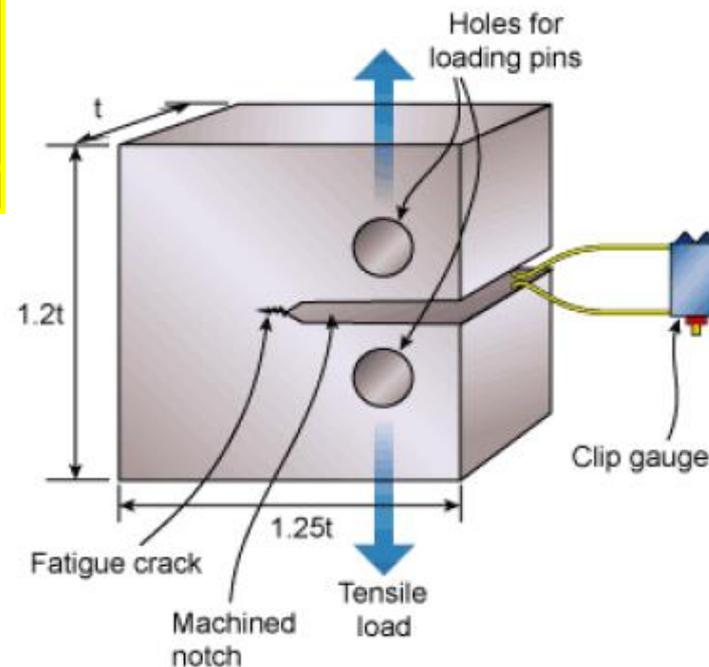
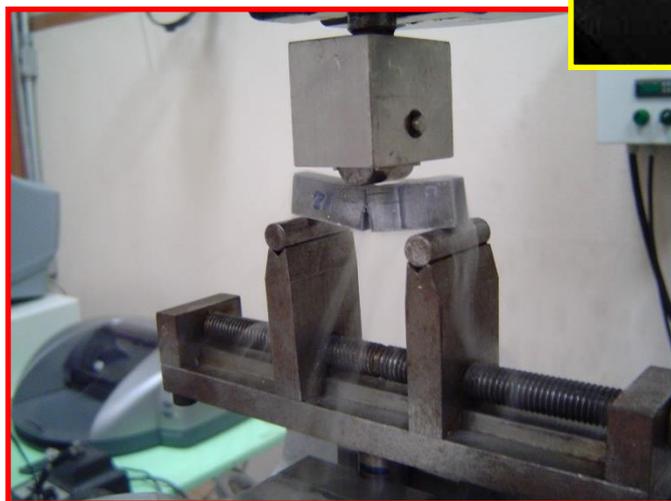
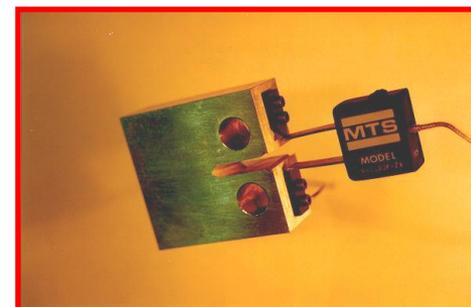
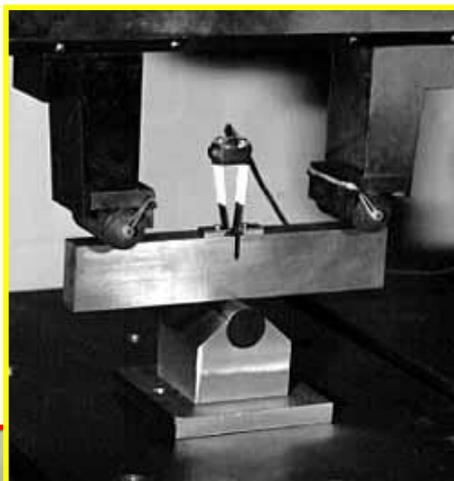


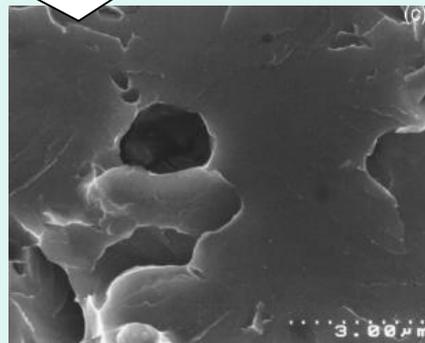
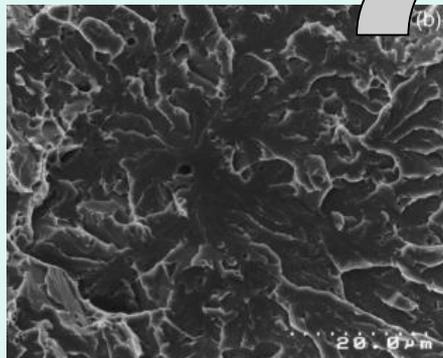
7 – ENSAIO DE TENACIDADE À FRATURA



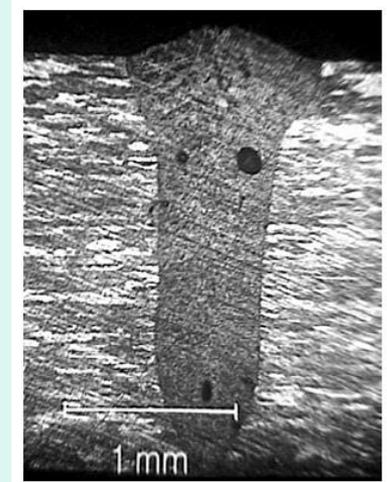
Comportamento em Presença de Trincas e Defeitos:

- Enfraquecimento do componente, podendo levar à falha por ruptura frágil
- Materiais contêm defeitos que devem ser tratados como trincas:
 - *Inclusões, poros, riscos, ...*

Fratura Iniciada em inclusão



Poros em cordão de solda a laser

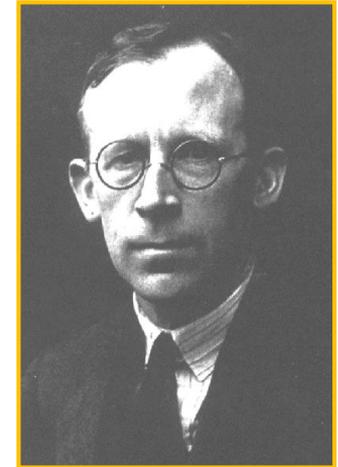


- Trincas também podem nuclear em condições de serviço em diversos tipos de estruturas, como aviões, vasos de pressão, navios, pontes, maquinaria pesada, veículos terrestres...

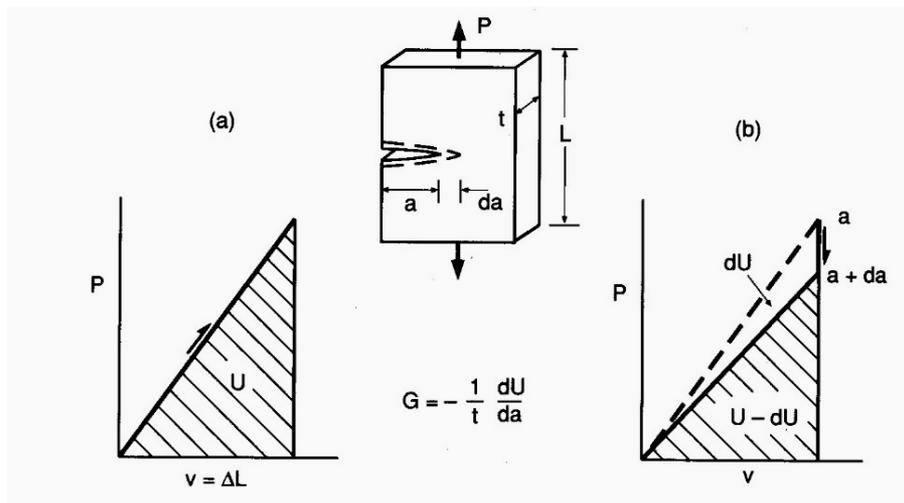


PRECURSORES DA MECÂNICA DA FRATURA

- Inglis: Concentração de tensão em presença de furo elíptico
- Griffith: Abordagem Energética.
- Uma trinca irá crescer se o decréscimo da energia elástica armazenada no corpo for ao menos igual à energia necessária para criar as novas superfícies de trinca.



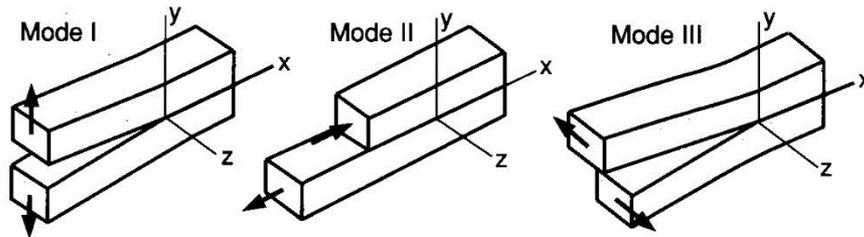
Alan Arnold Griffith (1893 – 1963)



$$U = \frac{Pv}{2}$$

$$G = -\frac{1}{t} \frac{dU}{da}$$

ESTADO DE TENSÃO NA VIZINHANÇA DA TRINCA



Modos de Sollicitação:

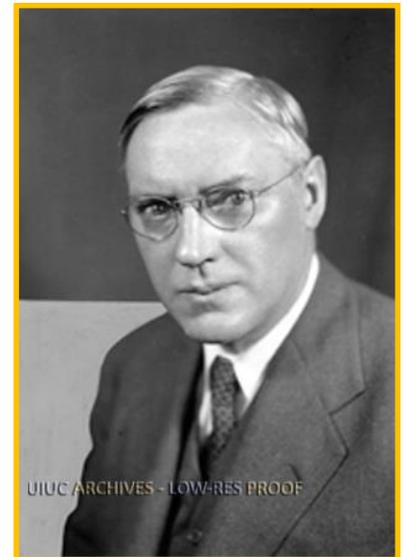
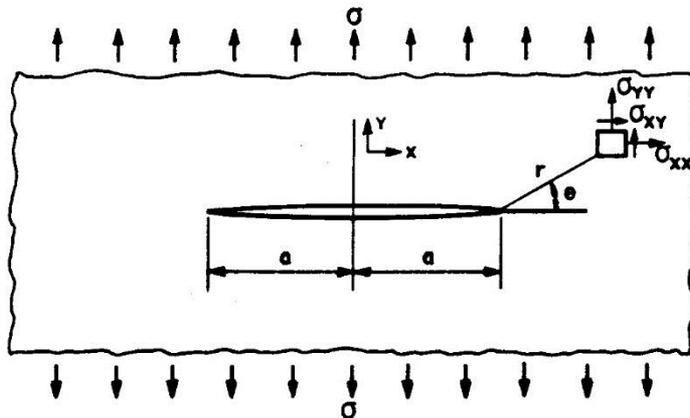
Modo I: Abertura

Modo II: Deslizamento (cisalhamento no plano)

Modo III: Rasgamento (cisalhamento antiplano)

Desenvolvimento analítico de Westergaard (1939)

- Placa infinita com trinca de comprimento $2a$.
- Introduziu uma função-tensão complexa.
- Resolveu o Campo de Tensões Elásticas na ponta da trinca.



Harold M. Westergaard (1888 – 1950)

ELASTICIDADE BIDIMENSIONAL

- Os 3 estados do problema estrutural (tensão, deformação, deslocamento)
- As 8 equações do problema (relações cinemáticas, Leis constitutivas, equilíbrio)
- Relações Adicionais: Equação de Compatibilidade e Condições de Contorno

Relações Cinemáticas: Relações deformação-deslocamento

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

Leis Constitutivas: Relações entre tensão e deformação

Estado Plano de Tensão

$$(\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0)$$

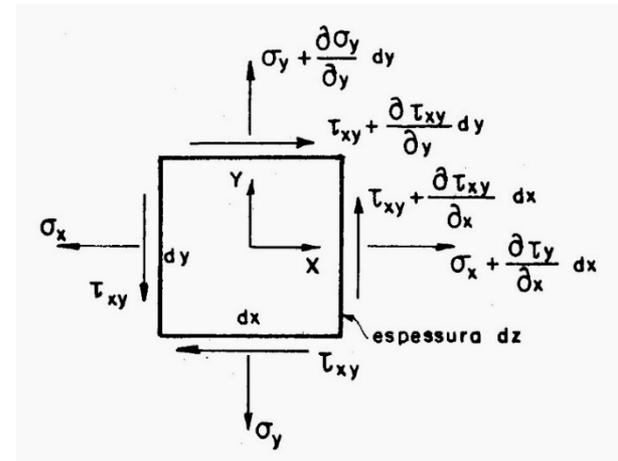
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ & 1 & 0 \\ & & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

ELASTICIDADE BIDIMENSIONAL

Equações de Equilíbrio:

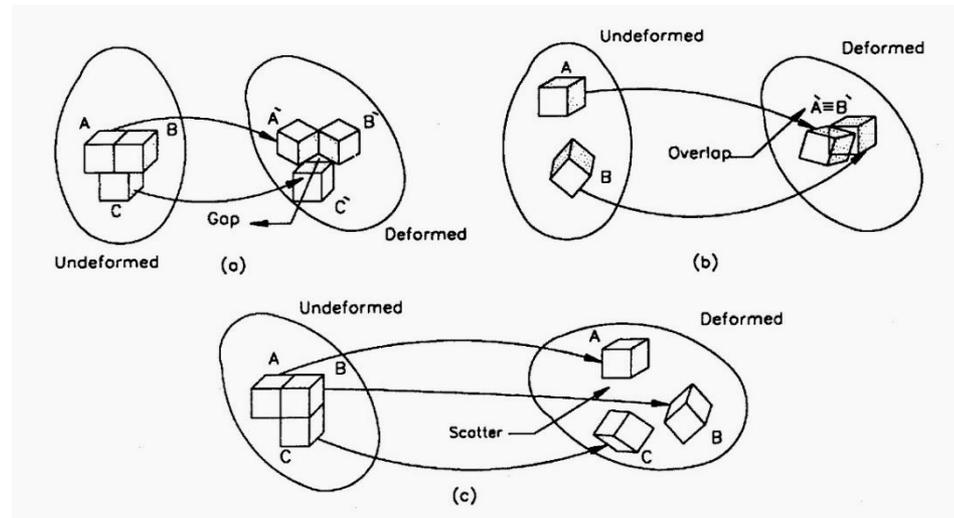
$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + F_x = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + F_y = 0$$



Equação de Compatibilidade:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}$$



ELASTICIDADE BIDIMENSIONAL

Equação de Compatibilidade em Termos das Tensões

A equação de compatibilidade pode ser transformada em uma equação envolvendo apenas componentes de tensão, empregando-se para isso as relações constitutivas e tendo em vista as equações de equilíbrio.

Quando as forças de volume são constantes ou nulas, as equações de compatibilidade para tensão plana e deformação plana se reduzem a uma única equação, a Equação Diferencial de Laplace ou Equação Harmônica:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = 0 \quad \text{ou:} \quad \nabla^2 (\sigma_x + \sigma_y) = 0$$

O problema da elasticidade plana consiste agora em resolver 3 equações (2 de equilíbrio e a equação de compatibilidade) a 3 incógnitas.

Airy descobriu uma engenhosa manobra algébrica que permitiu reduzir o conjunto de 3 equações a apenas 1 equação.

Considera-se que as tensões em um problema bidimensional podem ser descritas por uma única função ϕ , denominada função-tensão.

O conceito de Airy foi posteriormente generalizado por Maxwell para o caso tridimensional.

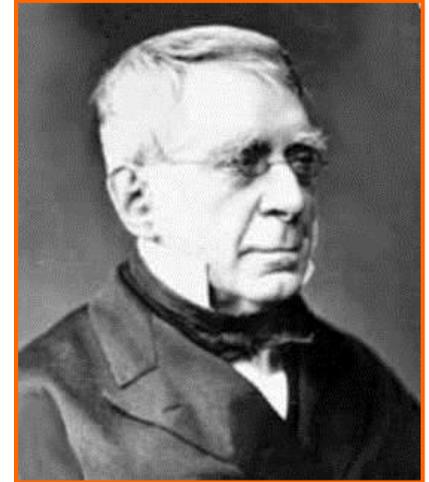
A FUNÇÃO-TENSÃO DE AIRY

Admita a existência de uma função ϕ determinada de modo a satisfazer as seguintes relações:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y}$$

Existindo tal função, as equações de equilíbrio são automaticamente satisfeitas. A equação de compatibilidade passa a ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = 0$$



George B. Airy (1801 – 1892)

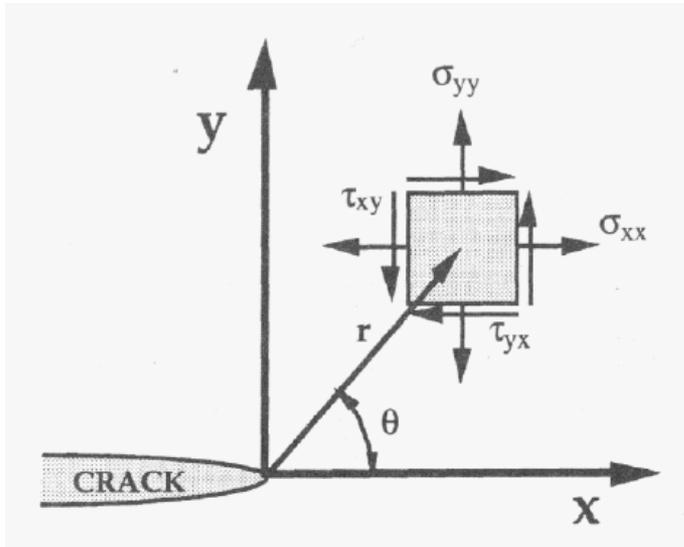
*Empregando o operador de Laplace, a equação de compatibilidade, agora uma **equação bi-harmônica**, é escrita da forma abaixo.*

Qualquer função que obedeça a equação bi-harmônica representa um estado de tensão, desde que obedecidas as condições de contorno.

$$\nabla^2 \nabla^2 \phi = \nabla^4 \phi = 0$$

A resolução de problemas é feita então por método inverso ou semi-inverso.

ESTADO DE TENSÃO NA VIZINHANÇA DA TRINCA DE MODO I

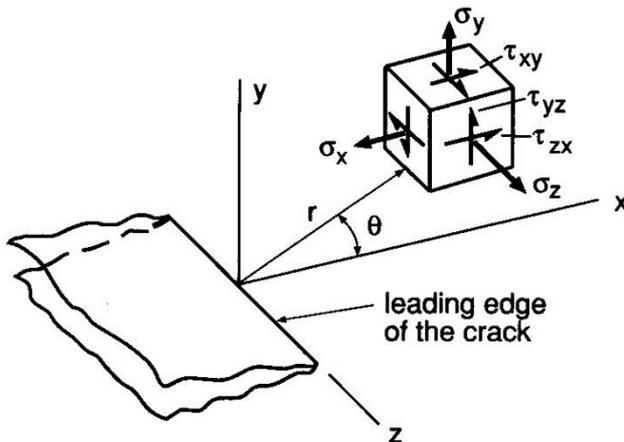


- Resultado do desenvolvimento analítico

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right) + \dots$$

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right) + \dots$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \dots$$



Sob predominância de deformação plana, tem-se ainda:

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$$

MECÂNICA DA FRATURA ELÁSTICA LINEAR

- O campo de tensões na vizinhança da trinca fica conhecido a partir do termo:

$$\sigma\sqrt{a}$$

- Irwin define o Fator Intensidade de Tensão K:

- Para trincas de modo I, tem-se: $K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$, onde Y é uma função geométrica
- O conceito é extensível aos modos II e III
- Como os problemas envolvendo trincas do modo I são mais comuns, é costume omitir-se o índice nestes casos: $K \equiv K_I$
- O campo de tensão à frente da trinca é então descrito como:

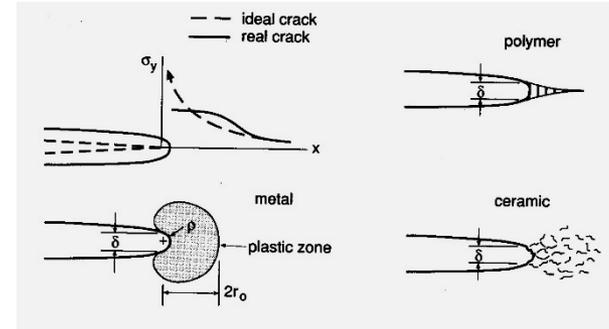
$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

Sendo a fratura um processo altamente localizado na ponta da trinca, é natural supor que ela seja controlada pelos campos de tensão e deformação, os quais estão completamente descritos pelo Fator Intensidade de Tensão.

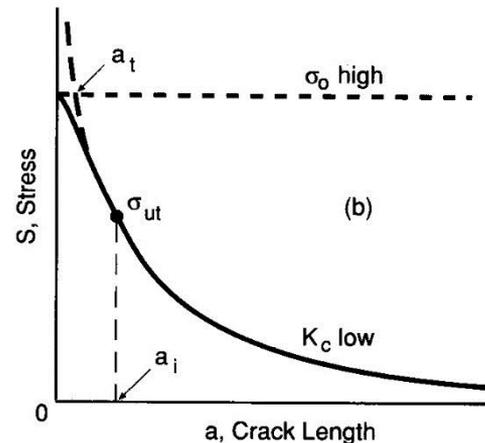
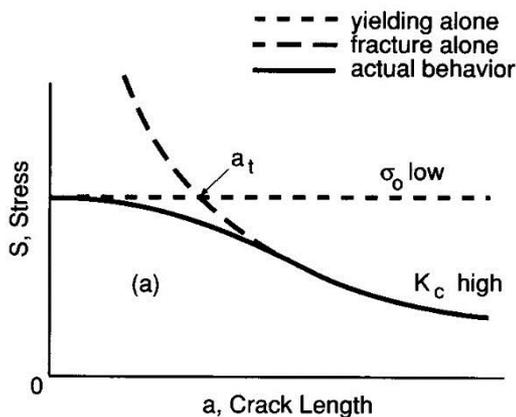
Verifica-se a existência de um valor crítico K_c deste Fator, para o qual ocorre a propagação instável da trinca. Este valor crítico depende do material e do estado de tensão.

Diferentes Comportamentos de Materiais:

Diferentes mecanismos de acomodação limitam a tensão na ponta da trinca



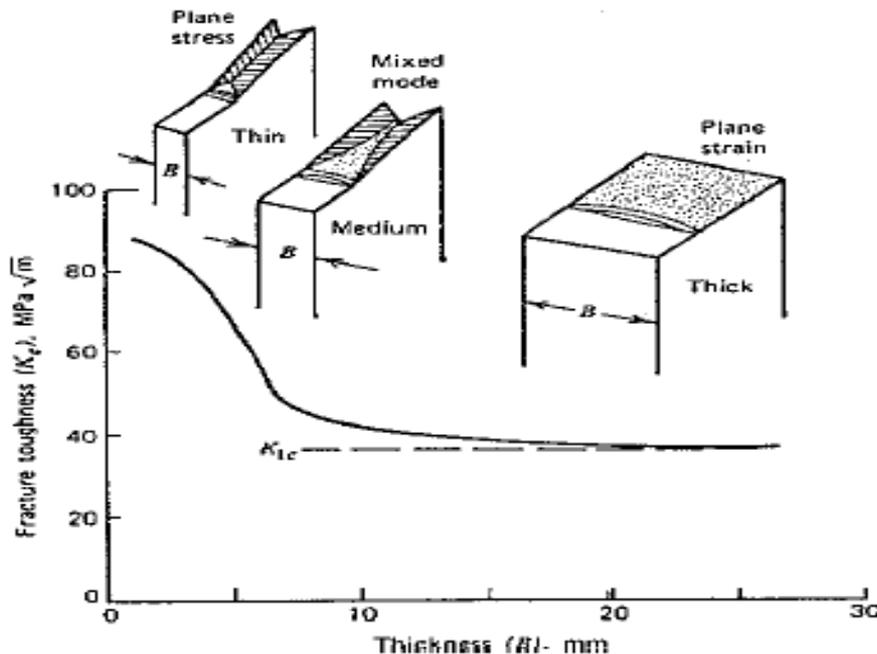
- Pode-se definir um tamanho de defeito que caracteriza transição no modo de falha ao considerar o tamanho da trinca para o qual a tensão de falha se iguala ao limite de escoamento do material.
- Os defeitos inerentes a alguns materiais são maiores que o tamanho de transição: neste caso o limite de escoamento não é atingido e o material se rompe de forma frágil.



$$a_t = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma_e} \right)^2$$

Tenacidade à Fratura:

- A forma e dimensões da zona plástica na ponta da trinca são afetadas pelo estado tensional (tensão plana ou deformação plana), visto que este determina a tensão efetiva de escoamento.
- Assim, o valor crítico do Fator Intensidade de Tensão também depende do estado de tensão. Observa-se que K_{Ic} varia com a espessura da amostra, diminuindo assintoticamente à medida que a deformação plana predomina.



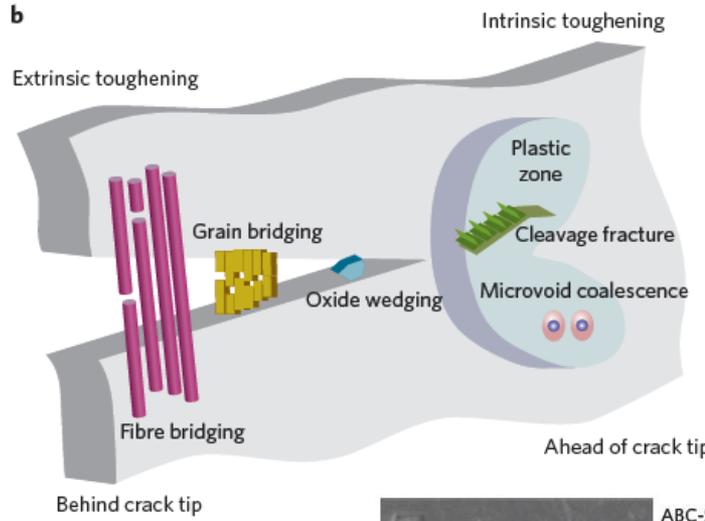
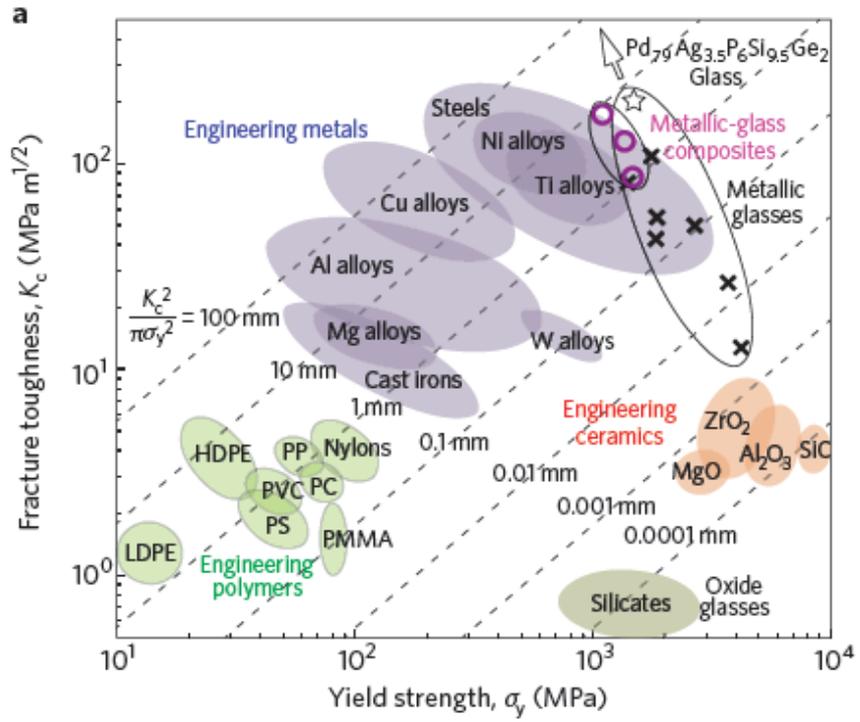
✓ O valor de K_{Ic} no estado de deformação plana é denotado por K_{Ic} e é denominado Tenacidade à Fratura, sendo considerado uma propriedade mecânica do material.

MATERIAL	K_{Ic} , $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	S_y , MPa
Aluminum		
2024	26	455
7075	24	495
7178	33	490
Titanium		
Ti-6AL-4V	115	910
Ti-6AL-4V	55	1035
Steel		
4340	99	860
4340	60	1515
52100	14	2070

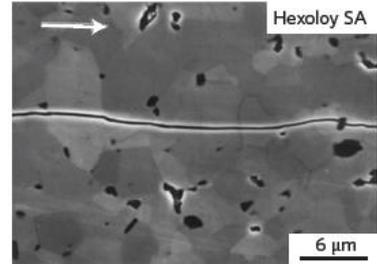
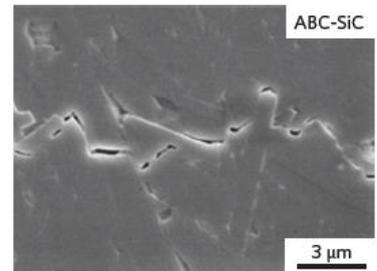
Tenacidade à Fratura:

Mecanismos de tenacificação

Resistência e Tenacidade



Exemplo: Modos de fratura do SiC



“The ability of a material to undergo deformation is a critical aspect of toughness, as this feature enables the local dissipation of high stresses that would otherwise cause the material to fracture; this is the reason that hard materials tend to be brittle and lower strength materials (which can deform readily) tend to be tougher” (R.O. Ritchie)

PERGUNTAS A SEREM RESPONDIDAS

- **Que tamanho de trinca pode ser tolerado para uma dada carga de serviço?**
- **Quanto tempo leva para uma trinca crescer de um tamanho inicial a um tamanho crítico?**
- **Que tamanho pode ser permitido para uma falha pré-existente no começo da vida útil da estrutura?**
- **Com que frequência as estruturas devem ser inspecionadas?**

O CASO DO F-111

Triunfo sobre a Adversidade

- O F-111 foi talvez o projeto mais problemático desde a Segunda Guerra Mundial.
- Custos crescentes com a fabricação e operação de aviões cada vez mais sofisticados induziram à adoção de projetos “multi-tarefas”.
- A General Dynamics assinou a proposta de desenvolvimento para o programa TFX, um caça-bombardeiro multipropósitos que serviria à USAF e à USN.
- Primeiro vôo em dezembro de 1964; início das entregas em outubro de 1967.



O CASO DO F-111

Triunfo sobre a Adversidade

- A tecnologia incorporada em um avião de produção regular usualmente está em um nível estável, onde é bem entendida e prontamente aplicada.
- Por outro lado, o F-111 demandou tal nível de performance para a época que as tecnologias existentes eram insuficientes para atender às necessidades.
- Novas tecnologias para as asas de geometria variável, motores, sistema de navegação automática, sistema de escape da tripulação e novas ligas metálicas.
- Projeto desenvolvido em regime de urgência; o avião entrou em produção antes que os problemas encontrados fossem resolvidos: **receita para o desastre**.



O CASO DO F-111

Asas de Geometria Variável

- Concebidas inicialmente pela Messerschmitt AG na Alemanha nazista.
- Um protótipo do projeto P.1101 foi construído, mas não foi testado em vôo antes do fim da Guerra, quando foi capturado incompleto pelas forças americanas.
- O protótipo foi levado para os Estados Unidos e entregue à Bell Aircraft Company.



Protótipo capturado do Messerschmitt P.1101

O CASO DO F-111

Asas de Geometria Variável

- O avião experimental Bell X-5 foi desenvolvido inspirado no protótipo alemão e incorporava um mecanismo de mudança do ângulo das asas em vôo.
- O X-5 voou pela primeira vez em 1951, mostrando-se um avião bastante instável e difícil de controlar. Em 1953 um dos protótipos caiu, matando o piloto de testes.
- O projeto foi abandonado devido às limitações tecnológicas da época.



Fotografia composta mostrando diferentes angulações das asas do Bell X-5.



Avião experimental Bell X-5 em vôo

O CASO DO F-111

Asas de Geometria Variável

- Um dos problemas da asa de geometria variável era que quando o ângulo de “sweep” da asa era aumentado, a porção da asa próximo do corpo do avião tinha que retrair para dentro da fuselagem, diminuindo a área de sustentação.
- Pesquisadores da NASA apresentaram em 1959 a ideia do duplo pivô, em que a raiz da asa poderia se mover para dentro ou para fora ao se mudar o ângulo. Para isso, seria necessário um anteparo (“shoulder”) que manteria as partes móveis afastadas da fuselagem e também poderia ter função de aerofólio.
- O conceito do “shoulder” não estava bem desenvolvido, e os projetistas da General Dynamics não o fizeram suficientemente largo (ou aerodinamicamente eficiente). Este erro só foi corrigido no caça F-14 Tomcat.

Um F-111 Aardvark da RAAF. Os Estados Unidos e a Austrália foram os únicos países a operar este avião militar “multitarefa”.



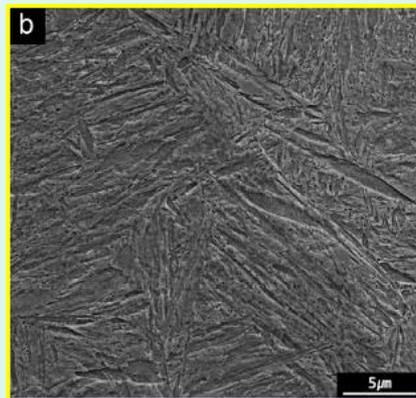
O CASO DO F-111

Novas Ligas Metálicas

- Vários componentes do F-111, entre eles as asas de geometria variável, trouxeram novos desafios aos engenheiros: encontrar materiais para resistir às altas tensões envolvidas (o avião deveria suportar acelerações de até 7g).
- Para o suporte das asas foi escolhido o aço D6ac, material novo na época e ainda não suficientemente testado em aviões.
- Em dezembro de 1969 um F-111 com apenas 104 horas de vôo caiu devido à fratura do suporte da asa esquerda durante a retomada de um mergulho, matando o piloto.
- A análise dos destroços revelou que um pequeno defeito de forjamento (não detectado nas inspeções) originou uma trinca que cresceu por fadiga e causou a fratura do suporte.

Composição do aço D6ac (% peso):

*0,42-0,48 C
0,90-1,20 Cr
0,90-1,10 Mo
0,60-0,90 Mn
0,40-0,70 Ni
0,07-0,15 V*

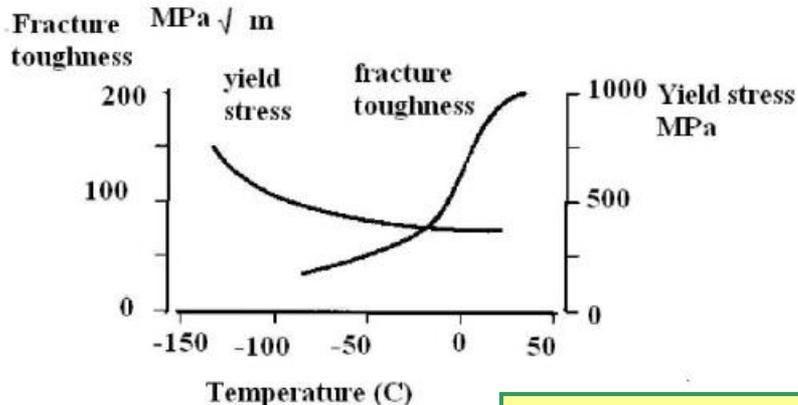


Microestrutura do aço D6ac temperado após austenitização a 1.000 °C (MEV)

O CASO DO F-111

Estrutura Tolerante aos Danos

- O projeto do F-111 foi baseado na filosofia “Safe Life”, cujo objetivo principal é levar em conta o efeito das cargas cíclicas na estrutura do avião. Contudo, este projeto não leva em conta o efeito de uma trinca (“rogue flaw”), introduzida em um avião específico e que não seja detectada nas inspeções não-destrutivas.
- A **Mecânica da Fratura** trata do efeito de pequenas trincas no material. Mas o F-111 já estava projetado e fabricado – tarde demais para uma nova filosofia de projeto. O comitê que investigou a falha recomendou que **todos** os F-111 fossem submetidos a um ensaio de resistência à temperatura de -40°C , o “Low Temperature Proof Test”.

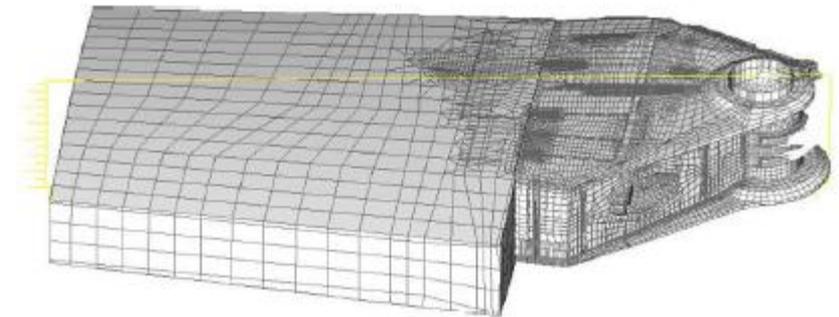
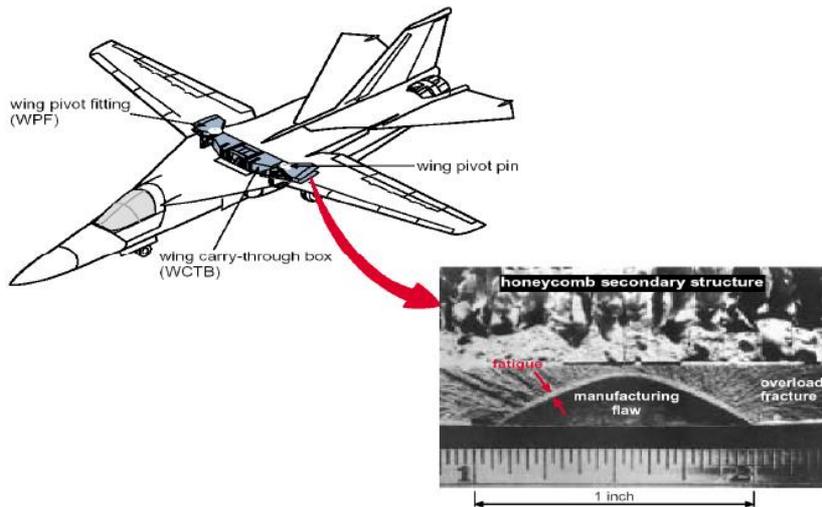


O F-111 foi o único avião na história que dependeu do “Cold Proof Test” para a sua operação segura.

O CASO DO F-111

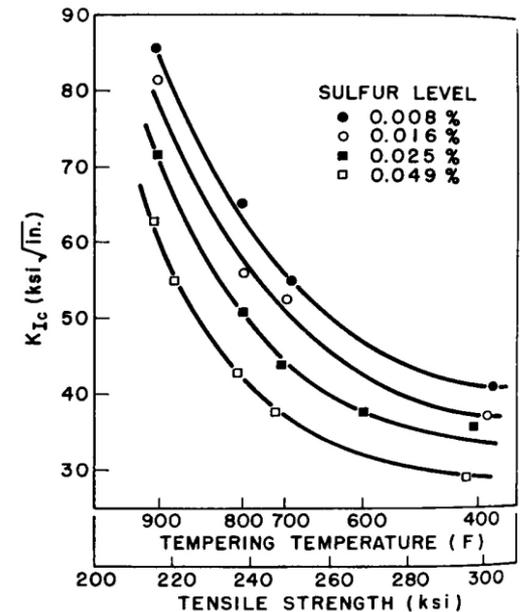
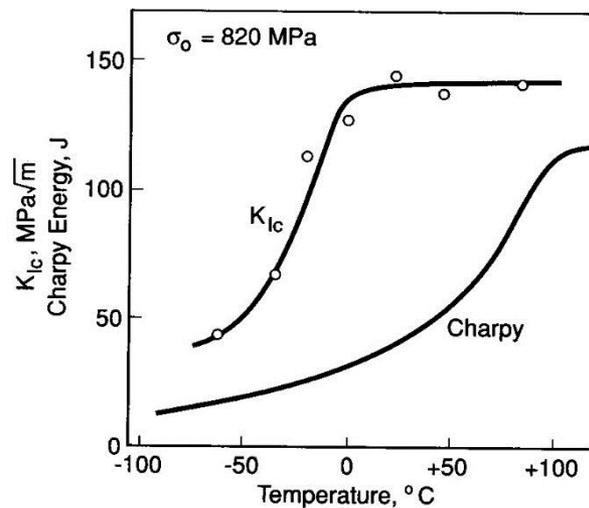
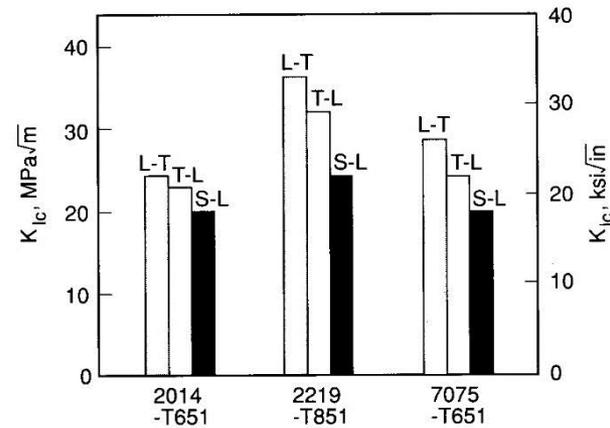
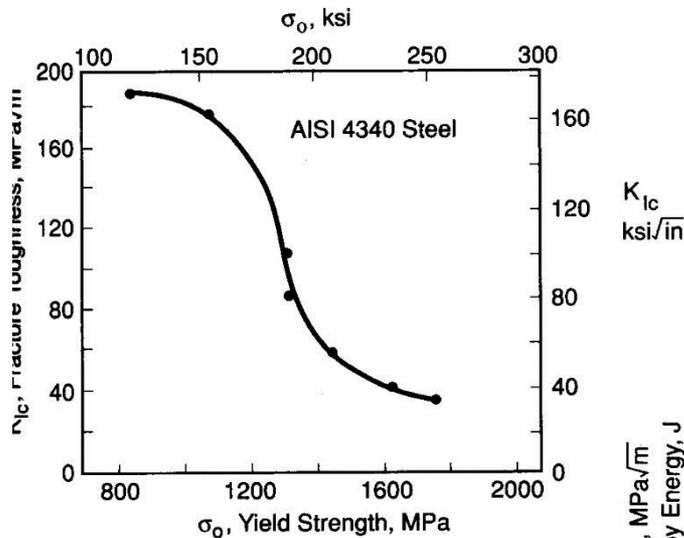
Triunfo sobre a Adversidade

- O caso do F-111 levou a USAF a desenvolver o conceito de **projeto tolerante ao dano**, em que falhas, tais como uma trinca de 0,05 polegada, são assumidas existir **a priori** em um componente crítico. O componente deve tolerar este defeito, resistindo às cargas e sobrecargas de operação normal. O defeito não pode crescer até o **tamanho crítico** antes da próxima inspeção. Critérios de crescimento da trinca são usados para estabelecer o intervalo entre as inspeções.
- Após a adoção do “Cold Proof Test”, nenhum outro F-111 caiu devido a falha estrutural em mais de 30 anos de operação.



Fatores que Influem na Tenacidade à Fratura:

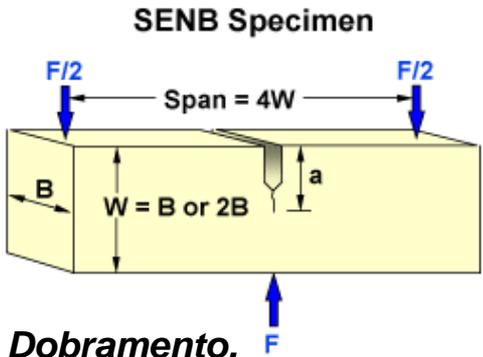
- Limite de escoamento
- Composição e microestrutura
- Temperatura e taxa de carregamento



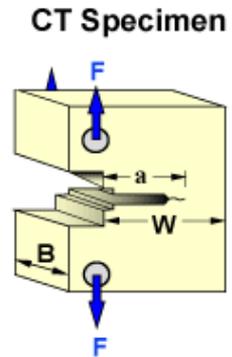
Ensaio para Determinação de K_{Ic} :

- Uma carga crescente é aplicada a um corpo-de-prova pré-trincado até que ele frature.
- Várias geometrias de corpos-de-prova podem ser adotadas.

Normas:
ASTM E399 e
BS 5447



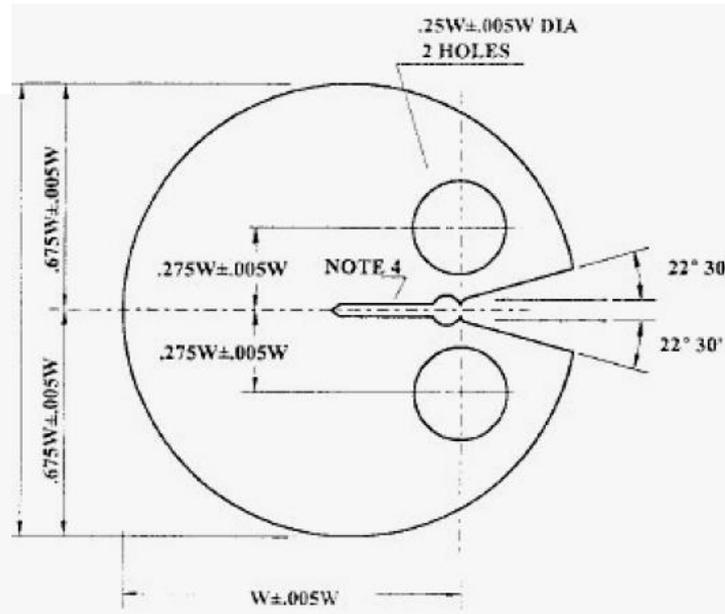
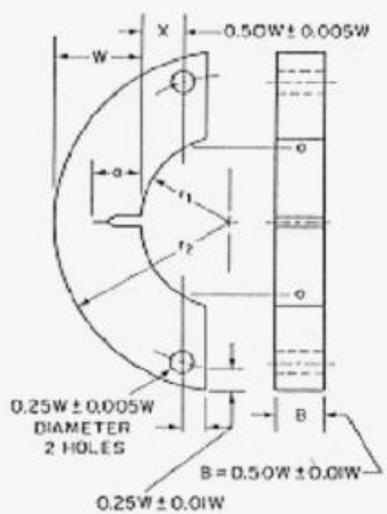
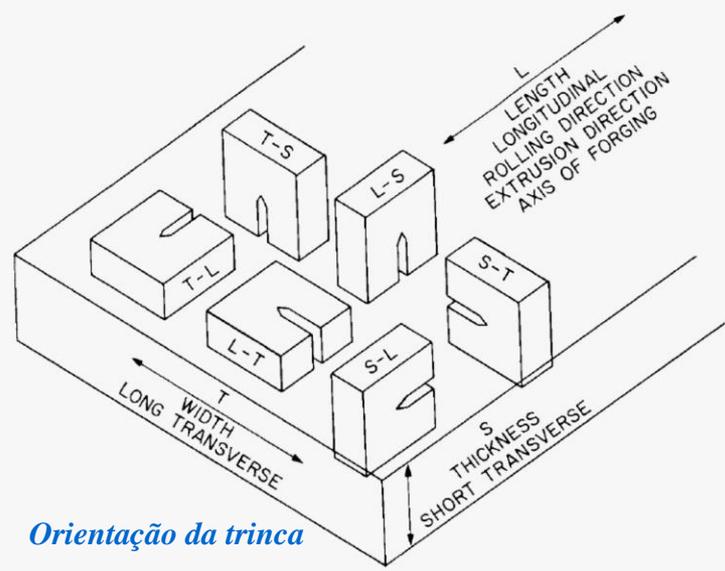
✓ **Dobramento.**



✓ **Compacto C(T).**

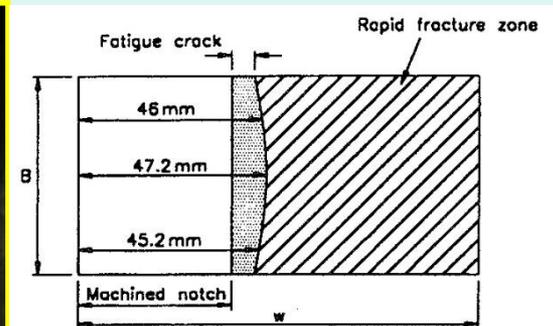
✓ **Em arco.**

✓ **Em forma de disco.**



Roteiro para o Ensaio:

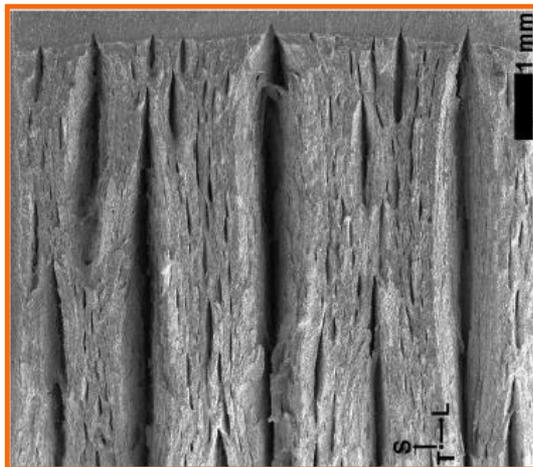
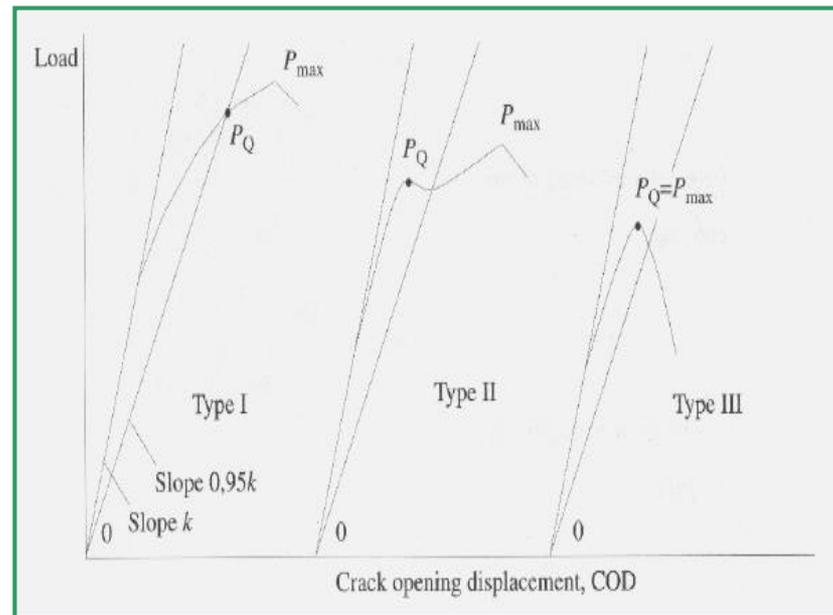
- A partir da disponibilidade do material e conhecimento prévio de suas propriedades, selecionar o corpo-de-prova e obter as dimensões críticas para validação do ensaio.
- Executar a pré-trinca por fadiga (carga cíclica com razão R entre -1 e +0,1).
- Aplicação de uma força crescente com aquisição de curva “carga vs. COD”.
- Após a fratura, medir a pré-trinca na linha central (a_3), na metade da distância entre linha central e as bordas (a_2, a_4), e nas bordas (a_1, a_5).
- Análise carga-COD, cálculo do K_{Ic} candidato (K_Q) e validação.



- Análise da Curva Carga-COD: Determinação de P_Q

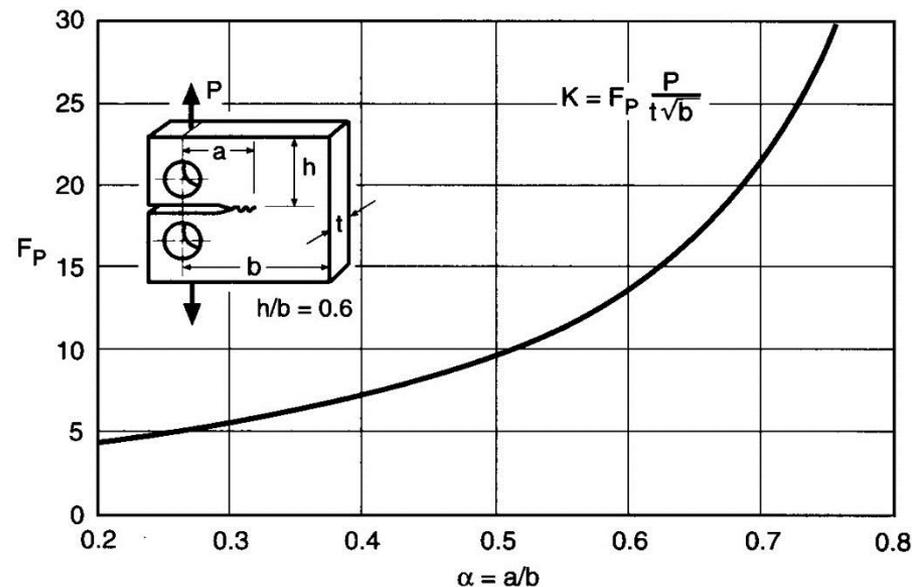


✓ COD é o deslocamento de abertura da trinca (do inglês “crack opening displacement”).



✓ A ocorrência do “pop-in” pode estar relacionada a vários fatores. Exemplo: Delaminação em aço inoxidável duplex.

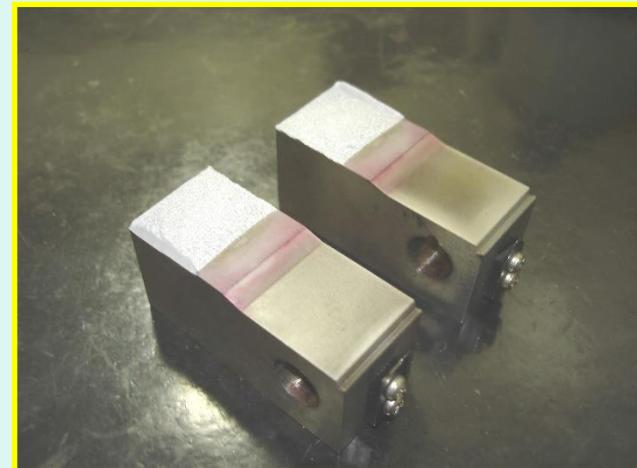
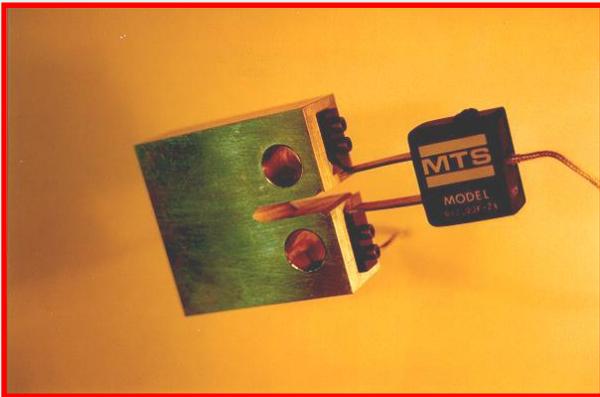
- Determinação de K_Q (valor candidato da tenacidade à fratura)
- ✓ *Empregando-se o valor de P_Q e uma expressão apropriada para o cálculo de K para a geometria do corpo-de-prova adotado, determina-se K_Q , ou seja, um valor “tentativo” de K_{Ic}*



$$F_P = \frac{2 + \alpha}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (a/b \geq 0.2)$$

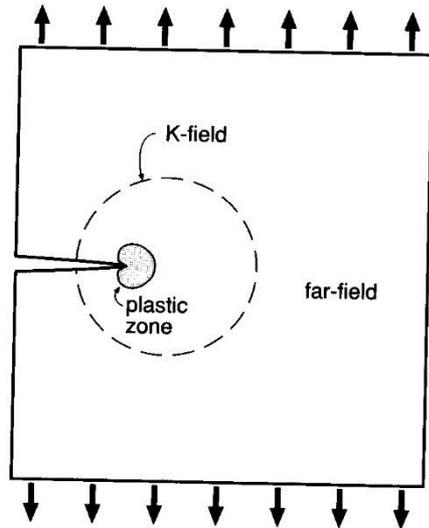
Validação do Ensaio:

- Condições para K_Q ser validado como K_{Ic} :
 - ✓ **Aplicabilidade da MFLE e predominância do estado de deformação plana**
(os cálculos necessários serão mostrados a seguir)
 - ✓ **Relação entre P_Q e $P_{máx}$: $P_{máx} \leq 1,10 P_Q$**
 - ✓ **Valor máximo do Fator Intensidade de Tensão durante pré-trinca:**
 $K_{max} \leq 0,60 K_Q$
 - ✓ **Medidas da trinca: a diferença entre quaisquer duas medidas deve ser menor que 10% do tamanho médio da trinca (a_m). O valor de a_m geralmente é determinado como a média entre os valores de a_2 , a_3 e a_4 .**



Validação do Ensaio:

✓ *Aplicabilidade da MFLE e predominância do estado de deformação plana:*

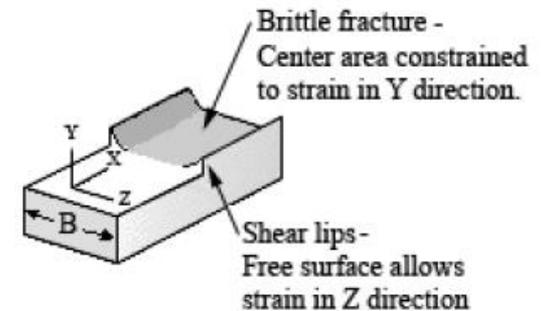
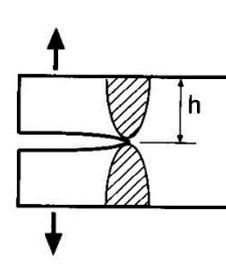
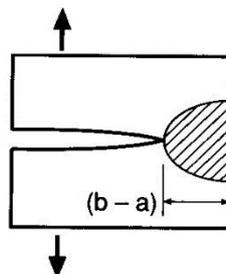
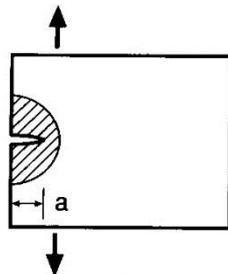
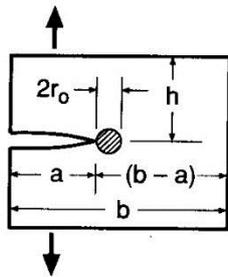


- Necessário existir o Campo K

$$a, (b - a), h \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_Q}{\sigma_e} \right)^2 \quad (\text{M.F.L.E. é aplicável})$$

- Predominância do Estado de Deformação Plana

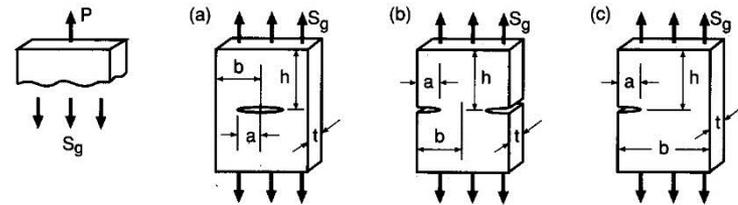
$$t, a \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_e} \right)^2$$



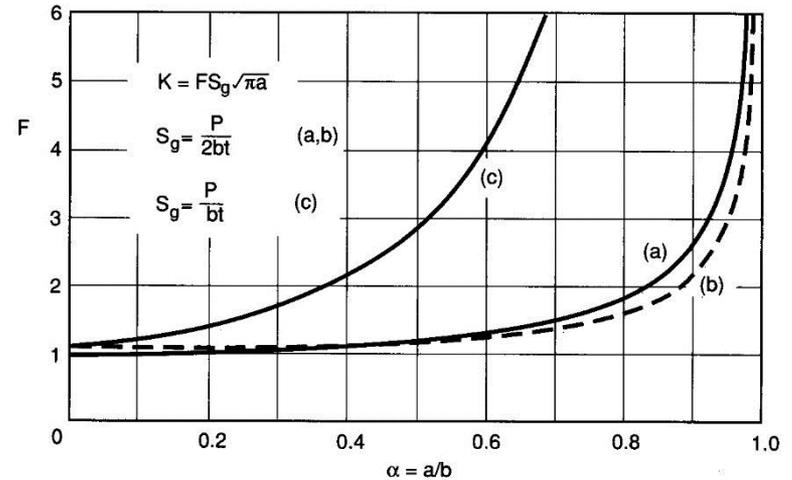
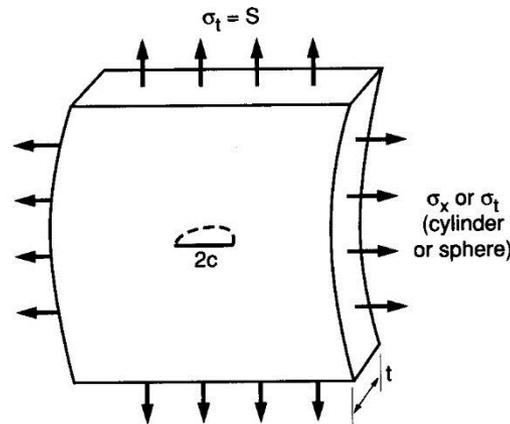
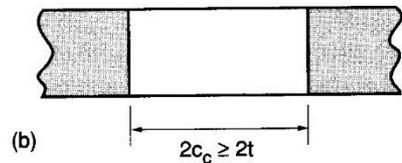
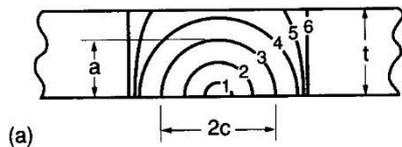
APLICAÇÃO EM PROJETO E SELEÇÃO DE MATERIAIS

Previsão de Falha:

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

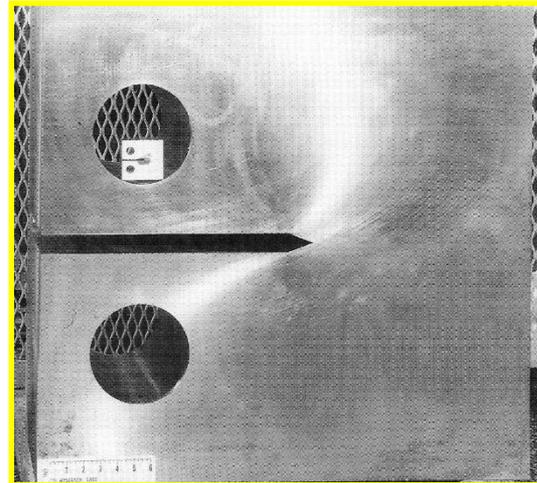
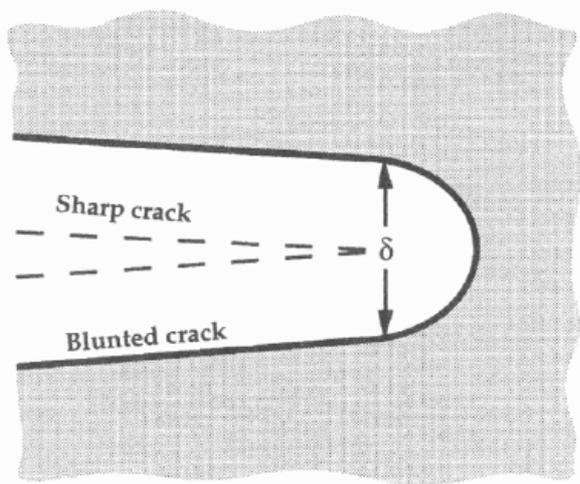


Critério “Leak before break”:



Determinação da Tenacidade à Fratura em Metais Dúcteis:

- Em muitas situações (exemplo: aços de média e baixa resistência mecânica) a fratura é acompanhada por significativa deformação plástica.
- Nestas condições, a Mecânica da Fratura Elástica Linear não é aplicável
- Empregam-se, portanto, parâmetros da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
- Exemplos:
 - Integral J
 - CTOD

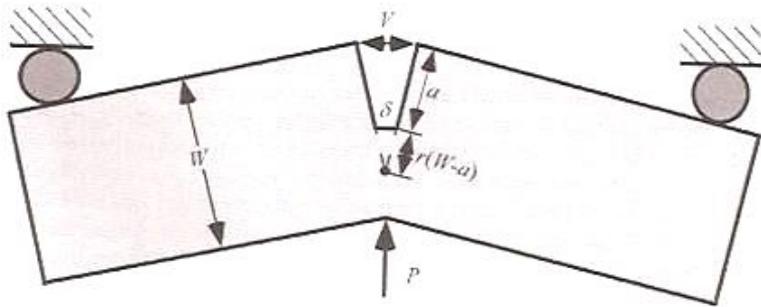


Para metais como o aço de baixo carbono a execução do ensaio de K_{Ic} pode se tornar impraticável.

Dificuldades:

- Maior complexidade dos ensaios
- Interpretação menos direta

Determinação do CTOD:



$$\frac{\delta}{r(W-a)} = \frac{V_g}{r(W-a)+a}$$

$$\delta = \delta_{el} + \delta_P = \frac{K_I^2}{m\sigma_{YS}E} + \frac{r_p(W-a)V_p}{r_p(W-a)+a}$$

