

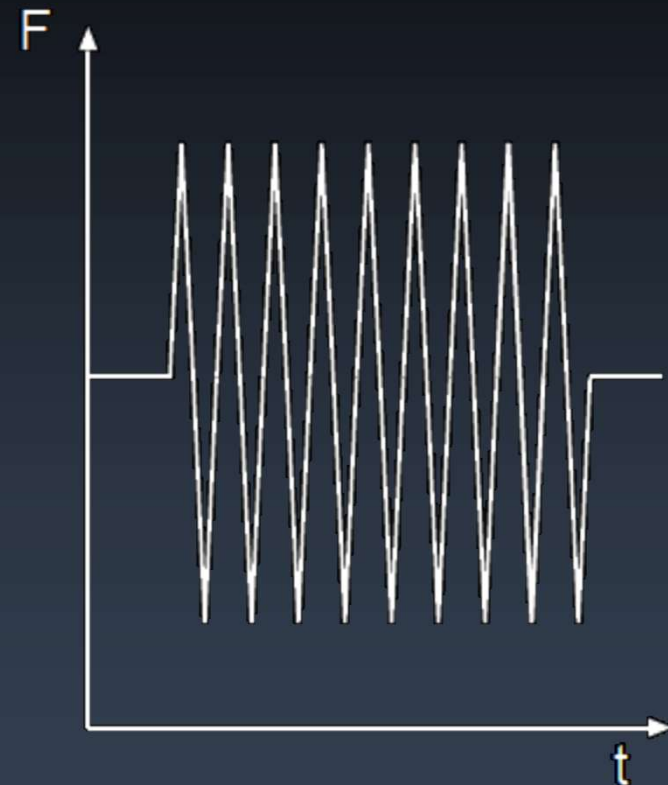
FADIGA

Esforços Dinâmicos

- Alteração no sentido de solicitação pode causar alterações no comportamento mecânico
- História ou caminho de carregamento ou deformação pode influenciar a resposta do material (ainda que o valor de ϵ seja independente do caminho)
- Esforços cuja direção de solicitação varia ao longo do tempo são chamados de *Esforços Dinâmicos*.

Modos de carregamento cíclico

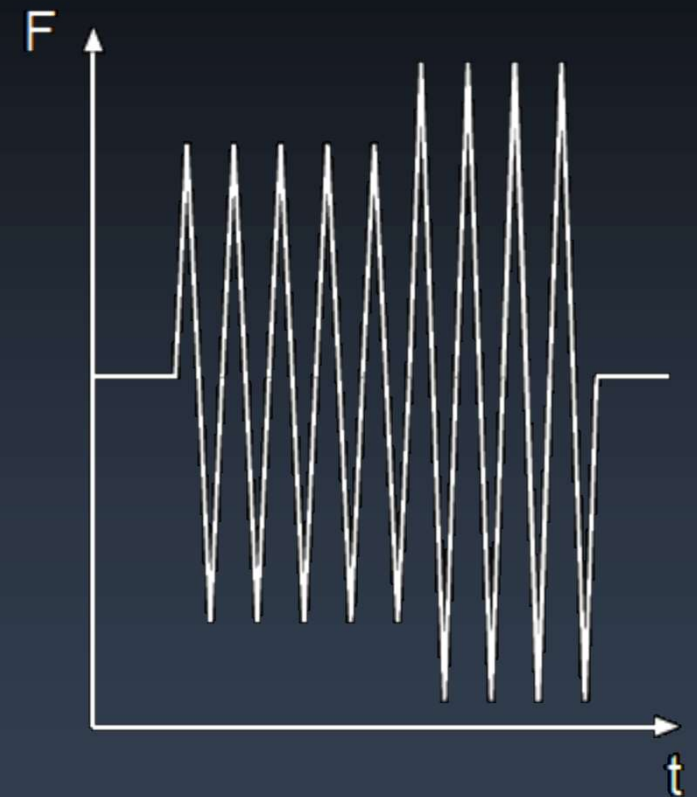
- Esforços em amplitude constante
 - Usado em ensaios de laboratório
 - Pouco realista
 - Situação semelhante – rotações em velocidade constante
 - Permitem estudo da fadiga eliminando a variável do ciclo irregular.



Cíclico

Modos de carregamento cíclico

- Esforços em Bloco
 - Usado antigamente para simulação de ciclos aleatórios
 - Não é mais empregado comumente



em Bloco

Modos de carregamento cíclico

- Esforços em espectro ou Amplitude Variável
 - Simula carregamentos reais
 - Possível após desenvolvimento de máquinas servocontroladas
 - Podem ser medidos experimentalmente e reproduzidos ou podem ser definidos como padrão
 - Realistas, mas muito complicados
 - Como contar os ciclos?
 - Como definir a amplitude?



em Espectro

Parâmetros de carregamento

- Para amplitude constante:

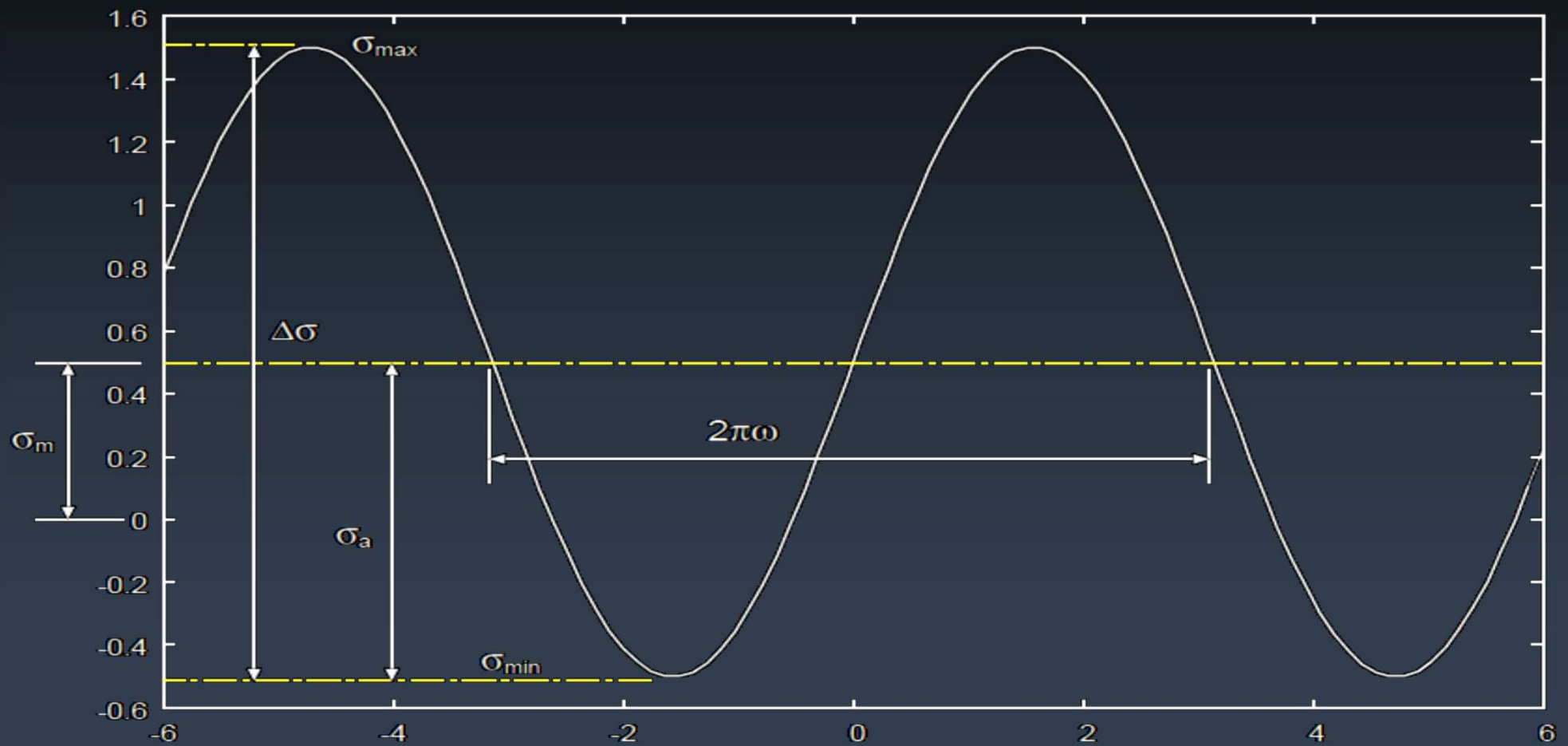
- Faixa de tensão $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

- Amplitude de tensão $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$

- Tensão Média $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

- Razão de tensão $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

Parâmetros de carregamento



Frequência de carregamento

- Estudos em materiais metálicos mostram que a frequência não afeta a fadiga na faixa típica dos ensaios (1 a 500 Hz)
- Polímeros são fortemente influenciados pela frequência devido ao aquecimento adiabático – o corpo de prova pode fundir localizadamente
- Ensaios em frequências ultrassônicas (~ 20 kHz) – Carregamento é dado por ondas mecânicas no corpo de prova – variação das dimensões do CP mudam a amplitude de carregamento
- Corpo de prova deve ser resfriado

Fadiga

- Definição:

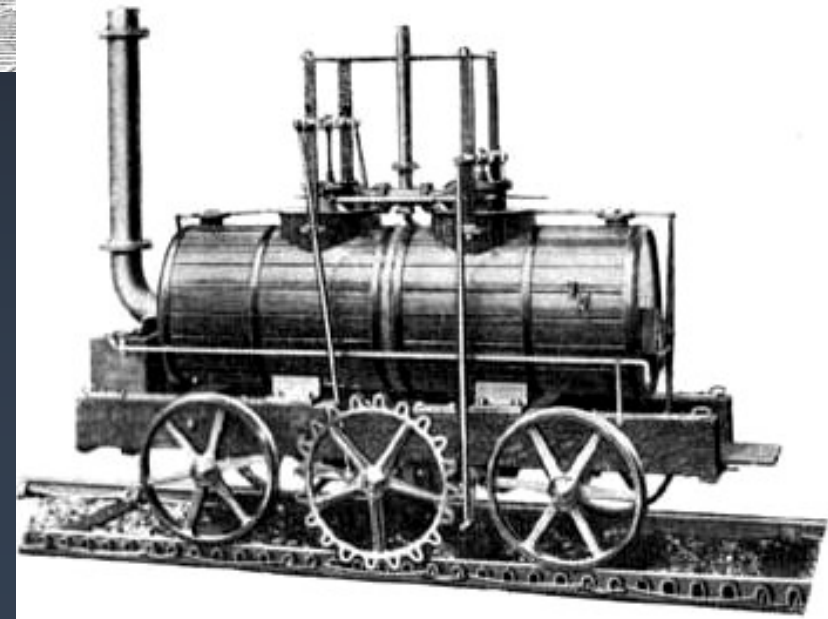
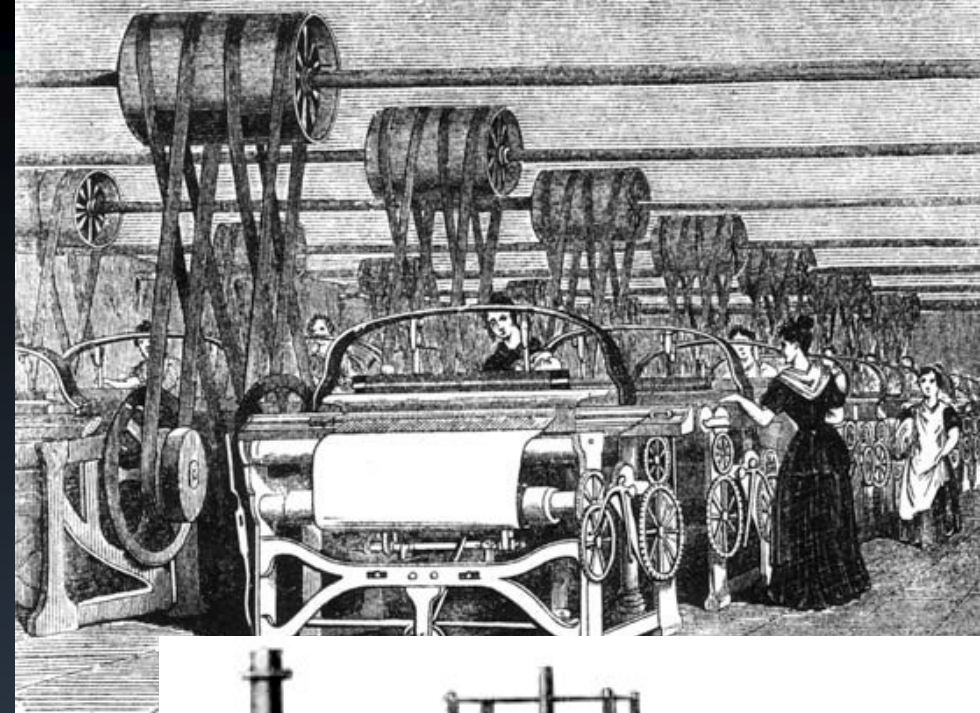
Processo de degradação de propriedades mecânicas de um material caracterizado pelo crescimento lento de uma ou mais trincas sob carregamento dinâmico, levando finalmente à fratura.

Fadiga

- Ocorre em todas as classes de materiais
- Ocorre mesmo para tensões muito baixas, nas quais não se observa deformação plástica significativa
- Degradação é acelerada pela presença de concentradores de tensão
 - Raios de curvatura pequenos, cantos vivos, grandes mudanças de seção
 - Exemplo: barras para feixe de molas têm bordas arredondadas

Histórico

- Fadiga foi identificada inicialmente como uma fratura frágil que atingia componentes de máquinas a vapor, locomotivas, bombas, etc, após muitos ciclos
- Porém, um único ciclo não gerava dano nenhum



Histórico

- Primeiro ensaio de fadiga: 1838 – W. A. J. Albert – correntes de correias transportadoras
- Primeiras investigações são sempre associadas a incidentes e acidentes – uma falha inesperada de um componente
- Estudos mais aprofundados – A. Wohler, a partir de 1858

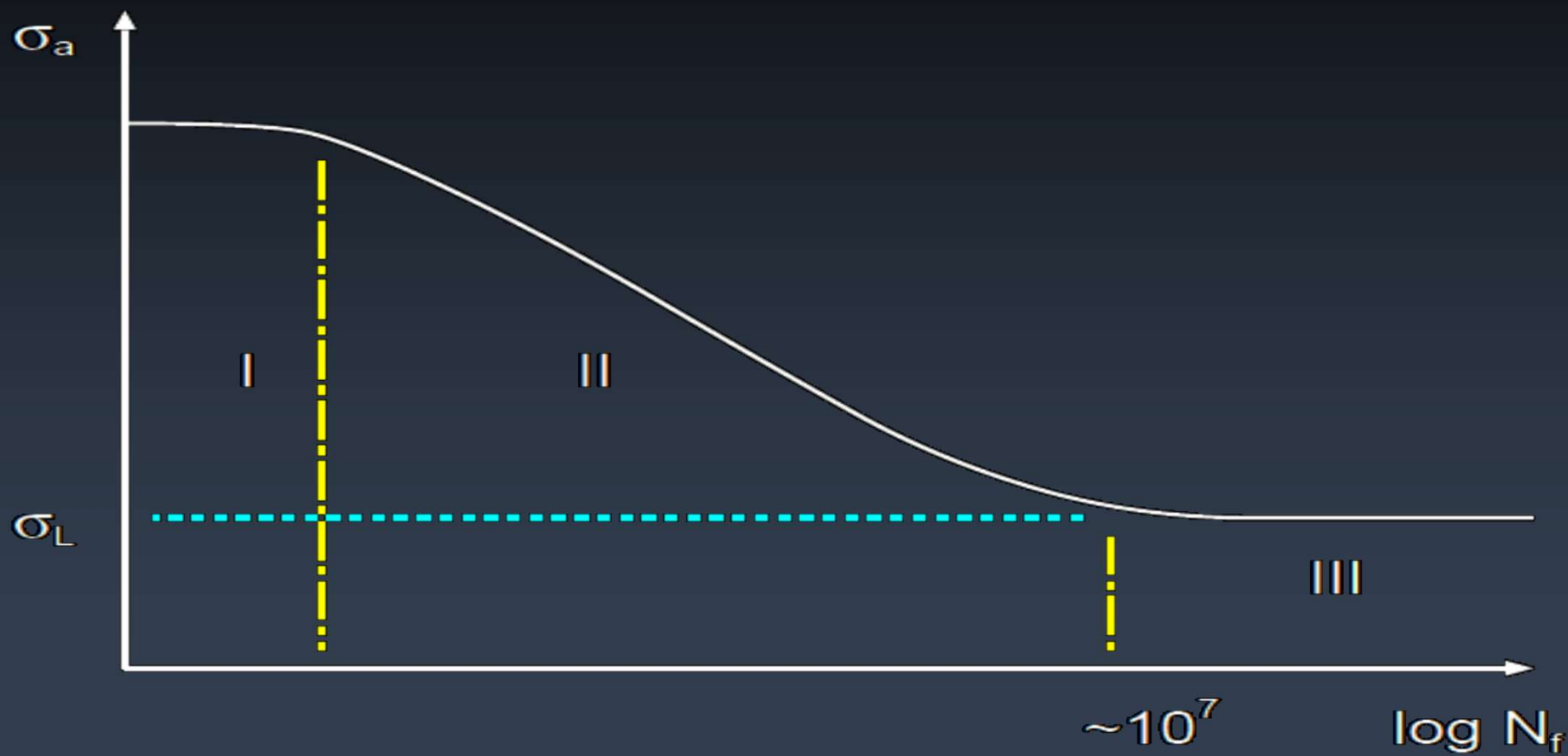
As três leis da fadiga

1. Um material pode ser induzido à falha pela múltipla repetição de tensões que, isoladamente, são menores do que a resistência estática do material
2. A amplitude de tensão é decisiva para destruir a coesão do material
3. A tensão máxima influencia o processo diminuindo a amplitude de tensão que leva à falha (aumento da tensão média reduz a resistência à fadiga para uma dada amplitude)

Curva S-N

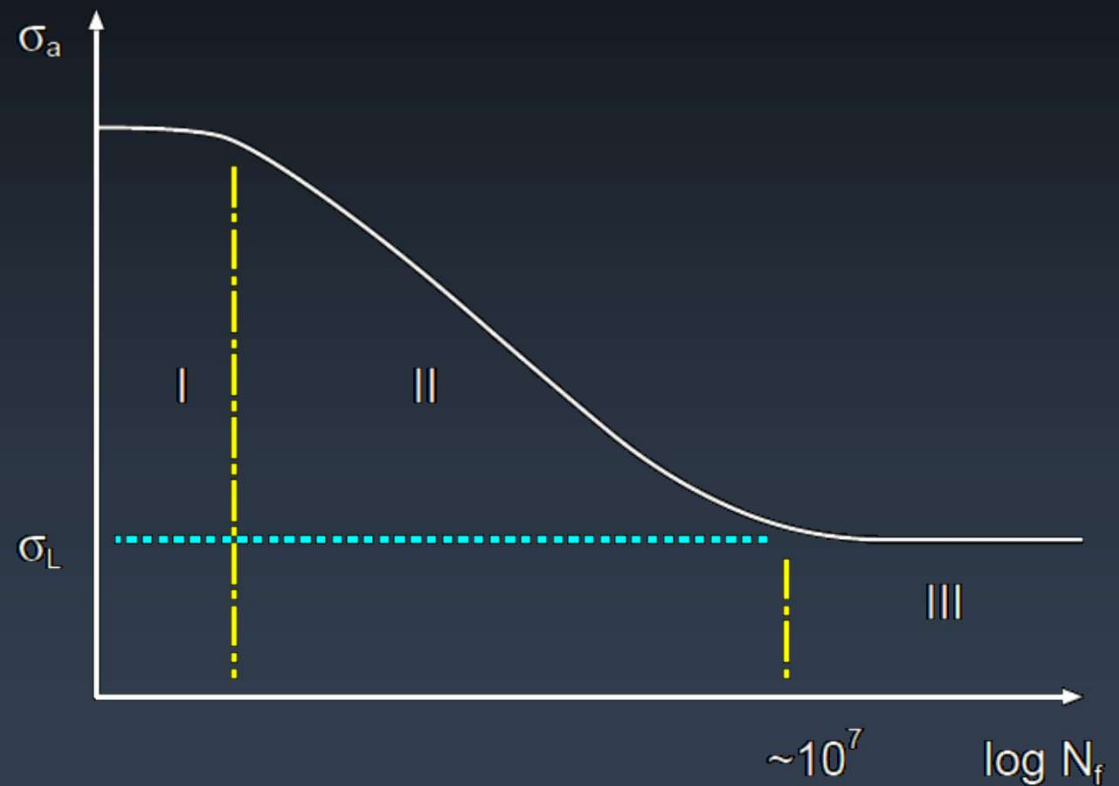
- Introduzidas por Wöhler
- Também chamadas curvas σ -N ou Curvas de Wöhler
- Indica o número de ciclos até a falha para uma dada amplitude ou faixa de tensões

Curva S-N



Curva S-N

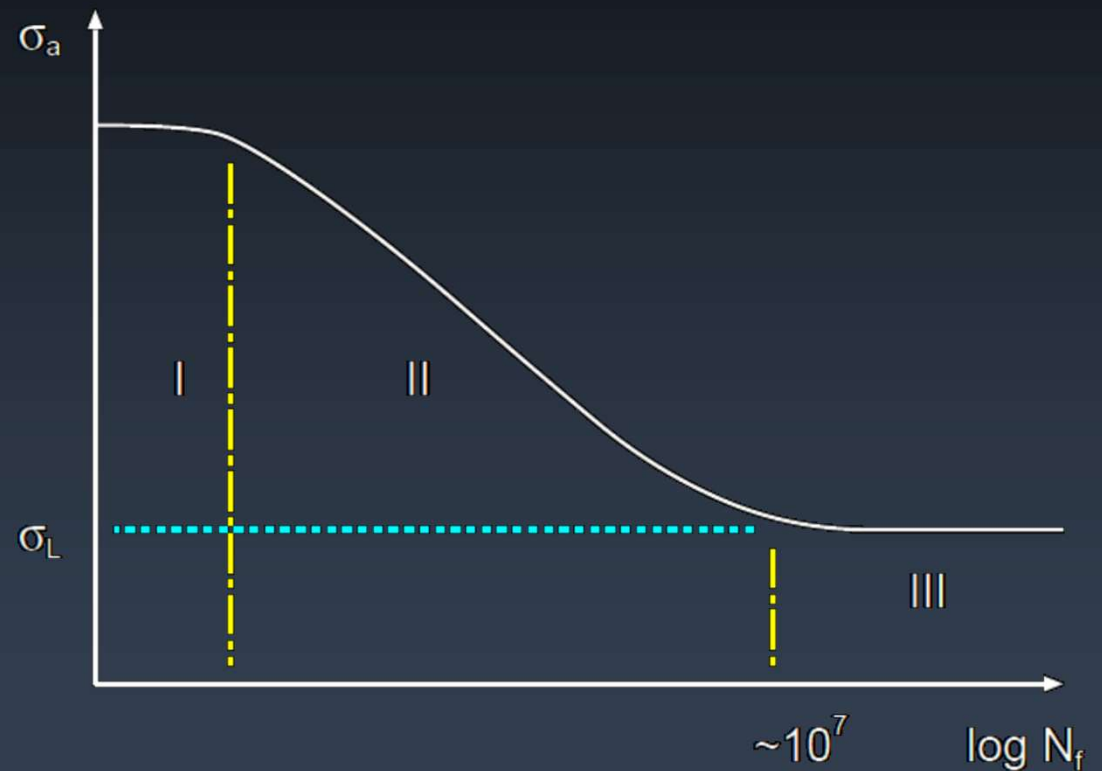
- I. Para amplitudes de tensão próximas ao LR, há um patamar de saturação – Se a falha não ocorre no primeiro ciclo, é provável que venha a ocorrer muito mais tarde



Curva S-N

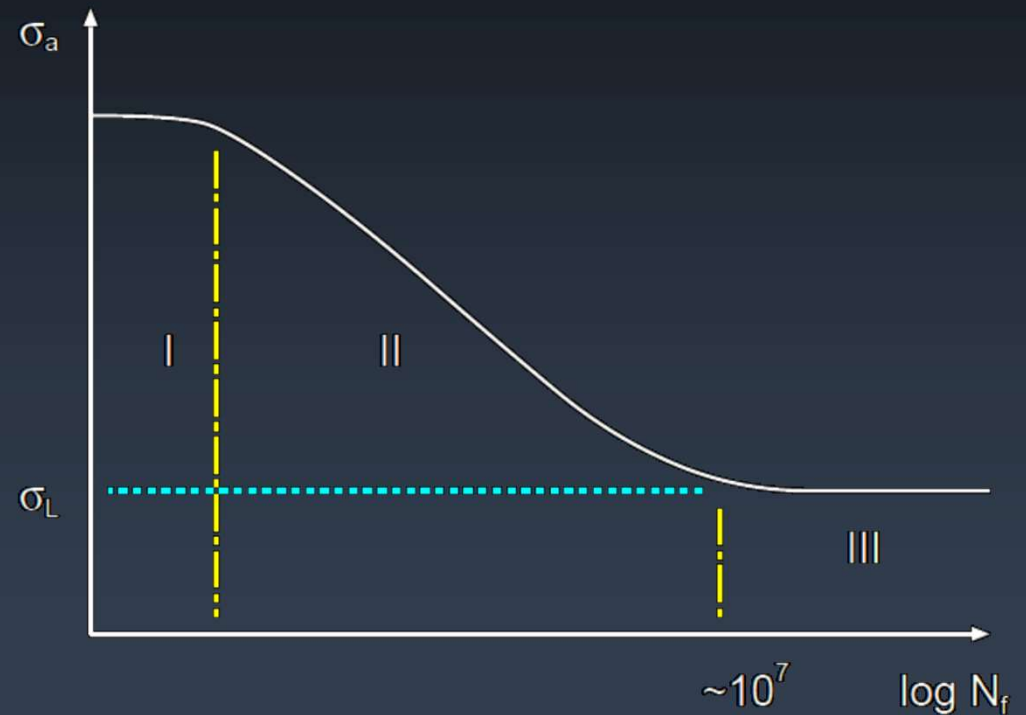
II. Para amplitudes intermediárias, há um aumento da resistência à fadiga com queda da amplitude de tensão

Domínio usual de trabalho dos materiais



Curva S-N

III. Para uma amplitude de tensões abaixo de um certo valor mínimo, a fratura ocorre para um número praticamente infinito de ciclos



Limite de fadiga

- Existe necessariamente para todos os materiais, por mais baixo que seja
- Em alguns casos, o patamar da curva S-N pode se estabilizar para uma amplitude de tensão que corresponde a um número muito alto de ciclos – determinação experimental prejudicada
- Critério tecnológico: amplitude de tensão que corresponde a 10^7 ciclos

Limite de fadiga

- Aços têm limite de fadiga alto, facilmente detectados experimentalmente
- Novos ensaios ultrassônicos permitem estender o ensaio até 10^{12} ciclos (fadiga a gigaciclos)
- Trecho horizontal na verdade tem inclinação muito menor do que o trecho acima do limite.

Fadiga em controle de tensão

- Equipamento de Wöhler – Máquina de eixo rotativo – Aplica-se um momento fletor a um corpo de prova que gira sobre seu eixo.
- Cada ponto do corpo de provas é sucessivamente solicitado sob tração em compressão
- Inversão total de solicitação (tensão média = 0)
- Aplica-se um ciclo de tensão ao corpo de prova.
- Assim o ensaio é feito em controle de carga

- Baixas amplitudes e muitos ciclos

Fadiga em controle de deformação

- Atenção no início do século XX se voltou para fadiga termomecânica, fadiga térmica e fadiga-fluência
 1. Redução do LE com a temperatura aumenta a importância da deformação plástica no processo de fadiga
 2. Esforços são um ciclo de deformações e não de carregamento
- L. F. Coffin e S. M. Manson – fadiga sob controle de deformação

Fadiga em controle de deformação

- Um ciclo de deformações é aplicado e a fadiga se estabelece sob tensões variáveis
- Tensão pode aumentar ou diminuir a cada ciclo
- Altas amplitudes de tensões
- Baixo número de ciclos

Fadiga de alto e baixo ciclo

- Divisão de método também divide os fenômenos estudados:
- Fadiga de alto ciclo: controle de carga, baixas amplitudes, alto número de ciclos (até 10^7)
- Fadiga de baixo ciclo: controle de deformação, altas amplitudes, baixo número de ciclos

FRATURA POR FADIGA

Estágios de propagação

- Nucleação da trinca
- Propagação estável da trinca
- Propagação instável da trinca

Nucleação

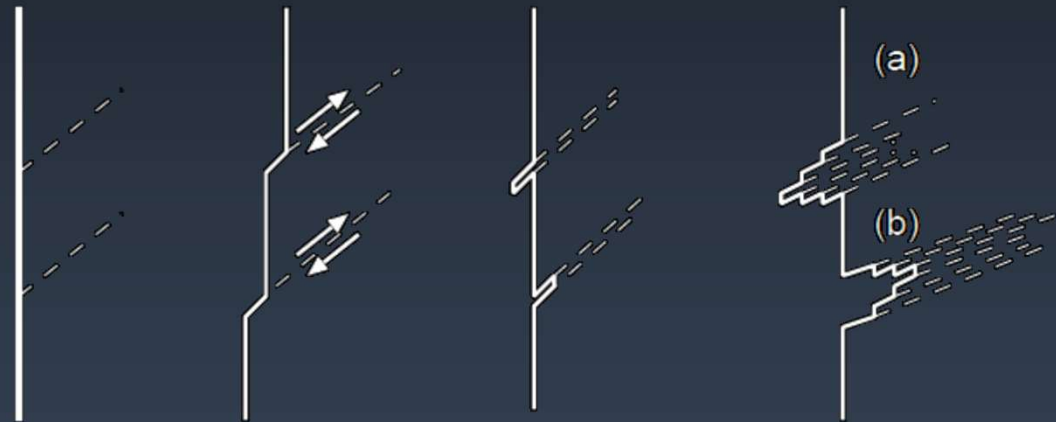
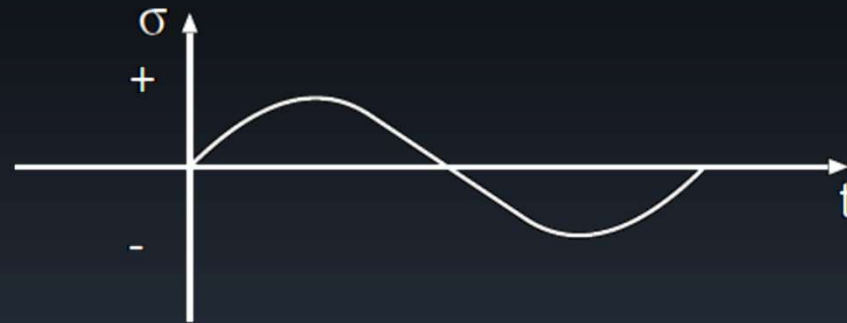
- Ocorre em descontinuidades no componente - superfícies, contornos de grão, interfaces com inclusões
- Favorecida por tensões de tração – concentradores de tensão são fundamentais
- Superfícies livres são os pontos de nucleação mais frequentes
 - Menores restrições à deformação plástica
 - Maiores tensões

Nucleação

- Formação de estruturas complexas de deformação
- Deformação cumulativa entre ciclos -> deformações muito elevadas -> estruturas muito estáveis de discordâncias
- Formação de Bandas de Deformação Persistentes (Bandas de deslizamento na superfície do material) – formam-se novamente no mesmo local mesmo após polimento

Nucleação

- Irregularidades superficiais se formam por causa das bandas persistentes
- Intrusões
- Extrusões



----- Planos de escorregamento

Superfície e vida em fadiga

- Qualidade da superfície é determinante para nucleação de trincas
- Resistência é favorecida por:
 - Acabamento
 - Introdução de tensões residuais

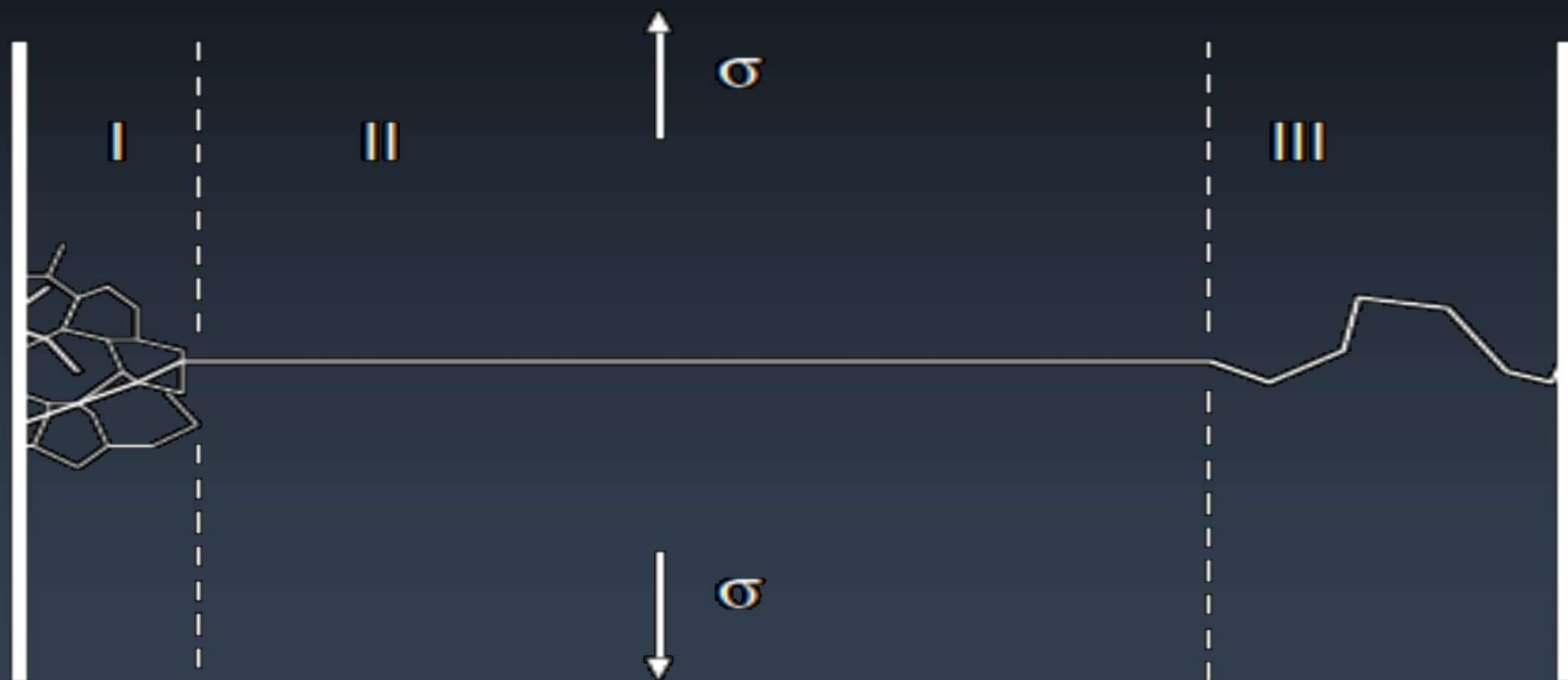
Superfície e vida em fadiga

- Shot Peening: jateamento da superfície do componente com partículas que causam deformação superficial
- Granalha ou esferas de aço
- Tensões residuais de compressão

Propagação da trinca

- Propagação estável corresponde a 95% da vida útil de um componente sob solicitação cíclica
- Propagação ocorre em 3 estágios:
 1. Uma ou mais trincas começam a se propagar a partir da superfície a 45° do eixo de carregamento.
A trinca cresce pouco e encontra contornos de grão.
Após passar por um contorno (não necessariamente o primeiro) a trinca muda de orientação.
 2. A trinca se propaga perpendicularmente à solicitação até atingir tamanho crítico para propagação instável
 3. Propagação catastrófica final

Propagação da trinca

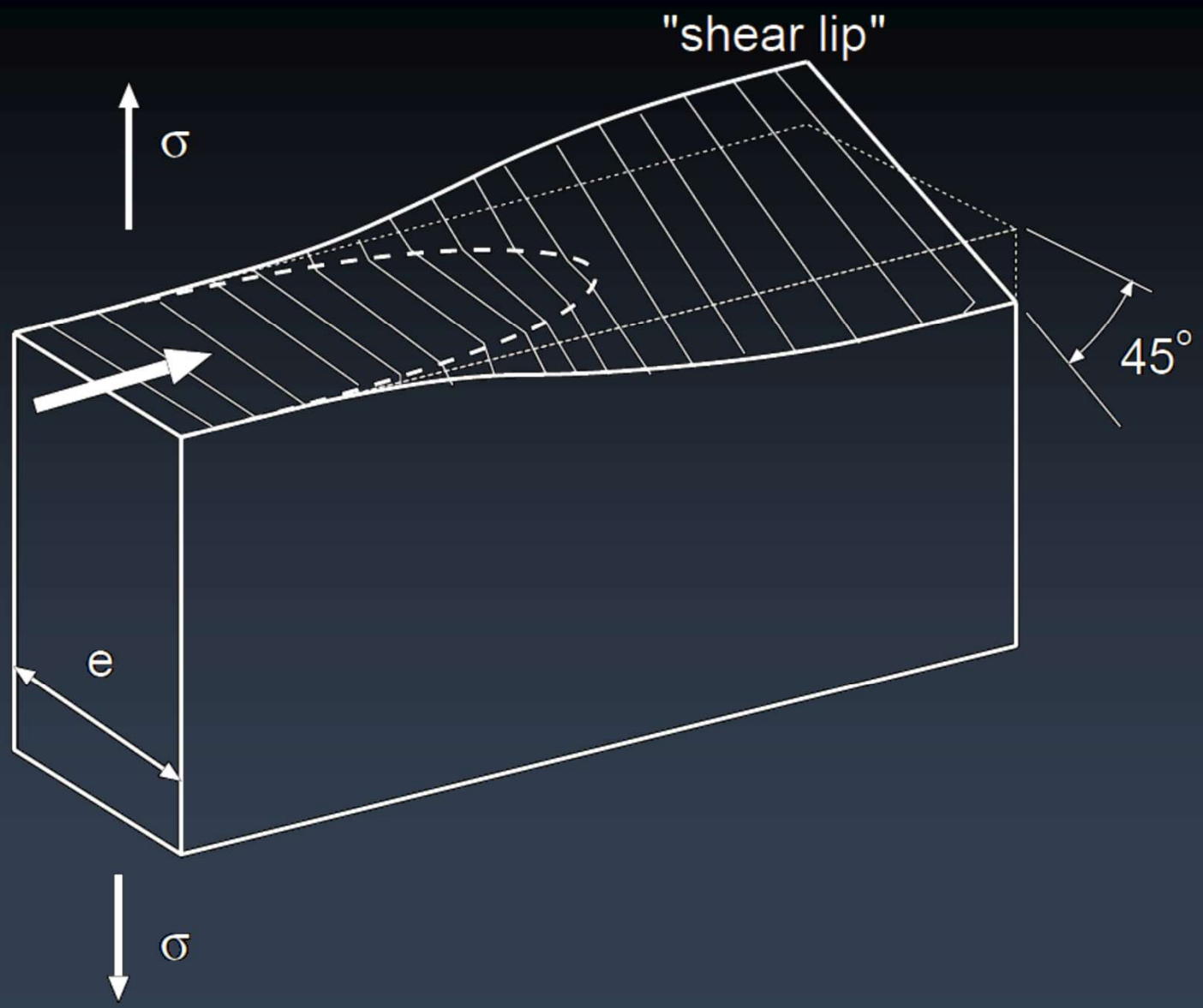


Propagação da trinca

- Microtrincas (estágio I) estão relacionadas às bandas persistentes.
- Propagação ocorre por cisalhamento nos planos das bandas
- Passagem para estágio II está relacionada à interação com um contorno de grão
- Em geral, no estágio II apenas a trinca principal se propaga. Outras trincas em estágio I param.
- Quando há muitos concentradores de tensão pode haver mais de uma trinca principal

Propagação da trinca

- Propagação é descontínua
- Trinca avança um Δa por ciclo
- Posição da frente da trinca pode ser associada a marcas deixadas no material
- Em componentes finos é possível observar a formação de zonas de cisalhamento no final da fratura



Superfície de fratura

- Em geral macroscopicamente plana e perpendicular ao esforço
- Microscopicamente ondula em torno do plano médio
- Rugosidade é menor quanto mais agressivo quimicamente for o meio em que o componente atua

Superfície de fratura

- Estrias:
- Visíveis para grandes aumentos
- Podem estar ausentes
- Causadas pelo relevo que resulta da formação da zona plástica à frente da trinca nos ciclos de carregamento
- Associadas à posição da trinca a cada ciclo

Superfície de fratura

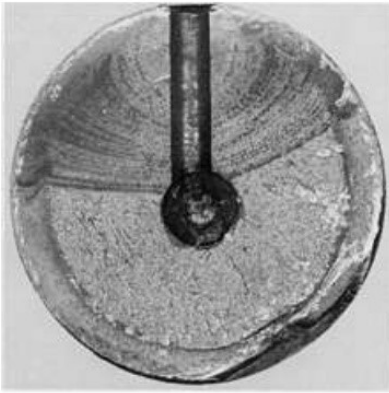
Marcas de praia

- Marcas aproximadamente concêntricas
- Irradiam a partir de um ponto
- Indicam qualitativamente o caminho que a trinca seguiu
- Formadas por oxidação diferente da superfície ao longo da propagação
 - Uma máquina desligada tem a trinca parada e sua superfície oxidando. Ao ligá-la novamente, a trinca volta a avançar
- Costuma-se associá-las também a variações no espaçamento das estrias

Superfície de fratura

Marcas de catraca ou ratchet marks

- Em condições severas ou especiais de carregamento, podem ocorrer muitas trincas em propagação simultânea
- Degrau microscópico aparece no encontro das trincas



Fractograph of fatigue failure in SAE 1050 pin, induction hardened to a depth of 5 mm (3/16 in.) and surface hardness of 55 HRC. Core hardness: 21 HRC. Fatigue initiated inside the grease hole at the metallurgical notch created by the very sharp case-core hardness gradient.

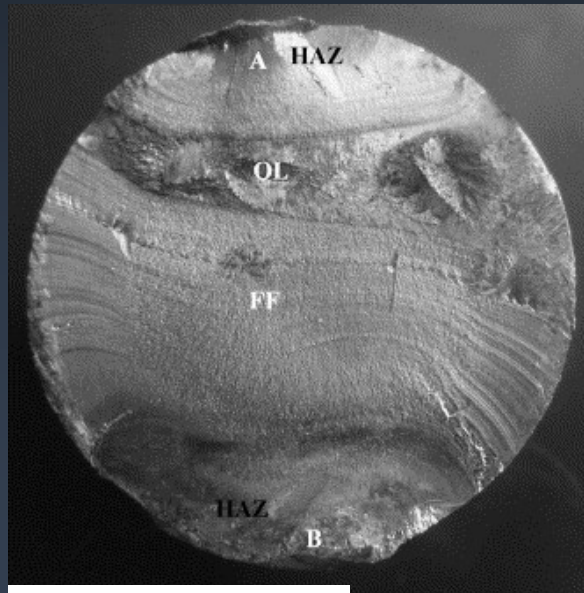
<https://pt.slideshare.net/umairbukhari3/fatigue-and-creep-rapture>



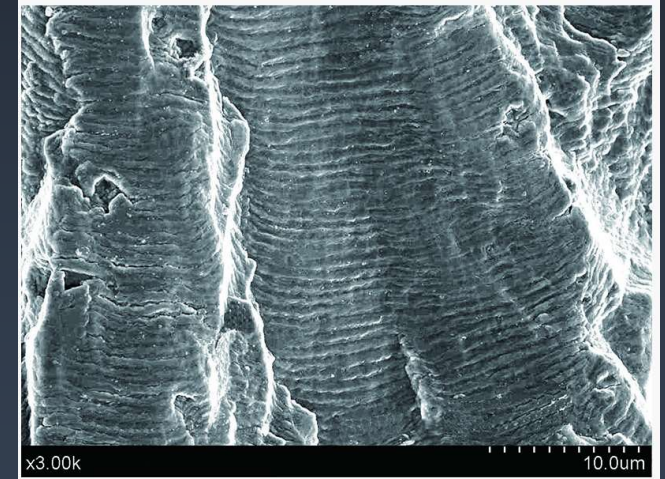
<http://leancrew.com/all-this/2012/05/bolt-upright/>



Usin Metallurgical Services



Engineering Failure Analysis
Volume 13, Issue 8, December 2006, Pages 1293-1302



<http://www.kmtl.co.jp/en/research>

Teorias de acumulação de danos

Previsão de vida em fadiga

- Carregamentos cíclicos são muito raros
- Carregamentos em bloco e espectro são mais comuns

Como contabilizar ciclos e prever a extensão dos danos?

- Acumulação de danos: cada ciclo resulta em danos irreversíveis
- Alterações se acumulam até atingir um nível crítico

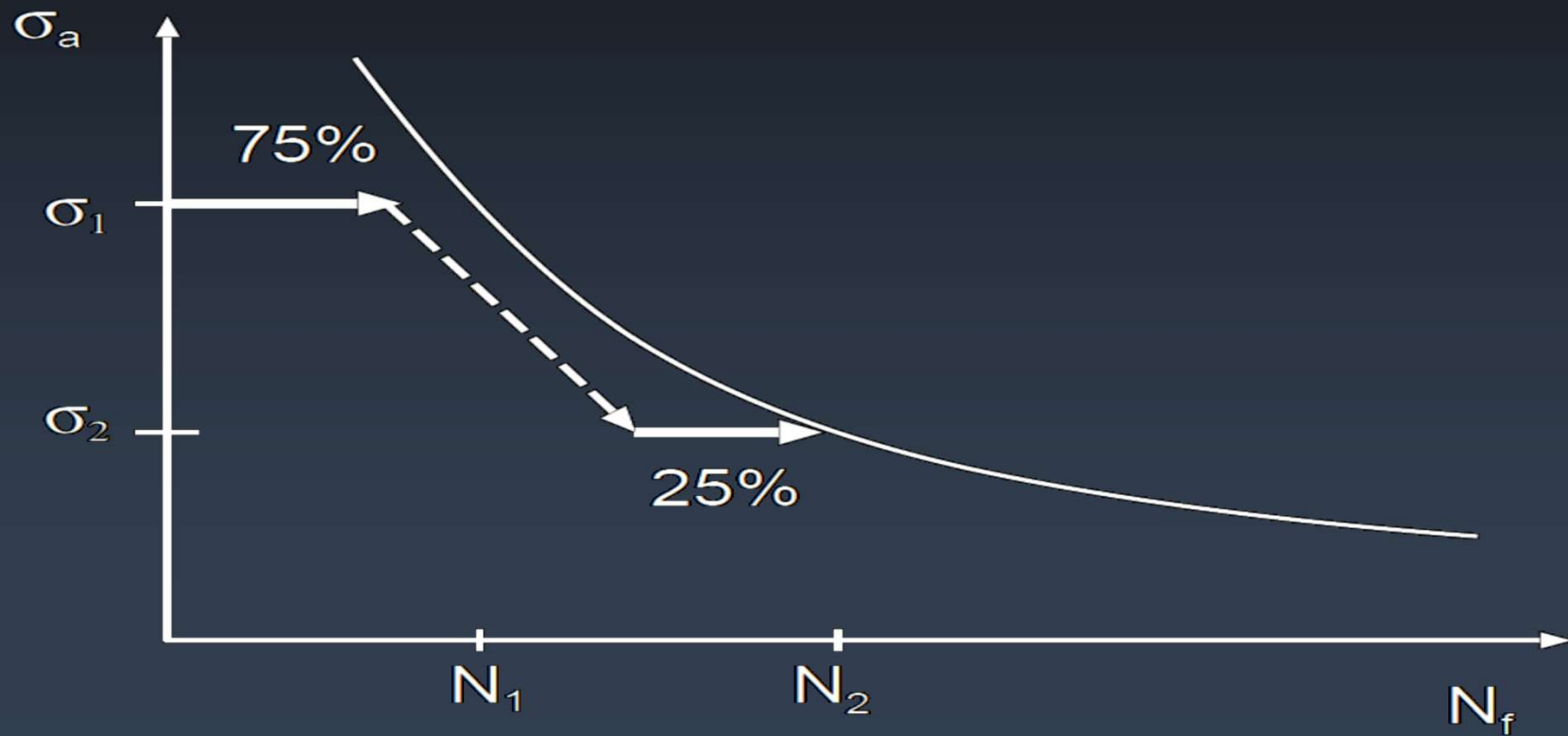
Previsão de vida em fadiga

- Regra de Pålmgren-Miner-Langer
- Pålmgren: o dano a cada ciclo é linear.
- Langer: dano linear, mas separando a nucleação da propagação da trinca
- Sorensen (URSS) e Miner (EUA): Regras lineares. Miner elaborou a equação:

$$\sum_{k=1}^M \frac{n_k}{N_k} = 1$$

Previsão de vida em fadiga

- Regra de Pálmgren-Miner-Langer



Previsão de vida em fadiga

- Crítica: a regra de linearidade implica que os danos para cada condição de solicitação são independentes
- Ou seja, a ordem de aplicação seria indiferente
- Na prática isso não é verdade:
- A vida será menor (no exemplo) se o bloco de ciclos de menor carga for aplicado antes do de maior carga
- Material apresenta interação de cargas.

Previsão de vida em fadiga

- Critérios para previsão de vida:
 1. Abordagem por curva de dano
 2. Abordagem baseada no limite de fadiga
 3. Abordagem da modificação da curva S-N
 4. Abordagem de dano em dois níveis
 5. Abordagem por crescimento de trinca
- Métodos 1 a 4 estão em Fatemi e Yang – International Journal of Fatigue, volume 20, páginas 9-34 - 1998

Relação de Paris

- Dano de fadiga pode ser dividido em:
 - Dano de nucleação – está ligado às bandas persistentes e intrusões/extrusões
 - Dano de propagação: é uma trinca se propagando no material (pode ser efetivamente medido)

Paris

- Aplicação da Mecânica da Fratura Elástica Linear
- A taxa de crescimento está ligada a um ΔK :

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

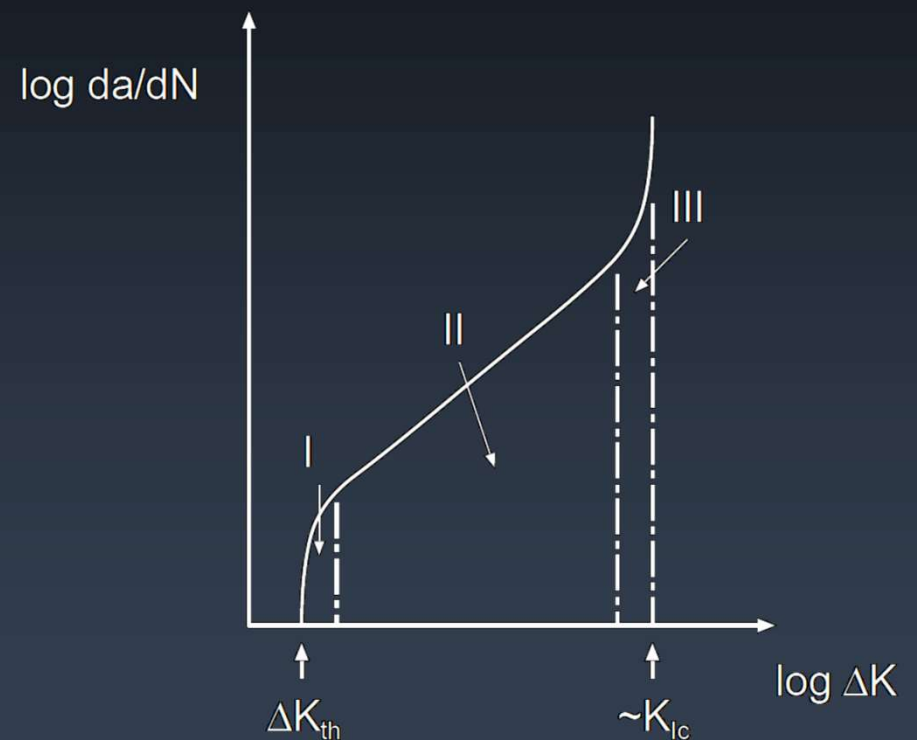
$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n$$

Relação de Paris

- Não prevê efeito de tensão média
- Não prevê falha estática
- Não prevê um limite de fadiga

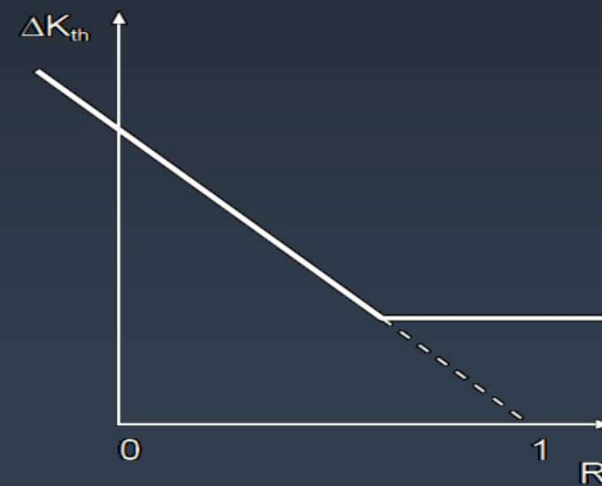
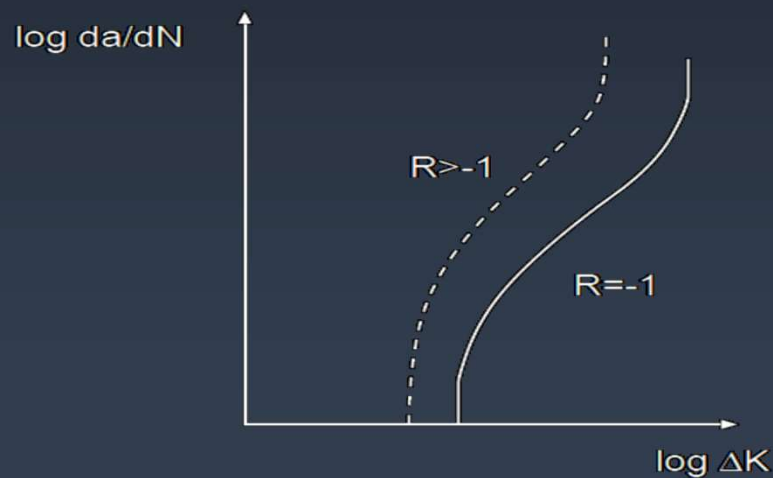
Relação de Paris

- Propagação da trinca em função de ΔK
 - I. Propagação muito lenta, sensível a microestrutura
 - II. Regime de lei de potência, insensível à microestrutura
 - III. Propagação rápida, condições próximas às condições críticas estáveis



Relação de Paris

- Curva depende do valor da razão de tensão adotada no ensaio
- R acima de -1 levam a curva a maiores taxas de propagação, reduzindo o ΔK limite

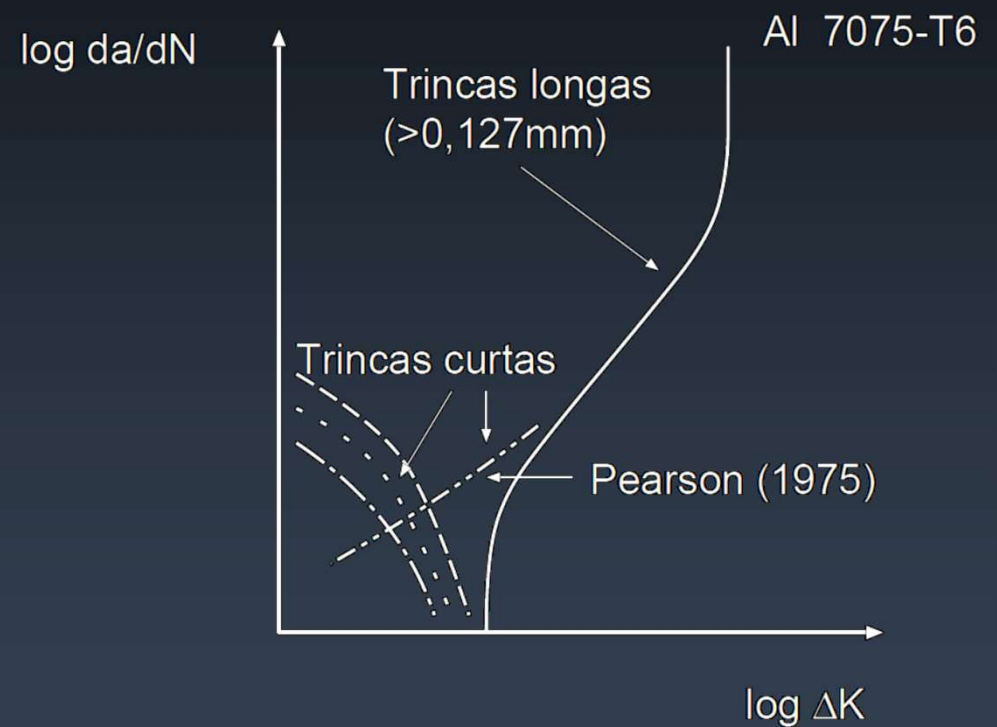


Desvios do comportamento de Paris

- Processo é mais complexo do que o proposto pela teoria de Paris
- A propagação trinca é fortemente não linear
 - Propagação de trincas curtas
 - Sobrecargas e subcargas

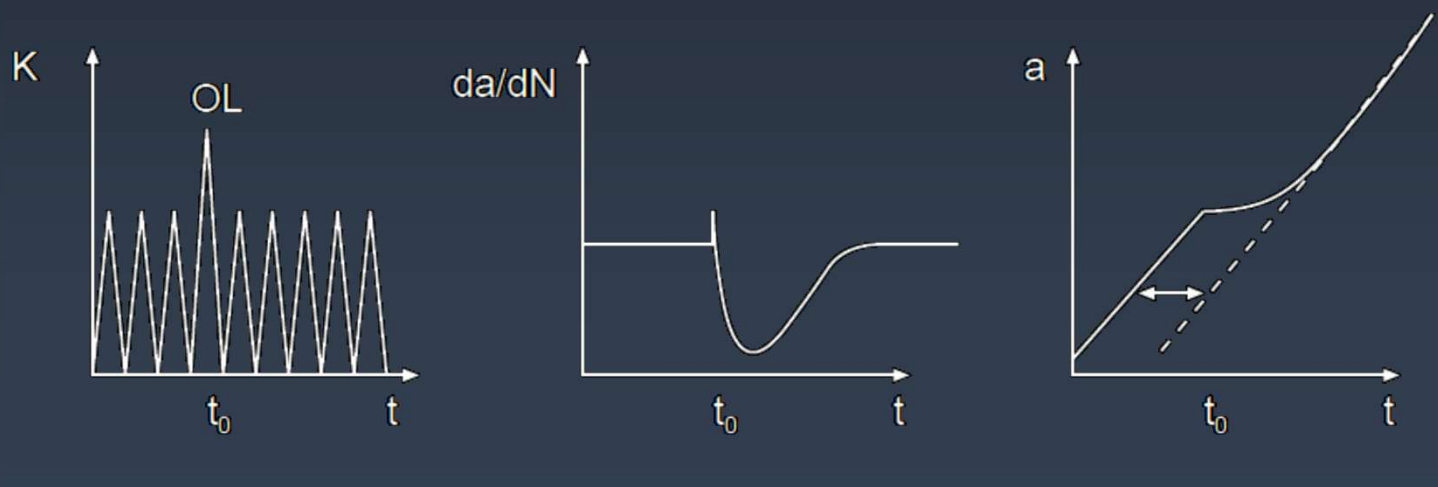
Trincas curtas

- Pearson – Microtrincas que se formavam em inclusões superficiais em alumínio cresciam a taxas maiores do que as previstas por Paris
- O Limiar de propagação é incompatível com a nucleação das trincas
- O comportamento das microtrincas superficiais precisa ter desvio em relação à regra de Paris



Sobrecargas e subcargas

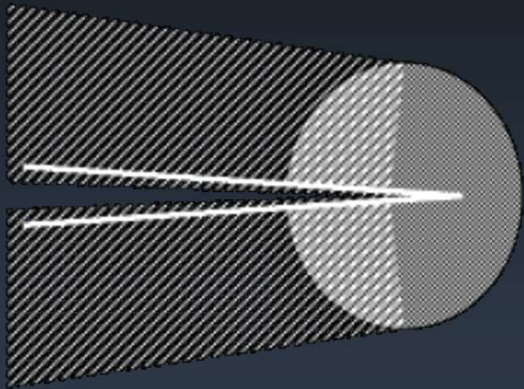
- Sobrecargas retardam a propagação da trinca, e subcargas causam aceleração
- Efeito não linear e quantificável
- Taxa de crescimento volta ao normal após um certo número de ciclos



Explicações dos desvios da lei de Paris

- Fechamento prematuro de trincas
 - Efeito de R sobre a propagação de trincas
 - Deformação na ponta da trinca causa abaulamento nas suas faces
 - Entre os extremos de K, as faces da trinca se tocam antes de $K=0$ (K_{op})
- O dano de fadiga ocorre apenas com a trinca aberta
- ΔK_{ef} : $K_{ef} = K_{max} - K_{op}$

Fechamento prematuro



Plasticidade



Rugosidade



Detritos

Explicações dos desvios da lei de Paris

- Teoria dos dois parâmetros
- Taxa de propagação não depende só de ΔK , mas também de K_{max}

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

Teoria dos dois parâmetros

1. Fadiga depende de ΔK e K_{\max} – forças motrizes macroscópicas para a propagação
2. Dois limiares de propagação: ΔK_{th} e K^*_{\max}
3. Existência dos dois explica a dependência de R
4. Fechamento será um terceiro parâmetro se for importante

Teoria dos dois parâmetros

- Força motriz microscópica é o estado de tensões à frente da trinca
- Zona plástica é uma das principais origens das tensões residuais de compressão
- Tensões residuais deslocam o σ_m
- Efeitos ambientais se manifestam na dependência de K_{max}

Comparação

- Modelos são incompatíveis: fechamento ocorre atrás da trinca; TDP atribui a não linearidade a fenômenos à frente da trinca
- Fechamento atribui a não linearidade a uma tensão de fechamento; TDP afirma que tensões residuais de compressão serão maiores se a zona plástica for maior
- Ambos atribuem os desvios a um desenvolvimento insuficiente da zona plástica

Fadiga Operacional

Introdução

- Fadiga é um problema de engenharia extremamente complexo
- Complexidade atrapalha significativamente a correlação entre ensaios de laboratório e componentes sob carga em serviço.

Conceitos fundamentais

Resistência de forma:

“ Para uma alta resistência à fadiga , a forma dos componentes projetada pelo engenheiros é mais importante que o material em si.”

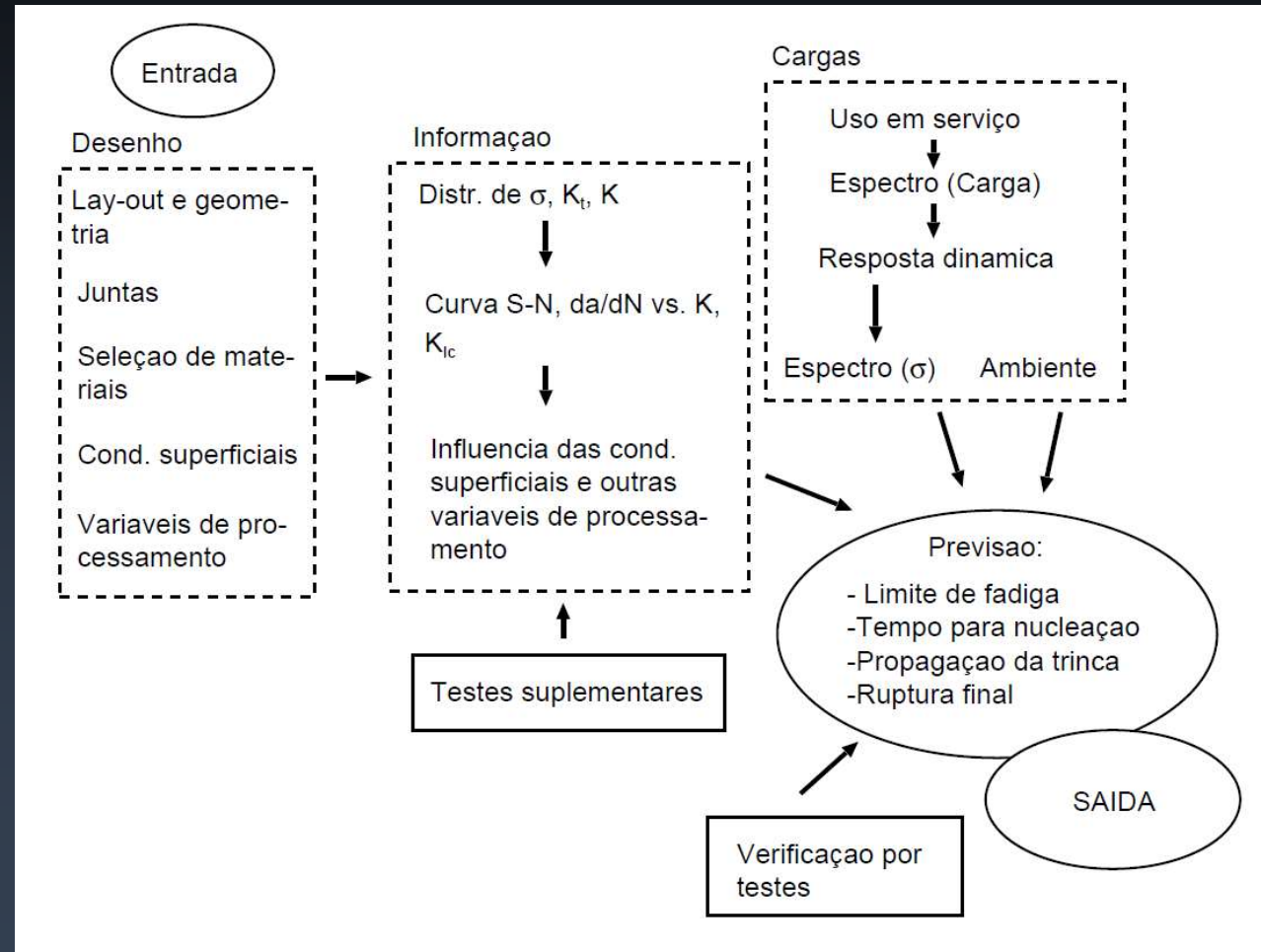
Necessidade de testar o componente em seu formato final em vez de corpos de prova padronizados

Conceitos fundamentais

- Resistência em serviço
- Dimensionamento de componentes para uma vida *finita mas suficiente*, usando ensaios de amplitude variável:
- Testar não só o componente em sua forma final, mas usar também um espectro de solicitações medido em campo

Previsão de vida em fadiga

- Complexidade da previsão de vida em fadiga é alta
- Influenciado por diversos fatores, muitas vezes desconhecidos



Hipótese de similaridade

- Ao escrever a equação que descreve o avanço da trinca, assume-se que este é unicamente influenciado pelos parâmetros instantâneos de solicitação
- Porém, esse tipo de descrição assume a hipótese de similaridade

Hipótese de similaridade

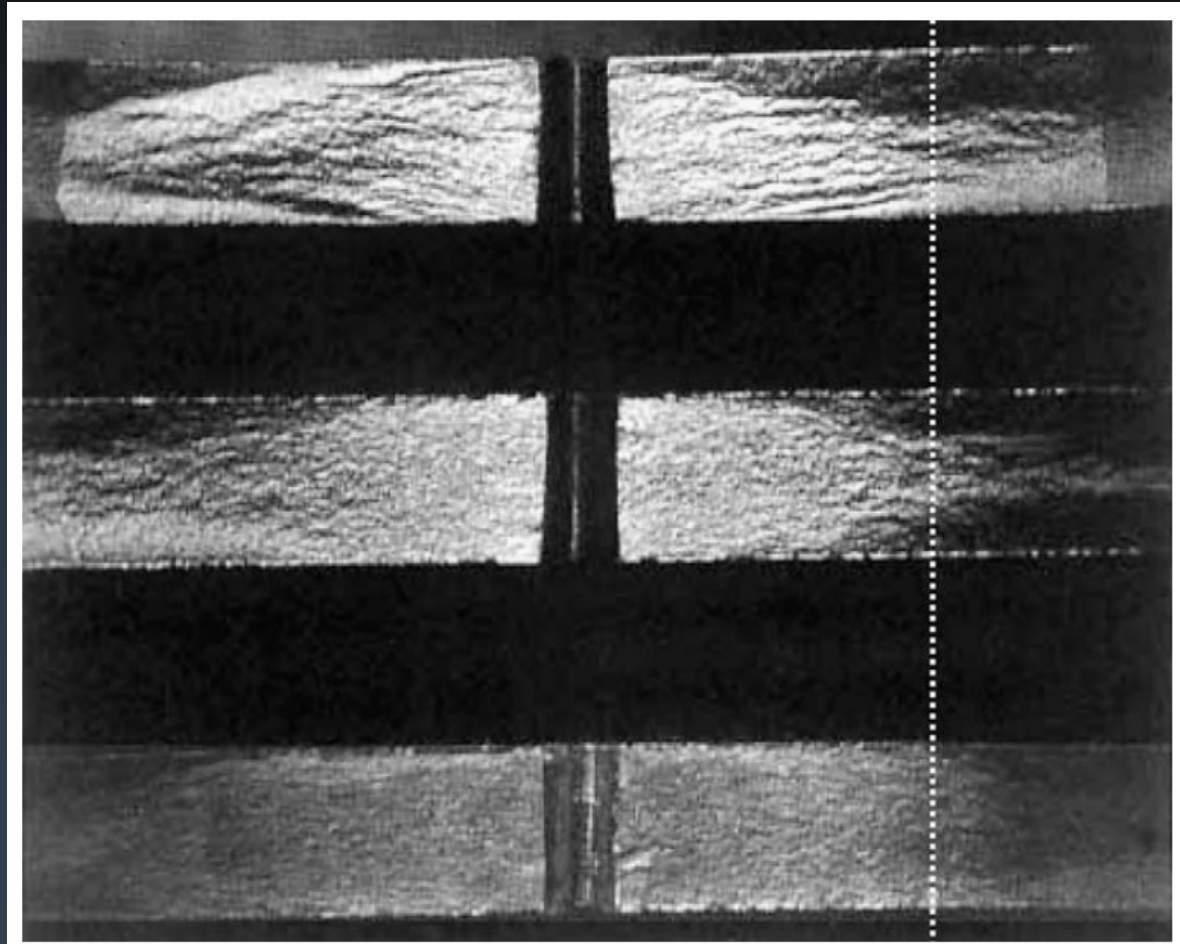
CONDIÇÕES SIMILARES, APLICADAS A SISTEMAS SIMILARES,
DEVEM PROVOCAR A MESMA CONSEQÜÊNCIA

Aplicado a fadiga:

CICLOS COM ΔK SEMELAHNTES APLICADOS A DIFERENTES
TRINCAS DEVEM PRODUZIR A MESMA TAXA DE
CRESCIMENTO.

Hipótese de similaridade

- Sunder, 2003:
- Resultados em ligas de alumínio ensaiadas sob solitação constante em meios diferentes.
- Resultado depende do ambiente e é incompatível com o princípio de similaridade



Ensaaios em estruturas

- Mais confiáveis do que amostras padronizadas
- Avaliam o efeito na estrutura como um todo
- Custosos e demorados
- Limitado a casos críticos ou em que a produtividade viabiliza financeiramente

Ensaaios em estruturas

Custo e complexidade levaram ao desenvolvimento de métodos de previsão a partir de testes padronizados

Desenvolvimento de ensaios de carregamento em espectro e modelos matemáticos de previsão de vida

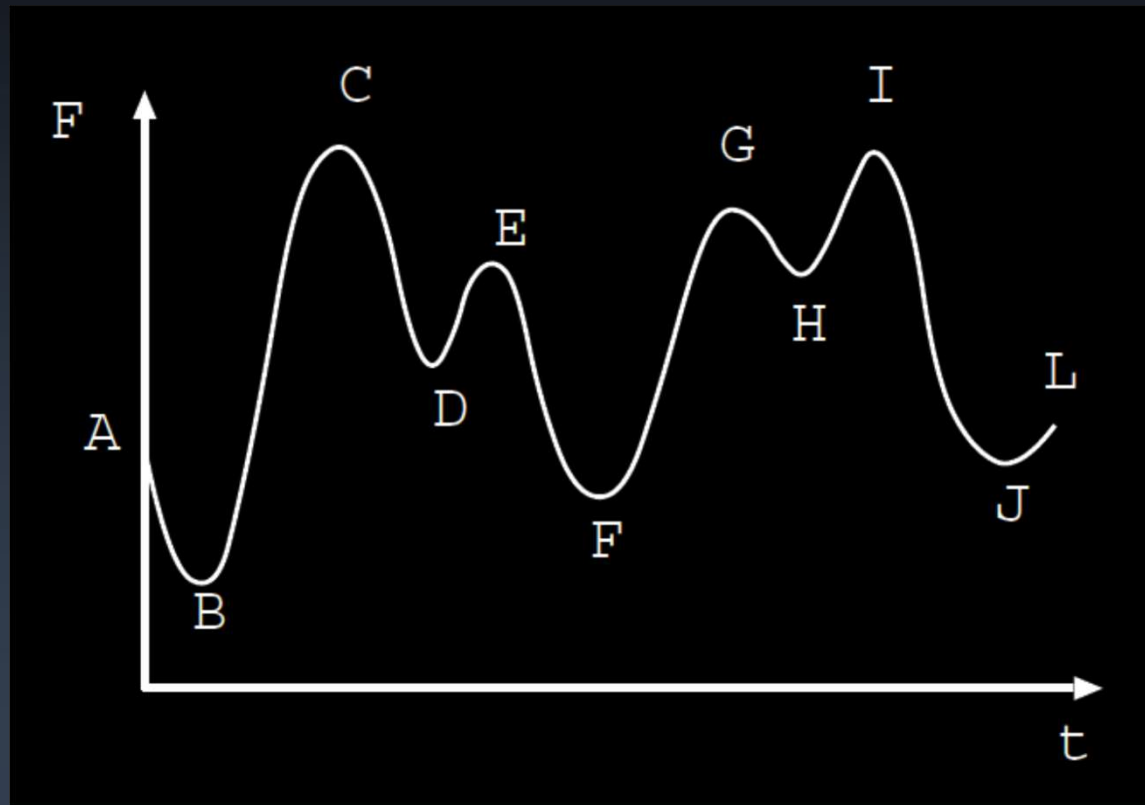
Ensaio com carregamento em espectro

- Importância da amplitude variável é reconhecida há quase um século
- Indústria aeronáutica do início do século XX sofreu grandes revezes
- Gassner: registrar o histórico de solicitação e usar em ensaios de fadiga

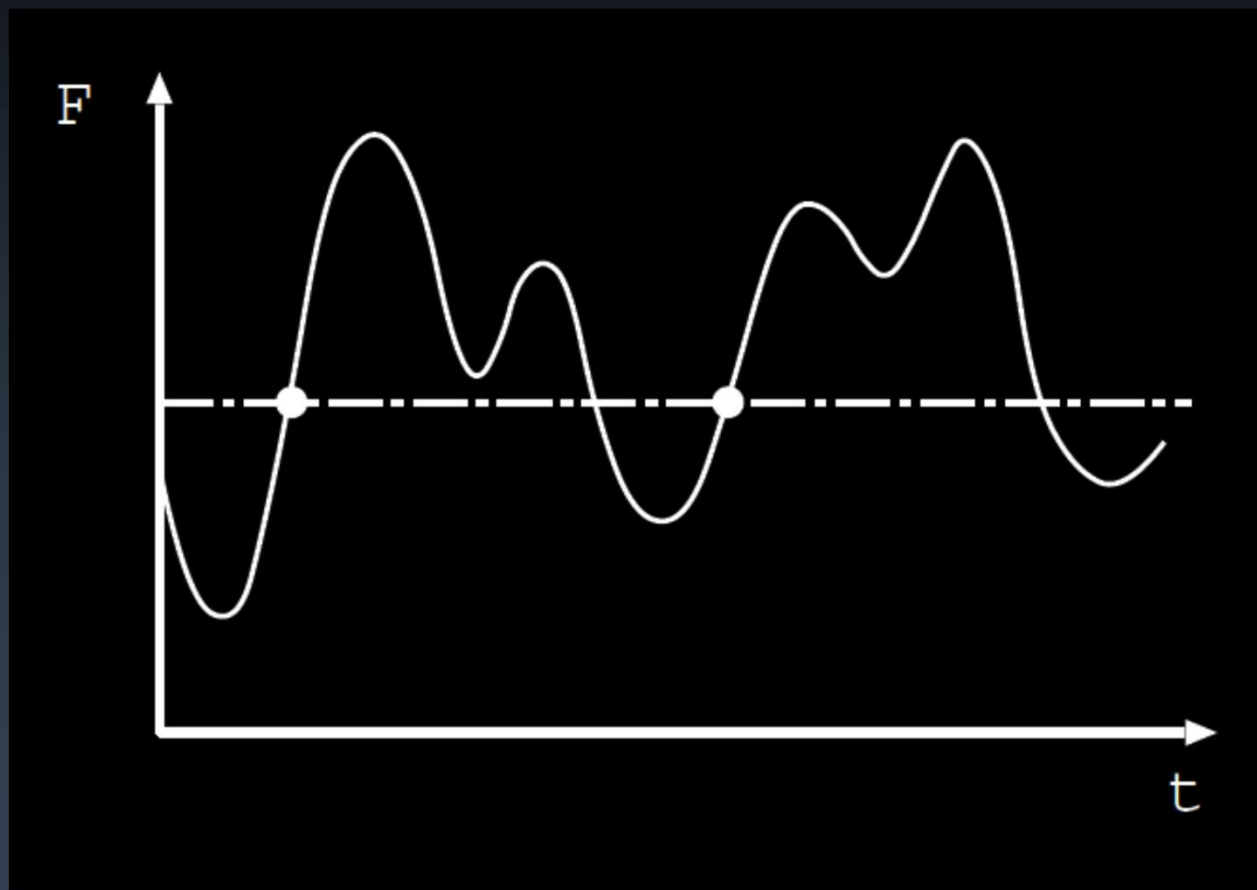
Contagem de ciclos

- Amplitude variável: como efetivamente contar os ciclos?
 - Quantos ciclos correspondem a um $\Delta\sigma$ ou ΔK ?
1. Contagem por cruzamento de níveis
 2. Contagem por picos
 3. Contagem de faixas
 4. Rainflow

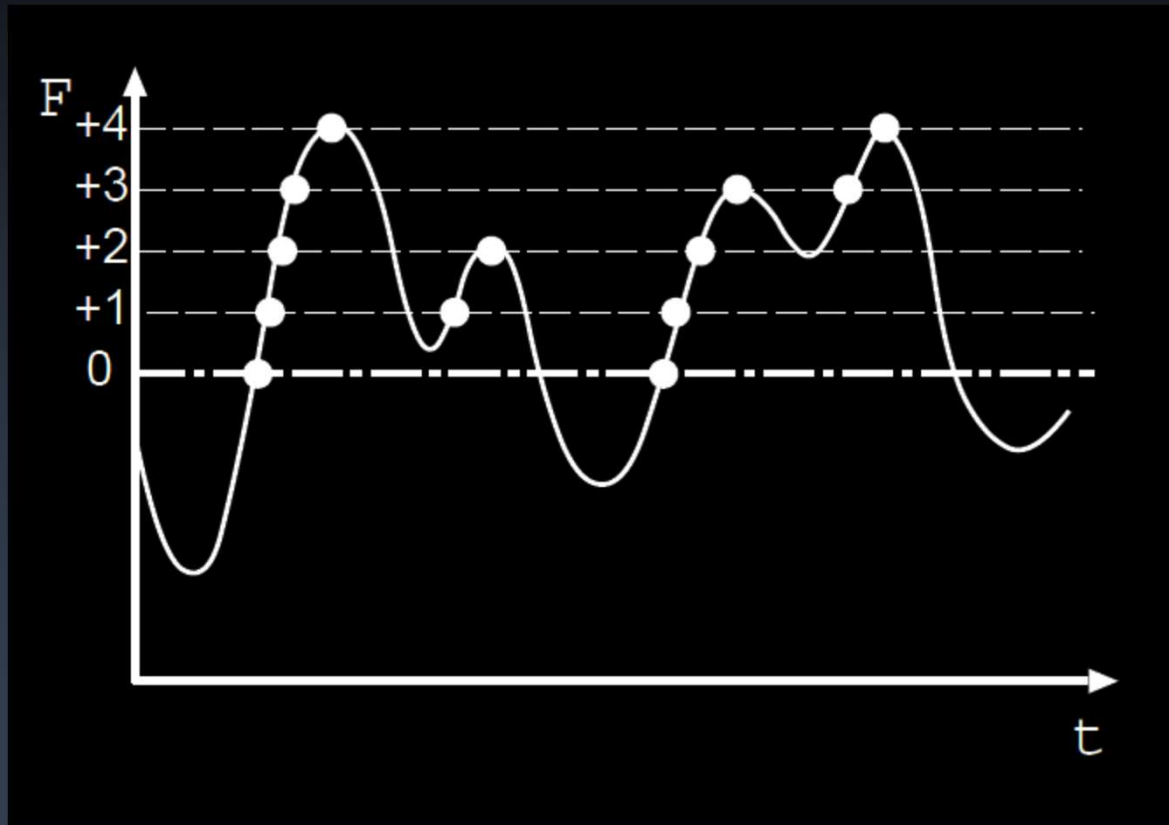
Contagem por cruzamento de níveis



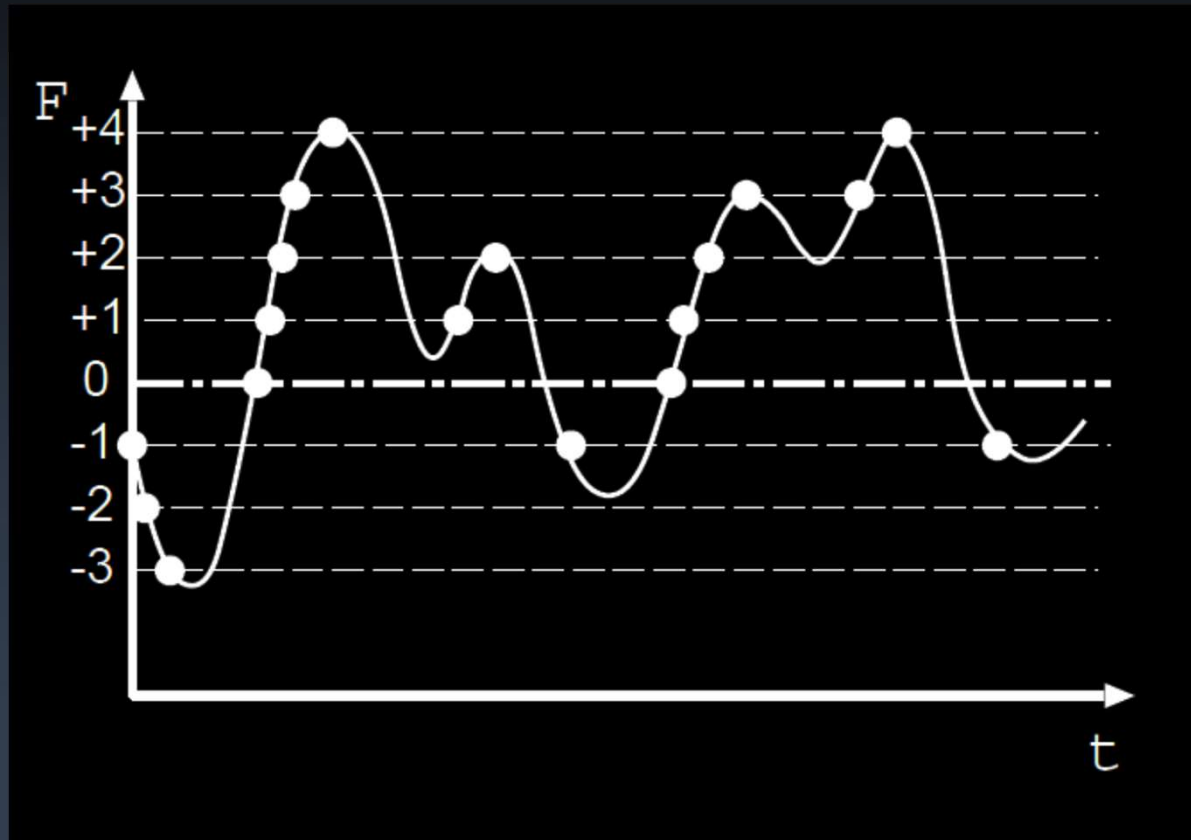
Contagem por cruzamento de níveis



Contagem por cruzamento de níveis



Contagem por cruzamento de níveis



Contagem por cruzamento de níveis

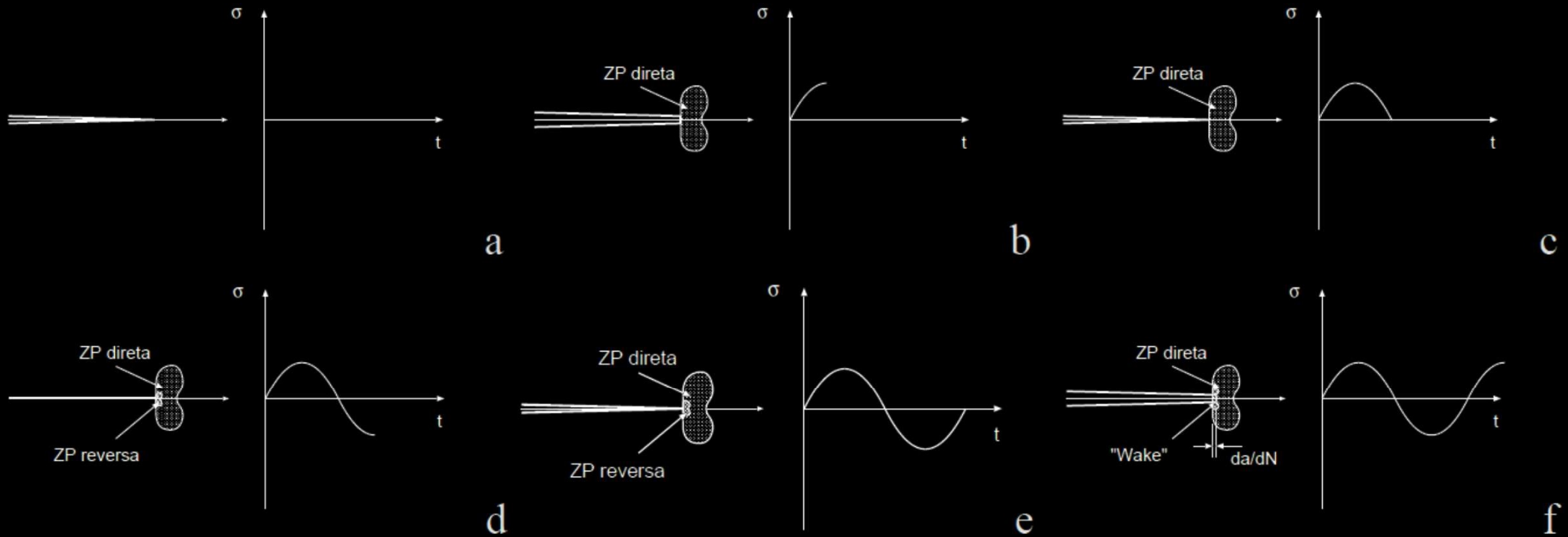
Nível	Cruzamentos
+4	2
+3	3
+2	3
+1	3
0	2
-1	3
-2	1
-3	1

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

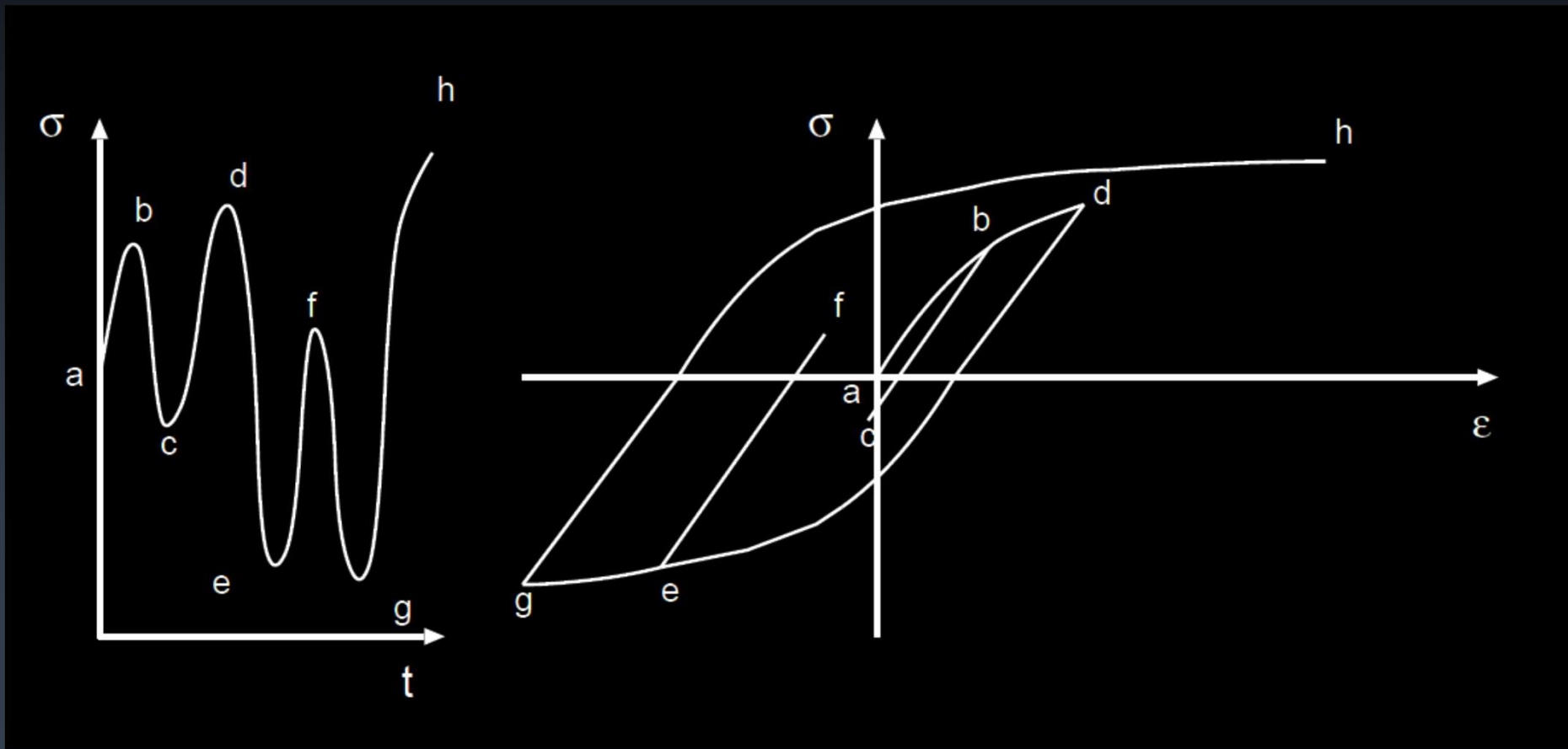
Rainflow

- Método proposto em 1967
- Premissas:
- Dano de fadiga está ligado com a plasticidade reversa
- Durante o ciclo, a ponta da trinca se deforma segundo a curva tensão deformação cíclica – o material não sofre mais endurecimento ou amolecimento cíclico
- Dano é quantificado pelo trabalho dissipado no ciclo histerético correspondente ao histórico de carregamento

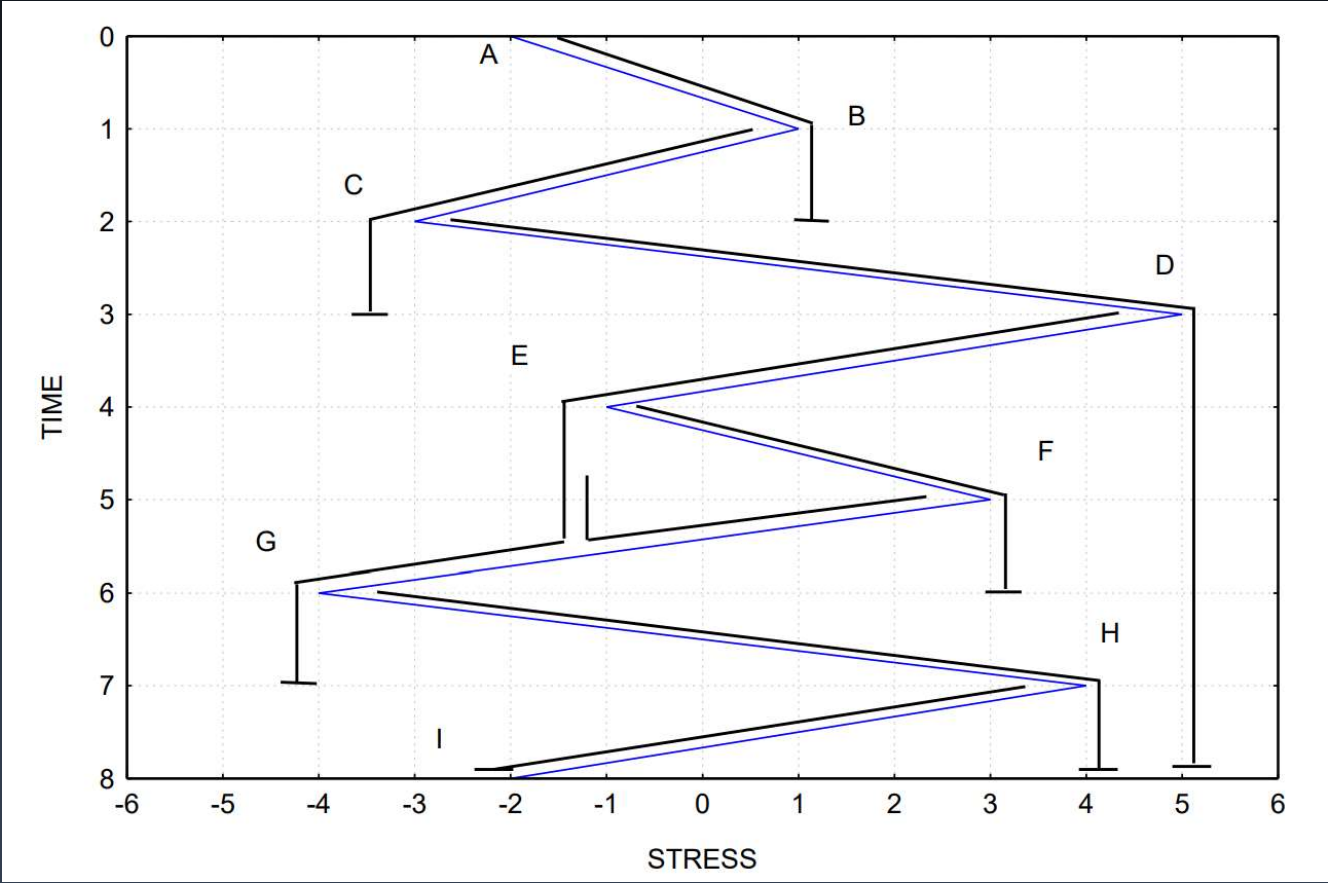
Zona plástica reversa



Ciclo histerético correspondente ao carregamento



Método Rainflow



Método Rainflow

Table 1. Rainflow Cycles by Path

Path	Cycles	Stress Range
A-B	0.5	3
B-C	0.5	4
C-D	0.5	8
D-G	0.5	9
E-F	1.0	4
G-H	0.5	8
H-I	0.5	6

Note that E-F is counted as one cycle because is it considered to contain some of F-G.

Método Rainflow

Table 2. Rainflow, Total Cycles

Stress Range	Total Cycles	Path
10	0	-
9	0.5	D-G
8	1.0	C-D, G-H
7	0	-
6	0.5	H-I
5	0	-
4	1.5	B-C, E-F
3	0.5	A-B
2	0	-
1	0	-

Métodos de contagem

- Diferentes métodos aplicados a um mesmo espectro podem resultar em faixas de tensão diferentes
- Rainflow leva a faixas mais severas
- Não se armazena a ordem das solicitações, apenas o número de ciclos de cada faixa

Fadiga em modo misto

- Solicitações reais frequentemente incluem solicitação da trinca em modos diferentes da abertura simples por tração (Modo I)
- Molas helicoidais: esforços de torção \rightarrow propagação da trinca é predominantemente modo II.
- Em situações reais, a intensidade e direção do vetor força variam

Fadiga Multiaxial

- Nucleação de trincas, assim, como no modo uniaxial, se dá em planos preferenciais (planos críticos):
 - Máximas tensões de cisalhamento :
 - Tensão normal perpendicular altera fechamento prematuro de trincas
 - Máximas tensões principais
 - Máximas deformações principais

Fadiga multiaxial

- Endurecimento não proporcional
 - Aumento adicional de LE em situações de defasagem de carregamento
- Plano de máxima tensão cisalhante roda no espaço em caso de carregamento defasado