

UNIVERSIDADE  
BEIRA INTERIOR

# Introdução à Mecânica da Fratura

## Estruturas Aeroespaciais II (10373/15095)

1º Ciclo/Mestrado Integrado em Engenharia  
Aeronáutica

2023

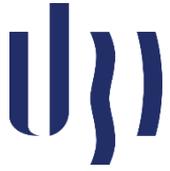
Pedro V. Gamboa

Departamento de Ciências Aeroespaciais  
Faculdade de Engenharia



# 1. Introdução

- A Mecânica da Fratura é um ramo da Mecânica que estuda a propagação de fendas em materiais.
- Ela usa métodos da mecânica dos sólidos analítica para calcular a força que provoca a fenda e métodos da mecânica dos sólidos experimental para caracterizar a resistência dos materiais à fratura.
- Na Ciência dos Materiais moderna, a mecânica da fratura é uma ferramenta importante para melhorar o desempenho mecânico de componentes mecânicos e estruturais.
- Ela aplica a física da tensão e da extensão, em particular as teorias de elasticidade e de plasticidade, aos defeitos cristalográficos microscópicos encontrados em materiais reais por forma a prever a falha macroscópica mecânica dos corpos.



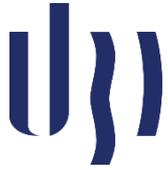
# 1. Introdução

- A fractografia é usada na mecânica da fratura para compreender as causas das falhas e também verificar as previsões teóricas de falha que ocorrem em falhas da vida real.
- A previsão da propagação de fenda está no cerne da disciplina de tolerância ao dano.



## 2. Ruína de Materiais

- A ruína de um material traduz-se por uma alteração do tamanho, forma e outras propriedades mecânicas de um dado componente que conduzem a um comprometimento dos seus requisitos funcionais.



## 2. Ruína de Materiais

- Existem diversos tipos de modos de falha:
  1. Deformação elástica por aplicação de força e/ou induzida pela temperatura
  2. Deformação plástica (ultrapassando o limite de cedência do material)
  3. Rutura dúctil
  4. Fratura frágil
  5. Fadiga (HCF, LCF, fadiga térmica, fadiga por fretagem, fadiga/corrosão)
  6. Corrosão
  7. Desgaste
  8. Impacto
  9. Fretagem (fretting)
  10. Fluência
  11. Encurvadura (Flambagem)
  12. Choque térmico
  13. ...

Alguns destes modos concorrem simultaneamente para a degradação do material!



## 2. Ruína de Materiais

- Principais causas da ruína:
  - 1. Deficiência de projeto**
    1. Desconhecimento do efeito de possíveis concentrações de tensão
    2. Informação desajustada sobre as cargas de serviço do componente
    3. Análise de tensões pouco exata ou pouco desenvolvida
  - 2. Material deficiente**
    1. Dados inadequados para a escolha de materiais
    2. Defeitos no material (heterogeneidade, defeitos de fabrico)
    3. Fraca concordância entre as condições de serviço e os critérios de seleção
  - 3. Sobrecargas introduzidas em serviço**
  - 4. Procedimentos inadequados de manutenção e/ou reparação**
  - 5. Fatores ambientais**
    1. Temperatura (elevada ou baixa)
    2. Ação corrosiva do ambiente



## 2. Ruína de Materiais

Quando estamos perante um estado de tensões multiaxial, existem critérios de cedência adequados para prever a falha do material:

- **Critério de Von Mises** (critério da energia de distorção): considera que a ruína por cedência num estado multiaxial de tensões ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume iguala ou excede a energia de distorção por unidade de volume de um provete do mesmo material ensaiado uniaxialmente:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sigma_{ced} \quad (3.01)$$



## 2. Ruína de Materiais

- **Critério de Tresca** (critério da tensão de corte máxima): considera que a ruína por cedência num estado multiaxial de tensões ocorre quando a tensão de corte máxima por unidade de volume iguala ou excede a tensão de corte de cedência (que é igual a metade do valor da tensão direta de cedência) por unidade de volume de um provete do mesmo material ensaiado uniaxialmente:

$$\tau_{\max} = \max\left(\frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}, \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_3 - \sigma_1|}{2}\right) = \tau_c = \frac{\sigma_{ced}}{2} \quad (3.02)$$
$$\Leftrightarrow \sigma_{eq} = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) = \sigma_{ced}$$

Notar que a tensão equivalente é aquela que num estado multiaxial de tensões produz o mesmo efeito que a tensão de cedência num estado de tensão uniaxial.



## 2. Ruína de Materiais

A rutura de componentes aeronáuticos é, muitas vezes, provocada pela propagação de fendas no contexto de um carregamento cíclico induzido durante o seu tempo de serviço.

Por isso, torna-se imperativo desenvolver técnicas de previsão de vida à fadiga que possam garantir a integridade estrutural destes componentes com um grande rigor.

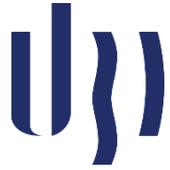
De entre estas metodologias, destacam-se as seguintes:

- **LTFC (Life To First Crack):** considera-se que o componente não tem qualquer dano aquando da entrada ao serviço, sendo retirado após a deteção de uma fenda de tamanho máximo imposto pelas normas (aproximadamente 0,38mm)



## 2. Ruína de Materiais

- **RFC (Retirement For Cause):** a monitorização de fendas é feita de uma forma continuada através de técnicas de inspeção não destrutivas, permitindo um prolongamento significativo do tempo de utilização do componente
- **Utilização da Mecânica da Fratura** como instrumento de previsão de propagação de fendas através de modelos adequados. A utilização de simulações computacionais é frequente (através da modelação por elementos finitos) e criam-se bases de dados aplicáveis a diferentes materiais, geometrias, condições de serviço, etc.

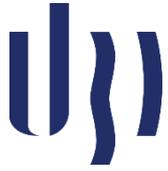


## 2. Ruína de Materiais

A observância crescente da necessidade de minimização de falhas de componentes em serviço levou a que, durante os últimos 60 anos, surgisse uma nova área científica dedicada ao estudo aprofundado dos mecanismos de ruína e à prevenção da fratura frágil: a **Mecânica da Fratura**.

Evolução histórica do estudo dos mecanismos associados à fratura:

- durante o século XVII, Galileu desenvolveu estudos intensivos dedicados à avaliação da resistência mecânica de alguns materiais à fratura mediante a aplicação de cargas estáticas de caráter progressivo
- em 1843, Rankine viria a comentar, pela primeira vez, as fraturas súbitas que afetavam recorrentemente os eixos das composições ferroviárias



## 2. Ruína de Materiais

- em 1860, o engenheiro alemão Wohler debruçou-se sobre o estudo sistemático do problema da fadiga em eixos de composições ferroviárias, recorrendo, para tal, a ensaios de caracterização mecânica para identificação das causas inerentes à ruína daqueles componentes
- em 1921, Griffith investigaria experimentalmente a propagação de fendas num conjunto de provetes de vidro sujeitos a esforços de tração, propondo que a fonte de energia necessária para a propagação das fendas estivesse diretamente relacionada com a energia de deformação atuante na sua extremidade durante a sua progressão



## 2. Ruína de Materiais

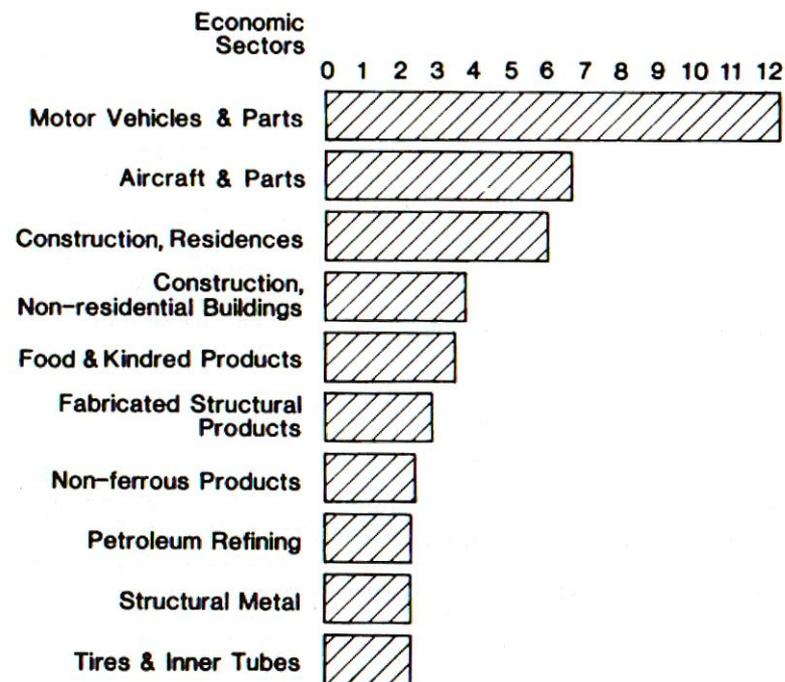
- a ASTM (American Society for Testing and Materials) decidiu criar, em 1959, um comitê especialmente dedicado ao estudo da Mecânica da Fratura, tendo este estabelecido métodos analíticos especificamente dedicados para o estudo experimental de fraturas de componentes mecânicos válidos até à atualidade

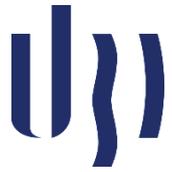


## 2. Ruína de Materiais

Um estudo levado a cabo pelo Departamento de Comércio dos E.U.A. em 1983 concluiu que, em termos médios, os custos económicos anuais resultantes de ruínas por fratura ocorridas naquele país rondariam os 4% do valor do seu produto interno bruto, qualquer coisa como 119 mil milhões de dólares:

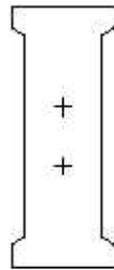
**Major Sector Contributions to the Annual Costs of Fracture (1982 Dollars in Billions)**





## 2. Ruína de Materiais

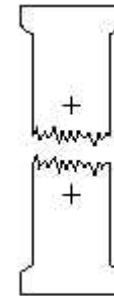
### Tipos de fraturas:



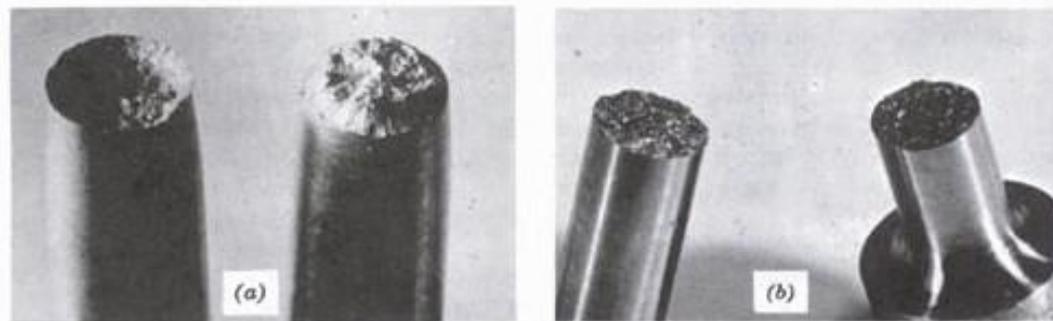
Geometria inicial



Fratura dúctil



Fratura frágil



Fratura dúctil

Fratura frágil



## 2. Ruína de Materiais

### Rutura dúctil:

- A rutura dúctil ocorre numa determinada zona de um componente quando aí se atinge um nível de tensões superior ao limite elástico do material. Verifica-se, por isso, uma mudança irreversível da sua geometria
- Em muitos casos, a deformação lenta e progressiva de um dado material resulta num processo de encruamento ou endurecimento, pelo que o nível de tensão necessário para atingir a cedência é aumentado
- Devem evitar-se zonas de concentração de tensões ou heterogeneidades que possam alterar a distribuição do carregamento e induzir cedência localizada



## 2. Ruína de Materiais

### **Fratura frágil:**

- Ao contrário da rutura dúctil, a fratura frágil ocorre de forma súbita, resultando da propagação instável (rápida) de uma fenda
- Praticamente não se verificam indícios de deformação plástica → a rutura do componente pode ocorrer para tensões nominais inferiores à tensão de cedência do material
- Alguns fatores promovem a fragilização do material:
  - Baixas temperaturas de serviço
  - Elevadas velocidades de deformação ou de carregamento
  - Existência de entalhes
  - Estados triaxiais de tensão



## 2. Ruína de Materiais

### Fratura frágil:

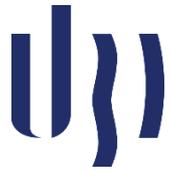
- A contribuição destes fatores (isolada ou conjuntamente) pode levar à ocorrência de fraturas em materiais que apresentem um comportamento dúctil em condições normais de serviço
- A resistência à fratura frágil pode ser determinada através de ensaios experimentais que submetam o componente a deformações e cargas súbitas. Normalmente, recorre-se a um ensaio de impacto que permite relacionar a energia armazenada pelo material até ao instante da fratura.
- A energia de impacto representa, pois, a aptidão do material em suportar choques, traduzindo a sua **resiliência** ou **tenacidade**, conforme este esteja, respetivamente, em condições de domínio elástico ou plástico



## 2. Ruína de Materiais

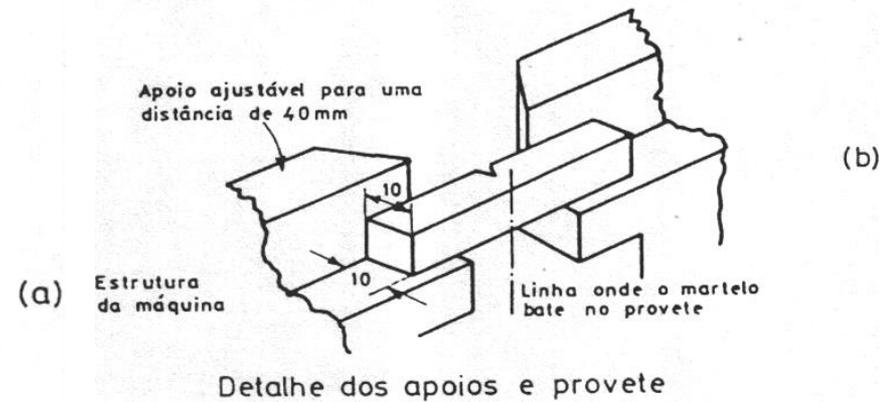
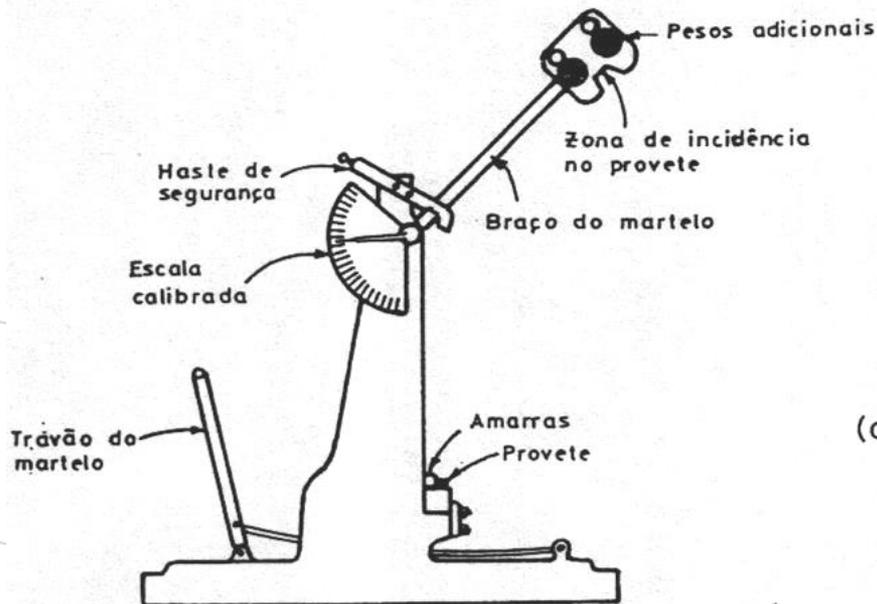
### Fratura frágil:

- Notar que a capacidade de absorção de energia varia com a temperatura
- Os ensaios mais convencionais, como o **ensaio Charpy**, recorrem a provetes entalhados que sofrem esforços de flexão súbitos decorrentes do impacto causado por um pêndulo largado de diferentes alturas. A medida da altura atingida pelo pêndulo após o impacto (e conseqüente fratura do provete) está relacionada com a energia dispendida no processo de fratura (i.e, quanto maior for a energia absorvida na fratura, menor será a altura atingida pelo pêndulo).



## 2. Ruína de Materiais

### Ensaio Charpy:





# 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.1. Fadiga

- A fadiga consiste num processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas, e que pode resultar na nucleação de fendas e sua posterior propagação, atingindo-se, eventualmente, a fratura completa do componente após um número suficiente de variações de carga.
- O nível das tensões dinâmicas que levam à rutura do componente é menor do que as cargas consideradas “seguras” obtidas em condições de carregamentos estáticos.



## 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

### 3.1. Fadiga

- Este mecanismo pode surgir mesmo em condições de solicitações de pequena amplitude, sendo frequente a sua combinação com outros mecanismos que tendem a agravar o problema, tais como a temperatura (originando uma conjugação dos fenômenos de fadiga-fluência), corrosão (fadiga-corrosão) e atrito (incluindo-se, neste caso, o processo de fadiga por fretagem)



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.1. Fadiga

### Exemplo: o caso da aeronave De Havilland Comet





## 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

### 3.1. Fadiga

- **LCF (*Low Cycle Fatigue*)** → ocorre para níveis de tensão relativamente elevados (podendo ultrapassar a tensão de cedência do material) que, induzindo deformações plásticas significativas nos componentes, levarão à sua rutura após um número de aplicações da carga relativamente reduzido, tipicamente entre  $10^4$  e  $10^5$  ciclos.
- **HCF (*High Cycle Fatigue*)** → define-se como sendo um processo inerente a níveis de tensão menos elevados e, conseqüentemente, à deformação do material essencialmente no domínio elástico (pelo menos considerando a fase inicial da propagação da fenda). Neste caso, a eventual rutura do componente ocorrerá para um número total de ciclos tipicamente acima dos  $10^5$ .



## 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

### 3.1. Fadiga

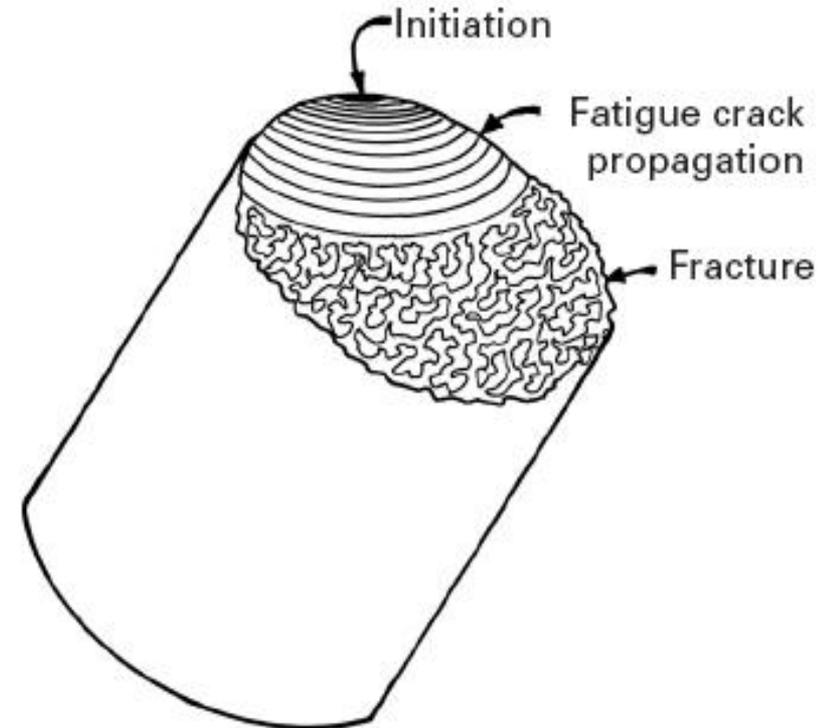
- Considerando a fadiga a alto número de ciclos, podemos dizer que este processo abarca sempre quatro etapas fundamentais: a **nucleação** da fenda, o seu **crescimento** microscópico, a sua **propagação** e a **ruptura final** do componente.



## 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

### 3.1. Fadiga

- Região de nucleação/iniciação da fenda (normalmente à superfície).
- Propagação da fenda por fadiga (evidenciada pelas curvas).
- Ruptura catastrófica quando o comprimento da fenda excede o comprimento crítico na tensão aplicada.





### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

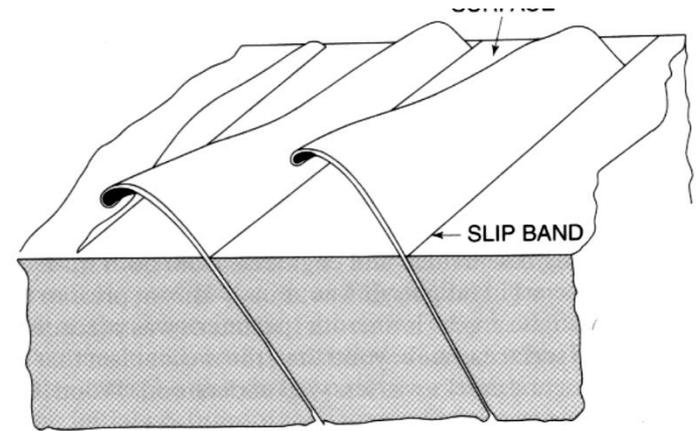
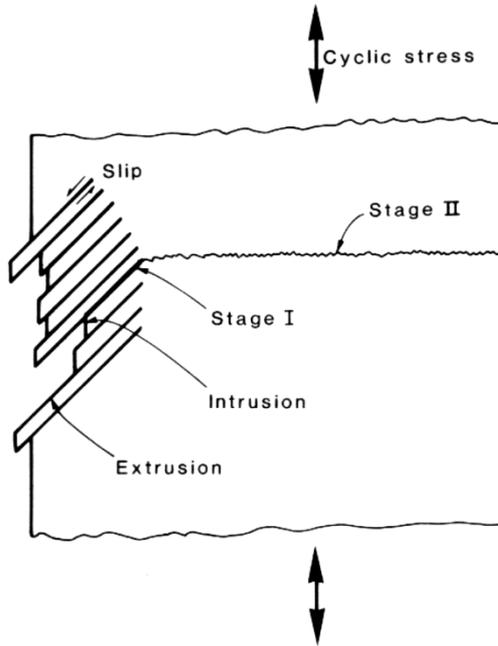
## 3.2. Iniciação da fenda

- A iniciação de uma fissura está quase sempre associada a uma concentração de tensões ocorrida em defeitos presentes no material, tais como defeitos de acabamento superficial inerentes ao processo de fabrico do componente;
- A nucleação de uma fenda pode, também, ocorrer no interior do material, sendo esta uma situação típica dos componentes com um elevado nível de acabamento superficial. Neste caso, o dano é promovido pela presença de defeitos internos (porosidades, inclusões, interfaces de diferentes elementos, etc...)



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.2. Iniciação da fenda



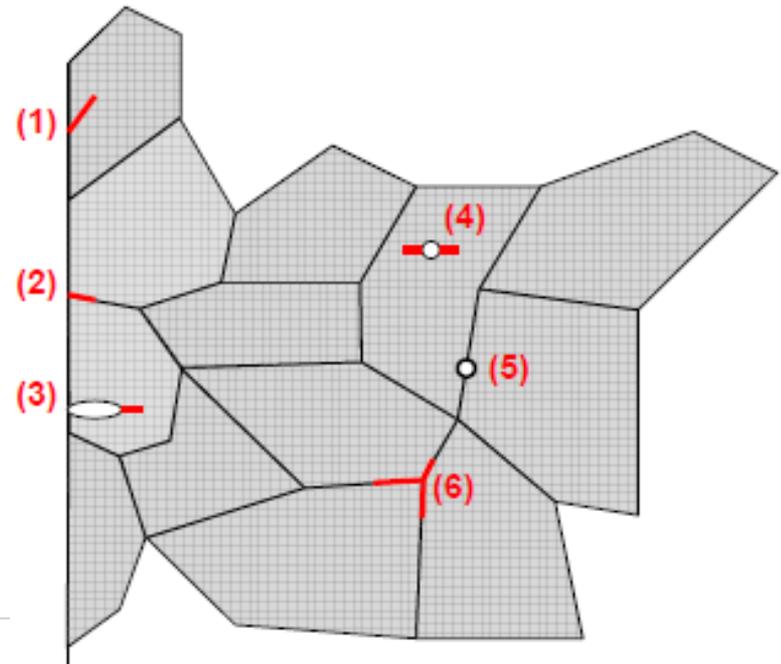


### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.2. Iniciação da fenda

Nas ligas metálicas, existem várias localizações onde a iniciação da fenda pode ocorrer:

1. Iniciação superficial transgranular
2. Iniciação superficial intergranular
3. Iniciação na superfície de defeito
4. Iniciação numa inclusão interna
5. Iniciação em vazios interiores nas fronteiras de grãos
6. Iniciação em fronteiras de grãos

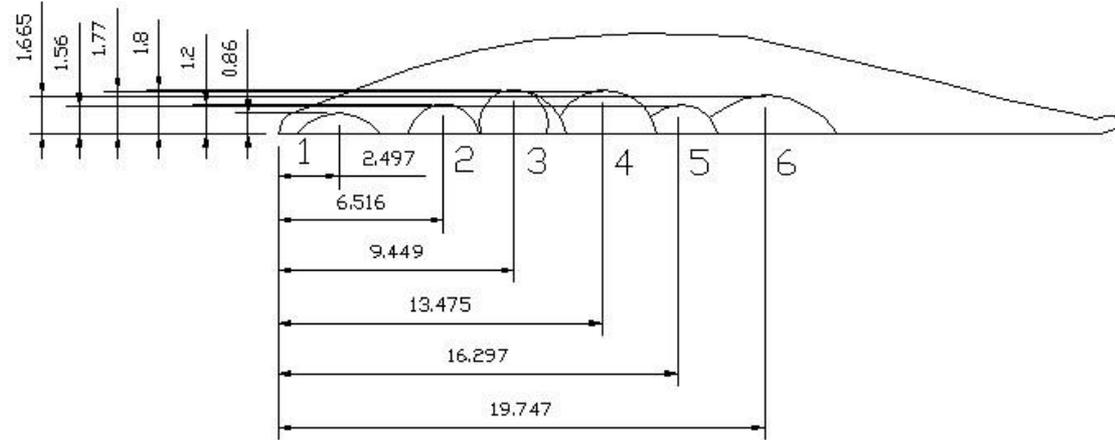
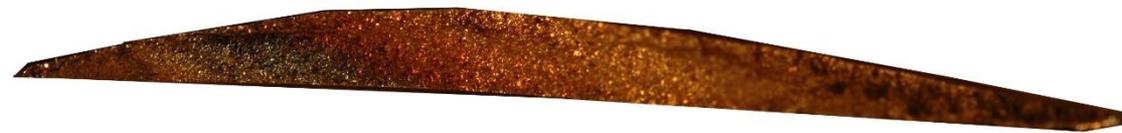




### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.2. Iniciação da fenda

**Exemplo: nucleação de fendas em pá de compressor**

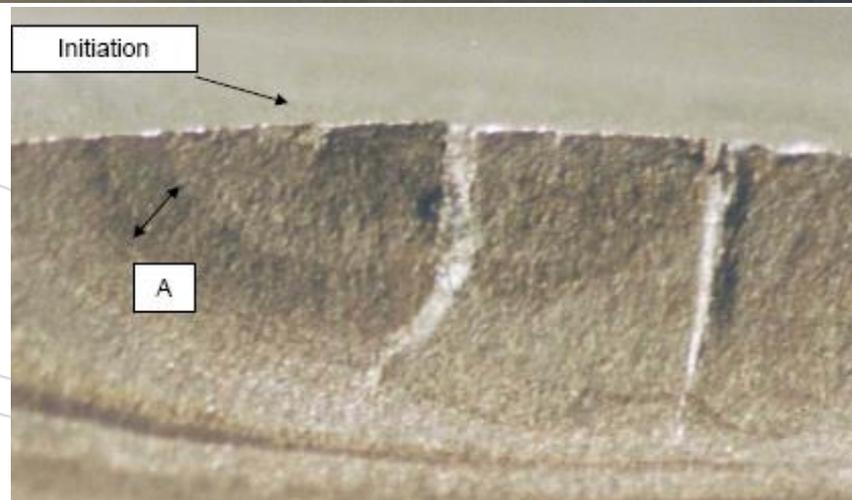
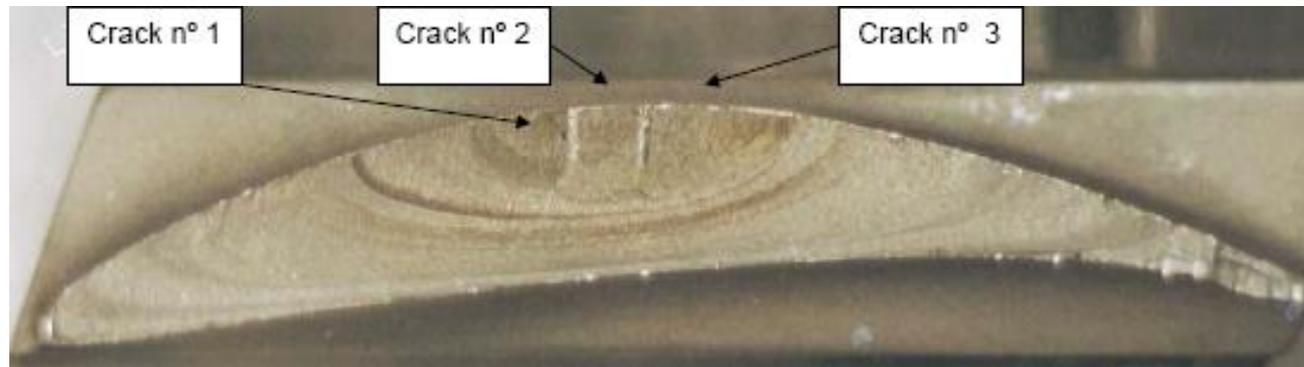




### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.2. Iniciação da fenda

**Exemplo: nucleação de fendas em pá de compressor**

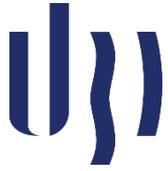




### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.3. Propagação da fenda

- Durante a etapa de propagação, a fenda poderá atingir dimensões apreciáveis devido a diferentes tipos de micromecanismos de dano atuantes na sua extremidade, dos quais se destacam os seguintes:
  - Microclivagem;
  - Coalescência de microcavidades;
  - Estriação (dúctil ou frágil).

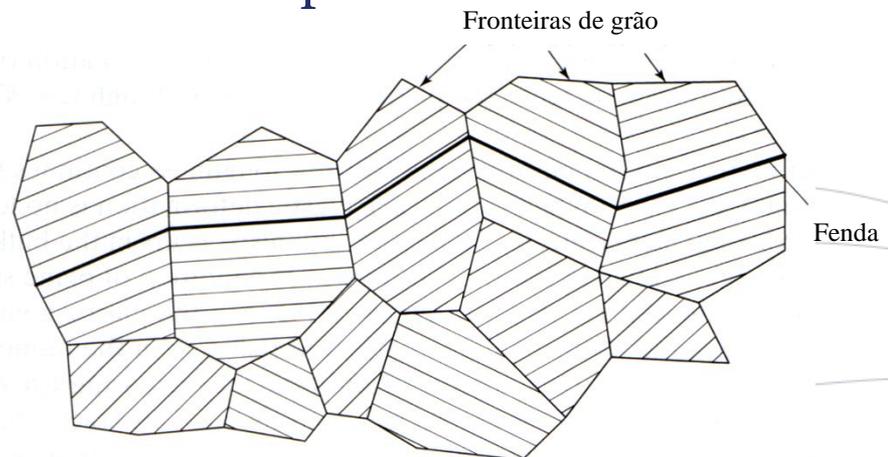


### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.3. Propagação da fenda

**Clivagem:** A fenda percorre o interior dos grãos segundo diferentes direções (**fratura transgranular**), pelo que as superfícies de fratura associadas a este mecanismo de propagação apresentam, tipicamente, um padrão característico onde são visíveis superfícies planas que se sucedem em socalcos, com um aspeto brilhante e sem quaisquer indícios de ductilidade.

Aliás, a clivagem está, normalmente, relacionada com a aplicação de **carregamentos de baixo valor de intensidade de tensões** (baixa absorção de energia) em **materiais de caráter frágil**, sendo também promovida por ambientes a baixas temperaturas.





## 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

### 3.3. Propagação da fenda

#### **Coalescência de cavidades:**

Mecanismo associado a **maiores valores de energia de fratura e a deformações plásticas mais intensas**, ainda que a uma escala microscópica.

A propagação faz-se ao longo de zonas críticas situadas a jusante da fenda, onde os valores de tensão locais poderão ultrapassar o limite de cedência do material.

Estes pontos críticos estão, normalmente, associados a **inclusões e partículas de segunda fase**, ambas associadas ao processo de fabrico de grande parte das ligas metálicas, e a microcavidades provocadas pela concentração localizada de átomos de hidrogénio na rede cristalina do material.

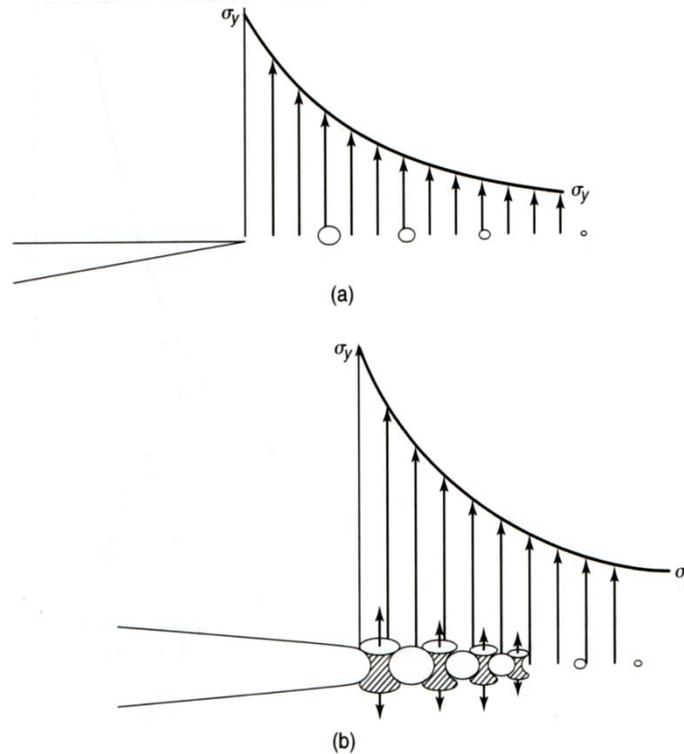
O avanço da fenda ocorrerá através de esforços de corte induzidos por deformação plástica entre a extremidade desta e as zonas de elevada concentração de tensões situadas imediatamente à sua frente, pelo que se formam microcavidades que tendem a aglutinar-se e, conseqüentemente, aumentam o comprimento da fissura.



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.3. Propagação da fenda

### Coalescência de cavidades:



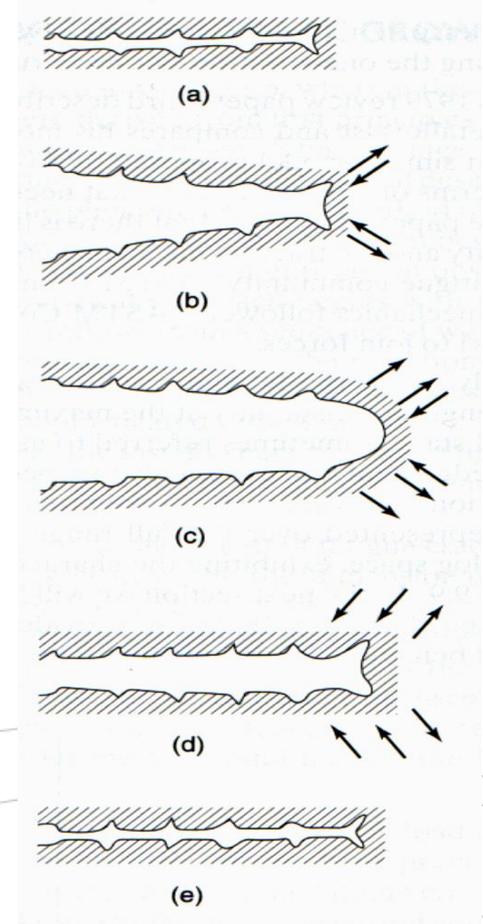
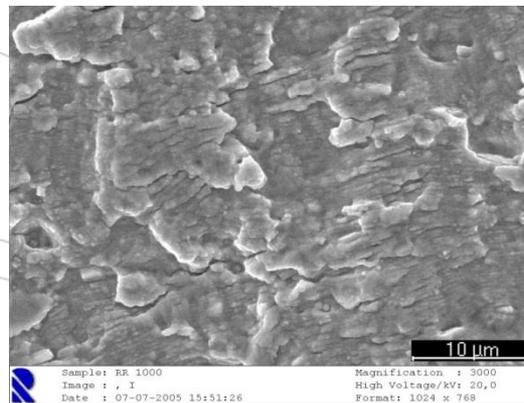


### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.3. Propagação da fenda

### Estriação:

Existe uma relação entre o avanço intermitente de uma frente de fenda por fadiga com a sucessão entre as etapas de formação e destruição de linhas de escorregamento na sua extremidade, sendo possível estabelecer uma interligação entre este processo e a formação de marcas visíveis na superfície de fratura e distanciadas a espaços regulares, conhecidas como estrias de fadiga.

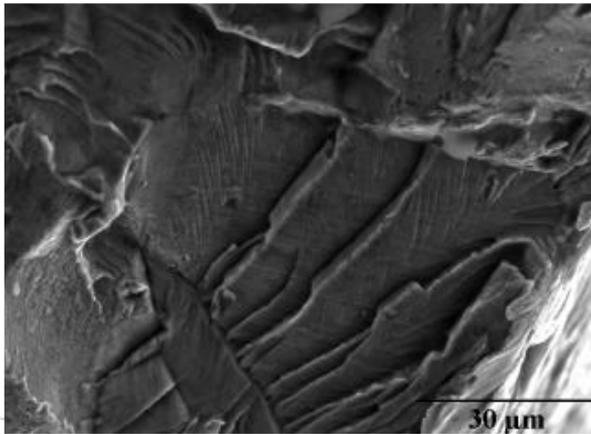




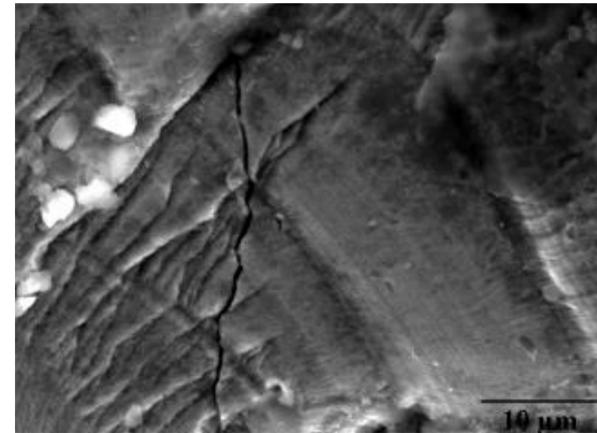
### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.3. Propagação da fenda

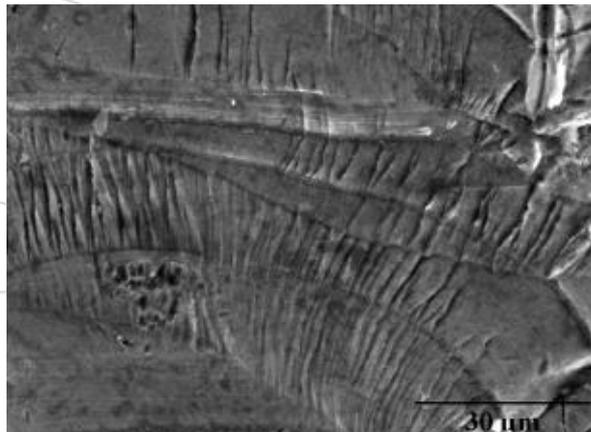
Exemplos de propagação de fendas por fadiga:



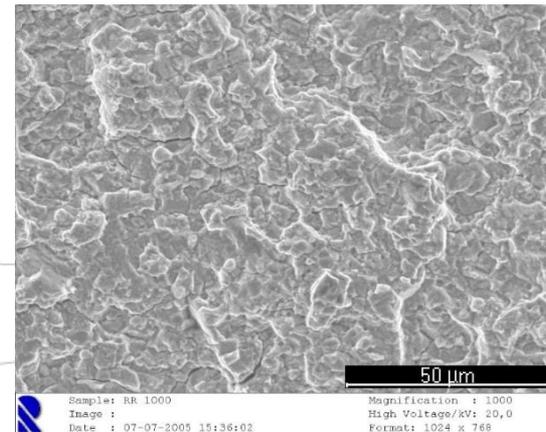
Fratura frágil



Fissuração secundária



Fratura transgranular



Propagação intergranular

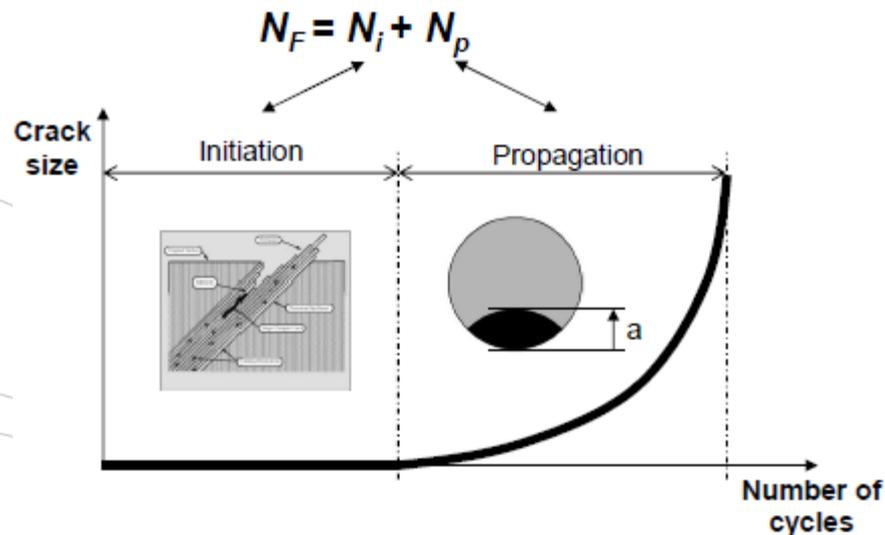


### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.4. Fases da vida à fadiga

### Iniciação e propagação da fenda:

- Geralmente, o principal objetivo do dimensionamento à fadiga é determinar o número total de ciclos  $N_f$  da estrutura.
- $N_f$  é a soma dos ciclos para a iniciação  $N_i$  com os ciclos da propagação  $N_p$ .
- A razão  $N_i/N_f$  depende da estrutura e do carregamento.

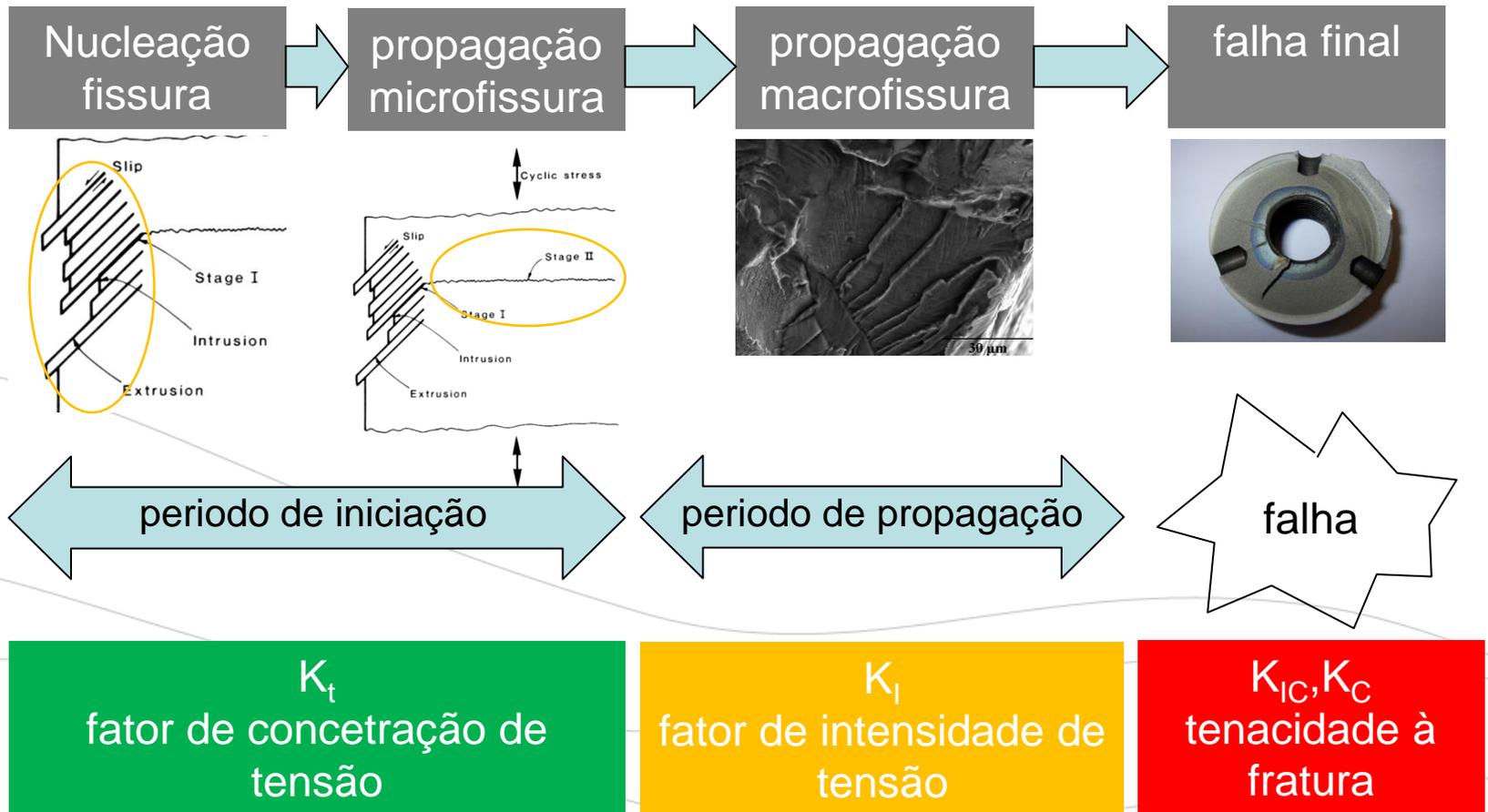




### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.4. Fases da vida à fadiga

### Diferentes fases da vida à fadiga:





### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.5. Conceitos de projeto à fadiga

As atuais filosofias de projeto à fadiga de componentes mecânicos dividem-se em dois conceitos: *vida garantida* e abordagem *tolerante ao dano*.

A diferença principal entre ambos os conceitos reside na forma como se quantifica o processo de danificação desde a fase de iniciação da fenda até à sua posterior propagação;

- No conceito ***vida garantida*** (“safe life”), um dado componente é projetado admitindo que será retirado de serviço logo após ter sido detetada uma microfissura inicial. Neste contexto, o projeto é essencialmente orientado para a fase de iniciação de fendas e sua propagação até comprimentos de reduzida dimensão (tipicamente abaixo de 1 mm);



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.5. Conceitos de projeto à fadiga

- Abordagem de **vida garantida** (“safe life”) – iniciação:  
Desenvolvida no anos 1950: **não é permitido qualquer dano** na estrutura ao longo da sua vida; ou a **estrutura com dano tem que resistir cargas finais** sempre.

O tempo de vida à fadiga  $N$  tem que ser demonstrado:

- Por testes
- Por cálculo para versões derivadas

Usa-se um fator de segurança  $k$  aplicado ao tempo de vida à fadiga demonstrado:

- $k=5$  no caso geral com demonstração por testes
- $k=3$  por exemplo para uma estrutura que é monitorizada em serviço para o número de ciclos

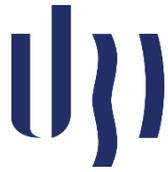
$$N_{\text{certificação}} = \frac{N}{k} \quad (3.03)$$



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.5. Conceitos de projeto à fadiga

- Na abordagem ***tolerante ao dano*** (“fail safe”), o projetista assume que qualquer componente é passível de possuir um dano inicial que poderá propagar-se até um valor limite antes da sua retirada de serviço. Este valor pode ser obtido graças à Mecânica da Fratura, sendo definido em termos da tenacidade à fratura do material, da carga limite ou de qualquer critério de deformação adequado. Esta filosofia de projeto surgiu num contexto mais recente associado a estruturas críticas, especialmente no domínio do setor aeroespacial e da indústria nuclear.



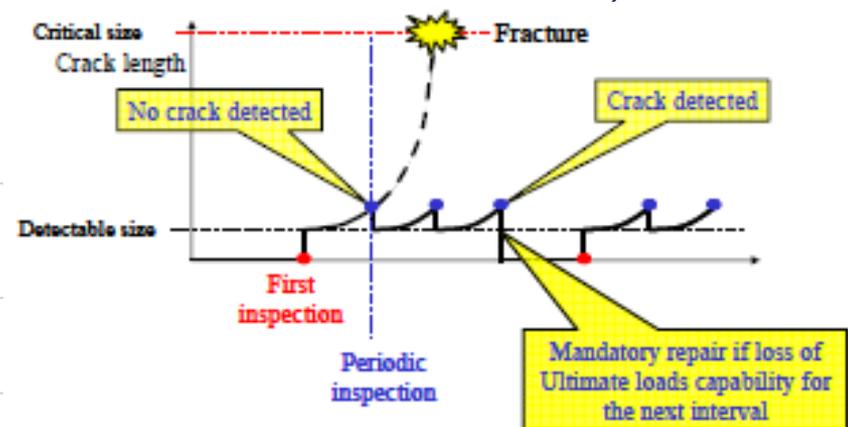
### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.5. Conceitos de projeto à fadiga

- Abordagem de **tolerância ao dano** (“fail safe”) – propagação: Desenvolvida no anos 1970: assume-se que todos os componentes contêm dano o qual **pode existir desde sempre ou que foi criado durante o serviço**.

O tempo de vida à fadiga é definido como sendo o necessário até o dano atingir um tamanho crítico.

Baseia-se no limite de redundância: depois da falha de um caminho de transmissão de esforços, o segundo caminho frequentemente apresenta danos que podem levar a uma falha catastrófica; a vida até à falha tem que ser avaliada.

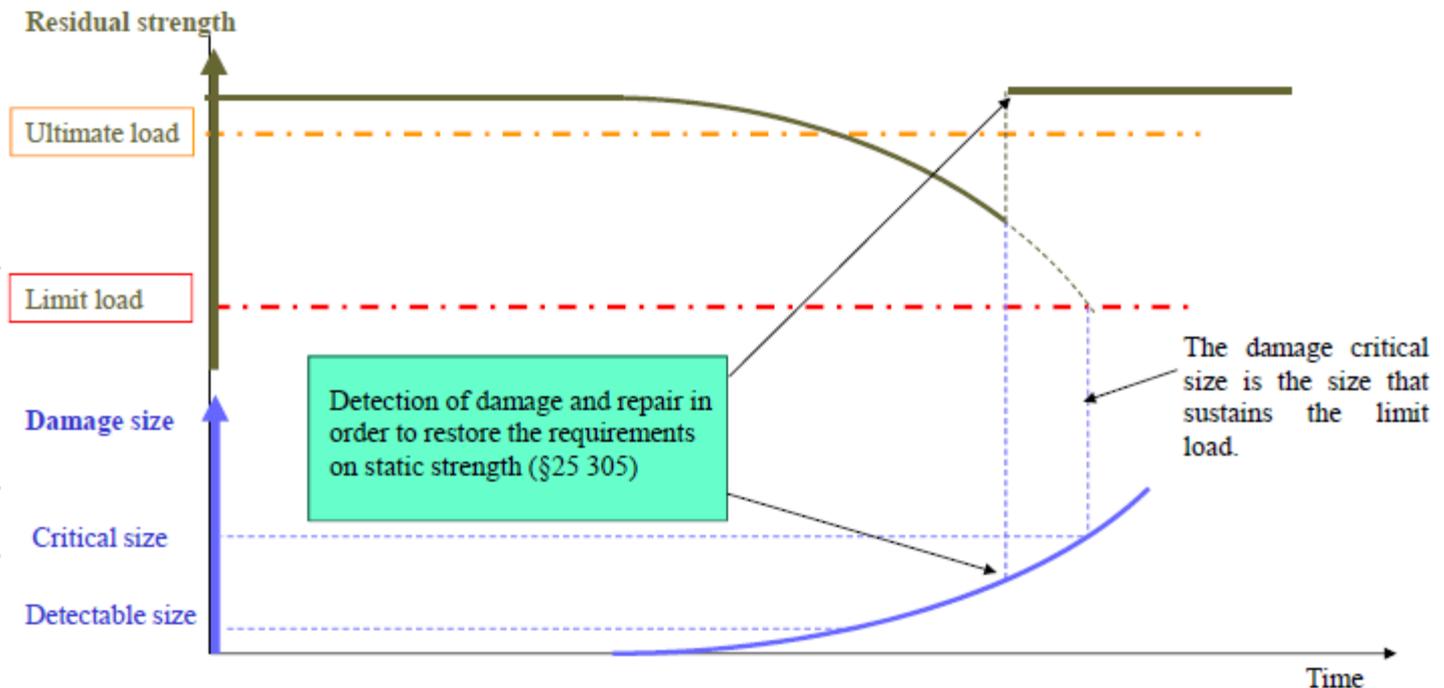




### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.5. Conceitos de projeto à fadiga

- Abordagem de **tolerância ao dano** (“fail safe”) – propagação: Conceito de tolerância ao dano de acordo com um crescimento de fenda estável:





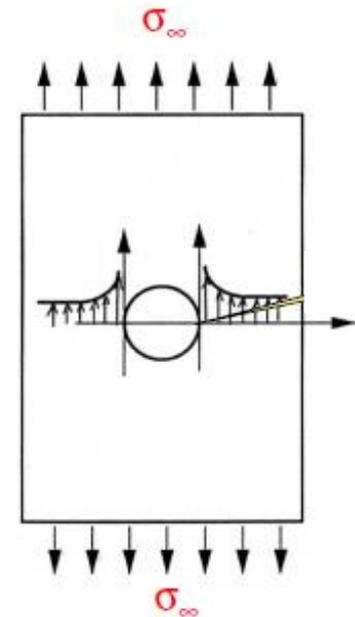
### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.6. Fator de concentração de tensão

Quando grandes gradientes de tensão ocorrem numa zona localizada da estrutura, a tensão elevada que se desenvolve chama-se concentração de tensão.

Próximo das mudanças de geometria de uma estrutura carregada, o fluxo normal de tensão é afetado causando grandes gradientes onde a tensão e a extensão máximas podem exceder em muito os valores nominais baseados em cálculos simples.

$K_t$  mede a severidade do defeito geométrico nas cargas estáticas lineares.



$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\infty}} \quad (3.04)$$



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão

Em 1957, Irwin propôs que a força necessária para a propagação de uma fenda fosse definida em termos de uma taxa de variação de energia de deformação associada à extensão da fenda com indícios de plastificação apenas junto às suas superfícies.

Esta componente energética foi designada pelo autor como  $G$ , traduzindo, afinal, a força que está mais diretamente relacionada com a extensão da fenda, permitindo, conseqüentemente, a quantificação do campo de tensões na sua extremidade.

A aplicação desta força irá implicar a acumulação de um nível de energia  $U$  associado às deformações elásticas verificadas em todo o volume do corpo.



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão

Se ocorrer uma variação infinitesimal do comprimento da fenda ( $da$ ), sendo  $a$  o comprimento da fenda, mantendo o deslocamento global num mesmo nível, então será expectável que ocorra uma variação de rigidez do corpo resultante da diminuição da energia potencial anteriormente acumulada, isto é,  $U$  irá sofrer uma variação  $dU$  em virtude de se verificar uma libertação de energia associada ao processo de fissuração.

Então, o parâmetro  $G$  é comumente utilizado como um aferidor da taxa de libertação de energia potencial provocada pelo avanço da fenda, podendo ser quantificado como

$$G = -\frac{1}{t} \frac{dU}{da} \quad (3.05)$$



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão

Desta forma, Irwin propôs que, em condições de estado plano de tensões, o campo de tensões na extremidade de uma fenda fosse caracterizado pelas equações abaixo.

Aqui, o termo  $E$  representa o módulo de elasticidade do material e  $\sigma_{ox}$  é uma tensão de valor constante que, por sobreposição, permite, segundo o autor, adaptar as expressões a certos níveis de arbitrariedade inerentes ao carregamento biaxial.

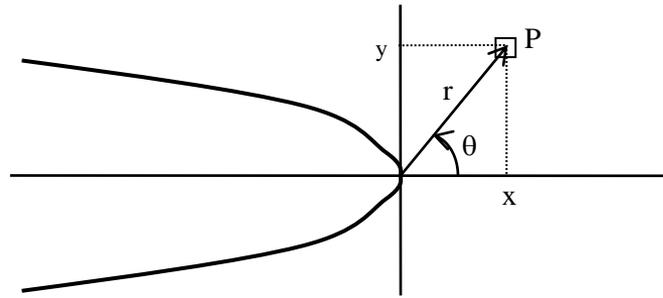
$$\sigma_y = \left( \frac{EG}{\pi} \right)^{1/2} \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\sqrt{(2r)}} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.06)$$

$$\sigma_x = \left( \frac{EG}{\pi} \right)^{1/2} \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\sqrt{(2r)}} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \sigma_{ox} \quad (3.07)$$



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão



$(r, \theta)$  são as coordenadas polares do ponto onde a tensão é considerada, sendo a origem na frente da fenda.

*Nota: As expressões acima foram desenvolvidas para estado plano de tensões e admitindo que a direção de propagação da fenda é perpendicular à direção de aplicação da carga!*



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão

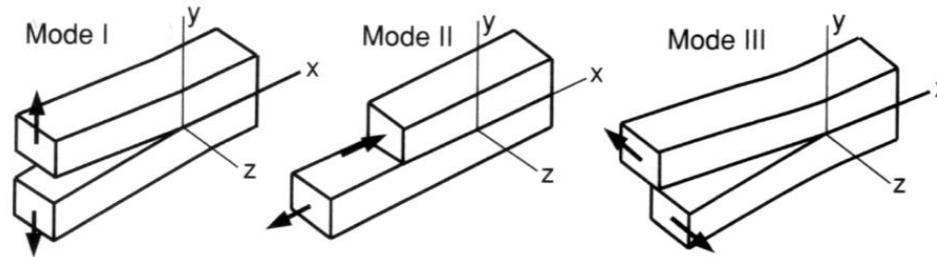
Contudo, outras situações de carregamento podem induzir diferentes modos de deformação e até condições de tri-axialidade de tensões, pelo que as equações anteriores podem assumir uma forma mais geral, tomando como referência os modos de propagação indicados na figura seguinte.

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_{zz} &= 2\nu \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} - 2\nu \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{yz} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad ; \quad \tau_{zx} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}\end{aligned}\tag{3.08}$$

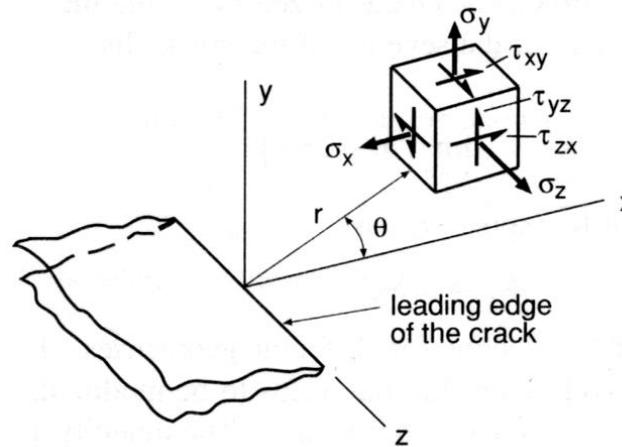


### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão



abrir/tração    corte no plano    corte fora do plano





### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão

O conceito de fator de intensidade de tensão,  $K$ , foi sugerido, pela primeira vez, por Irwin (1956), numa tentativa de caracterização das tensões singulares presentes na extremidade de uma fenda em função, apenas, de um único parâmetro, o que viria a revelar-se de uma utilidade inquestionável na abordagem da maior parte dos problemas relativos à Mecânica da Fratura.

- Em termos gerais, pode dizer-se que  $K$  caracteriza a intensidade (magnitude) das tensões na vizinhança de uma fenda aguçada (i.e., com raio nulo) presente num material linearmente elástico e isotrópico
- O fator de intensidade de tensão  $K$  pode ser obtido através de uma relação matemática que contabiliza os efeitos geométricos traduzidos pelo parâmetro adimensional  $Y$ , representativo da influência da geometria do provete, da posição e forma da fenda e da distribuição da carga



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão

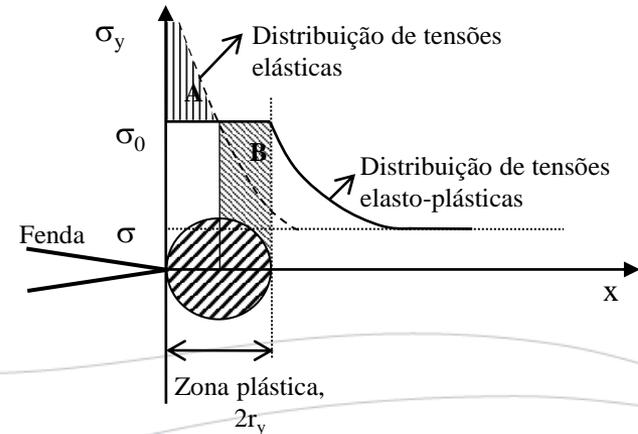
Assim

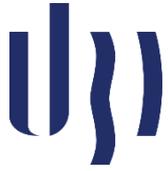
$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.09)$$

onde  $\sigma$  é a tensão nominal assumindo que não existe fissura.

Para que a utilização de  $K$  seja viável, as normas internacionais recomendam que a dimensão da zona plástica seja inferior a um valor dado por:

$$r_y \leq \frac{a}{50}$$

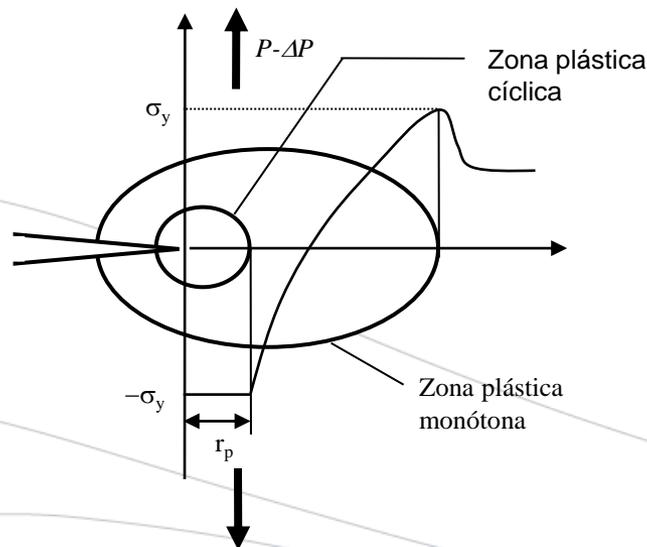




### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão

Rice foi o pioneiro a propor, em 1967, que a aplicação de um carregamento cíclico num material com uma fenda induziria, na extremidade desta, uma zona plástica dupla relativa às fases de aumento e diminuição da carga externa



$$r_p = \frac{1}{\alpha\pi} \cdot \left( \frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (3.10)$$



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão

Nesta expressão, o valor do parâmetro  $\alpha$  determina o tipo de carregamento, assumindo os valores 1 e 3 para condições de, respectivamente, estado plano de tensões e estado plano de extensões, enquanto os parâmetros  $\sigma_y$  e  $K_I$  representam, respectivamente, a tensão de cedência do material e o fator de intensidade de tensões.

A relação entre os parâmetros  $K$  e  $G$  está extensamente documentada na literatura de referência relacionada com o problema da fadiga dos materiais.

Assim, e considerando a condição geral de carregamento tri-dimensional envolvendo um estado plano de extensões, pode escrever-se a seguinte relação:

$$G = \frac{(1-\nu^2)}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{(1+\nu)}{E} K_{III}^2 \quad (3.11)$$



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão

Nesta expressão,  $E$  representa o módulo de elasticidade do material e  $\nu$  o seu coeficiente de Poisson.

De forma análoga, e considerando um estado plano de tensões:

$$G = \frac{1}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) \quad (3.12)$$

Rice provou que, para o caso particular de um material com um comportamento linear elástico,  $J$  representa a taxa de variação de energia potencial ( $dU$ ) associada ao avanço da fenda ( $da$ ), sendo por isso equivalente ao parâmetro  $G$ .

Então, pode estabelecer-se a seguinte relação:

$$J = G = -\frac{dU}{da} \quad (3.13)$$



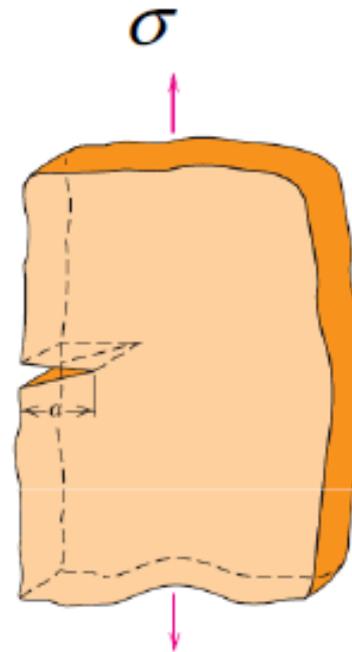
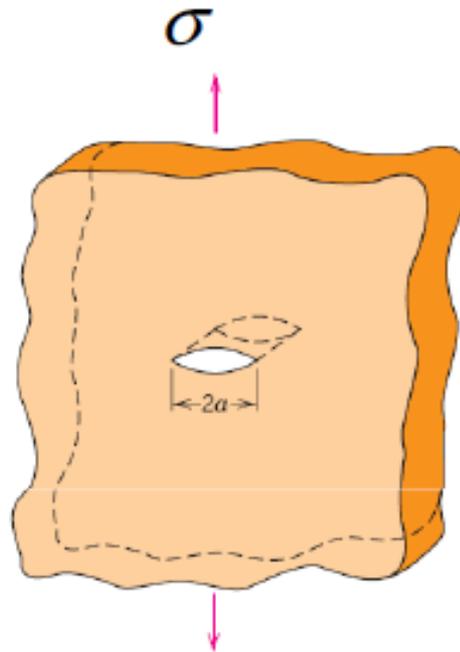
### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.7. Fator de intensidade de tensão

Fenda central com comprimento  $2a$

Fenda lateral com comprimento  $a$

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$



$$K_I = 1.12Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

O valor de  $Y$  muitas vezes não é conhecido:  $0,5 < Y < 2$



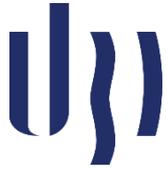
### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.8. Tenacidade à fratura

Uma vez que existe uma relação entre o fator de intensidade de tensões e a taxa de libertação de energia inerente ao processo de fissuração de um material, compreende-se facilmente que existirá, porventura, um valor crítico de  $K$  que corresponde a um nível de energia suficiente para a ocorrência de fratura instável.

Este valor crítico é designado por **tenacidade à fratura** do material e representa-se, habitualmente, como  $K_C$ .

Por sua vez, o valor de  $K_C$  depende do tipo de material em consideração, variando em função da temperatura e da espessura do componente.



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.8. Tenacidade à fratura

**Valores típicos da tenacidade à fractura de algumas ligas de engenharia**

| <b>Material</b>                          | <b><math>K_{IC}</math><br/>MPa<math>\sqrt{m}</math></b> | <b><math>\sigma_{cedência}</math><br/>MPa</b> |
|--|---|---|
| <b>Ligas de alumínio:</b>                |   |   |
| 2024-T851                                | 26,4  | 455   |
| 7075-T651                                | 24,2  | 495   |
| 7178-T651                                | 23,1  | 570   |
| <b>Liga de titânio:</b>                  |   |   |
| Ti-6Al-4V                                | 55  | 1035  |
| <b>Aços ligados:</b>                     |   |   |
| 4340 (aço de baixa liga)                 | 60,4  | 1515  |
| 17-7 pH (endurecimento por precipitação) | 76,9  | 1435  |
| aço maraging 350                         | 55  | 1550  |



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.8. Tenacidade à fratura

**Exemplo 3.01:** Para uma placa espessa o fator de forma  $Y$  é 1. Suponha que uma liga de aço tem uma tenacidade à fratura de  $88\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . O aço será exposto a uma tensão de  $310\text{ MPa}$  durante a sua operação. Calcule a dimensão mínima de uma fenda na superfície que irá propagar-se catastróficamente. Repita o cálculo para uma fenda interna.



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.8. Tenacidade à fratura

**Exemplo 3.02:** Uma placa de vidro relativamente grande está sujeita a uma tensão de tração de 40 MPa. Se a energia superficial específica for  $0,3 \text{ J/m}^2$  e o módulo elástico for 69 GPa, determine o comprimento máximo da fenda superficial que é possível obter sem haver falha. Assuma que  $X = 1$  e que  $Y = 1$ .



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.8. Tenacidade à fratura

**Exemplo 3.03:** Cálculos efetuados com base na coesão interatômica sugerem que a tensão de rutura do vidro é aproximadamente 10 GPa. No entanto, a tensão de rutura obtida experimentalmente para este material é de apenas 1,5% desse valor. Griffith propôs que esse valor baixo se deve à presença de defeitos no material.

Calcular a dimensão  $2a$  de uma fenda central, perpendicular à tensão direta aplicada na placa, consistente com a tensão de rutura experimental, sabendo que  $E=70$  GPa e  $G=1$  J/m<sup>2</sup>.



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.8. Tenacidade à fratura

**Exemplo 3.04:** Considere uma placa com uma fenda lateral em que a espessura é tal que se verificam condições de deformação plana. Sabendo que a largura da placa é de 1000 mm, responda às seguintes questões, usando os dois materiais da tabela:

- Ocorrerá fratura para uma tensão igual a  $2/3$  da tensão de cedência e um comprimento de fenda de 1 mm?
- Qual a dimensão crítica da fenda para essa mesma tensão?
- Qual a máxima tensão que pode ser aplicada para um comprimento de fenda de 1 mm sem danos permanentes?

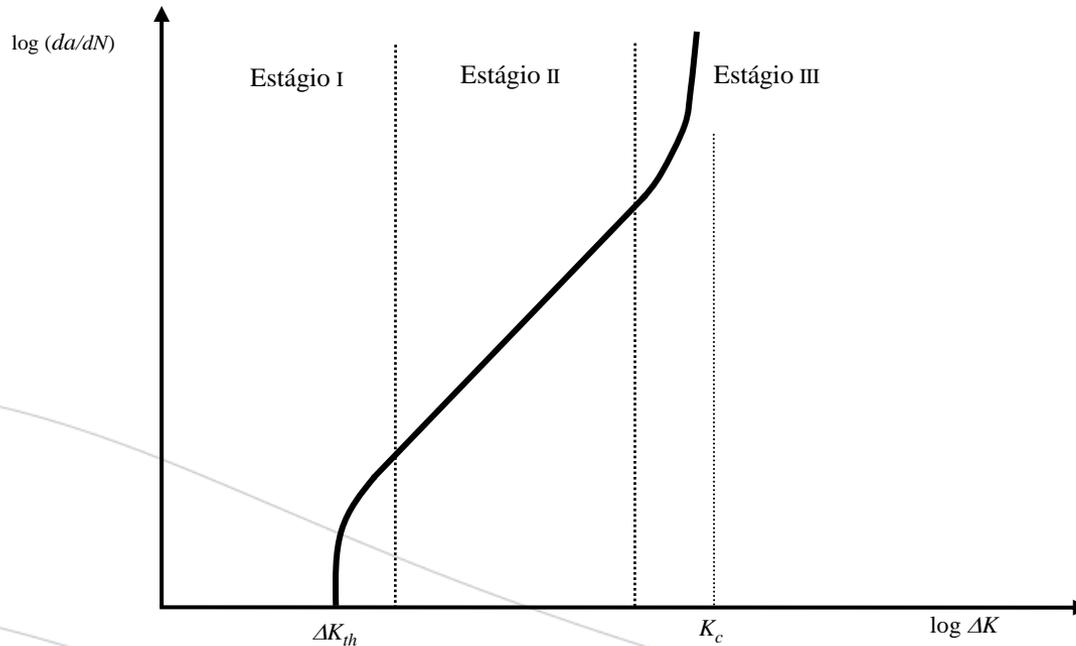
| Material   | Tensão de cedência, N/mm <sup>2</sup> | Tensão de ruptura, N/mm <sup>2</sup> | Tenacidade à fratura em deformação plana, N/mm <sup>3/2</sup> |
|------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---|
| Aço 4340   | 1470                                  | 1820                                 | 1500  |
| Al 7075-T6 | 500                                   | 560                                  | 1040  |



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.9. Propagação de fenda por fadiga

### Curvas de propagação de fendas:



Introdução à Mecânica da Fratura

**Lei de Paris**

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, K_{max}, K_{min}, \Delta K_{th}, E, \nu, \sigma_c, \sigma_u, \varepsilon_i, k_i) \longrightarrow \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3.14)$$



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.9. Propagação de fenda por fadiga

Um outro parâmetro importante é o limiar de propagação  $\rightarrow \Delta K_{lf}$ . Este parâmetro relaciona o nível de tensões aplicadas com a dimensão de um defeito no componente, considerando que este não se propaga por fadiga.

Assim, considerando um defeito de dimensão  $a$ , este propagar-se-á se a tensão aplicada for superior à dada pela seguinte expressão:

$$\Delta \sigma_p = \frac{\Delta K_{lf}}{Y \sqrt{\pi a}} \quad (3.15)$$

O valor do limiar de propagação é determinado por via experimental.



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.9. Propagação de fenda por fadiga

A previsão de vida à fadiga de um componente baseia-se em leis de propagação, sendo a **Lei de Paris** a mais conhecida.

Através da integração desta equação podemos determinar o número de ciclos até à condição de rutura por fadiga:

$$N_r = \frac{1}{C(\Delta\sigma)^m} \times I \quad (3.16)$$

Por sua vez, o integral de propagação  $I$  é dado pela expressão:

$$I = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{(Y\sqrt{\pi a})^m} \quad (3.17)$$

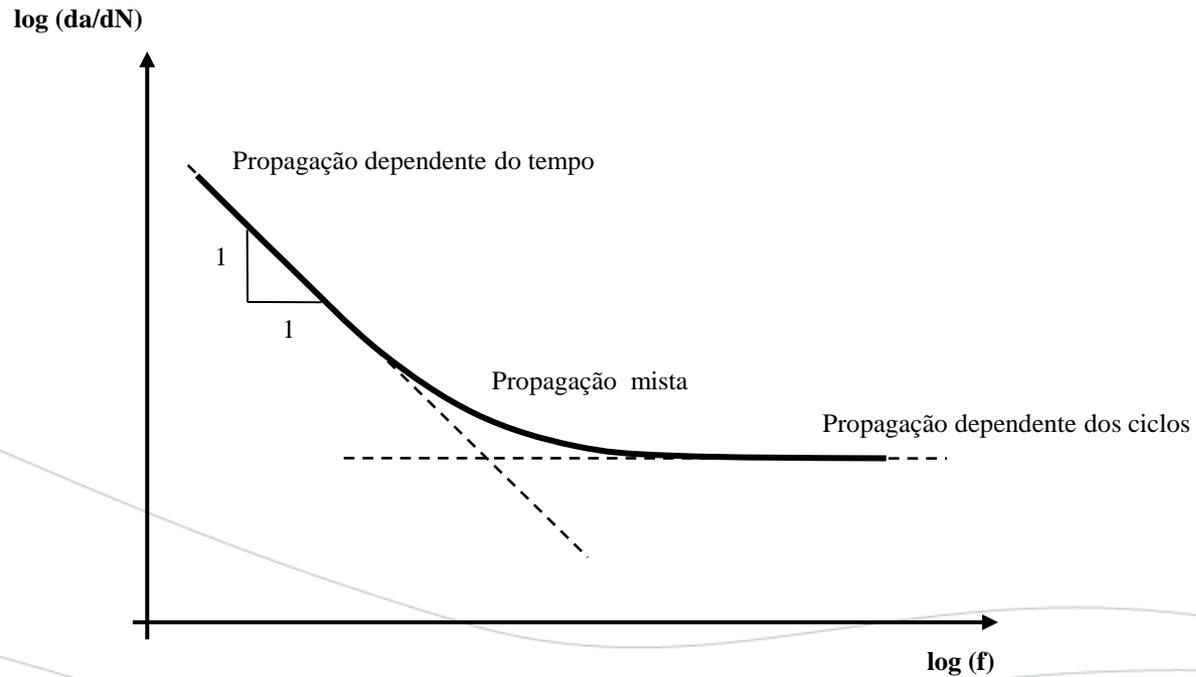


### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.9. Propagação de fenda por fadiga

### Efeito da frequência de carregamento:

Introdução à Mecânica da Fratura





### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.9. Propagação de fenda por fadiga

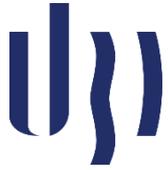
#### **Efeito da frequência de carregamento:**

As maiores frequências correspondem a uma propagação dependente dos ciclos, o que corresponderá a valores tipicamente acima de 1 Hz.

No lado oposto, teremos uma propagação fortemente dependente do tempo para frequências menores.

De uma forma geral, as baixas frequências promovem a ocorrência de mecanismos de fissuração dependentes do tempo, pelo que será expectável um regime de propagação **intergranular**.

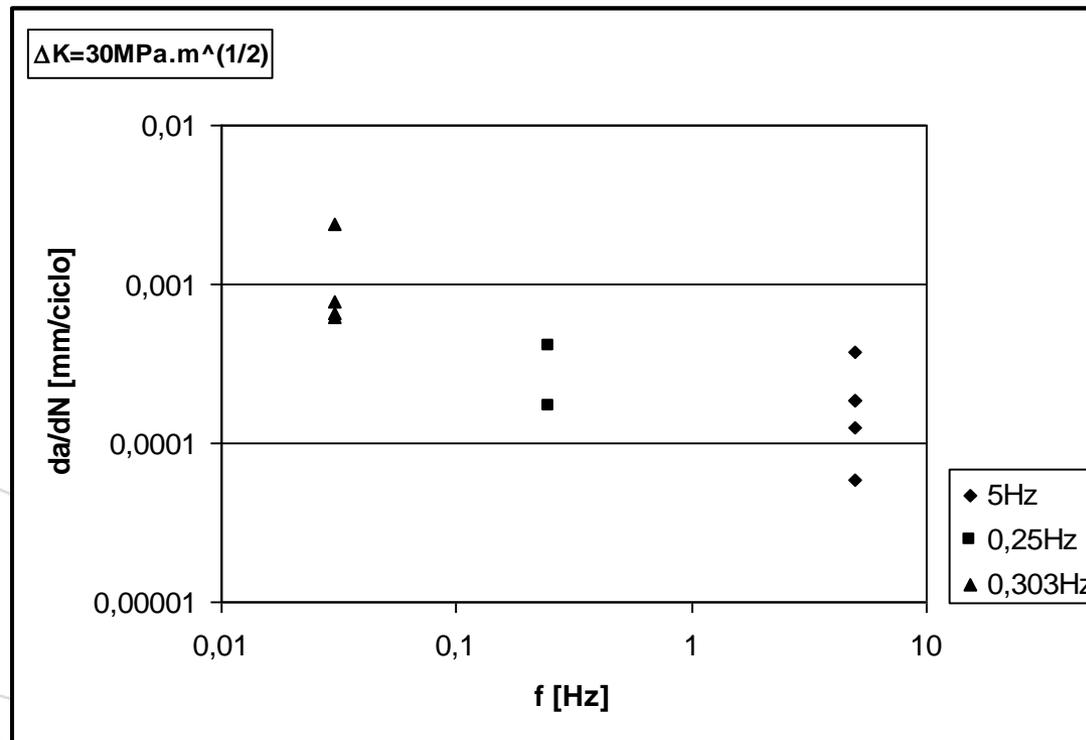
No caso de aplicação de carregamentos com frequências mais elevadas, a tendência será de uma propagação em regime **transgranular** motivada pela predominância dos mecanismos de deformação plástica cíclica.



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.9. Propagação de fenda por fadiga

### Efeito da frequência de carregamento:



Efeito da frequência na velocidade de fissuração  $da/dN$  (para  $\Delta K=30\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ );  
Ensaio de fadiga a alta temperatura da superliga de níquel RR1000



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.9. Propagação de fenda por fadiga

#### Efeito da temperatura:

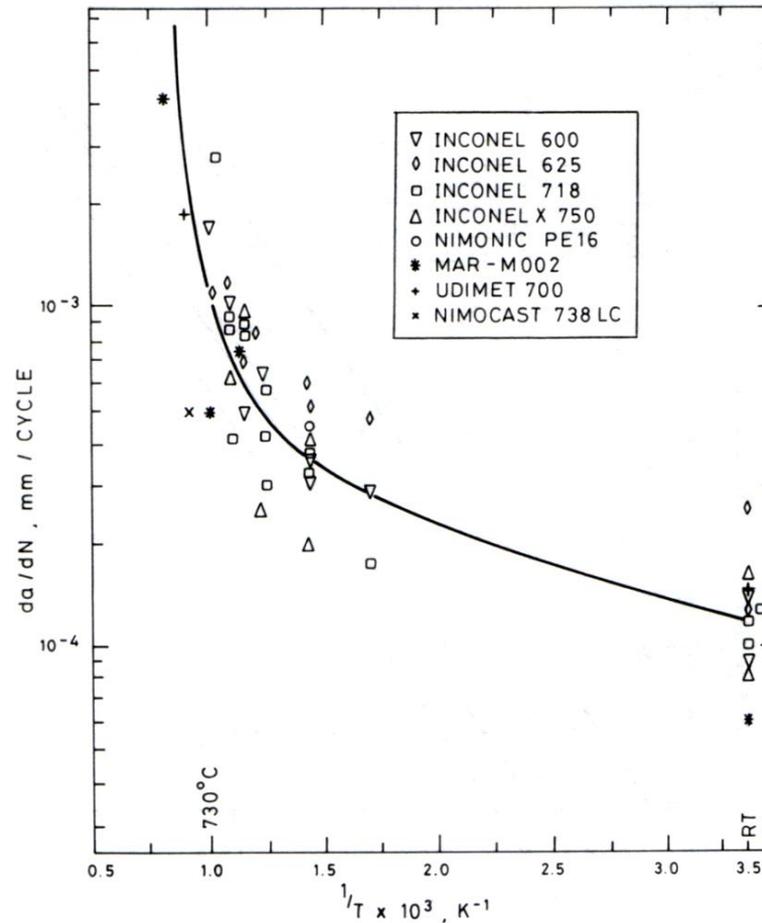
- Um dos principais problemas inerentes ao aumento de temperatura está relacionado com a possibilidade de ocorrência de uma fragilização dinâmica do material, mecanismo que se manifesta por uma lenta descoesão das fronteiras de grão, sendo especialmente notado em condições de aplicação de cargas com elevado tempo de patamar e em ambientes com um elevado teor de elementos químicos propiciadores de uma fragilização microestrutural do material, tais como o oxigênio, face à aplicação de uma carga de carácter dinâmico;
- Tendência geral traduz-se num aumento de  $da/dN$  com  $T$ .



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.9. Propagação de fenda por fadiga

### Efeito da temperatura:



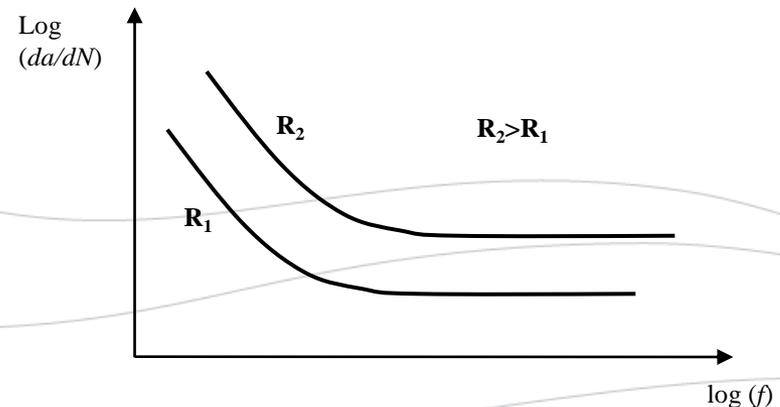


### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.9. Propagação de fenda por fadiga

### Efeito da forma de onda:

- O parâmetro  $R$  representa a razão entre as tensões mínima e máxima respeitantes ao ciclo de carregamento, traduzindo, portanto, os efeitos associados à tensão média de carregamento.
- De uma forma geral, pode dizer-se que a um aumento do valor de  $R$ , para um valor de  $\Delta K$  constante, corresponderá um aumento da carga média e, conseqüentemente, poderão ser potenciados os mecanismos de fluência comparativamente aos mecanismos de fadiga.





### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.9. Propagação de fenda por fadiga

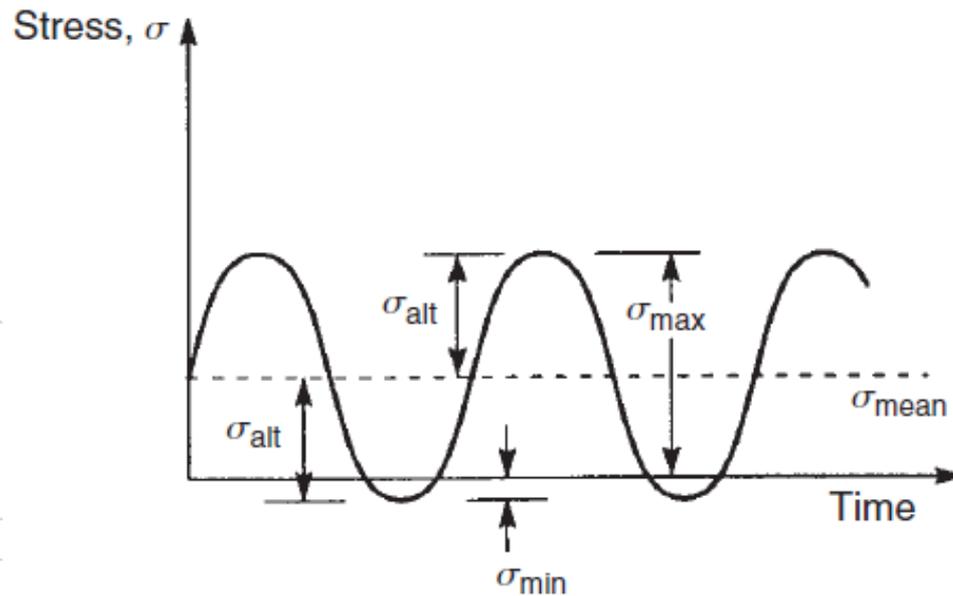
**Exemplo 3.05:** Uma placa infinita contém uma fenda com um comprimento inicial de 0,2 mm e está sujeita a uma tensão repetida cíclica de amplitude  $175 \text{ N/mm}^2$ . Se a tenacidade à fratura da placa for  $1708 \text{ N/mm}^{3/2}$  e a taxa de crescimento da fenda for  $40 \times 10^{-15} (\Delta K)^4 \text{ mm/ciclo}$ , determine o número de ciclos até à rutura.



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.10. Curvas S-N

Em elementos estruturais, uma tensão alternada,  $\sigma_{alt}$ , é frequentemente sobreposta a uma tensão estática média,  $\sigma_{med}$ , como mostra a figura.





### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.10. Curvas S-N

O valor de  $\sigma_{alt}$  é o mais importante na determinação do número de ciclos de carregamento que provoca a rutura.

O valor de  $\sigma_{alt}$  que pode ser suportado para um dado número de ciclos chama-se *resistência à fadiga* do material.

Alguns materiais, como o aço macio, possuem um nível de tensão que pode ser suportado por um número infinito de ciclos.

Esta tensão é conhecida como o *limite de fadiga* do material.

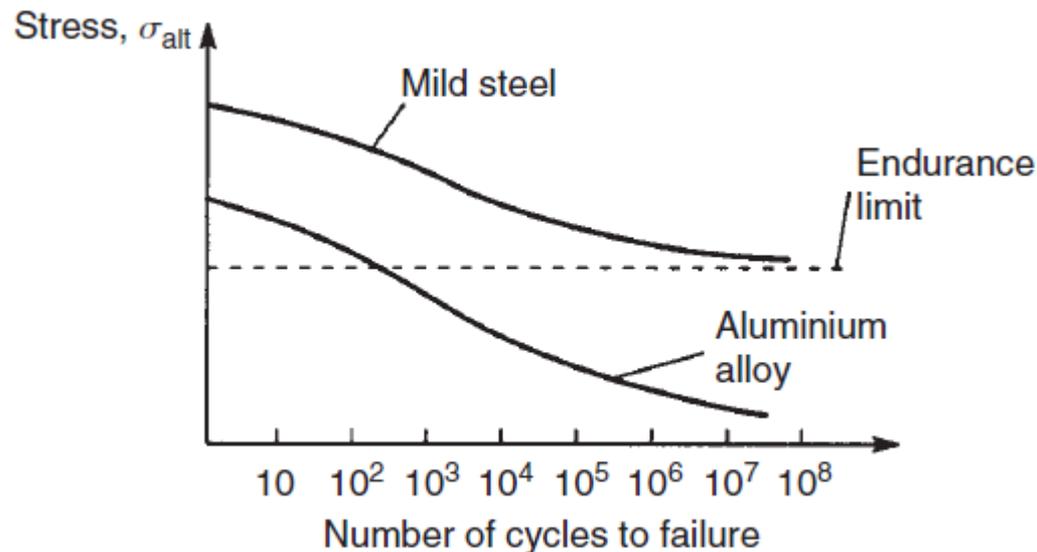
Este comportamento não foi encontrado no alumínio ou nas suas ligas.

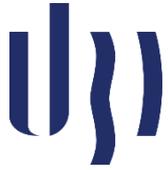


### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.10. Curvas S-N

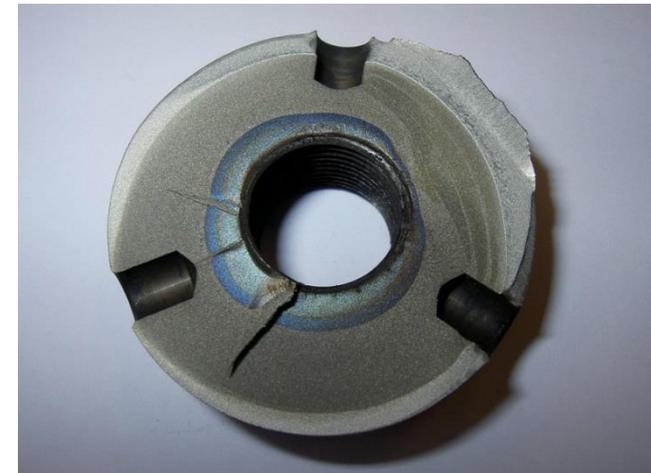
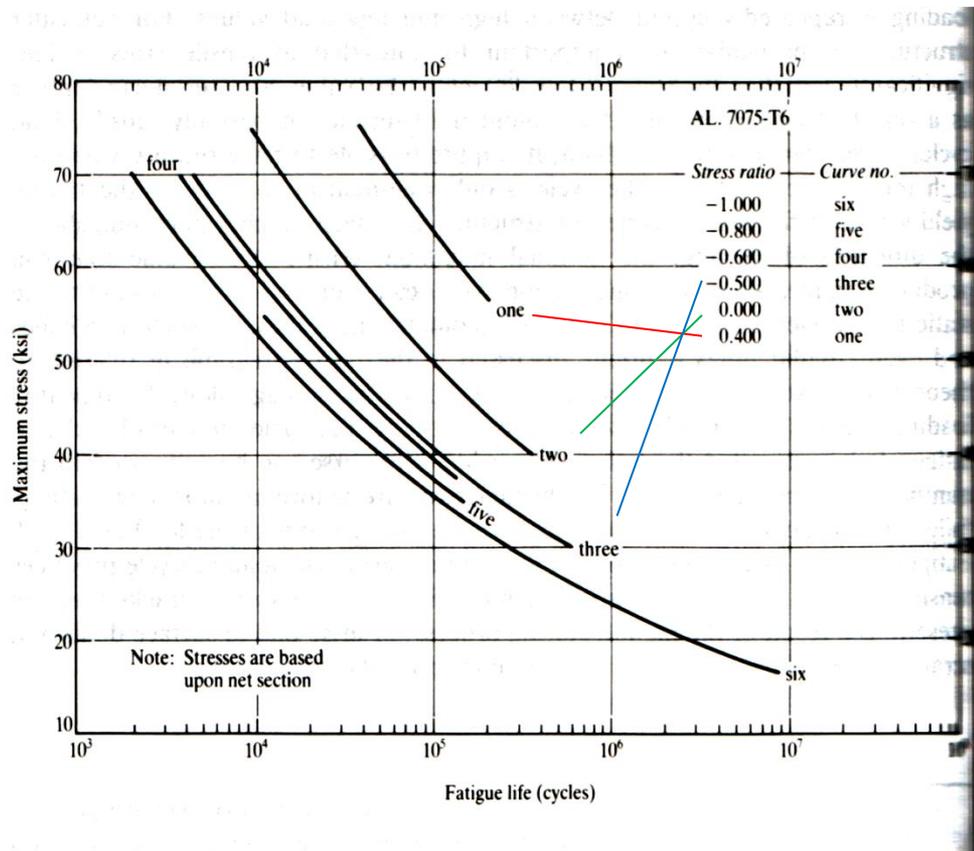
Informação de fadiga é frequentemente apresentada na forma de curvas S-N como mostra a figura.





# 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.10. Curvas S-N





### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.10. Curvas S-N

### Exemplo: Curvas S-N para compósitos à base de cortiça

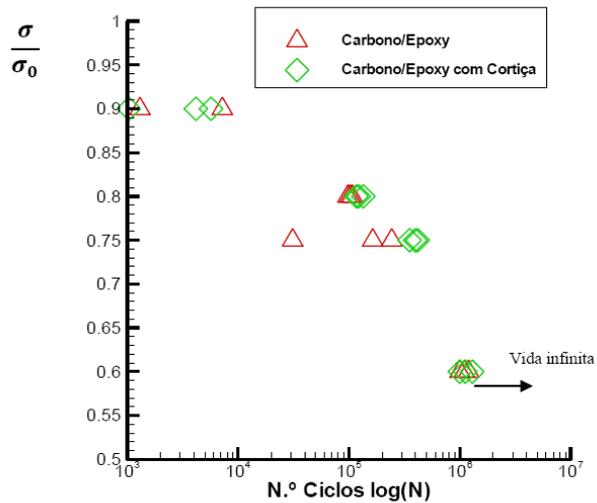


Tabela 3 - Geometria das amostras sujeitas a ensaios de fadiga

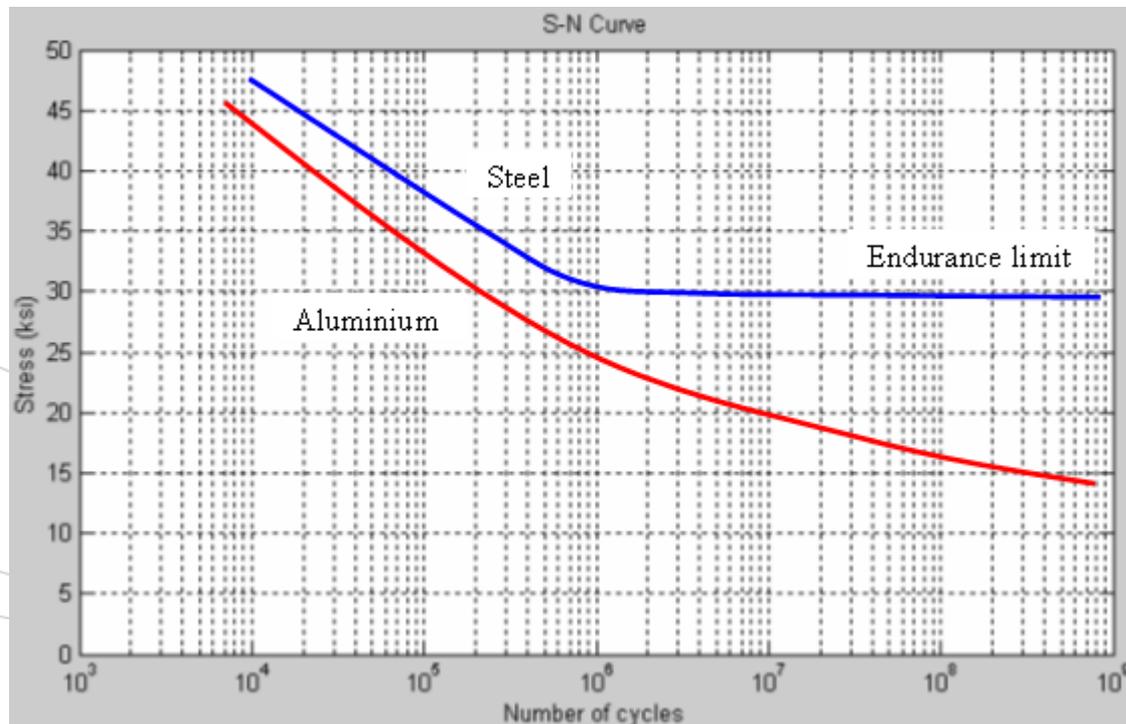
| Amostras  | Espessura d (mm) | Largura b (mm) | Comprimento L (mm) | Espessura do tab (mm) | Comprimento do tab (mm) |
|---|------------------|----------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| Carbono [0° <sub>10</sub> ]   | 1,48             | 15             | 220                | 3                     | 55                      |
| Carbono e granulado fino Empilhamento B [0° <sub>5</sub> /cortiça]s | 1,65             | 15             | 220                | 3                     | 55                      |



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.10. Curvas S-N

**Exemplo 3.06:** Considere as curvas S-N da figura abaixo. Indique o número de ciclos até à rutura da liga de aço e da liga de alumínio representadas para uma tensão aplicada de 200MPa e de 300MPa.





### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.11. Estimativa da vida à fadiga

Em muitas situações reais, a amplitude da tensão alternada varia e é frequentemente de natureza aleatória.

Nesta situação, a curva S-N não se aplica diretamente e, por isso, é necessária uma forma alternativa para estimar a rutura.

A teoria de dano cumulativo de Miner sugere que a rutura ocorre quando

$$\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_r}{N_r} = 1 \quad (3.18)$$

onde  $n_1, n_2, \dots, n_r$  são o número de aplicações da tensão  $\sigma_{alt}$ ,  $\sigma_{med}$  e  $N_1, N_2, \dots, N_r$  são o número de ciclos até à rutura das tensões  $\sigma_{alt}$ ,  $\sigma_{med}$ .



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.11. Estimativa da vida à fadiga

**Exemplo 3.07:** Um membro estrutural será sujeito a uma série de carregamentos cíclicos que produzem os níveis de tensão alternada da tabela. Determine se existe probabilidade de rutura ou não.

| Loading | Number of cycles | Number of cycles to failure |
|---------|------------------|-----------------------------|
| 1       | $10^4$           | $5 \times 10^4$             |
| 2       | $10^5$           | $10^6$                      |
| 3       | $10^6$           | $24 \times 10^7$            |
| 4       | $10^7$           | $12 \times 10^7$            |



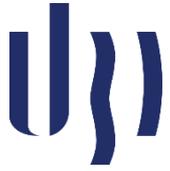
### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.12. Fluência

A fluência pode ser definida como um processo dependente do tempo onde, face à aplicação de uma tensão de valor constante, um dado material irá evidenciar uma deformação num ambiente isotérmico.

Pode dizer-se que o aumento dos níveis de temperatura e da tensão de carregamento promoverão a deformação por fluência.

Duma forma geral, a fluência assume uma importância relevante nos mecanismos de fissuração de um componente quando a sua temperatura de serviço se situa entre 30% a 60% do valor relativo à temperatura de fusão do material.



### 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica

## 3.12. Fluência

