



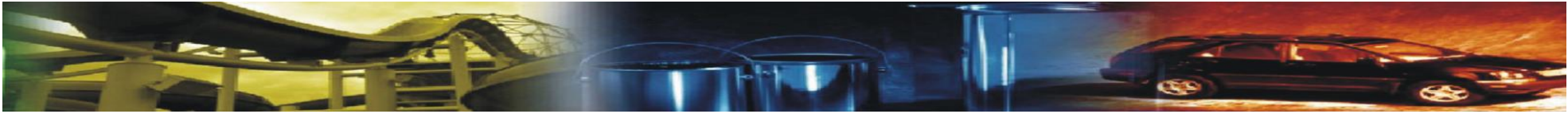
# Análise de Falhas

DEMEC – TM049

Prof Adriano Scheid



Colapso do Wright Flyer, 1908.



# Mecânica da Fratura

# Mecânica da Fratura

## Histórico

Os conceitos da Mecânica da Fratura foram introduzidos em 1920 por A. A. Griffith, quando desenvolveu uma relação quantitativa entre a fratura e sólidos frágeis defeituosos.

Griffith disse que a força motriz para propagar uma trinca é a diferença entre a energia que poderá ser liberada se a trinca crescer e a energia necessária para a criação de novas interfaces (superfícies).

Irwin, baseado na teoria de Griffith, desenvolveu o conceito de taxa de liberação de energia ( $G$ ) como sendo a força motriz da propagação da trinca.

A taxa de liberação de energia pode ser comparada à resistência do material à propagação da trinca, que depende do trabalho elástico e plástico necessário para produzir duas novas superfícies.

# Mecânica da Fratura

## Introdução

A Mecânica da Fratura pode fornecer importante informação quantitativa sobre as circunstâncias que levam à falha e pode ser usado para estipular medidas preventivas à ocorrência de falhas em componentes similares.

A mecânica da fratura não é usada para entender falhas em que o custo é baixo, pessoas não estão sob risco de vida ou existe investigação criminal envolvida.

### **A mecânica da fratura pode ser usada para determinar:**

- Quando a estrutura ou componente foi adequadamente inspecionado periodicamente a fim de detectar trincas críticas.
- Caso trincas tenham sido detectadas, permite a análise apropriada sobre a segurança da continuidade da operação e por quanto tempo.
- Que modificações precisam ser feitas nas estruturas para garantir operação segura.

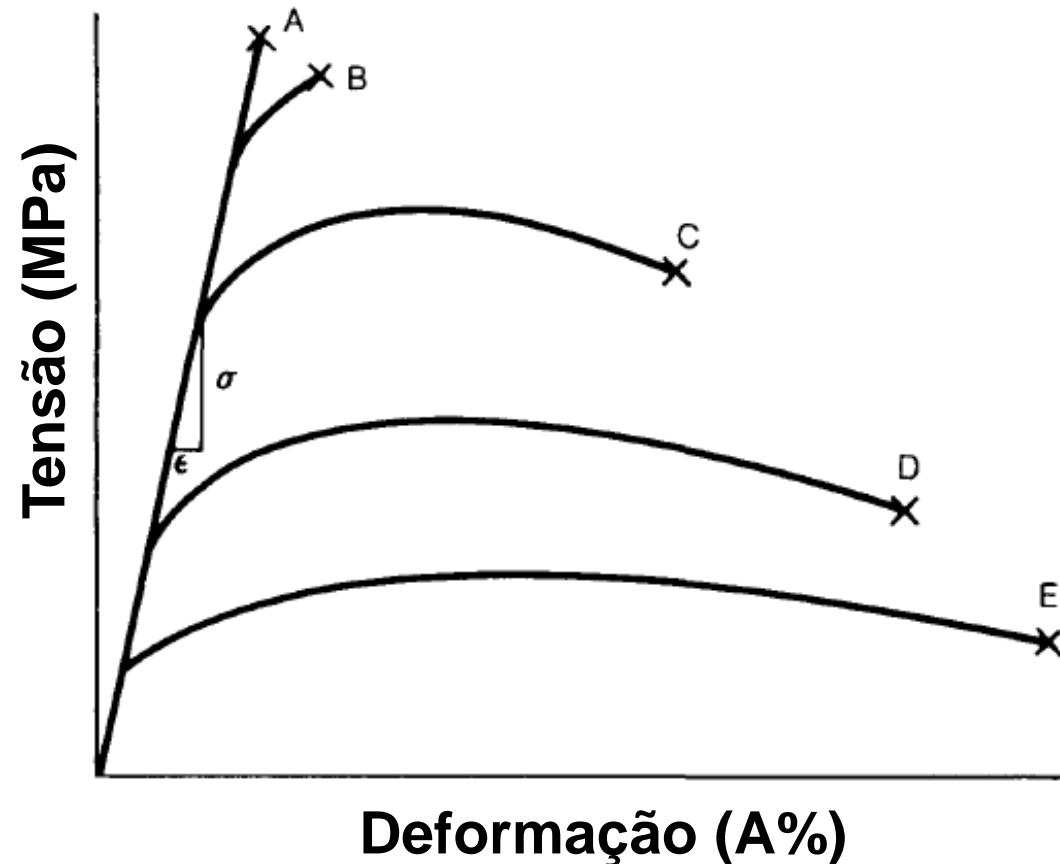
# Mecânica da Fratura

## Tenacidade e Mecânica da Fratura

Tenacidade é a capacidade de um material absorver energia por deformação plástica anterior à fratura. Materiais tenazes resistem à propagação de defeitos durante o processo de escoamento e deformação plástica. A maior parte da deformação ocorre na ponta do defeito.

Uma das medidas da tenacidade é a área sob a curva Tensão x Deformação. Esta é uma medida da energia absorvida durante o ensaio de tração.

Comportamento de um aço frágil (A), enquanto um mais dúctil (E).



# Mecânica da Fratura

## Tenacidade e Mecânica da Fratura

O ensaio de tração uniaxial dá somente uma grosseira estimativa da tenacidade do material, uma vez que as taxas de deformação são baixas, não correspondendo às condições de impacto que muitas vezes estão presentes na operação real.

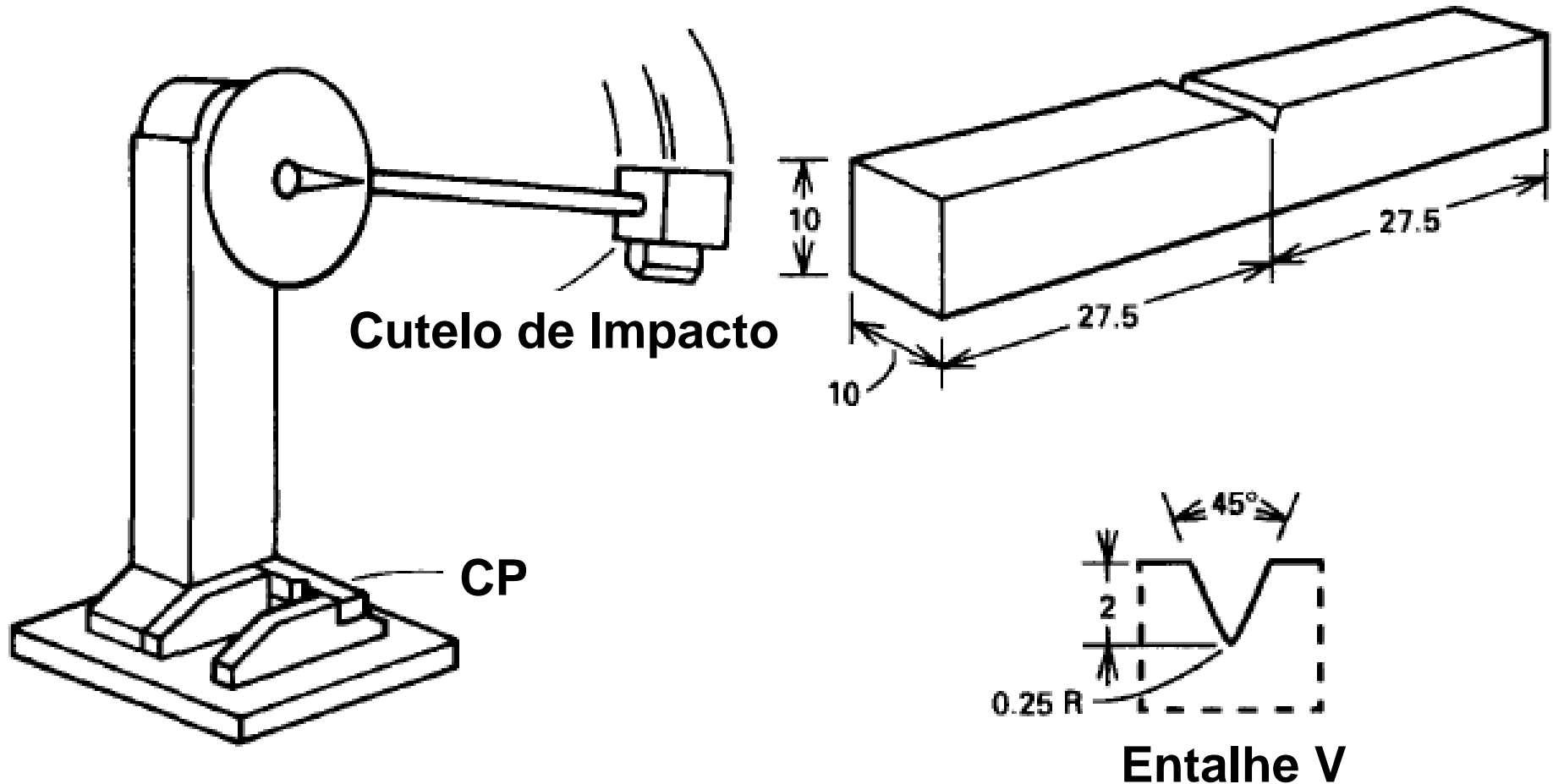
Portanto, a tenacidade é normalmente avaliada em condições que envolvem elevadas taxas de deformação. Ensaios como o de Impacto Charpy utilizam um corpo de prova tipo barra padrão entalhada, a qual é fraturada em temperatura conhecida a partir de uma única aplicação de carga realizado em um pêndulo de impacto.

O resultado da tenacidade ao entalhe obtido do ensaio de impacto charpy tem unidade em Joules (J).

Este resultado não pode, na maior parte das vezes, ser utilizado em projetos ou cálculos de engenharia.

# Mecânica da Fratura

## Tenacidade e Mecânica da Fratura



# Mecânica da Fratura

## Tenacidade e Mecânica da Fratura

Tendo em vista as limitações do uso dos resultados do impacto Charpy, novas técnicas foram desenvolvidas a fim de estimar a tenacidade a partir de ensaios de laboratório que permita prever o tamanho de defeito ao qual a fratura ocorrerá em peças que apresentem estes defeitos para quaisquer geometrias.

Em adição, para um dado tamanho de defeito, será possível predizer a máxima tensão de operação segura.

A Tenacidade à Fratura é o “novo” parâmetro obtido a partir da mecânica da fratura. **A tenacidade à fratura é um termo genérico que representa a medida da resistência à propagação de trincas.**

“Tenacidade à fratura é a habilidade de um material de resistir à fratura na presença de trincas.”



# Mecânica da Fratura

## Princípios da Mecânica da Fratura

A mecânica da fratura permite a quantificação das relações entre as propriedades dos materiais, o nível de tensão, a presença de defeitos geradores de trincas e os mecanismos de propagação de trincas.

Princípios fundamentais:

### *Concentração de Tensões*

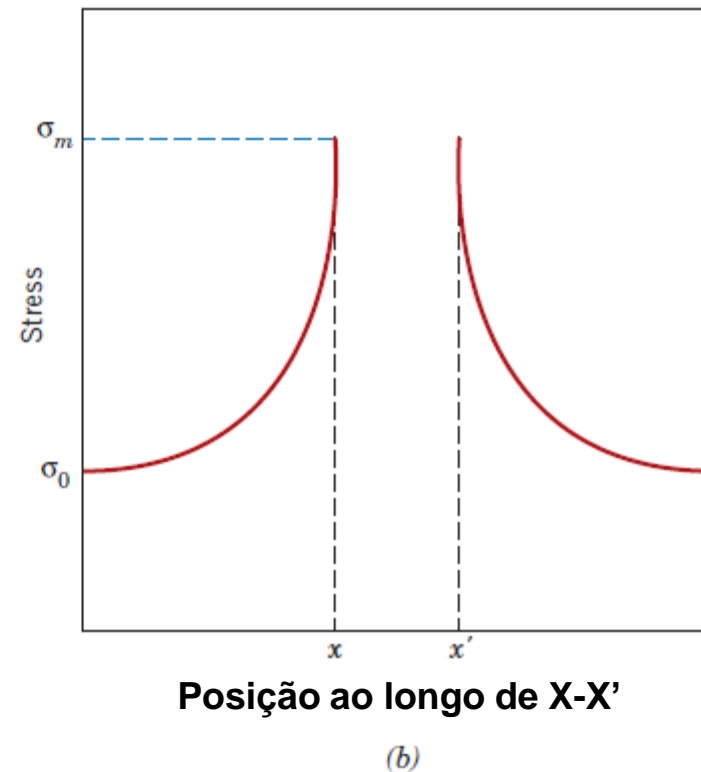
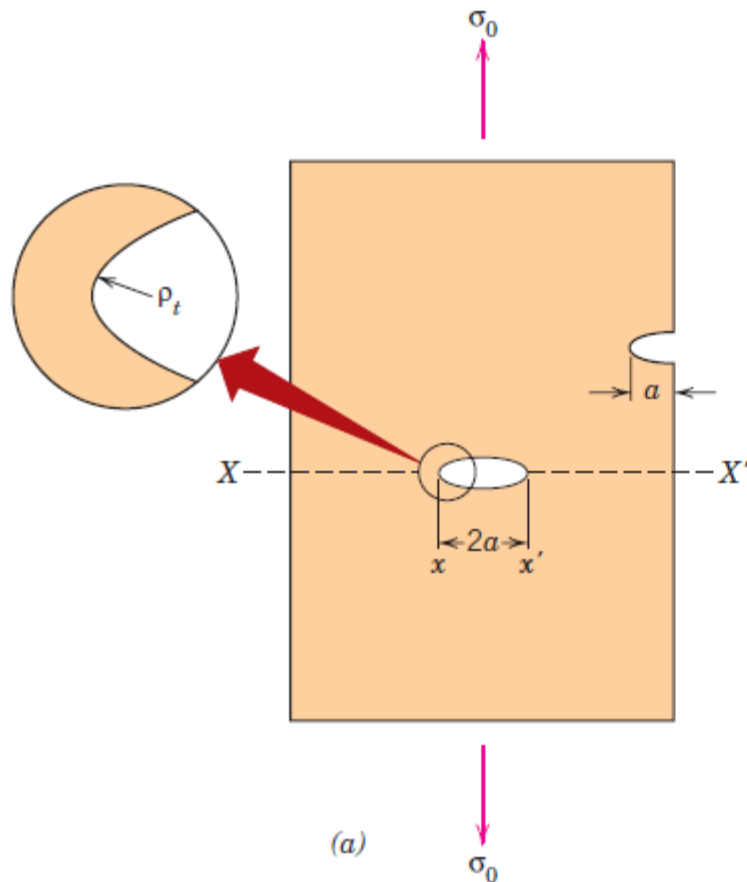
A resistência à fratura para materiais frágeis é menor que aquela prevista a partir de cálculos de energia de ligação atômica, diferença explicada pela presença de defeitos internos ou trincas muito pequenas.

Estes defeitos afetam negativamente a resistência à fratura, uma vez que a tensão aplicada pode ser concentrada ou aumentada na extremidade do defeito, dependendo da orientação e geometria da trinca.

# Mecânica da Fratura

## Princípios da Mecânica da Fratura

Devido à sua habilidade em amplificar uma tensão aplicada em suas proximidades, esses defeitos são, algumas vezes, denominados *concentradores de tensão*.



# Mecânica da Fratura

## Princípios da Mecânica da Fratura

Considerando que uma trinca é semelhante a um furo elíptico vazante a uma placa e que se encontra orientado perpendicularmente à tensão aplicada ( $\sigma_0$ ), a tensão máxima ( $\sigma_m$ ) ocorre na extremidade da trinca e pode ser aproximada conforme segue:

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left( \frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

Onde:

$\sigma_0$  é a tensão de tração nominal aplicada

$\rho_t$  é o raio de curvatura da extremidade da trinca

$a$  é o comprimento da trinca superficial ou metade do comprimento da trinca se esta for interna.

# Mecânica da Fratura

## Princípios da Mecânica da Fratura

A razão  $\sigma_m/\sigma_0$  é conhecido como fator de concentração de tensões  $K_t$ , conforme segue:

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left( \frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

A expressão representa a medida do grau pelo qual uma tensão aplicada externamente é aumentada na extremidade de uma trinca.

O fator de concentração de tensões é mais significativo nos materiais frágeis e menos nos materiais dúcteis, pois este último se deforma e distribui mais uniformemente as tensões na vizinhança da trinca ou concentrador de tensões.

# Mecânica da Fratura

## Princípios da Mecânica da Fratura

A tensão crítica  $\sigma_c$ , necessária para a propagação de uma trinca em um material frágil pode ser descrita pela expressão:

$$\sigma_c = \left( \frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$

Onde:

$E$  é o módulo de elasticidade

$\gamma_s$  é a energia de superfície específica

$a$  é a metade do comprimento de uma trinca interna.

# Mecânica da Fratura

## Princípios da Mecânica da Fratura

Além disso, a partir dos princípios mecânica da fratura foi desenvolvida uma expressão que relaciona essa tensão crítica para a propagação de uma trinca com o comprimento da mesma, conforme segue:

$$K_c = Y\sigma_c\sqrt{\pi a}$$

Onde:

$K_c$  é a tenacidade à fratura, que mede a resistência à fratura frágil quando uma trinca está presente ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

$Y$  é um parâmetro adimensional, dependente do tamanho e da geometria da trinca e da amostra, bem como do modo de aplicação da carga.

# Mecânica da Fratura

## Mecânica da Fratura Linear Elástica

As duas categorias da Mecânica da Fratura são:

a- Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

b- Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP)

a- A MFLE é usada se a ponta da trinca em um corpo é aguda e existe somente uma pequena quantidade de deformação plástica nas redondezas da ponta da trinca em materiais como: aços de alta resistência, Titânio e ligas de Alumínio.

b- A MFEP é usada quando a ponta da trinca não é aguda e existe alguma plasticidade na ponta da trinca. É uma categoria utilizada para avaliar materiais de baixa resistência ou materiais de elevada tenacidade.

# Mecânica da Fratura

## Mecânica da Fratura Linear Elástica

A abordagem da MFLE à análise da fratura considera que uma parte do Corpo de Prova apresenta uma trinca ou outro defeito:

1- a trinca é uma superfície plana em um campo de tensão linear elástico,

2- a energia liberada durante a propagação rápida da trinca é uma propriedade básica do material, não influenciada pelo tamanho do componente.

A maior parte das ligas metálicas apresenta defeitos de tipos variados, conforme a tabela apresentada a seguir.

Os defeitos apresentam tamanho freqüentemente abaixo da mínima capacidade de detecção dos ensaios não-destrutivos. A produção de peças livres de defeitos apresenta custo muito elevado, sendo apenas possível reduzir a quantidade e o tamanho destes defeitos.



# Mecânica da Fratura

## Mecânica da Fratura Linear Elástica

### Defeitos típicos nas ligas metálicas

<b>Microestrutura Metalúrgica</b>	<b>Defeitos de Processo</b>	<b>Defeitos de Operação (Uso)</b>
Inclusões (óxidos, sulfetos)	Porosidades de Fundição	Pites de Corrosão
Precipitados Grandes (carbonetos, intermetálicos)	Contaminantes cerâmicos, outros elementos químicos	Desgaste
Bandas e Segregações	Defeitos de soldagem (inclusões, porosidade)	Oxidação e Carburização superficial
Revestimentos Fragilizantes	Dobras de Forjamento / Extrusão, ...	Hidrogênio
Tamanho de Grão	Marcas de ferramenta, usinagem	Trincamento por fluência

# Mecânica da Fratura

## Mecânica da Fratura Linear Elástica

Uma trinca presente em um componente carregado mecanicamente promove seu próprio campo de tensões na ponta da trinca aguda, que é caracterizado por um parâmetro denominado intensidade de tensão ( $K$ ).

$K$  representa um parâmetro simples que inclui ambos o efeito da tensão aplicada a uma amostra e o efeito de uma trinca de dado tamanho na amostra.

A rápida propagação de trincas é controlada por uma constante do material, chamada de Fator de Intensidade de Tensão Crítica ( $K_c$ ). Quanto maior o valor de  $K_c$ , maior a tensão necessária para a rápida propagação da trinca e maior a resistência do material à fratura frágil.

# Mecânica da Fratura

## Modos de Carregamento

A figura abaixo define três modos de carregamento:

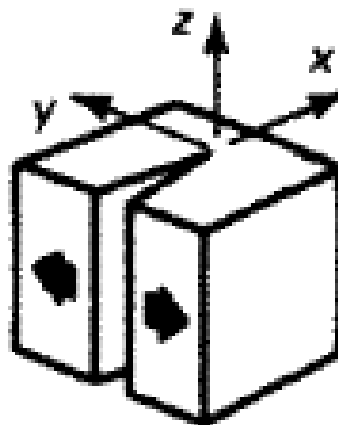
Modo I: Abertura ou modo trativo

Modo II: Escorregamento ou modo cisalhante

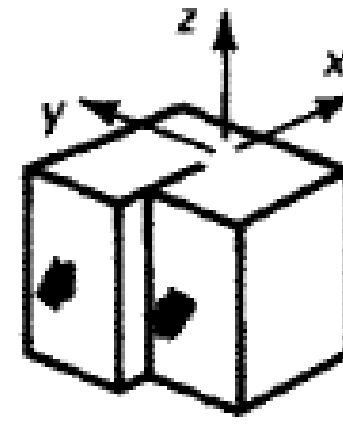
Modo III: Modo de Rasgamento

Os conceitos da mecânica da fratura são semelhantes para os três modos, entretanto, a maior parte dos estudos e dados são referentes ao Modo I.

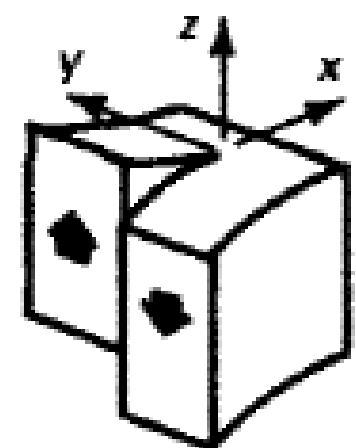
A nomenclatura usada é então alterada para  $K_{Ic}$ , que é o fator crítico de intensidade de tensão na tenacidade à fratura sob modo I de carregamento.



Modo I



Modo II



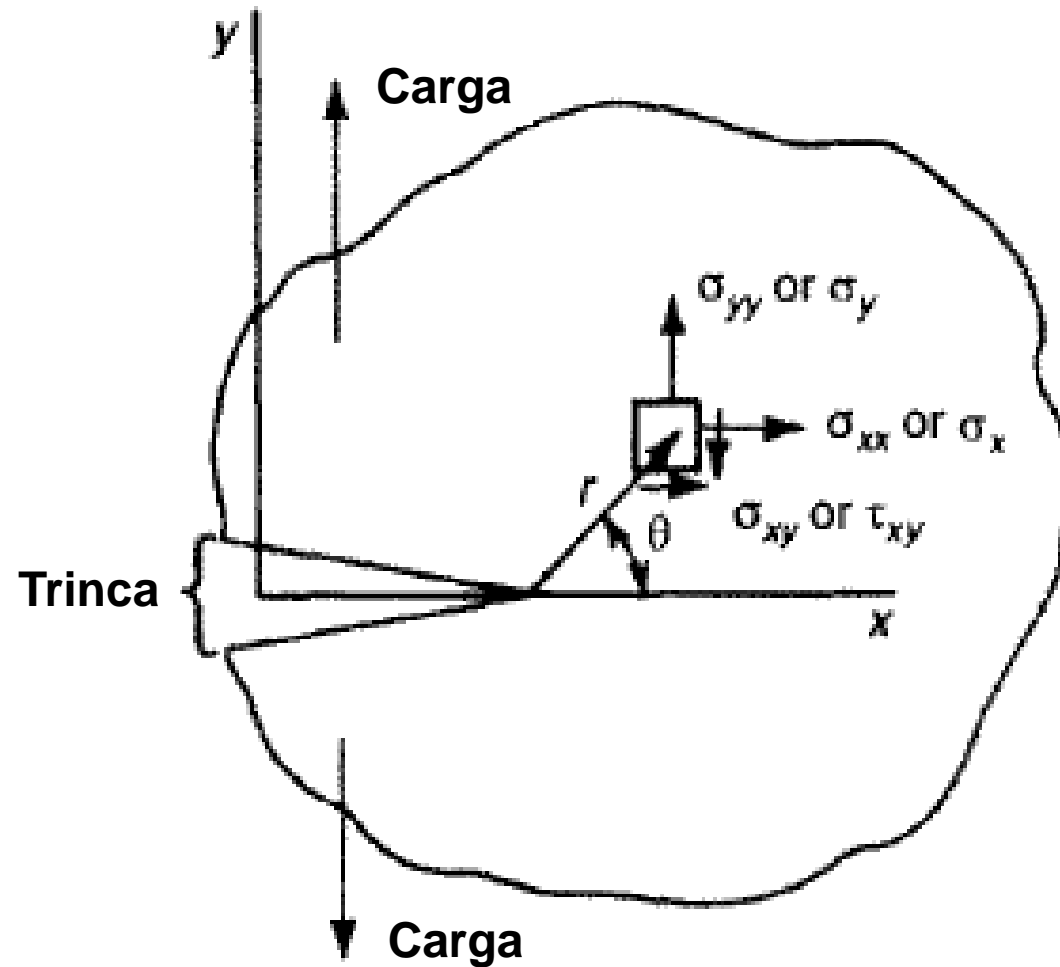
Modo III

# Mecânica da Fratura

## Mecânica da Fratura Linear Elástica

Uma vez que a trinca é plana e tomada como uma superfície livre interna em um campo de tensão linear elástica, uma descrição matemática pode ser feita para a tensão nas vizinhanças da ponta da trinca.

Uma trinca em uma peça carregada mecanicamente produz seu próprio campo de tensão, que pode ser estimado a partir do sistema de coordenadas.



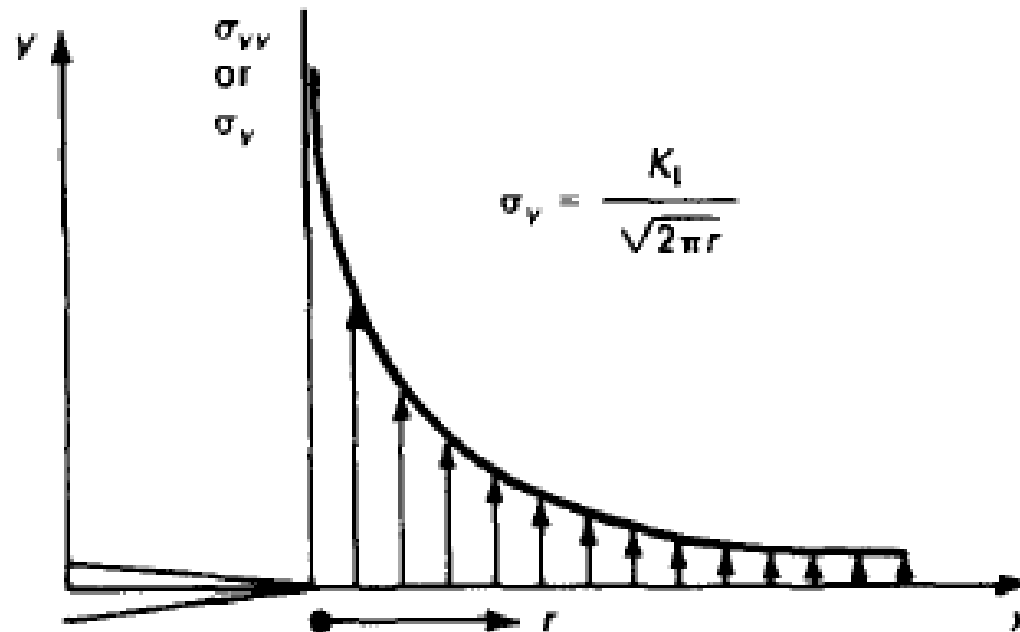
Corpo arbitrário em um sistema de coordenadas usado para calcular um campo de tensão na ponta da trinca sob modo I de carregamento.

# Mecânica da Fratura

## Mecânica da Fratura Linear Elástica

A mecânica da fratura é baseada no princípio teórico de que o campo de tensão à frente da ponta da trinca aguda pode ser caracterizado por um parâmetro chamado Intensidade de Tensão –  $K$ , relacionado à taxa de liberação de energia.

O fator  $K$  ou  $K_I$  indica o quanto a tensão intensifica na ponta da trinca. A tensão nominal aumenta atingindo o infinito na ponta da trinca ( $r=0$ ).



# Mecânica da Fratura

## Mecânica da Fratura Linear Elástica

A rápida propagação da trinca é controlada somente por fatores associados ao material. Esta constante chamada de Fator Crítico de Intensidade de tensão  $K_c$  é o fator de intensidade de tensão (K) no qual a propagação da trinca se torna rápida. É também chamada de tenacidade à fratura em deformação plana e é expressa em  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Para a rápida propagação da trinca, o fator está relacionado com a taxa de liberação de energia pela expressão:

$$K_c^2 = EG_c$$

Onde: E é o módulo de elasticidade e  $G_c$  é a taxa de liberação de energia crítica para a propagação de uma trinca instável.

A correlação entre G e K é importante, pois permite o uso de K (matematicamente estimável) para cálculos estruturais de dimensionamento e análise de falhas.

# Mecânica da Fratura

## Mecânica da Fratura Linear Elástica

Quando a região de deformação plástica ao redor da trinca é pequena em comparação com o tamanho da trinca (que é o caso de grandes estruturas com materiais de elevada resistência) a magnitude do campo de tensão ao redor da trinca é expressa como o fator de intensidade de tensão:

$$K = K_{Ic} = f(g)\sigma\sqrt{\pi a}$$

Onde:

$\sigma$  é a tensão aplicada ao componente,

$a$  é a dimensão característica do defeito,

$f(g)$  é uma função relacionada à geometria da trinca e configuração estrutural.

# Mecânica da Fratura

## Deformação Plana e Tensão Plana

Na prática, um estado bidimensional de tensão é assumido no interior do material, quando uma das dimensões é admitida pequena em relação às outras.

Um estado bidimensional de tensão, **chamado deformação plana**, ocorre quando a deformação plástica na ponta da trinca é severamente limitada. Isto é causado por maior espessura ou seções grossas, elevada resistência e limitada ductilidade.

Um estado bidimensional de tensão, **chamado tensão plana**, ocorre quando muito mais deformação plástica existe na ponta da trinca. Isto é induzido por materiais de baixa resistência e dúcteis e seções muito finas.

A diferença entre deformação plana e tensão plana está baseada na presença ou ausência, respectivamente, de constricção transversal na deformação do material nas vizinhanças da ponta da trinca.

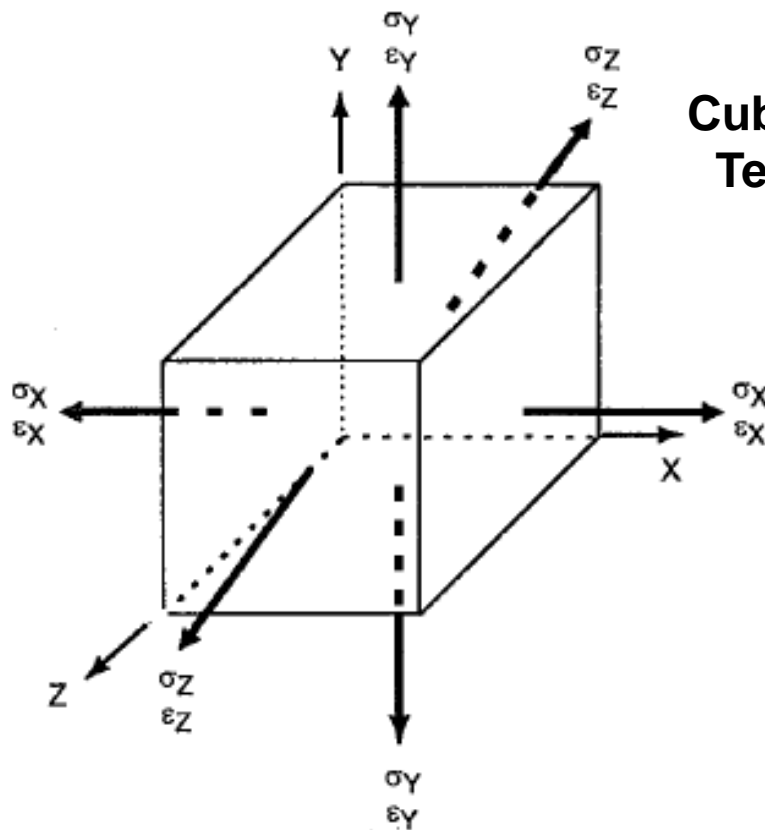


# Mecânica da Fratura

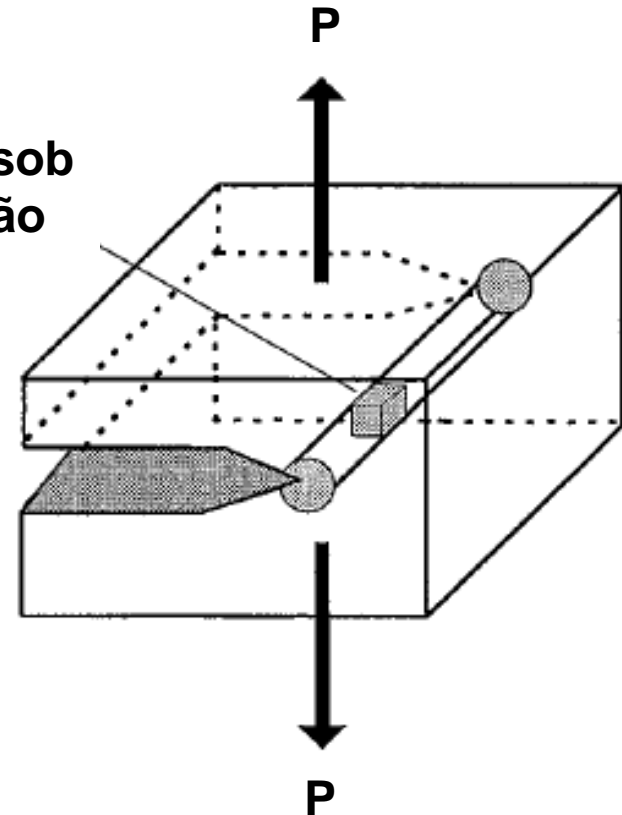
## Deformação Plana e Tensão Plana

Na Deformação Plana,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  e  $\xi_x$  e  $\xi_y$  tem valores e  $\xi_z$  é zero. A deformação  $\xi_x$  e  $\xi_y$  estão no plano.

Na Tensão Plana,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\xi_x$ ,  $\xi_y$  e  $\xi_z$  tem valores e  $\sigma_z$  zero. Neste caso,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  tem valor e estão no plano.



Cubo sob Tensão

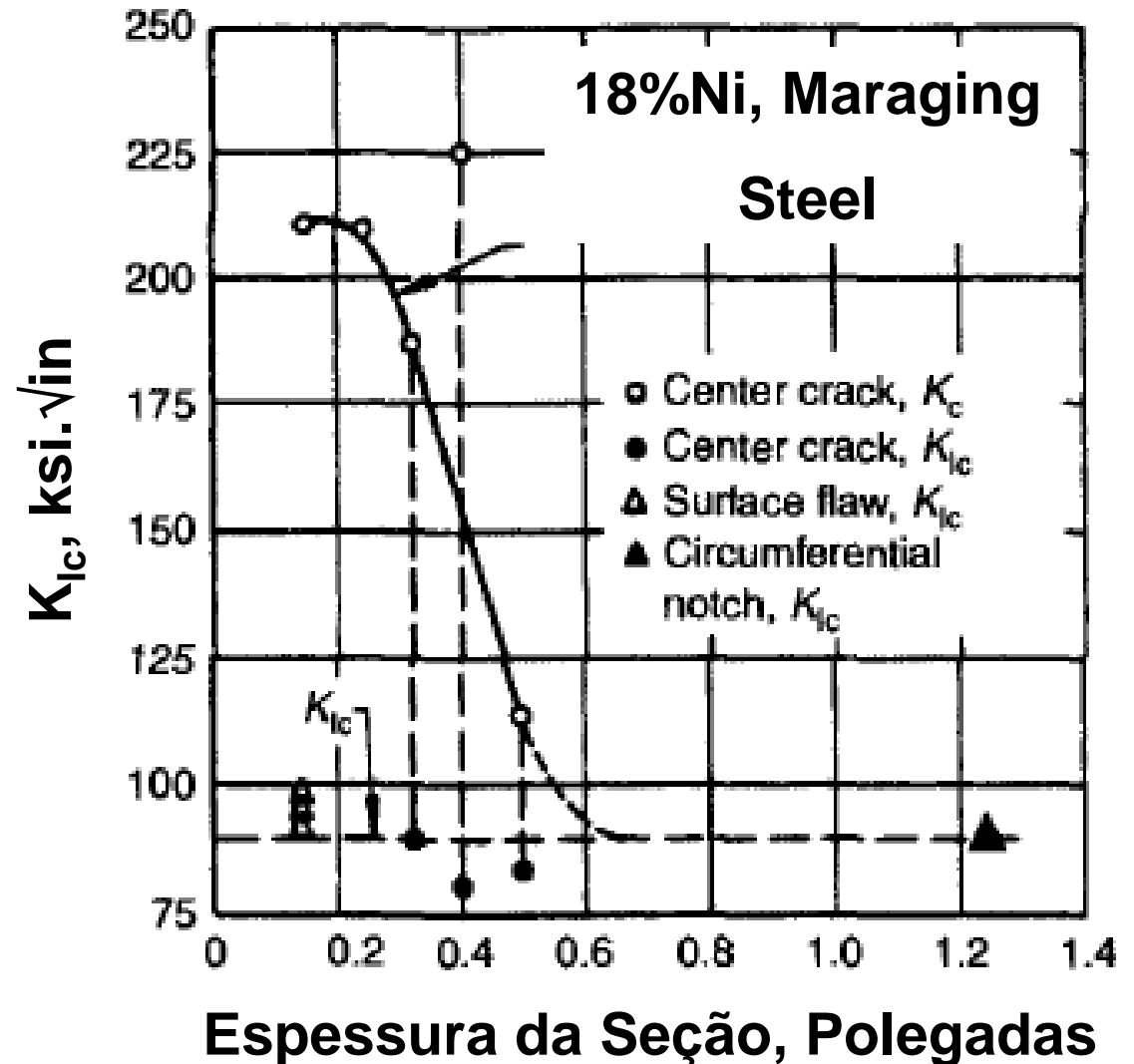


# Mecânica da Fratura

## Deformação Plana e Tensão Plana

Em geral, o aumento da espessura do corpo de prova promove a redução da tenacidade à fratura a um valor crítico limite.

A propagação da trinca é governada por condições de deformação plana e o Fator Crítico de Intensidade de Tensão alcança um valor mínimo, designado como o Fator Crítico de Intensidade de Deformação-Tensão Plana, ou  $K_{Ic}$ .



# Mecânica da Fratura

## Deformação Plana e Tensão Plana

Assim, condições de deformação plana governam a iniciação da trinca em crescimento lento, então o  $K_{Ic}$  caracteriza ambos fratura total em seções espessas e indica a tensão em que as trincas propagam em seções finas.

O uso do  $K_{Ic}$  em projetos e seleção de materiais melhora a assertividade na seleção do material adequado, avaliando ao mesmo tempo o efeito danoso da presença de trincas e defeitos, prevenindo assim falhas catastróficas.

# Mecânica da Fratura

## Fatores que Afetam a Tenacidade à Fratura

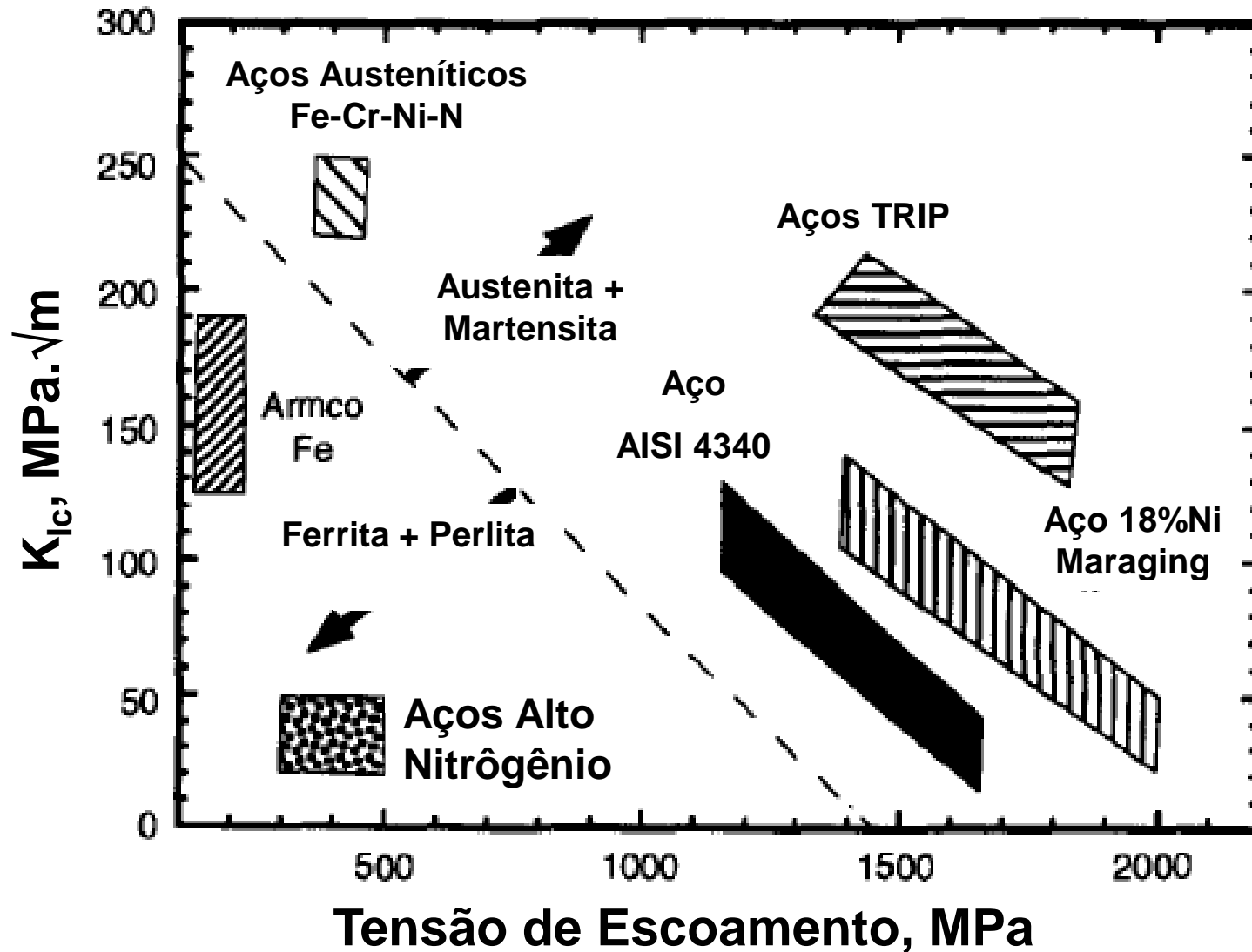
Em geral, a tenacidade à fratura diminui com o aumento da resistência. Uma das possibilidades de manter a tenacidade e, ao mesmo tempo, desenvolver elevados níveis de resistência é pelo controle da microestrutura e da composição química das ligas.

**Os fatores microestruturais que melhoram a tenacidade à fratura são:**

- pequeno tamanho de grão,
- baixa fração volumétrica e grande espaçamento de inclusões,
- Fatores especiais como a plasticidade induzida por deformação (fenômeno TRIP) em aços e mecanismos de deflexão de trincas em ligas de Alumínio-Lítio.

# Mecânica da Fratura

## Fatores que Afetam a Tenacidade à Fratura



# Mecânica da Fratura

## Fatores que Afetam a Tenacidade à Fratura

A tabela resume as principais características que levam à uma boa combinação entre a resistência e tenacidade.

Parâmetro Microestrutural	Efeito sobre a Tenacidade
Tamanho de grão	Aumento do TG, Aumento do $K_{Ic}$ para aços Austeníticos e Ferríticos
Austenita Retida não ligada	Aumenta levemente o $K_{Ic}$
Austenita Retida ligada	Aumento significativo do $K_{Ic}$ pelo efeito TRIP
Carbonetos inter e intra Martensita	Diminui o $K_{Ic}$ , pelo aumento da tendência à clivagem
Impurezas (P, S, As, Sn)	Diminui o $K_{Ic}$ , pela fragilização ao revenido
Inclusões de Sulfetos e Carbonetos coalescidos	Diminui o $K_{Ic}$ , pelo promovendo a nucleação de trincas
Teor de Carbono >0,25 wt%	Diminui o $K_{Ic}$ , por tornar mais fácil a nucleação da clivagem
Martensita Maclada	Diminui o $K_{Ic}$ , por sua fragilidade
Teor de Martensita em aços temperados	Aumenta o $K_{Ic}$ .
Ferrita e Perlita em aços temperados	Diminui o $K_{Ic}$ em aços martensíticos

# Mecânica da Fratura

## Fatores que Afetam a Tenacidade à Fratura

Relação entre a orientação pelo tratamento termomecânico e a tenacidade.

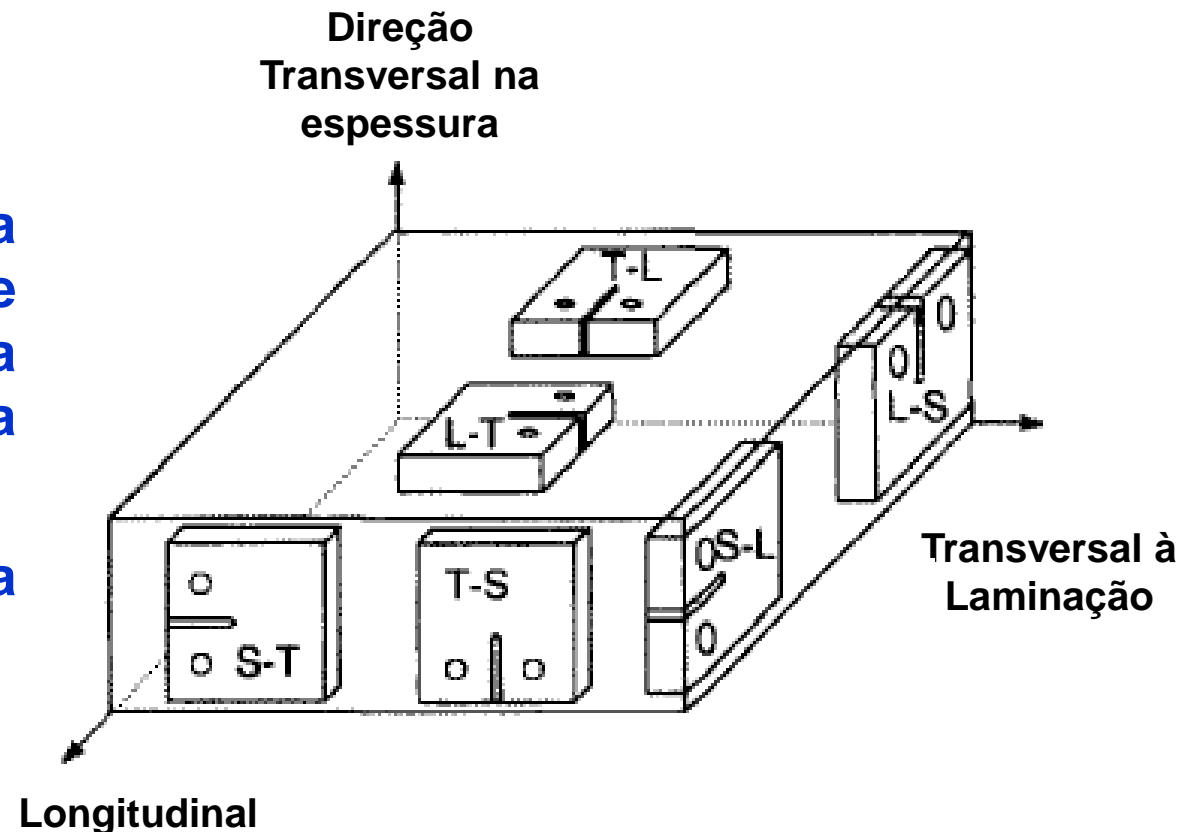
S – Espessura

T – Largura

L – Comprimento

A primeira letra denota a direção da aplicação da força e a segunda representa a direção do crescimento da trinca.

A determinação do  $K_{Ic}$  é feita conforme norma ASTM E 399.



# Mecânica da Fratura

## Crescimento da Trinca - Fadiga

As trincas de fadiga são consideradas predominantes iniciadores da fratura frágil. Dados convencionais de fadiga são obtidos a partir das curvas  $S-N$ , mas o valor absoluto de tensão necessária para causar uma fratura em um dado  $n^o$  de ciclos depende da configuração do corpo de prova.

Estão presentes, normalmente, três estágios: (i) a nucleação da trinca, (ii) a propagação e (iii) a fratura final.

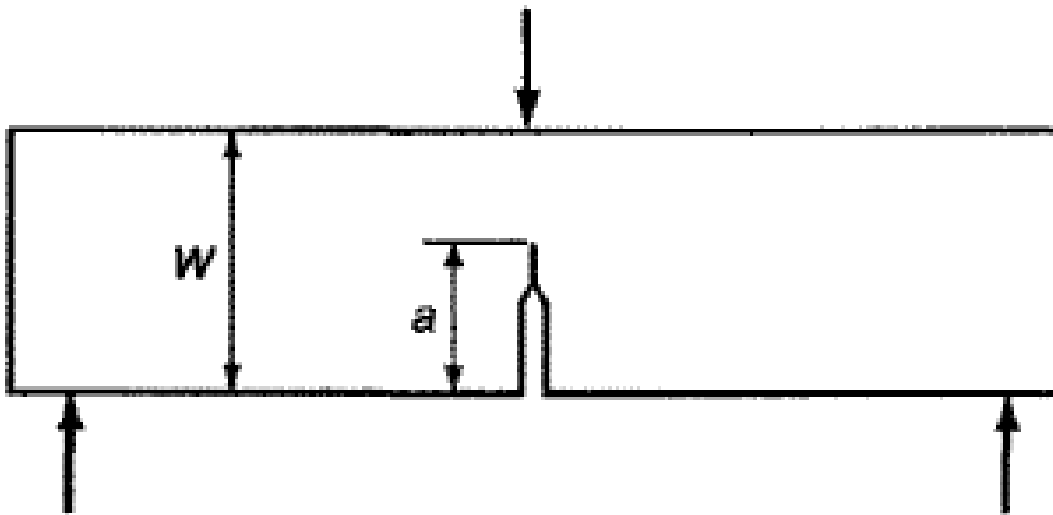
Defeitos pré-existentes reduzem ou eliminam o primeiro estágio. Assim, usando a mecânica da fratura nos estudos de crescimento de trinca, surge um parâmetro  $\Delta K$  que descreve as condições de intensidade de tensão para uma dada trinca sob carga cíclica.



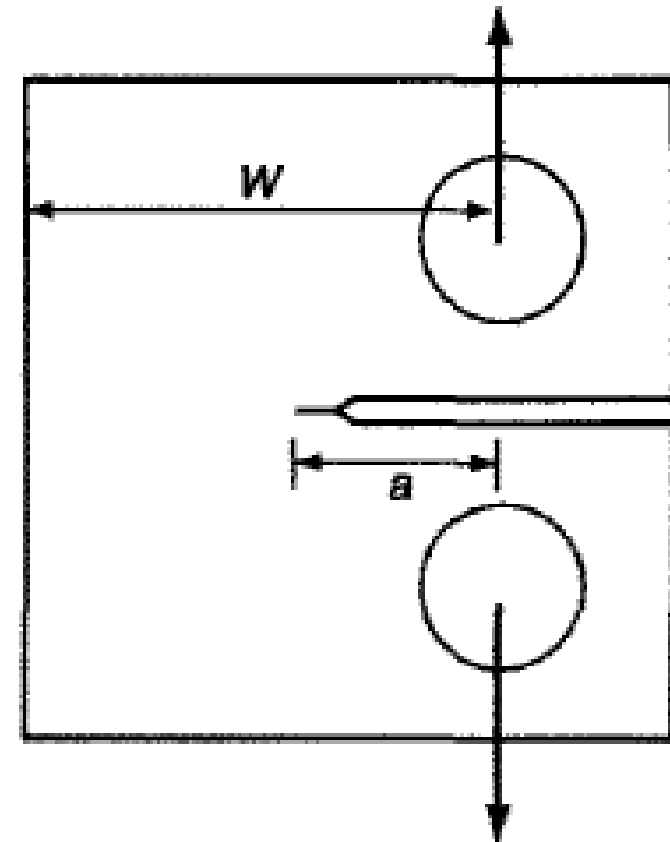
# Mecânica da Fratura

## Ensaio de Tenacidade à Fratura

Para medidas do  $K_{Ic}$  conforme a ASTM E 399, utilizam corpos de prova conforme segue:



(a) Corpo de Prova entalhado para Dobramento SE (B)

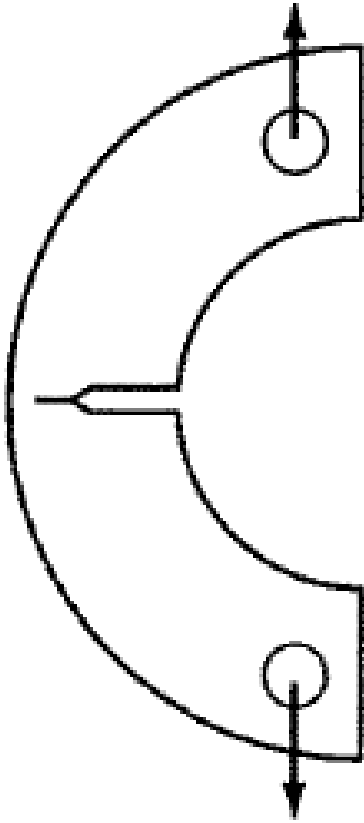


(b) Corpo de Prova Compacto, C (T)

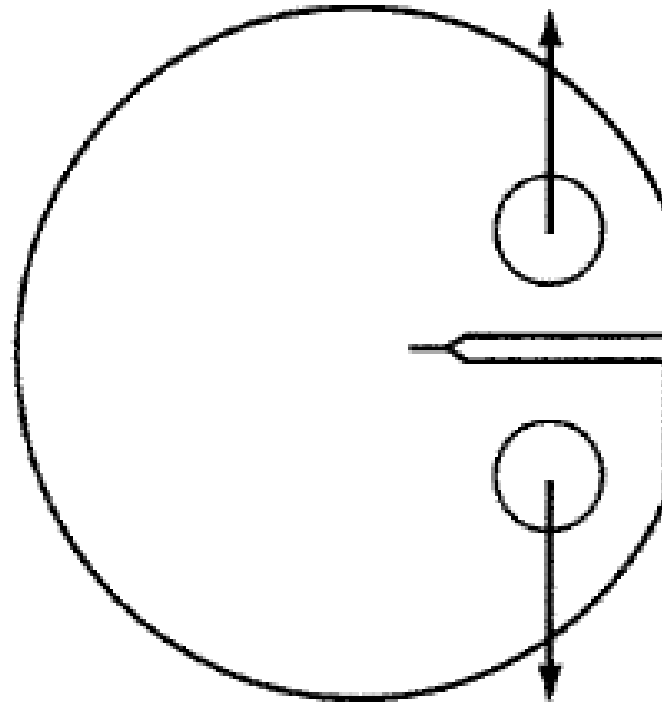
# Mecânica da Fratura

## Ensaio de Tenacidade à Fratura

Para medidas do  $K_{Ic}$  conforme a ASTM E 399, utilizam corpos de prova conforme segue:



(c) Corpo de Prova para Tração em forma de Arco A (T)

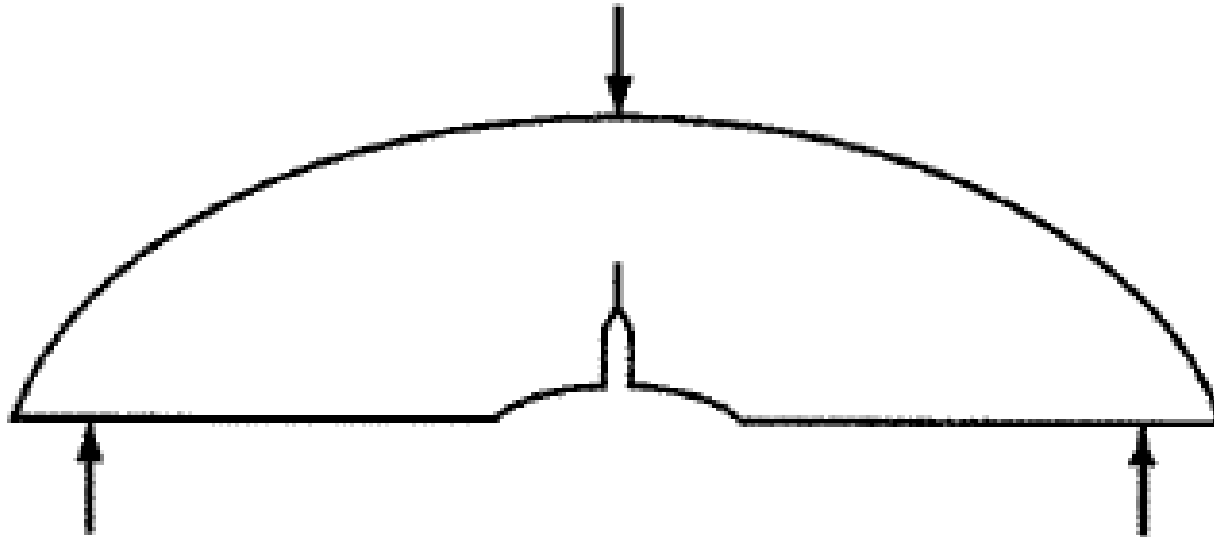


(d) Corpo de Prova Compacto em forma de Disco, DC (T)

# Mecânica da Fratura

## Ensaio de Tenacidade à Fratura

Para medidas do  $K_{Ic}$  conforme a ASTM E 399, utilizam corpos de prova conforme segue:



(e) Corpo de Prova para Dobramento em forma de Arco A (T)

# Mecânica da Fratura

## Ensaio de Tenacidade à Fratura

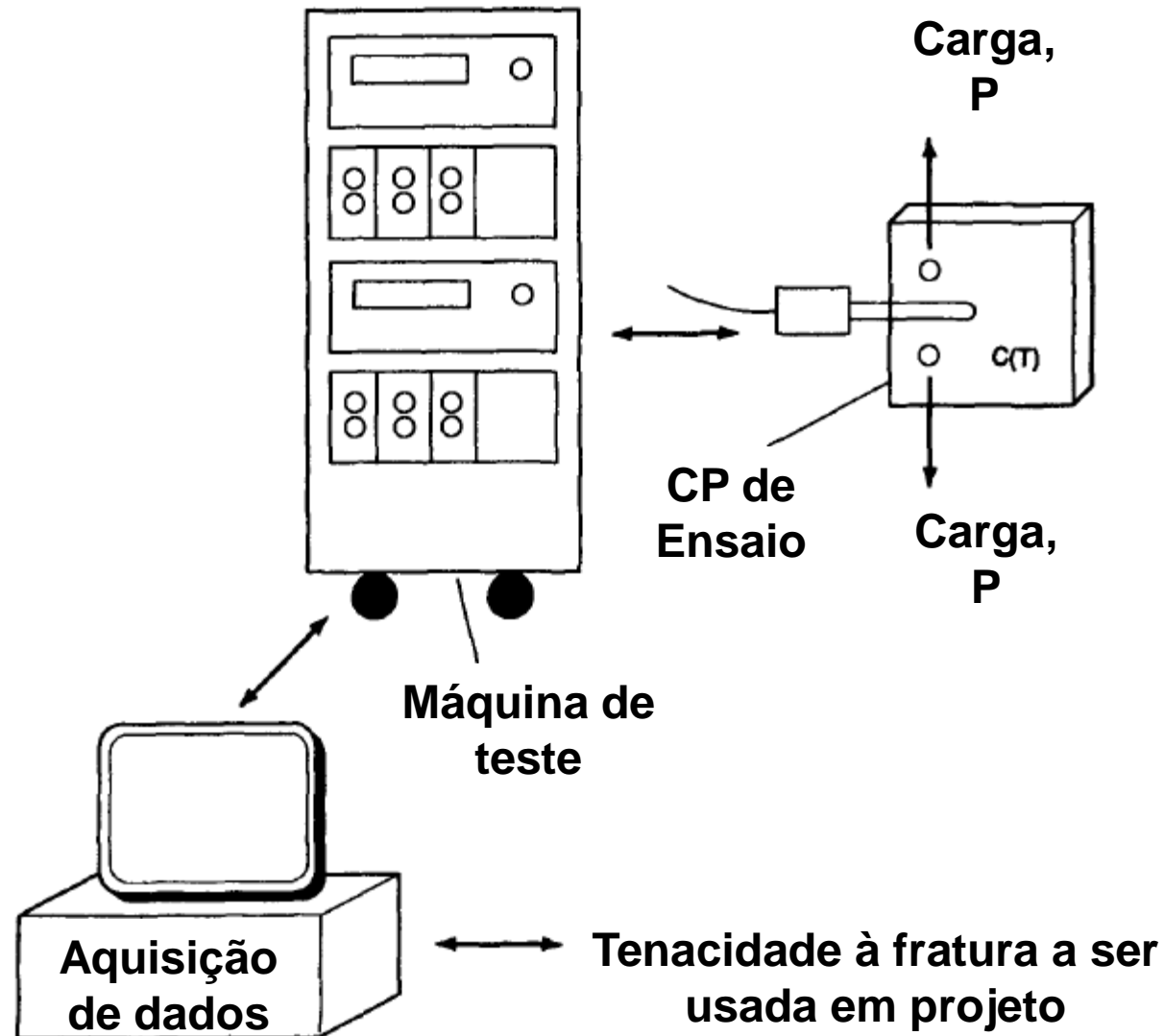
A região plástica na ponta da trinca é pequena se comparada com o comprimento da trinca e com o corpo de prova na direção de constricção. O corpo de prova compacto em forma de disco (d) é freqüentemente usado para determinar a tenacidade à fratura.

O ensaio de tenacidade à fratura requer um equipamento servo-hidráulico, que consiste de um aparato de teste com aquisição de dados.

O ensaio utiliza um dispositivo de abertura de trinca com sensor. Os sinais são amplificados e armazenados em um computador de teste.

# Mecânica da Fratura

## Equipamento para Ensaio de Tenacidade à Fratura



# Mecânica da Fratura

## Crescimento de Trinca: Abordagem da Mecânica da Fratura à Fadiga

A falha por fadiga apresenta, classicamente, três estágios:

1- Nucleação da trinca,

2- Propagação da trinca

3- Ruptura

O segundo estágio é de importância primária!

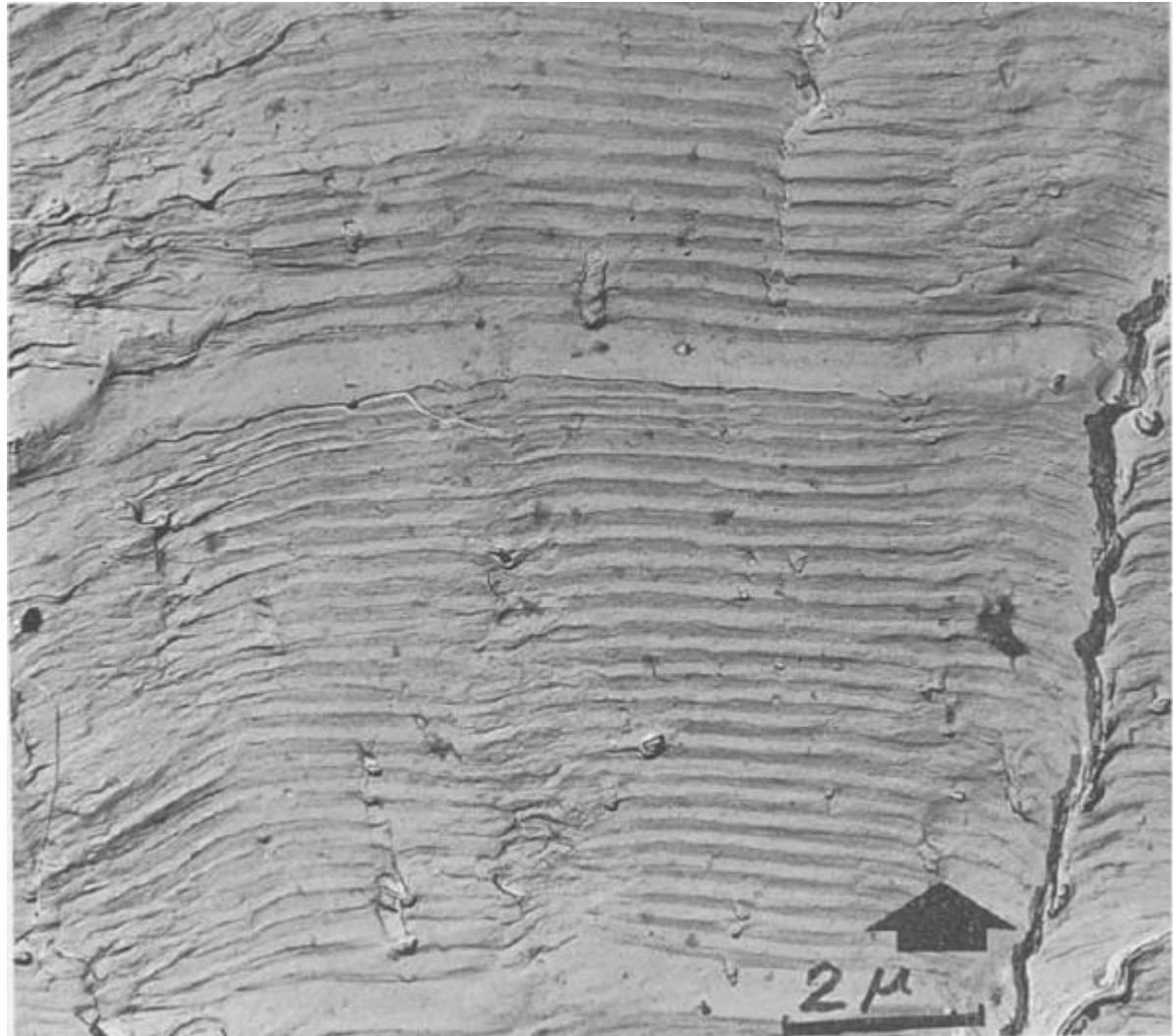
O ensaio de crescimento de trinca é realizado em amostras com  $K_I$  conhecido versus comprimento da trinca - (a). O comprimento da trinca é medido a cada incremento de ciclos.

O fenômeno de propagação de trinca em fadiga em que as trincas crescem a cada ciclo aplicado é mostrado na figura à seguir.

# Mecânica da Fratura

## Ensaio de Tenacidade à Fratura

A quantidade de crescimento de trinca ( $\Delta a$ ) por ciclo de tensão é denominado  $da/dN$  (ou  $\Delta a/\Delta N$ ).



# Mecânica da Fratura

## Ensaio de Tenacidade à Fratura

Para valores maiores de  $\Delta K$ , a trinca atinge a instabilidade e a taxa de propagação torna-se muito rápida.

Para valores baixos, a taxa de propagação cai a zero,  $\Delta K_{th}$ , de forma análoga do limite de fadiga.

Para a região central temos:

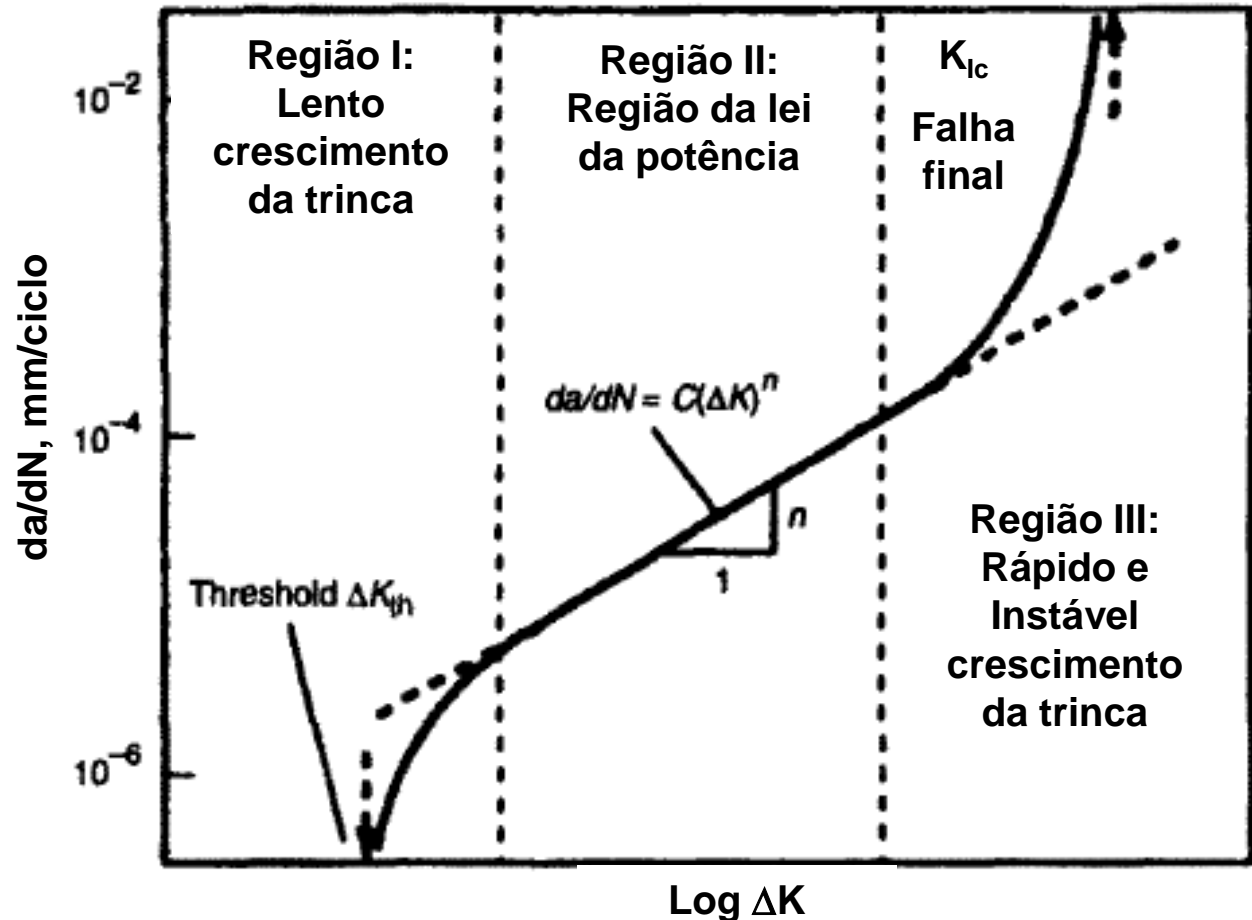
$$da/dN = C_0 (\Delta K)^n$$

Onde:

$da/dN$  é a taxa de crescimento da trinca de fadiga

$C_0$  e  $n$  são constantes do material

$\Delta K$  é a faixa do fator de intensidade de tensão durante o ciclo de tensão.





# Mecânica da Fratura

## Aplicações da Mecânica da Fratura

### Exemplo 1

#### Cálculo do Máximo Tamanho de Defeito

Aços Maraging (grau 350) tem limite de escoamento de aproximadamente 2450 MPa (355 ksi) e tenacidade à fratura de 55 MPa√m.

Um trem de pouso é fabricado com este aço a partir de tensões de projeto de 70% da resistência ao escoamento (1715MPa). Assumindo que defeitos detectáveis devam ter pelo menos 2,54mm, verifique se o componente poderá operar com segurança nesta tensão?

Admitir que trincas agudas estão presentes, com parâmetro de intensidade de tensão para esta trinca seja dado por:

$$K = 1,12\sigma\sqrt{\pi a}$$

Onde  $\sigma$  é a tensão aplicada e  $a$  é o tamanho da trinca.

# Mecânica da Fratura

## Aplicações da Mecânica da Fratura

### Exemplo 1 - Solução:

O tamanho de defeito ao qual a fratura ocorre é calculada pelo rearranjo da equação:

$$\begin{aligned}a_{\text{defeito}} &= (0,797/\pi) (K_{Ic}/\sigma_0)^2 \\ &= 0,797 / \pi (55 / 1715)^2 \\ &= 0,26\text{mm}\end{aligned}$$

É importante notar que o tamanho crítico de defeito que leva à fratura é menor que a sensibilidade das técnicas não-destrutivas.

Portanto, apesar da tensão trativa de projeto ser menor que a tensão de escoamento, a tensão é muito elevada para a operação segura do trem de pouso. Então, a tensão deve ser reduzida a ponto de tornar o tamanho de trinca crítico maior que o mínimo detectável.

# Mecânica da Fratura

## Aplicações da Mecânica da Fratura

### Exemplo 2

#### Cálculo da Máxima Tensão para a Fratura

Suponha que a tenacidade à fratura de uma liga de Titânio seja  $44\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  e uma trinca circular de diâmetro de 16mm está localizada na espessura de uma chapa que será usada em tração uniaxial (modo I) .

Se a condição de deformação plana é admitida e a tensão de escoamento é de 900 MPa, a máxima tensão permitida sem ocorrer a fratura é calculada como segue:

A intensidade de tensão para esta trinca circular é:

$$K = 2\sigma\sqrt{a/\pi}$$

Onde  $\sigma$  é a tensão aplicada e  $a$  é o comprimento da trinca.

# Mecânica da Fratura

## Aplicações da Mecânica da Fratura

### Exemplo 2 - Solução:

Na fratura,  $K = K_{Ic}$ . Rearranjando a equação e substituindo pelos valores apropriados, temos:

$$\begin{aligned}\sigma &= K/2\sqrt{\pi/a} \\ &= 44/2 (\pi / 0,008)^{1/2} \\ \sigma_{\text{fratura}} &= 436 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Portanto, a fratura ocorrerá abaixo da tensão de escoamento do material.

Como vemos, não há garantia de que a fratura não ocorrerá mesmo para tensões abaixo do limite de escoamento.

# Mecânica da Fratura

## Aplicações da Mecânica da Fratura

### Exemplo 3

#### Mecânica da Fratura no Carregamento em Fadiga

É importante conhecer a máxima carga que pode ser aplicada sem causar fratura quando assumindo que existem trincas pré-existentes.

A situação mais típica é aquela em que existe uma trinca pré-existente e cargas ciclicamente aplicadas menores que aquelas que levam à fratura imediata.

Neste caso, a aplicação repetitiva da carga onde  $K < K_{Ic}$ , causará a propagação da trinca, lentamente no início e mais rapidamente à medida que a trinca avança em comprimento.

**Quantos ciclos poderão ser aplicados antes que a trinca se torne comprida o suficiente para causar a ruptura final?**

# Mecânica da Fratura

## Aplicações da Mecânica da Fratura

### Exemplo 3 - Solução:

Para calcular o número de ciclos, a taxa de crescimento da trinca em função do parâmetro de intensidade de tensão deve ser estabelecido. Isto é normalmente possível para materiais de engenharia de interesse, conforme segue:

$$da/dN = f(\Delta K)$$

Onde:  $N$  é o número de ciclos e  $\Delta K = K_{\text{máx.}} - K_{\text{mín.}}$

Nesta equação,  $\Delta K$  é conhecido como faixa do parâmetro de intensidade de tensão, que caracteriza as tensões cíclicas e deformações à frente da trinca.

A equação de Paris descreve o comportamento de crescimento da trinca para uma larga faixa de  $\Delta K$ .

# Mecânica da Fratura

## Aplicações da Mecânica da Fratura

### Exemplo 4

Estimativa da Vida em Fadiga pela Equação de Paris – Al 7076-T6

A taxa de crescimento de trinca para a liga de Alumínio é dada por:

$$da/dN = 5 \times 10^{-10} (\Delta K)^4$$

Onde:  $\Delta K$  é dado em ksi.in e  $da/dN$  é dado em in/ciclo

Admitindo que o componente apresenta uma trinca de 5 mm de comprimento, a tensão varia entre 0 e 207 MPa (0 – 30ksi) e a tenacidade à fratura é de 27,5MPa $\sqrt{m}$  (25ksi $\sqrt{in}$ ).

Para esta geometria de trinca, o parâmetro de intensidade de tensão é dado por:

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

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

# Mecânica da Fratura

## Aplicações da Mecânica da Fratura

### Exemplo 4 - Solução:

A partir dos dados do problema e da expressão, a taxa de crescimento é dada por:

$$(da/dN) = 5 \cdot 10^{-10} \times (30)^4 \times \pi^2 \times a^2 = 4 \cdot 10^{-3} a^2 \text{ in/ciclo}$$

Esta equação pode ser integrada desde  $N = 0$  e  $a = a_0 = 2,54\text{mm}$  até a condição final de  $N = N_f$  e  $a = a_f$ . O comprimento final da trinca ( $a_f$ ) é o comprimento de trinca na qual a fratura ocorre e corresponde a  $K_{\text{máx.}} = K_{Ic}$ .

$$N_f = 250 \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{a^2}$$

$$N_f = 250 \left( \frac{1}{a_0} - \frac{1}{a_f} \right)$$

$a_f$  depende da tenacidade à fratura e da geometria considerada.

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma} \right)^2 = \left( \frac{25}{30} \right)^2 = 0.22 \text{ in. (5.6 mm)}$$



# Mecânica da Fratura

## Aplicações da Mecânica da Fratura

### Exemplo 4 - Solução:

Substituindo  $a_f$  na equação anterior teremos:

$$N_f = 250 \left( \frac{1}{0.1} - \frac{1}{0.22} \right) = 1363 \text{ cycles}$$

Portanto, baseado nas informações dadas, o componente apresentará vida de pelo menos 1300 ciclos.