

Propagação de Trincas por Fadiga

ESCOPO

1. CRESCIMENTO DE TRINCA SOB CARREGAMENTOS CÍCLICOS DE AMPLITUDE CONSTANTE

Curva da/dN vs ΔK

Leis do crescimento de trinca por fadiga

Outros fatores

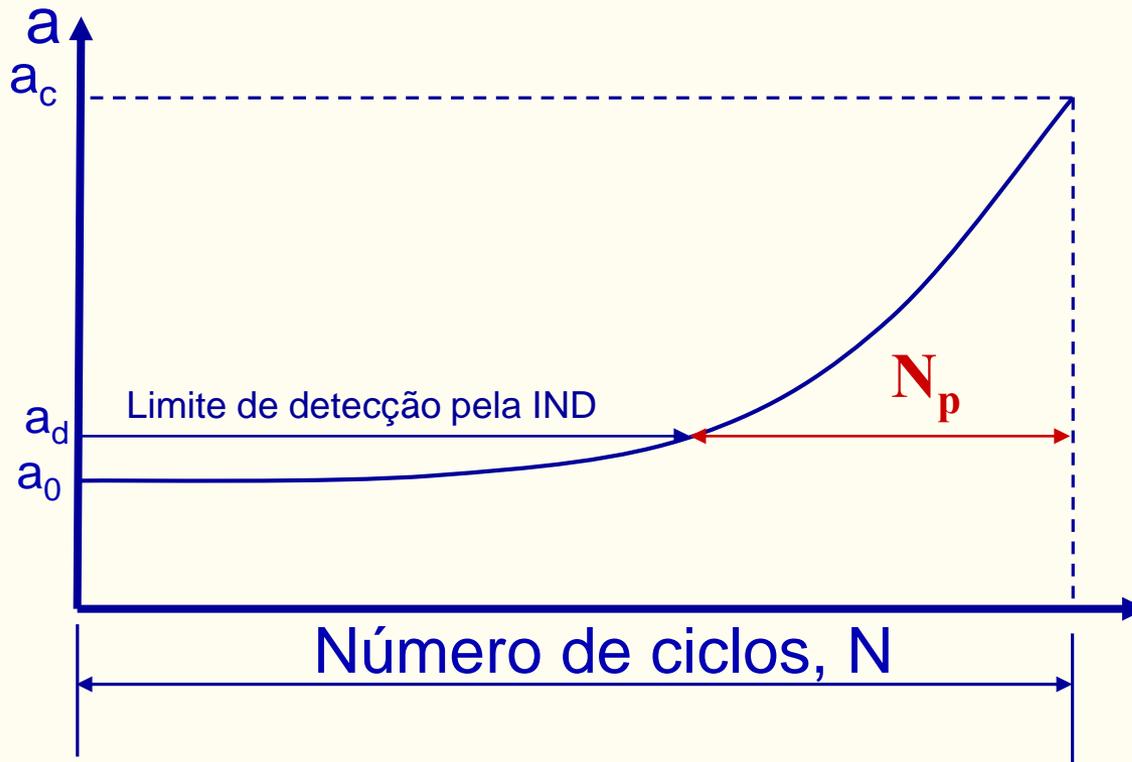
2. APLICAÇÕES.

■ Bibliografia:

- Norma ASTM 647 – 06
- Norma ASTM 399 – 00
- Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications, T. L. Anderson, 1994
- Fracture Mechanics – R.J.H. Wanhill et al. 2ª Ed. 2004.
- Fatigue and Durability of Structural Materials. S.S. Mason e GR Halford, 2006
- Introdução à Mecânica da Integridade Estrutural, V. Pastoukhove H. J.C. Voorwald, 1995
- Structural Life Assessment Methods, A. F. Liu, 1999.
- Fundamentals of Metals Fatigue Analysis – J.A. Bannantine et. al., 1990
- Metal Fatigue in Engineering, R.I. Stephens et. Al. (Rev. 2000)
- Mechanical behavior of Materials. N. E. Dowling, 1993.

CRESCIMENTO DE TRINCA SOB CARREGAMENTOS CÍCLICOS DE AMPLITUDE CONSTANTE

Em situação de fadiga, a trinca pode crescer mesmo se $a_0 < a_c$ ou $\sigma < \sigma_c$.

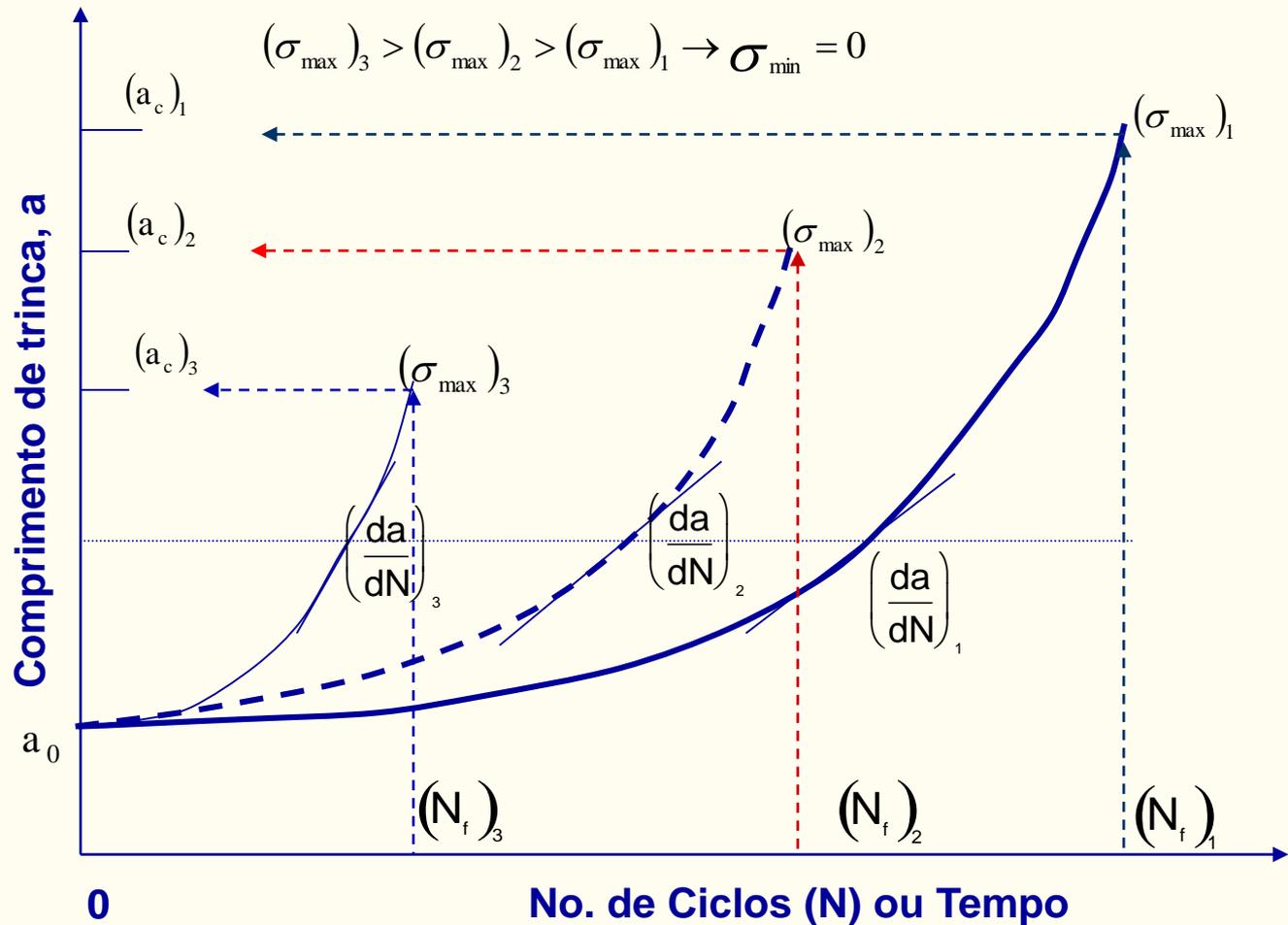


$a_d = ?$ (END, IND)

$a_c = ?$ (MFEL)

$N_p = ?$ ($a \times N$)

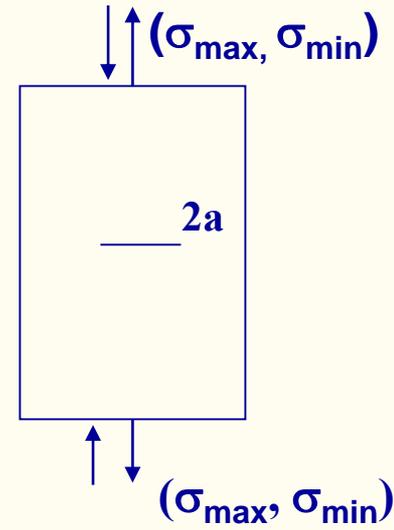
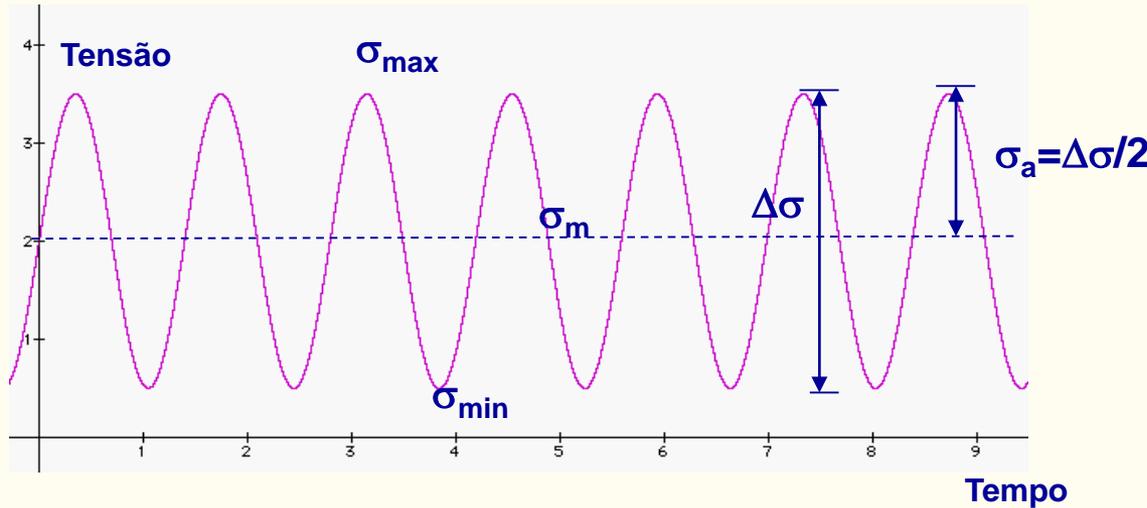
Taxa de Crescimento de Trinca Vs. Tensão



Conclusão:

- (1) Inicialmente a taxa de crescimento da trinca (da/dN) é pequena, aumentando com aumento de a .
- (2) da/dN aumenta com aumento do nível de tensão aplicada e para um a específico.

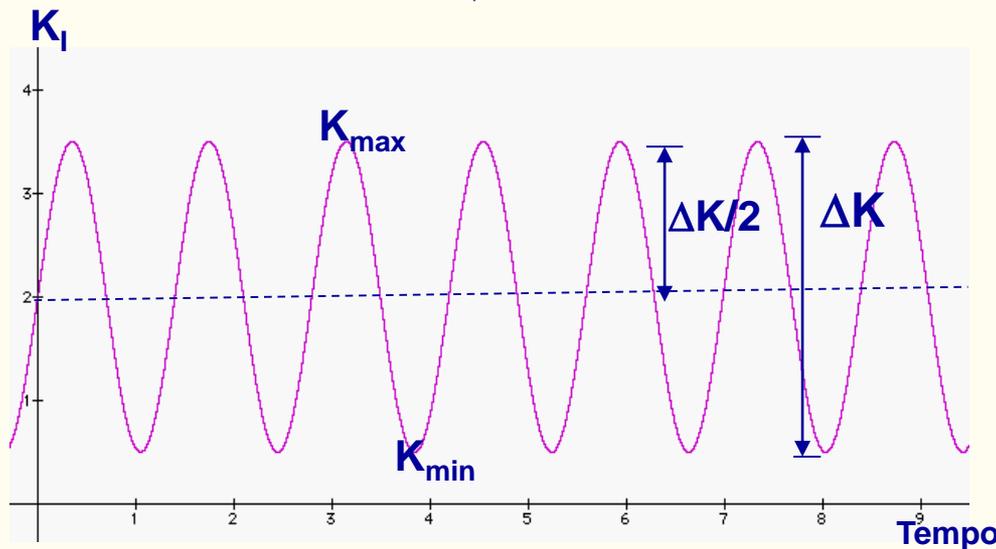
Parâmetros Utilizados na descrição do Crescimento de Trinca por Fadiga



$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$



$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a} \Rightarrow Y = 1$$



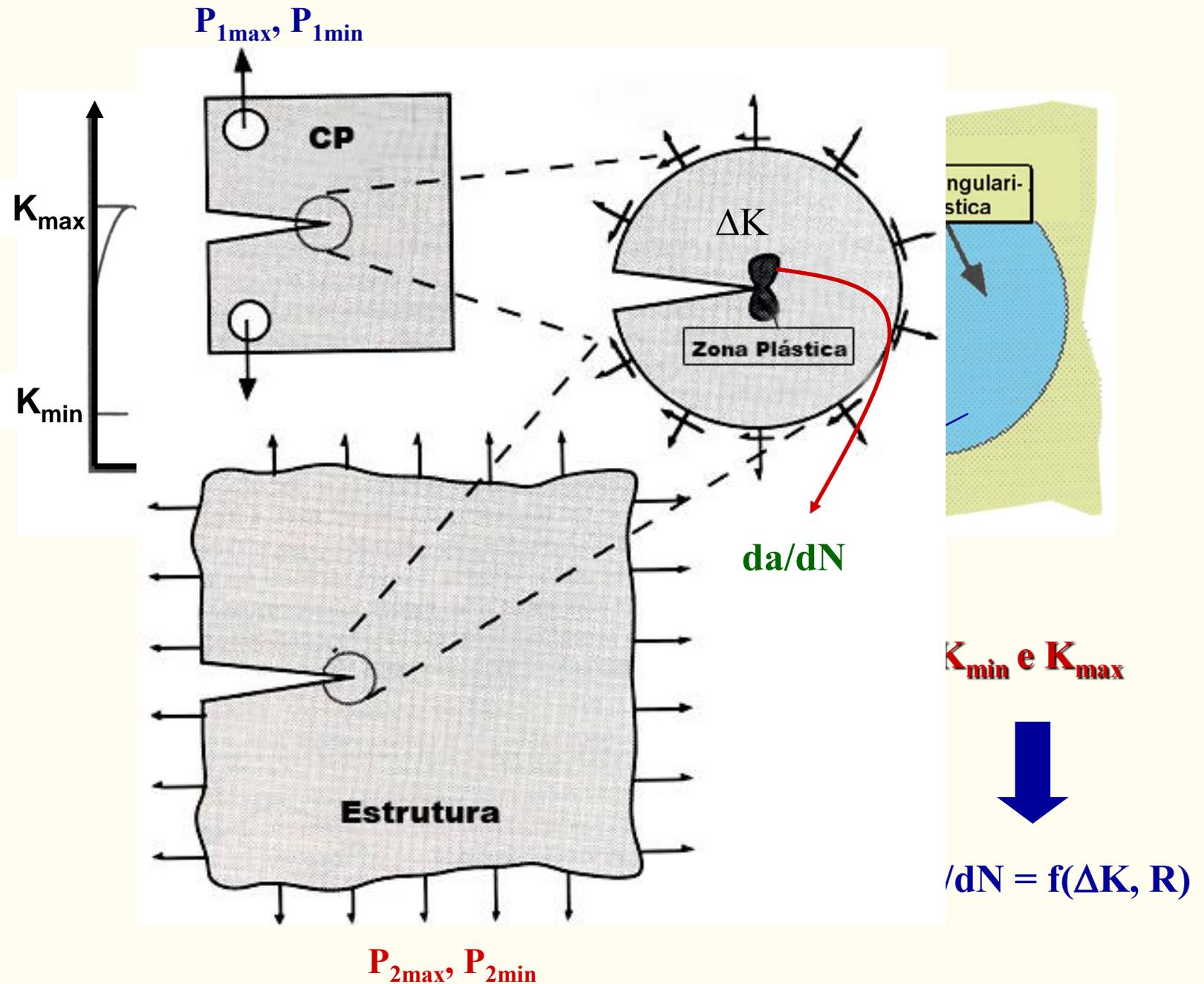
$$K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a}$$

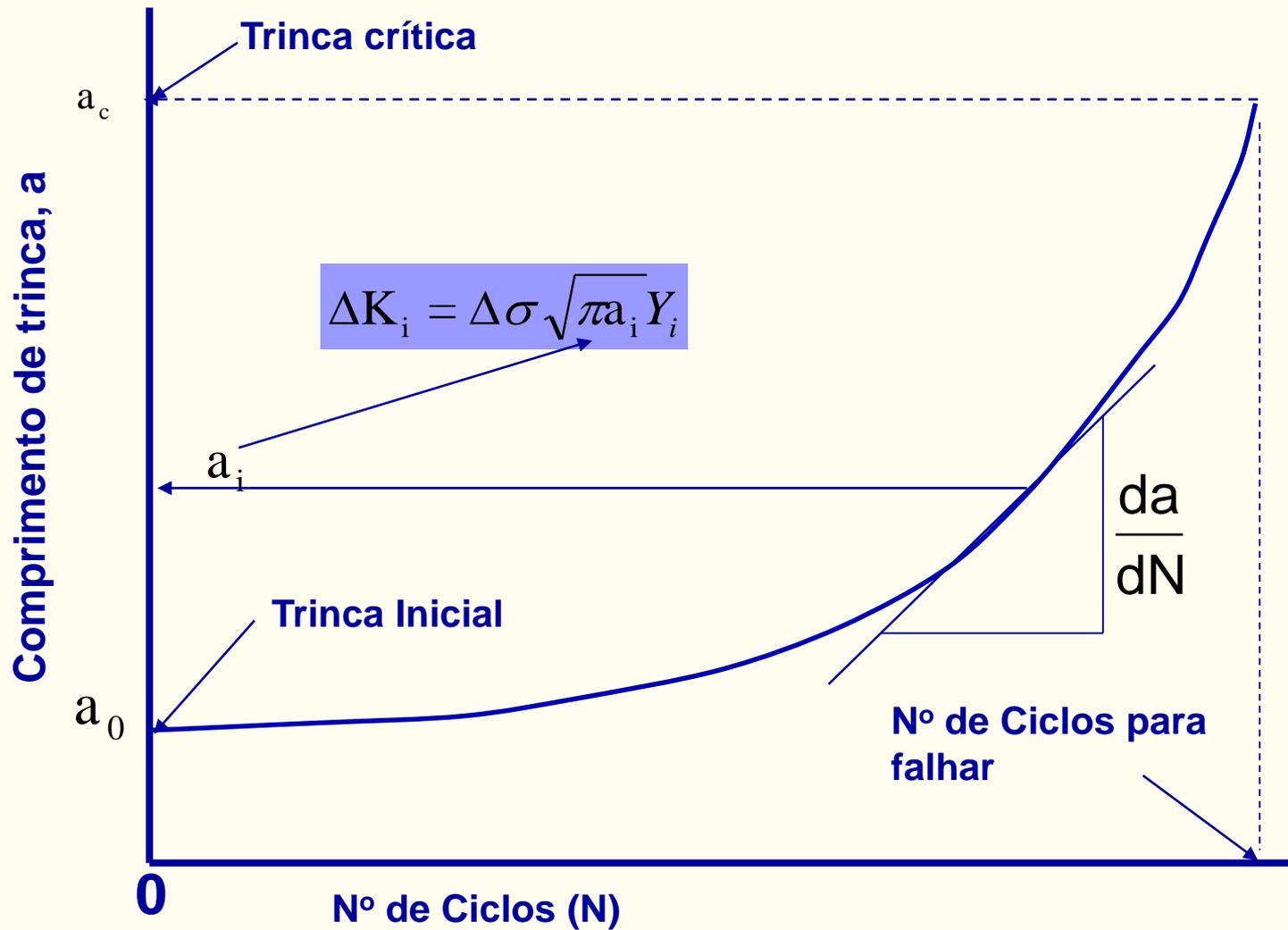
$$K_{\min} = \sigma_{\min} \sqrt{\pi a}$$

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

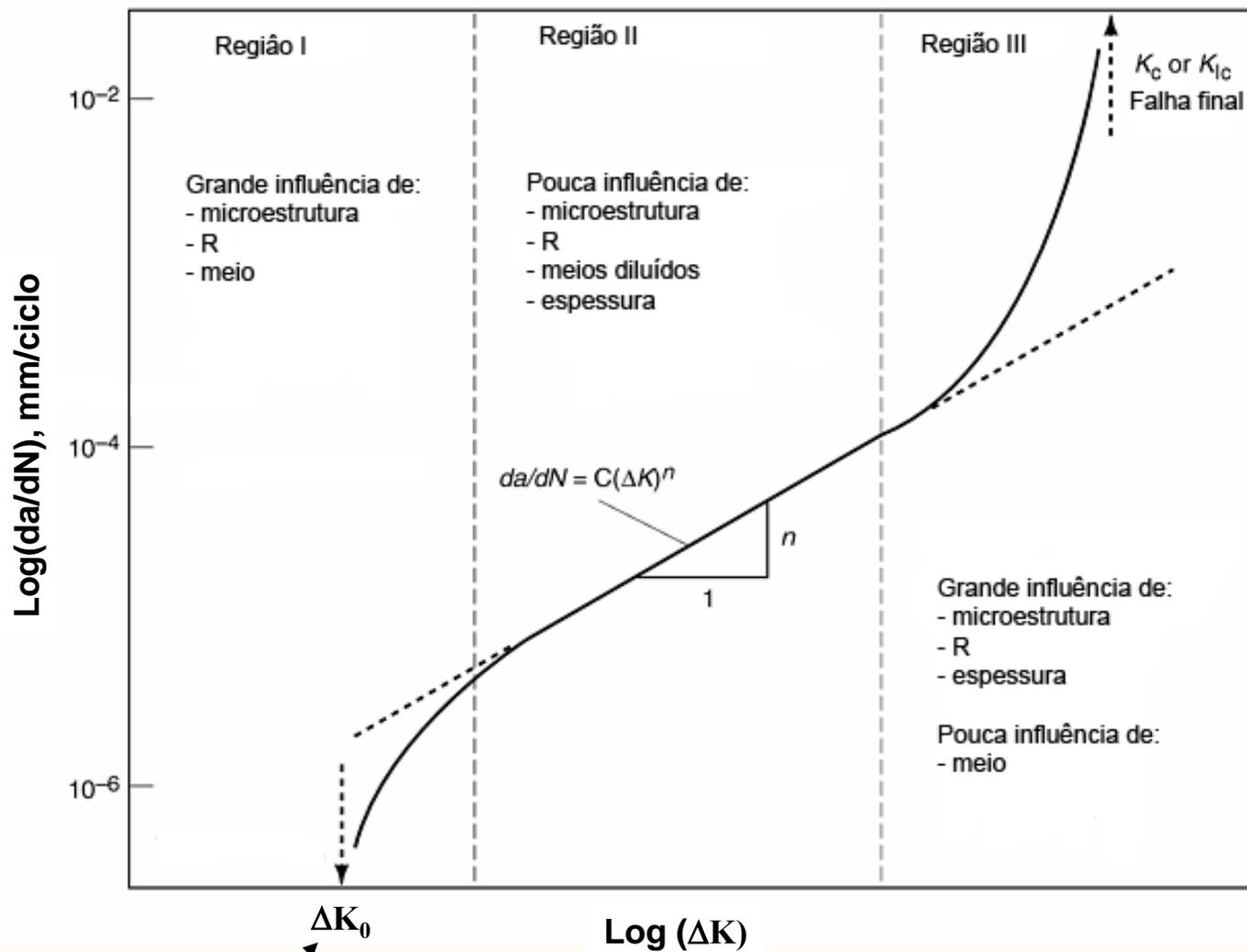
$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$$

SIMILARIDADE EM FADIGA





CURVA DE CRESCIMENTO DE TRINCA POR FADIGA



Al : 3 – 7 MPa m^{1/2}
Aço : 6 – 17 MPa m^{1/2}

LEIS DOS CRESCIMENTO DE TRINCAS POR FADIGA



- Região linear (Paris e Erdogan):

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

onde C e m são constantes do material e determinados experimentalmente, para metais: $2 \leq m \leq 7$.

- **Limitações:**

- Não Leva em conta efeitos de R, superestima a Região I (ΔK_0) e subestima a Região III ($K = K_{IC}$)

- **Vantagens:**

- Os valores previstos concordam bem com os dados experimentais.
- Simples de ser usada e incorporada a programa de cálculo da vida em propagação em serviço.

Material	C		m
	da/dN (m/cycle) ΔK in MPa√m	da/dN (in/cycle) ΔK in ksi√in	
Ferritic-Pearlitic Steels	6.9×10^{-12}	3.6×10^{-10}	3.0
Martensitic Steels	1.35×10^{-10}	6.6×10^{-9}	2.25
Austenitic Stainless Steels	5.6×10^{-12}	3.0×10^{-10}	3.25
Ni-Mo-V Steels	1.8×10^{-19}	----	3.0

- Um grande número de pesquisadores (mais do que 50) desenvolveram expressões, que pudessem modelar parte ou toda a curva $\log da/dN \times \log \Delta K$.

Regiões II e III

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^n}{(1-R)K_{IC} - \Delta K} \Rightarrow \text{Forman (1967)}$$

- $K_{\max} \rightarrow K_{IC}$ $da/dN \rightarrow \infty$
- $R > 0$

Curva Completa

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \frac{(\Delta K - \Delta K_0)}{(1-R)K_{IC} - \Delta K} \Rightarrow \text{Forman modificada}$$

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K - \Delta K_0}{K_C - K_{\max}} \right)^n \Rightarrow \text{Priddle (1976)}$$

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K - \Delta K_0)^2 \left(1 + \frac{\Delta K}{K_C - K_{\max}} \right) \Rightarrow \text{McEvily, (1988)}$$

Estimativa da Vida – Amplitudes Constantes

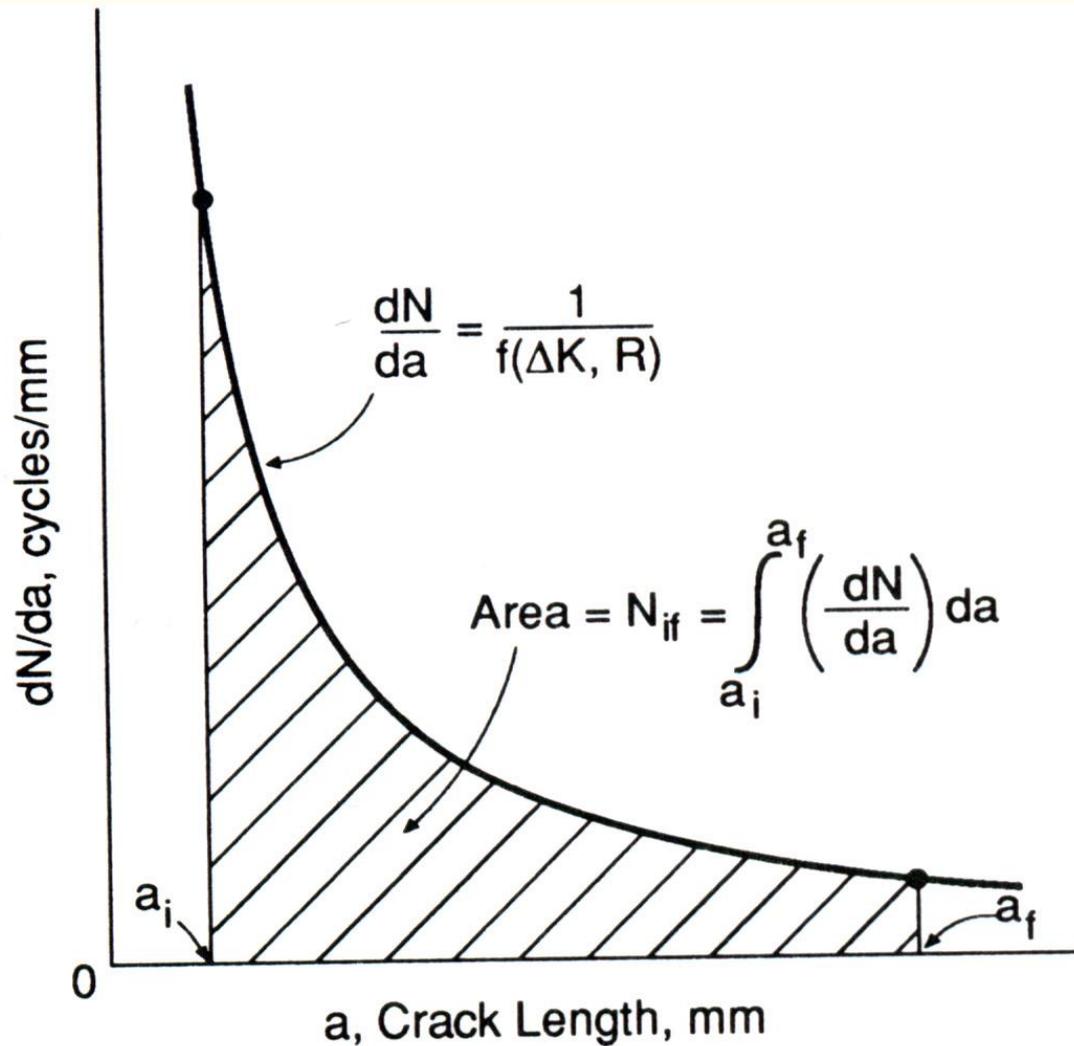
Para muitas configurações a função Y pode variar excessivamente entre os valores iniciais e finais da trinca, ou ainda a expressão de da/dN pode ser mais complexa. Nestes casos, precisamos integrar numericamente.

$$N = \int_0^N dN = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K, R)}$$

$$\frac{dN}{da} = \frac{1}{da/dN} = \frac{1}{f(\Delta K, R)} \quad N_{if} = \int_{a_i}^{a_f} \left(\frac{dN}{da} \right) da$$

dN/da é a taxa de acumulação de ciclos, N, por unidade de aumento da trinca, a.

Esta equação sugere o uso de uma solução gráfica da correlação dN/da x a . A vida N_{if} é simplesmente a área sob a curva.



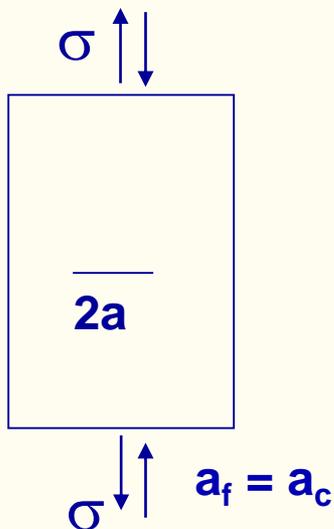
Solução Aproximada

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \longrightarrow dN = \frac{da}{f(\Delta K, R)}$$

Integrando entre o tamanho inicial e final utilizando-se eq. PARIS teremos:

$$N = \int_0^N dN = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K, R)}$$

Complexidade de $f(\Delta K, R)$
 $Y = f(a/W)$: Ex. $Y=1,0$ (placa infinita)



$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m} = \int_{a_0}^{a_f} \frac{a^{-m/2} da}{C(\Delta\sigma)^m \pi^{m/2}} = \frac{1}{C(\Delta\sigma)^m \pi^{m/2}} \int_{a_0}^{a_f} a^{-m/2} da$$

$$N = \frac{1}{C(\Delta\sigma)^m \pi^{m/2} \left(1 - \frac{m}{2}\right)} \left[a_f^{1-(m/2)} - a_0^{1-(m/2)} \right]$$

Integração da Lei de Paris - Exemplo

Dado: $da/dN = 6,6 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2,25}$, da/dN em pol/ciclo, ΔK em $\text{ksi}\sqrt{\text{pol}}$ e $\sigma_{\max} = 40 \text{ ksi}$, $\sigma_{\min} = 10 \text{ ksi}$

Determine: O nº de ciclos para uma trinca de tamanho inicial de 0,25 pol crescer até 0,75 pol.

Solução:

$$\Delta\sigma = 30 \text{ ksi}$$

Supor: $Y=1,0$ (placa infinita)

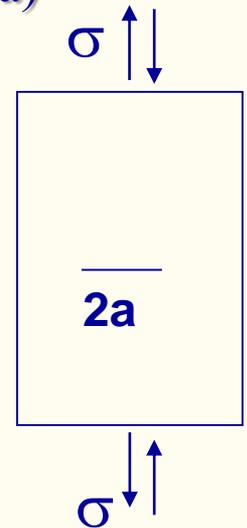
$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi a}$$

$$a_0 = 0,125 \text{ pol}, \quad a_f = 0,375 \text{ pol}$$

$$C = 6,6 \times 10^{-9}, m = 2,25 (\text{Const. Material})$$

$$N = \frac{(0,375^{-0,125} - 0,125^{-0,125})}{6,6 \times 10^{-9} (30)^{2,25} \pi^{1,125} (1 - 1,125)}$$

$$N = 26.418 \text{ ciclos}$$



Integração da Lei de Paris - Exemplo

Dado: $da/dN = 6,6 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2,25}$, da/dN em pol/ciclo, ΔK em $\text{ksi}\sqrt{\text{pol}}$, $\sigma_{\max} = 40 \text{ ksi}$, $\sigma_{\min} = 10 \text{ ksi}$, $K_{IC} = 60 \text{ ksi}\sqrt{\text{pol}}$, $2a_0 = 0,25''$.

Determine: Qual o número de ciclos para falhar?

Solução:

$$\Delta\sigma = 30 \text{ ksi}$$

$$K_I = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a_{cr}} = K_{IC} \quad \text{na fratura}$$

$$a_{cr} = \left(K_{IC} / \sigma_{\max} \right)^2 \frac{1}{\pi} = (60/40)^2 \frac{1}{\pi} = 0,7162 \text{ in}$$

$$\begin{aligned} N &= \frac{1}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m (1-m/2)} \left[a_{cr}^{1-m/2} - a_0^{1-m/2} \right] \\ &= \frac{(0,7162^{-0,125} - 0,125^{-0,125})}{6,6 \times 10^{-9} (30\sqrt{\pi})^{2,25} (-0,125)} \end{aligned}$$

$$N = 40.361 \text{ ciclos}$$

Integração da Lei de Paris

Exemplo: Melhoria da Vida

Do exemplo anterior nós temos $N = 40.361$ ciclos para $\Delta\sigma = 30$ ksi, $a_0 = 0,125$ pol, $K_{IC} = 60$ ksi $\sqrt{\text{pol}}$

a) Decrescendo a_0 : tente $a_0 = 0,05$ pol
→ $N = 65.345$ ciclos **62%**

b) Aumentando a_{cr} : tente $K_{IC} = 100$ ksi $\sqrt{\text{pol}}$
→ Tenacidade $a_{cr} = 1,9894$ pol
→ $N = 60.204$ ciclos **49%**

c) Diminuindo a tensão de projeto σ_{max}

Diminuindo σ_{max} → a_{cr} aumenta
→ $\Delta\sigma$ Diminui

tente $\sigma_{max} = 30$ ksi

→ $\Delta\sigma = 20$ ksi

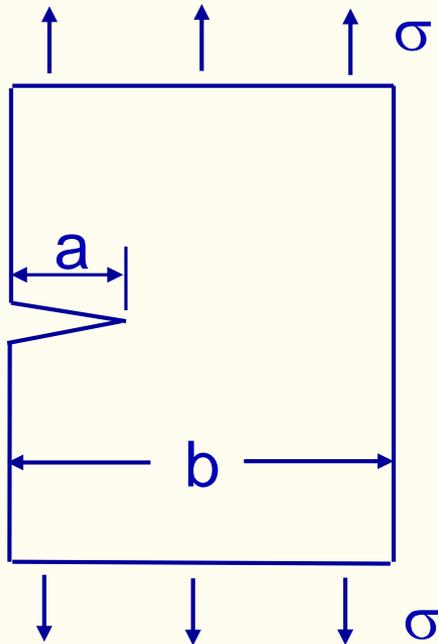
→ $a_{cr} = 1,2732$ pol → $N = 129.099$ ciclos

220%

Integração Numérica da Lei de Paris

Para muitas configurações, a integração torna-se complexa. Nestes casos, precisamos integrar numericamente.

Exemplo:



$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a},$$

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

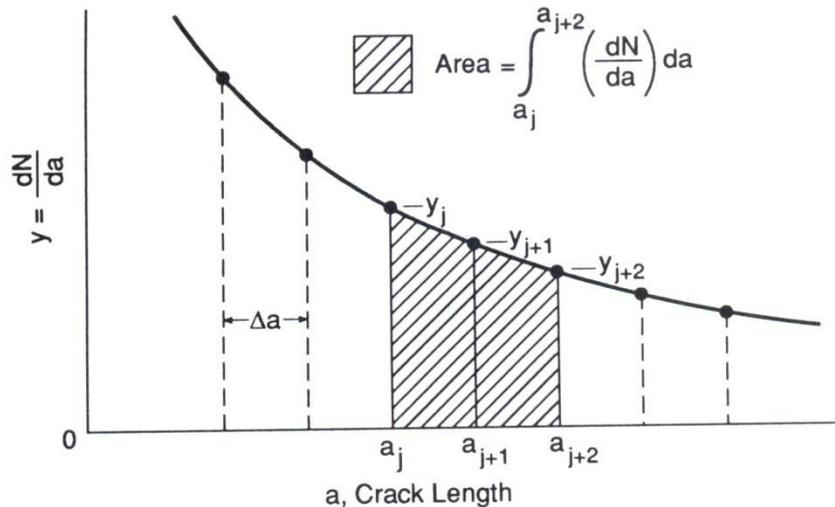
$$Y = 1,12 - 0,231 (a/b) + 10,55 (a/b)^2 - 21,72 (a/b)^3 + 30,39 (a/b)^4$$

A forma mais prática de proceder é escolher um certo número de comprimentos de trincas entre a_i e a_f .

Para cada um destes comprimentos e considerando o material, geometria e o carregamento de interesse, calcula-se ΔK e então da/dN , invertendo para a obtenção de dN/da . Assim, coloca-se em gráfico dN/da x a e encontramos a área sobre a curva entre a_i e a_f .

$$\left(\frac{dN}{da}\right) = \frac{1}{C(\Delta K_J)^m} = \frac{1}{C(F_J \Delta S \sqrt{\pi a_J})^m}$$

Um método relativamente simples é o uso da regra de Simpson. A equação é aplicada para cada $j= 0, 2, 4, 6, \dots, n$



$$\int_{a_j}^{a_{j+2}} y da = \frac{\Delta a}{3} (y_j + 4 y_{j+1} + y_{j+2})$$

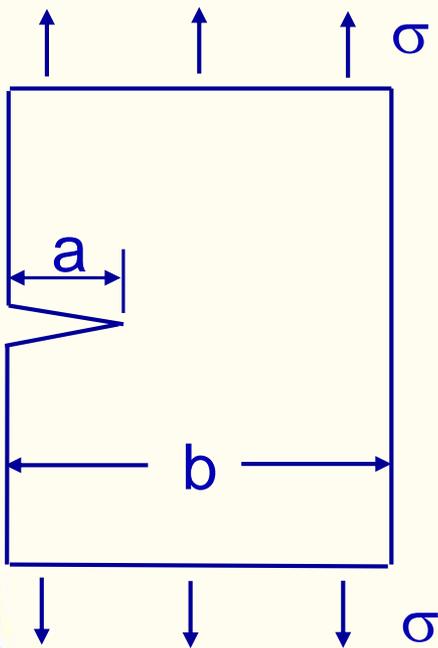
Figure 11.27 Area under the dN/da vs. a curve over two intervals Δa as estimated by Simpson's rule.

Entretanto, para o presente caso é mais interessante que os espaçamentos não sejam uniformes, mas ao invés disto que sejam diferentes por um fator r , tal que $r > 1$,

$a_1 = ra_i$; $a_2 = r^2a_i$; $a_n = r^na_i$

$$\int_{a_j}^{a_{j+2}} y da = \frac{a_j (r^2 - 1)}{6r} \left(y_j r(2 - r) + y_{j+1} (r + 1)^2 + y_{j+2} (2r - 1) \right)$$

Dado: $da/dN = 6,6 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2,25}$, da/dN em pol/ciclo, ΔK em $\text{ksi}\sqrt{\text{pol}}$, $\sigma_{\max} = 40 \text{ ksi}$, $\sigma_{\min} = 0 \text{ ksi}$, $K_{IC} = 60 \text{ ksi}\sqrt{\text{pol}}$, $a_0 = 0,10''$ e $b=2''$.



Solução:

$$a_{cr} = \left(K_{IC} / Y \sigma_{\max} \right)^2 \frac{1}{\pi}$$

Caso $Y=1,0$ encontre o tamanho crítico

$$a_{cr} = 0,7168 \text{ pol}$$

$$N = \sum_1^k \Delta N = \sum_1^k \frac{\Delta a}{C(\Delta K)^m}$$

Use $\Delta a = a_{i+1} - a_i = 0,05$ pol (incremento)

ΔK é calculado pela média do comprimento de trinca,

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a_{med}}$$
$$a_{med} = (a_i + a_{i+1})/2$$

$$Y = 1,12 - 0,231(a_{med}/b) + 10,55(a_{med}/b)^2$$
$$- 21,72(a_{med}/b)^3 + 30,39(a_{med}/b)^4$$

$$\Delta N = \frac{0,05}{6,6 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2,25}}$$

$$Y = 1,12 - 0,231(a_{med}/b) + 10,55(a_{med}/b)^2 - 21,72(a_{med}/b)^3 + 30,39(a_{med}/b)^4$$

$$\Delta N = \frac{0,05}{6,6 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2,2}}$$

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a_{med}}$$

a_i	a_{i+1}	a_{med}	a_{med}/b	Y	ΔK	ΔN
0,10	0,15	0,125	0,0625	1,142	28,6	3997
0,15	0,20	0,175	0,0875	1,168	34,6	2603
0,20	0,25	0,225	0,1125	1,202	40,4	1840
0,25	0,30	0,275	0,1375	1,242	46,2	1362
0,30	0,35	0,325	0,1625	1,289	52,1	1039
0,35	0,40	0,375	0,1875	1,342	58,3	808
0,40	0,45	0,425	0,2125	1,401	64,8	-----

Atingiu K_{IC}

Número de ciclos para falhar:

$$N = \sum \Delta N = 11.469 \text{ Ciclos}$$

Região I da Curva de Crescimento de Trinca por Fadiga

Fator de Intensidade de Tensão Limite, ΔK_{th}

Abaixo de ΔK_{th} , o crescimento de trinca por fadiga não ocorre

$$\Delta K_{th} = 6,4(1 - 0,85R) \text{ for } R \geq + 0,1$$

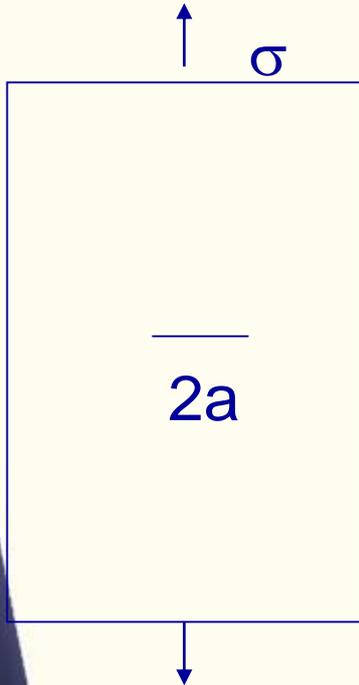
$$\Delta K_{th} = 5,5 \quad \text{for } R < + 0,1$$

EXEMPLO (1) SOBRE O FIT LIMITE

dado: $R=0,2$;

$$\Delta K_{th} = 6,4(1 - 0,85R) \text{ for } R \geq + 0,1$$

$$\Rightarrow \Delta K_{th} = 5,312 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$$



a) Se $\Delta\sigma = 50 \text{ MPa}$,
Calcule o comprimento trinca limite, abaixo do qual a trinca não cresce.

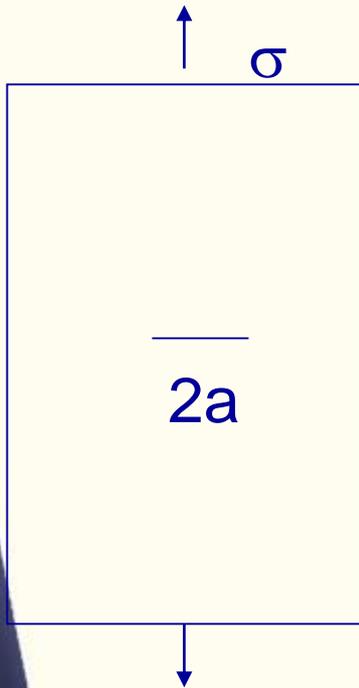
$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi a_{th}} = \Delta K_{th}$$

$$a_{th} = \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma \sqrt{\pi}} \right)^2 = \left(\frac{5,312}{50 \sqrt{\pi}} \right)^2$$

$$= 0,00359 \text{ m} = 3,59 \text{ mm}$$

EXEMPLO (2) SOBRE O FIT LIMITE

Dado: $R=0,2$; $\Delta K_{th} = 6,4(1 - 0,85R)$ for $R \geq +0,1$
 $\Rightarrow \Delta K_{th} = 5,312 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$



b) Se $2a = 10 \text{ mm}$, Calcule a variação de tensão limite $\Delta\sigma_{th}$ abaixo da qual não ocorrerá o crescimento de trinca.

$$\Delta K = \Delta\sigma_{th} \sqrt{\pi a} = \Delta K_{th}$$

$$\Delta\sigma_{th} = \frac{\Delta K_{th}}{\sqrt{\pi a}} = \left(\frac{5,312}{\sqrt{0,005} \sqrt{\pi}} \right) = 42,38 \text{ MPa}$$

ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CRESCIMENTO DA TRINCA POR FADIGA

- NORMA: ASTM E647-05

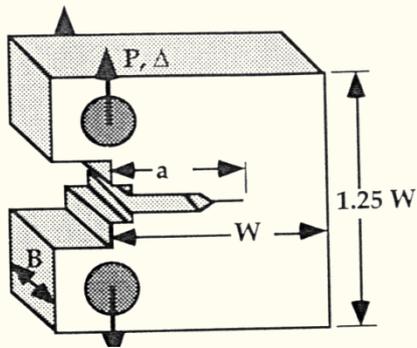
- Ciclos de amplitude constante;

- TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DA TRINCA:

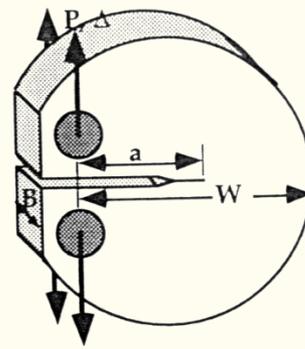
- Observação visual com microscópio (luneta graduada);
- Mudança da flexibilidade (rigidez) da seção remanescente (compliance);
- Medição por ultra-som;
- Réplica de acetato;
- Passagem de corrente (Queda de Potencial);
- Filmagem e foto da trinca.

CORPOS DE PROVA

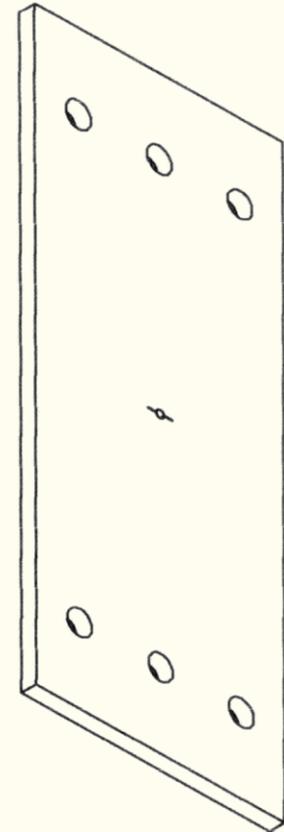
- NORMA: ASTM E647- 05
- CORPOS DE PROVA MAIS UTILIZADOS:
 - COMPACTO – CT
 - DISCO – DCT
 - CHAPA – CCT OU M(T)



CT

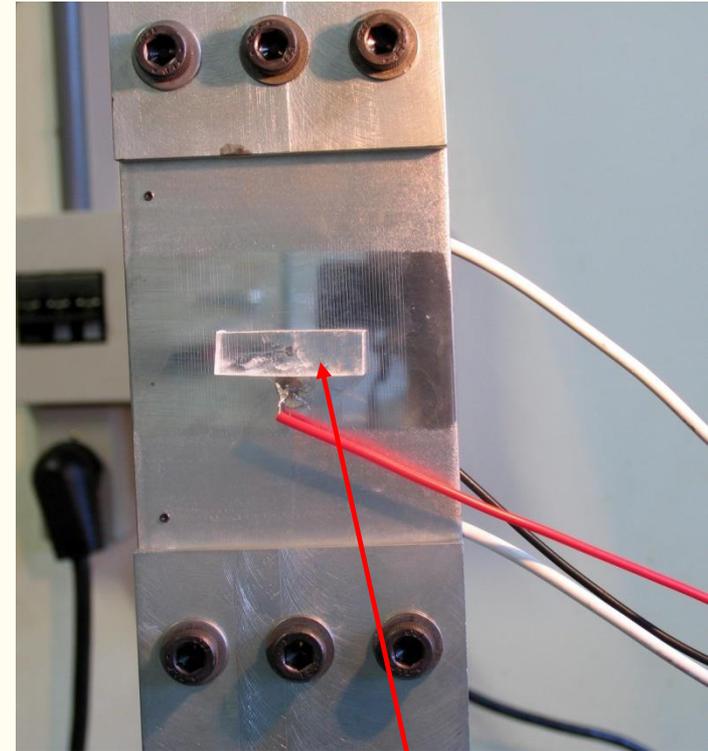
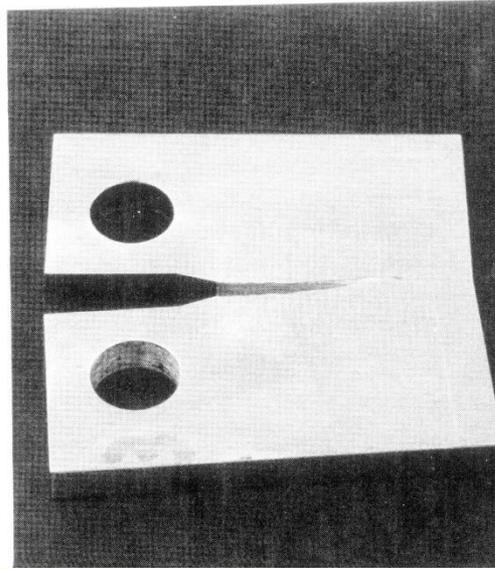
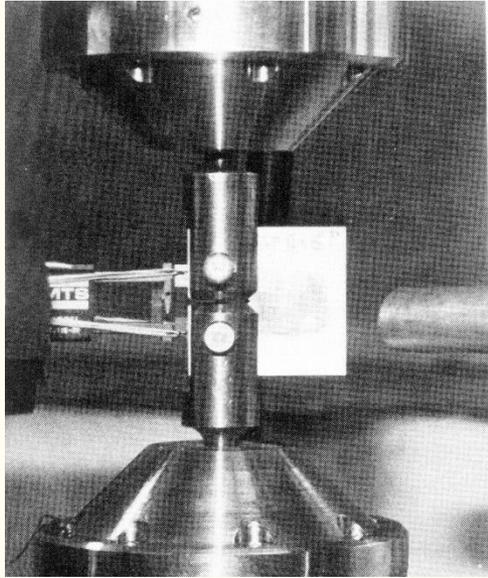


DCT



CCT OU M(T)

TÉCNICAS MAIS UTILIZADAS PARA DETERMINAÇÃO DE a



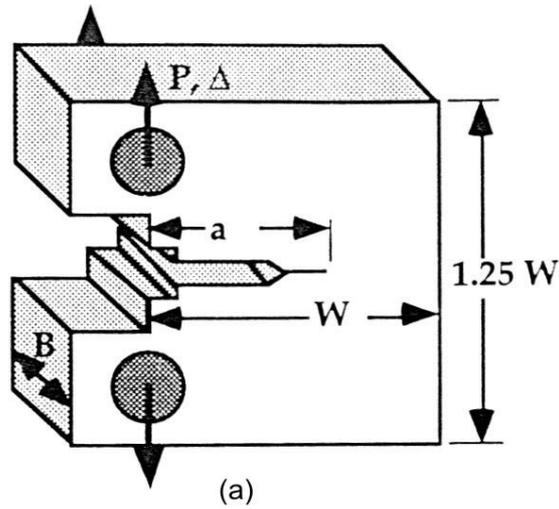
Compliance



Réplica de acetato

Queda de Potencial

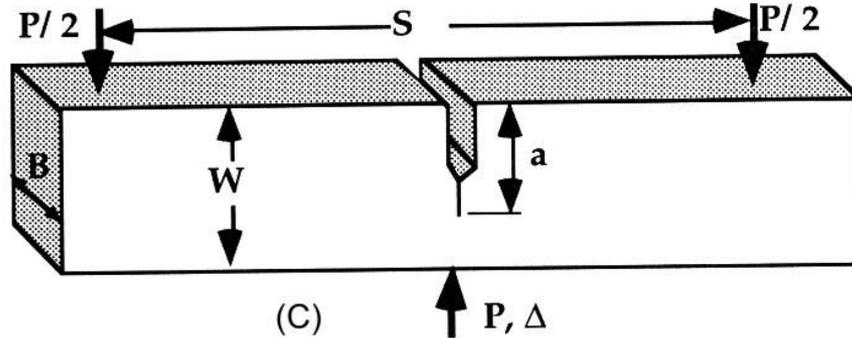
C(T)



$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} Y$$

$$Y = f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[0,886 + 4,64\left(\frac{a}{W}\right) - 13,32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$

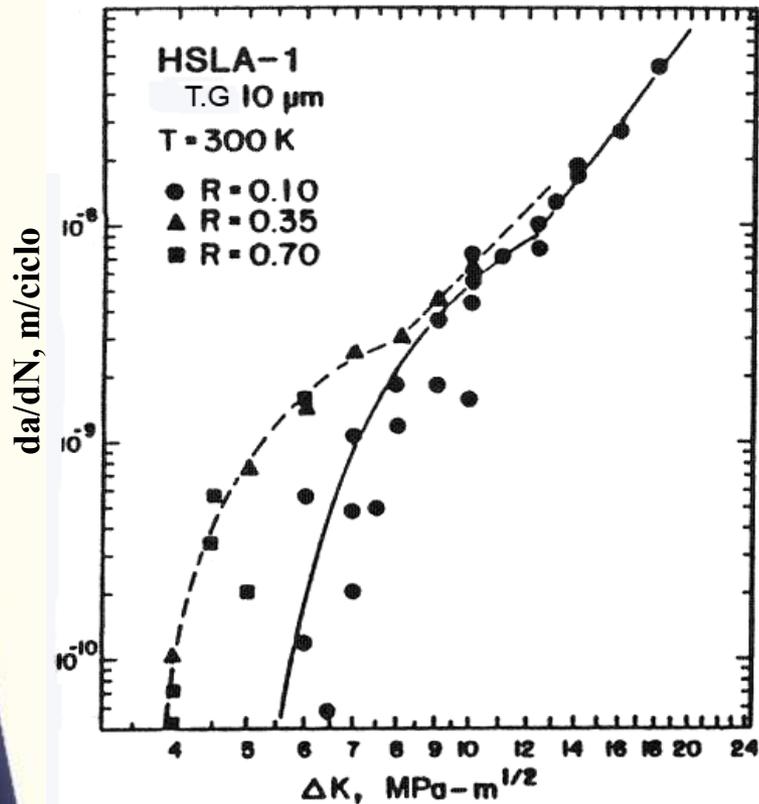
SEN(B)



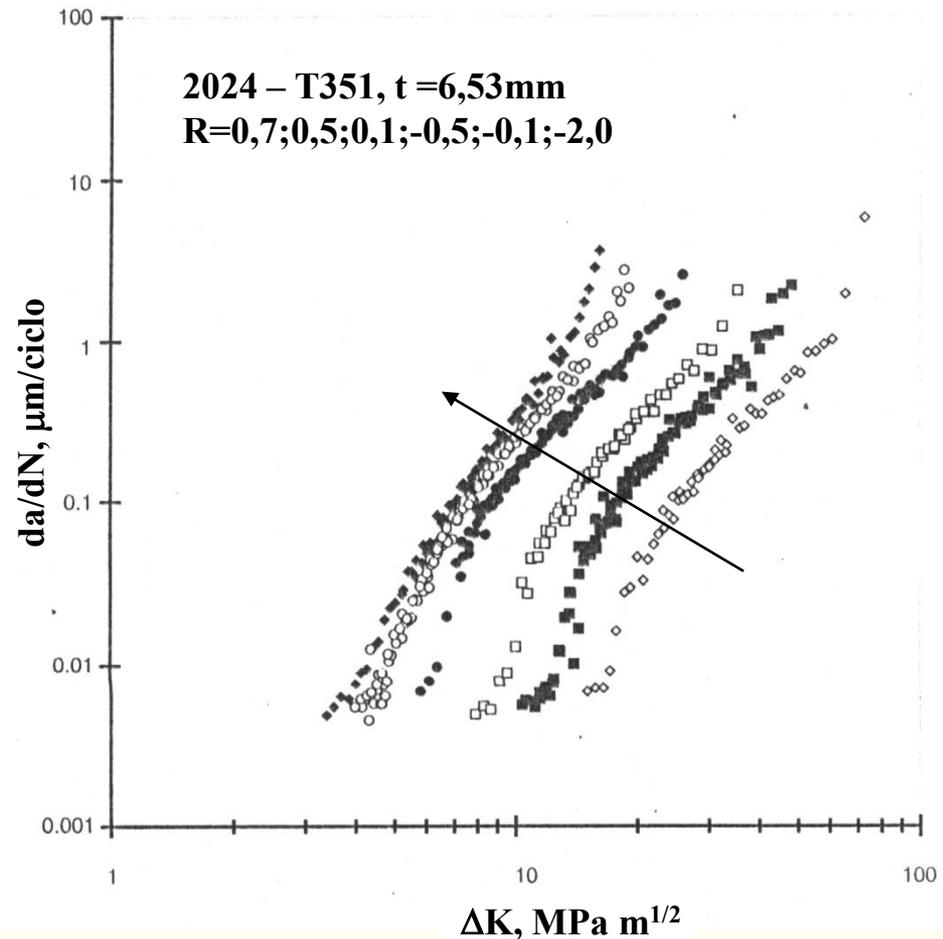
$$Y = f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left\{ 2,15 - 3,93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right\} \right]$$

Influência da Razão de Carga, R

No caso de ensaios conduzidos com $\Delta\sigma$ constante e diferentes R, a taxa de crescimento de trinca por fadiga pode depender de R.



Esaklul, K.A et al (1984)



A. F. Liu (1986)

Efeito de R no crescimento de trinca por fadiga

- Várias relações empíricas foram desenvolvidas para caracterizar o efeito de R nas curvas $da/dN \times \Delta K$.
- Relação original de Walker:

$$\bar{\Delta S} = S_{\max}^{1-\gamma} \Delta S^{\gamma}$$

$$\bar{\Delta S} = S_{\max} (1-R)^{\gamma} \longrightarrow \bar{\Delta K} = K_{\max} (1-R)^{\gamma}$$

- Onde γ é uma constante do material e $\bar{\Delta K}$ é a variação do fator de intensidade de tensão para o caso de $R=0$, que causa a mesma taxa de crescimento de trinca que o par K_{\max} e R . Considerando que:

$$\sigma_a = \frac{\Delta \sigma}{2} = \frac{\sigma_{\max}}{2} (1-R)$$

$$\Delta K = K_{\max} (1-R)$$

- Combinando as equações:

$$\bar{\Delta K} = \frac{\Delta K}{(1-R)^{1-\gamma}}$$

- Considere que C_0 é para o caso de $R=0$

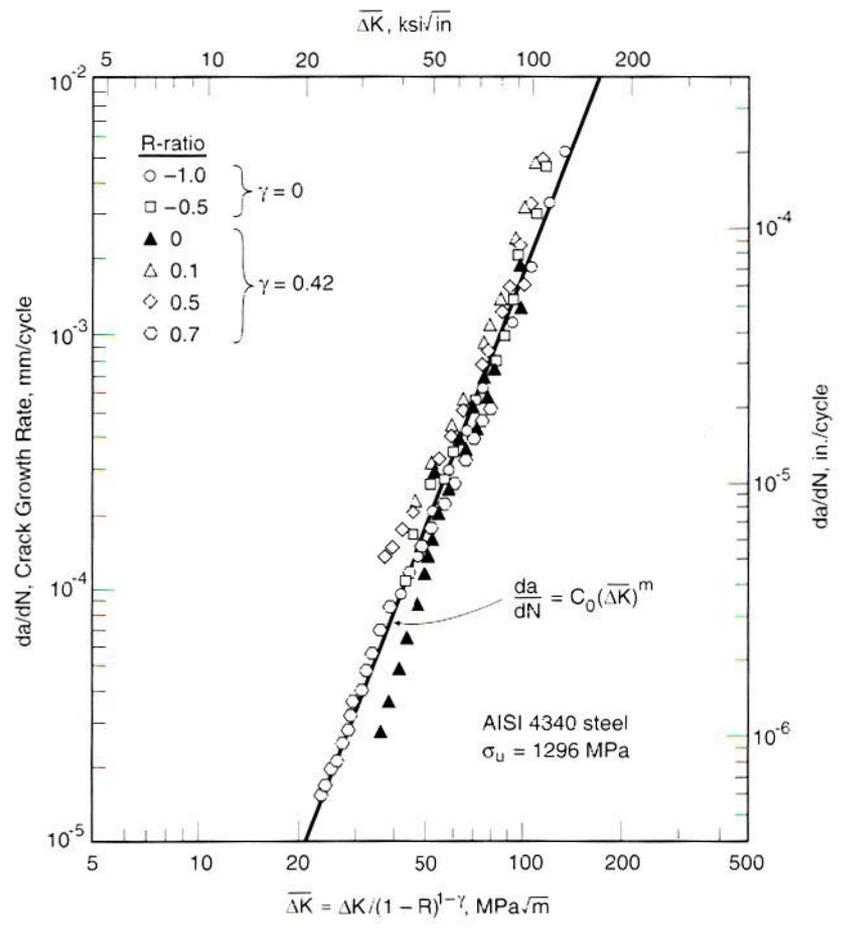
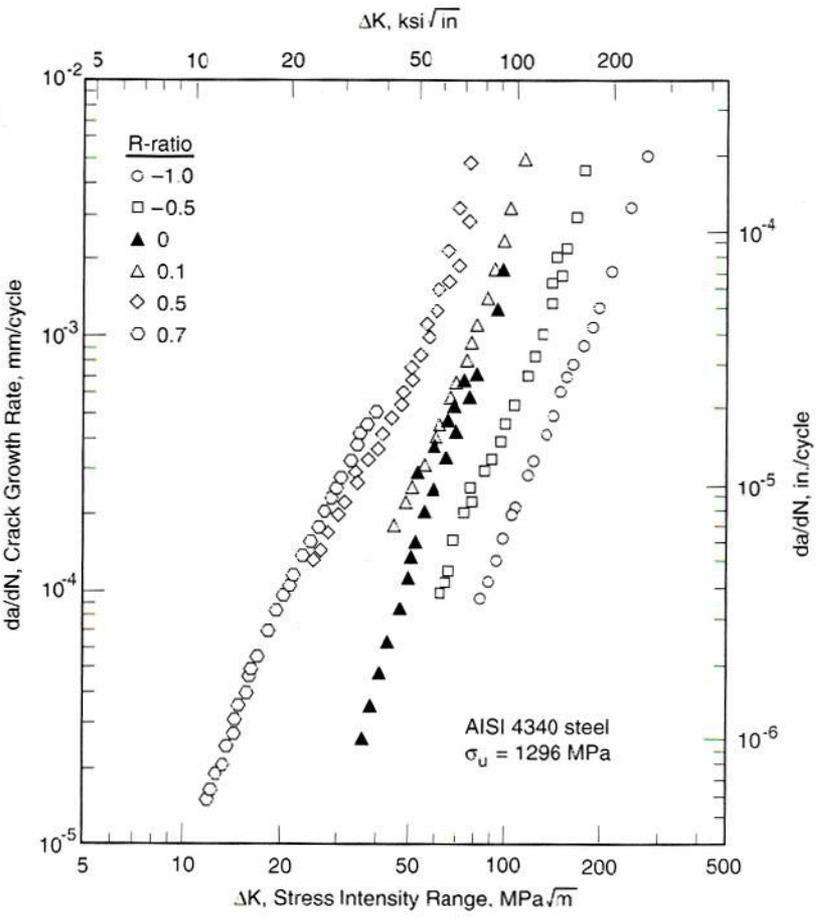
$$\frac{da}{dN} = C_0 \bar{\Delta K}^m \Leftrightarrow R = 0$$

- Considerando que $\bar{\Delta K} = \Delta K$ para o caso de $R=0$, podemos substituir o valor de ΔK na equação anterior:

$$\frac{da}{dN} = C_0 \left[\frac{\Delta K}{(1-R)^{1-\gamma}} \right]^m$$

- Esta equação representa uma família de retas (log-log), que são paralelas e com inclinação m .

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_0}{(1-R)^{m(1-\gamma)}} (\Delta K)^m \quad C = \frac{C_0}{(1-R)^{m(1-\gamma)}}$$



- Uma outra formulação foi apresentada por Forman:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_2 \Delta K^{m_2}}{(1-R)K_C - \Delta K} = \frac{C_2 \Delta K^{m_2}}{(1-R)(K_C - K_{\max})}$$

- Considerando que Q seja:

$$Q = \frac{da}{dN} [(1-R)K_C - \Delta K]$$

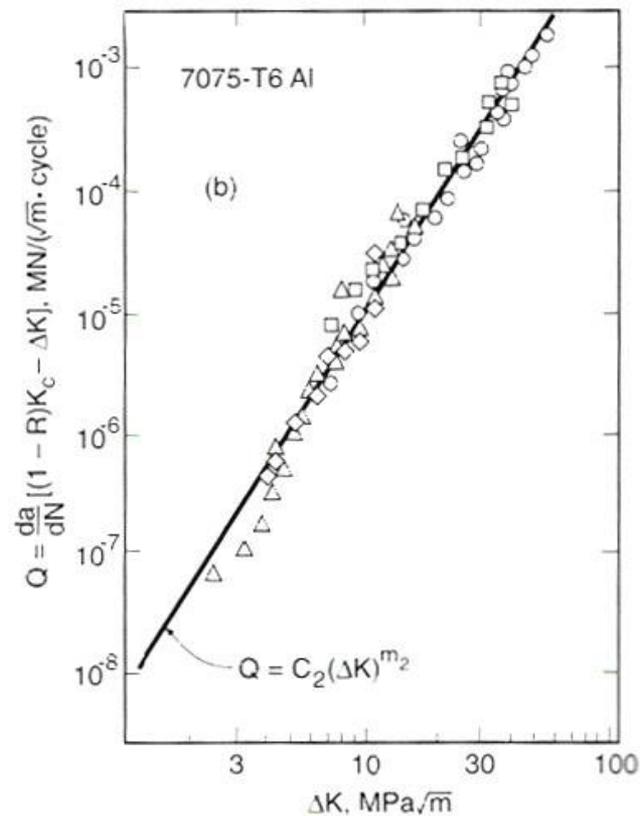
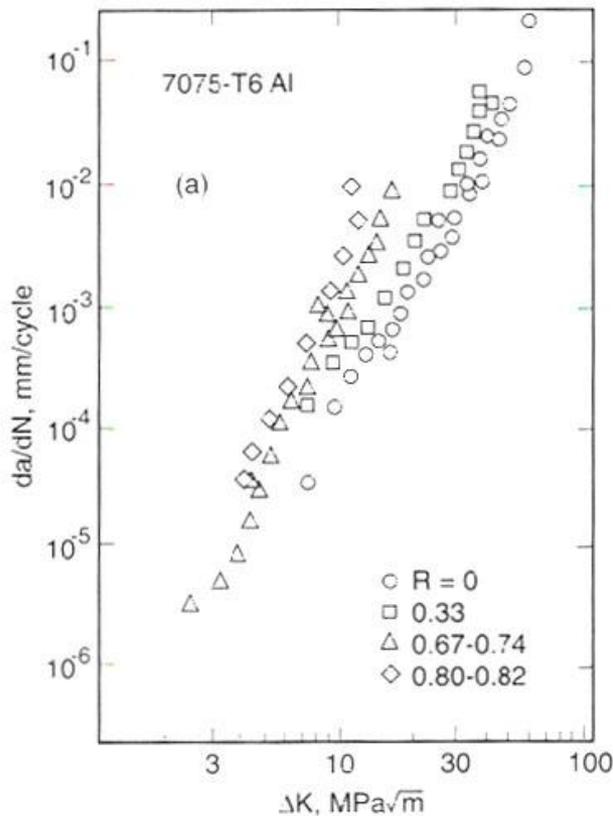


Table 11.2 Constants for the Walker Equation for Several Metals

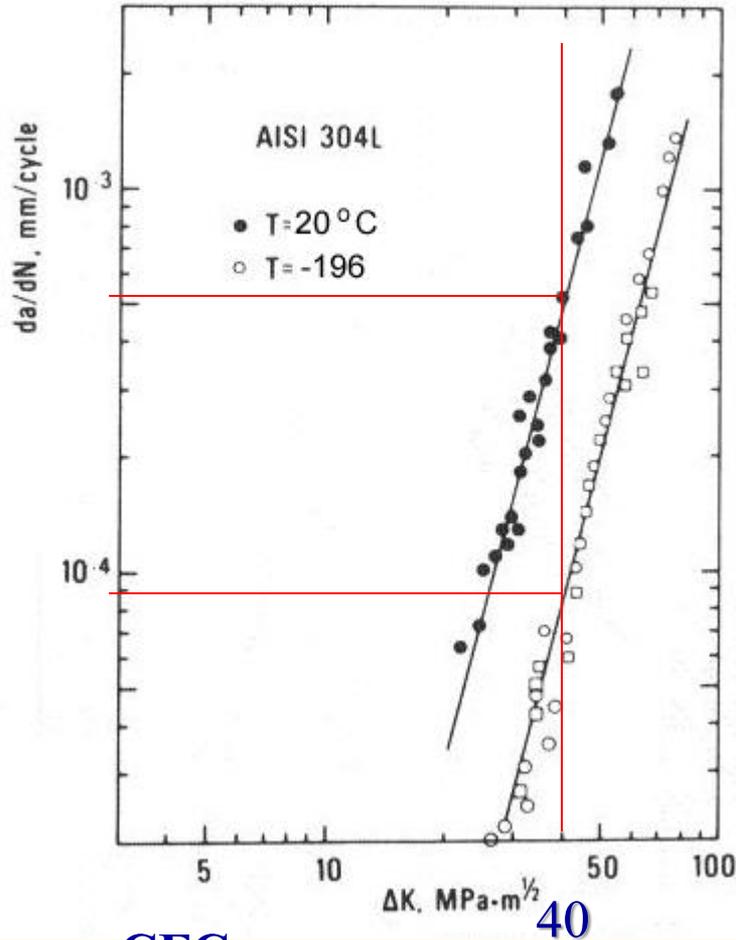
Material	Yield σ_o	Toughness K_{Ic}	Walker Equation				
			C_0	C_0	m	γ	γ
			mm/cycle $(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^m$	in/cycle $(\text{ksi}\sqrt{\text{in}})^m$		$(R \geq 0)$	$(R < 0)$
Man-Ten steel	363 (52.6)	200 ¹ (182)	3.28×10^{-9}	1.74×10^{-10}	3.13	0.928	0.220
RQC-100 steel	778 (113)	150 ¹ (136)	8.01×10^{-11}	4.71×10^{-12}	4.24	0.719	0
AISI 4340 steel ($\sigma_u = 1296$ MPa)	1255 (182)	130 (118)	5.11×10^{-10}	2.73×10^{-11}	3.24	0.420	0
17-4 PH steel (H1050, vac. melt)	1059 (154)	120 ¹ (109)	3.29×10^{-8}	1.63×10^{-9}	2.44	0.790	—
2024-T3 Al ²	353 (51.2)	34 (31)	1.42×10^{-8}	7.85×10^{-10}	3.59	0.680	—
7075-T6 Al ²	523 (75.9)	29 (26)	2.71×10^{-8}	1.51×10^{-9}	3.70	0.641	0

Notes: ¹Data not available; values given are estimates. ²Values for C_0 include a modification for use in [Hudson 69] of k , where $K = k\sqrt{\pi}$.

Sources: Original data or fitted constants in [Crooker 75], [Dennis 86], [Dowling 79c], [Hudson 69], and [MILHDBK 94] pp. 3–10 and 3–11.

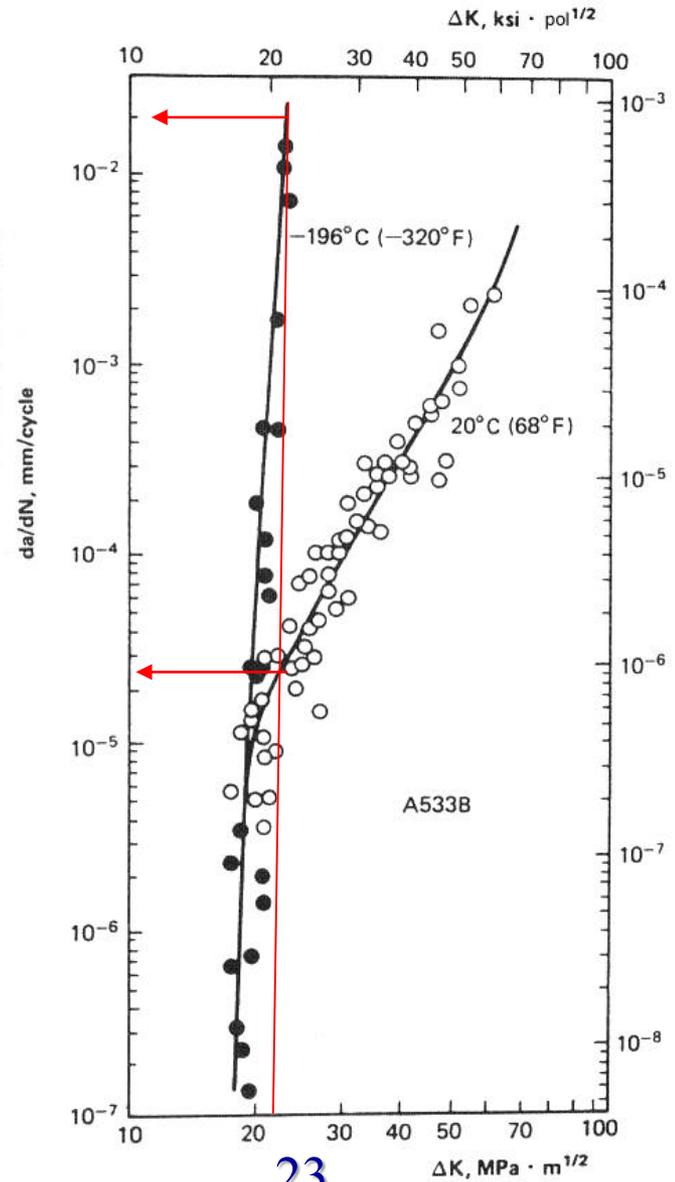
▪ TEMPERATURA

▪ Baixa Temperatura



CFC

40

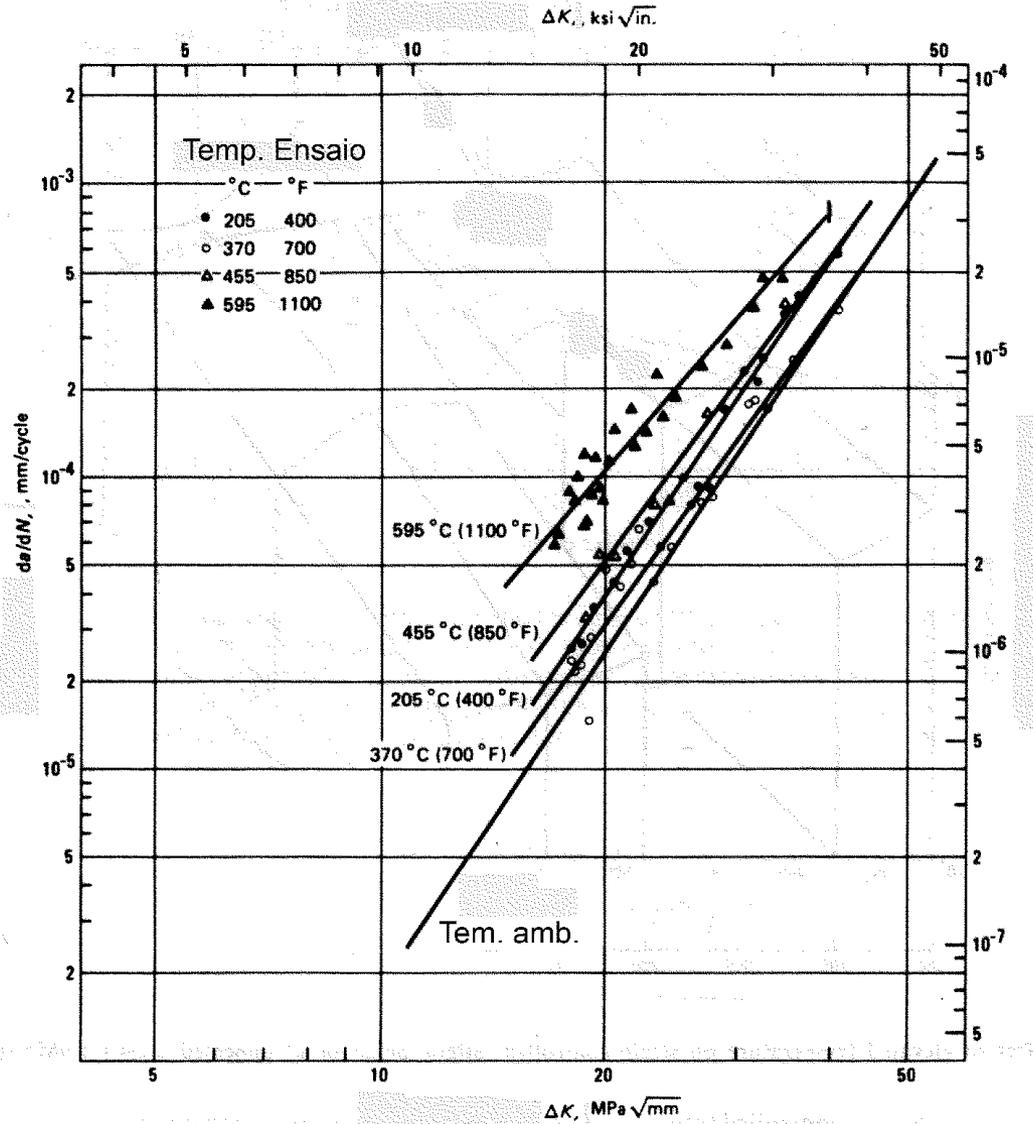


23

CCC

▪ TEMPERATURA

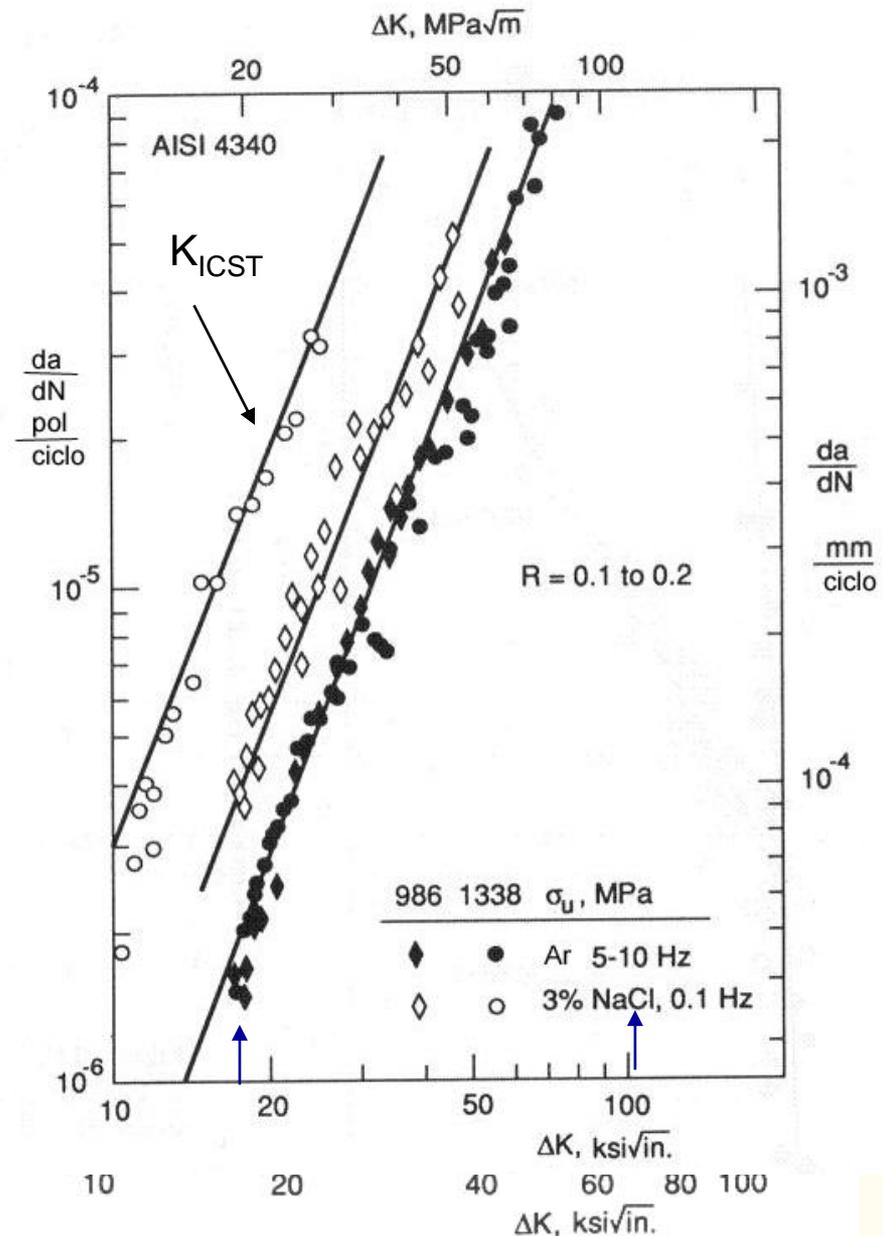
▪ Temperatura Elevada



Metals Handbook, V9

▪ MEIO

O termo corrosão fadiga é muitas vezes utilizado quando o crescimento de trinca acontece em meio corrosivo, sendo que, normalmente a taxa de crescimento de trinca é aumentada.



Aplicação: Metodologia de Tolerância ao Dano

- É capaz de prever a vida remanescente e quantificar os intervalos de inspeção.
- Como sugerido pelo nome, considera a existência de trincas ou descontinuidades cujo o tamanho estão abaixo do tamanho crítico.

$$K_{IC} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a_c} Y \Rightarrow a_c = \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{\max}} \right)^2 \frac{Y^2}{\pi}$$

- Tamanho tolerável $\rightarrow a_t = \beta \cdot a_c$ onde β leva em conta as incertezas sobre as tensões, tenacidade e da taxa da/dt. Deve ser escolhido de maneira que a da/dt é pequena, garantindo que um longo tempo será necessário para que a_t atinja a_c .
- Uso de END para controlar o processo de fratura, determinando o tamanho da trinca e definindo o intervalo de inspeções.
- Se trincas não são observadas deve ser adotado o tamanho do maior defeito que poderia estar presente, a_0 .

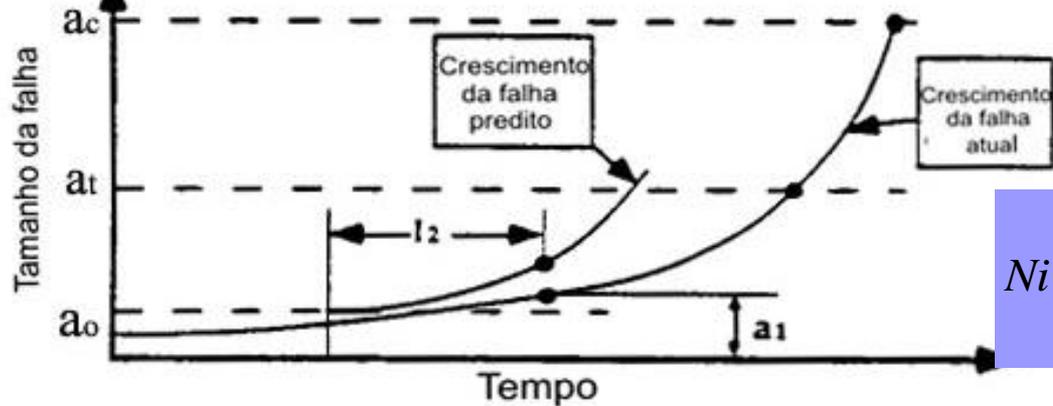


(a) Determinação do primeiro intervalo de inspeção, I_1

- 1) Obter a curva que represente a propagação da pior falha na estrutura $a \times N$ calculada pela MF estimando p/ uma pior falha (a_c), enquanto que a curva preditiva assume o tamanho inicial da falha como a_0 .
- 2) Obter o tempo consumido para crescer de a_0 ao tolerável da falha a_t ($a_t = \beta * a_c$)

$$N_i = \int_{a_0}^{a_t} \frac{da}{f(\Delta K, R)} \Rightarrow I_i < N_i$$

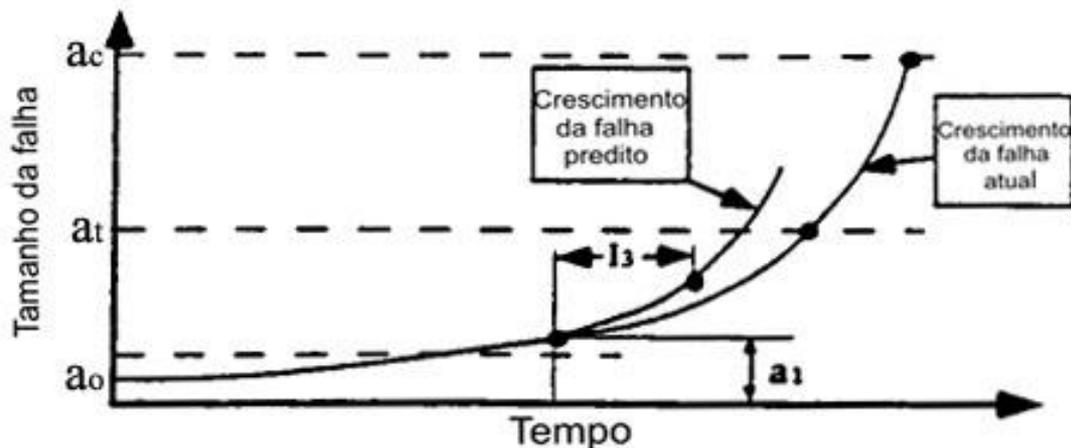
- 3) O intervalo I_1 deve ser menor do que este tempo para garantia de que a falha não cresça além de a_t antes da próxima inspeção.



$$N_i = \int_{a_1}^{a_i} \frac{da}{f(\Delta K, R)} \Rightarrow I_i < N_i$$

(b) Determinação do segundo intervalo de inspeção, I_2

- 1) Se nenhuma falha detectada for maior do que a_0 , o segundo intervalo de inspeção será $I_2 = I_1$.
- 2) Se na próxima inspeção o tamanho a_1 for maior do que a_0 , deve-se calcular a tempo para crescer de a_1 até a_t .
- 3) O próximo intervalo de inspeção, I_3 , pode ser menor do que I_2 e os intervalos seguintes de inspeção serão cada vez menores a medida que a vida da estrutura se aproxima do fim.



(c) Determinação do terceiro intervalo de inspeção, I_3

ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DE DEFEITOS

•Até o desenvolvimento da Mecânica da Fratura o estudo da resistência mecânica de peças e estruturas que pudessem apresentar defeitos, como no caso de estruturas soldadas, era feito tradicionalmente de uma forma bastante empírica, com base em extensos programas experimentais,.

•Com a metodologia desenvolvida pela Mecânica da Fratura tornou-se possível uma análise criteriosa, levando em conta os efeitos das falhas e defeitos muitas vezes provocados pelo processo de fabricação.

•No caso de estruturas de responsabilidade torna-se imperativo um exame integral do material para verificar a existência de eventuais defeitos.

•Na possibilidade de ser detectado algum defeito, são necessários critérios para decidir sobre a rejeição ou não do componente, bem como a eventual necessidade de reparo, quando este for possível.⁴³

PROCEDIMENTO GERAL

Tendo sido detectado um defeito em uma estrutura de responsabilidade, por meio de um ensaio não destrutivo, o procedimento discutido a seguir é usado na análise sobre o risco que a presença do defeito apresenta. O procedimento está baseado na teoria e metodologia da Mecânica da Fratura, sendo formado por uma série de passos, que levam a uma quantificação que permite uma tomada de decisão criteriosa, sobre a continuidade do uso, ou não, do componente em análise.

PASSO 1. Definição geometria da trinca.

A partir da geometria do defeito indicado, deve-se definir uma trinca equivalente, idealizada, de modo a permitir a aplicação da Mecânica da Fratura. Normalmente adota-se uma trinca elíptica, quando interna, ou semi-elíptica quando junto à superfície livre, que sobrepuje a indicação do defeito.

A literatura apresenta várias configurações de indicações, com as correspondentes geometrias de trincas equivalentes, conforme comentado anteriormente.

PASSO 2. Determinação do fator de intensidade de tensão.

Uma vez definida a geometria da trinca, é possível determinar o fator de intensidade de tensão, a partir dos fatores de correção quanto à forma da trinca, bem como do carregamento nominal que atue. Com a máxima carga esperada em serviço calcula-se $K_{Imáx}$.

PASSO 3. Tenacidade à fratura do material.

A tenacidade à fratura para o ponto onde o defeito está localizado é fundamental para avaliar o risco de ruptura frágil do componente. A tenacidade deve ser compatível com o material, o tratamento térmico, as condições ambientais (temperatura e meio), a espessura do componente, a orientação relativa da trinca nos planos de laminação do material, etc.

PASSO 4. Verificação quanto à ruptura estática.

Sendo K_C a tenacidade à fratura pertinente ao ponto com defeito, deve-se verificar a possibilidade de ruptura estática da peça. Tal ocorre para $K_{Imáx} > K_C$. Se $K_{Imáx} < K_C$ então o componente não irá romper quando da primeira aplicação de carga. Como critério de aceitação do defeito pode-se adotar: $K_{Imáx} < 0,7 K_C$

PASSO 5. Propagação por corrosão sob tensão.

Se ocorrer que a combinação material - meio ambiente propicie a corrosão sob tensão, então podemos ter uma propagação do defeito mesmo sob a ação de uma carga estática. Se o defeito for interno ao material, o meio ambiente não vai atacar o material das bordas do defeito.

Para $K_{I_{\text{máx}}} > K_{\text{ISCC}}$ ocorre a propagação por corrosão sob tensão, onde K_{ISCC} é o limite de sensibilidade para que ocorra o ataque do meio ambiente ao material, (Stress Corrosion Cracking). O seu valor depende especificamente da combinação material - meio ambiente. Em geral, quando existe a possibilidade de corrosão sob tensão, não se admite a existência de trincas superficiais, em contacto com o meio.

PASSO 6. Flutuação do fator de intensidade de tensão.

Se no passo 4 não foi detectada a ruptura estática do componente e a carga aplicada varia ao longo do tempo, deve ser verificada a possibilidade de propagação por fadiga do defeito. Para cada flutuação de tensão, $\Delta\sigma_i$, calcular

$$\Delta K_i = f(\Delta\sigma_i) = Y a_i \Delta\sigma \pi$$

que é a variação, durante um ciclo de carga, do fator de intensidade de tensão.

PASSO 7. Nível de sensibilidade.

Para o meio ambiente, material e coeficiente de simetria do ciclo, determinar o nível de sensibilidade para propagação por fadiga, ΔK_0 .

PASSO 8. Estacionaricidade do defeito.

Verificar para cada ΔK_i a desigualdade $\Delta K_i < \Delta K_0$

Se tal for satisfeita para todos os níveis de flutuação de tensão, então a trinca fica estacionária, ou seja, o defeito não se propaga por fadiga. Em caso contrário, ocorrerá o crescimento da trinca nas flutuações de tensão em que $\Delta K_i > \Delta K_0$.

PASSO 9. Tamanho crítico do defeito.

Ocorrendo a propagação por fadiga, o defeito vai crescer até atingir o tamanho crítico, para ruptura estática. Este tamanho crítico é necessário para estabelecer a vida de propagação de fadiga, por intermédio da integração da taxa de crescimento da trinca.

$$a_c = (1/\pi) (K_C / \sigma_{MÁX} Y)^2$$

O cálculo exato de a_c não chega a ser muito importante, devido à grande velocidade de crescimento da trinca nos últimos 5% da vida de propagação.

PASSO 10. Determinação da vida.

Se no passo 8 não ficou definida a estacionaricidade da trinca, para todas as flutuações de tensão, ocorrerá a propagação por fadiga. A vida de propagação é obtida pela integração da taxa de propagação entre os tamanhos a_1 (indicação do defeito) e a_2 (tamanho crítico ou fração deste). Colocando a taxa de propagação na forma:

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

Vem

$$\int_{N_1}^{N_2} dN = \int_{a_1}^{a_2} (C (\Delta \sigma Y \sqrt{\pi a})^m)^{-1} da$$

Dependendo do tipo de sollicitação e do comportamento de Y , como função do tamanho da trinca, temos várias possibilidades:

$$N_{12} = (C (Y \Delta \sigma \sqrt{\pi})^m)^{-1} \frac{a_2^{1-m/2} - a_1^{1-m/2}}{1 - m/2}$$

Para $Y \Delta \sigma$ constante durante toda a vida do componente, é possível realizar a integral analiticamente, que fornece, para $m \neq 2$:

$$N_{12} = (C (Y \Delta \sigma \sqrt{\pi})^2)^{-1} \ln a_2/a_1$$

Se Y variar, a integração deve ser feita de modo discreto, numericamente. Isto é feito arbitrando acréscimos Δa no tamanho da trinca.

$$\begin{array}{l}
 a_i \Rightarrow Y_i \Rightarrow \Delta K_i \Rightarrow \Delta a \Rightarrow a_j \Rightarrow \Delta N_i \\
 a_j \Rightarrow Y_j \Rightarrow \Delta K_j \Rightarrow \Delta a \Rightarrow a_k \Rightarrow \Delta N_j
 \end{array}$$

Se $\Delta\sigma$ for variável em blocos, com duração N ($\Delta\sigma_i$) para o nível de tensão $\Delta\sigma_i$, o processo é como esquematizado,

$$\begin{array}{l}
 a_i \Rightarrow Y_i \Rightarrow \Delta K_i \Rightarrow N(\Delta\sigma_i) \Rightarrow \Delta a \Rightarrow a_j \\
 a_j \Rightarrow Y_j \Rightarrow \Delta K_j \Rightarrow N(\Delta\sigma_j) \Rightarrow \Delta a \Rightarrow a_k
 \end{array}$$

Para carga aleatória, a integração deve ser feita ciclo a ciclo, $N = 1$.

$$\begin{array}{l}
 a_i \Rightarrow \Delta\sigma \Rightarrow Y_i \Rightarrow \Delta K_i \Rightarrow \Delta a \\
 a_j \Rightarrow \Delta\sigma \Rightarrow Y_j \Rightarrow \Delta K_j \Rightarrow \Delta a
 \end{array}$$

PASSO 11. Critério de segurança.

O passo final é avaliar, a partir dos resultados obtidos anteriormente, se os defeitos detectados comprometem ou não a estrutura.

A decisão é muitas vezes extremamente difícil, pois na maioria dos casos não estão disponíveis todas as informações e dados que são necessários, na forma desejada. Assim, nestas situações são feitas aproximações ou estimativas com casos semelhantes disponíveis na literatura ou de experiências anteriores.

De um modo, ou de outro, a precisão da análise fica comprometida, sendo que os resultados finais devem ser considerados como uma orientação da ordem de grandeza e nunca como um valor numérico exato, absoluto.

Outro aspecto a considerar é a dispersão das propriedades do material, entre o corpo de prova usado nos ensaios e o material real da estrutura, ou mesmo ainda, a heterogeneidade do material dentro da própria estrutura.

As cargas que agem na estrutura podem também ser diversas das usadas na análise. Assim, o critério para aceitar ou não o componente estrutural com uma indicação de defeito deve ponderar todos os aspectos acima citados, bem como mais alguns eventuais, aplicáveis ao caso em particular. maiores.