

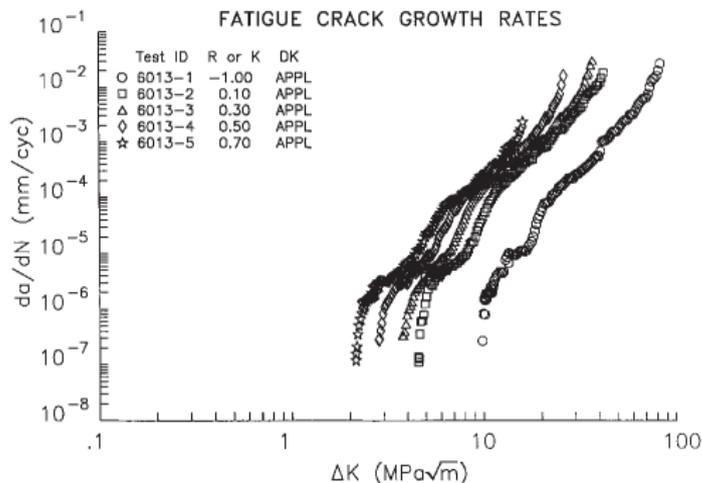
PMT3306 - Módulo “Fadiga operacional” - Material de apoio

Cláudio Geraldo Schön

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

23 de novembro de 2020

Curvas de Paris



$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

P. C. Paris, H. Tada, J. K. Donald "Service load fatigue – a historical perspective" *Int. J. Fatigue* **21** (1999) S35 – A46.

Princípio da similaridade

“Situações similares, aplicados a sistemas similares, devem resultar nas mesmas consequências.”

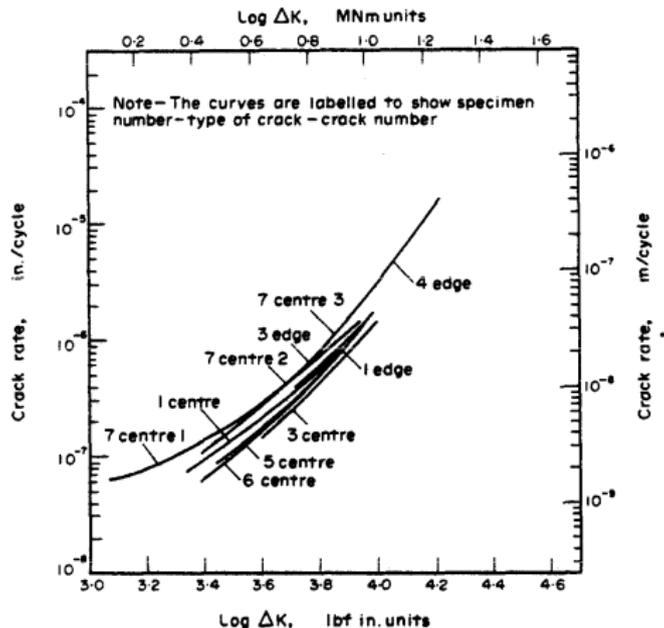
Princípio da similaridade

“O mesmo valor ΔK aplicado a diferentes trincas deve resultar na mesma taxa de propagação.”

Desvios do princípio da similaridade

- Propagação de trincas curtas
- Efeitos de sobrecarga e subcarga

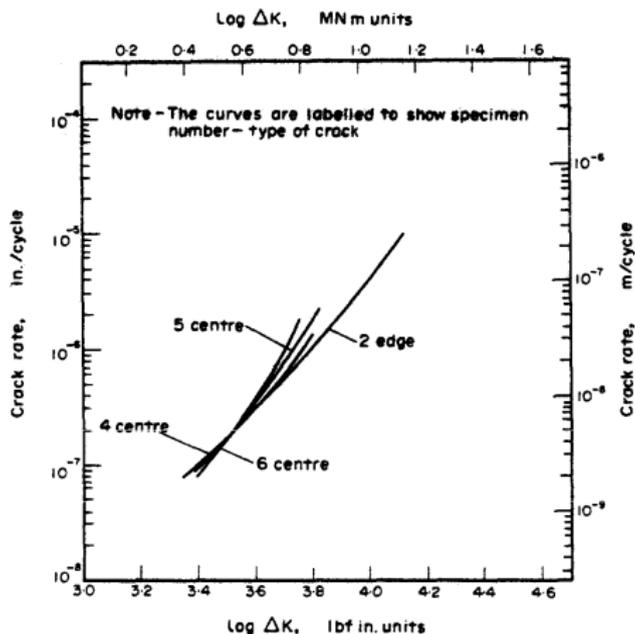
Resultados de Pearson (1975)



S. Pearson "Initiation of fatigue cracks in commercial alloys and the subsequent propagation of very short cracks" *Eng. Frac.*

Mech. 7 (1975) 235 – 247.

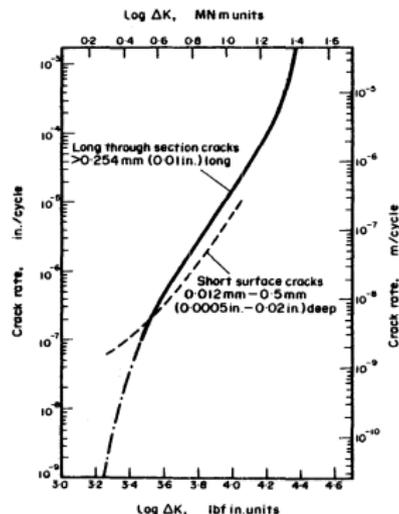
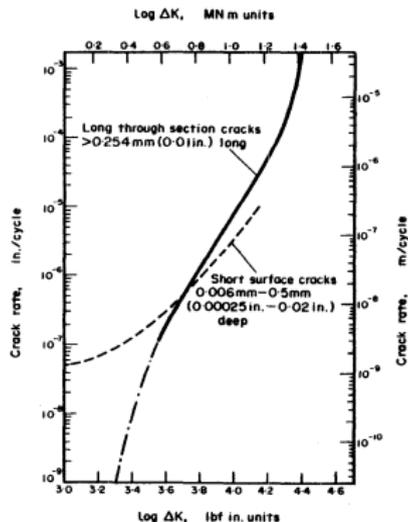
Resultados de Pearson (1975)



S. Pearson "Initiation of fatigue cracks in commercial alloys and the subsequent propagation of very short cracks" *Eng. Frac.*

Mech. 7 (1975) 235 – 247.

Resultados de Pearson (1975)

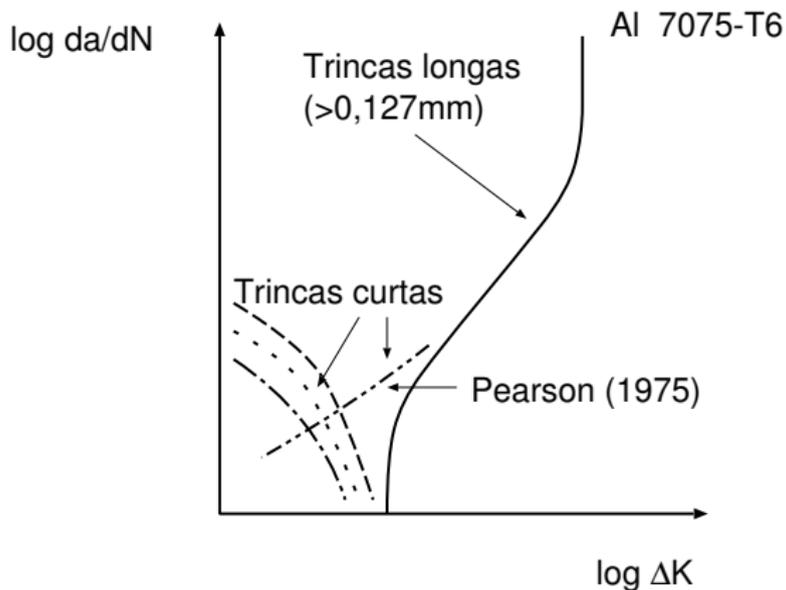


S. Pearson "Initiation of fatigue cracks in commercial alloys and the subsequent propagation of very short cracks" *Eng. Frac.*

Mech. 7 (1975) 235 - 247.

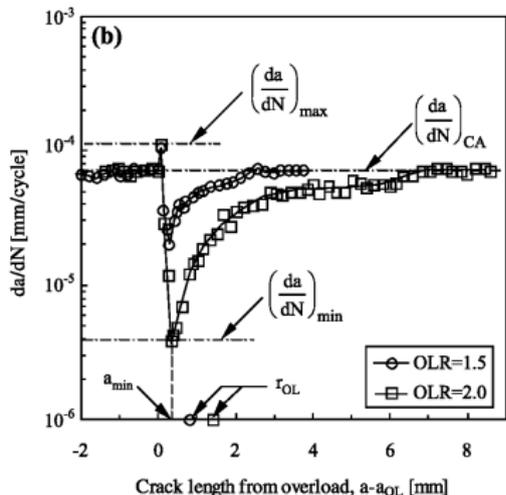
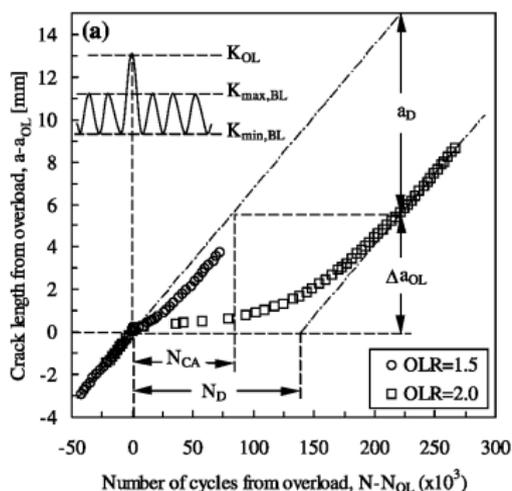
O “problema” da trinca curta

“Short-crack problem”



Efeito de sobrecarga

Al 6082 - T6



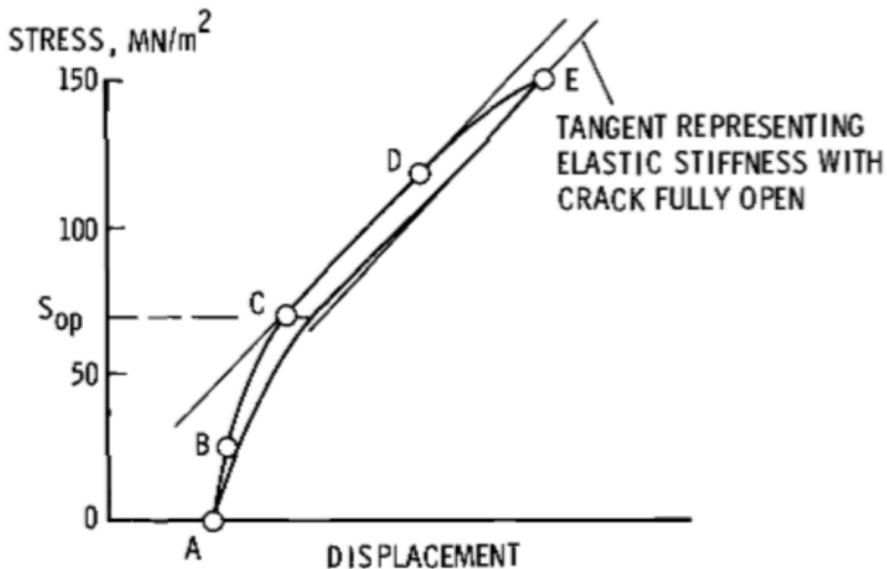
L. Borrego, J. M. Ferreira, J. M. Pinho da Cruz, J. M. Costa "Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure"

Eng. Frac. Mech. **70** (2003) 1379 – 1397.

Wolf Elber (1941 - 2019)

- Fez seu doutorado na Universidade da Nova Gales do Sul, defendido em 1968 (!!!!)
- Fez sua descoberta quando cortou o ligamento de um corpo de prova, o artigo só foi publicado em 1970
- Voltou para a Alemanha
- Encontrou P. C. Paris em 1968, explicou seu método em um jantar
- Foi contratado para trabalhar na NASA em 1972
- Pesquisador mais influente da história da fadiga na segunda metade do século XX

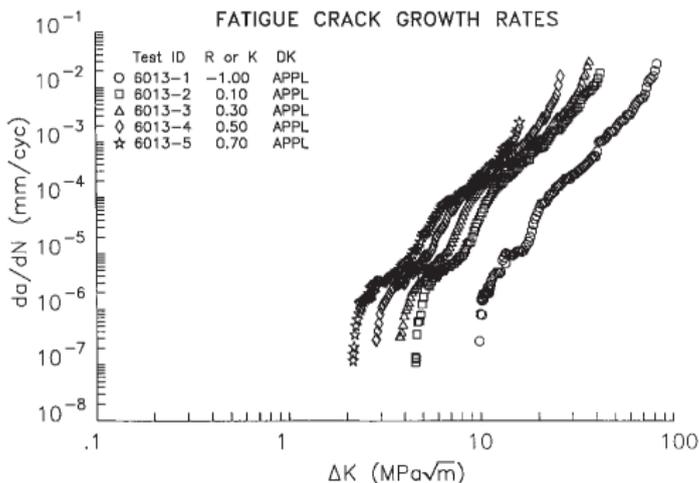
Carga de abertura



$$K_{ef} = Y(\sigma_{max} - \sigma_{OP})\sqrt{\pi a}$$

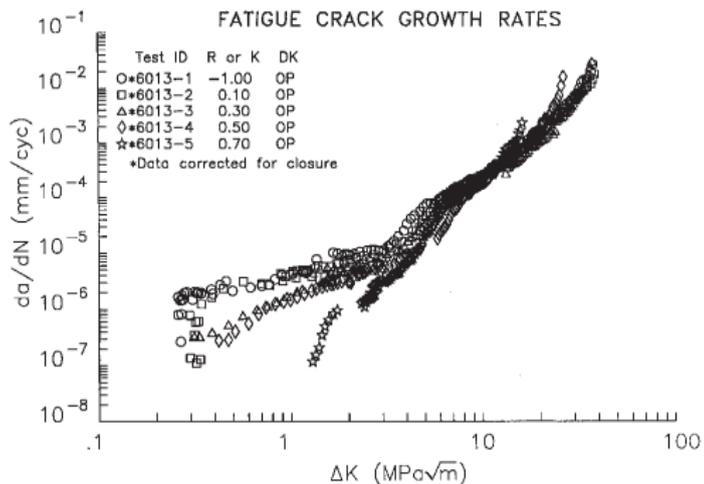
W. Elber "The significance of fatigue crack closure" in: ASTM STP 486 "Damage tolerance in aircraft structures" ASTM:Toronto, 1970, pp.

Efeito do fechamento prematuro de trinça



$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

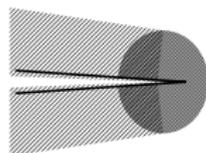
Efeito do fechamento prematuro de trinça



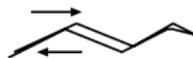
$$K_{ef} = Y(\sigma_{max} - \sigma_{OP})\sqrt{\pi a}$$

P. C. Paris, H. Tada, J. K. Donald "Service load fatigue – a historical perspective" *Int. J. Fatigue* **21** (1999) S35 – A46.

Mecanismos de fechamento prematuro de trinça



Plasticidade



Rugosidade



Detritos

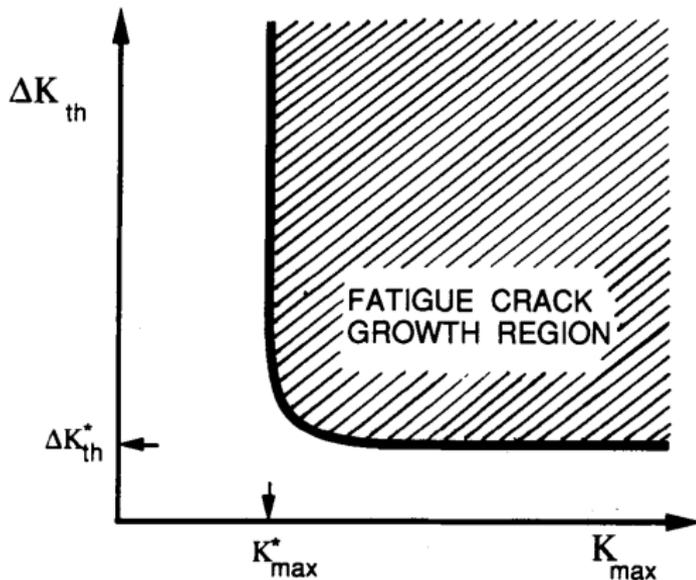
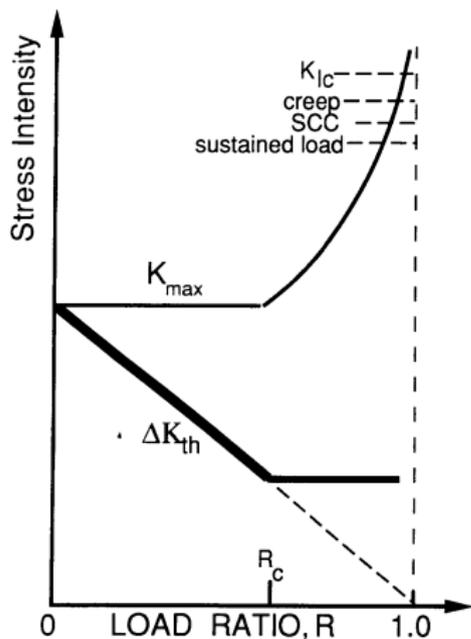
Teoria dos dois parâmetros

Vasudévan e Sadananda:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, K_{max})$$

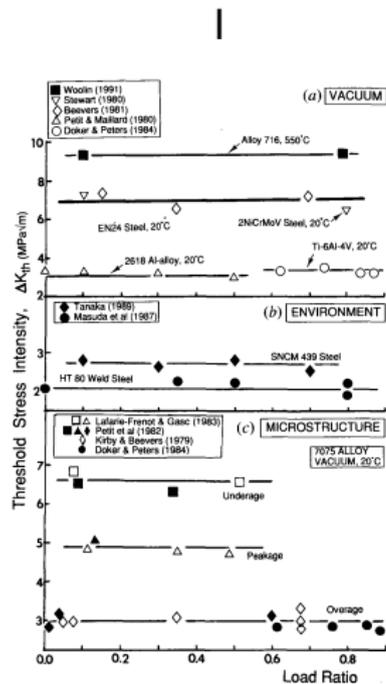
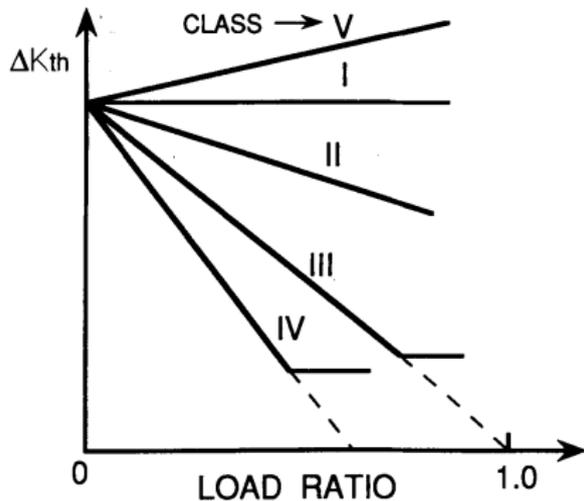
1. Fadiga depende fundamentalmente de dois parâmetros, ΔK e K_{max} , que são as forças motrizes macroscópicas para a propagação da trinca.
2. Existem dois limiares de propagação, ΔK_{th} e K_{max}^* .
3. A existência dos dois limiares torna trivial a dependência de ΔK_{th} com R , portanto é desnecessário postular a ação de fechamento de trinca para justificar o fenômeno.
4. Caso o fechamento de trinca seja importante no processo, ele será caracterizado por um terceiro parâmetro.
5. A força motriz microscópica para o crescimento da trinca é o estado de tensão na ponta da trinca, ou seja, a superposição das tensões geradas pela tensão remota e das tensões residuais de compressão existentes na ponta da trinca.
6. A zona plástica à frente da trinca é uma das principais fontes de tensões residuais de compressão.
7. O efeito básico das tensões residuais é deslocar o valor de σ_m , portanto a dependência em K_{max} é mais sensível a este parâmetro.
8. Efeitos ambientais (ex. corrosão-fadiga) se manifestam fundamentalmente na dependência em K_{max} .

Dependência do limiar de fadiga em R



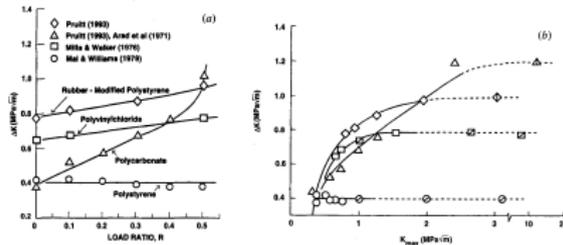
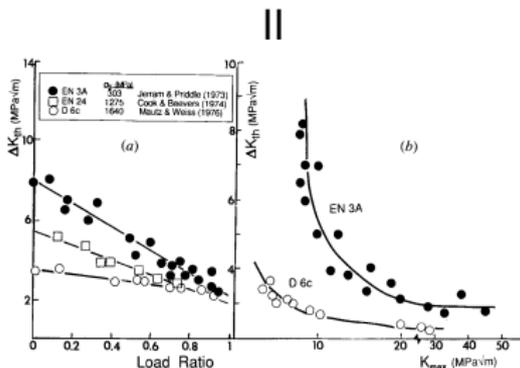
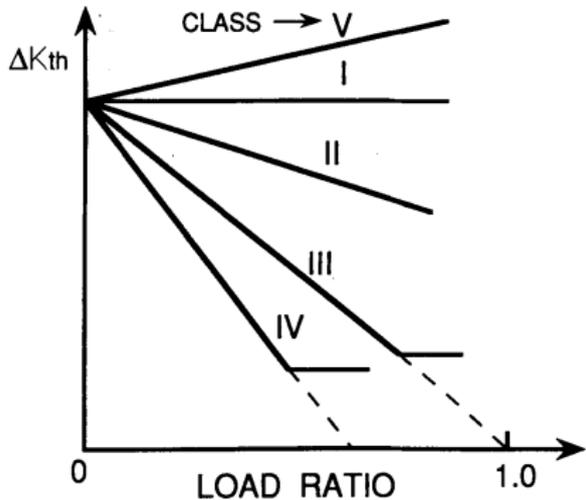
A. K. Vasudévan, K. Sadananda "Classification of fatigue crack growth behavior" *Metall. Mater. Trans. A* **26** (1995) 1221 – 1234.

Classificação dos comportamentos em fadiga



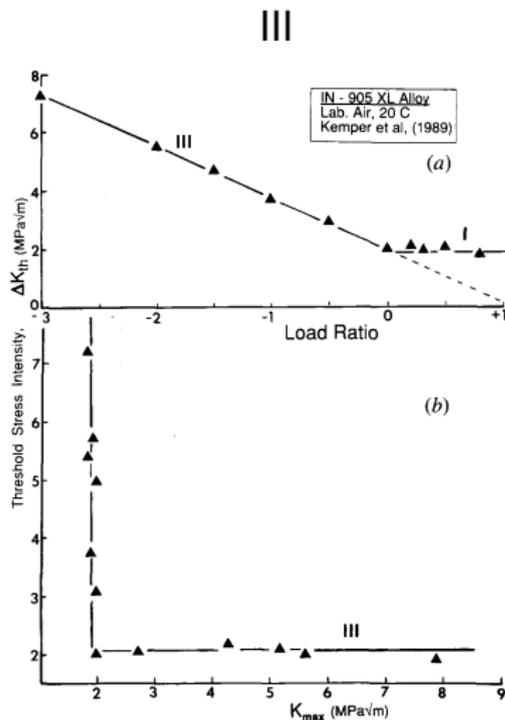
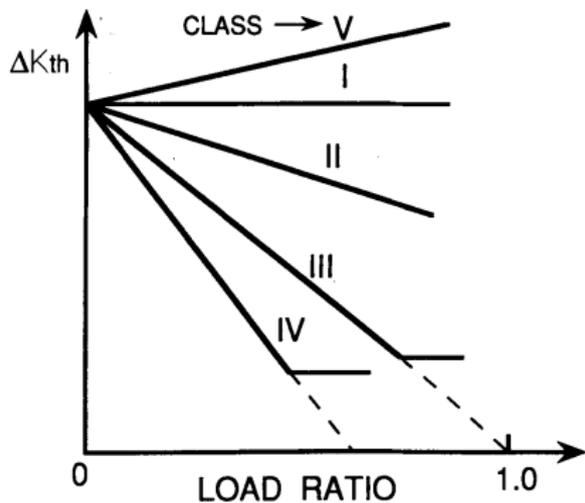
A. K. Vasudévan, K. Sadananda "Classification of fatigue crack growth behavior" *Metall. Mater. Trans. A* **26** (1995) 1221 – 1234.

Classificação dos comportamentos em fadiga



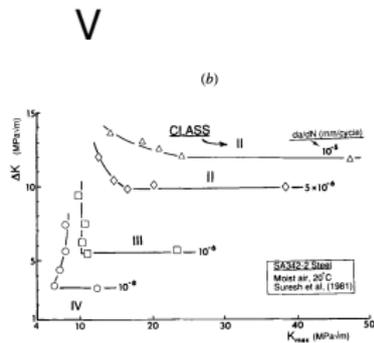
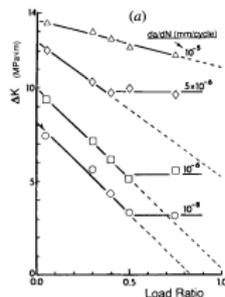
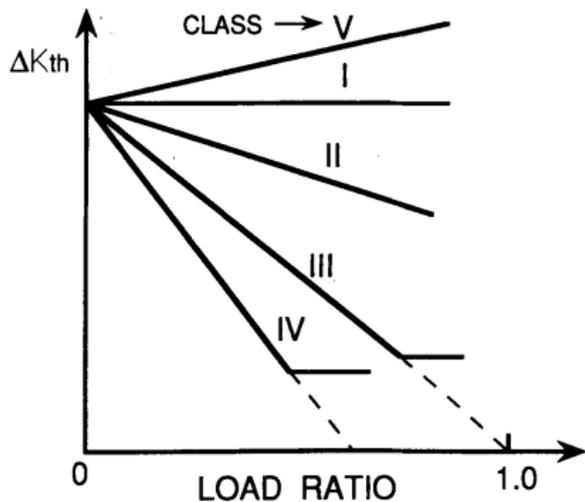
A. K. Vasudévan, K. Sadananda "Classification of fatigue crack growth behavior" *Metall. Mater. Trans. A* **26** (1995) 1221 – 1234.

Classificação dos comportamentos em fadiga



A. K. Vasudévan, K. Sadananda "Classification of fatigue crack growth behavior" *Metall. Mater. Trans. A* 26 (1995) 1221 - 1234.

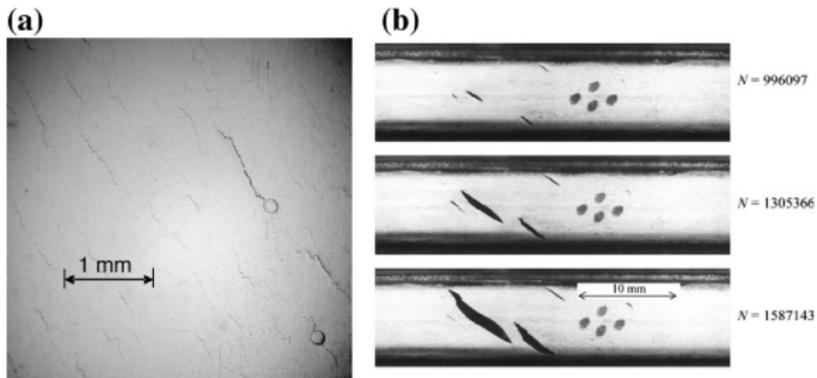
Classificação dos comportamentos em fadiga



A. K. Vasudévan, K. Sadananda "Classification of fatigue crack growth behavior" *Metall. Mater. Trans. A* **26** (1995) 1221 – 1234.

Plano crítico

Torção - tração:

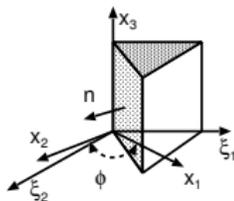
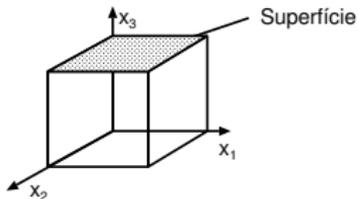


- (a) Aço 1050 cementado, carregamento em fase
- (b) Borracha, carregamento 90° fora de fase

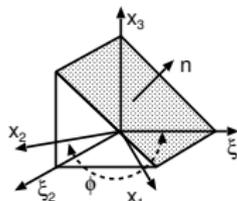
A. Fatemi, N. Shamsaei "Multiaxial fatigue: an overview and some approximation models for life prediction" *Int. J. Fatigue* **33** (2011) 948 – 958.

Plano crítico

Tratamento de Bannantine e Socie



Caso A



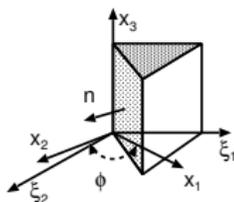
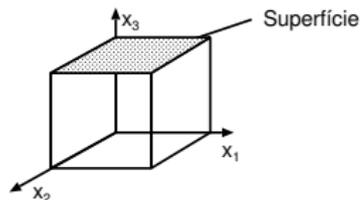
Caso B

Caso A:

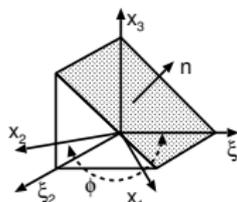
$$D_{BS} = \frac{\Delta \varepsilon}{2} \sigma_{max} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{b+c}$$

Plano crítico

Tratamento de Bannantine e Socie



Caso A



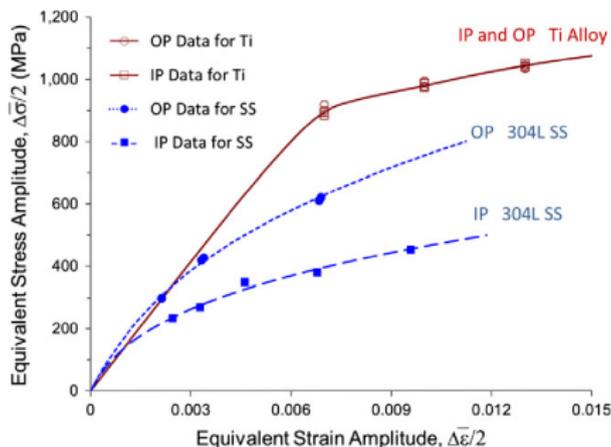
Caso B

Caso B:

$$D_{FS} = \frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^b + \gamma_f' (2N_f)^c$$

Carregamentos em fase e fora de fase

Endurecimento

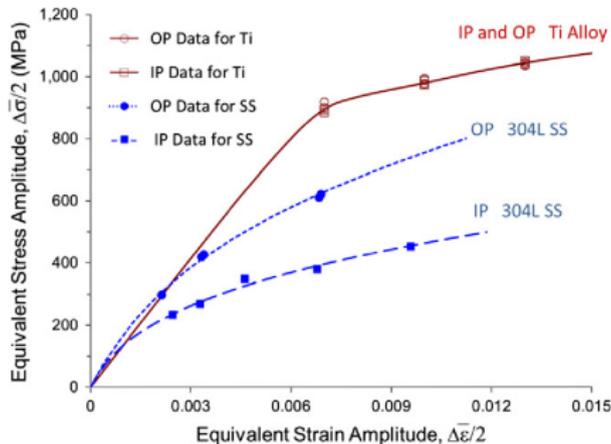


$$\alpha = \frac{\Delta\bar{\sigma}_{0^\circ}}{\Delta\bar{\sigma}_{90^\circ}} - 1$$

A. Fatemi, N. Shamsaei "Multiaxial fatigue: an overview and some approximation models for life prediction" *Int. J. Fatigue* **33** (2011) 948 – 958.

Carregamentos em fase e fora de fase

Endurecimento



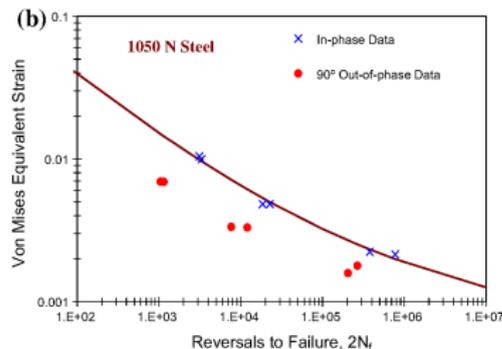
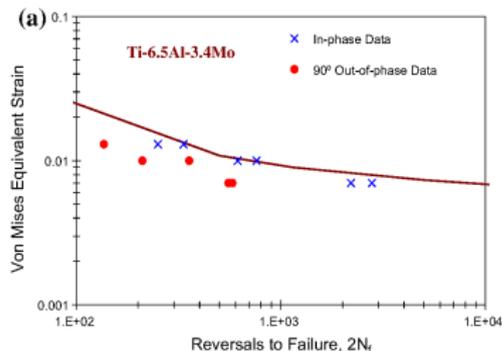
$$\alpha = 1,6 \frac{K}{K'} \left(\frac{\Delta\bar{\epsilon}}{2} \right)^{2(n-n')} - 3,8 \frac{K}{K'} \left(\frac{\Delta\bar{\epsilon}}{2} \right)^{(n-n')} + 2,2$$

A. Fatemi, N. Shamsaei "Multiaxial fatigue: an overview and some approximation models for life prediction" *Int. J. Fatigue* **33**

(2011) 948 – 958.

Carregamentos em fase e fora de fase

Resistência à fadiga



(a) Liga de titânio

(b) Aço 1050 normalizado

Parâmetro de Fatemi - Socie:

$$D_{FS} = \frac{\Delta\gamma_{max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_{n,max}}{\sigma_e} \right)$$

A. Fatemi, N. Shamsaei "Multiaxial fatigue: an overview and some approximation models for life prediction" *Int. J. Fatigue* **33** (2011) 948 – 958.

Critério MTS

Maximum Tensile Stress

A trinca cresce no plano de máxima tensão normal de tração, quando o dano atinge o valor do limite de fadiga uniaxial

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2 \sigma_{\theta}}{\partial \theta^2} < 0$$

Ou ainda:

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0$$

Critério S

A trinca irá crescer ao longo da direção que apresentar a mínima densidade de energia de deformação, S , e inicia quando esta atinge um valor crítico, S_c . S é definida como:

$$S = a_{11}k_1^2 + 2a_{12}k_1k_2 + a_{22}k_2^2 + a_{33}k_3^2$$

onde os a_{ij} são coeficientes relacionados ao ângulo polar, ao módulo de rigidez e ao coeficiente de Poisson, os k são definidos como:

$$k_i = \frac{K_i}{\pi} \quad (i = \text{I, II, III})$$

Critério J

A trinca cresce orientada de acordo com o vetor:

$$\vec{J} = J_I \vec{i} + J_{II} \vec{j}$$

Onde J_I e J_{II} são as integrais J em modo I e II respectivamente.

Taxa de crescimento de trinca

Segundo Tanaka:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_{mix})^m$$

onde:

$$\Delta K_{mix} = \left[\Delta K_I^4 + 8\Delta K_{II}^4 \right]^{0,25}$$

Gestaltfestigkeit e Betriebfestigkeit

Gestaltfestigkeit (Thum e Bautz, 1935):

“for a high fatigue strength, the shape of the components, as developed by the designer, is much more important than the material itself.”

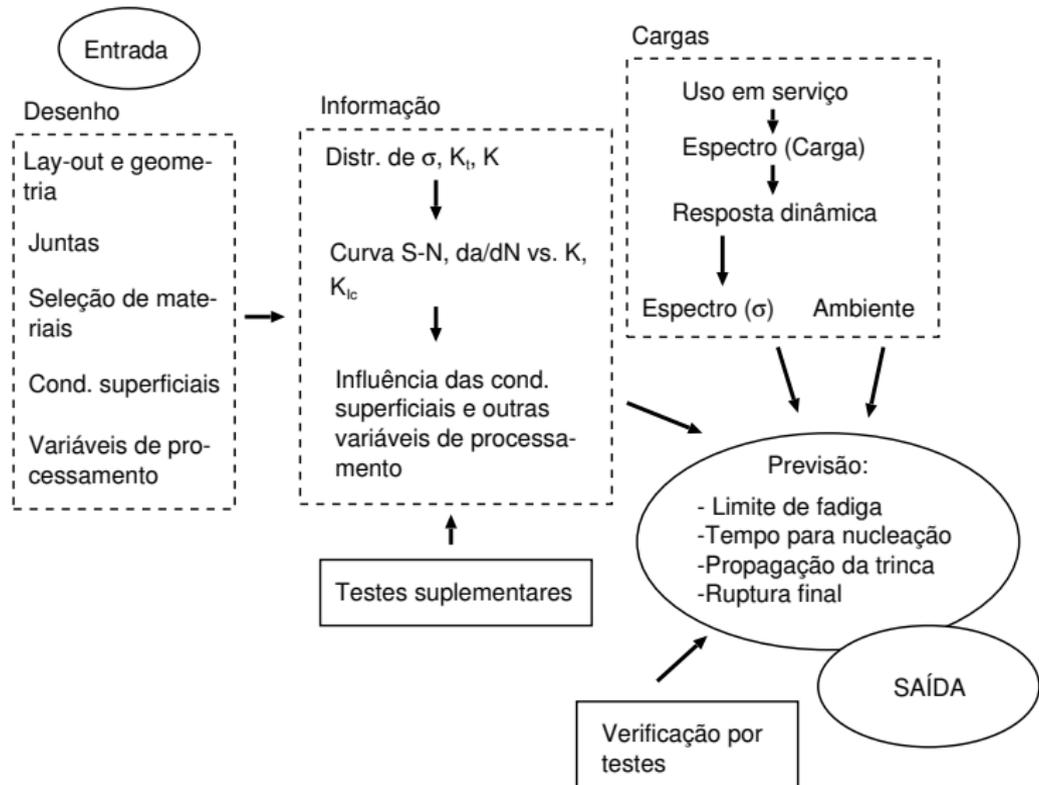
Gestaltfestigkeit e Betriebfestigkeit

Gestaltfestigkeit (Thum e Bautz, 1935):

“for a high fatigue strength, the shape of the components, as developed by the designer, is much more important than the material itself.”

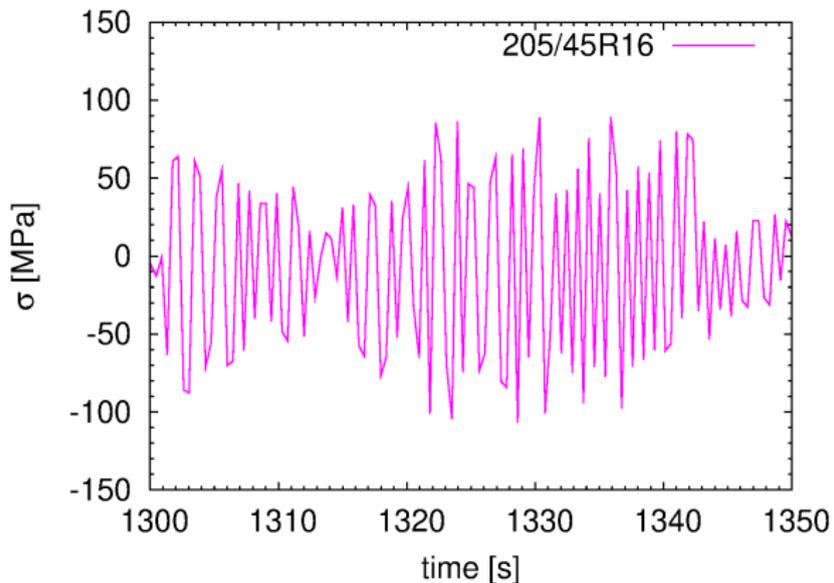
Betriebfestigkeit (Gaßner, 1939): Extensão da *Gestaltfestigkeit* na qual não apenas o componente é ensaiado, mas também é usado o espectro medido em serviço.

Complexidade da fadiga



Espectros

Trecho de um espectro veicular:

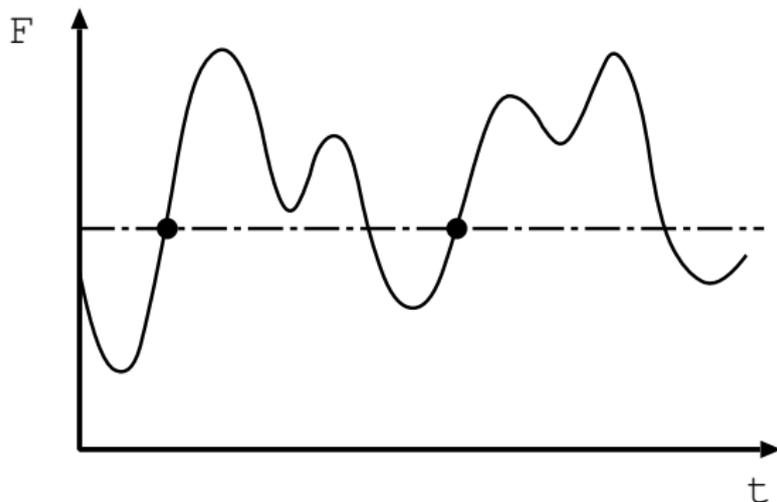


Contagem de ciclos

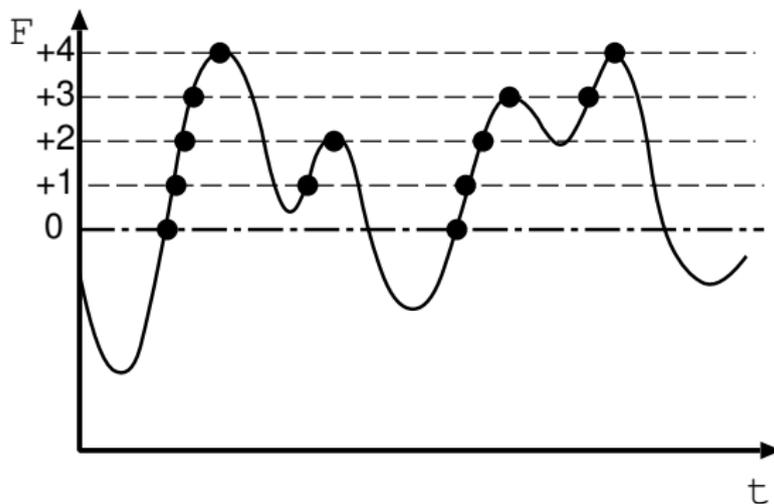
ASTM 1049-85 (reaprovada em 1997):

1. Contagem por cruzamento de nível (*level crossing counting*).
2. Contagem de picos (*peak counting*).
3. Contagem de faixas (*simple-range counting*).
4. *Rainflow* e métodos associados.

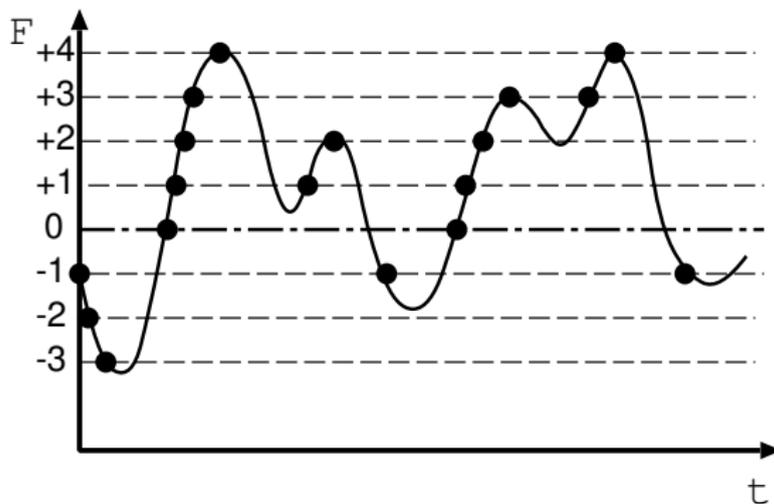
Contagem de níveis



Contagem de níveis



Contagem de níveis



Contagem de níveis

Montamos a tabela de cruzamentos:

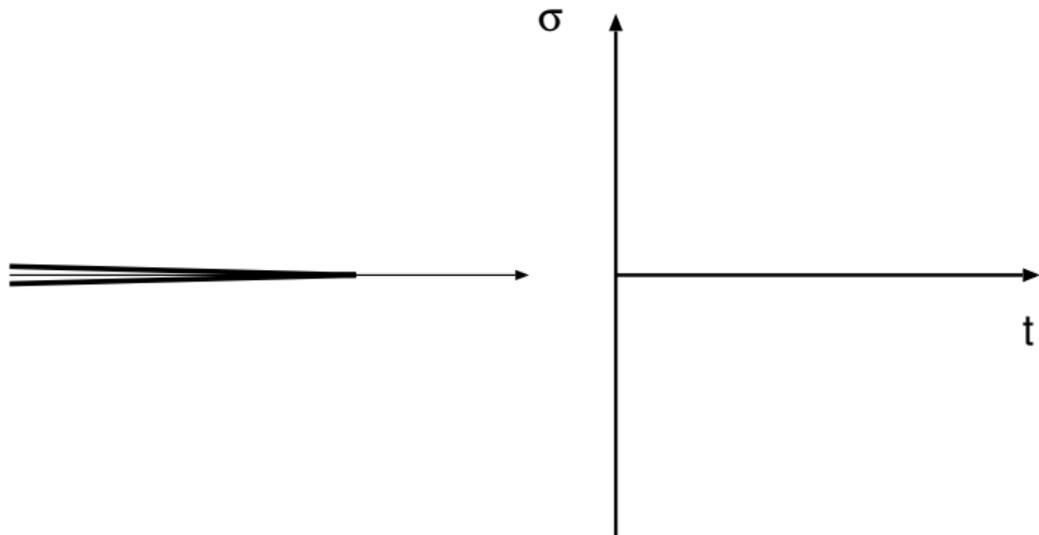
Nível	Cruzamentos
+4	2
+3	3
+2	3
+1	3
0	2
-1	3
-2	1
-3	1

Contagem de níveis

Faixa	Frequência
+7	1
+6	1
+5	0
+4	3
+3	0
+2	2
+1	4

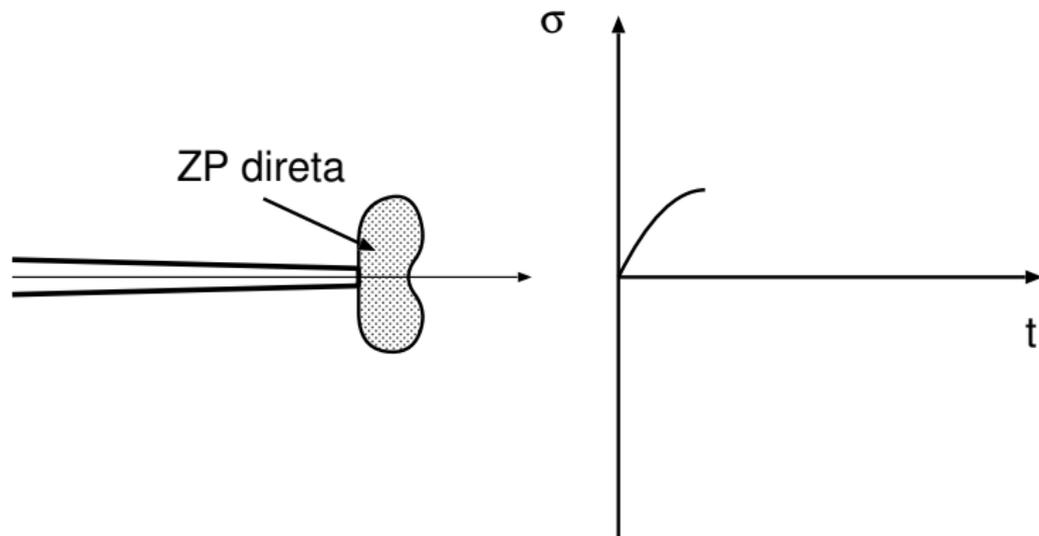
Método *Rainflow*

Plasticidade cíclica



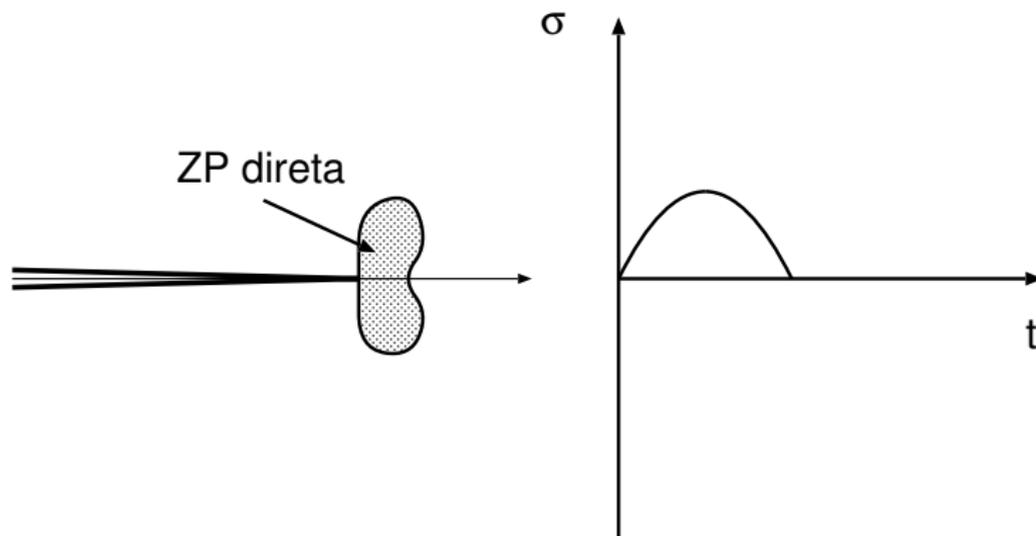
Método *Rainflow*

Plasticidade cíclica



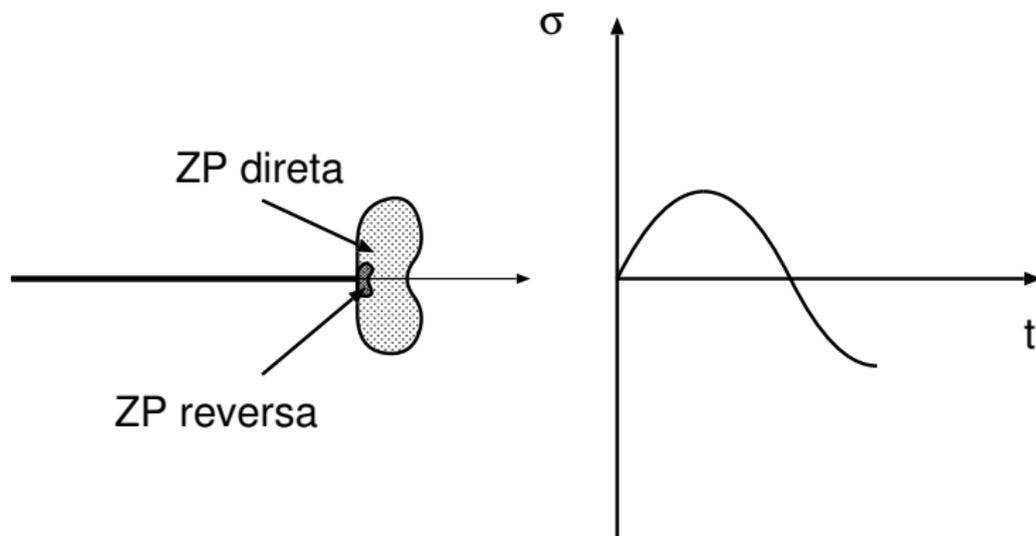
Método *Rainflow*

Plasticidade cíclica



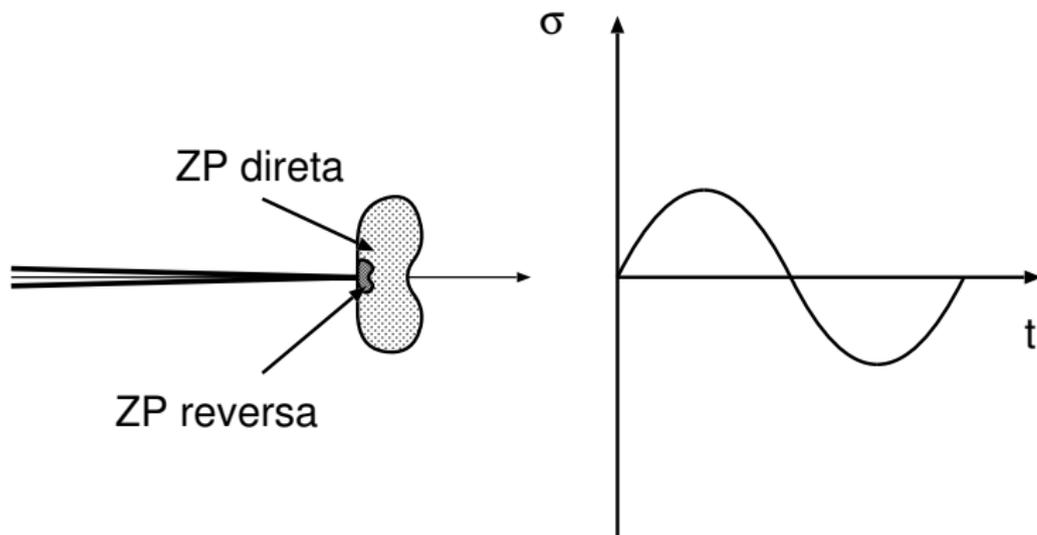
Método *Rainflow*

Plasticidade cíclica



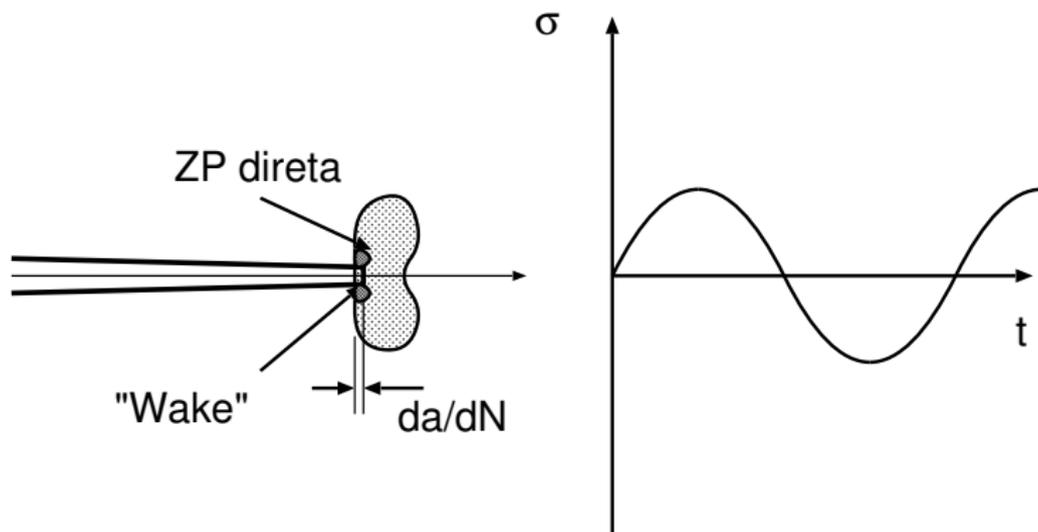
Método *Rainflow*

Plasticidade cíclica



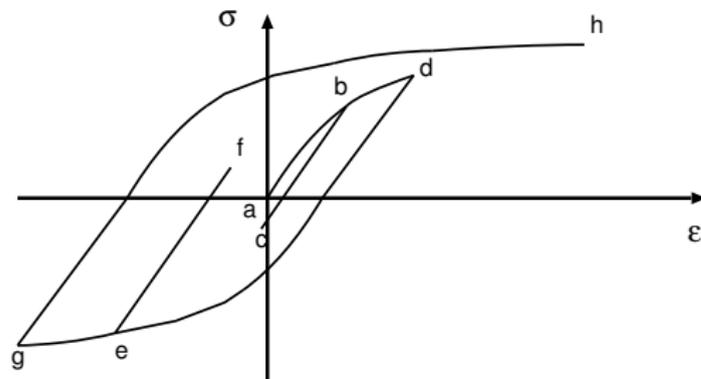
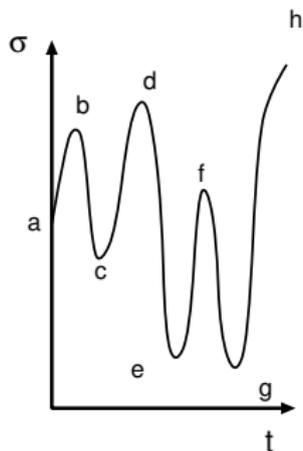
Método *Rainflow*

Plasticidade cíclica



Método *Rainflow*

Plasticidade cíclica



Filosofias de projeto

- *Fail safe* → curva S-N, vida limitada por durabilidade prevista
- *Damage tolerance* → curva da Paris, inspeção
- *Durability design* → interpretação probabilística da fadiga
- *Small crack theory* → considera a microestrutura (e um modelo para trincas curtas)

Schütz → ensaios em protótipos.