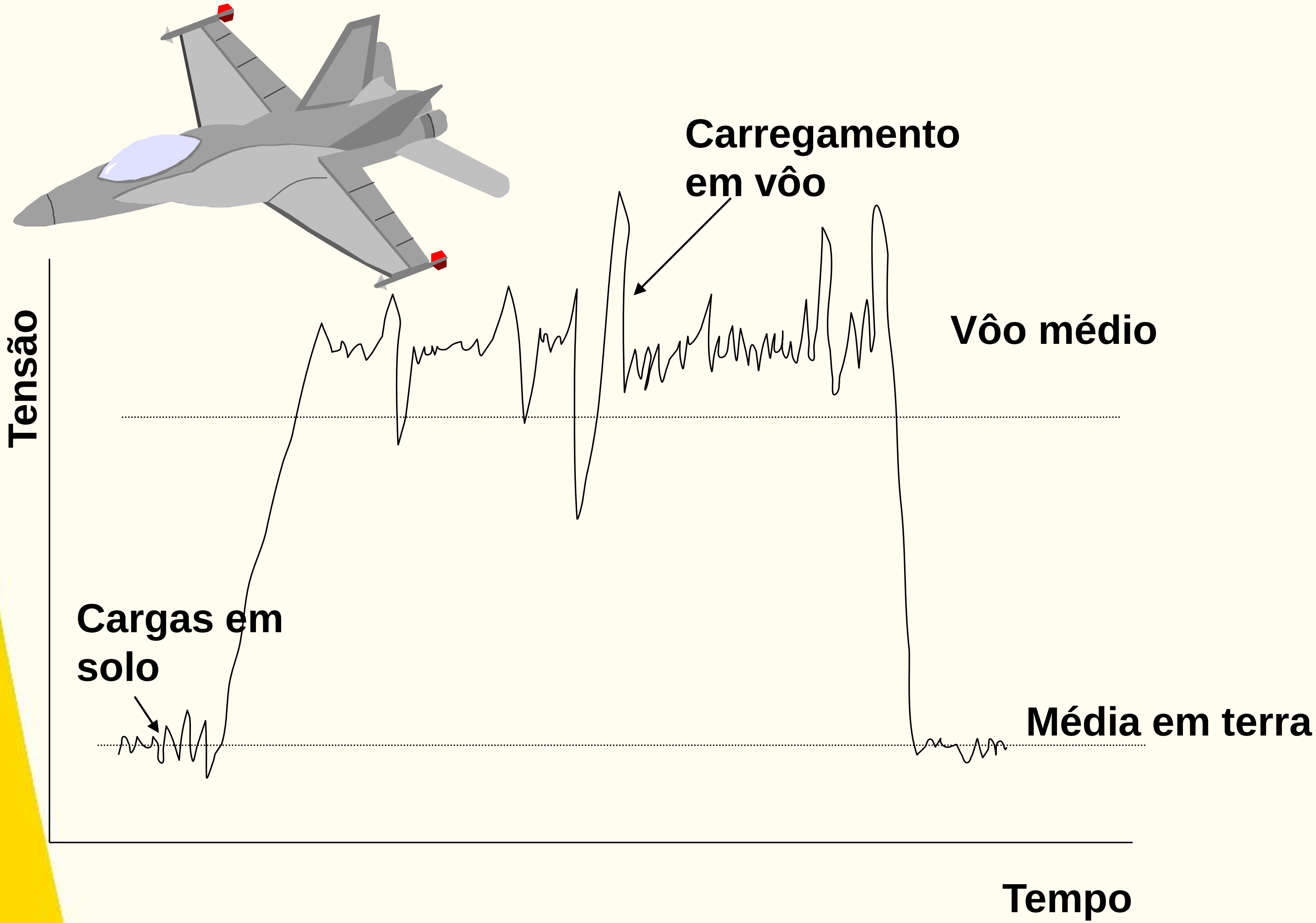
Carregamentos de Amplitudes Variável

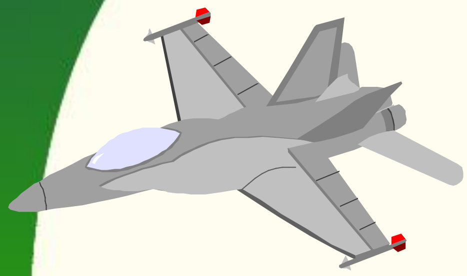
Waldek Wladimir Bose Filho, PhD

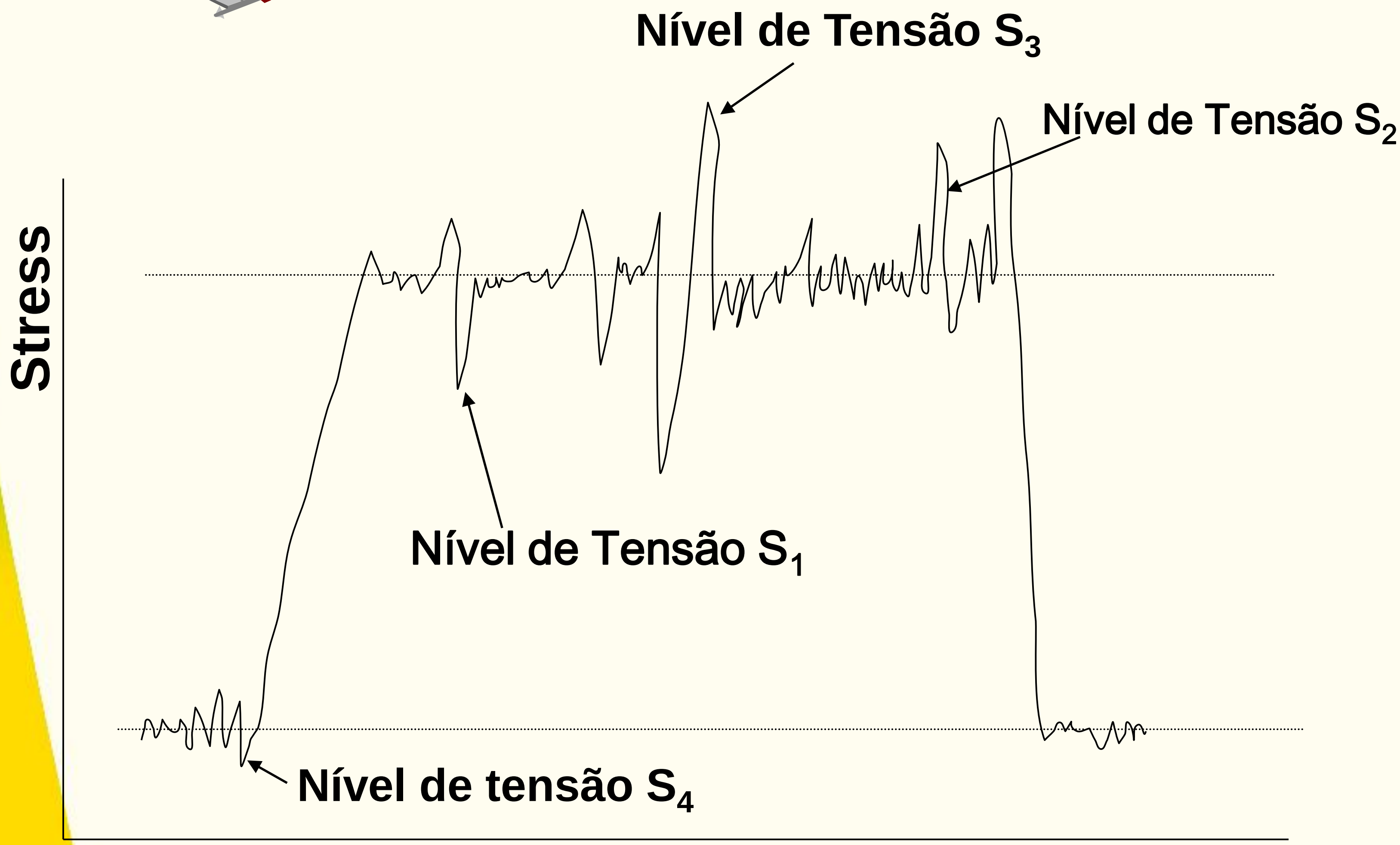
NEMAF – Núcleo de Ensaio de Materiais e Análise de Falhas

Repetição ou Variação de Carga



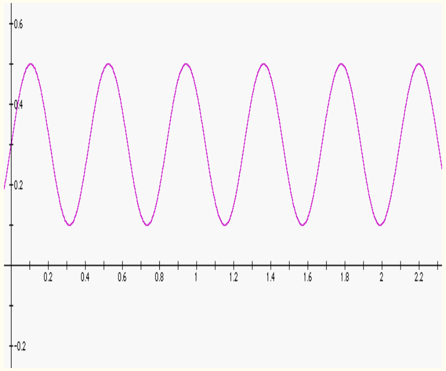
Estudo do Espectro de Tensão Aplicada

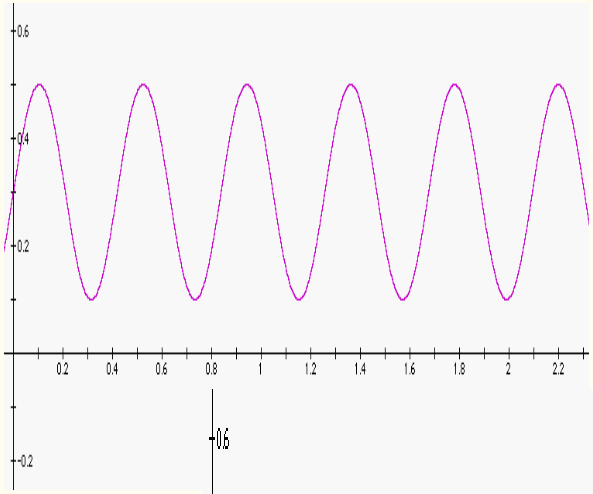




Frequencia dos Níveis de tensão Aplicados

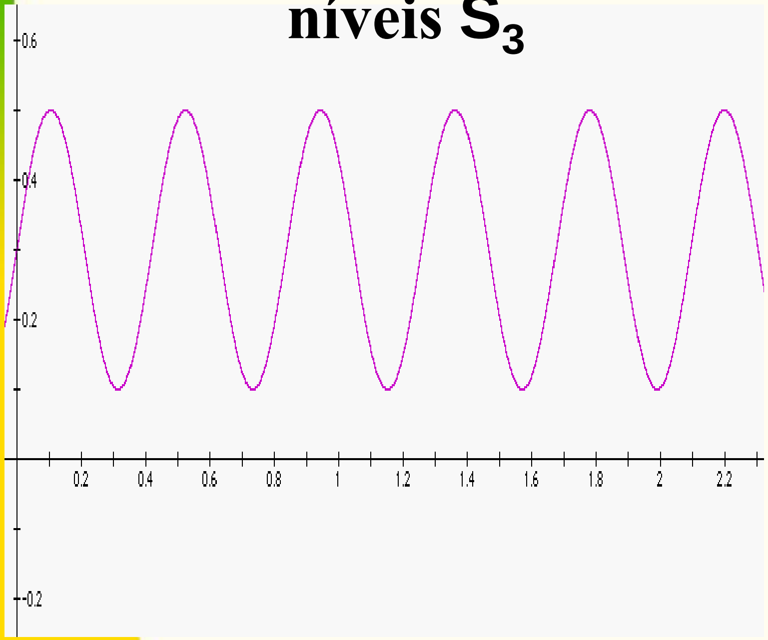
n_1 Ciclos de níveis S_1

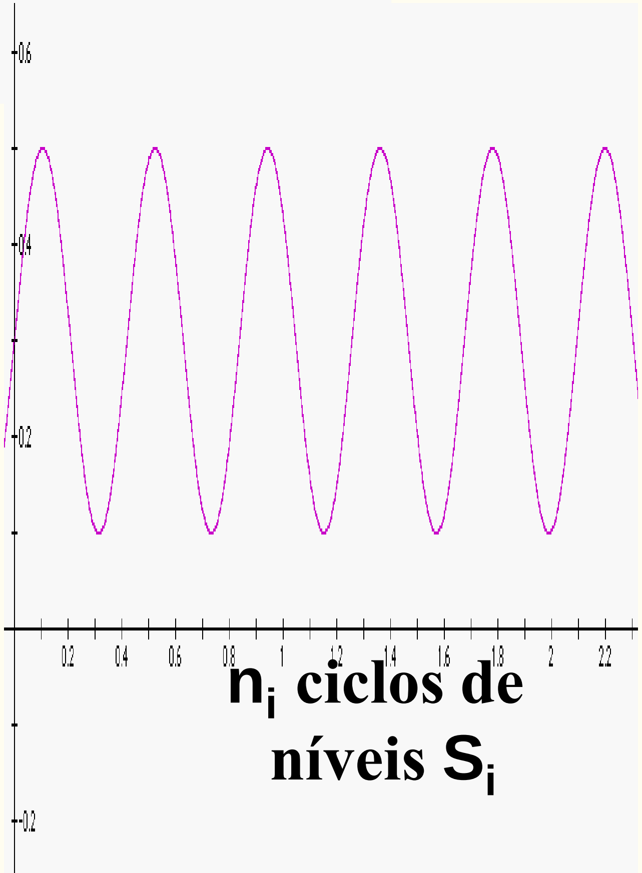




n_2 ciclos de níveis S_2

n_3 ciclos de níveis S_3

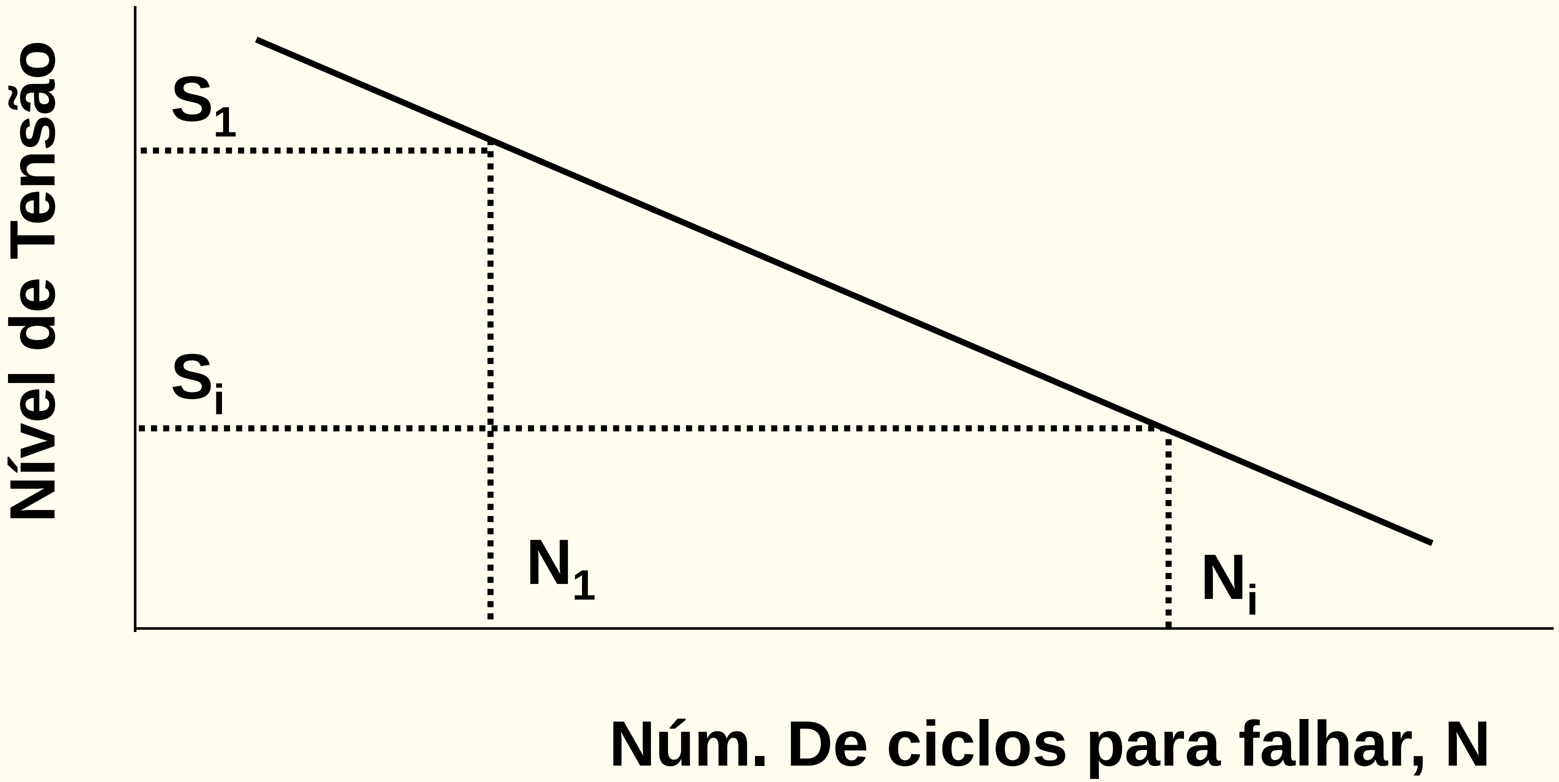




n_i ciclos de níveis S_i

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



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

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

<u>O dano acumulado total</u> **devido a uma história de tensão aplicada**

$$D = \sum_{1}^{n} D_i = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

$$= \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \ldots\ldots + \frac{n_k}{N_k}$$

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**

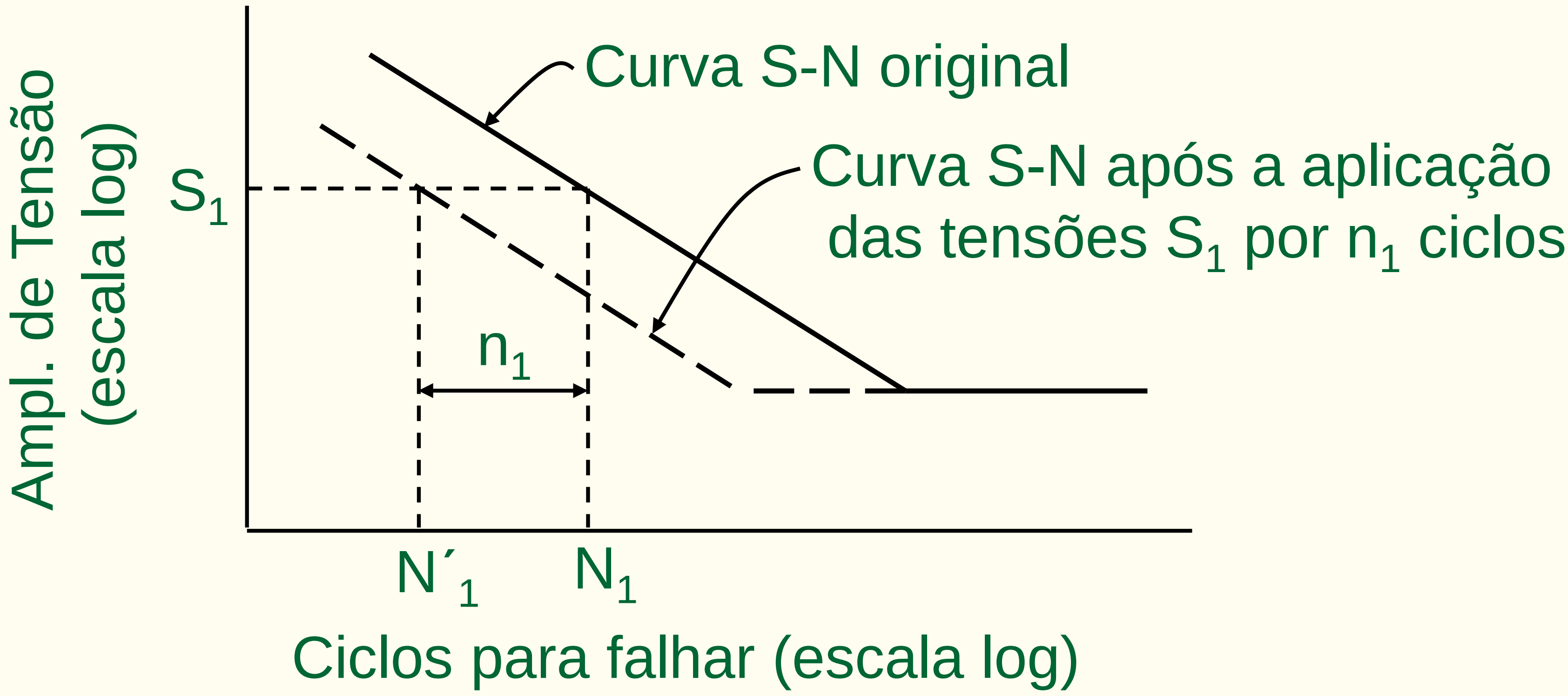
Exemplo: A regra de Miner prediz o mesmo dano para seqüências de alta para baixa tensões e de baixa para alta tensões. Na práticas estas histórias de carregamentos apresentam diferentes danos.

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

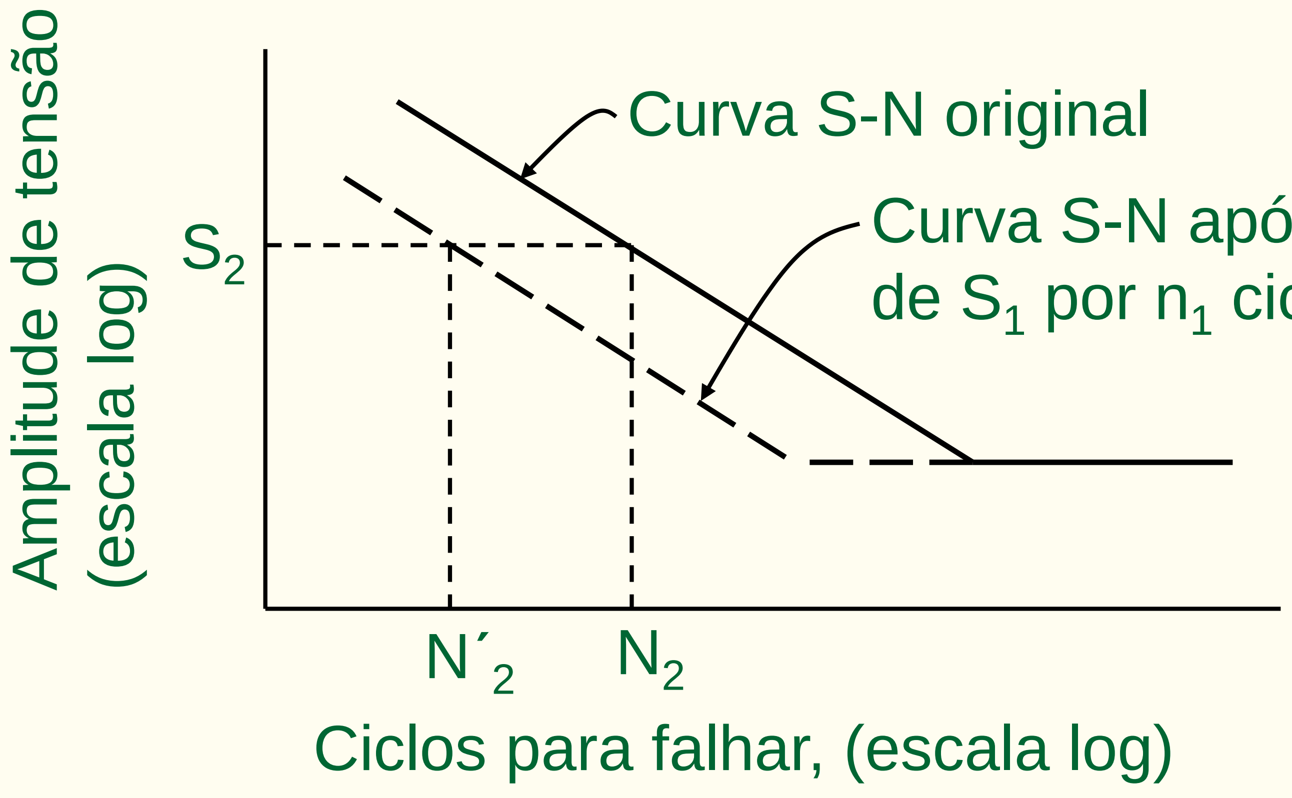
Em altas amplitudes de deformação a nucleação de tricas iniciarão em poucos ciclos e em baixas amplitudes de deformação quase que toda vida é gasta para nucleação.

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:

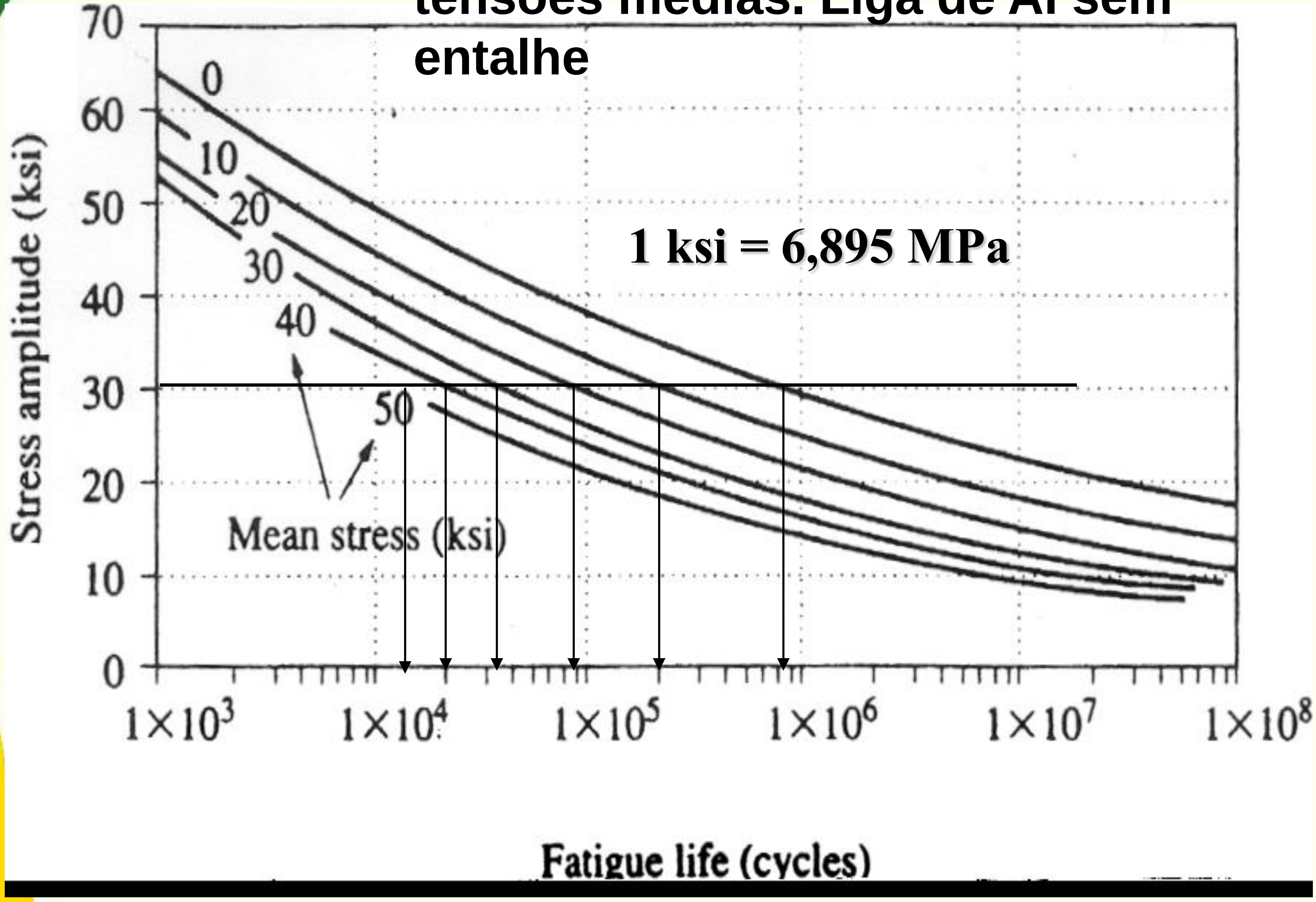
σ_m = 0 para 10 ciclos/vôo
σ_m = 69 MPa para 6 ciclos/vôo
σ_m = 138 MPa para 3 ciclos/vôo
σ_m = 207 MPa para 0,2 "
σ_m = 276 MPa para 0,1 "
σ_m = 345 MPa for 0,05 "

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
		Σ(n/N)		73,9738

A partir do espectro de tensões

Continuação:

Dano por vôo, D_f = Σ(n/N) = 73,9738 x 10^{-6}

DanoTotal na vida, D =(Dano por vôo*)* x (*Núm. de vôos)*

Falha ocorre quando D =1

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

Num. de vôos estimados para falhar = 13.515

***<u>Num. de vôos seguros</u>* = 13.515/(fator de espalhamento)**

***<u>Num. de vôos seguros</u>* = 4.505**

***<u>Num de horas de vôos seguros</u>* = 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.

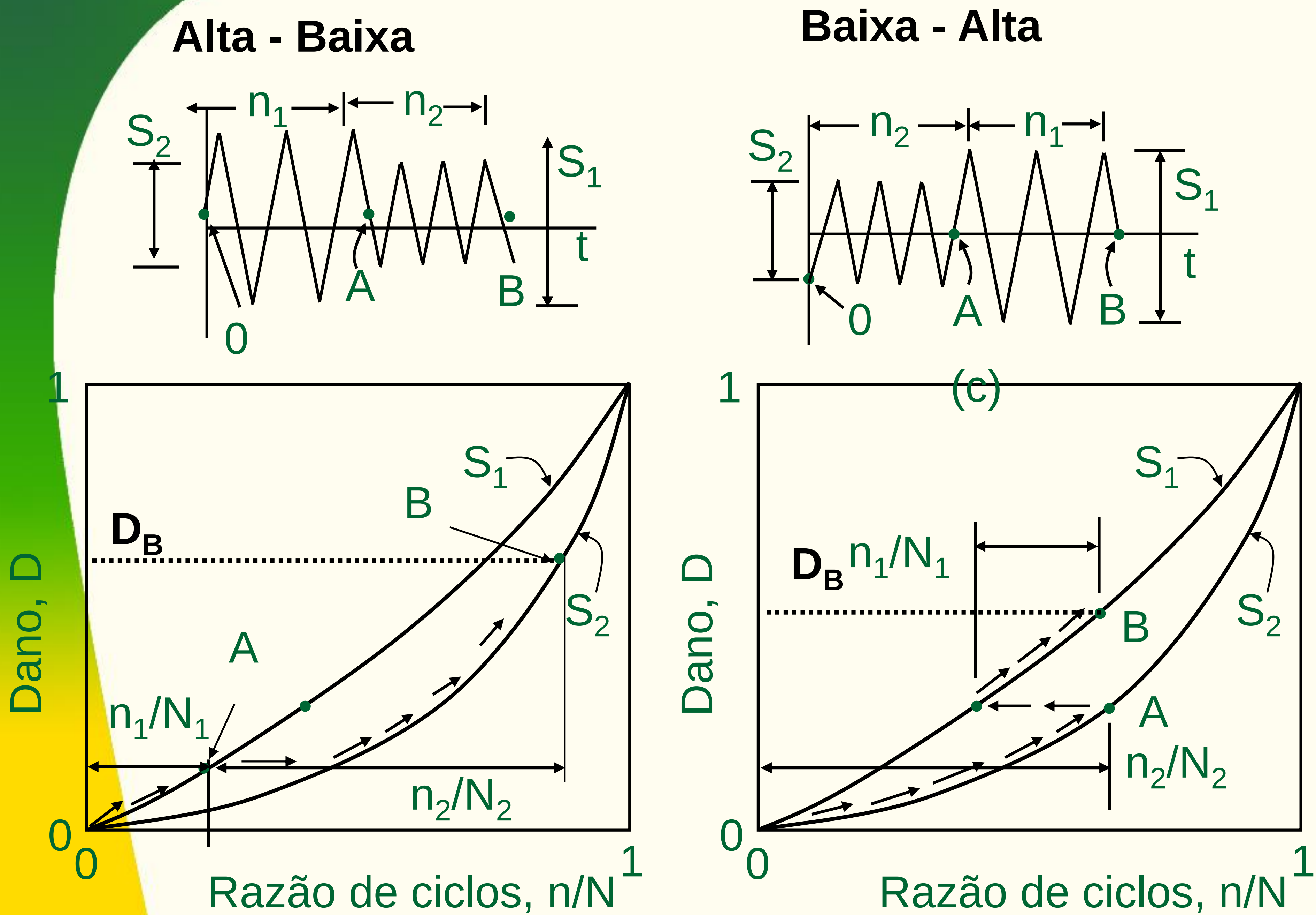
- Elas fornecem uma melhor previsão do que a regra de Miner em alguns históricos de carregamentos simples, mas não é garantia de que ela funciona melhor do que a aplicação real da historia de carregamento real.

Descricão geral das teorias não lineares:

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

O exponente, p, é função do nível de tensão. Generalmente, $0 < p < 1$

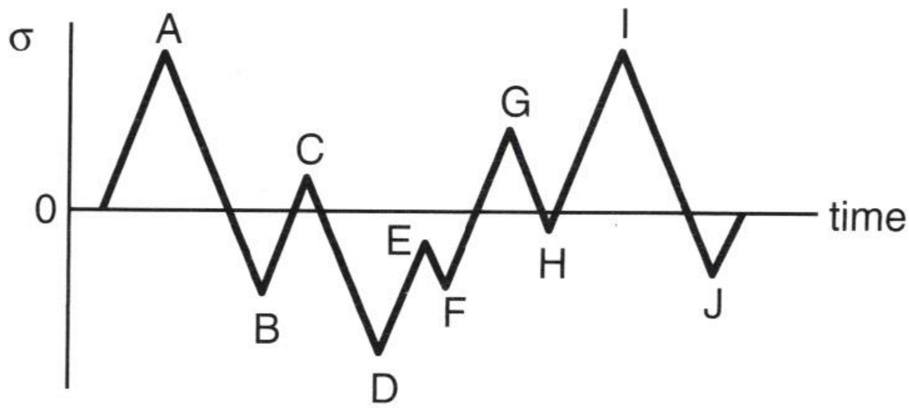
para $p = 1$, recorre-se a regra linear do dano de Miner



Dano D_B no final dos blocos de carregamentos são diferentes.

Contagem de Ciclos Para Histórias de Carregamentos Irregulares

Rain Flow

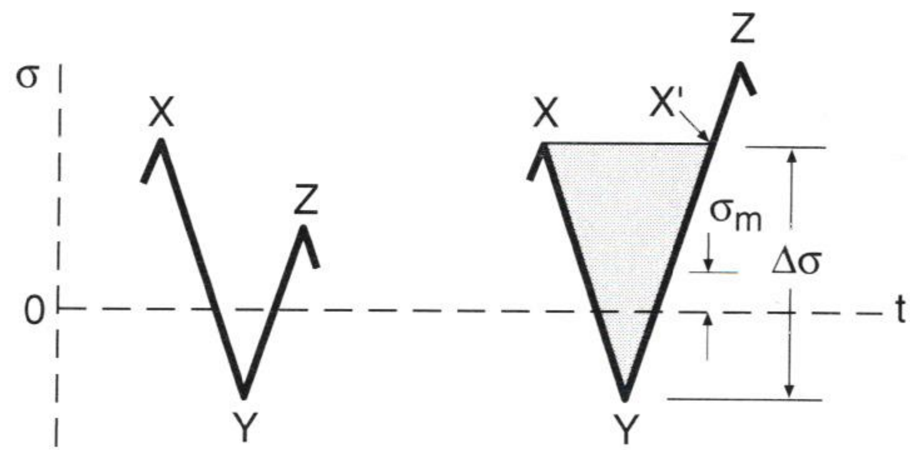


Peaks: A, C

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

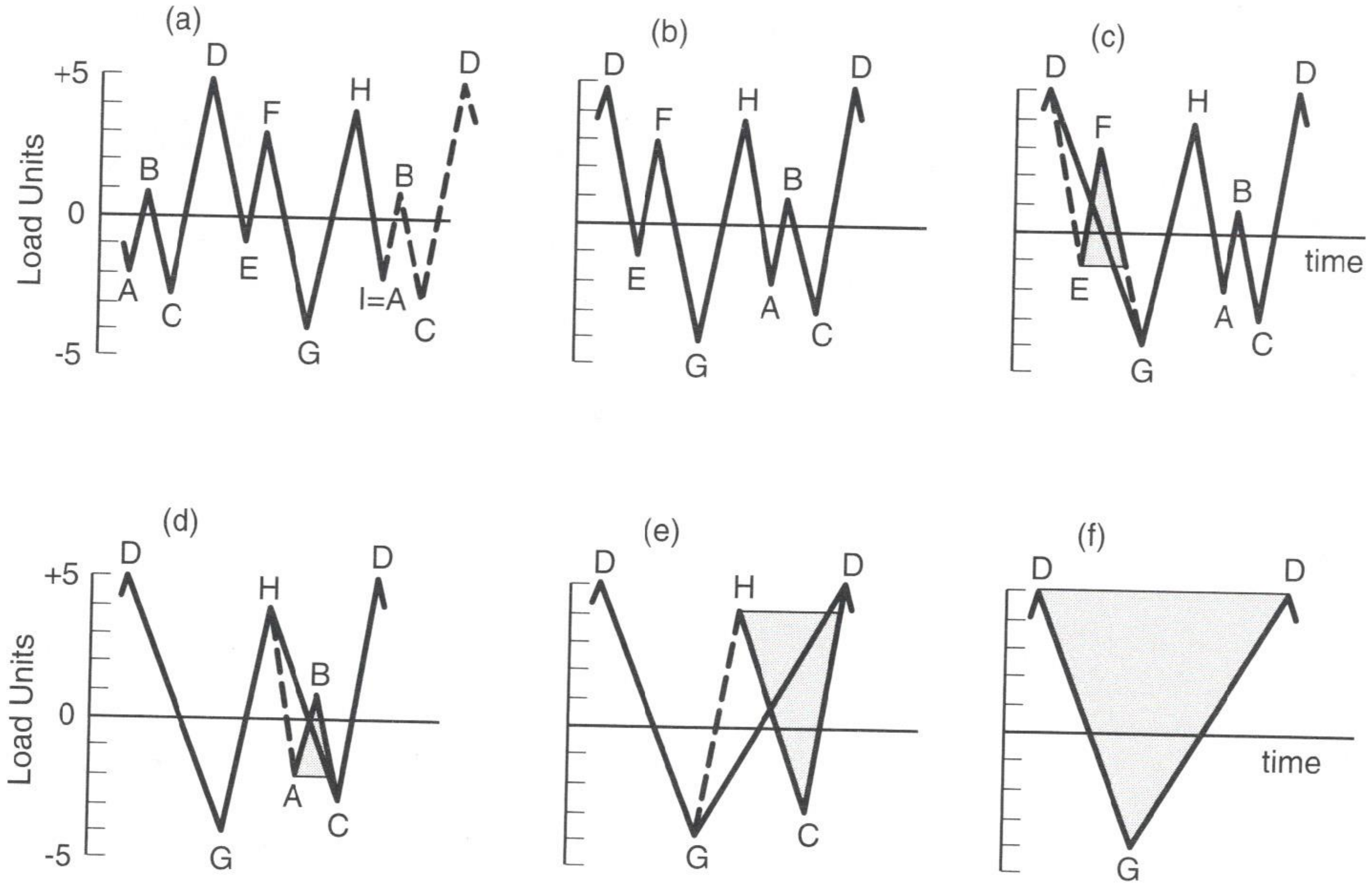
<u>For cycle X-Y</u>

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	$S = \sigma'_f\,(2N_f)^b = A(N_f)^b$			σ_a=C+D logN_f	
			σ'_f	A	b	C	D
Aços							
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
Liga de Al							
2024-T4	303	476	900	839	-0.102	624	-69.9
Liga de Ti							
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.

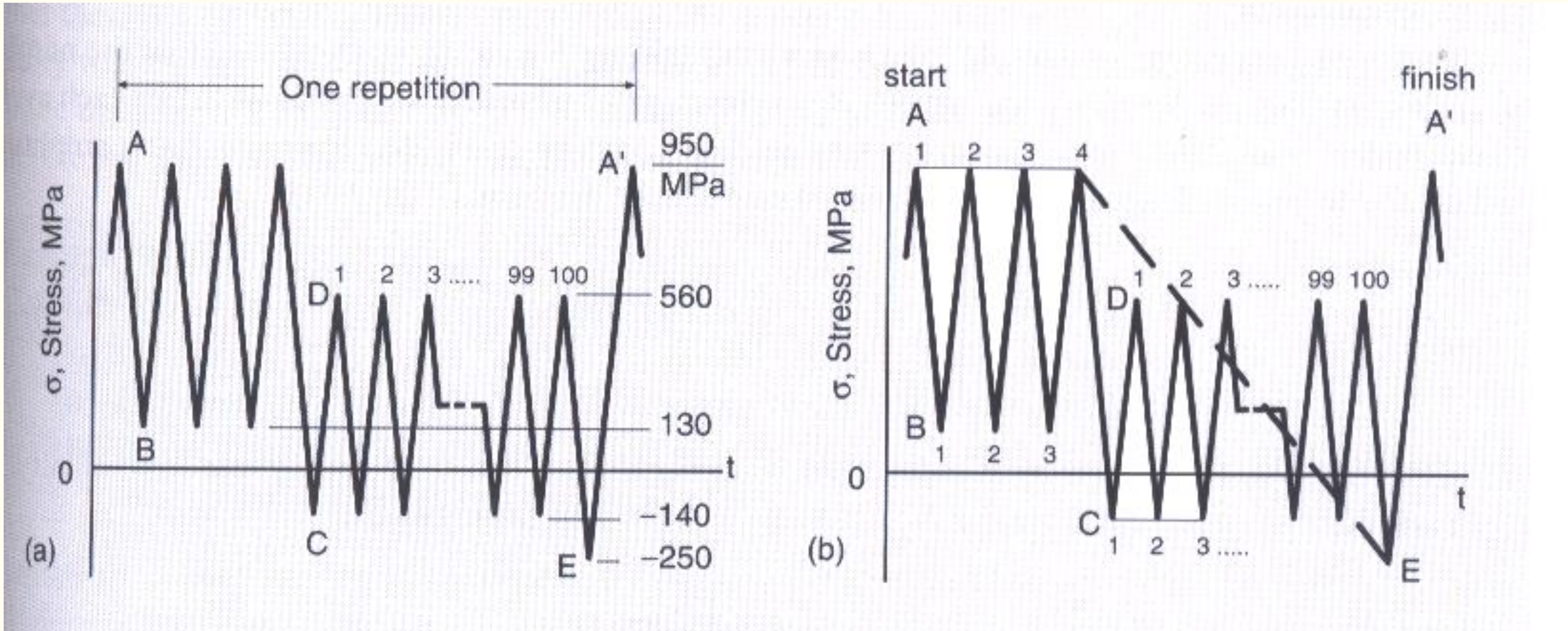


Figure E9.9

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

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

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

A estimativa do número de repetições pode ser obtida para :

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

$$B_f = \frac{1}{3{,}068x10^{-4}} = 3259 \text{ repetições}$$

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 x N_B;
- Para cada ciclo uma σ_{ar} equivalente pode ser considerada a partir do par (amplitude de tensão e tensão média);

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

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

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

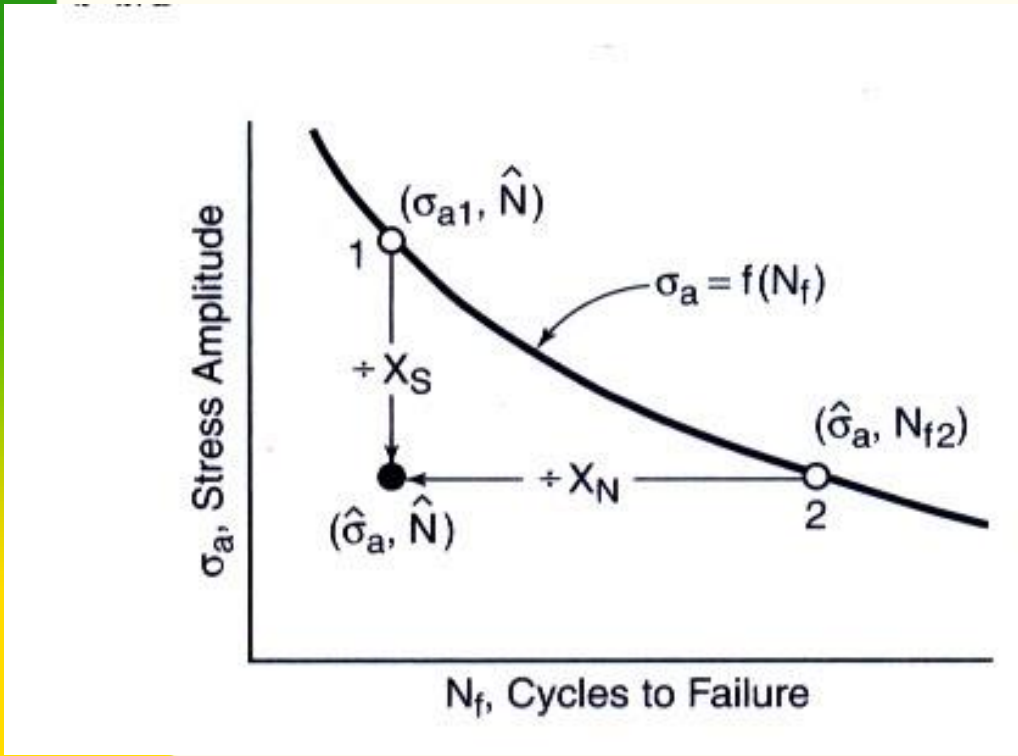
$$\frac{N_f}{N_B}\cdot\left[\sum_{j=1}^{N_B}2\left(\frac{\sigma_{arj}}{\sigma'_f}\right)^{-1/b}\right]=1 \Rightarrow \sigma'_f\left(2N_f\right)^b\left[\sum_{j=1}^{N_B}\left(\sigma_{arj}\right)^{-1/b}/N_B\right]^b=1$$

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

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

- 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:

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

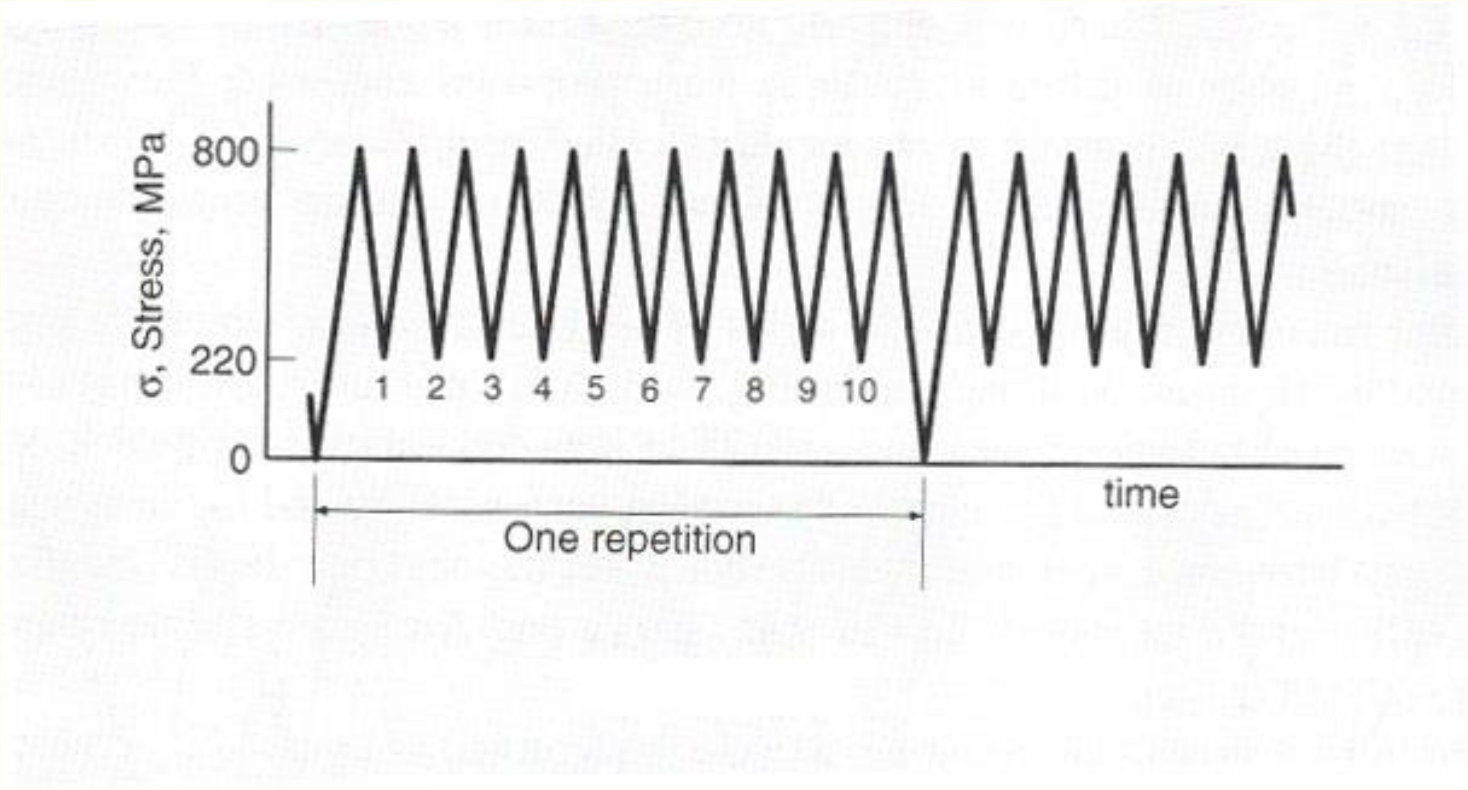


$$X_S = \frac{\sigma_{aq1}}{\hat{\sigma}_{aq}} ....(N_f = \hat{N})$$

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

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

- 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	$1{,}54 \times 10^6$	$6{,}51 \times 10^{-6}$

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

$\sigma'_f = 1758$ MPa e

$b = -0{,}0977$

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

$$B_f\left[\sum_{j=1}^{N_B} \frac{N_j}{N_{fj}}\right] = 1 \Rightarrow B_f = 1/1{,}388x10^{-5} = 72.000..repetições$$

Considere a história de carregamento anterior e:

a) Estime a vida usando o método da tensão equivalente com amplitude constante.

b) Se para esta história de tensões é esperada 1000 repetições, qual o fator de segurança em vida e em tensão?

j	Nj	σ_{min}	σ_{max}	σ_a	σ_m	σ_{arj}	Nj x $(\sigma_{arj})^{-1/b}$
1	1	0	800	400	400	517,8	$6{,}036 \times 10^{27}$
2	10	220	800	290	510	408,5	$5{,}330 \times 10^{27}$

$$\sigma_{aq} = \left[\sum_{j=1}^{k} N_j \left(\sigma_{arj}\right)^{-1/b} \Big/ N_B \right]^{-b} = [1{,}137x10^{28}/11]^{-(-0{,}0977)} = 435{,}8MPa$$

Substituindo este valor em e calculando Nf:

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

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

O fator de segurança pode ser calculado como:

$$X_N = \frac{N_{f2}}{\hat{N}} = \frac{792.300}{11x1000} = 72{,}0$$

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