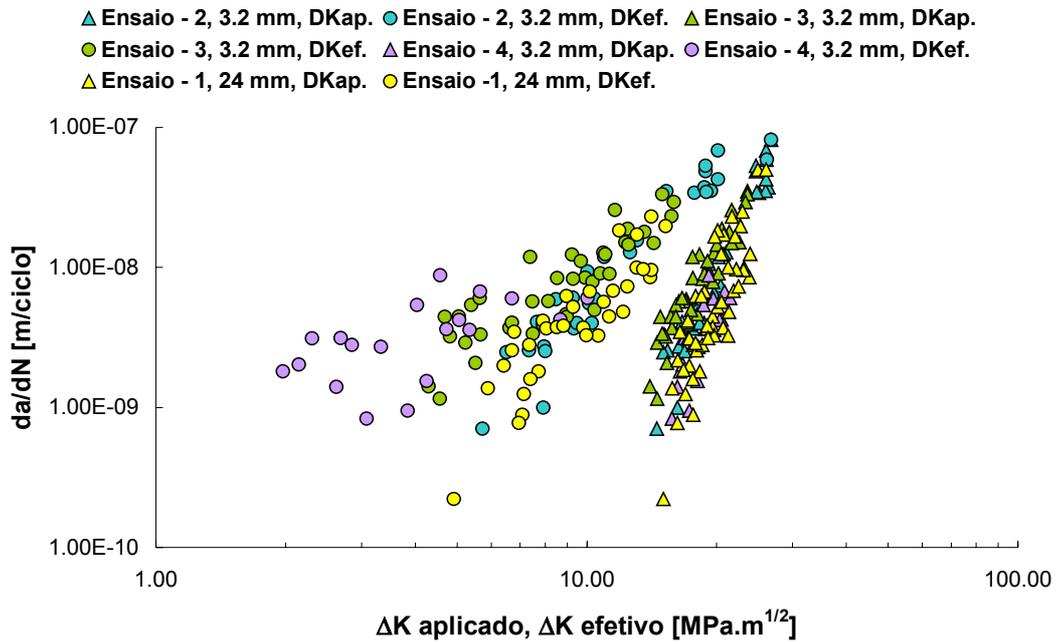


Figura 4 – Testes de  $\Delta K_{ap}$  crescente e decrescente (logo um mesmo  $\Delta K_{ap}$  foi aplicado em quatro comprimentos de trinca diferentes) em CP's do tipo DC(T) de aço SAE-4340 com duas espessuras diferentes (3.2 mm e 24 mm).

Aço 4340, CP tipo DC(T), B = 24 mm, DP<sub>exp</sub> = 15.4 KN, R = 0.05

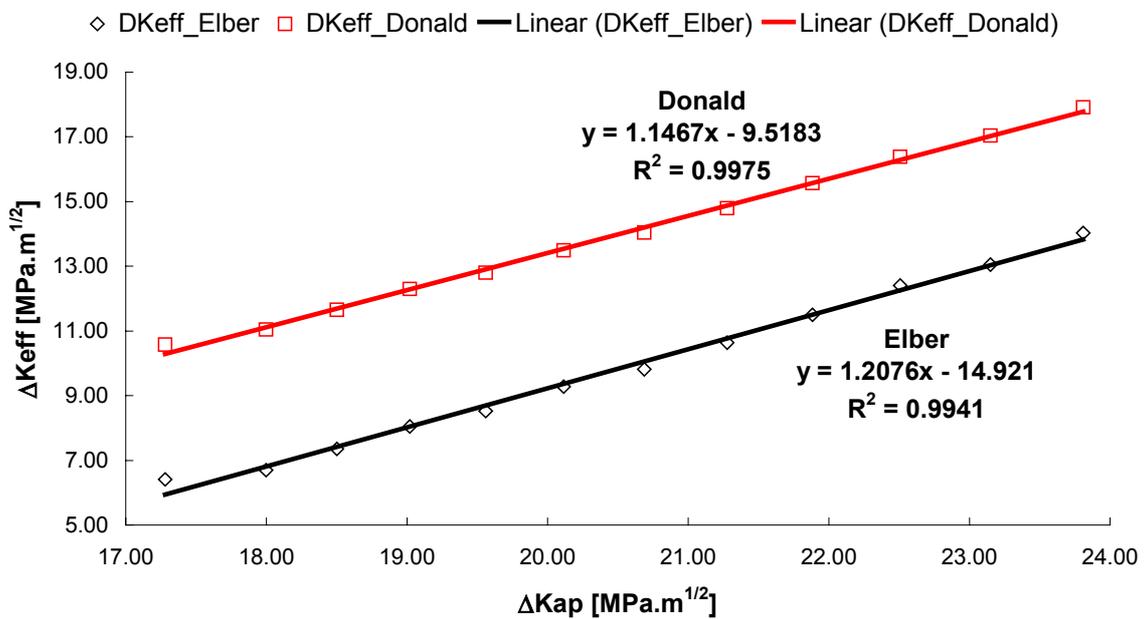


Figura 5 – Relação entre o  $\Delta K_{eff}$  por Elber e por Donald e o  $\Delta K_{ap}$  mostrando maiores taxas de crescimento dos  $\Delta K_{eff}$ 's.

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados do presente trabalho (que devem ser considerados válidos apenas para aços 4340 com espessura de 24 mm e  $17.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} < \Delta K_{ap} < 23.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) não se recomenda o projeto baseado em curvas efetivas de propagação sob pena de cometer erros não conservativos nas previsões. Os testes indicam uma diminuição do fechamento com o aumento do  $\Delta K_{ap}$  que começa a gerar curvas  $a \times N$  à direita dos dados experimentais para tamanhos de trinca altos, o que é inadmissível do ponto de vista da segurança dos projetos de engenharia. Devido a que a hipótese do fechamento parcial de Donald e Paris considera que cargas abaixo de  $P_{op}$  também contribuem para a propagação, isto é, prevê um  $\Delta K_{eff}$  maior, os resultados são mais conservativos quando comparados com as previsões baseadas no  $\Delta K_{eff}$  de Elber. A correção  $2/\pi$ , no entanto, continua a prever taxas menores do que as experimentais para  $\Delta K$ 's altos, ou seja, mantém o não conservadorismo das previsões baseadas no  $\Delta K_{eff}$ .

## REFERÊNCIAS

- 1 Paris, P.C. (1962). "The growth of fatigue cracks due to variations in load". *Ph.D. Dissertation*, Lehigh University.
- 2 Elber, W. (1970). "Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension". *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 2, pp. 37-45.
- 3 Durán, J.R. Castro, J.T.P. (2002). "Variação do  $\Delta K_{efetivo}$  na Propagação de Trincas por Fadiga". In: *Anais da 6ta Conferencia sobre Tecnologia de Equipamentos*, (COTEQ 2002) [CDRom], Salvador, Bahia, 19 – 21 de agosto de 2002.
- 4 Medeiros, N., Durán, J.R. (2006). "Cálculo da Vida Residual de Estruturas Trincadas Mediante Ajuste das Curvas de Propagação de Trincas por Fadiga". In: *Anais do 61 Congresso Anual Internacional da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais* [em CD], Rio de Janeiro, R.J., Julho 2006.
- 5 Donald K. Paris P.C. (1999). "An evaluation of  $\Delta K_{eff}$  estimation procedures on 6061-T6 and 2024-T3 aluminum alloys". *International Journal of Fatigue*, vol. 21, S47–S57.
- 6 PARIS, P.C. TADA, H. DONALD, J.K. (1999). "Service load fatigue damage – a historical perspective". *International Journal of Fatigue*, vol 21, pp. S35 – S46.
- 7 Durán, J.R. Castro, J.T.P., Meggiolaro, M.A. (2007). "Estudo da variação das cargas de abertura em tensão plana e deformação plana". Trabalho em preparação.
- 8 Newman, J.C. Jr. (1981). "Stress Intensity Factors and Crack Opening Displacements for Round Compact Specimens". *International Journal of Fracture*, vol. 17, No. 6, pp. 567-578.