

ViDa 98 - Danômetro Visual Para Automatizar O Projeto À Fadiga Sob Carregamentos Complexos

ViDa 98 - Visual Damagemeter To Automate The Fatigue Design Under Complex Loading

Marco Antonio Meggiolaro*

Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio
22453-900 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*atualmente no Mech.Eng.Dept., M.I.T.

e-mails: meggi@mit.edu; jtcastro@mec.puc-rio.br

Abstract

A powerful language named **ViDa 98** was developed to automate *all* the methods traditionally used in mechanical design to calculate the fatigue damage caused by complex loading: SN, IIW (for welded structures) and ϵN to predict crack initiation, and da/dN for studying plane and 2D crack propagation based on Fracture Mechanics concepts, *considering* load sequence effects. It has a friendly graphical interface and runs in a Windows environment. Among a number of similar features, can be highlighted: several intelligent data banks, two rain-flow counters and a race-track filter, generators of *corrected* hysteresis loops and 2D crack fronts, importation and adjustment of experimental data, an equation interpreter and a complete help file, which includes an online advanced course on fatigue. Moreover, its damage models introduce various non-trivial innovations, and the interface language can be English or Portuguese.

Key-words: Fatigue, Life Prediction, Complex Loading.

Resumo

Uma poderosa linguagem chamada **ViDa 98** foi desenvolvida para automatizar *todos* os métodos tradicionalmente usados no projeto mecânico à fadiga sob carregamentos complexos: SN, IIW (para estruturas soldadas) e ϵN para prever a iniciação da trinca, e da/dN para estudar a propagação das trincas planas e 2D usando conceitos da Mecânica da Fratura, *considerando* os efeitos de seqüência do carregamento. Entre outras ferramentas similares, todas com uma interface gráfica amigável que roda num ambiente Windows, destacam-se: vários bancos de dados inteligentes, dois contadores *rain-flow* e um filtro *race-track*, geradores de laços de histerese elastoplástica *corrigidos* e de frentes de trincas 2D, importação e ajuste de dados experimentais, um interpretador de equações e um completo arquivo de ajuda, que inclui um curso avançado em fadiga. Além disto, seus modelos de dano introduzem diversas inovações não-triviais, e a língua da interface pode ser português ou inglês.

Palavras-Chaves: Fadiga, Carregamentos Complexos, Previsão de Vida.

Introdução

Fadiga é o tipo de falha mecânica caracterizada pela geração e/ou propagação paulatina de uma trinca, causada primariamente pela aplicação repetida de carregamentos variáveis. Estes fenômenos são progressivos, cumulativos e localizados.

A geração das trincas geralmente ocorre a partir de entalhes, e depende primariamente da gama das tensões $\Delta\sigma$ ou deformações $\Delta\epsilon$ *locais*, atuantes nos *pontos* mais solicitados da peça. Para efeito de dimensionamento, $\Delta\sigma$ e $\Delta\epsilon$ são quantificados num volume grande em relação aos parâmetros microestruturais do material (e.g., o tamanho de grão em metais). Quando as solicitações cíclicas são pequenas ($\Delta\sigma$ macroscopicamente elástica), o fenômeno é muito influenciado pelos *detalhes* do material, do acabamento superficial, do gradiente das tensões e do estado de tensões residuais atuantes na raiz do entalhe. A resistência à iniciação de uma trinca por fadiga tende a aumentar com a resistência à ruptura S_U , com a melhoria do acabamento superficial, com o aumento do gradiente de tensões e com a presença de tensões residuais compressivas. Estes detalhes são menos importantes quando as cargas alternadas são grandes, e a componente plástica de $\Delta\epsilon$ não é desprezível frente à elástica. Neste caso, é a ductilidade do material o principal parâmetro controlador da resistência à fadiga.

Trincas grandes (maiores que alguns tamanhos de grão) têm a sua taxa de propagação por fadiga, da/dN , controlada primariamente pela gama do fator de intensidade de tensões ΔK . Entretanto, esta taxa é muito influenciada por outros parâmetros (e.g., pela microestrutura e pelas cargas médias) quando ΔK é baixo (próximo do limiar de propagação ΔK_{th}) ou alto (com K_{max} próximo da tenacidade do material K_C).

Os métodos tradicionais de dimensionamento mecânico à iniciação de uma trinca por fadiga são o SN e o ϵN . Estruturas soldadas são em geral dimensionadas por uma variação do método SN, segundo procedimentos de institutos de soldagem como o IIW ou a AWS. Para quantificar a propagação das trincas usa-se normalmente o chamado método da/dN , baseado em conceitos da Mecânica da Fratura.

Para automatizar as rotinas de projeto de *todos* estes métodos, foi desenvolvida uma poderosa linguagem chamada **ViDa 98**, de **Danômetro Visual**, versão 98. Ela roda em ambiente Windows, possui uma interface gráfica intuitiva e amigável e é particularmente útil para tratar o caso de carregamentos complexos, considerando efeitos de seqüência entre os eventos do carregamento, tanto na iniciação como na propagação de trincas 1D e 2D. De interesse para este trabalho são as diversas inovações que tiveram que ser desenvolvidas e implementadas nos vários métodos de dimensionamento à fadiga, para que se pudesse garantir a confiabilidade e aumentar a velocidade dos cálculos, e as diversas melhorias em relação às versões iniciais do programa, descritas em Meggiolaro & Castro 95 e 96. Dentre elas, destacam-se:

- a introdução do conceito da contagem *rain-flow* ordenada;
- a consideração do efeito de sobrecargas elastoplásticas no método SN;
- uma série de correções na metodologia ϵN tradicional, para garantir a previsão de laços de histerese fisicamente admissíveis nos entalhes;
- modelos de propagação de trincas planas e 2D de velocidade e precisão ajustável, pela divisão do fator de intensidade de tensões em duas partes, carregamento e geometria, que podem ser atualizadas a taxas diferentes;
- modelos para descrever efeitos de seqüência na propagação de trincas, como retardos após sobrecargas;
- banco de dados inteligente com propriedades de materiais hierarquizadas (o programa *estima* valores coerentes na ausência de propriedades medidas, reconhecendo-os como diferentes dos valores experimentais);
- a *forma* das diversas telas gráficas, que usam informações visuais claras e notações tradicionais e intuitivas, para eliminar do processo de projeto qualquer programação.

Filosofia da Linguagem

O **ViDa 98** inclui todos os métodos do projeto tradicional à fadiga (Anderson 95, Bannantine et al. 90, Barson & Rolfe 87, Broek 88, Dowling 93, Farahmand 97, Fuchs & Stephens 80, Hertzberg 89, Juvinall 67, Rice 88, Shigley & Mischke 89, por exemplo). O seu objetivo primário é tornar o projeto à fadiga um processo equivalente a editar um texto num processador moderno de alto nível (e é por isto que as vezes prefere-se chama-lo de *linguagem* e não de *programa*). Todos os métodos de projeto requerem informações em seis áreas complementares de igual importância (figura 1):

- **Dimensões Geométricas** (incluindo principalmente a dos entalhes e das trincas, caso presentes).
- **Cargas de Serviço** (devem ser medidas não estimadas, pois influenciam diretamente as previsões).
- **Propriedades dos Materiais** (também devem ser preferencialmente medidas, pela mesma razão).
- **Análise de Tensões** (nos pontos críticos, para prever a iniciação das trincas).
- **Análise das Trincas** (para prever a sua propagação).
- **Análise do Acúmulo de Dano** (p.ex. modelo de Wöhler-Goodman-Miner no método SN).

Note-se que a precisão das previsões é controlada pelo elo *menos* preciso desta corrente, logo não adianta sofisticar os modelos de análise de tensões, de trincas e de acúmulo de dano (que dependem de erudição acadêmica), se os outros elos (que dependem de informações experimentais) não forem igualmente bem conhecidos. A qualidade dos modelos de cálculo *não* substitui as informações experimentais indispensáveis nas aplicações práticas. Por outro lado, deve-se também reconhecer que modelos de cálculos incorretos simplesmente *não* geram previsões adequadas sobre a vida da peça, mesmo que se disponha de dados experimentais confiáveis sobre os três primeiros elos.

Por isto, os objetivos deste programa foram especificados tanto sob o ponto de vista do projetista mecânico quanto do pesquisador acadêmico, de forma a obter-se uma ferramenta precisa, atualizada e fácil de usar, visando:

- Apresentar uma interface gráfica clara, amigável e intuitiva.
- Calcular corretamente o dano à fadiga por todos os métodos tradicionais de projeto, incluindo todas as sofisticações necessárias para maximizar a acurácia dos cálculos.
- Dar ao usuário total controle sobre todas as opções de cálculo
- Incluir um completo arquivo de ajuda com todas as informações necessárias sobre o funcionamento, desempenho numérico e embasamento teórico de todos os modelos de cálculo.
- Minimizar o tempo de cálculo, usando opções de filtragem e algoritmos numéricos eficientes.

- Incluir todos os bancos de dados necessários às rotinas de projeto.
- Permitir a fácil expansibilidade de todos os bancos de dados.
- Gerar relatórios gráficos e numéricos facilmente imprimíveis e exportáveis.

Entrada de Dados

A tela de entrada do programa é ilustrada na figura 2. Sua aparência é a usual no ambiente Windows, e na sua parte superior apresenta cinco opções geradoras de menus. A opção **Arquivo** serve para carregar ou ativar:

- as histórias do carregamento,
- o cálculo de tensões equivalentes ou de rosetas,
- a filtragem do carregamento,
- a contagem *rain-flow*,
- o cadastro de propriedades de materiais, e
- os cadastros dos fatores de concentração de tensão K_t , dos fatores de intensidade de tensão K_I , ou das equações de propagação de trincas.

As cargas podem ser especificadas em tensão ou em deformação, e o usuário pode escolher o SI ou o sistema inglês para as unidades. A história do carregamento pode ser dada (i) por sua seqüência ordenada de picos e vales, (ii) pela seqüência equivalente de cargas médias, alternadas e número de reversões (ou 1/2 ciclos), ou (iii) por um histograma. A informação pode ser manualmente digitada ou importada de listas ordenadas com extensão .csv, inclusive as geradas experimentalmente ou numa planilha tipo Excel. A *ordem* dos carregamentos seqüenciais é preservada. No caso das cargas médias e alternadas, é claro que a amplitude σ_a ou ϵ_a tem que ser um número positivo, enquanto que a média σ_m ou ϵ_m pode ser compressiva ou trativa, já que nos cálculos são reconhecidas as diferenças entre seus efeitos na vida à fadiga.

Há opções de filtragem do carregamento em *amplitude* segundo um patamar ajustável, seguindo a idéia do método *race-track* (Nelson & Fuchs 77), e de contagem de ciclos, segundo os métodos *rain-flow* tradicional (Dowling 93, p.ex.) e seqüenciado, explicado abaixo. Para que se possa visualizar a história do carregamento, o programa desenha a seqüência dos picos e vales, e também os carregamentos filtrados.

A filtragem em amplitude é muito útil para diminuir o esforço computacional nos cálculos de dano à fadiga, mas deve ser usada com cuidado porque *despreza* carregamentos, o que é um procedimento intrinsecamente *não* conservativo. Uma boa regra é limitar o patamar de corte ao valor do limite de fadiga na carga média em questão, já que solicitações menores que este valor não causam dano à peça (Castro et al. 94).

Para evitar que a contagem *rain-flow* seja tratada como qualquer estatística, perdendo as informações de seqüência, há também a opção de ordena-la mantendo a *localização* de seus picos, uma nova idéia explicada na figura 3. A contagem *rain-flow* seqüenciada contabiliza o efeito dos carregamentos no momento em que eles ocorrem (e não *antes* de sua ocorrência, como no método tradicional), sem acrescentar qualquer dificuldade de monta ao algoritmo de contagem.

Todos os cadastros são facilmente editáveis e expansíveis. Os cadastros de K_t , K_I e de curvas da/dN podem ser editados através de um interpretador de fórmulas matemáticas com sintaxe padrão Basic, sendo fácil amplia-los, por exemplo, com informações contidas nas referências tradicionais (Peterson 74, Hardy & Malik 92 ou Tada et al. 85).

É na opção **Arquivo** que também se escolhe qual o material da peça. O programa fornece um banco de dados inteligente e hierarquizado (que já conta com propriedades de centenas de materiais diferentes), o qual pode ser facilmente expandido sem limites de armazenamento. Com este banco de dados pode-se:

- Selecionar materiais ordenando-os por uma ou mais propriedades (e.g., pode-se listar os materiais com resistência ao escoamento S_Y entre 500 e 700MPa e tenacidade K_C maior que $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$).
- Gerar os gráficos SN, ϵN , da/dN vs. ΔK , e σE real (monotônico e cíclico), com *zoom* e eixos ajustáveis (basta *clique* sobre os gráficos para expandi-los, e pode-se imprimir-los diretamente).
- Ajustar tabelas de pontos experimentais, com geração dos gráficos e cálculo das propriedades correspondentes.
- Completar as tabelas de propriedades, *estimando* as não fornecidas (os números estimados aparecem em vermelho, para diferencia-los dos valores medidos). As regras usadas nesta estimativa podem ser modificadas pelo usuário.
- Ajustar manualmente qualquer das propriedades, para verificar sua influência nos cálculos.
- Remeter as propriedades para os modelos de cálculo.

A opção seguinte da tela inicial do programa chama-se **Vida**, e é sua parte mais importante, pois inclui *todas* as metodologias tradicionais de projeto à fadiga, *em toda a sua complexidade*. Estes métodos são:

Método SN

O método SN correlaciona o trincamento por fadiga de *qualquer* peça complexa com o de pequenos corpos de prova (CP), que tenham a mesma *resistência* que o *ponto crítico* da peça (em geral a raiz de um entalhe), e que sejam submetidos à mesma *história de tensões* $\Delta\sigma$ que o solicita em serviço. Desta forma, a rotina de projeto é:

1. Avaliar a resistência à fadiga do ponto crítico da peça.
2. Calcular a história de tensões nele induzida pelo carregamento real.
3. Quantificar o dano acumulado pelos diversos eventos do carregamento.

Este método só deve ser aplicado aos $\Delta\sigma$ macroscopicamente elásticos, logo às longas vidas de iniciação (ao contrário do ϵN , o SN não considera de forma explícita os efeitos elastoplásticos cíclicos eventualmente presentes nas raízes dos entalhes e, como aquele, não reconhece a presença de trincas). Entretanto, o SN é computacionalmente muito mais rápido que o ϵN , conta com um vasto banco de dados e muita experiência acumulada, e pode ser usado confiavelmente talvez na maioria dos casos práticos de dimensionamento mecânico.

No **ViDa 98** o cálculo do número de ciclos necessários para iniciação de uma trinca segundo o método SN segue as idéias consagradas pelo uso em projeto mecânico, e inclui algumas melhorias não-usuais interessantes, como o reconhecimento do efeito das tensões residuais causadas por sobrecargas elastoplásticas, conforme explicado abaixo. A tela deste método está ilustrada na figura 4.

Como a história dos carregamentos disponível pode incluir ou não o efeito dos entalhes (neste caso os carregamentos são chamados nominais), há um banco de dados com fatores de concentração de tensões K_t para diversas geometrias (figura 5), que o usuário pode expandir usando o interpretador de equações do programa. O valor de K_t pode ser modificado pela sensibilidade ao entalhe q e transformado em $K_f = 1 + q(K_t - 1)$, para multiplicar os carregamentos nominais e calcular as tensões causadoras do trincamento por fadiga (q também é calculável pelo programa, em função da resistência à ruptura do material e do raio do entalhe). Pode-se optar por aplicar ou não o efeito da concentração de tensões sobre a componente média do carregamento.

Para prever a resistência da peça à fadiga, primeiro a curva de Wöhler padrão do material (estimada pelo programa, caso não haja um conjunto de resultados experimentais confiáveis) é modificada pelos fatores de acabamento superficial, tamanho, forma de carregamento, etc., característicos do ponto mais solicitado da peça, seguindo especificamente as equações propostas por Shigley (89). Todos os fatores são calculados automaticamente, mas podem ser modificados pelo usuário, que também pode desconsiderar o limite de fadiga S_e para os aços, mantendo ou modificando a inclinação da curva SN a partir de uma vida de referência.

O efeito das cargas médias é quantificado por diversas regras ou “diagramas $S_a S_m$ ” (que são o lugar geométrico das combinações $\sigma_a \sigma_m$ que causam o mesmo dano à fadiga), como Goodman, Gerber, Soderberg e elíptica (da qual as outras três são casos particulares):

$$\left(\frac{\sigma_a}{S_a}\right)^r + \left(\frac{\sigma_m}{S_m}\right)^s = 1 \quad (1)$$

O usuário pode especificar os parâmetros da regra elíptica, definindo a resistência à carga média S_m e os expoentes r e s (Castro 79). A resistência à carga alternada $S_a(N)$ é calculada diretamente da curva de Wöhler da peça, se $S_a > S_e$: $S_a = (c/N)^b$. A parte correspondente à carga média compressiva pode ser considerada de duas formas nos diversos diagramas $S_a S_m$: ou desprezando seu efeito (fazendo $\sigma_m = 0$ quando σ_m for negativo), ou usando uma percentagem ajustável da inclinação da curva de Goodman, para quantificar seu benefício.

O dano à fadiga d é definido pela razão entre os números de ciclos aplicado, n , e o que causaria falha, N : $d = n/N$. No caso de carregamentos complexos, o i -ésimo 1/2 ciclo (contado pelo método *rain-flow*) pode ter componentes alternadas e médias σ_{a_i} , σ_{m_i} , e o dano causado por este evento é $d_i = 1/2N_i$. (N_i é a vida à fadiga que a peça teria sob um carregamento simples, onde estas componentes não variassem). Para calcular d_i , o programa calcula primeiro a tensão totalmente alternada σ'_{a_i} equivalente ao carregamento σ_{a_i} , σ_{m_i} por cada uma das regras $S_a S_m$, e depois a vida N_i correspondente, usando Wöhler:

$$\sigma'_{a_i} = \frac{\sigma_{a_i}}{\left[1 - \left(\frac{\sigma_{m_i}}{S_m}\right)^s\right]^{1/r}} \quad \therefore \quad N_i = \frac{c}{(\sigma'_{a_i})^b} \Rightarrow d_i = \frac{(\sigma'_{a_i})^b}{2 \cdot c} \quad (2)$$

O dano é acumulado a cada evento do carregamento, e falha é definida pelo seu somatório: $\sum d_i = \alpha$, onde α é especificável pelo usuário.

Além destas rotinas de cálculo, que podem ser chamadas de tradicionais, o programa inclui uma opção não-usual no método SN: a consideração das tensões residuais devidas a gradientes de deformação plástica, causados por sobrecargas

esporádicas superpostas a um carregamento de outra forma elástico, aproveitando a informação da *ordem* dos carregamentos. Ao reconhecer algum evento que provoque tensões maiores que a resistência ao escoamento S_Y (localmente na raiz do entalhe), o programa pode aplicar apenas neste 1/2 ciclo a metodologia eN (detalhada mais abaixo) para calcular a tensão residual resultante do descarregamento desta sobrecarga, e passar a somá-la à componente média dos ciclos subsequentes.

A grande vantagem desta opção é acumular o dano reconhecendo o principal efeito de seqüência do carregamento, eliminando assim (pelo menos parcialmente) a principal desvantagem da regra de Miner. Também não se perde muito da vantagem computacional, pois o método SN é aplicado a todos os ciclos elásticos do carregamento antes e após a sobrecarga.

A saída numérica é na forma de uma planilha que inclui o dano por evento, segundo cada uma das regras $S_a S_m$, o dano acumulado e a vida residual prevista. Além disto, o programa gera gráficos de dano versus evento para cada uma das curvas $S_a S_m$, e também desenha os laços de histerese elastoplástica correspondentes aos eventos de sobrecarga, quando esta opção é especificada.

A função de cada um dos botões da diversas telas do programa é descrita num completo arquivo de ajuda, e todos os detalhes dos vários modelos de cálculo são explicados num curso avançado de fadiga incluído no manual visual do programa. Por fim, os usuários menos experientes podem optar por usar a versão simplificada do método SN, onde o dano é calculado sem que seja necessário especificar as várias opções de modelagem discutidas acima.

Projeto de Estruturas Soldadas

O projeto à fadiga de estruturas soldadas é um sub-conjunto do método SN particularmente simples, e baseia-se em testes feitos em estruturas e não em pequenos CPs soldados (devido principalmente às tensões residuais de soldagem e às características geométricas dos filetes mais longos, como tamanho e distribuição dos poros e inclusões).

A metodologia normalizada por órgãos como o IIW - International Institute of Welding, a AWS - American Welding Society, etc., é baseada em apenas duas premissas simples, assumindo que a resistência de uma junta estrutural soldada (executada segundo padrões de controle de qualidade industriais em aço estrutural ao C ou C-Mn) depende apenas de dois fatores (Moura Branco et al., 87):

- da geometria ou do tipo da junta, que é classificada em diversas classes como as ilustradas na figura 6 (que são as normalizadas pelo IIW); e
 - da gama do carregamento nominal $\Delta\sigma$.
- Note-se que esta metodologia tem duas diferenças importantes em relação ao método SN, pois ela *não depende*:
- do material de base (para as normas não importa, do ponto de vista de resistência à fadiga, se a chapa soldada é de aço A36 ou de SAR-60, mesmo que o S_Y deste seja mais que o dobro daquele), e
 - da carga média aplicada na estrutura.

Os diversos detalhes de soldagem são divididos em classes de resistência cuja notação varia entre as diversas organizações normalizadoras. No IIW estas classes são denominadas pelo valor da gama de tensões $\Delta\sigma$ em MPa que o detalhe de soldagem pode suportar com uma vida mínima à fadiga de $2 \cdot 10^6$ ciclos, dentro de uma confiabilidade de 95%.

O **ViDa 98** reconhece todas as classes de juntas normalizadas pelo IIW, e permite que o usuário escolha entre as diversas opções da norma (como o expoente da curva de Wöhler 3.0 ou 3.5, e a existência ou não de um limite de fadiga em $5 \cdot 10^6$ ciclos). Do ponto de vista computacional, o projeto à fadiga de estruturas soldadas é bem mais simples que o SN tradicional, pois não é necessário calcular a tensão σ'_{a_i} equivalente à combinação $(\sigma_{a_i}, \sigma_{m_i})$ do *i*-ésimo carregamento aplicado à peça. A insensibilidade à carga média σ_{m_i} também facilita muito a identificação do patamar de filtragem de amplitude mais adequado ao problema. Uma interessante aplicação prática desta simplificação é discutida em Castro et al. (94), onde se estuda um caso real de previsão da vida residual de reparos soldados em pontes rolantes.

Vale a pena comentar esta aparente insensibilidade das estruturas soldadas à carga média, o que a primeira vista parece um contra-senso, já que as tensões residuais de soldagem são tão altas que freqüentemente ultrapassam as resistências ao escoamento tanto do material de base quanto do depositado. Mas, exatamente por isto, a superposição do carregamento externo às já muito altas tensões residuais só pode induzir uma pequena *variação* das cargas médias atuantes nos cordões de solda. Na realidade, o efeito das grandes tensões residuais reflete-se na baixa resistência à fadiga intrínseca das juntas soldadas: os piores detalhes - os da classe 45 - só toleram uma amplitude de carregamento que é cerca de 5% da resistência à ruptura dos aços *menos* resistentes, enquanto que os melhores - as juntas de topo esmerilhadas da classe 125 - têm uma resistência à fadiga só 2.8 vezes maior do que isto.

Método eN:

O método ϵN correlaciona o *trincamento* por fadiga de *qualquer* peça com o de pequenos CPs, que sejam submetidos à mesma *história de deformações* $\Delta\epsilon$ e que tenham a mesma *resistência* que o *ponto crítico* da peça. Eventos *elastoplásticos* induzidos pelo carregamento no ponto crítico *são* quantificados. Desta forma, a rotina de projeto, similar à do método SN, é:

1. Avaliar a resistência à fadiga do ponto crítico da peça.
2. Calcular a história de deformações nele induzida pelo carregamento real.
3. Quantificar o dano acumulado pelos diversos eventos do carregamento.

Como no caso do método SN, o ϵN também só se aplica ao dimensionamento à fadiga de peças *não* trincadas mas, por quantificar explicitamente as deformações plásticas cíclicas macroscópicas, pode ser usado para prever qualquer vida (o ϵN *tem* que ser usado em vez do SN quando o problema for o dimensionamento à fadiga oligocíclica ou de baixa ciclagem, isto é, quando a gama das deformações plásticas $\Delta\epsilon_p$ atuantes na raiz do entalhe for da mesma ordem ou maior que as elásticas $\Delta\epsilon_e$, mas este método também *pode* ser usado para o dimensionamento às vidas longas). Esta modelagem requer quatro tipos de informação:

- uma relação $\Delta\sigma \Delta\epsilon$, para descrever o laço de histerese elastoplástica na raiz do entalhe,
- uma regra de concentração de deformações (como a de Neuber ou a Linear), para correlacionar as tensões nominais $\Delta\sigma_n$ aplicadas sobre a peça com as deformações $\Delta\epsilon$ por elas induzidas na raiz do entalhe,
- uma relação entre a gama de deformações $\Delta\epsilon$ e a vida à fadiga N , como a regra de Coffin-Manson, e
- uma regra de acúmulo de dano, como a regra de Miner.

A tela de entrada do método ϵN é mostrada na figura 7.

Este é um método moderno, corroborado por instituições tradicionais como a SAE (Rice 88), mas que tem certas idiosincrasias relativamente pouco conhecidas, e que devem ser respeitadas sob pena de graves insucessos. Por isto foi necessário desenvolver uma série de procedimentos alternativos para que o **ViDa 98** efetuasse adequadamente os cálculos ϵN , conforme resumido a seguir.

A metodologia ϵN clássica trabalha com tensões e deformações reais, usa relações $\sigma \epsilon$ tipo Ramberg-Osgood e considera o amolecimento ou endurecimento cíclico do material, mas não o seu transiente a partir do comportamento monotônico, assumindo uma equação única para o laço de histerese expressa por:

$$\epsilon_a = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (3)$$

onde E é o módulo de Young, enquanto K' e n' são o coeficiente e o expoente de encruamento da curva $\sigma \epsilon$ cíclica estabilizada. No caso onde as tensões nominais sejam elásticas, pode-se escrever a regra de concentração de deformações de Neuber como:

$$K_t^2 = \frac{\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon \cdot E}{\Delta\sigma_n^2} \quad (4)$$

onde $\Delta\sigma$ e $\Delta\epsilon$ são as gamas de tensão e deformação atuantes na raiz do entalhe, e $\Delta\sigma_n$ a tensão nominal atuante (em relação à qual é definido o valor de K_t). A relação entre a amplitude das deformações atuantes na raiz do entalhe e a vida à fadiga é geralmente dada pela regra de Coffin-Manson, expressa por:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \epsilon'_f (2N)^c \quad (5)$$

onde σ'_f , ϵ'_f , b e c são constantes do material.

Há vasto suporte experimental para justificar o uso das simplificações do método ϵN no caso do dimensionamento à fadiga sob carregamentos simples, mas em geral a literatura *não* reconhece explicitamente a fundamental importância do estado inicial da peça e da ordem do carregamento no caso de carregamentos complexos.

A forma tradicional de se projetar pelo método ϵN nestes casos tem sido calcular o dano d_i provocado pelas n_i reversões do i -ésimo carregamento nominal $\Delta\sigma_{n_i}$ (contadas pelo método *rain-flow*, como se os diversos ciclos do carregamento fossem independentes), e usar a regra de Miner para acumular o dano $d_i = n_i/2N_i$, sendo N_i o número de ciclos que a peça duraria se somente o carregamento $\Delta\sigma_{n_i}$ estivesse atuando. Para carregamentos nominais elásticos, este método tradicional pode ser resumido por:

- (i) Dado o i -ésimo evento do carregamento $\Delta\sigma_{n_i}$, calcula-se a tensão $\Delta\sigma_i$ induzida na raiz do entalhe:

$$(K_t \Delta\sigma_{n_i})^2 = \Delta\sigma_i \cdot \left(\Delta\sigma_i + 2E \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_i}{2K'} \right)^{1/n'} \right) \quad (6)$$

(ii) A seguir calcula-se a deformação $\Delta\varepsilon_i$ causada por $\Delta\sigma_i$, e os correspondentes N_i e d_i :

$$\frac{\Delta\sigma_i}{E} + 2 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_i}{2K'} \right)^{1/n'} = \Delta\varepsilon_i = \frac{2\sigma'_f}{E} (2N_i)^b + 2\varepsilon'_f (2N_i)^c \Rightarrow d_i = \frac{n_i}{2N_i} \quad (7)$$

Estas equações não são inversíveis, logo o uso do método εN é computacionalmente trabalhoso, o que explica (mas não justifica) a pouca divulgação dos problemas que o seu uso não criterioso pode acarretar:

A aplicação destas equações à contagem rain-flow do carregamento não gera previsões de laços de histerese fisicamente admissíveis!

De fato, para garantir a qualidade das previsões é indispensável assegurar primeiro que o modelo de cálculo reproduza os laços de histerese que atuam na raiz do entalhe, para só então calcular o dano por eles provocado. Como os incrementos de deformação plástica *são* dependentes da história, mesmo que a peça seja virgem, que o estado de tensões e deformações residuais seja zero, e que se possa desprezar os transientes de amolecimento ou endurecimento cíclico, ainda assim é necessário distinguir entre o primeiro 1/2 ciclo do carregamento e os subsequentes. O primeiro 1/2 ciclo segue a relação $\sigma\varepsilon$ cíclica $\varepsilon = \sigma/E + (\sigma/K')^{1/n'}$ e não as equações do laço:

$$(K_t \sigma_{n1})^2 = \sigma_1 \cdot \left(\sigma_1 + E \cdot \left(\frac{\sigma_1}{K'} \right)^{1/n'} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_1}{E} + \left(\frac{\sigma_1}{K'} \right)^{1/n'} = \varepsilon_1 = \frac{2\sigma'_f}{E} (2N_1)^b + 2\varepsilon'_f (2N_1)^c \Rightarrow d_1 = \frac{1}{2N_1} \quad (9)$$

Mas este cuidado indispensável ainda não é suficiente. Como ilustrado na figura 8, é também necessário garantir que todos os eventos subsequentes não ultrapassem (i) a curva $\sigma\varepsilon$ cíclica, nem (ii) o envoltório dos laços de histerese. Para isto, deve-se verificar se e quando as deformações previstas pela equação do laço de histerese para cada evento $\Delta\sigma_{n_i}$ cruzam a curva $\sigma\varepsilon$ cíclica ou um laço previamente induzido na raiz do entalhe. No caso de cruzamento, deve-se trocar a equação do *i*-ésimo laço a partir da interseção, e passar a seguir a curva $\sigma\varepsilon$ (ou a do laço anterior de maior amplitude) até o fim do carregamento $\Delta\sigma_{n_i}$.

Este passo é complicado, mas é absolutamente indispensável sob pena de gerar previsões (i) fisicamente inadmissíveis, e (ii) possivelmente *não conservativas*. De fato, conforme mostrado na figura 8, só se efetuando a troca das equações chega-se ao $\Delta\varepsilon_i$ correto, que pode ser *maior* do que aquele que seria previsto pela equação do laço.

Para garantir a precisão dos cálculos, no programa seguem-se todos os procedimentos discutidos acima, além de uma série de outros igualmente importantes que, por limitações de espaço, são detalhados num trabalho complementar específico (Castro & Meggiolaro 98). Além disto o programa:

- desenha a curva εN , plota sobre ela a curva SN tradicional, e permite que se force a componente elástica da deformação a atingir a curva SN no limite,
- permite que se troque a regra de Neuber pela regra linear de concentração de deformações,
- desenha os laços de histerese *devidamente corrigidos* (e também os previstos pelo método tradicional),
- calcula a vida à fadiga não só por Coffin-Manson e pelo método das inclinações universais de Manson, que não consideram a carga média, como também considera os efeitos da componente média do carregamento pelas regras de Morrow, Morrow modificada e Smith-Topper-Watson.
- gera gráficos de dano versus evento para cada um dos modelos de cálculo.

Como no caso SN, também há uma versão simplificada do método εN para os usuários menos experientes. E, da mesma forma, a função de cada um dos botões da tela deste método, bem como o embasamento teórico de todas as opções de cálculo, são detalhadamente descritos nos arquivos de ajuda do programa.

Método da/dN:

Este método assume que:

- A trinca é o *ponto crítico* da peça, e pode ser modelada pelos conceitos tradicionais da Mecânica da Fratura.
- A taxa de propagação de trincas da/dN (e também dc/dN, no caso das trincas 2D) depende primariamente da faixa ou gama de variação do fator de intensidade de tensões ΔK .

A tela usada no cálculo do crescimento de trincas 2D por fadiga é mostrada na figura 9. A tela do crescimento 1D é similar. Trincas 2D são trincas internas, superficiais ou de canto que se propagam em duas direções, digamos a e c, mudando de forma a cada ciclo do carregamento. Desta forma, estas trincas têm duas taxas de propagação diferentes mas acopladas (isto é, da/dN e dc/dN dependem de a e de c).

O método da/dN teve início quando Paris demonstrou convincentemente que é a gama do fator de intensidade de tensões ΔK e não a da tensão $\Delta\sigma$ o parâmetro que controla a propagação das trincas por fadiga, e propôs a famosa regra da/dN = $A \cdot \Delta K^m$, onde A e m são constantes que dependem do material. Entretanto, as curvas da/dN vs. ΔK típicas não são parabólicas, mas têm uma forma *sigmoidal* característica em log-log, com três fases bem distintas: a fase I, com um limiar de propagação ΔK_{th} e derivada decrescente, a fase II, de derivada constante, e a fase III, de derivada crescente até a fratura, que

ocorre quando $K_{max} = K_C$. A regra de Paris só descreve bem a fase II, e pode gerar erros *significativos* nas previsões de vida, pois (i) não reconhece os efeitos da carga média, de ΔK_{th} nem de K_C na taxa da/dN, (ii) é muito conservativa em pequenos ΔK , e (iii) é *não*-conservativa em altos ΔK e em altas cargas médias. Além disto, *a maior parte da vida pode ser consumida ou para propagar trincas pequenas, ou após sobrecargas que retardem a trinca, reduzindo os valores de ΔK até a ordem de ΔK_{th} .*

Por isto, nos cálculos mais precisos, é necessário usar regras mais completas que a de Paris. Dentre estas, a mais simples é a de Elber, da/dN = $A \cdot (\Delta K - \Delta K_{th})^m$, que modela as fases I e II, mas não reconhece os efeitos da carga média (o programa ajusta dados experimentais de propagação de trincas por Paris e por Elber, usando-se mínimos quadrados). Inúmeras outras regras foram e podem ser propostas para descrever mais precisamente a curva da/dN vs. ΔK , como detalhado num trabalho complementar (Castro & Meggiolaro, 97a). Muitas delas estão incluídas num banco de dados, que pode ser expandido através do interpretador de equações. Uma facilidade particularmente útil é o gráfico de propagação mostrado na figura 9, no qual se plota, além de Paris e Elber, qualquer regra de propagação escolhida pelo usuário (para se expandir o gráfico, basta *clique* sobre ele). Desta forma se tem uma informação visual imediata sobre a concordância entre as diversas regras (o que permite um rápido ajuste de suas constantes), e pode-se facilmente estudar a sensibilidade das previsões de vida à fadiga aos diversos modelos de propagação.

Pode-se calcular o crescimento da trinca correspondente a um dado carregamento especificado (tensão $\Delta\sigma_i$ atuando durante n_i ciclos), ou especificar as dimensões iniciais e finais da trinca, caso se queira calcular a vida correspondente. Em todos os casos, o programa automaticamente pára os cálculos e indica o instante da ocorrência se durante o carregamento acontecer (i) fratura por $K_{max} = K_C$, ou (ii) a trinca atingir o tamanho máximo especificado para a trinca final, ou (iii) a peça atingir a resistência à ruptura no ligamento residual, ou (iv) da/dN igualar 1mm/ciclo ou o CTOD por ciclo, ou (v) no caso das trincas 2D, quando uma das fronteiras da peça é atingida pela frente da trinca. Desta forma, pode-se usar os valores calculados com a garantia de que o limite de validade dos modelos matemáticos nunca é excedido. Além disto, o programa avisa quando atingir o escoamento do ligamento residual antes que o valor especificado para n_i ou para o tamanho máximo da trinca seja atingido.

No caso das trincas 2D, o programa pode desenhar as frentes de trinca a cada evento especificado pelo usuário, para que se possa acompanhar as mudanças de geometria que ocorrem durante a sua propagação. E também pode plotar gráficos que envolvam qualquer das variáveis calculadas, como variação da forma de trinca a/c, $K_I(a)$, $K_I(c)$, etc., para que se possa estudar todas as nuances do comportamento daquelas trincas, que certamente não é nem simples nem intuitivo. A figura 10 ilustra o crescimento de uma trinca superficial semi-elíptica, mostrando claramente a mudança de forma observada durante a propagação de trincas 2D. Como todos os gráficos gerados pelo programa são facilmente plotáveis, esta é uma poderosa ferramenta para visualizar e ilustrar os problemas de fadiga.

Prever o crescimento de trincas sob carregamentos de amplitude constante usando regras mais completas do que a de Paris é uma tarefa (conceitualmente) trivial. No caso geral, a regra de propagação pode depender de ΔK , de ΔK_{th} , de K_C , da carga média (em geral dada por $R = K_{min}/K_{max}$), e de outros parâmetros: da/dN = $F(\Delta K, \Delta K_{th}, K_C, R, \dots)$. Para calcular o número de ciclos que a trinca leva para crescer de um comprimento inicial a_0 até um final a_f , pode-se usar qualquer algoritmo de integração numérica, como Simpson, e.g., para obter:

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{F(\Delta K, \Delta K_{th}, K_C, R, \dots)} \quad (10)$$

Mas o problema do crescimento de trincas sob carregamentos complexos não é nada trivial. Mesmo quando se desprezam os efeitos da interação entre os ciclos, como retardos na taxa de propagação induzidos por sobrecargas, implementar um algoritmo numericamente eficiente exige cuidados não desprezíveis. No **ViDa 98** foram implementados dois métodos para tratar este problema: os métodos do *crescimento ciclo a ciclo* (ccc) e da *carga de amplitude constante equivalente* (ΔK_{rms}), Barson & Rolfe (87). Este é o mais simples, e substituí o carregamento complexo por um outro de amplitude $\Delta\sigma_{rms}$ constante equivalente, no sentido de causar o mesmo crescimento da trinca. O algoritmo de Hudson (81)

$$\Delta K_{rms} = (\sigma_{max_{rms}} - \sigma_{min_{rms}}) \sqrt{\pi a} \cdot f(a) \quad (11)$$

$$\sigma_{\max_{\text{rms}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^q (\sigma_{\max_i})^2}{q}}, \quad \sigma_{\min_{\text{rms}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^q (\sigma_{\min_i})^2}{q}}, \quad R_{\text{rms}} = \frac{\sigma_{\min_{\text{rms}}}}{\sigma_{\max_{\text{rms}}}} \quad (12)$$

permite que o carregamento complexo seja tratado como se fosse de amplitude constante (e igual a $\Delta\sigma_{\text{rms}}$). Este procedimento foi generalizado para o caso das trincas 2D, seguindo as mesmas idéias detalhadas acima. Como ΔK_{rms} se comporta como uma carga simples, o número de ciclos N que a trinca leva para crescer do comprimento inicial a_0 até o final a_f é dado por:

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{F(\Delta K_{\text{rms}}, R_{\text{rms}}, \Delta K_{\text{th}}, K_C, \dots)} = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{F(a)} \quad (13)$$

Na prática, um carregamento complexo é dado por uma seqüência de picos e vales $\{\sigma_{\max_i}, \sigma_{\min_i}\}$, ou pela seqüência equivalente $\{\sigma_{ai}, \sigma_{mi}, n_i\}$. Para se usar o método ΔK_{rms} deve-se primeiro zerar os σ_{\max_i} e $\sigma_{\min_i} < 0$, para depois calcular $\Delta\sigma_{\text{rms}}$, R_{rms} . Entretanto, há uma série de detalhes que tornam o uso deste modelo menos simples do que aparentam as equações acima. Deve-se notar que:

- O método ΔK_{rms} deveria ser chamado de $\Delta\sigma_{\text{rms}}$, pois ele *não* contabiliza o crescimento da trinca em ΔK_{rms} .
- $\Delta\sigma_{\text{rms}}$ *não* é o valor médio quadrático de σ (se o valor rms de σ fosse usado, cargas de amplitude constante não convergiriam para $\Delta\sigma_{\text{rms}} = \Delta\sigma$, e se os picos e vales negativos não fossem zerados, cargas com $\sigma_m = 0$ não causariam crescimento da trinca).
- O valor ΔK_{rms} de um carregamento complexo é *similar* mas *não idêntico* a um carregamento simples pois, como toda estatística, ΔK_{rms} não reconhece ordem temporal, e não pode perceber problemas como (i) fratura súbita (basta que *num único* evento o valor de $K_{\max} = K_C$), (ii) qualquer efeito de interação entre os ciclos do carregamento (como *retardos* induzidos por sobrecargas)
- *Não* se pode garantir a inatividade da trinca se $\Delta K_{\text{rms}}(a_0) < \Delta K_{\text{th}}(R_{\text{rms}})$

Estes problemas acentuam-se na implementação do modelo de crescimento 2D. Os detalhes estão discutidos em trabalhos complementares (Castro & Meggiolaro, 97b e Castro et al., 98).

O método ccc quantifica o crescimento da trinca a cada ciclo do carregamento, e é, desta forma, conceitualmente similar ao acúmulo de dano usado na modelagem da geração das trincas por fadiga. Como no caso ΔK_{rms} , a parte negativa dos carregamentos é desconsiderada, já que a trinca não cresce enquanto fechada. Desprezando efeitos de interação entre os diversos eventos de um carregamento complexo, é fácil escrever uma expressão geral para o crescimento da trinca a cada ciclo, segundo qualquer regra de propagação. Sendo $da/dN = F(\Delta K, R, \Delta K_{\text{th}}, K_C, \dots)$, então no i -ésimo $1/2$ ciclo $\Delta\sigma_i$ a trinca cresce de δa_i dado por:

$$\delta a_i = F(\Delta K(\Delta\sigma_i, a_i), R(\Delta\sigma_i, \sigma_{\max_i}), \Delta K_{\text{th}}, K_C, \dots) / 2 \quad (14)$$

As trincas 2D também podem crescer na profundidade e na largura, e tanto $\Delta K(a_i)$ quanto $\Delta K(c_i)$ dependem de a_i e de c_i ao mesmo tempo. Logo, o crescimento δa_i e δc_i nas duas direções é acoplado. Ver os trabalhos complementares já citados acima para detalhes.

Para se efetuar o cálculo do crescimento ciclo a ciclo de um carregamento complexo, deve-se reconhecer primeiro todos os eventos do carregamento. Mas para isto é particularmente importante utilizar a contagem *rain-flow seqüenciada*, como indicado na figura 3, pois os efeitos de ordem do carregamento na propagação das trincas são de duas naturezas distintas:

- os de retardo no crescimento subsequente da trinca (efeitos prolongados), e que podem ser causados, e.g., por alteração do fechamento tipo Elber ou por bifurcações da ponta da trinca
- os relacionados com eventos de fratura, que são instantâneos e dependem da relação entre a tenacidade à fratura do material K_C e $K_{\max_i} = \sigma_{\max_i} \sqrt{\pi a_i} f(a_i)$ em cada evento.

Estes últimos são muito mais dramáticos, pois significam a quebra da peça e tem que ser previstos com exatidão. A modificação introduzida na contagem *rain-flow* (que na sua versão original *antecipa* os grandes picos do carregamento em relação ao momento de sua ocorrência) evita que o programa não reconheça um evento de quebra quando os picos de carga ocorrem com a trinca já grande, pois estes só são contabilizados no instante de sua ocorrência e o programa sempre verifica se $K_{\max_i} < K_C$. (A contagem *rain-flow* seqüencial não elimina *todos* os problemas de ordenamento causados pelo método tradicional, mas é certamente uma opção recomendável pois apresenta vantagens sobre e não acrescenta dificuldades ao algoritmo de contagem original).

O algoritmo ccc não é eficiente sob carregamento complexo. Por isto, na sua implementação numérica foram introduzidas opções para diminuir o tempo de computação, como uma (pequena e especificável) percentagem de variação na \sqrt{a} para só então mudar o valor do fator geométrico de ΔK usado nos cálculos.

Como no caso geral $\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{(\pi a)}f(a)$, onde $f(a)$ é um fator que só depende da geometria, pode-se dizer que a gama do fator de intensidade de tensões a cada ciclo do carregamento ΔK_i depende: (i) da variação da tensão naquele ciclo $\Delta\sigma_i$, e (ii) do comprimento da trinca a_i naquele *instante*. Ora, desta forma ΔK depende de duas variáveis de naturezas diferentes. É claro que $\Delta\sigma_i$ pode em geral variar bastante a cada ciclo quando o carregamento é complexo, mas as trincas *sempre* se propagam muito devagar por fadiga, pois as maiores taxas de crescimento *estável* observadas na prática são da ordem de $\mu\text{m}/\text{ciclo}$, sendo que durante a maioria da vida as taxas são melhor medidas em nm/ciclo . Como em geral as expressões para $f(a)$ podem ser muito complexas mas não apresentam descontinuidades, pode-se tirar proveito da pequena mudança no produto $\sqrt{a}f(a)$ para pequenos incrementos no comprimento da trinca. Desta forma, em vez de se calcular a cada ciclo $\Delta K_i = \Delta\sigma_i\sqrt{(\pi a_i)}f(a_i)$, o que demandaria grande esforço computacional, pode-se manter o produto $\sqrt{a}f(a)$ constante enquanto a \sqrt{a} não variar da (pequena) percentagem especificada pelo usuário do programa.

Efeitos de seqüência podem ser *muito* significativos na propagação das trincas de fadiga (podem *parar* o crescimento da trinca!). Este é um problema complexo, com vários mecanismos envolvidos como, e.g.: (i) alteração do *fechamento* da trinca; (ii) *cegamento* e/ou *bifurcação* da ponta da trinca; (iii) tensões e/ou deformações *residuais*; (iv) *rugosidade* das superfícies da trinca; e (v) *oxidação* das faces da trinca (Suresh, 91). A importância relativa dos diversos mecanismos pode variar dependendo de fatores como tamanho da trinca, microestrutura do material, estado de tensões dominante, meio ambiente, etc. Entretanto, as modelagens tradicionais deste problema baseiam-se apenas na idéia do fechamento induzido por plasticidade, segundo a qual:

- Trincas de fadiga se propagam cortando um material que já foi ciclicamente deformado pela zona plástica que acompanha suas pontas.
- As faces da trinca ficam embutidas num envelope de deformações (plásticas) residuais trativas.
- As trincas de fadiga *comprimem* as suas faces quando completamente descarregadas, e só se abrem aliviando-as de forma progressiva.
- Quanto maior a carga de abertura da trinca, menor o valor efetivo de ΔK : $\Delta K_{\text{ef}} = K_{\text{max}} - K_{\text{ab}}$
- ΔK_{ef} seria o principal controlador da taxa da/dN .
- ΔK_{ef} diminui se a carga de abertura aumentar quando a trinca penetrar na zona plástica hipertrofiada pela sobrecarga, retardando ou até parando o crescimento da trinca.

O programa dispõe de dois modelos para quantificar a interação entre ciclos. O primeiro é o modelo de Wheeler (Broek, 88), segundo o qual se a zona plástica do carregamento estiver embutida na de uma sobrecarga (ver figura 11), o retardo depende da distância da fronteira plástica da sobrecarga à ponta da trinca, isto é, se $a_i + ZP_i < a_{\text{sc}} + ZP_{\text{sc}}$, e vale:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{ret}_i} = \left(\frac{da}{dN}\right)_i \cdot \left(\frac{ZP_i}{a_{\text{sc}} + ZP_{\text{sc}} - a_i}\right)^\beta \quad (15)$$

Este modelo não pode prever a parada das trincas após uma sobrecarga de amplitude suficientemente grande. Por isto, também foi introduzida e implementada uma modificação que aplica o efeito do retardo em ΔK e não em da/dN :

$$\Delta K_{\text{ret}}(a_i) = \Delta K(a_i) \cdot \left(\frac{ZP_i}{a_{\text{sc}} + ZP_{\text{sc}} - a_i}\right)^\gamma \quad (16)$$

Os detalhes destes modelos, bem como de sua implementação numérica, tanto no caso 1D como no 2D, são bastante longos, e estão discutidos num trabalho complementar (Castro & Meggiolaro 97b). Como nos casos SN e ϵN , também há uma versão simplificada do método da/dN para os usuários menos experientes. E, da mesma forma, a função de cada um dos botões da tela deste método, bem como o embasamento teórico de todas as opções de cálculo, são detalhadamente descritos nos arquivos de ajuda do programa.

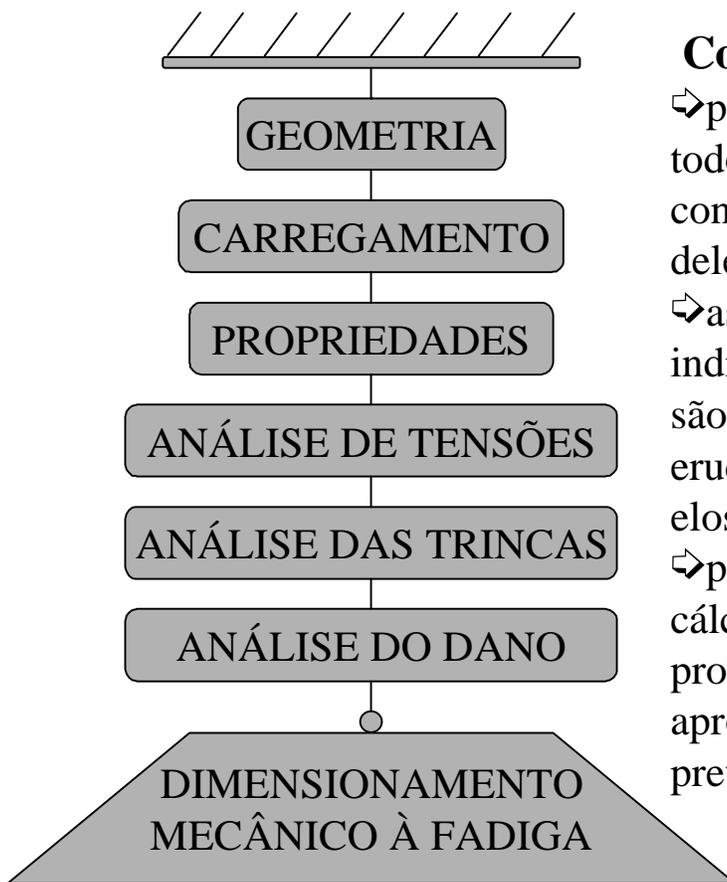
Conclusões

Um programa chamado **ViDa** foi concebido e desenvolvido para calcular vida à fadiga sob carregamentos complexos por todos os métodos usuais de projeto mecânico, incluindo todas as facilidades que pudessem ser úteis ao projetista, como bancos de dados, inúmeras opções de cálculo, interface amigável, etc. Este programa tem sido compartilhado com pessoal qualificado que queira contribuir para o seu desenvolvimento, e que participe do mini-curso intensivo "Avanços na Automação do Projeto à Fadiga", oferecido pelo Centro de Estudos em Integridade Estrutural - CEIE - da PUC-Rio. A versão 98 deste programa inclui, além das características resumidas no texto, rotinas de cálculo depuradas por três anos de testes

intensivos. Por isto, a distribuição do programa para uso acadêmico em Universidades já pode ser discutida diretamente com os autores.

Referências

- Anderson,T.L. "Fracture Mechanics", CRC 95.
- Bannantine,J.A.; Comer,J.J. & Handrock,J.L. "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall 90.
- Barson,J.M. & Rolfe,S.T. "Fracture and Fatigue Control in Structures", Prentice-Hall 87.
- Broek,D. "The Practical Use of Fracture Mechanics", Kluwer 88.
- Castro,J.T.P. "Um Método Racional Explícito para Projeto de Componentes Mecânicos Sujeitos a Carregamentos Dinâmicos Gerais", Rev. Bras. Ciênc. Mecânicas v.2, n.2, pp71-80, 79.
- Castro,J.T.P.; Freire,J.L.F. & Vieira,R.D. "Fatigue Life Prediction of Repaired Welded Structures", J.Constructional Steel Research, V.28, pp.187-195, 94.
- Castro,J.T.P. & Meggiolaro,M.A. "Uma Nota Sobre a Modelagem da Curva de Propagação de Trincas por Fadiga", submetido à Rev. Bras. Ciênc. Mecânicas, 97a.
- Castro,J.T.P. & Meggiolaro,M.A. "Uma Nota Sobre a Automação do Cálculo da Propagação de Trincas por Fadiga sob Carregamentos Complexos", submetido à Rev. Bras. Ciênc. Mecânicas, 97b.
- Castro,J.T.P.; Giassoni,A. & Kenedi,P.P. "Propagação por Fadiga de Trincas Superficiais Semi e Quarto-Elípticas em Soldas Molhadas", Rev. Bras. Ciênc. Mecânicas vol.20, n.2, pp.263-269, 98.
- Castro,J.T.P. & Meggiolaro,M.A. "Alguns Comentários sobre a Automação do Método eN para Dimensionamento à Fadiga sob Carregamentos Complexos", a ser publicado na Rev. Bras. Ciências Mecânicas, 98.
- Dowling,N.E. "Mechanical Behavior of Materials", Prentice-Hall 93.
- Farahmand,B. "Fatigue and Fracture Mechanics of High Risk Parts", Chapman & Hall 97.
- Fuchs,H.O. & Stephens,R.I. "Metal Fatigue in Engineering", Wiley 80.
- Hardy,S.J. & Malik,N.H. "A Survey of Post-Peterson Stress Concentration Factor Data", Int.J.Fatigue v.14, n.3, pp.147-153, 92.
- Hertzberg,R.W. "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", Wiley 89.
- Hudson,C.M. "A Root-Mean-Square Approach for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading", ASTM STP 748, pp.41-52, 81.
- Juvinall,R.C. "Stress, Strain & Strength", McGraw-Hill 67.
- Meggiolaro,M.A. & Castro,J.T.P. "ViDa - Programa para Previsão de Vida à Fadiga sob Carregamentos Complexos", Anais do III Simpósio de Análise Experimental de Tensões, pp.7-10, ABCM 95.
- Meggiolaro,M.A. & Castro,J.T.P. "Desenvolvimentos na Automação do Projeto à Fadiga sob Carregamentos Complexos", II Sem. Mec. Fratura, pp.99-118, ABM 96.
- Moura Branco,C. et al. "Fadiga de Estruturas Soldadas", Gulbenkian 87.
- Nelson,D.V. & Fuchs,H.O. "Predictions of Cumulative Fatigue Damage Using Condensed Load Histories", in Fatigue Under Complex Loading, SAE 77
- Peterson,R.E. "Stress Concentration Factors", Wiley 74.
- Rice,R.C., ed. "Fatigue Design Handbook", SAE 88.
- Shigley,J.E. & Mischke,C.R. "Mechanical Engineering Design", McGraw-Hill 89.
- Suresh,S. "Fatigue of Materials", Cambridge 91.
- Tada,H.; Paris,P.C. & Irwin,G.R. "The Stress Analysis of Cracks Handbook", Paris Prod. 85.



Corrente do Projeto à Fadiga

⇨ para otimizar o projeto à fadiga, todos os elos devem ter precisão e confiabilidade similares: o *pior* deles controla a qualidade

⇨ as informações experimentais indispensáveis aos 3 primeiros *não* são supridas sofisticando-se (pela erudição acadêmica) os 3 últimos elos da corrente

⇨ por outro lado, *só* modelos de cálculo que descrevam a física do problema de forma *correta* e apropriada podem gerar boas previsões de vida à fadiga!

Figura 1: A corrente do projeto à fadiga, e os diversos elos nos quais o processo pode ser dividido.

Material com o qual os cálculos serão efetuados

Barra indicadora do progresso de cálculo

Gráfico 1: dano ou crescimento de trinca por evento (clicar sobre qualquer gráfico para expandi-lo)

Seqüência de carregamento na planilha principal: Componentes Alternadas/Médias / nº de 1/2 ciclos ou Picos e Vales

Duração de todos os eventos da planilha principal, para estimar o tempo de vida residual

Carregamentos podem ser em tensões (MPa ou ksi) ou em deformações ($\mu\text{m}/\text{m}$, 10^{-6})

Número do evento

Componente Alternada do carregamento

Componente Média do carregamento

Número de 1/2 ciclos do carregamento

Gráfico 3: laços de histerese

Gráfico 2: dano total ou crescimento de trinca acumulado por evento

Dano por evento, por cada um dos modelos de cálculo

| Evento | Alternado | Médio | 1/2 ciclos | Coffin-Manson | Morrow | Morrow mod | Smith-Wat |
|--------|-----------|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|
| 1 | 90 | 90 | 1 | 6.84111E-06 | 8.55581E-06 | 2.32761E-05 | 1.3448E-0 |
| 2 | 20 | 40 | 1 | 1.81785E-10 | 1.17463E-09 | 1.47444E-09 | 6.79907E- |
| 3 | 20 | 40 | 1 | 1.81785E-10 | 1.17463E-09 | 1.47444E-09 | 6.79907E- |
| 4 | 20 | 100 | 1 | 1.81785E-10 | 1.17463E-09 | 1.47444E-09 | 6.79907E- |
| 5 | 20 | 100 | 1 | 1.81785E-10 | 1.17463E-09 | 1.47444E-09 | 6.79907E- |
| 6 | 110 | 70 | 1 | 5.4357E-06 | 5.98682E-06 | 8.64965E-06 | 1.15258E- |
| 7 | 40 | 40 | 1 | 2.11556E-08 | 1.48574E-08 | 1.2906E-08 | 1.1255E-0 |
| 8 | 40 | 40 | 1 | 2.11556E-08 | 1.48574E-08 | 1.2906E-08 | 1.1255E-0 |
| 9 | 140 | 100 | 1 | 1.89793E-05 | 2.05901E-05 | 3.40123E-05 | 3.29668E- |
| 10 | 30 | 190 | 1 | 3.16262E-09 | 1.52665E-08 | 2.60122E-08 | 3.06097E- |
| 11 | 30 | 190 | 1 | 3.16262E-09 | 1.52665E-08 | 2.60122E-08 | 3.06097E- |
| 12 | 160 | 80 | 1 | 2.91844E-05 | 3.04295E-05 | 4.09197E-05 | 4.48239E- |
| 13 | 40 | 200 | 3 | 6.30716E-08 | 3.21972E-08 | 2.51862E-08 | 7.30572E- |
| 14 | 40 | 200 | 1 | 2.13004E-08 | 1.08791E-08 | 8.50129E-09 | 2.48604E- |
| 15 | 60 | 60 | 1 | 2.31103E-07 | 1.72662E-07 | 1.29177E-07 | 4.24571E- |
| 16 | 60 | 60 | 1 | 2.2505E-07 | 1.67951E-07 | 1.25887E-07 | 4.16873E- |
| 17 | 140 | 100 | 1 | 1.65255E-05 | 1.70683E-05 | 2.04908E-05 | 2.44481E- |
| 18 | 50 | 110 | 1 | 8.17663E-08 | 1.61675E-07 | 3.01665E-07 | 1.01807E- |
| 19 | 90 | 150 | 1 | 5.42709E-06 | 7.24337E-06 | 2.45289E-05 | 1.52576E- |

Tela Principal
(com resultados de um cálculo eN)

Figura 2: Tela principal do ViDa 98 no modo de saída, com a planilha mostrando os resultados de um cálculo eN. Notar a complexidade dos carregamentos, os diversos modelos de cálculo disponíveis e o gráfico dos laços de histerese corrigidos.

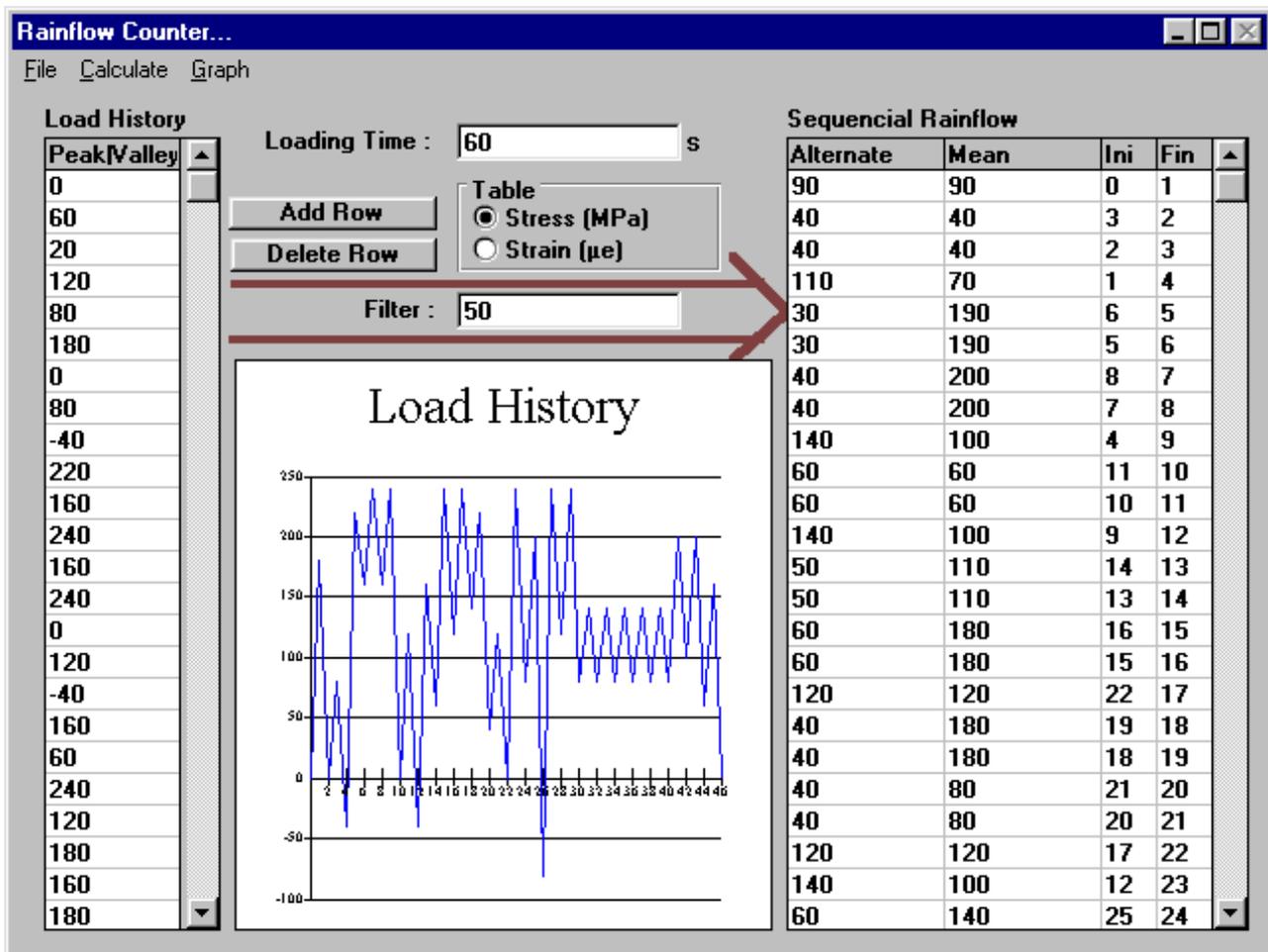


Figura 3: Contagem rain-flow sequencial. Notar que, ao contrário da contagem tradicional, este método não antecipa os carregamentos, minimizando assim os efeitos de seqüência. Notar também que, como o **ViDa 98** permite a escolha da língua da interface, esta tela está em inglês.

The image shows the 'Calcular Vida (SN)...' dialog box in the ViDa 98 software. The interface is annotated with callouts explaining various parameters and features:

- Acabamento superficial do ponto crítico da peça:** Retificado
- Título do cálculo, para o histórico:** Títula do cálculo:
- Gráfico 1: Curva SN, incluindo os fatores de modificação do limite de fadiga:** Curva S-N (MPa x cycl)
- Nome e expoentes do diagrama SaSm elíptico:** Nome: PUC
- Gráfico 2: Diagramas SaSm:** Curva de Dano Personalizada
- Efeito da tensões médias compressivas no diagrama SaSm:** Exp. Tensão Média: 1
- Calcula tensões residuais geradas por sobrecargas e traça laços de histerese, usando só nestes eventos o método ϵN :** Considerar Tensões Residuais: (unchecked)
- Resistência à ruptura:** Su: 441 MPa
- Temperatura de trabalho:** Temperatura: 20 °C
- Fatores de modificação da curva SN:** ka: 9.42E-01, kb: 9.26E-01, kc: 1.00E+00, kd: 1.00E+00, ke: 1.00E+00
- Parâmetros b e c da curva SN:** b: 9.53E+00, c: 5.91E+27
- Expoente b da curva SN para tensões abaixo de Sf (se nulo, há o cotovelo):** b_cot: 0.00E+00
- Critério de falha segundo a regra de Miner, $\Sigma n_i/N_i = \alpha$ (α normalmente = 1):** Fim da vida para dano = 1
- Fatores de concentração de tensões e de sensibilidade ao entalhe:** Kt: 2.50E+00, q: 0.00E+00
- Número de pontos utilizados no cálculo e na plotagem dos laços de histerese:** Pts p/ cálculo: 40

Tela SN

Figura 4: Tela SN do **ViDa 98**, mostrando as principais opções de cálculo disponíveis. Notar o gráfico dos diversos diagramas SaSm, e a opção de cálculo dos efeitos elastoplásticos causados por sobrecargas.

Calcular Fator de Concentração de Tensão (K_t)...

Grupo
 Barras com Furos ou Entalhes Barras Filetadas Eixos Filetados Eixos com Entalhes

Barras com Furos ou Entalhes

Fonte : Roark - Formulas for Stress and Strain (5.ed.)

Imprimir

Gráficos do K_t da peça escolhida

Dimensões da peça escolhida

| | | |
|--------------------------------------|-----|-----|
| Largura (w) ou Diâmetro (D) : | 10 | mm |
| Largura, diâmetro ou espessura (d) : | 8 | mm |
| Raio (r) : | 1 | mm |
| Su : | 441 | MPa |

Obs: aconselha-se não utilizar valores de w/d (ou D/d ou 2r/w) fora dos limites dos apresentados em cada gráfico.

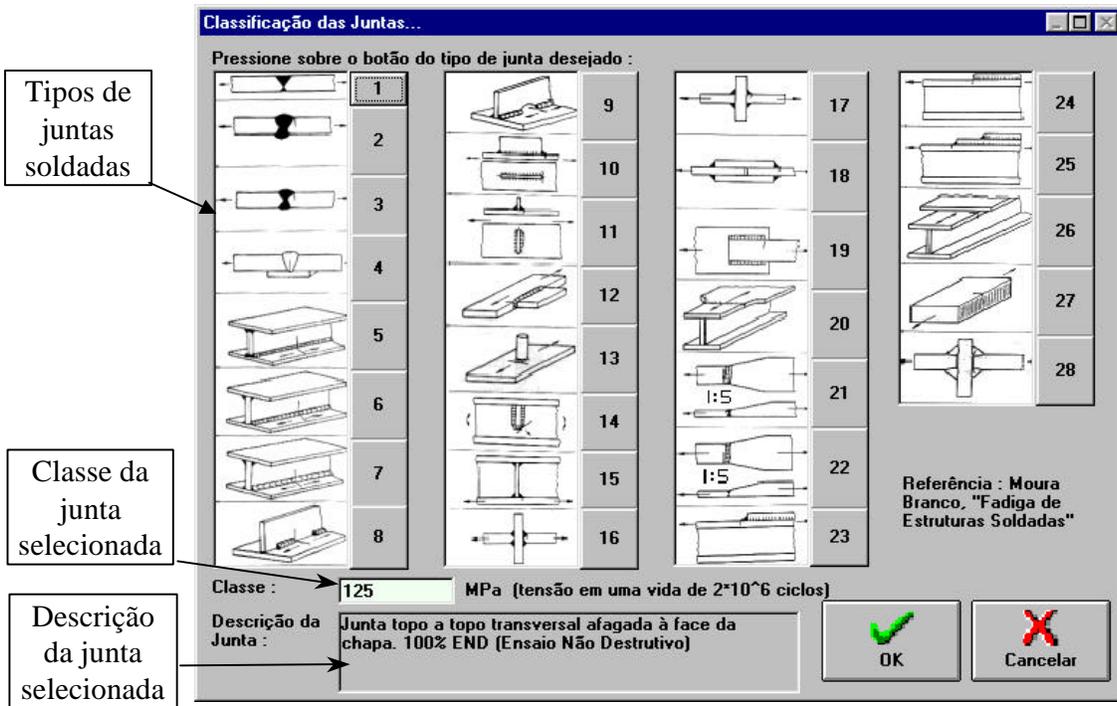
Cancelar

K_t : 2.42E+00 q : 7.67E-01 K_f : 2.09E+00

K_t, q e K_f calculados para o tipo e as dimensões de peça escolhidos

Tela de Cálculo dos K_t

Figura 5: Tela de cálculo dos fatores de concentração de tensões K_t de entalhes típicos.



Tela das Classes de Juntas Soldadas

Figura 6: Tela do cálculo da vida à fadiga de juntas soldadas, segundo o método do IIW.

Calculador Vida (eN)...

Calcular Gráfico

Título do cálculo:

Acabamento Superficial: Retificado

Carregamento: Flexão

Diâmetro: 15 mm

Su: 441 MPa

Temperatura: 20 °C

S_f: 220.5 MPa

ka: 9.42E-01

kb: 9.26E-01

kc: 1.00E+00

kd: 1.00E+00

ke: 1.00E+00

Curva e-N

σ_f: 8.96E+02 MPa

ε_f: 4.10E-01

b: -1.29E-01

c: -5.10E-01

Fim da vida para dano = 1

K_t: 2.50E+00

Concentração de Deformações [valores nominais elásticos]

Enfoque Linear (K_e = K_t) Sistema de Neuber (K_e.K_s = K_t²)

Considerar Cotovelo da Curva S-N

Traçar Laços de Histerese

Corrigir Laços (***altamente recomendado***)

Desenhar Curva S-e Cíclica sobre os Laços

Rainflow nas Deformações

Definir Laços a Traçar

Filtro Amplitude: 0 μe

Inicial: 100 Final: 200

Pts. cálculo: 40

Pts. plotagem: 20

OK Cancelar

Curva e-N (reversões)

Curva e-N

Elástica (e-N)

Plástica (e-N)

Curva S-N

Usar Neuber ou a regra Linear para quantificar o Efeito do K_t nos cálculos eN

Reconhecer o limite de fadiga

Desenhar laços de histerese

Corrigir cálculos eN para gerar laços corretos

Contar (rainflow) as deformações calculadas, após filtragem de amplitude

Tela eN

Tipo do carregamento

Acabamento superficial do ponto crítico da peça

Título do cálculo, para o histórico

Curvas eN e SN, incluindo os fatores de modificação do limite de fadiga e o cotovelo da curva SN (caso escolha-se essa opção)

Diâmetro da peça

Resistência à ruptura

Temperatura de trabalho

Fatores de modificação da curva SN

Constantes da curva eN. O expoente b é automaticamente ajustado quando se alteram os fatores ka, kb, ...

Critério de falha segundo a regra de Miner, Σn_i/N_i = α (α normalmente = 1)

Fator de concentração de tensões

Nº de pontos usados no cálculo e na plotagem dos laços de histerese

Eventos usados para traçar os laços

Figura 7: Tela eN do ViDa 98, mostrando as diversas opções de cálculo disponíveis. Notar os botões de correção dos laços e de contagem *rain-flow* das deformações calculadas, propostas que são discutidas no texto e que são indispensáveis para que se possa obter previsões fisicamente corretas.

Picos e Vales de Deformação

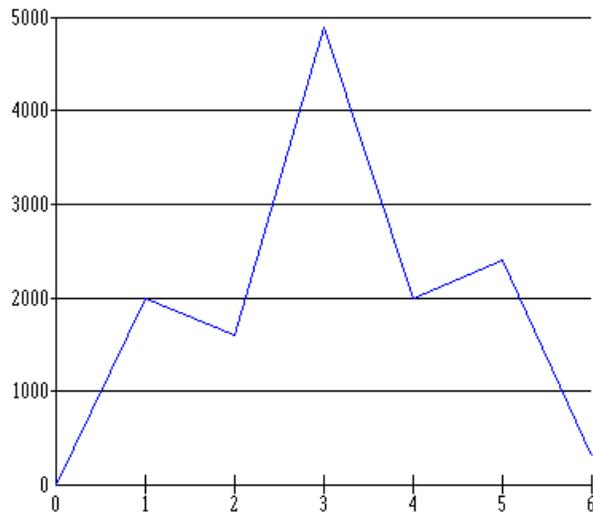


Figura 8a: Carregamento imposto sobre um CP de tração de aço 1020.

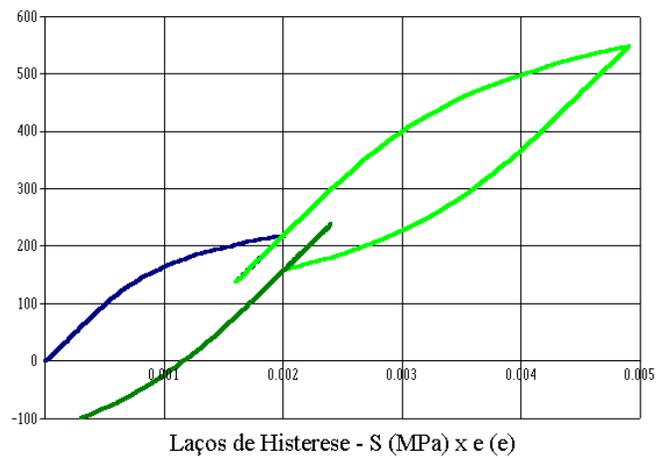


Figura 8b: Laços previstos pelo método ϵN tradicional.

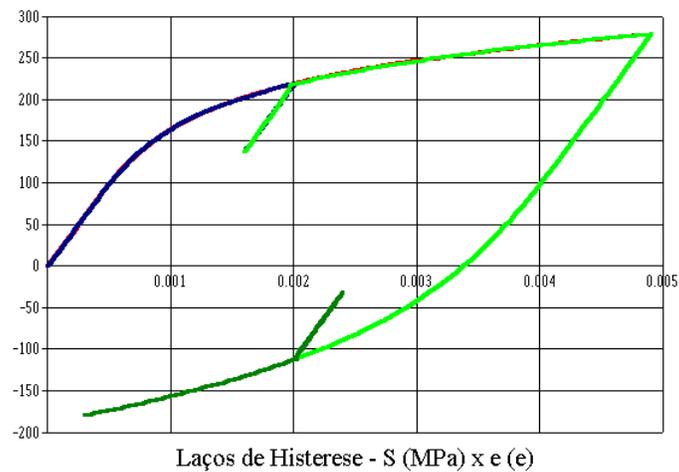


Figura 8c: Laços obtidos após incluir nos cálculos as correções necessárias.

Valor de K_C , de ΔK_{th} e das constantes das regras de Paris e de Elber

Tamanhos iniciais e finais da trinca (estes usados como critério de parada dos cálculos)

Curvas da/dN de Paris, de Elber e de uma terceira equação especificada, usando os valores numéricos listados na tabela de variáveis

Nome da terceira equação da/dN usada nos cálculos

Calcula da/dN para um ΔK especificado

Grava uma nova equação de propagação de trincas

Editor de equações

Especificação dos gráficos de saída

Tabela das variáveis usadas nas equações

Parcelas de flexão e tração na carga

Regras da/dN usadas nos cálculos

Considera efeitos de retardo na propagação de trinca (Wheeler para corrigir da/dN ou Wheeler Modificado para ΔK) e especifica a precisão do cálculo numérico

Especifica o uso do modelo ΔK_{rms} para os cálculos, e integra por Simpson

Tipo de trinca 2D: de canto, semi-elíptica, ou interna

| Variável | Valor (unid. SI) |
|----------|------------------|
| A | 0.02 |
| b | 2 |
| B | 3 |
| d (mm) | 4 |
| D | 5 |
| h | 6 |
| H | 7 |
| I | 8 |
| L | 9 |
| m | 2.01 |
| n | 11 |
| p | 12 |
| r | 13 |
| s | 14 |
| t (mm) | 15 |
| v | 16 |
| x | 17 |
| y | 18 |
| z | 19 |

Tela da/dN 2D

Figura 9: Tela da propagação de trincas 2D. Notar (i) os vários tipos de trincas; (ii) as opções de cálculo ΔK_{rms} e seqüencial (no texto chamado de modelo ccc), esta incluindo os efeitos de retardo; (iii) o editor de equações; (iv) as diversas opções dos gráficos de saída; e (v) o gráfico das curvas da/dN, que é alterado quando se mudam as constantes da tabela de variáveis, permitindo assim um fácil ajuste visual das diversas equações.

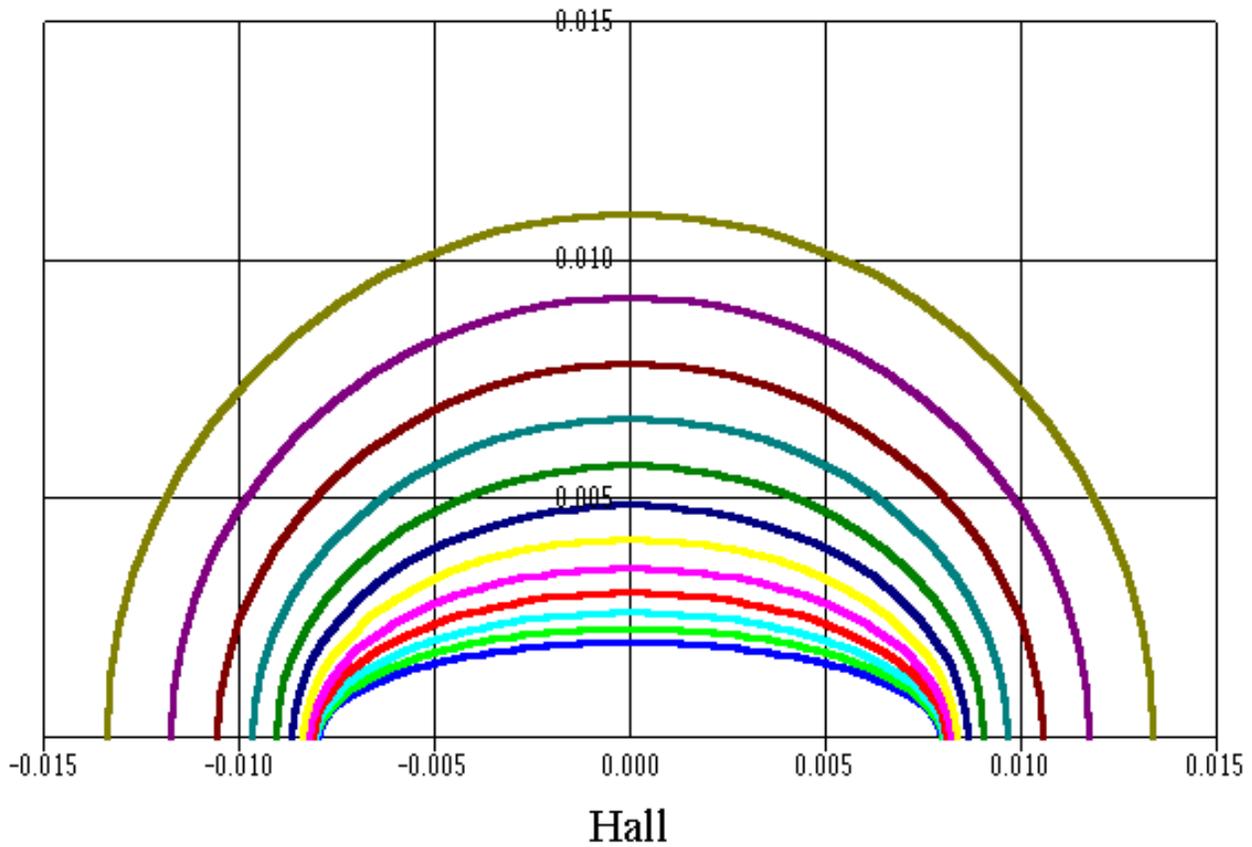


Figura 10a: Previsão do crescimento de uma trinca superficial semi-elíptica, mostrando a mudança da forma da frente da trinca, uma característica do problema 2D.

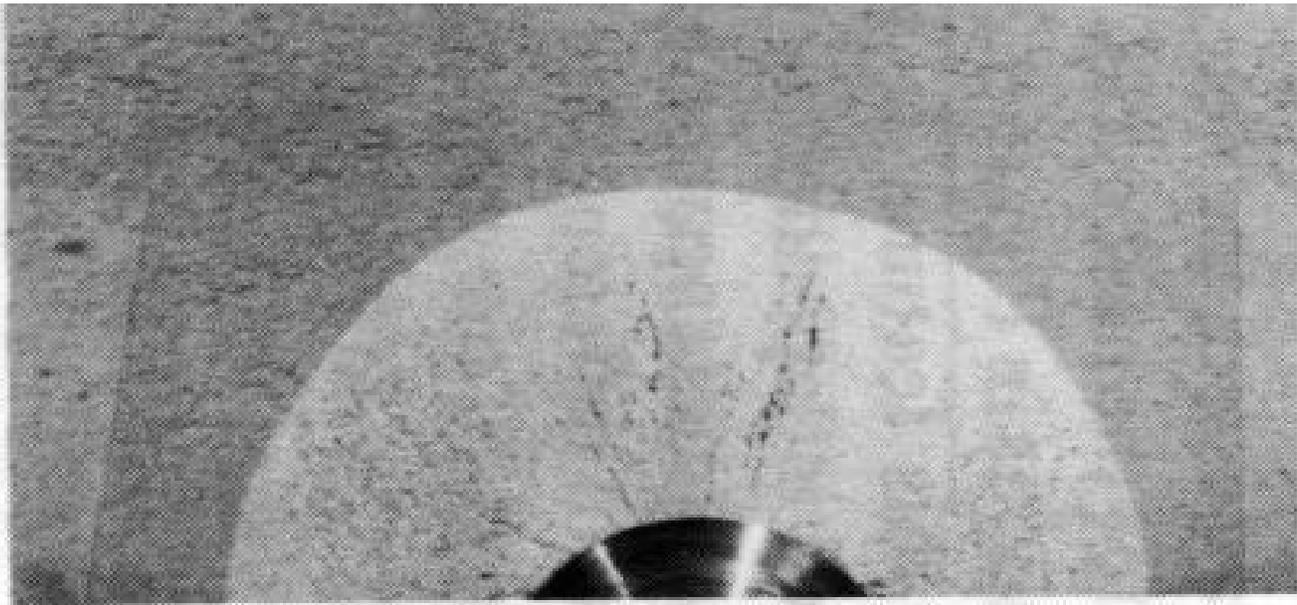
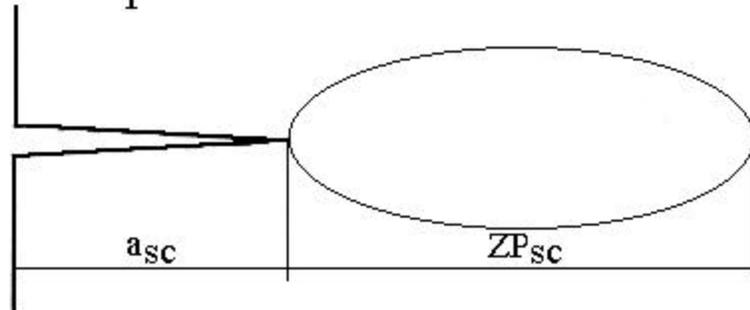
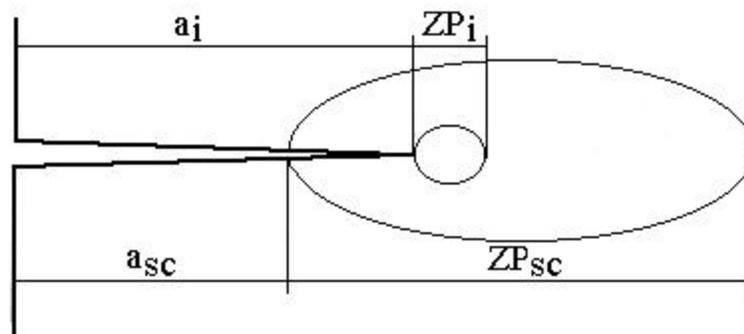


Figura 10b: Trinca superficial mostrando mudanças de forma como as simuladas acima (Broek 89).

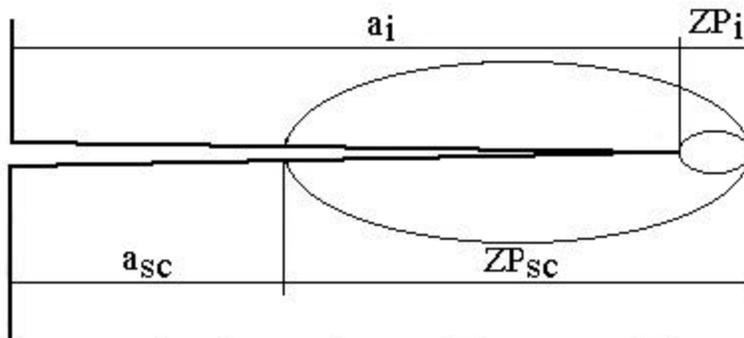
Esquema do modelo de Wheeler



Instante da sobrecarga: trinca de comprimento a_{sc}



Região de retardo: $a_i + ZP_i < a_{sc} + ZP_{sc}$



Fim do retardo: $a_i + ZP_i = a_{sc} + ZP_{sc}$

O retardo tipo Wheeler é proporcional a $\left[\frac{ZP_i}{a_{sc} + ZP_{sc} - a_i} \right]^\beta$

Figura 11: Esquema da zona de influência dos modelos de retardo tipo Wheeler. No ViDa 98 pode-se especificar o expoente dos modelos e um limiar de filtragem, abaixo do qual não se consideram os efeitos das sobrecargas (ver detalhes em Castro & Meggiolaro 97b).