

4

Automação da Propagação de Trincas de Fadiga sob Carregamento Complexo

A finalidade deste capítulo é descrever os métodos de crescimento de trinca por fadiga e seus efeitos quando submetida a carregamento complexo, dentro de um ambiente de programação. Para isso, a descrição do capítulo esta pautada em um programa chamado **ViDa** (Meggiolaro e Castro, 1998). Esse programa tem um ambiente amigável, do ponto de vista de interface, e a automação dos cálculos requerida para predizer a vida a fadiga sob carregamento complexo já se encontra no programa. Embora a propagação de trincas a fadiga não tenha uma teoria sofisticada, complicações numéricas surgem quando passada para um ambiente de programação. No programa essas complicações são tratadas consistentemente e por isso este capítulo o tem como base.

Este capítulo descreve dois métodos de crescimento de trinca: o método DK_{rms} e o método de crescimento ciclo-a-ciclo. Observações de implementação numérica são descritas a fim de tornar os cálculos eficientes em termos de tempo. Modelos que tentam descrever efeitos de retardo são discutidos e por fim um fluxograma simplificado do calculo da/dN no **ViDa** é apresentado.

4.1

O Programa ViDa

O objetivo programa **ViDa** é automatizar em um ambiente amigável todos os cálculos requeridos para predizer vida a fadiga sob carregamento complexo por uma aproximação local. O programa é executado em computadores pessoais com sistema operacional *Windows 95* ou mais recente, e inclui todas as ferramentas necessárias para executar as previsões, como interfaces de gráficos intuitivos e amigáveis em múltiplos idiomas; bancos de dados inteligentes para fator de intensidade e concentração de tensão, regras de propagação de trinca, propriedades de materiais; contadores *Rain-Flow* tradicional e sequencial, geradores de gráficos de laços de histerese elasto-plásticos e de frente de trinca

2D; ajuste automático de dados experimentais de iniciação de trinca e de propagação; interpretadores de equação, etc. O programa calcula o crescimento da trinca considerando qualquer regra de propagação e qualquer expressão de DK que pode ser escrita em uma sintaxe básica (fazendo disto um companheiro ideal do programa **Quebra2D** (Carvalho, 1998) que pode ser usado para gerar expressões de $DK(a)$ que não estiverem disponíveis em seu banco de dados).

O carregamento pode ser dado por uma lista seqüencial de picos (s_{max}) e vales (s_{min}), ou então pela seqüência equivalente do número de reversões ($n/2$) de tensões alternadas (s_a) e médias (s_m). O carregamento também pode ser especificado em deformação em vez de tensão. Os dados podem ser digitados ou podem ser importados de qualquer arquivo de texto e podem ser incluídos aqueles gerados experimentalmente (por exemplo, através de *strain-gages*).

A propagação de trinca é calculada a cada evento de carga. Um evento é definido por um bloco de carga simples na qual s_a e s_m permanecem constantes durante n ciclos, ou a cada variação da amplitude de carga no caso complexo.

O programa faz uma verificação automática de critérios de projeto para cada evento de propagação de uma trinca. Quando algum critério é violado o programa automaticamente interrompe os cálculos, e indica o valor dos parâmetros que causaram a interrupção. As seguintes condições de projeto provocam interrupção:

- fratura se $K_{max} = K_C$;
- trinca alcança seu tamanho máximo especificado;
- tensão no ligamento residual alcançando a tensão de ruptura S_U do material;
- taxa de propagação da trinca da/dN alcançando $0.1mm/ciclo$ (acina desta taxa o problema é de fraturamento, não de trincamento).

Além disso, o programa informa quando há ligamento residual antes do tamanho máximo de trinca especificada ou o número de ciclos de carga é alcançado. Deste modo, os valores calculados podem ser usados com a garantia que os limites de validade do modelo matemático adotado nunca são excedidos.

4.2

Método DK_{rms}

A amplitude do fator de intensidade de tensão é expresso como $DK = Ds \sqrt{\bar{O}(pa) f(a/W)}$, onde Ds é a amplitude da tensão nominal, a é o comprimento da trinca, $f(a/W)$ é uma função adimensional de a/W , e W é um tamanho característico da estrutura. Então, Ds quantifica a influência do carregamento e $\bar{O}(pa) f(a/W)$ quantifica o efeito da geometria da peça e a forma de trinca em DK .

O modo mais simples para tratar o problema de previsão de vida de fadiga sob carregamento complexo é substituí-lo por uma carga equivalente simples, que causa o mesmo crescimento da trinca. Foi descoberto experimentalmente que DK_{rms} , a raiz da média quadrática da amplitude de tensão, pode ser usada em muitos casos para este propósito (Barsom & Rolfe, 1987).

De acordo com Hudson (1981), DK_{rms} pode ser calculado dos valores positivos rms dos picos e vales do carregamento, desde que a trinca não cresça enquanto fechada e a parte compressiva do carregamento possa ser descartada. Desse modo, despreza-se os efeitos de diminuição da carga de abertura devida à compressão que pode ser não conservativo se as cargas compressivas forem significativas. Desta forma:

$$s_{\max_{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (s_{\max_i})^2}{p}}, \quad (s_{\max_i} \geq 0) \quad (4.1)$$

$$s_{\min_{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^q (s_{\min_i})^2}{q}}, \quad (s_{\min_i} \geq 0) \quad (4.2)$$

$$\Delta s_{rms} = s_{\max_{rms}} - s_{\min_{rms}} \quad \text{e} \quad R_{rms} = \frac{s_{\min_{rms}}}{s_{\max_{rms}}} \quad (4.3)$$

Como $DK_{rms} = Ds_{rms} \sqrt{\bar{O}(pa) f(a/W)}$, o número de ciclos que a trinca leva para crescer do comprimento inicial a_0 para comprimento final a_f é dado por:

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{F(DK_{rms}, R_{rms}, DK_{th}, K_c, \dots)} \quad (4.4)$$

No programa **ViDa**, uma variação do algoritmo de Simpson pode ser usada para a integração numérica no caso de carregamento simples e, por conseguinte, também para o método DK_{rms} . Um incremento de trinca $da > 0.1\mu m$ para a discretização da integral pode ser especificado pelo usuário, que também pode escolher um método de integração baseado em passos ajustáveis que dependem da variação do tamanho da trinca, como será discutido mais tarde no método de crescimento ciclo-a-ciclo.

O valor de DK_{rms} de um carregamento complexo é semelhante mas não idêntico ao DK de um carregamento simples. Como qualquer estatística, DK_{rms} não reconhece ordem temporal, e não pode detectar alguns problemas importantes como:

- Fratura súbita causado por um único pico grande durante o carregamento complexo (para começar o processo de fratura, é suficiente que um só evento atinja $K_{max} = K_C$).
- Qualquer interação entre os ciclos de carregamento (por exemplo, o retardo da trinca ou fenômeno de parada depois de uma sobrecarga).
- Não é possível garantir a inatividade da trinca se $DK_{rms}(a_0) < DK_{th}(R_{rms})$.

Em carregamento complexo, este último problema mais tarde podem ser causados por todos o eventos (Ds_i, R_i) que induzem $DK_i > DK_{th}(R_i)$, que pode fazer a trinca crescer até mesmo se $DK_{rms} < DK_{th}(R_{rms})$. Então, como DK_i depende da amplitude da tensão Ds_i e do tamanho a_i da trinca naquele evento, até mesmo se o valor de Ds_{rms} permanecer constante, o mesmo não pode ser garantido para DK_{rms} .

Concluindo, vale lembrar que o método de DK_{rms} é o modo mais simples para tratar um problema de carregamento complexo, mas só deveria ser usado, como com qualquer modelo, com a avaliação devida de suas limitações.

4.3 Método do Crescimento Ciclo-a-Ciclo

A idéia básica deste método é associar a cada reversão da carga o crescimento que a trinca teria se apenas aquele 1/2 ciclo atuasse sobre a peça (isto implica negligenciar efeitos de interação entre os vários eventos de um carregamento complexo, como retardo induzido por sobrecarga ou parada no

crescimento de trinca). Usando esta suposição, é fácil escrever uma expressão geral para o crescimento de trinca ciclo-a-ciclo, por qualquer regra de propagação de trinca. Se $da/dN = F(DK, R, DK_{th}, K_C, \dots)$, e se no $1/2$ i -ésimo ciclo de carga de uma trinca de comprimento a_i , amplitude de tensão é Ds_i e a carga média causa R_i , então a trinca cresce por um da_i dado por:

$$da_i = \frac{1}{2} \cdot F(DK(Ds_i, a_i), R(Ds_i, s_{max_i}), DK_{th}, K_C, \dots) \quad (4.5)$$

O crescimento total da trinca é quantificado por $S(da_i)$. Então, o método ciclo-a-ciclo é semelhante em termos de acumulação de dano linear aos métodos de projeto a fadiga SN e eN (Dowling, 1999). E, como na regra de Miner (Dowling, 1999), é requerido que todos os eventos que causam dano a fadiga sejam reconhecidos antes do cálculo, por contagem *rain-flow* do carregamento.

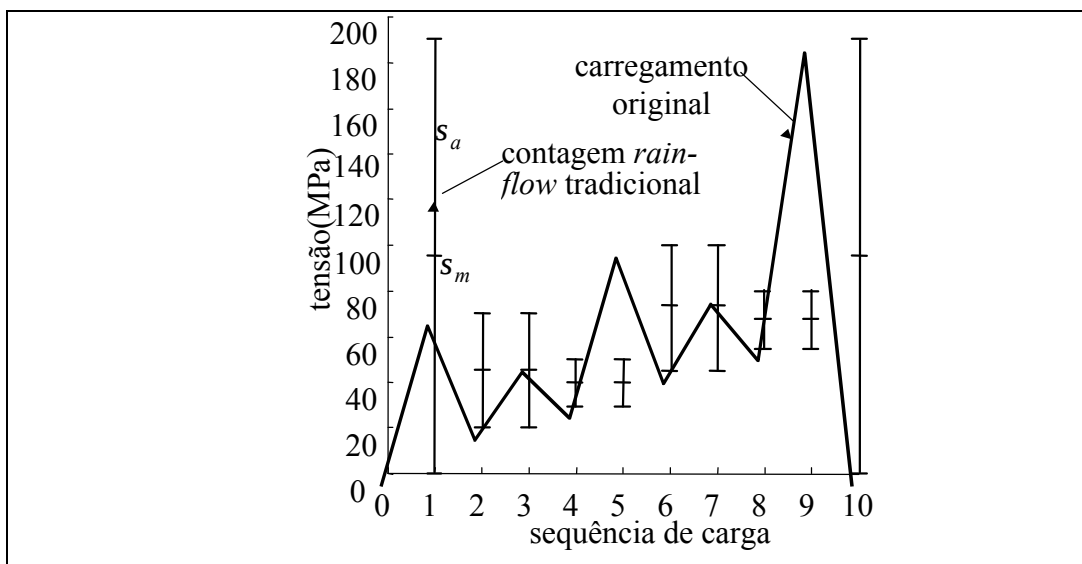


Figura 4.1 - Contando *rain-flow* tradicional, antecipando os eventos de carga grandes.

Porém, esse algoritmo de contagem altera a ordem do carregamento, como mostrado na Figura 4.1. Isto é, o pico de número 9 é antecipado para acontecer no primeiro evento, que na realidade não ocorre. Isto pode causar problemas sérios nas previsões, porque a ordem de carregando afeta a propagação da trinca de duas maneiras diferentes:

- Efeitos de retardo, que podem retardar ou parar o crescimento subsequente da trinca devido, por exemplo, ao fechamento de trinca induzido por plasticidade do tipo Elber (Suresh, 1998) ou por trincas que

bifurcam. Estes efeitos de interação entre ciclos de carregamento normalmente aumentam a vida da trinca e, se negligenciado no cálculo ciclo-a-ciclo, pode induzir previsões excessivamente conservadoras.

- Fratura instantânea, que acontece quando $K_{max} = K_C$ em único evento, que deve ser previsto precisamente.

Como mencionado anteriormente, o carregamento de entrada no programa **ViDa** é seqüencial, e preserva a informação de ordem de temporal que está perdida quando são geradas por histogramas ou por qualquer outra estatística. Tirando proveito desta característica, uma contagem *rain-flow* seqüencial foi introduzida no programa (Meggiolaro & Castro, 1998). Com esta técnica, é contado o efeito de cada evento de carga grande quando acontece (e não antes de sua ocorrência, como no método *rain-flow* tradicional). A idéia é explicada na Figura 4.2, e neste caso o pico de número 9 ocorre na sua devida posição.

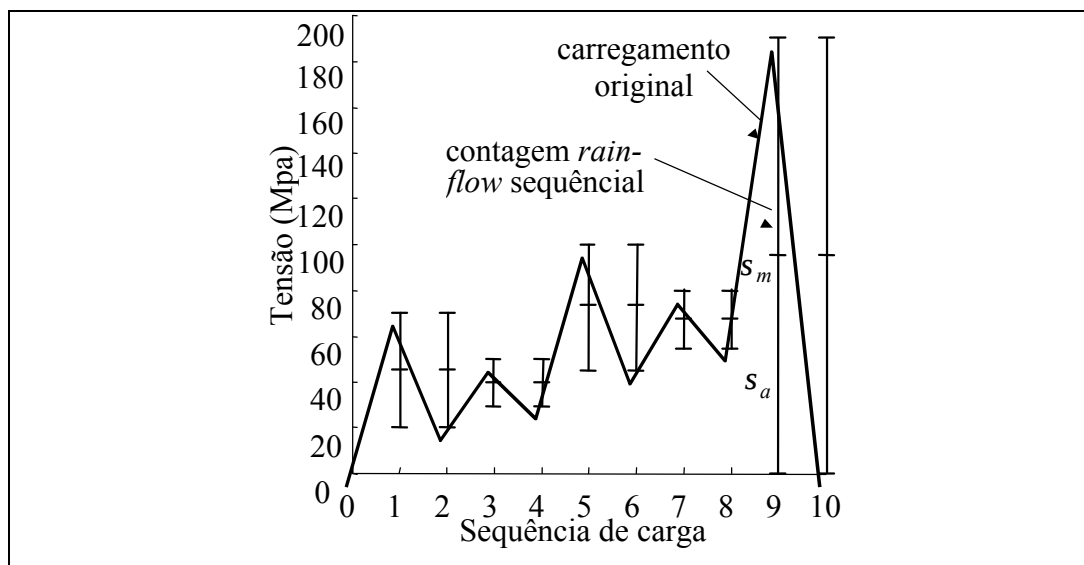


Figura 4.2 - Contagem *rain-flow* seqüencial, preservando a maioria da ordem de carregamento.

A vantagem principal do algoritmo de contagem *rain-flow* seqüencial é evitar o cálculo prematuro de efeitos de sobrecargas, que podem causar previsões não conservativas na vida a propagação da trinca (como $K(s, a)$ em geral cresce com a trinca, uma determinada sobrecarga aplicada quando a trinca é grande pode ser muito mais prejudicial do que aplicada quando a trinca é pequena). A contagem *rain-flow* seqüencial não elimina todos os problemas causados pelo

método tradicional, mas é certamente uma opção aconselhável porque apresenta vantagens em cima do algoritmo original, sem aumentar sua dificuldade.

Uma opção de filtro pode ser muito útil para descartar as cargas pequenas que não causam nenhum dano induzindo $DK_i < DK_{th}(R_i)$, seguindo as idéias do método *race-track* (Nelson & Fuchs, 1977).

A filtro de amplitude pode realmente reduzir significativamente o esforço computacional em cálculos de dano de fadiga se a história do carregamento complexo é longa. Mas este procedimento é intrinsecamente não-conservativo, porque DK_i não está disponível antes dos cálculos de crescimento de trinca (DK não só depende das cargas, mas também no tamanho da trinca). Por conseguinte, a regra conservativa é limitar o corte de cargas aos pares (Ds_i, R_i) que causam $DK(a_f) < DK_{th}[R(a_f)]$, onde a_f é a duração final esperada pela trinca. Mas, na prática pode ser mais fácil tentar diminuir a amplitude do filtro, até que não haja variações significativas nos resultados.

A implementação computacional de Equação (4.5), até mesmo com filtro de amplitude de carregamento, ainda não é numericamente eficiente. Por isto, uma característica adicional para reduzir o tempo computacional pode ser bastante útil: a opção de manter a parte geométrica de DK constante durante variações pequenas em tamanho de trinca.

Como $DK = Ds_i[\ddot{O}(pa)f(a/W)]$, onde $f(a/W)$ é uma função adimensional (normalmente complicada) que depende somente da peça e da geometria de trinca e não do carregamento, pode ser dito que a amplitude do fator de intensidade de tensão DK_i a cada reversão de carga depende de duas variáveis de naturezas diferentes:

- a amplitude de tensão Ds_i naquele evento, e
- o comprimento da trinca a_i naquele momento.

Ds_i pode variar significativamente a cada reversão de carga quando o carregamento é complexo, porém trincas de fadiga sempre crescem muito lentamente. De fato, pelo menos em metais estruturais, as maiores taxas de crescimento de trinca estável observadas na prática são da ordem de $\mu m/ciclo$, e durante a maioria da vida útil das estruturas as taxas de crescimento de trinca são mais adequadamente medidas em $nm/ciclo$.

Porém, como em geral as expressões de $f(a/W)$, que são normalmente complicadas, não apresentam descontinuidades, pode-se tirar proveito de pequenas mudanças em $f(a/W)$ durante incrementos pequenos no comprimento da trinca. Deste modo, em vez de calcular a cada ciclo de carga o valor de $DK_i = Ds_i \sqrt{\bar{O}(pa_i) f(a_i/W)}$, uma tarefa que exige grande esforço computacional, é mais eficiente manter $f(a_i/W)$ constante durante um (pequeno) percentual de %da, de incremento de trinca, que deverá ser especificado pelo usuário de programa de cálculo.

Os erros introduzidos por esse procedimento são não-conservativos, mas diminuem rapidamente com o valor especificado para da%. E, como no caso do filtro de amplitude, é mais fácil começar com um valor mais alto para minimizar o tempo computacional, e numericamente tentar achar um valor mais conveniente de %da para o problema em mão.

4.4 Efeitos de Interação em Cargas Cíclicas

É um fato bem conhecido que problemas de interação entre cargas cíclicas podem ter um efeito muito significativo na previsão de crescimento de trinca de fadiga. Há uma vasta literatura provando que sobrecargas, quando aplicadas sobre um carregamento que se mantém constante, podem causar retardo, aceleração ou parada no crescimento de trinca (veja Figura 4.3, por exemplo). Conseqüentemente estas sobrecargas podem às vezes afetar a taxa de propagação de trinca (Suresh, 1998; Broek, 1986, 1988).

Negligenciar esses efeitos em cálculos de vida à fadiga pode invalidar as previsões completamente. A geração de um algoritmo universal para quantificar esses efeitos é particularmente difícil, devido ao número e complexidade dos mecanismos envolvidos no retardo de trinca de fadiga, entre os quais:

- fechamento da trinca induzido por plasticidade;
- cegamento e/ou bifurcação da trinca ;
- tensões e/ou deformações residuais;
- rugosidade das superfícies da trinca;
- oxidação das faces da trinca.

Além disso, dependendo do caso, alguns desses mecanismos podem agir conjuntamente ou em competição, em função de fatores como:

- tamanho da trinca;
- microestrutura do material;
- estado de tensão dominante;
- meio ambiente.

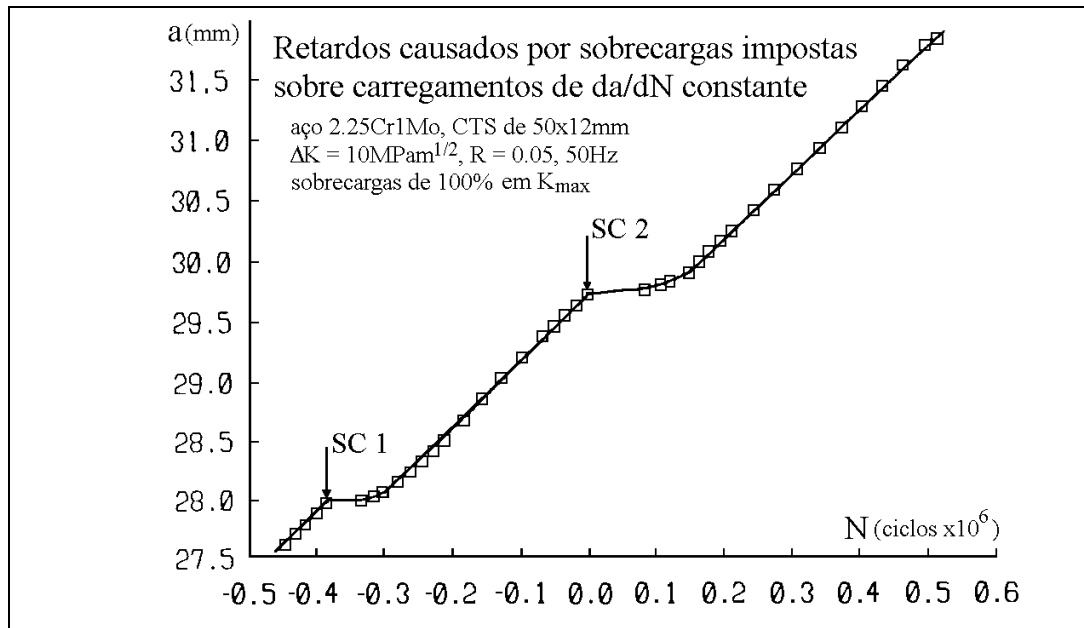


Figure 4.3 - Retardo de trinca causado por sobrecargas.

A discussão detalhada desses fenômenos é considerada além do âmbito deste trabalho (uma revisão do problema pode ser achada em [Suresh, 1998]). Além disso, a importância relativa dos vários mecanismos pode variar de caso a caso, e não há nenhuma única equação universalmente aceita capaz de descrever o problema por inteiro. Então, do ponto de vista do projetista, isto deve ser tratado de um modo mais simples.

A característica principal de trincas de fadiga é propagar cortando um material que já foi deformado pela zona de plástica que sempre acompanha a trinca. Desse modo, as faces de trinca de fadiga são embutidas em um envelope de tensões residuais (plásticas) e, por conseguinte:

- comprimem suas faces quando completamente descarregada, e
- abrem aliviando de um modo progressivo a carga (compressiva) transmitida pelas suas faces.

De acordo com Elber (1971), só depois de abrir completamente a trinca a uma carga K_{ab} , que esta então seria tensionada. Então, com o maior K_{ab} , a menor amplitude de intensidade de tensão efetiva seria $DK_{ef} = K_{max} - K_{ab}$, e este DK_{ef} em vez de DK seria o parâmetro controlador da taxa de propagação da trinca. A maioria dos modelos de interação de carga são, embora indiretamente, baseados nesta idéia. Isto implica na suposição que o principal mecanismo de retardo é causado pelo fechamento da trinca induzido por plasticidade: nestes casos, deveria aumentar a carga de abertura quando a trinca penetra na zona plástica aumentada pela sobrecarga, reduzindo o DK_{ef} e parando ou retardando a trinca, enquanto as zonas plásticas associadas com o carregamento estiverem contidas na zona plástica induzida pela sobrecarga.

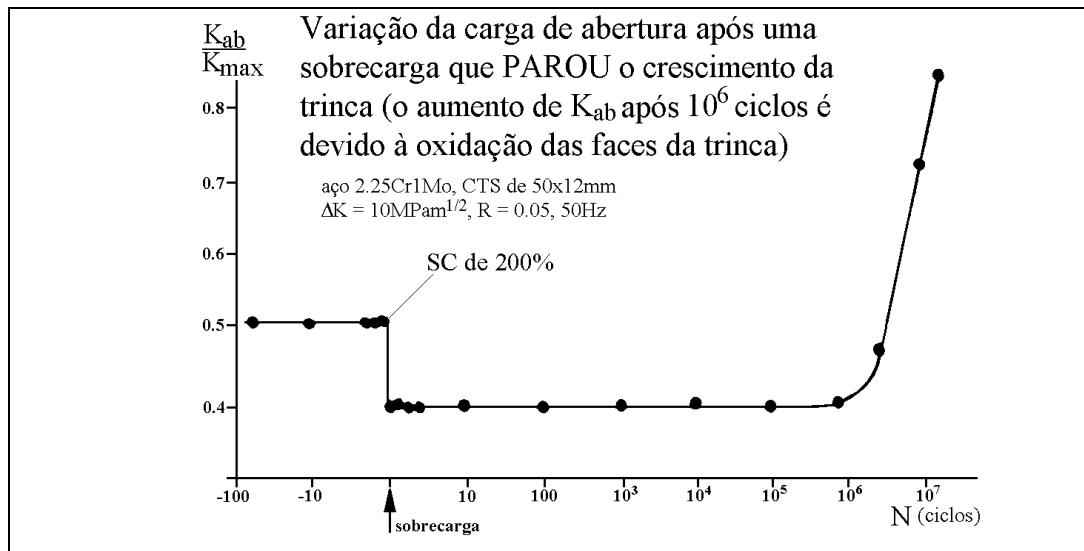


Figure 4.4 - Carga de abertura contra número de ciclos depois de uma sobrecarga que parou o crescimento da trinca de fadiga. Logo após a sobrecarga que a carga de abertura diminuiu, um comportamento completamente incompatível com fechamento de trinca de tipo Elber.

Mas é muito importante enfatizar que isto não é o único mecanismo que pode induzir retardo de trinca. Por exemplo, Castro e Parks (1982) mostraram que, sob condições de tensão plana dominante, retardo ou parada da trinca induzida por sobrecargas podem acontecer enquanto DK_{ef} aumentam (Figura 4.4). O mecanismo principal de retardo nesses casos era bifurcação da ponta da trinca.

O modelo de Wheeler é um modelo de retardo popular (Broek, 1988). O modelo é simples e assume que enquanto a zona plástica do carregamento ZP_i

estiver embutida na zona plástica da sobrecarga ZP_{ov} , a taxa de crescimento da trinca dependerá da distância da borda de ZP_{ov} para a ponta da trinca, com mostra a Figura 4.5.

Segundo este modelo, o retardo é máximo logo após a sobrecarga (Wheeler não modela “*delayed retardation*”), e o retardo termina quando a borda de ZP_i toca borda de ZP_{ov} . Então, se a_{ov} e a_i são os tamanhos da trinca no instante da sobrecarga e no i -ésimo ciclo, e $(da/dN)_{ret_i}$ e $(da/dN)_i$ são as taxas de crescimento de trinca no retardo e sem retardo (com a qual a trinca estaria crescendo no ciclo i -ésimo se a sobrecarga não tivesse ainda acontecido), então, de acordo com Wheeler:

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_{ret_i} = \left(\frac{da}{dN} \right)_i \cdot \left(\frac{ZP_i}{a_{ov} + ZP_{ov} - a_i} \right)^b, \quad a_i + ZP_i < a_{ov} + ZP_{ov} \quad (4.14)$$

onde b é uma constante experimentalmente ajustável. Broek (1986; 1988) menciona os dados de Wheeler para aços ($b = 1.43$) e para Ti-6Al-4V ($b = 3.4$), e sugere que outros valores típicos para b estão entre 0 e 2.

Nota-se que esse modelo não pode prever as paradas de trinca observadas. Como $ZP \gg (K_{max}/S_Y)^2$, onde S_Y é a tensão de escoamento do material, segundo Wheeler o valor máximo de retardo acontece imediatamente depois da sobrecarga, e é igual a $(K_{max}/K_{ov})^{2b}$, onde K_{max} é a carga máxima no ciclo logo após a sobrecarga, e K_{ov} é o pico da sobrecarga. Então, a fenomenologia do problema da interação de ciclos de carga não está completamente reproduzível pelo modelo Wheeler original. Porém, para também modelar paradas de trinca, uma modificação simples que parece razoável é usar o parâmetro multiplicativo de Wheeler em DK em vez de da/dN depois da sobrecarga:

$$DK_{ret}(a_i) = DK(a_i) \cdot \left(\frac{ZP_i}{a_{ov} + ZP_{ov} - a_i} \right)^g, \quad a_i + ZP_i < a_{ov} + ZP_{ov} \quad (4.15)$$

onde $DK_{ret}(a_i)$ e $DK(a_i)$ são valores dos fatores de intensidade de tensão que estariam agindo em a_i com e sem retardo devido à sobrecarga, e g é em geral diferente do b do modelo original. Essa modificação simples pode ser usada com quaisquer regras de propagação que reconhecem DK_{th} para prever o retardo e a

parada de trincas de fadiga depois de uma sobrecarga (a parada que acontece se $DK_{ret}(a_i) < DK_{th}$).

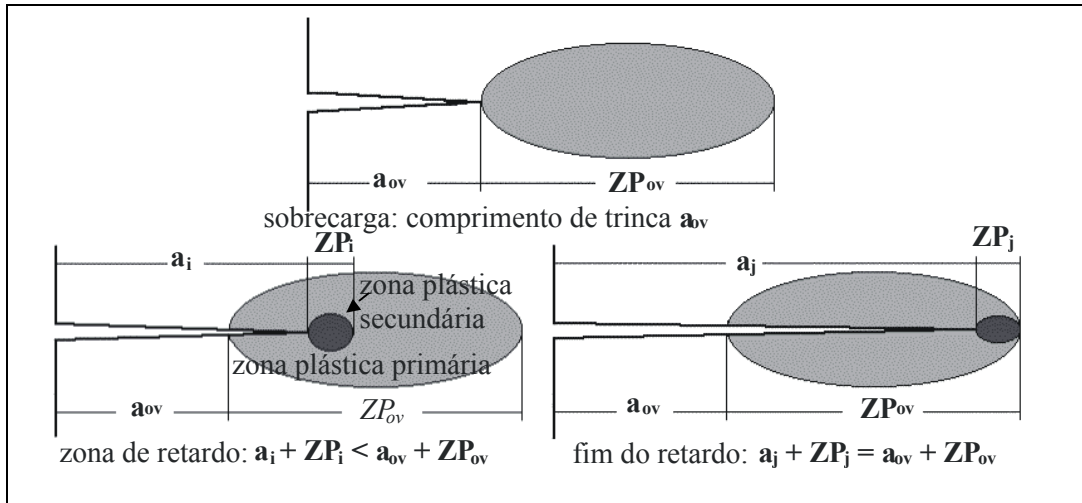


Figure 4.5 - Modelo de retardo de trinca de Wheeler.

A implementação numérica destes modelos de retardo em um algoritmo ciclo-a-ciclo não é conceitualmente difícil, mas requer um esforço de programação considerável. Para ilustrar as principais idéias, um fluxograma simplificado do algoritmo de cálculo usado no programa de **ViDa** é mostrado na Figura 4.6.

Alguns detalhes de cálculo valem a pena serem mencionados. O primeiro se refere ao uso do filtro $da\%$. Este pode funcionar muito bem como incremento de tamanho de trinca, por outro lado, pode causar dificuldades com os modelos de retardo, pois o tamanho da zona plástica pode ser muito pequeno comparado com o tamanho de trinca. Para quantificar o gradiente de propagação dentro da zona de sobrecarga afetada, $da\%$ deve ser muito menor que ZP_{ov} .

Segundo, pode-se economizar muito tempo computacional quando o carregamento é complexo. Pequenas variações na amplitude do carregamento não causam experimentalmente retardo de trincas detectáveis, e não deveriam ser considerados como sobrecargas no modelo de cálculo. Então, um filtro numérico para sobrecargas pode ser introduzido no algoritmo, especificando que não há nenhum efeito de sobrecarga se $s_j/s_{j-1} < a$, onde s_{j-1} e s_j são picos sucessivos do carregamento e a é uma constante ajustável (que pode ser escolhida como 1.25 ou 1.3, na ausência de informação melhor).

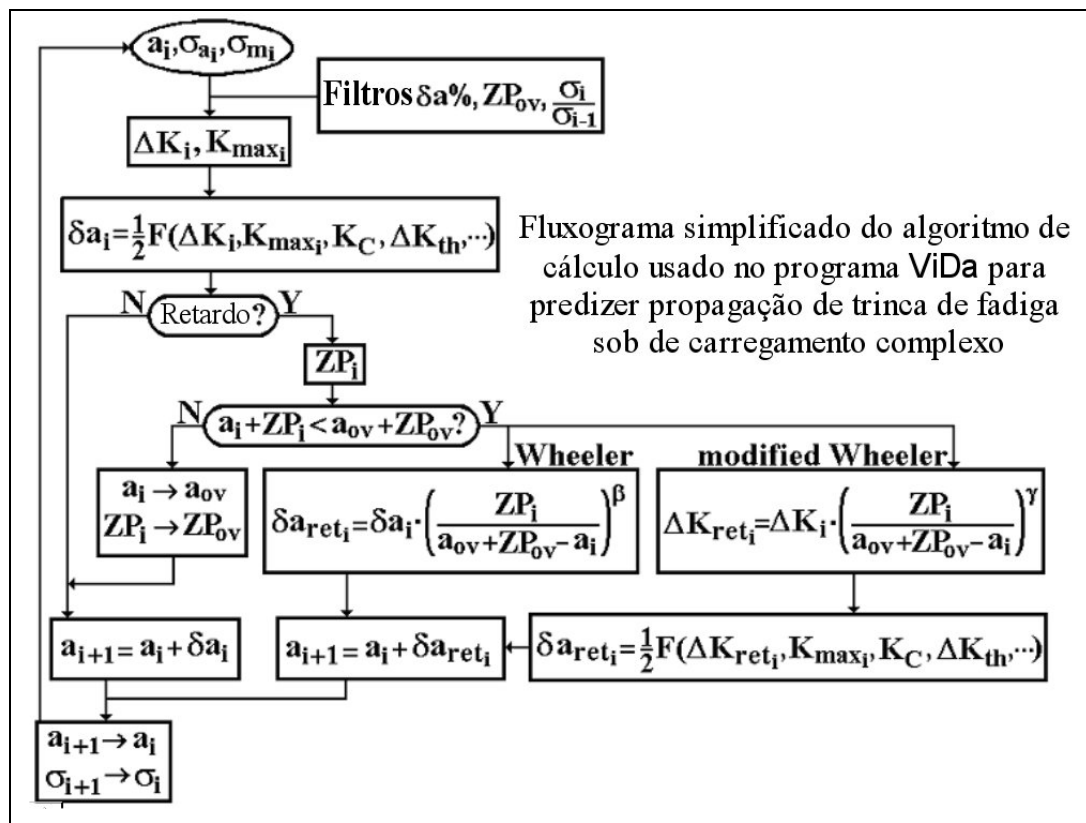


Figure 4.6 - Fluxograma simplificado do algoritmo de cálculo usado no programa **ViDa** para prever propagação de trinca de fadiga sob de carregamento complexo.