

# QUESTIONAMENTO SOBRE IMPORTÂNCIA DA CARGA DE ABERTURA NA PROPAGAÇÃO DA TRINCA DE FADIGA\*

Samuel Elias Ferreira<sup>1</sup>  
Jaime Tupiassú Pinho de Castro<sup>2</sup>  
Marco Antonio Meggiolaro<sup>3</sup>

## Resumo

Após identificar o fechamento de trincas de fadiga sob cargas trativas, Elber propôs que a sua propagação seria controlada pela gama efetiva do fator de intensidade de tensão  $\Delta K_{ef} = K_{max} - K_{ab}$ . Essa hipótese, que pode explicar muitas peculiaridades do comportamento das trincas sob cargas de serviço, foi logo aceita pela comunidade científica e é até hoje muito usada na previsão da vida residual de peças trincadas. Porém, o fechamento Elberiano não pode explicar vários outros efeitos tais como retardos ou paradas de trincas após sobrecargas sob R alto e  $K_{min} > K_{ab}$ ; trincas que crescem com taxas constantes sob  $\Delta K_{ef}$  muito variável; ou trincas paradas sob uma dada razão de carga R que retomam o crescimento ao reduzir R sem alterar  $\Delta K_{ef}$ . Pela grande relevância desse tema para aplicações práticas, esse trabalho reanalisa os principais argumentos e evidências experimentais que suportam ou questionam o fechamento Elberiano como a causa primária dos efeitos de sequência na taxa de propagação de trincas por fadiga, e levanta questões que deveriam ser seriamente discutidas por todos aqueles que necessitam fazer previsões de vida residual.

**Palavras-chave:** Carga de abertura; Taxa de propagação; Carregamento de serviço.

## QUESTION ABOUT THE SIGNIFICANCE OF THE OPENING LOAD FOR FATIGUE CRACK GROWTH

### Abstract

After identifying fatigue crack closure under tensile loads, Elber proposed that fatigue crack growth is controlled by the effective stress intensity range  $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$ . This assumption, which can explain many peculiarities of the FCG behavior under service loads, was readily accepted by the research community and is still used to predict residual lives of cracked structures. However, Elber's closure cannot explain many other effects such as crack retardation or arrest after overloads under high R and  $K_{min} > K$ ; cracks that grow with constant rates under highly variable  $\Delta K_{eff}$ ; or cracks arrested at a given R that can restart to grow at a lower R without changing its  $\Delta K_{eff}$ . Due to the major importance of this topic for practical applications, this work revisits the main arguments and evidences that support or question plasticity-induced crack closure as the primary cause for sequence effects in FCG, and raises some questions that should be properly discussed by all those that need to make residual life predictions.

**Keywords:** Opening loads; Fatigue crack growth behavior; Service loads; Sequence effects.

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Doutorando, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, R.J., Brasil. Engenheiro de Equipamentos, Petrobras, Macaé, R.J., Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Ph.D., Professor, Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Ph.D., Professor, Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Pesquisas desenvolvidas desde a década de 1960 têm demonstrado que cargas de amplitude variável causam efeitos de memória nas taxas de propagação de trincas por fadiga da/dN que não podem ser descritos apenas pelos parâmetros da carga como  $\Delta K$  e R, onde  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$  é a gama do fator de intensidade de tensões (FIT),  $R = K_{\min}/K_{\max}$ , e  $K_{\max}$  e  $K_{\min}$  são os valores máximos e mínimos do FIT. Em geral sobrecargas induzem retardos e subcargas causam acelerações nas taxas da/dN subsequentes [1], as quais indicam mudanças na força motriz da trinca após esses eventos. Diversos mecanismos foram propostos para explicar esses efeitos de memória em da/dN, dentre eles cegamento da ponta da trinca, tensões residuais à frente da ponta da trinca, fechamento induzido por plasticidade (ou fechamento Elberiano), fechamento induzido por rugosidade, e bifurcação da ponta da trinca [2]. Skorupa [1,2] fez uma extensa revisão da literatura até 1999 listando centenas de trabalhos sobre efeitos de memória em da/dN [1], e discutiu qualitativamente os mecanismos que os induzem [2]. A autora conclui que os mecanismos relacionados à deformação plástica próximo da ponta da trinca, como o fechamento induzido por plasticidade e as tensões residuais, permitem uma análise qualitativa da maioria dos dados medidos sob cargas de amplitude variável. Mas, segundo ela, não só nem sempre há uma relação quantitativa entre as taxas da/dN e a gama efetiva do FIT  $\Delta K_{\text{ef}} = K_{\max} - K_{\text{ab}}$ , onde  $K_{\text{ab}}$  é a carga de abertura da trinca de fadiga, como as razões para algumas discrepâncias sistemáticas não seriam claras.

Apesar disso, o fechamento induzido por plasticidade ou Elberiano [3-4] continua sendo o mecanismo utilizado pela maior parte da comunidade científica para explicar os efeitos de sequência em da/dN, embora existam diversas evidências que não são modeláveis por ele [5-10]. De fato, programas clássicos de previsão de vida residual sob cargas reais de serviço como o NASGRO e o AFGROW [11-12], muito usados na indústria aeronáutica, são baseados em  $\Delta K_{\text{ef}}$ . Como esse tema tem grande importância prática, o principal objetivo desse trabalho é rever os argumentos e evidências experimentais que suportam ou refutam a ideia de que o fechamento induzido por plasticidade é a causa primária dos efeitos de sequência nas taxas de crescimento de trincas por fadiga sob cargas de amplitude variável.

## 2 A IDENTIFICAÇÃO DO FECHAMENTO DA TRINCA

Ao medir a flexibilidade de um corpo de prova (cp) trincado de uma liga de alumínio 65 S-T6, Elber [3] concluiu que a trinca estaria aberta apenas em uma parte do ciclo quando  $K > K_{\text{ab}}$ , mesmo quando a carga é completamente tratativa. Ele atribuiu o fenômeno do fechamento da trinca às deformações plásticas permanentes deixadas no entorno das suas faces, as quais formam um envelope que as envolve. Elber [4] assumiu também que uma trinca de fadiga não pode propagar enquanto sua ponta estiver fechada, logo que a parte do ciclo abaixo da carga de abertura não induziria dano, e que a força motriz das taxas da/dN seria  $\Delta K_{\text{ef}}$  e não  $\Delta K$ . Ele ajustou dados de taxas da/dN medidas sob cargas de amplitude constante em cp's de Al 2024-T3 pelas regras de propagação de Forman, Paris-Erdogan e da/dN =  $C\Delta K_{\text{ef}}^m$ , as quais geraram somas de quadrados residuais 28, 27 e 21 respectivamente. Esse aparente melhor desempenho do modelo proposto foi utilizado como sustentação da sua hipótese de que da/dN seria controlada por  $\Delta K_{\text{ef}}$ . Contudo um ajuste de dados dessa natureza não pode ser usado como uma prova irrefutável, principalmente quando o ajuste das outras curvas gera erros semelhantes.

A ideia de que  $\Delta K_{ef}$  seria a força motriz das trincas de fadiga é interessante e pode explicar muitos efeitos de memória observados sob cargas de amplitude variável. Porém, para que essa hipótese seja de fato válida o ligamento residual (ainda não trincado) não pode sofrer nenhum dano abaixo da carga de abertura  $K_{ab}$ . Contudo, resultados mostrados no artigo do próprio autor [4] colocam em dúvida sua hipótese, vide figura 1, que mostra dados de tensão e de deslocamento medidos à frente da ponta da trinca (i.e., no ligamento residual) antes e após uma sobrecarga. Esses dados mostram deslocamentos no material abaixo da carga de abertura da trinca  $K_{ab}$  tanto no carregamento quanto no descarregamento do cp, uma evidência do próprio artigo do Elber contra sua hipótese de que a trinca não sofre dano se sua ponta não estiver totalmente aberta. Ou seja, esse resultado mostra que pode ocorrer dano no material à frente da trinca abaixo de  $K_{ab}$ , na parte do ciclo desconsiderada por Elber, em particular durante o descarregamento.

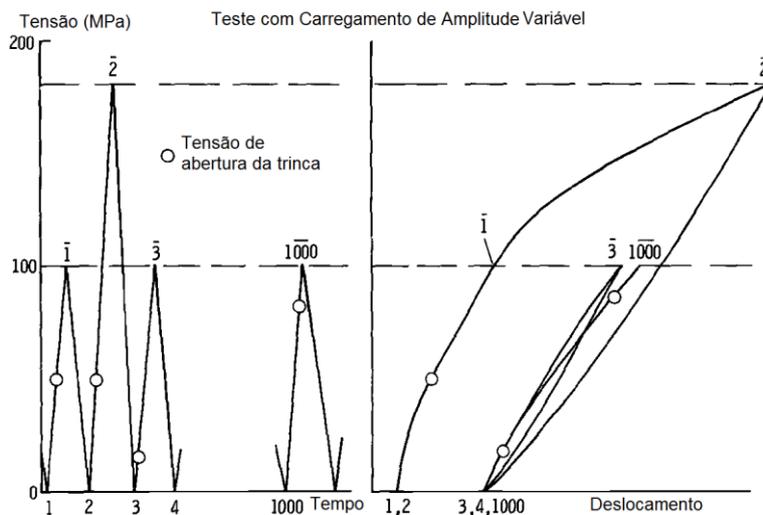


Figura 1. Medidas de tensão e deslocamento feitas por Elber à frente da ponta de uma trinca [4].

### 3 CORRELAÇÃO ENTRE CARGA DE ABERTURA E TAXA DE PROPAGAÇÃO

Inúmeros autores testaram a hipótese proposta por Elber. Por exemplo, von Euw et al. [13] fizeram uma série de ensaios em cp's de alumínio 2024-T3 de espessura 3,2mm para avaliar os efeitos gerados na taxa  $da/dN$  pela aplicação de três níveis de sobrecarga. Os autores aplicaram a equação empírica proposta por Elber [4] ( $da/dN = C[(0,5 + 0,4R)\Delta K]^n$ ) e concluíram que ela era apropriada devido à sua boa correlação com os dados medidos. Todavia, como a geometria do cp utilizado nessa pesquisa era totalmente diferente daquela utilizada em [4], pode-se questionar o uso desta equação empírica, pois o princípio da similitude na propagação não se aplica à carga de abertura. Assim, como os autores não mediram  $K_{ab}$ , a evidência por eles apresentada não é prova da validade da hipótese Elberiana. Os resultados da figura 2 mostram que a taxa  $da/dN$  mínima medida em [13] não ocorreu imediatamente após a aplicação da sobrecarga. Segundo os autores ela foi alcançada após a trinca se propagar entre 1/8 e 1/4 do tamanho da zona plástica que sempre acompanha as trincas de fadiga, o que seria uma evidência do chamado atraso no retardo. De forma qualitativa, a carga de abertura deveria se reduzir após uma sobrecarga pelo aumento do CTOD por ela causado, o que resultaria em uma taxa de propagação mais alta que no ciclo anterior pelo aumento do  $\Delta K_{ef}$  [7, 14], e não mais baixa como observado (figura 2). O problema de novo é que os autores não mediram a carga de abertura, impossibilitando a comprovação dessa correlação.

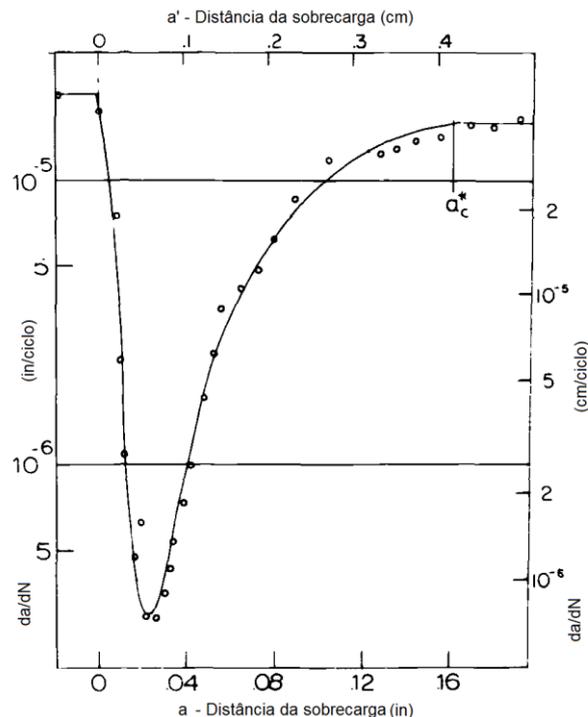


Figura 2. Resultado de propagação com atraso no retardo [5].

Em testes de propagação em cp's de uma liga Al-Cu-0,7Si de espessura 7mm e de aço 4340 de espessura 9mm Hertzberg et al. [15] avaliaram o efeito do aumento de  $K_{ab}$  na propagação pelo uso de calços entre as faces da trinca com três espessuras: 0,05, 0,075 e 0,1mm. Para o alumínio ocorreu aumento da carga de abertura de 13% para 30%, 50% e 93% da carga máxima, enquanto a taxa da/dN diminuiu pelos fatores de 1,2, 2,7 e 4,7. Porém pela medição de  $K_{ab}$  a taxa da/dN deveria diminuir por um fator de 16, 27 e 800, respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados para o aço 4340. Logo, a previsão da taxa da/dN através da medição de  $K_{ab}$  subestimou significativamente o crescimento da trinca. Esses resultados indicam dano abaixo de  $K_{ab}$ , ao contrário do assumido pela hipótese de Elber. Todavia, os autores não questionaram se a hipótese proposta por Elber seria válida, eles simplesmente atribuíram essa diferença à forma como a carga de abertura foi medida - via um extensômetro na boca da trinca. Medições de carga de abertura em campo distante, como a feita em [15], às vezes são questionadas na literatura por resultarem em valores de  $K_{ab}$  mais baixos que as medições de campo próximo [16-17], mas muitos autores não relatam diferença entre essas duas técnicas [5-6, 14]. Entretanto, admitindo que haja diferença, o erro entre o previsto e o medido poderia ser ainda maior se a medição fosse executada em campo próximo.

No teste mostrado na figura 3, Fleck [14] mediu um aumento na taxa da/dN após uma subcarga compressiva seguida de ciclos de  $\Delta K$  e R fixos. A taxa da/dN estabilizou entre 2 e 3mm após o ponto de aplicação da subcarga, enquanto a carga de abertura  $K_{ab}$  só estabilizou entre 9 e 10mm daquele ponto. Esses dados não são compatíveis com o fechamento induzido por plasticidade, pois houve aumento de  $\Delta K_{ef}$  enquanto a taxa da/dN se manteve constante. Fleck [14] também mediu da/dN e  $K_{ab}$  após uma sobrecarga em cp's de aço de baixa resistência (BS4360 50B) com duas espessuras, 3mm e 24mm: SC de  $K_{max} = 51\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  foram aplicadas após a trinca crescer cerca de 5mm sob  $\Delta K = 25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  e  $R = 0,05$ , mantidos fixos antes e após a SC. A carga de abertura foi medida através de extensômetros na boca da

trinca e na face traseira do cp. Adicionalmente, foi instalado um extensômetro semelhante ao utilizado em [4] a cerca de 2,5mm atrás da ponta da trinca. A figura 4 mostra resultados da taxa  $da/dN$  (a) e da carga de abertura  $K_{ab}$  (b), representada indiretamente pela razão de fechamento  $U = (K_{max} - K_{ab}) / (K_{max} - K_{min})$ . Para o corpo de prova de 24mm houve diferença entre as taxas e as cargas de abertura medidas no centro e na superfície dos cp's.

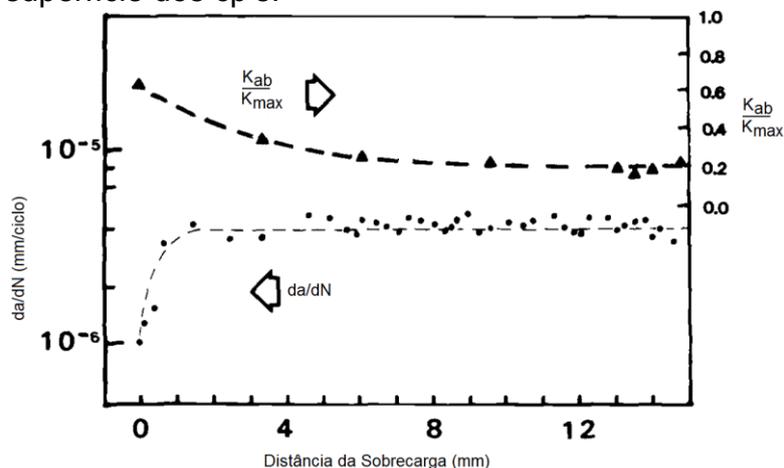


Figura 3. Propagação e carga de abertura após uma sobrecarga compressiva para o alumínio [6].

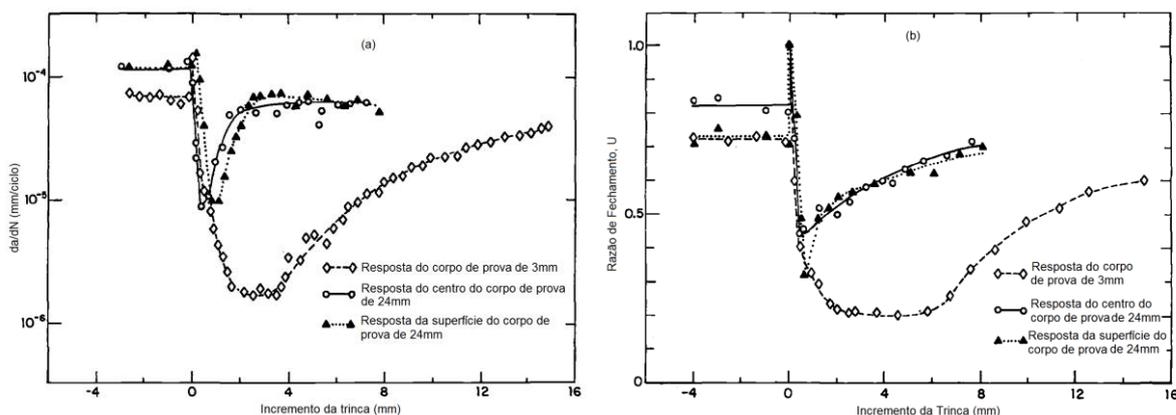


Figura 4. Resultados da medição da taxa de propagação (a) e carga de abertura (b) [8].

Para o cp de 24mm, embora a taxa  $da/dN$  antes da aplicação da SC tenha sido a mesma no centro e na superfície, a carga de abertura medida na superfície foi mais alta. Se  $\Delta K_{ef}$  é força motriz da trinca, por que as taxas seriam as mesmas para diferentes amplitudes de  $K_{ab}$ ? Após a aplicação da SC,  $K_{ab}$  na superfície reduziu para valores próximos a  $K_{min}$  mas sem aumento proporcional na taxa  $da/dN$ . A carga de abertura foi diminuindo gradativamente entre 2mm e 8mm de incremento da trinca, porém a taxa  $da/dN$  se manteve relativamente estável. Para os cp's de 3mm a carga de abertura se manteve constante entre 2mm e 6mm, porém a partir de 4mm de incremento da trinca a taxa  $da/dN$  começou a aumentar. Admitindo que essas medições são coerentes, lembrando que o autor mediu a carga de abertura de três formas distintas, essas evidências apontam para outro mecanismo controlando a força motriz da propagação da trinca, em vez de  $K_{ab}$ . O autor atribui a incapacidade de  $K_{ab}$  explicar o comportamento da taxa de propagação  $da/dN$  ao "fechamento descontínuo". Segundo ele, no ponto de aplicação da SC forma-se uma região de material estirado que passa a ser o local de primeiro contato entre as faces da trinca ao longo da propagação subsequente. Esse material atua como uma mola e permite deslocamentos cíclicos na ponta da trinca abaixo da carga de abertura. Assim, a

gama do fator de intensidade de tensão experimentada pela ponta da trinca é maior que o indicado pelas medições de  $K_{ab}$  e a taxa  $da/dN$  excede a prevista por  $\Delta K_{ef}$ . Acontece que sempre há deslocamentos à frente da trinca abaixo de  $K_{ab}$ , como mostrado inclusive pelos resultados originais de Elber [4], vide figura 1, logo este comportamento não depende das SC. Se o fechamento descontínuo afeta a medida de  $K_{ab}$ , e se por isso ela diminui à medida que essa porção de material se afasta da ponta da trinca (cp de 24mm após 2mm de incremento), então essa é uma forte evidência de que o fechamento foi desprezível para o crescimento da trinca, pois a taxa se manteve constante no cp de 24mm, vide figura 4b.

Castro et al. [5] mediram taxas  $da/dN$  e cargas de abertura  $K_{ab}$  (de duas formas distintas, campo próximo e distante, que geraram resultados idênticos) em corpos de prova de aço SAE 1020 de 2mm e 30mm de espessura sob  $\Delta K$ ,  $K_{max}$  e  $R$  fixos, vide figuras 5a e 5b, onde  $a$  é o comprimento da trinca e  $w$  a largura inicial do cp. Embora  $K_{ab}$  tenha diminuído continuamente à medida que as trincas cresciam por fadiga (e, portanto,  $\Delta K_{ef}$  também), as taxas  $da/dN$  medidas permaneceram essencialmente constantes em todos os testes. Logo, a propagação dessas trincas certamente não foi controlada por  $\Delta K_{ef}$ , como assumido pelo modelo Elberiano.

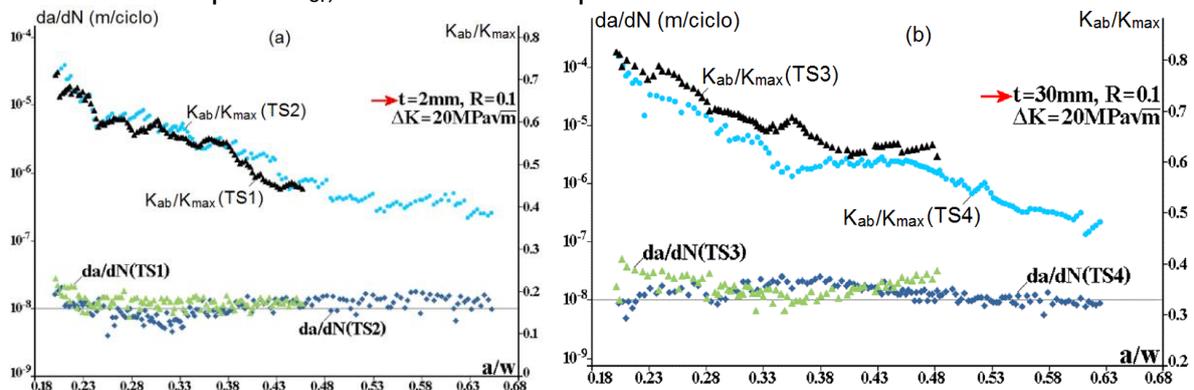


Figura 5. Taxas de propagação e cargas de abertura em cps de 2mm (a) e de 30mm (b) [20].

Em ensaios de propagação do aço A542/2 sob  $\Delta K$  constante de  $10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,  $R = 0,7$  e aplicação de uma sobrecarga com amplitude de 1,5 vezes o  $K_{max}$  do ciclo, Castro et al [6] observaram retardo após aplicação de sobrecargas como visto na figura 6a, porém a carga mínima esteve sempre acima da carga de abertura - figura 6b. Como  $\Delta K_{ef} = \Delta K$  ao longo desses ensaios, tanto antes como após as SCs, não é possível explicar o retardo observado nas taxas  $da/dN$  após as SCs por um aumento do fechamento da trinca. A medição dessas cargas de abertura foi feita de forma muito cuidadosa, com um equipamento especial capaz de detectar variações menores que 1% em  $K_{ab}$ . Uma mostra dessa sensibilidade está na alteração da inclinação na curva da figura 6b, ao ser detectada novamente a propagação da trinca após a SC.

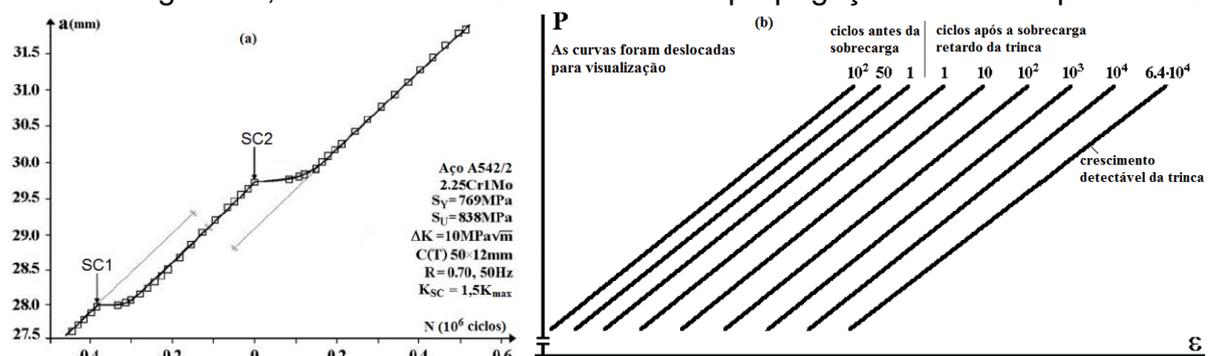


Figura 6. Resultados da taxa de propagação (a) e carga de abertura (b) [19].

Davidson et al. [7] fizeram ensaios de propagação em cps de alumínio 7091-T7E69 examinando três níveis de sobrecarga com medições de carga de abertura via imagens obtidas num microscópio eletrônico de varredura (MEV). Eles verificaram que a severidade do retardo, caracterizada pelo número de ciclos nos quais a taxa é afetada ( $N_D$ ) e pelo valor da taxa  $da/dN$  mínima, aumenta com a magnitude da SC, vide figuras 7a e 7b, e reduz quando uma subcarga é aplicada logo após a SC, vide figura 7c, onde  $\Delta K_{SC}$  e  $\Delta K_{SubC}$  são as gamas do FIT da sobrecarga e da subcarga, respectivamente.

Assim como em [13] não foi verificado nas figuras 7a e 7b aumento na taxa de propagação logo após o evento de sobrecarga. O atraso no retardo com respectivo aumento da taxa  $da/dN$  após a aplicação da sobrecarga é justificável pela redução de  $K_{ab}$  em função do aumento do CTOD, causado pela deformação plástica induzida pela SC. Mas como não houve um aumento de  $da/dN$  associado à clara redução em  $K_{ab}$  na figura 7b, essa é uma evidência contra as hipóteses Elberianas. Na figura 7c observa-se um aumento de cerca de 8 vezes na taxa de propagação imediatamente após o evento. Para que esse aumento possa ser justificado pelo acréscimo em  $\Delta K_{ef}$  o expoente  $m$  da regra  $da/dN \times \Delta K_{ef}$  deveria ser 5,83. Os autores não apresentaram o valor desse parâmetro, porém a estimativa das medianas para 54 ligas de Al série 7xxx é  $m = 3,2$  [18]. Na figura 7c observa-se ainda uma contínua redução na razão  $\Delta K_{ef}/\Delta K$  em uma região onde a taxa  $da/dN$  está aumentando, o que claramente não se justifica pelo fechamento Elberiano.

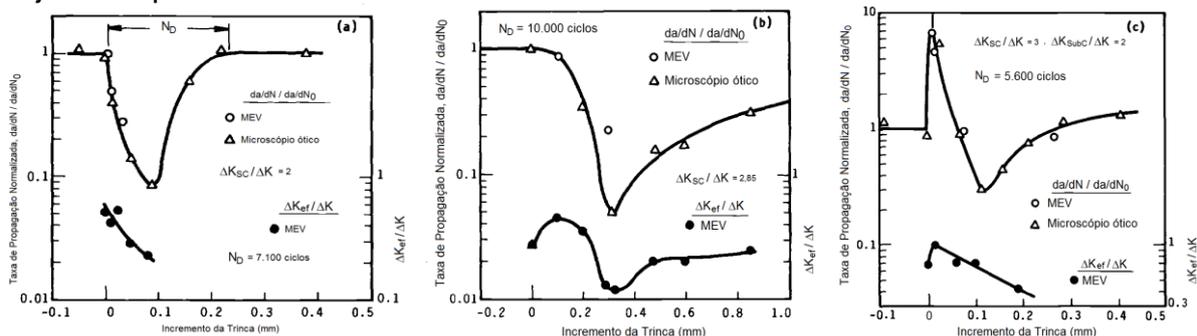


Figura 7. Taxa  $da/dN$  e  $\Delta K_{ef}$  para  $R_{SC} = 2$  (a) e para  $R_{SC} = 2,85$  (b) e  $R_{SC} = 3$  e  $R_{SubC} = 2$  (c) [8].

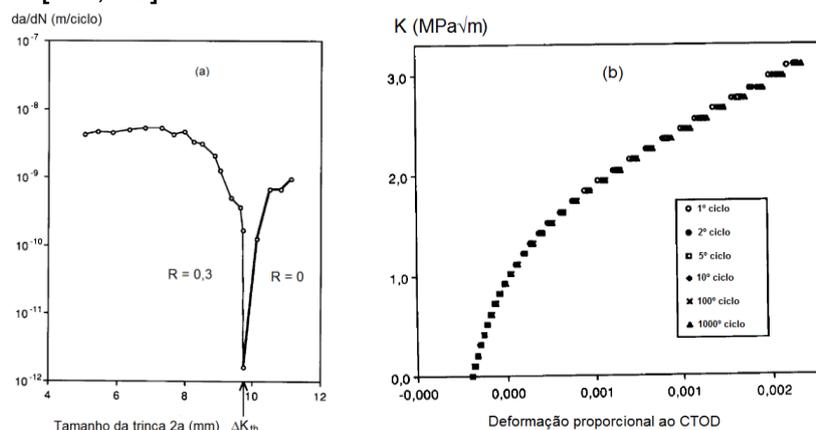
Pelas medições do campo de deslocamento o resultado líquido do ciclo de SC é um pequeno deslocamento de natureza geralmente trativa acompanhada por uma trinca que permanece aberta por uma distância de até vários milímetros atrás de sua ponta [7], o que confirma que  $K_{ab}$  deveria diminuir após a aplicação de uma SC. Já uma subcarga aumenta a reversibilidade dos deslocamentos durante o descarregamento e diminui o deslocamento residual de abertura da trinca com respectivo aumento da deformação plástica compressiva [7].

A interação entre as zonas plásticas primária (monotônica) e reversa à frente das pontas das trincas de fadiga pode explicar alguns comportamentos da taxa  $da/dN$  sob cargas de amplitude variável. A redução na tensão residual compressiva pela formação de uma zona de deformação plástica reversa pode explicar o atraso no retardo, pois as tensões residuais resultantes podem ser menores que aquelas dos ciclos de amplitude constante. Além disso, a tensão residual máxima pode não estar imediatamente à frente da ponta da trinca devido ao estado triaxial de tensão. Lang [8] executou uma série de ensaios de propagação para identificar o valor do FIT que precisa ser superado para propagar a trinca ( $K_{pr}$ ), sendo esse o ponto onde o material imediatamente à frente da trinca torna-se livre de tensões residuais

compressivas. O autor verificou que  $K_{pr}$  aumenta com a amplitude da sobrecarga e reduz com a redução da carga mínima durante o descarregamento. Para o teste com aplicação de uma subcarga compressiva após a sobrecarga,  $K_{pr}$  diminui com o aumento da tensão de compressão gerada pela subcarga compressiva. Essas evidências, corroboram as medições de deslocamento apresentadas por [7], e estão de acordo com a mecânica da formação das zonas plásticas. Cargas mínimas mais baixas permitem maior deformação plástica reversa à frente da trinca, reduzindo as deformações plásticas trativas e, portanto, as tensões residuais compressivas.

Toyosada e Niwa [9] consideraram que as trincas não se propagam se não ocorrer deformação plástica à frente delas, e desenvolveram um ensaio para medir a carga que gera uma zona plástica novamente tracionada em ensaios de propagação utilizando corpos de prova de aço SM-41B com espessura de 10mm. Os autores mostraram que o limiar de propagação se refere ao ponto em que a deformação plástica na ponta passa a não ser mais significativa, não gerando dano. Ao tentar correlacionar os dados de propagação em função de  $\Delta K_{ef}$  verificaram que a relação não foi linear em toda a faixa. Dessa forma eles identificaram que a carga de abertura e, conseqüentemente, o  $\Delta K_{ef}$  não representou a força motriz da trinca. Os resultados apresentados em [9] indicam que o limiar de propagação não seria uma prova física da influência da carga de abertura, como defendem muitos autores.

Isso torna ainda mais claro pelos obtidos por Chen et al. [10], que testaram a validade do conceito  $\Delta K_{ef}$  em ensaios em cp's de alumínio mantendo  $R = 0,3$  fixo e reduzindo gradativamente  $\Delta K$  até atingir o limiar de propagação ( $10^{-12}$  m/ciclo), no qual  $K_{max} = 3\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,  $K_{min} = 0,9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , e  $K_{ab} = 2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Em seguida a carga mínima foi reduzida para zero ( $R = 0$ ) não alterando  $\Delta K_{ef}$ , porém gerando um grande aumento na taxa de propagação, vide figura 8a. Os autores realizaram medições de flexibilidade ao longo do ensaio até  $10^3$  ciclos não tendo sido registrada alteração na amplitude da carga de abertura (figura 8b). Esses resultados mostram que há uma contribuição da parte do ciclo abaixo da carga de abertura na propagação da trinca, uma forte evidência contra a hipótese de  $\Delta K_{ef}$  ser a sua força motriz. Houve aumento do  $\Delta K$  do ciclo com aumento da taxa  $da/dN$  mas com  $\Delta K_{ef}$  constante. Essa evidência contradiz o argumento de que  $K_{ab}$  seria uma evidência física do limiar de propagação e de que  $\Delta K_{ef}$  seria a força motriz do trincamento por fadiga. De fato, o retorno do crescimento de uma trinca parada sob  $\Delta K_{th}$  pela diminuição de  $R$  sem qualquer aumento de  $\Delta K_{ef}$  é mais uma evidência de dano gerado abaixo da carga de abertura. Esse dano pode estar relacionado ao aumento da deformação plástica compressiva durante o descarregamento, o qual reduziria a tensão residual de compressão à frente da trinca [7-8, 19].



**Figura 8.** Taxa de propagação medida no alumínio (a) e medição da carga de abertura (b) [10].

A hipótese proposta por Elber [4] assume que a ponta da trinca está completamente protegida de qualquer dano por fadiga abaixo de  $K_{ab}$ . Todavia, pelo comportamento elastoplástico do material mesmo que a trinca se feche por completo sob uma carga trativa, isso apenas afetaria a forma da trinca, pois suas faces não se deslocam mais após fechadas. Porém, isso não impede que com a continuação da redução da carga tensões compressivas continuem se formando à frente da ponta da trinca, em função da zona plástica previamente criada durante seu carregamento. E essas tensões compressivas certamente afetam o dano por fadiga à frente da trinca. Dessa forma,  $\Delta K_{ef}$  pode superestimar o efeito do fechamento, tendendo a gerar previsões de propagação que podem ser não conservativas. Embora muitos autores relutem em aceitar, essa possivelmente é a causa das inconsistências observadas ao tentar utilizar a carga de fechamento para prever a propagação de trincas por fadiga sob cargas de amplitude variável em vários casos práticos.

#### 4 CONCLUSÃO

Diversos resultados disponíveis na literatura mostram que em muitos casos práticos os efeitos de memória observados no comportamento de trincas de fadiga sujeitas a cargas de amplitude variável não podem ser devidamente explicados por variações nas suas carga de abertura, como suposto pelo popular modelo Elberiano e aceito e usado por muitos pesquisadores sem maiores questionamentos. Desta forma, assumir que  $\Delta K_{ef}$  sempre controla a propagação das trincas por fadiga não é uma hipótese sensata, já que inúmeros resultados experimentais apresentados por diversos autores não podem ser bem modelados por ela. Há fortes evidências de que existem deformações à frente da ponta da trinca em cargas abaixo da carga de abertura, e de que sua influência não pode ser desprezada na modelagem da propagação das trincas por fadiga. Ou seja, definitivamente as pontas das trinca de fadiga não são todas “descarregadas” no momento em que se inicia seu fechamento ou “carregadas” apenas quando elas já estão totalmente abertas. Portanto, o uso de modelos de previsão de vida residual de estruturas trincadas baseados apenas no fechamento Elberiano deve ser feito com cautela, i.e., esses modelos não podem ser assumidos como uma panacéia capaz de resolver satisfatoriamente todo e qualquer problema prático de fadiga.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Skorupa, M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading – a literature review. Part I: empirical trends. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1998; 21: 987-1006.
- 2 Skorupa, M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading – a literature review. Part II: qualitative interpretation. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1999; 22: 905-926.
- 3 Elber, W. Fatigue crack closure under cyclic tension. *Engineering Fracture Mechanics*. 1970; 2: 37-45.
- 4 Elber, W. The significance of fatigue crack closure. *ASTM STP: Damage Tolerance in Aircraft Structures*. 1971; 486: 230-242.
- 5 Castro JTP, Meggiolaro MA, González JAO. Can  $\Delta K_{eff}$  be assumed as the driving force for fatigue crack growth? *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2015; 33: 97-104.
- 6 Castro JTP, Meggiolaro MA, Miranda ACO. Singular and non-singular approaches for predicting fatigue crack growth behavior. *International Journal of Fatigue*. 2005; 27: 1366-1388.

- 7 Davidson DL, Hudak Jr SJ. Alterations in crack-tip deformation during variable-amplitude fatigue crack growth. ASTM STP: Fracture Mechanics - Eighteenth Symposium. 1988; 945: 934-954.
- 8 Lang M. Description of load interaction effects by the  $\Delta k_{\text{eff}}$  concept. ASTM STP: Advances in Fatigue Crack Closure Measurement and Analysis. 1999; 1343: 207-223.
- 9 Toyosada M, Niwa T. The significance of RPG load for fatigue crack propagation and the development of a compliance measuring system. International Journal of Fracture. 1994; 67: 217-230.
- 10 Chen DL, Weiss B, Stickler R. The effective fatigue threshold: significance of the loading cycle below the crack opening load. International Journal of Fatigue. 1994; 16 (7): 485-491.
- 11 Newman Jr JC. An evaluation of the plasticity-induced crack-closure concept and measurement methods. Langley Research Center: NASA/TN-1998-208430; 1998.
- 12 Newman Jr JC, Anagnostou EL, Rusk D. Fatigue and crack-growth analyses on 7075-T651 aluminum alloy coupons under constant- and variable-amplitude loading. International Journal of Fatigue. 2014; 62: 133-143.
- 13 von Euw EFJ, Hertzberg RW, Roberts R. Delay effects in fatigue crack propagation. ASTM STP: Stress Analysis and Growth of Cracks - Proceedings of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics, Part I. 1972; 513: 230-259.
- 14 Fleck NA. Influence of stress state on crack growth retardation. ASTM STP: Basic Questions in Fatigue. 1988; 924: 157-183.
- 15 Hertzberg RW, Newton CH, Jaccard R. Crack closure: correlation and confusion. ASTM STP: Mechanics of Fatigue Crack Closure. 1988; 982: 139-148.
- 16 Kemp PMJ. Fatigue crack closure – a review. Royal Aerospace Establishment: TR90046; 1990.
- 17 Ward-Close CM, Blom AF, Ritchie RO. Mechanisms associated with transient fatigue crack growth under variable-amplitude loading: an experimental and numerical study. Engineering Fracture Mechanics. 1989; 32 [4]: 613-638.
- 18 Castro, JTP, Meggiolaro, MA. Fadiga - Técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço, volume II - propagação de trincas, efeitos térmicos e estocásticos. Scotts Valley: CreateSpace Publishing Company; 2009.
- 19 Kujwaski D.  $\Delta K_{\text{eff}}$  parameter under re-examination. International Journal of Fatigue. 2003; 25: 793-800.