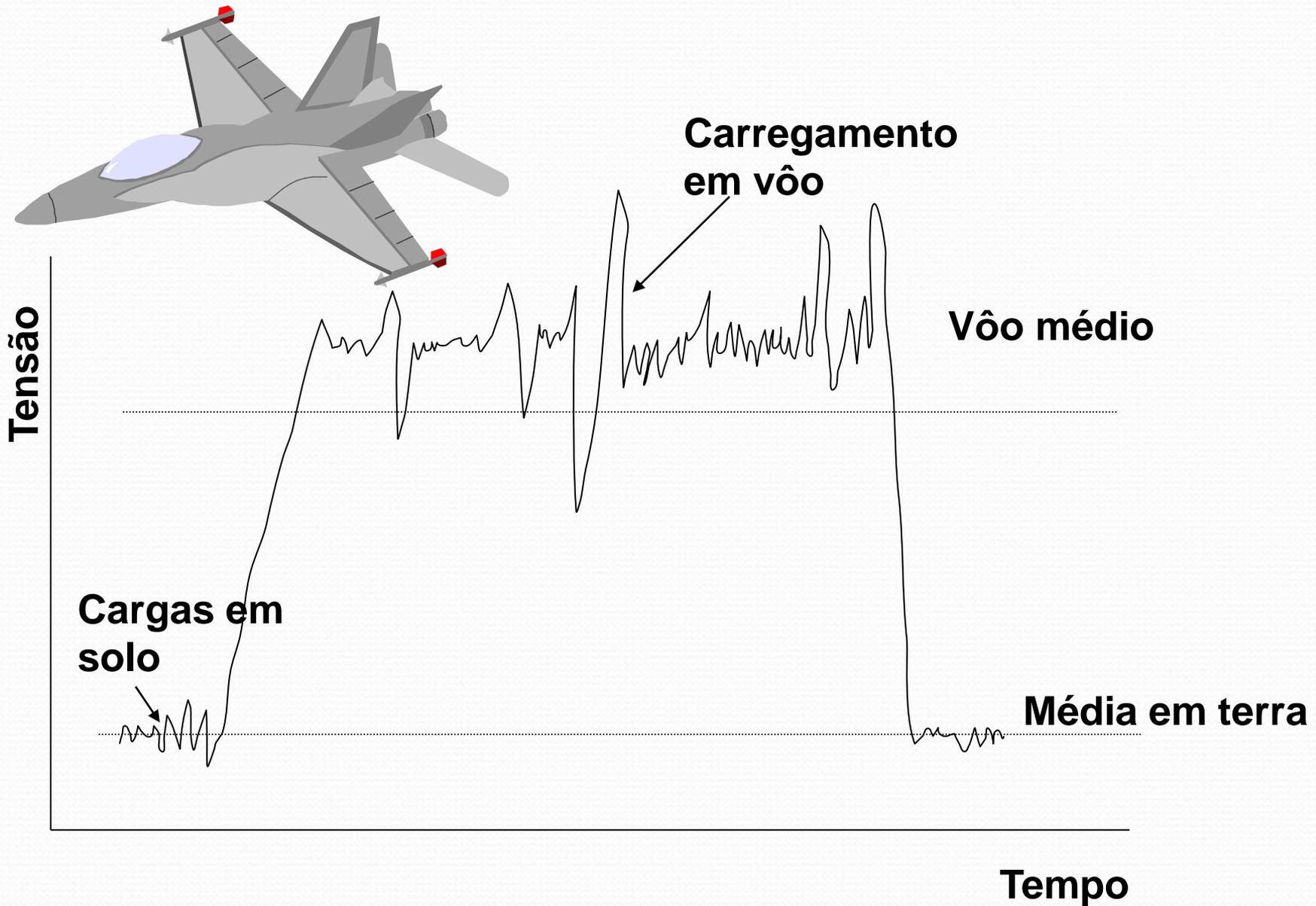




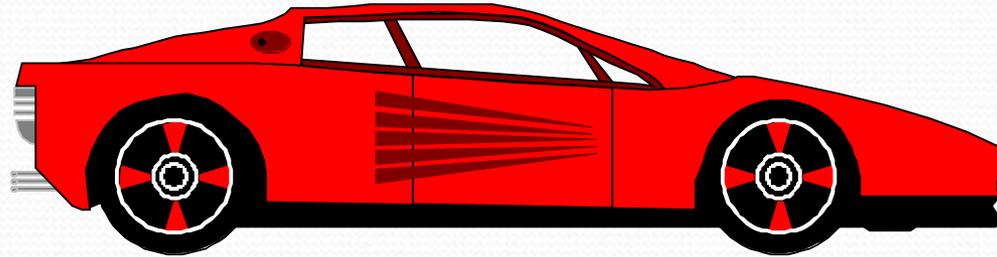
FADIGA S-N

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

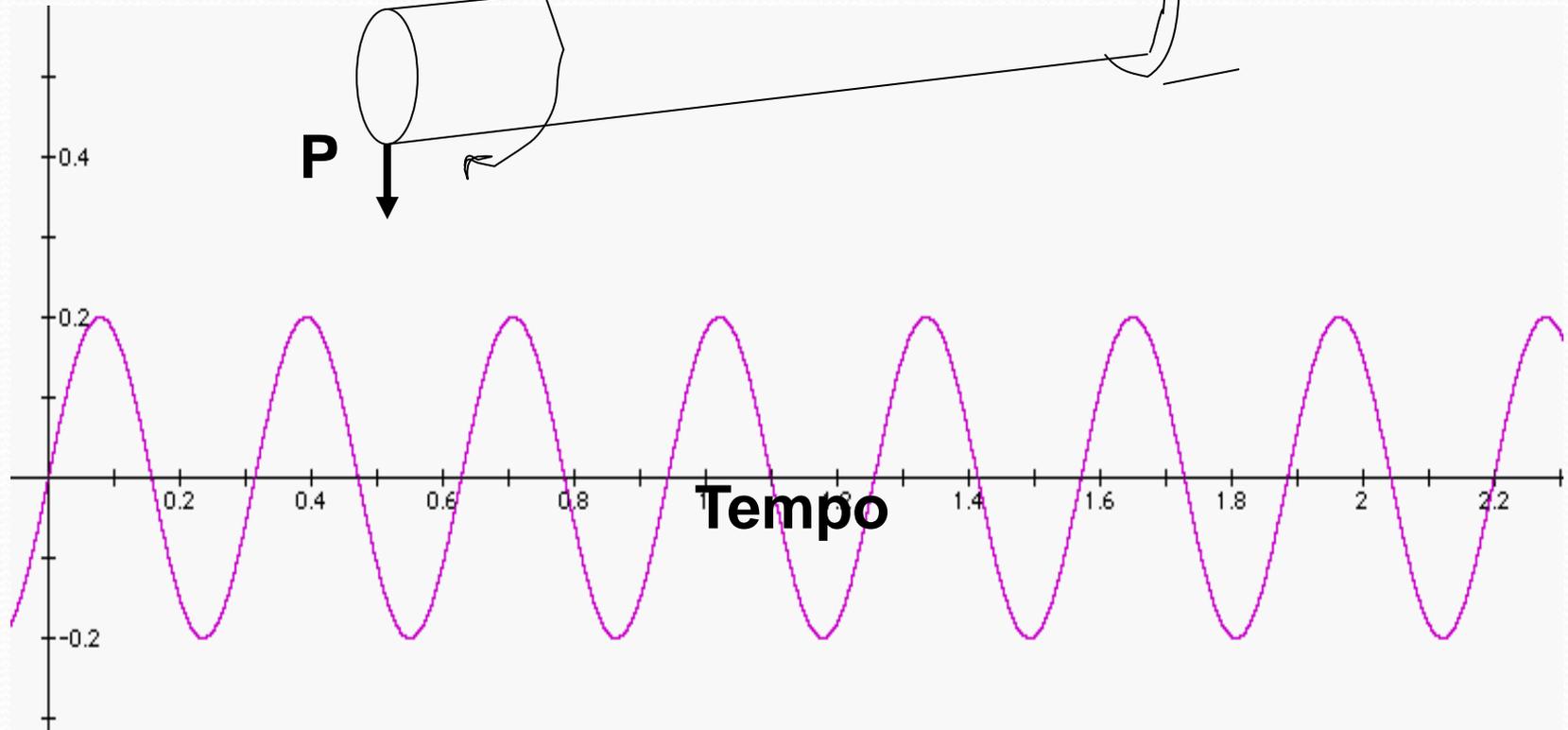
Veloci//
angular Ω

A

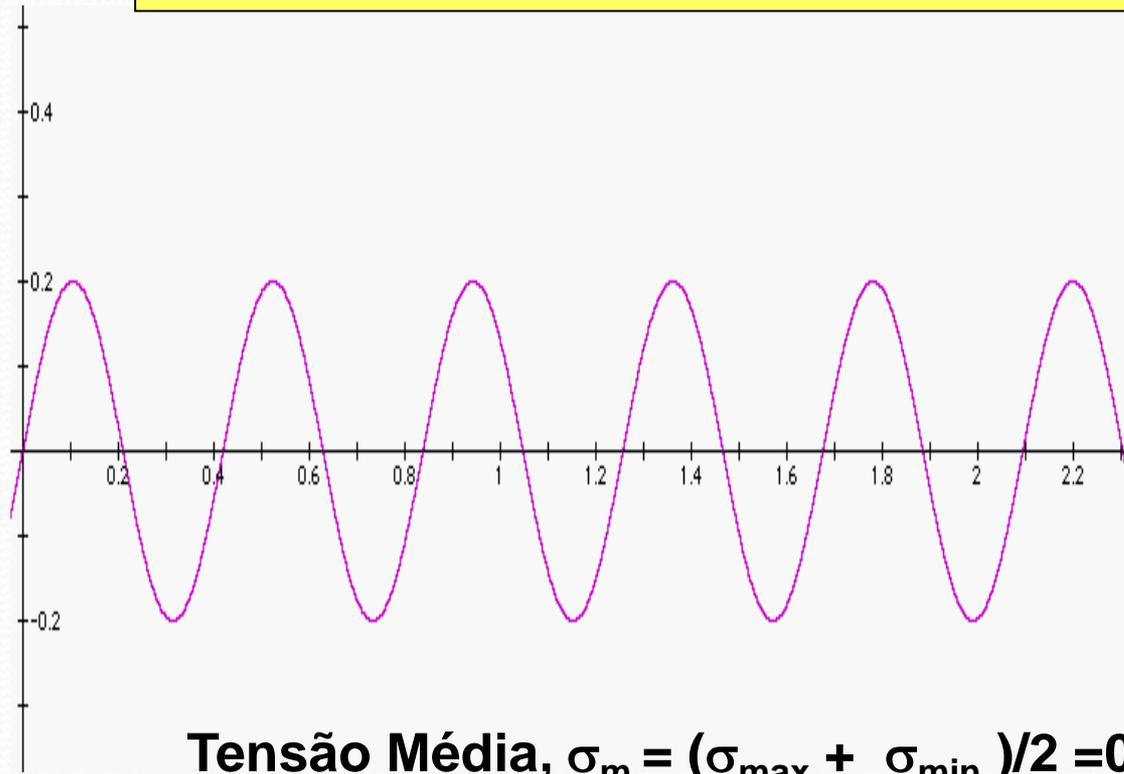
P

Ω

Tensão em A



Carregamentos completamente reversos



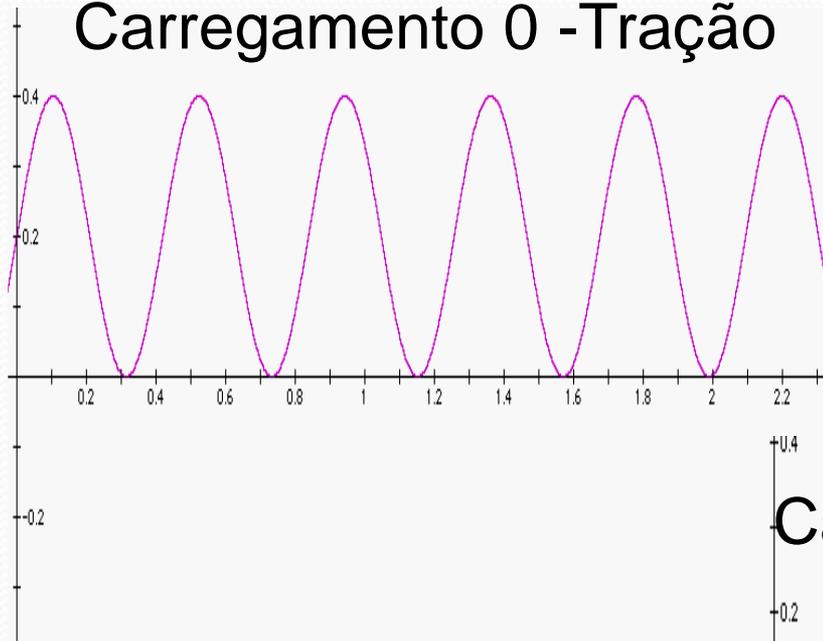
Tensão Média, $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2 = 0$

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



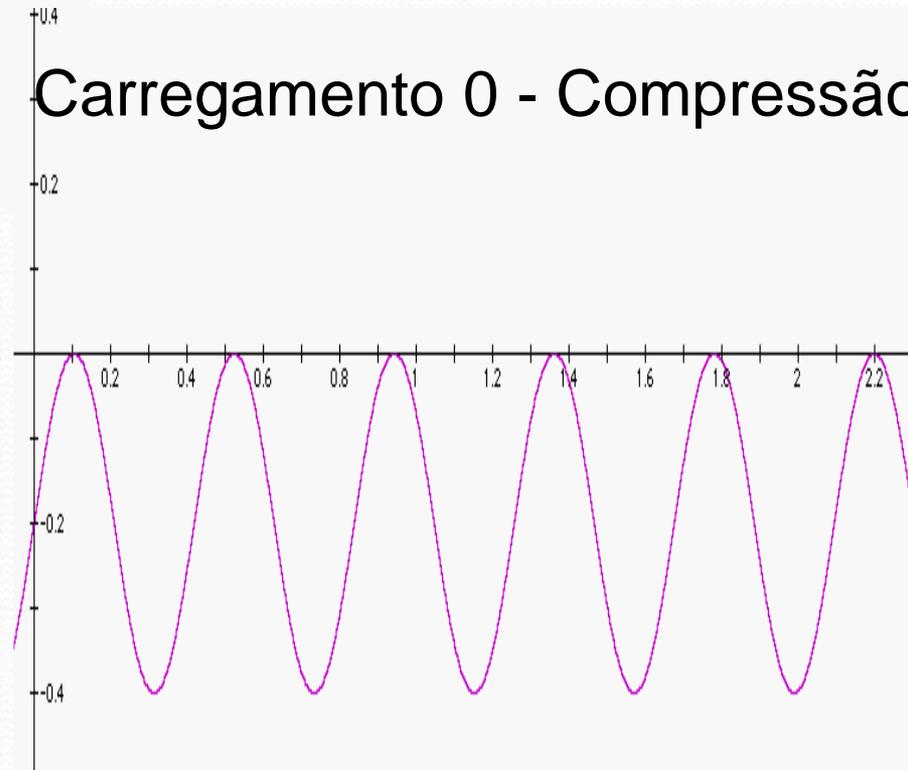
$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0$$

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

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

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

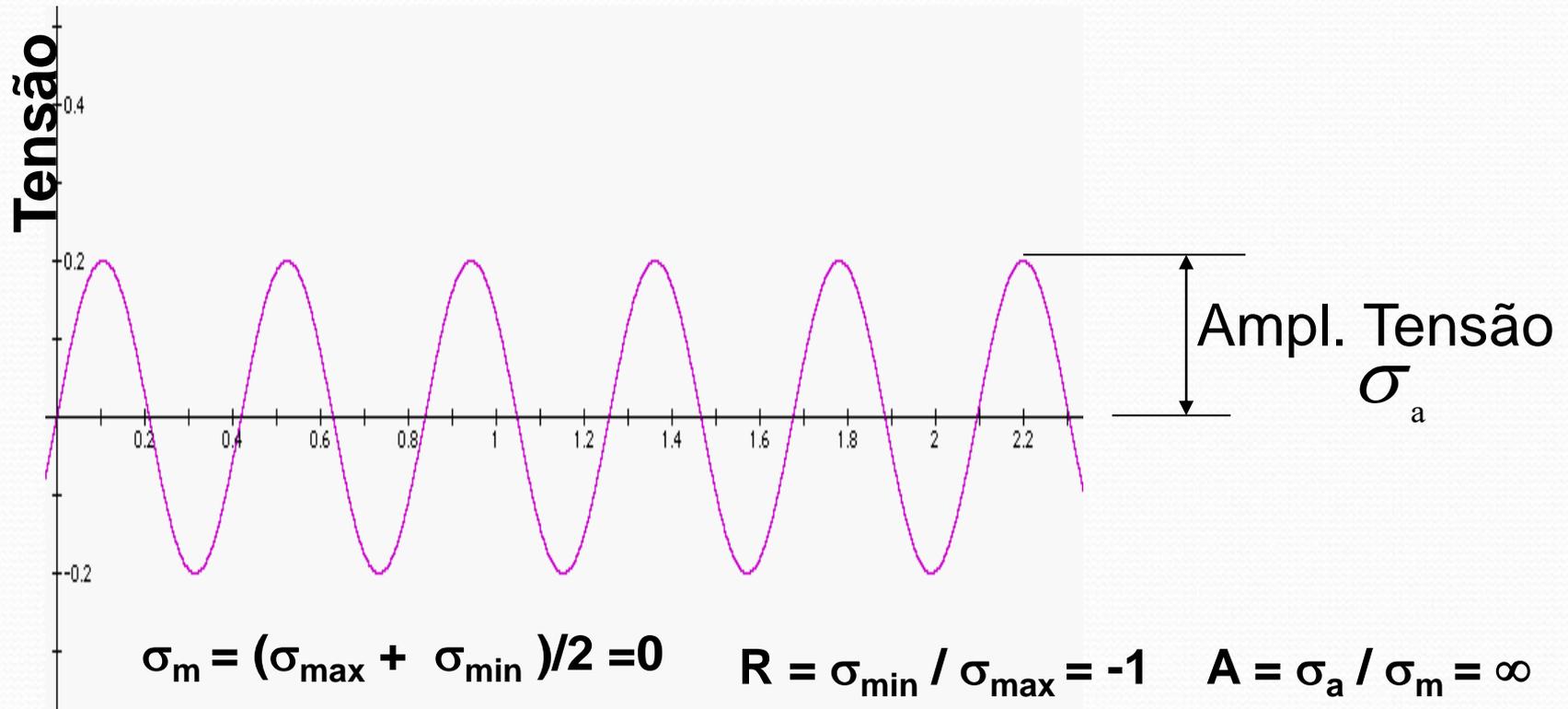
Carregamento 0 - Compressão



Propriedades de Fadiga

Os dados de fadiga são comumente apresentados:

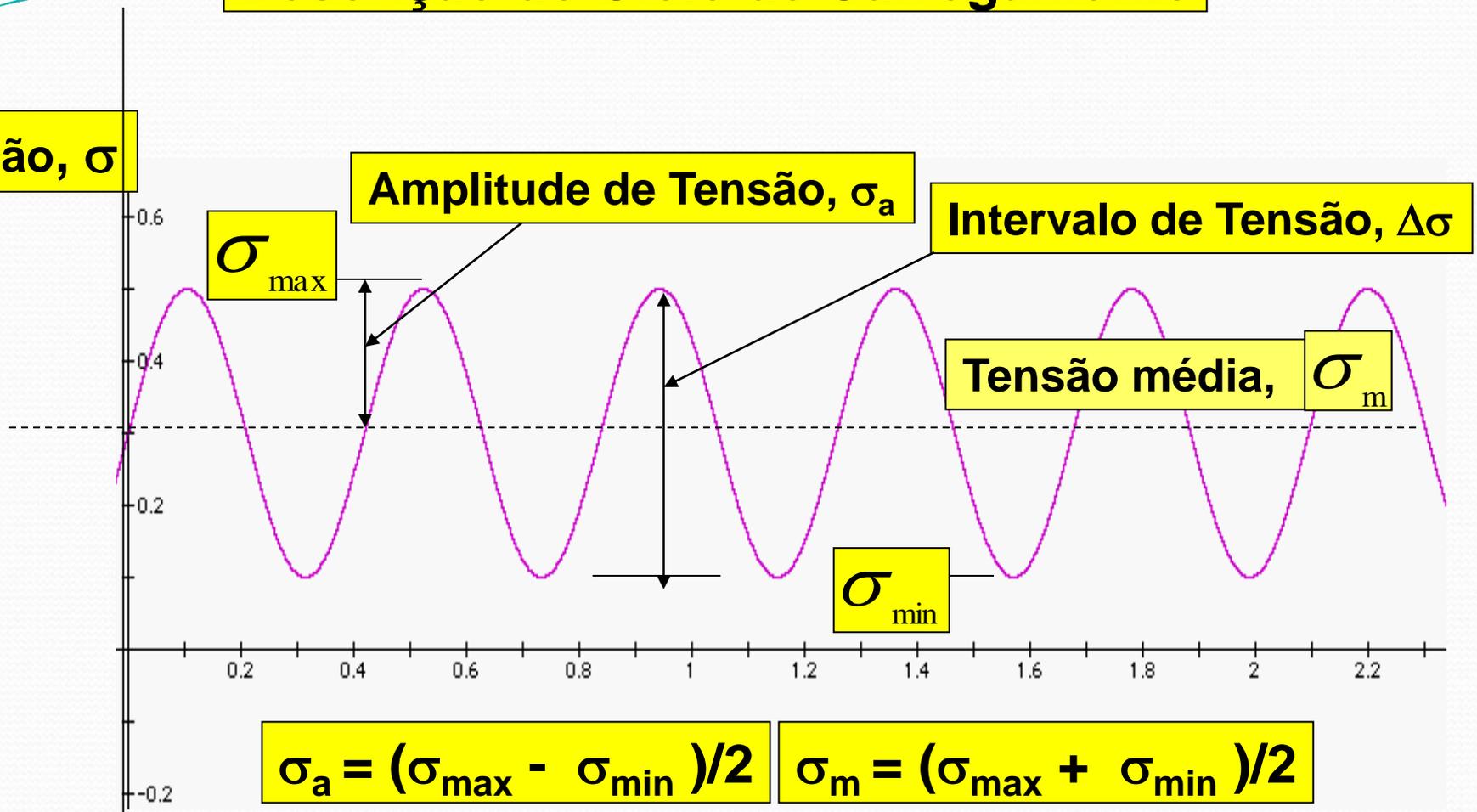
- para CP polidos;
- Sob flexão reversa.



DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Descrição do Ciclo de Carregamento

Tensão, σ



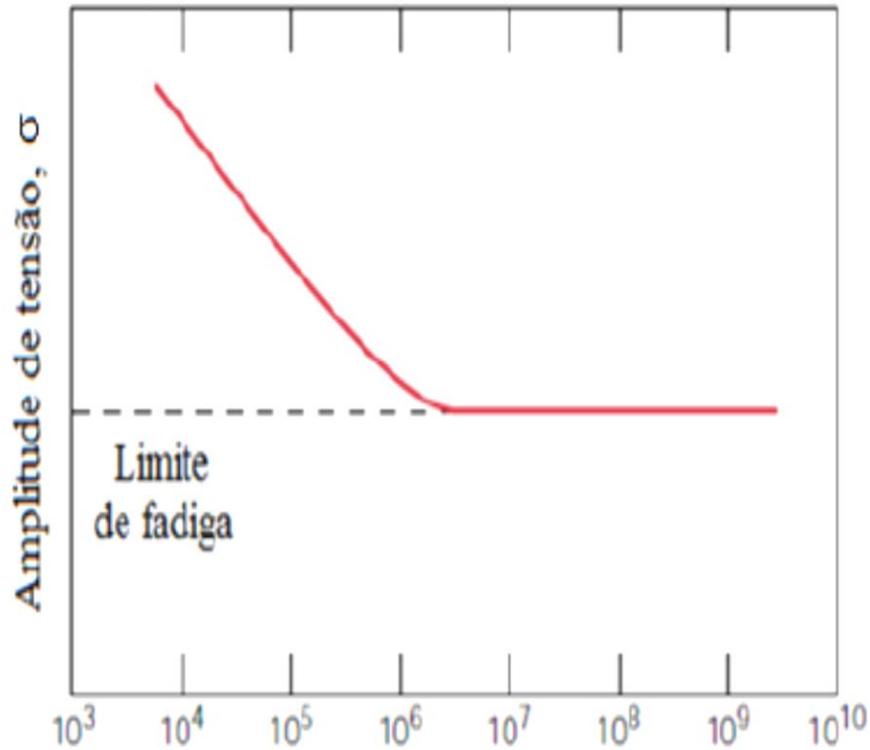
$\Delta\sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$

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

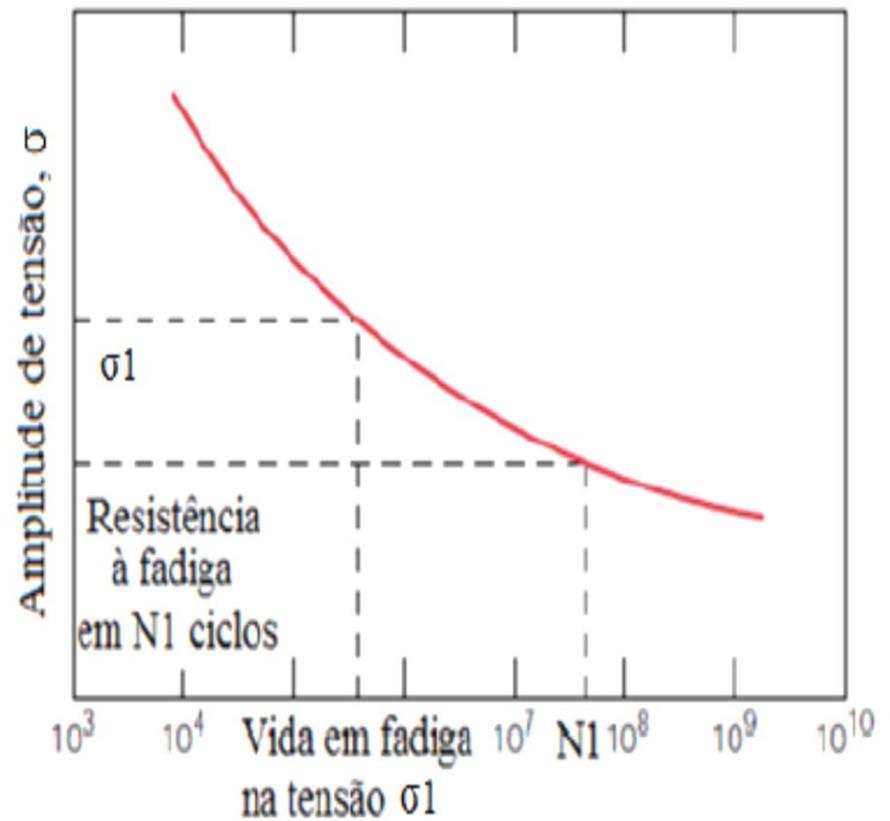
RAZÃO DE AMPLITUDE

$A = \sigma_a / \sigma_m$

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 (ϵ -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

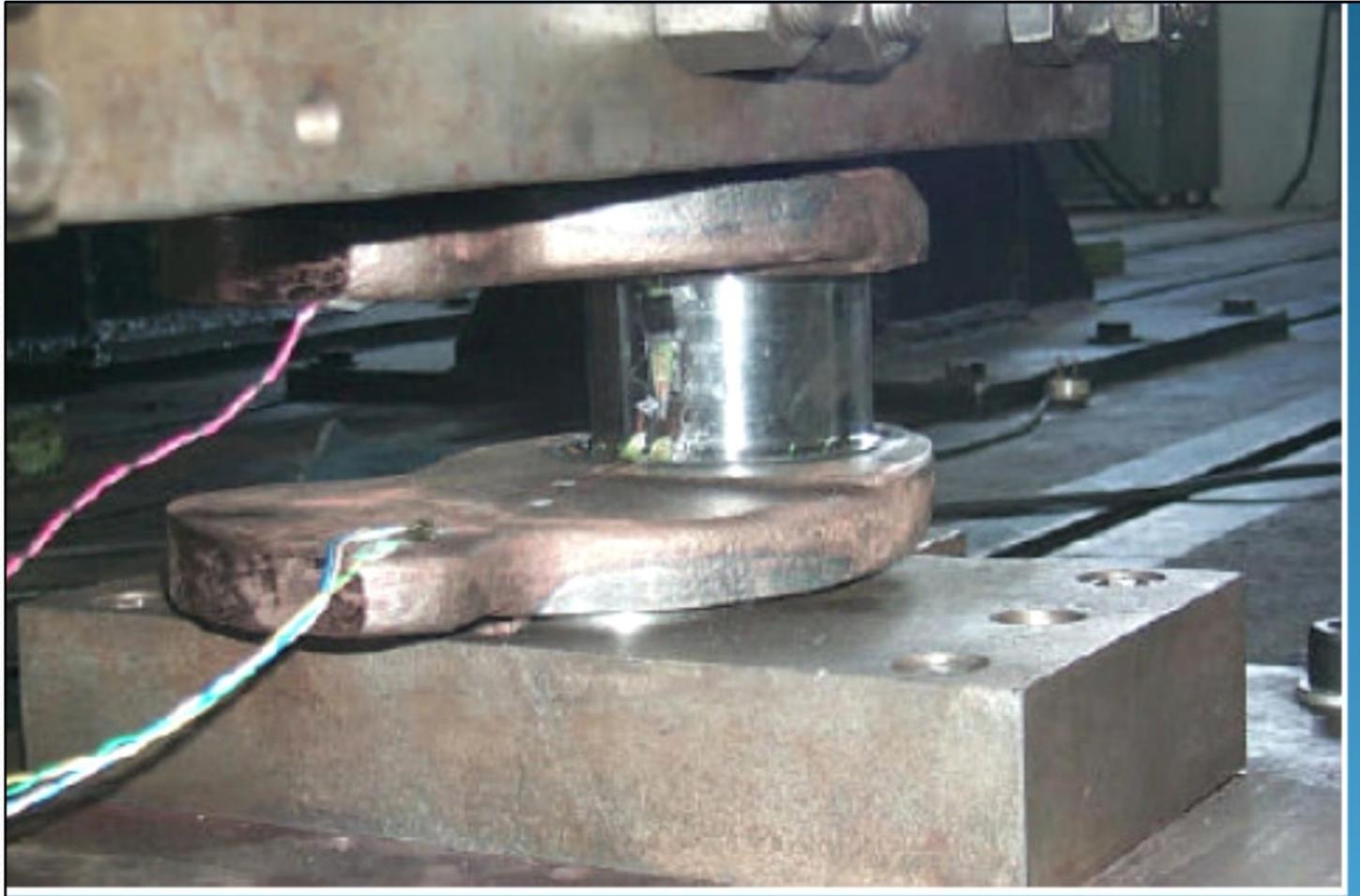
Condições de carregamento sensivelmente imprevisíveis, ou ao menos, não constantes. A vida selecionada para o projeto deve incluir uma margem de segurança para levar em consideração o carregamento

Falha Segura

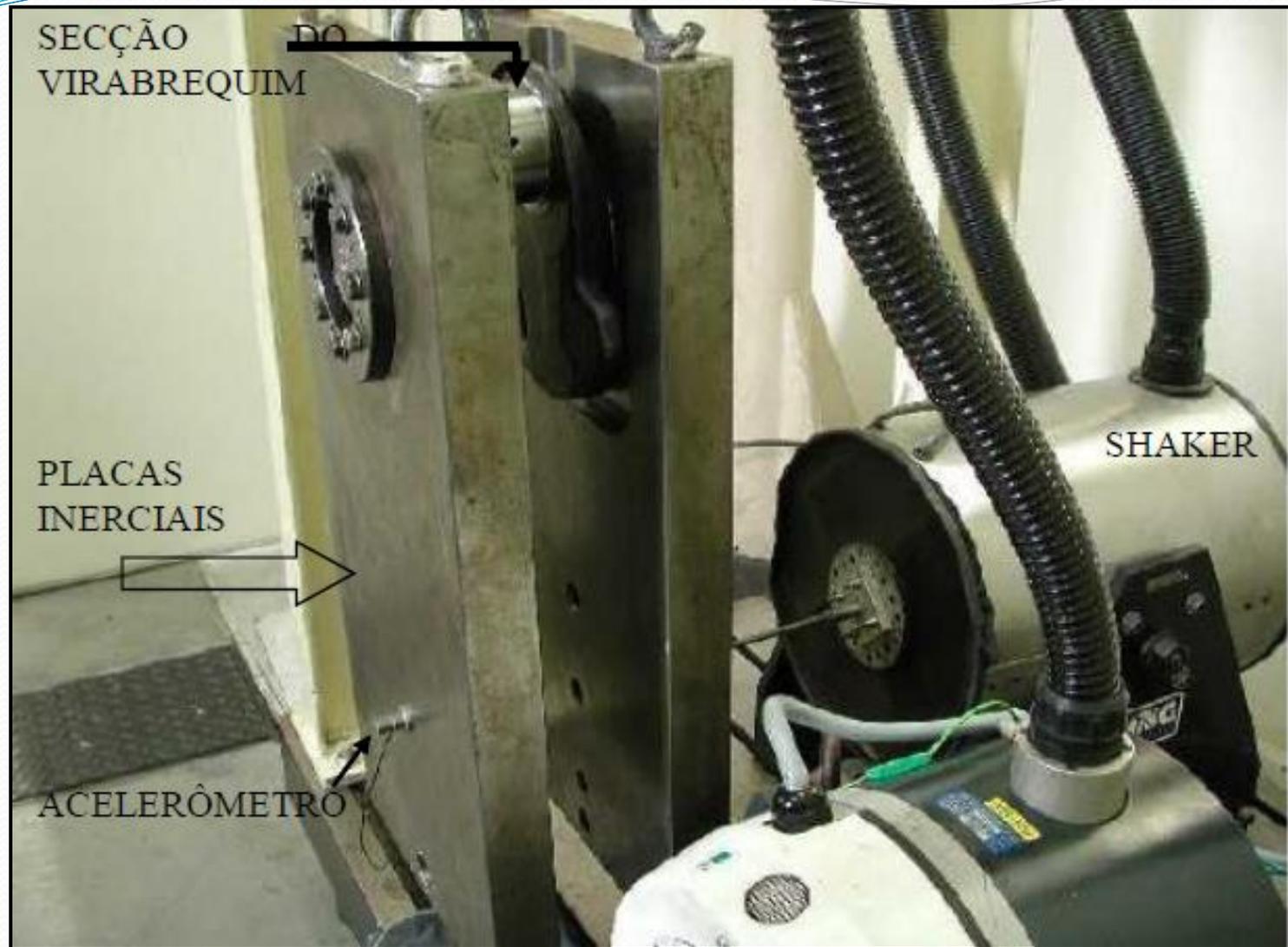
Este critério considera a possibilidade de ocorrência de trincas de fadiga, porém, sem levar ao colapso as estruturas antes destas fissuras serem detectadas e reparadas.

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

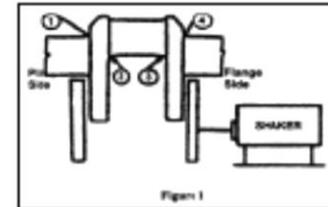
Fatigue Tests Control Data Sheet

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

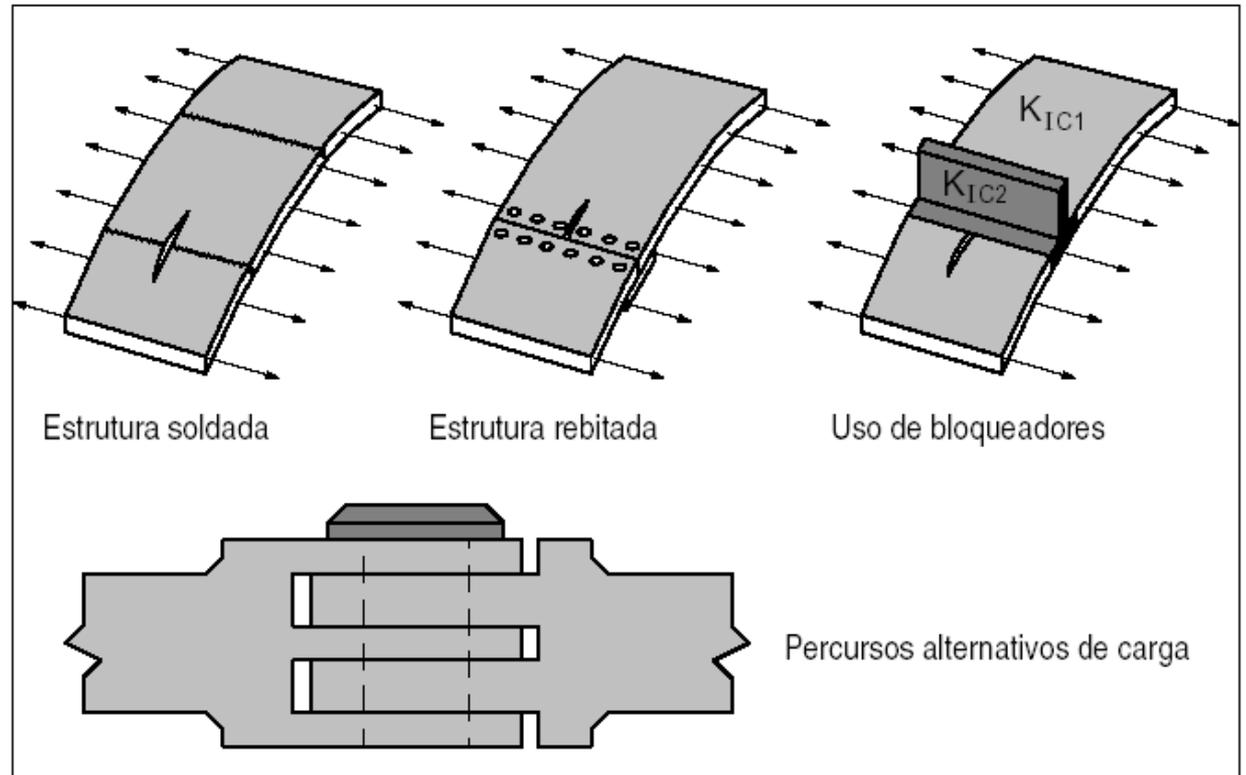
PROJETO PARA FALHA SEGURA PFS (FAIL SAFE)

- 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**.

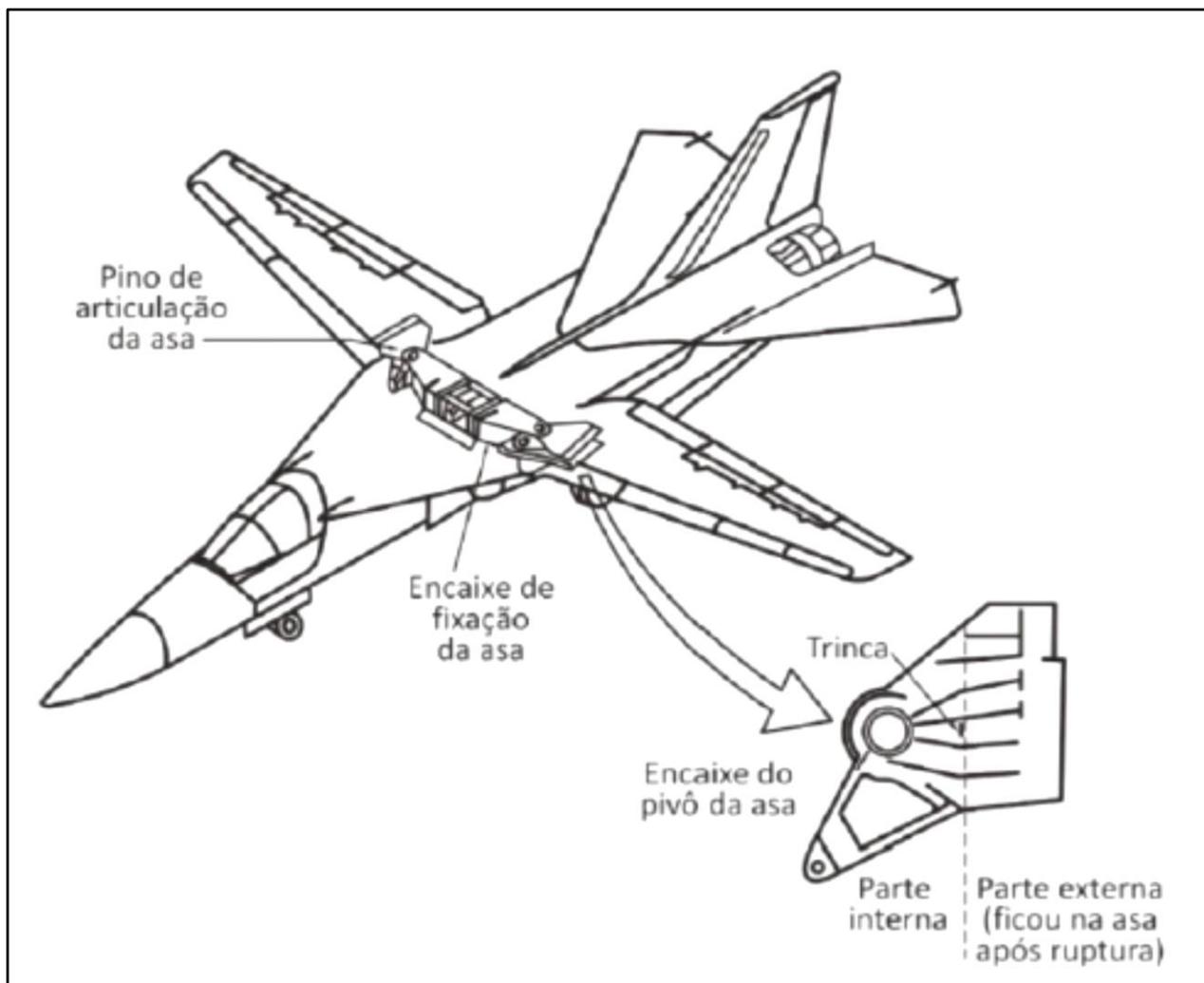
Alguns meios de possibilitar o comportamento "fail safe" em uma estrutura são: **introduzir bloqueadores de propagação**, ou elementos para impedir a propagação da trinca (crack arresters), usar uniões **rebitadas ou parafusadas** ao invés de soldadas, etc..

■ **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

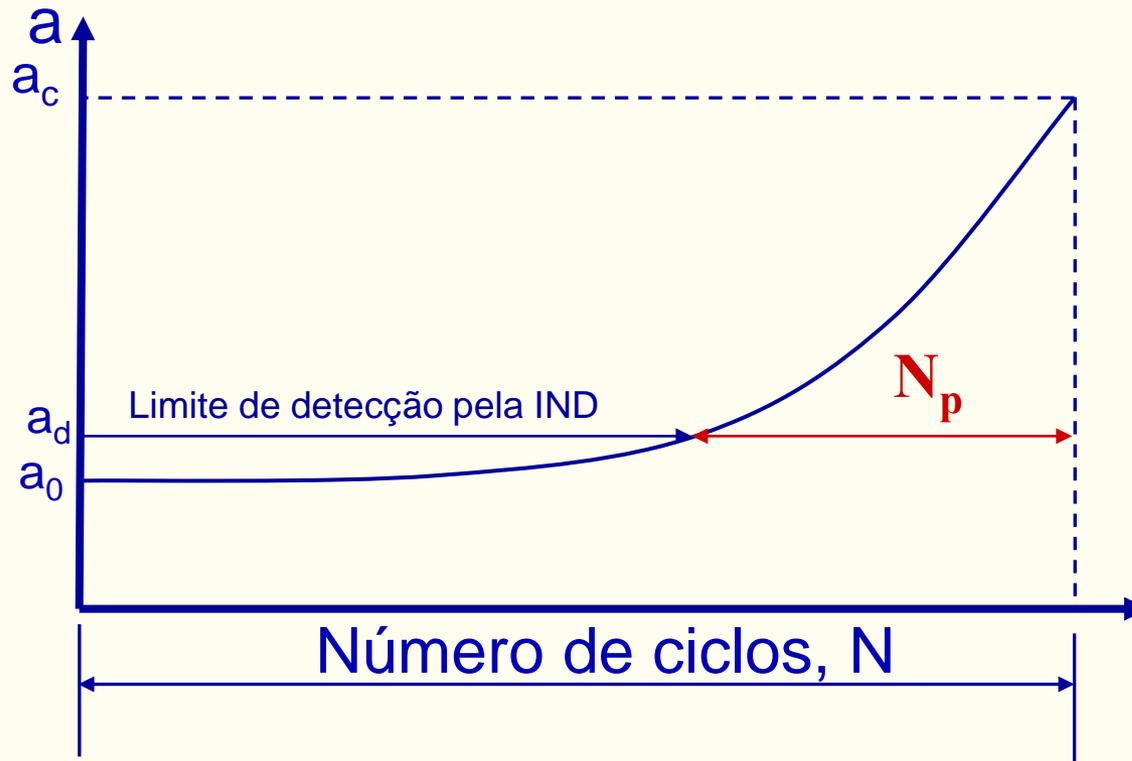
- Este critério é um **aperfeiçoamento** da filosofia "**fail safe**". Parte-se do **princípio** de que a estrutura **possui uma trinca**, seja por defeito de fabricação, seja devida à operação (fadiga, corrosão sob tensão, etc.), e com os conceitos da **Mecânica da Fratura** são desenvolvidos os projetos 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 $\sigma < \sigma_c$.

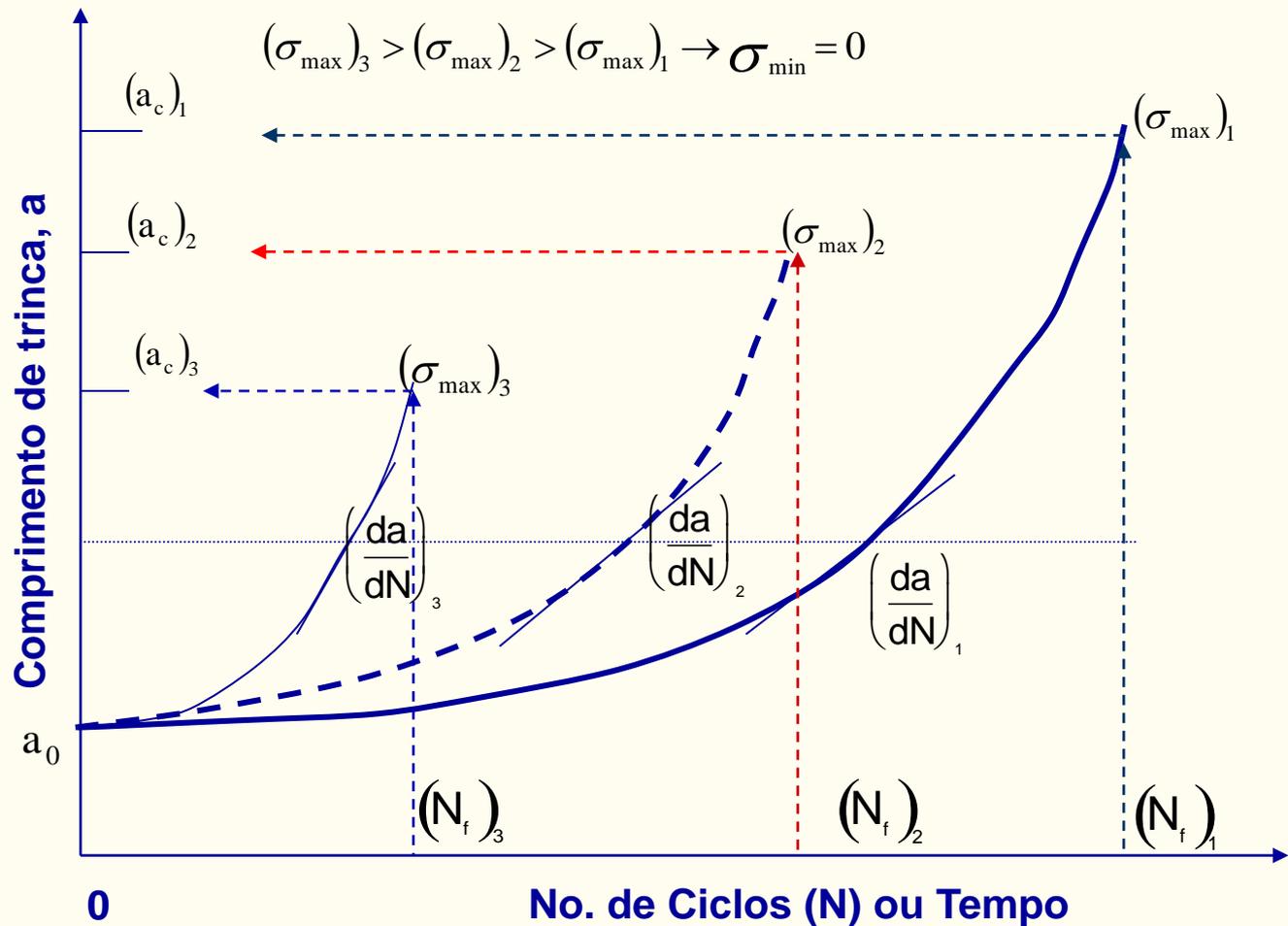


$a_d = ?$ (END, IND)

$a_c = ?$ (MFEL)

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

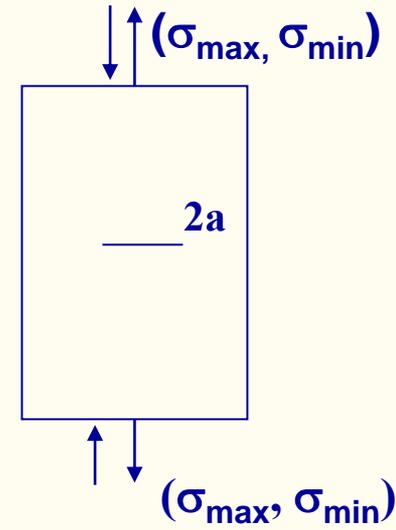
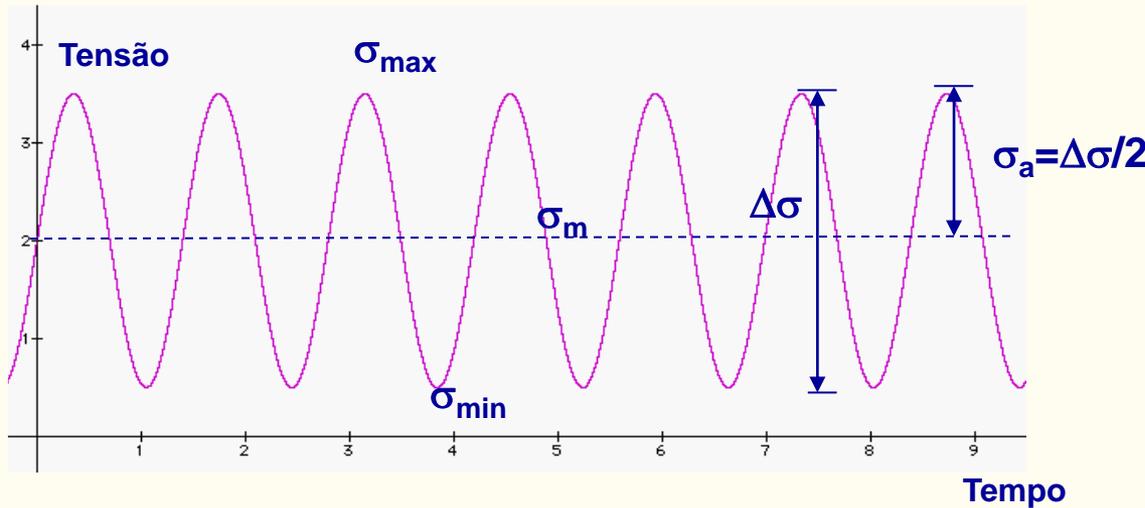
Taxa de Crescimento de Trinca Vs. Tensão



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.

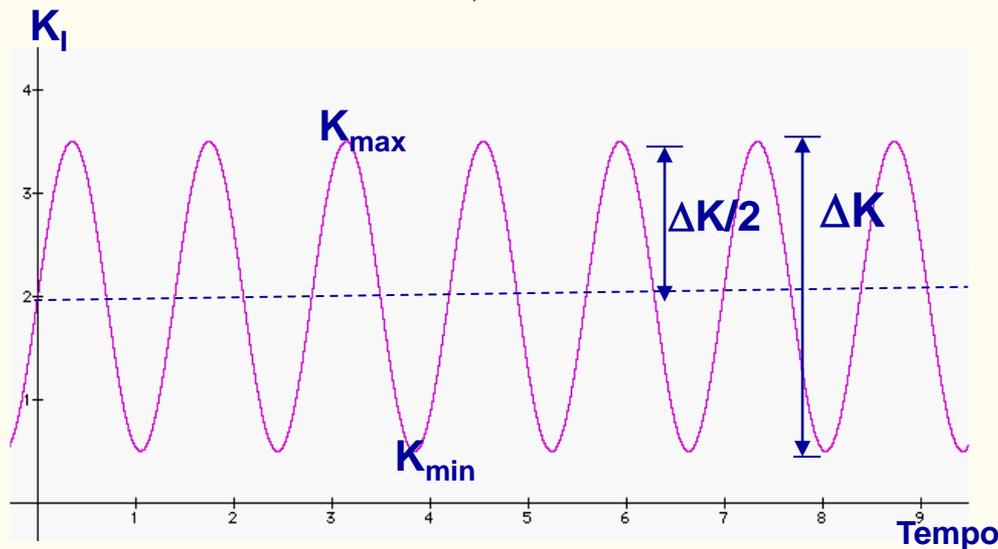
Parâmetros Utilizados na descrição do Crescimento de Trinca por Fadiga



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



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

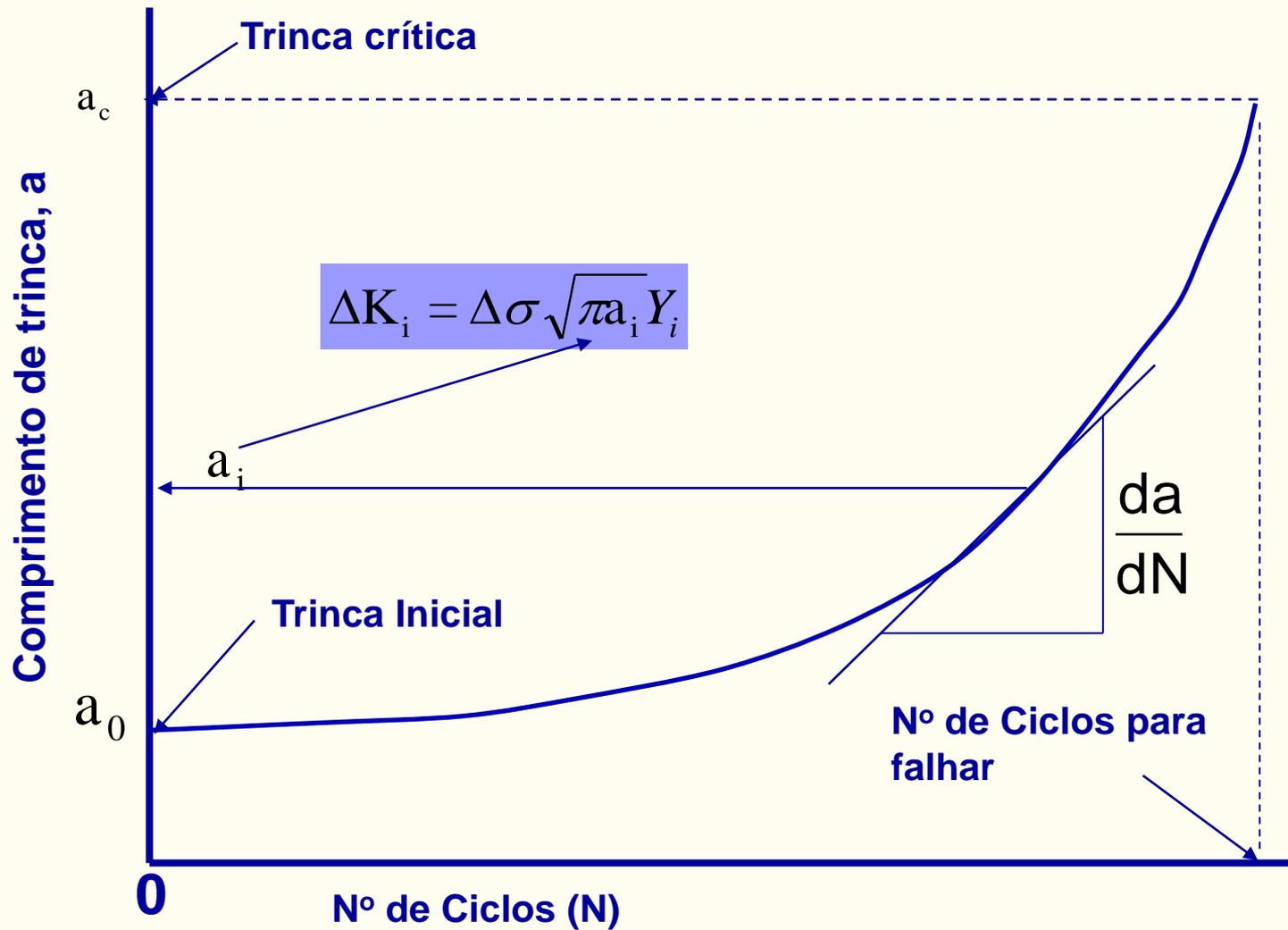


$$K_{max} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a}$$

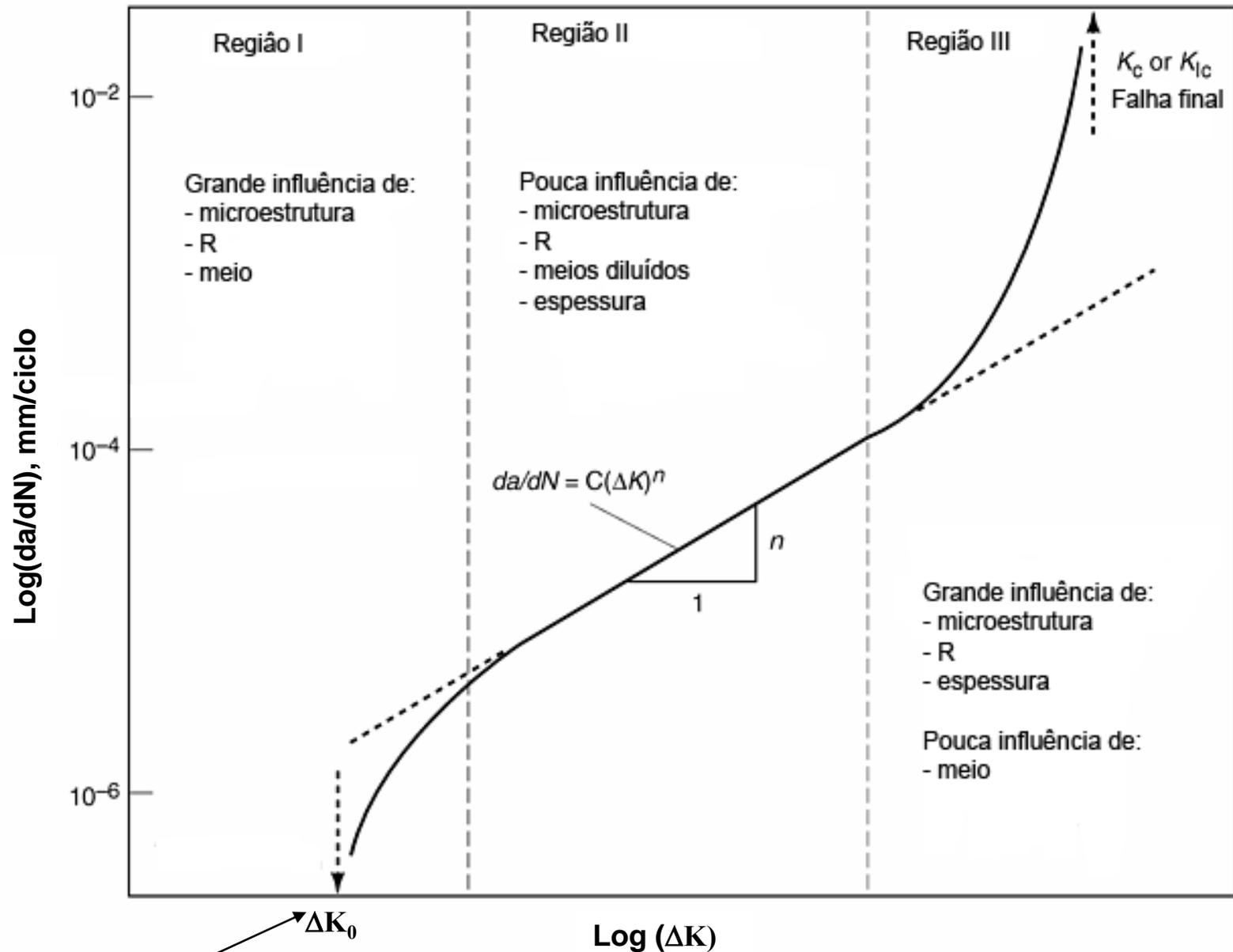
$$K_{min} = \sigma_{min} \sqrt{\pi a}$$

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

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



CURVA DE CRESCIMENTO DE TRINCA POR FADIGA



Al : 3 – 7 MPa m^{1/2}

Aço : 6 – 17 MPa m^{1/2}



- **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 (ΔK_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	6.9×10^{-12}	3.6×10^{-10}	3.0
Martensitic Steels	1.35×10^{-10}	6.6×10^{-9}	2.25
Austenitic Stainless Steels	5.6×10^{-12}	3.0×10^{-10}	3.25
Ni-Mo-V Steels	1.8×10^{-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, ΔK_{th} :

- **Abaixo de ΔK_{th} , o crescimento de trinca por fadiga**
- **não ocorre**
- **Para vários aços , têm-se as relações abaixo:**

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

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

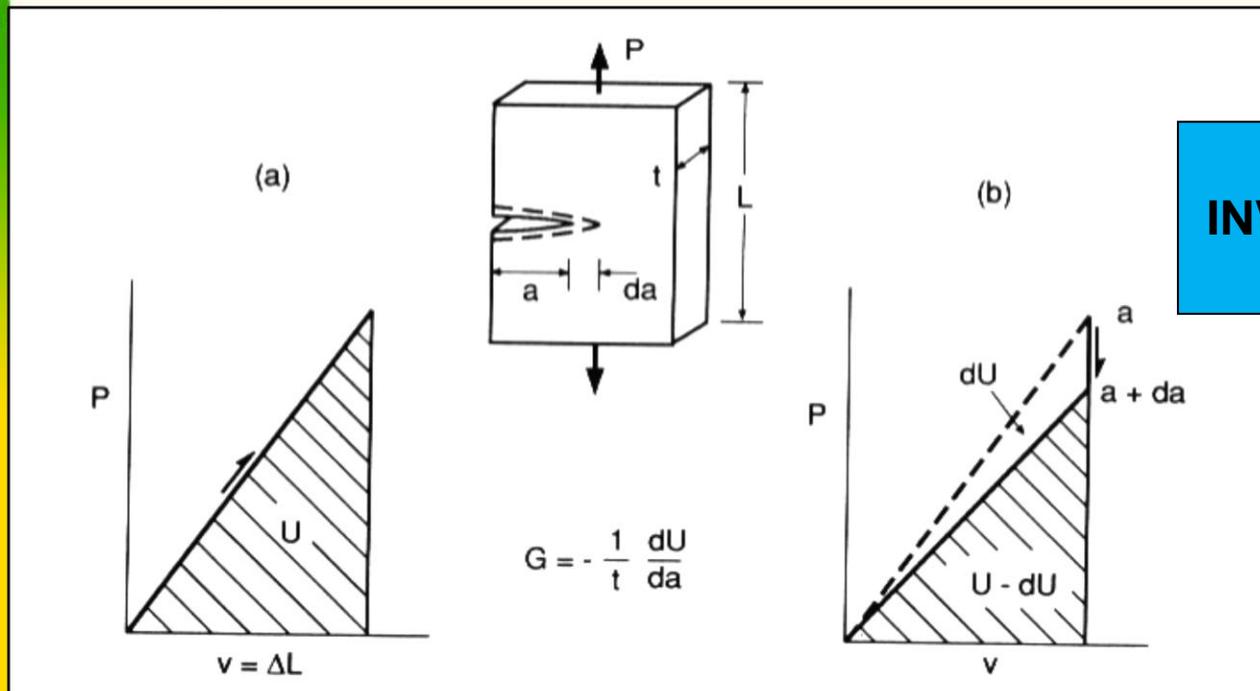
ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CRESCIMENTO DA TRINCA POR FADIGA

- 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.**

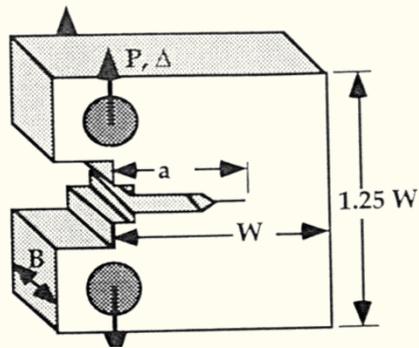
- O ensaio é controlado pelo **compliance** (*inverso da rigidez*), que é uma forma de controlar o ensaio pelo nível de tensão;
- **Quando a trinca se propaga (da), a rigidez do material decresce e a energia potencial decresce de dU;**
- G é a taxa de variação da energia potencial por unidade de área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



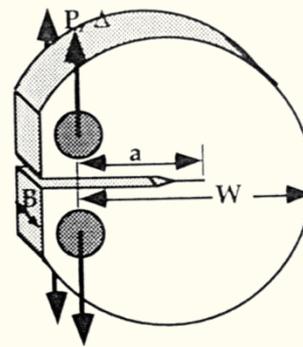
**COMPLIANCE:
INVERSO DA RIGIDEZ
 $C = \Delta V / \Delta P$**

CORPOS DE PROVA

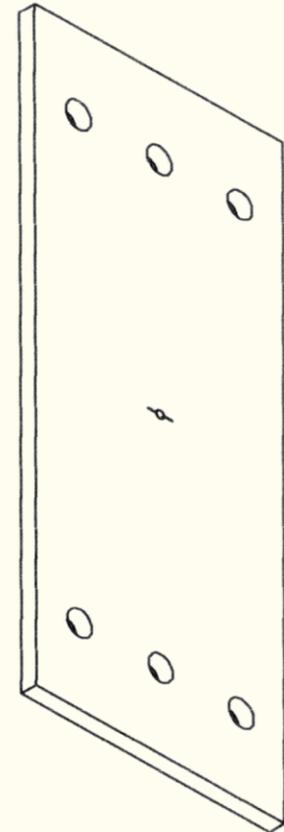
- NORMA: ASTM E647- 05
- CORPOS DE PROVA MAIS UTILIZADOS:
 - COMPACTO – CT
 - DISCO – DCT
 - CHAPA – CCT OU M(T)



CT

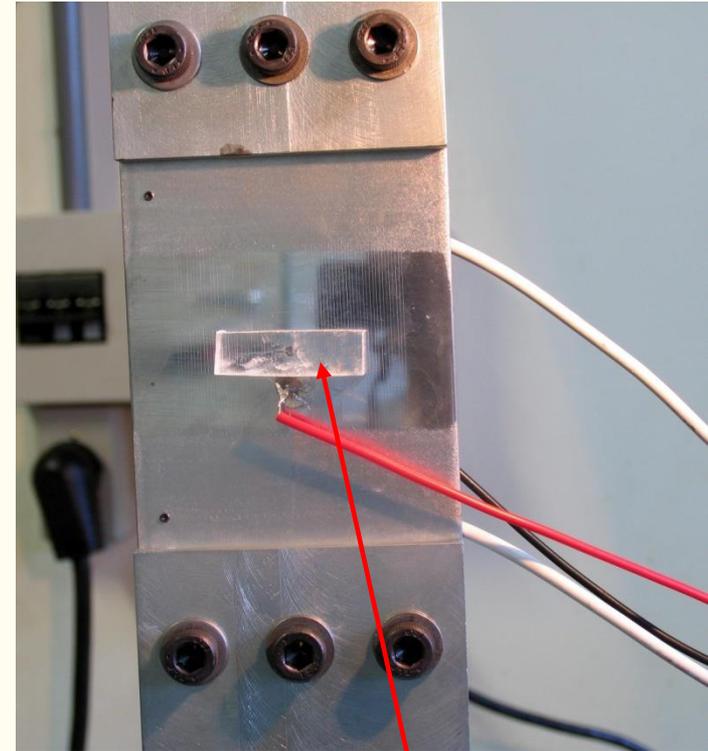
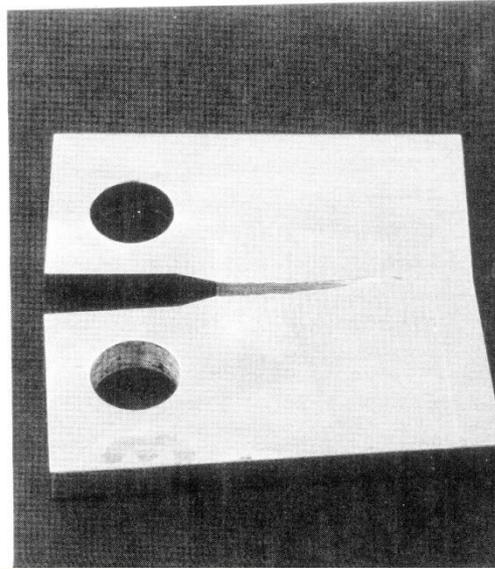
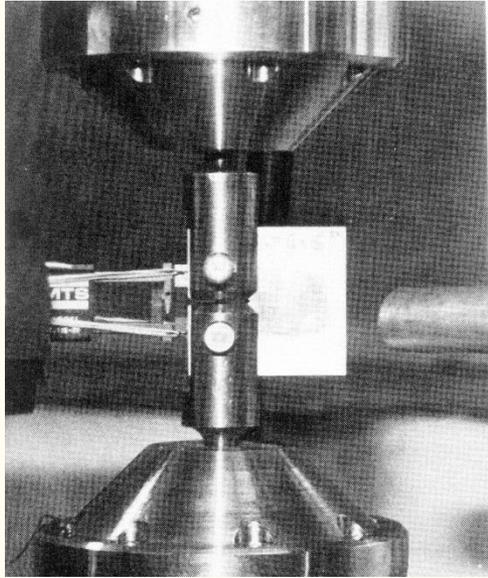


DCT



CCT OU M(T)

TÉCNICAS MAIS UTILIZADAS PARA DETERMINAÇÃO DE a



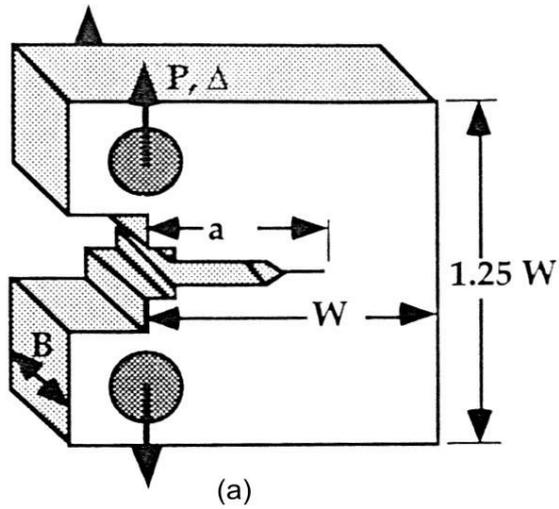
compliance



Réplica de acetato

Queda de Potencial

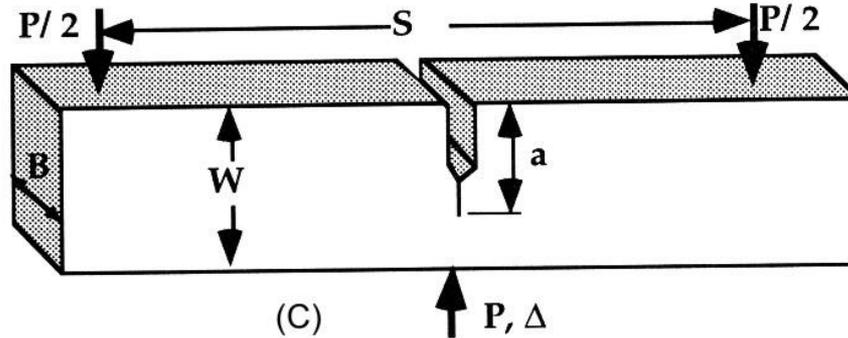
C(T)



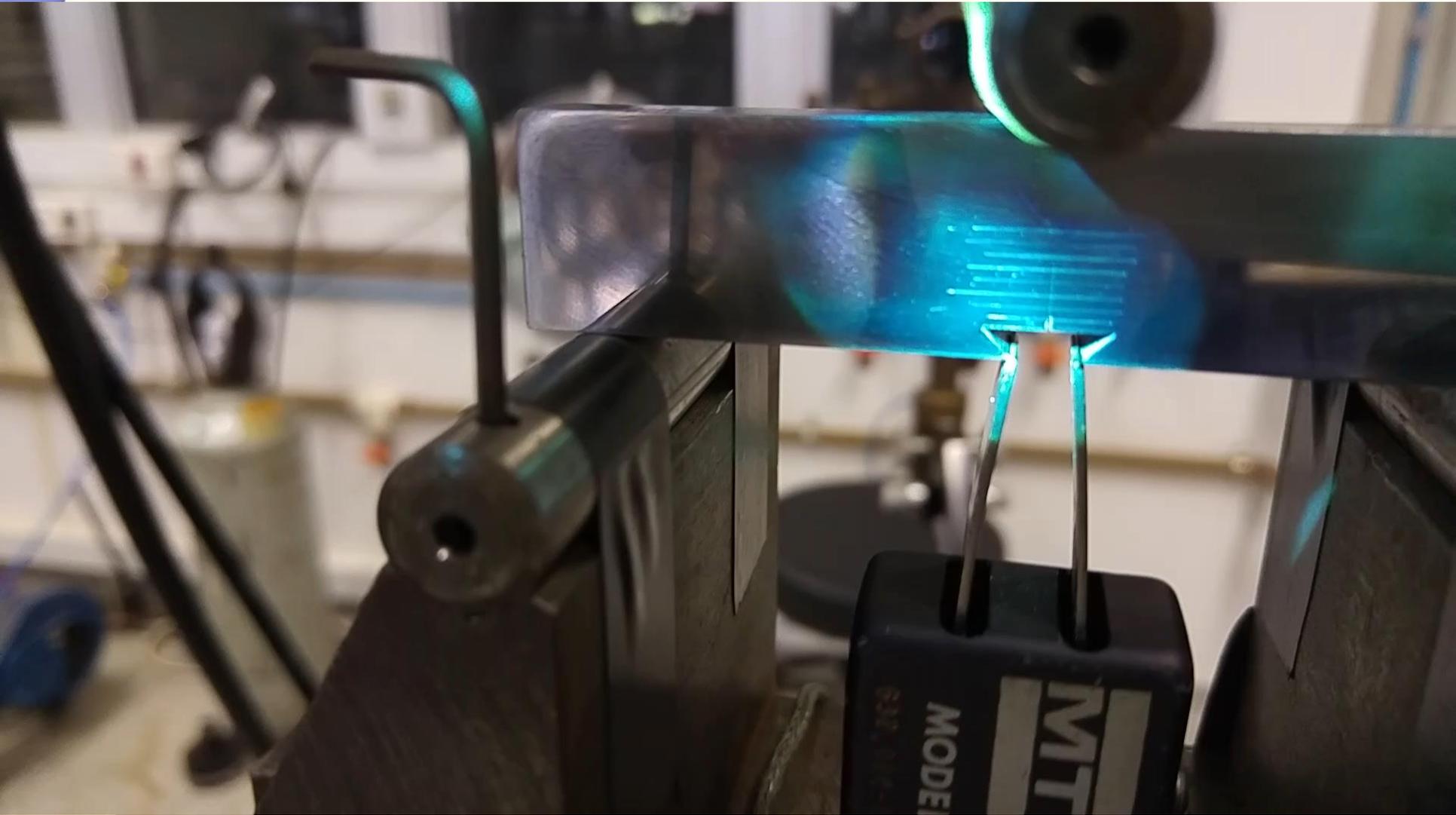
$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} Y$$

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

SEN(B)

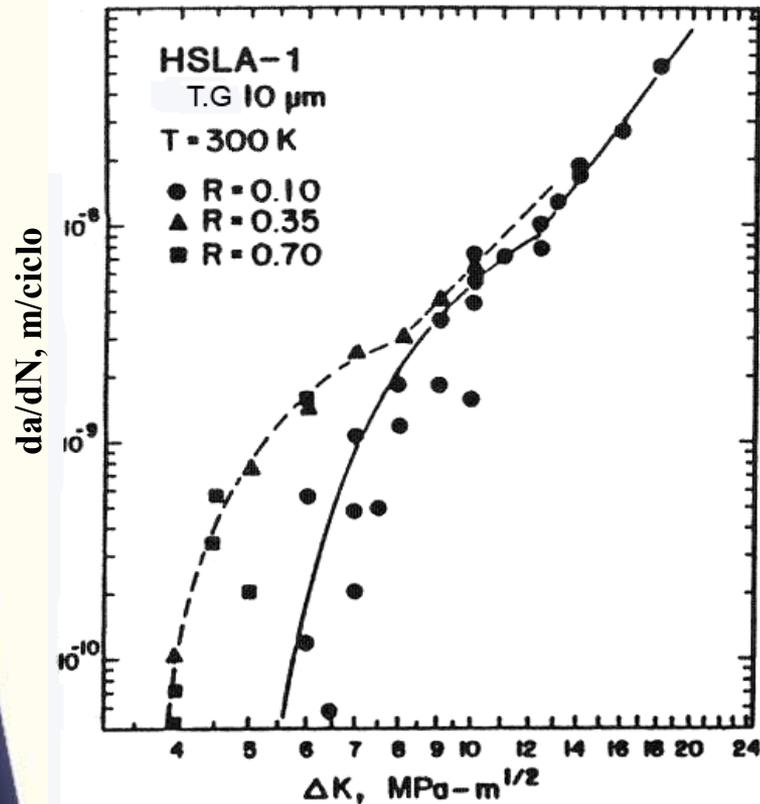


$$Y = f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left\{ 2,15 - 3,93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right\} \right]$$

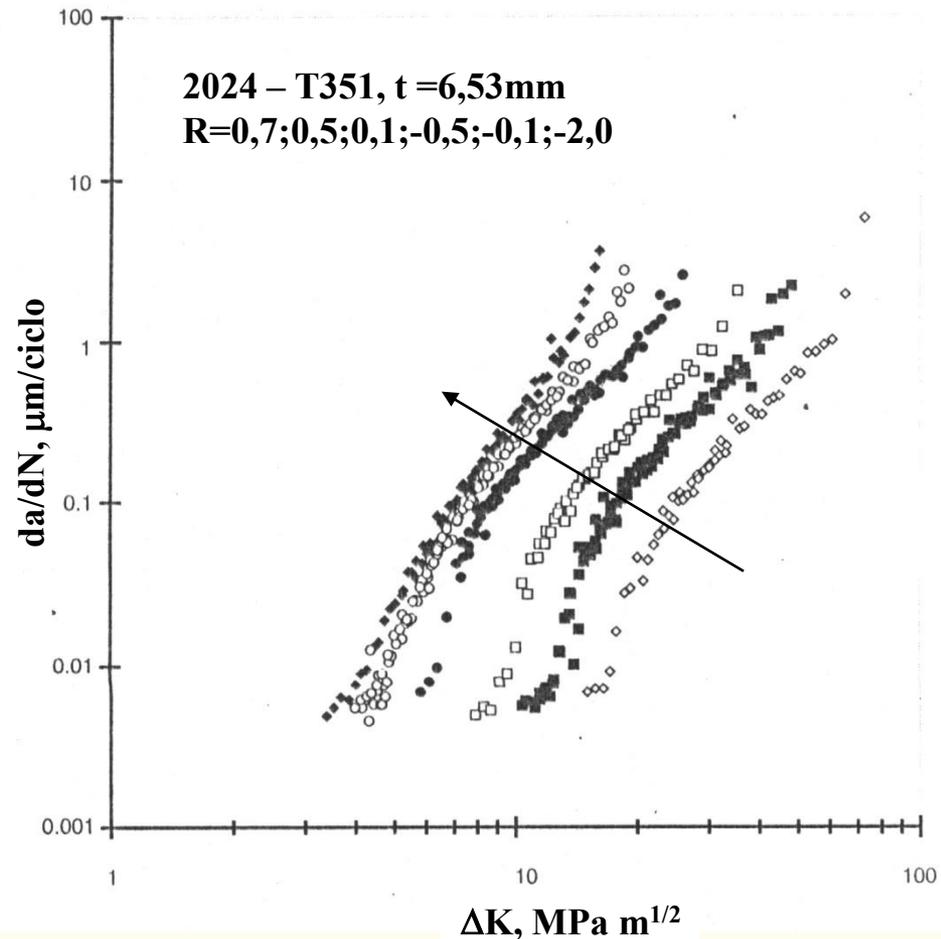


Influência da Razão de Carga, R

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

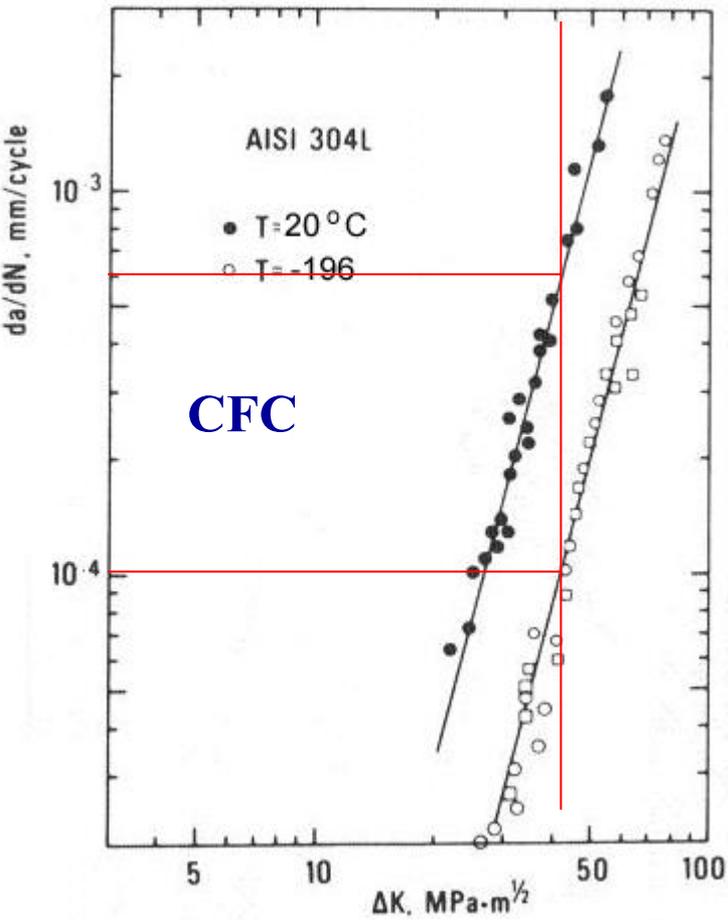


Esaklul, K.A et al (1984)



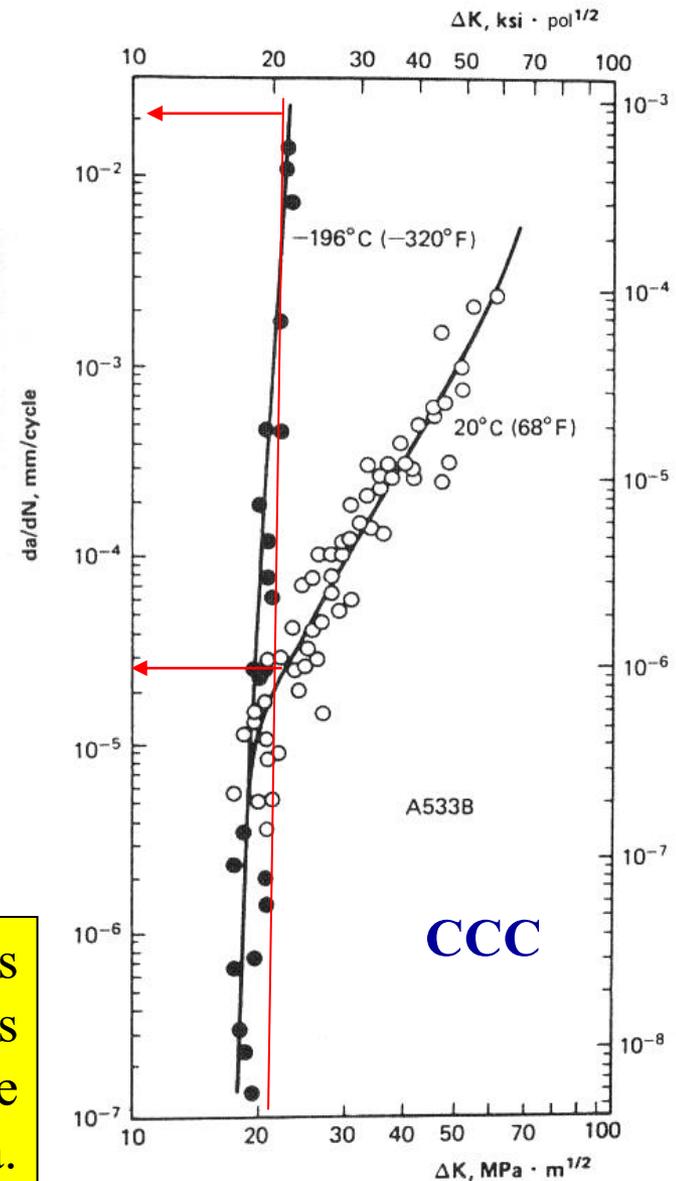
A. F. Liu (1986)

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

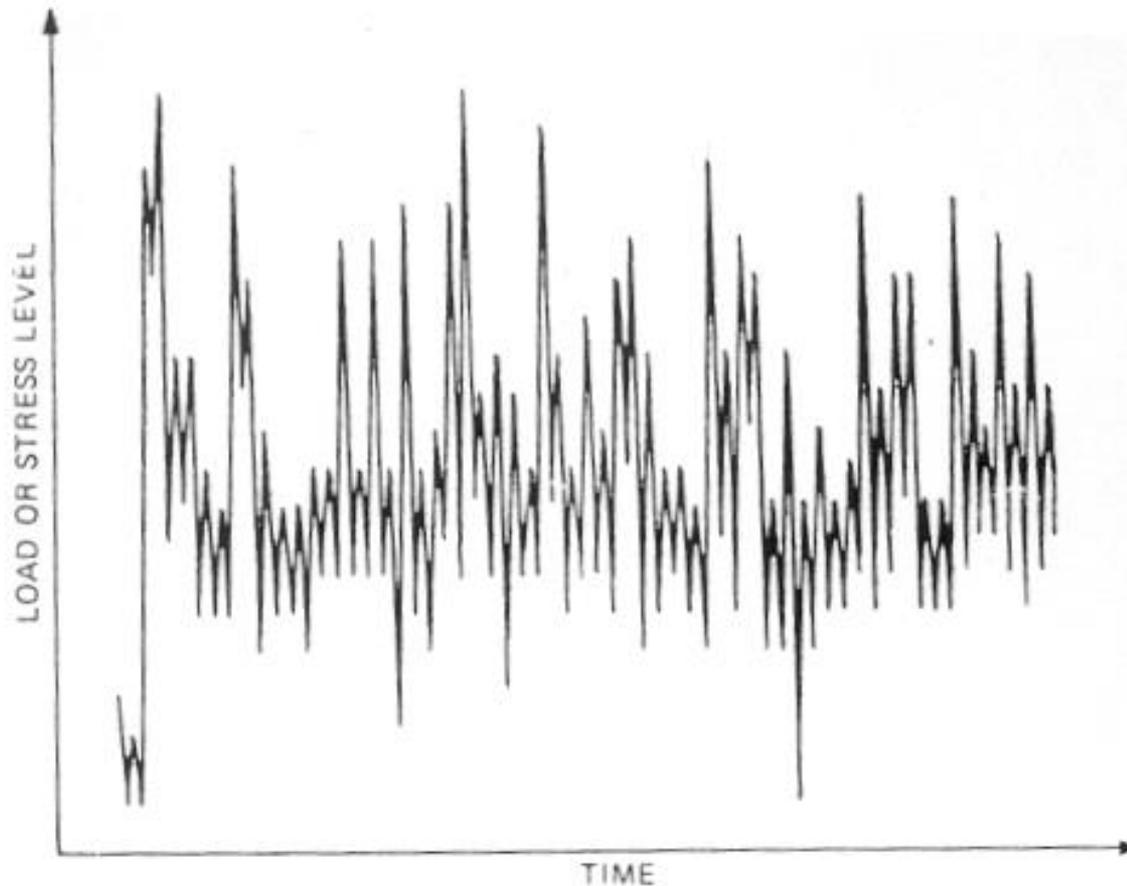


Figure 9.11. Example of a fairly random cyclic load history (part of a flight for a tactical aircraft).

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

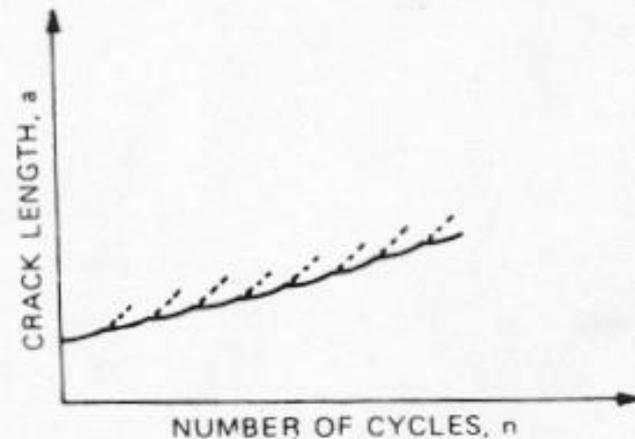
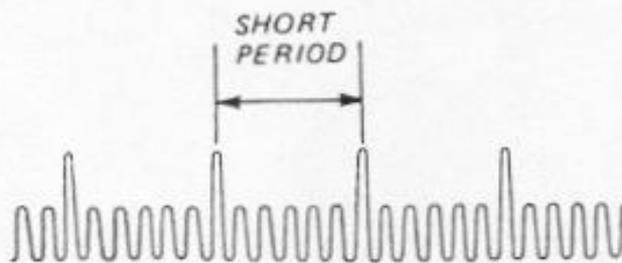
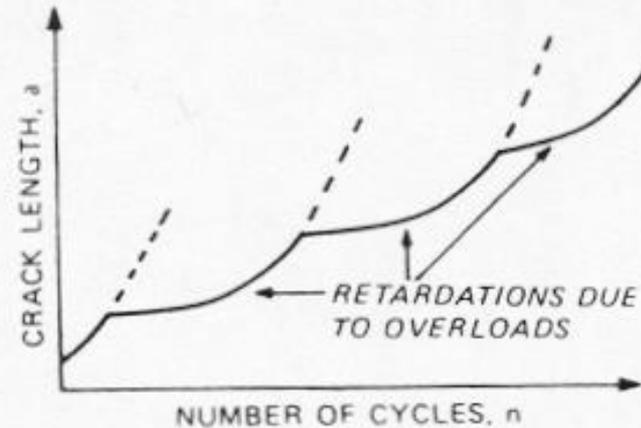
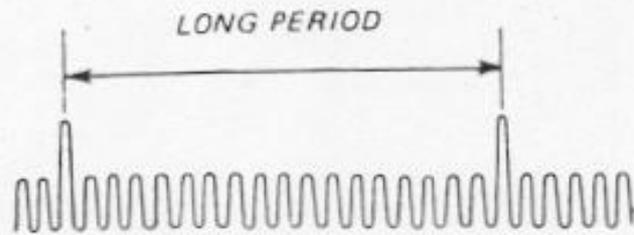


Figure 9.15. Effect of peak load recurrence period on the crack growth curve.

FIM