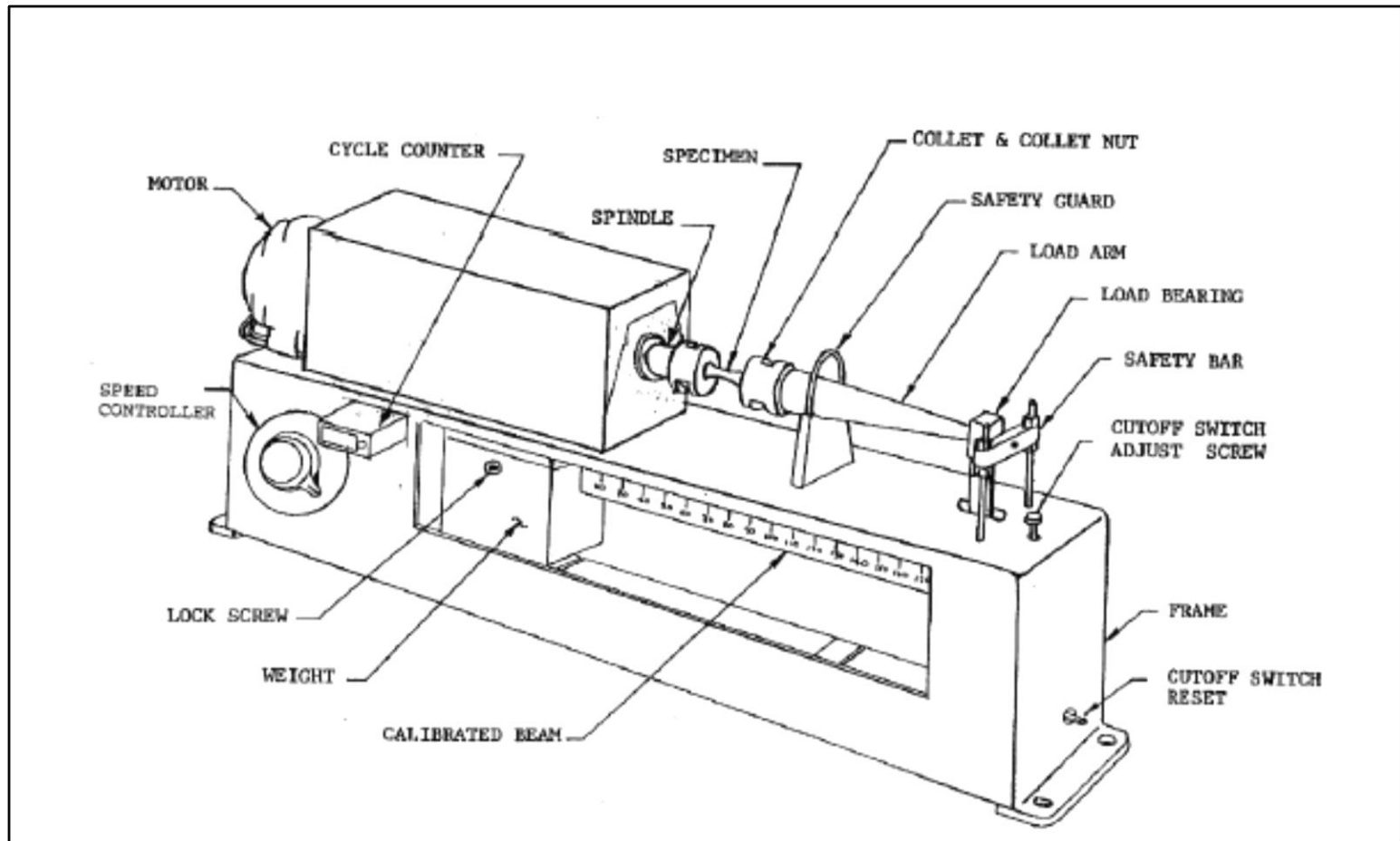


FADIGA DOS MATERIAIS

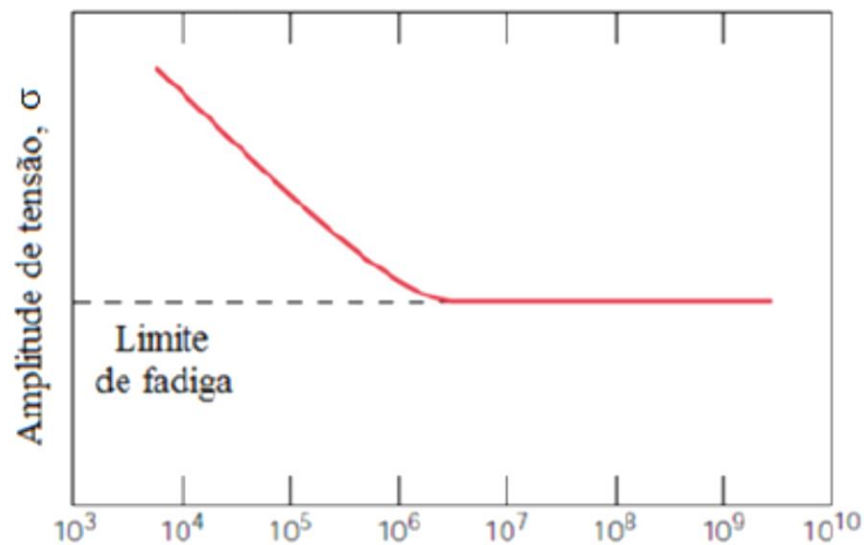
NATUREZA ESTATÍSTICA DA FADIGA

FATORES MODIFICADORES

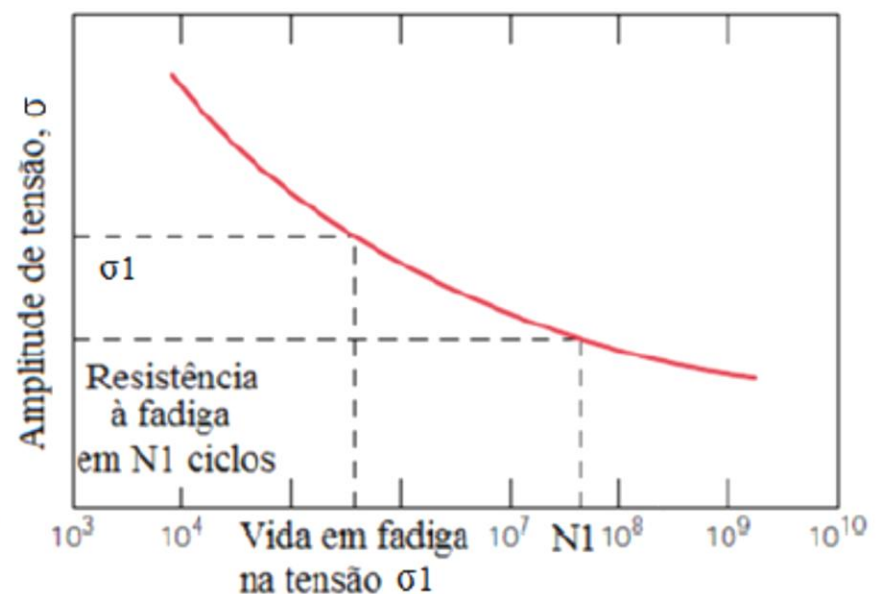
FADIGA S-N



Resultado: curva S-N.



(a) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)

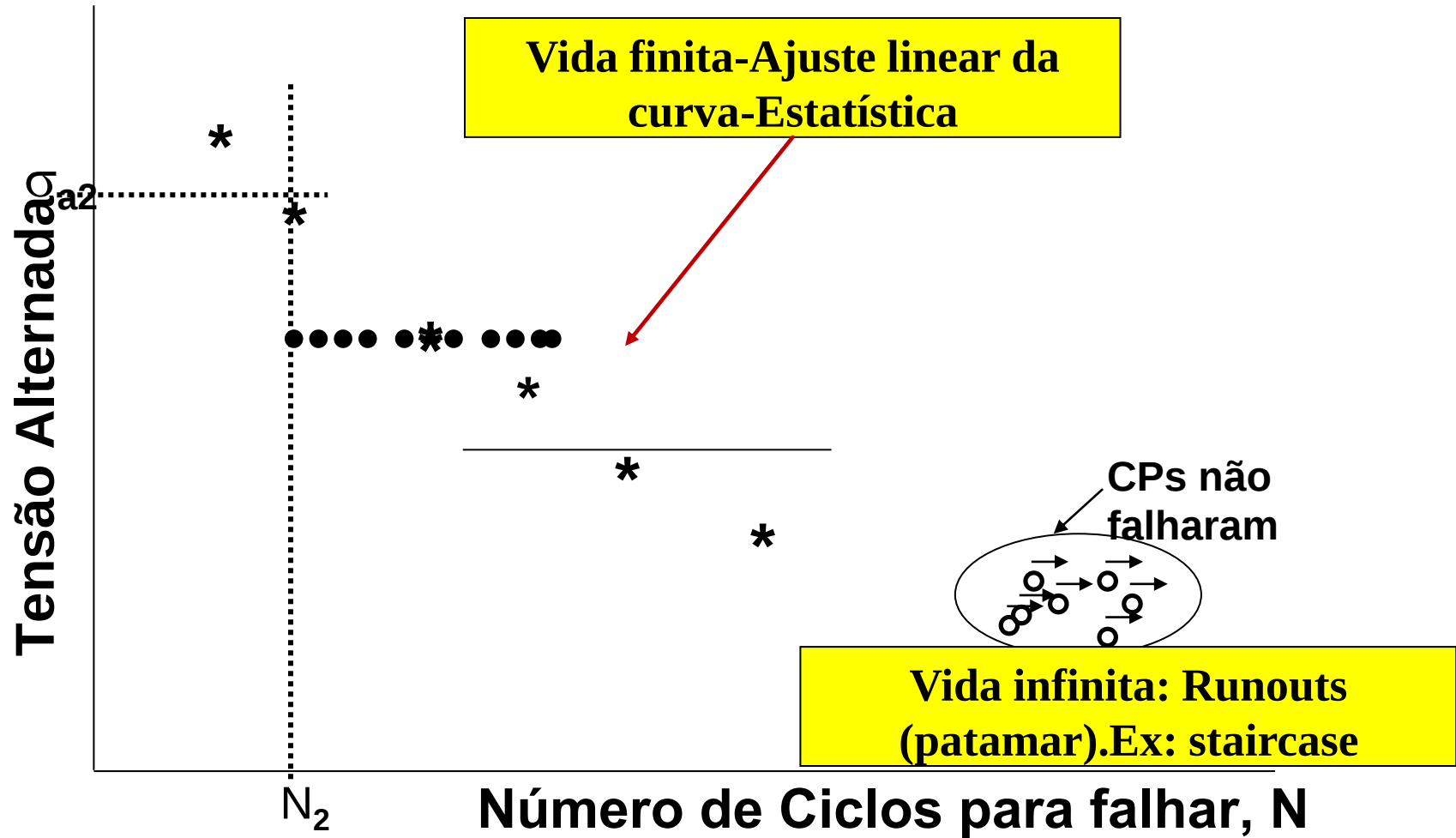


(b) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)

Figura 8.30 Curva S/N típicas: (a) aços e ligas de titânio; (b) metais não ferrosos em geral.

No caso de materiais policristalinos, a ocorrência deste patamar foi relacionada à parada (arrest) de trincas logo após a nucleação, ao encontrarem obstáculos microestruturais como contornos de grãos, partículas precipitadas, inclusões [Klesnil, 1992]

Ensaio S-N - Espalhamento nos Resultados experimentais



Wöhler (1852) – Conclui, entre outras que o fenômeno da fadiga de alto ciclo é dependente de condições macroscópicas e microscópicas o que leva a uma dispersão estatística, aleatória.

A **dispersão** dos resultados do ensaio de fadiga de materiais metálicos, especialmente na **curva S-N**, reflete a natureza **aleatória** de sua **microestrutura**, oriunda de **uma composição química e de um processamento**, combinada à parâmetros de superfície como **rugosidade, tensão superficial, concentradores de tensão (geometria)**. Uma quantidade (como uma dada propriedade mecânica) que apresente espalhamento é chamada de **variável aleatória**. A Estatística engloba um conjunto de métodos para a análise O primeiro passo no tratamento estatístico é estabelecer uma distribuição de probabilidades que represente adequadamente a dispersão dos resultados experimentais: função **densidade de probabilidade (f.d.p.)**, denotada por **$f(x)$** .

Propriedades da função densidade de probabilidades $f(x)$

$$f(x) \geq 0 \forall x$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

$$F(x) = \int f(x) dx$$

$$F(a) = P(x \leq a) = \int_{-\infty}^a f(x) dx$$

Na análise estatística dos dados de **vida em fadiga** dos materiais é com frequência adotada a **distribuição log-normal**.

Distribuição normal ou gaussiana

Proposta por **J.C.F. Gauss (1777-1855)** e cuja f.d.p. é dada pela equação:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right]$$

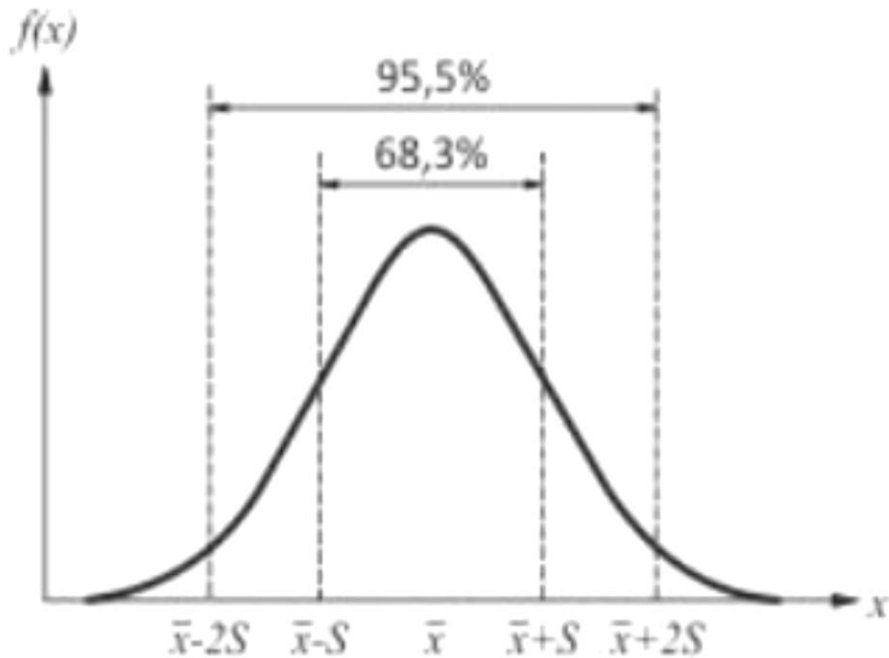
Ela é descrita por dois parâmetros, a média μ (**uma medida de posição ou tendência central dos dados**) e o desvio-padrão σ (**uma medida da dispersão ou espalhamento dos dados**).

A partir de uma amostra representativa constituída pelos resultados de uma série de **n ensaios similares**. Assim, a média $\bar{x}$ e o desvio padrão S da amostra são calculados e podem ser considerados **boas aproximações** dos valores reais de μ e σ , se **n** for suficientemente **grande**.

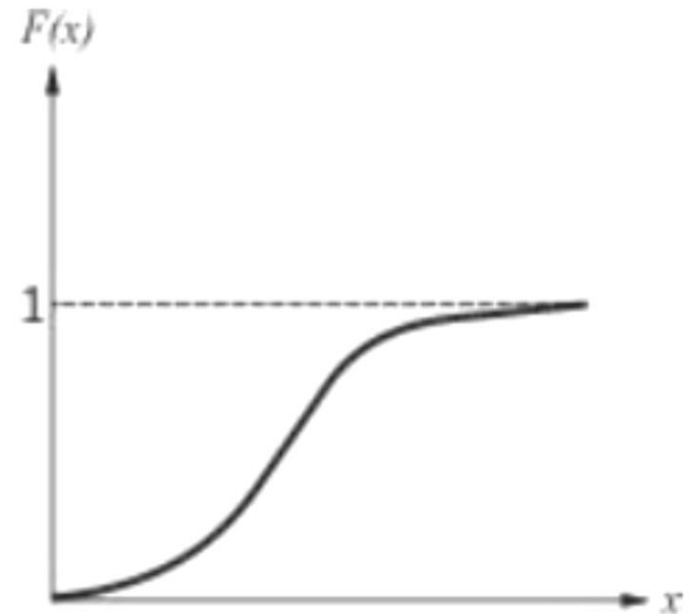
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Distribuição normal: (a) função densidade de probabilidade; (b) função de distribuição acumulada



(a)



(b)

Distribuição de Weibull

Essa função de distribuição de probabilidades foi proposta pelo **engenheiro e matemático sueco E.H.W. Weibull (1887-1979)**. É aplicada na **análise estatística do módulo de ruptura** de materiais frágeis (**ensaio de flexão**) e na avaliação do **tempo de falha** de componentes mecânicos (**confiabilidade**).

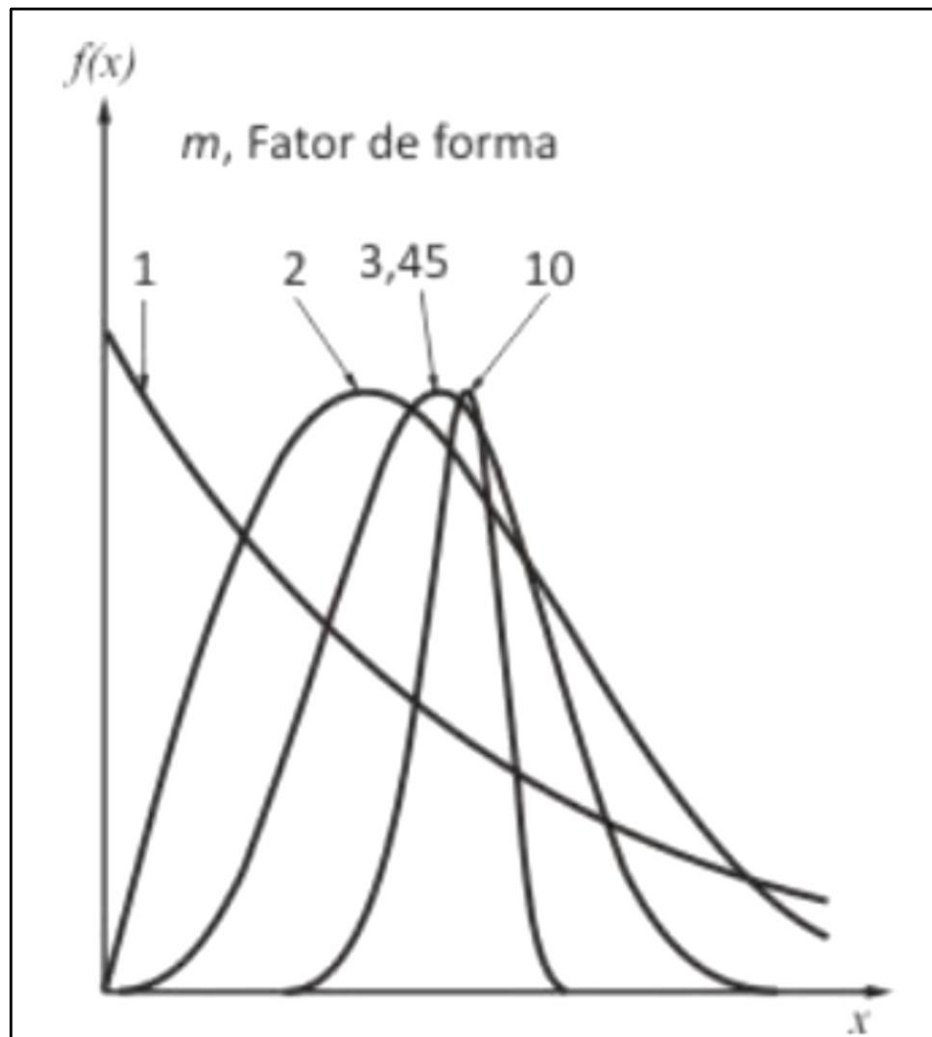
$$f(x) = \frac{m(x-x_0)^{m-1}}{b^m} \exp \left[- \left(\frac{x-x_0}{b} \right)^m \right]$$

onde os parâmetros são:

b = valor característico ou de referência; é o fator de escala da distribuição.

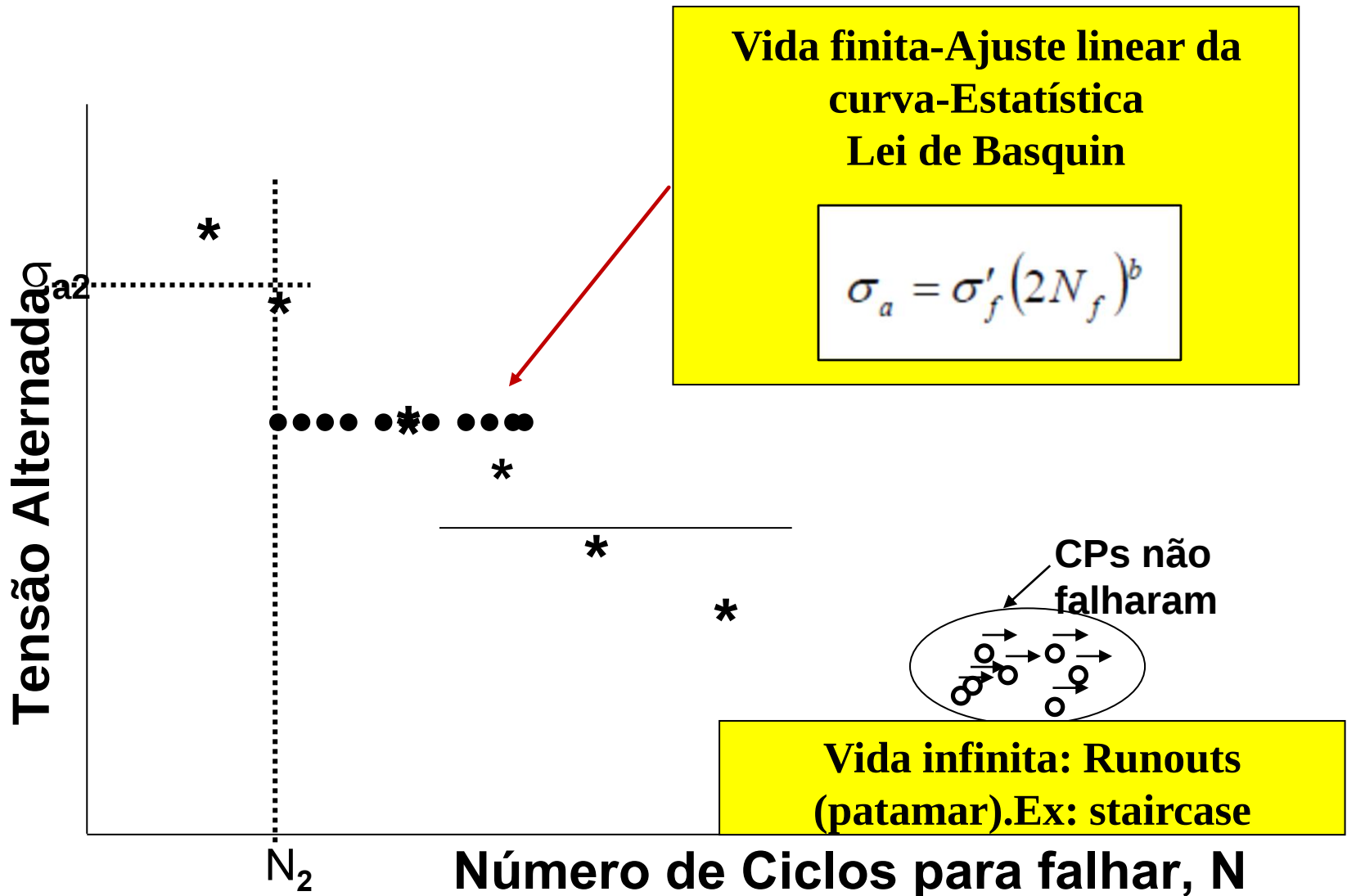
m = módulo de Weibull; é o fator de forma da distribuição.

x_0 = limiar da variável aleatória; é o valor mínimo para qualquer membro da população.



Quando $m = 1$, define-se a **distribuição exponencial**, que é um caso particular da **distribuição de Weibull**.

Ensaio S-N - Espalhamento nos Resultados experimentais



Lei de Basquin: relaciona a amplitude de tensão σ_a com o número de reversões para a falha, $2N_f$ (um ciclo de carregamento corresponde a duas reversões). O **coeficiente de resistência à fadiga**, σ'_f é dado pela extrapolação da curva S/N para o primeiro meio-ciclo ($2N_f = 1$). O parâmetro **b** é o **expoente de resistência à fadiga**.

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b$$

A norma **ASTM E739** define algumas relações para o **ajuste dos dados de fadiga de forma a representar o trecho linear ou linearizado das curvas S/N**.

$Y = \log(N_f)$, A e B são os parâmetros de ajuste, $X = S$ ou $X = \log(S)$, onde S pode assumir o valor da tensão máxima do ciclo de carregamento ($\sigma_{\text{máx}}$) ou da amplitude de tensão (σ_a). Quando $X = \log(\sigma_a)$, tem-se uma expressão equivalente à equação de Basquin.

ANÁLISE DOS DADOS DE FADIGA – CURVAS S/N

Modelos Matemáticos mais Empregados

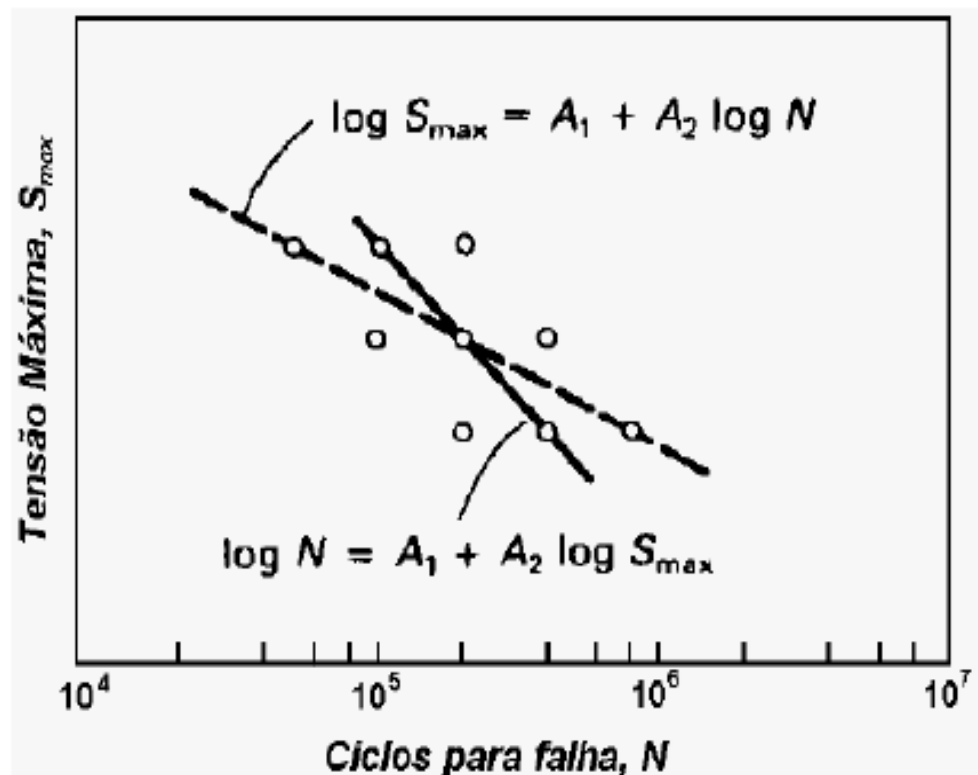
- Lei de Basquin: $\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b$
- ASTM E739: modelos lineares da forma $Y = A + B \cdot X$
- Nos modelos mais empregados, adota-se:

$$\begin{cases} Y = \log(N_f) \\ X = S \text{ ou } X = \log(S) \end{cases}$$

onde: $S = \sigma_{m\acute{a}x}$ ou $S = \sigma_a$

Escolha correta dos parâmetros

- Tensão: variável independente
- Vida: variável dependente



ANÁLISE DOS DADOS DE FADIGA

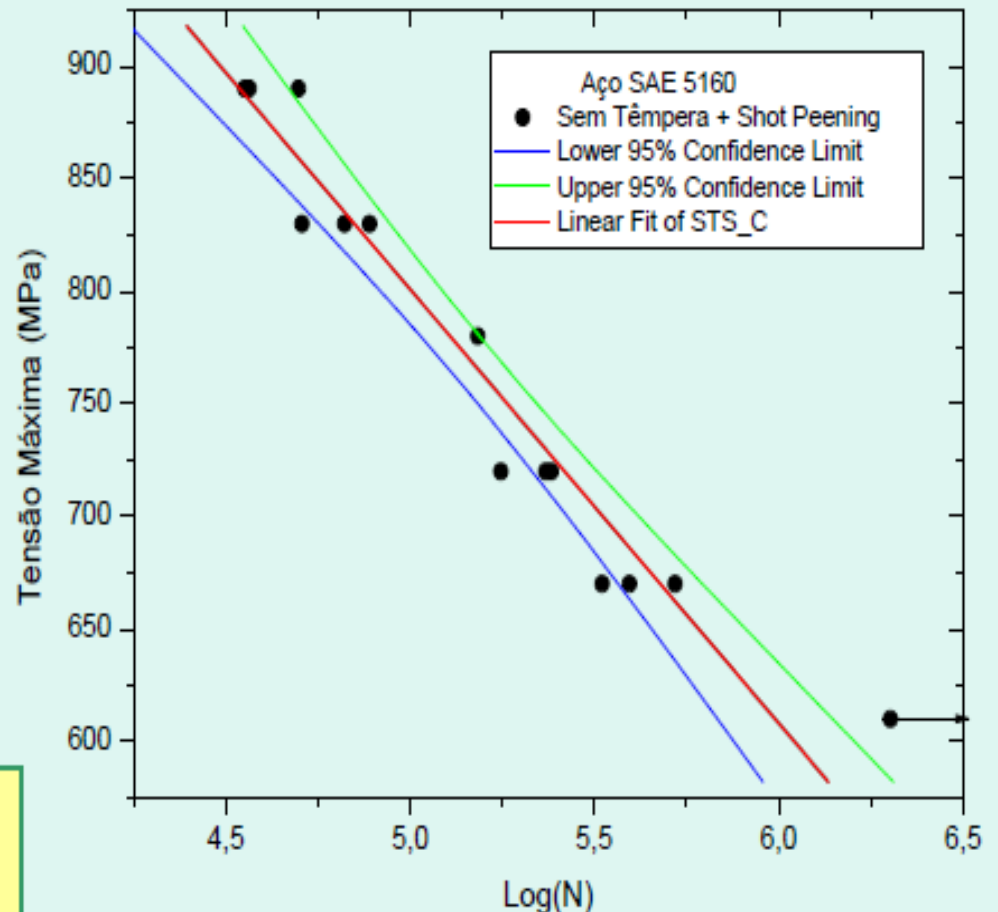
Exemplo de curva S/N obtida no Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL/USP

Condições do Ensaio:

- Corpos-de-prova cilíndricos
- Fadiga Axial
- Controle de Força
- $R = 0,1$
- Frequencia = 20 Hz

Significado do Intervalo de Confiança:

Temos um nível de confiança de 95% de que a curva média de fadiga deste material esteja dentro do intervalo.

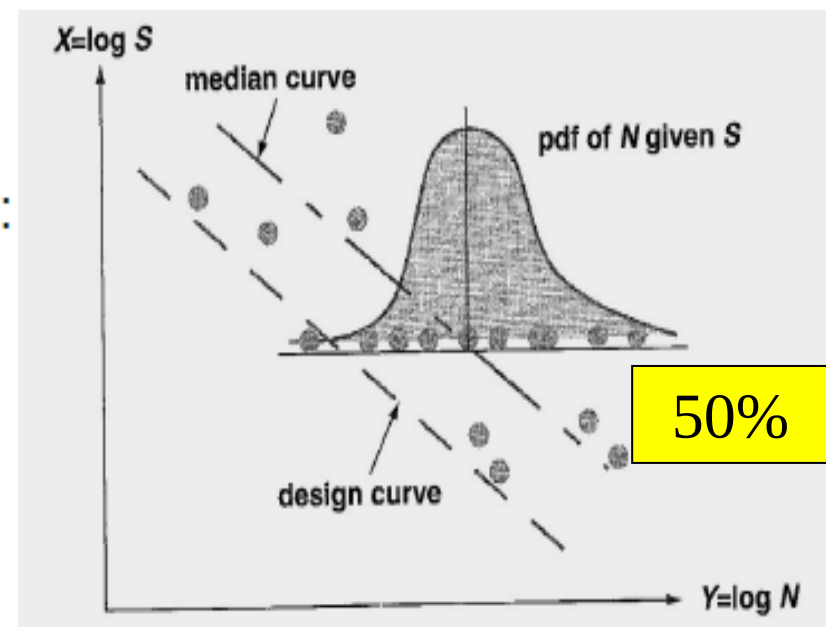


CURVA S/N DE PROJETO NA REGIÃO DE VIDA FINITA

Existem métodos práticos para se obter uma “*Design S/N Curve*” que caracteriza a vida mínima em fadiga para uma dada tensão, de modo que a maioria dos dados de fadiga fiquem acima deste valor mínimo, também chamado de “*Lower Bound*”.

A escolha da *Lower Bound* depende de:

- Custo de material
- Política de segurança
- Norma industrial



Exemplo: Um valor que pode ser usado em projeto de componentes é dado pelo **R95C90**, que significa que há 95% de probabilidade de sobrevivência, com nível de confiança de 90% para a solicitação em uma dada tensão.

CURVA S/N DE PROJETO NA REGIÃO DE VIDA FINITA

Tradicionalmente emprega-se em engenharia as curvas de projeto 2-sigma e 3-sigma inferiores, nos quais a curva média de vida em fadiga é deslocada para a esquerda de um valor igual a duas ou três vezes o desvio-padrão.

Análise Estatística:

Considera-se que a vida em fadiga segue a distribuição log-normal, e que a variância do logaritmo da vida é constante para os níveis de tensão dados.

Modelo de Regressão: $\hat{Y} = \hat{A} + \hat{B}X$ (valores estimados pelos mínimos quadrados)

Tomando os logaritmos e reorganizando a lei de Basquin:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad \xrightarrow{\quad} \quad \log(2N_f) = \frac{-1}{b} \log(\sigma'_f) + \frac{1}{b} \log(\sigma_a) \quad \text{onde: } X = \log(\sigma_a)$$

Diagrama: Um retângulo amarelo com o texto 'Y' tem uma seta vermelha apontando para o termo $\log(2N_f)$ no lado esquerdo da equação. Um retângulo amarelo com o texto 'X' tem uma seta vermelha apontando para o termo $\log(\sigma_a)$ no lado direito da equação.

O erro padrão, assumido constante dentro da região de interesse, é dado por:

$$S^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \left[Y_i - (\hat{A} + \hat{B}X_i) \right]^2$$

e de onde tiramos:
$$\begin{cases} b = \frac{1}{B} \\ \sigma'_f = 10^{-Ab} \end{cases}$$

CURVA S/N DE PROJETO NA REGIÃO DE VIDA FINITA

Lower-Bound:

A curva de projeto pelos métodos 2-sigma e 3-sigma é escrita como:

$$Y_L(X_i) = \hat{Y}(X_i) - K \cdot S \quad \text{onde } K = 2 \text{ ou } K = 3.$$

$$\log(2N_f) = \log(2N_f) - 3\sigma \text{ (ou } 3S)$$

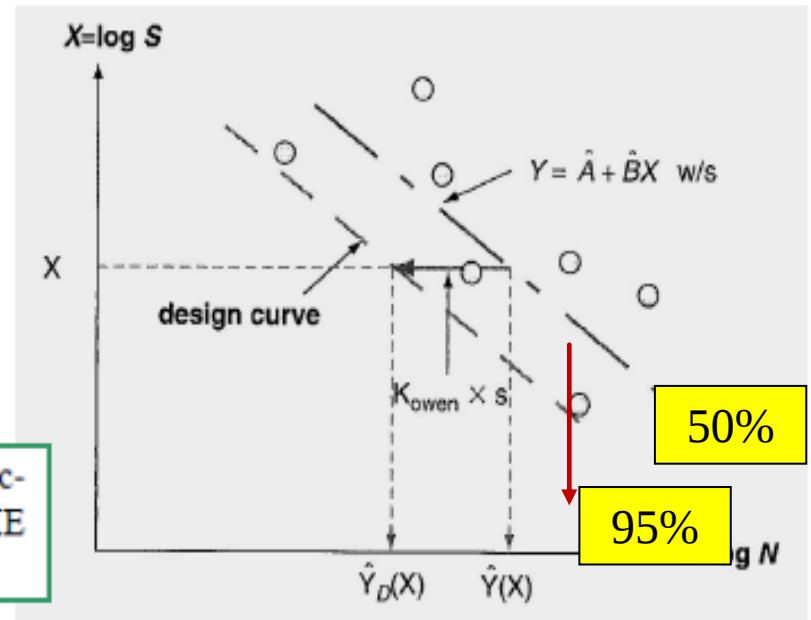
Falha: não considera o número de cps e nem o intervalo de confiança e confiabilidade desejada!

Alternativamente, pode-se usar o Limite de Tolerância de Owen, dado por:

$$\log(2N_f) = \log(2N_f) - K_{OWEN} \times S$$

Os parâmetros são determinados por meio de coeficientes empíricos, cuja determinação é detalhada na seguinte referência:

Shen CL, Wirsching PH, Cashman GT. Design curve to characterize fatigue strength. J Eng Mater Technol ASME 1996;118:535-41.



CURVA S/N DE PROJETO NA REGIÃO DE VIDA FINITA

Valores de K_{Owen} para vários tamanhos de amostra, confiabilidade e níveis de confiança:

TABLE 4.5 K_{Owen} Factors for the Approximate Owen Tolerance Limits

n_S	$C = 0.90$			$C = 0.95$		
	$R = 0.90$	$R = 0.95$	$R = 0.99$	$R = 0.90$	$R = 0.95$	$R = 0.99$
6	2.862	3.504	4.750	3.560	4.331	5.837
7	2.608	3.190	4.319	3.167	3.846	5.173
8	2.441	2.987	4.043	2.910	3.534	4.751
9	2.323	2.843	3.851	2.728	3.314	4.455
10	2.253	2.736	3.707	2.592	3.151	4.237
11	2.162	2.651	3.595	2.485	3.024	4.069
12	2.105	2.583	3.505	2.400	2.923	3.936
13	2.057	2.526	3.430	2.331	2.840	3.827
14	2.016	2.478	3.367	2.272	2.771	3.737
15	1.980	2.436	3.313	2.222	2.712	3.660
16	1.949	2.400	3.266	2.178	2.661	3.594
17	1.922	2.369	3.225	2.140	2.617	3.536
18	1.898	2.340	3.189	2.106	2.577	3.485
19	1.876	2.315	3.156	2.076	2.542	3.440
20	1.857	2.292	3.127	2.048	2.510	3.399
21	1.839	2.272	3.100	2.024	2.482	3.363
22	1.822	2.252	3.076	2.001	2.456	3.329
23	1.807	2.235	3.054	1.981	2.432	3.300
24	1.793	2.219	3.034	1.961	2.410	3.271
25	1.781	2.204	3.015	1.947	2.389	3.247
26	1.769	2.191	2.997	1.927	2.370	3.221
27	1.757	2.178	2.981	1.912	2.353	3.199
28	1.747	2.166	2.966	1.898	2.337	3.178
29	1.737	2.155	2.952	1.885	2.321	3.158
30	1.728	2.144	2.939	1.872	2.307	3.140

Source: From Williams et al., 2003.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Foram realizados ensaios de fadiga por flexão rotativa ($R = -1$), com o objetivo de se obter dados para análise de confiabilidade, empregando-se 12 peças.

Os resultados são dados na tabela abaixo. Pede-se:

- Determinar a curva S/N pelo método dos mínimos quadrados
- Determinar a curva *Lower-Bound* com 95% de probabilidade de sobrevivência e 90% de nível de confiança.

Stress Amplitude S_a (MPa)	Fatigue Life $2N_f$ (Reversals)	X $\text{Log}(S_a)$	Y $\text{Log}(2N_f)$
200	$9.8\text{E} + 03$	2.30103	3.99123
200	$1.2\text{E} + 04$	2.30103	4.07918
200	$4.1\text{E} + 04$	2.30103	4.61278
200	$2.4\text{E} + 04$	2.30103	4.38021
175	$7.7\text{E} + 06$	2.24304	6.88649
175	$5.6\text{E} + 05$	2.24304	5.74819
175	$4.0\text{E} + 06$	2.24304	6.60206
175	$5.2\text{E} + 06$	2.24304	6.71600
150	$2.5\text{E} + 07$	2.17609	7.39794
150	$9.0\text{E} + 07$	2.17609	7.95424
150	$4.2\text{E} + 07$	2.17609	7.62325
150	$3.0\text{E} + 07$	2.17609	7.47712

Material	Limite de escoamento	Limite de resistência	Tensão Verd. de fratura	$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b = A N_f^B$		
	σ_o	σ_u	$\tilde{\sigma}_{fB}$	σ'_f	A	b = B
<i>(a) Steels</i>						
SAE 1015 (normalized)	228 (33)	415 (60.2)	726 (105)	1020 (148)	927 (134)	-0.138
Man-Ten (hot rolled)	322 (46.7)	557 (80.8)	990 (144)	1089 (158)	1006 (146)	-0.115
RQC-100 (roller Q & T)	683 (99.0)	758 (110)	1186 (172)	938 (136)	897 (131)	-0.0648
AISI 4142 (Q & T, 450 HB)	1584 (230)	1757 (255)	1998 (290)	1937 (281)	1837 (266)	-0.0762
AISI 4340 (aircraft quality)	1103 (160)	1172 (170)	1634 (237)	1758 (255)	1643 (238)	-0.0977
<i>(b) Other Metals</i>						
2024-T4 Al	303 (44.0)	476 (69.0)	631 (91.5)	900 (131)	839 (122)	-0.102
Ti-6Al-4V (solution treated and aged)	1185 (172)	1233 (179)	1717 (249)	2030 (295)	1889 (274)	-0.104

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Dos mínimos quadrados, determinamos: $\begin{cases} \hat{A} = 65,564 \\ \hat{B} = -26,536 \end{cases}$ De onde vem que: $\begin{cases} S = 0,48850 \\ b = -0,0377 \\ \sigma'_f = 296 \text{ MPa} \end{cases}$

A curva S/N média é dada por: $\sigma_a = 296 \cdot (2N_f)^{-0,0377}$

R95C90:

Inicialmente arbitramos um valor $2N_f$ e determinamos σ_a : $2N_f = 2 \times 10^6 \Rightarrow \sigma_a = 171 \text{ MPa}$

Da tabela (ver Tab 4.5), obtemos: $K_{Owen} = 2,583$

O logaritmo da vida na curva R95C90 para tensão de 171 MPa é então:

$$\log(2N_{f,R95C90}) = \log(2 \times 10^6) - 2,583 \times 0,4885 = 5,039 \Rightarrow 2N_{f,R95C90} = 10^{5,039} = 109.400$$

Assim, o coeficiente de resistência da equação R95C90 é calculado:

$$\sigma'_{f,R95C90} = \frac{\sigma_a}{(2N_{f,R95C90})^b} = \frac{171}{(109.400)^{-0,0377}} = 265 \text{ MPa}$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

N = 12 corpos-de-prova
R = 95
C = 90

TABLE 4.5 K_{Owen} Factors for the Approximate Owen Tolerance Limits

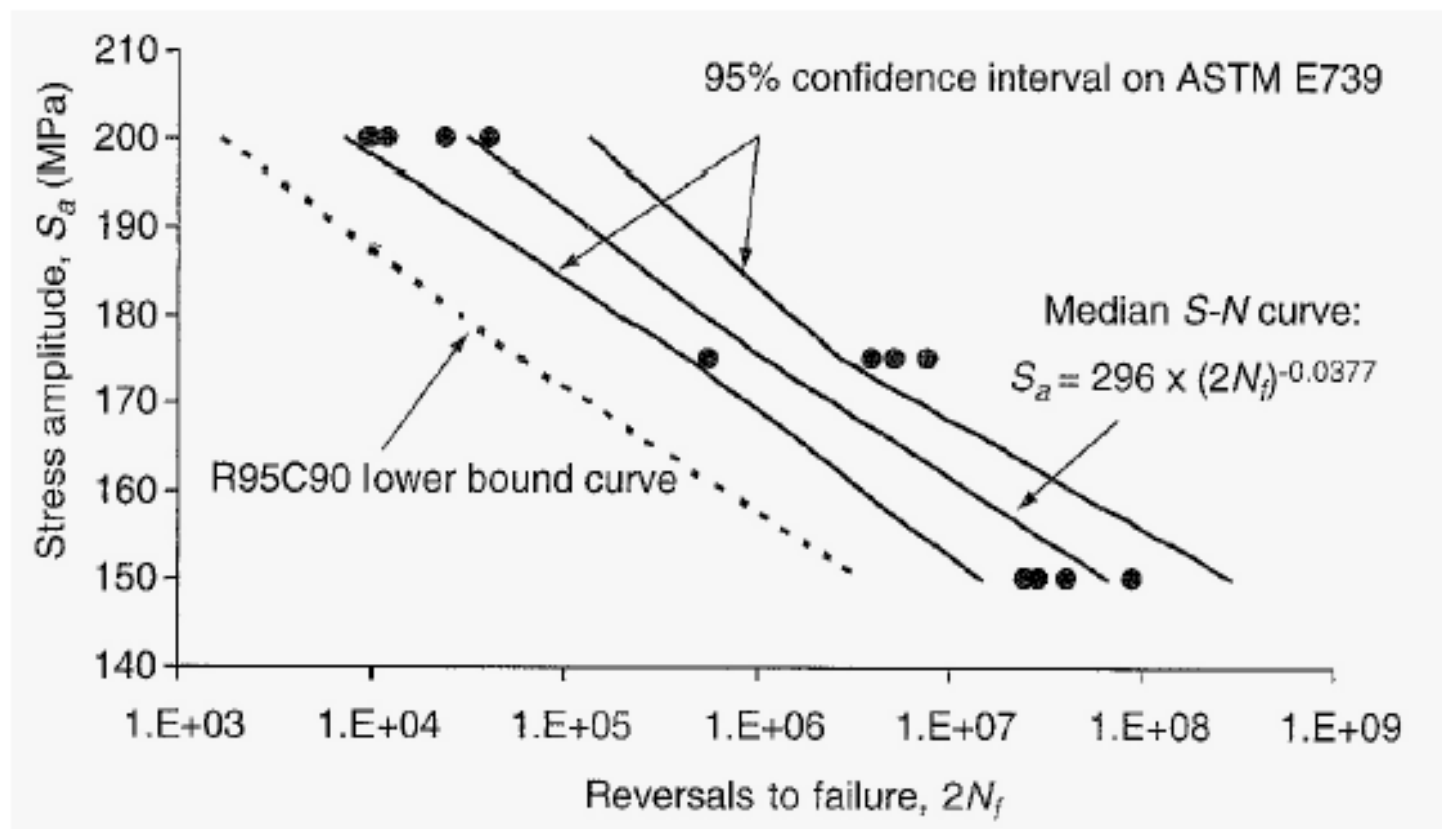
n_S	$C = 0.90$			$C = 0.95$		
	$R = 0.90$	$R = 0.95$	$R = 0.99$	$R = 0.90$	$R = 0.95$	$R = 0.99$
6	2.862	3.504	4.750	3.560	4.331	5.837
7	2.608	3.190	4.319	3.167	3.846	5.173
8	2.441	2.987	4.043	2.910	3.534	4.751
9	2.323	2.843	3.851	2.728	3.314	4.455
10	2.253	2.736	3.707	2.592	3.151	4.237
11	2.162	2.651	3.595	2.485	3.024	4.069
12	2.105	2.583	3.505	2.400	2.923	3.936
13	2.057	2.526	3.430	2.331	2.840	3.827
14	2.016	2.478	3.367	2.272	2.771	3.737
15	1.980	2.436	3.313	2.222	2.712	3.660
16	1.949	2.400	3.266	2.178	2.661	3.594
17	1.922	2.369	3.225	2.140	2.617	3.536
18	1.898	2.340	3.189	2.106	2.577	3.485
19	1.876	2.315	3.156	2.076	2.542	3.440
20	1.857	2.292	3.127	2.048	2.510	3.399
21	1.839	2.272	3.100	2.024	2.482	3.363
22	1.822	2.252	3.076	2.001	2.456	3.329
23	1.807	2.235	3.054	1.981	2.432	3.300
24	1.793	2.219	3.034	1.961	2.410	3.271
25	1.781	2.204	3.015	1.947	2.389	3.247
26	1.769	2.191	2.997	1.927	2.370	3.221
27	1.757	2.178	2.981	1.912	2.353	3.199
28	1.747	2.166	2.966	1.898	2.337	3.178
29	1.737	2.155	2.952	1.885	2.321	3.158
30	1.728	2.144	2.939	1.872	2.307	3.140

Source: From Williams et al., 2003.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

A curva S/N média é dada por: $\sigma_a = 296 \cdot (2N_f)^{-0,0377}$

A curva R95C90 é dada por: $\sigma_a = 265 \cdot (2N_f)^{-0,0377}$



Como o **número de ensaios** geralmente é **limitado**, este **nível de confiança (C)** é introduzido no cálculo para assegurar que haja **90% de chance de que o valor real de 95% de confiabilidade (R)** esteja **acima do limite mínimo** [Lee, 2005]. A figura mostra curva S/N média e seu correspondente intervalo de confiança de 95% (significando que **existe 95% de probabilidade de a curva média real estar dentro desse intervalo determinado a partir da amostra ensaiada**), bem como a curva de projeto **R95C90 (linha tracejada)**. Analogamente, existe **95 % de probabilidade de sobrevivência** para as peças abaixo da curva tracejada.

FATORES MODIFICADORES

- ▶ **Efeito do tamanho;**
- ▶ **Efeito do tipo de carregamento;**
- ▶ **Acabamento superficial;**
- ▶ **Tratamentos térmicos e termoquímicos;**
- ▶ **Efeito da temperatura;**
- ▶ **Efeito do meio ambiente;**
- ▶ **Efeito da tensão média.**

Limite de Fadiga **Modificado**:

$$S_e = S_e' C_{\text{tam}} C_{\text{carga}} C_{\text{acab.sup.}}$$

S_e – é o limite de fadiga do CP **real ou componente** ou estrutura;

S_e' - é o limite de fadiga do CP padronizado e **polido sob flexão reversa**;

C_{tam} – Fator que leva em conta o **tamanho**;

C_{carga} - Fator que leva em conta o **carregamento** diferente da flexão reversa;

$C_{\text{acab.sup.}}$ - Fator que leva em conta o **acabamento diferente do polido**.

FATORES MODIFICADORES – EFEITO DO TAMANHO

- O **elo-mais-fraco** **controla** as falhas em geral e em particular o fenômeno de fadiga.
- A **probabilidade** de achar um elo-mais fraco **aumenta** com o **aumento das dimensões** do componente.

Diâmetro(in)	Limite de fadiga (ksi)
0.3	33.0
1.5	27.6
6.75	17.3

Ref: Faupel and Fisher, Engineering design, 1981

- Ajustes Empiricos:

$$C_{\text{size}} = 1.0 \text{ if } d \leq 0.3 \text{ in (8 mm)}$$

$$C_{\text{size}} = 0.869 d^{-0.097} \text{ if } 0.3 \text{ in} \leq d \leq 10 \text{ in}$$

$$C_{\text{size}} = 1.189 d^{-0.097} \text{ if } 8 \text{ mm} \leq d \leq 250 \text{ mm}$$

FATORES MODIFICADORES – EFEITO DE CARREGAMENTO

Gradiente de tensões na flexão e torção

Estimativas Conservadoras e **Empíricas**

$$S_e(\text{axial}) \cong 0.7 S_e(\text{flexão})$$
$$t_e(\text{torção}) \cong 0.577 S_e(\text{flexão})$$

Exemplo: Para aços

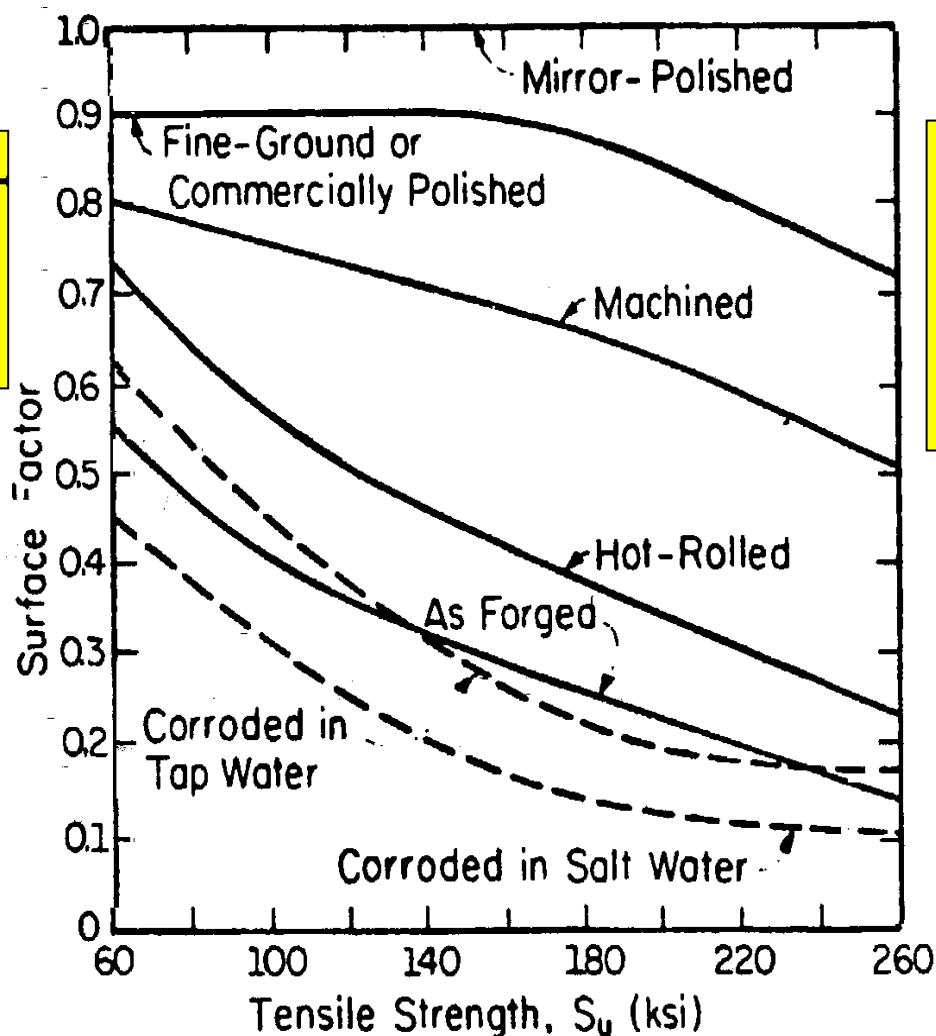
$$S_e \cong 0.5 S_u$$

$$S_e(\text{axial}) \cong 0.7 S_e(\text{flexão}) \cong 0.35 S_u$$

$$t_e(\text{torção}) \cong 0.577 S_e(\text{flexão}) \cong 0.2885 S_u$$

FATORES MODIFICADORES – ACABAMENTO SUPERFICIAL

$C_{acab.sup.}$



Riscos, pites e marcas de usinagem: concentradores de tensão e reduzem a vida em fadiga

Figure 1.13 Surface finish factor: steel parts. (From Ref. 6.)

FATORES MODIFICADORES – ACABAMENTO SUPERFICIAL

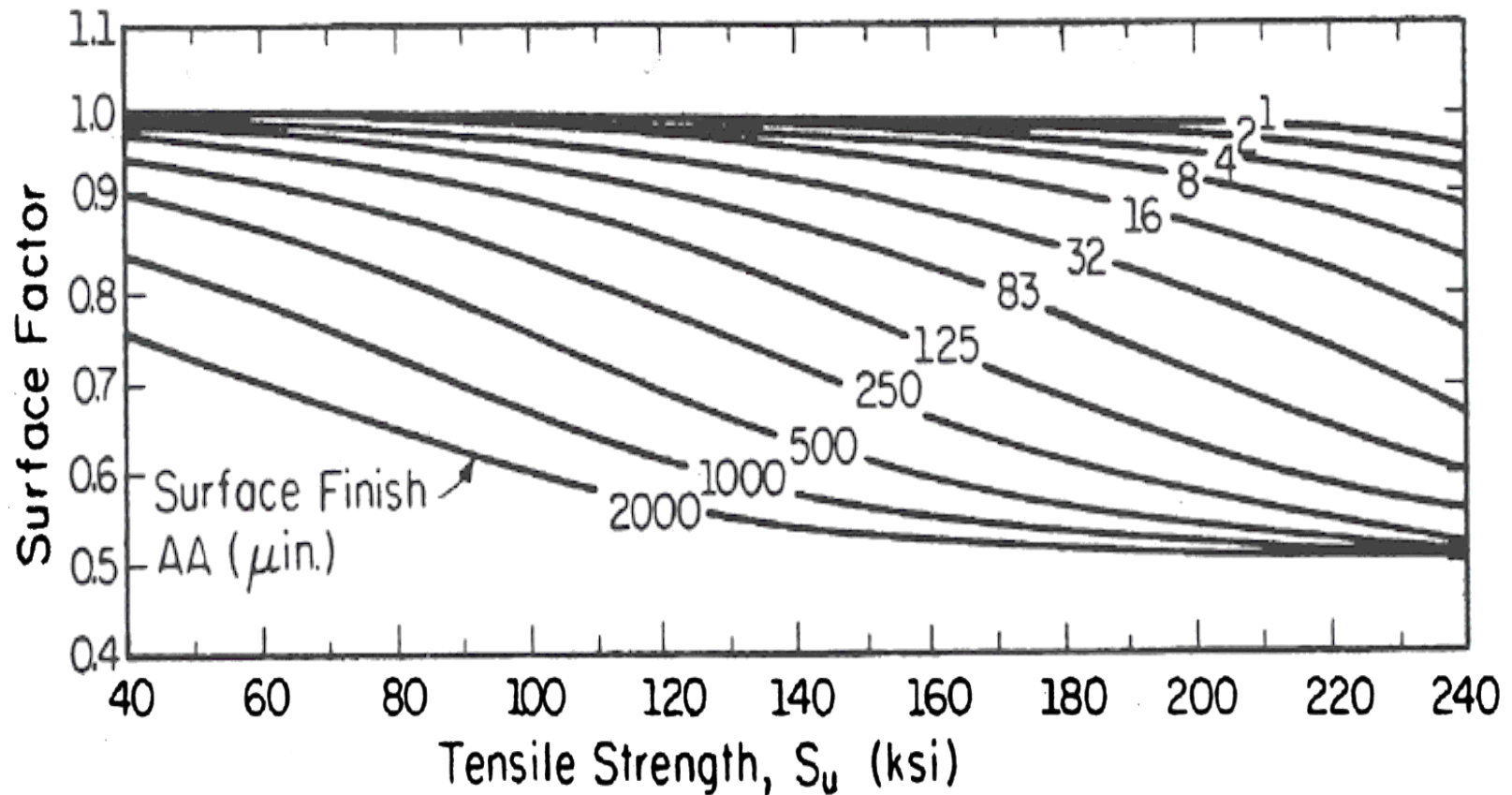


Figure 1.14 Surface finish factor versus surface roughness and strength: steel parts. (From Ref. 7.)

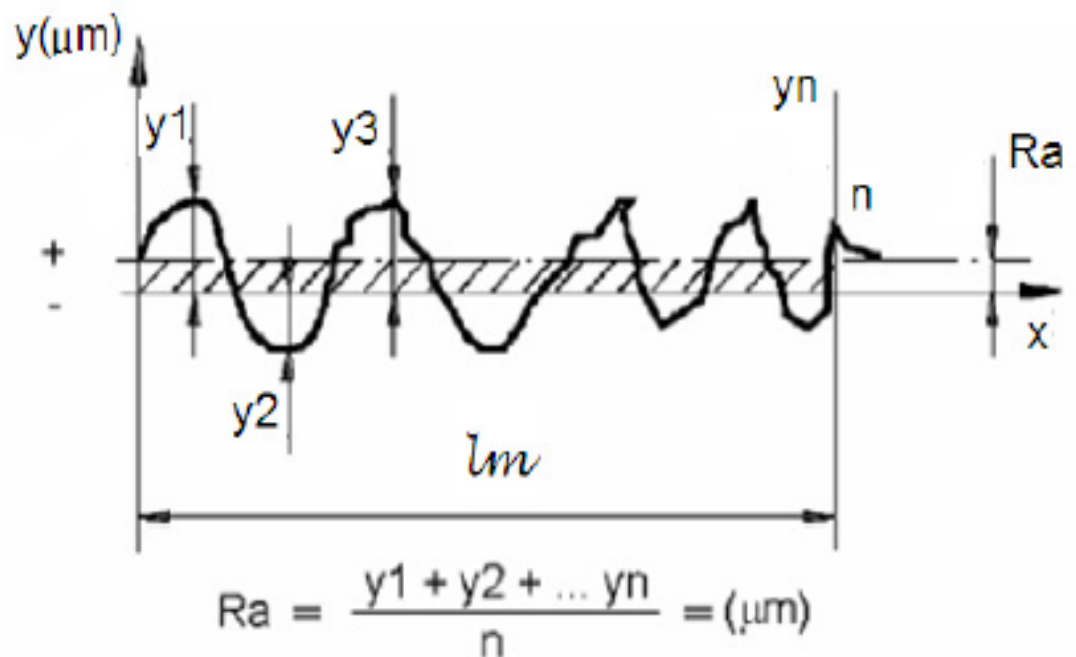
ROUGHNESS AVERAGE

Ra = rugosidade aritmética ou média,
também representado por **CLA** ou **AA**.

- Unidades: micrometro (μm) ou micropolegada
- Parâmetro determinado em função da linha média M do perfil de rugosidade

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{A}{L}$$

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$



RUGOSÍMETRO



FATORES MODIFICADORES – TRATAMENTO TÉRMICO

- Trincas de fadiga iniciam na superfície do componente;
- **Plating, processos térmicos, termoquímicos e mecânicos** induzem **tensões residuais** na superfície;
- Se as tensões residuais **são compressivas**, elas serão **benéficas**;
- Se as tensões residuais forem **trativas**, elas serão **prejudiciais**;
- Tensões residuais **podem desaparecer** devido ao **relaxamento de tensões** devido **altas temperaturas e sobrecargas**.

TENSÃO RESIDUAL

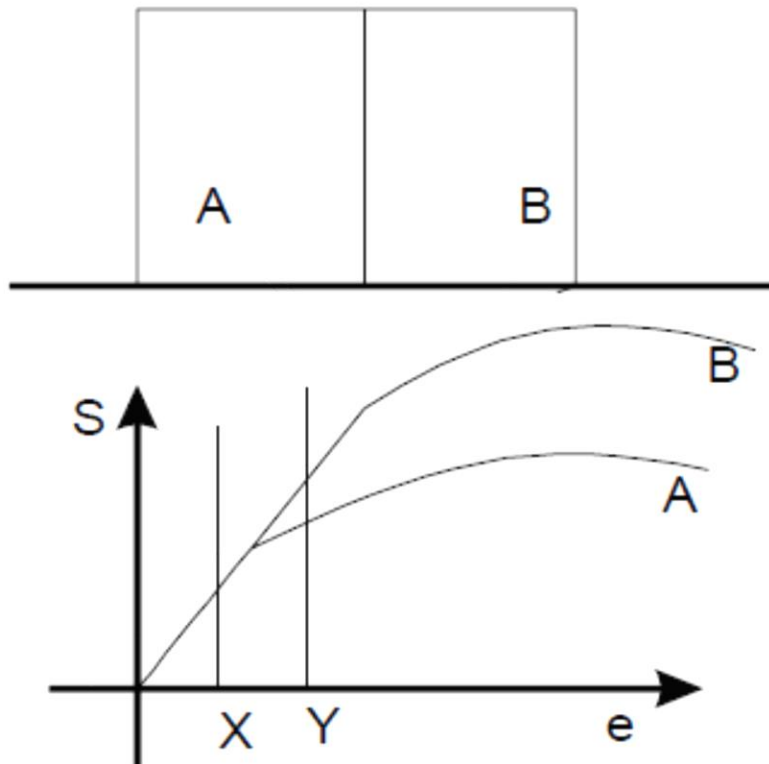
- **Tensões Residuais (TR)** são tensões que atuam num componente ou estrutura na **ausência de esforços externos**, sejam cargas mecânicas, esforços resultantes de gradientes de temperatura ou de efeitos inerciais. Portanto, pela própria definição, as **tensões residuais constituem um sistema em equilíbrio**.
- **TR são tensões secundárias;**
- **Tensões primárias: resultantes dos esforços externos e necessárias para o equilíbrio de forças e momentos;**
- **Tensões secundárias: resultantes da interação entre partes adjacentes do mesmo componente ou estrutura, que impõe restrições a deformações diferenciais localizadas;**

TENSÃO RESIDUAL

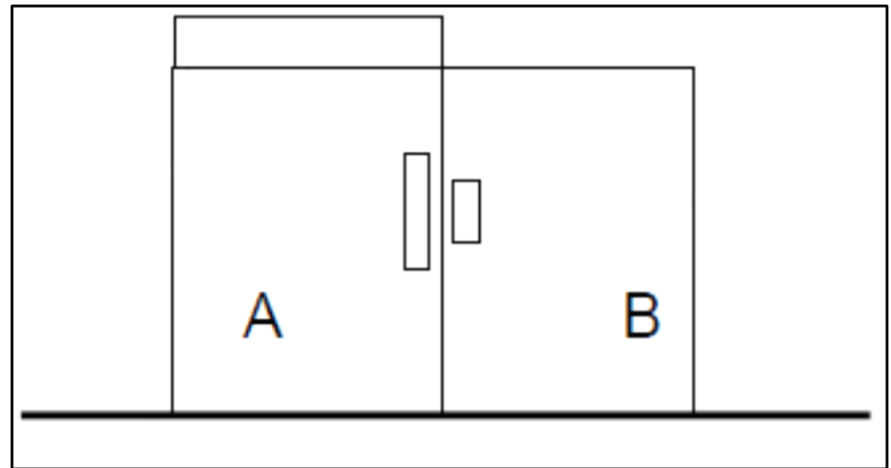
TENSÕES RESIDUAIS RESULTAM DE DEFORMAÇÕES PERMANENTES NÃO UNIFORMES NA SEÇÃO RESISTENTE DE UMA PEÇA OU ESTRUTURA.

TENSÃO RESIDUAL

MECANISMO BÁSICO DO DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES RESIDUAIS



BLOCOS A E B SOLDADOS. SOLDA DE RESISTÊNCIA INFINITA (!!!)



A DEFORMA E TENTA TRACIONAR B.
B REAGE COMPRIMENDO A.

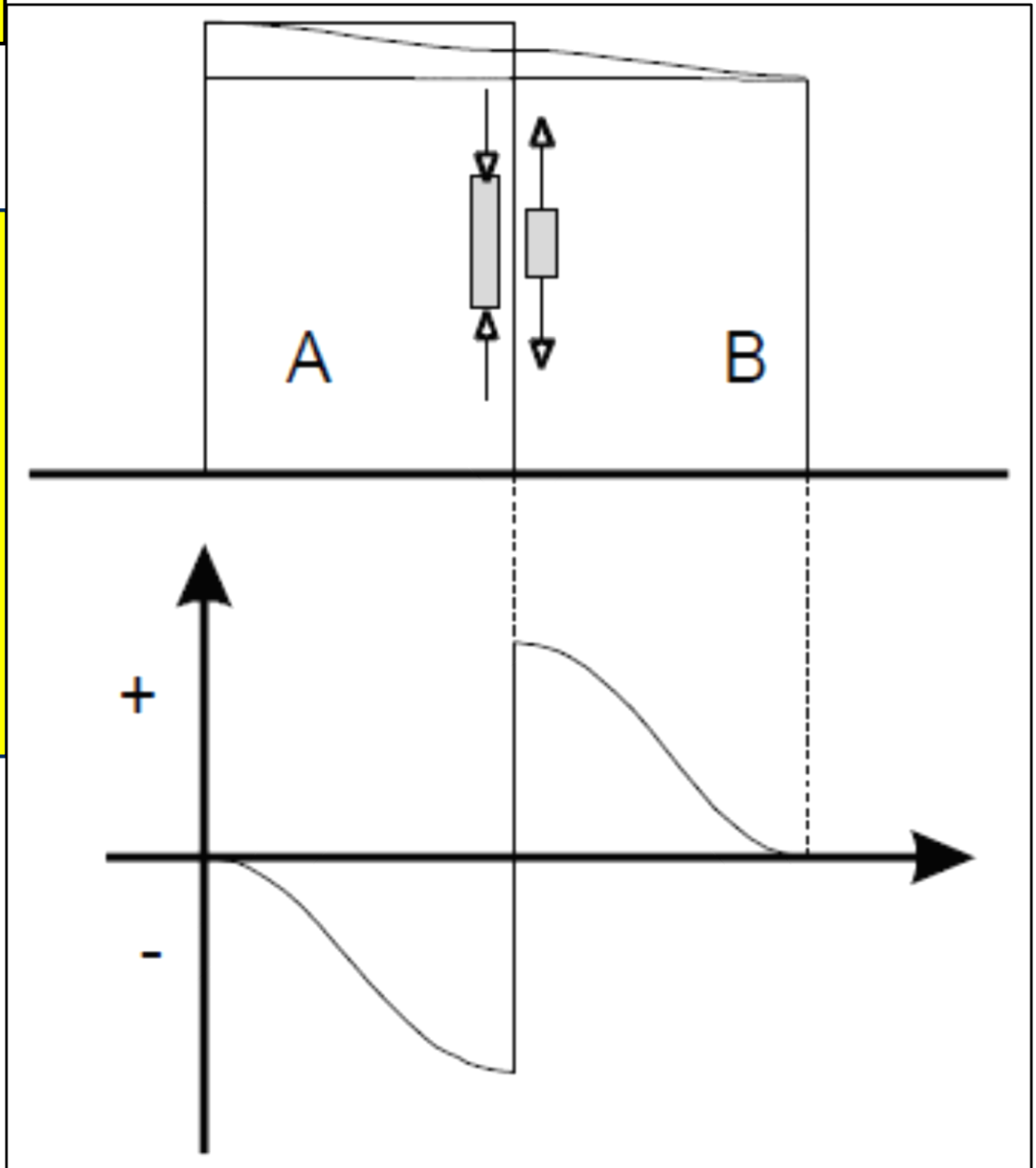
TRACIONANDO ATÉ X E DESCARREGANDO, NÃO HÁ TR.
TRACIONANDO ATÉ Y, OCORRE TR (A DEFORMA PLAST. E B NÃO).

TENSÃO RESIDUAL

O RESULTADO É:

PRÓXIMO À
INTERFACE, DO LADO
DE A, TENSÃO
RESIDUAL DE
COMPRESSÃO E DO
LADO DE B, TENSÃO
RESIDUAL DE
TRAÇÃO.

AO LONGO DO
GRÁFICO DE TR, AS
ÁREAS POSITIVAS E
NEGATIVAS DEVEM
SER IGUAIS.



TENSÃO RESIDUAL

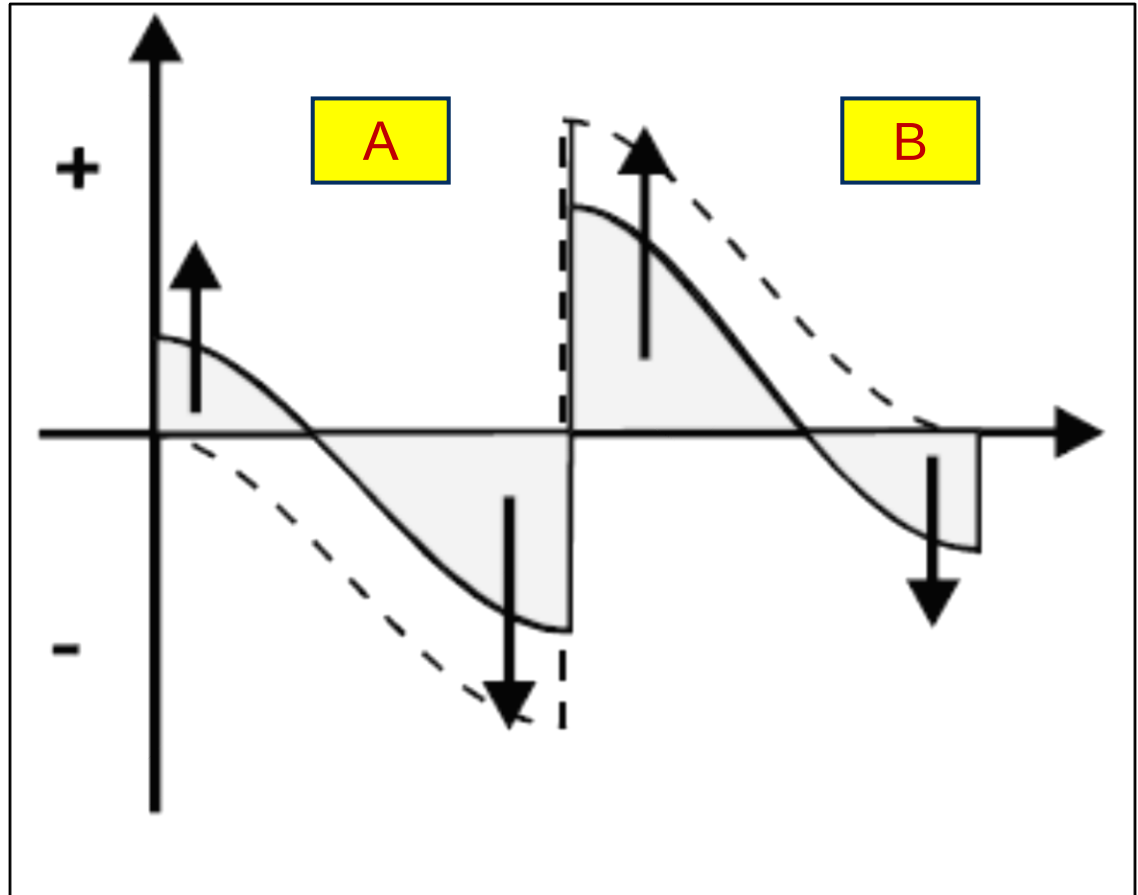
O CORRETO É:

AS ÁREAS DEVEM SER IGUAIS E DEVE HAVER EQUILÍBRIO:

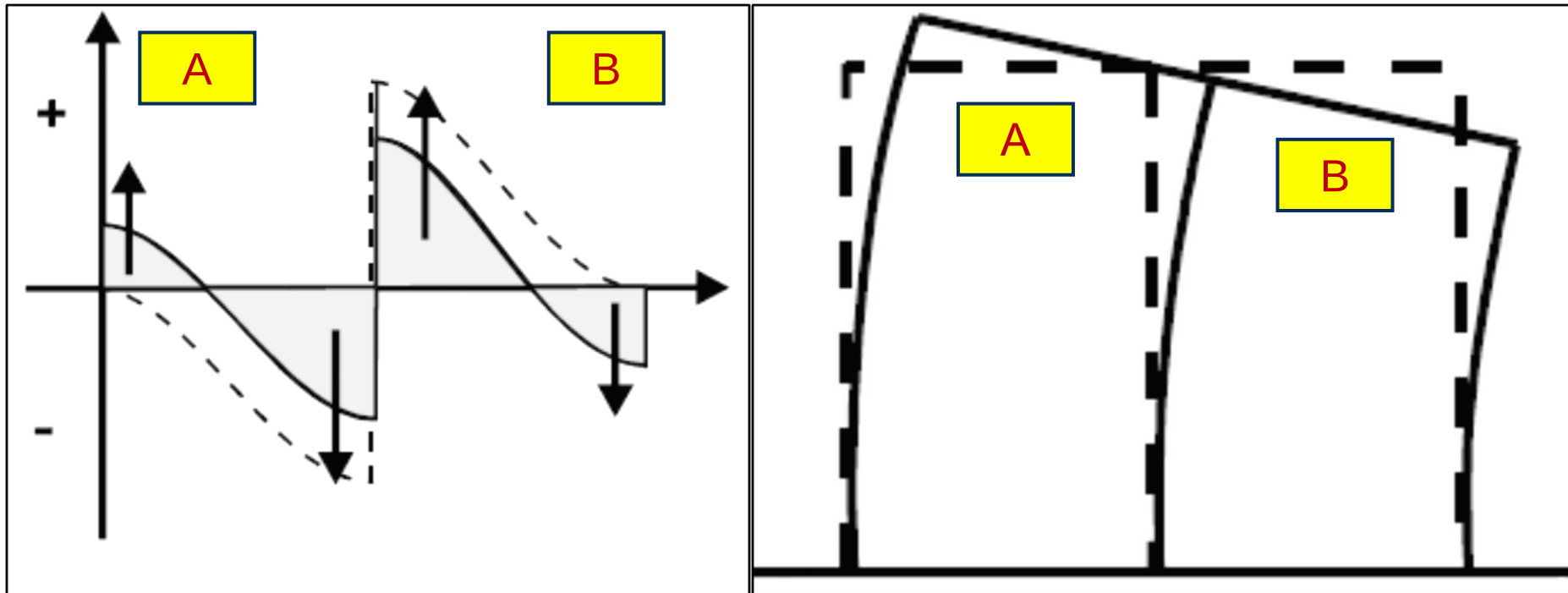
$$\Sigma F = 0, \Sigma M = 0$$

EM CADA BLOCO HÁ UM BINÁRIO:
EQUILÍBRIO!

O **BINÁRIO** DE UM DOS LADOS DEVE SE OPOR AO OUTRO E ANULAM-SE PARA MANTER O EQUILÍBRIO.



TENSÃO RESIDUAL

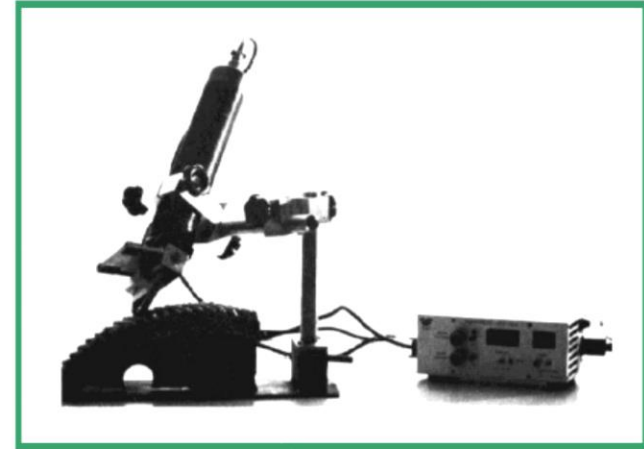


Para haver equilíbrio, a face esquerda do bloco A deverá estar tracionada longitudinalmente e a face direita do bloco B, comprimida: **DEFORMAÇÃO NÃO UNIFORME= TENSÃO RESIDUAL.**

TENSÕES RESIDUAIS

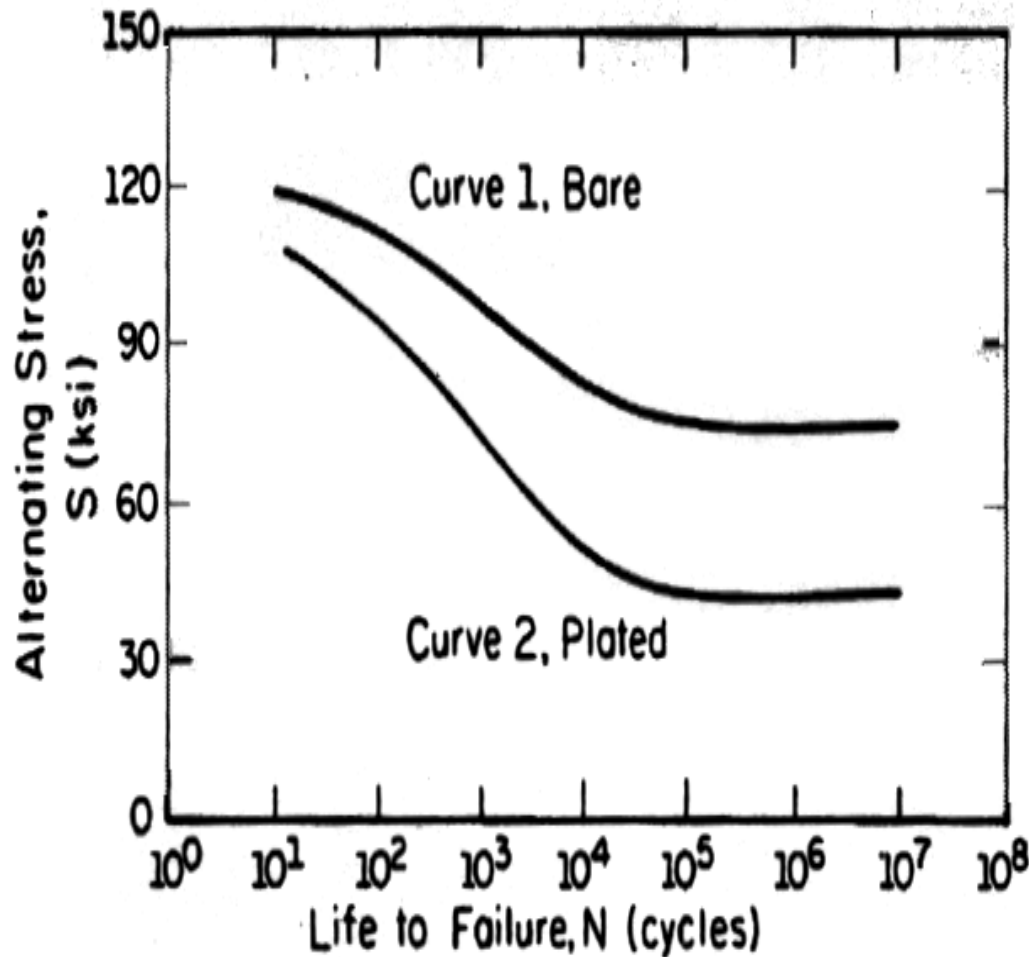
Medição de tensões residuais

- Em laboratório ou no campo.
- Técnicas incluem: difração de raios-X, ultrassom, *hole drilling*.



FATORES MODIFICADORES

TRATAMENTO SUPERFICIAL PLATING



Plating introduz tensões residuais Trativas, que são prejudiciais.

Figure 1.17 Effect of chrome plating on S-N curve of 4140 steel. (From Ref. 1.)

FATORES MODIFICADORES TRATAMENTO SUPERFICIAL PLATING

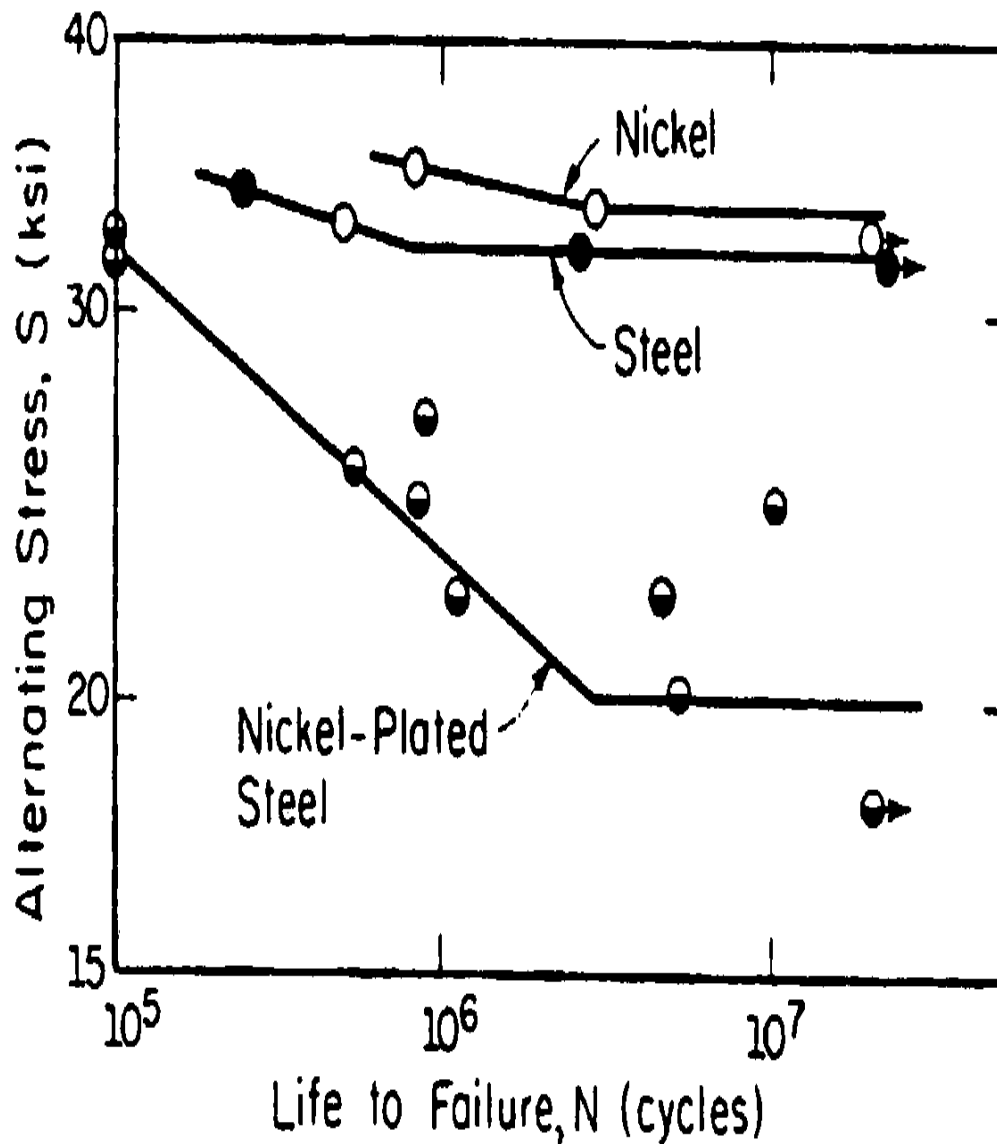


Figure 1.18 Effect of nickel plating on S - N curve of steel ($S_u = 63$ ksi). (From Ref. 9.)

FATORES MODIFICADORES

TRATAMENTO SUPERFICIAL SHOT PEENING

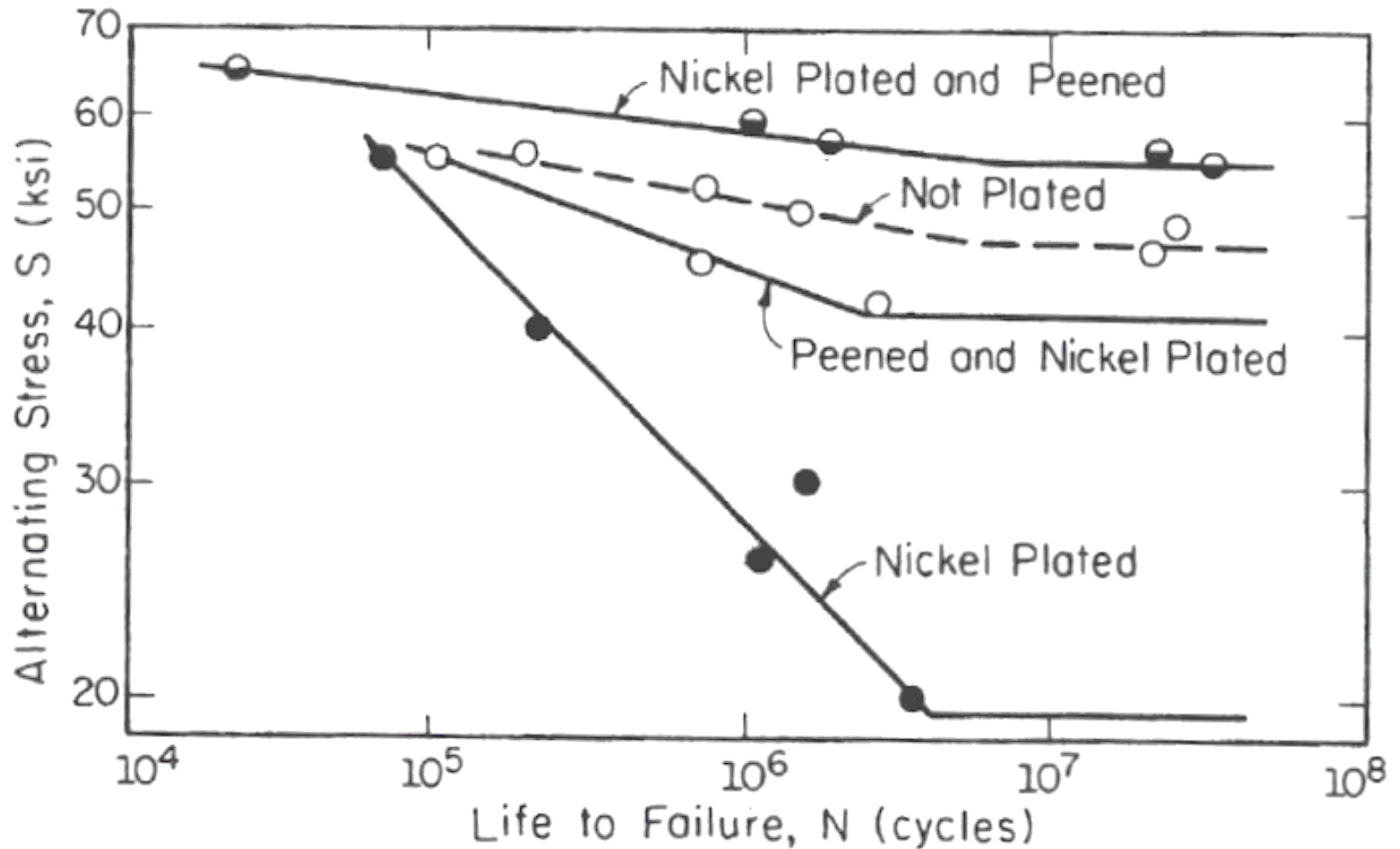


Figure 1.19 Effects of shot peening on S - N curve of nickel plated steel. (From Ref. 9.)

FATORES MODIFICADORES – CONDIÇÕES SUPERFICIAIS

Laminação e forjamento a quente causam:

- **Descarbonetação: redução da resistência do material;**
- **Tensões residuais trativas na superfície;**
- **Ambas são prejudiciais à resistência à fadiga.**

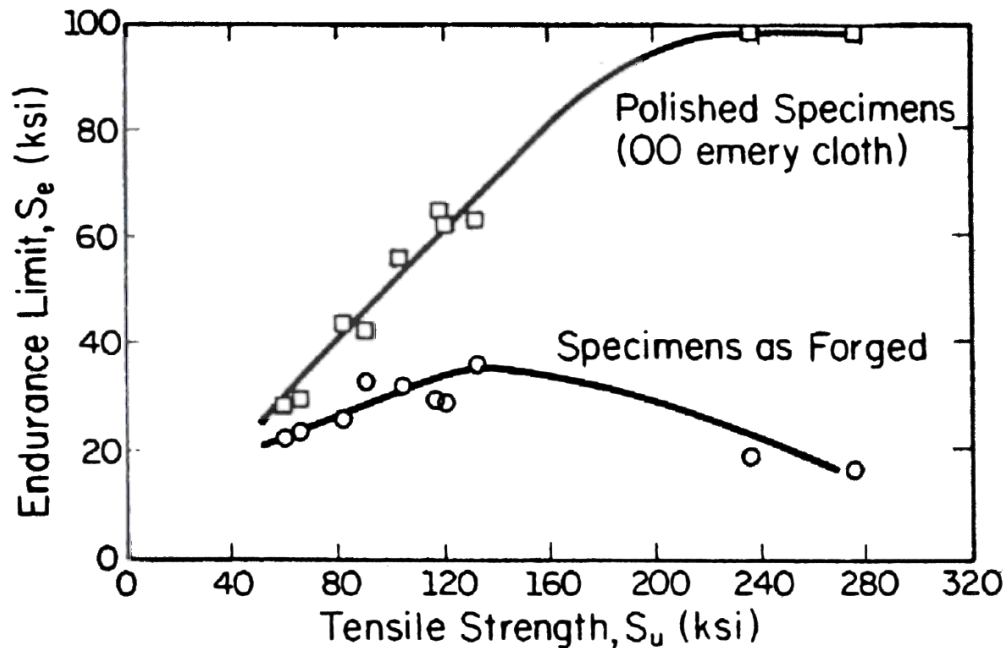


Figure 1.20 Effect of forging on the endurance limit of steels. (From Ref. 10.)

**FATORES MODIFICADORES
CONDIÇÕES SUPERFICIAIS
TEMPERATURA-DESCARBONETAÇÃO-ENTALHE**

Aço (AISI)	S_u	Limite de fadiga (ksi)			
		Normal		Descarbonetado	
		Suave	Entalhado	Suave	Entalhado
2340	250	122	69	35	25
2340	138	83	43	44	25
4140	237	104	66	31	22
4140	140	83	40	32	19

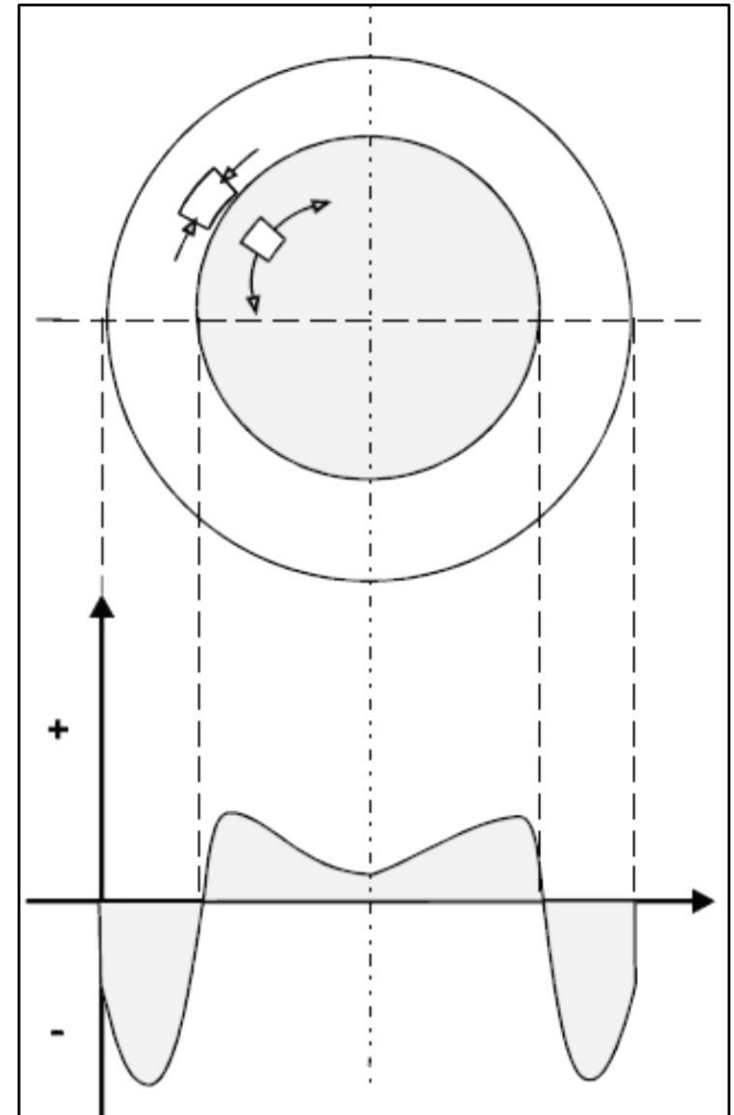
TENSÃO RESIDUAL

TR RESULTANTES DE EFEITOS TÉRMICOS

Gradientes de **temperatura** causam **tensões térmicas**, mas estas geram **tensões residuais somente** quando provocam **deformação plástica**.

Ex: cilindro de aço aquecido até 600°C e resfriado rapidamente em água. Tensões mais significativas: **circunferenciais** – deformação é a diminuição do perímetro (**arco**), e **não do raio**.

**NÚCLEO ESFRIA APÓS A
SUPERFÍCIE E CONTRAI.
COMPRIME A SUPERFÍCIE QUE O
TRACIONA**

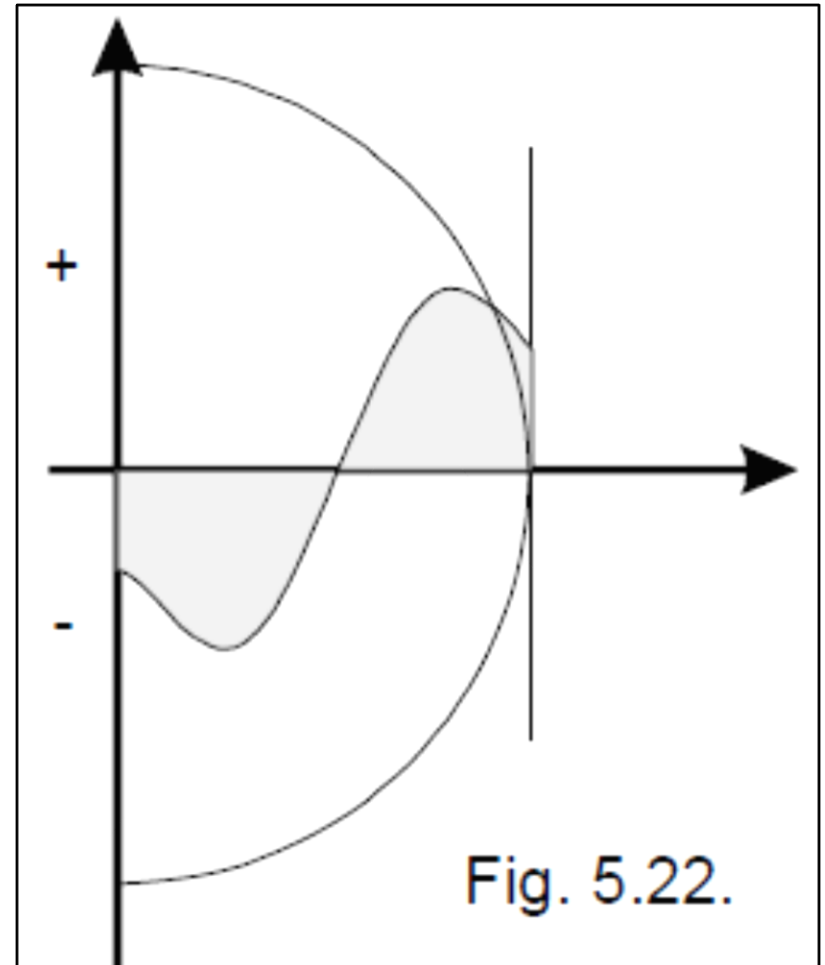


TENSÃO RESIDUAL

TR RESULTANTES DE TRANSFORMAÇÕES DE FASE

Têmpera plena

- Transformação martensítica na superfície e no núcleo;
- Ambos terão expansão;
- Quando a superfície transforma o núcleo se acomoda (plástico);
- Quando o núcleo transforma, a superfície já está fria e martensítica, sofre tração e comprime o núcleo;
- O efeito se sobrepõe ao efeito de contração do resfriamento.

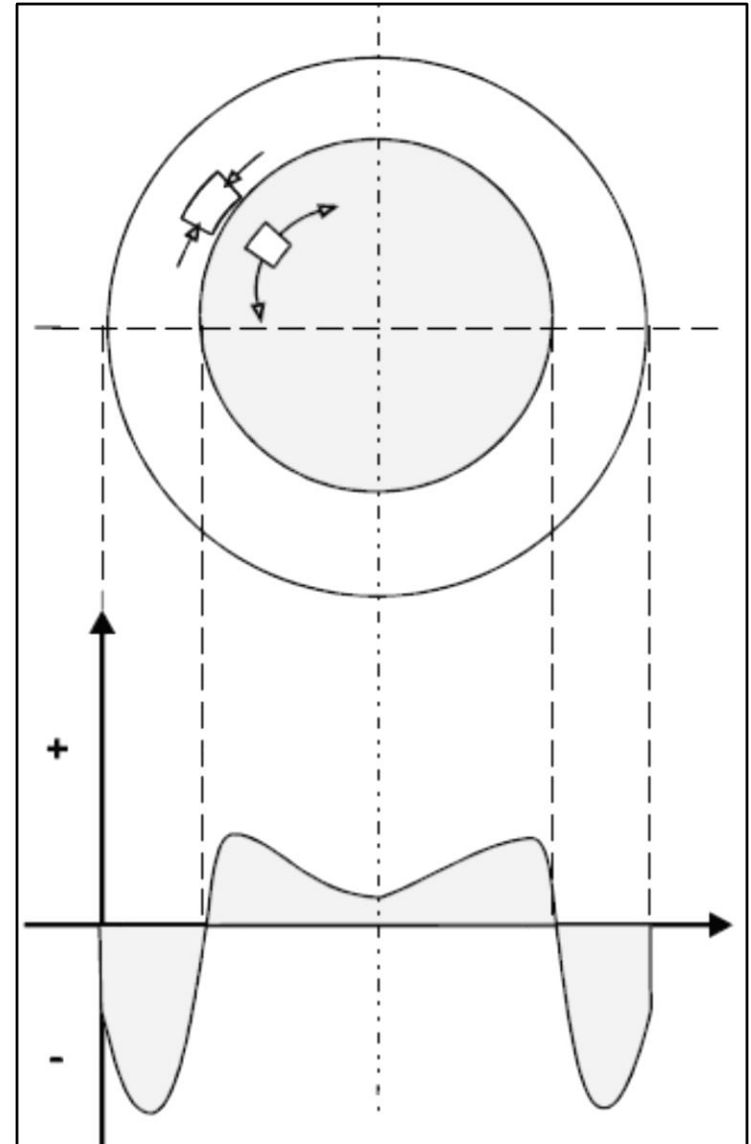


TENSÃO RESIDUAL

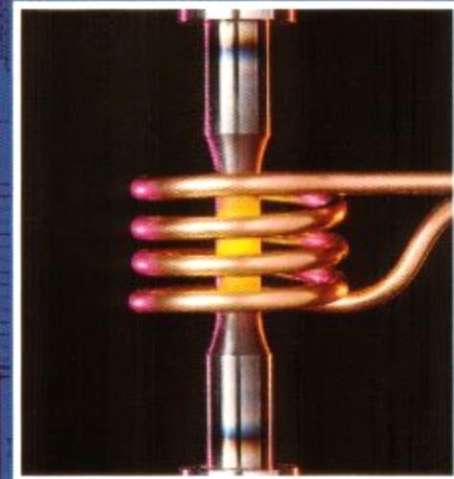
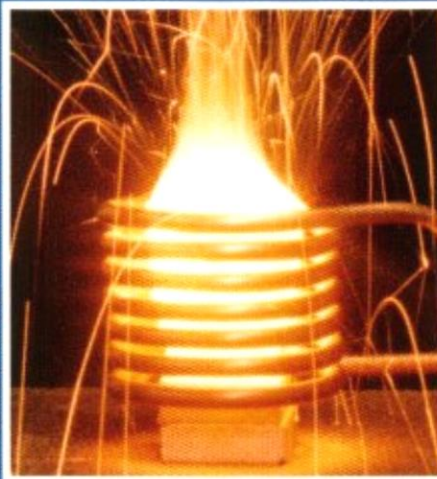
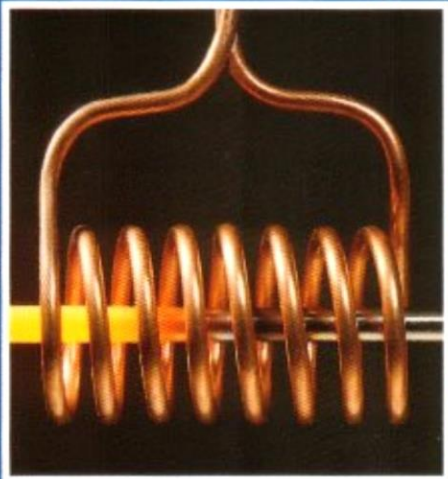
TR RESULTANTES DAS TRANSFORMAÇÕES DE FASES

Têmpera superficial

- **Por Indução:** a transformação martensítica ocorre na **superfície**, provoca **expansão** e **traciona o núcleo** que está “frio” que **comprime a superfície** (soma-se aos efeitos térmicos).
- **Aquecimento total, têmpera rasa:** transformação martensítica ocorre na **superfície**. No núcleo - ferrita+perlita: expansão é similar e as TRs muito baixas: prevalece o efeito térmico. EX: têmpera ao ar;
- **Aumento de espessura da camada = Têmpera total!**

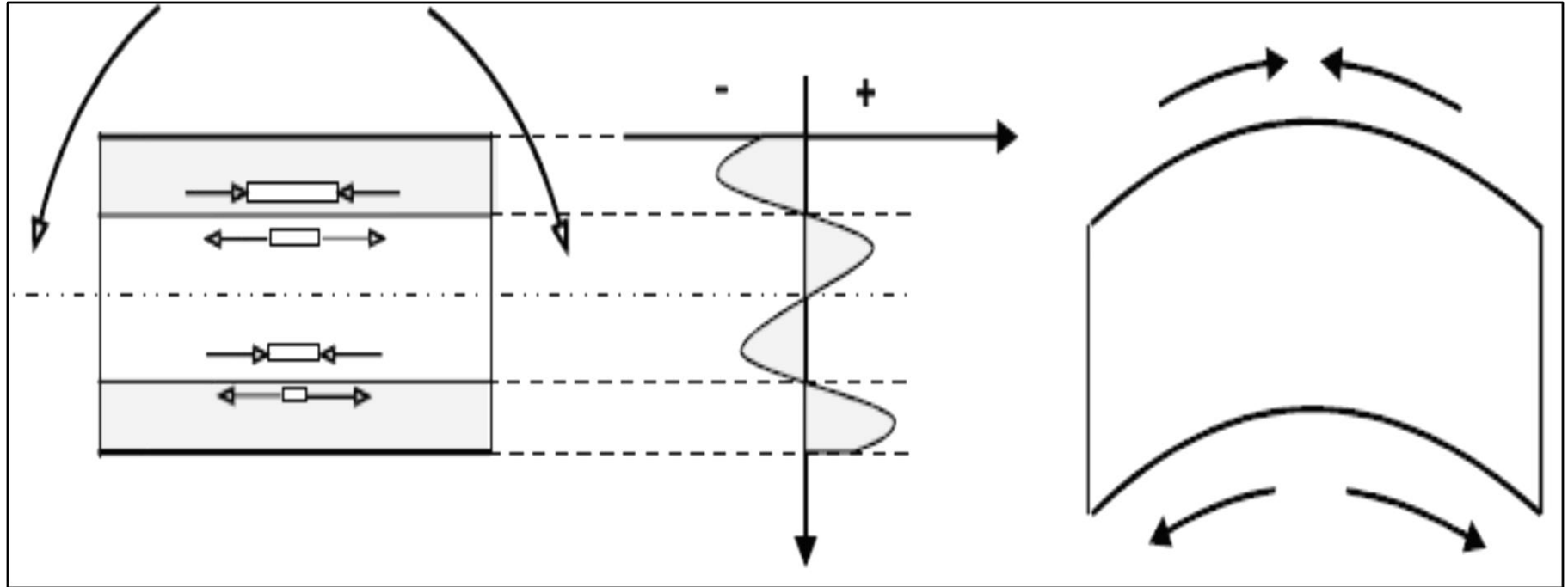


TÊMPERA POR INDUÇÃO



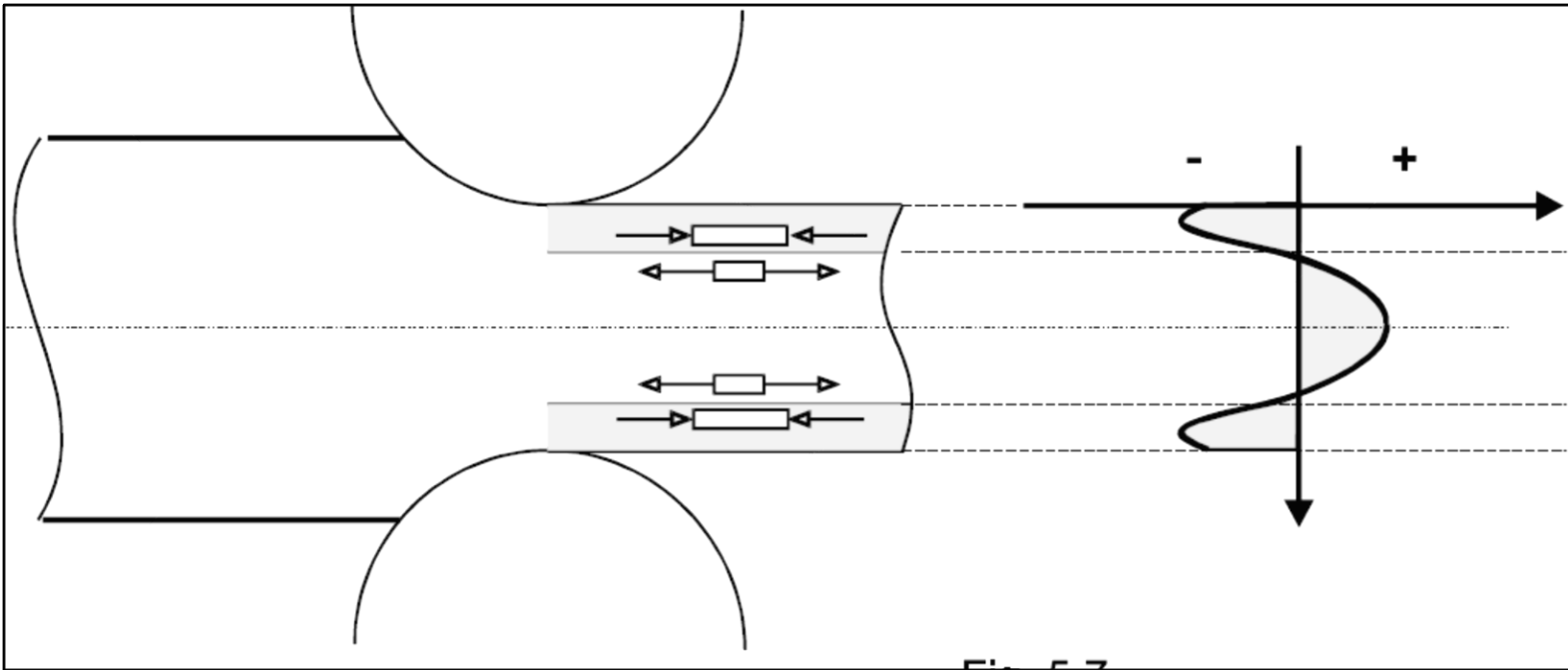
CALANDRAGEM

FABRICAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO/REACTORES QUÍMICOS, PETROQUÍMICOS, NUCLEARES.



TR RESULTANTES DE TRABALHO MECÂNICO A FRIO

Chapa laminada a frio (pequena redução)



Aumenta a resistência à fadiga!

Roscas laminadas tem muito maior resistência à fadiga do que roscas usinadas.

Ex: resistência à fadiga (tensão alternada) em 10^5 ciclos para parafusos feitos de aço AISI8635

Roscas laminadas

74 ksi

Roscas usinadas

44 ksi

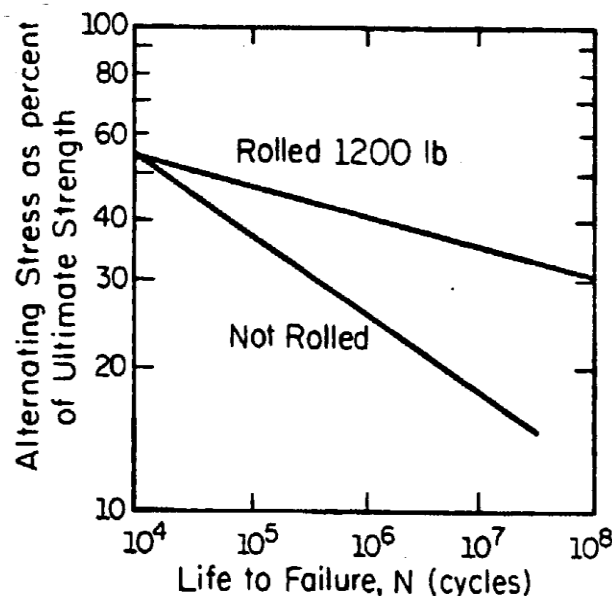
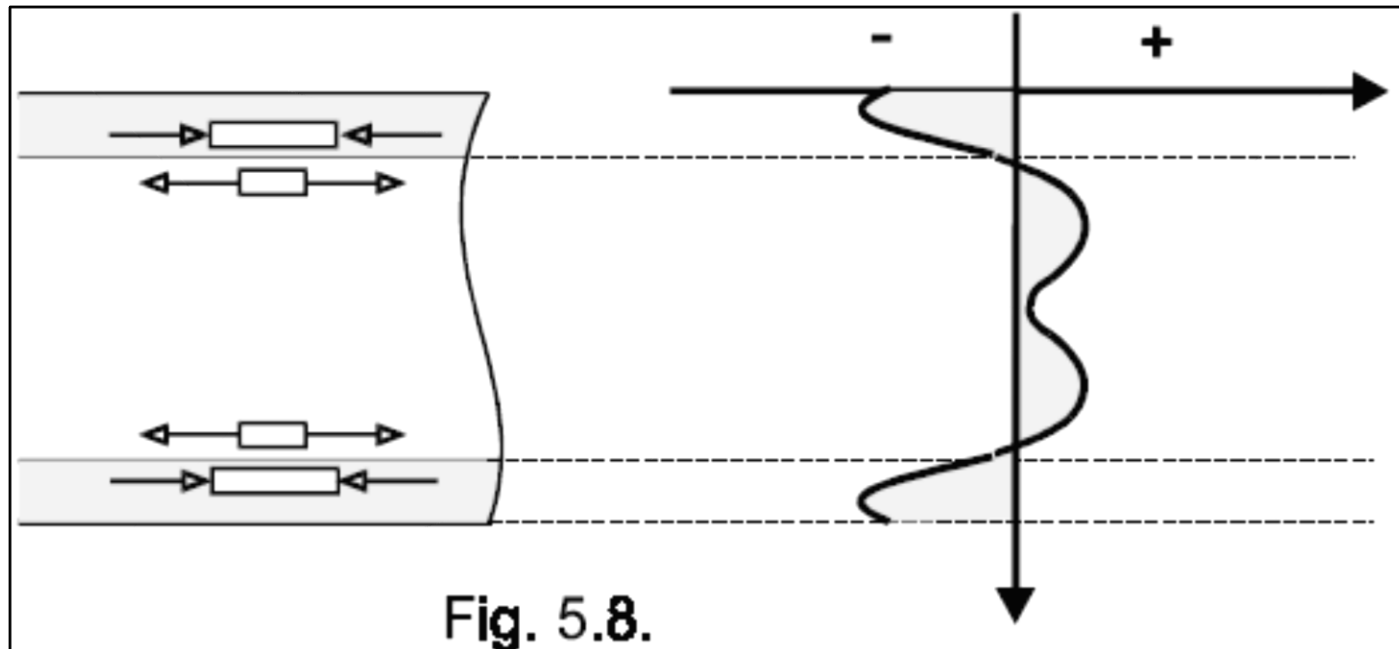


Figure 1.22 Effects of cold rolling on $S-N$ curve of steel. (From Ref. 9.)

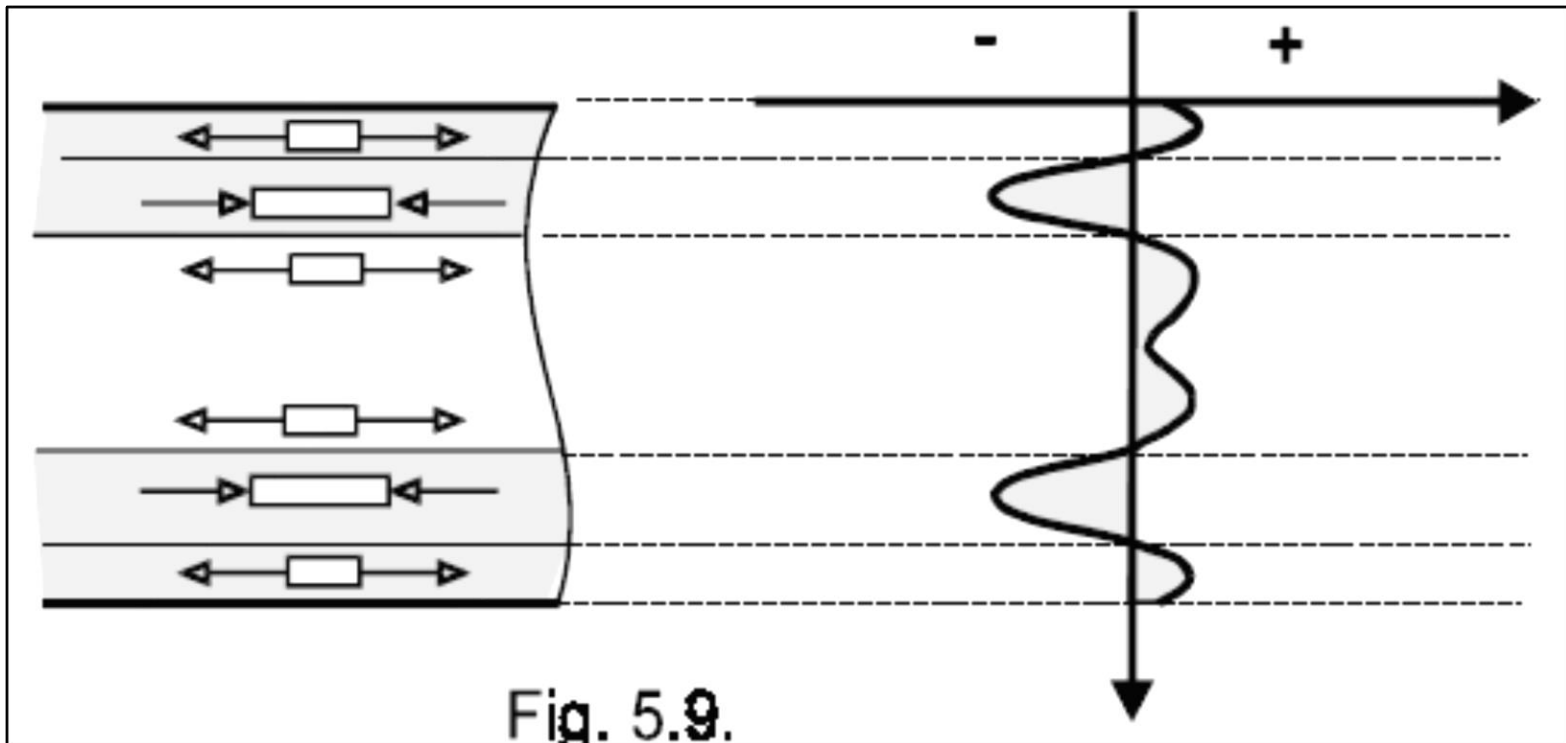
TR RESULTANTES DE TRABALHO MECÂNICO A FRIO

Maior espessura – tensão residual no centro diminui



TR RESULTANTES DE TRABALHO MECÂNICO A FRIO

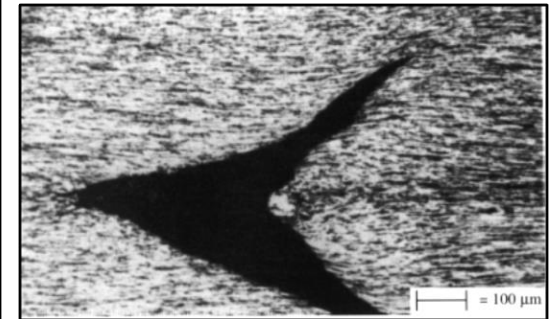
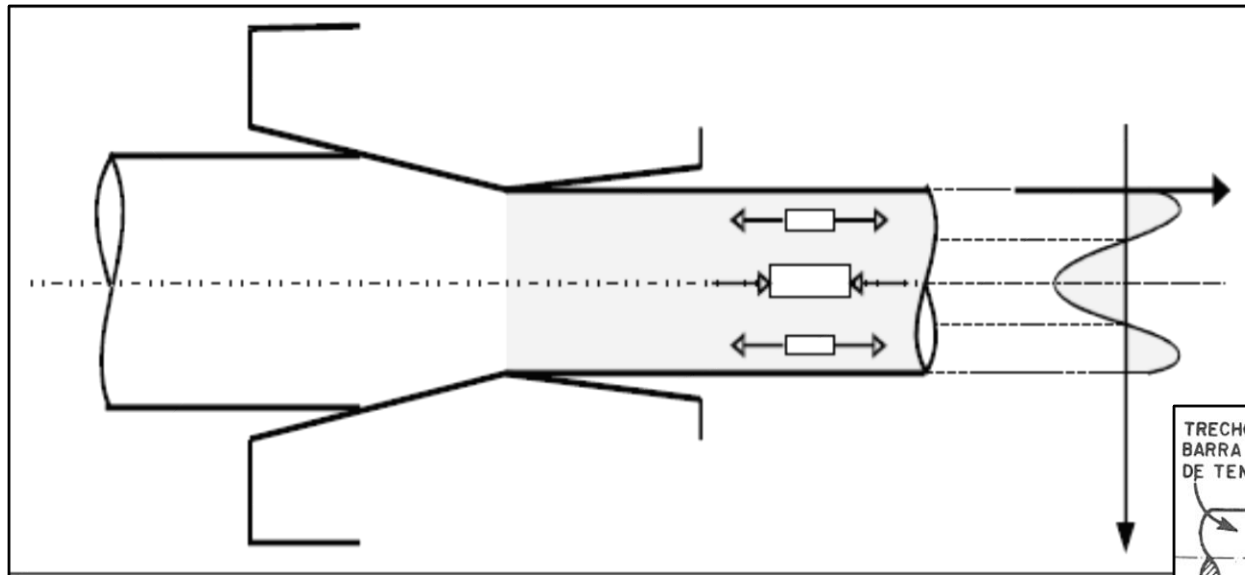
Com o aumento da pressão dos cilindros– camadas mais profundas sofrerão maior deformação que as da superfície.



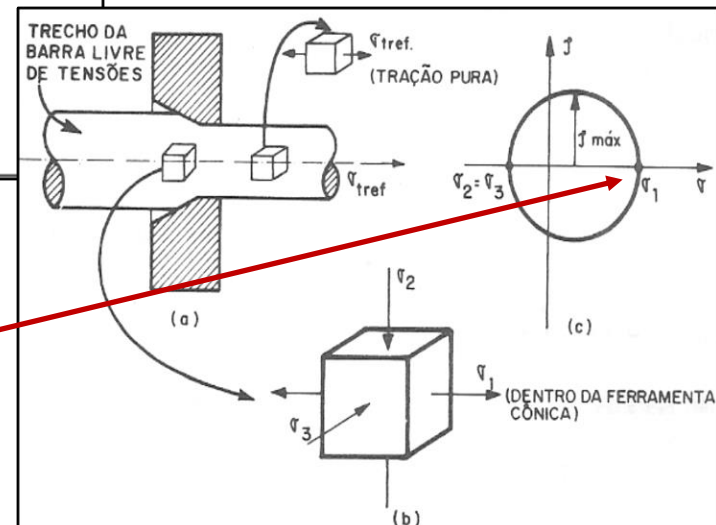
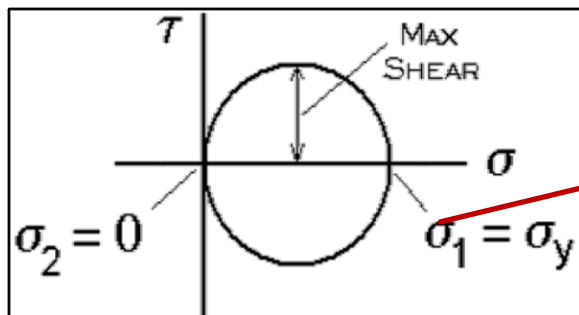
O resultado se inverte! Não é favorável à fadiga!

TR RESULTANTES DE TRABALHO MECÂNICO A FRIO

TREFILAÇÃO: NÚCLEO DEFORMA MAIS-ATRITO DA SUPERFÍCIE COM A FIEIRA



Não é favorável à fadiga!



$$\sigma_1 \text{ trefilação} < \sigma_1 \text{ tração}$$

SHOT PEENING

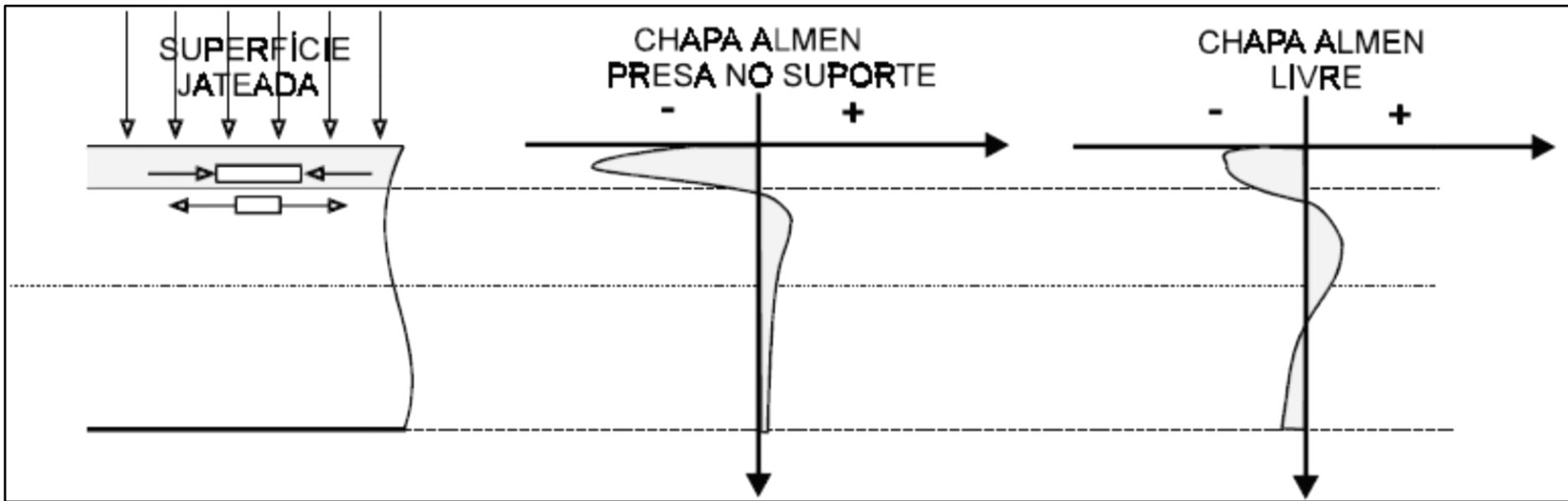
Informações Básicas

- Processo de trabalho a frio por jateamento com esferas de aço, cerâmica ou vidro.
- Não é simples jateamento mas um método preciso, controlável e repetível.
- Produz tensões residuais compressivas e alta densidade de discordâncias nas camadas superficiais do componente.



SHOT PEENING – JATO DE GRANALHA

DEFORMAÇÃO SEMELHANTE AO ENSAIO DE DUREZA

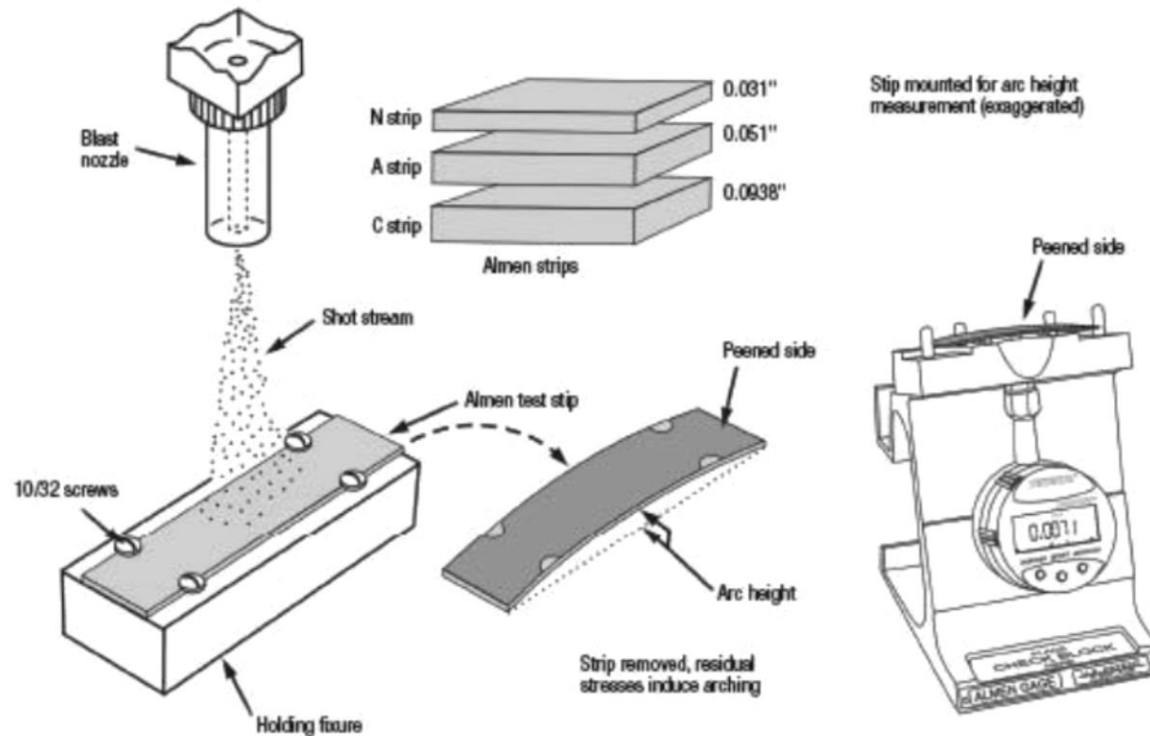


Aumenta a resistência à fadiga!

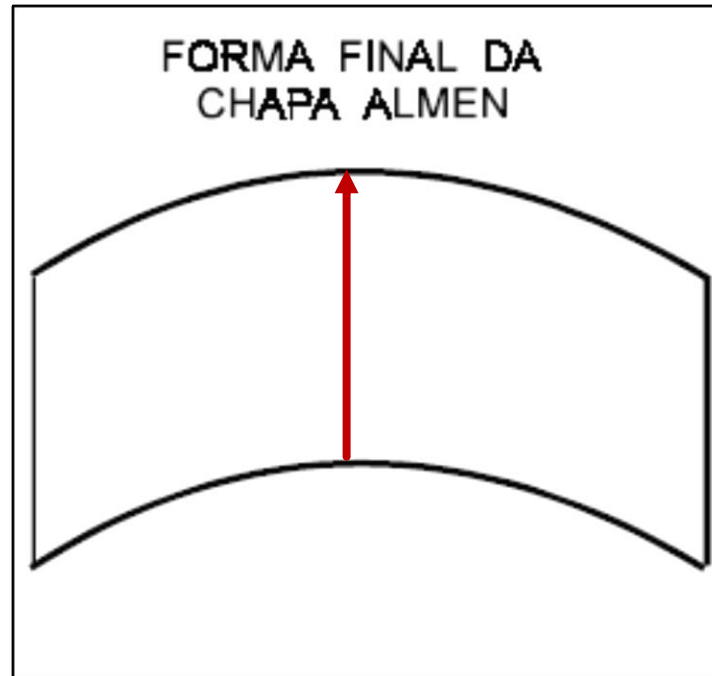
SHOT PEENING

Intensidade de Peening

- Controlada com o emprego das chamadas Placas de Almen.
- Placas padronizadas colocadas junto ao material tratado.
- Existem 3 espessuras de placas: “N”, “A”, “C”, onde $3N = A = 0,3C$.
- Após o Shot Peening as placas se deformam; mede-se a flecha (polegadas).



MÉTODO ALMEN



A **lâmina ALMEN** é colocado no jato, em um dispositivo. Posteriormente, a lâmina é retirada. A **intensidade** do “shot peening” é medida pela **flecha** apresentada da mesma, que se deforma para anular os binários resultantes das TR.

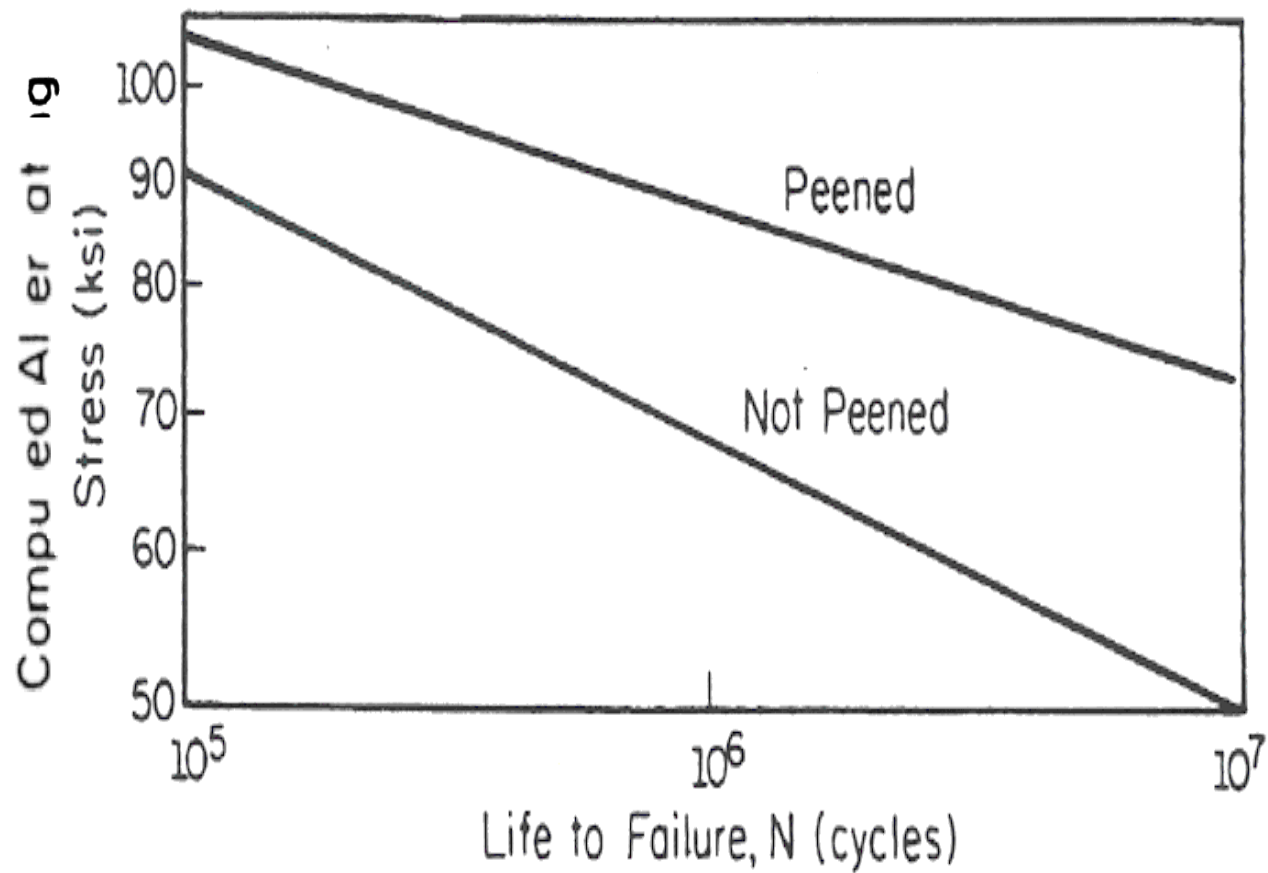
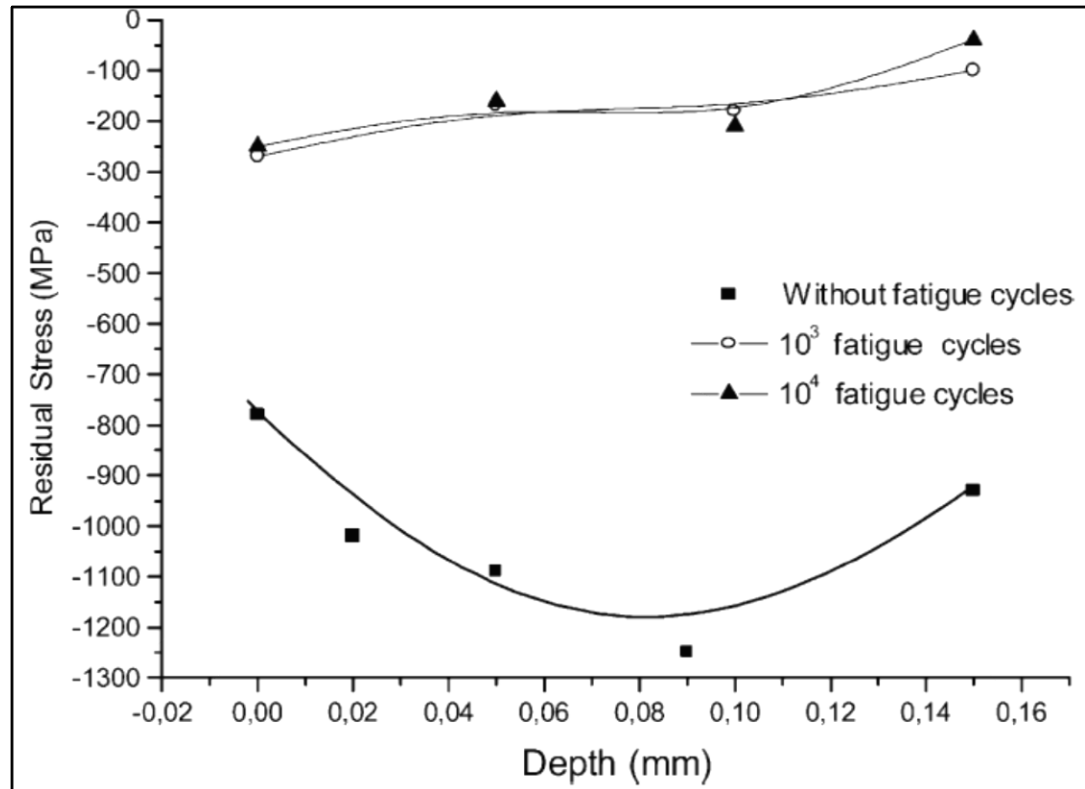


Figure 1.23 *S-N* curve of carburized gears in peened and unpeened conditions. (From Ref. 12.)

An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel

M.A.S. Torres, H.J.C. Voorwald



Em algumas situações, pode ocorrer uma superposição entre as tensões residuais do *shot peening* e as tensões em serviço, o que leva ao relaxamento das TR e o efeito do SP não é efetivo para a vida em fadiga.

International Journal of Fatigue 24 (2002) 877–886

An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel

M.A.S. Torres, H.J.C. Voorwald

Nos ensaios de flexão rotativa, as tensões de compressão aplicadas somam-se às tensões compressivas presentes devido ao tratamento de shot peening. Se o resultado desta superposição for suficientemente grande, existe então uma deformação plástica e, conseqüentemente, uma redistribuição das tensões, causando o relaxamento do CTRC original. Com a continuidade dos ensaios, devido ao relaxamento das tensões, a soma algébrica das tensões irá diminuir. Com isso, a partir de um determinado momento, espera-se que o nível da superposição das tensões fique abaixo da tensão de escoamento cíclico do material e torne o CTRC estável.

Prof. Carlos Baptista

FATORES MODIFICADORES- EFEITO DA TEMPERATURA

Baixa Temperatura

- Aços, o limite de **fadiga aumenta** (como a resistência a carregamento estático);
- A **tenacidade à fratura diminui** quando o material torna-se frágil em baixa temperatura.

Temperaturas Elevadas

- Aços, o limite de fadiga “desaparece”, devido ao **aniquilamento das discordâncias**;
- Em temp muito alta (> 0.5 PF), a **fluência** torna-se importante;
- **A metodologia S-N não pode ser usada.**

FATORES MODIFICADORES MEIO AMBIENTE CORROSÃO FADIGA

- O carregamento em fadiga se aplicado em **meio corrosivo**, **pode resultar** em **redução** significativa na vida em fadiga;
- A interação entre a fadiga e a corrosão, referida como **“Corrosão Fadiga”** envolve **mecanismos** de falhas **complexos** e **ainda não entendidos**;
- Corrosão fadiga é muito **difícil de ser quantificada**.

FATORES MODIFICADORES MEIO AMBIENTE CORROSÃO FADIGA

Descrição Qualitativa da Corrosão Fadiga



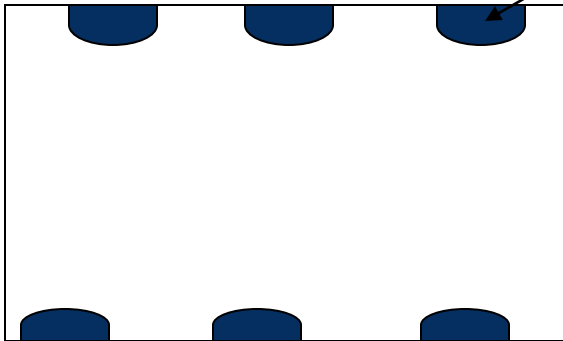
- Filme de **óxido** é formado sobre a superfície devido à exposição ao meio;



Sob carregamentos de fadiga, o filme óxido se quebra, proporcionando acesso do meio corrosivo ao metal.

FATORES MODIFICADORES MEIO AMBIENTE CORROSÃO FADIGA

Descrição Qualitativa da Corrosão Fadiga - Pites



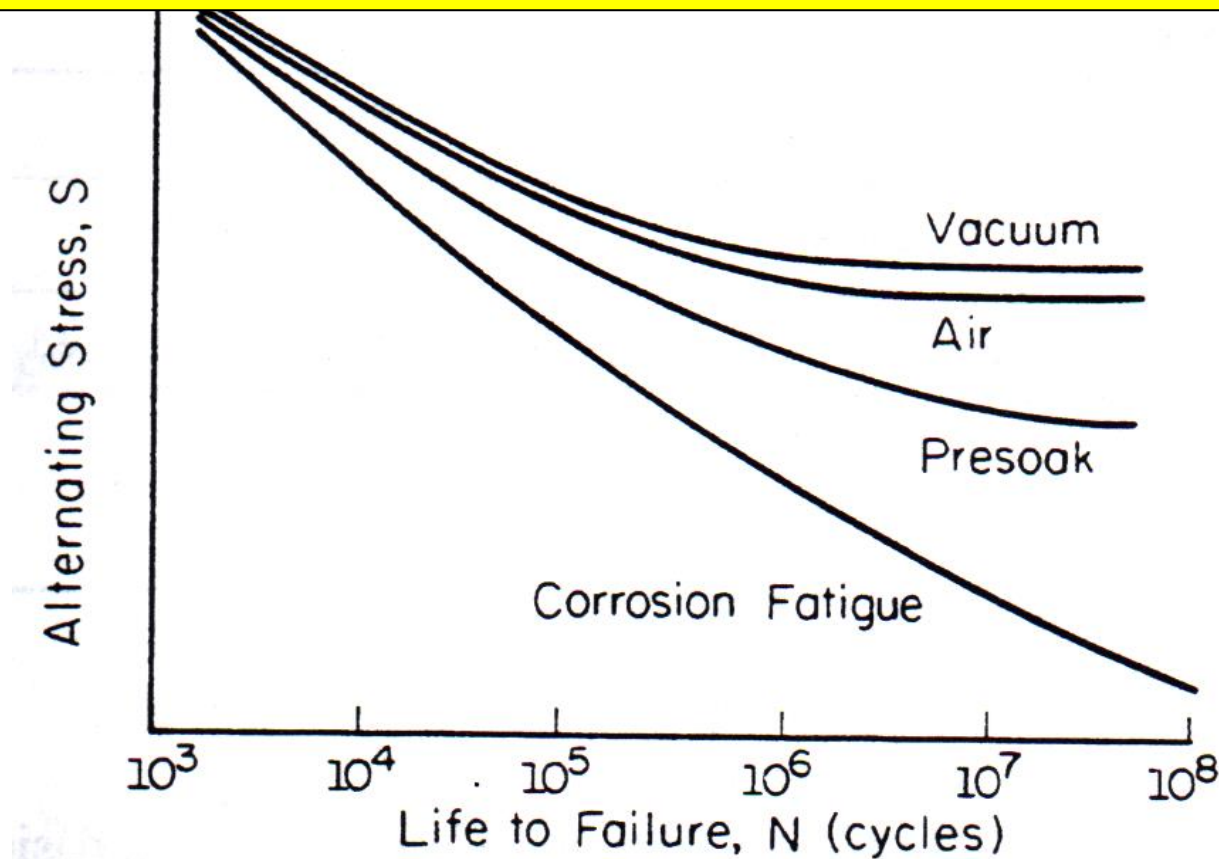
- Pites superficiais são formados devido à corrosão;
- Podem atuar como concentradores de tensão e portanto eles afetam adversamente a vida em fadiga;
- Pites crescem em tamanho com a aplicação de carregamentos cíclicos;
- A MF pode ser usada para prever a vida em fadiga.

FATORES MODIFICADORES MEIO AMBIENTE CORROSÃO FADIGA

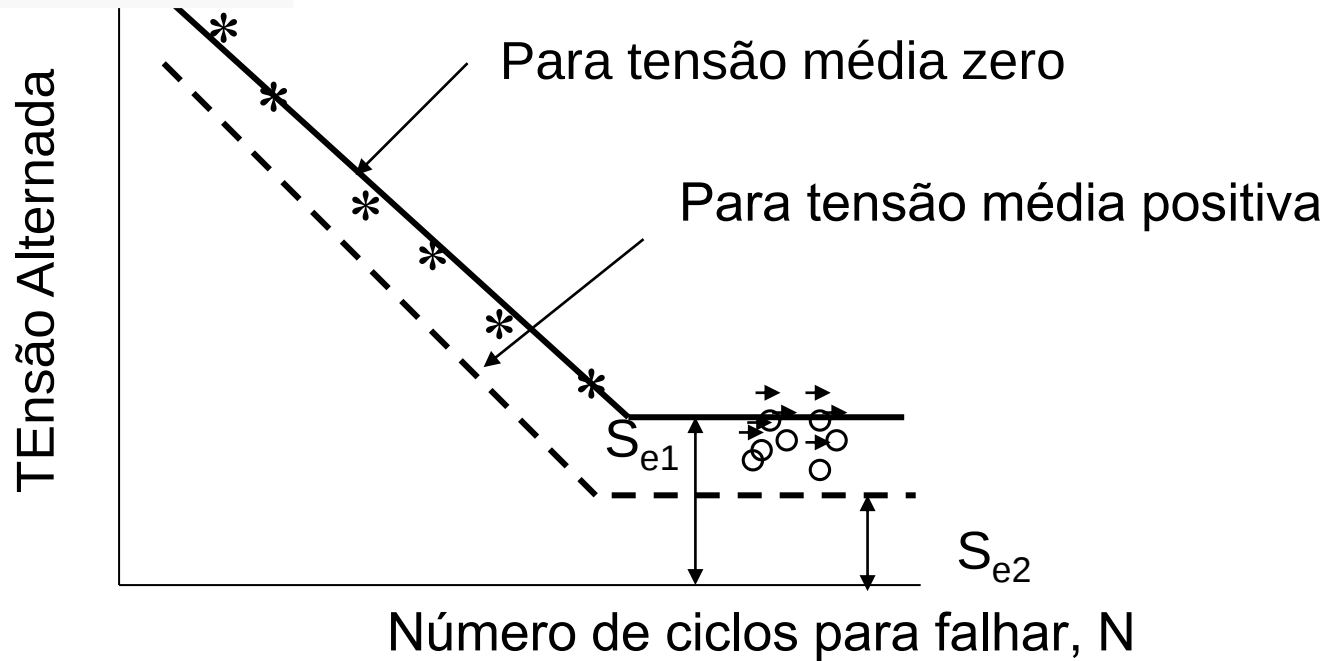
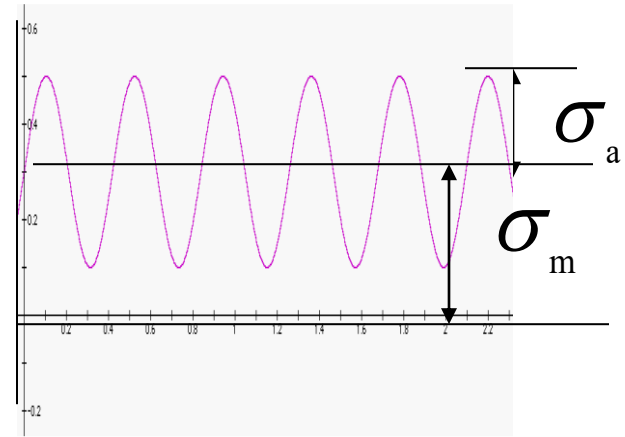
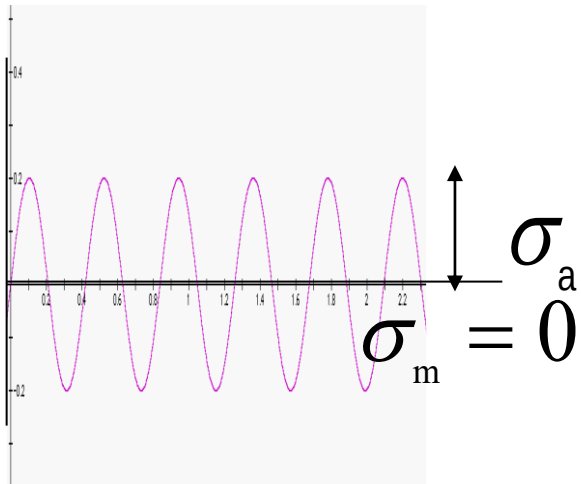
- **Umidade e o Oxigênio** reduzem a vida em fadiga quando comparado com vácuo;
- **Premolhamento:** O aço é embebido em um meio corrosivo e então testado em ar. A **redução na vida** é devido à ação de pites que atuam como sítios concentradores de tensão;
- **Corrosão Fadiga:** Os aços são ensaiados em um meio corrosivo. Note o desaparecimento do limite de fadiga.

FATORES MODIFICADORES MEIO AMBIENTE CORROSÃO FADIGA

A figura apresenta o efeito de vários meios sobre a curva S-N de aços.



EFEITO DA TENSÃO MÉDIA



FIM