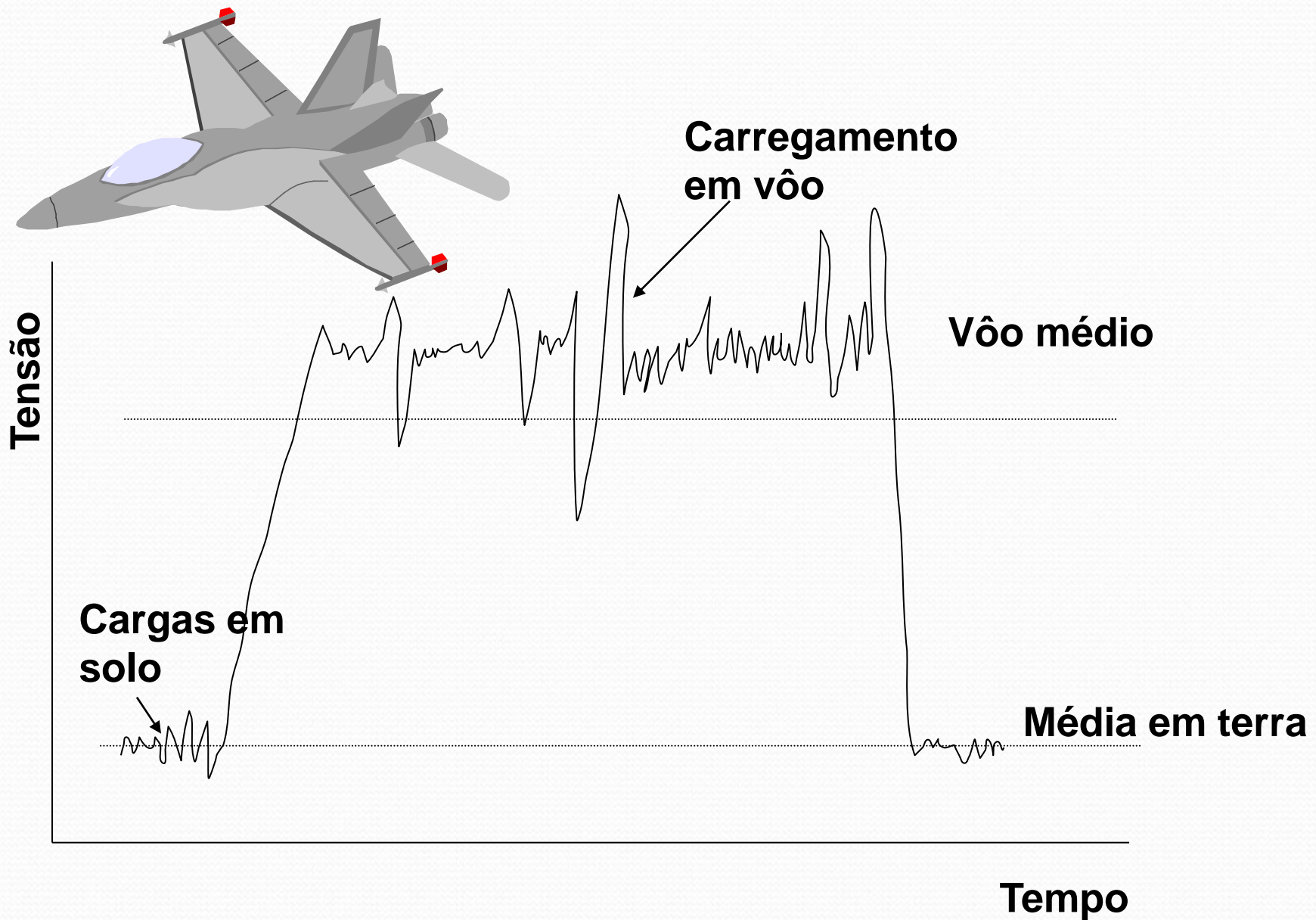




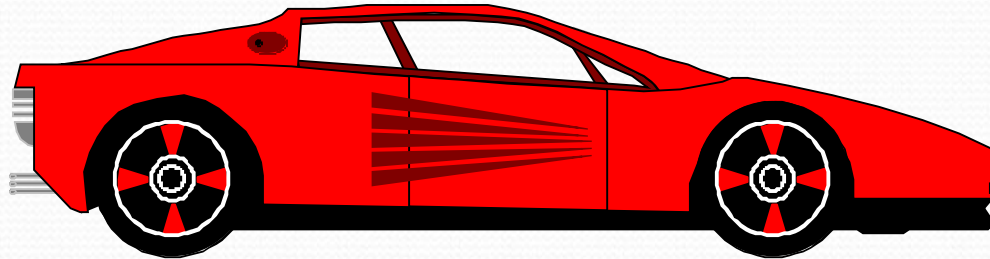
# **FADIGA S-N**

**Prof. Dr. José Benedito Marcomini**

# VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA



# VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA



**Carga**

**Típica história de tempo x carga para o eixo da roda**

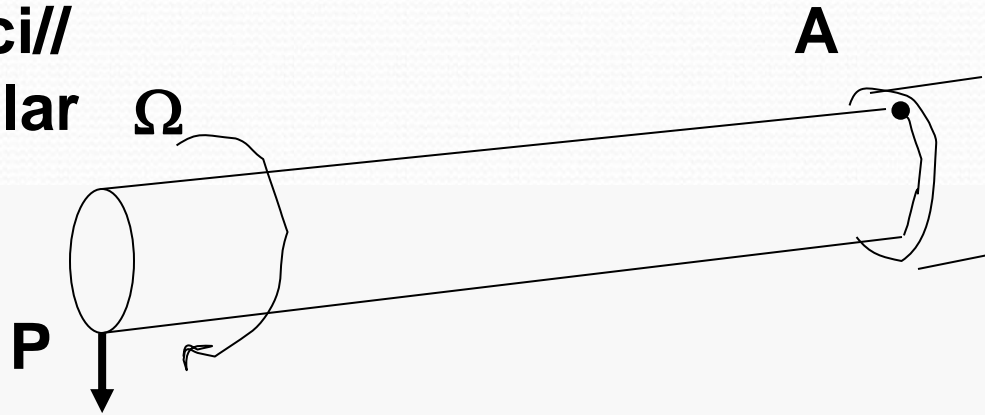


**Tempo**

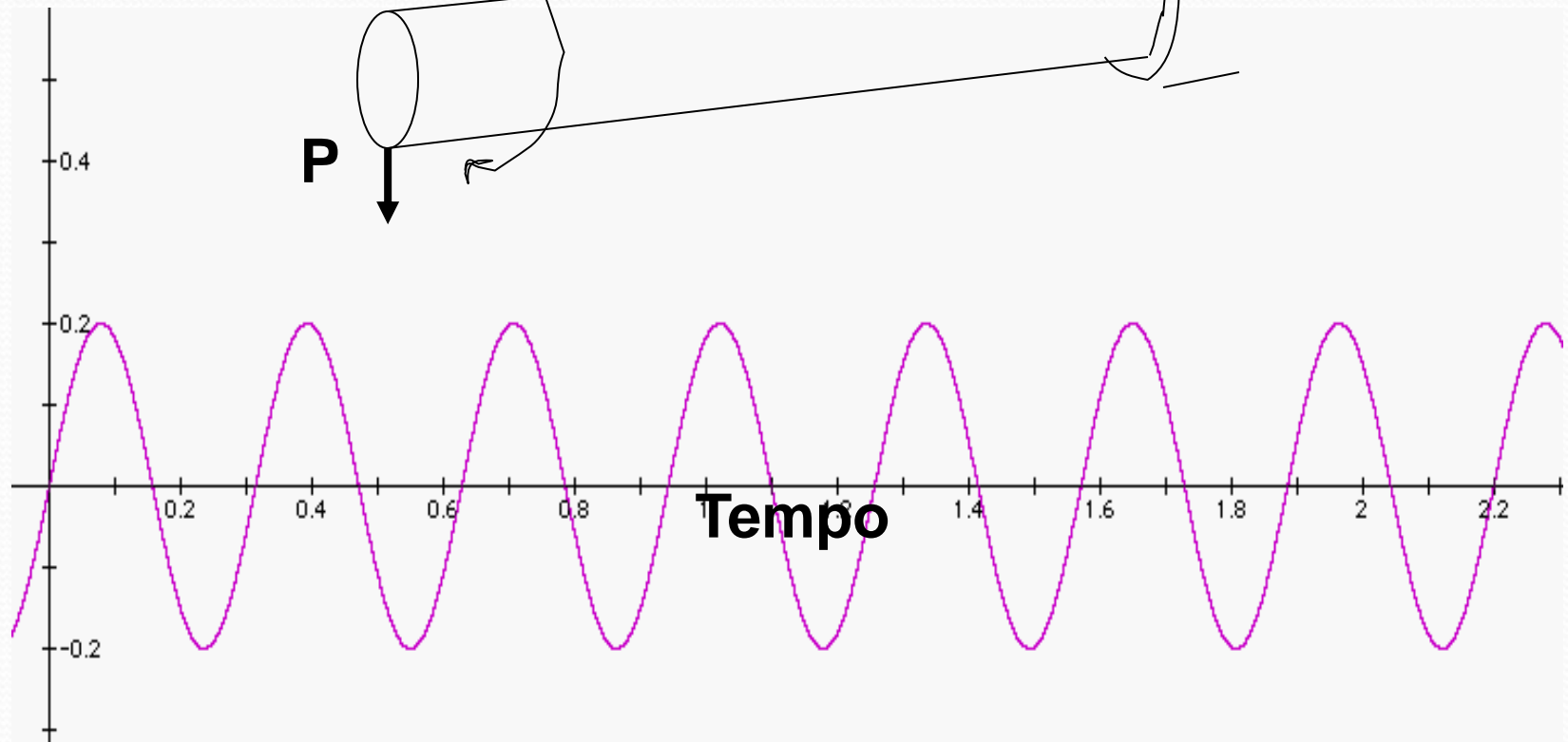


# VARIAÇÃO CÍCLICA DE CARGA

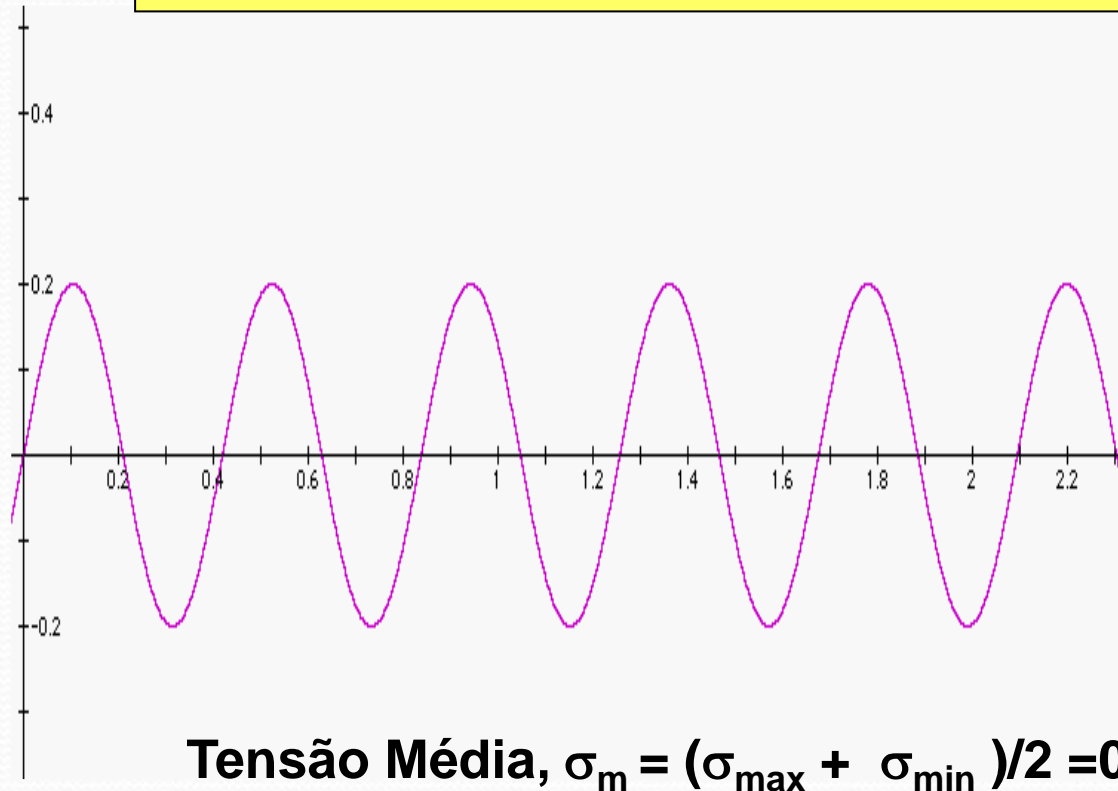
Velocidade angular  $\Omega$



Tensão em A



# Carregamentos completamente reversos

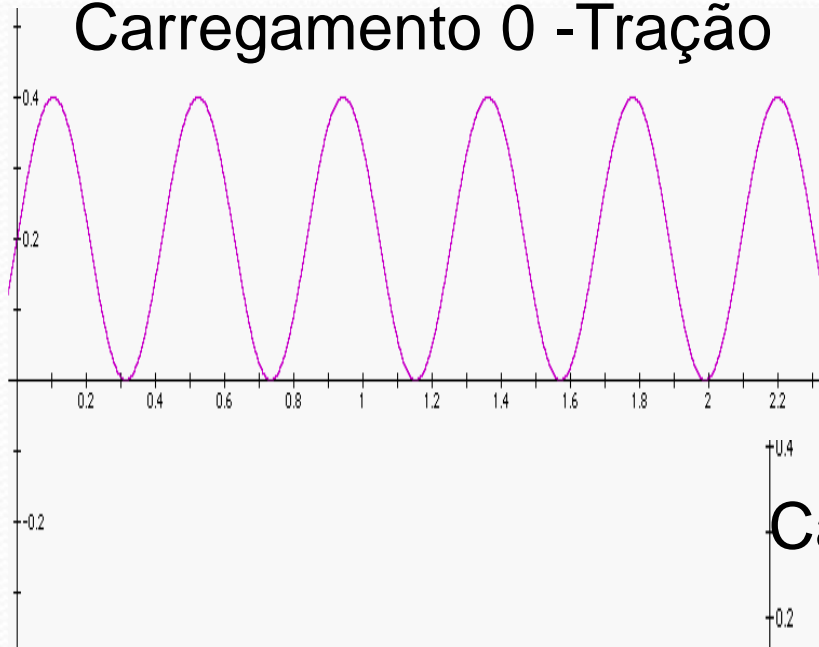


Razão de Tensões,  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$  ←

Razão de Amplitudes,  $A = \sigma_a / \sigma_m = \infty$

UTILIZADO NAS  
HOMOLOGAÇÕES  
DE PEÇAS  
AUTOMOTIVAS

## Carregamento 0 - Tração



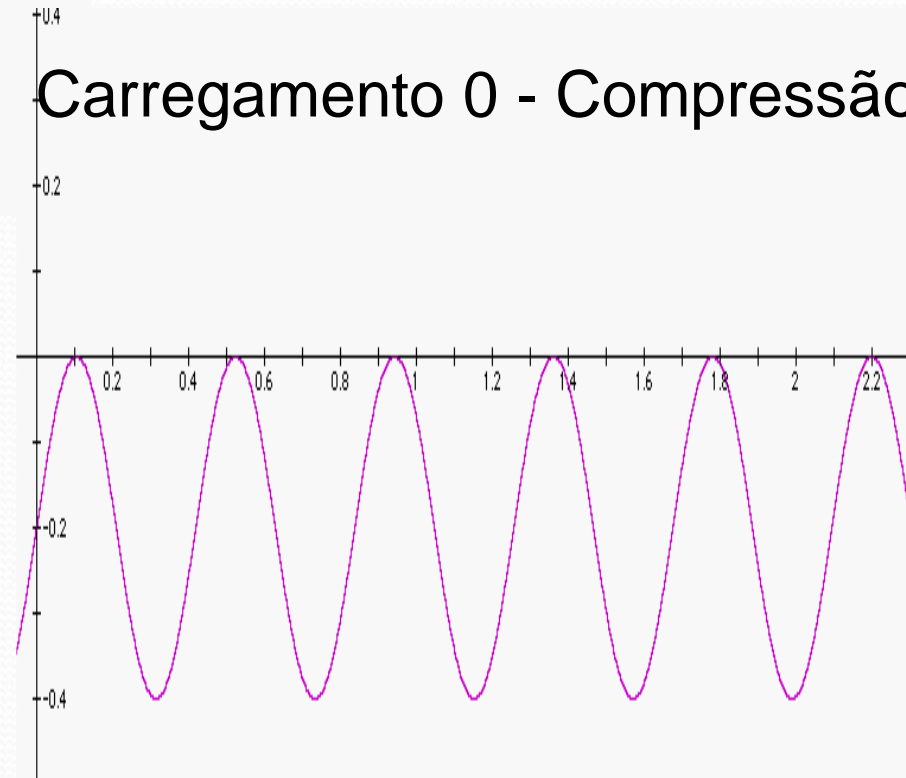
$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0$$

$$A = \sigma_a / \sigma_m = 1$$

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = \infty$$

$$A = \sigma_a / \sigma_m = 1$$

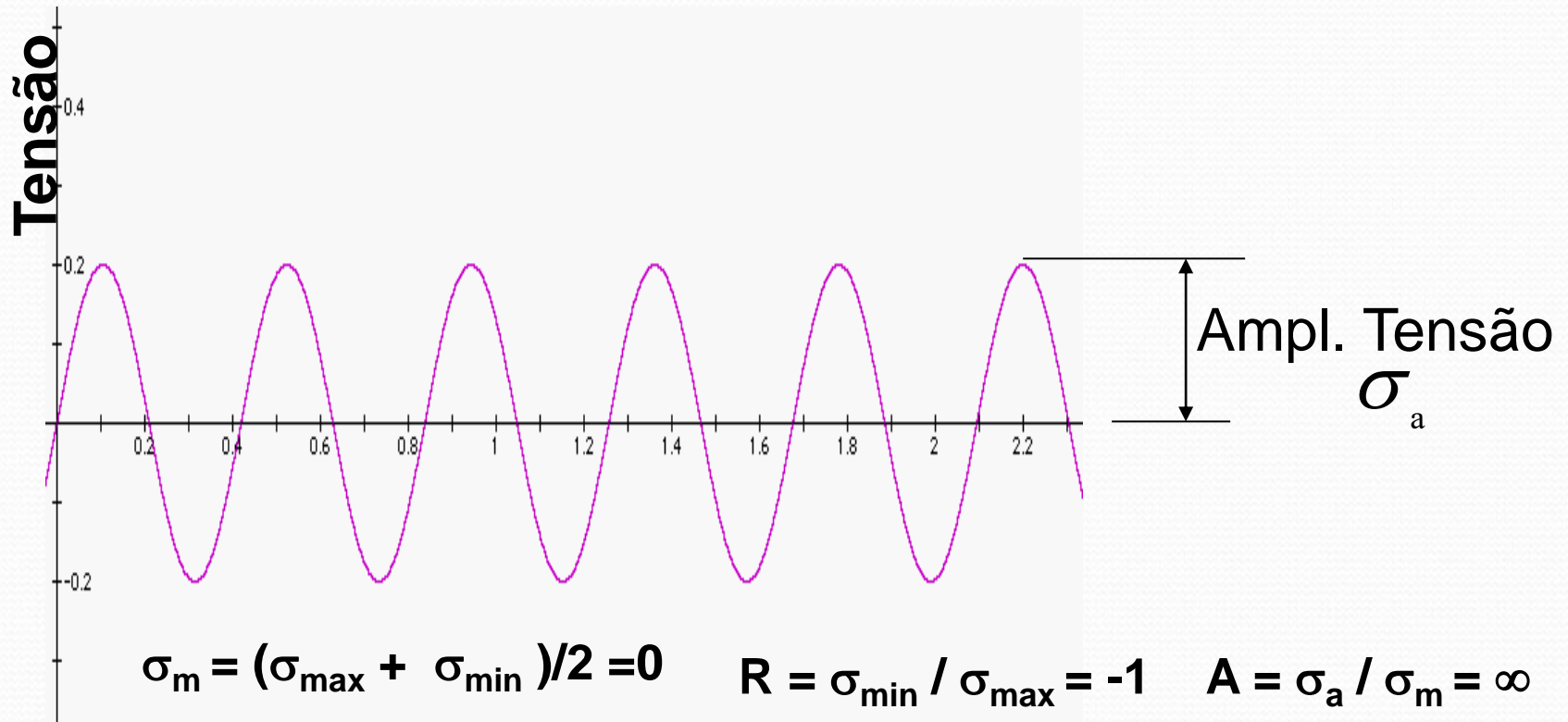
## Carregamento 0 - Compressão



# Propriedades de Fadiga

Os dados de fadiga são comumente apresentados:

- para CP polidos;
- Sob flexão reversa.

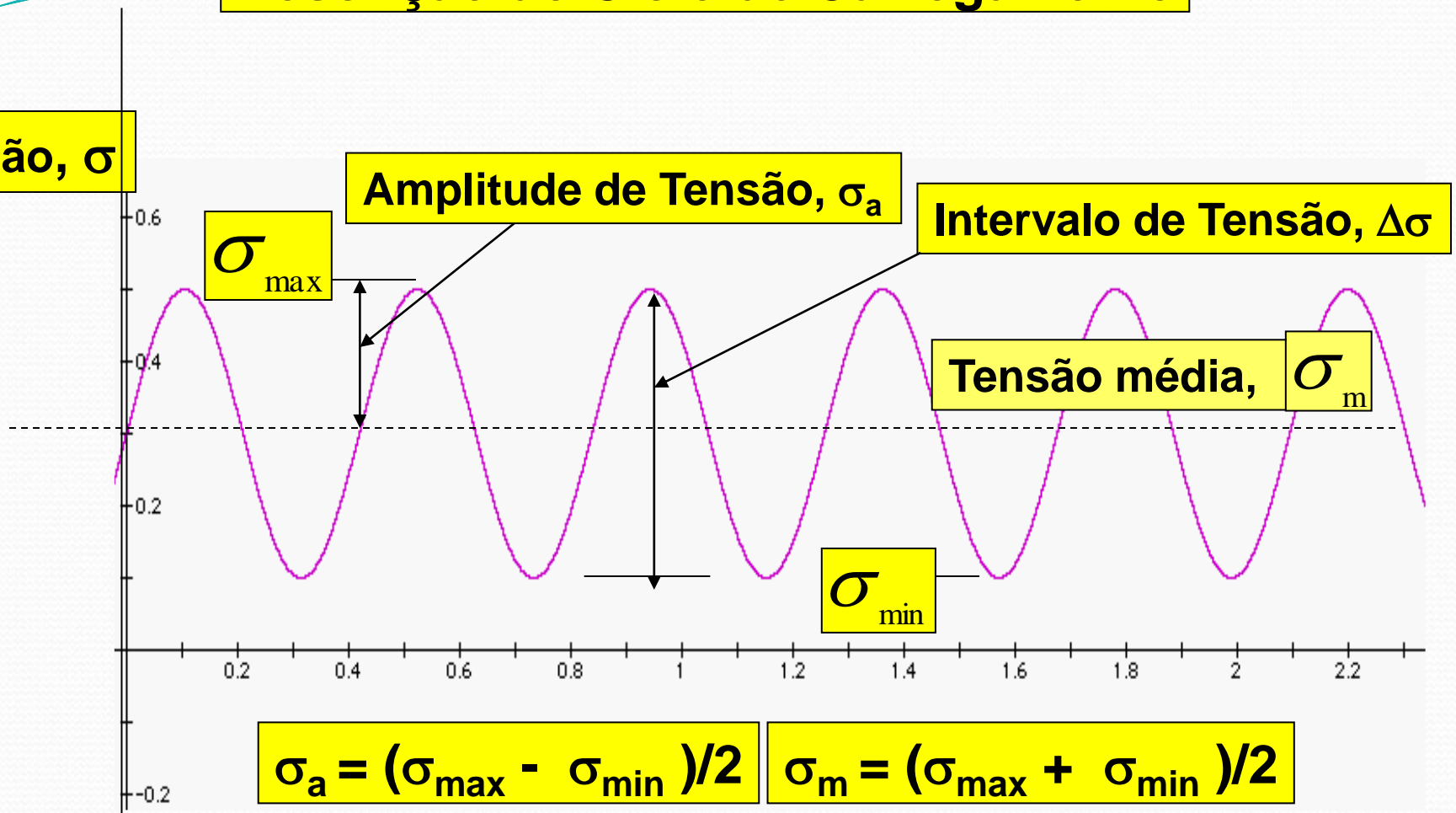




# DEFINIÇÕES E CONCEITOS

## Descrição do Ciclo de Carregamento

Tensão,  $\sigma$



$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$$

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$$

$$\Delta\sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

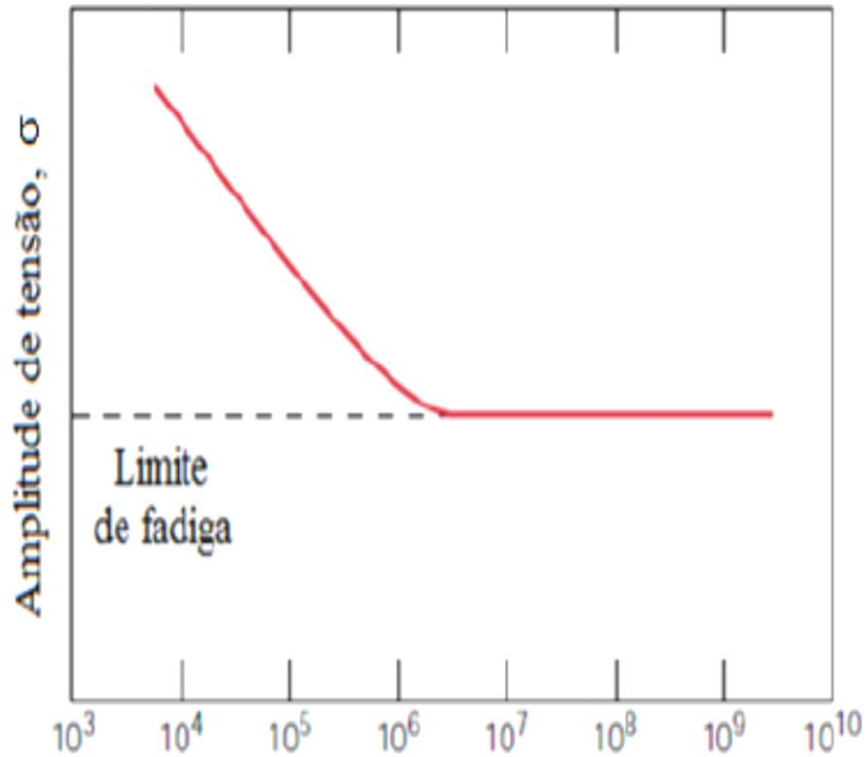
$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

RAZÃO DE AMPLITUDE

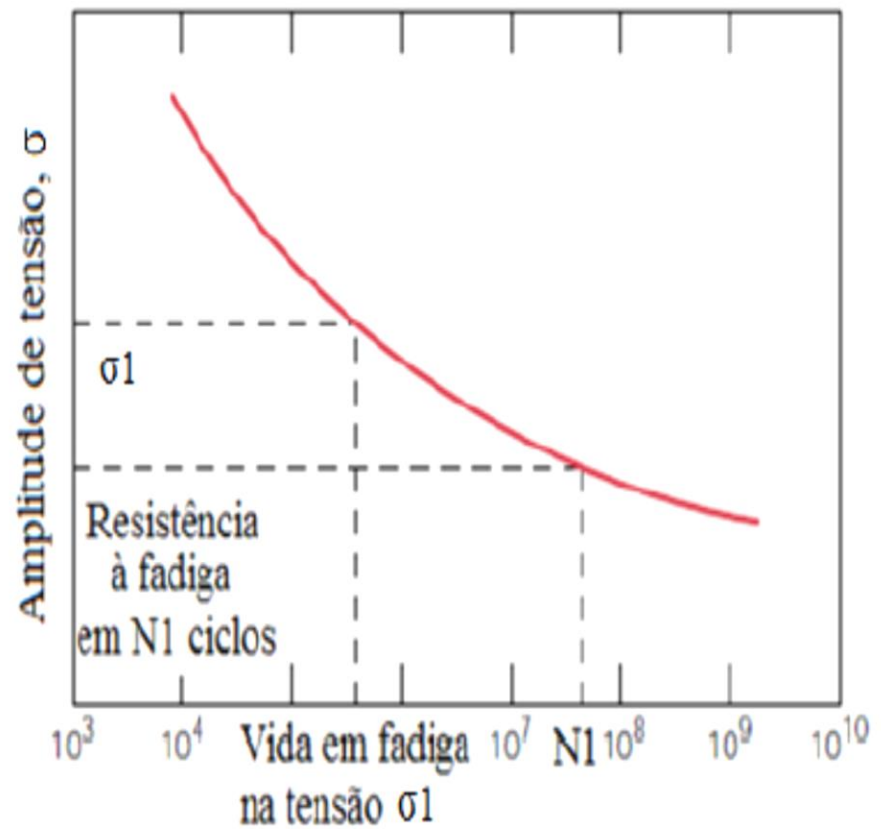
$$A = \sigma_a / \sigma_m$$



# FADIGA



(a) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)



(b) Ciclos para a falhas (escala logarítmica)

Mais de 90% das falhas: fadiga ou combinada à fadiga

- Fadiga **de alto ciclo (controlado por tensão)**;
- Fadiga **de baixo ciclo (controlada por deformação)**;
- **Propagação** de trinca por fadiga;
- Avaliação da **sensibilidade ao entalhe**;
- Fadiga **por fretting**;
- Fadiga **multiaxial**;
- Fadiga térmica: **isotérmica e termomecânica**;
- Fadiga em **meios agressivos**: iniciação e propagação;
- **Fadiga-fluência**.

## NORMAS:

- **ASTM E466-15** Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials;
- **ASTM E606-12** Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing;
- **ASTM E739-10(2015)** Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data;
- **ASTM E647-15e1** Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates;
- **ASTM E1049-85(2017)** Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis;
- **ASTM E2789-10(2015)** Standard Guide for Fretting Fatigue Testing.





# **Metodologias de Projeto em Fadiga**

# Filosofias de Projeto

## Vida Infinita

Este critério exige que as tensões atuantes estejam abaixo da tensão limite de fadiga.

## Vida Finita

Condições de carregamento sensivelmente imprevisíveis, ou ao menos, não constantes. A vida selecionada para o projeto deve incluir uma margem de segurança para levar em consideração o carregamento

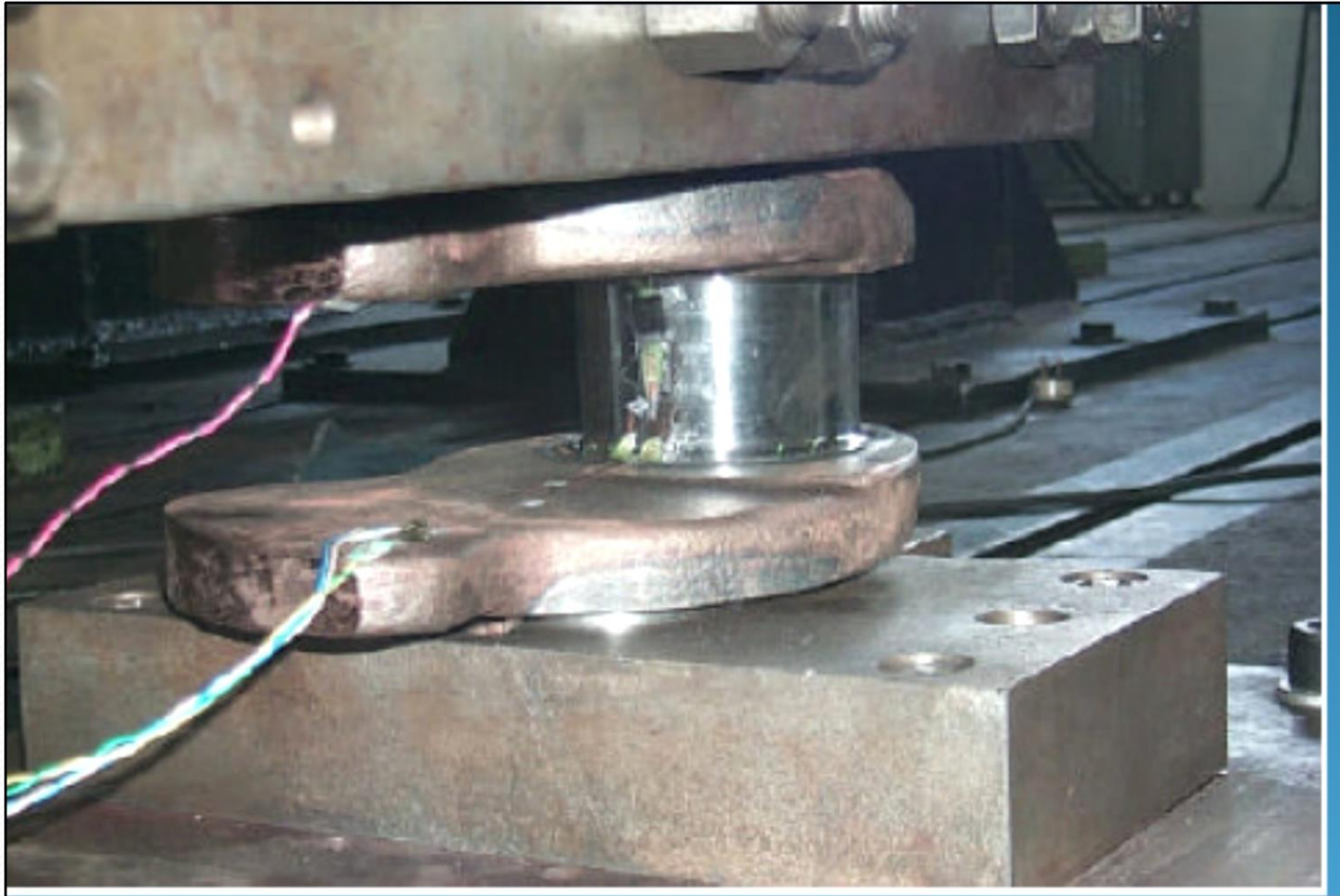
## Falha Segura

Este critério considera a possibilidade de ocorrência de trincas de fadiga, porém, sem levar ao colapso as estruturas antes destas fissuras serem detectadas e reparadas.

## Tolerante ao Dano

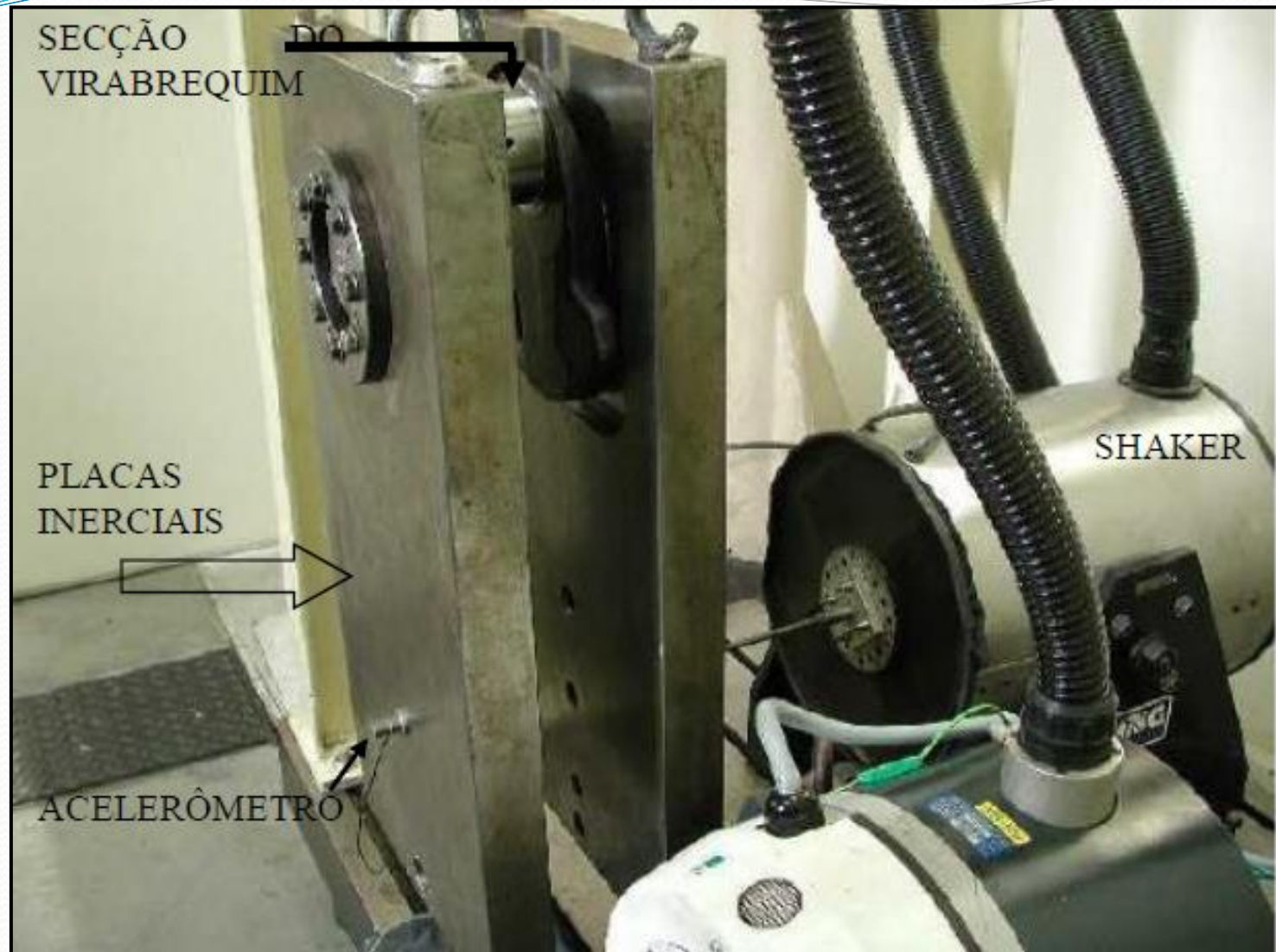
Este critério é um refinamento do anterior, porém, levando em consideração a existência de uma trinca, o projeto da estrutura é executado para que esta trinca não cresça, evitando a falha do componente.





**DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS**





“SHAKER ELETROMAGNÉTICO”- RESONANT DWELL



**ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DE LÍQUIDO PENETRANTE APÓS ENSAIO DE FADIGA PARA DETERMINAR LOCAL DA TRINCA.**



# FADIGA – ENSAIOS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

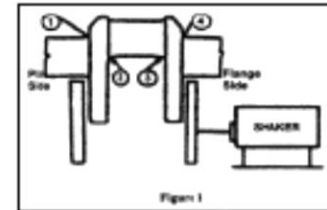
## Fatigue Tests Control Data Sheet

Testing Machine: \_\_\_\_\_

KR / heat code: \_\_\_\_\_

Customer: \_\_\_\_\_

Test Reason: \_\_\_\_\_



Test #	SAMPLE ID #	PIN #	Bending Moment (Nm)	Acceleration (G)	Frequency (Hz)	# of cycles	Date	Failure Location	Obs
1	1:1	1	3500,0	69,96	113,78	10.000.000	7/7/2009		
2	3:1	1	3600,0	76,20	114,67	198.236	8/7/2009	1	
3	4:2	2	3700,0	74,12	115,11	238.775	8/7/2009	3	
4	2:6	6	3600,0	72,04	115,09	10.000.000	13/7/2009		
5	4:6	6	3700,0	74,12	115,15	10.000.000	14/7/2009		
6	2:4	4	3600,0	76,20	115,32	2.734.528	15/7/2009	3	
7	4:4	4	3700,0	74,12	115,39	1.277.056	15/7/2009	1	
8	3:3	3	3600,0	72,04	115,19	10.000.000	17/7/2009		
9	1:5	5	3700,0	74,12	114,97	4.712.704	28/7/2009	3 - 4	
10	1:3	3	3600,0	72,04	114,98	10.000.000	29/7/2009		
11	5:1	1	3700,0	74,12	115,32	371.968	29/7/2009	3	
12	5:3	3	3600,0	72,04	115,18	10.000.000	31/7/2009		
13	6:2	2	3700,0	74,12	114,88	10.000.000	5/8/2009		
14	5:5	5	3600,0	76,20	114,39	279.335	5/8/2009	4	
15	6:6	6	3700,0	74,12	114,68	490.624	6/8/2009	4	
16	6:4	4	3600,0	72,04	114,74	1.159.936	6/8/2009	1	
17									
18									

### Fatigue Limit (10.000.000 cycles)

50% (mean)	3772,2 Nm
95%	3719,5 Nm
std dev	68,7 Nm

### Stair Case Method According

Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments - McGraw Hill  
Lipson, C. and Sheth, N. J.  
Chapter 9 - Fatigue Experiments



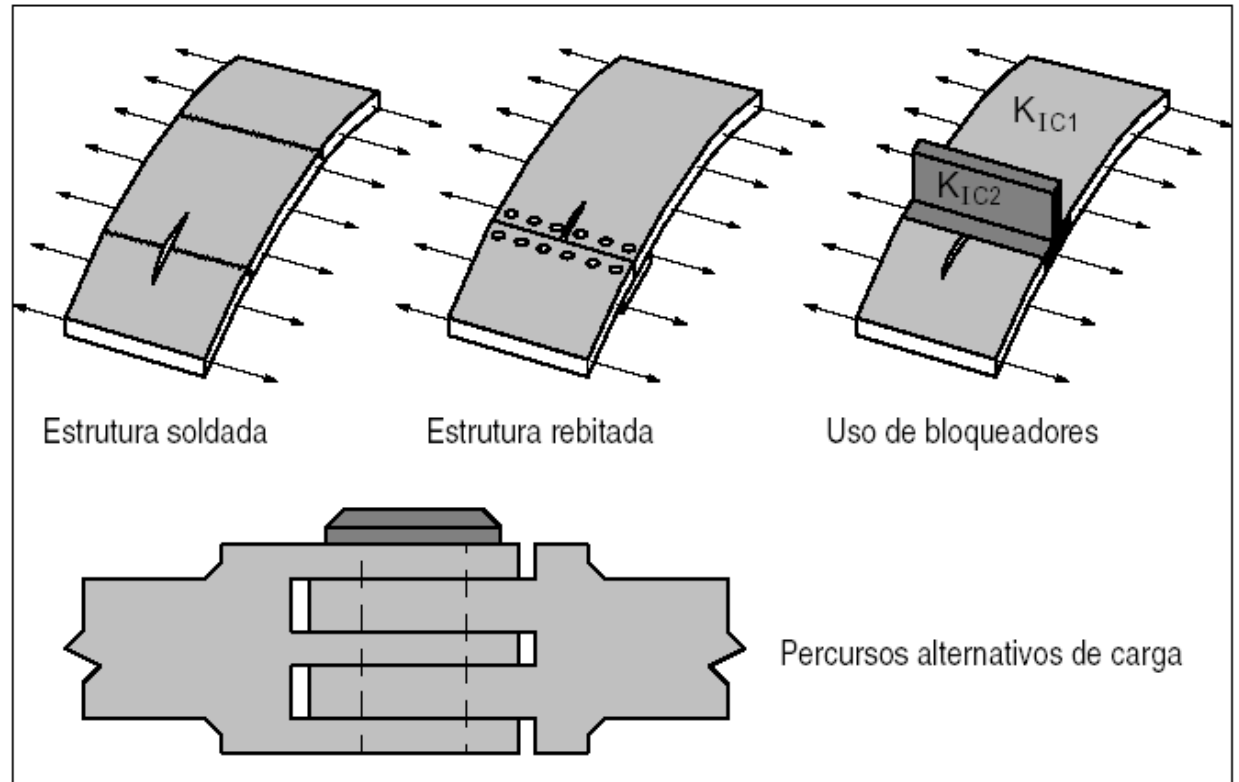
## PROJETO PARA FALHA SEGURA PFS (FAIL SAFE)

- Este critério foi desenvolvido pelos **engenheiros aeronáuticos**, já que estes não podem tolerar o **peso adicional** requerido por um coeficiente de segurança **alto**, nem o **risco** de falha implícito por um coeficiente **muito baixo**;
- O **critério** para falha segura considera a possibilidade de **ocorrência de trincas** de fadiga e dispõem a estrutura de modo que as **trincas não a levem ao colapso** antes de serem **detectadas e reparadas**.

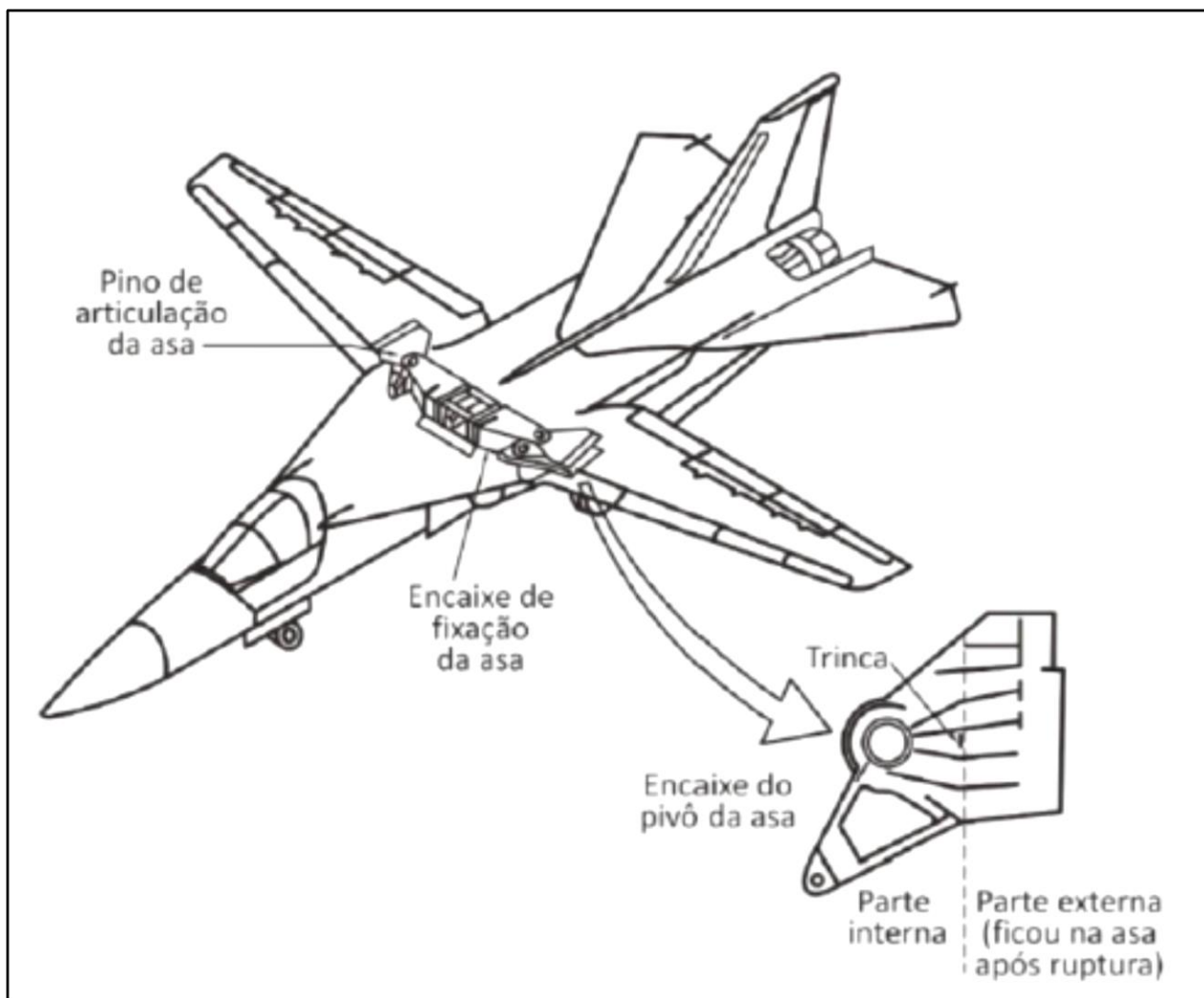
Alguns meios de possibilitar o comportamento "fail safe" em uma estrutura são: **introduzir bloqueadores de propagação**, ou elementos para impedir a propagação da trinca (crack arresters), usar uniões **rebitadas ou parafusadas** ao invés de soldadas, etc..

■ **EXEMPLOS:**

- Fuselagens e asas de aviões
- Cascos de navios
- Pontes.



**Acidente com um caça F-111 com apenas 104 horas de voo (1969)-ano que o homem pisou na Lua –deflagrou o desenvolvimento de projetos com tolerância ao dano pela Força Aérea Americana-peça com defeito de forjamento, na asa.**



# PROJETO COM TOLERÂNCIA AO DANO

- Este critério é um **aperfeiçoamento** da filosofia "**fail safe**". Parte-se do **princípio** de que a estrutura **possui uma trinca**, seja por defeito de fabricação, seja devida à operação (fadiga, corrosão sob tensão, etc.), e com os conceitos da **Mecânica da Fratura** são desenvolvidos os projetos de modo que as **trincas** pré-existentes **não cresçam** até o **tamanho crítico**, antes que sejam **detectadas pelas inspeções periódicas**;
- Este critério é mais **adequado** a materiais com **baixa velocidade de propagação de trincas e com alta tenacidade**. O **tamanho inicial** do defeito pode ser **estimado** (ao menos o seu limite superior) através de um **ensaio prévio de sobrecarga**;
- Se o **componente sobrevive** ao ensaio está assegurado que **não existem** defeitos (trincas) **acima** de uma dada dimensão. É um critério que usa extensivamente as modernas metodologias de projeto.

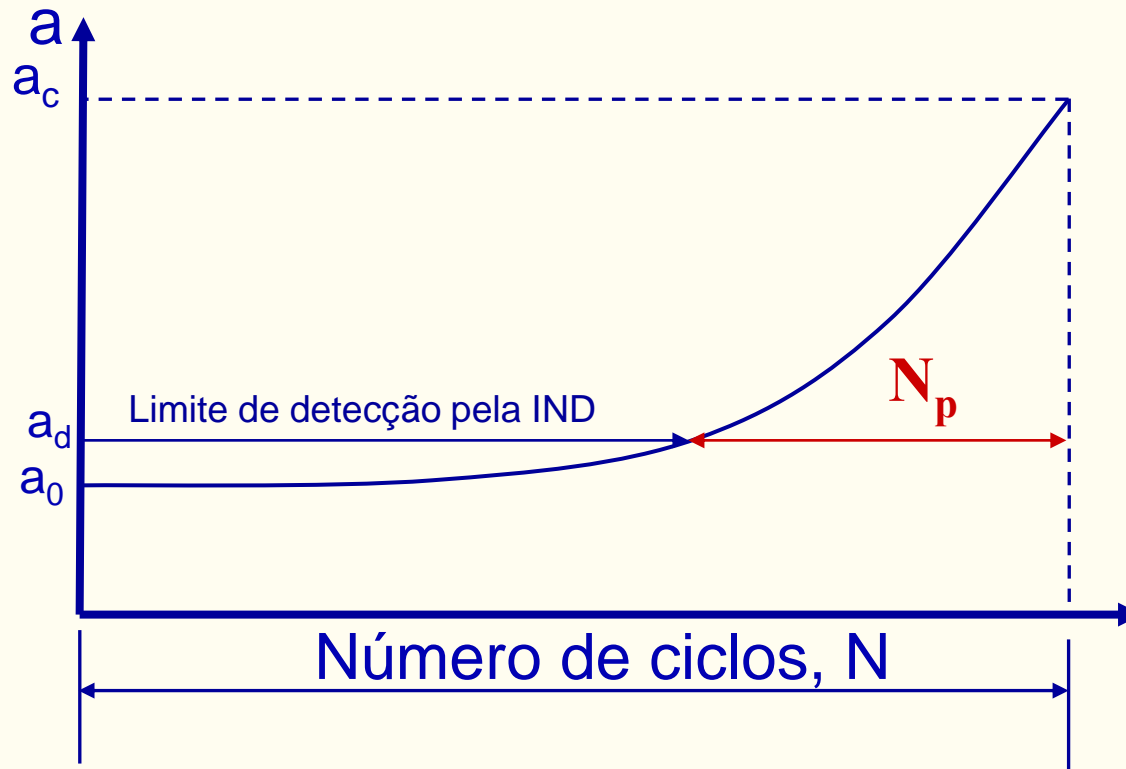


# **PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA**

**Prof. Dr. José Benedito Marcomini**

# CRESCIMENTO DE TRINCA SOB CARREGAMENTOS CÍCLICOS DE AMPLITUDE CONSTANTE

Em situação de fadiga, a trinca pode crescer mesmo se  $a_0 < a_c$  ou  $\sigma < \sigma_c$ .

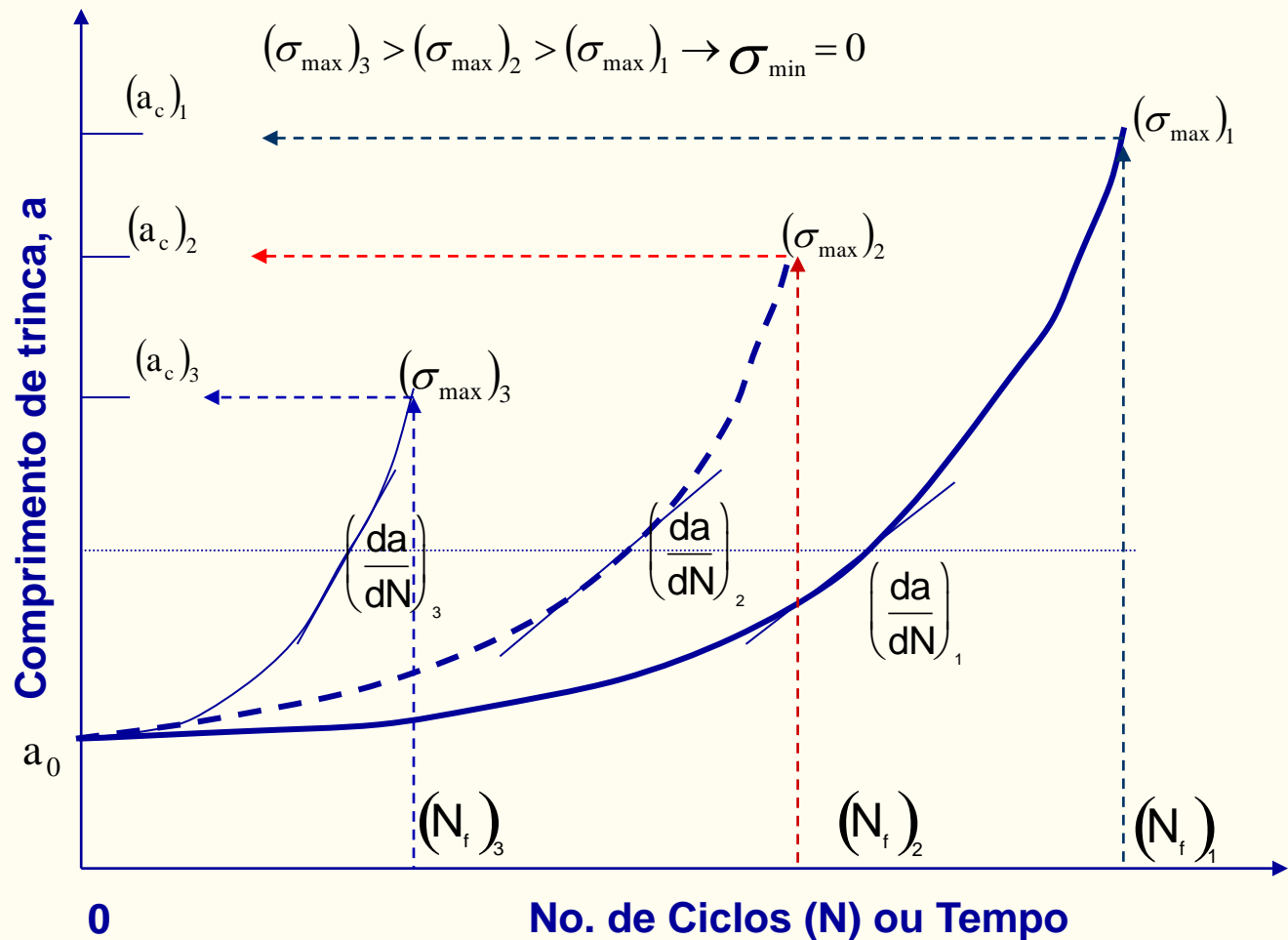


$a_d = ?$  (END, IND)

$a_c = ?$  (MFEL)

$N_p = ?$  ( $a \times N$ )

# Taxa de Crescimento de Trinca Vs. Tensão

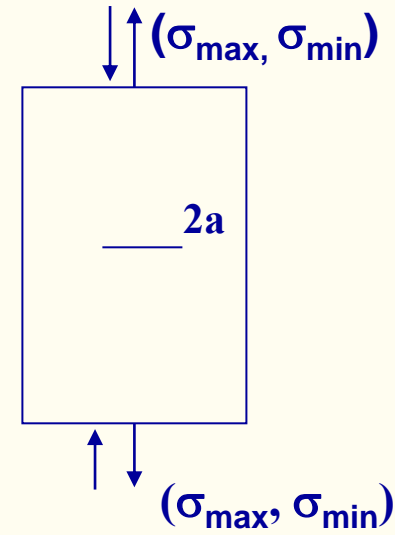
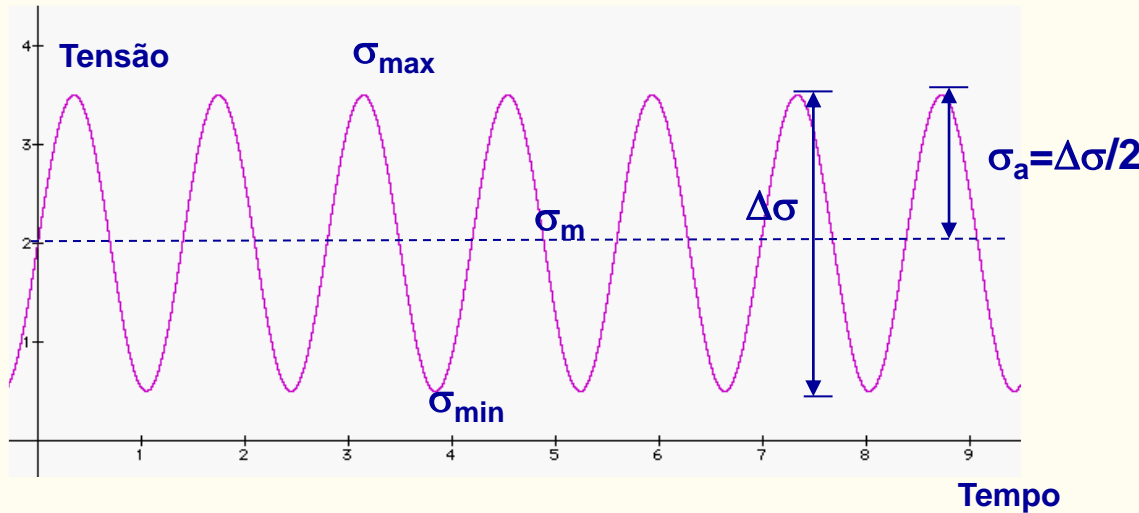


## Conclusão:

- (1) Inicialmente a taxa de crescimento da trinca ( $da/dN$ ) é pequena, aumentando com aumento de  $a$ .
- (2)  $da/dN$  aumenta com aumento do nível de tensão aplicada e para um  $a$  específico.



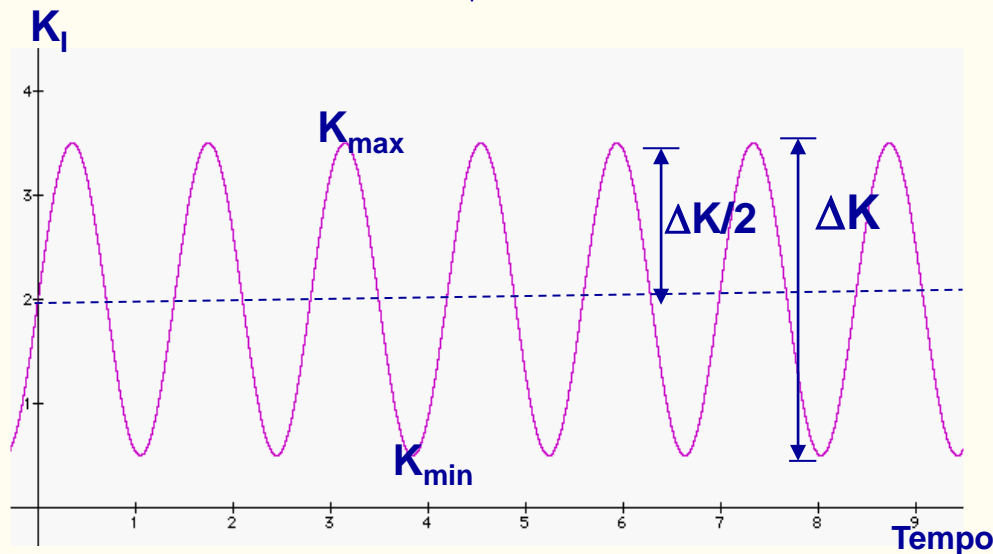
# Parâmetros Utilizados na descrição do Crescimento de Trinca por Fadiga



$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$



$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a} \Rightarrow Y = 1$$

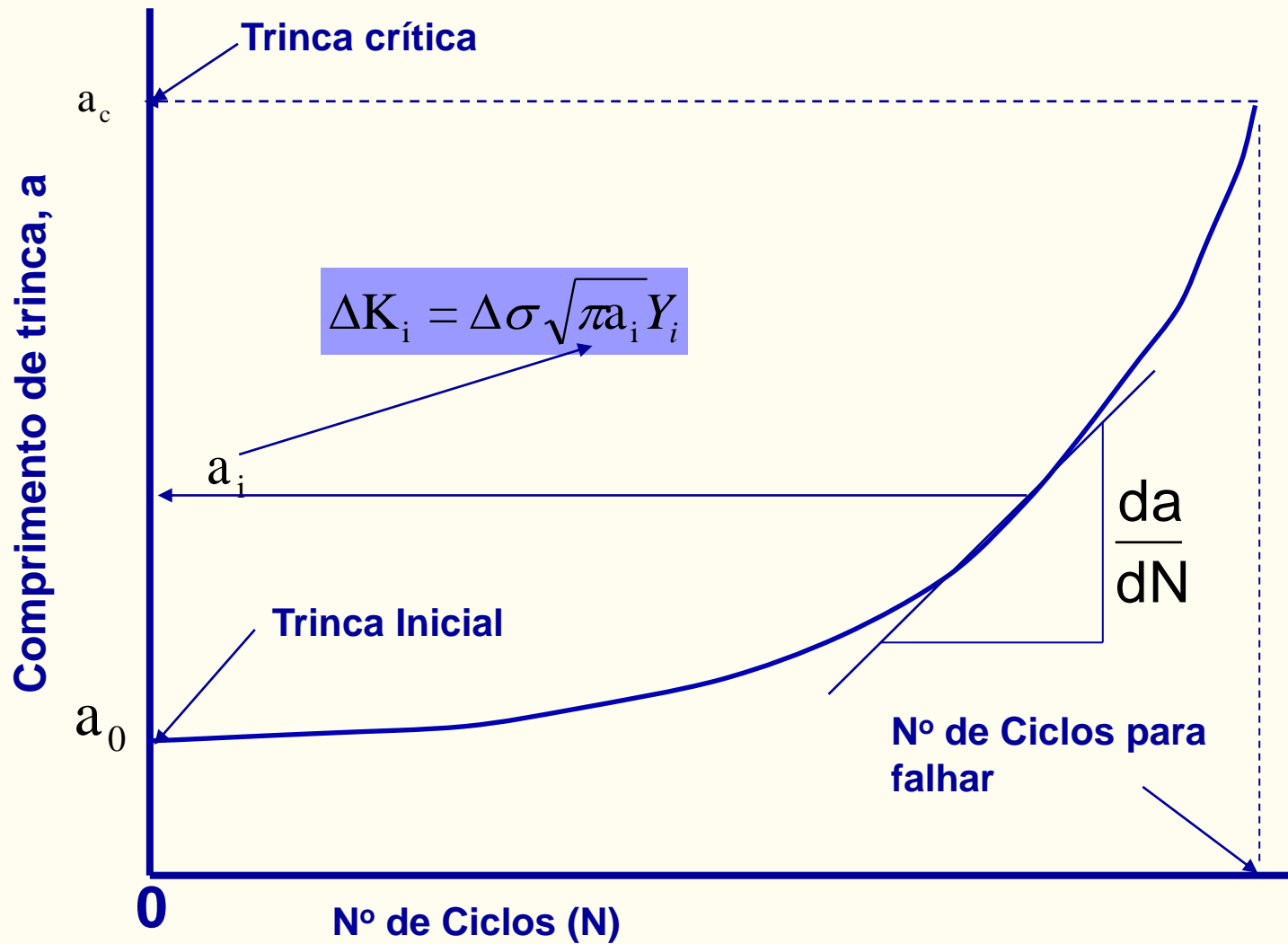


$$K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a}$$

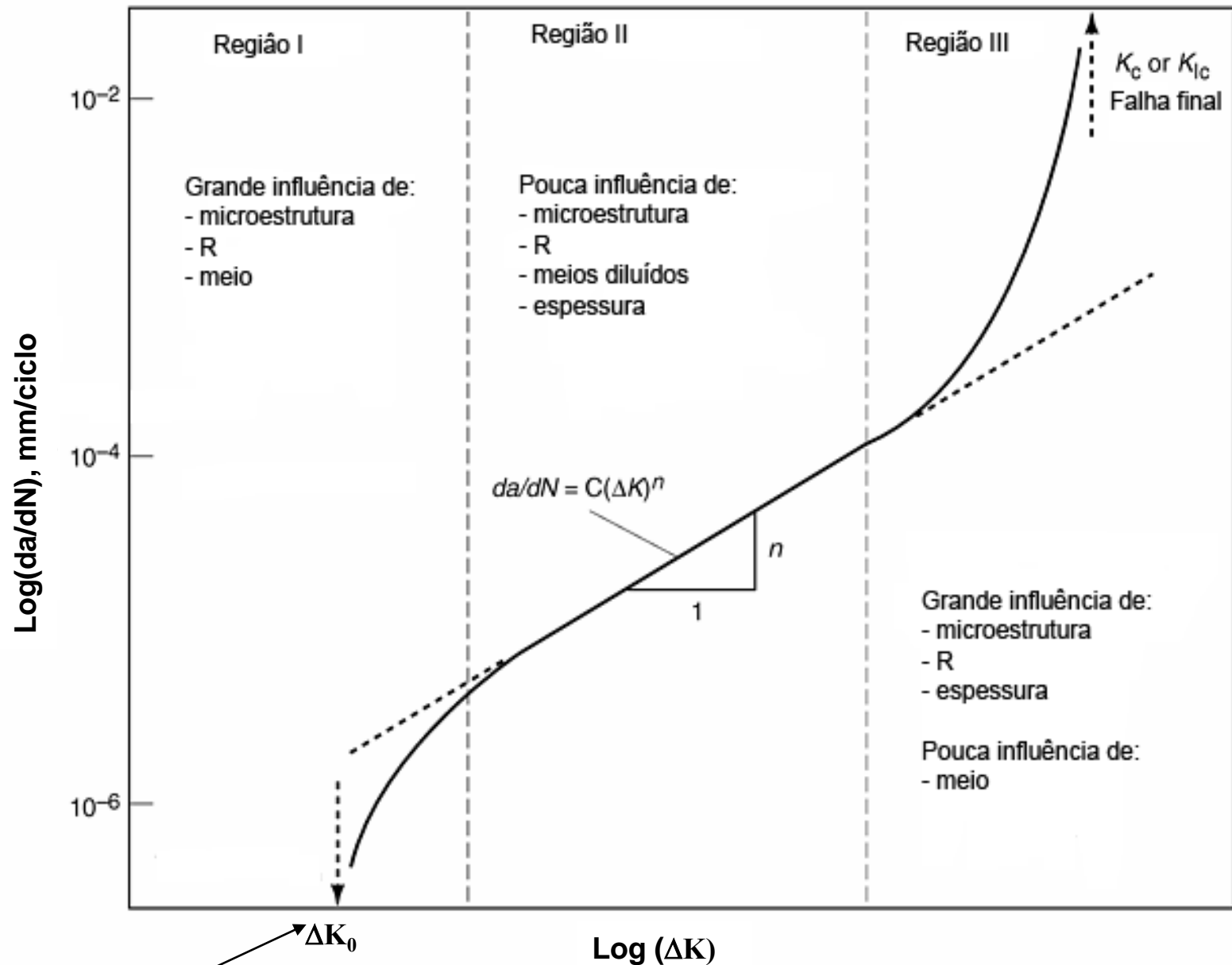
$$K_{\min} = \sigma_{\min} \sqrt{\pi a}$$

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

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$$



# CURVA DE CRESCIMENTO DE TRINCA POR FADIGA



Al : 3 – 7 MPa m<sup>1/2</sup>

Aço : 6 – 17 MPa m<sup>1/2</sup>





- **Região linear (Paris e Erdogan):**

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

onde C e m são constantes do material e determinados experimentalmente. Metais:  $2 \leq m \leq 7$ .

- **Limitações:**

- Não Leva em conta efeitos de R, superestima a Região I ( $\Delta K_0$ ) e subestima a Região III ( $K = K_{IC}$ )

- **Vantagens:**

- Os valores previstos concordam bem com os dados experimentais.
- Simples de ser usada e incorporada a programa de cálculo da vida em propagação em serviço.

Material	C		m
	da/dN (m/cycle) ΔK in MPa√m	da/dN (in/cycle) ΔK in ksi√in	
Ferritic-Pearlitic Steels	$6.9 \times 10^{-12}$	$3.6 \times 10^{-10}$	3.0
Martensitic Steels	$1.35 \times 10^{-10}$	$6.6 \times 10^{-9}$	2.25
Austenitic Stainless Steels	$5.6 \times 10^{-12}$	$3.0 \times 10^{-10}$	3.25
Ni-Mo-V Steels	$1.8 \times 10^{-19}$	----	3.0

Um grande número de pesquisadores (mais do que 50) desenvolveram expressões, que pudessem modelar parte ou toda a curva  $\log da/dN$  x  $\log \Delta K$ .

### Regiões II e III

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^m}{(1-R)K_{IC} - \Delta K} \Rightarrow \text{Forman (1967)}$$

- $K_{\max} \rightarrow K_{IC} \quad da/dN \rightarrow \infty$
- $R > 0$

### Curva Completa

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \frac{(\Delta K - \Delta K_0)}{(1-R)K_{IC} - \Delta K} \Rightarrow \text{Forman modificada}$$

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{\Delta K - \Delta K_0}{K_C - K_{\max}} \right)^m \Rightarrow \text{Priddle (1976)}$$

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K - \Delta K_0)^2 \left( 1 + \frac{\Delta K}{K_C - K_{\max}} \right) \Rightarrow \text{McEvily, (1988)}$$



# Região I da Curva de Crescimento de Trinca por Fadiga

## Fator de Intensidade de Tensão Limite, $\Delta K_{th}$ :

- Abaixo de  $\Delta K_{th}$  , o crescimento de trinca por fadiga
- não ocorre
- Para vários aços , têm-se as relações abaixo:

$$\Delta K_{th} = 6,4(1 - 0,85R) \text{ for } R \geq +0,1$$

$$\Delta K_{th} = 5,5 \quad \text{for } R < +0,1$$

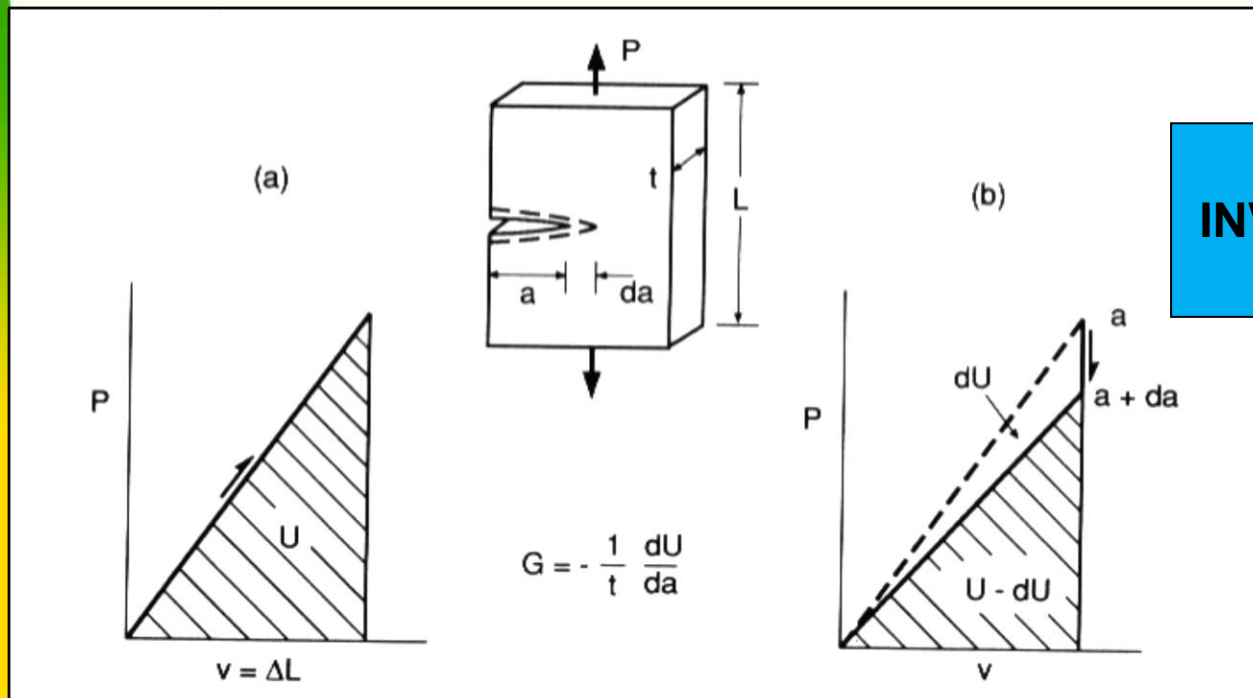
# **ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CRESCIMENTO DA TRINCA POR FADIGA**

**- NORMA: ASTM E647-05: Ciclos de amplitude constante;**

## **TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DA TRINCA:**

- Observação visual com microscópio (luneta graduada);**
- Mudança da flexibilidade (rigidez) da seção remanescente (compliance);**
- Medição por ultra-som;**
- Réplica de acetato;**
- Passagem de corrente (Queda de Potencial);**
- Filmagem e foto da trinca.**

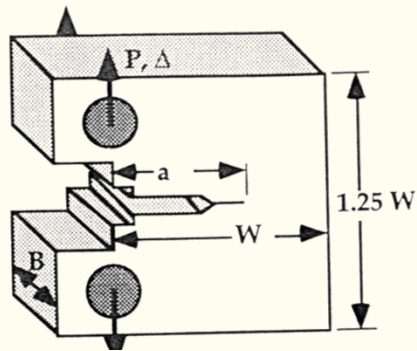
- O ensaio é controlado pelo **compliance** (*inverso da rigidez*), que é uma forma de controlar o ensaio pelo nível de tensão;
- **Quando a trinca se propaga (da), a rigidez do material decresce e a energia potencial decresce de dU;**
- G é a taxa de variação da energia potencial por unidade de área da trinca, a força motriz para a propagação da trinca:  $G = - dU/tda$ ;



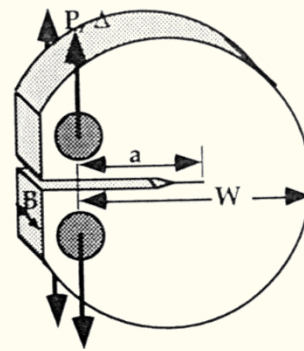
**COMPLIANCE:  
INVERSO DA RIGIDEZ  
 $C = \Delta V / \Delta P$**

# CORPOS DE PROVA

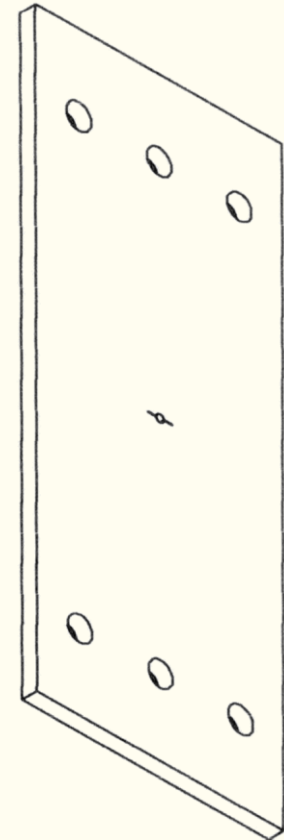
- NORMA: ASTM E647- 05
- CORPOS DE PROVA MAIS UTILIZADOS:
  - COMPACTO – CT
  - DISCO – DCT
  - CHAPA – CCT OU M(T)



**CT**



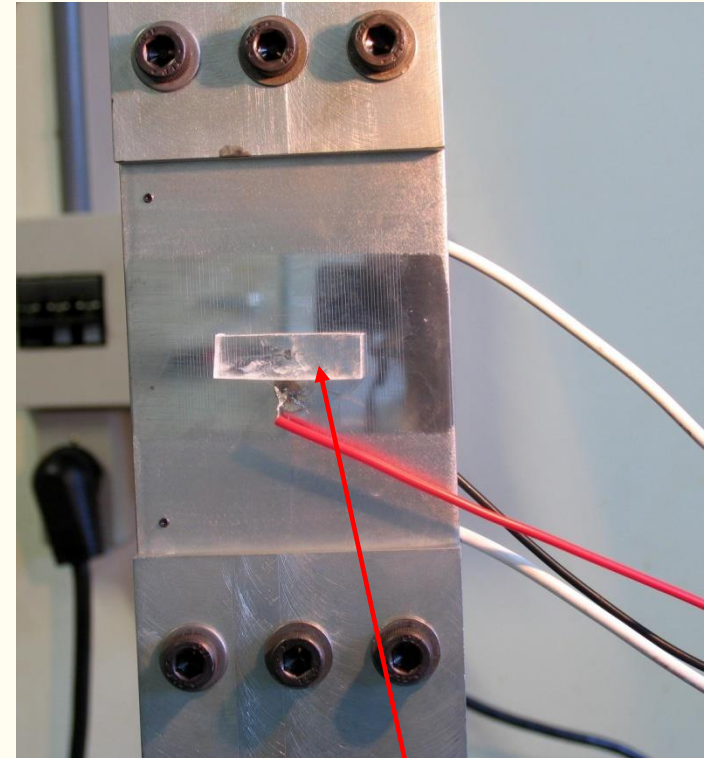
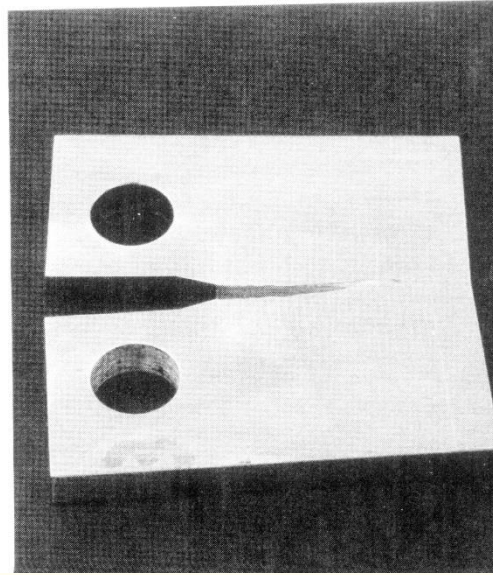
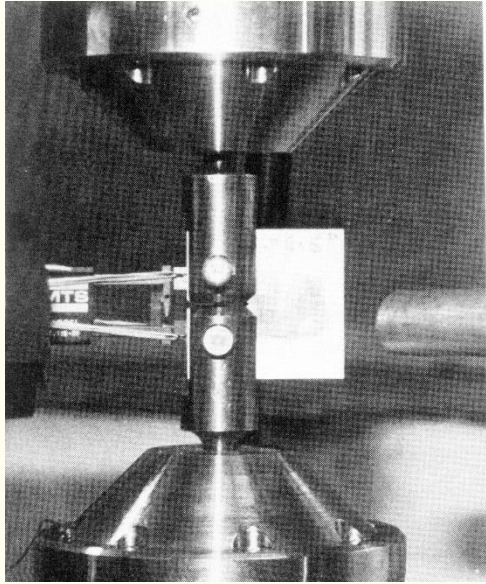
**DCT**



**CCT OU M(T)**



# TÉCNICAS MAIS UTILIZADAS PARA DETERMINAÇÃO DE $a$



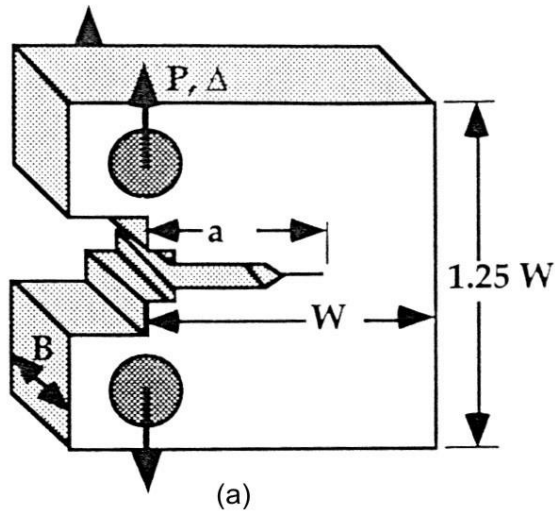
Compliance



Réplica de acetato

Queda de Potencial

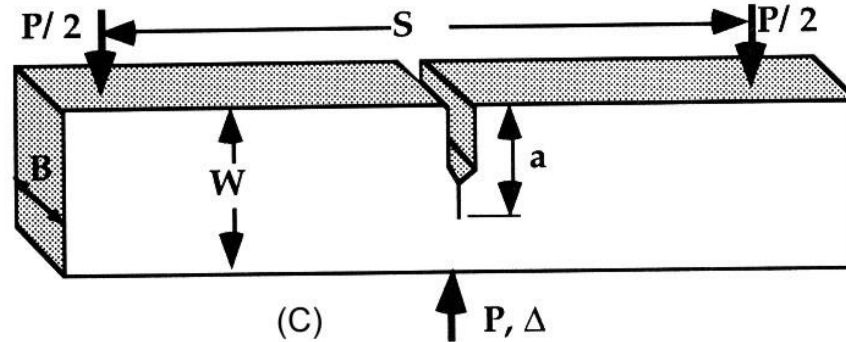
C(T)



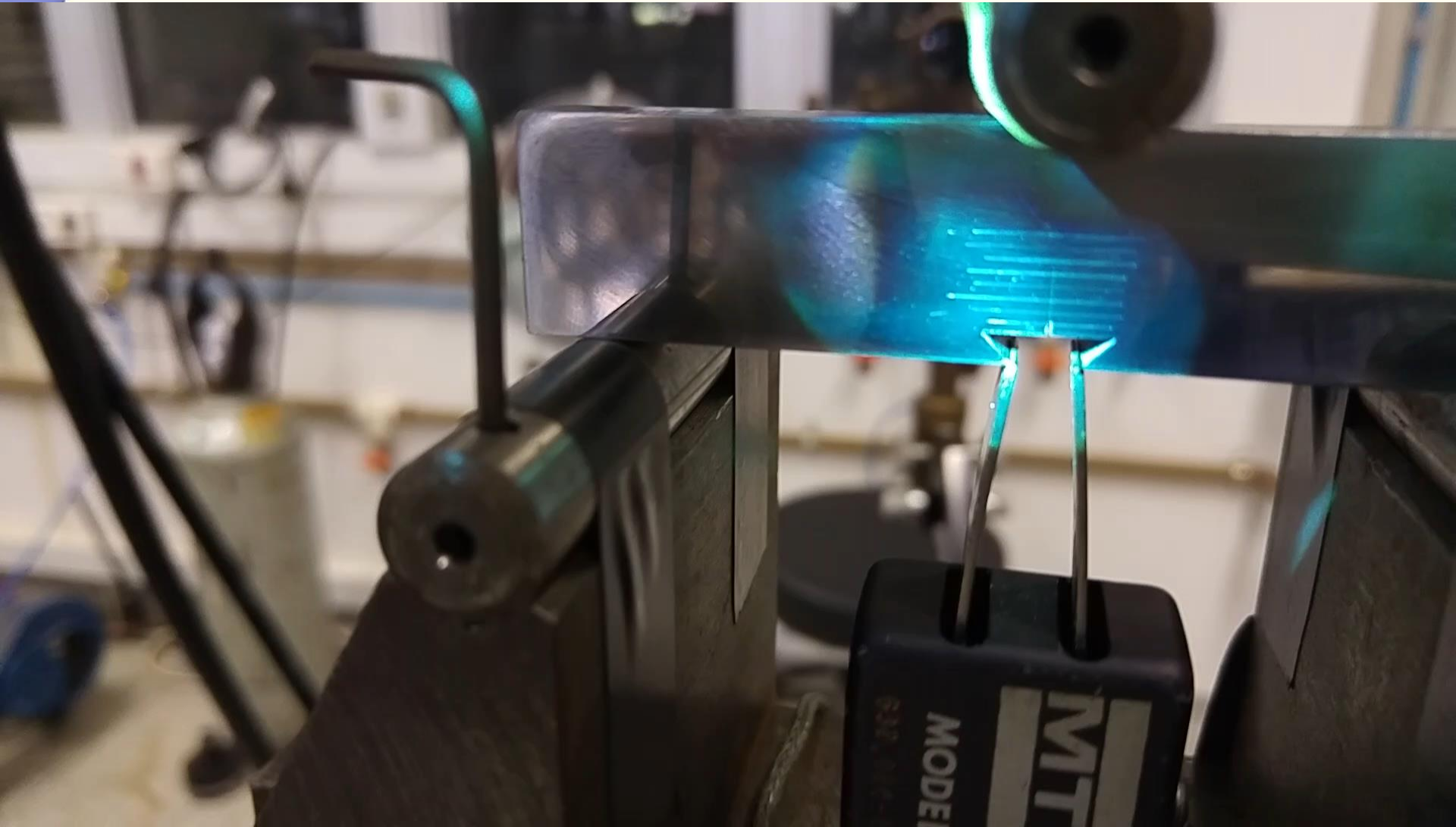
$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} Y$$

$$Y = f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[ 0,886 + 4,64\left(\frac{a}{W}\right) - 13,32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$

SEN(B)



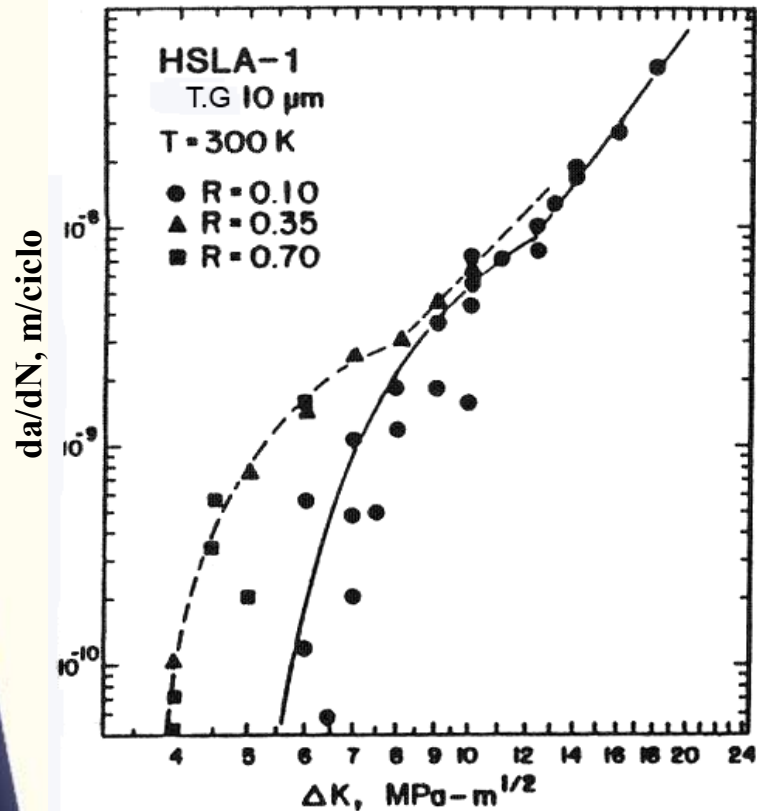
$$Y = f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[ 1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left\{ 2,15 - 3,93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right\} \right]$$



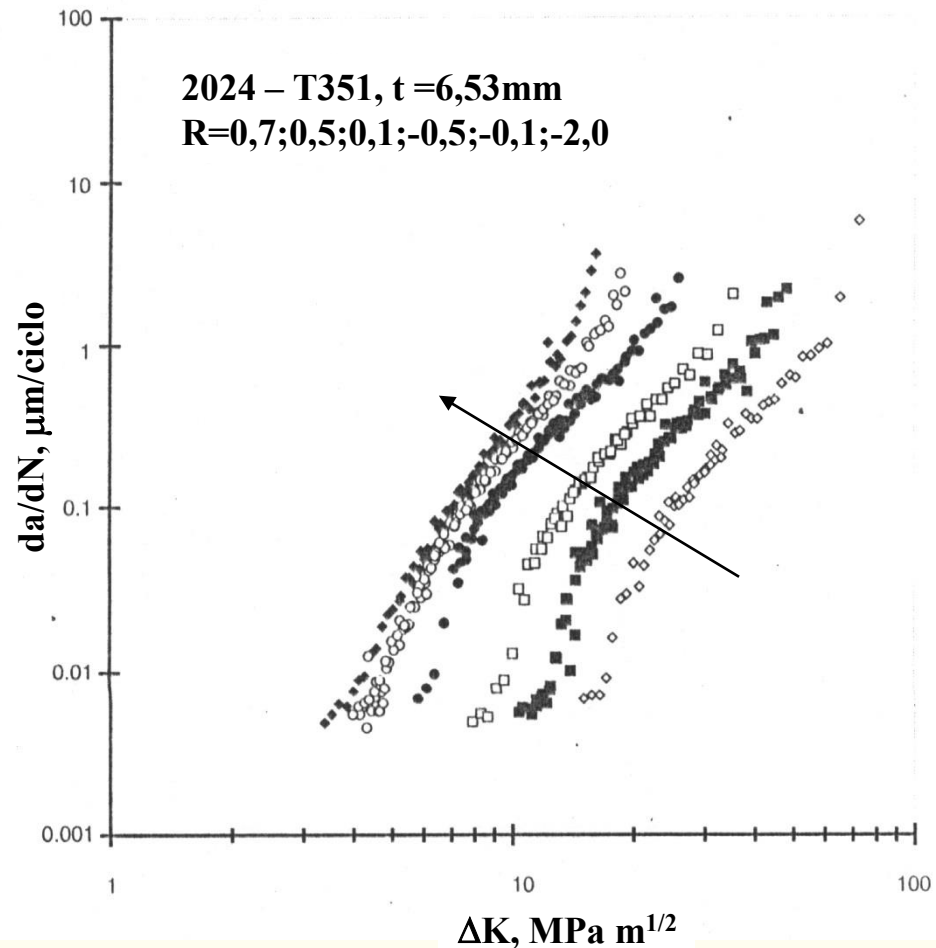


## Influência da Razão de Carga, R

No caso de ensaios conduzidos com  $\Delta\sigma$  constante e diferentes R, a taxa de crescimento de trinca por fadiga pode depender de R.

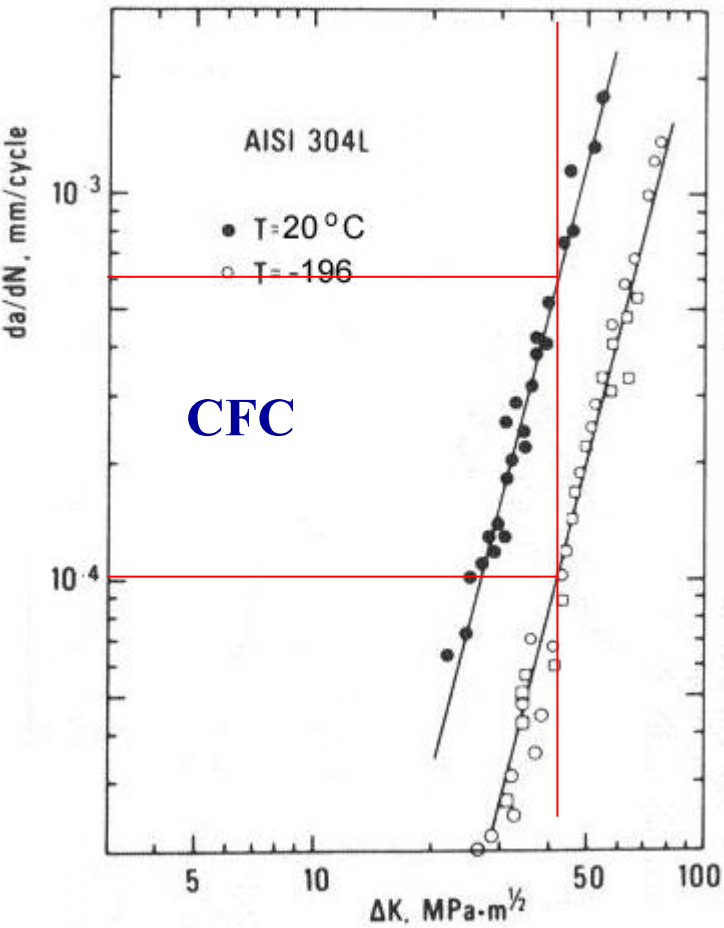


*Esaklul, K.A et al (1984)*



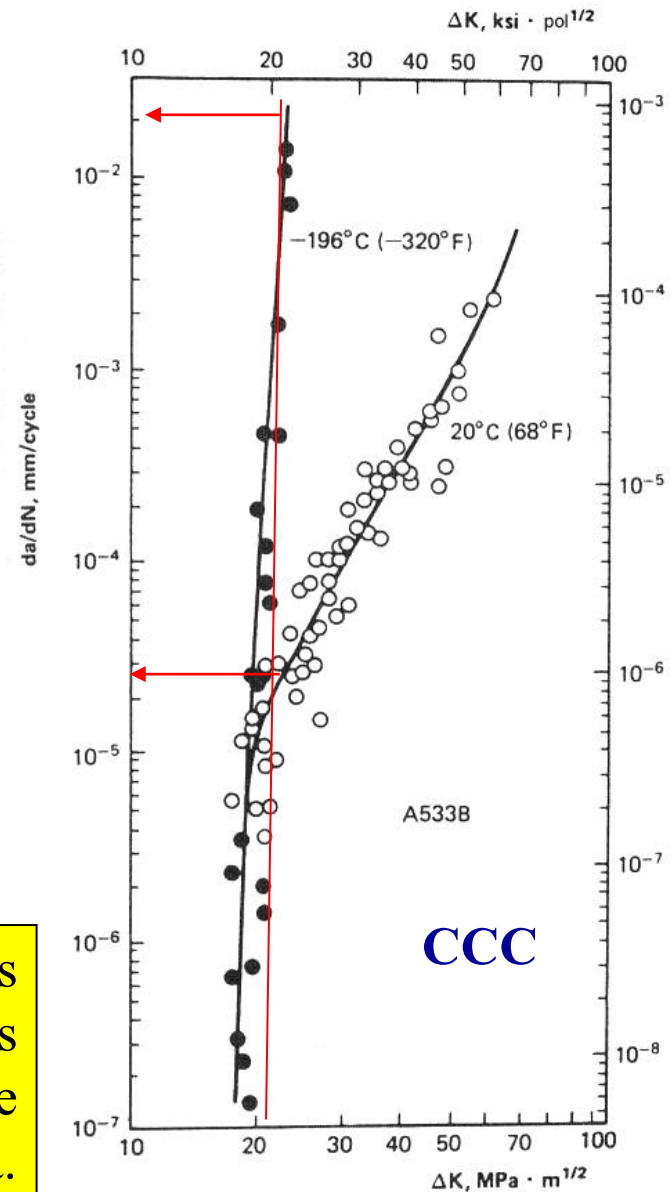
*A. F. Liu (1986)*

## Baixa Temperatura



CFC- deformação por maclação com os sistemas de deslizamento restritos, mais sistemas de deslizamento, aumento de dureza, aumenta res.à prop. Trinca, não cliva.

CCC- menos sistemas de deslizamento, aumento de dureza, fragiliza, pode clivar.





# **PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA EM AMPLITUDE VARIÁVEL**

# Crescimento de trinca – Carregamento de Amplitudes Variáveis

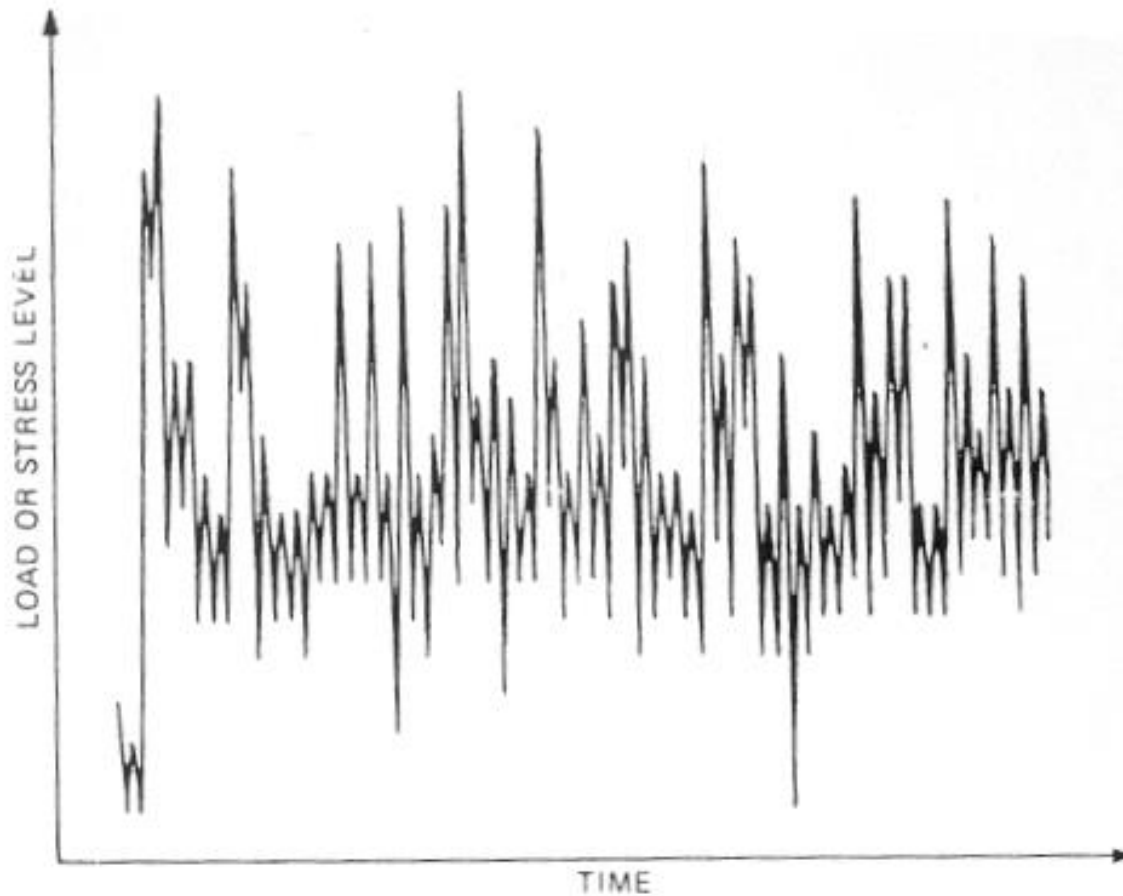


Figure 9.11. Example of a fairly random cyclic load history (part of a flight for a tactical aircraft).

## CTF- Efeito de sobrecargas

A **sobrecarga** pode acarretar um aumento da tensão, levando à **deformação plástica localizada**, fenômenos de **fechamento**, o que **retarda** a propagação da trinca

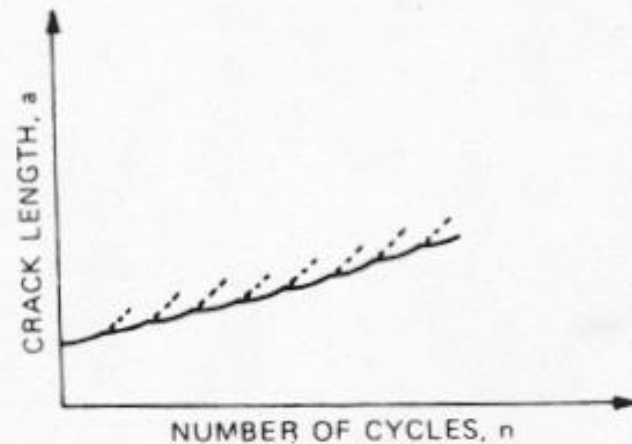
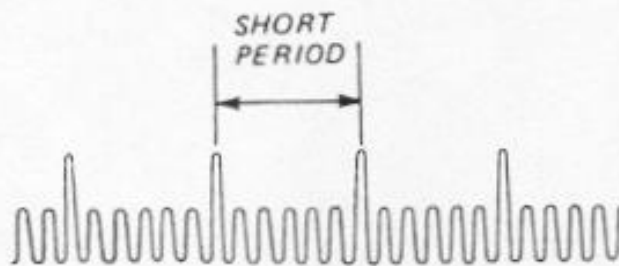
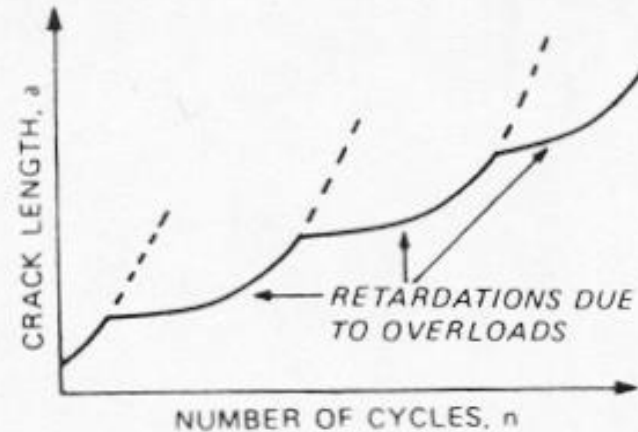
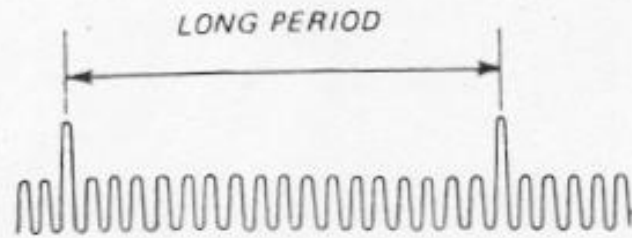


Figure 9.15. Effect of peak load recurrence period on the crack growth curve.

**FIM**