

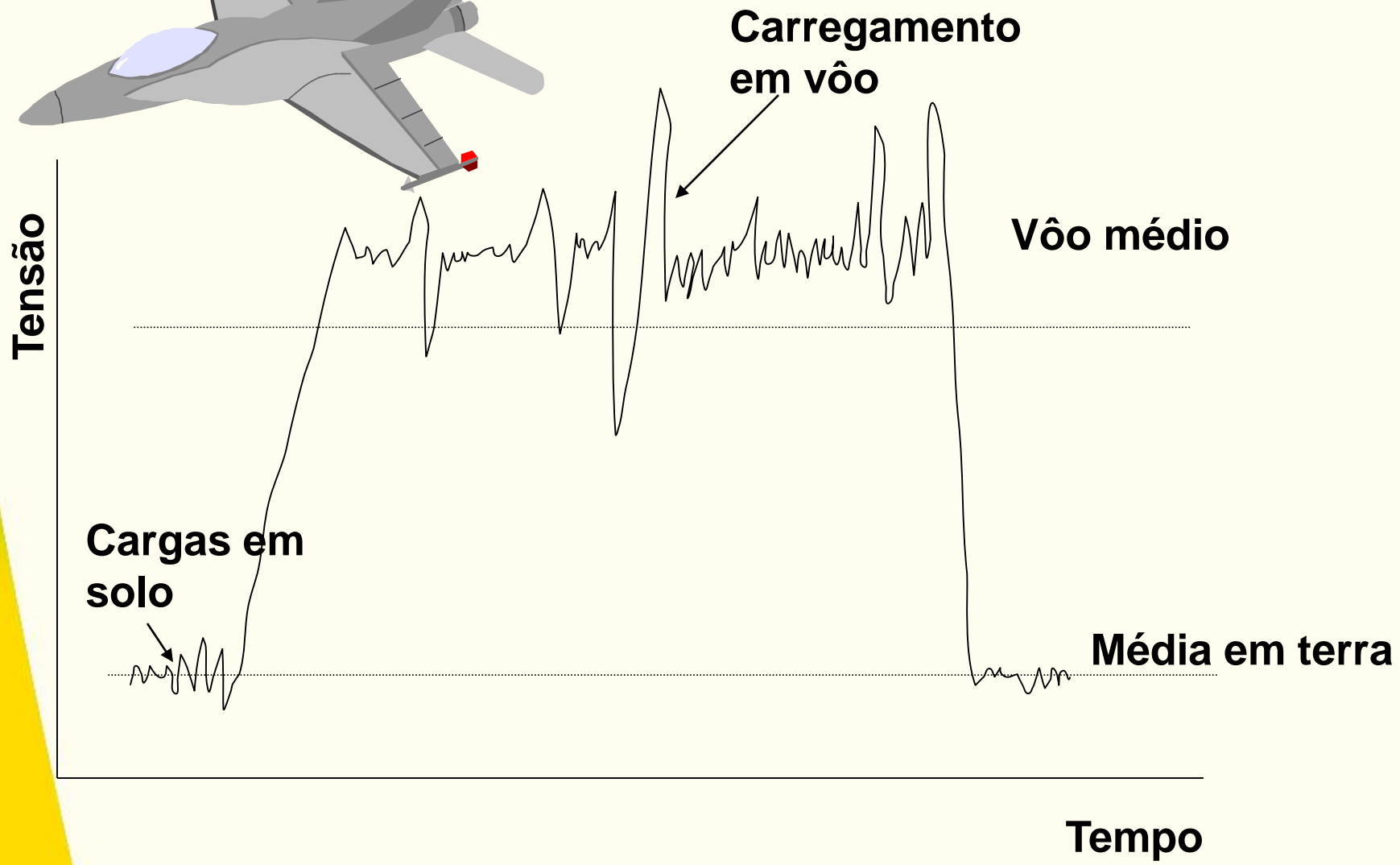
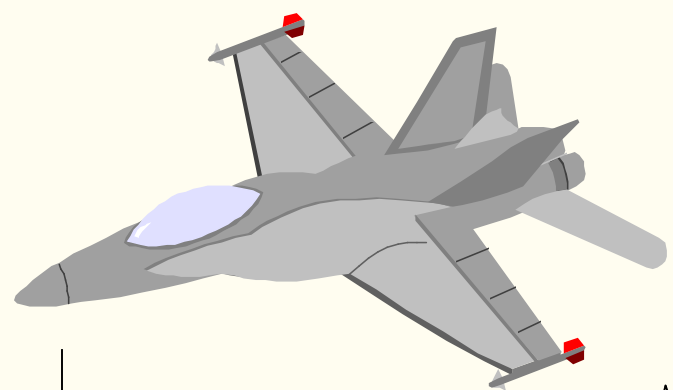


Carregamentos de Amplitudes Variável

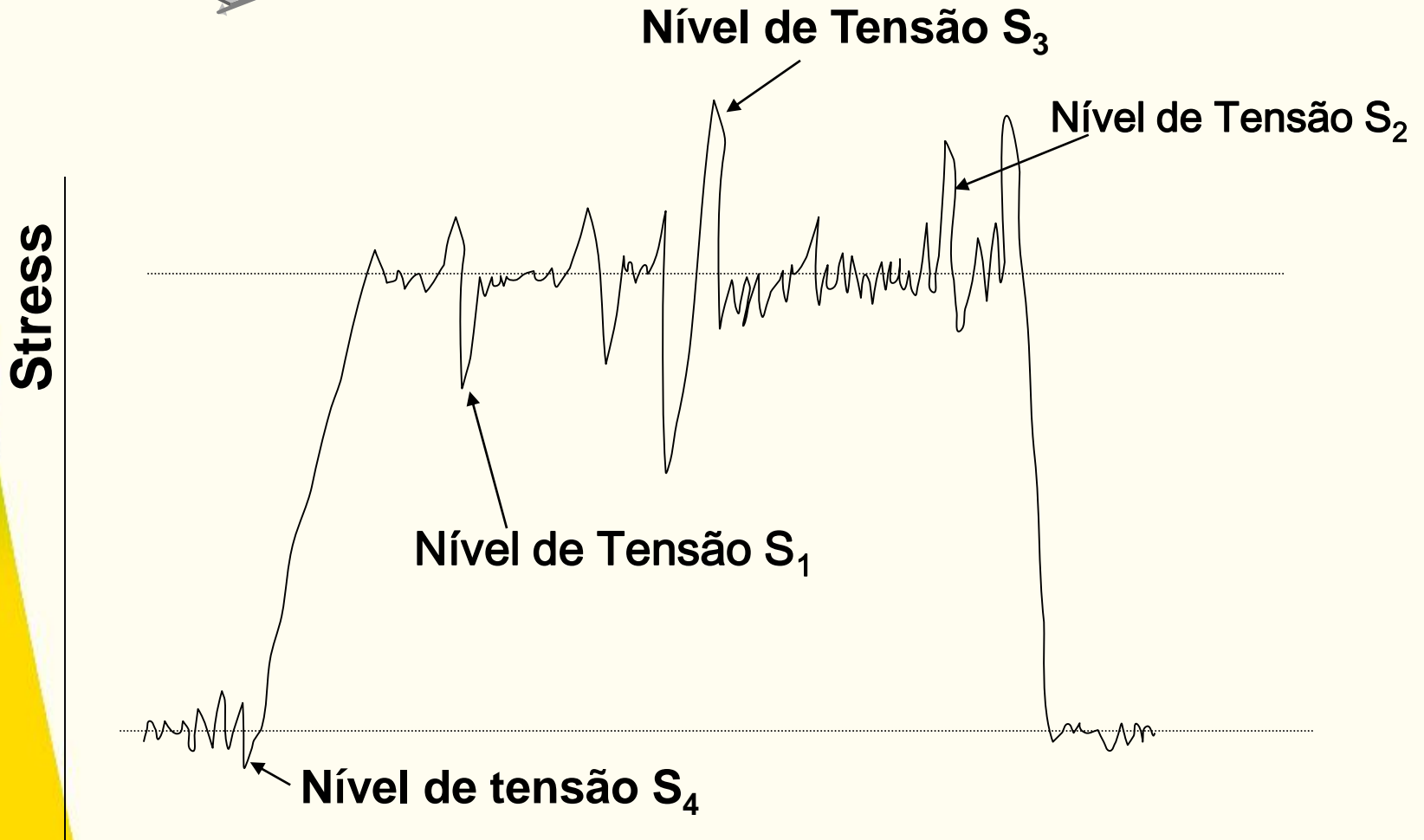
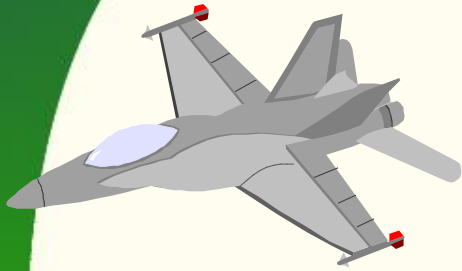
Waldek Wladimir Bose Filho, PhD

**NEMAF – Núcleo de Ensaio de
Materiais e Análise de Falhas**

Repetição ou Variação de Carga

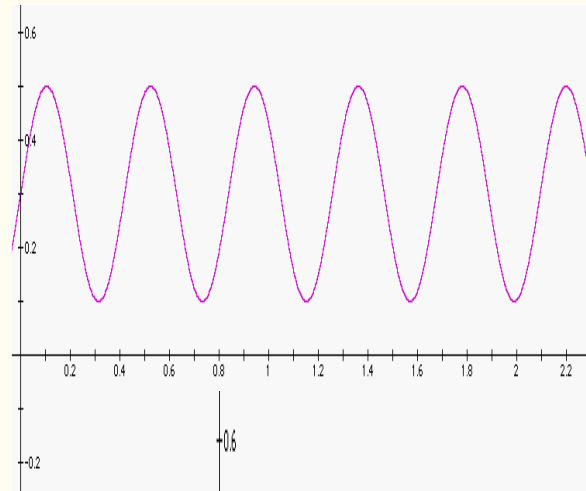


Estudo do Espectro de Tensão Aplicada



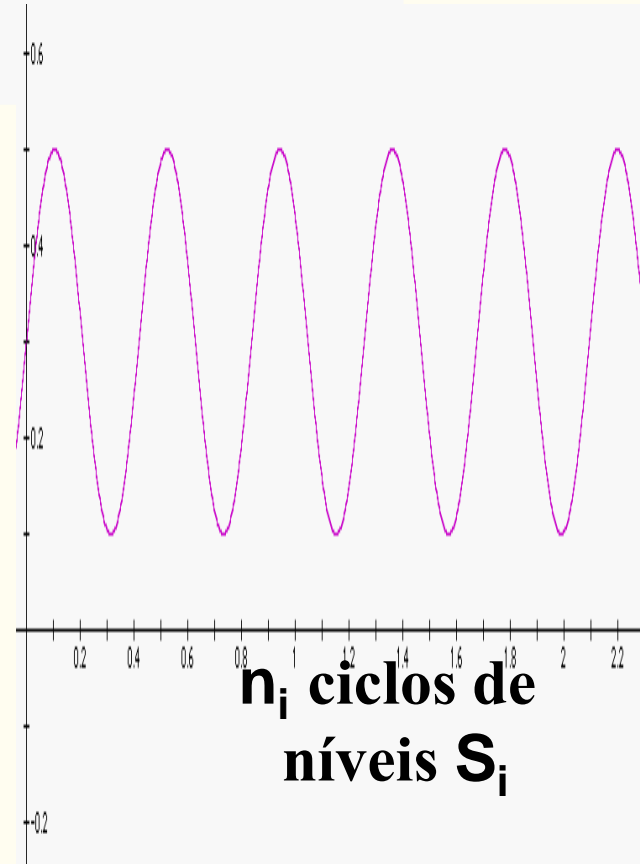
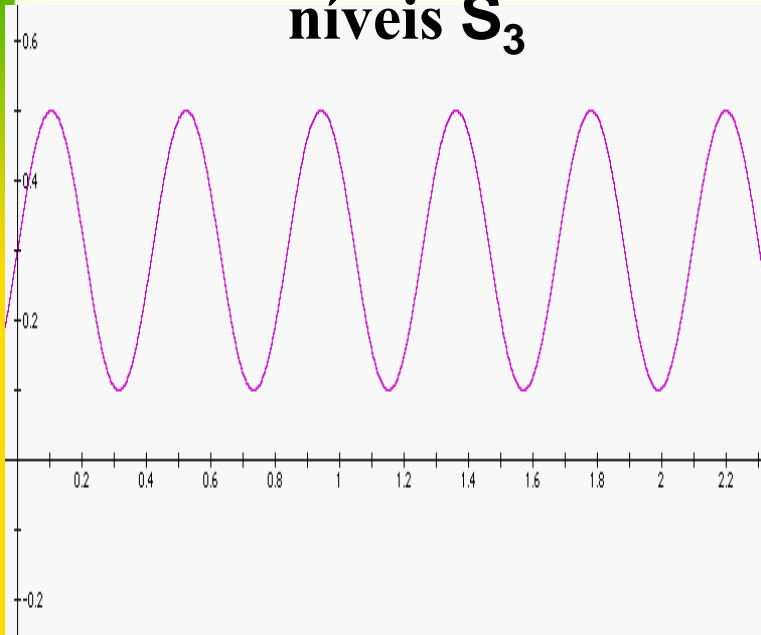
Frequencia dos Níveis de tensão Aplicados

n_1 Ciclos de níveis S_1



n_2 ciclos de níveis S_2

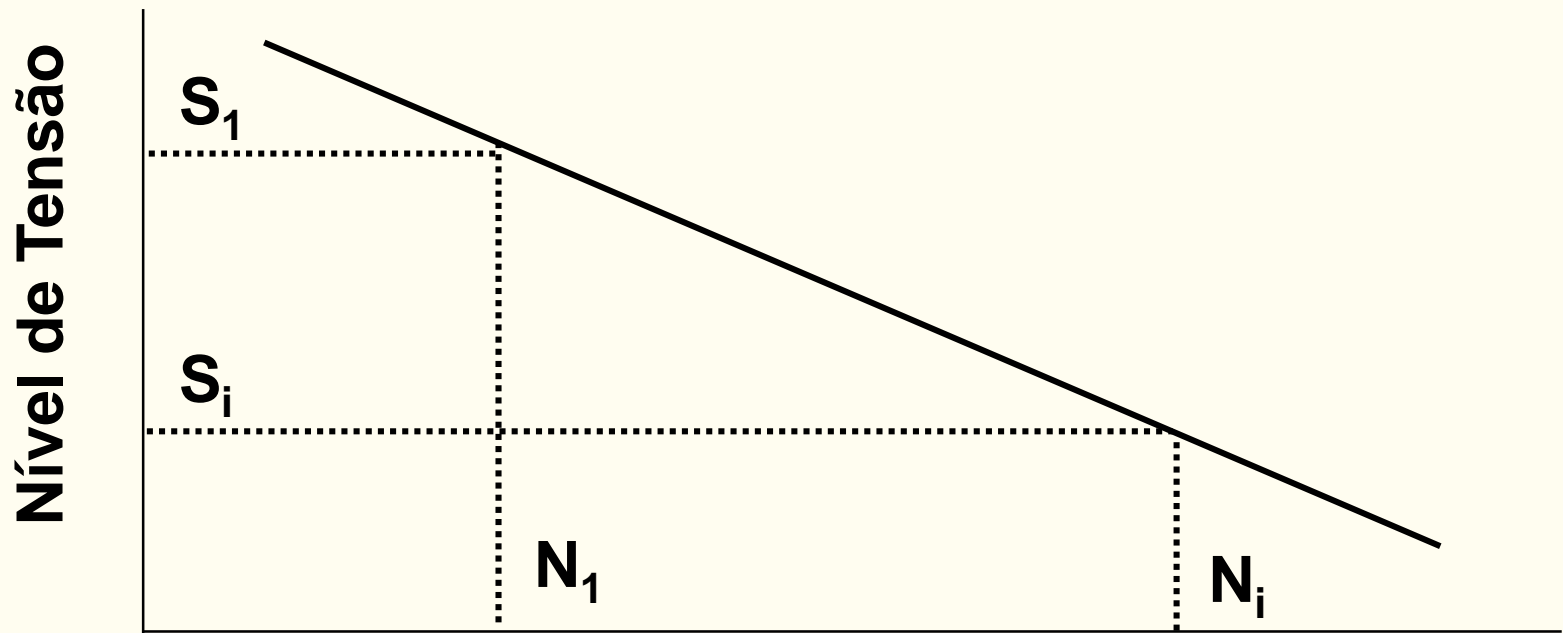
n_3 ciclos de níveis S_3



n_i ciclos de níveis S_i

Dados S - N para vários níveis de tensão

N_1 Números de ciclos para falhar se o componente é submetido a somente S_1 e assim por diante, sendo N_i Números de ciclos para falhar se o componente é submetido a somente S_i



Núm. De ciclos para falhar, N

Assim, a fração de dano causado por S_i em 01 ciclo

$$D_i = \frac{1}{N_i}$$

O dano acumulado total devido a uma história de tensão aplicada

$$\begin{aligned} D &= \sum_1^n D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \\ &= \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_k}{N_k} \end{aligned}$$

A falha irá acontecer se

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \geq 1$$

**Regra de Palmgren – Miner
ou regra de Miner**

Comentários sobre a regra de MINER:

- **Modelo linear de dano acumulado.**
- **Muito fácil de usar e implementar.**

- **Não leva em conta a seqüência de aplicação de cargas ou tensões**

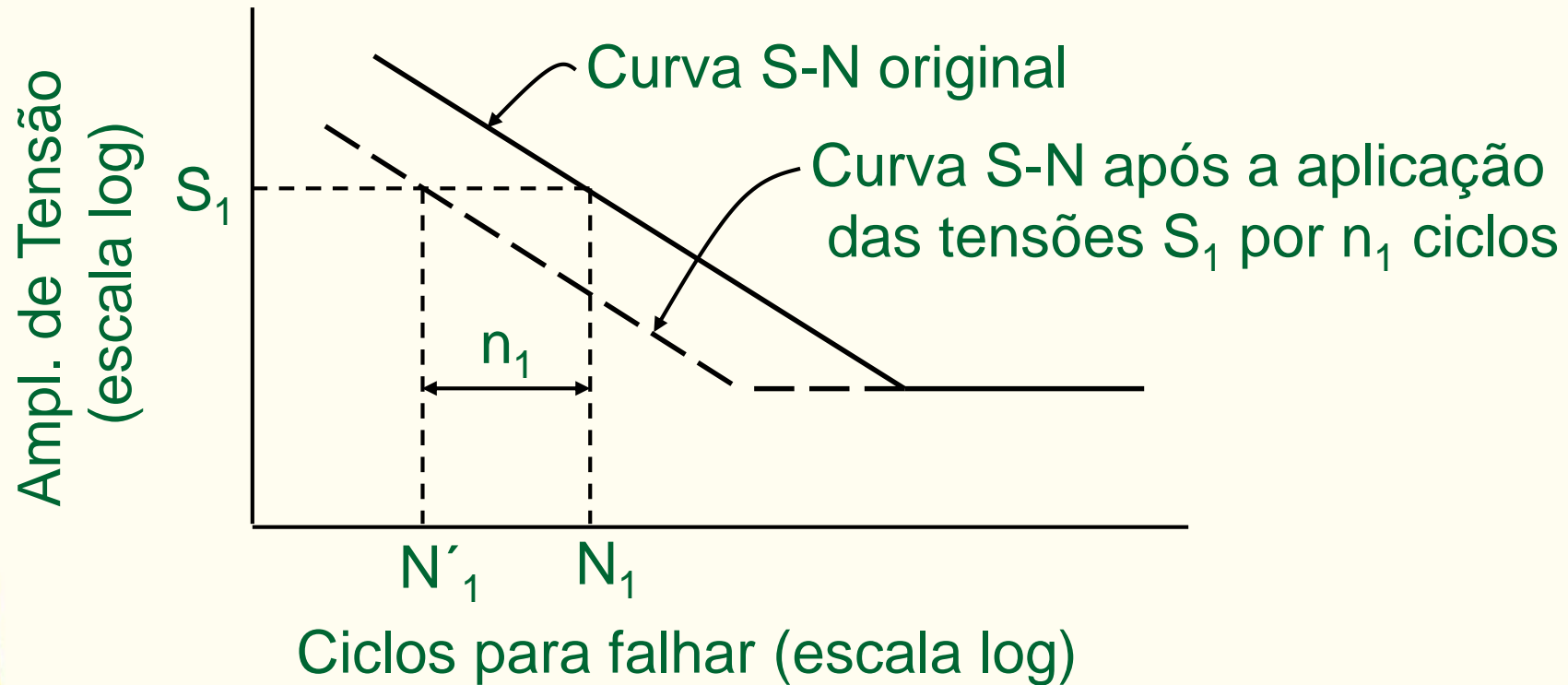
Exemplo: A regra de Miner prediz o mesmo dano para seqüências de alta para baixa tensões e de baixa para alta tensões. Na práticas estas histórias de carregamentos apresentam diferentes danos.

- **Prediz que a taxa de dano acumulado é independente do nível de tensão.**

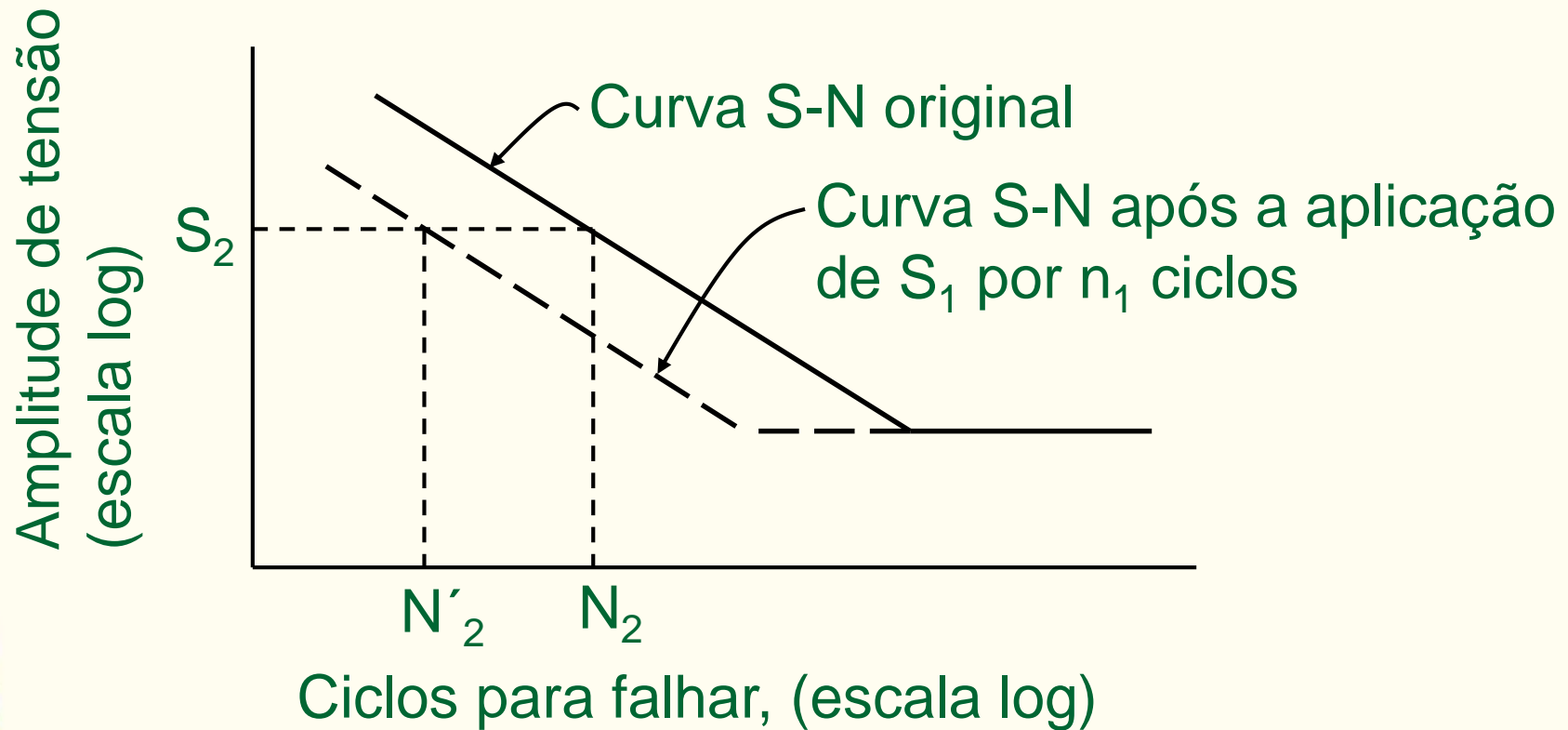
Em altas amplitudes de deformação a nucleação de tricas iniciarão em poucos ciclos e em baixas amplitudes de deformação quase que toda vida é gasta para nucleação.

Efeitos da regra de Miner sobre a curva S-N

$N'_1 = (N_1 - n_1)$ é o novo valor de vida no nível S_1 após ter sido submetido a n_1 ciclos.



Se o nível S_2 é aplicado, o componente falhará em N'_2 ciclos, ao invés de N_2 .



Implementação da regra de Miner

- **Estabeleça a história de carregamento/tensão para a estrutura.**
- **Espectro de tensão:**

Nível de tensão (Tensão alternada e média) versus o número de ocorrências em uma unidade de operação (tal como dia, hora, ano, vôos, etc.)
- **Analise a geometria do componente para K_t , etc.**
- **Obtenha os dados S-N para o material correspondente ao K_t e níveis de tensão.**
- **Calcule o dano acumulado por unidade de operação usando a regra de Miner.**

Exemplo da Implementação da regra de Miner

Um componente aeronáutico, sem entalhe e previamente sem tensões, fabricado de liga de Al é submetido a uma tensão alternada de 207 MPa e uma tensão média variável como segue:

$\sigma_m = 0$ para 10 ciclos/vôo

$\sigma_m = 69$ MPa para 6 ciclos/vôo

$\sigma_m = 138$ MPa para 3 ciclos/vôo

$\sigma_m = 207$ MPa para 0,2 “

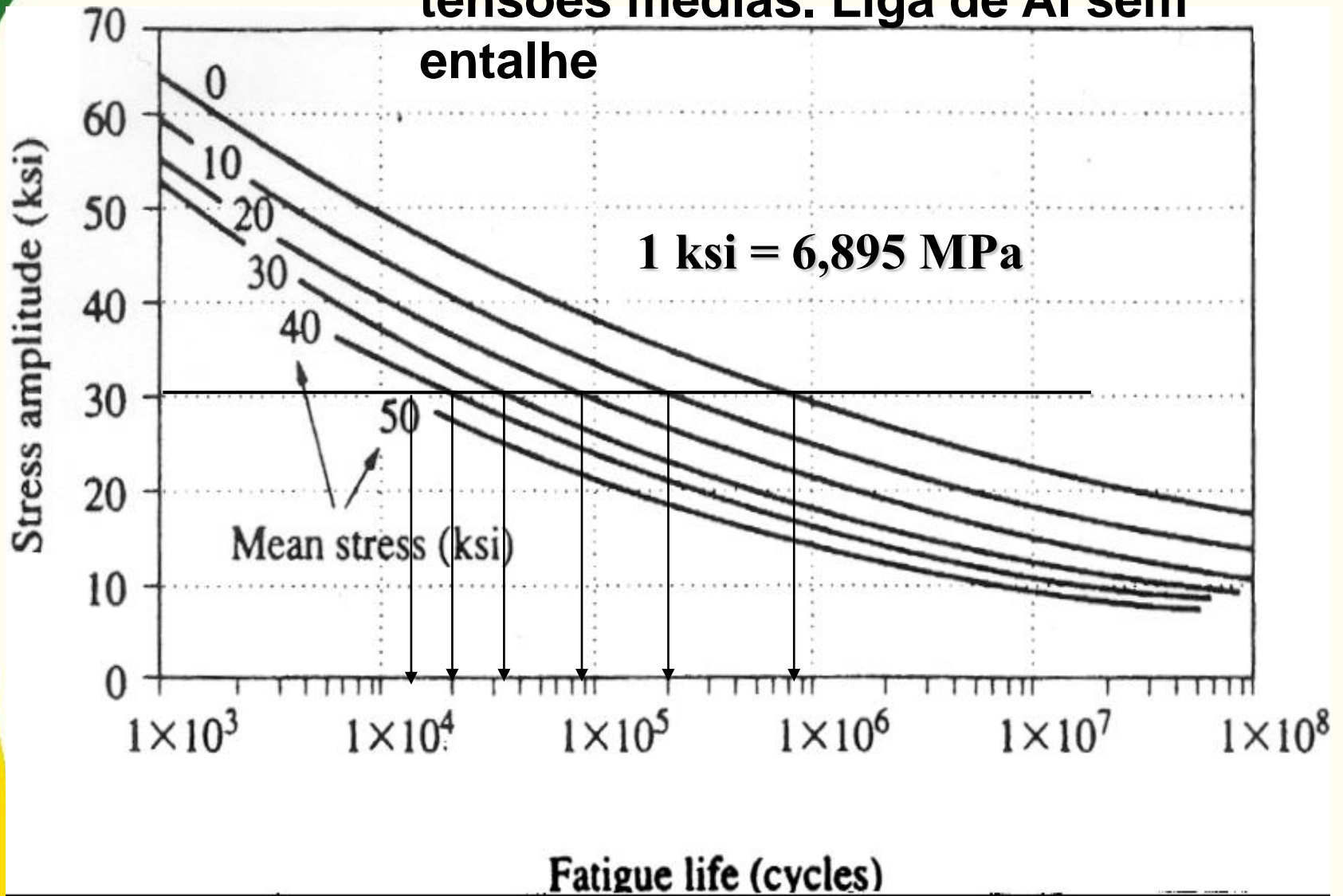
$\sigma_m = 276$ MPa para 0,1 “

$\sigma_m = 345$ MPa for 0,05 “

Os dados S-N para o material sem entalhe é dado no diagrama A-M.

- a) Estime a vida em fadiga em número de vôos.
- b) Usando um fator de espalhamento de 3 (coef. de segurança), estime a vida segura em vôos se a média de vôo é de 45 min.

Diagrama S - N para diferentes tensões médias. Liga de Al sem entalhe



Da curva S-N

Solução:

| σ_a MPa | σ_m MPa | Nº. of Ocorr. por voô, n | Nº. de ciclos para falhar, N | [n/N] (10^6) - |
|-------------------|-------------------|------------------------------------|--|-----------------------|
| 207(30) | 0 | 10 | 955.000 | 10,4712 |
| 207(30) | 69 (10) | 6 | 272.000 | 22,0588 |
| 207(30) | 138 (20) | 3 | 103.000 | 29,1262 |
| 207(30) | 207(30) | 0,2 | 46.400 | 4,31034 |
| 207(30) | 276(40) | 0,1 | 23.700 | 4,21941 |
| 207(30) | 345(50) | 0,05 | 13.200 | 3,78788 |
| $\Sigma(n/N)$ | | | | 73,9738 |

A partir do espectro de tensões

Continuação:

Dano por vôo, $D_f = \sum(n/N) = 73,9738 \times 10^{-6}$

Dano Total na vida, $D = (\text{Dano por vôo}) \times (\text{Núm. de vôos})$

Falha ocorre quando $D = 1$

$D = 1 \Rightarrow = 73,9738 \times 10^{-6} \times (\text{Num. de vôos}) = 1$

Num. de vôos estimados para falhar = 13.515

Num. de vôos seguros = 13.515/(fator de espalhamento)

Num. de vôos seguros = 4.505

Num de horas de vôos seguros = 4.505 (45/60)= 3.378 Hr.

Teoria do Dano Não Linear

Para superar os problemas na regra de Miner

- As teorias não lineares exigem constantes adicionais do material e de geometria que devem ser obtidas a partir de ensaios.**
- A teoria não linear leva em conta o efeito da história. Cálculos pode ser trabalhoso.**
- Elas fornecem uma melhor previsão do que a regra de Miner em alguns históricos de carregamentos simples, mas não é garantia de que ela funciona melhor do que a aplicação real da historia de carregamento real.**

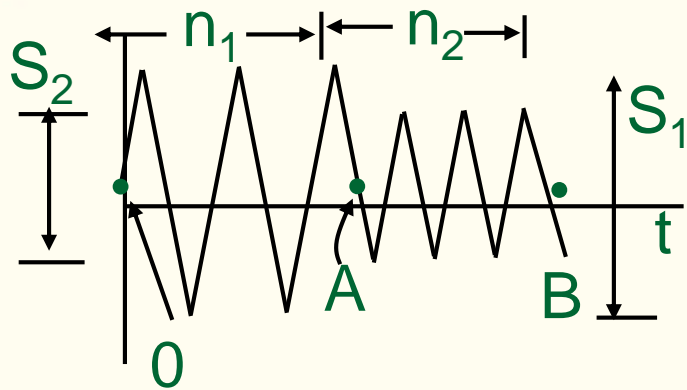
Descrição geral das teorias não lineares:

$$D = \left(\frac{n}{N} \right)^p$$

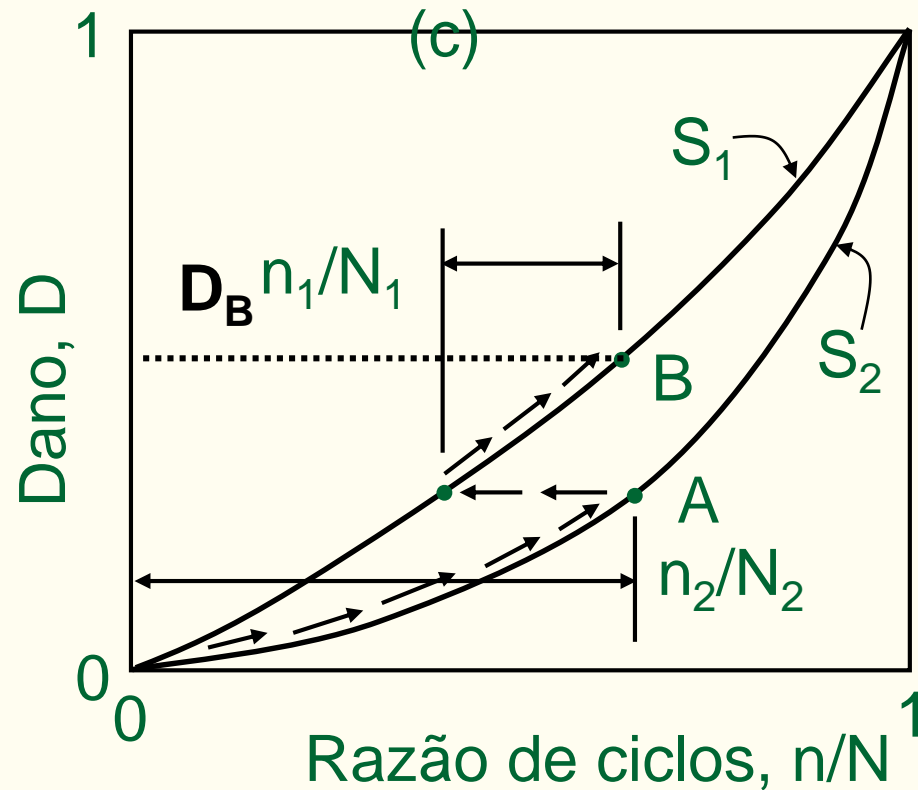
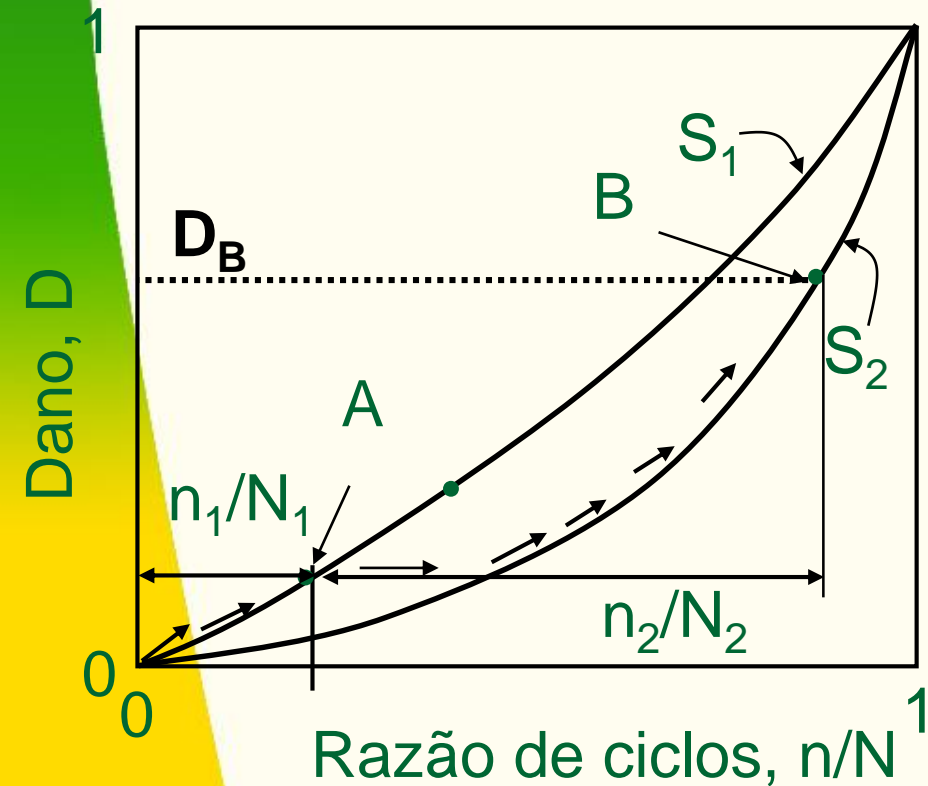
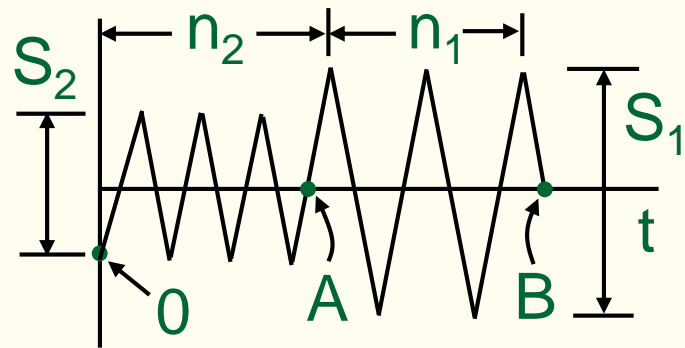
**O expoente, p , é função do nível de tensão.
Geralmente, $0 < p < 1$**

para $p = 1$, recorre-se a regra linear do dano de Miner

Alta - Baixa



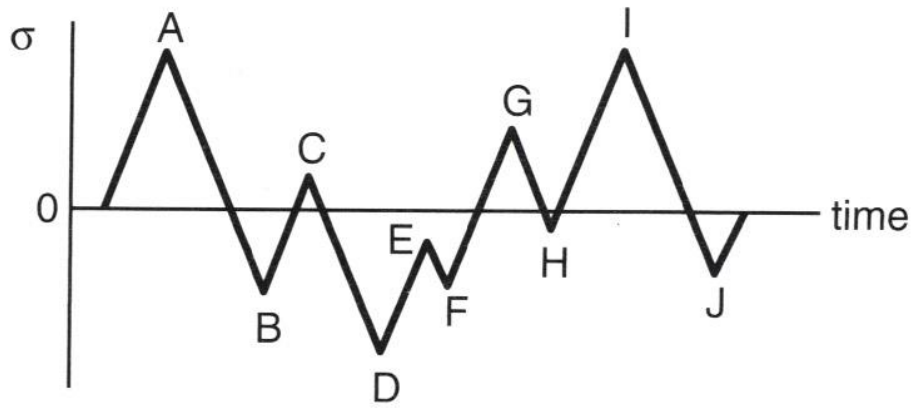
Baixa - Alta



Dano D_B no final dos blocos de carregamentos são diferentes.



**Contagem de Ciclos Para Histórias de
Carregamentos Irregulares
Rain Flow**

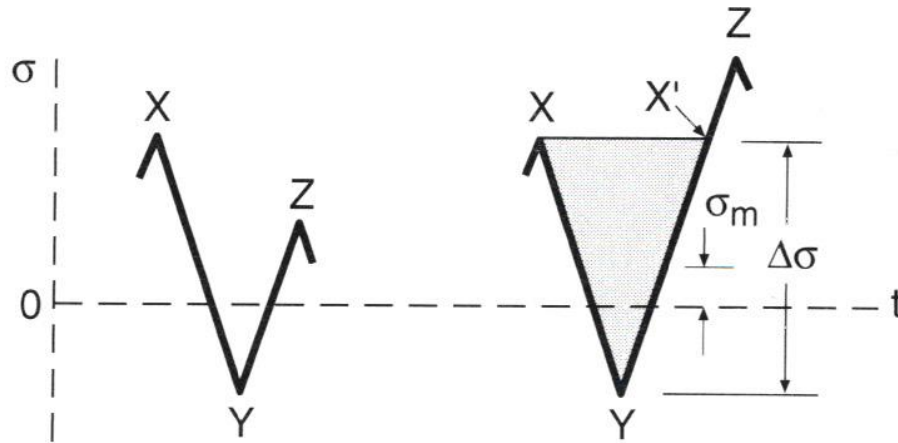


Peaks: A, C

Valleys: B, D

Simple ranges: A-B, B-C

Overall ranges: A-D, D-G



$\Delta\sigma_{YZ} < \Delta\sigma_{XY}$
No cycle

$\Delta\sigma_{YZ} \geq \Delta\sigma_{XY}$
X-Y = cycle

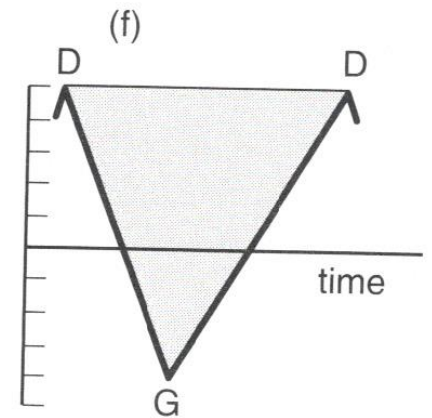
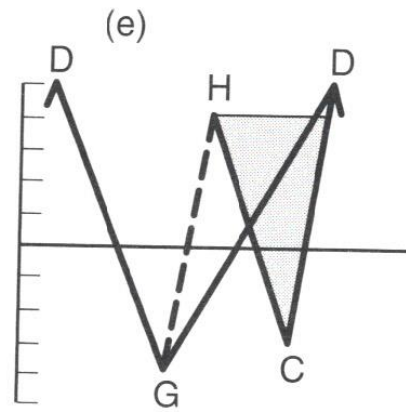
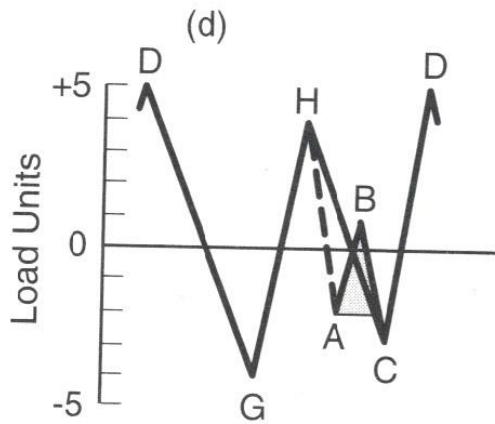
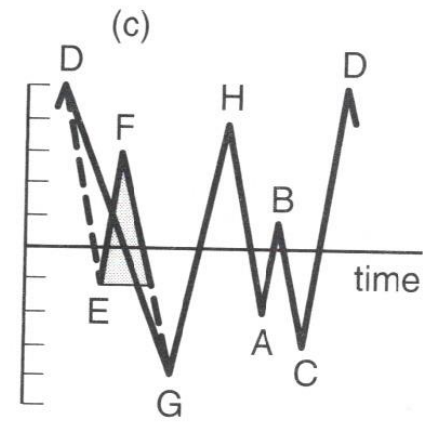
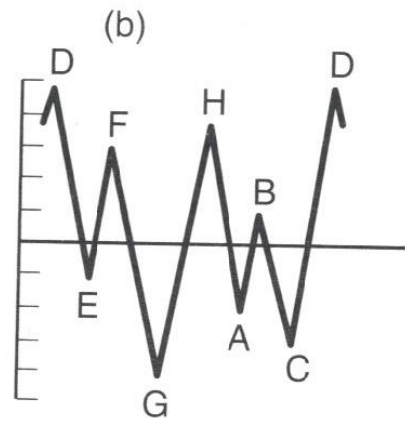
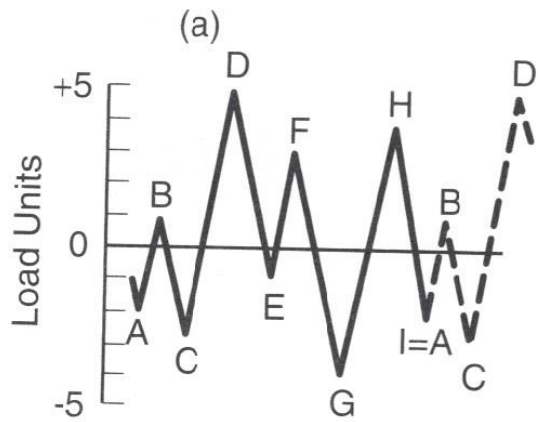
For cycle X-Y

Peak: σ_X

Valley: σ_Y

Range: $\Delta\sigma = \sigma_X - \sigma_Y$

Mean: $\sigma_m = (\sigma_X + \sigma_Y)/2$



| Cycle | Range | Mean |
|-------|-------|------|
| E-F | 4.0 | 1.0 |
| A-B | 3.0 | -0.5 |
| H-C | 7.0 | 0.5 |
| D-G | 9.0 | 0.5 |

EXEMPLO

- Em um local de interesse em um componente aeronáutico feito de uma liga de Ti-6Al-4V da Tabela 9.1; o material é repetidamente carregado uniaxialmente com uma história de carregamento da figura abaixo. Estime o número de repetições necessárias para causar a falha do componente.

Constantes para a curva S-N para materiais estruturais
 -CPS ensaiados com tensão média igual a zero e sem entalhe e carregamento axial(Ref: Dowling)

| Materiais | S_y | S_u | $S = \sigma'_f (2N_f)^b = A(N_f)^b$ | | | $\sigma_a = C + D \log N_f$ | |
|---|-------|-------|-------------------------------------|------|---------|-----------------------------|-------|
| | | | σ'_f | A | b | C | D |
| <u>Aços</u> | | | | | | | |
| AISI 1015 (N) | 227 | 415 | 976 | 886 | -0.14 | 545 | -69.6 |
| Man-Ten (HR) | 322 | 557 | 1089 | 1006 | -0.115 | 703 | -83.0 |
| RQC-100 (R Q&T) | 683 | 758 | 938 | 897 | -0.0648 | 780 | -68.9 |
| AISI 4142 (Q&T, 450 HB) | 1584 | 1757 | 1937 | 1837 | -0.0762 | 1529 | -148 |
| AISI 4340 (qualidade aeronáutica) | 1103 | 1172 | 1758 | 1643 | -0.0977 | 1247 | -137 |
| <u>Liga de Al</u> | | | | | | | |
| 2024-T4 | 303 | 476 | 900 | 839 | -0.102 | 624 | -69.9 |
| <u>Liga de Ti</u> | | | | | | | |
| Ti-6Al-4V (Solubilizada e envelhecida) | 1185 | 1233 | 2030 | 1889 | -0.104 | 1393 | -157 |

(N) Normalizada, (HR) laminado a quente. S_y , S_u , σ'_f , A, C e D estão em MPa. Os dados são para fadiga de alto ciclo $10^3 < N < 10^6$

- A contagem de ciclos inicia no primeiro ponto no nível A e termina quando a história retorna a este ponto, em A'. Considerando os eventos:
 - A1-B1-A2 um ciclo é contado neste nível.
 - A2-B2-A3
 - A3-B3-A4
 - O próximo evento A4-C1-D1 será considerado mas não contado.
 - C1-D1-C2 outro ciclo de outro nível e assim por diante até 100 ciclos serem formados.
 - Neste ponto todos os ciclos foram considerados menos os ciclos A4, E e A'. Estes foram o maior ciclo que pode ser formado.

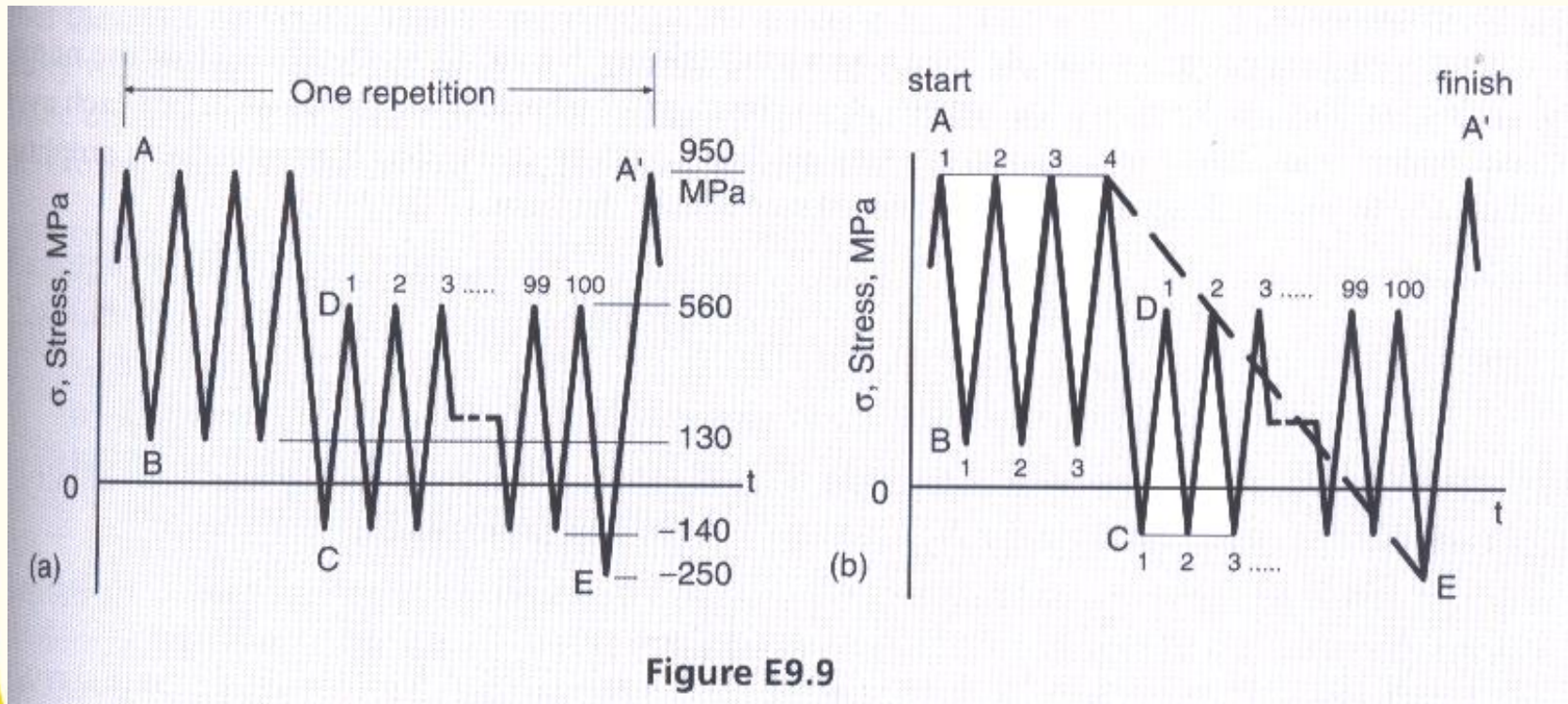


Figure E9.9

| Ciclo | j | N _j | σ _{min} MPa | σ _{max} MPa | σ _a MPa | N _{fj} | N _j /N _{fj} |
|-------|---|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------|
| A-B | 1 | 3 | 130 | 950 | 410 | 4,21X10 ⁴ | 7,12X10 ⁻⁵ |
| C-D | 2 | 100 | -140 | 560 | 350 | 1,14X10 ⁶ | 8,74X10 ⁻⁵ |
| A-E | 3 | 1 | -250 | 950 | 600 | 6,75X10 ³ | 1,481X10 ⁻⁴ |
| | | | | | | | Σ=3,068 x10⁻⁴ |

As constantes σ'_f e b para a liga de Ti-4Al-4V e a equação de SWT

$$\sqrt{\sigma_{\max} \sigma_a} = \sigma'_f (2 N_f)^b \dots\dots\dots (\sigma_{\max} > 0)$$

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{\sigma_{\max} \sigma_a}}{\sigma'_f} \right)^{1/b}$$

A estimativa do número de repetições pode ser obtida para :

$$D = B_f \sum \frac{n_i}{N_i} = 1$$

$$B_f = \frac{1}{3,068 \times 10^{-4}} = 3259 \text{ repetições}$$

Tensão Equivalente e Fator de segurança

- Um procedimento alternativo é o calculo de um nível de tensão equivalente, de amplitude constante que cause a mesma vida que a história de carregamento de amplitude variável, se aplicada para o mesmo número de ciclos.
- Considere:
 - N_B = ciclos da história de carregamentos;
 - N_f = ciclos para falhar = $B_f \times N_B$;
- Para cada ciclo uma σ_{ar} equivalente pode ser considerada a partir do par (amplitude de tensão e tensão média);

$$B_f \left[\sum_{j=1}^{N_B} \frac{N_j}{N_{fj}} \right] = 1$$

$$\sigma_{ar} = \sigma'_f (2N_f)^b \Rightarrow N_{fj} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{arj}}{\sigma'_f} \right)^{1/b}$$

- Tratar cada ciclo individualmente, de maneira que $N_j = 1$ e substitua os valores de N_{fj} na primeira equação, obtendo:

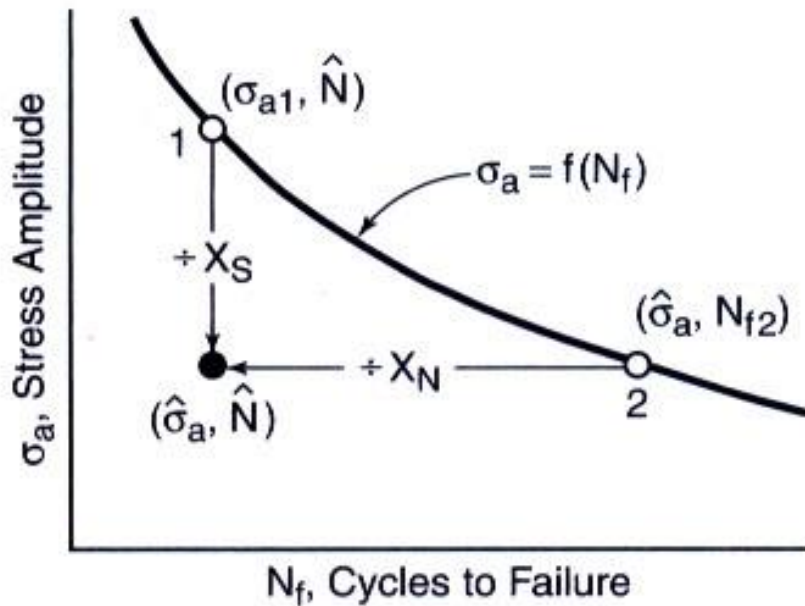
$$\frac{N_f}{N_B} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_B} 2 \left(\frac{\sigma_{arj}}{\sigma'_f} \right)^{-1/b} \right] = 1 \Rightarrow \sigma'_f (2N_f)^b \left[\sum_{j=1}^{N_B} (\sigma_{arj})^{-1/b} / N_B \right]^b = 1$$

$$\sigma_{aq} = \sigma'_f (2N_f)^b$$

$$\sigma_{aq} = \left[\sum_{j=1}^{N_B} (\sigma_{arj})^{-1/b} / N_B \right]^{-b} \Rightarrow \sigma_{aq} = \left[\sum_{j=1}^k N_j (\sigma_{arj})^{-1/b} / N_B \right]^{-b}$$

- Para determinação do fator de segurança, a mesma lógica apresentada pode ser aplicada, sendo σ_a agora σ_{aq} e a curva S-N sendo dada por:

$$\sigma_{aq} = \sigma'_f (2 N_f)^b$$

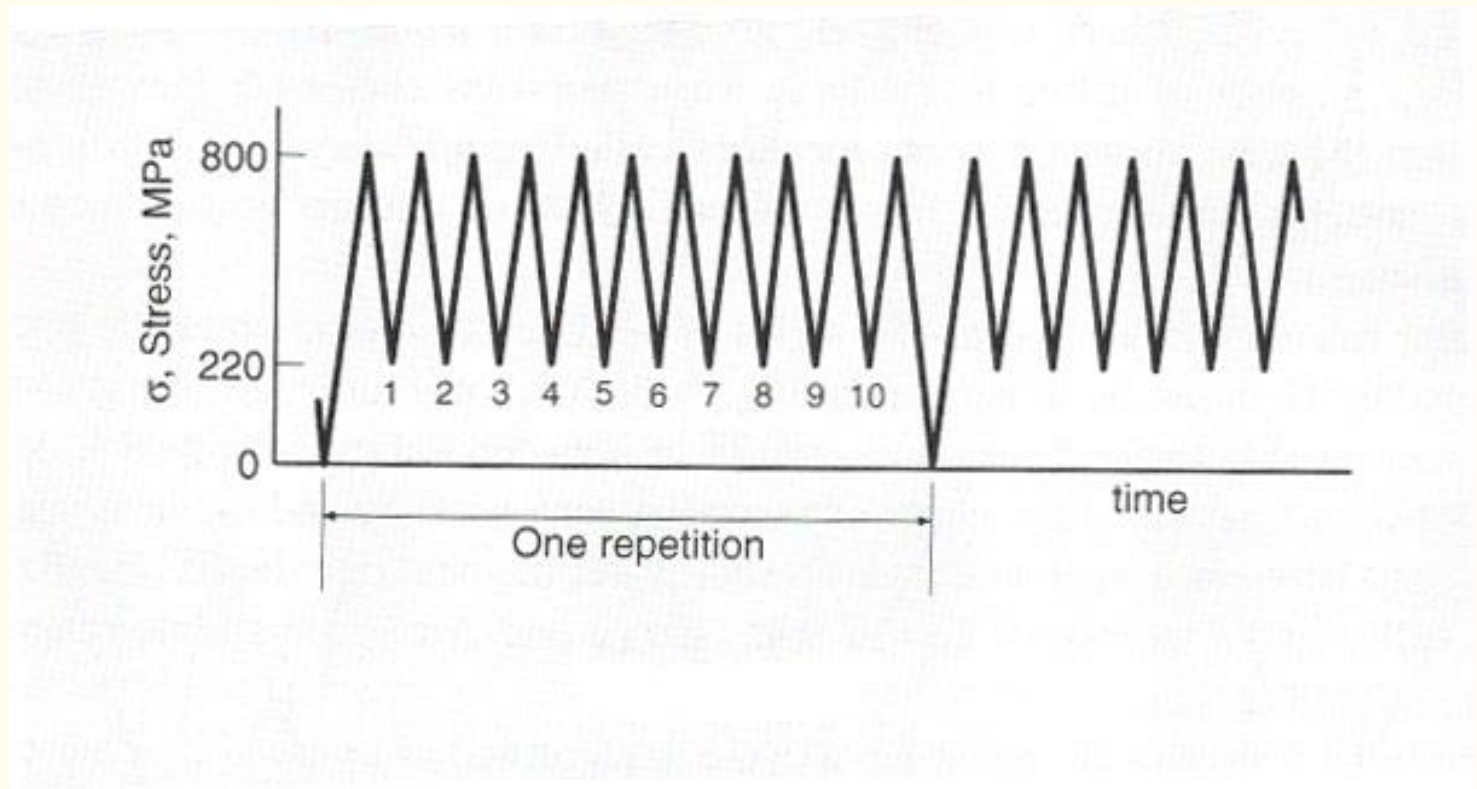


$$X_S = \frac{\sigma_{aq1}}{\hat{\sigma}_{aq}} \dots \dots \dots (N_f = \hat{N})$$

$$X_N = \frac{N_{f2}}{\hat{N}} \dots \dots \dots (\sigma_{aq} = \hat{\sigma}_{aq})$$

$$X_S = X_N^{-b}$$

- Uma história de carregamento é apresentada a seguir, sendo o carregamento uniaxial aplicado em um CP não entalhado fabricado de um aço AISI 4340. Estime o número de repetições necessárias para falhar o CP.



| j | Nj | σ_{\min} | σ_{\max} | σ_a | σ_m | Nfj | Nj/Nfj |
|---|----|-----------------|-----------------|------------|------------|--------------------|-----------------------|
| 1 | 1 | 0 | 800 | 400 | 400 | $1,36 \times 10^5$ | $7,37 \times 10^{-6}$ |
| 2 | 10 | 220 | 800 | 290 | 510 | $1,54 \times 10^6$ | $6,51 \times 10^{-6}$ |

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \dots\dots\dots \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma'_f = 1758 \text{ MPa e}$$

$$b = -0,0977$$

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_f - \sigma_m} \right)^{1/b}$$

$$B_f \left[\sum_{j=1}^{N_B} \frac{N_j}{N_{fj}} \right] = 1 \Rightarrow B_f = 1 / 1,388 \times 10^{-5} = 72.000 \dots \text{repeti\c{c}oes}$$

Considere a hist3ria de carregamento anterior e:

- Estime a vida usando o m3todo da tens3o equivalente com amplitude constante.
- Se para esta hist3ria de tens3es 3 esperada 1000 repeti33es, qual o fator de seguran3a em vida e em tens3o?

| j | N _j | σ _{min} | σ _{max} | σ _a | σ _m | σ _{arj} | N _j x (σ _{arj}) ^{-1/b} |
|---|----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|------------------|--|
| 1 | 1 | 0 | 800 | 400 | 400 | 517,8 | 6,036 x 10 ²⁷ |
| 2 | 10 | 220 | 800 | 290 | 510 | 408,5 | 5,330 x 10 ²⁷ |

$$\sigma_{aq} = \left[\sum_{j=1}^k N_j (\sigma_{arj})^{-1/b} / N_B \right]^{-b} = [1,137 \times 10^{28} / 11]^{-(-0,0977)} = 435,8 \text{ MPa}$$

Substituindo este valor em e calculando N_f:

$$\sigma_{aq} = \sigma'_f (2 N_f)^b \Rightarrow N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{aq}}{\sigma'_f} \right)^{1/b} = \frac{1}{2} \left(\frac{435,8}{1758} \right)^{1/-0,0977} = 792.300$$

$$B_f = \frac{N_f}{\sigma'_f} = \frac{792.300}{11} = 72.000$$

O fator de segurança pode ser calculado como:

$$X_N = \frac{N_{f2}}{\hat{N}} = \frac{792.300}{11 \times 1000} = 72,0$$

$$X_S = X_N^{-b} = 72^{-0,0977} = 1,52$$



Propagação de Trinca sob Carregamentos de Amplitudes Variáveis

Crescimento de trinca – Carregamento de Amplitudes Variáveis

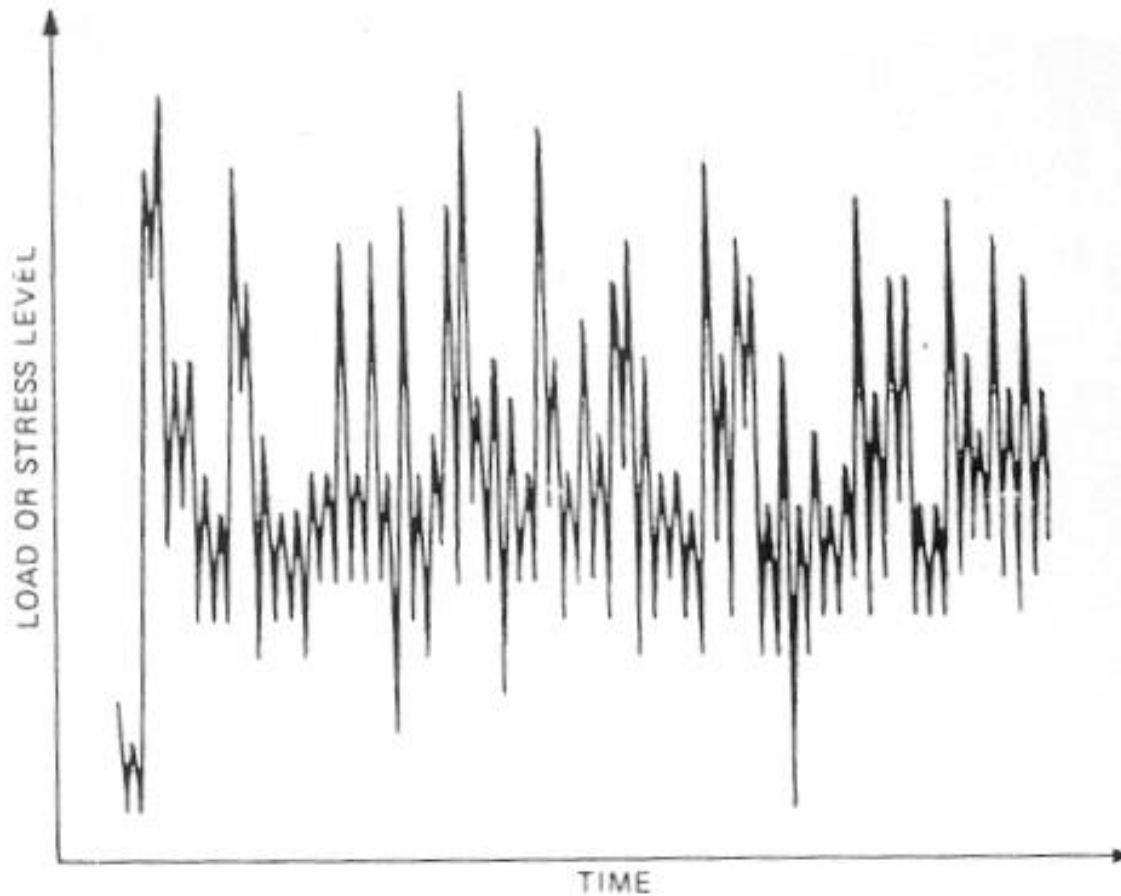


Figure 9.11. Example of a fairly random cyclic load history (part of a flight for a tactical aircraft).

CTF- Efeito de sobrecargas

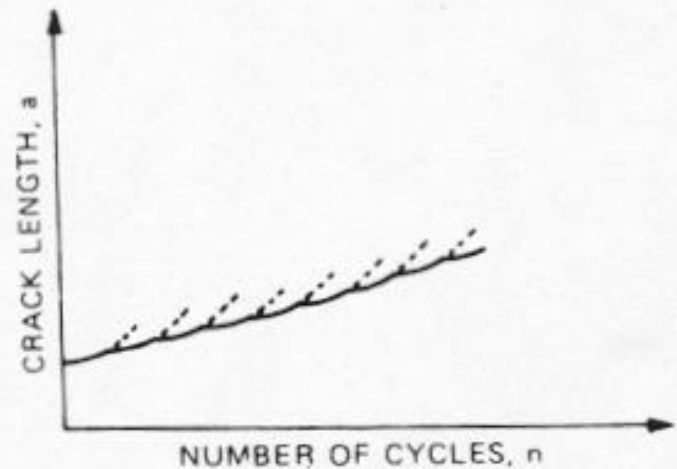
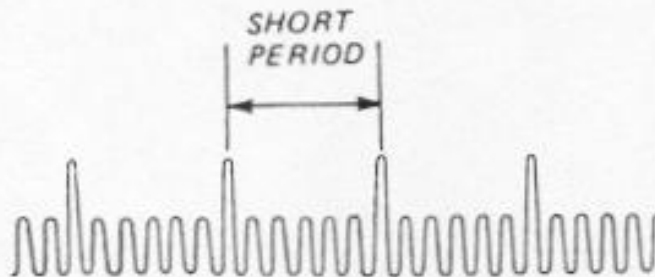
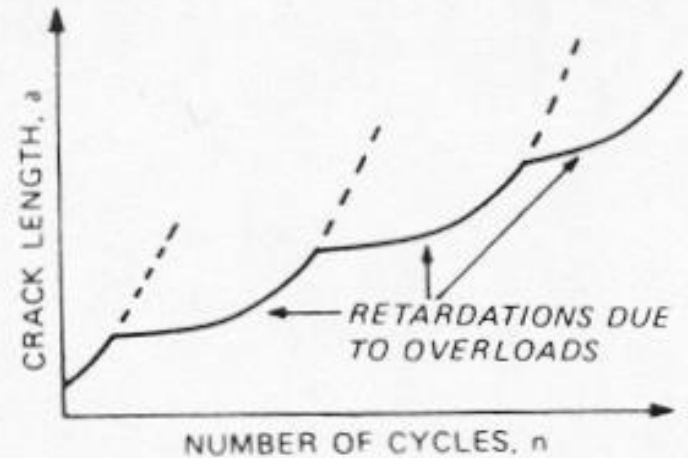
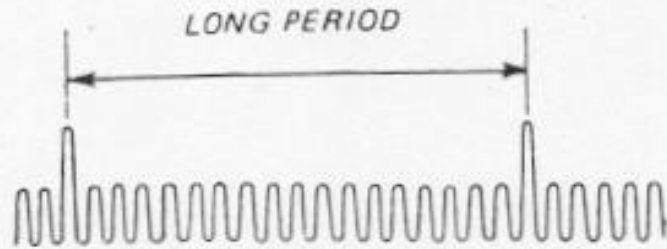


Figure 9.15. Effect of peak load recurrence period on the crack growth curve.

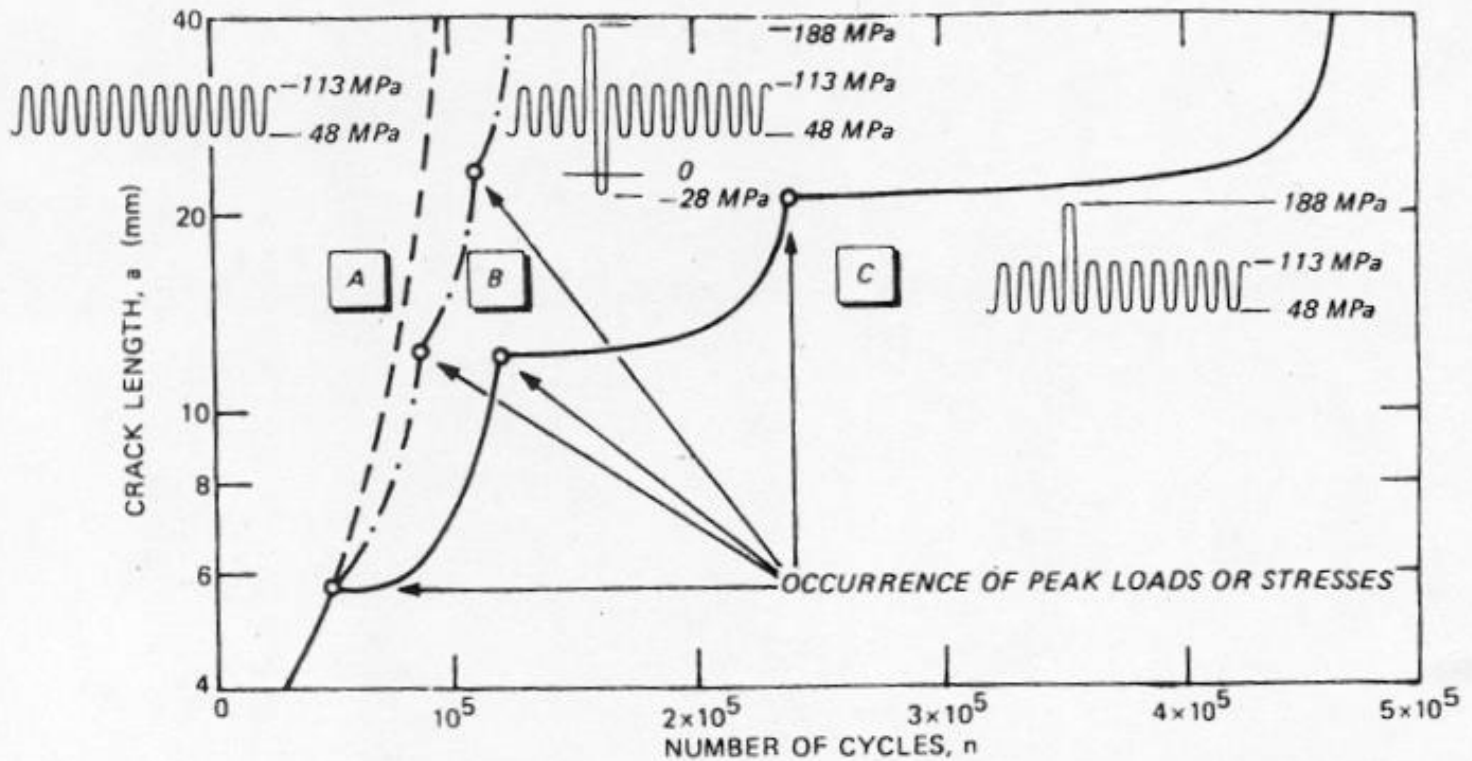
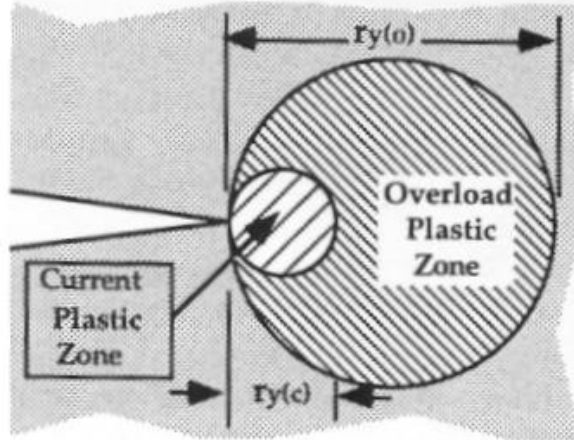
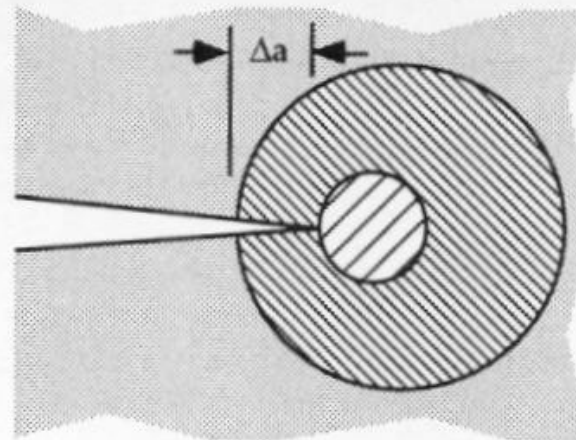


Figure 9.12. Crack growth curves under constant amplitude loading and constant amplitude loading + occasional peak loads for a centre cracked panel of aluminium alloy 2024-T3 (reference 9 of the bibliography).

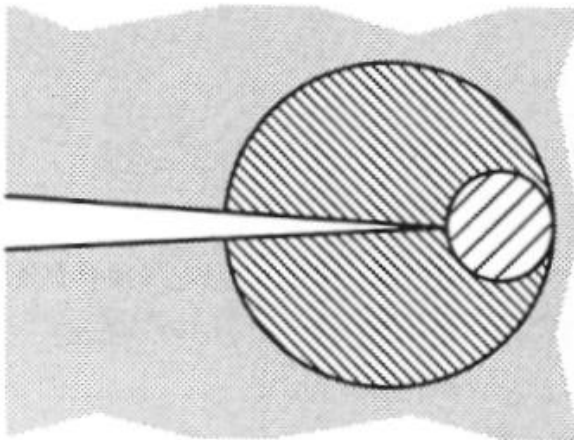
Retardamento devido a sobrecarga



(a) Immediately following the overload.



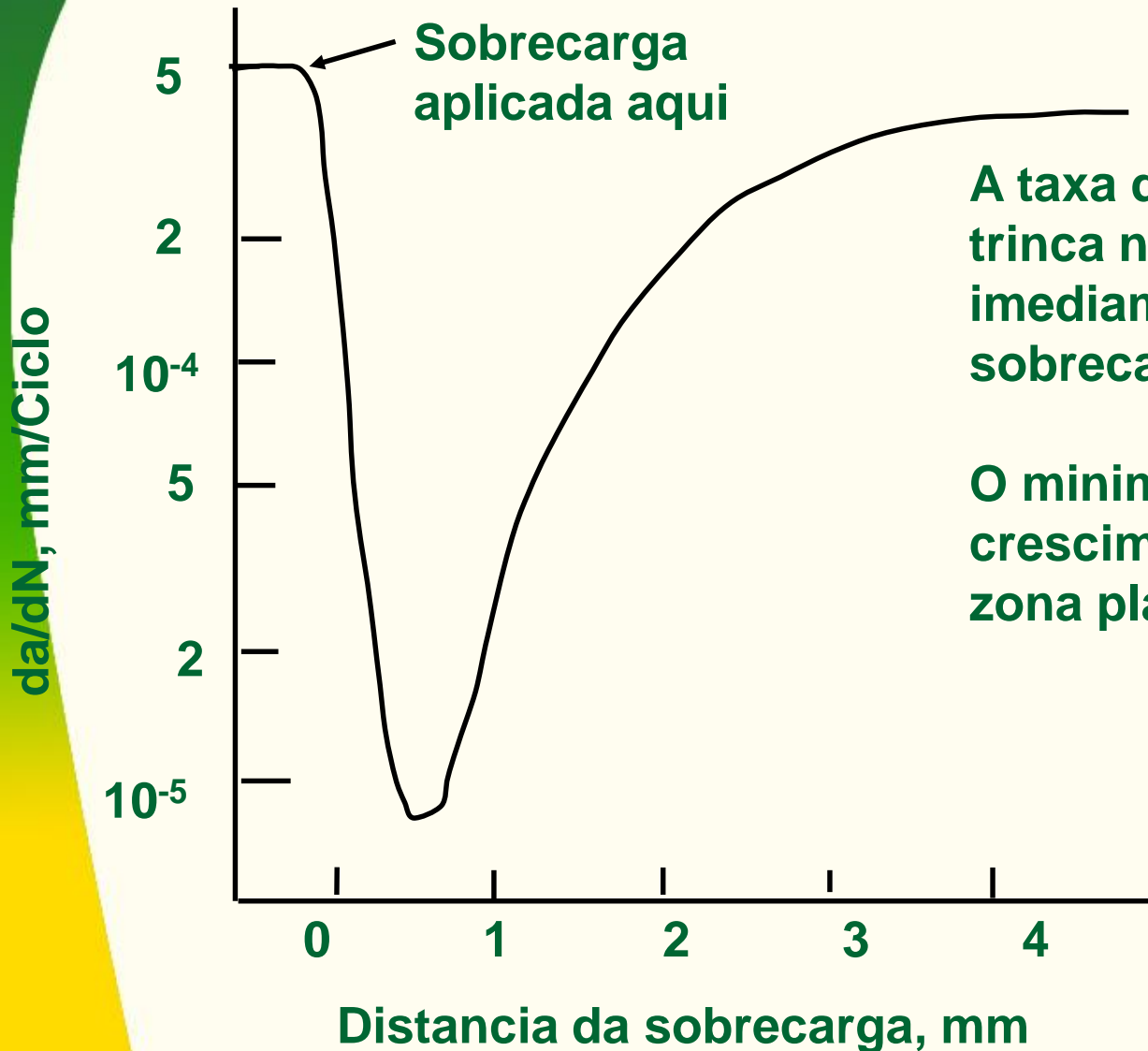
(b) After the crack propagates Δa .



(c) Propagation through the overload plastic zone.

FIGURE 10.14 The Wheeler model for fatigue retardation. The crack growth rate depends on the size and position of the current plastic zone relative to the overload plastic zone.

Retardamento devido a uma sobrecarga



Sobrecarga aplicada aqui

A taxa de propagação de trinca não atinge um mínimo imediatamente após a sobrecarga.

O mínimo atinge após um crescimento de $\sim 1/8$ a $1/4$ da zona plastica formada.

Estimativa de Vida em Carregamentos de Amplitudes Variáveis

- Se o nível de tensão variar durante o crescimento de trinca, ainda é possível estimar a vida. Uma metodologia simples é assumir que o crescimento para um dado ciclo não é afetado pelo precedente, isto é, não existe o efeito da seqüência .

Somatória dos incrementos de Trinca

- Δa para cada ciclo pode ser estimado a partir da curva $da/dN \times \Delta K$. Somando estes Δa , considerando o número de ciclos, permite obter a vida.
- Assim, para um comprimento de trinca a_j e o incremento Δa_j , o novo valor de trinca a_{j+1} para o próximo ciclo é:

$$a_{j+1} = a_j + \Delta a_j = a_j + \left(\frac{da}{dN} \right)_j$$

$$a_N = a_i + \sum_{j=1}^N \left(\frac{da}{dN} \right)_j$$

- Onde Δa é numericamente igual a da/dN , quando $\Delta N=1$. Cada da/dN é calculado para o ΔK e R para um ciclo em particular, onde Δk é obtido para o comprimento do atual a_j e para o ΔS de um ciclo em particular. Para carregamentos altamente irregulares a metodologia Rain Flow pode ser usada

Método Especial para História Repetitivas

- Em alguns casos pode ser razoável aproximar o histórico de carregamento em serviço a um histórico repetitivo de cargas.
- Primeiro assuma que $da/dN \times \Delta K$ obedece uma relação de potencia do tipo a relação de Paris. O incremento de trinca pode ser para qualquer ciclo ($\Delta N=1$) é então.

$$\Delta a_j = C_0 (\bar{\Delta K}_j)^m$$

onde $\bar{\Delta K}$...e... C_0 ...são...para...o...caso...de... $R = 0$

- Se o carregamento repetitivo contem N_B ciclos, o aumento da trinca durante a aplicação esta repetição é obtida pela somatória:

$$\Delta a_B = \sum_{j=1}^{N_B} \Delta a_j = \sum_{j=1}^{N_B} C_0 (\bar{\Delta K}_j)^m$$

- A média de crescimento de trinca por ciclo durante uma repetição da história:

$$\begin{aligned} \frac{da}{dN_{\text{média}}} &= \frac{\Delta a_B}{N_B} = \frac{C_0 \sum_{j=1}^{N_B} (\bar{\Delta K}_j)^m}{N_B} = \\ &= C_0 \left(\left[\frac{\sum_{j=1}^{N_B} (\bar{\Delta K}_j)^m}{N_B} \right]^{1/m} \right)^m = C_0 (\bar{\Delta K}_q)^m \\ \Delta K_q &= \left[\frac{\sum_{j=1}^{N_B} (\bar{\Delta K}_j)^m}{N_B} \right]^{1/m} \end{aligned}$$

- ΔK_q pode ser interpretado como sendo o valor do fator de intensidade de tensão ($R=0$) equivalente que é esperado causar o mesmo crescimento de trinca quando uma historia de carregamento de amplitudes variáveis é aplicada para o mesmo numero de ciclos N_B . Como a tensão é diretamente associada a ΔK :

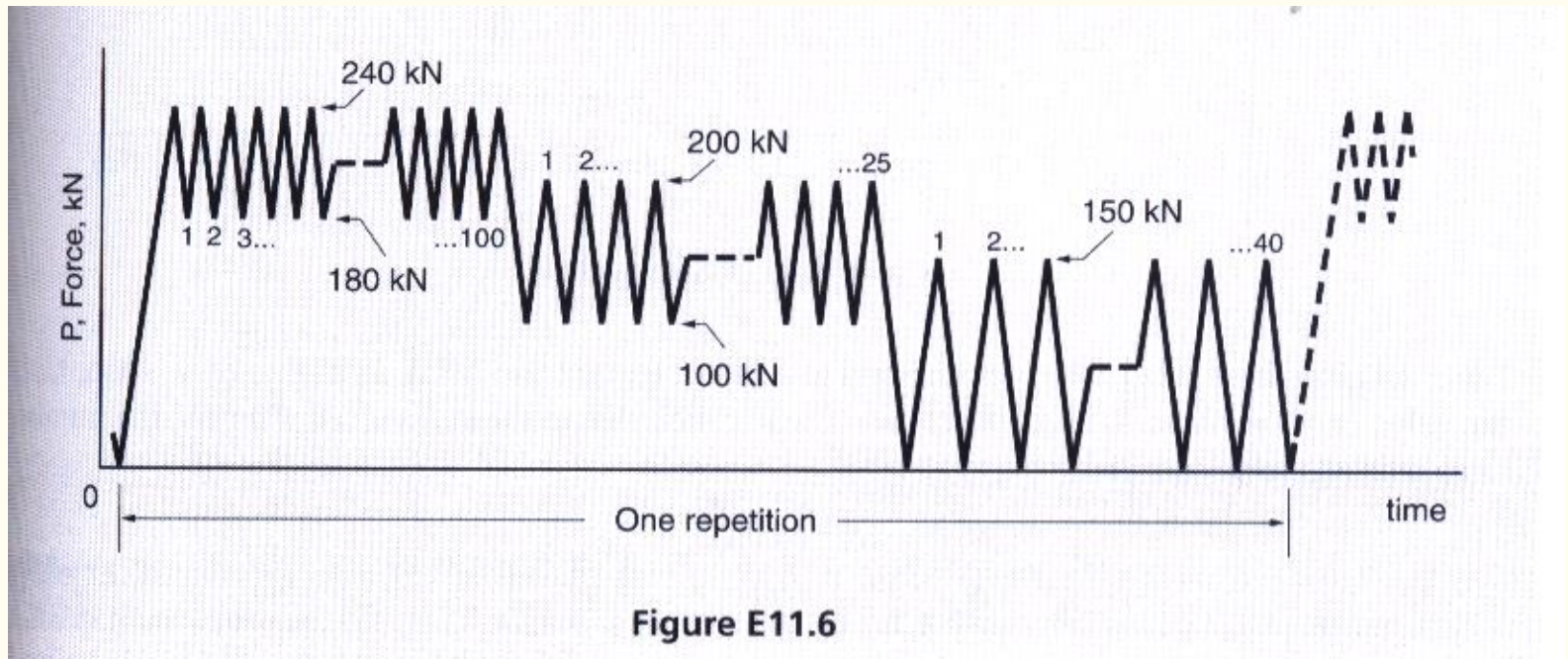
$$\Delta S_q = \frac{\Delta K_q}{F \sqrt{\pi a}} = \left[\frac{\sum_{j=1}^{N_B} (\bar{\Delta S}_j)^m}{N_B} \right]^{1/m}$$

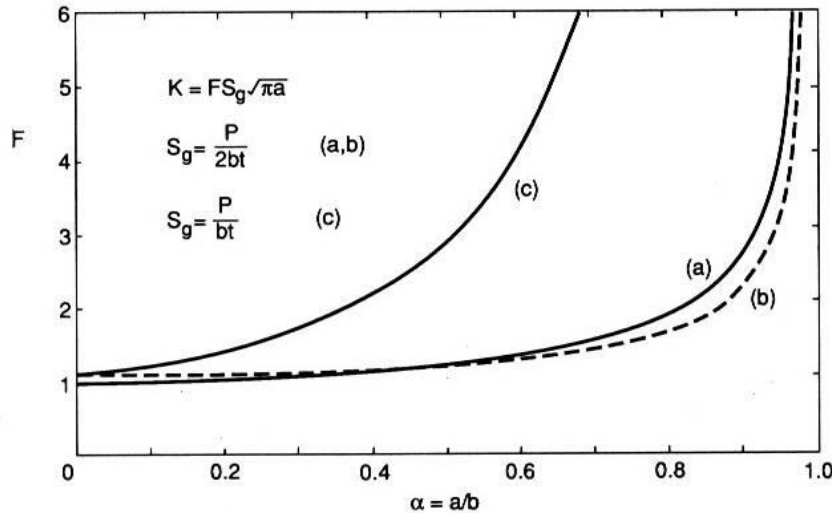
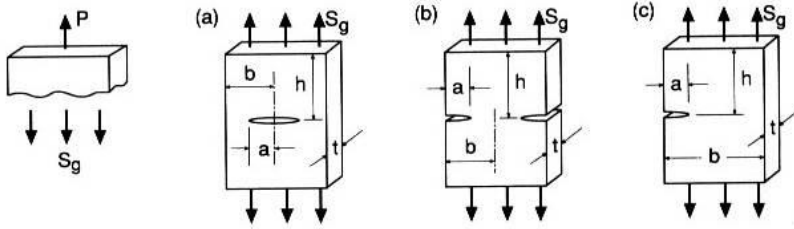
$$\bar{\Delta S} = S_{\max} (1 - R)^\gamma$$

$$\Delta S_q = \left[\frac{\sum_{j=1}^k N_j (\bar{\Delta S}_j)^m}{N_B} \right]^{1/m}$$

Exercício

- Uma placa com um trinca central de aço AISI4340, tem as dimensões definidas na figura abaixo, de $b=38\text{ mm}$ $t=6\text{ mm}$ e um comprimento inicial de trinca de 2 mm . Esta placa é constantemente submetida a uma história de carregamentos axiais mostrado na figura. Quantas repetições desta história de carregamento pode ser aplicada até a ocorrência da falha por fadiga?





Values for small α/b and limits for 10% accuracy:

$$(a) \quad K = S_g \sqrt{\pi a} \quad (a/b \leq 0.4) \quad (b) \quad K = 1.12 S_g \sqrt{\pi a} \quad (a/b \leq 0.6) \quad (c) \quad K = 1.12 S_g \sqrt{\pi a} \quad (a/b \leq 0.13)$$

Expressions for any $\alpha = a/b$:

$$(a) \quad F = \frac{1 - 0.5\alpha + 0.326\alpha^2}{\sqrt{1 - \alpha}} \quad (h/b \geq 1.5)$$

$$(b) \quad F = \left(1 + 0.122 \cos^4 \frac{\pi\alpha}{2}\right) \sqrt{\frac{2}{\pi\alpha} \tan \frac{\pi\alpha}{2}} \quad (h/b \geq 2)$$

$$(c) \quad F = 0.265 (1 - \alpha)^4 + \frac{0.857 + 0.265\alpha}{(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (h/b \geq 1)$$

$$N_{if} = \frac{a_f^{1-(m/2)} - a_i^{1-(m/2)}}{C_0 \cdot (F \cdot \Delta S_q \cdot \sqrt{\pi})^m (1 - (m/2))}$$

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

Table 11.2 Constants for the Walker Equation for Several Metals

| Material | Yield | Toughness | Walker Equation | | | | |
|---|---------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------|--------------|-----------|
| | σ_o | K_{Ic} | C_0 | C_0 | m | γ | γ |
| | MPa (ksi) | MPa \sqrt{m} (ksi \sqrt{in}) | mm/cycle $(MPa\sqrt{m})^m$ | in/cycle $(ksi\sqrt{in})^m$ | | $(R \geq 0)$ | $(R < 0)$ |
| 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 |

$$C = \frac{C_0}{(1 - R)^{m(1-\gamma)}}$$

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.

$$R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}; S_{\max} = \frac{P_{\max}}{2bt}; \bar{\Delta S} = S_{\max} (1 - R)^{\gamma}$$

$$\sum_{j=1}^{N_B} (\bar{\Delta S}_j)^m = \sum_{j=1}^k N_j (\bar{\Delta S}_j)^m$$

Table E11.6

| j | N_j cycles | P_{\max} kN | P_{\min} kN | R | S_{\max} MPa | $\bar{\Delta S}_j$ MPa | $N_j (\bar{\Delta S}_j)^m$ |
|----------|-----------------|------------------|------------------|------|-------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1 | 10.0 | 240 | 180 | 0.75 | 526.3 | 294.0 | 9.94×10^9 |
| 2 | 25 | 200 | 100 | 0.5 | 438.6 | 327.8 | 3.54×10^9 |
| 3 | 40 | 150 | 0 | 0 | 328.9 | 328.9 | 5.72×10^9 |
| 4 | 1 | 240 | 0 | 0 | 526.3 | 526.3 | 6.56×10^8 |
| Σ | 166 | | | | | | 1.986×10^{10} |

$$\Delta S_q = \left[\frac{\sum_{j=1}^k N_j (\bar{\Delta S}_j)^m}{N_B} \right]^{1/m} = \left[\frac{1,986 \times 10^{10}}{166} \right]^{1/3,24} = 311,3 \text{ MPa}$$

$$N_{if} = \frac{a_f^{1-(m/2)} - a_i^{1-(m/2)}}{C_0 \cdot (F \cdot \Delta S_q \cdot \sqrt{\pi})^m (1 - (m/2))} = \left[\frac{0,0158^{-0,62} - 0,001^{-0,62}}{5,11 \times 10^{-13} (1,03 \times 311,3 \sqrt{\pi})^{3,24} (-0,62)} \right]$$

$$N_{if} = 2,23 \times 10^5 \text{ ciclos}$$

$$B_{if} = \frac{N_{if}}{N_B} = \frac{2,23 \times 10^5}{166} = 1340 \text{ repetições}$$