UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO DE TRINCAS DE FADIGA

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA.

JAMIR LEMES SANTANA

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL
JANEIRO - 1980

SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO DE TRINCAS DE FADIGA

JAMIR LEMES SANTANA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO.

PROF. EDISON DA ROSA, M.Sc.
ORIENTADOR

PROF. ARNO BLASS, Ph.D.
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

PROF. EDISON DA ROSA, M.Sc.

PROF. NELSON BACK, Ph.D.

PROF. LONGUINHO DA COSTA M. LEAL, M.Sc.

AGRADECIMENTOS

O autor, ao término do trabalho, deseja agradecer:

- Ao Professor Edison da Rosa, pela orientação e apoio dado em todos os momentos da execução deste trabalho;

- Ao Professor Berend Snoeijer e aos engenheiros Márcio de Almeida Abreu, Boris Otte e Mário Augusto de Freitas Baptista, pelo apoio e incentivo dado em todos os momentos;

- Aos colegas e amigos do DGH e DATC, que de uma forma ou outra contribuíram para a execução deste trabalho.

À Regina

Ao Júnior

Aos meus pais

Aos meus irmãos.

S U M Á R I O

N O T A Ç Ã O

a - dimensão característica da trinca.

a_{eq} - dimensão da trinca equivalente.

a_i - tamanho inicial da trinca.

a_c - tamanho crítico da trinca.

$\dot{a} = da/dN$ - velocidade de crescimento da trinca.

C - constante (eq. 2.33).

da - variação do tamanho da trinca.

dN - variação do número de ciclos.

E - módulo de elasticidade do material.

f - frequência.

f_o - valor esperado de f.

G - módulo de elasticidade transversal.

K_I - fator de intensidade de tensão segundo modo I.

K_{II} - fator de intensidade de tensão segundo modo II.

K_{III} - fator de intensidade de tensão segundo modo III.

K_{IC} - fator de intensidade de tensão crítico.

K_m - fator de intensidade de tensão médio.

K_{max} - fator de intensidade de tensão máximo.

K_{min} - fator de intensidade de tensão mínimo.

K_p - fator de intensidade de tensão plástico.

m - constante (eq. 2.33).

N - número de ciclos.

n - constante (eq. 2.36).

R - relação entre a tensão mínima e a máxima.

r - coordenada polar.

r_p - raio plástico.

t - tempo.

u_i - deslocamento na direção i.

W - largura da placa.

$W(f)$ - densidade espectral.

Y_i - fator geométrico segundo o modo de solicitação.

Y_p - fator de correção plástico.

β - constante (eq. 2.36).

δ - abertura da extremidade da trinca.

Δa - variação do comprimento da trinca.

ΔK - variação do fator de intensidade de tensões.

$\Delta K_o = \Delta K_{th}$ - valor de ΔK, abaixo do qual não há propagação da trinca.

ΔT - intervalo de tempo.

$\Delta\sigma$ - variação da tensão.

Θ - coordenada polar.

ν - coeficiente de Poisson.

σ_E - tensão de escoamento.

σ_{ij} - tensão normal.

$\sigma(t)$ - tensão atuante no tempo t.

τ_{ij} - tensão cizalhante.

R E S U M O

O presente trabalho apresenta um sistema computacional que permite prever o crescimento de trincas devido ao carregamento cíclico, sendo fornecidas informações sobre a geometria do elemento, características do material e a solicitação que está agindo no elemento.

A solicitação pode ser cíclica de amplitude constante ou aleatória fornecida pico a pico, ou ainda aleatória fornecida a densidade espectral.

O programa fornece como saída o crescimento progressivo da fissura, bem como o tamanho crítico em que ocorre a ruptura final.

O número de ciclos, número de blocos ou o tempo para o crescimento da trinca desde o tamanho inicial a_i , até o tamanho crítico a_c, é a principal informação que o programa fornece.

A B S T R A C T

This work presents a software method capable of simulating the crack growing due to dynamic loading based on the following data: structure geometry, caracteristics of the material and loading.

The stresses may be of the constant amplitude type for ciclic loadings or randon type. In this case the information of the loading may be given through its spectral density or on a peak to peak basis.

This set of programs allows the calculation of the progressive growing of cracks as well as the its critical size.

The elapsed time, ammount of cycles or blocks necessary to increase the initial crack length a_i, to the critical length a_c, constitute the main information that the set of programs provide.

1. INTRODUÇÃO

A prevenção de falhas, de estruturas ou elementos estruturais, causadas por carregamento cíclico ou fadiga, tem sido desde a muito tempo reconhecida como um dos grandes problemas do projetista. A fadiga, no entanto, é ainda a principal causa das falhas em serviço de estruturas metálicas. E, naturalmente, frente a isso, melhores métodos para o projeto contra a falha por fadiga são necessários.

A aproximação convencional para o projeto contra a fratura por fadiga envolve previsões da vida cíclica baseadas na tensão nominal (ou deformação) x número de ciclos, a partir de dados obtidos em testes com corpos de prova, realizados em laboratório. Entretanto, estes dados não distinguem entre o período de nucleação da trinca e o período de crescimento. Consequentemente, estes dados de resistência à fadiga de corpos de prova polidos, não fornecem informações a respeito do efeito de falhas pré-existentes na vida do componente. Especificamente, a presença de defeitos pode reduzir ou mesmo eliminar o período de nucleação da trinca de fadiga, que muitas vezes chega a ser mais que noventa por cento da vida prevista a partir de dados convencionais de fadiga.

Por esta razão, na presença de uma falha pré-existente, a vida é dependente da taxa de crescimento da trinca e, consequentemente, os dados de limite de resistência à fadiga não podem ser usados para estabelecer quantitativamente, de um forma conveniente, a vida do componente.

A importância do crescimento da trinca de fadiga como um fator de controle da vida de componentes estruturais sujeitos à carregamento cíclico, tem sido desde a mui to tempo reconhecida. Em 1935, D. Forest notou que a maioria das fraturas por fadiga eram encontradas iniciando a partir de um defeito pré-existente e que a vida útil do componente era dependente da taxa de propagação da trinca de fadiga |9|.

Desde então, uma grande quantidade de leis empíricas, para avaliar a taxa de propagação de trincas de fadiga, tem sido propostas no intuito de caracterizar o comportamento do crescimento das trincas de fadiga |2|. Infelizmente, a maioria destas leis eram obtidas a partir de dados limitados e o resultado das mesmas era passível de aplicação somente para condições específicas de carga |30|. Também muitas dessas leis eram contraditórias e por causa das confusões óbvias, associadas com a falta de compreensão do crescimento das trincas de fadiga, poucas tentativas foram feitas para incorporar os dados da taxa de crescimento das trincas nas considerações de projeto.

Conseqüentemente, o limite de resistência convencional permaneceu como o método usado para o projeto contra a fratura por fadiga. Entretanto, avanços recentes no desenvolvimento da Mecânica da Fratura aplicada à fadiga, tem feito com que sejam eliminadas muitas das confusões associadas com o comportamento do crescimento de trincas de fadiga.

Este trabalho apresenta um sistema computacional que permite prever o crescimento de trincas, devido ao carregamento cíclico, procurando dar, de uma forma bem genérica, condições de incorporar a influência da taxa de propagação nas considerações atuais de projeto.

Como é conhecido, usando os conceitos da Mecânica da Fratura, é possível prever a velocidade de crescimento da fissura e o instante em que ocorrerá a ruptura brusca do componente. Se eventualmente o componente possuir uma fissura inicial, proveniente, por exemplo, do processo de fabricação, todo o período de vida será usado na propa gação desta fissura, ficando descartado o período de nucleação. No caso de um corpo de prova liso, a vida deste fica dada pela parcela necessária para a nucleação da trinca, mais a parcela necessária para a propagação até um tamanho crítico, quando ocorre a ruptura final.

A Mecânica da Fratura aplica-se apenas na propagação da fissura e, assim, é interessante lembrar que o programa desenvolvido só tem aplicabilidade para o caso de estruturas ou elementos que possuam defeitos ou falhas que possam ser caracterizados como uma fissura.

Dentro das limitações, procurou-se desenvolver um sistema computacional de forma ampla, com diversas geometrias, materiais e tipos de carregamentos, de tal forma que fosse abrangida a grande maioria dos elementos e tipos de solicitações presentes nos elementos estruturais.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1 - Teoria da Mecânica da Fratura

A Mecânica da Fratura se preocupa em estudar o comportamento de um sólido quando este contém uma fissura. Em essência, é estudado o campo de tensões desenvolvido nas proximidades do extremo da trinca e sua relação com a tensão nominal aplicada, propriedades do material, bem como a geometria e o tamanho da fissura.

Uma interpretação do fenômeno da fratura, originalmente desenvolvida por Irwin |25|, introduziu o conceito do fator de intensidade de tensões, K, como sendo um parâmetro característico do estado de tensões e deslocamentos do extremo de uma descontinuidade. As tensões para o modo I e II de solicitação da trinca (Fig. 2.2) podem ser calculadas por:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \frac{K_I \cos \Theta/2}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} 1 - \operatorname{sen} \frac{\Theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\Theta}{2} \\ 1 + \operatorname{sen} \frac{\Theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\Theta}{2} \\ \operatorname{sen} \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3\Theta}{2} \end{bmatrix} +$$

$$+ \frac{K_{II} \operatorname{sen} \Theta/2}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} 2 + \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3\Theta}{2} \\ \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3\Theta}{2} \\ \cos \frac{\Theta}{2} - \operatorname{sen} \frac{\Theta}{2} \end{bmatrix} + \qquad (2.1)$$

$$+ \text{ termos de ordem superior em } r$$

e, para o modo III, por:

$$\begin{bmatrix} \tau_{13} \\ \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} \text{sen } \Theta/2 \\ \\ \cos \Theta/2 \end{bmatrix} + \text{termos de ordem superior em } r \qquad (2.2)$$

Os deslocamentos, para os modos I e II, são fornecidos por:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \\ u_2 \end{bmatrix} = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{bmatrix} \cos \frac{\Theta}{2} \left(f_1(\nu) + \text{sen}^2 \frac{\Theta}{2}\right) \\ \\ \text{sen } \frac{\Theta}{2} \left(f_2(\nu) - \cos^2 \frac{\Theta}{2}\right) \end{bmatrix} +$$

$$+ \frac{K_{II}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{bmatrix} \text{sen } \frac{\Theta}{2} \left(f_2(\nu) + \cos^2 \frac{\Theta}{2}\right) \\ \\ -\cos \frac{\Theta}{2} \left(f_1(\nu) - \text{sen}^2 \frac{\Theta}{2}\right) \end{bmatrix} \qquad (2.3)$$

e, para o modo III, por:

$$u_3 = \frac{2K_{III}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \text{ sen } \frac{\Theta}{2} \qquad (2.4)$$

onde r e Θ são as coordenadas polares de um ponto em relação ao extremo da trinca, conforme pode ser visto na figura 2.1 ; $f_1(\nu)$ e $f_2(\nu)$ são funções que dependem do estado de tensões e deformações que ocorre, tal que

$$\left.\begin{aligned} f_1(\nu) &= 1 - 2\nu \\ f_2(\nu) &= 2(1-\nu) \end{aligned}\right\} \text{ para um estado plano de deformação,} \qquad (2.5)$$

e

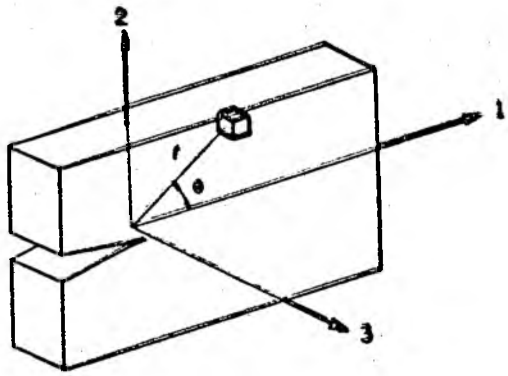


Fig. 2.1 - Localização do sistema de coordenadas usado no estudo das tensões em uma peça com fissura.

$$f_1(\nu) = (1 - \nu)/(1 + \nu)$$

$$f_2(\nu) = 2 / (1 + \nu)$$

para um estado plano de tensões (2.6)

sendo ν o coeficiente de Poisson. O fator de intensidade de tensões fornece o coeficiente do termo singular das séries (2.1) e (2.2), que define o campo de tensões. Os subscritos que aparecem no fator de intensidade de tensões caracterizam os três possíveis modos de solicitação da trinca, conforme o carregamento, como esquematizado na Figura 2.2 . Os fatores de intensidade de tensão dependem somente

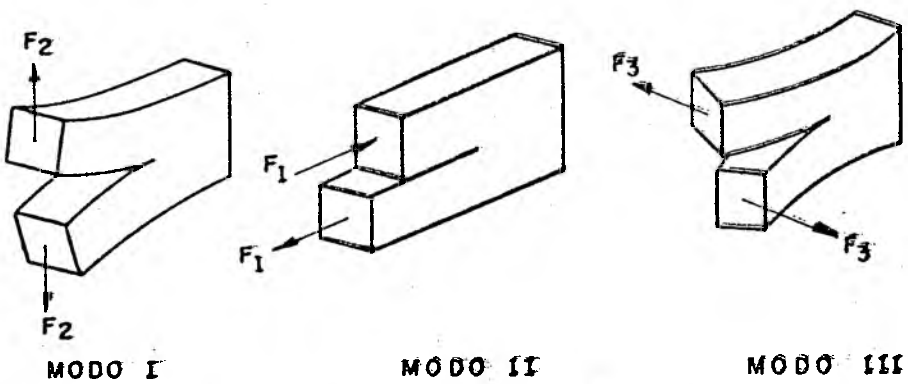


Fig. 2.2 - Modos de solicitação da trinca.

da geometria e das condições de carregamento. De uma maneira geral, é possível dizer, sendo, a, uma dimensão da trinca, que

$$K_I = \sigma\, Y_I \sqrt{\pi a} \qquad (2.7.a)$$

$$K_{II} = \tau\, Y_{II} \sqrt{\pi a} \qquad (2.7.b)$$

$$K_{III} = \tau\, Y_{III} \sqrt{\pi a} \qquad (2.7.c)$$

onde Y_i é um fator geométrico que depende da forma e proporções do componente sob estudo, bem como do carregamento. σ e τ são as tensões nominais que solicitam o elemento de forma a provocar os modos I, II e III. No caso da Figura 2.3, placa de dimensões infinitas sob tração com uma trinca central, o modo de solicitação da trinca é do tipo I e neste caso $Y_I = 1$. Logo,

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \qquad (2.8)$$

Como no restante do trabalho será usado apenas o modo de solicitação I, o índice de Y_i será omitido daqui para a frente.

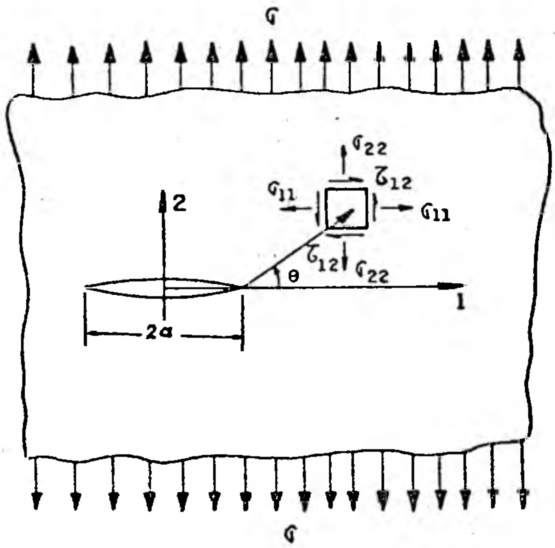


Fig. 2.3 - Placa infinita sob tração, contendo uma trinca central.

Para uma placa de largura finita, sob tração e com uma trinca central |45|,

$$Y = \sqrt{\sec \pi a/2w} \qquad (2.9)$$

sendo 2w a largura da placa e 2a o comprimento da trinca.

O fator de intensidade de tensões é uma medida do estado de tensões e deformações que solicita o material nas proximidades do extremo da trinca. Para que ocorra uma propagação da trinca é necessário que as tensões e deformações nas suas proximidades alcancem um valor crítico, ou seja, pode-se esperar que ocorra fratura quando K_I atinge um valor crítico, K_{IC}, que é uma propriedade do material. Contudo, o uso de K_{IC} está restrito à situações onde a fratura é precedida por uma deformação plástica limitada, pois, conforme Liu |25| assinalou, não são as tensões e deformações elásticas, fora da zona plástica, que causam a fratura, embora estas controlem o estado de tensões e deformações plásticas. Outro ponto que deve ser ressaltado quanto à validade de K_{IC} como critério de falha, está na própria definição de K como um parâmetro caracterizador da singularidade do extremo da trinca, expresso na forma (equações (2.1) e (2.2)).

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \; f_{ij}(\theta) + \ldots \text{ série} \qquad (2.10)$$

A equação (2.10) apresenta o primeiro termo da expansão em série da expressão para a distribuição de tensões em pontos próximos ao extremo da trinca e esta forma só é válida quando $r << a$.

2.2 - Fratura com Plasticidade Restrita

Como os materiais reais exibem uma tensão de escoamento, acima da qual eles se deformam plasticamente, e xiste uma região ao redor do extremo da trinca onde ocorre deformação plástica e portanto, não pode existir a singularidade elástica. É possível estimar o comprimento da zona plástica, tanto para um estado plano de tensão como para um estado plano de deformação. Irwin |3| e Dudgale |3, 12| propuseram métodos de estimativa da zona plástica, com os quais é possível se determinar um valor de K que se adapte melhor às condições de plasticidade no extremo da trinca, assumindo que a região plastificada seja de pequena dimensão.

2.2.1 - Estimativa da zona plástica segundo Irwin

Irwin |3| obteve uma expressão para o comprimento da zona plástica, partindo da solução elástica para uma trinca em uma placa infinita, solicitada segundo o modo I. A distribuição de tensões segundo o eixo 2 é,

$$\sigma_{22} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2}\left(1 + \operatorname{sen}\frac{\theta}{2}\operatorname{sen}\frac{3\theta}{2}\right) \qquad (2.11)$$

e, para $\theta = 0$, torna-se

$$\sigma_{22} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$$

Assumindo que o material possui uma tensão de escoamento σ_E, tem-se que o raio de plastificação, r_p, é definido no ponto onde σ_{22} é igual a σ_E. Então

$$\sigma_E^2 = \frac{K_I^2}{2\pi\, r_p}$$

$$r_p = \frac{1}{2\pi}\left(K_I/\sigma_E\right)^2 \qquad (2.12)$$

para um estado plano de tensões. No estado plano de deformações,

$$r_p = \frac{1}{6\pi} (K_I / \sigma_E)^2 \qquad (2.13)$$

Devido ao escoamento, a distribuição de tensões fica alterada, podendo ser pensada como proveniente de uma trinca fictícia, em um material perfeitamente elástico, com dimensão característica $a + r_p$, sendo assim definida uma trinca equivalente (Figura 2.4).

$$a_{eq} = a + r_p \qquad (2.14)$$

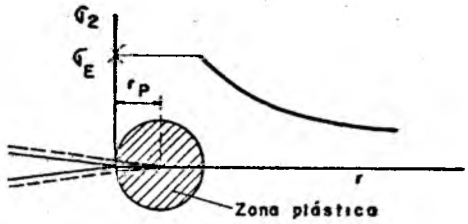


Fig. 2.4 - Correção da zona plástica segundo Irwin.

Irwin |3|, então, propos que, quando a tensão que solicita o material for da mesma ordem de grandeza da tensão de escoamento, o fator de intensidade de tensão deve ser definido através da trinca equivalente, sendo obtido pela equação (2.7). Como esse fator intensidade de tensão considera o efeito de deformações plásticas no extremo da trinca, será denominado fator de intensidade de tensão plástico K_p, calculado por

$$K_p = Y \sigma \sqrt{\pi a_{eq}} \qquad (2.15)$$

Substituindo a equação do raio plástico (equação (2.12)), tem-se

$$K_p = Y\,\sigma\sqrt{\pi\left(a + \frac{1}{2\pi}\,(K/\sigma_E)^2\right)}$$

onde K é calculado com base no tamanho geométrico da trinca (equação (2.7)), e desta forma vem

$$K_p = Y\,\sigma\sqrt{\pi a\,\left(1 + \tfrac{1}{2}(Y\,\sigma/\sigma_E)^2\right)} \qquad (2.16)$$

Porém, o fator de intensidade de tensões plástico é definido por

$$K_p = Y\,Y_p\,\sigma\,\sqrt{\pi a} \qquad (2.17)$$

onde Y_p é o fator de correção plástico. Desta forma, o fator de correção, segundo Irwin, é

$$Y_p = \sqrt{1 + \frac{1}{2}\,(Y\,\sigma/\sigma_E)^2} \qquad (2.18)$$

A definição do fator de correção plástico, dada pela equação (2.18), não é rigorosamente correta, em parte, porque o valor de r_p foi calculado usando o fator de intensidade de tensões K, sem correção. Usando K_p no cálculo do raio da plastificação, obtém-se

$$Y_p = 1 / \sqrt{1 - \frac{1}{2}\,(Y\,\sigma/\sigma_E)^2} \qquad (2.19)$$

Uma análise mais rigorosa mostra que as expressões acima são razoavelmente exatas, desde que o nível de solicitação não exceda o limite de escoamento do material. Em outras palavras, a equação (2.18) pode ser usada para níveis de tensão nominal σ de até 70% da tensão de escoamento e a equação (2.19) pode ser usada para tensões de até 90% da tensão de escoamento.

2.2.2 - Estimativa da zona plástica segundo Dugdale

Dugdale |3, 12| obteve uma expressão para o comprimento da zona plástica de uma trinca solicitada segundo o modo de abertura I, para um material elasto-plástico ideal.

Quando ocorre o escoamento sobre um comprimento s medido do extremo da trinca de comprimento 2a (Figura 2.5a), é assumido que esta situação é equivalente à deformação elástica de uma trinca hipotética de comprimento $2a_{eq}$, que está sob a ação da tensão aplicada σ e da tensão de escoamento σ_E sobre parte de sua superfície, que tende a fechá-la (Figura 2.5b).

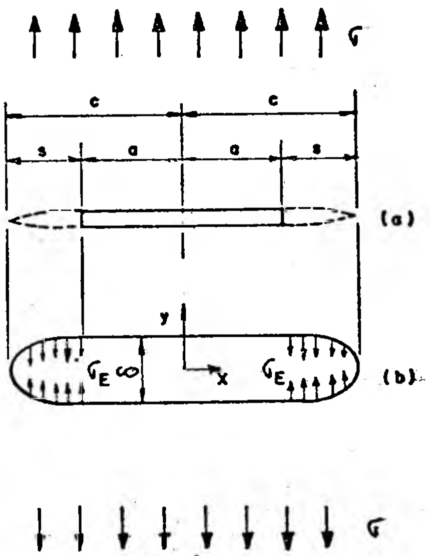


Fig. 2.5 - Correção da zona plástica segundo Dugdale: (a) escoamento interno ; (b) tensões internas atuando sobre a região que sofreu escoamento.

Dugdale |3, 12| define o comprimento da zona plástica como

$$s = c \left[2 \operatorname{sen}^2 \left(\frac{\pi}{4} \frac{\sigma}{\sigma_E}\right)\right]$$

que pode ser colocada na forma

$$s = a(\sec \pi\sigma/2\,\sigma_E - 1) \qquad (2.20)$$

Portanto, a trinca equivalente pode ser definida como

$$a_{eq} = a + s/2 = a + a/2\,(\sec \pi\sigma/2\sigma_E - 1)$$

ou seja,

$$a_{eq} = c - s/2$$

$$a_{eq} = \frac{a}{2}\,(1 + \sec \pi\sigma/2\sigma_E) \qquad (2.21)$$

E, assim, o fator de intensidade de tensões plástico será

$$K_p = Y\,\sigma\,\sqrt{\pi a(1 + \sec \pi\sigma/2\sigma_E)\,/\,2} \qquad (2.22)$$

onde, o fator de correção plástico, segundo Dugdale, é

$$Y_p = \sqrt{(1 + \sec \pi\sigma/2\sigma_E)\,/\,2} \qquad (2.23)$$

Uma outra forma de usar os resultados de Dugdale é definir o fator de correção da zona plástica a partir do conceito de deslocamento de abertura da trinca . Segundo Dugdale |3, 4, 12| a extremidade da trinca sofre uma abertura δ devida ao afastamento de suas faces, como conseqüência das deformações plásticas, e pode ser obtida como

$$\delta = \frac{8}{\pi}\,\frac{\sigma_E}{E}\,a\,\ln\,(\sec \pi\sigma/2\sigma_E) \qquad (2.24)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material. A expressão para δ pode ser expandida, e, tomando-se apenas o primeiro termo da série, vem que

$$\delta = \frac{\pi \sigma^2 a}{E \sigma_E}$$

ou

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta E\sigma_E}{\pi a}} \qquad (2.25)$$

Da equação (2.25) pode-se, então, definir o fator de intensidade de tensões plástico como

$$K_p = Y\sqrt{\frac{\delta E \sigma_E}{\pi a}} \sqrt{\pi a}$$

e, desenvolvendo a equação acima, tem-se

$$K_p = Y \sigma\sqrt{\pi a} \frac{\sigma_E}{\pi\sigma} \sqrt{8 \ln (\sec \pi\sigma/2\sigma_E)} \qquad (2.26)$$

Portanto, o fator de correção da zona plástica é

$$Y_p = \frac{\sigma_E}{\pi\sigma} \sqrt{8 \ln (\sec \pi\sigma/2\sigma_E)} \qquad (2.27)$$

Dentre as expressões para Y_p, ou seja, equações (2.18), (2.19), (2.23) e (2.27), a última é a mais exata. Contudo, deve ser salientado que elas foram obtidas para o modelo de uma placa de dimensões infinitas sob tração. Deste modo, em peças ou corpos de provas reais, a menos que o tamanho da zona plastificada seja pequeno comparado com as outras dimensões, estas expressões não fornecem resultados muito confiáveis. Assim, é necessário analisar a influência do contorno da peça sobre o tamanho da zona plástica para cada geometria, antes de usar o conceito da correção da zona plástica sobre o fator de intensidade de tensões como critério de falha. Alguns resultados podem ser vistos na referência |26|.

A Figura 2.6 ilustra as quatro equações para Y_p segundo os modelos apresentados.

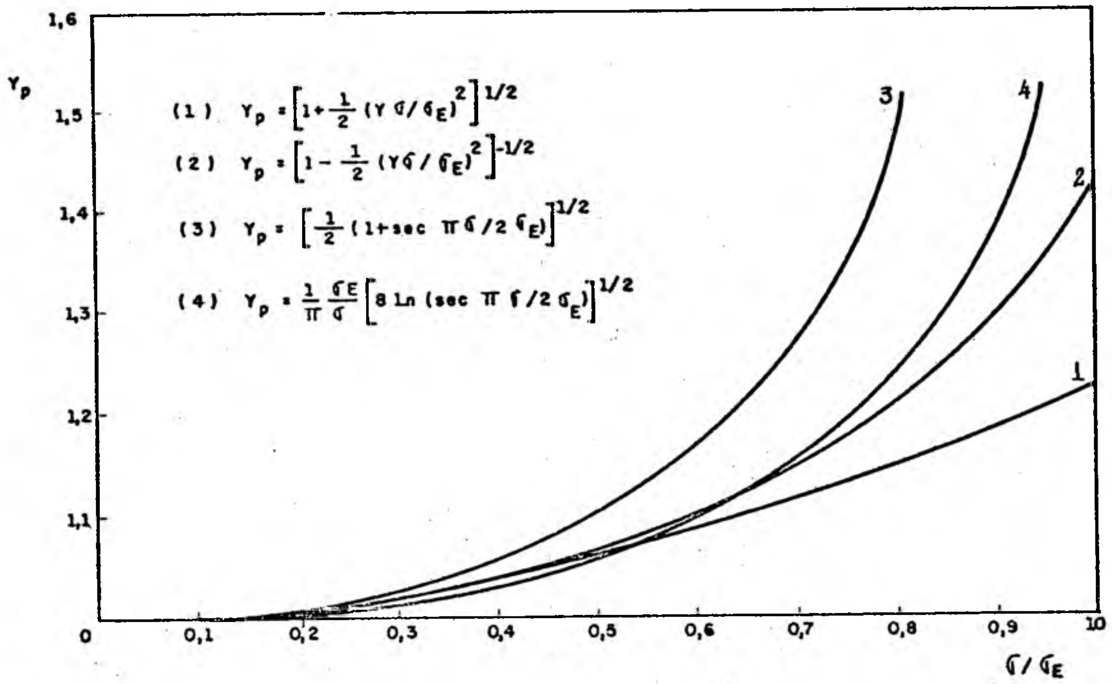


Fig. 2.6 - Comparação entre as várias equações para o fator de correção da zona plastificada (segundo Irwin (1) e (2) e Dugdale (3) e (4)), em função da razão entre a tensão aplicada e a tensão de escoamento do material.

2.3 - Propagação de Trincas de Fadiga

Embora o término da vida de uma estrutura, por sua ruptura brusca, possa ser baseado no fator de intensidade de tensões crítico, a vida útil de um componente solicitado ciclicamente pode depender da velocidade de crescimento da trinca, desde um tamanho microscópico até o tamanho crítico requerido para provocar a ruptura brusca. Assim, tanto um estudo das combinações críticas de tensões e tamanho dos defeitos para fratura brusca, como as características de propagação da fissura para o material em consideração, são essenciais para determinar a vida útil do componente.

Como o conceito de fator de intensidade de tensão fornece um parâmetro único, que descreve a magnitude do estado de tensões existente nas proximidades da fissura, e a propagação de uma trinca de fadiga é um fenômeno localizado, dependente também destas tensões, o conceito de fator de intensidade de tensões pode ser usado para um enfoque quantitativo na interpretação do comportamento de propagação da trinca.

Os dados de propagação da fissura são habitualmente obtidos monitorizando o tamanho da trinca durante o ensaio, obtendo a curva de seu crescimento. Um exemplo é fornecido pela Figura 2.7 . A variável de interesse, em ge

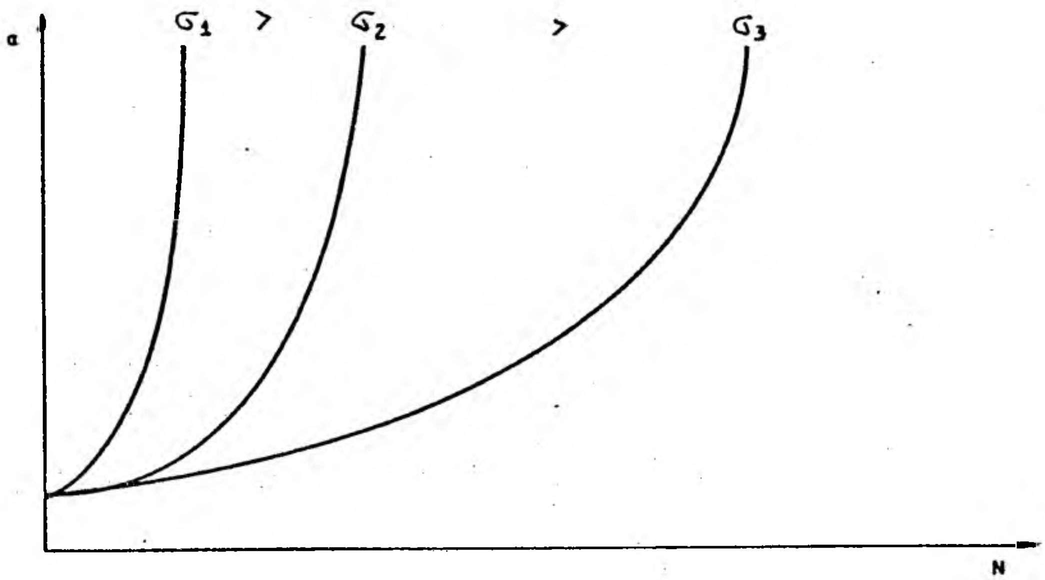


Fig. 2.7 - Curvas de crescimento da trinca.

ral, é a velocidade de propagação da trinca $\dot{a}$, ou seja, da/dN. De uma forma geral, Paris e Erdogan | 30 | mostram que o crescimento da trinca pode ser, aproximadamente, fornecido por uma expressão da forma

$$\dot{a} = f\ (\Delta\sigma;\ a;\ C) \tag{2.28}$$

sendo, $\Delta\sigma$, a faixa de variação da tensão nominal (Figura 3.1); a, o tamanho da trinca e, C, uma constante dependente do material, carga média e outras variáveis secundárias. Usando o conceito do fator de intensidade de tensão, Paris propôs uma forma mais específica, ou seja,

$$\dot{a} = f\ (\Delta K;\ C) \tag{2.29}$$

onde ΔK = faixa de variação do fator de intensidade de tensão correspondente a $\Delta\sigma$, $\Delta K = Y \Delta\sigma \sqrt{\pi a}$

Atualmente existe uma grande quantidade de dados experimentais que confirmam esta relação e mostram que o fator de intensidade de tensões é o parâmetro que controla a propagação da trinca de fadiga. A partir das curvas da figura 2.7 é possível obter $\dot{a}$ e ΔK para cada ponto e plotar em um gráfico de $\dot{a}$ versus ΔK, como na figura 2.8 . Nas

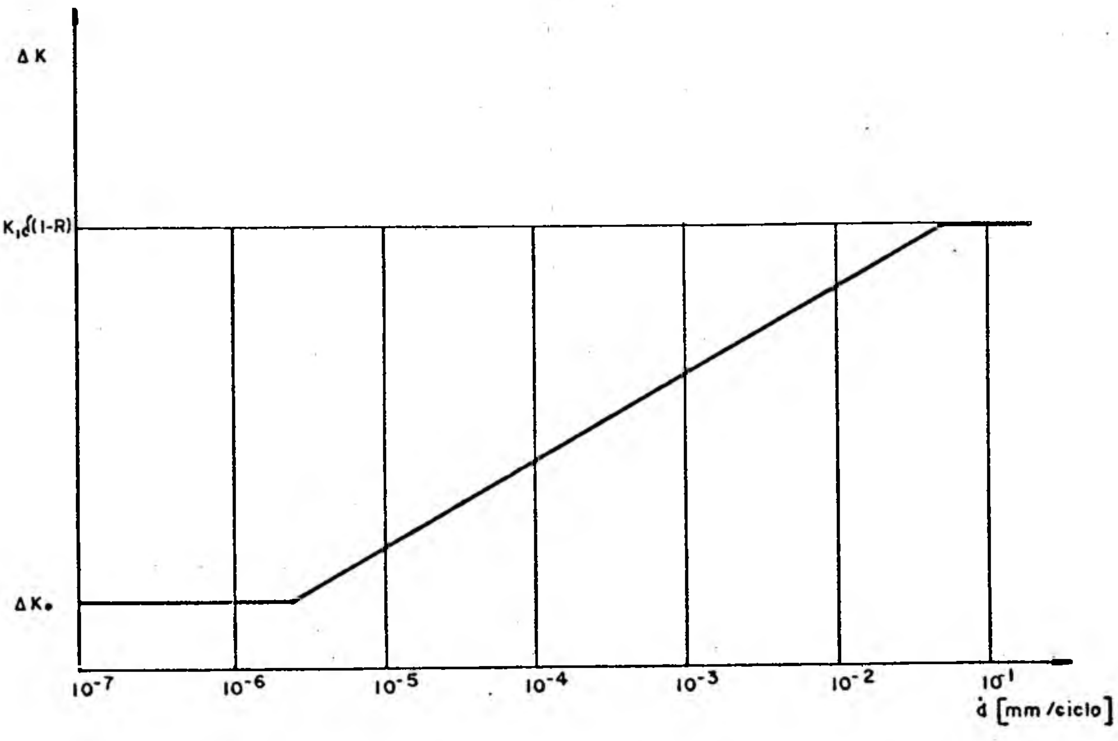


Fig. 2.8 - Velocidade de propagação da trinca função de ΔK.

proximidades do fim da vida, a velocidade de propagação cresce rapidamente, chegando de imediato ao tamanho crítico da fissura. A ruptura brusca ocorre quando $K_{máx}$ iguala a K_{IC}.

Para ΔK inferior a ΔK_o, a trinca não se propaga, ou seja, a velocidade de propagação é nula. Se o valor máximo do fator de intensidade de tensões for maior do que K_{IC}, haverá ruptura brusca do componente, com a velocidade tendendo à infinito. O valor K_o é um nível mínimo de sensibilidade, para que a trinca venha a se propagar. Pode ser tomado como análogo ao limite de fadiga na curva σ-N usual. O fator de intensidade de tensões máximo, está ligado à faixa de variação, pela equação

$$K_{máx} = \Delta K / (1 - R) \tag{2.30}$$

onde R é um coeficiente que fornece a assimetria do carregamento dinâmico, definido, neste caso, como

$$R = \frac{K_{min}}{K_{max}} \tag{2.31}$$

e, assim, o valor limite de ΔK para evitar a ruptura brusca, é

$$\Delta K_{IC} = K_{IC} (1 - R) \tag{2.32}$$

A parte da curva entre os valores limites de ΔK, pode ser representada por

$$\dot{a} = C (\Delta K)^m \tag{2.33}$$

conforme proposta inicialmente por Paris.

Em vista do apresentado até este ponto, uma vantagem óbvia do uso da mecânica da fratura para a propagação da trinca, é a possibilidade de incorporar em um único parâmetro, todas as variáveis externas pertinentes, como a tensão nominal, tamanho da fissura, geometria do componente, etc., de modo que os dados são aplicáveis para uma grande variedade de configurações, mesmo que diversas da usada para obtê-los. A expressão (2.33) foi verificada para vários materiais estruturais, sendo C e m constantes empíricas. Quando a C, depende das propriedades do material, freqüência de aplicação da carga, carga média e outras variáveis secundárias.

É um fato reconhecido que uma tensão média de tração, em um carregamento cíclico, reduz sensivelmente a vida, ou seja, aumenta a velocidade de propagação da fissura. Assim, vários autores procuraram desenvolver expressões que levassem em conta este efeito, para situações diferentes da de teste, pois este é normalmente feito com carga pulsante, variando de zero até um máximo, ou seja, com R = 0 . As expressões mais significativas estão dadas a seguir.

Segundo Forman |23|, a velocidade de propagação da trinca deve tender a infinito quando K_{max} tende para K_{IC}, ou seja,

$$\lim_{K_{max} \to K_{IC}} \dot{a} = \infty$$

que pode ser obtido dividindo (2.33) por uma expressão que se anule com $K_{max} = K_{IC}$; usando (2.32) obtém-se

$$\dot{a} = \frac{C\ (\Delta K)^m}{(1-R)\ K_{IC} - \Delta K} \qquad (2.34)$$

Por outro lado, Nelson |28| cita um trabalho de Erdogan, onde foi desenvolvida a equação

$$\dot{a} = C \ (\Delta K)^m \ (K_{max})^n \qquad (2.35)$$

Em outro artigo, Radon e Culver |32|, em um trabalho de propagação de trincas em polímeros, obtiveram a expressão

$$\dot{a} = \beta\lambda^n \qquad (2.36)$$

onde

$$\lambda = K_{max}^2 - K_{min}^2$$
$$\lambda = 2\Delta K \ . \ K_m \qquad (2.37)$$

e assim, pode ser pensado como um caso particular de (2.35) onde o expoente que afeta ΔK e K_m é o mesmo.

Finalmente, Mukherjee e Burns |27|, também trabalhando com polímeros, através de uma análise estatística detalhada, chegaram a conclusão que a expressão que melhor representa os dados dos seus ensaios é

$$\dot{a} = C \ f^{-0,43} \ \Delta K^{2,39} \ K_m^{2,13} \qquad (2.38)$$

com um coeficiente de correlação de 0,955 . No caso, f é a freqüência do carregamento, que para o caso de materiais viscoelásticos é de importância fundamental. Vale a observação de que não há, também, diferença sensível entre esta expressão e a equação proposta por Erdogan.

3. ESTRUTURA DO SISTEMA

Com o crescente desenvolvimento realizado nos últimos anos, na área da Mecânica da Fratura aplicada à fadiga, tornou-se possível prever o crescimento de trincas de fadiga, conhecendo as propriedades do material, a solicitação e as características do componente estrutural. Baseado nisso, foi desenvolvido este trabalho, que é, basicamente, um programa de computador para calcular o crescimento da trinca e que informa, a cada instante, o tamanho da trinca, o número de ciclos e o fator de intensidade de tensão.

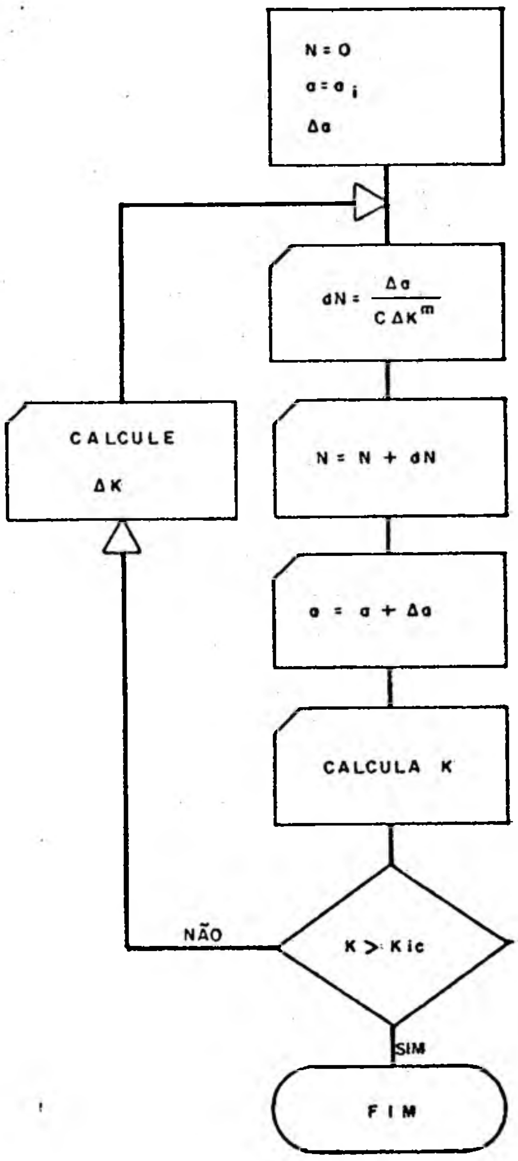
A solução que se tem para calcular o número de ciclos necessários para provocar o crescimento da trinca desde um tamanho a_i, até um tamanho a_f, através da expressão

$$N = \frac{(a_i^{(m/2)-1})^{-1} - (a_f^{(m/2)-1})^{-1}}{C\ \Delta\sigma^m((m/2)-1)\ (Y\ \sqrt{\pi})^m}$$

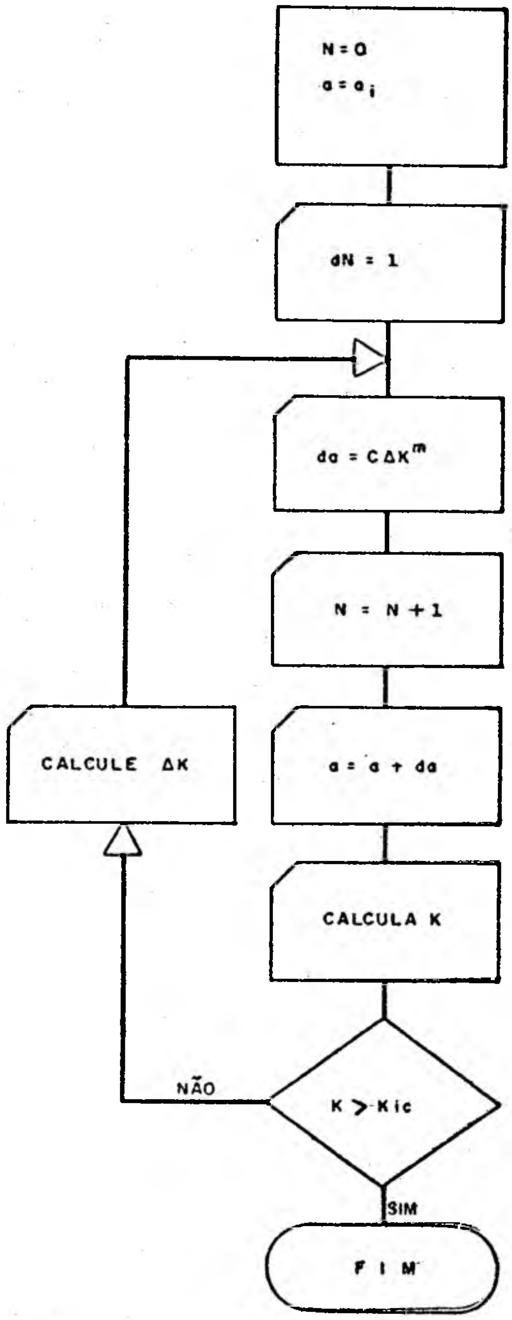
só é válida para o caso de solicitação cíclica de amplitude constante, bem como, com o fator geométrico, Y, constante em todo o intervalo (a_i, a_f). Como é conhecido, esta hipótese só é válida para o caso específico de placas ou elementos de dimensões infinitas. Procurando fugir a estas limitações, foi desenvolvido este sistema, o qual permite prever o crescimento de trincas, para várias geometrias, com dimensões finitas ou infinitas e, ainda, para os vários tipos de solicitação, seja cíclica de amplitude constante ou aleatória.

Para atingir este objetivo, foi considerado que o fator geométrico, Y, é constante dentro de um pequeno in tervalo (a_i, $a_i + \Delta a$), de forma que o erro introduzido fosse o mínimo possível. O fluxograma I ilustra o procedimento utilizado, quando a solicitação é cíclica de amplitude constante.

Para o caso de uma solicitação aleatória, o incremento da trinca deve ser calculado para cada ciclo de tensão. O fluxograma II ilustra o procedimento correspondente.



Fluxograma I



Fluxograma II

3.1 - Arquitetura do Sistema

O sistema computacional desenvolvido é formado por dois programas distintos, agrupando em cada um, dois tipos genéricos de solicitação.

Ambos os programas apresentam flexibilidade suficiente para permitir a substituição ou inclusão de dados nos diferentes arquivos, caso seja necessário.

As etapas necessárias para constituir os programas denominados I e II, podem ser definidas como:

P R O G R A M A I

Etapa	Procedimento
Leitura de dados	DADOS
Cálculo da propagação da trinca	INCREMENTO
Arquivo de dados das geometrias	GEOMETRIA
Arquivo de dados de operação	SEMANA PADRÃO
Arquivo de dados das tensões	TENSÃO
Impressão dos dados de entrada	IMPRIME DADOS
Impressão do relatório final	RELATÓRIO

P R O G R A M A II

Etapa	Procedimento
Leitura de dados	DADOS
Leitura das tensões do Carreg. 3	CARREG3
Leitura dos dados comuns	DADOS 34
Cálculo da propagação da trinca	INCREMENTO
Método de contagem de ciclo	RAIN FLOW
Arquivo de dados das geometrias	GEOMETRIA
Impressão dos dados de entrada	IMPRIME DADOS
Impressão do relatório final	RELATÓRIO
Gerar tensões	GERA TENSÃO

3.2 - Descrição

A divisão do sistema em dois programas foi feita considerando os carregamentos com tensão cíclica de amplitude constante e tensão aleatória.

O programa I, fornece o crescimento progressivo da fissura e o tamanho crítico em que ocorre a ruptura final, para os seguintes tipos de carregamentos:

- Tensão cíclica de amplitude constante no tempo (Figura 3.1);
- Tensão cíclica de amplitude constante em intervalos de tempo, formando blocos de solicitação (Fig. 3.2).

O programa II, por sua vez, fornece os mesmos dados a respeito do crescimento da trinca, para os seguintes carregamentos:

- Tensão aleatória, fornecida pico a pico (Fig.3.3).
- Tensão aleatória, fornecido o espectro de frequência (Fig. 3.4)

Basicamente a diferença entre os programas está no tipo de solicitação válido para cada um.

3.2.1 - Etapas comuns aos carregamentos 1 e 2

As etapas comuns são as geometrias disponíveis aos programas e as leis de propagação das trincas de fadiga utilizadas.

GEOMETRIAS

Neste arquivo, encontram-se as geometrias disponíveis aos programas e, para serem chamadas ao programa principal, basta indicar o código da geometria desejada.

As geometrias disponíveis e os seus respectivos códigos de identificação, são os seguintes:

Código	Geometria
01	Placa infinita com trinca central
02	Placa semi-infinita com uma trinca na borda
03	Placa finita com trinca central
04	Placa finita com trinca na borda
05	Placa finita com trincas nas bordas (Y1)
06	Placa finita com trincas nas bordas (Y2)
07	Placa finita com trinca central sob flexão
08	Corpo de prova sob tração com trinca na borda
09	Corpo de prova sob flexão em três pontos
10	Corpo de prova sob tração - Corpo de prova compacto
11	Trinca semi-elíptica na superfície - tração.
12	Eixo com trinca circunferencial sob tração.

LEIS DE PROPAGAÇÃO

Os programas foram desenvolvidos considerando a possibilidade de se utilizar duas leis de propagação distintas, que, da mesma forma que as geometrias, para se optar por uma, basta indicar o código referente à lei de propagação desejada que a mesma será automaticamente selecionada.

As leis consideradas são as seguintes:

1. $\dot{a} = C\ \Delta K^m$

2. $$\dot{a} = \frac{C\ \Delta K^m}{(1 - R)\ K_{IC} - \Delta K}$$

onde:

$\dot{a}$ = velocidade de propagação da trinca.

C ou m = Constantes que dependem do material e do tipo de carregamento.

ΔK = Variação do fator de intensidade de tensão.

R = Relação entre a tensão mínima e a tensão máxima.

3.3 - Programa I

O programa I foi desenvolvido considerando as geometrias e as leis de propagação citadas no item 3.2.1 e para as solicitações cíclica flutuante constante no tempo e cíclica flutuante constante em intervalos de tempo, formando um bloco de solicitação.

As figuras 3.1 e 3.2 ilustram estes dois tipos de solicitação.

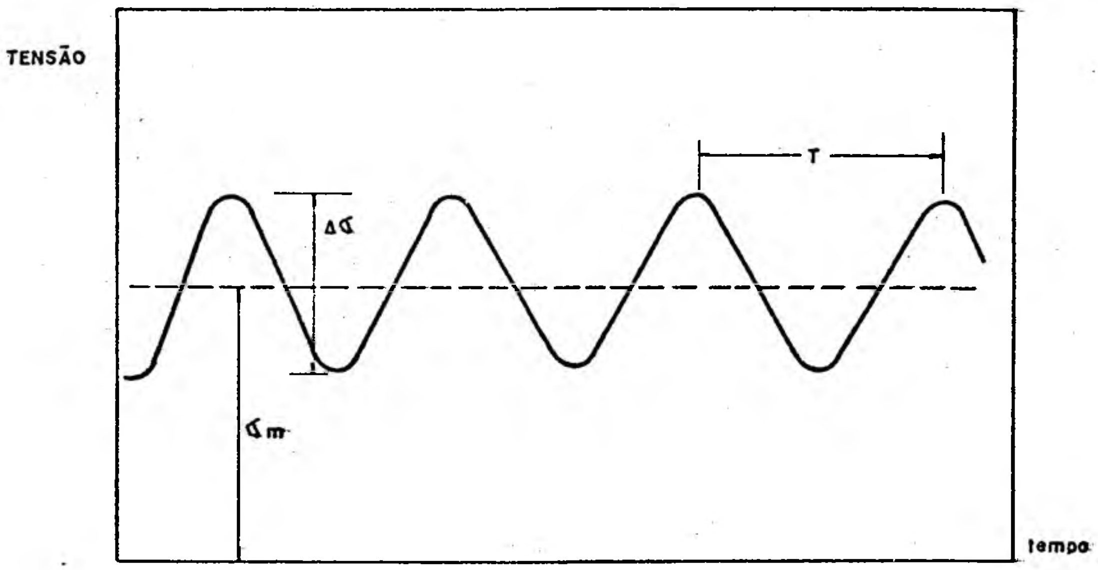


Fig. 3.1 - Solicitação flutuante constante no tempo - Carregamento 1

Os parâmetros que caracterizam a solicitação flutuante constante no tempo são:

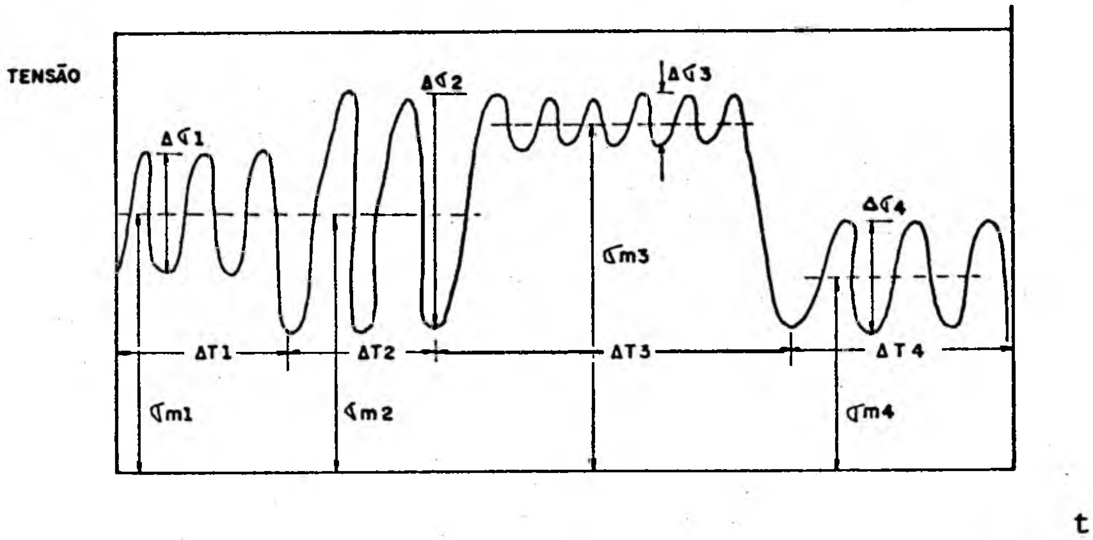


Fig. 3.2 - Solicitação flutuante constante em intervalos de tempo - Carregamento 2

- Tensão média atuante
- Variação da tensão atuante
- Período ou freqüência

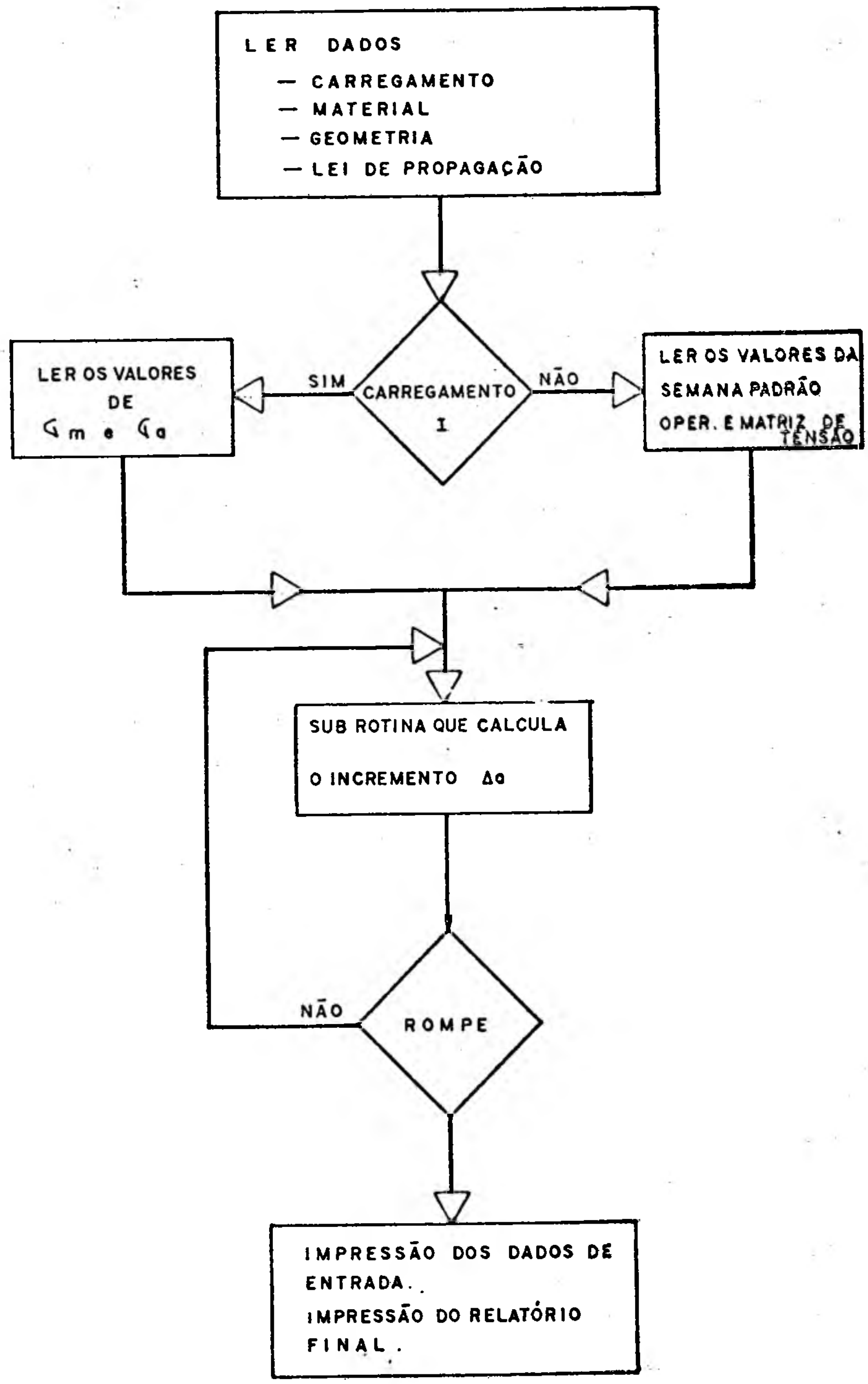
Para a solicitação flutuante em intervalos de tempo é necessário que se defina, para cada intervalo de tempo em que o carregamento é constante, os valores das tensões média, alternada e a freqüência da solicitação considerada.

Para o caso particular do programa I, está embutido dentro do corpo do programa, uma subrotina com os dados referentes às tensões reais de trabalho das pás dos rotores das turbinas das unidades 1 e 3, em função da potência gerada e três semanas padrão de operação das unidades.

3.3.1 - Relatórios de saída

O programa fornece um quadro informando os dados de entrada do programa e um relatório informando a cada incremento da trinca até a ruptura final, os valores do tamanho da trinca, número de ciclos, tempo, velocidade de pro pagação e o valor de ΔK.

3.3.2 - Fluxograma do programa



3.4 - Programa II

A estrutura básica do programa II é a mesma utilizada no programa I, ou seja, foram utilizadas as mesmas geometrias, materiais e leis de propagação do programa I, com a diferença dos tipos de solicitações considerados.

3.4.1 - Solicitação aleatório fornecida pico a pico

O parâmetro que caracteriza a solicitação aleatória é a tensão ponto a ponto.

Neste caso, para definir o carregamento é necessário informar ponto a ponto o valor da tensão atuante no elemento. Isto é feito através de um conjunto de cartões contendo os valores das tensões ponto a ponto. A figura 3.3 mostra este tipo de solicitação.

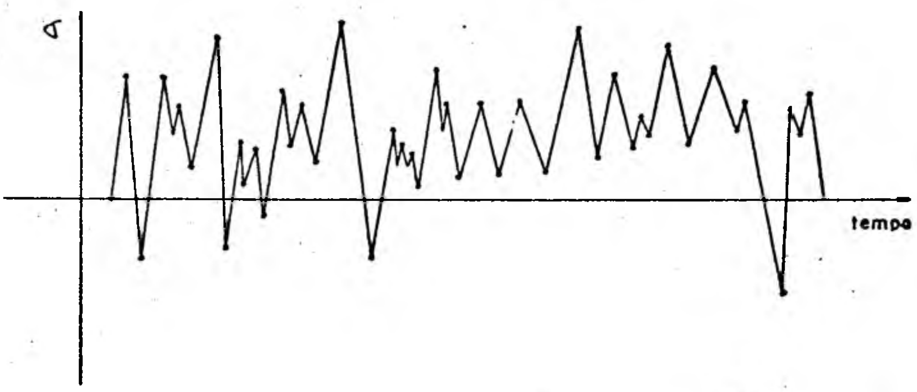


Fig. 3.3 - Amostra da solicitação aleatória fornecida pico a pico - Carregamento 3

Para poder utilizar a teoria da Mecânica da Fratura, para solicitações aleatórias, deve-se definir o que vem a ser um ciclo de tensão. O método utilizado para definir os ciclos de tensão foi o Rain Flow, pois, dentre todos os métodos de contagem de ciclos para a análise do dano por fadiga ou para o estudo da propagação de trincas, este parece ser o método que fornece a previsão mais exata do comportamento do material. O apêndice A 6 apresenta o método.

3.4.2 - Solicitação aleatória fornecido o espectro de frequência.

Este tipo de solicitação é muito semelhante ao anterior, em termos de programação e necessita, também, de um método para a contagem de ciclos. A diferença básica entre eles está nos dados de entrada. No carregamento anterior, os cartões continham os valores das tensões que variavam no tempo; neste carregamento o que se tem é uma função W(f) que dá o valor da energia contida no sinal em função da frequência obtida, através de medições do espectro de frequência da solicitação atuante na estrutura considerada. A figura 3.4 mostra um exemplo típico da solicitação.

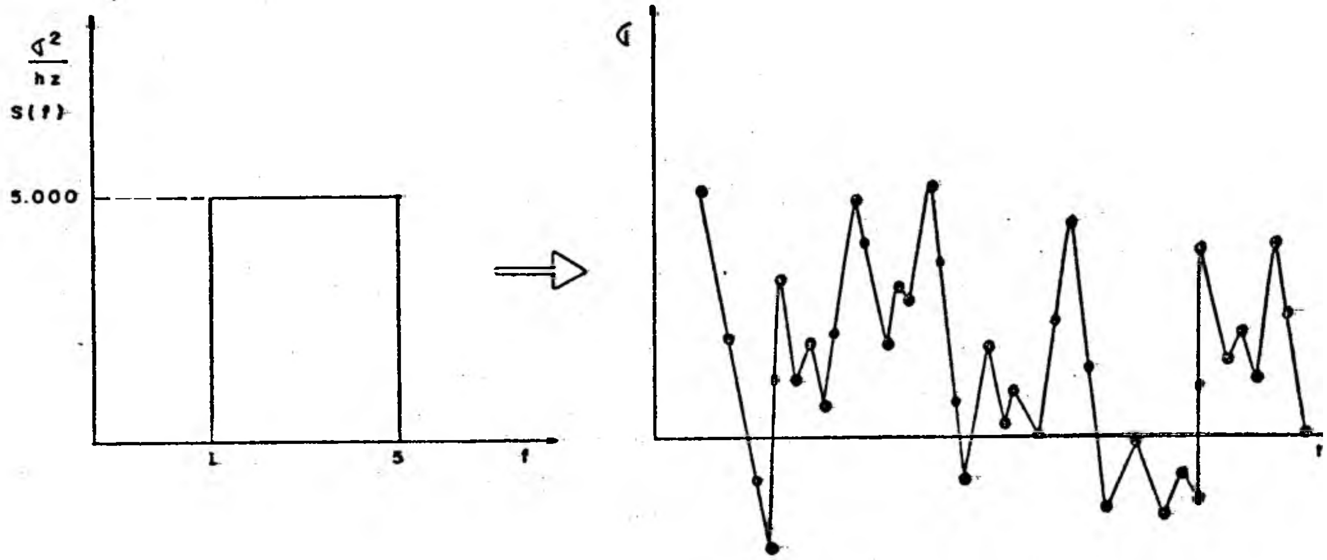


Fig. 3.4 - a) Espectro de frequência; b) Sinal gerado no tempo - Carregamento 4

Como o dado básico da solicitação é o espectro de frequência, o programa gera uma amostra (bloco) de $\sigma(t)$, usando a seguinte formulação |39|:

$$\sigma(t) = \sum_{k=1}^{j} \left[2G(\omega_k)\ \Delta\omega_k \right]^{1/2} \cos\ (\omega_k\ t + \Phi_k)$$

$G(\omega)$ é a função do espectro de frequência $G(\omega) = \dfrac{W(f)}{2\pi}$.

A freqüência é definida sobre o intervalo $(0, \omega_u)$ com partições de comprimento $\Delta\omega_k$

$$\omega_u = \sum_{k=1}^{j} \Delta\omega_k$$

Φ é o ângulo de fase aleatório, uniformemente distribuído no intervalo $(0, 2\pi)$. O número de componentes harmônicos J é arbitrário, mas neste estudo o valor de J usado foi sempre menor que 20.

Se todos os ω_k forem iguais, $\sigma(t)$ será periódica com período igual ao inverso da mínima frequência do espectro de frequência de entrada. Este problema é evitado usando intervalos aleatórios para $\Delta\omega_k$.

Usando estes procedimentos, $\sigma(t)$ é simulada para um tempo t e é convertida em um conjunto de pontos com picos e vales.

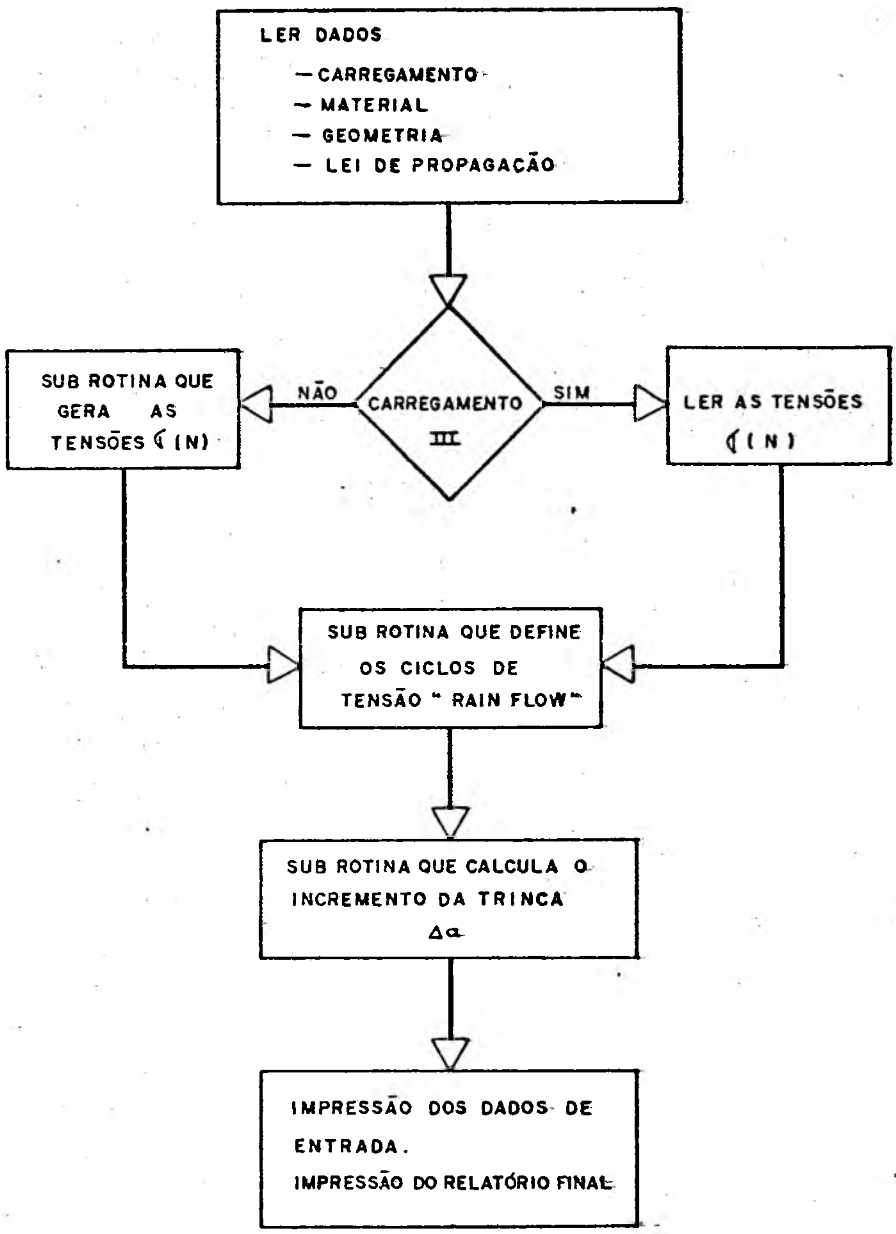
Utilizando o método de contagem de ciclos Rain Flow, estes pontos são transformados em ciclos e calculados os valores da tensão média e alternada para cada ciclo.

No mais, o processo é o mesmo utilizado no programa I.

3.4.3 - Relatórios de saída

O relatório fornecido pelo programa II, é basicamente do mesmo tipo que o fornecido pelo programa I.

3.4.4 - Fluxograma do programa



4. O PROBLEMA DA FISSURA EM PÁS DE TURBINAS

4.1 - Introdução

Nos últimos anos, com a evolução verificada na área de Geracão Hidráulica. os tamanhos e as potências das turbinas hidráulicas aumentaram sensivelmente.

Geralmente os rotores de turbinas de pequeno e médio porte (menores de 200 MW) são fundidos em uma peça única e os rotores de turbinas de grande porte (maiores que 200 MW) são obtidos pela soldagem das pás nas coroas superior e inferior. A fundição e a soldagem são processos que podem apresentar defeitos ou falhas no material após a sua solidificação. Como é, atualmente, conhecido de estudos da Mecânica da Fratura, estes defeitos irão comprometer a resistência à fadiga do rotor.

Portanto, a vida total do componente, calculada usando a aproximação convencional para o projeto contra a fadiga, irá superestimar a vida do componente.

Nesta parte, é apresentado o problema de fissuras verificado nas pás das turbinas hidráulicas da Usina de Salto Osório, mostrando a influência de defeitos, originados durante o processo de fabricação, na vida útil dos rotores das turbinas. São, também, apresentados os procedimentos utilizados nas medições das tensões reais de trabalho das pás do rotor.

Os resultados obtidos nas medições das tensões reais de trabalho das pás dos rotores e na análise da amostra do material trincado na pá nº 4 da turbina I, são utilizados no programa I, item 3.3 .

4.2 - Características Principais das Turbinas

As quatro turbinas hidráulicas instaladas na Usina Hidroelétrica de Salto Osório, são do tipo Francis, de eixo vertical e de projeto convencional, com caixas espirais do tipo inteiramente soldados, fabricadas em chapas de aço e rotor de peça única de aço fundido, com revestimento de aço inoxidável nas superfícies das pás, coroa e cinta, para proteção das áreas mais sujeitas à cavitação.

Dados principais:

- Tipo de rotor : Francis
- Potência Nominal : 245.000 CV
- Queda Nominal : 72 m
- Rotação : 120 pm
- Sentido de rotação: anti-horário

4.3 - Aspectos Gerais do Problema

Durante a parada anual da Unidade I, em junho de 1978, verificou-se a existência de trincas situadas nas bordas de entradas das pás, próximas à ligação com a coroa inferior, como mostra a figura 4.1.

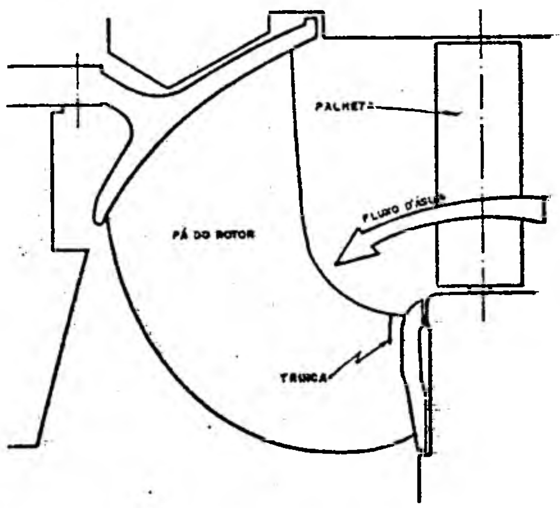


Fig. 4.1 - Localização das trincas no rotor.

Imediatamente após a medida dos comprimentos destas trincas, foram realizadas inspeções nos demais rotores, onde também foi constatada a existência de trincas, nas mesmas regiões e com as mesmas características, diferindo entre si apenas em seus comprimentos. O quadro da figura 4.2 mostra a situação geral das trincas verificadas nas quatro unidades.

DIMENSÕES DAS TRINCAS (mm)								
PÁ	LADO DE PRESSÃO				LADO DE SUCÇÃO			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	60	-	-	-	115	8	36	-
2	130	-	55	70 46	120	-	56	126 22
3	90	96	-	-	140	150	-	-
4	110	-	-	-	150	-	52	-
5	30	-	-	-	80	14	17	-
6	-	-	-	-	30	-	-	-
7	95	-	103	-	130	-	150	50
8	-	72	-	-	-	135	-	-
9	85	-	46	-	120	-	78 20	-
10	160	32	-	-	230	25 37 129	20	-
11	165	-	47	-	200	16	106	-
12	-	-	-	-	35	-	-	-
13	-	-	-	-	25	-	-	-
14	-	-	40	-	65	-	81	-
15	85	-	32	-	160	-	47	-

Fig. 4.2 - Comprimentos das trincas verificadas nas turbinas.

A ilustração 4.3 mostra a configuração e a localização típica das trincas.

A observação direta sobre as superfícies das trincas não deixou dúvidas quanto ao fato de se estar em presença de um processo de fratura por fadiga.

Com base nessas informações, foi iniciado o estu

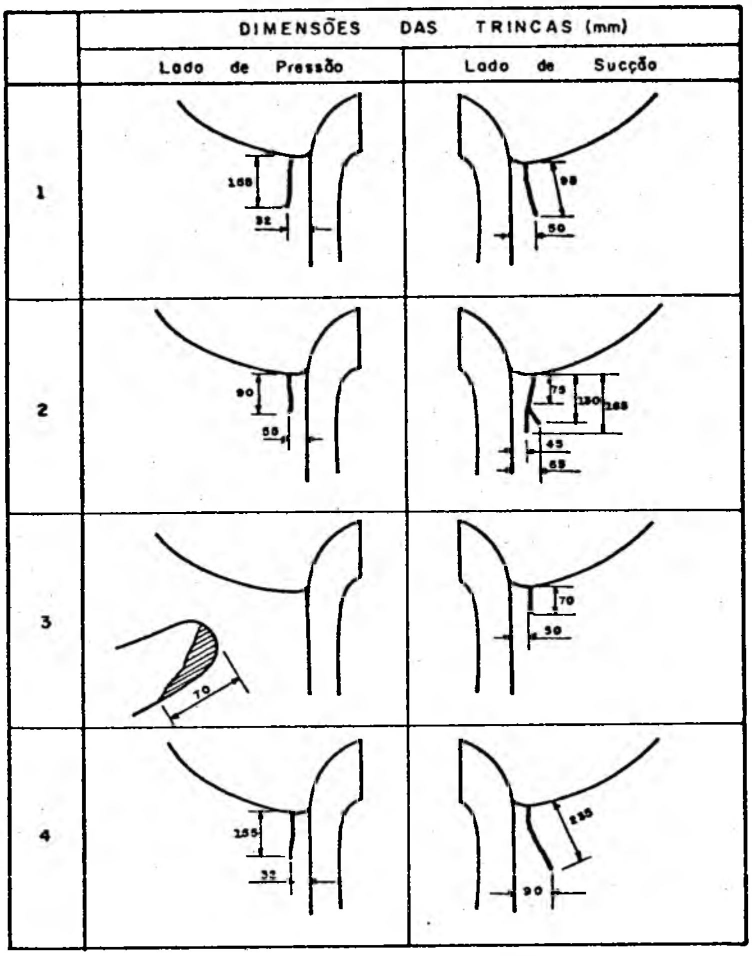


Fig. 4.3 - Localização e configuração típica das trincas encontradas.

do das prováveis causas da nucleação e crescimento das referidas trincas. Procurando obter informações sobre a nucleação destas trincas, foi retirada uma amostra de material trincado para análise e, para se ter as condições de trabalho das pás, resolveu-se realizar a medição das tensões reais de trabalho das pás dos rotores.

4.4 - Resultados da Análise da Amostra do Material com Trinca

Com o propósito de investigar as causas de nucleação destas trincas, foi retirada uma amostra da pá nº4 do rotor da turbina I, e enviada para o laboratório de Pesquisa de Materiais da MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, no Japão, para análise.

As ilustrações 4.4 e 4.5 mostram a localização e a amostra retirada da pá.

Fig. 4.4 - Local onde foi retirada a amostra.

A descrição desta análise, bem como os seus resultados, foge ao escopo do trabalho. Entretanto, é importante mencionar o resultado mais significativo, de grande valia para o estudo das causas das trincas. Investigando-se a propagação das trincas por meio de fractografias, concluiu-se que a trinca da amostra foi desenvolvida a partir de um defeito triangular de 6 mm x 4 mm, localizada no capeamento de aço inoxidável, na parte da borda de entrada do lado de sucção, originado durante a soldagem do capeamento de aço inoxidável.

A ilustração 4.6 mostra a localização do defeito e as linhas de propagação da trinca.

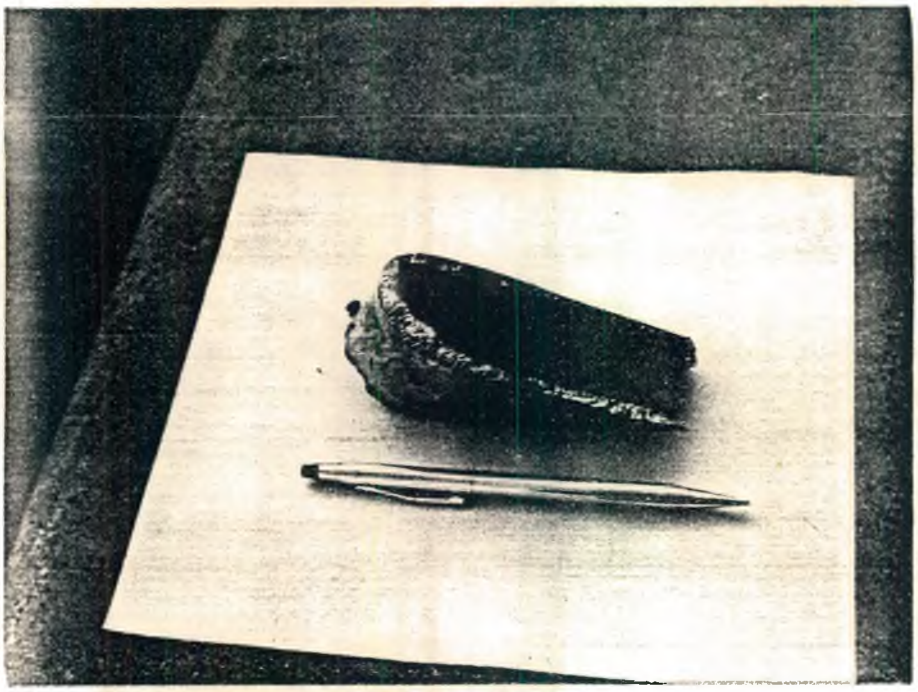


Fig. 4.5 - Amostra do material trincado.

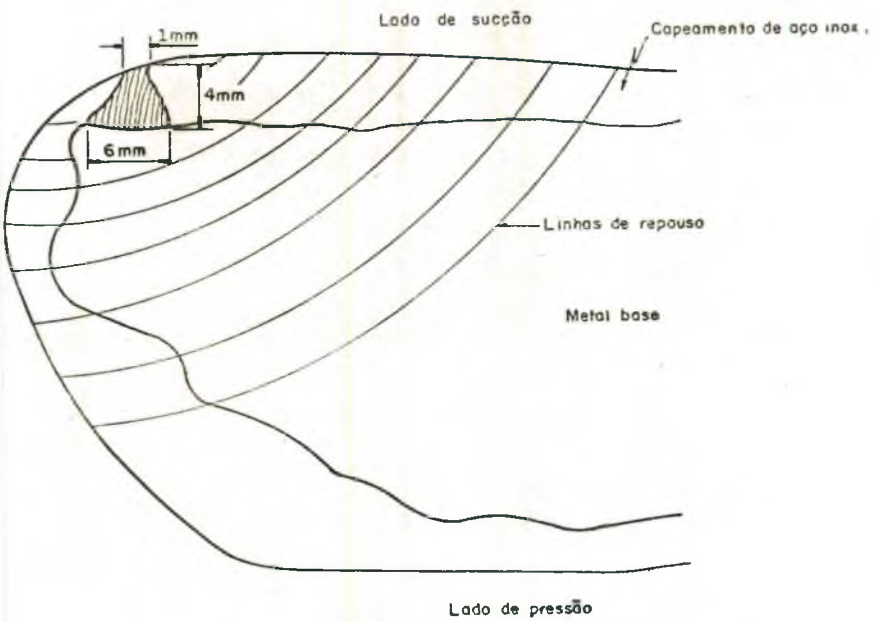


Fig. 4.6 - Localização do defeito na amostra.

4.5 - Medição das Tensões Reais de Trabalho das Pás

4.5.1 - Procedimentos utilizados nas medições

As medições das tensões reais de trabalho das pás das turbinas foram feitas utilizando-se extensômetros de resistência variável, localizados nas regiões críticas, no lado de sucção das pás.

Devido às severas condições a que ficam sujeitos os extensômetros durante a operação da turbina , cuidados especiais foram tomados durante a sua instalação, a fim de evitar a sua ruptura ou mesmo o seu arrancamento.

A ilustração 4.7 mostra esquematicamente a localização dos extensômetros nas turbinas 1 e 3.

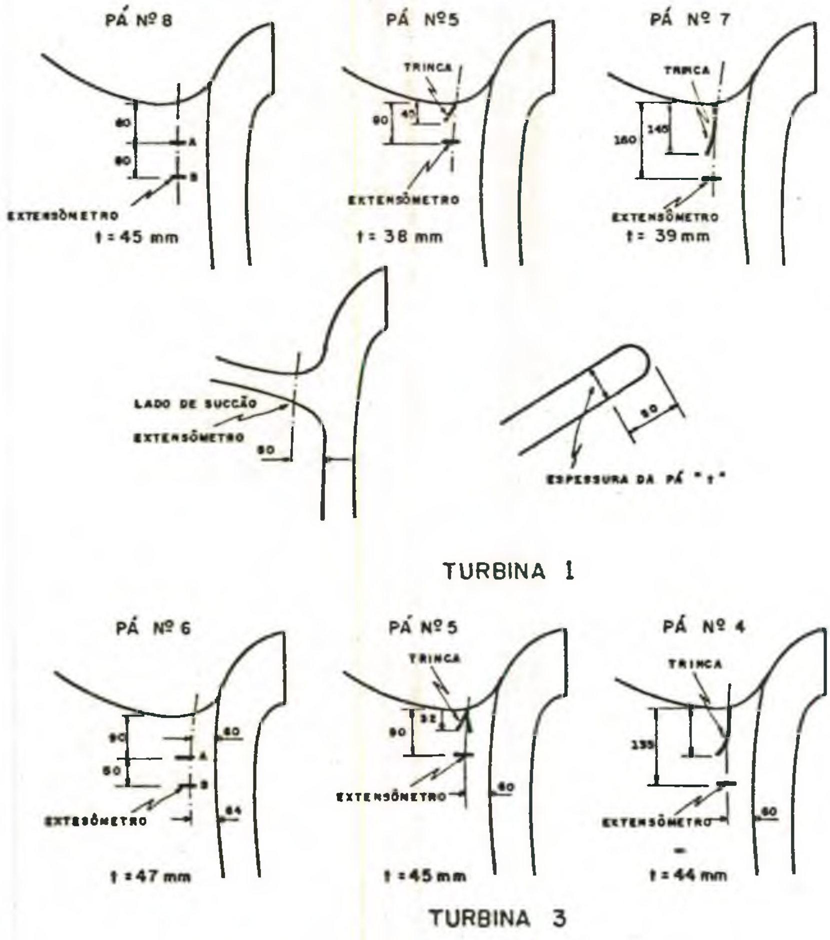


Fig. 4.7 - Localização dos extensômetros nas turbinas 1 e 3.

Os detalhes e os materiais utilizados na instala ção dos extensômetros são mostrados na ilustração 4.8 .

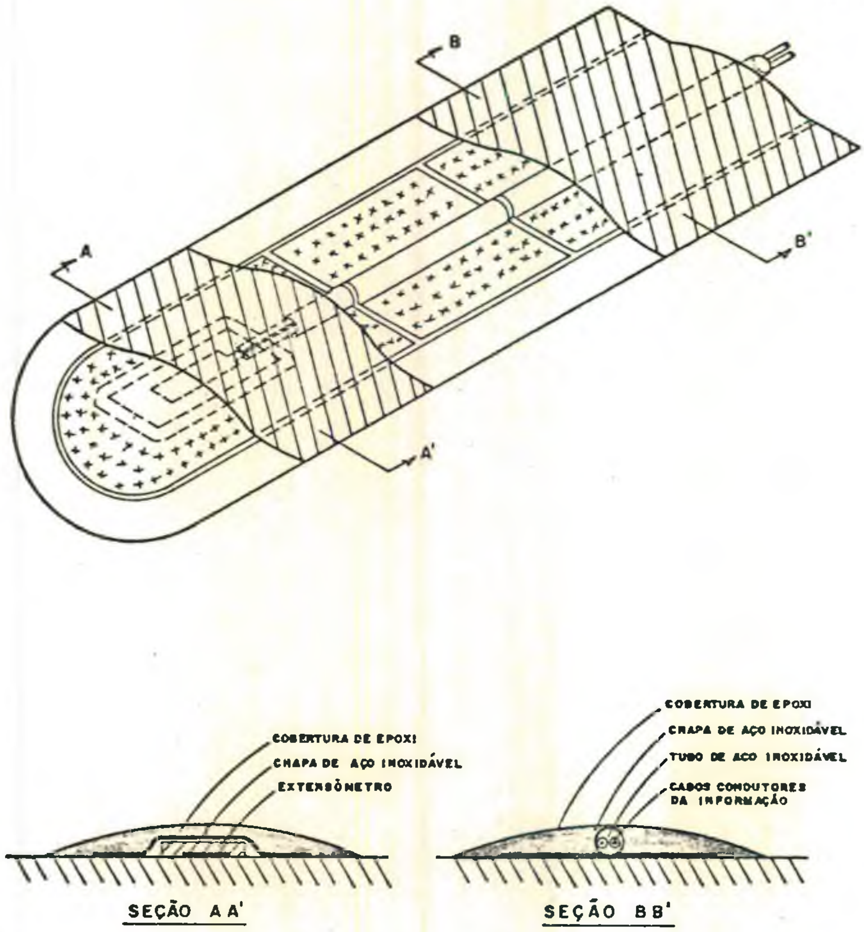


Fig. 4.8 - Detalhes da instalação dos extensômetros.

A fiação dos extensômetros foi passada ao longo das pás, entrando no cone do rotor e através dos eixos vazados da turbina e do gerador, sendo levada até a região dos anéis coletores do gerador.

O percurso e os detalhes desta instalação estão apresentados nas ilustrações 4.9, 4.10 e 4.11 .

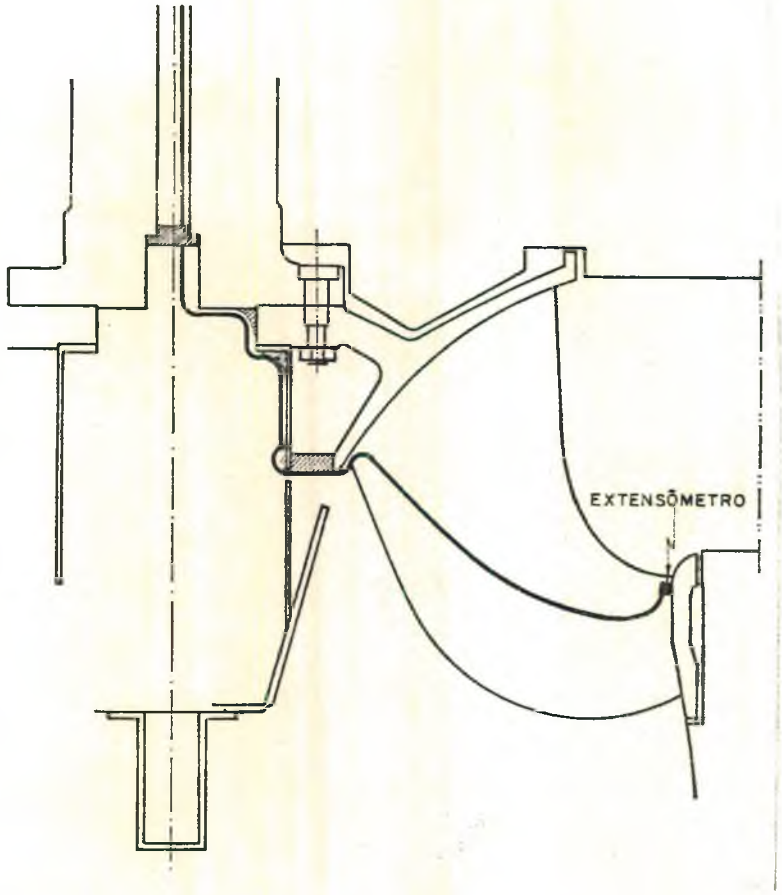


Fig. 4.9 - Percurso dos cabos de informação.

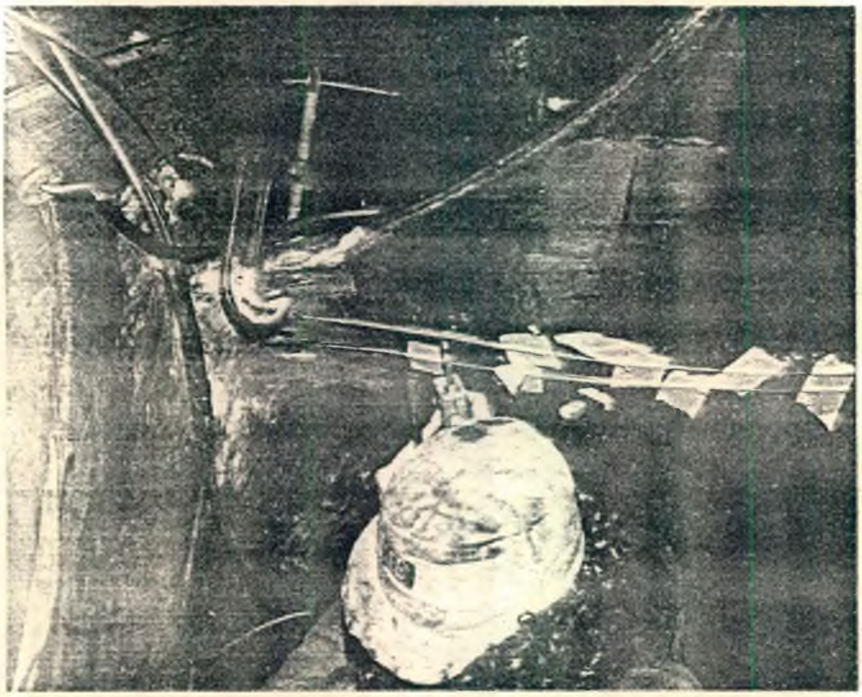


Fig. 4.10 - Detalhes da instalação dos extensô
metros.

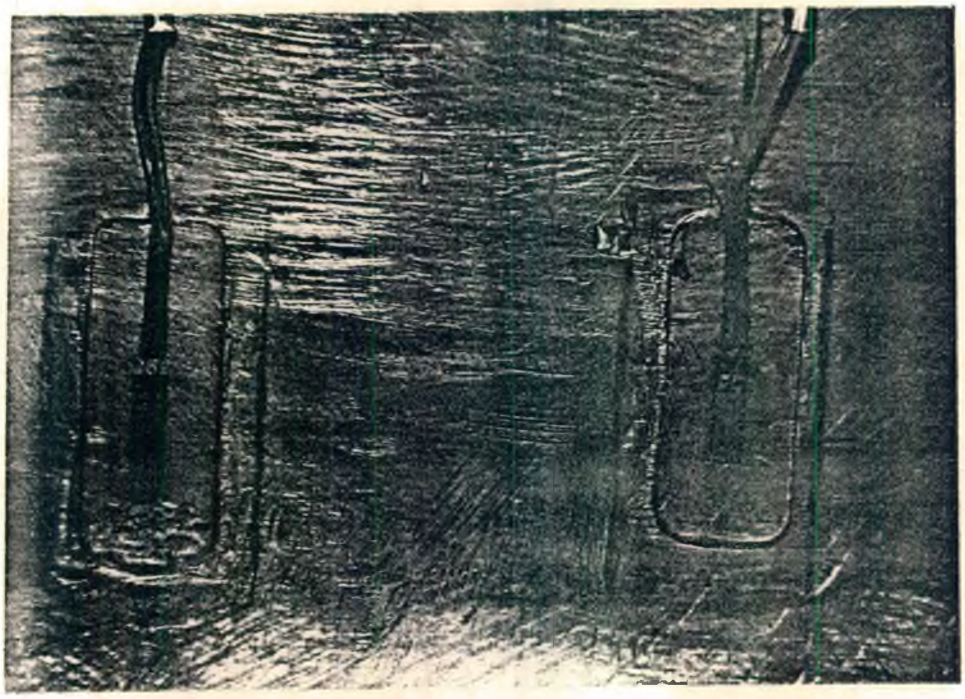


Fig. 4.11 - Detalhes da instação dos extensô metros.

Em um teste deste tipo um dos problemas que surge é a transmissão dos sinais oriundos das partes rotativas aos instrumentos de medição que estão estacionários. Para isso foi desenvolvido um dispositivo empregando mercúrio como meio condutor.

No topo do eixo da unidade, logo acima dos anéis coletores, foi instalado este dispositivo, que consiste de um conjunto de oito cubas contendo mercúrio, fabricadas de material isolante e fixadas à caixa de ar do gerador.

Cada cabo condutor proveniente dos extensômetros foi colocado em contato com o mercúrio através de um anel metálico, que girava com o eixo.

Solidário à parede inferior da cuba, foi colocado um outro anel metálico, completamente imerso no mercúrio. Cada anel estacionário foi eletricamente conectado à uma régua terminal e daí, aos instrumentos de medição. A ilustração 4.12 mostra as cubas de mercúrio instaladas no topo do gerador.

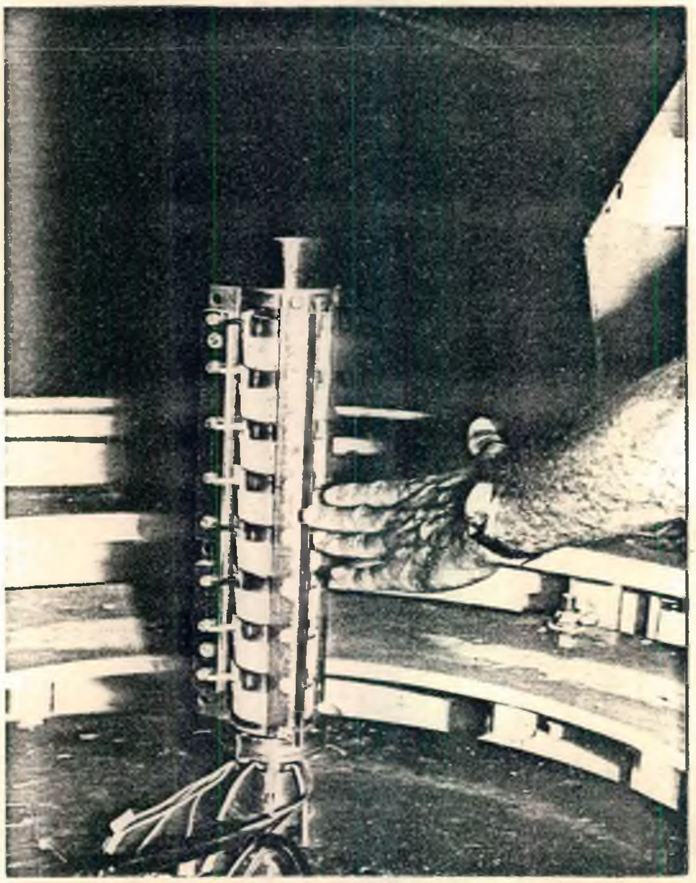


Fig. 4.12 - Detalhes da instalação das cubas.

4.5.2 - Resultados das medições

A ilustração 4.13 mostra esquematicamente os valores típicos das tensões indicadas por um extensômetro, durante uma partida e uma parada.

A ilustração 4.14 mostra esquematicamente os valores das tensões indicadas pelo extensômetro 8-A, durante uma partida e tomada de carga.

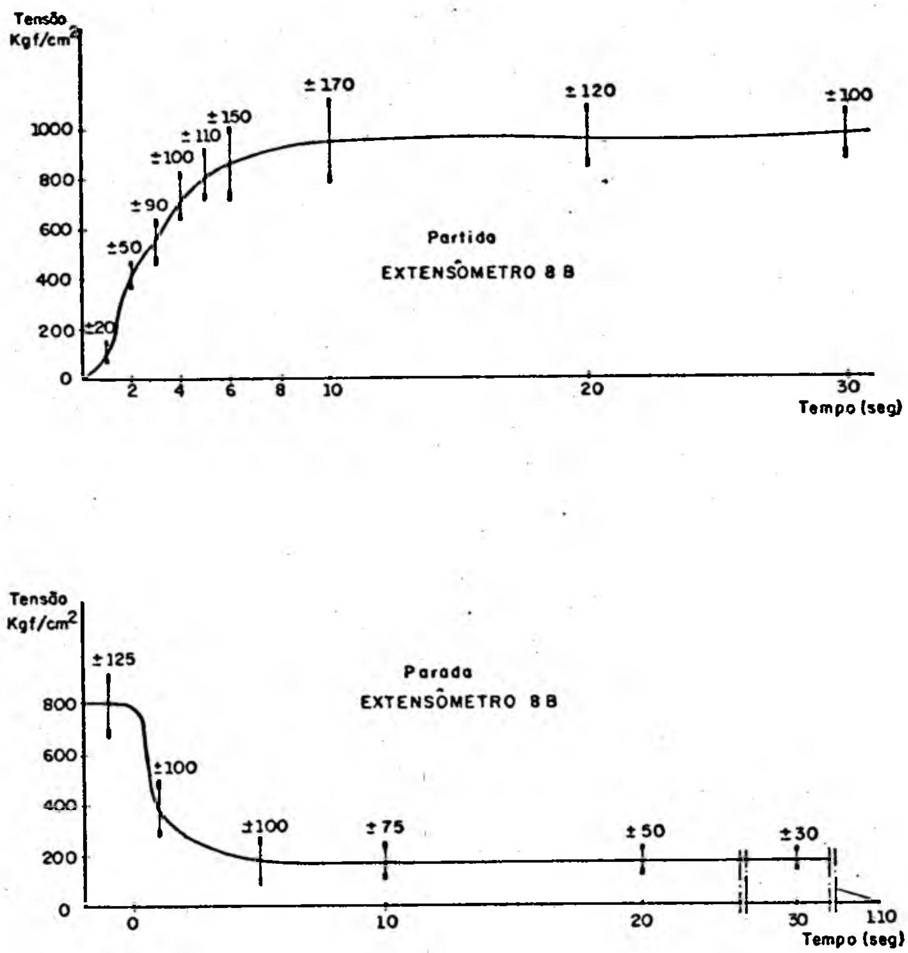


Fig. 4.13 - Resultado das medições das tensões da unidade I.

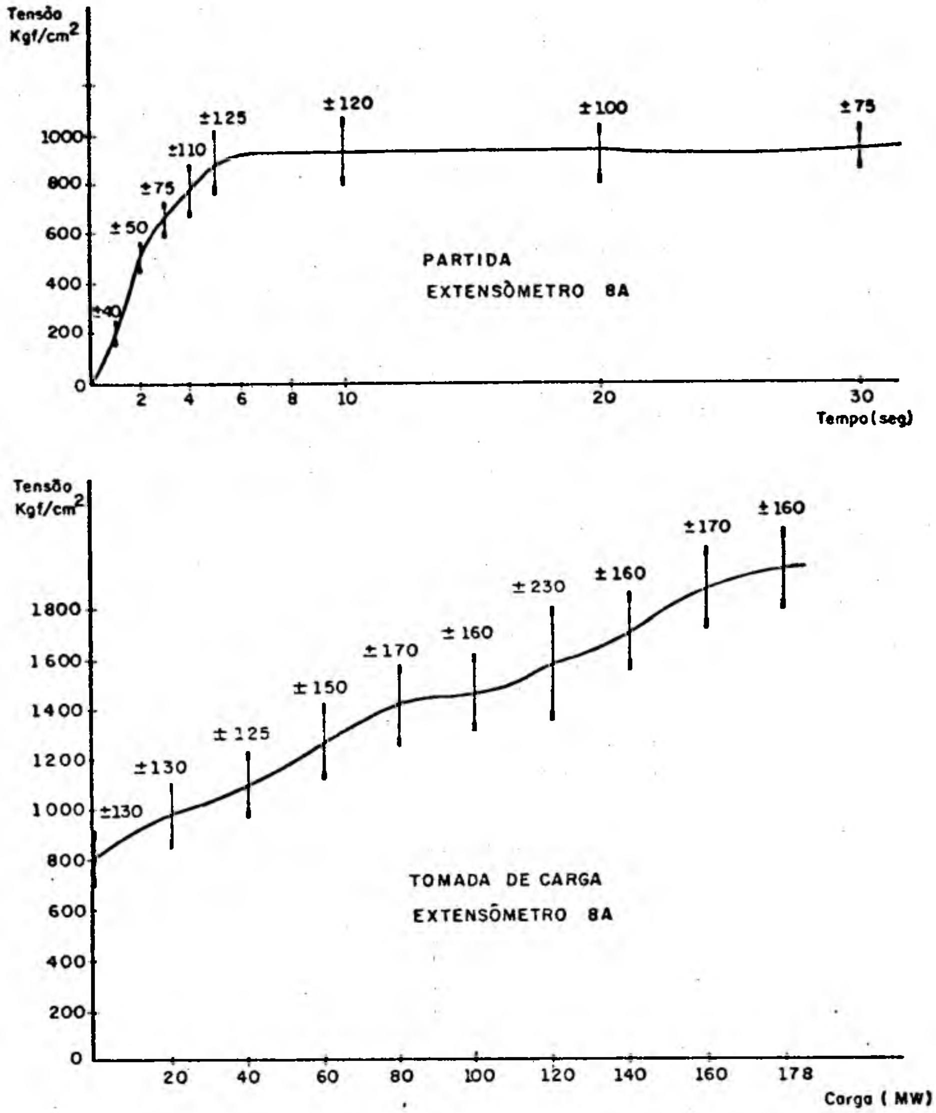


Fig. 4.14 - Resultado das medições das tensões da unidade I.

5. RESULTADOS OBTIDOS PELOS PROGRAMAS

Os resultados obtidos pelos programas encontram-se listados abaixo, obedecendo a divisão feita, ou seja:

- Resultados do Programa I
- Resultados do Programa II

5.1 - Resultados do Programa I

5.1.1 - Influência de Δa sobre N

Objetivando verificar a influência do valor de Δa sobre a vida total calculada, foram obtidos os valores de a x N para vários valores de Δa e a_i.

A influência de Δa e a_i é devido ao processo utilizado para calcular ΔN.

Como,

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

para o caso da lei 1, estabeleceu-se vários valores de da, em porcentos de a_i e calculou-se o número de ciclos dN, necessário para atingir este valor. O valor obtido foi comparado com o valor dado pela expressão

$$N = \frac{(a_1{}^{(m/2)-1})^{-1} - (a_c{}^{(m/2)-1})^{-1}}{C \quad \Delta\sigma^m (m/2 - 1) \quad (Y \sqrt{\pi})^m} \tag{5.1}$$

considerando-se Y constante e $Y_p = 1$.

As tabelas das figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam estes resultados e o erro dado para cada caso, bem como, o tempo de computação gasto, considerando as seguintes informações: placa infinita com trinca central, aço carbono, $\sigma_E = 250\ MN/m^2$, $m = 3{,}3$, $C = 2{,}427 \times 10^{-12}$, $K_{IC} = 500\ MP_a \sqrt{m}$, $\Delta K_{th} = 3{,}8\ MP_a \sqrt{m}$, $Y_p = 1$, $\sigma_{max} = 200\ MN/m^2$ e $\sigma_{min} = 0\ MN/m^2$.

Δa (mm)	N Total (Programa)	N Total (Eq. 5.1)	Erro (%)	Tempo de Computação (seg.)
$\frac{a_i}{100}$	212381	212515	- 0,06	> 51,06
$\frac{a_i}{50}$	214901	214325	+ 0,27	> 49,50
$\frac{a_i}{10}$	223013	216289	+ 3,11	> 47,00

Fig. 5.1 - Influência de Δa sobre N (a_i = 1 mm).

Δa (mm)	N Total (Programa)	N Total (Eq. 5.1)	Erro (%)	Tempo de Computação (seg.)
$\frac{a_i}{100}$	47355	47221	+ 0,28	49,29
$\frac{a_i}{50}$	47526	47221	+ 0,65	32,13
$\frac{a_i}{10}$	48847	47221	+ 3,44	20,87

Fig. 5.2 - Influência de Δa sobre N (a_i = 10 mm).

Δa (mm)	N Total (Programa)	N Total (Eq. 5.1)	Erro (%)	Tempo de Computação (seg.)
$\frac{a_i}{100}$	9390	9358	+ 0,34	19,40
$\frac{a_i}{50}$	9428	9358	+ 0,75	10,36
$\frac{a_i}{10}$	9699	9358	+ 3,64	3

Fig. 5.3 - Influência de Δa sobre N (a_i = 100 mm)

Considerando que o maior erro apresentado pelo programa, com a utilização de $\Delta a = a_i/50$, foi para o valor de a_i = 100 mm e, também, que a maioria das estruturas geralmente apresentam valores de a_i bem inferiores a este, foi considerado esse valor de Δa como adequado para a finalidade a que se propõe o programa.

5.1.2 - Influência do uso do fator geométrico

Foram obtidos os valores de a x N para a geometria abaixo, considerando a influência de Y na vida total, fazendo a consideração da influência das dimensões, ou seja, Y constante, placa infinita e Y variável, placa finita; a figura 5.4 mostra este resultados.

5.1.3 - Influência do fator de correção plástico.

Para considerar a influência do fator de correção plástico, Y_p, foi considerado Y_p = 1, para as mesmas geometrias citadas no parágrafo 5.1.2, e comparado com os resultados obtidos considerando

$$Y_p = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_E}{\sigma} \left[8 \ln \left(\sec \pi\sigma/2\sigma_E\right)\right]^{1/2}$$

A figura 5.5 apresenta os resultados.

5.1.4 - Influência da geometria da trinca

Foram consideradas várias geometrias de trinca, submetidas a um mesmo esforço, material, etc., para verificar a influência da forma do defeito na vida do elemento. A figura 5.6 apresenta estes resultados.

5.1.5 - Influência do tamanho inicial da trinca

Foram considerados três tamanhos iniciais de trinca para a geometria 5, placa finita com trinca numa borda, para verificar a influência de a_i, na vida total do elemento. A figura 5.7 ilustra estes resultados.

5.2 - Resultados do Programa II

5.2.1 - Objetivando verificar a precisão do método proposto, foi verificado o erro apresentado pelo programa II, carregamento 3, considerando pontos de tensão de forma a dar uma solicitação cíclica de amplitude constante.

O erro apresentado foi menor que 0,5 %, quando comparado com o valor obtido nas mesmas condições, pelo programa I, carregamento I. A figura 5.8 apresenta a vida de uma peça, quando solicitada por um carregamento que possui 2 ciclos/bloco (ver item 3.4.1).

5.2.2 - Os resultados obtidos pelo programa II para so licitação aleatória fornecida a densidade de espectral, são apresentados no apêndice A5.

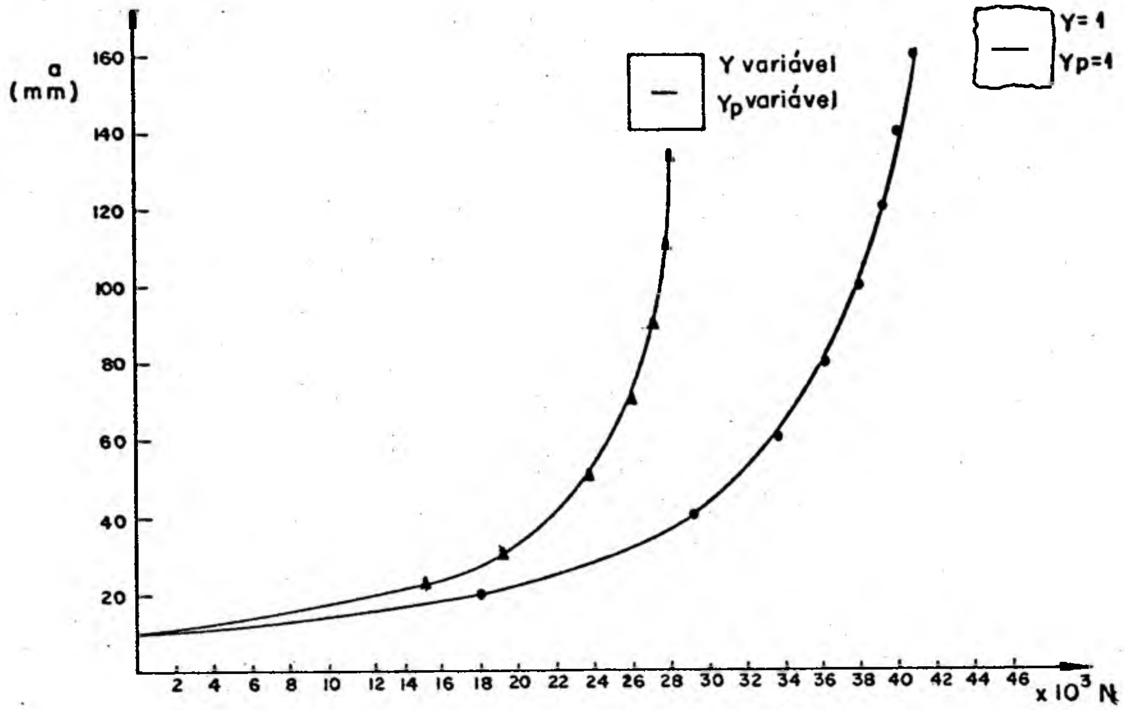


Fig. 5.4 - Influência do fator geométrico.

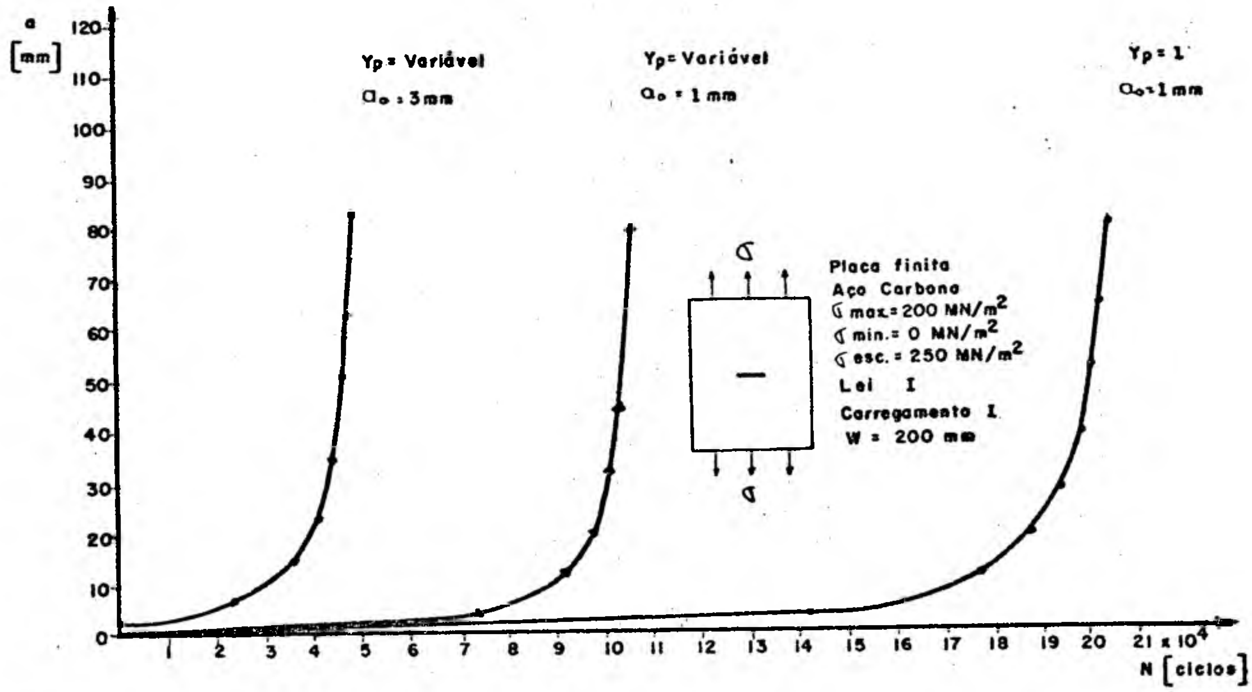


Fig. 5.5 - Influência do fator de correção plástico.

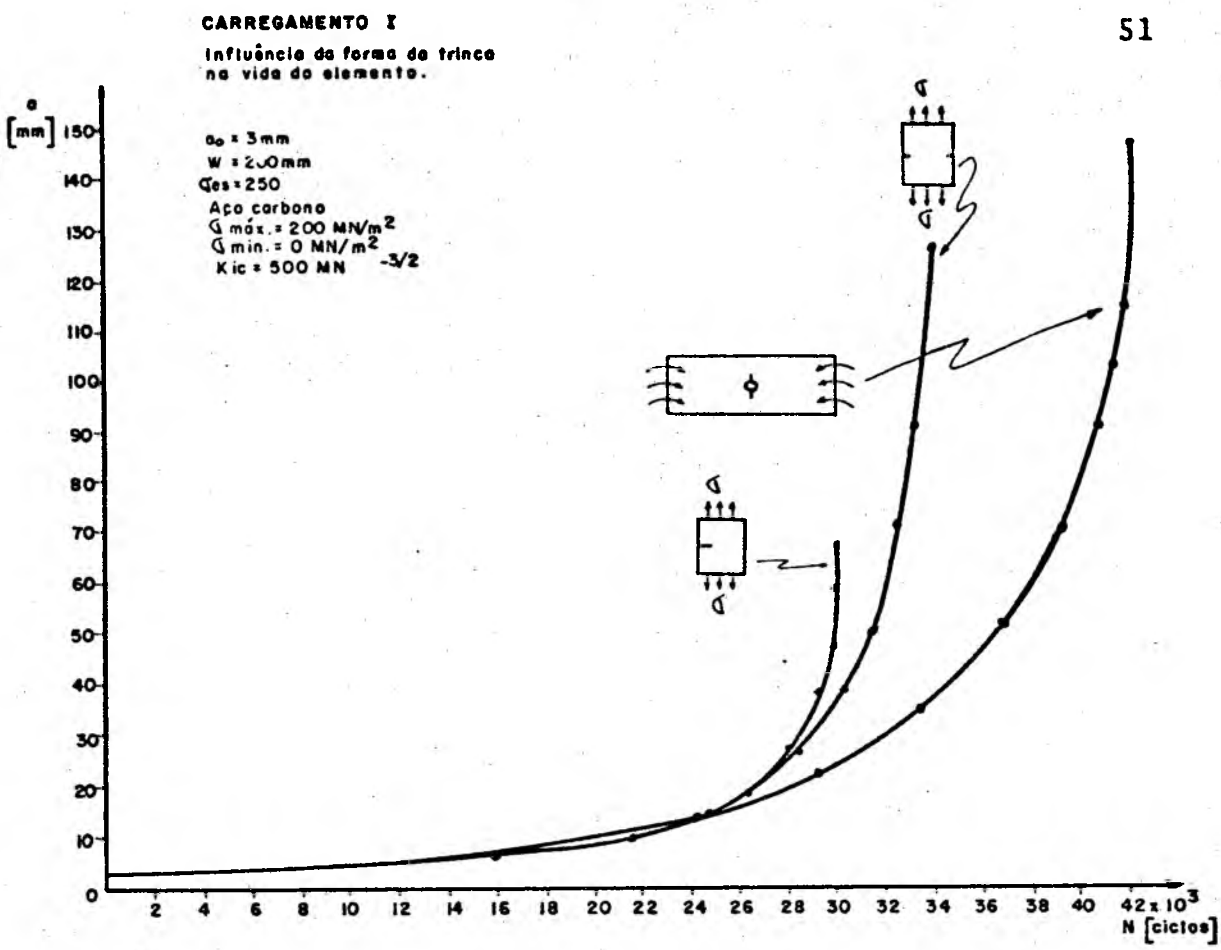


Fig. 5.6 - Influência da geometria, na vida do elemento.

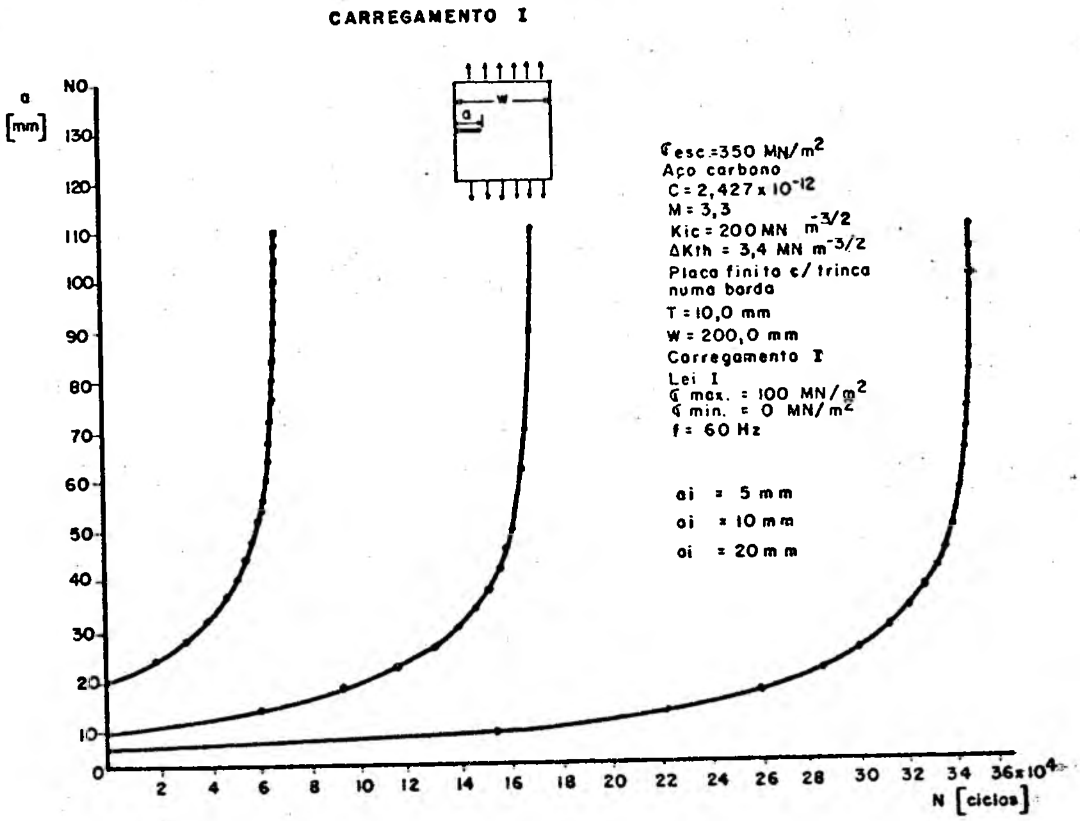


Fig. 5.7 - Influência do tamanho inicial da trinca.

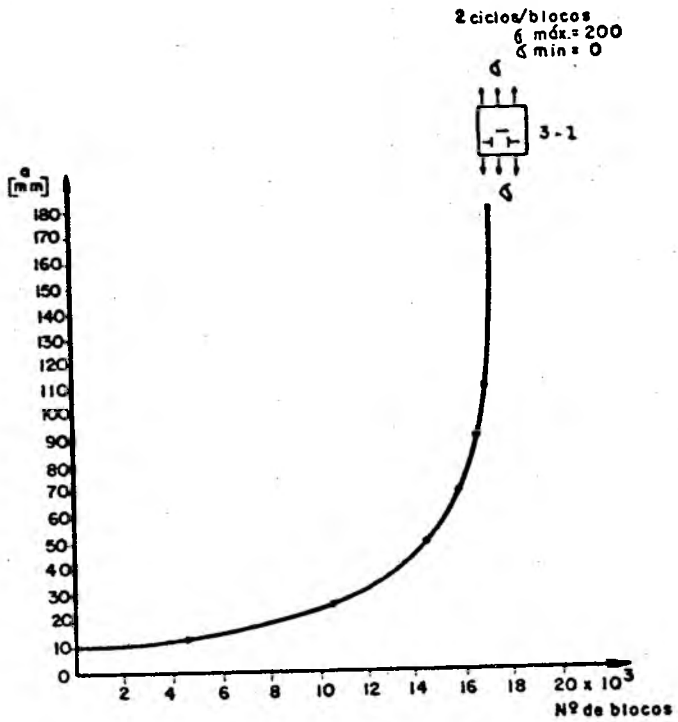


Fig. 5.8 - Resultado do programa II, carregamento 3.

6. CONCLUSÃO

O programa desenvolvido para solicitação cíclica de amplitude constante, apresentou resultados com erro inferior a 0,5 %, desde que seja observado um Δa suficientemente pequeno, conforme mostrado nas tabelas das figuras 5.1, 5.2 e 5.3. Como conseqüência, conclui-se que, para a solicitação cíclica de amplitude constante em intervalos de tempo, o resultado é igualmente satisfatório.

Como já foi citado no capítulo 3, a necessidade de se desenvolver um programa para calcular o crescimento de trincas de fadiga, prende-se ao fato da expressão

$$N = \frac{(a_i^{(m/2)-1})^{-1} - (a_f^{(m/2)-1})^{-1}}{C\ \Delta\sigma^m((m/2)-1)\ (Y\ \sqrt{\pi})^m}$$

só ser válida se o fator geométrico for considerado constante no intervalo (a_i, a_f), o que não pode, em geral, ser feito quando trabalha-se com componentes estruturais de dimensões finitas.

A verificação que se tentou realizar para o caso do carregamento 2, considerando os resultados experimentais e os dados do crescimento das trincas das pás dos rotores das turbinas, não apresentou resultados favoráveis, por possuir a pá uma geometria complexa, e não se conseguir realizar um enquadramento completo nas geometrias disponíveis na literatura. Para os casos onde, por exemplo, ocorre uma transição entre um tipo de geometria e outra, com o crescimento da trinca, torna-se necessário um estudo particular para obter o fator geométrico, Y, em função do tamanho da trinca. A geometria 11, do arquivo dos programas I e II é uma tentativa de enquadramento, que infelizmente não apresentou bons resultados. Maiores estudos neste ponto devem, portanto, serem efetuados para permitir resolver a contento o problema.

Os resultados obtidos pelo programa II, para o carregamento 3, considerando um carregamento de forma a dar uma solicitação de amplitude constante no tempo, apresentou erro inferior a 0,5 % , quando comparado com o resultado apresentado pelo programa I, nas mesmas condições, indicando ser o processo utilizado coerente e aceitável. Para se obter o resultado acima, foram rodados os programas I e II, considerando o fator de correção plástico, Y_p, e o fator geométrico, Y, iguais a 1 .

Como os resultados apresentados pelo carregamento 3, foram considerados satisfatórios, a verificação do programa II para o carregamento 4, limitou-se a conferir os resultados obtidos pelo procedimento GERA TENSÃO. Os resultados, não considerando o ângulo de fase, Φ, para a simulação de $\sigma(t)$ para diferentes formas de $W(f)$ e a conseqüente transformação do sinal em ciclos de tensão, utilizando o método RAIN FLOW, apresentaram erro inferior a 5%, quando calculado em relação ao valor de n obtido pela expressão

$$N = f_o \cdot t$$

A simulação de $\sigma(t)$, considerando Φ como sendo um ângulo de fase aleatório, não apresentou resultados satisfatórios.

6.1 - Considerações e Sugestões

Apesar de se saber que existe o efeito de sobrecarga, e que o mesmo altera a velocidade de crescimento da trinca de fadiga, este fato não foi considerado, pois não se tinha um modelo adequado para explicar este efeito e, mais ainda, por não se ter dados para sua comparação. Como este efeito é importante, trabalhos futuros poderiam ser desenvolvidos no intuito de se levantar a influência de sobrecargas no crescimento de trincas de fadiga.

Como citado anteriormente neste trabalho, o método proposto só pode ser aplicado para prever o crescimento de trincas de fadiga para elementos estruturais que possuam defeitos ou falhas que possam ser caracterizados como uma fissura; no entanto, o período de nucleação da trinca pode, muitas vezes, consumir até 90 % da vida útil do componente, além de que, o próprio período de propagação da trinca é altamente sensível ao tamanho inicial desta. Por esses motivos existe a necessidade de se desenvolver estudos na área da nucleação da trinca, de forma a procurar definir, através de algum parâmetro, o final do período da nucleação e o início do período de propagação.

Procurando formar uma linha de pesquisa nessa área, seria interessante a realização de trabalhos básicos de forma a obter dados sobre os diversos parâmetros característicos da Mecânica da Fratura aplicada à fadiga, para os materiais de maior aplicação em elementos estruturais, considerando a influência do meio ambiente e de tratamento térmico.

Como última sugestão, simular em laboratório um sinal aleatório entrando com a densidade espectral e obter o crescimento da trinca em corpos de prova de geometria conhecida. Tal ensaio poderá ser realizado, sem muitas dificuldades, pelo acoplamento entre o Fourier Analyser, gerador do sinal, e a máquina de ensaio MTS, ambos, em breve, operacionais no Centro Tecnológico. Um outro caso seria o acoplamento da MTS com uma leitora de fita, na qual se teria gravado os pontos de tensão.

BIBLIOGRAFIA

|1| AAMODT, B. and KLEM, F., Application of numerical techniques in practical fracture mechanics. Fracture Mechanics in Engineering Practice. Applied Science Publishers. 1977, pp. 33-56.

|2| AKHTAR, A. and BRODIE, N.W., Field welding of large turbine runners. Water Power & Dam Construction, September 1979, pp. 40-46.

|3| BROEK, D., Elementary engineering fracture mechanics. Noordhoff International Publishing, Leyden, 1974.

|4| BURDEKIN, F.M. and STONE, D.E., The crack openning displacement approach to fracture mechanics in yielding materials. Journal of Strain Analysis, Vol. 1, Nº 2, 1966, pp. 145-153.

|5| CLARK, G.W., Jr., Fracture mechanics in fatigue. Experimental Mechanics, September 1971, pp. 421-428.

|6| CLARK, G.W., Jr. and HUDAK, S.J., Jr., Variability in fatigue crack growth rate testing. Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 3, nº 6, 1975, pp. 454-476.

|7| CHRISTENSEN, R.H. and HARMON, M.B., Limitations of fatigue-crack research in the design of flight vehicle structures. Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 415, 5, 1967.

|8| COLES, A.; JOHNSON, R.E. and POPP, H.G., Utility of surface-flawed tensile bars in cyclic life studies. Journal of Engineering Materials and Technology . October 1976, pp. 305-315.

|9| DeFOREST, A.V., The rate of growth of fatigue cracks. Jnl. of Appl. Mech., A-23, March 1936.

|10| DOWLING, N.E., Fatigue failure predictions for complicated stress-strain histories. Journal of Materials, JMLSA, Vol. 7, Nº 1, March 1972, pp. 7-87.

|11| DREW, V.N., Review of fatigue-crack-growth prediction methods. Experimental Mechanics , February 1977, pp. 41-49.

|12| DUGDALE, D.S., Yielding of steel sheets containing slits. Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 8, 1960, pp. 100-104.

|13| FLOREEN, S., The fracture toughness of cast high-strenght steels. Transactions of the ASME, January 1977, pp. 70-75.

|14| FORMAN, R.G.; KEARNEY, V.E. and ENGLE, R.M., Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures. Journal of Basic Engineering, September 1967, pp. 459-464.

|15| FRANÇOIS, D. and JOLY, L., La Rupture des Métaux. Masson et Cie, 1972, Paris.

|16| FROST, N.E.; POOK, L.P. and DENTON, K., Engineering fracture mechanics, Vol. 3, Nº 2, 1971, pp. 109-126.

|17| FROST, N.E., Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 173, Nº 35, 1959, pp. 811-836.

|18| FROST, N.E. and GREENAN, A.F., Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 9, Nº 3, 1967, pp. 234-237.

|19| FROST, N.E. and GREENAN, A.F., Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 6, Nº 3, 1964, pp. 203-210.

|20| FROST, N.E. and GREENAN, A.F., Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 12, Nº 3, 1970, pp. 159-168.

|21| FROST, N.E., Journal of Mechanical Enginnering Science, Vol. 2, Nº 2, 1960, pp. 109-119.

|22| FROST, N.E., Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 5, Nº 1, 1963, pp. 15-22.

|23| GRANDT, A.F., Jr. and SINCLAIR, G.M., Stress intensity factors for surface cracks in bending. Stress Analysis and Growth of Cracks, Proccedings of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics , Part I, ASTM STP 513, American Society for Testing and Materials, 1972, pp. 37-58.

|24| GRAY, T.G.F., A closed form approach to the assessment of practical crack propagation problems. Fracture Mechanics in Engineering Practice. Applied Science Publishers, 1977, pp. 123-148.

|25| HAYES, D.J., Origins of the stress intensity factor approach to fracture. Journal of Strain Analysis, Vol. 10, Nº 4, October 1975, pp. 198-200.

|26| KNOTT, J.F., The fracture toughness of metals. Journal of Strain Analysis, Vol. 10, Nº 4, October 1975, pp. 201-206.

|27| MUKHERJEE, B. and BURNS, D.J., Fatigue crack growth in polymethil-metacrylate. Experimental Mechanics, October 1971, pp. 433-439.

|28| NELSON, D.V., Review of fatigue crack growth. Prediction methods. Experimental Mechanics, February 1977, pp. 41-49.

|29| PARIS, P.C. and SIN, G.C., Stress analysis of cracks. Fracture Toughness Testing and its Applications . ASTM STP 381, 1965, pp. 30-81.

|30| PARIS, P. and ERDOGAN, F., A critical analysis of crack propagation laws. Journal of Basic Engineering, December 1963, pp. 528-534.

|31| POOK, L.P., Fatigue crack growth data for varius materials deduced precracked plates. Stress Analysis and Growth of Cracks, Proceedings of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics, Part I, ASTM STP 513, American Society for Testing and Materials, 1972, pp. 106-124.

|32| RADON, J.C. and CULVER, L.E., Fatigue crack propagation in metals. Experimental Mechanics, March 1976, pp. 105-110.

|33| RITCHIE, R.O., Near-threshold fatigue crack propagation in ultrahigh strength steel: Influence of load ratio and cyclic strength. Journal of Engineering Materials and Technology, July 1977, pp. 195-204.

|34| ROSA, E. e SANTANA, J.L., Alguns resultados sobre a propagação de trincas de fadiga em flexão plana. Anais do IV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Vol. A, Dezembro 1977, pp. 335-342.

|35| ROSA, E. e LEAL, L.M., Uma apreciação crítica sobre o problema da fadiga. Anais da Conferência sobre Análise, Projeto e Construção de Estruturas de Centrais Nucleares. Abril 1978, pp. 55-74.

|36| SANTANA, J.L.; OLIVEIRA, J.V. e FONSECA, R.I., Medição das tensões reais de trabalho de um rotor Francis para pesquisa de prováveis causas de fadiga. V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. RE/GPH/21, Recife 1979.

|37| SASSI, B.H. et LEHR, P., Ténacité et résistance à la propagation des fissures de fadigue de l'alliage de titane TA6V. Journal of the Less-Common Metals, 56, 1977, pp. 157-165.

|38| SCHMIDT, R.A. and PARIS, P.C., Thereshold for fatigue crack propagation and the effects of load ratio and frequency. Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536, American Society for Testing and Materials, 1973, pp. 79-94.

|39| SHEHATA, A.M. and WIRSCHING, P.H., Fatigue under wide band randon stresses using the Rain-Flow method. Journal of Engineering Materials and Technology. July 1977, pp. 205-211.

|40| STEWART, A.T.; HAINES, K.A. and WILLIANS, Influence of residual stress on fatigue crack propagation in an alternator rotor. Fracture Mechanics in Engineering Practice. Applied Science Publishers. 1977, pp. 323-338.

|41| TOPPER, T.H. and EL HADDAD, M.H., Fracture mechanics analysis for short fatigue cracks. V Interamerican Conference on Materials Technology, Novembro 1978, pp. 493-500.

|42| UEYAMA, T.; SONO, M. and YONEDA, Y., The results of field test on 310 MW Francis Pump Turbines. 1976.

|43| UEYAMA, T. and FUJIWARA, M., Investigation report of runner cracks. Material Research Laboratory MHI. 1978.

|44| YODER, G.R.; COOLEY, L.A. and CROOKER, T.W., Enhancement of fatigue crack growth and fracture resistance in Ti-6 Al-4 V and Ti-6 Al- 6 V-2 Sn through microstructural modification. Journal of Engineering Materials and Technology, October 1977, pp. 313-318.

|45| ZETTLEMOYER, N. and FISHER, J.W., Stress gradient and crack shape effects on stress intensity at welded details. Welding Research Supplement, August 1978, pp. 246-250.

A P Ê N D I C E S

APÊNDICE A1

DADOS SOBRE A PARTE EXPERIMENTAL

Os dados obtidos experimentalmente e os valores dos demais parâmetros verificados desde a inspeção que constatou a presença de trincas nos rotores das turbinas da Usina Hidroelétrica de Salto Osório, até os valores obtidos durante a execução dos reparos das trincas, encontram-se listados neste apêndice.

Os quadros das figuras A1-1 e A1-2 mostram, respectivamente, os valores dos comprimentos das trincas e os dados de operação das máquinas quando da inspeção realizada em julho de 1978.

DIMENSÕES DAS TRINCAS (mm)								
PÁ	LADO DE PRESSÃO				LADO DE SUCÇÃO			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
01	60	-	-	-	115	8	36	-
02	130	-	55	70/46	120	-	56	126/22
03	90	96	-	-	140	150	-	-
04	110	-	-	-	150	-	52	-
05	30	-	-	-	80	14	17	-
06	-	-	-	-	30	-	-	-
07	95	-	103	-	130	-	150	50
08	-	72	-	-	-	135	-	-
09	85	-	46	-	120	-	78/20	-
10	160	32	-	-	230	129/37	20	-
11	165	-	47	-	200	16	106	-
12	-	-	-	-	35	-	-	-
13	-	-	-	-	25	-	-	-
14	-	-	40	-	65	-	81	-
15	85	-	32	-	160	-	47	-

Fig. A1-1 - Comprimento das trincas

UNIDADE	HORAS DE OPERAÇÃO	NÚMERO DE PARTIDAS	ENERGIA GERADA (GWH)
I	14.358,44	853	1.748,185
II	15.180,43	523	1.773,404
III	16.653,39	571	1.698,183
IV	17.418,00	210	1.552,0

Fig. A1-2 - Dados operativos das unidades.

Os quadros das figuras A1-3 e A1-4 mostram, respectivamente, os valores dos comprimentos das trincas e os dados de operação das unidades geradoras quando da execução dos reparos realizados nas pás trincadas.

DIMENSÕES DAS TRINCAS (mm)								
PÁ	LADO DA PRESSÃO				LADO DE SUCÇÃO			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
01	70	-	19	20	118	24	61	60
02	135	-	63	122/70	125	160	117	160/22
03	101	110	-	-	175	160	-	-
04	x	-	30	-	x	-	92	-
05	40	-	-	-	177	33	32	-
06	-	-	-	-	200	28	-	-
07	100	-	132	6	218	20	243	70
08	-	91	-	-	-	165	62	-
09	113	-	52	-	125	-	90	-
10	193	64	29	-	240	145	54	-
11	180	-	57	-	220	24	115	-
12	-	-	-	-	168	15	-	35
13	-	-	-	10	206	-	-	150
14	-	-	51	-	220	-	127	-
15	96	-	46	-	205	11	109	-

Fig. A1-3 - Comprimento das trincas.

UNIDADE	HORAS DE OPERAÇÃO	NÚMERO DE PARTIDAS	ENERGIA GERADA (GWH)
I	18.537,00	942	2.367,825
II	19.713,00	543	2.189,796
III	20.336,00	641	2.032,029
IV	23.215,00	266	1.922,146

Fig. A1-4 - Dados operativos das unidades.

O quadro da figura A1-5 ilustra o regime de operação normal das turbinas, durante uma semana, valores estes retirados das folhas de leitura do Setor de Operação da Usina.

HORA	S E M A N A						
	SEG.	TER.	QUAR.	QUIN.	SEX.	SÁB.	DOM.
0:00	80	80	90	120	120	100	80
2:00	80	80	90	120	120	100	80
4:00	100	80	90	80	100	120	100
6:00	100	100	100	120	160	100	100
8:00	120	120	120	120	140	80	100
10:00	140	140	120	160	160	100	100
12:00	140	140	120	160	140	120	120
14:00	120	120	100	80	80	120	120
16:00	140	140	100	160	80	120	120
18:00	140	160	120	160	100	100	100
20:00	175	175	160	120	140	120	120
22:00	160	100	120	140	120	100	120
24:00	80	100	80	140	80	80	120

Fig. A1-5 - Regime de operação das turbinas
(Potência gerada em MW).

APÊNDICE A2

GEOMETRIAS DISPONÍVEIS

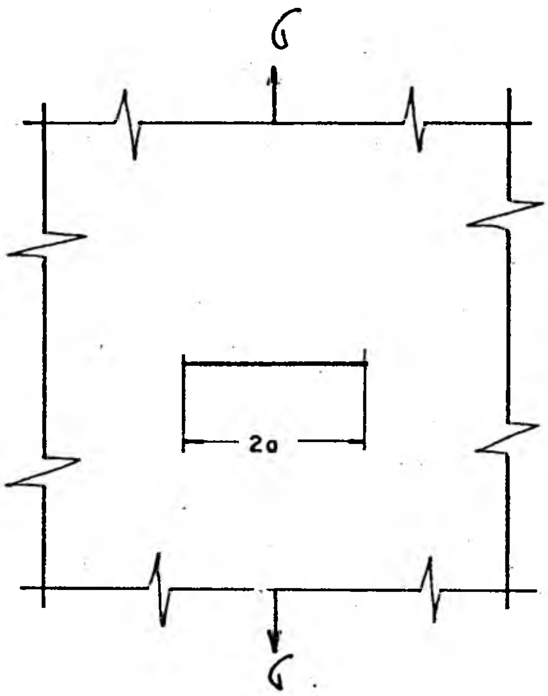
Neste apêndice encontra-se o conjunto de geometrias que estão disponíveis no procedimento Geometria e que podem ser chamadas para o programa principal, bastando indicar o código correspondente à referida geometria.

Os parâmetros que definem as geometrias são:

- Código da geometria
- Fator de intensidade de tensões
- Parâmetro de forma da trinca
- Dimensões características
  - . Comprimento da trinca (a)
  - . Largura da peça (W)
  - . Espessura (t)
  - . Altura (H)
  - . Largura da trinca (c)
  - . Diâmetro da peça (D)
  - . Diâmetro do furo (D)

Nas geometrias referentes aos corpos de prova, o fator de intensidade de tensões K é obtido, geralmente, como sendo função da força aplicada, por ser este parâmetro muito mais fácil de se controlar durante a realização de testes em laboratório. No entanto, para o propósito deste trabalho, a definição do fator de intensidade de tensões, como sendo dependente da tensão nominal aplicada, é mais interessante. Por esta razão, as geometrias correspondentes a estes corpos de prova, foram definidas das duas maneiras acima.

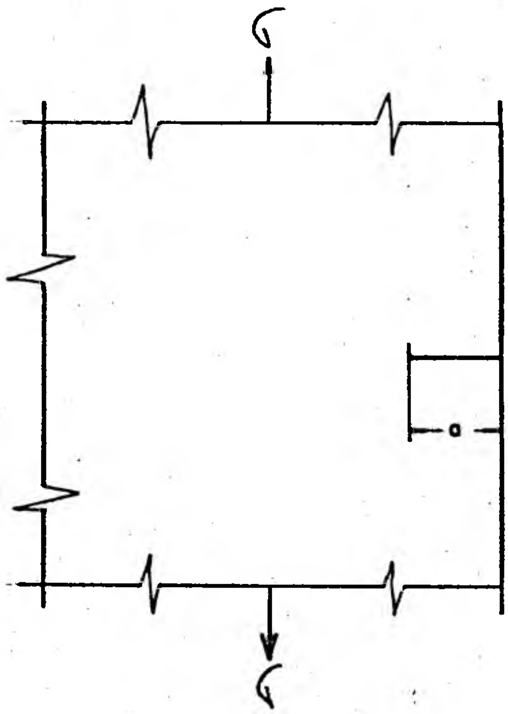
PLACA INFINITA COM TRINCA CENTRAL |30|



$$K = \sigma_o . Y . Y_p . \sqrt{\pi . a}$$

Y= 1 → Constante

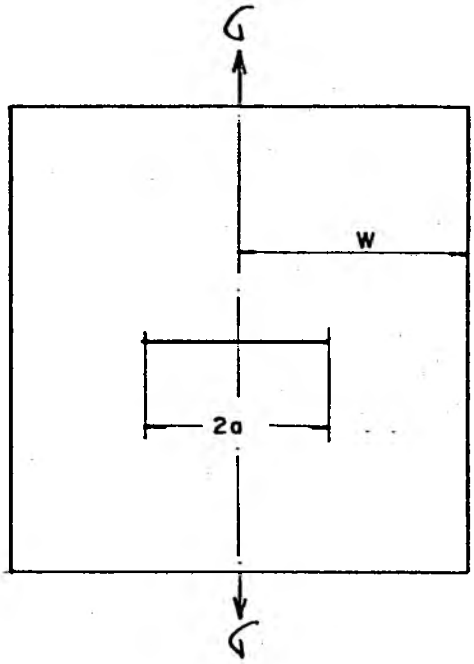
PLACA SEMI-INFINITA COM TRINCA NA BORDA |30|



$$K = \sigma_o . Y . Y_p . \sqrt{\pi . a}$$

Y=1,1215 → Constante

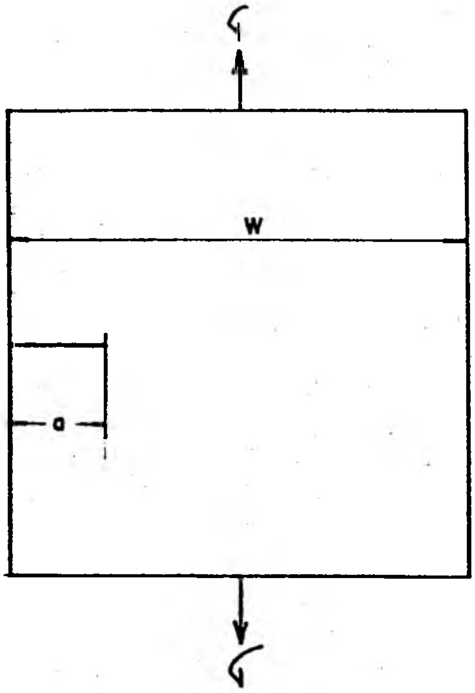
PLACA FINITA COM TRINCA CENTRAL |45|



$$K = \sigma_o \cdot Y \cdot Y_p \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

$$Y = \left[\mathrm{Sec.} \left(\frac{\pi \alpha}{2} \right) \right]^{1/2} \quad \text{onde } \alpha = \frac{a}{W}$$

PLACA FINITA COM TRINCA NA BORDA | 04 |

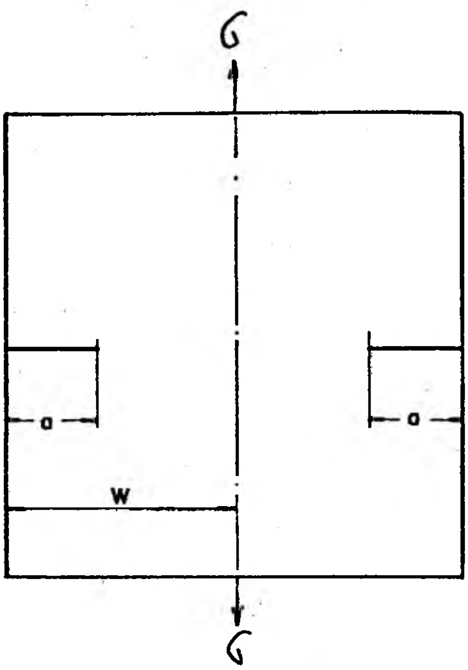


$$K = 1{,}12 \cdot \sigma_o \sqrt{\pi \cdot a} \quad \text{P/ } \frac{a}{W} \text{ Pequeno}$$

$$K = \sigma_o \cdot Y \cdot Y_p \sqrt{a} \quad \text{Onde}$$

$$Y = 1{,}99 - 0{,}41 \cdot \frac{a}{W} + 18{,}7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 38{,}48 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 53{,}85 \left(\frac{a}{W}\right)^4$$

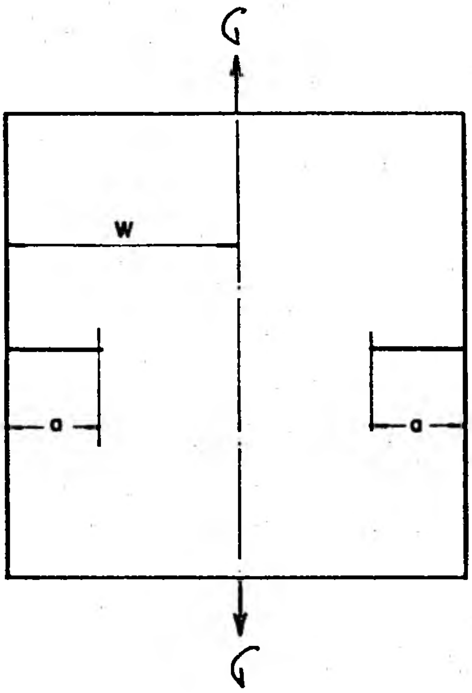
PLACA FINITA COM TRINCAS NAS BORDAS |45|



$$K = \sigma_o \, Y.Y_p \sqrt{\pi . a}$$

$$Y = \left[\frac{2}{\pi \alpha} \, \text{Tag} \left(\frac{\pi \alpha}{2} \right) \right]^{1/2} \quad \text{onde } \alpha = \frac{a}{W}$$

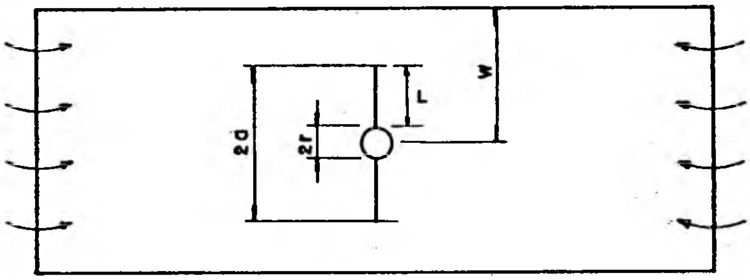
PLACA FINITA COM TRINCAS NAS BORDAS |04|



$$K = \sigma_o \, Y.Y_p \sqrt{a}$$

$$Y = 1{,}99 + 0{,}38 \frac{a}{W} - 2{,}12 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 3{,}42 \left(\frac{a}{W} \right)^3$$

PLACA FINITA COM TRINCA CENTRAL SOB FLEXÃO |34|

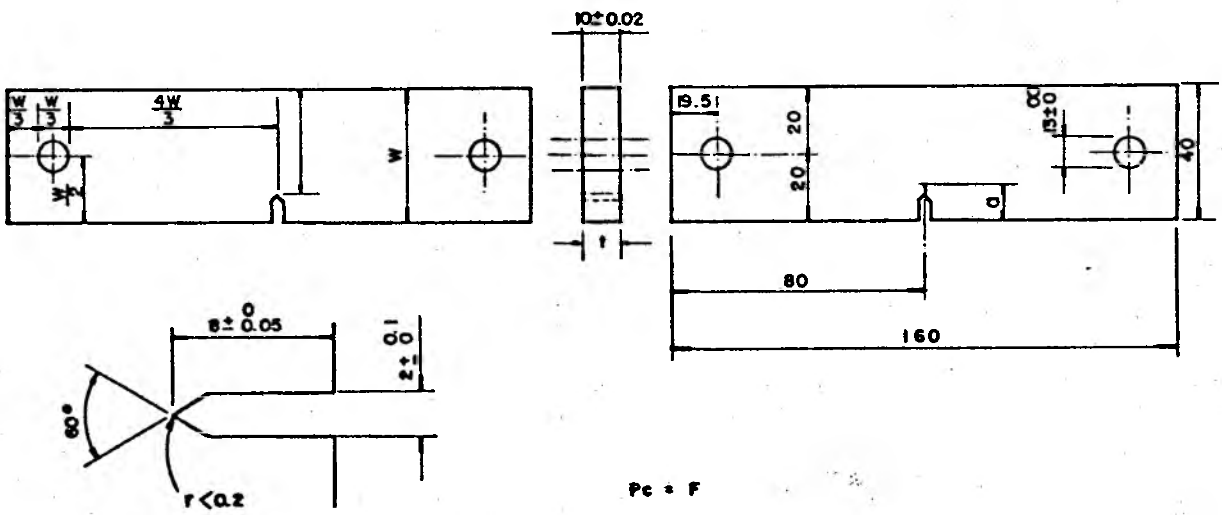


$$K = \sigma_o . Y . Y_p . \sqrt{\pi . a}$$

$$Y = \left[1.369 \left(\frac{L}{r} \right)^{-0,119} \right] \left(\mathrm{Sec.} \frac{\pi \alpha}{2} \right)^{1/2}$$

Onde $\alpha = \frac{a}{W}$

CORPO DE PROVA SOB TRAÇÃO COM TRINCA NA BORDA |15|



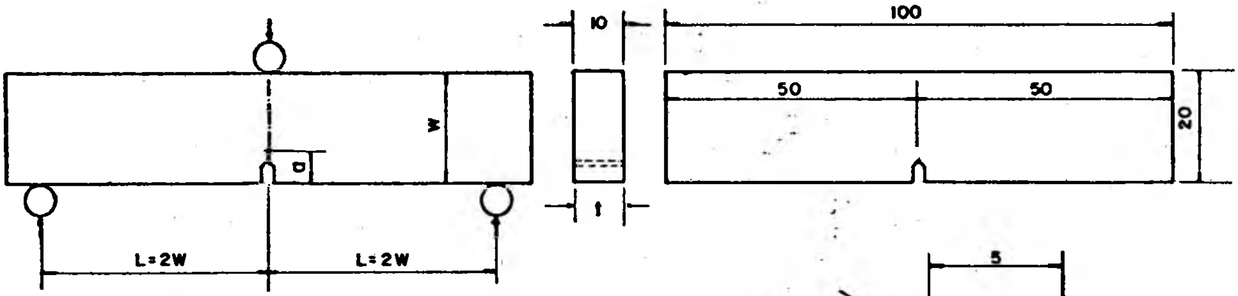
Pc = F

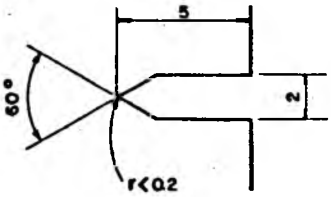
$$K = \frac{P_c Y_p}{t\sqrt{W}} \left[1.99 \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 0.41 \left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 18.70 \left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 38.48 \left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 53,85 \left(\frac{a}{W}\right)^{9/2} \right]$$

$\sigma = \frac{F}{tw}$ K função de σ e = Pc $K = \sigma Y Y_p \sqrt{W}$

$$Y = \left[1.99 \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 0.41 \left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 18.70 \left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 38.48 \left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 53.85 \left(\frac{a}{W}\right)^{9/2} \right]$$

CORPO DE PROVA SOB FLEXÃO EM TRÊS PONTOS |15|



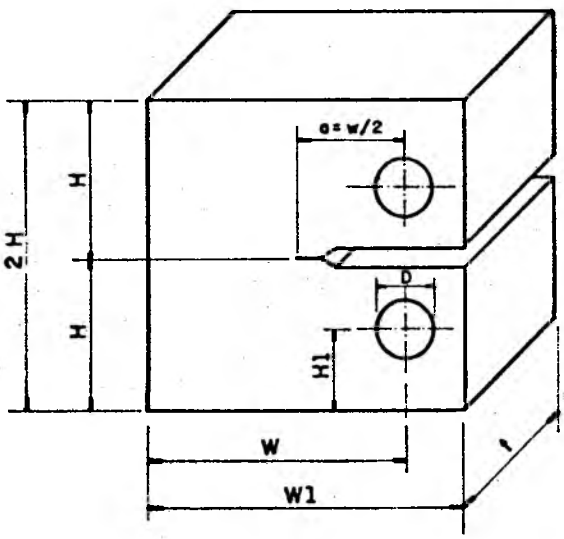


$$2 < \frac{W}{t} < 8 \qquad \sigma = \frac{F}{tw}$$

$$K = \frac{Pc\ Yp}{t\sqrt{W}}\left[11.58\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 18.42\left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 87.18\left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 150.66\left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 154.30\left(\frac{a}{W}\right)^{9/2}\right]$$

$$Y = \left[11.58\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 18.42\left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 87.18\left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 150.66\left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 154.30\left(\frac{a}{W}\right)^{9/2}\right] \qquad K = \sigma\, Y Yp \sqrt{W}$$

CORPO DE PROVA SOB TRAÇÃO — CORPO DE PROVA COMPACTO |15|



TIPOS

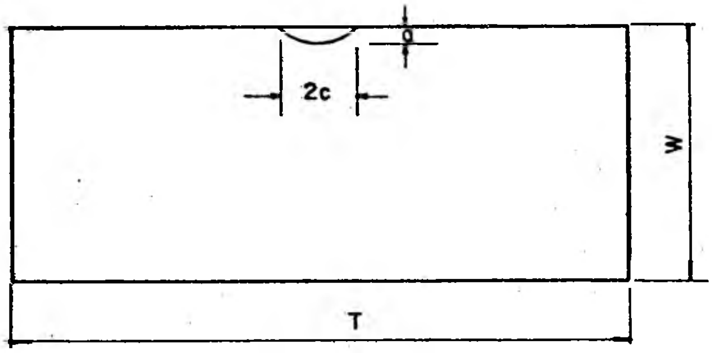
1T-CT	t = 1"	W = 2t
2T-CT	t = 2"	x = t
3T-CT	t = 3"	H = 1,2t
4T-CT	t = 4"	D = 0,5t
6T-CT	t = 6"	W1 = 2,5t
8T-CT	t = 8"	H1 = 0,65t
10T-CT	t = 10"	
12T-CT	t = 12"	

$$\sigma = \frac{F}{tw}$$

$$K = \frac{Pc\ Yp}{t\sqrt{W}}\left[29,6\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 185,5\left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 655,7\left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 1017\left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 638,9\left(\frac{a}{W}\right)^{9/2}\right]$$

$$Y = \left[29.6\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 185.5\left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 655.7\left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 1017\left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 638.9\left(\frac{a}{W}\right)^{9/2}\right] \qquad K = Y Yp \sqrt{W}$$

TRINCA SEMI ELÍPTICA NA SUPERFÍCIE - TRAÇÃO |5|



$$K = \sigma_o \cdot Y \cdot Y_p \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

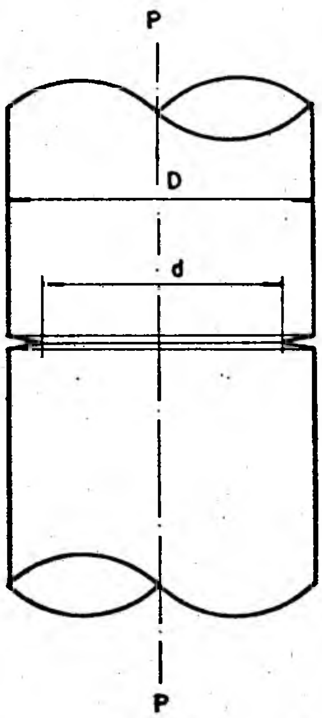
$$Y = \frac{1.1215}{\sqrt{Q}}$$

$$Q = \phi^2 - 0{,}212\,(\sigma/\sigma_{ys})^2$$

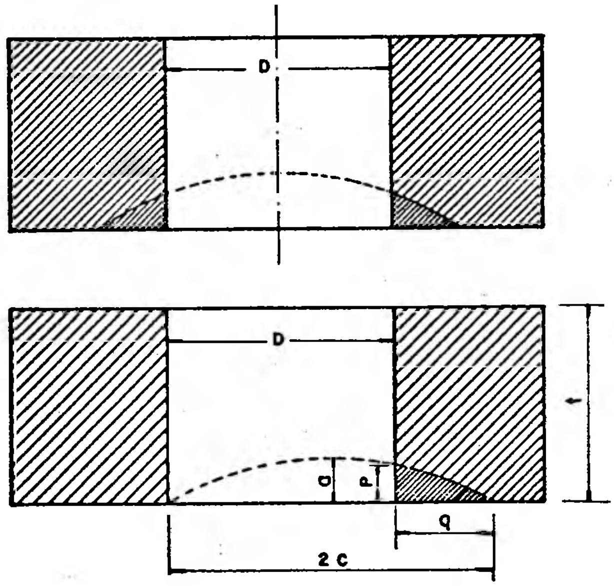
$$\phi = \int_0^{\pi/2} \left[\operatorname{sen}^2\phi + (a/c)^2\cos^2\phi\right]^{1/2} d\phi$$

EIXO COM TRINCA CIRCUNFERENCIAL SOB TRAÇÃO |5|

$$K = \frac{P_c\,Y_p}{D^{3/2}}\left[1{,}72\,(D/d) - 1{,}27\right]$$



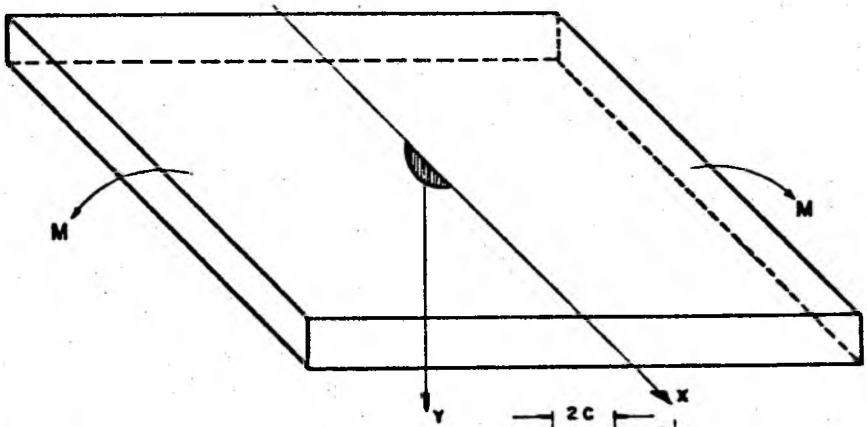
TRINCAS NOS CANTOS DOS FUROS, CONSIDERANDO O FURO COMO |30| PARTE DA TRINCA

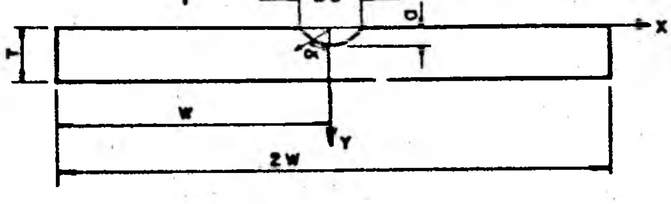


$$K = \frac{1.21\,\sigma\sqrt{\pi p}}{\phi}\left[\frac{p^2(D+q)^2(D-q)^2(Dq)^{-1}+4p^2(D+q)^2}{4Dq\,[4p^2+(D-q)^2]}\right]^{1/4}$$

onde $a/2c = \dfrac{P}{2\sqrt{Dq}}$

TRINCA ELÍPTICA NA SUPERFÍCIE DE UMA PLACA FINITA |23|





$$K = M_B\,\sigma\sqrt{\pi a/Q}\;Y_p$$

$$Q = \phi^2 - 0{,}212\,(\sigma/\sigma_{ys})^2$$

$$\phi = \int_0^{\pi/2}\left[\operatorname{sen}^2\phi + (a/c)^2\cos^2\phi\right]^{1/2} d\phi$$

APÊNDICE A3

ALGUNS DADOS DOS MATERIAIS

Este apêndice apresenta uma coletânea de materiais e as suas propriedades referentes à Mecânica da Fratura aplicada à propagação de trincas de fadiga.

Material	Ref.	Tratamento térmico	Tensão de ruptura (MN/m^2)	R	m	ΔK para $da/dN = 10^{-6}$mm/c
Aço doce	16	......	325	0,14 - 0,54	3,3	6,2
Aço doce	17,18	1h à 650°C	435	-1 - 0,64	3,3	6,2
Aço baixa liga	19	1h à 570°C	835	-1	3,3	6,2
	20	1h à 680°C	680	0,33 - 0,75	3,3	6,2
Aço Maraging	20	-	2010	0,67	3	3,5
Aço Austenítico 18/8	16	-	665	0,43	3,1	6,3
Aço Austenítico 18/8	19	1h à 600°C	690	-1	3,1	6,3
	20	4h à 600°C	665	0,0 - 0,74	3,1	6,3
Alumínio	16	......	125-155	0,33 - 0,60	2,9	2,0
	19,20	1h à 320°C	75	-1,0 - 0,53	2,9	2,0
4 1/2% Cu-Alumínio Liga BSL71	16	......	480	0,14 - 0,46	3,7	2,4
4 1/2% Cu-Alumínio Liga BSL73	16	......	435	0,5 - 0,88	-	4,4
4 1/2% Cu-Alumínio Liga BSL65	21	......	450	-1	4	3,3
	20	......	495	0,33	4	3,0
Cobre	16	......	215-310	0,07 - 0,60	3,9	4,3
Cobre	22	1h à 600°C	225	-1 - 0,8	3,9	4,3
	20	1h à 700°C	215	-1 - 0,8		
Bronze Fosforoso	19	1h à 500°C	325	-1 - 0,5	4	5,6
	20	1h à 550°C	370			
60/40 Latão	19	1h à 550°C	330	-1 - 0,33	4	6,3
	20	1h à 550°C	325			
Titânio	16	......	555	0,07 - 0,87	4,4	3,1
Titânio	20	1h à 700°C	540	0,60	4,4	3,6
Níquel	19	1h à 500°C	455	-1		
	20	1h à 850°C	430	0,03 - 0,71	4,0	8,8
Monel	19	1h à 500°C	525	-1 - 0,67	4,0	6,2
	20	1h à 850°C	525	-1 - 0,67	4,0	6,2
Inconel	19	1h à 600°C	660	-1 - 0	4,0	10,7
	20	2h à 800°C	650			

O valor de C dado pela equação (2.33) pode ser calculado usando o valor de ΔK da última coluna da tabela, através da expressão:

$$C = 10^{-9} \text{ m/ciclo} \cdot \Delta K^{-m}$$

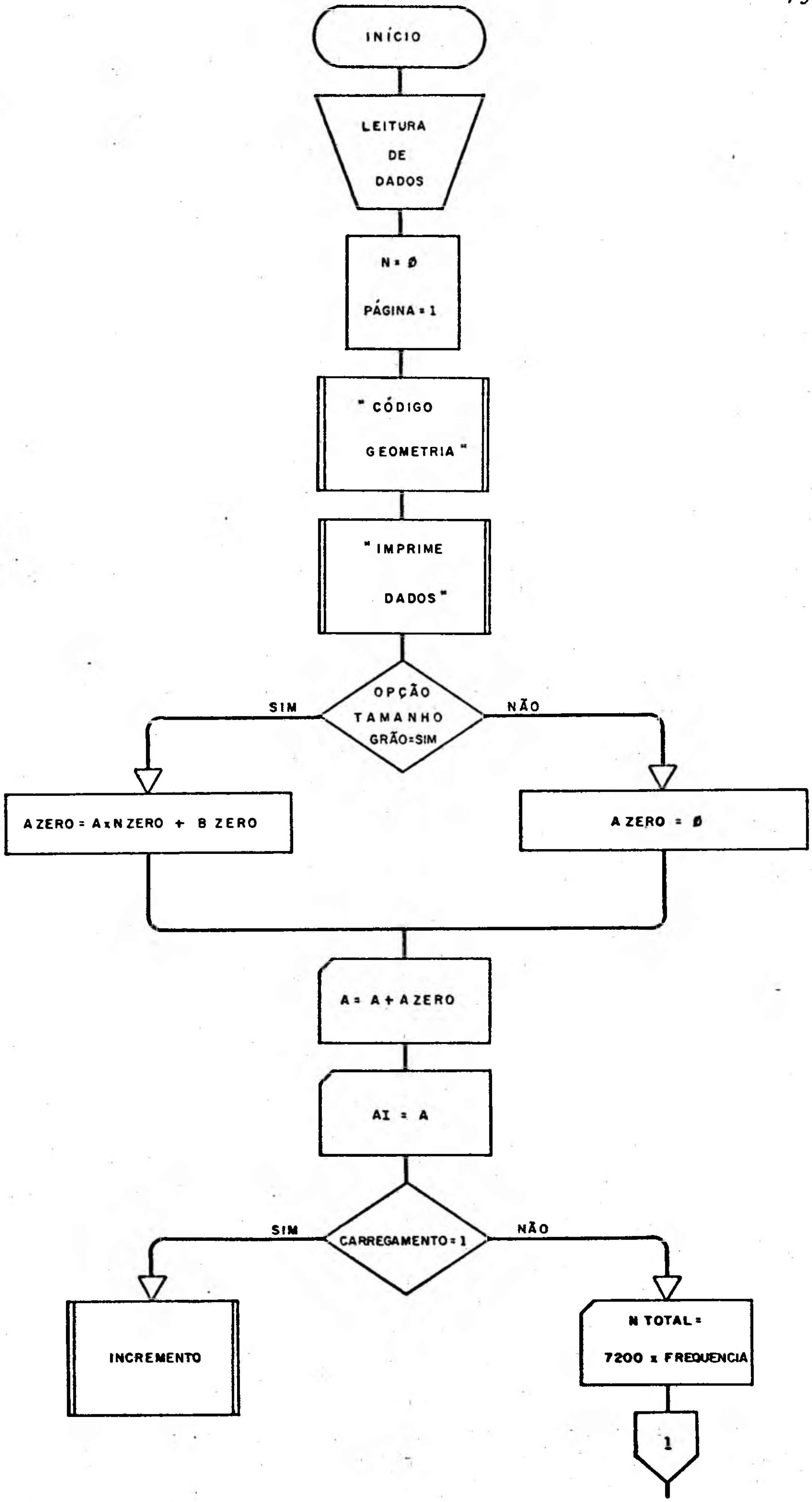
M A T E R I A L	R	ΔKth $(MN/m^{3/2})$
Aço doce	-1	6,4
	0,75	3,8
Aço baixa liga	-1	6,3
	0,75	2,5
Aço Maraging	0,67	2,7
Aço Austenítico 18/8	-1	6,0
	0	6,0
	0,33	5,9
	0,74	4,1
Alumínio	-1	1,0
	0,53	1,2
4 1/2 % Cu-Alumínio	-1	2,1
	0,67	1,2
Cobre	-1	2,7
	0	2,5
	0,80	1,3
Bronze Fosforoso	-1	3,7
	0,74	2,4
60/40 Latão	-1	3,1
	0,72	2,6
Titânio	0,60	2,2
Níquel	-1	5,9
	0,71	3,6
Monel	-1	5,6
	0,67	3,6
Incromel	-1	6,4
	0,71	4,0

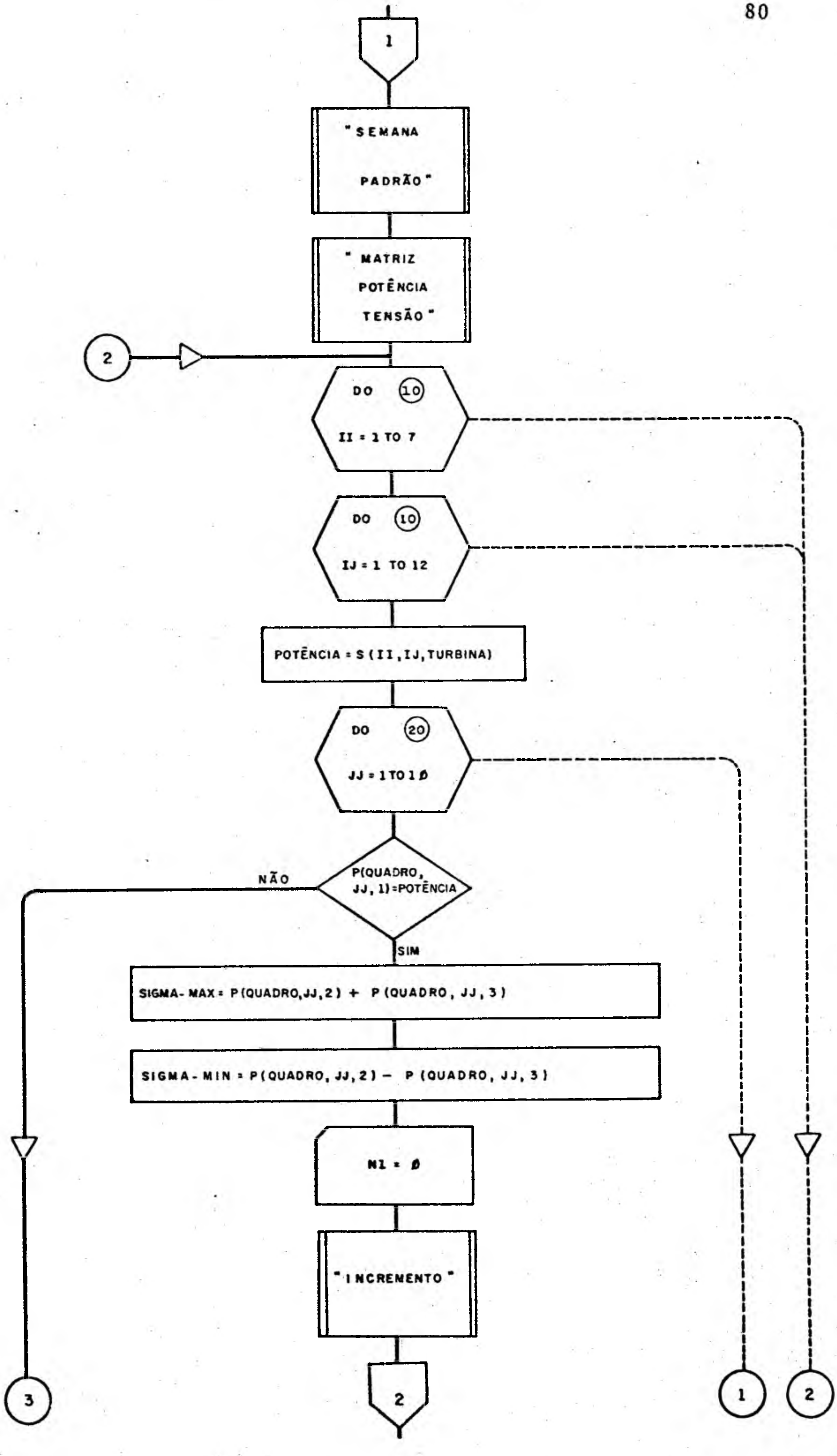
APÊNDICE A4

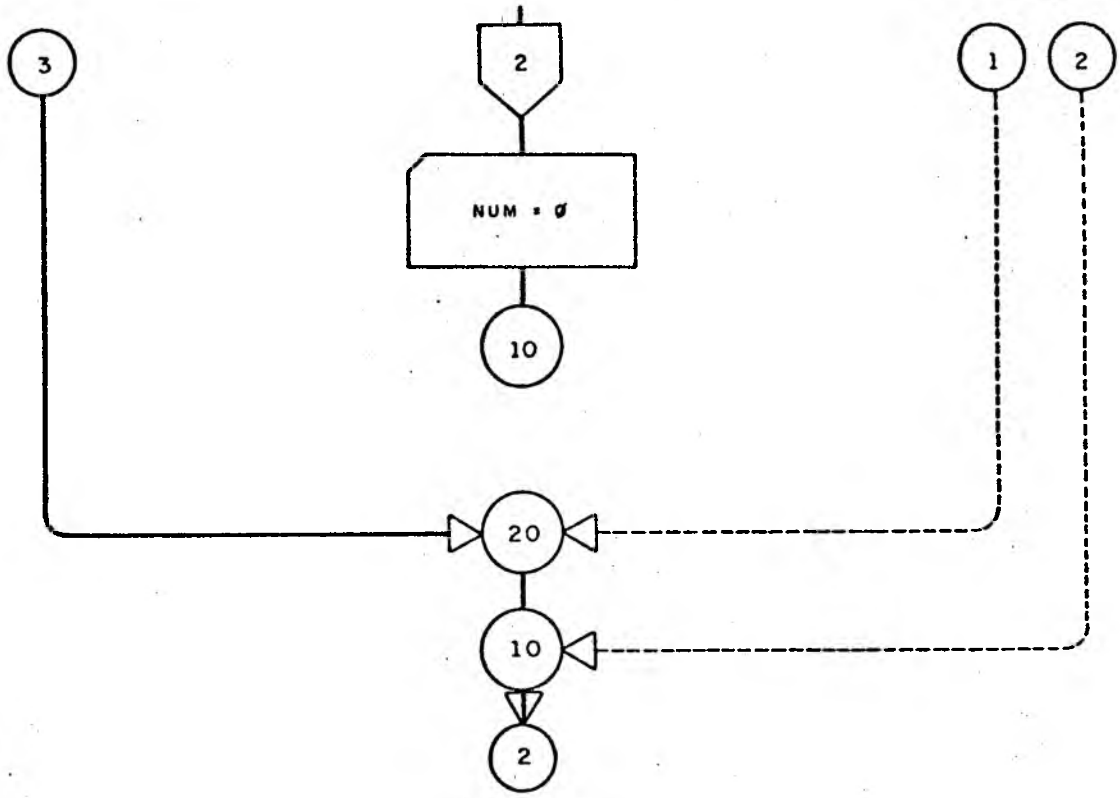
FLUXOGRAMAS DOS PROGRAMAS

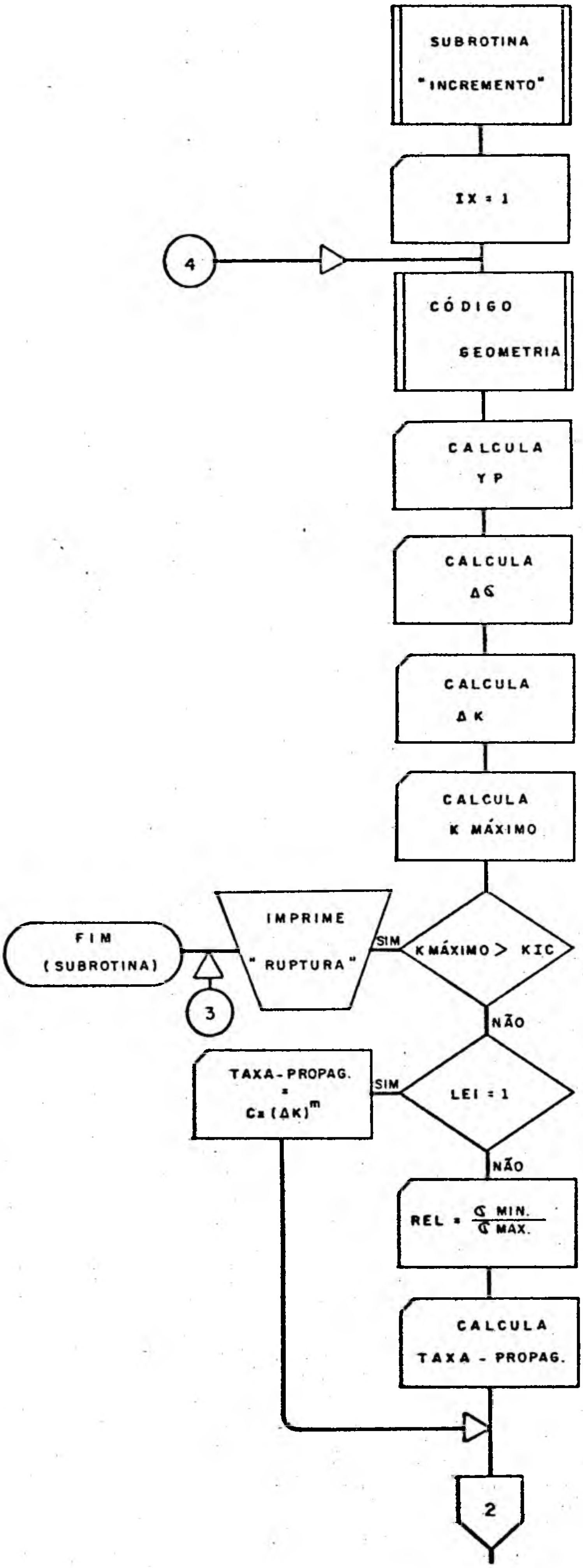
Neste apêndice apresentam-se os fluxogramas detalhados dos programas denominados I e II, desenvolvidos para prever o crescimento de trincas de fadiga, e as demais subrotinas utilizadas, com o objetivo de mostrar sua estrutura de funcionamento.

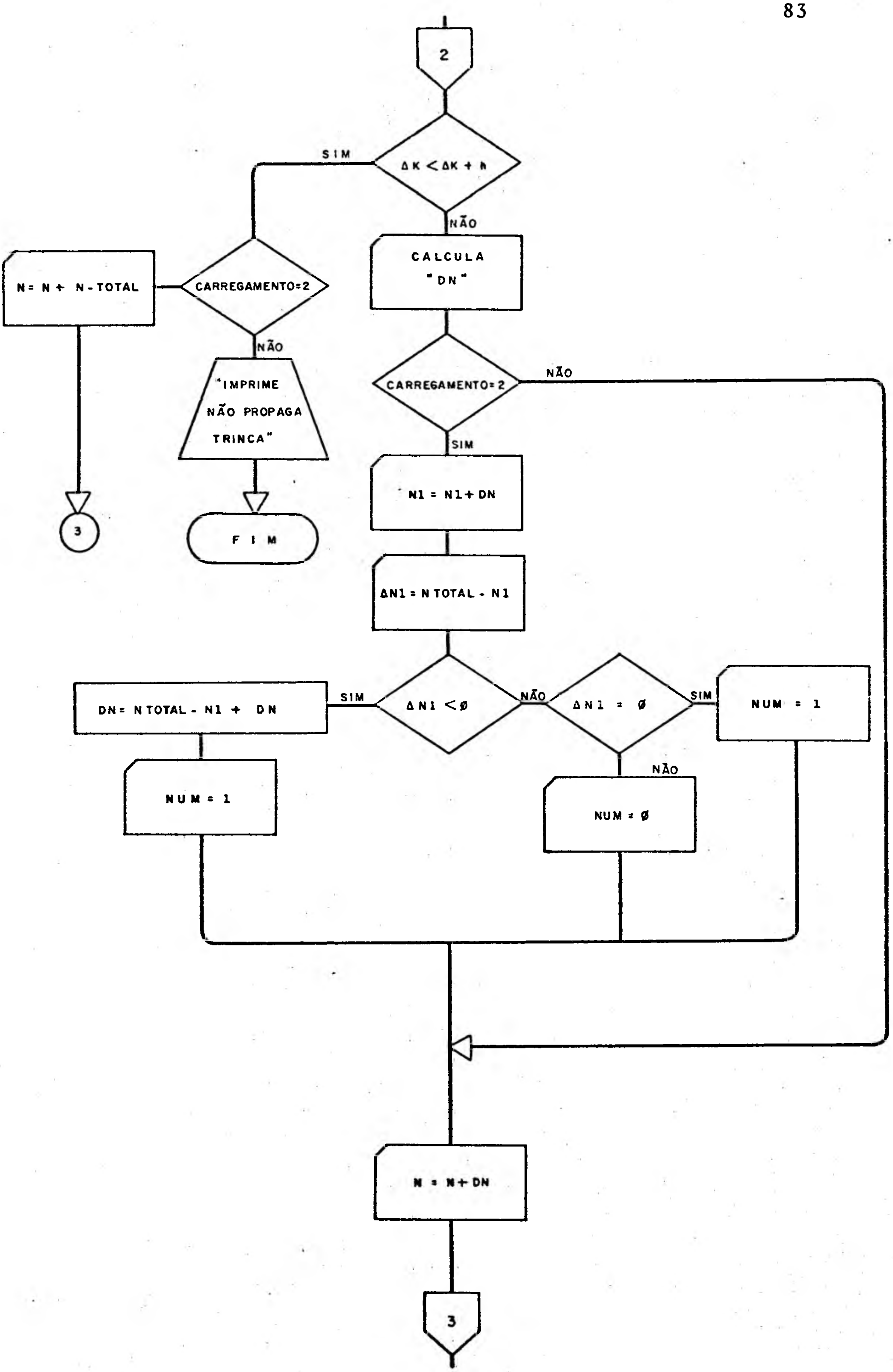
FLUXOGRAMA DO PROGRAMA I

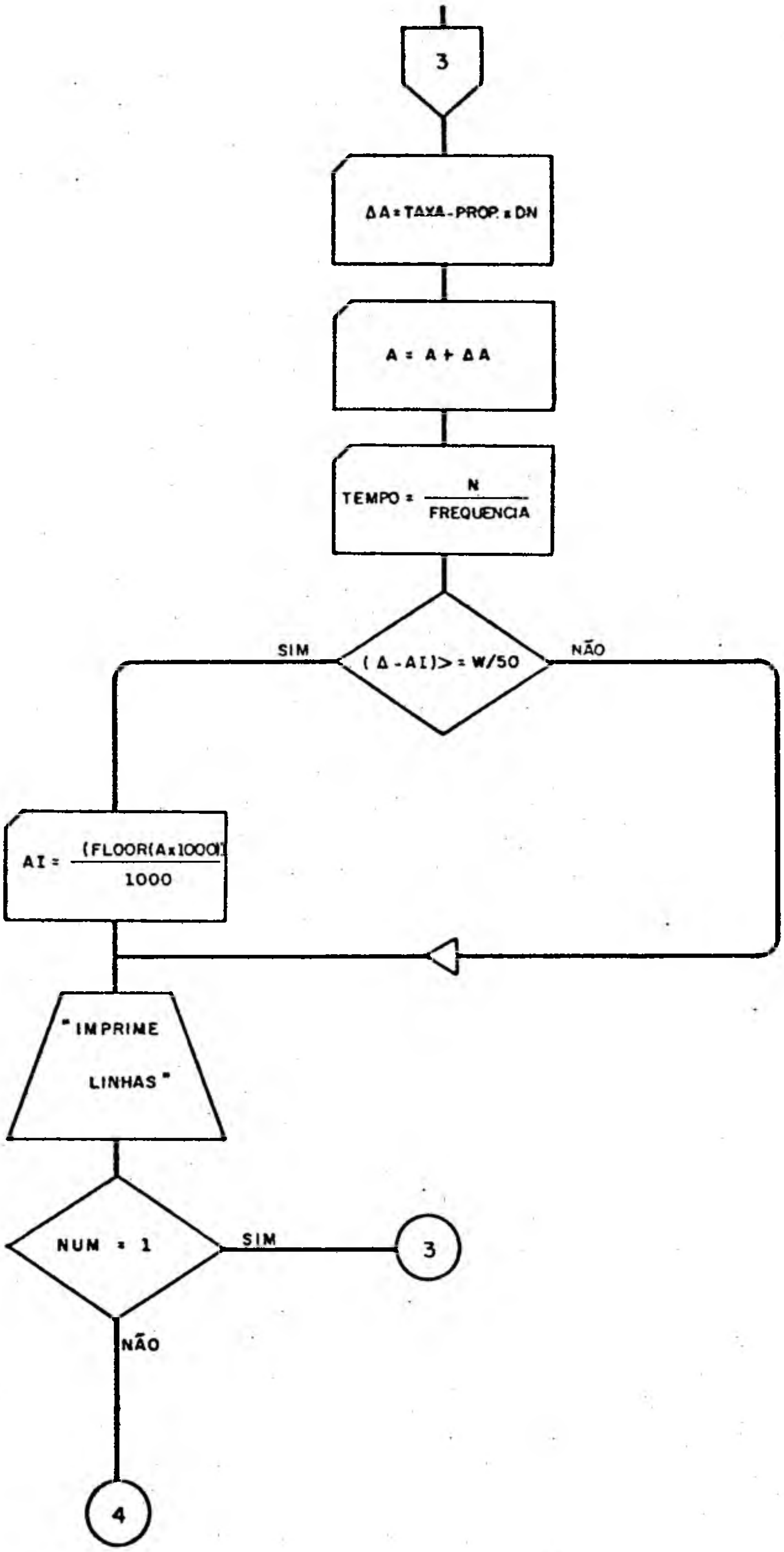

INÍCIO
LEITURA DE DADOS
N = Ø
PÁGINA = 1
" CÓDIGO GEOMETRIA "
" IMPRIME DADOS "
OPÇÃO TAMANHO GRÃO=SIM
SIM
NÃO
A ZERO = A x N ZERO + B ZERO
A ZERO = Ø
A = A + A ZERO
AI = A
CARREGAMENTO = 1
SIM
NÃO
INCREMENTO
N TOTAL = 7200 x FREQUENCIA
1


1
"SEMANA PADRÃO"
" MATRIZ POTÊNCIA TENSÃO"
2
DO 10
II = 1 TO 7
DO 10
IJ = 1 TO 12
POTÊNCIA = S (II, IJ, TURBINA)
DO 20
JJ = 1 TO 1 Ø
P(QUADRO, JJ, 1) = POTÊNCIA
NÃO
SIM
SIGMA-MAX = P(QUADRO, JJ, 2) + P(QUADRO, JJ, 3)
SIGMA-MIN = P(QUADRO, JJ, 2) − P(QUADRO, JJ, 3)
N1 = Ø
"INCREMENTO"
3
2
1
2

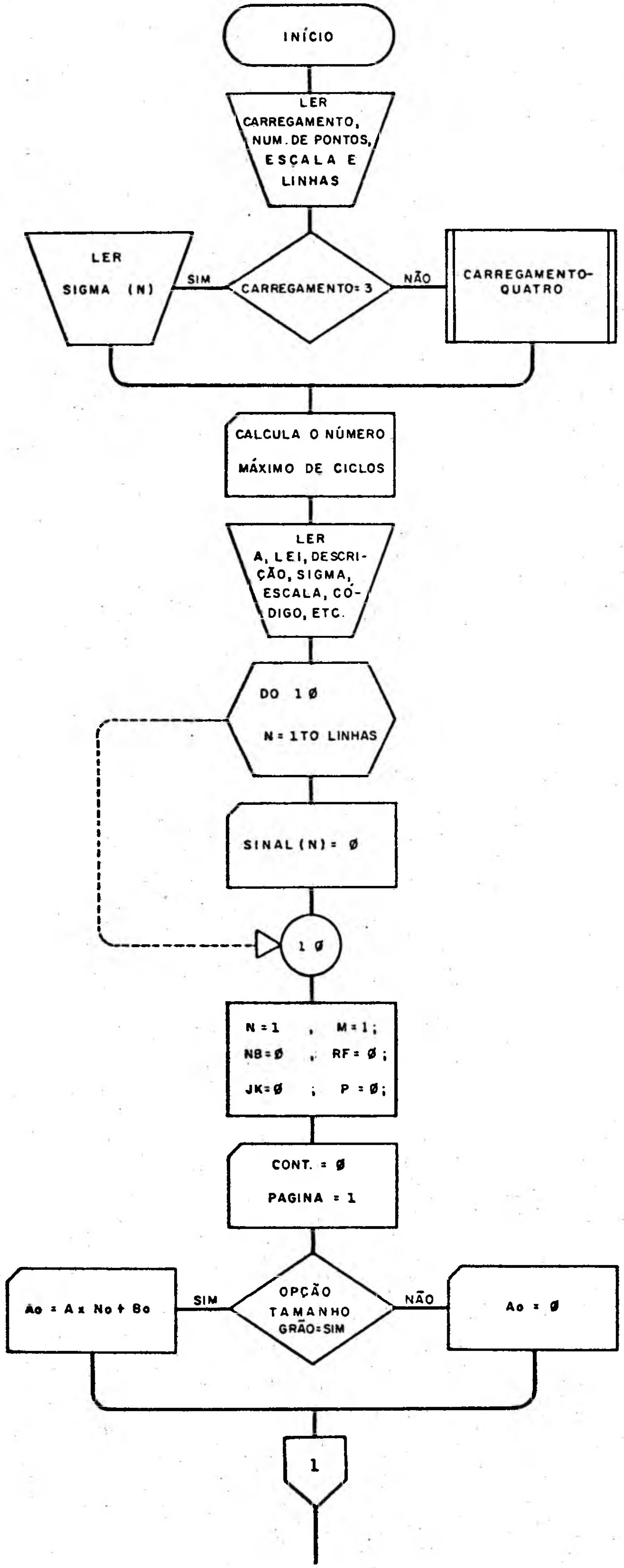

3
2
1
2
NUM = Ø
10
20
10
2

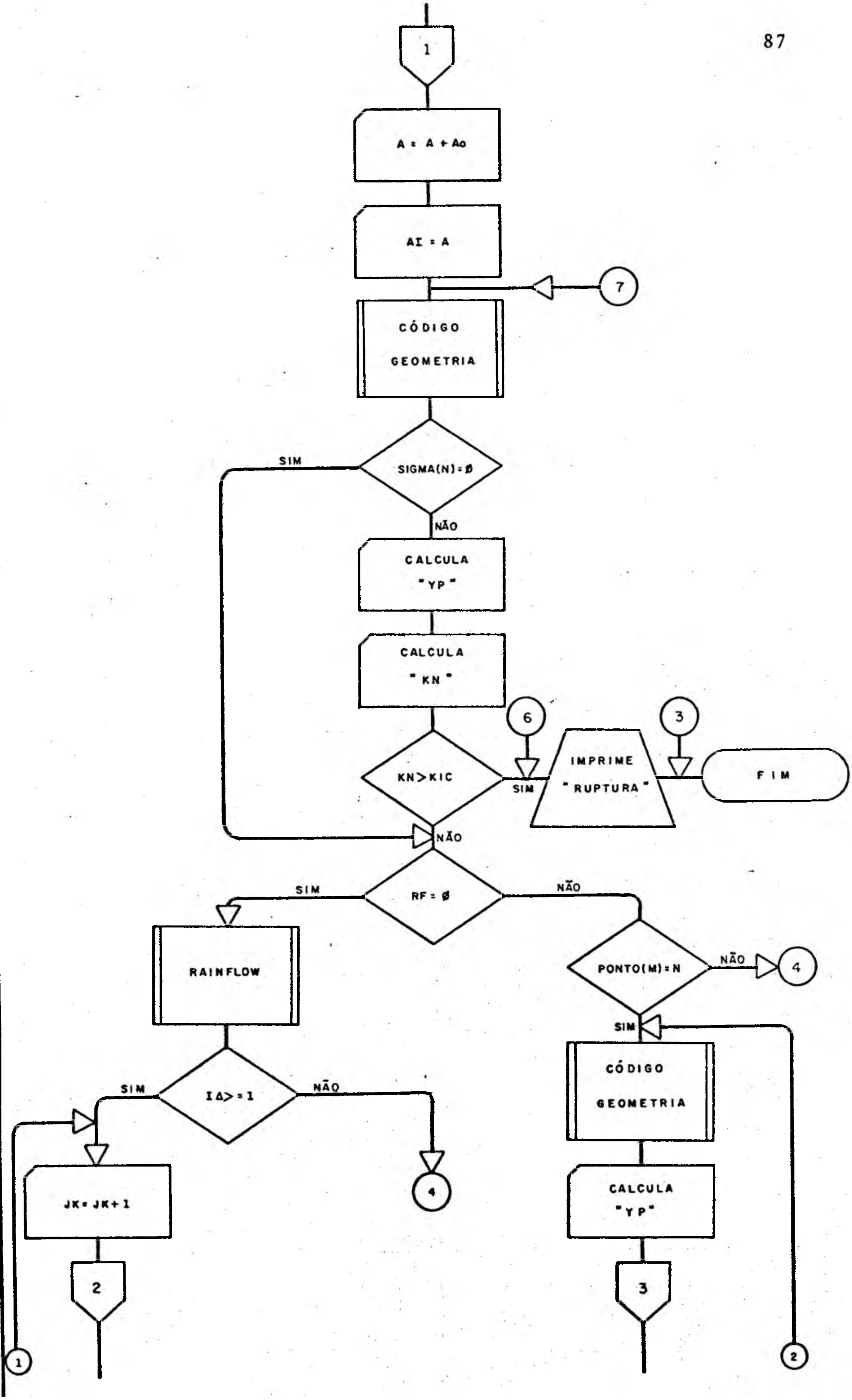

SUBROTINA
"INCREMENTO"
IX = 1
4
CÓDIGO
GEOMETRIA
CALCULA
YP
CALCULA
Δσ
CALCULA
ΔK
CALCULA
K MÁXIMO
KMÁXIMO > KIC
SIM
IMPRIME
" RUPTURA "
FIM
(SUBROTINA)
3
NÃO
LEI = 1
SIM
TAXA-PROPAG.
=
C x (ΔK)^m
NÃO
REL = σ MIN. / σ MAX.
CALCULA
TAXA - PROPAG.
2

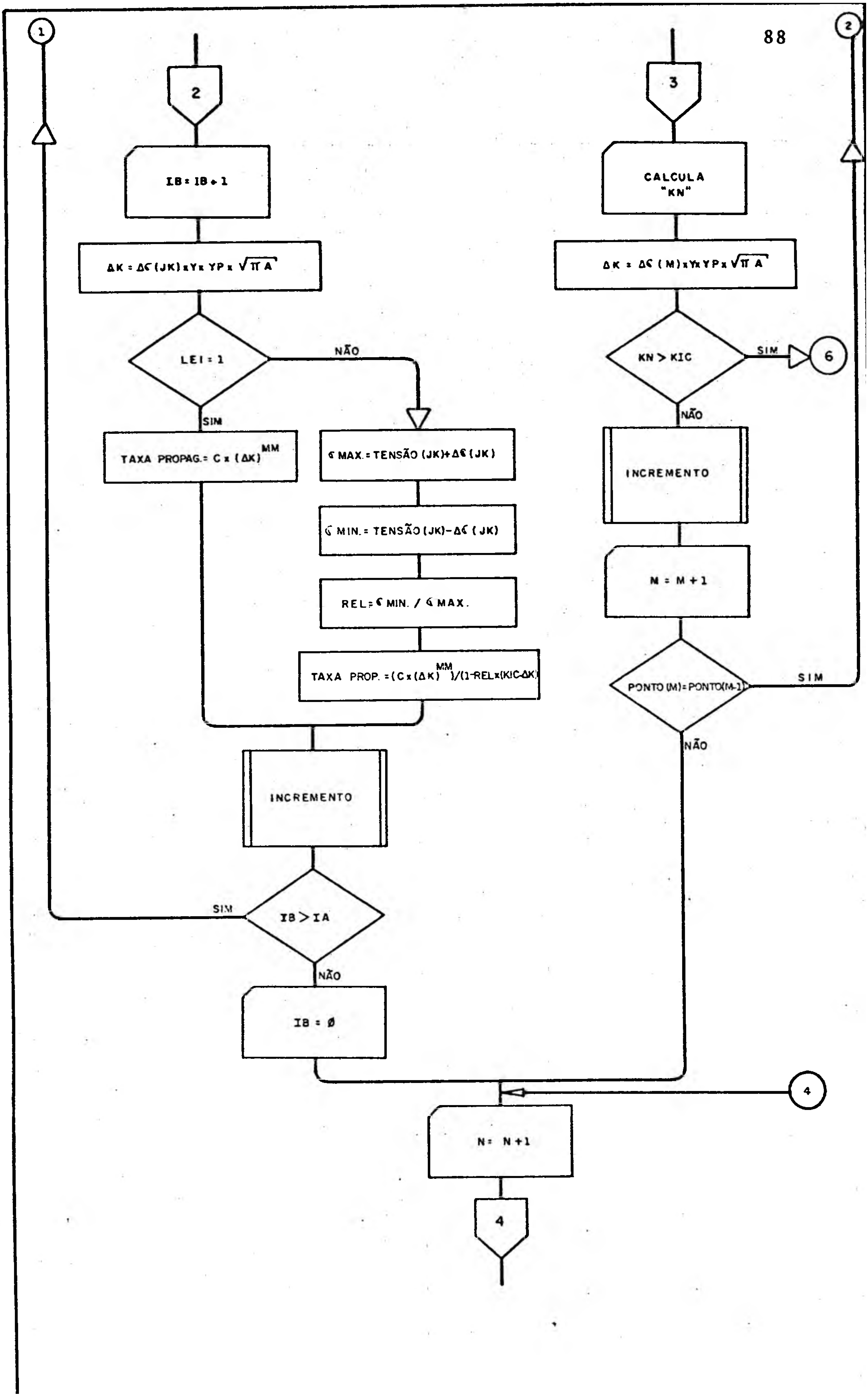

2
ΔK < ΔK + n
SIM
NÃO
CALCULA "DN"
N= N + N-TOTAL
CARREGAMENTO=2
NÃO
"IMPRIME NÃO PROPAGA TRINCA"
3
F I M
CARREGAMENTO=2
NÃO
SIM
N1 = N1+ DN
ΔN1 = N TOTAL - N1
DN= N TOTAL - N1 + DN
SIM
ΔN1 < Ø
NÃO
ΔN1 = Ø
SIM
NUM = 1
NUM = 1
NÃO
NUM = Ø
N = N+ DN
3

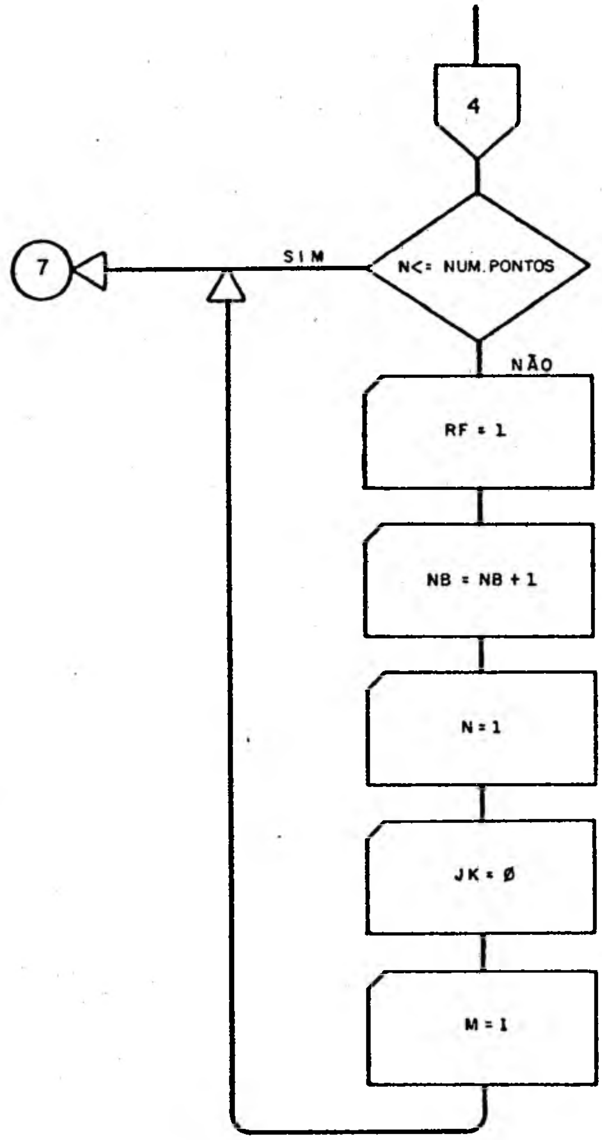

3
ΔA = TAXA-PROP. x DN
A = A + ΔA
TEMPO = N / FREQUENCIA
SIM
(Δ - AI)> = W/50
NÃO
AI = (FLOOR(A x 1000)) / 1000
"IMPRIME LINHAS"
NUM = 1
SIM
3
NÃO
4

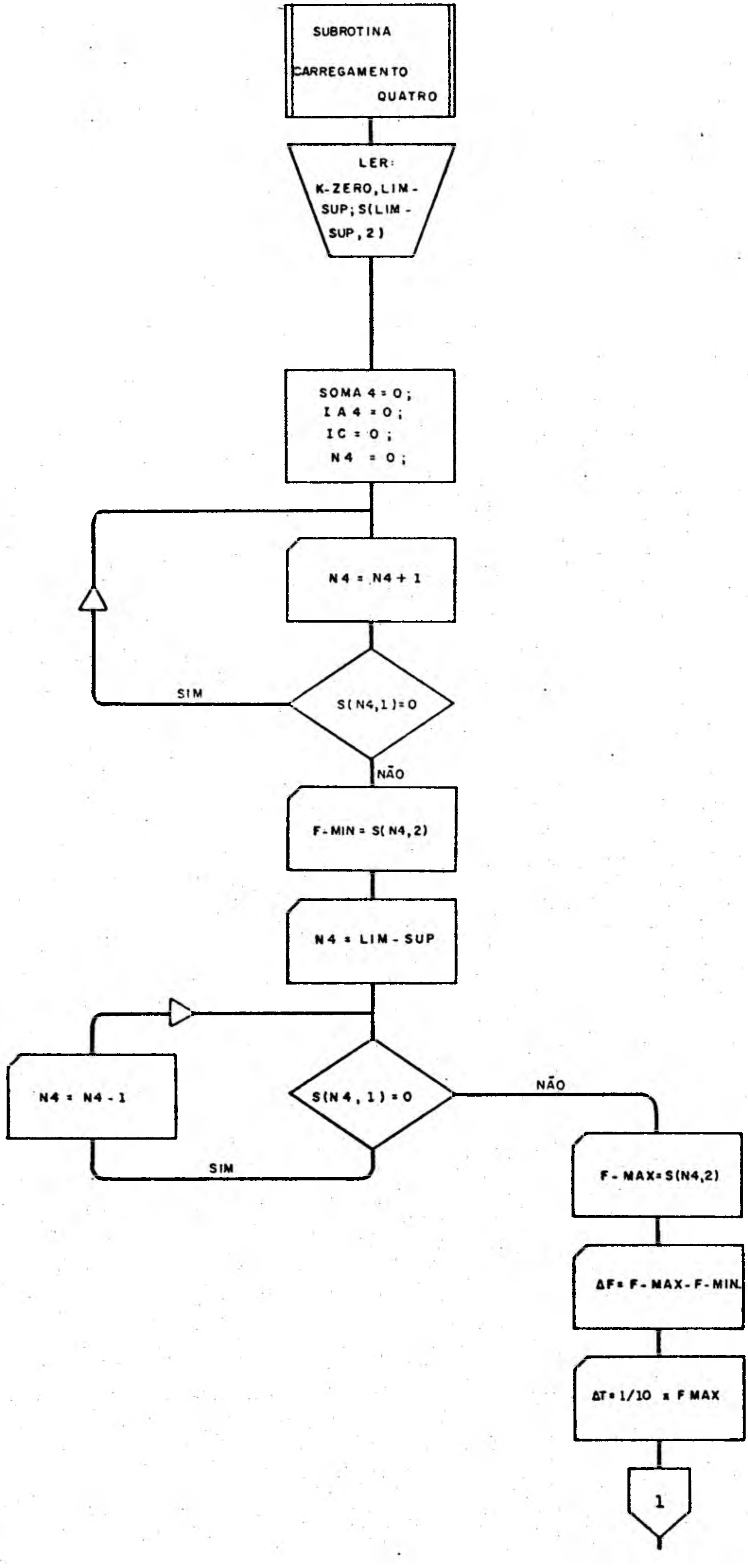
FLUXOGRAMA DO PROGRAMA II

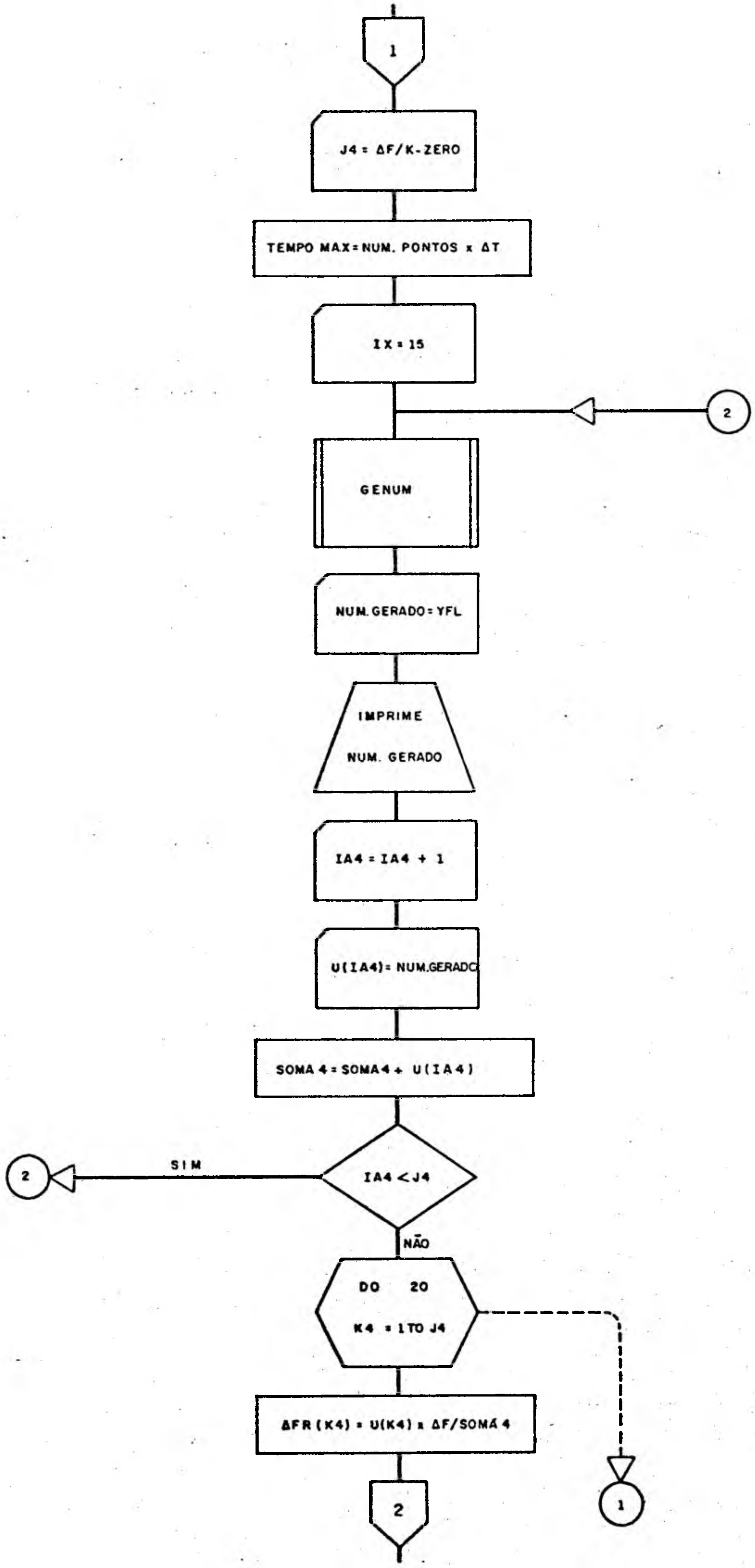

INÍCIO
LER
CARREGAMENTO,
NUM. DE PONTOS,
ESCALA E
LINHAS
LER
SIGMA (N)
SIM
CARREGAMENTO= 3
NÃO
CARREGAMENTO-
QUATRO
CALCULA O NÚMERO
MÁXIMO DE CICLOS
LER
A, L.E.I, DESCRI-
ÇÃO, SIGMA,
ESCALA, CÓ-
DIGO, ETC.
DO 1Ø
N = 1 TO LINHAS
SINAL (N) = Ø
1Ø
N = 1 , M = 1;
NB = Ø , RF = Ø;
JK = Ø ; P = Ø;
CONT. = Ø
PAGINA = 1
Ao = A x No + Bo
SIM
OPÇÃO
TAMANHO
GRÃO = SIM
NÃO
Ao = Ø
1

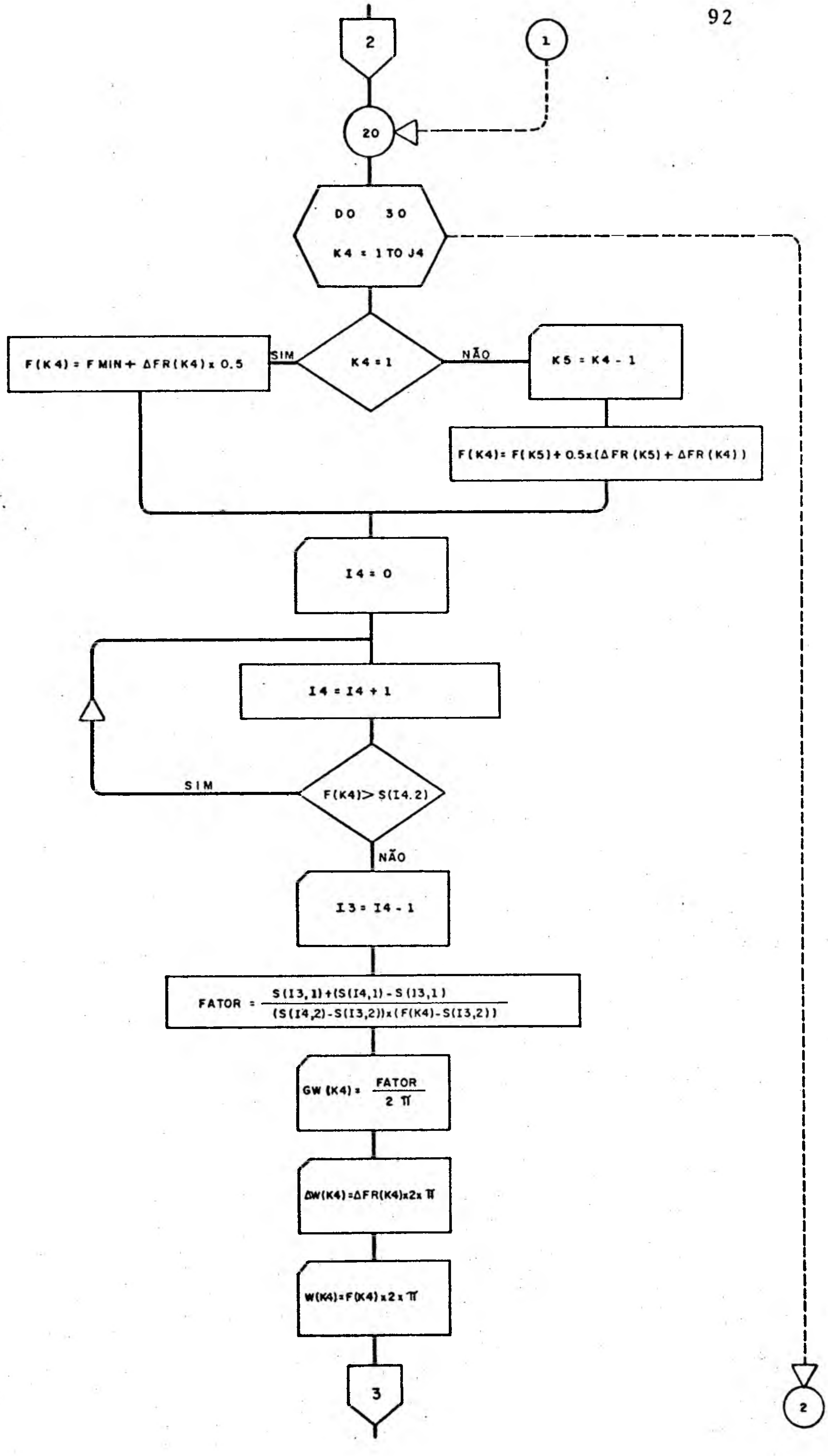

1
A = A + Ao
AI = A
7
CÓDIGO
GEOMETRIA
SIGMA(N) = Ø
SIM
NÃO
CALCULA
"YP"
CALCULA
"KN"
6
3
KN>KIC
SIM
IMPRIME
"RUPTURA"
FIM
NÃO
RF = Ø
SIM
NÃO
RAINFLOW
PONTO(M) = N
NÃO
4
SIM
IΔ> = 1
SIM
NÃO
4
CÓDIGO
GEOMETRIA
JK = JK + 1
CALCULA
"YP"
2
3
1
2

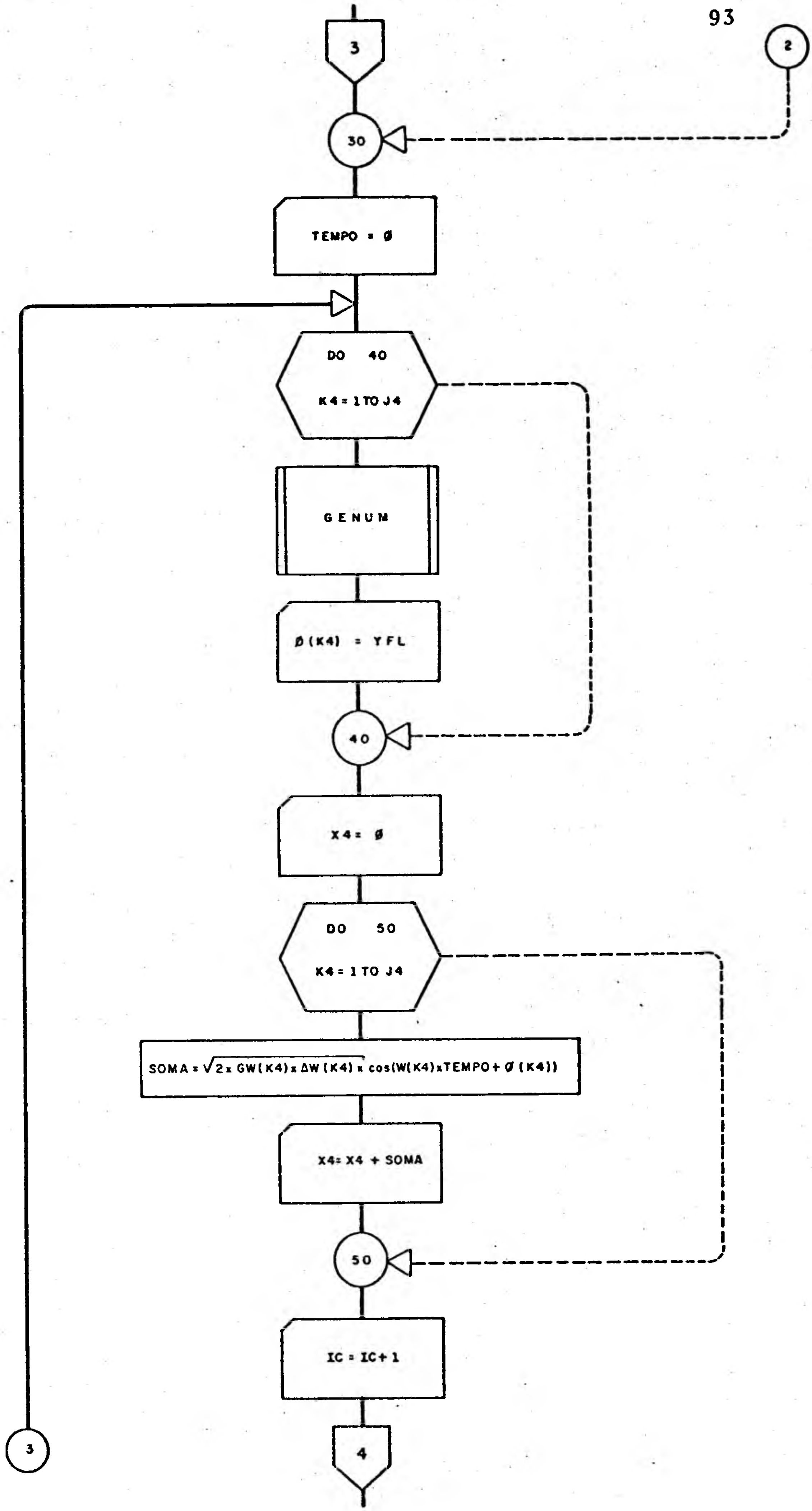

1
2
IB = IB + 1
ΔK = Δσ (JK) x Y x YP x √(π A)
LEI = 1
NÃO
SIM
TAXA PROPAG. = C x (ΔK)^MM
σ MAX. = TENSÃO (JK) + Δσ (JK)
σ MIN. = TENSÃO (JK) − Δσ (JK)
REL. = σ MIN. / σ MAX.
TAXA PROP. = (C x (ΔK)^MM)/(1−REL x (KIC−ΔK))
INCREMENTO
SIM
IB > IA
NÃO
IB = Ø
3
CALCULA "KN"
ΔK = Δσ (M) x Y x YP x √(π A)
KN > KIC
SIM
6
NÃO
INCREMENTO
M = M + 1
PONTO (M) = PONTO (M-1)
SIM
NÃO
2
4
N = N + 1
4

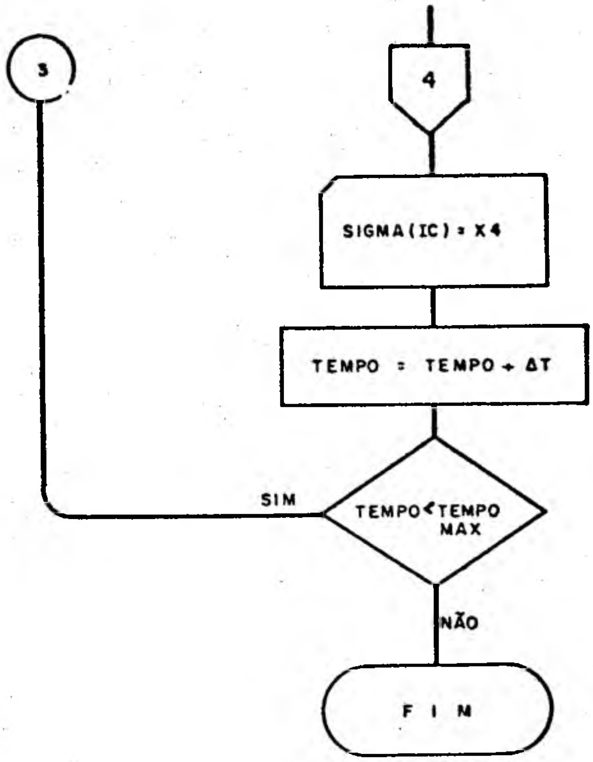

4
N<= NUM.PONTOS
SIM
7
NÃO
RF = 1
NB = NB + 1
N = 1
JK = Ø
M = 1


SUBROTINA
CARREGAMENTO
QUATRO
LER:
K-ZERO, LIM-SUP; S(LIM-SUP, 2)
SOMA 4 = 0;
I A 4 = 0;
IC = 0;
N 4 = 0;
N4 = N4 + 1
S(N4,1)=0
SIM
NÃO
F-MIN = S(N4,2)
N4 = LIM-SUP
N4 = N4 - 1
S(N4, 1) = 0
NÃO
SIM
F-MAX=S(N4,2)
ΔF= F-MAX-F-MIN
ΔT=1/10 x F MAX
1

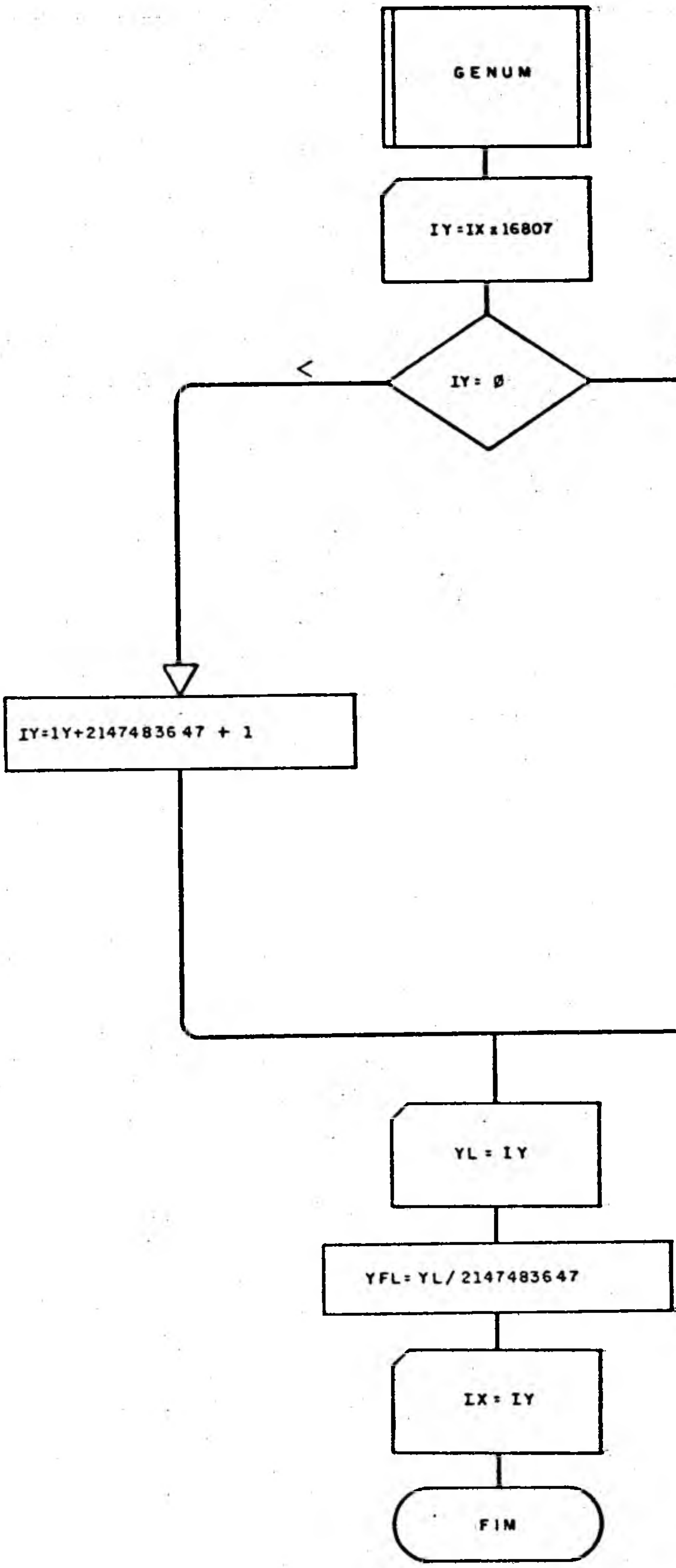

1
J4 = ΔF/K-ZERO
TEMPO MAX = NUM. PONTOS x ΔT
IX = 15
2
GENUM
NUM. GERADO = YFL
IMPRIME
NUM. GERADO
IA4 = IA4 + 1
U(IA4) = NUM.GERADO
SOMA 4 = SOMA4 + U(IA4)
IA4 < J4
SIM
2
NÃO
DO 20
K4 = 1 TO J4
ΔFR (K4) = U(K4) x ΔF/SOMA 4
2
1

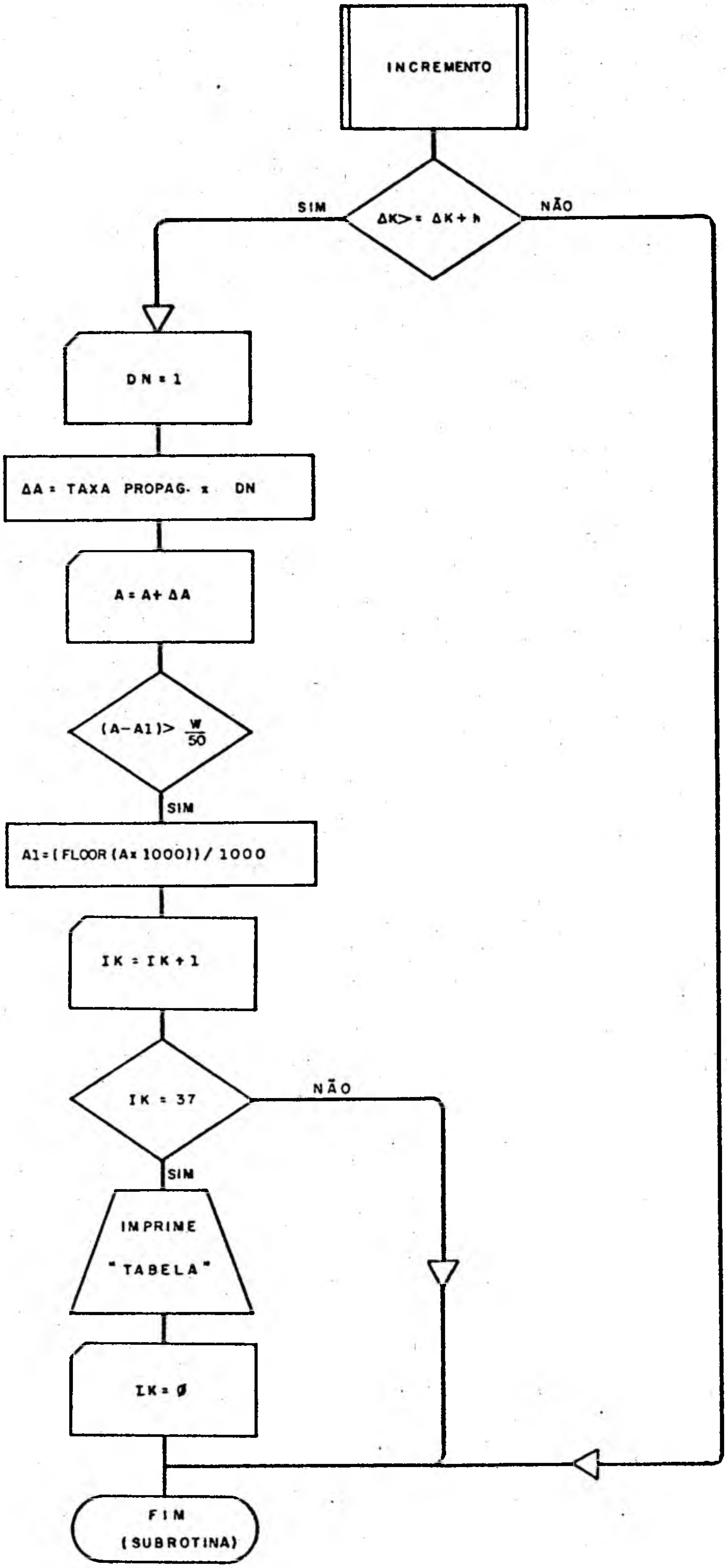

2
1
20
DO 30
K4 = 1 TO J4
F(K4) = FMIN + ΔFR(K4) x 0.5
SIM
K4 = 1
NÃO
K5 = K4 - 1
F(K4) = F(K5) + 0.5x(ΔFR(K5) + ΔFR(K4))
I4 = 0
I4 = I4 + 1
SIM
F(K4) > S(I4.2)
NÃO
I3 = I4 - 1
FATOR = S(I3,1) + (S(I4,1) - S(I3,1) / (S(I4,2) - S(I3,2)) x (F(K4) - S(I3,2))
GW(K4) = FATOR / 2 π
ΔW(K4) = ΔFR(K4) x 2 x π
W(K4) = F(K4) x 2 x π
3
2


3
2
30
TEMPO = Ø
DO 40
K4 = 1 TO J4
GENUM
Ø (K4) = YFL
40
X4 = Ø
DO 50
K4 = 1 TO J4
SOMA = √2 x GW(K4) x ΔW(K4) x cos(W(K4) x TEMPO + Ø(K4))
X4 = X4 + SOMA
50
IC = IC + 1
3
4



(SUBROTINA)


GENUM
IY=IX x 16807
IY: Ø
<
>
IY=IY+2147483647 + 1
YL = IY
YFL= YL/ 2147483647
IX = IY
FIM


INCREMENTO
ΔK>= ΔK + h
SIM
NÃO
DN = 1
ΔA = TAXA PROPAG. x DN
A = A + ΔA
(A−A1)> W/50
SIM
A1=(FLOOR(A x 1000))/1000
IK = IK + 1
IK = 37
NÃO
SIM
IMPRIME
"TABELA"
IK = Ø
FIM
(SUBROTINA)

APÊNDICE A5

RESULTADOS DETALHADOS

Neste apêndice são apresentados os diversos tipos de relatórios emitidos pelos programas I e II.

Unidades utilizadas nos programas.

Tensão de escoamento	[MPa]
Valor de K_{IC}	[$MPa\sqrt{m}$]
Delta K	[$MPa\sqrt{m}$]
Fissura inicial	[m]
Espessura da peça	[m]
Largura da peça	[m]
Tensão máxima	[MPa]
Tensão mínima	[MPa]
Tempo	[seg]
Velocidade	[m/ciclo]
Frequência	[ciclos/seg]

CENTRAIS ELETRICAS DO SUL DO BRASIL S/A - ELETROSUL

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

CARACTERISTICAS DO MATERIAL

TENSAO DE ESCOAMENTO	3.500E+02
MATERIAL	ACO CARBONO
COEFICIENTE C	2.427E-12
COEFICIENTE M	3.3000
VALOR DE KIC	0200
VALOR DE DELTA KTH	3.40

CARACTERISTICAS DA GEOMETRIA

GEOMETRIA	PLACA FINITA COM TRINCA NUMA BORDA
CODIGO GEOMETRIA	05
FISSURA INICIAL	0.0050
ESPESSURA DA PECA	0.0000
LARGURA DA PECA	0.2000

CARACTERISTICAS DO CARREGAMENTO

CARREGAMENTO	01 TENSAO CONSTANTE AO LONGO DO TEMPO
LEI DE PROPAGACAO	01
FREQUENCIA	060
TENSAO MAXIMA	2.000E+02
TENSAO MINIMA	0.000E+00

PAGINA= 0002

C E N T R A I S   E L E T R I C A S   D O   S U L   D O   B R A S I L   S / A   -   E L E T R O S U L

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

TABELA DE PROPAGACAO DA TRINCA

TEMPO	NUMERO DE CICLOS	FISSURA	VELOCIDADE	DELTA_K
216	12961	0.009	5.187E-07	41.220
308	18568	0.013	9.939E-07	50.197
360	21626	0.017	1.641E-06	58.439
393	23594	0.021	2.500E-06	66.385
415	24921	0.025	3.621E-06	74.274
431	25852	0.029	5.072E-06	82.256
442	26526	0.033	6.934E-06	90.433
450	27023	0.037	9.312E-06	98.885
457	27395	0.041	1.234E-05	107.681
461	27679	0.045	1.617E-05	116.887
465	27895	0.049	2.103E-05	126.575
468	28062	0.053	2.719E-05	136.819
470	28191	0.057	3.500E-05	147.706
472	28292	0.061	4.495E-05	159.337
473	28370	0.065	5.766E-05	171.820
474	28432	0.069	7.396E-05	185.289
475	28479	0.073	9.500E-05	199.891

C E N T R A I S   E L E T R I C A S   D O   S U L   D O   B R A S I L   S / A   -   E L E T R O S U L

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

TABELA DE PROPAGACAO DA TRINCA

TEMPO	NUMERO DE CICLOS	FISSURA	VELOCIDADE	DELTA_K
475	28479	0.073	9.500E-05	200.272

O CARREGAMENTO PROVOCA A PROPAGACAO RAPIDA DA TRINCA

CENTRAIS ELETRICAS DO SUL DO BRASIL S/A - ELETROSUL

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

CARACTERISTICAS DO MATERIAL

TENSAO DE ESCOAMENTO	3.500E+02
MATERIAL	ACO CARBONO
COEFICIENTE C	2.427E-12
COEFICIENTE M	3.3000
VALOR DE KIC	0200
VALOR DE DELTA KTH	3.40

CARACTERISTICAS DA GEOMETRIA

GEOMETRIA	PLACA SEMI-INFINITA COM UMA TRINCA NA BORDA
CODIGO GEOMETRIA	02
FISSURA INICIAL	0.0050
ESPESSURA DA PECA	0.0400
LARGURA DA PECA	1.6000

CARACTERISTICAS DO CARREGAMENTO

CARREGAMENTO	02 TENSAO CONSTANTE EM INTERVALOS DE TEMPO
LEI DE PROPAGACAO	01
FREQUENCIA	048
TENSAO MAXIMA	VARIAVEL
TENSAO MINIMA	VARIAVEL
TURBINA	02
EXTENSOMETRO	02

C E N T R A I S   E L E T R I C A S   D O   S U L   D O   B R A S I L   S / A   -   E L E T R O S U L

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

TABELA DE PROPAGACAO DA TRINCA

TEMPO	NUMERO DE CICLOS	FISSURA	VELOCIDADE	DELTA_K
216000	10368000	0.007	2.334E-10	3.989
343211	16474150	0.009	4.330E-10	4.811
431996	20735792	0.011	4.909E-10	4.998
492246	23627792	0.013	7.848E-10	5.761
539096	25876603	0.015	1.002E-09	6.204
577678	27728528	0.017	1.230E-09	6.601
607606	29165088	0.019	1.481E-09	6.984
635037	30481792	0.021	1.427E-09	6.905
660701	31713632	0.023	1.524E-09	7.044
682174	32744576	0.025	2.350E-09	8.032
699154	33559376	0.027	2.642E-09	8.323
713456	34245872	0.029	3.001E-09	8.650
726961	34894112	0.031	3.362E-09	8.953
738339	35440272	0.033	3.716E-09	9.229
751493	36071904	0.035	3.056E-09	8.697
762620	36605760	0.037	4.502E-09	9.781
771202	37017712	0.039	4.865E-09	10.014
779971	37438624	0.041	4.321E-09	9.660
788855	37865056	0.043	5.149E-09	10.187
797001	38256048	0.045	5.036E-09	10.119
805048	38642288	0.047	5.415E-09	10.344
812595	39004560	0.049	5.808E-09	10.566
819393	39330949	0.051	6.197E-09	10.776
824914	39595888	0.053	8.142E-09	11.705
830527	39865280	0.055	6.458E-09	10.911
836647	40159040	0.057	6.842E-09	11.104
842552	40442496	0.059	8.672E-09	11.931
847216	40666352	0.061	9.163E-09	12.132
851684	40880848	0.063	9.670E-09	12.331
855874	41081968	0.065	1.018E-08	12.526
859530	41257440	0.067	1.199E-08	13.161
862915	41419904	0.069	1.259E-08	13.356
866165	41575920	0.071	1.302E-08	13.495
869285	41725680	0.073	1.363E-08	13.683
872263	41868608	0.075	1.425E-08	13.869
875116	42005584	0.077	1.489E-08	14.053
877851	42136848	0.079	1.553E-08	14.234

CENTRAIS ELETRICAS DO SUL DO BRASIL S/A - ELETROSUL

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

TABELA DE PROPAGACAO DA TRINCA

TEMPO	NUMERO DE CICLOS	FISSURA	VELOCIDADE	DELTA_K
991525	47593200	0.405	1.891E-07	30.364

O CARREGAMENTO PROVOCA A PROPAGACAO RAPIDA DA TRINCA

C E N T R A I S   E L E T R I C A S   D O   S U L   D O   B R A S I L   S / A   -   E L E T R O S U L

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

CARACTERISTICAS DO MATERIAL

TENSAO DE ESCOAMENTO	3.500E+02
MATERIAL	ACO CARBONO
COEFICIENTE C	2.427E-12
COEFICIENTE M	3.3000
VALOR DE KIC	0500
VALOR DE DELTA KTH	2.40

CARACTERISTICAS DA GEOMETRIA

GEOMETRIA	PLACA FINITA COM TRINCA CENTRAL
CODIGO GEOMETRIA	03
FISSURA INICIAL	0.0100
ESPESSURA DA PECA	0.0100
LARGURA DA PECA	0.2000

CARACTERISTICAS DO CARREGAMENTO

CARREGAMENTO	03 TENSAO ALEATORIA, PONTO A PONTO
LEI DE PROPAGACAO	01
NUMERO DE PONTOS	0007
ESCALA	0005

CENTRAIS ELETRICAS DO SUL DO BRASIL S/A - ELETROSUL

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

TABELA DE PROPAGACAO DA TRINCA

TEMPO	NUMERO DE BLOCOS	FISSURA	VELOCIDADE	DELTA K
*******	4511	0.014	5.878E-07	42.811
*******	7271	0.018	8.956E-07	48.639
*******	9158	0.022	1.257E-06	53.907
*******	10538	0.026	1.673E-06	58.777
*******	11596	0.030	2.143E-06	63.360
*******	12432	0.034	2.670E-06	67.723
*******	13111	0.038	3.257E-06	71.925
*******	13672	0.042	3.907E-06	76.002
*******	14143	0.046	4.625E-06	79.992
*******	14543	0.050	5.416E-06	83.914
*******	14886	0.054	6.290E-06	87.802
*******	15182	0.058	7.252E-06	91.673
*******	15440	0.062	8.311E-06	95.539
*******	15666	0.066	9.480E-06	99.426
*******	15864	0.070	1.077E-05	103.349
*******	16039	0.074	1.220E-05	107.325
*******	16194	0.078	1.379E-05	111.379
*******	16331	0.082	1.554E-05	115.496
*******	16452	0.086	1.750E-05	119.727
*******	16560	0.090	1.969E-05	124.082
*******	16656	0.094	2.215E-05	128.579
*******	16742	0.098	2.491E-05	133.247
*******	16817	0.102	2.801E-05	138.067
*******	16885	0.106	3.155E-05	143.129
*******	16945	0.110	3.558E-05	148.442
*******	16998	0.114	4.018E-05	154.013
*******	17045	0.118	4.549E-05	159.912
*******	17086	0.122	5.155E-05	166.093
*******	17122	0.126	5.869E-05	172.749
*******	17154	0.130	6.706E-05	179.875
*******	17182	0.134	7.699E-05	187.561
*******	17206	0.138	8.866E-05	195.756
*******	17227	0.142	1.029E-04	204.778
*******	17245	0.146	1.202E-04	214.650
*******	17261	0.150	1.418E-04	225.682
*******	17274	0.154	1.688E-04	237.917

CENTRAIS ELETRICAS DO SUL DO BRASIL S/A - ELETROSUL

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

TABELA DE PROPAGACAO DA TRINCA

TEMPO	NUMERO DE BLOCOS	FISSURA	VELOCIDADE	DELTA K
*******	17285	0.158	2.038E-04	251.918
*******	17293	0.162	2.463E-04	266.788
*******	17301	0.166	3.076E-04	285.390
*******	17307	0.170	3.941E-04	307.650
*******	17311	0.174	5.156E-04	333.736
*******	17314	0.178	6.703E-04	361.362
*******	17317	0.182	9.376E-04	400.044
*******	17319	0.187	1.511E-03	462.270

CENTRAIS ELETRICAS DO SUL DO BRASIL . S/A - ELETROSUL

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

TABELA DE PROPAGACAO DA TRINCA

TEMPO	NUMERO DE BLOCOS	FISSURA	VELOCIDADE	DELTA K
*******	17319	0.187	1.511E-03	462.270

O CARREGAMENTO PROVOCA A PROPAGACAO RAPIDA DA TRINCA

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

CARACTERISTICAS DO MATERIAL

TENSAO DE ESCOAMENTO	6.000E+02
MATERIAL	ACO CARBONO
COEFICIENTE C	2.427E-12
COEFICIENTE M	3.3000
VALOR DE KIC	0200
VALOR DE DELTA KTH	3.40

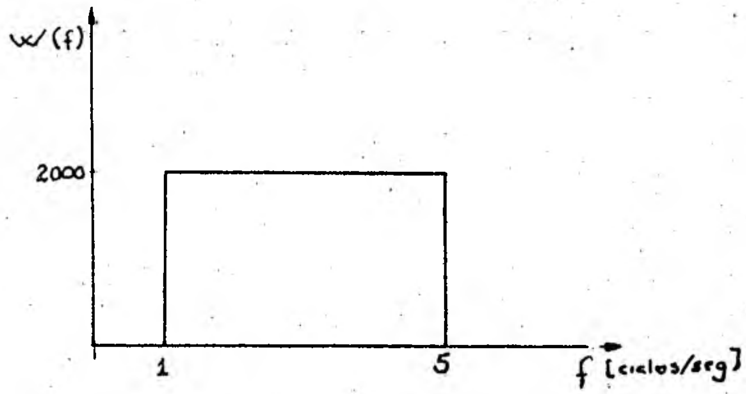
CARACTERISTICAS DA GEOMETRIA

GEOMETRIA	PLACA FINITA COM TRINCA CENTRAL
CODIGO GEOMETRIA	03
FISSURA INICIAL	0.0100
ESPESSURA DA PECA	0.0100
LARGURA DA PECA	0.2000

CARACTERISTICAS DO CARREGAMENTO

CARREGAMENTO	04 TENSAO ALEATORIA, ESPECTRO DE FREQUENCIA
LEI DE PROPAGACAO	01
NUMERO DE PONTOS	0100
ESCALA	0001

```
 4   100    1  1000
0.5       2
 2000          1       2000        5
                    SIGMA(  1)=     2.870E+02
                    SIGMA(  2)=     2.600E+02
                    SIGMA(  3)=     1.850E+02
                    SIGMA(  4)=     8.100E+01
                    SIGMA(  5)=    -2.600E+01
                    SIGMA(  6)=    -1.120E+02
                    SIGMA(  7)=    -1.590E+02
                    SIGMA(  8)=    -1.620E+02
                    SIGMA(  9)=    -1.280E+02
                    SIGMA( 10)=    -7.300E+01
                    SIGMA( 11)=    -1.700E+01
                    SIGMA( 12)=     2.100E+01
                    SIGMA( 13)=     3.300E+01
                    SIGMA( 14)=     1.700E+01
                    SIGMA( 15)=    -1.800E+01
                    SIGMA( 16)=    -5.700E+01
                    SIGMA( 17)=    -8.600E+01
                    SIGMA( 18)=    -9.600E+01
                    SIGMA( 19)=    -8.300E+01
                    SIGMA( 20)=    -5.100E+01
                    SIGMA( 21)=    -1.200E+01
                    SIGMA( 22)=     2.500E+01
                    SIGMA( 23)=     4.900E+01
                    SIGMA( 24)=     5.900E+01
                    SIGMA( 25)=     5.500E+01
                    SIGMA( 26)=     4.500E+01
                    SIGMA( 27)=     3.600E+01
                    SIGMA( 28)=     3.500E+01
                    SIGMA( 29)=     4.400E+01
                    SIGMA( 30)=     6.000E+01
                    SIGMA( 31)=     7.600E+01
                    SIGMA( 32)=     8.400E+01
                    SIGMA( 33)=     8.000E+01
                    SIGMA( 34)=     6.100E+01
                    SIGMA( 35)=     3.000E+01
                    SIGMA( 36)=    -5.000E+00
                    SIGMA( 37)=    -3.700E+01
                    SIGMA( 38)=    -5.900E+01
                    SIGMA( 39)=    -6.800E+01
                    SIGMA( 40)=    -6.600E+01
                    SIGMA( 41)=    -5.900E+01
                    SIGMA( 42)=    -5.400E+01
                    SIGMA( 43)=    -5.600E+01
                    SIGMA( 44)=    -6.700E+01
                    SIGMA( 45)=    -8.500E+01
                    SIGMA( 46)=    -1.010E+02
                    SIGMA( 47)=    -1.070E+02
                    SIGMA( 48)=    -9.500E+01
                    SIGMA( 49)=    -6.200E+01
                    SIGMA( 50)=    -1.000E+01
                    SIGMA( 51)=     5.300E+01
                    SIGMA( 52)=     1.160E+02
                    SIGMA( 53)=     1.650E+02
                    SIGMA( 54)=     1.900E+02
                    SIGMA( 55)=     1.860E+02
                    SIGMA( 56)=     1.550E+02
                    SIGMA( 57)=     1.040E+02
```



```
SIGMA( 58)=    4.300E+01
SIGMA( 59)=   -1.400E+01
SIGMA( 60)=   -5.900E+01
SIGMA( 61)=   -8.500E+01
SIGMA( 62)=   -9.000E+01
SIGMA( 63)=   -7.800E+01
SIGMA( 64)=   -5.500E+01
SIGMA( 65)=   -2.700E+01
SIGMA( 66)=   -2.000E+00
SIGMA( 67)=    1.500E+01
SIGMA( 68)=    2.200E+01
SIGMA( 69)=    1.700E+01
SIGMA( 70)=    2.000E+00
SIGMA( 71)=   -2.100E+01
SIGMA( 72)=   -4.900E+01
SIGMA( 73)=   -7.700E+01
SIGMA( 74)=   -9.900E+01
SIGMA( 75)=   -1.110E+02
SIGMA( 76)=   -1.060E+02
SIGMA( 77)=   -8.400E+01
SIGMA( 78)=   -4.400E+01
SIGMA( 79)=    9.000E+00
SIGMA( 80)=    6.600E+01
SIGMA( 81)=    1.190E+02
SIGMA( 82)=    1.570E+02
SIGMA( 83)=    1.720E+02
SIGMA( 84)=    1.620E+02
SIGMA( 85)=    1.280E+02
SIGMA( 86)=    8.000E+01
SIGMA( 87)=    2.700E+01
SIGMA( 88)=   -1.800E+01
SIGMA( 89)=   -4.700E+01
SIGMA( 90)=   -5.600E+01
SIGMA( 91)=   -4.700E+01
SIGMA( 92)=   -2.800E+01
SIGMA( 93)=   -1.000E+01
SIGMA( 94)=   -3.000E+00
SIGMA( 95)=   -1.300E+01
SIGMA( 96)=   -4.000E+01
SIGMA( 97)=   -7.900E+01
SIGMA( 98)=   -1.170E+02
SIGMA( 99)=   -1.440E+02
SIGMA(100)=   -1.470E+02
```

```
DELTA_SIGMA(  1) =   287.000     SIGMA-MEDIO(  1) =   143.500
DELTA_SIGMA(  2) =   129.000     SIGMA-MEDIO(  2) =   -31.500
DELTA_SIGMA(  3) =    24.000     SIGMA-MEDIO(  3) =    47.000
DELTA_SIGMA(  4) =    14.000     SIGMA-MEDIO(  4) =   -61.000
DELTA_SIGMA(  5) =   191.000     SIGMA-MEDIO(  5) =   -11.500
DELTA_SIGMA(  6) =   112.000     SIGMA-MEDIO(  6) =   -34.000
DELTA_SIGMA(  7) =    53.000     SIGMA-MEDIO(  7) =   -29.500
DELTA_SIGMA(  8) =   283.000     SIGMA-MEDIO(  8) =    30.500
```

C E N T R A I S E L E T R I C A S D O S U L D O B R A S I L S / A - E L E T R O S U L

RELATORIO DE PROPAGACAO DE TRINCAS DE FADIGA

TABELA DE PROPAGACAO DA TRINCA

TEMPO	NUMERO DE BLOCOS	FISSURA	VELOCIDADE	DELTA K
******	1219	0.014	4.767E-07	40.178

APÊNDICE A6

O MÉTODO RAIN FLOW

Dentre todos os métodos de contagem de ciclos para a análise de dano por fadiga ou para o estudo da propagação de trincas, o método que parece fornecer a previsão mais exata do comportamento do material é o método Rain Flow.

Neste trabalho, ele é usado para definir as magnitudes do ciclo de tensão σ_i (i = 1, n), e para contar o número de ciclos para os carregamentos 3 e 4.

Para o caso do carregamento 3, onde são fornecidos os valores de σ_i (i = 1, n), o método define o ciclo, o valor da amplitude $\Delta\sigma$ e também a tensão média.

Para o carregamento IV, é fornecido o espectro de frequência das tensões e gerado o sinal no tempo, $\sigma(t)$.

Como exemplo do método, uma amostra de $\sigma(t)$ é convertida em um sinal com picos e vales, como mostrado na figura A6-1.

O eixo dos tempos é orientado verticalmente com a direção positiva para baixo (O processo pode ser considerado como uma seqüência de calhas com a chuva caindo nelas). Os trechos do método são definidos de acordo com as seguintes regras:

- Um trecho se inicia a cada pico ou vale.
- Quando um trecho começa em uma depressão (vale) e chega ao pico, o trecho está terminado se o vale seguinte é mais negativo do que aquele em que começou o trecho considerado (Ex. : figura A6-1, trecho (1,8), (9,10)). Um percur

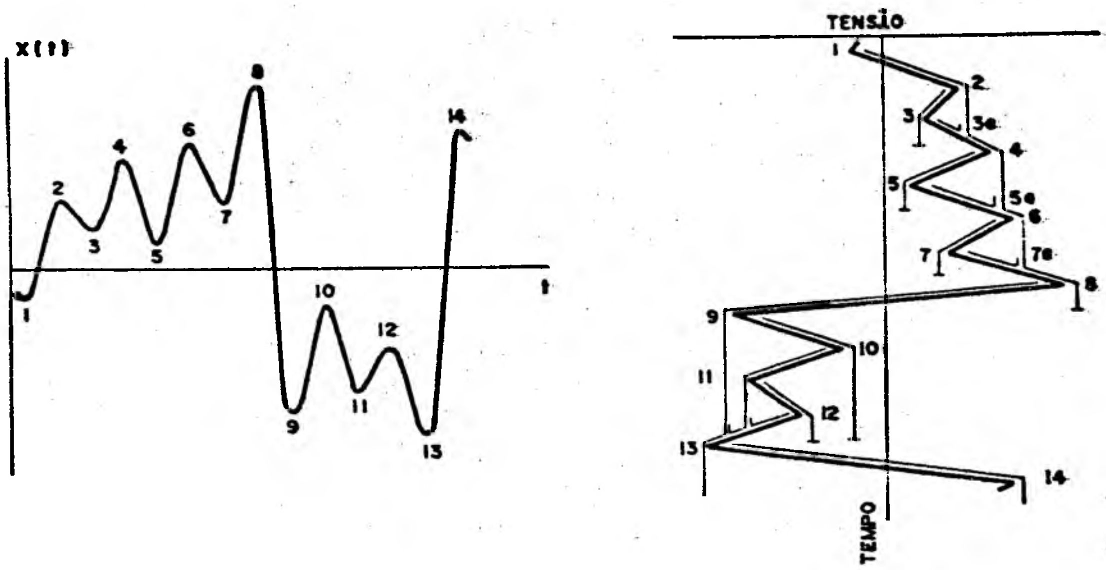


Fig. A6-1 - O método Rain Flow.

so que começou num pico é terminado em outro pico que seja mais positivo do que aquele onde começou o trecho em consideração (Ex.: trecho (2,3), (4,5), (6,7)).

- Se o fluxo que desce uma calha intercepta o fluxo que vem do pico anterior, então o presente trecho está terminado (Ex.: (3, 3a), (5, 5a)), não fechando ciclo.
- Um novo trecho não pode começar até que o trecho considerado não tenha terminado.
- Os ciclos dos vales originam a magnitude das tensões, $\Delta\sigma_i$. Seria, por exemplo, a distância projetada no eixo de tensão (Ex.: (1,8), (3,3a) e (5,5a)).

Baseado no exposto acima foi desenvolvido um programa de computador para definir os ciclos e os valores de $\Delta\sigma$ de um sinal aleatório $\sigma(t)$.

O programa, além das considerações acima, introduziu as seguintes regras, usadas na montagem dos quadros dos exemplos 1, 2 e 3:

- Ao iniciar o algorítmo, gera-se uma coluna de sinais iguais ao do primeiro ponto (zero, positivo ou negativo). O número de linhas com o sinal igual ao primeiro é determinado por um fator de escala FE, definido na entrada do programa.

- Para os demais pontos, quando o nível de tensão do ponto considerado é maior que o do ponto anterior, aquele recebe sinal positivo, e quando for menor recebe o sinal negativo.

- Para cada ponto calcula-se o número de linhas que devem mudar de sinal pela expressão

$$Ny = \left| \frac{\sigma_n - \sigma_{n-1}}{FE} \right|$$

Após se ter trocado o sinal de Ny linhas, de sinal diferente ao do ponto, passa-se para o próximo ponto. Caso o sinal do ponto em consideração seja negativo, as linhas que serão trocadas de sinal serão aquelas com 0 e + . Se positivo, os sinais trocados serão os 0 e -.

- O processo se repete para os demais pontos , sempre considerando as regras acima.

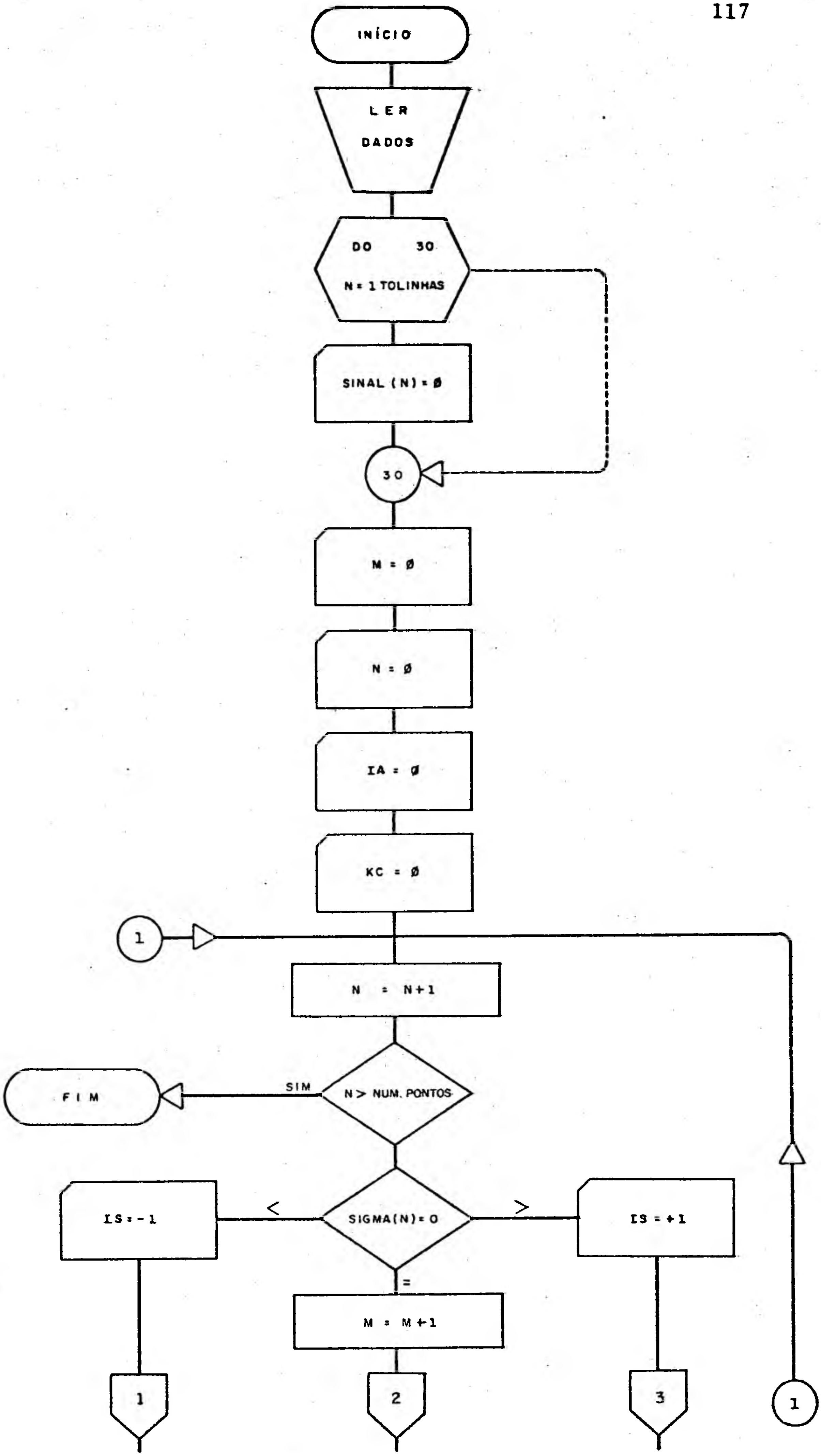
Regras que definem um ciclo e o valor de delta sigma:

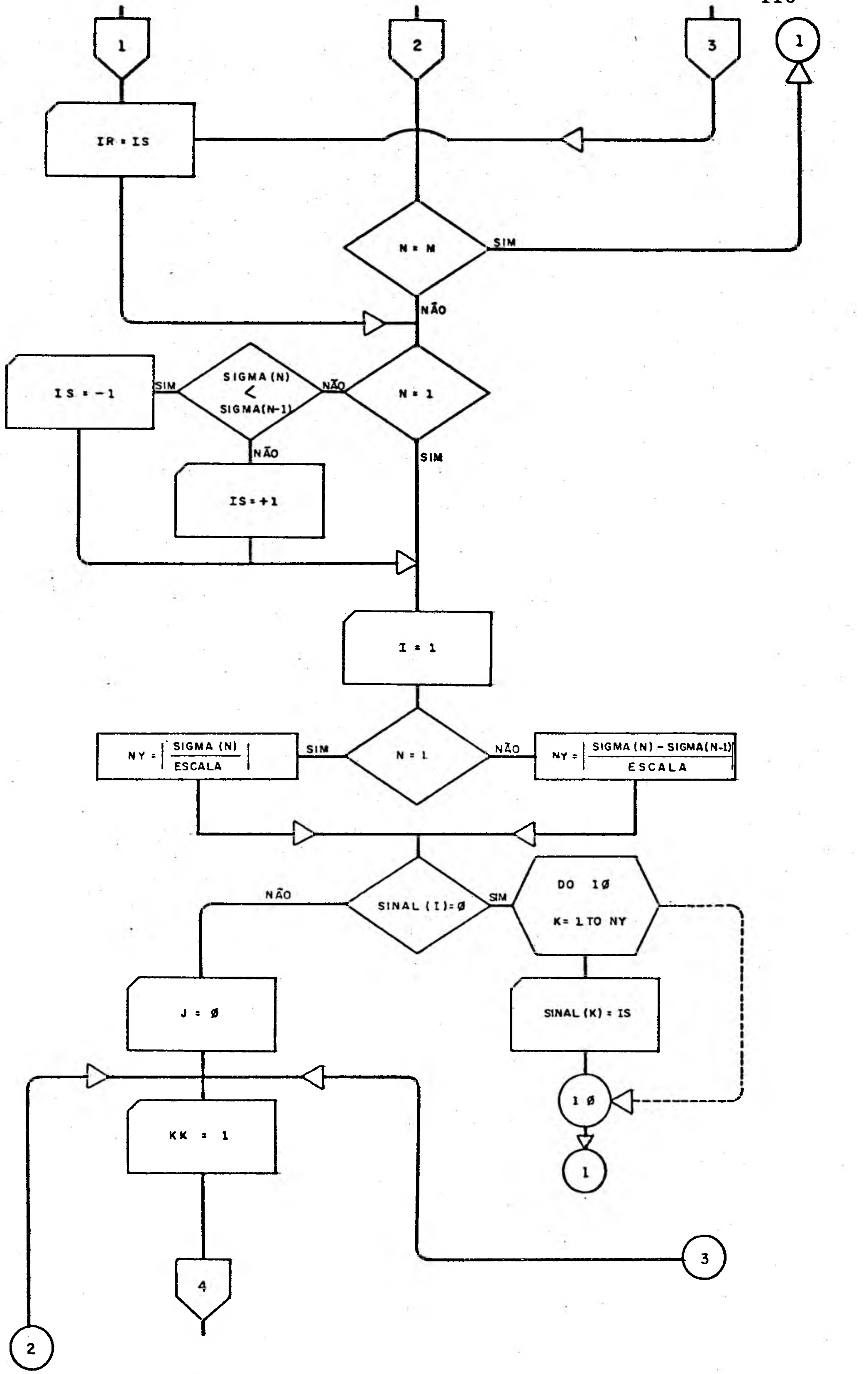
- Um ciclo fecha quando durante a troca de sinal da linha, encontra-se uma linha com o sinal do ponto.

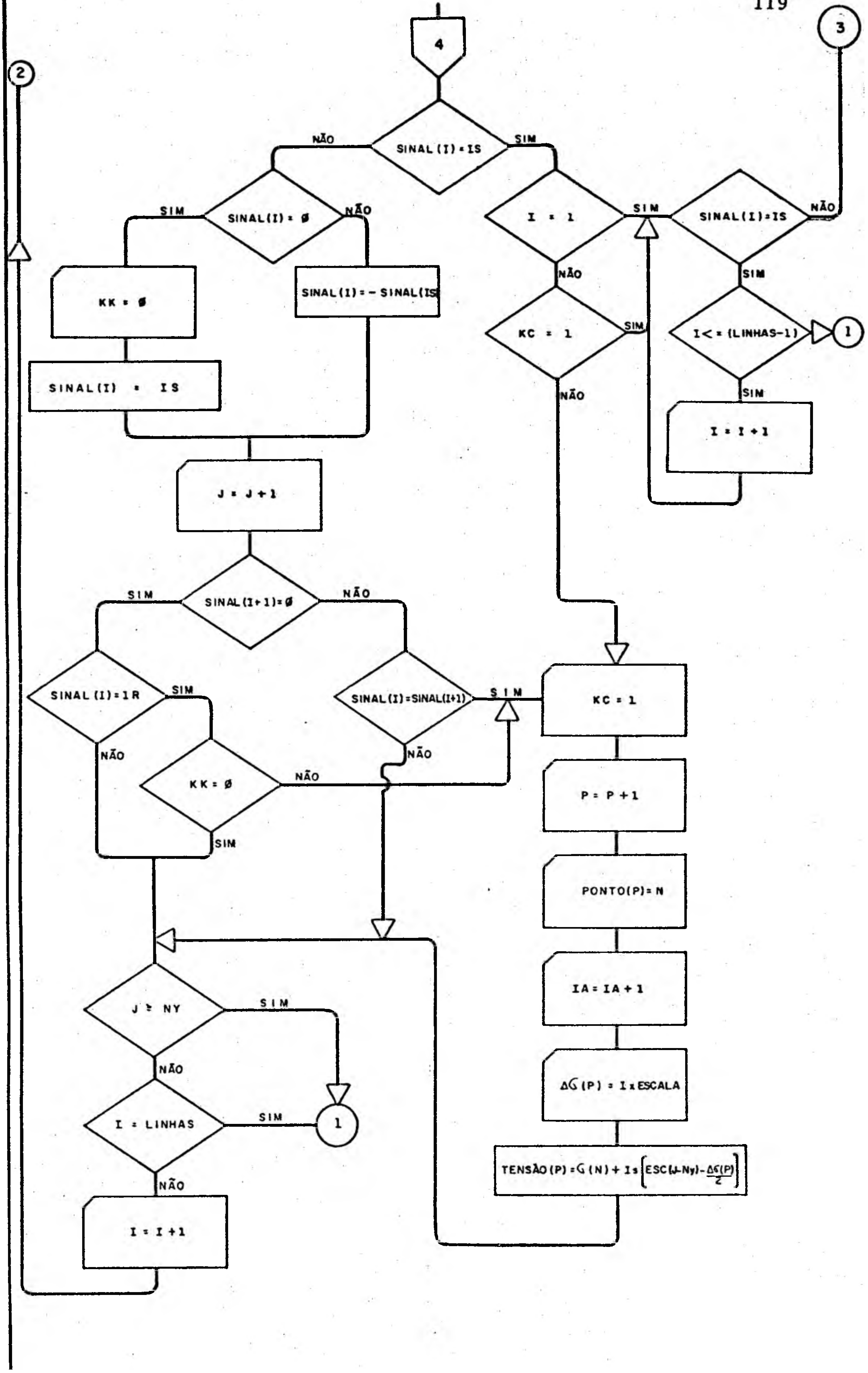
- Quando o sinal da linha seguinte for 0 e o primeiro ponto diferente de zero do carregamento tiver o mesmo sinal que o ponto em consideração e desde que não seja este o primeiro ponto diferente de zero, fecha-se um ciclo.

- Completada a troca de sinas das Ny linhas, quando o sinal da última linha trocada tiver o mesmo sinal que o da linha seguinte, fecha-se um ciclo.
- Sempre que fechar um ciclo, o valor de $\Delta\sigma$ será igual ao número de linhas que trocou de sinal vezes FE.

O fluxograma abaixo mostra a seqüência e os procedimentos utilizados no processo.

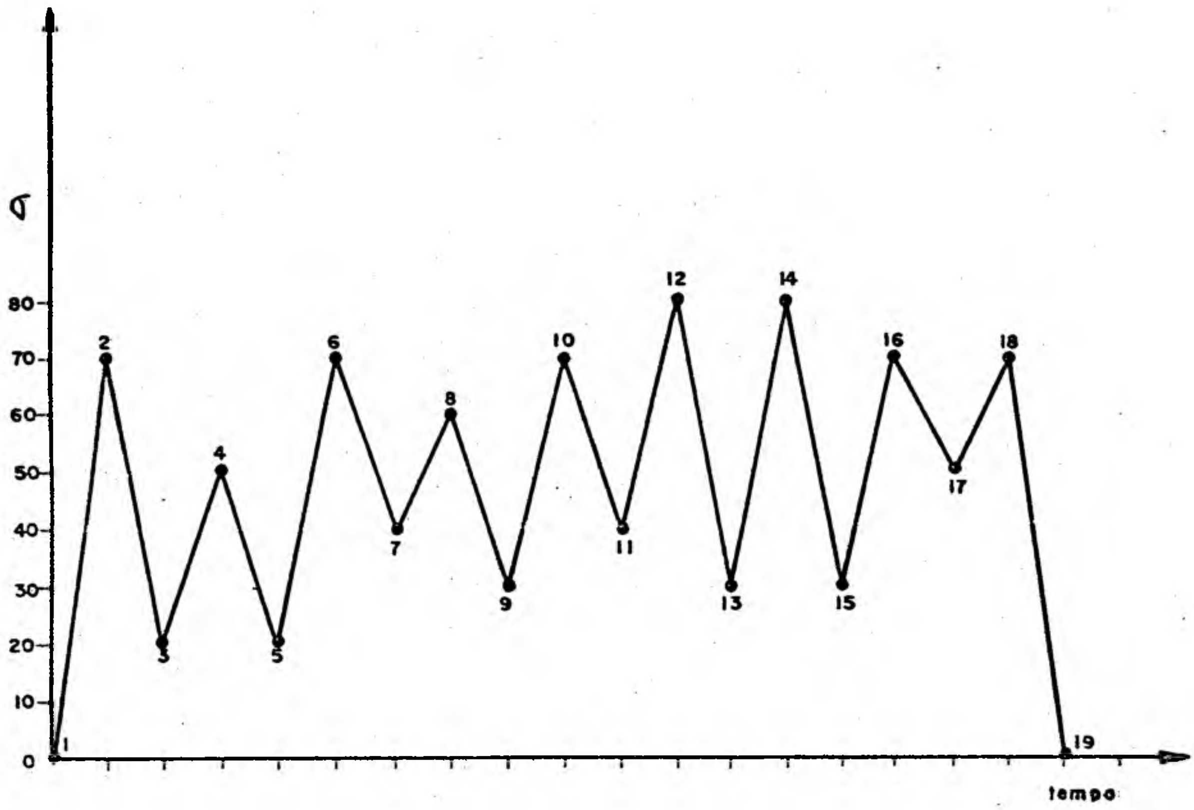

INÍCIO
LER
DADOS
DO 30
N = 1 TOLINHAS
SINAL (N) = Ø
30
M = Ø
N = Ø
IA = Ø
KC = Ø
1
N = N+1
SIM
N > NUM. PONTOS
FIM
<
SIGMA(N) = O
>
IS = -1
IS = +1
=
M = M+1
1
2
3
1


1
2
3
1
IR = IS
N = M
SIM
NÃO
IS = -1
SIM
SIGMA (N) < SIGMA(N-1)
NÃO
N = 1
NÃO
SIM
IS = +1
I = 1
NY = | SIGMA (N) / ESCALA |
SIM
N = 1
NÃO
NY = | SIGMA (N) - SIGMA(N-1) / ESCALA |
NÃO
SINAL (I)=Ø
SIM
DO 1Ø
K= 1 TO NY
J = Ø
SINAL (K) = IS
1 Ø
1
KK = 1
3
4
2


4
3
2
SINAL (I) = IS
NÃO
SIM
SINAL(I) = Ø
SIM
NÃO
KK = Ø
SINAL(I) = - SINAL(IS)
SINAL(I) = IS
I = 1
SIM
SINAL(I)=IS
NÃO
NÃO
SIM
KC = 1
SIM
I< = (LINHAS-1)
1
NÃO
SIM
I = I + 1
J = J + 1
SINAL(I+1)=Ø
SIM
NÃO
SINAL (I)=IR
SIM
SINAL(I)=SINAL(I+1)
SIM
KC = 1
NÃO
NÃO
KK = Ø
NÃO
P = P + 1
SIM
PONTO(P) = N
IA = IA + 1
J ≥ NY
SIM
NÃO
ΔG (P) = I x ESCALA
I = LINHAS
SIM
1
NÃO
TENSÃO (P) = G (N) + Is [ESC(J-Ny)- ΔG(P)/2]
I = I + 1

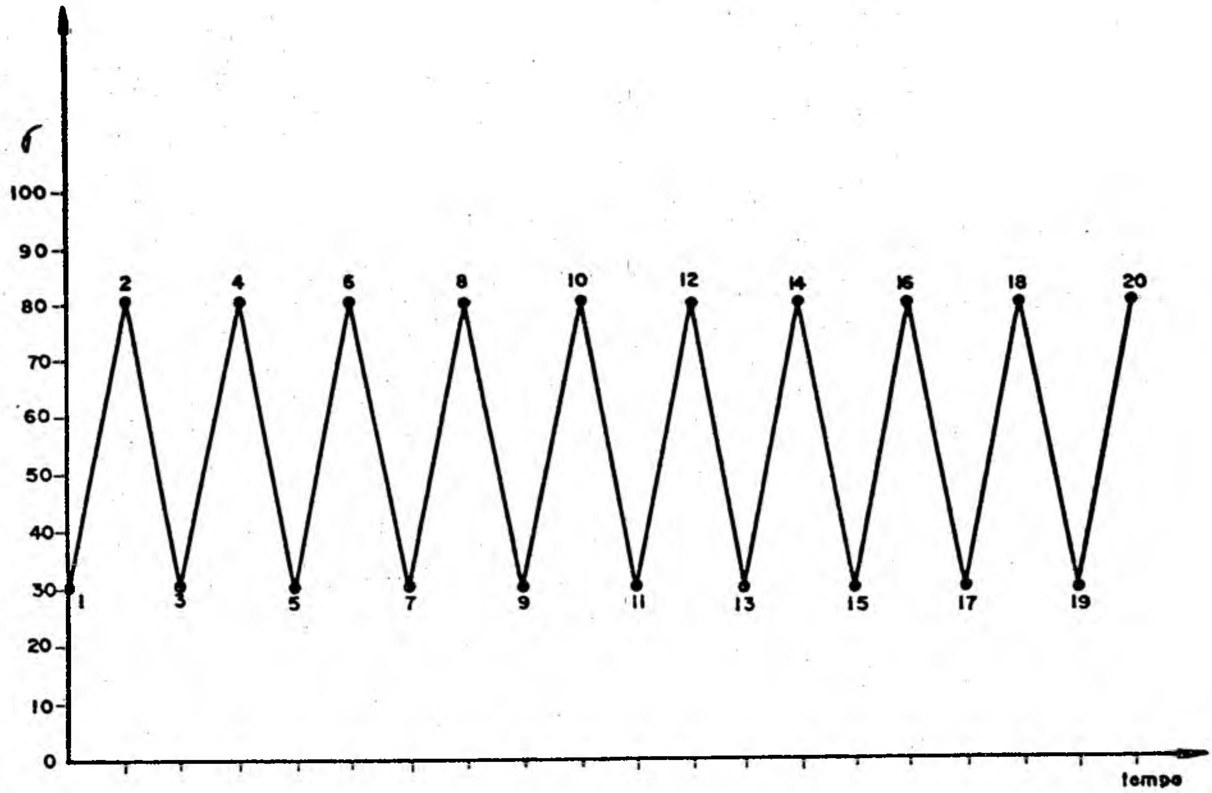
A seguir são apresentados vários exemplos, de forma a dar uma idéia bem completa dos procedimentos e metodologia usada no Método Rain Flow.

Exemplo 1 - Carregamento Aleatório



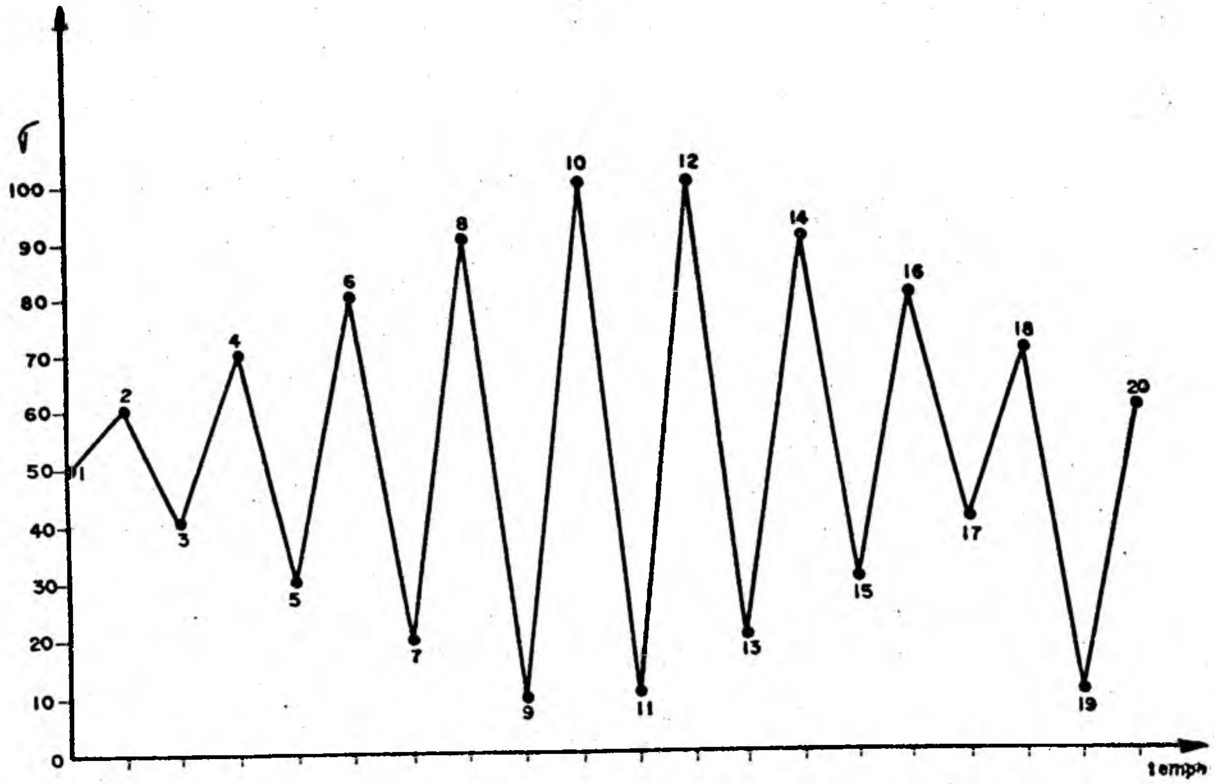
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	0	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
0	0	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
0	0	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-
0	0	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-	+	+	+	-
0	0	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-
0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	[illegible]
$\Delta\sigma$		*	*	*	30	50	*	*	20	40	*	30	*	50	*	*	*	20	40
σ_m		*	*	*	35	45	*	*	50	50	*	55	*	55	*	*	*	60	50

Exemplo 2 - Carregamento cíclico flutuante, constante no tempo.

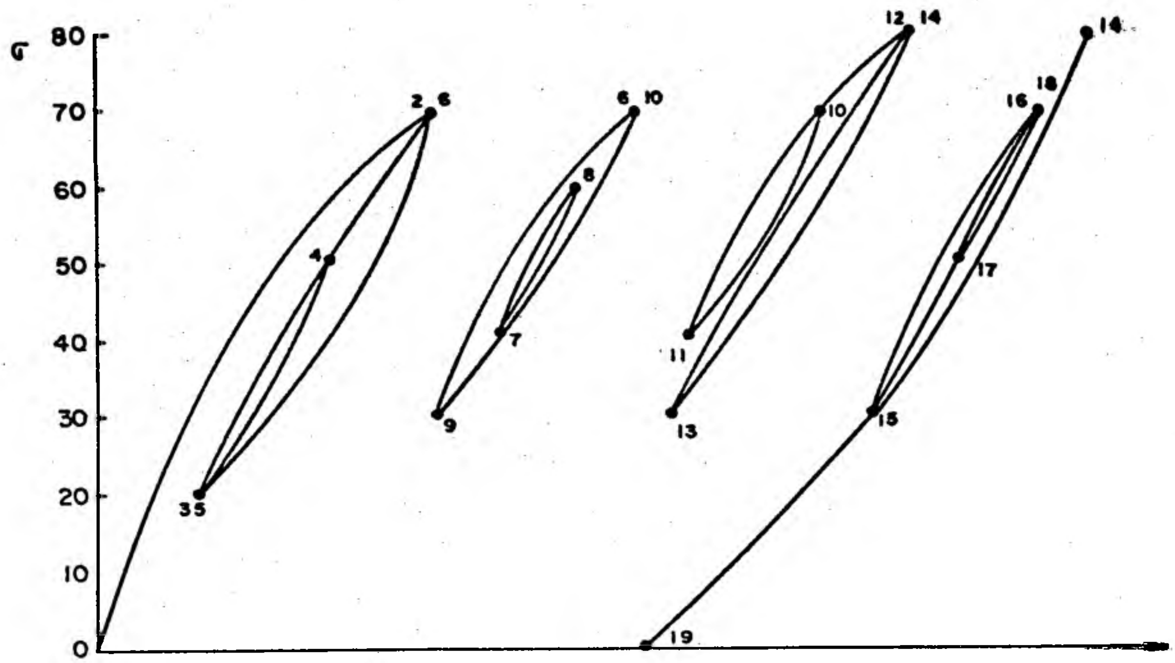


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	+	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+
0	+	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+
0	+	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+
0	0	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+
0	0	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+
0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta\sigma$	*	*	*	50	*	50	*	50	*	50	*	50	*	50	*	50	*	50
σ_m	*	*	*	55	*	55	*	55	*	55	*	55	*	55	*	55	*	55

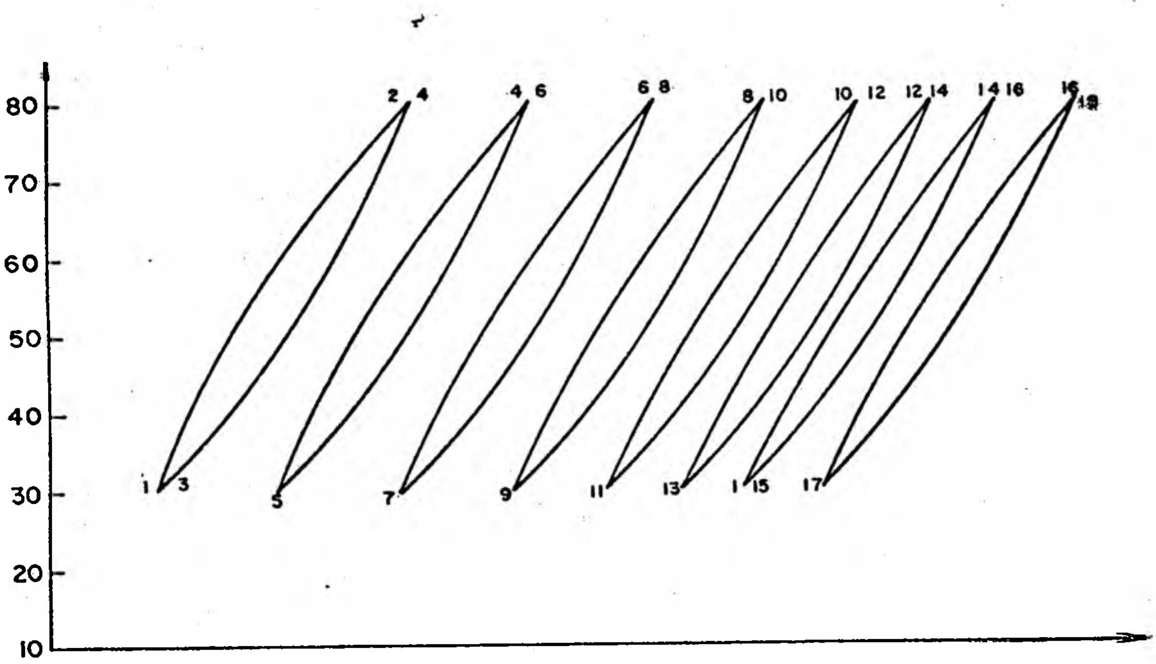
Exemplo 3 - Carregamento Crescente-Decrescente.



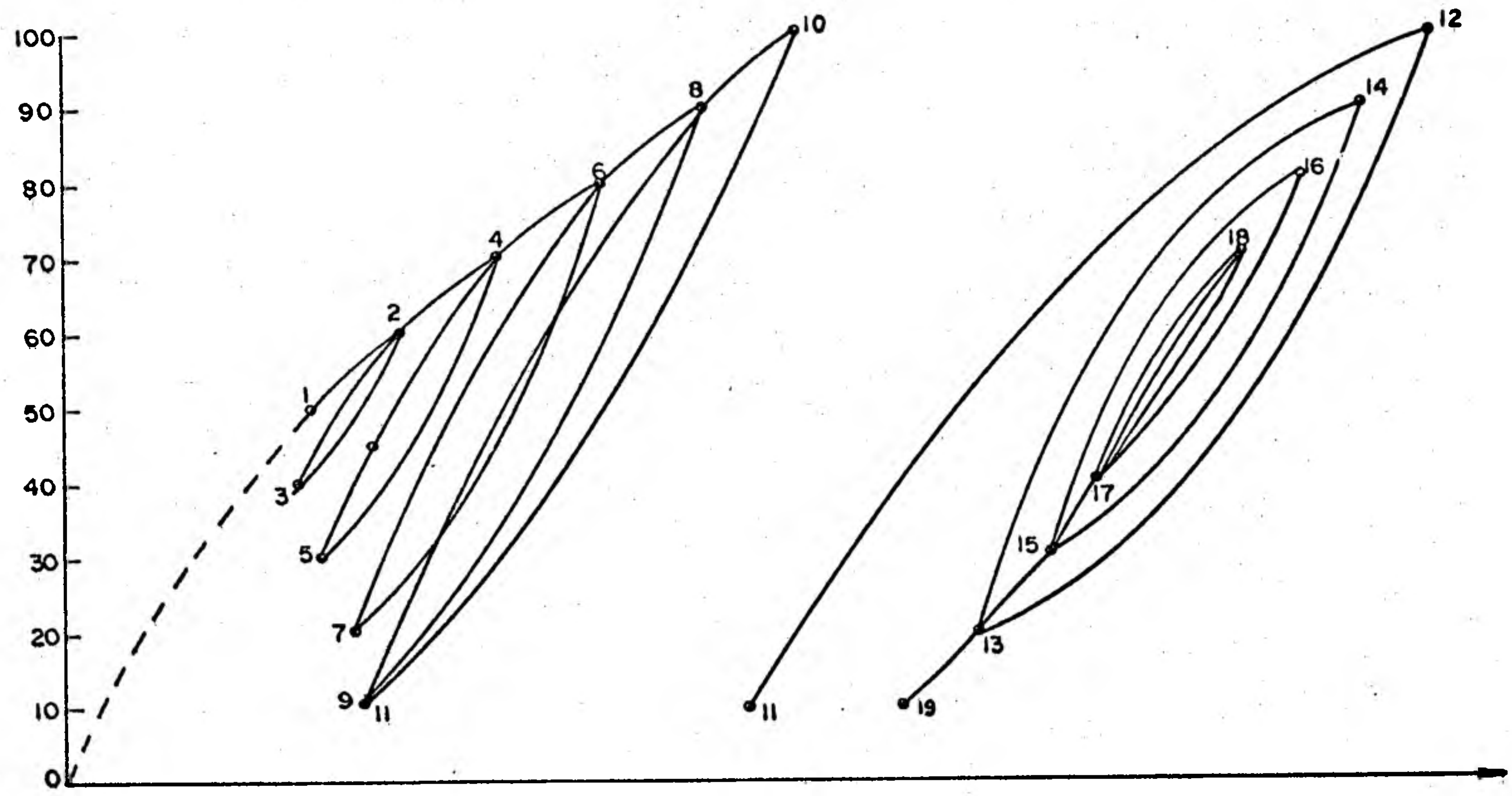
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	+	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−
0	+	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−
0	+	+	+	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	=
0	+	+	+	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	−	−
0	+	+	+	+	+	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	+	+	=
0	0	+	+	+	+	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	−	−	−	−
0	0	0	0	+	+	+	+	+	−	+	−	+	−	+	+	+	+	+	=
0	0	0	0	0	0	+	+	+	−	+	−	+	−	−	−	−	−	−	−
0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	−	+	+	+	+	+	+	+	=
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$\Delta\sigma$	*	*	*	20	*	40	*	60	*	80	*	90	*	*	*	*	*	*	*
σ_m	*	*	*	50	*	50	*	50	*	50	*	55	*	*	*	*	*	*	*



Laços de histereses do exemplo 1.



Laços de histereses do exemplo 2.



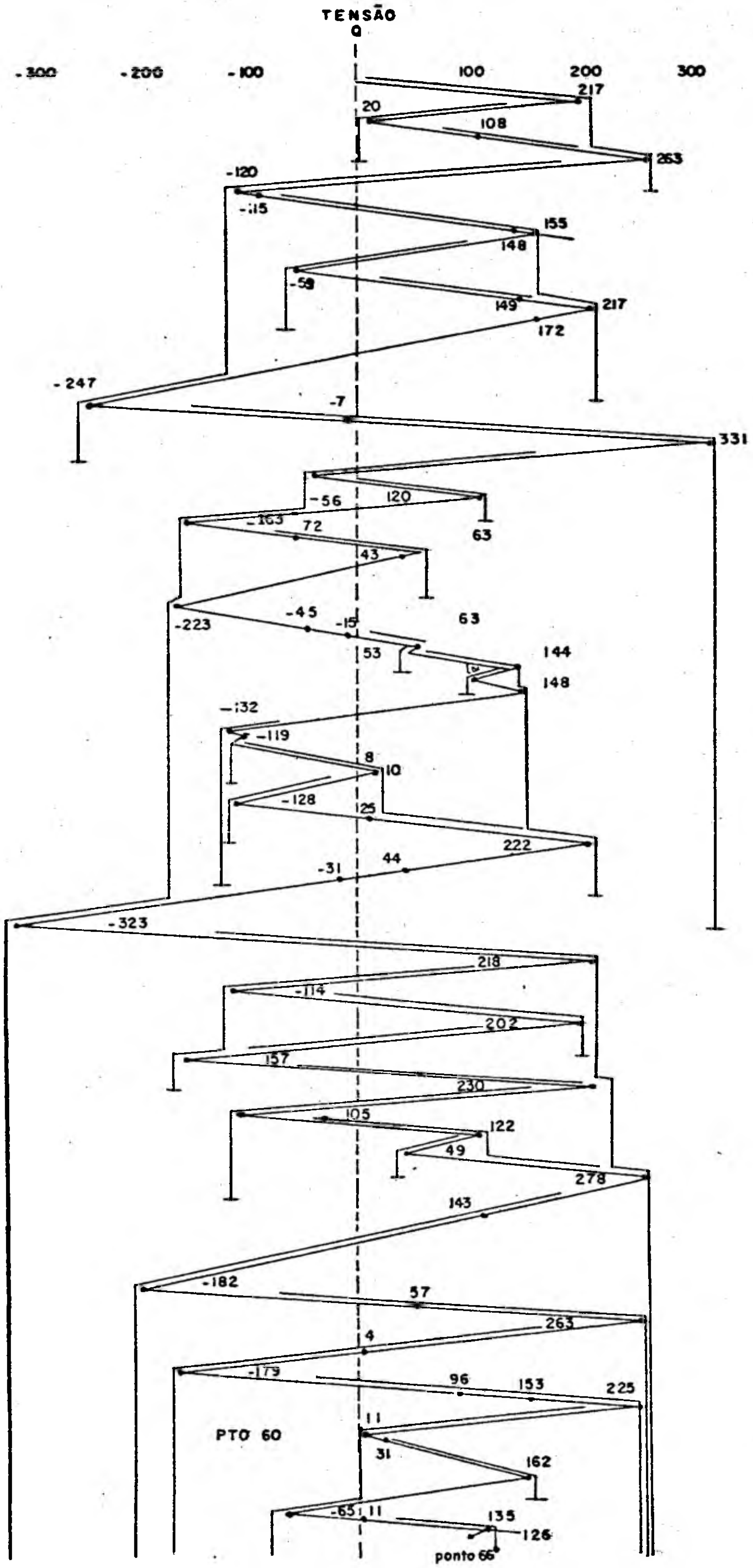
Laços de histereses do exemplo 3.

O exemplo a seguir ilustra a aplicação do método Rain Flow.

```
SIGMA(  1)=    2.170E+02
SIGMA(  2)=    2.000E+01
SIGMA(  3)=    1.080E+02
SIGMA(  4)=    2.630E+02
SIGMA(  5)=   -1.200E+02
SIGMA(  6)=   -1.150E+02
SIGMA(  7)=    1.480E+02
SIGMA(  8)=    1.550E+02
SIGMA(  9)=   -5.900E+01
SIGMA( 10)=    1.490E+02
SIGMA( 11)=    2.170E+02
SIGMA( 12)=    1.720E+02
SIGMA( 13)=   -2.470E+02
SIGMA( 14)=   -7.000E+00
SIGMA( 15)=    3.310E+02
SIGMA( 16)=   -4.200E+01
SIGMA( 17)=    1.200E+02
SIGMA( 18)=   -5.600E+01
SIGMA( 19)=   -1.630E+02
SIGMA( 20)=   -7.200E+01
SIGMA( 21)=    6.300E+01
SIGMA( 22)=    4.300E+01
SIGMA( 23)=   -2.230E+02
SIGMA( 24)=   -4.500E+01
SIGMA( 25)=   -1.500E+01
SIGMA( 26)=    6.300E+01
SIGMA( 27)=    5.300E+01
SIGMA( 28)=    1.440E+02
SIGMA( 29)=    1.060E+02
SIGMA( 30)=    1.480E+02
SIGMA( 31)=   -1.320E+02
SIGMA( 32)=   -1.190E+02
SIGMA( 33)=   -1.270E+02
SIGMA( 34)=    8.000E+00
SIGMA( 35)=    1.000E+01
SIGMA( 36)=   -1.280E+02
SIGMA( 37)=    2.500E+01
SIGMA( 38)=    2.220E+02
SIGMA( 39)=    4.400E+01
SIGMA( 40)=   -3.100E+01
SIGMA( 41)=   -3.230E+02
SIGMA( 42)=    2.180E+02
SIGMA( 43)=   -1.140E+02
SIGMA( 44)=    2.020E+02
SIGMA( 45)=   -1.570E+02
SIGMA( 46)=    2.300E+02
SIGMA( 47)=   -1.050E+02
SIGMA( 48)=    1.220E+02
SIGMA( 49)=    4.900E+01
SIGMA( 50)=    2.780E+02
SIGMA( 51)=    1.430E+02
SIGMA( 52)=   -1.920E+02
SIGMA( 53)=    5.700E+01
SIGMA( 54)=    2.630E+02
SIGMA( 55)=    4.000E+00
SIGMA( 56)=   -1.790E+02
SIGMA( 57)=    9.600E+01
SIGMA( 58)=    1.530E+02
SIGMA( 59)=    2.250E+02
SIGMA( 60)=    1.100E+01
```

```
SIGMA( 61)=     3.100E+01
SIGMA( 62)=     1.620E+02
SIGMA( 63)=    -6.500E+01
SIGMA( 64)=     1.100E+01
SIGMA( 65)=     1.350E+02
SIGMA( 66)=     1.240E+02
SIGMA( 67)=    -3.310E+02
SIGMA( 68)=    -1.240E+02
SIGMA( 69)=    -3.000E+00
SIGMA( 70)=    -6.400E+01
SIGMA( 71)=     2.540E+02
SIGMA( 72)=     2.530E+02
SIGMA( 73)=     1.180E+02
SIGMA( 74)=     2.010E+02
SIGMA( 75)=     1.750E+02
SIGMA( 76)=     9.300E+01
SIGMA( 77)=    -6.200E+01
SIGMA( 78)=     1.340E+02
SIGMA( 79)=     1.410E+02
SIGMA( 80)=    -2.040E+02
SIGMA( 81)=    -3.600E+01
SIGMA( 82)=     1.780E+02
SIGMA( 83)=    -6.700E+01
SIGMA( 84)=    -5.000E+00
SIGMA( 85)=     1.700E+02
SIGMA( 86)=     9.000E+01
SIGMA( 87)=     2.750E+02
SIGMA( 88)=    -3.000E+01
SIGMA( 89)=     9.500E+01
SIGMA( 90)=    -1.980E+02
SIGMA( 91)=     2.550E+02
SIGMA( 92)=    -3.000E+01
SIGMA( 93)=     6.000E+00
SIGMA( 94)=    -1.670E+02
SIGMA( 95)=    -1.500E+01
SIGMA( 96)=     1.340E+02
SIGMA( 97)=    -3.500E+01
SIGMA( 98)=     2.220E+02
SIGMA( 99)=     2.210E+02
SIGMA(100)=     1.090E+02
```

DELTA_SIGMA(1)	= 197.000	SIGMA-MEDIO(1)	= 118.500
DELTA_SIGMA(2)	= 263.000	SIGMA-MEDIO(2)	= 131.500
DELTA_SIGMA(3)	= 21[illegible].000	SIGMA-MEDIO(3)	= 48.000
DELTA_SIGMA(4)	= 337.000	SIGMA-MEDIO(4)	= 48.500
DELTA_SIGMA(5)	= 510.000	SIGMA-MEDIO(5)	= 8.000
DELTA_SIGMA(6)	= 162.000	SIGMA-MEDIO(6)	= 39.000
DELTA_SIGMA(7)	= 226.000	SIGMA-MEDIO(7)	= -50.000
DELTA_SIGMA(8)	= 10.000	SIGMA-MEDIO(8)	= 58.000
DELTA_SIGMA(9)	= 38.000	SIGMA-MEDIO(9)	= 125.000
DELTA_SIGMA(10)	= 8.000	SIGMA-MEDIO(10)	= 123.000
DELTA_SIGMA(11)	= 138.000	SIGMA-MEDIO(11)	= -59.000
DELTA_SIGMA(12)	= 280.000	SIGMA-MEDIO(12)	= 8.000
DELTA_SIGMA(13)	= 445.000	SIGMA-MEDIO(13)	= -0.500
DELTA_SIGMA(14)	= 578.000	SIGMA-MEDIO(14)	= 42.000
DELTA_SIGMA(15)	= 316.000	SIGMA-MEDIO(15)	= 44.000
DELTA_SIGMA(16)	= 375.000	SIGMA-MEDIO(16)	= 30.500
DELTA_SIGMA(17)	= 73.000	SIGMA-MEDIO(17)	= 85.500
DELTA_SIGMA(18)	= 335.000	SIGMA-MEDIO(18)	= 62.500
DELTA_SIGMA(19)	= 151.000	SIGMA-MEDIO(19)	= 86.500
DELTA_SIGMA(20)	= 200.000	SIGMA-MEDIO(20)	= 35.000
DELTA_SIGMA(21)	= 404.000	SIGMA-MEDIO(21)	= 23.000
DELTA_SIGMA(22)	= 455.000	SIGMA-MEDIO(22)	= 35.500
DELTA_SIGMA(23)	= 601.000	SIGMA-MEDIO(23)	= -22.500
DELTA_SIGMA(24)	= 61.000	SIGMA-MEDIO(24)	= -33.500
DELTA_SIGMA(25)	= 83.000	SIGMA-MEDIO(25)	= 159.500
DELTA_SIGMA(26)	= 203.000	SIGMA-MEDIO(26)	= 39.500
DELTA_SIGMA(27)	= 80.000	SIGMA-MEDIO(27)	= 130.000
DELTA_SIGMA(28)	= 245.000	SIGMA-MEDIO(28)	= 55.500
DELTA_SIGMA(29)	= 175.000	SIGMA-MEDIO(29)	= 7.500
DELTA_SIGMA(30)	= 36.000	SIGMA-MEDIO(30)	= -12.000
DELTA_SIGMA(31)	= 169.000	SIGMA-MEDIO(31)	= 49.500


TENSÃO
Q
-300
-200
-100
100
200
300
217
20
108
263
-120
-115
155
148
-59
149
217
172
-247
-7
331
-56
120
-163
72
63
43
-223
-45
-15
63
53
144
148
-132
-119
8
10
-128
125
222
-31
44
-323
218
-114
202
157
230
105
122
49
278
143
-182
57
263
4
-179
96
153
225
PTO 60
11
31
162
-65
11
135
126
ponto 66