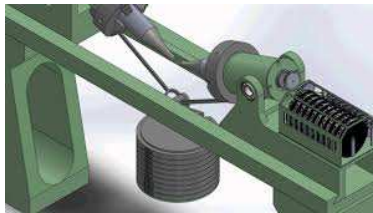


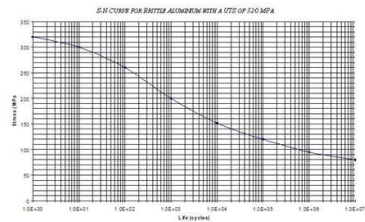
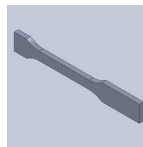
## 6. CURVAS SN

Prof. Dr. Julio Almeida

Universidade Federal do Paraná  
Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica



PGMEC



1

## CURVAS TENSÃO x NÚMERO DE CICLOS

Wohler, apesar de não ser sido o primeiro a observar o fenômeno da fadiga, foi o primeiro a desenvolver uma metodologia de estudo para o referido fenômeno.

2

## CURVAS TENSÃO x NÚMERO DE CICLOS

Isso ocorreu entre os anos de 1852 e 1869, ocasião em que o mesmo criou a denominada curva S-N (curva tensão x número de ciclos), construída a partir do ajuste de dados coletados em ensaios realizados para um grande número de corpos de prova em várias amplitudes de tensões cíclicas e tensão média nula, em escala logarítmica.

3

## CURVAS TENSÃO x NÚMERO DE CICLOS

Tais curvas podem ser obtidas experimentalmente mediante carregamentos cíclicos de (tração, compressão, flexão ou torção) impostos a um determinado número de amostras distintas.

4

## EQUIPAMENTOS DE ENSAIO - EXEMPLOS



<https://www.youtube.com/watch?v=33hB4G1JUJw>

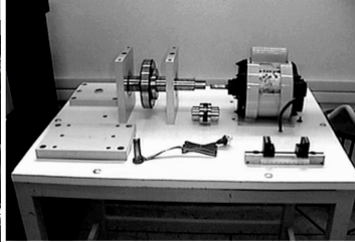
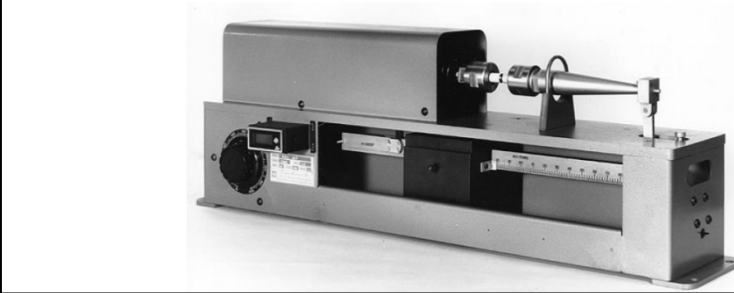
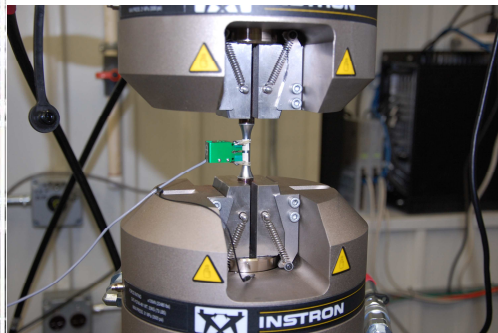
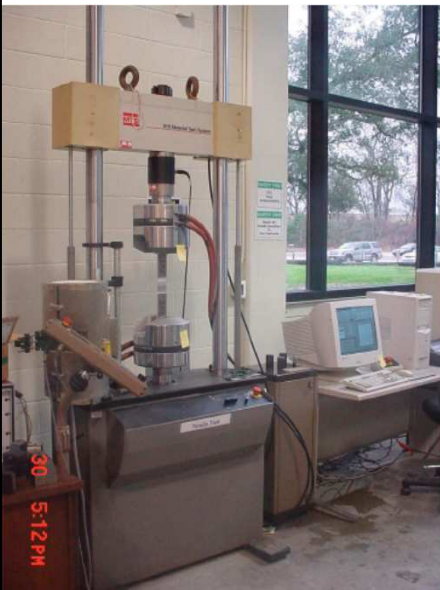


Figura 4. Principais componentes do projeto antes da montagem.



5

## EQUIPAMENTOS DE ENSAIO - EXEMPLOS



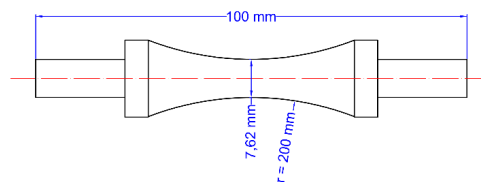
6

## O ENSAIO DE FLEXÃO ROTATIVA

- ensaio proposto por Moore, sendo o mais tradicional e convencional tipo de ensaio de fadiga;
- trabalha-se com um corpo de prova padronizado, de secção transversal cilíndrica e com grande curvatura central objetivando eliminar problemas de concentração de tensões localizadas;

7

## CORPO DE PROVA - ENSAIO DE FLEXÃO ROTATIVA



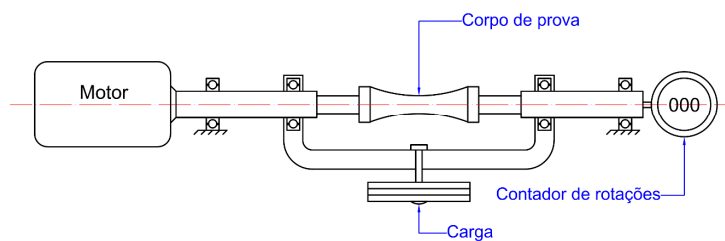
8

## O ENSAIO DE FLEXÃO ROTATIVA

- o corpo de prova (CP) é disposto numa máquina de ensaio específica que permite solicitá-lo simultaneamente a cargas de flexão (flexão alternada) e torção.

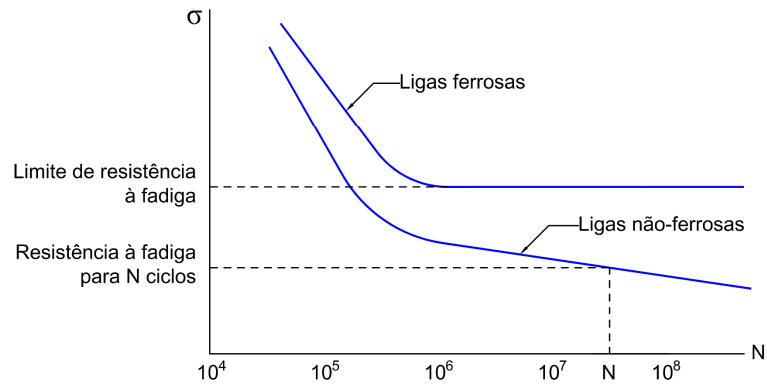
9

## O ENSAIO DE FLEXÃO ROTATIVA



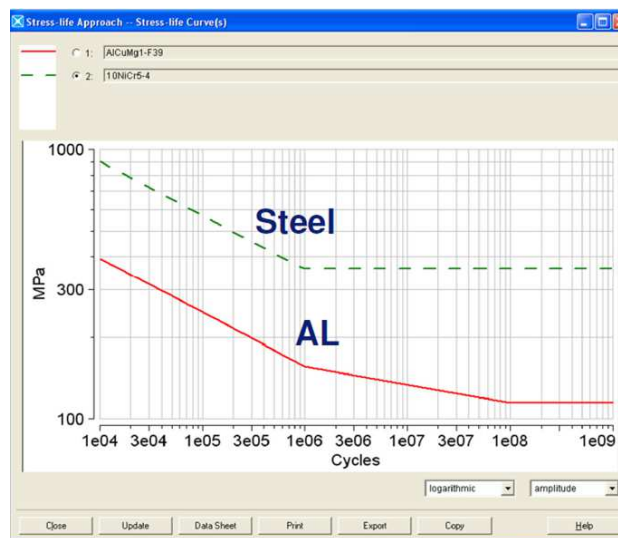
10

## CURVA TENSÃO x NÚMERO DE CICLOS



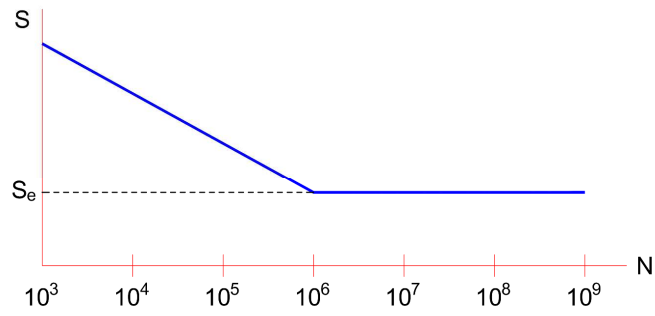
11

## CURVA TENSÃO x NÚMERO DE CICLOS



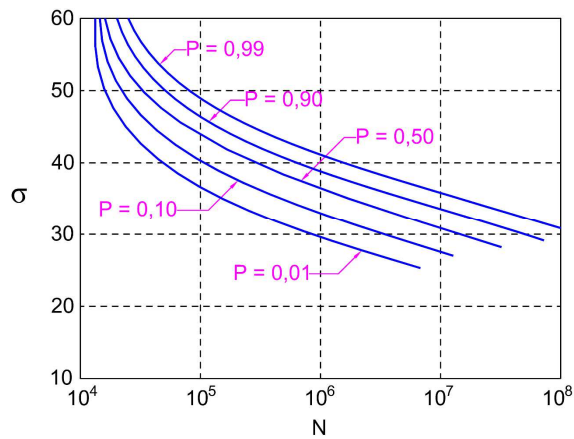
12

### CURVA TENSÃO x NÚMERO DE CICLOS



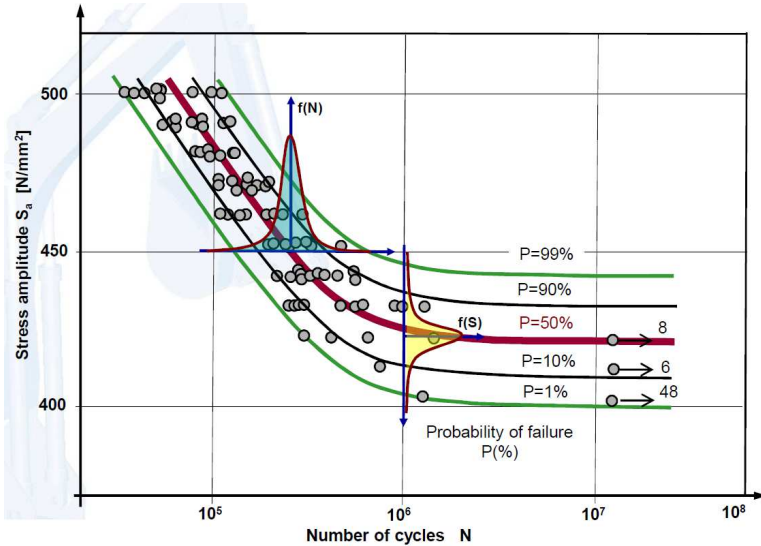
13

### CURVA SN – DISPERSÃO DOS RESULTADOS



14

## CURVA SN – DISPERSÃO DOS RESULTADOS



15

## LIMITE DE FADIGA DE ALGUNS MATERIAIS

- flexão rotativa/aços forjados

$$\sigma_N = 0,8\sigma_{rup}$$

$$\sigma_F = 0,5\sigma_{rup}$$

- carregamento axial/aços forjados

$$\sigma_N = 0,75\sigma_{rup}$$

$$\sigma_F = 0,425\sigma_{rup}$$

- torção alternada/aços forjados

$$\tau_N = 0,68\sigma_{rup}$$

$$\tau_F = 0,29\sigma_{rup}$$

- flexão rotativa/ferros fundidos

$$\sigma_F = 0,35\sigma_{rup}$$

- flexão rotativa/aços fundidos

$$\sigma_F = 0,48\sigma_{rup}$$

16



## LIMITE DE FADIGA DE ALGUNS MATERIAIS

- flexão rotativa/ligas de cobre  $\sigma_F = (0,25 \text{ à } 0,5) \sigma_{rup} \Rightarrow 2 \cdot 10^7 \text{ ciclos}$

- flexão rotativa/latão  $\sigma_F = 0,22 \sigma_{rup} \Rightarrow 2 \cdot 10^7 \text{ ciclos}$

- flexão rotativa/ligas de magnésio extrudadas

$$\sigma_F = 0,40 \sigma_{rup} \Rightarrow 10^8 \text{ ciclos}$$

- flexão rotativa/ligas de magnésio forjadas

$$\sigma_F = 0,36 \sigma_{rup} \Rightarrow 10^8 \text{ ciclos} \quad 17$$

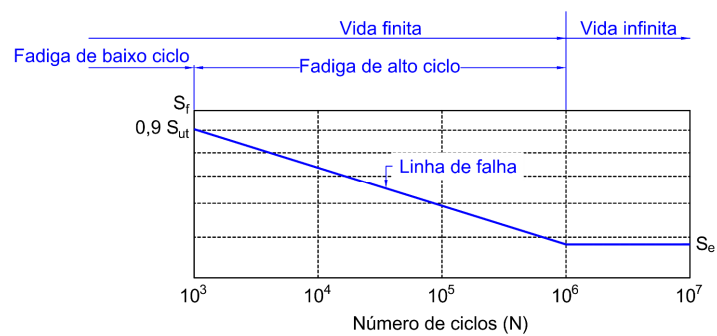
## LIMITE DE FADIGA DE ALGUNS MATERIAIS

Material	Number of Cycles	Relation
Magnesium alloys	$10^8$	$S'_e = 0,35 S_u$
Copper alloys	$10^8$	$0,25 S_u < S'_e < 0,5 S_u$
Nickel alloys	$10^8$	$0,35 S_u < S'_e < 0,65 S_u$
Titanium	$10^7$	$0,45 S_u < S'_e < 0,65 S_u$
Aluminum alloys	$5 \times 10^8$	$S'_e = 0,45 S_u (S_u < 48 \text{ksi})$ $S'_e = 19 \text{ ksi} (S_u \geq 48 \text{ksi})$

**EXEMPLO 01**

Estimar a curva S-N para o aço ABNT SAE 4340 com dureza de 334 HB. Supor um teste de flexão rotativa.

19

**FADIGA DE ALTO E BAIXO CICLO**

20

## FADIGA DE ALTO E BAIXO CICLO

Fadiga de alto ciclo - quando as cargas cíclicas são relativamente baixas, os ciclos de deformação são restritos ao limite elástico e a expectativa de vida torna-se elevada, caracterizando o regime de fadiga de alto ciclo.

Análise pelo critério da curva S-N.

21

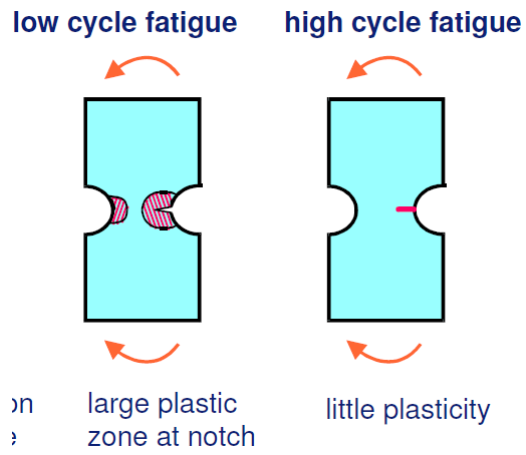
## FADIGA DE ALTO E BAIXO CICLO

Fadiga de baixo ciclo – quando as cargas cíclicas são altas, os ciclos de deformação passam a ser tipicamente plásticos e a expectativa de vida torna-se pequena, caracterizando agora o regime de fadiga de baixo ciclo.

Análise pelo critério da curva  $\epsilon$ -N.

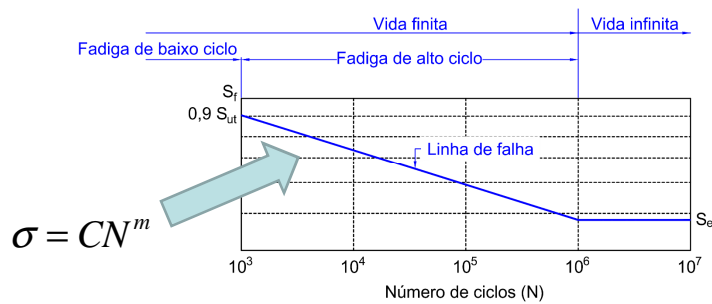
22

## FADIGA DE ALTO E BAIXO CICLO



23

## VIDA FINITA E INFINITA



Eq. Basquin

24

**VIDA FINITA**

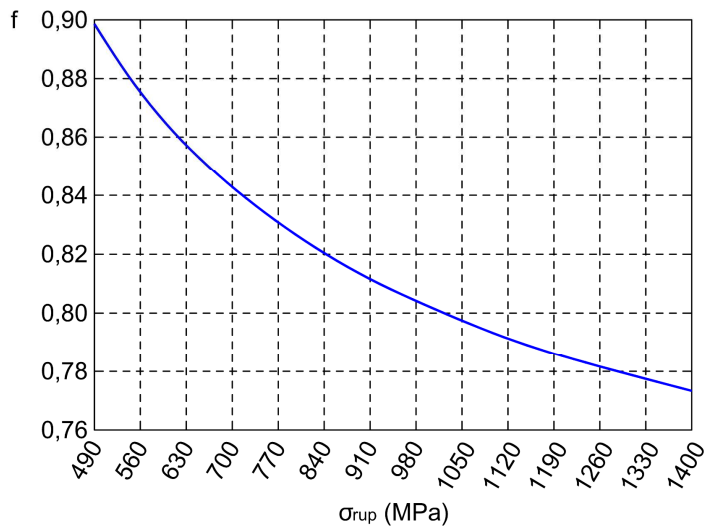
$$S_f = aN^b$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{f\sigma_{rup}}{S_e} \qquad a = \log \frac{(f\sigma_{rup})^2}{S_e}$$

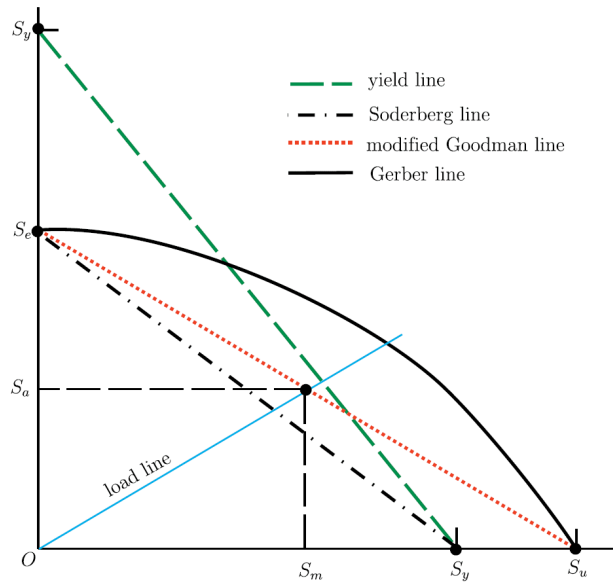
f = fator de carga (tabelado)

**FATOR DE CARGA**

f = 0,90 – para alguns autores

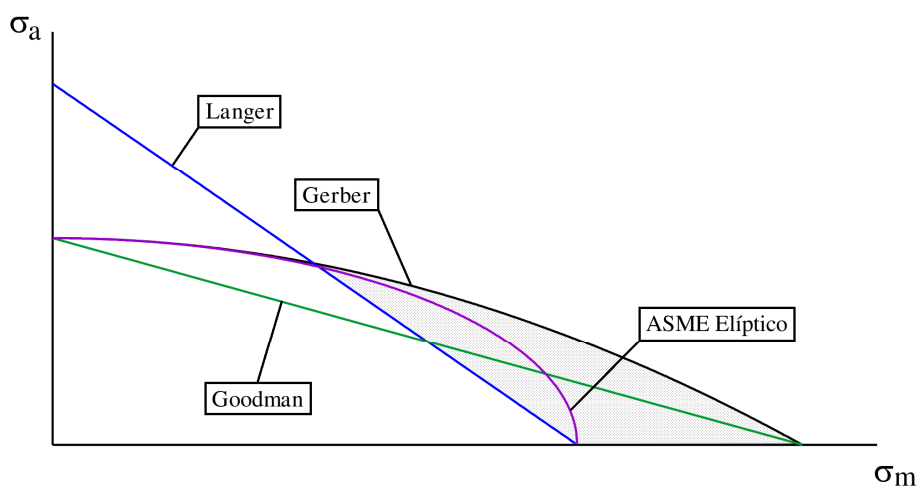


### VIDA INFINITA



27

### VIDA INFINITA



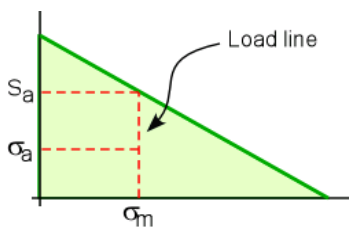
28

**VIDA INFINITA**

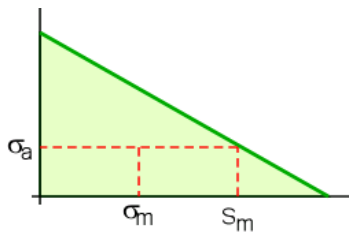
Critério	Curva de Falha	Região de Projeto
Goodman	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{rup}} = 1$	$\frac{\sigma_a}{S_e/n_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{rup}/n_f} \leq 1$
Gerber	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{rup}}\right)^2 = 1$	$\frac{\sigma_a}{S_e/n_f} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{rup}/n_f}\right)^2 \leq 1$
ASME Elíptico	$\left(\frac{\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{rup}}\right)^2 = 1$	$\left(\frac{\sigma_a}{S_e/n_f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{rup}/n_f}\right)^2 \leq 1$

$n_f$  = coeficiente de segurança em fadiga

**VIDA INFINITA – COEFICIENTES DE SEGURANÇA**

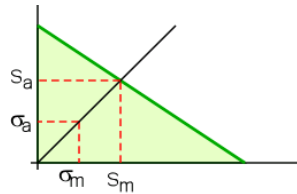


$$\sigma_m = cte. \Rightarrow n_f = \frac{S_a}{\sigma_a}$$

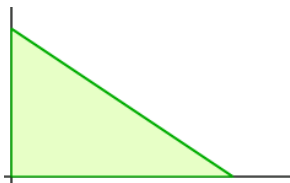


$$\sigma_a = cte. \Rightarrow n_f = \frac{S_m}{\sigma_m}$$

## VIDA INFINITA – COEFICIENTES DE SEGURANÇA



$$n_f = \frac{S_a}{\sigma_a} = \frac{S_m}{\sigma_m}$$



$$\frac{1}{n_f} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{rup}}$$

31

## EXEMPLO 02

Uma barra de aço ABNT SAE 4340 é submetida a uma carga axial flutuante que varia entre 330 kN (em tração) e 110 kN (em compressão). Determine o diâmetro da barra para vida infinita baseado no critério de *Goodman* e com um coeficiente de segurança de 2,5.

As propriedades mecânicas do 4340 são: tensão de ruptura – 1090 MPa, limite de fadiga da peça = 510 MPa.

32



## BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA

**Morales, M. B. M.**, *Variabilidad en el crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas aleatorias*, Universidad de Málaga, Málaga (2002) .

**Rosa, E.**, *Análise de Resistência Mecânica*, UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Análise e Projeto Mecânica, Santa Catarina (2002).

**Udomphol, T.**, *Fatigue of Metals*, Suranaree University of Technology, 2007.

**Weaber, M. L.**, *Fatigue of Materials – Module #39*.

**Zhen, Y.**, *Introduction to creep, fatigue and fracture*. (2012).