

4- Fadiga dos Materiais

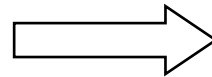
4.1-Introdução

- * Início do século XIX já se conhecia fadiga , mas até hoje o conhecimento não é completo.
- * Wohler , em 1862 , “On the mechanical tests on iron and steel”:

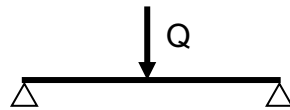
“A tensão com que rompiam em serviço alguns eixos de vagões ferroviários estava bem abaixo da tensão que o eixo suportava estaticamente”

- * Bach (1908) separou as solicitações em:

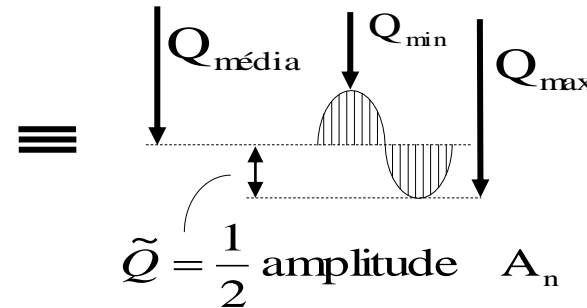
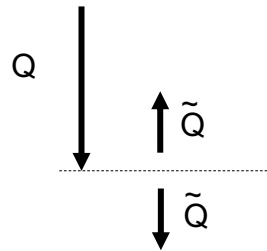
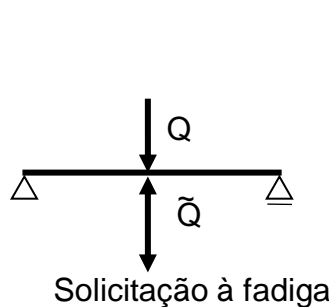
Estáticas
alternada simétrica
flutuante



Diferentes coeficientes de segurança



Solicitação estática



Exemplos

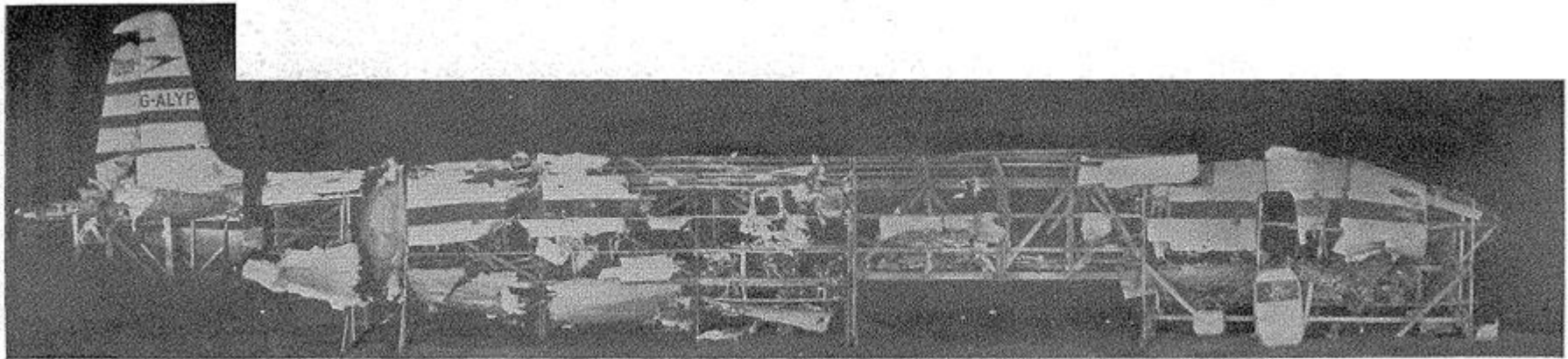
1. Acidente aéreo - De Havilland Comet 4B , série 6438, 1954



Acidente em maio de 1953, resultado da pressão sobre a fuselagem, que explodiu no ar. Ajustes no projeto foram feitos, mas o pior ainda estava por vir. Em janeiro de 1954, um Comet se desintegrou e matou 35 pessoas a bordo. Três meses depois, outro acidente, com as mesmas características do anterior.

A causa das explosões estava na estrutura da aeronave. O formato retangular das janelas panorâmicas não era ideal para um voo de grande altitude. A diferença de pressão causava fadiga no metal da fuselagem, provocando a desintegração. Os pontos fracos eram os cantos das janelas, quadradas, e as aberturas na fuselagem, também quadradas, para as portas e antenas de rádio.

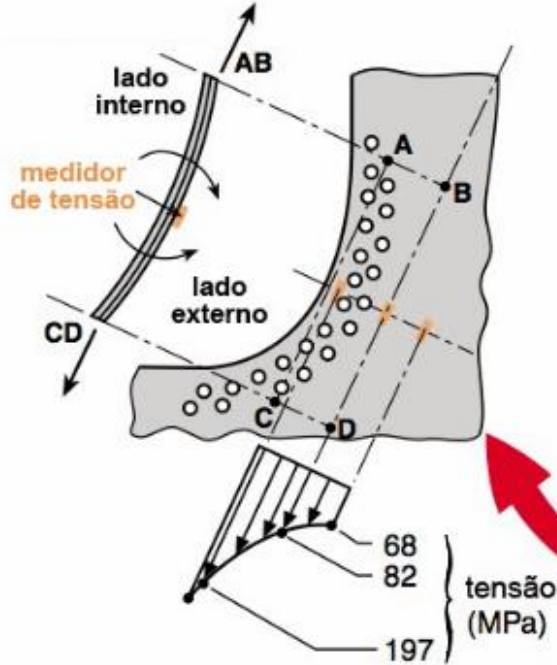
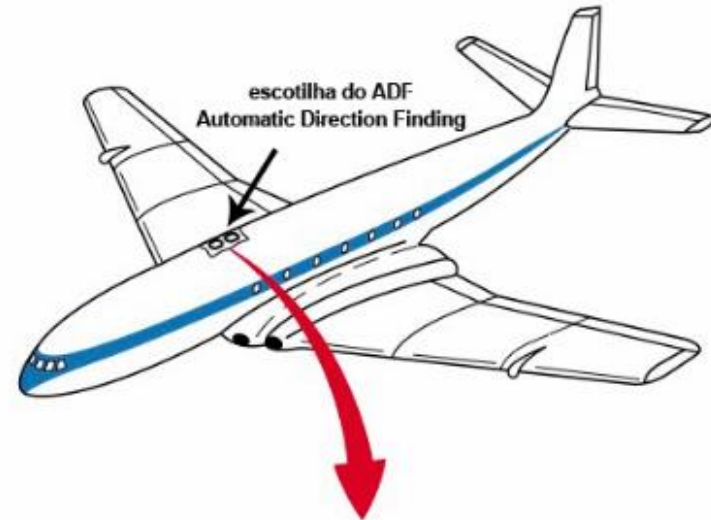
(<https://aventurasnahistoria.uol.com.br/noticias/reportagem/como-o-modelo-comet-se-transformou-em-um-tragico-pioneiro-na-nova-era-da-aviacao.phtml>)



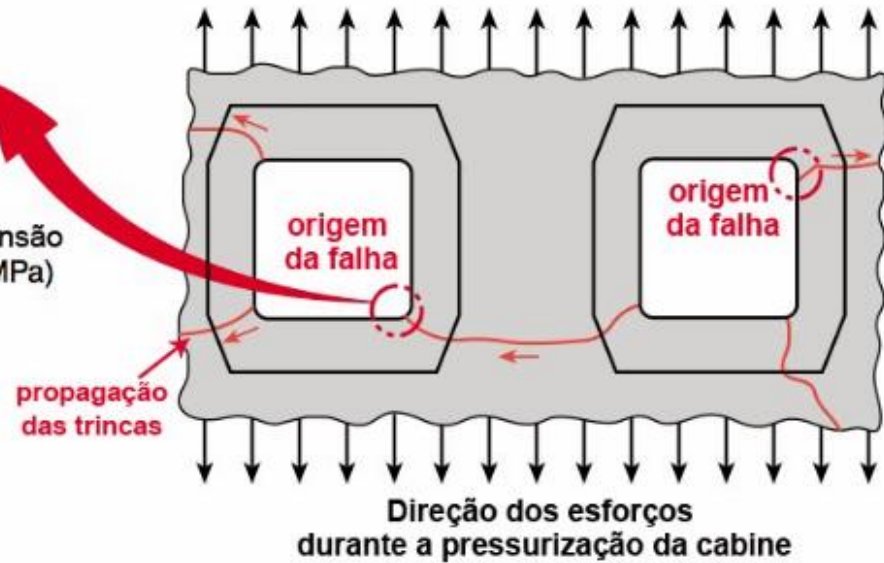
Fonte: https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dgjr/hh/text_2019_01_24_Comet.pdf

Comet G-ALYP

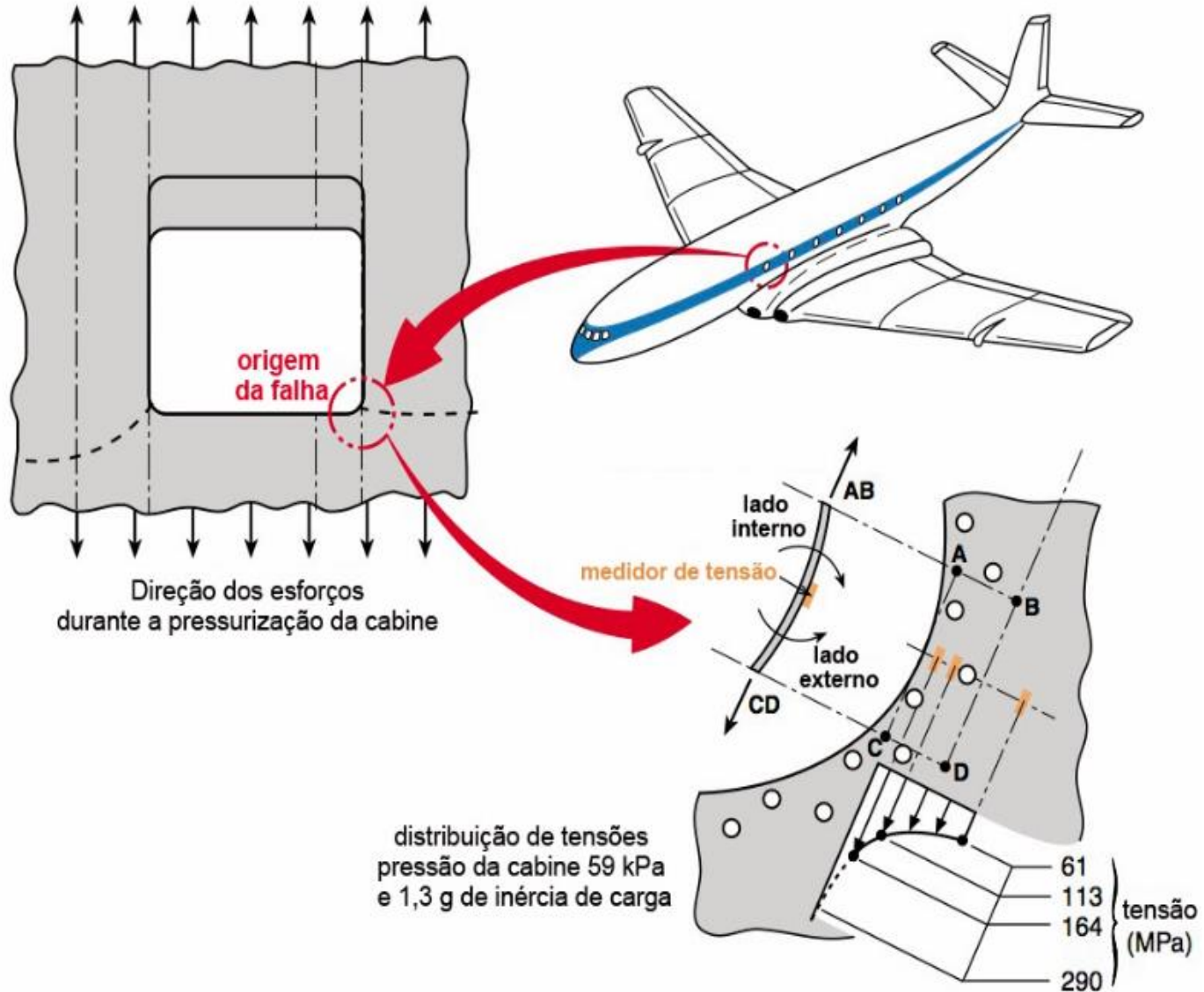
Acidente em 10 de janeiro de 1954



distribuição de tensões
pressão da cabine 59 kPa e
1,3 g de inércia de carga

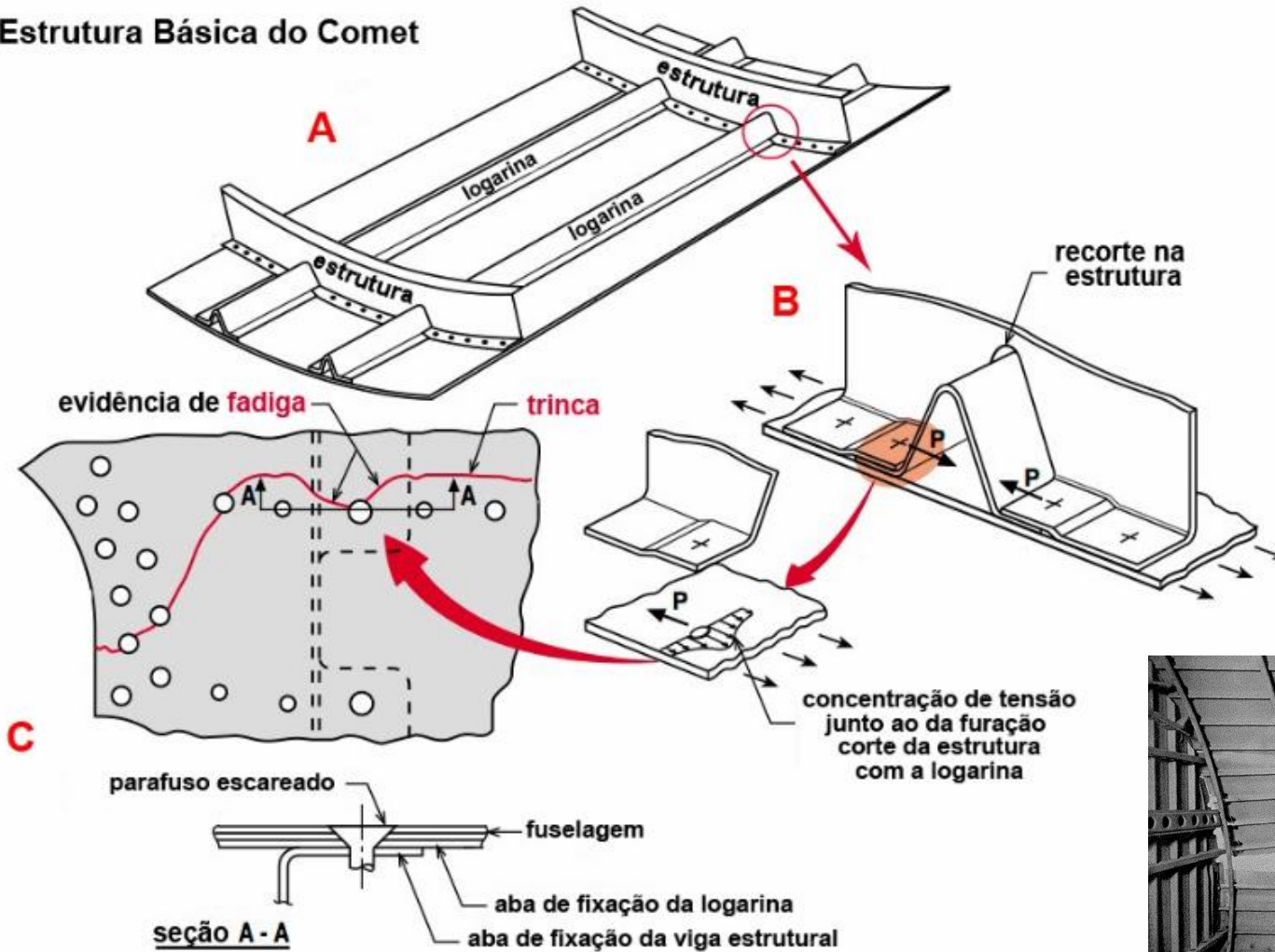


Fonte: <http://inspecaoequipto.blogspot.com/2014/02/caso-060-avioes-comet-falhas-por-fadiga.html>



Fonte: <http://inspecaoequipto.blogspot.com/2014/02/caso-060-avioes-comet-falhas-por-fadiga.html>

Estrutura Básica do Comet

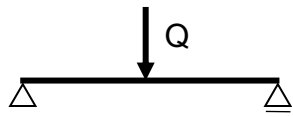


Fonte: <http://inspecaoequipto.blogspot.com/2014/02/caso-060-avioes-comet-falhas-por-fadiga.html>

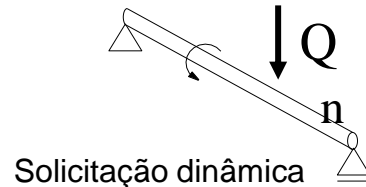
2. Acidente aéreo - Boeing 737, abril de 1988



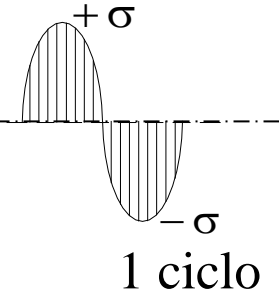
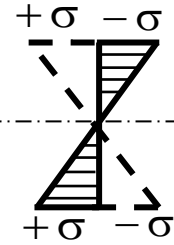
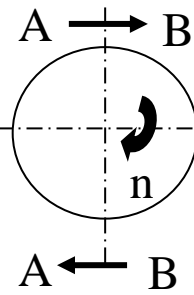
Fonte: <http://inspecaoequipto.blogspot.com/2014/02/caso-060-avioes-comet-falhas-por-fadiga.html>



Solicitação estática



Solicitação dinâmica



Falhas por Fadiga

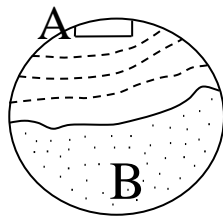
iniciam na superfície ou logo abaixo → trincas microscópicas

Onde?

Pontos de concentração de tensões

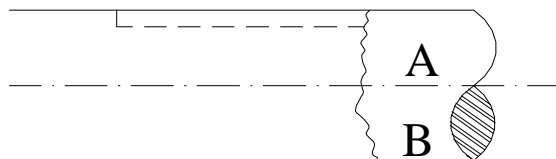
- rasgos de chaveta
- mudança diâmetros
- entalhes
- defeitos superficiais

* Progridem lentamente (A) e falham repentinamente (B)

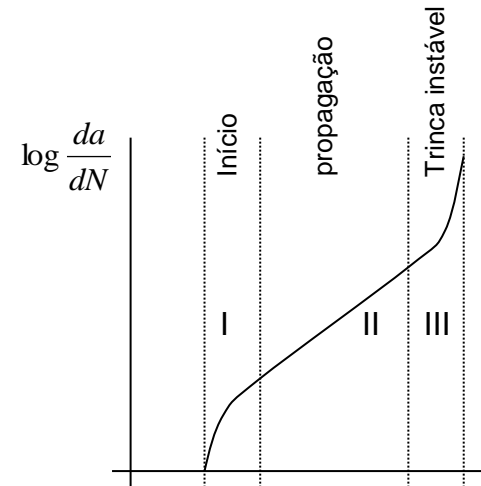


A- região polida devido ao “abre-fecha”

B- região fosca → ruptura violenta



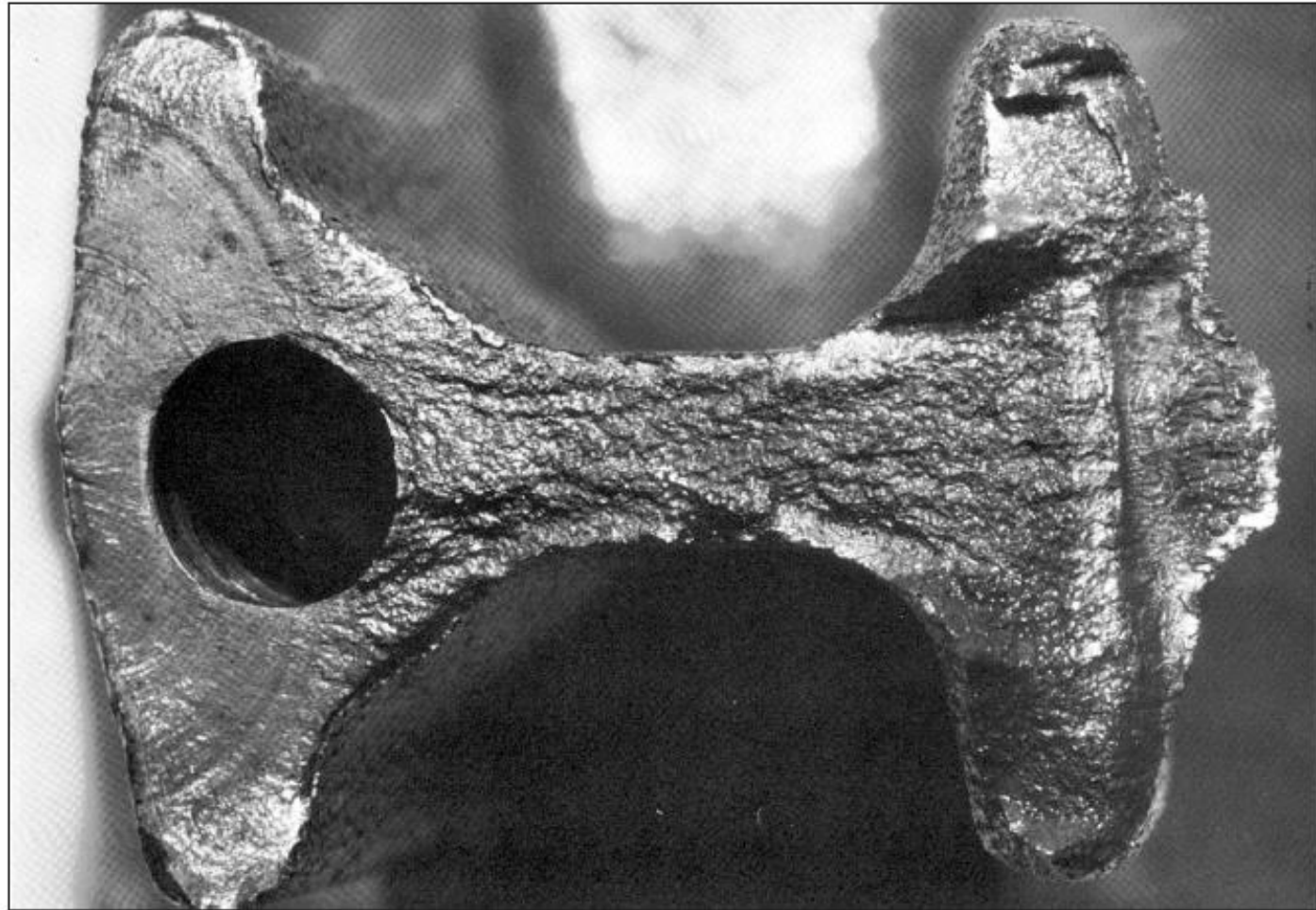
rasgo de chaveta
concentração de tensões



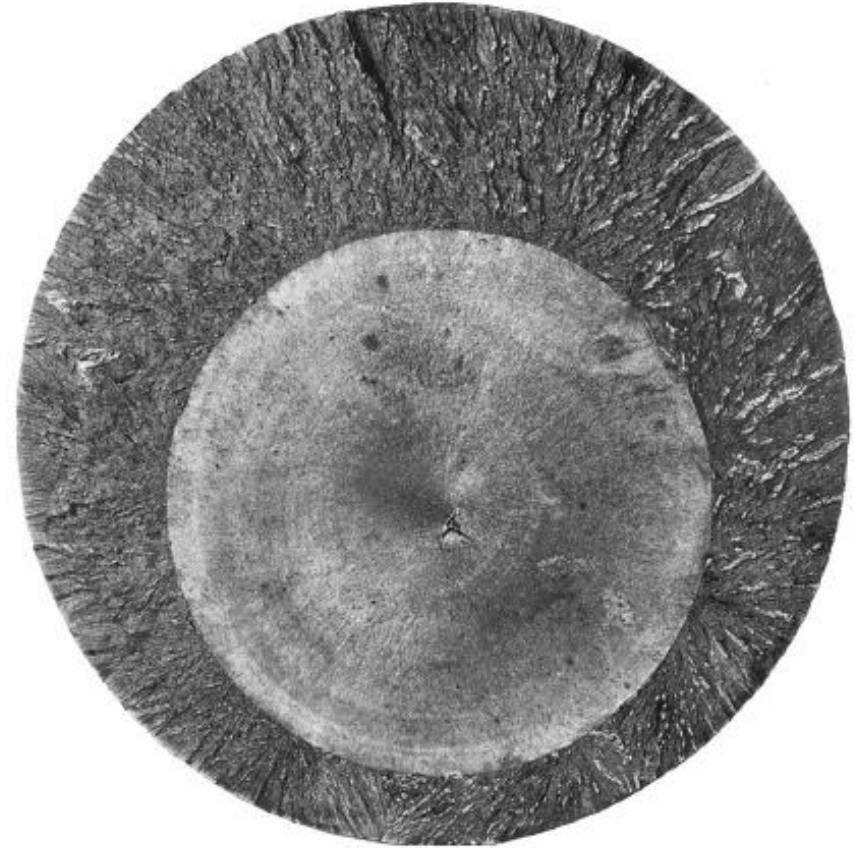
Fatigue fracture of an AISI 4320 drive shaft. The fatigue failure initiated at the end of the keyway at points *B* and progressed to final rupture at *C*. The final rupture zone is small, indicating that loads were low. (From *ASM Handbook, Vol. 12: Fractography, 2nd printing, 1992, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, fig 51, p. 120. Reprinted by permission of ASM International®, www.asminternational.org.*)



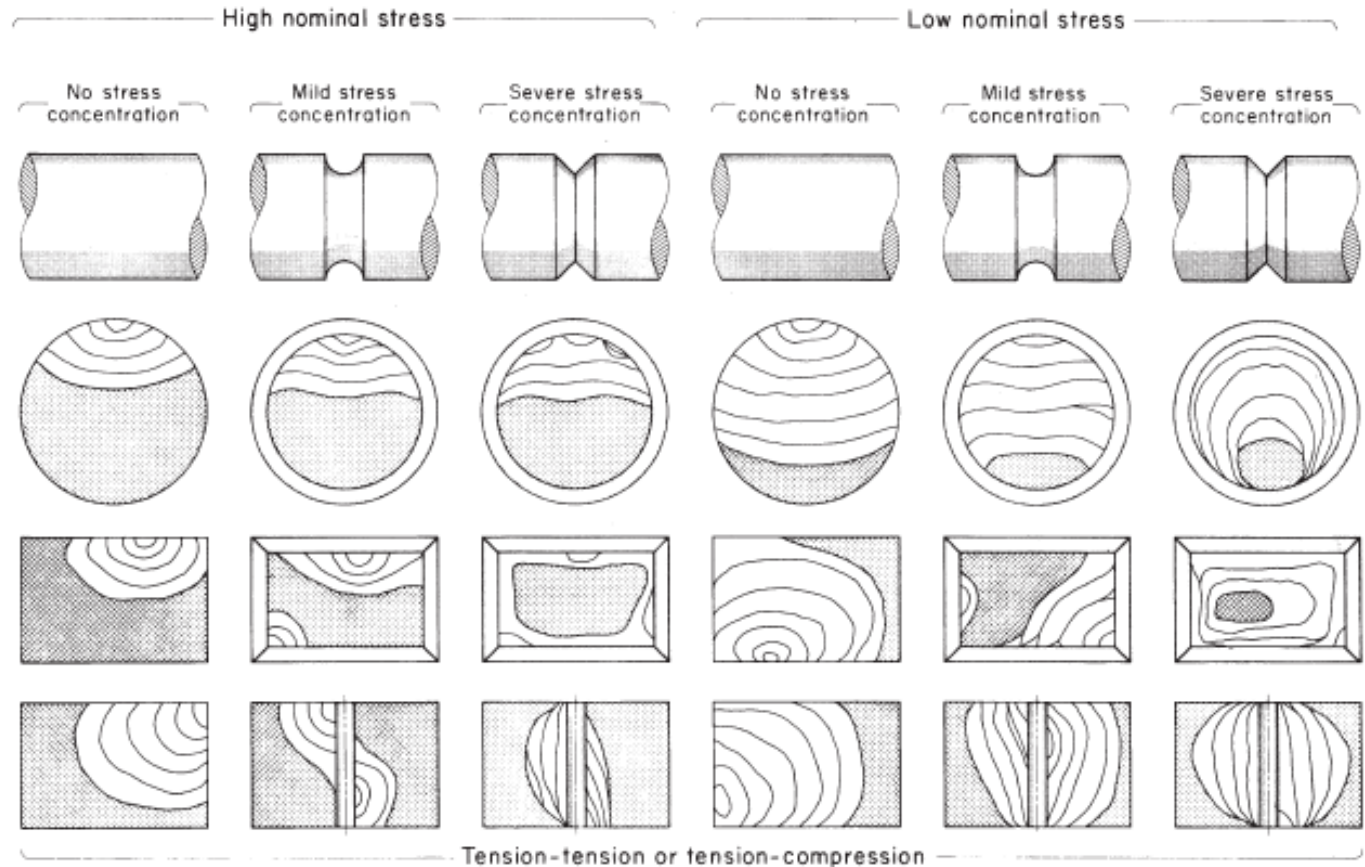
Fatigue fracture surface of a forged connecting rod of AISI 8640 steel. The fatigue crack origin is at the left edge; the flash line of the forging, no unusual roughness of the flash trim was indicated. The fatigue crack progressed halfway around the oil hole at the left, indicated by the beach marks, before final fracture occurred. Note the pronounced shear lip in the final fracture at the right edge. (From ASM Handbook, Vol. 12: Fractography, 2nd printing, 1992, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, fig 523, p. Reprinted by permission of ASM International®, www.asminternational.org.)

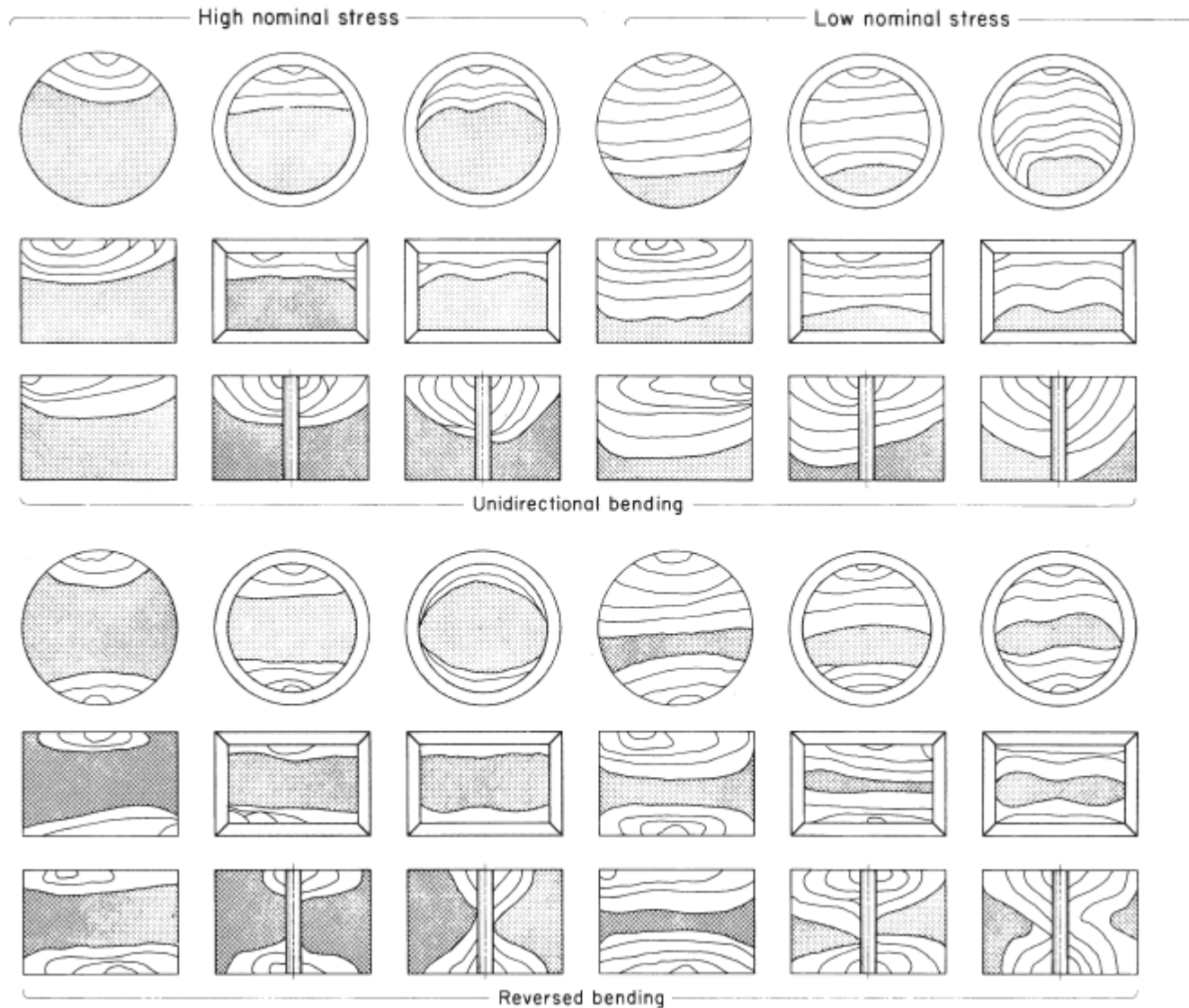


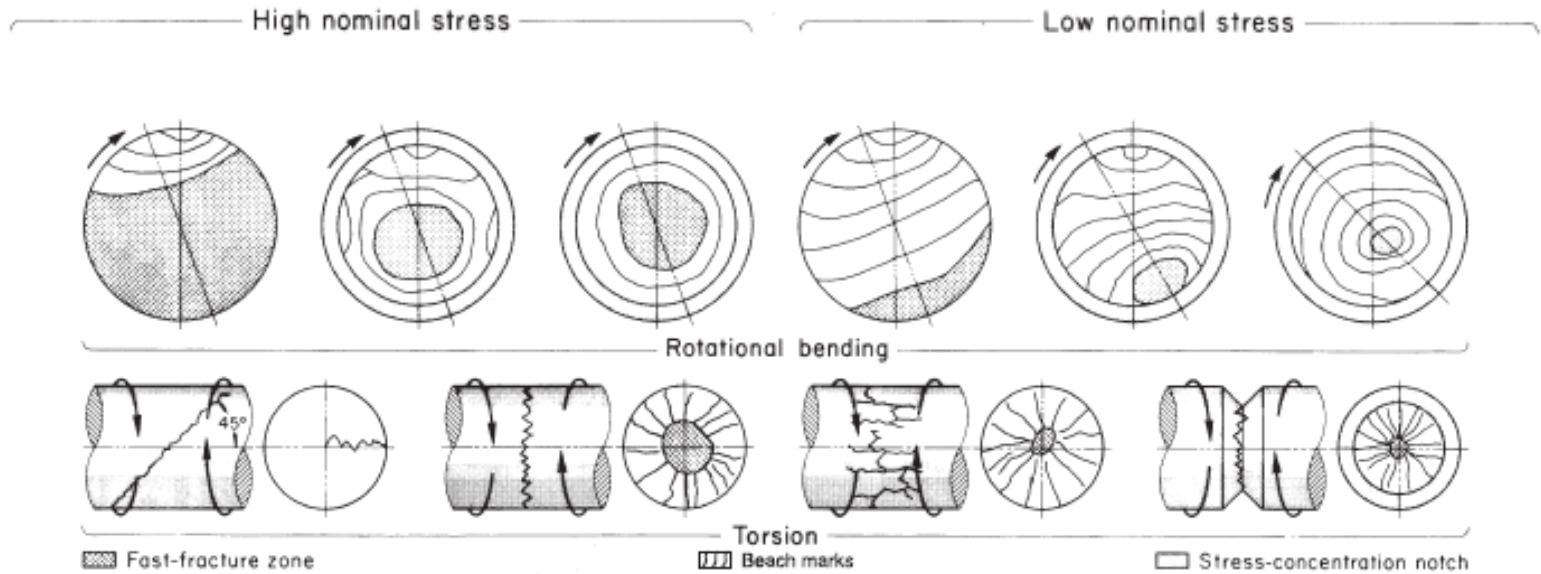
Fatigue fracture surface of a 200-mm (8-in) diameter piston rod of an alloy steel steam hammer used for forging. This is an example of a fatigue fracture caused by pure tension where surface stress concentrations are absent and a crack may initiate anywhere in the cross section. In this instance, the initial crack formed at a forging flake slightly below center, grew outward symmetrically, and ultimately produced a brittle fracture without warning. (From ASM Handbook, Vol. 12: Fractography, 2nd printing, 1992, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, fig 570, p. 342. Reprinted by permission of ASM International®, www.asminternational.org.)



Schematics of fatigue fracture surfaces produced in smooth and notched components with round and rectangular cross sections under various loading conditions and nominal stress levels. (From *ASM Metals Handbook, Vol. 11: Failure Analysis and Prevention, 1986, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, fig 18, p. 111. Reprinted by permission of ASM International®, www.asminternational.org.*)





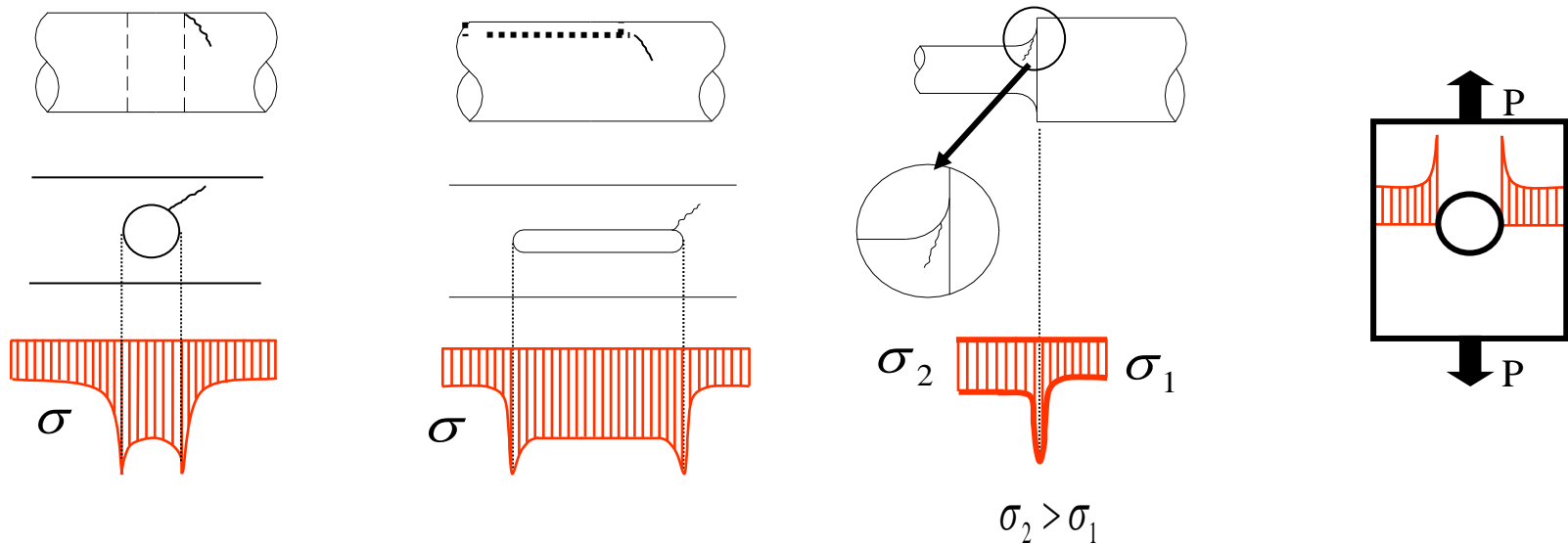


Fatores que contribuem para fadiga

- Grande diferença entre σ_{\min} e σ_{\max}
- Grande número de ciclos
- σ_{\max} muito elevado
- Tipo de material (aço, alumínio, plástico, etc.)

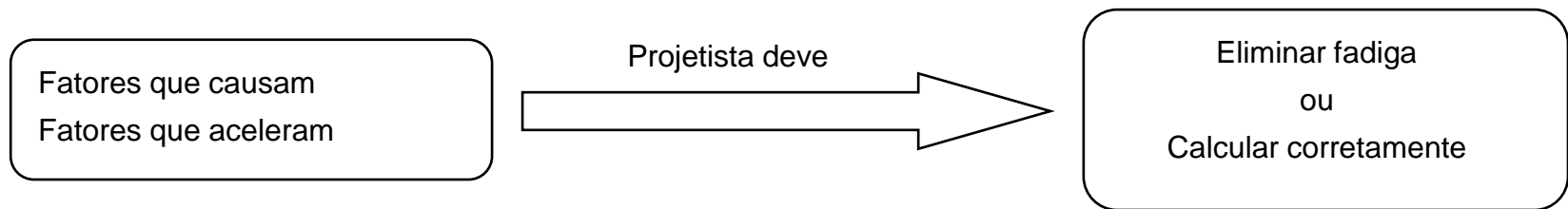
Fatores que aceleram a fadiga

a) Concentração de tensões (entalhes)



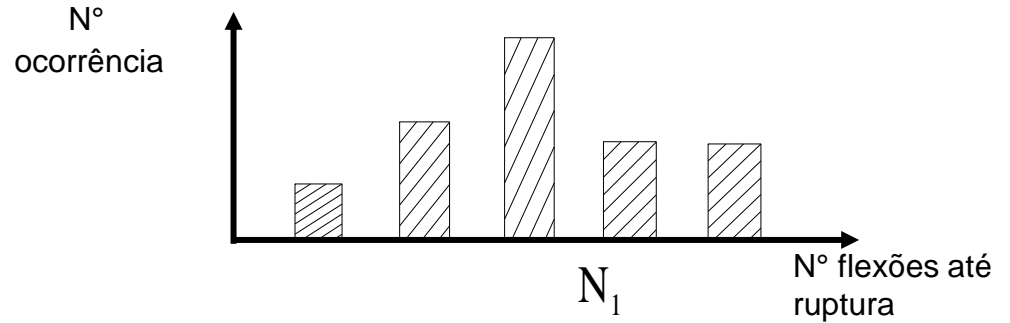
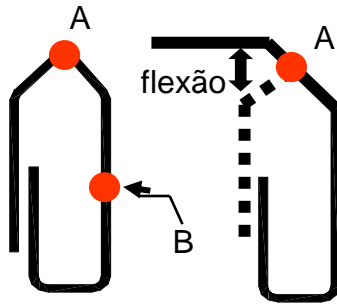
- b) Imprecisões metalúrgicas (composição, dureza, ...)
- c) Acabamento superficial
- d) Corrosão
- e) Tensões residuais
- f) Temperatura (somente se alterar propriedades mecânicas)
- g) Sobrecarga

OBS.: Frequência (tempo do ciclo) NÃO tem influência



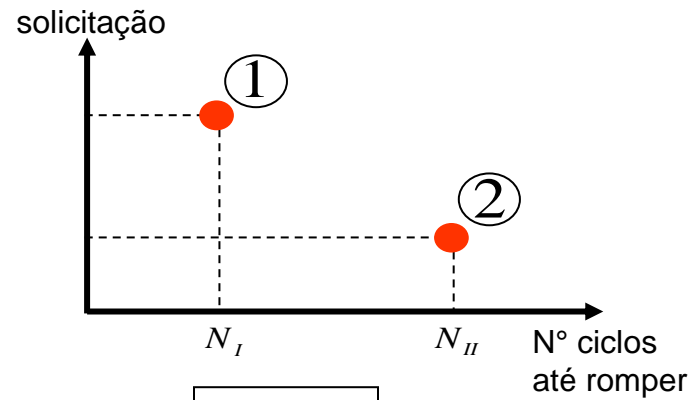
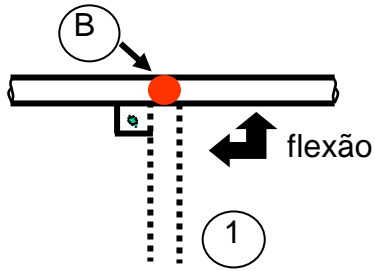
4.2 - Diagrama de Wohler ou S-N

Experiência I



fenômeno estatístico!

Experiência II



Experiência III

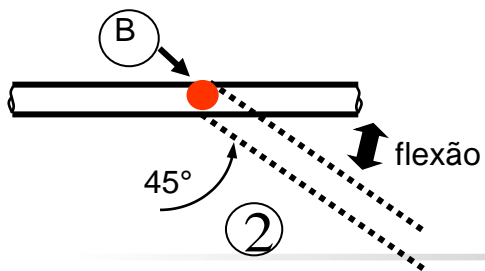
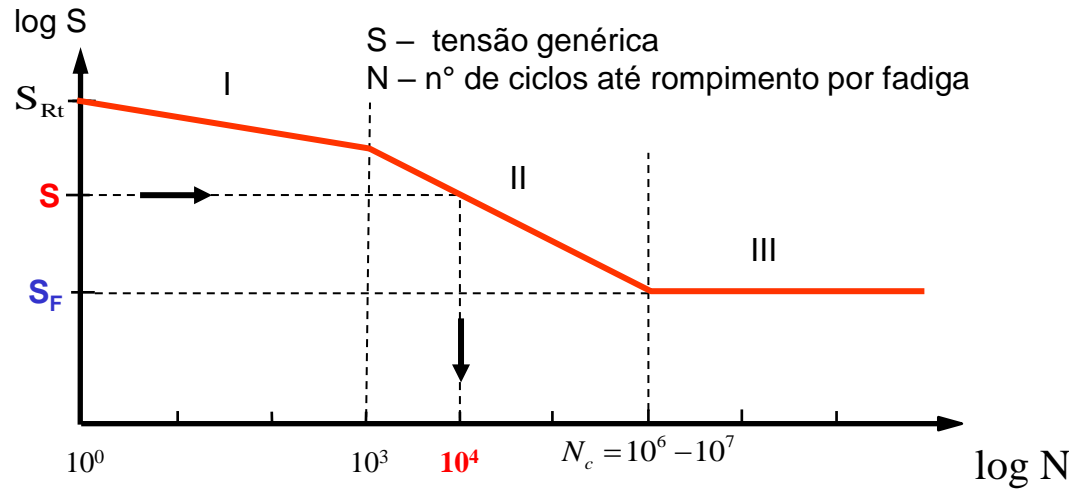


Diagrama de Wohler S-N



I – Região de fadiga a baixa ciclagem
II – Região de fadiga a alta ciclagem
III – Região de vida infinita

Curva acima vale para aços

Observações I

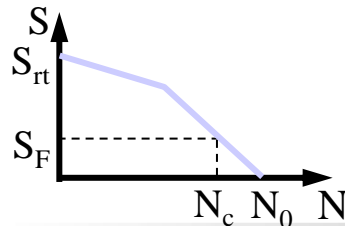
S_{rt} - tensão ruptura estática

S_F - tensão limite de resistência à fadiga

$$S_F \cong 0,4 \text{ a } 0,6 S_{rt}$$

$\sigma \leq S_F$: vida infinita!

N_c - n° crítico de ciclos



- Al e ligas
- Cu e ligas
- Mg
- plásticos

$S_F \cong 0,3 \text{ a } 0,4 S_{rt}$
 $S_F \cong 0,18 \text{ a } 0,3 S_{rt}$

não há vida infinita !!

$$N_0 \geq 10^9$$

$$S_F \iff 10^8 \text{ (por convenção)}$$

Um eixo girando com $n=1000$ [rpm], faz $60 \times n$ [ciclos/hora], para $N_c = 10^7$ ciclos e tensão S_F :

* atinge N_c em $\frac{1 \times 10^7}{60 \times 1000} \cong 166,6$ horas de serviço.

* se trabalhar com tensão S romperá com 10^4 [ciclos] (diagrama) em $\frac{10^4}{60 \times 1000} = 10$ [minutos]

Observações II

- $N < 10^3$ - fadiga a baixa ciclagem
- $S < S_F$ - vida infinita
- $S \geq S_F$ - vida finita

Quanto ao uso

- $N < 10^3$ - construção civil . Solicitação estática.
- $10^3 < N < N_c$ - peças de engenharia mecânica com vida curta (descartáveis, ausência calculada , baixa frequência de uso , etc).
- $N > N_c$ - peças mecânicas em geral

Importante

Curva de Wohler pode ser obtida com corpo de prova padrão ou com a própria peça.

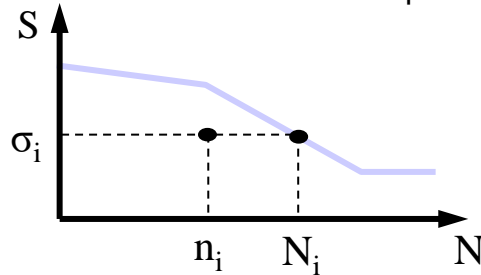
Na curva de Wohler para a peça :

- a) Corrigir $S_{F_{lim}}$ por b_1 e b_2
- b) Corrigir $S_{F_{lim}}$ se $k \neq \infty$

(ver conceitos adiante)

Danos Acumulativos

Não existe teoria exata a respeito.



- n_i - nº de ciclos sob tensão σ_i
- N_i - nº de ciclos para romper sob apenas σ_i

Depois de (σ_i, n_i) não rompe mas causa danos que diminuem a vida. Agora S_F é menor que originalmente.

Teoria de Miner

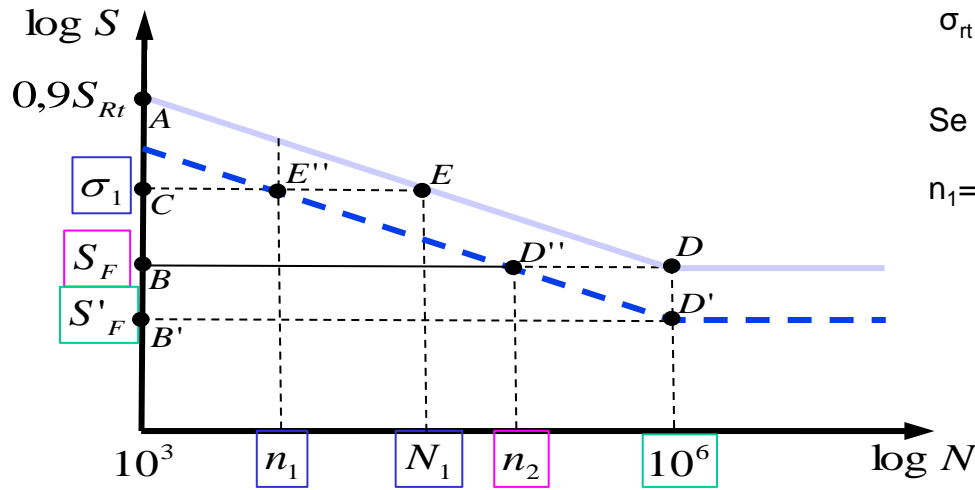
$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = C \quad , \quad 0.7 \leq C \leq 2.2$$

Assume-se $C=1$ e trecho entre $[10^3, 0.9 S_{rt}]$ e $[N_c, S_F]$ do diagrama S-N original.

Exemplo :

$$\sigma_{rt} = 55 \text{ [Kgf/mm}^2\text{]}; S_F = 27,6 \text{ [Kgf/mm}^2\text{]}; N_c = 10^6$$

Se a peça for submetida a $\sigma_1 = 41,3 \text{ [Kgf/mm}^2\text{]}$ por $n_1 = 3000$ [ciclos], qual o novo limite da fadiga?



$\sigma_{rt} = 55$ [Kgf/mm²]; $S_F = 27,6$ [Kgf/mm²]; $N_c = 10^6$

Se a peça for submetida a $\sigma_1 = 41,3$ [Kgf/mm²] por $n_1 = 3000$ [ciclos], qual o novo limite da fadiga?

Usamos diagrama de Wohler “original” AED e semelhança ΔACE e ΔABD , lembrando que estamos no espaço $\log \times \log$

$$\frac{\log N_1 - \log 10^3}{\log(0,9S_{Rt}) - \log \sigma_1} = \frac{\log 10^6 - \log 10^3}{\log(0,9S_{Rt}) - \log S_F} \Rightarrow \log N_1 = 3,93$$

$$N_1 = 8,51 \times 10^3 \text{ [ciclos]}$$

Se trabalharmos com σ_1 , até o fim da vida ainda restam :

$$\Delta = N_1 - n_1 = 5510 \text{ [ciclos].}$$

Nesta mesma situação, se trabalhássemos com $\sigma = S_F$ teríamos n_2 ciclos restantes.

O cálculo de n_2 pode ser realizado segundo a teoria de Miner

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \Rightarrow n_2 = \left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right) N_2$$

$$n_2 = \left[1 - \frac{3 \times 10^3}{8,51 \times 10^3}\right] \times 10^6 = 0,65 \times 10^6 [\text{ciclos}]$$

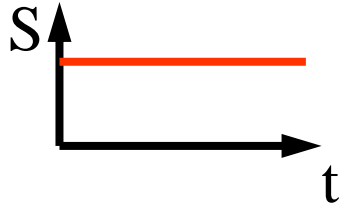
Ainda segundo Miner reta AED // D'D'E" no espaço log x log e $\Delta DD'D''$ semelhante a ΔABD

$$\frac{\log 10^6 - \log 0,65 \times 10^6}{\log S_F - \log S'_F} = \frac{\log 10^6 - \log 10^3}{\log(0,9 S_{Rt}) - \log S_F}$$

$$\log S'_F = 1,424881 \Rightarrow S'_F = 26,6 \left[\text{kgf} / \text{mm}^2 \right]$$

4.3-Tipos de variações de tensões

Contínua

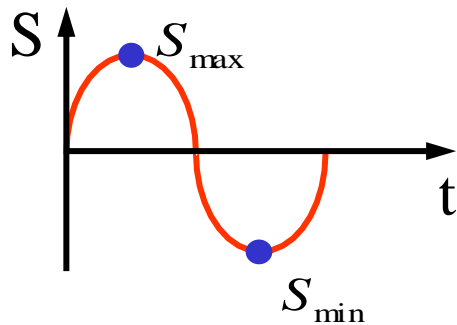


$$S_{\max} = S_{\min} = S_{\text{med}}$$

S : tensão genérica, pode ser =

$\sigma > 0$ tração
 $\sigma < 0$ compressão
 ζ cisalhamento
 flexão $\rightarrow \sigma$

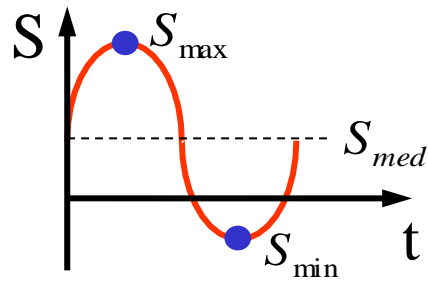
Alternada simétrica



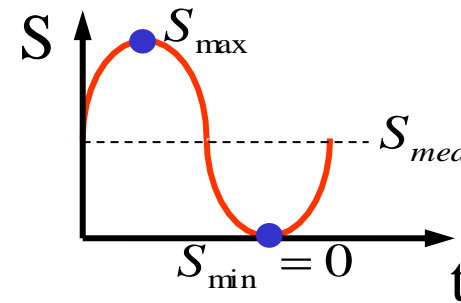
$$|S_{\max}| = |S_{\min}|$$

$$S_{\text{med}} = 0$$

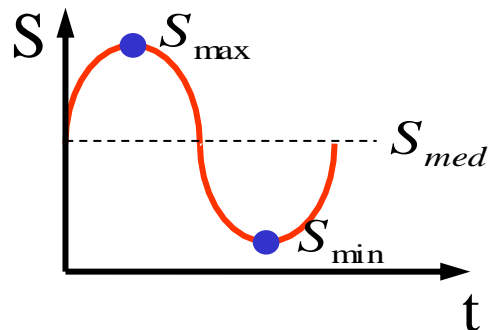
Alternada



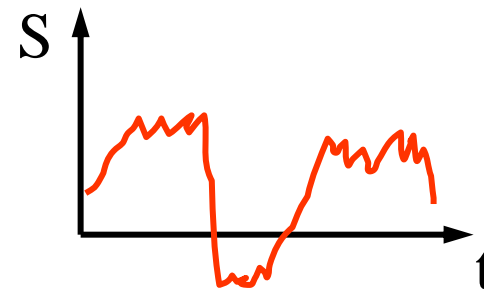
Pulsatória



Pulsatória ondulada



Aleatória

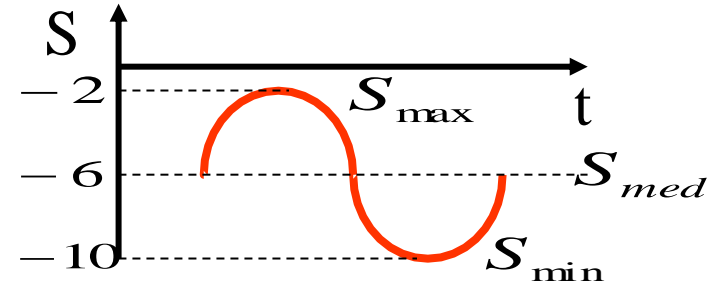


Parâmetros que definem a Variação de Tensão

1) Amplitude

$$A_n = S_{\max} - S_{\min}$$

$$A_n = -2 - (-10) = 8$$



2) Tensão média

$$S_{med} = \frac{1}{2} (S_{\max} + S_{\min})$$

$$S_{med} = \frac{1}{2} (-2 + (-10)) = -6$$

3) Coeficiente de variação de solitação k

$$k = \frac{S_m}{|S_{med}|}$$

$$S_m = \max(|S_{\max}|, |S_{\min}|)$$

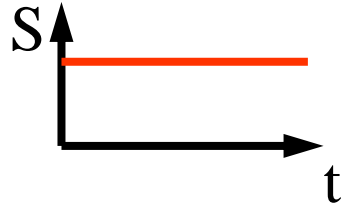
$$k = \frac{\max(|-2|, |-10|)}{|-6|} = \frac{10}{6}$$

$$1 < k < \infty$$

$$k_{alternandasimétrica} = \infty$$

Aplicações aos casos anteriores:

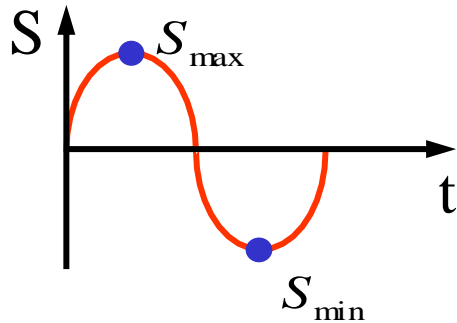
Contínua



$$S_{\max} = S_{\min} = S_{med}$$

$$k = \frac{S_m}{|S_{med}|} \quad k = 1$$

Alternada simétrica



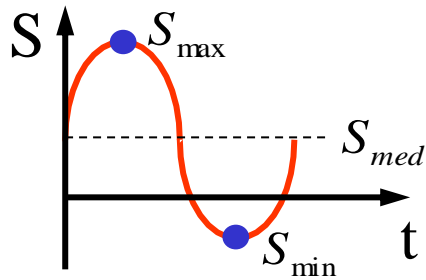
$$|S_{\max}| = |S_{\min}|$$

$$S_{med} = 0$$

$$k = \frac{S_m}{|S_{med}|}$$

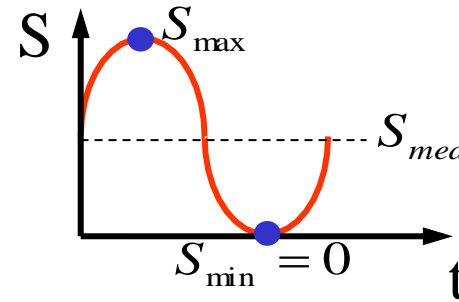
$$k = \infty$$

Alternada



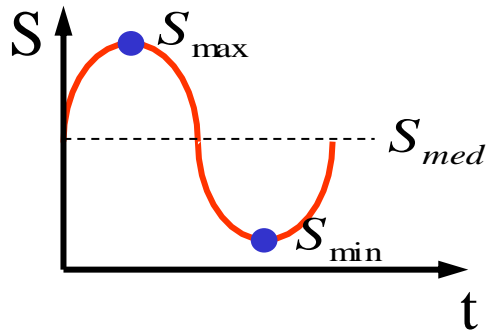
$$k = \frac{S_m}{|S_{med}|} \quad 2 < k < \infty$$

Pulsatória



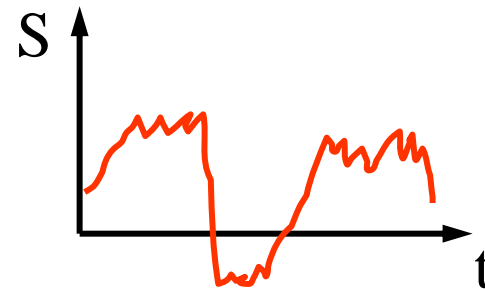
$$k = 2$$

Pulsatória ondulada



$$1 < k < 2$$

Aleatória

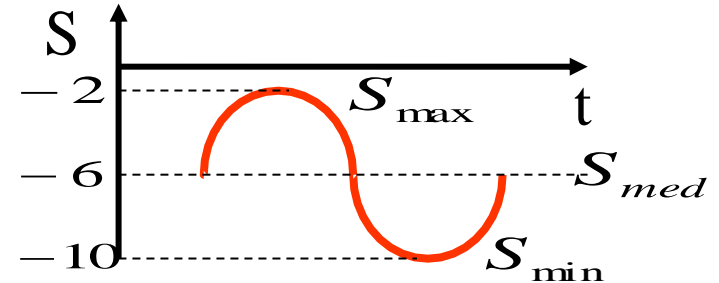


Parâmetros que definem a Variação de Tensão

1) Amplitude

$$A_n = S_{\max} - S_{\min}$$

$$A_n = -2 - (-10) = 8$$



2) Tensão média

$$S_{med} = \frac{1}{2} (S_{\max} + S_{\min})$$

$$S_{med} = \frac{1}{2} (-2 + (-10)) = -6$$

3) Coeficiente de variação de solitação k






$$k = \frac{S_m}{|S_{med}|}$$

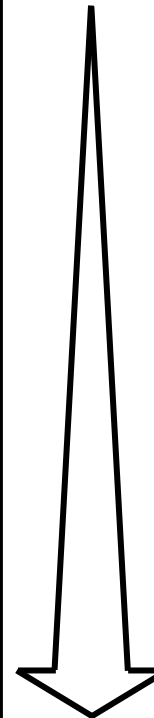
$$S_m = \max(|S_{\max}|, |S_{\min}|)$$

$$k = \frac{\max(|-2|, |-10|)}{|-6|} = \frac{10}{6}$$

$$1 < k < \infty$$

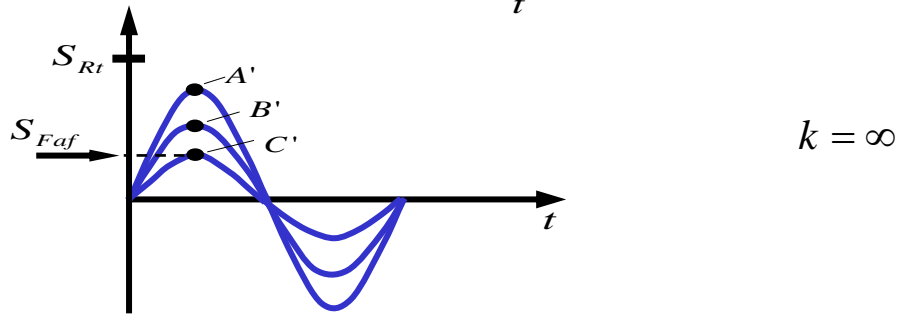
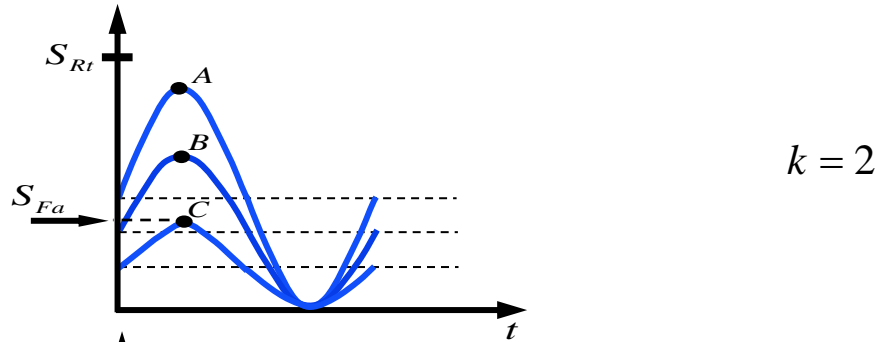
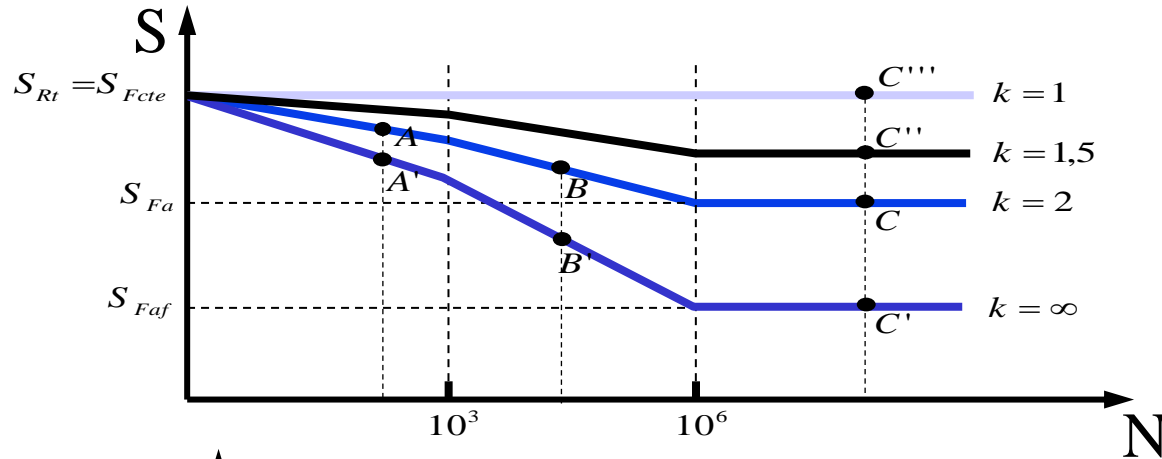
$$k_{alternandasimétrica} = \infty$$

Tipo de solicitação	Gráfico	k
Contínua		1
Pulsatória ondulada		$1 < k < 2$
Pulsatória		2
Alternada		$2 < k < \infty$
Alternada simétrica		∞



Severidade de solicitação à fadiga

Diagrama de Wohler para vários k's



Obs: Os valores de S usados nas ordenadas são sempre : $S_m = \max(|S_{\max}|, |S_{\min}|)$

Para cada k



S_{Fk} tensão limite de fadiga

Explicação das Experiências

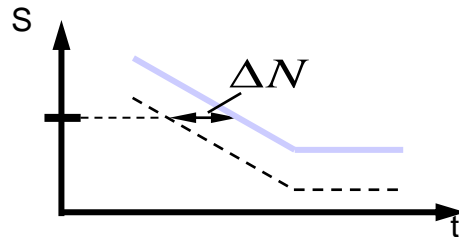


Exp I

O ponto A tem forte deformação plástica

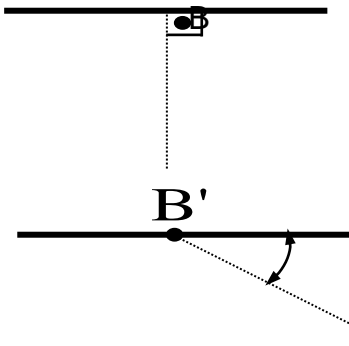


equivalente dano cumulativo.

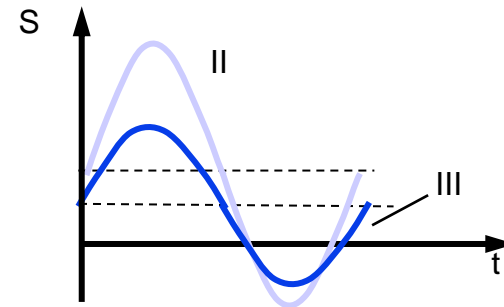
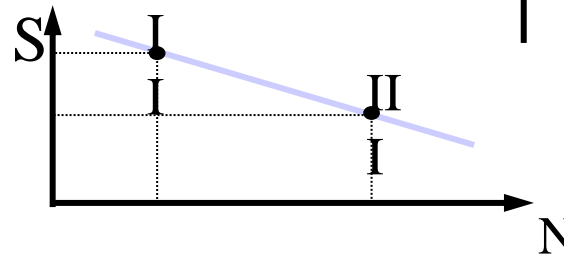


N_i menor que na experiência II

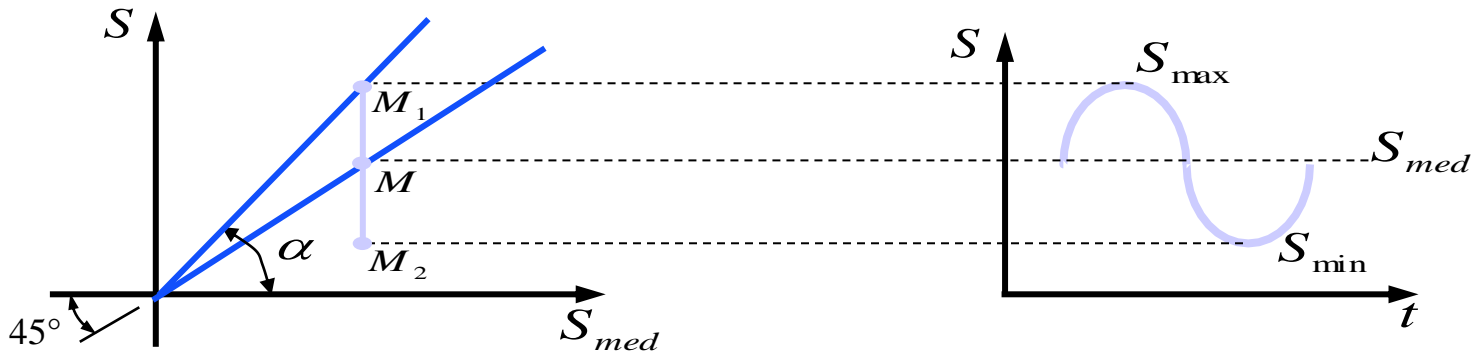
Experiências II e III



45°



4.4- Diagrama de Smith



*lugar geométrico dos M → reta 45°

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S_m}{S_{med}} = k$$

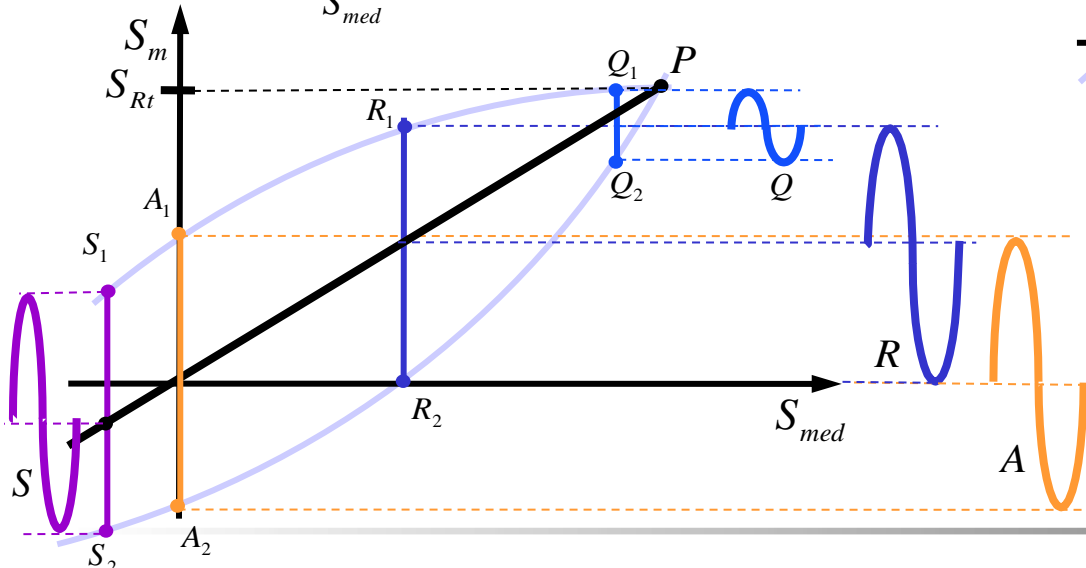
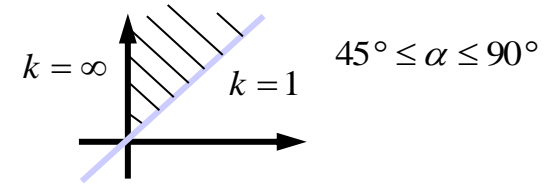
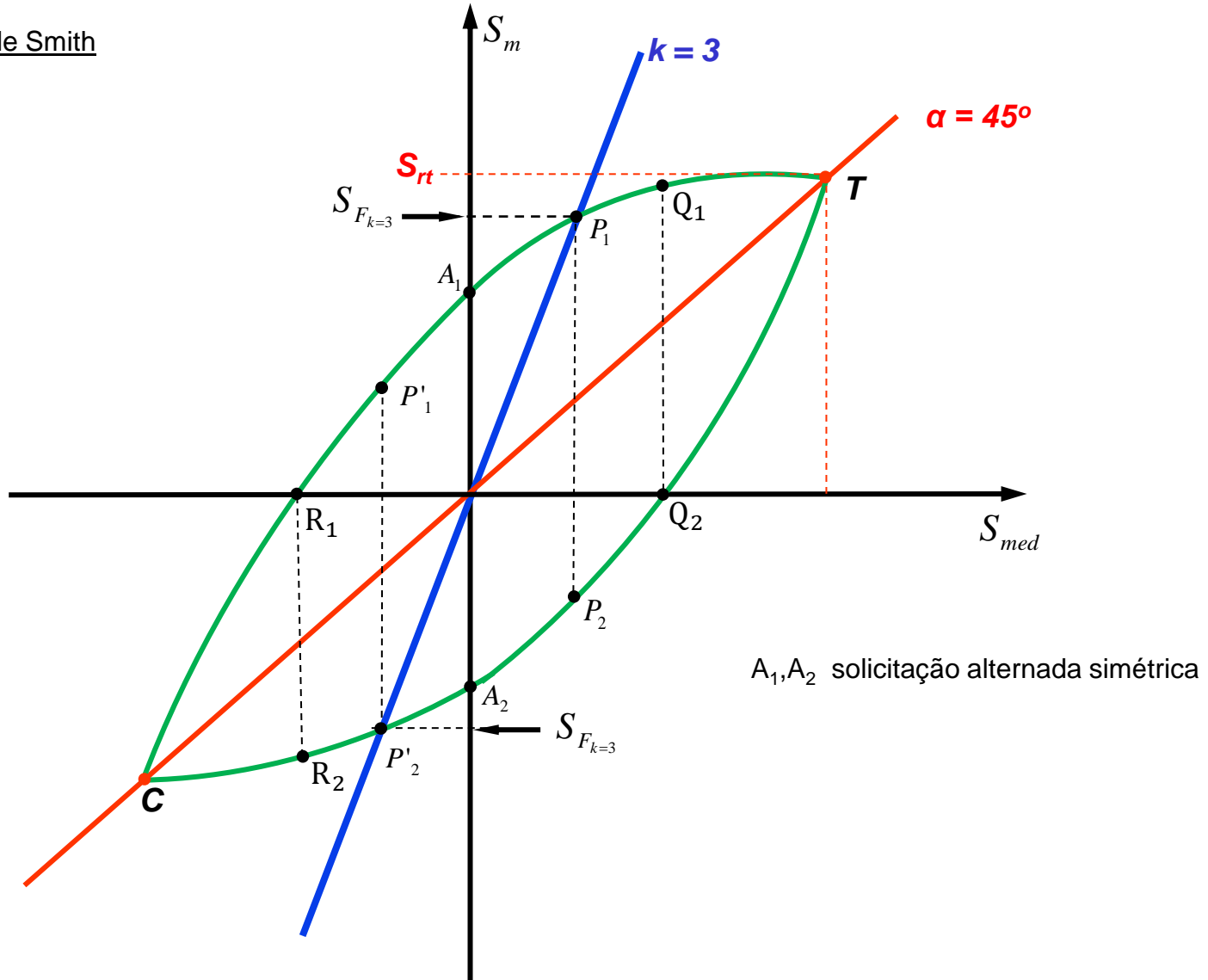


Diagrama de Smith



Observações sobre o Diagrama de Smith

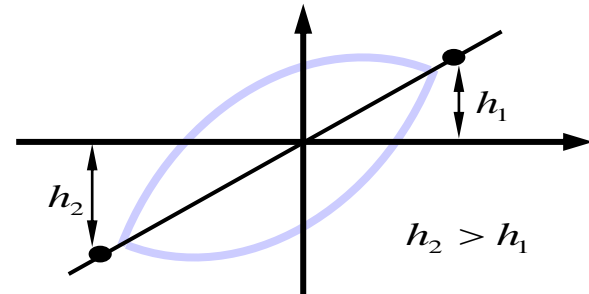
- Trecho CA₁T tensões máximas
- Trecho CA₂T tensões mínimas
- Ramos A₁T e CA₂ contém pontos $S_m = \max(|S_{max}|, |S_{min}|)$ daí saem S_F para os vários k's.
- Ramos Q₂T e R₁T representam “tração”, $S > 0$
- Ramos R₁C e Q₂C representam “compressão”, $S < 0$

Pontos Notáveis

- T - S_{Rt} - tensão ruptura à tração, $k=1$
- C - S_{Rc} - tensão ruptura à compressão, $k=1$

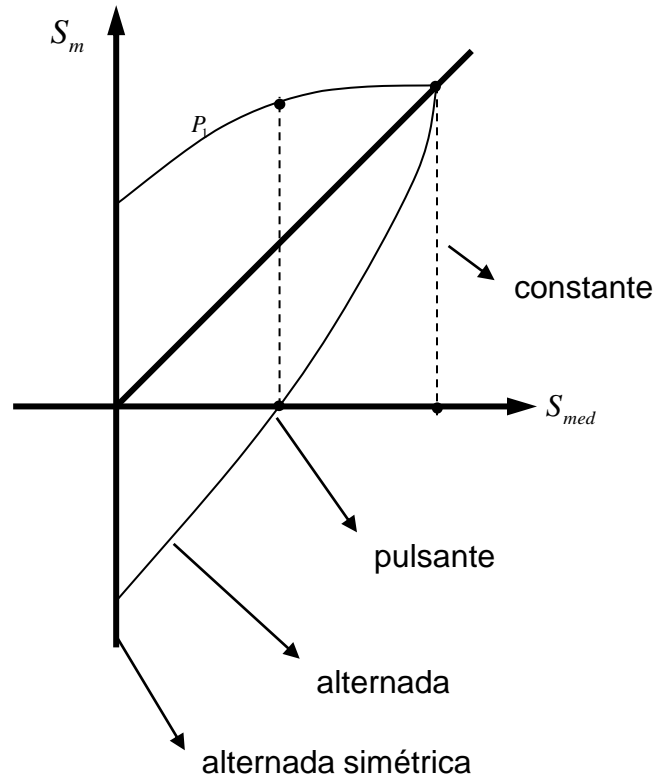
Faz-se :

$$S_{Rt} = S_{Rc} \quad \text{Mas na realidade}$$



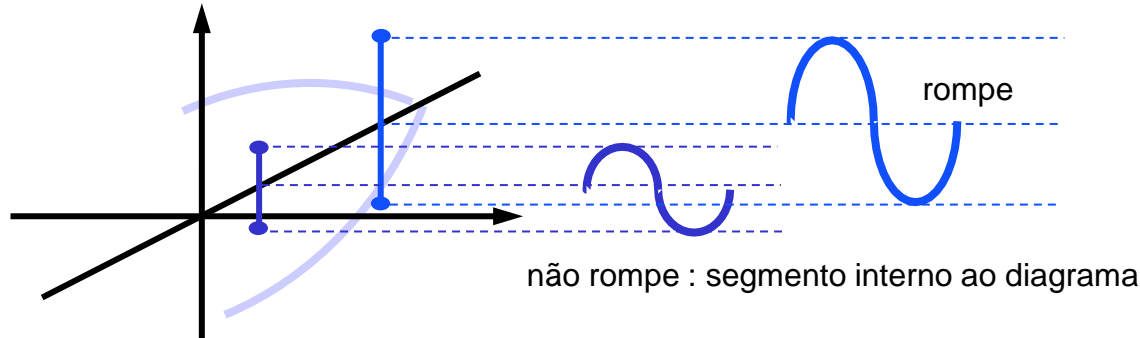
Q₁, Q₂ e R₁, R₂ \implies sollicitação pulsatória, $k = 2$

A₁, A₂ \implies sollicitação alternada simétrica $k = \infty$

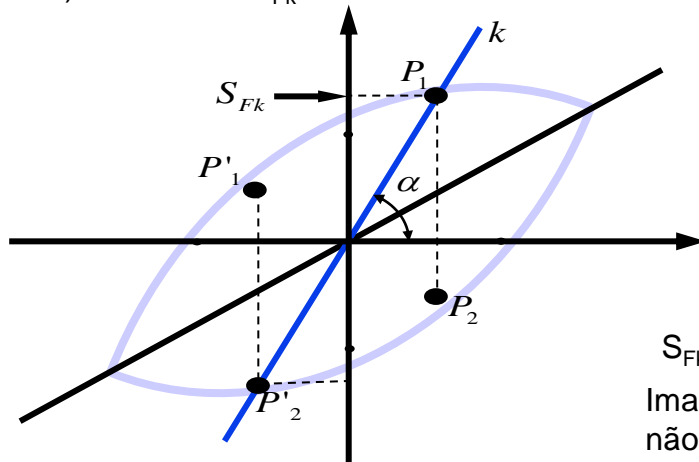


Uso do Diagrama de Smith

1) Saber se com certa sollicitação o corpo de prova rompe ou não à fadiga



2) Determinar S_{Fk}



Fazendo-se reta passando pela origem com :

$$\alpha = \text{arc tg } k$$

acha-se S_{Fk}

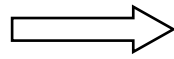
S_{Fk} não é P_2 (ou P'_1) ?

Imagine-se um ciclo lento \rightarrow o corpo de prova romperá com P_1 (ou P'_2) e não com P_2 porque :

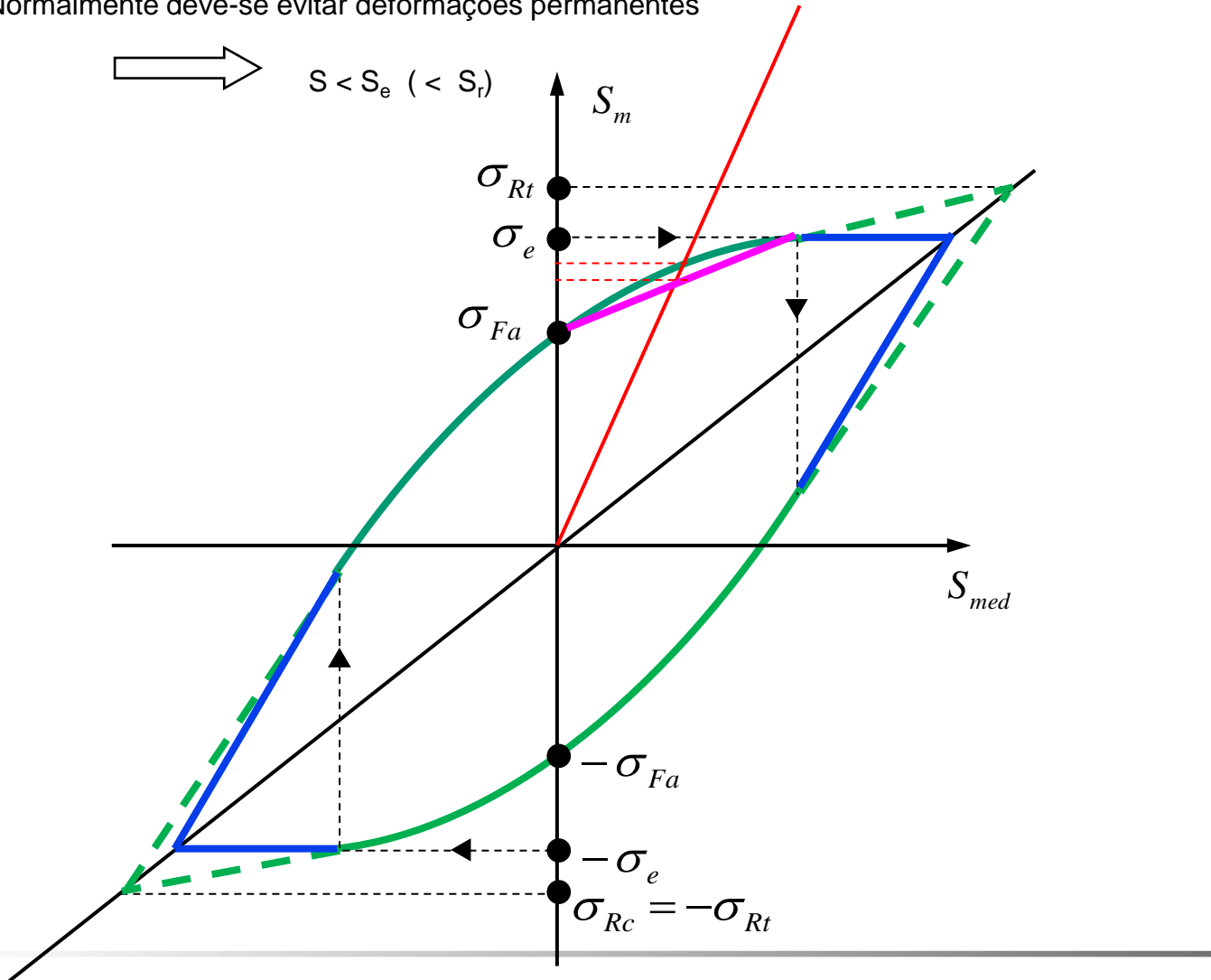
$$|P_1| > |P_2|$$

Limitação do Diagrama de Smith

- Normalmente deve-se evitar deformações permanentes

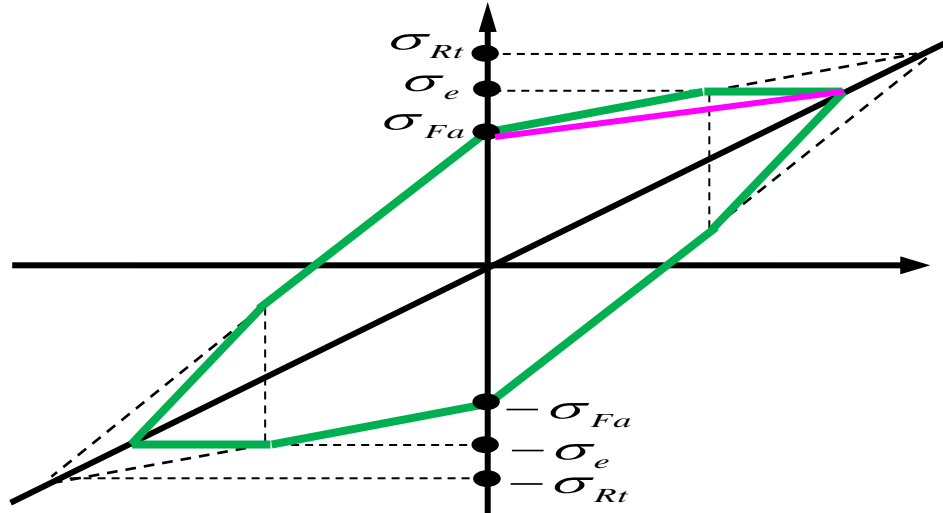


$$S < S_e (< S_r)$$



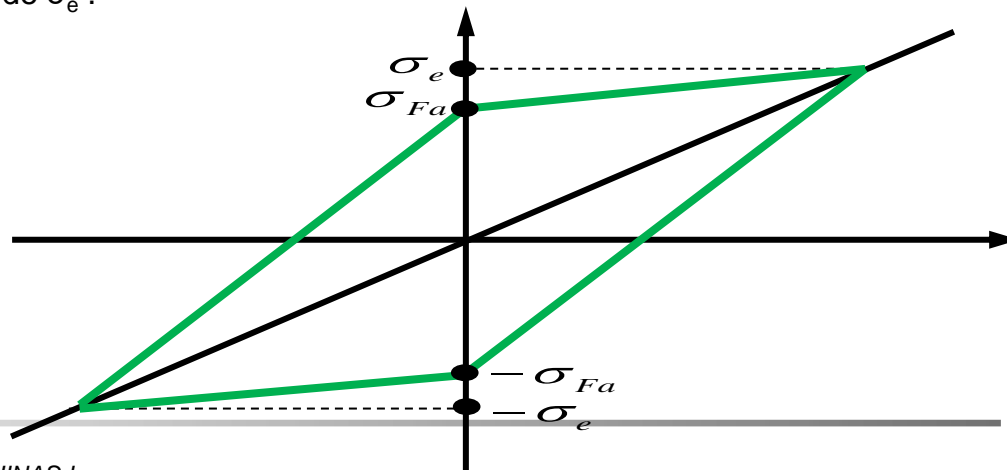
4.5- Diagrama de Smith Simplificado - Diagrama de Goodman

Quando se conhecem σ_{rt} , σ_e , σ_{Fa}



- Quando não se leva em conta σ_{rt} . Basta conhecer σ_e e σ_{Faf} (S_e e S_{Faf})
- Para solicitação uniaxial usar (S_e e S_{Faa}), para torção (S_e e S_{Fat}), etc.
- Para materiais frágeis usar σ_{rt} em vez de σ_e .

Quando não se conhece σ_{rt}



Resumindo:

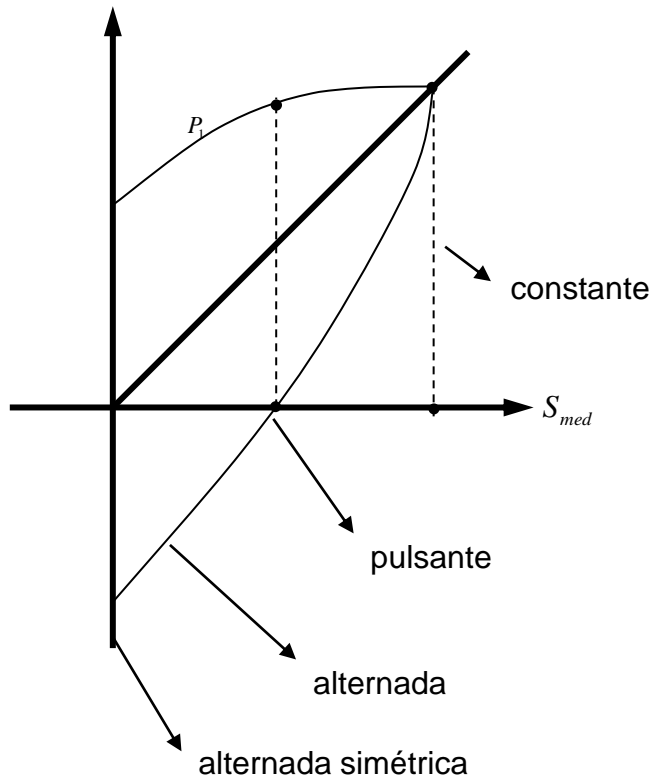


Diagrama de Smith

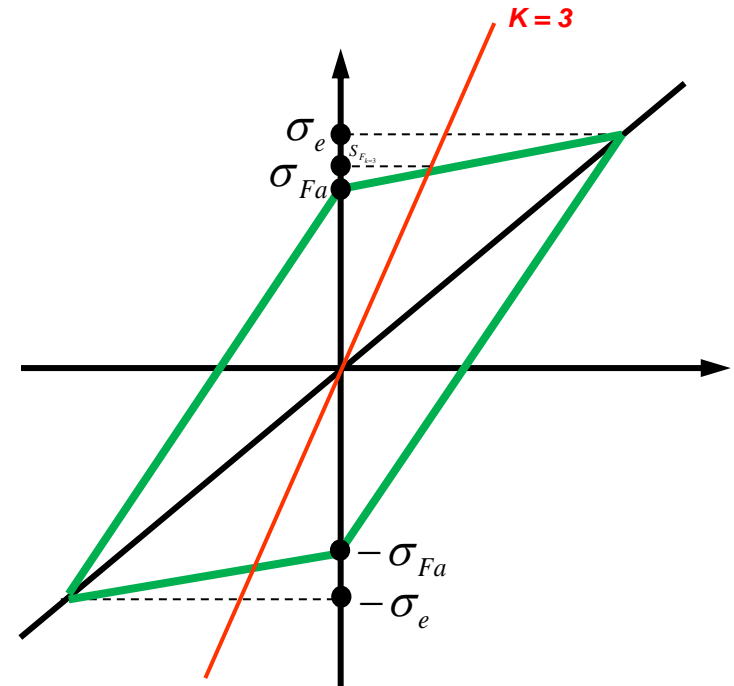
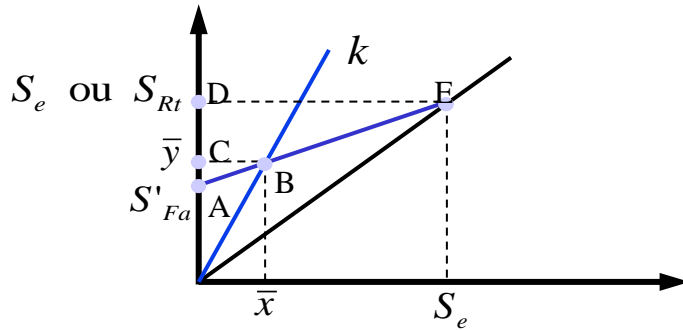


Diagrama de Goodman

Expressão Analítica de S_{Fk} $k \neq \infty$



$$S'_{Fa} = \left(\frac{S_{Fa}}{\beta_k} \right)_{k=\infty} \cdot b_1 \cdot b_2$$

Reta representativa de

$$k \neq \infty$$

$$\implies y = k \cdot x$$

Semelhança de triângulos:

$$\triangle ABC \sim \triangle AED$$

$$\implies \frac{\bar{y} - S'_{Fa}}{\bar{x}} = \frac{S_e - S'_{Fa}}{S_e}$$



$$\bar{y} = \left(1 - \frac{S'_{Fa}}{S_e} \right) \bar{x} + S'_{Fa}$$

mas,

$$\bar{x} = \frac{\bar{y}}{k}$$

$$\bar{y} = \left(1 - \frac{S'_{Fa}}{S_e} \right) \frac{\bar{y}}{k} + S'_{Fa}$$

$$\bar{y} = S_{F_{k \neq \infty}} = \frac{S'_{Fa}}{1 - \frac{1}{k} \left(1 - \frac{S'_{Fa}}{S_e} \right)}$$

ou

$$\bar{y} = S_{F_{k \neq \infty}} = \frac{S'_{Fa}}{1 - \frac{1}{k} \left(1 - \frac{S'_{Fa}}{S_{rt}} \right)}$$

Resumindo:

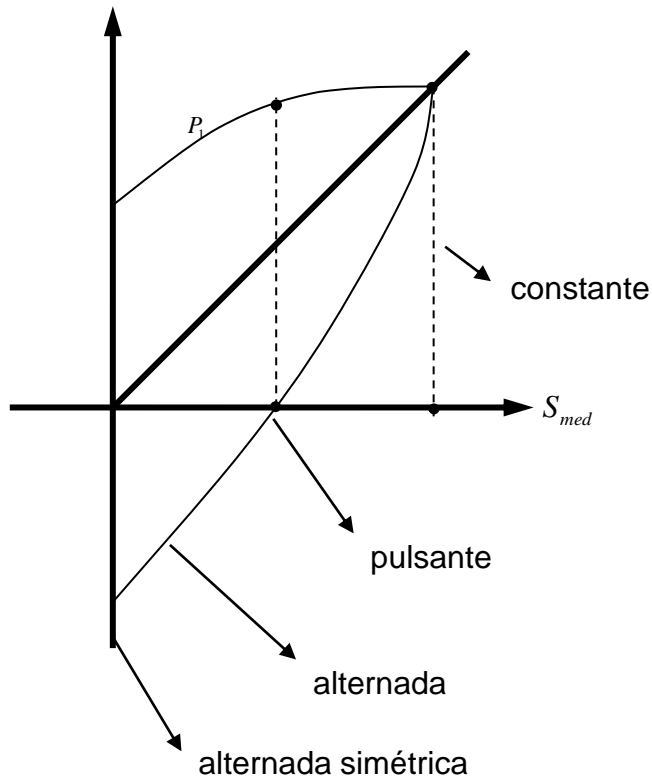


Diagrama de Smith

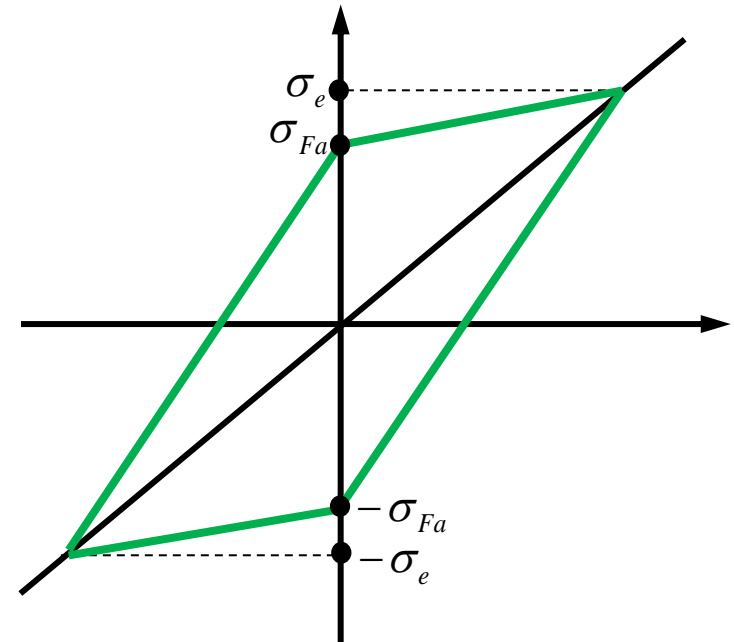


Diagrama de Goodman

Exemplo

Para um determinado material dúctil são conhecidos os valores de S_e e de S_{fa} ($S_{fa} = 0,4 S_e$) para carregamentos cíclicos à torção. Um corpo de prova deste material é submetido a uma torção variável com $S_{max} = 0,6 S_e$ e $S_{min} = -0,2 S_e$ (valor negativo) .

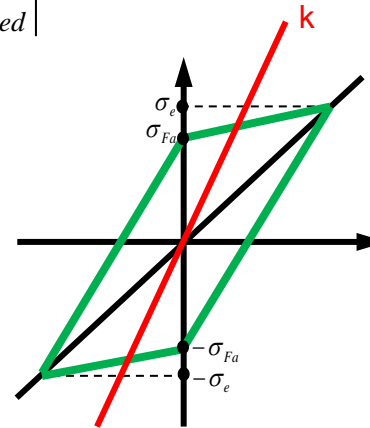
Usando um gráfico em escala (aproximada), responder:

- O corpo de prova romperá? Justificar graficamente.
- Mantendo-se o mesmo valor de k , mostrar graficamente quais devem ser os valores de S_{max} e S_{min} para que se trabalhe no limite de resistência à fadiga.
- Refazer o cálculo anterior analiticamente.

Resolução:

1. Calcular k (coeficiente) de solitação:
$$k = \frac{S_m}{|S_{med}|}$$

2. Fazer o Diagrama de Goodman em escala;



3. Representar k no gráfico e verificar se os valores máximos e mínimos aplicados excedem os limites;
4. Proceder ao cálculo analítico para validação.

Resolução:

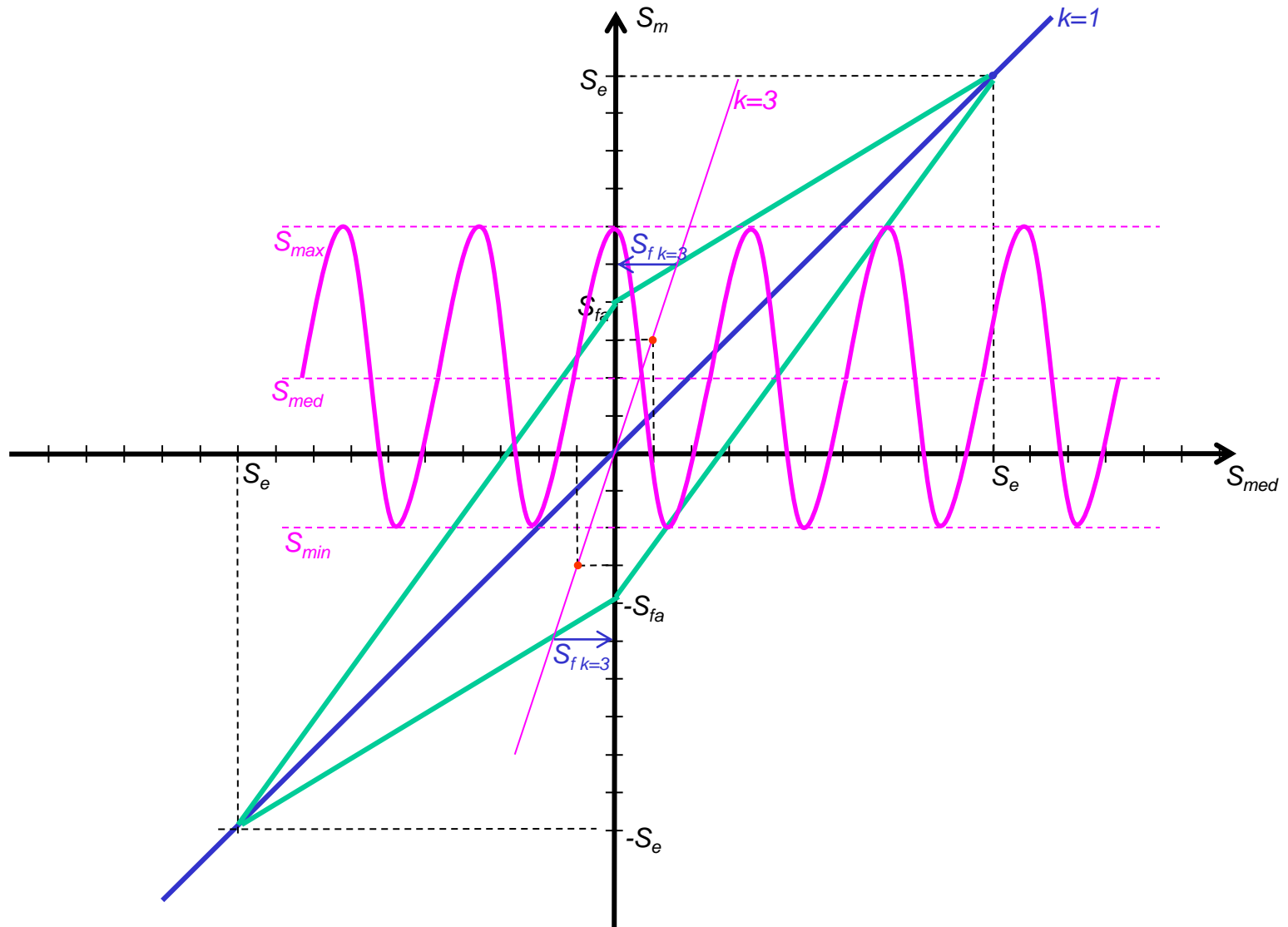
Calcular k (coeficiente) de solitação:

$$k = \frac{S_m}{|S_{med}|}$$

$$S_m = \max(|S_{max}|, |S_{min}|) = 0,6.S_e$$

$$S_{med} = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} = \frac{0,4.S_e}{2} = 0,2.S_e$$

$$k = \frac{0,6.S_e}{0,2.S_e} = \mathbf{3}$$



Respostas:

- a) Romperá, pois pelo gráfico, o valor S_{max} está acima do limite para $k=3$;
- b) Indicado no gráfico ($S_{f_{k=3}}$);
- c) Cálculo analítico:

$$\bar{y} = S_{F_{k \neq \infty}} = \frac{S'_{Fa}}{1 - \frac{1}{k} \left(1 - \frac{S'_{Fa}}{S_e} \right)} \quad \Rightarrow \quad S_{f_k} = \frac{S_{fa}}{1 - \frac{1}{k} \left(1 - \frac{S_{fa}}{S_e} \right)} = \frac{0,4 \cdot S_e}{1 - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{0,4 \cdot S_e}{S_e} \right)} = 0,5 \cdot S_e$$

Exercício 03

1. Traçar o diagrama de WÖHLER para um aço com tensão de ruptura à tração de 600 [MPa] e tensão limite de resistência à fadiga por flexão 250 [MPa], para $N = 10^7$ ciclos, sabendo que para 1000 ciclos o corpo de prova rompe a 450 [MPa].

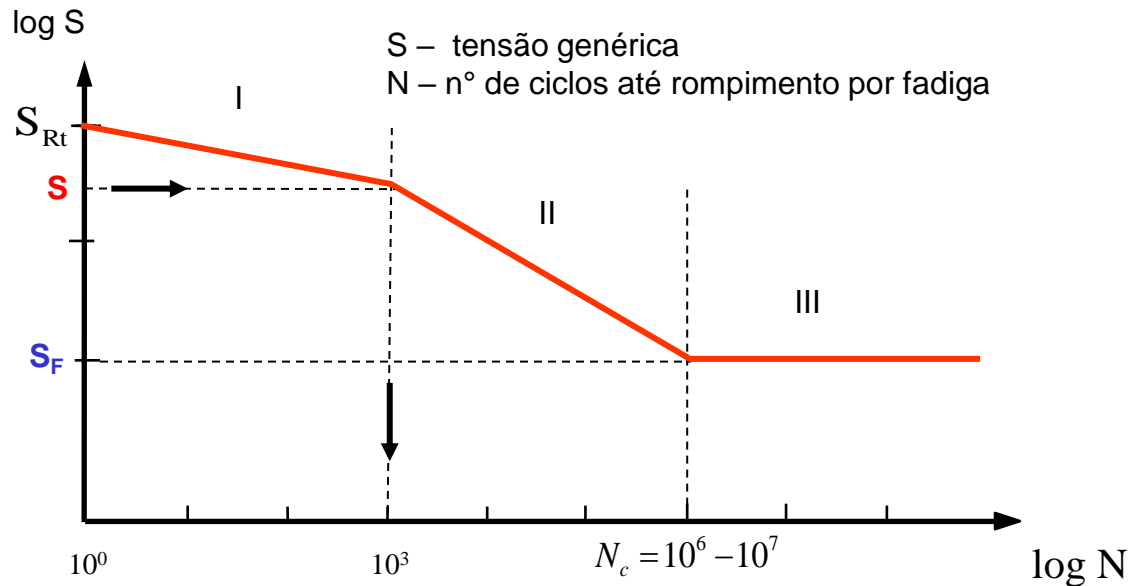
2. Um eixo liso, bi-apoiado nas extremidades, de comprimento 1600 mm e diâmetro 50 mm, girando a 120 rpm, recebe uma carga cortante no meio do vão no valor igual na 12000 N. Considerando que seja confeccionado no mesmo aço do exercício anterior, responda:

a) Qual a vida do eixo?

b) A carga fornecida garante vida infinita? Caso negativo, qual deveria ser o valor da carga para garanti-la?

Resolução (dicas)

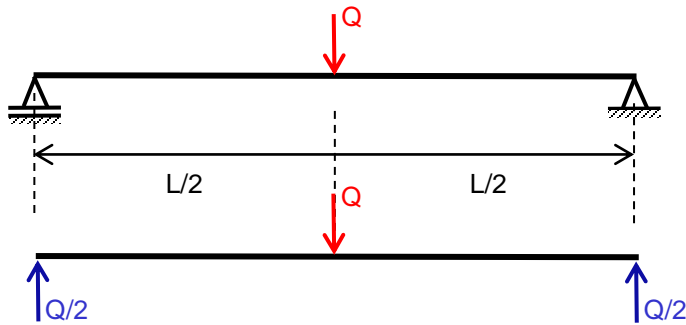
1. Traçar o diagrama de WÖHLER para um aço com tensão de ruptura à tração de 600 [MPa] e tensão limite de resistência à fadiga por flexão 250 [MPa], para $N = 10^7$ ciclos, sabendo que para 1000 ciclos o corpo de prova rompe a 450 [MPa].



2. Um eixo liso, bi-apoiado nas extremidades, de comprimento 1600 mm e diâmetro 50 mm, girando a 120 rpm, recebe uma carga cortante no meio do vão no valor igual na 12000 N. Considerando que seja confeccionado no mesmo aço do exercício anterior, responda:

a) Qual a vida do eixo?

b) A carga fornecida garante vida infinita? Caso negativo, qual deveria ser o valor da carga para garanti-la?



$$W_f = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

$$M_{f \max} = \frac{Q \cdot L}{4}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{f \max}}{W_f}$$