

6. Análise e Prevenção de Falhas



Falhas em Serviço

O que é falha?

Falha é um termo geral usado para indicar que um componente ou peça em serviço tornou-se inoperante, ou continua operante mas tornou-se incapaz de desempenhar satisfatoriamente sua função, ou está seriamente comprometido a ponto de se tornar inseguro para o uso contínuo.

A falha é um evento indesejável, pois pode ter sérias consequências, com danos, exposição a riscos e causar prejuízos. A prevenção de falhas, ou a determinação de vida em serviço e condições para que a falha ocorra de forma prevista são medidas que contribuem para o sucesso de um projeto.



Falhas em Serviço

Análise de Falhas

A investigação de Falha, também conhecida como Análise de Falha, é o processo de coletar e analisar dados para determinar a causa raiz de um determinado incidente ou falha no processo de fabricação ou funcionamento de máquinas e equipamentos.

Importância da Análise de Falhas

- Quando a falha não é analisada, não se sabe o real motivo que provocou o incidente;
- Falhas não analisadas geralmente se repetem em um curto período de tempo;
- Falhas oferecem riscos aos trabalhadores;
- Falhas geram custos elevadíssimos para as empresas.



Falhas em Serviço

- A análise de falhas de componentes é um aspecto importante da Engenharia
- Conhecendo-se as causas de falhas, pode-se melhorar: projeto, condições de operação e seleção de material
- As causas de falhas podem ser divididas em 3 categorias:
 - Uso incompatível com as premissas do projeto (mau uso)
 - Erros de fabricação, montagem e manutenção
 - Erros de projeto, que podem incluir:
 - Forma e dimensões do componente
 - Propriedades do material

Frequencia de Causas de Falhas em Componentes Industriais

(Fonte: Brooks & Choudhury, "Metallurgical Failure Analysis", 1993.

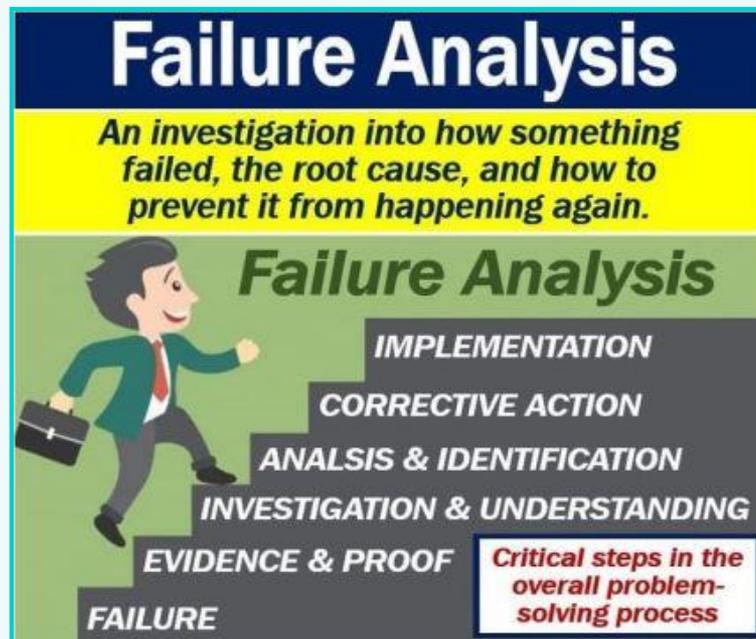
• Seleção de Material	38%
• Defeito de Fabricação	15%
• Erro em Tratamento Térmico	15%
• Erro em Projeto Mecânico	11%
• Condições de Operação Imprevistas	8%
• Controle Inadequado das Condições Ambientais	6%
• Inspeção e Controle de Qualidade impróprios	5%
• Outras	2%



Falhas em Serviço

Obtenção de informações:

- Descrição dos componentes falhados e suas funções
- Eventos “anormais” antes da falha?
- Tempo de serviço; cronogramas de inspeção e manutenção
- Detalhes de manutenção, incluindo registros de inspeção não destrutiva
- Existência de reparos, retrabalhos prévios?
- Eventos após a falha (exemplo, incêndios)
- Detalhes de falhas anteriores, acidentes, e ações adotadas, se for o caso

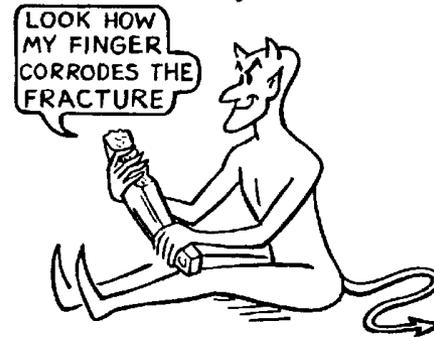
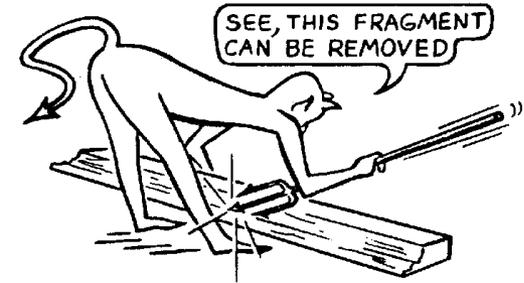
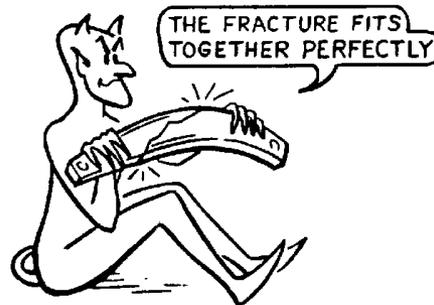


Falhas em Serviço

Fratografia: O exame da superfície de fratura informa sobre o modo de falha

Frequencia de modos de falha associados à deterioração em durante condições de serviço:

- Corrosão 29%
- Fadiga 25%
- Fratura Frágil 16%
- Sobrecarga 11%
- Corrosão/Alta Temper. 7%
- Corrosão/Fadiga 6%
- Fluência 3%
- Desgaste/Abrasão/Erosão 3%



HANDLE FRACTURES WITH CARE



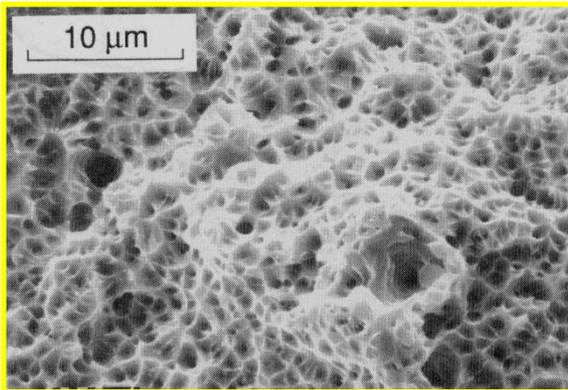
Fratura causada por carregamento cíclico (fadiga de material)



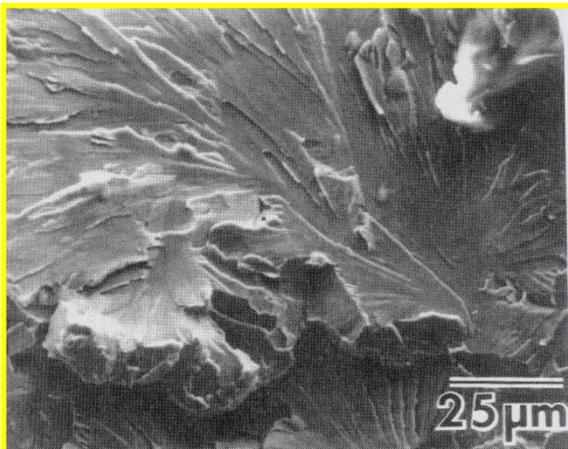
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Análise de Fratura

Aspectos morfológicos das superfícies de fratura



Dúctil



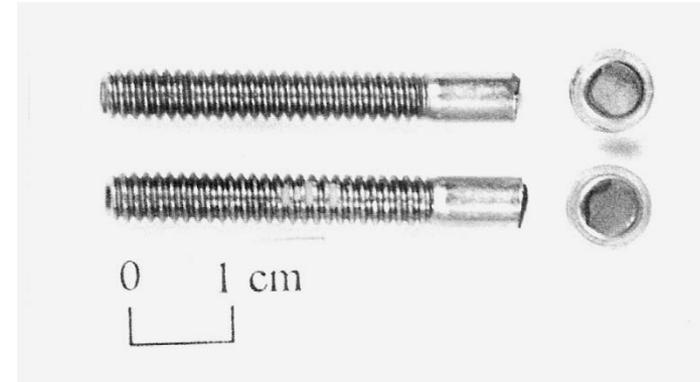
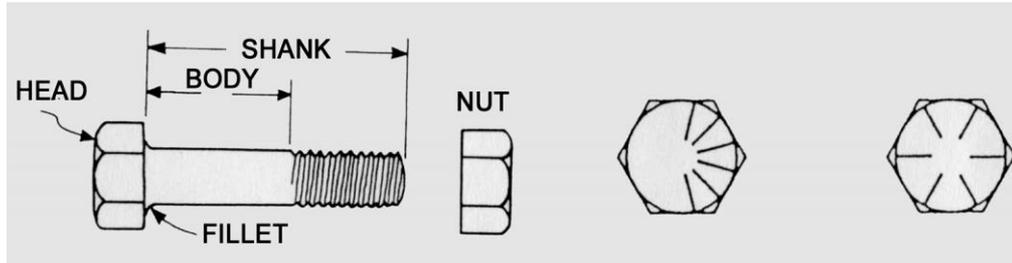
Frágil

Ensaio de impacto e transição dúctil-frágil

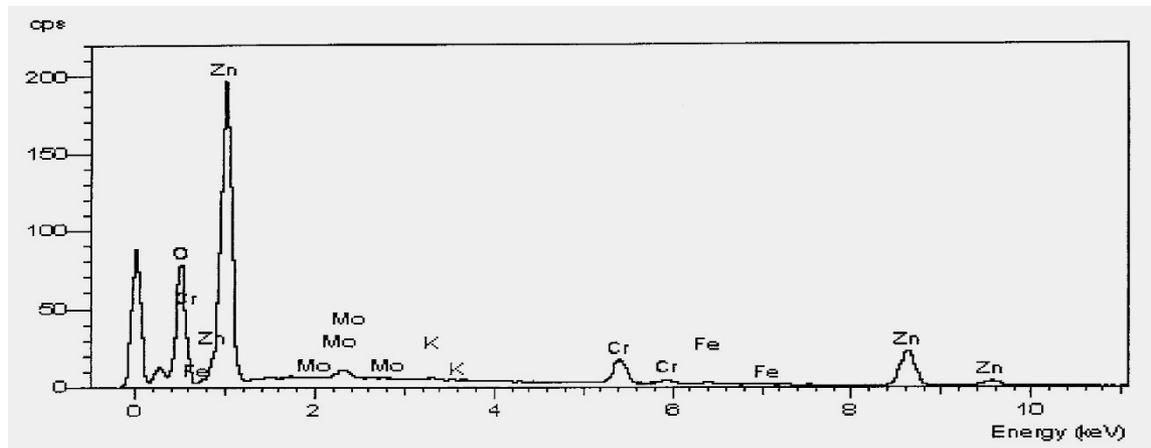


(Análise feita na AMR/DCTA)

Exemplo: fratura de parafusos em serviço



- Parafusos de fixação de retentor de óleo falhados em serviço, após cerca de 5.000 horas de operação
- Material: aço de baixo carbono (dureza dentro da especificação)
- Manutenção do equipamento em dia, de acordo com o especificado pelo fabricante
- Torque especificado: torque para remover parafusos remanescentes dentro dos valores previstos
- Sem ocorrências prévias
- Após a falha, ocorreu vazamento de óleo e *interlock* hidráulico
- Exame visual: parafusos apresentavam camada superficial de cor amarela.



Análise realizada por EDS da superfície do parafuso, indicando a presença de camada de zinco



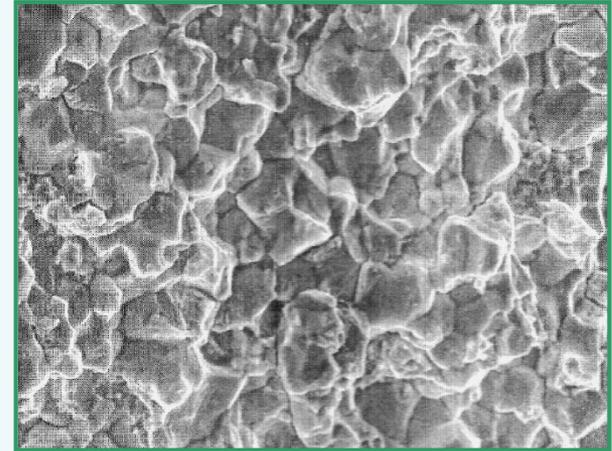
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Exemplo: fratura de parafusos em serviço

Aspecto geral da superfície de fratura



Aspecto intergranular da superfície de fratura (aumento 1.000x)



Presença de “hair lines” típicos de fragilização por hidrogênio (aumento 10.000x)



Conclusão: fratura ocorreu por fragilização ao Hidrogênio, ocasionada pela exposição do parafuso a um processo de deposição eletrolítica, provavelmente devido a problemas com o tratamento térmico de desidrogenação.



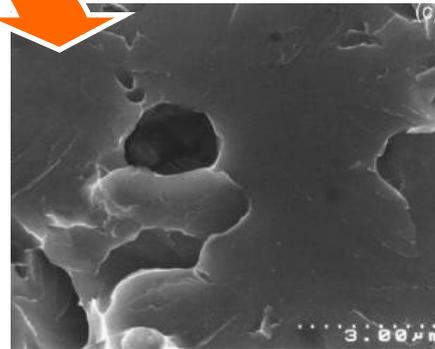
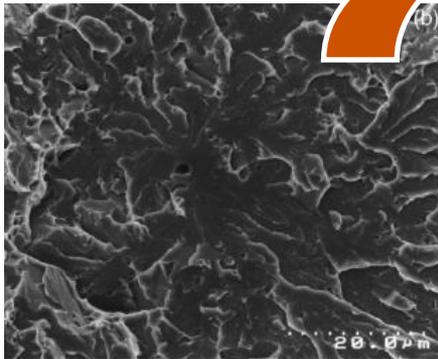
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Trincas e Defeitos nos Materiais

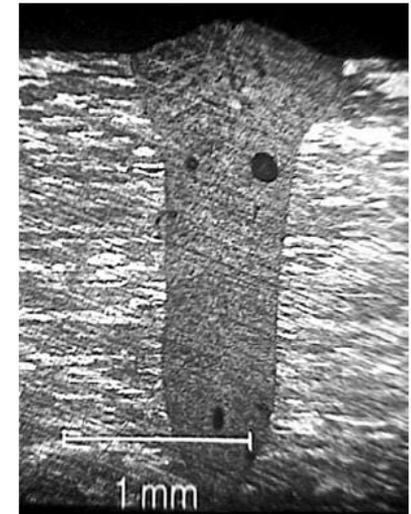
Comportamento em Presença de Trincas e Defeitos:

- Enfraquecimento do componente, podendo levar à falha por ruptura frágil
- Materiais contêm defeitos que devem ser tratados como trincas:
 - *Inclusões em Forjados e Fundidos*
 - *Poros em Soldas*
 - *Riscos Superficiais Profundos*
 - *Delaminação*

*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



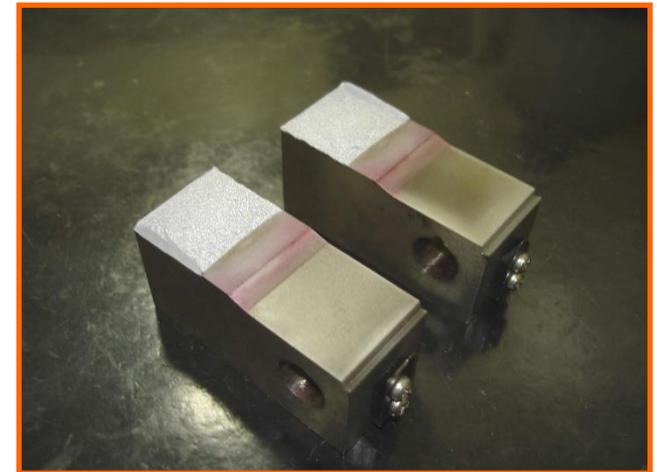
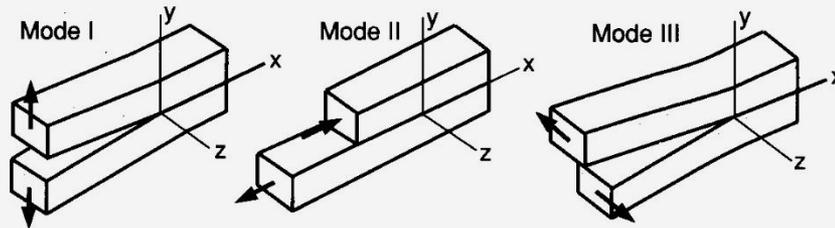
EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

Introdução à Mecânica da Fratura

Conceitos básicos

- A Mecânica da Fratura é empregada para avaliar a resistência de estruturas ou componentes contendo trincas ou defeitos.
- MFEL : As condições do material são predominantemente elásticas na fratura.
- Materiais de alta resistência mecânica tendem a apresentar baixa resistência residual em presença de trincas (fratura frágil, de baixa energia).

Os três modos básicos de sollicitação de uma trinca



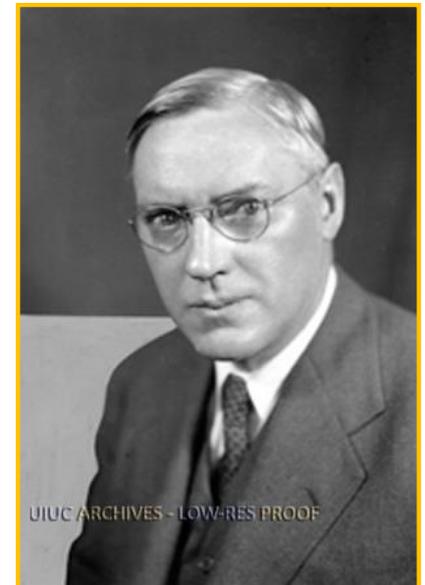
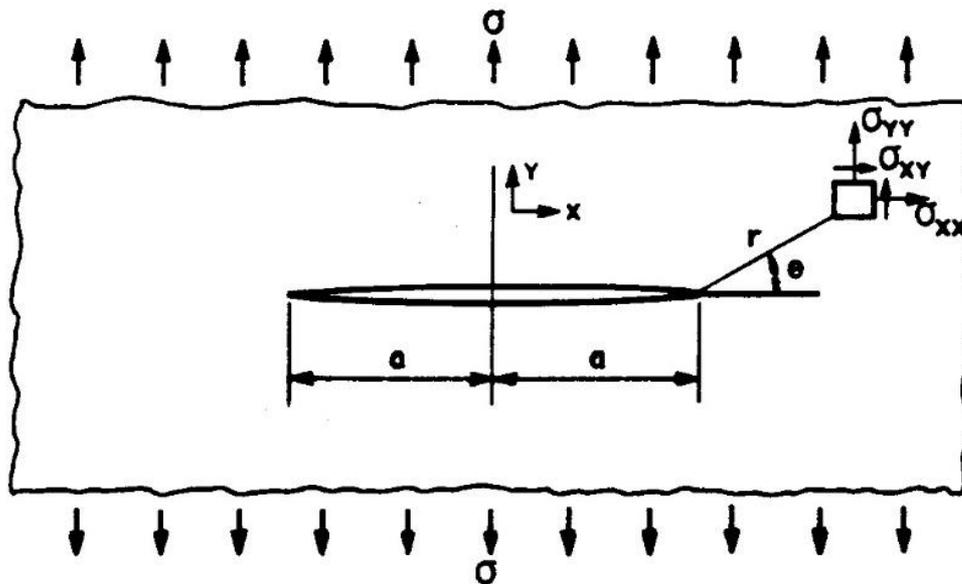
Corpo-de-prova após ensaio de Tenacidade à Fratura (ASTM E399)

Introdução à Mecânica da Fratura

Estado de Tensão próximo à Ponta da Trinca (Westergaard, 1939)

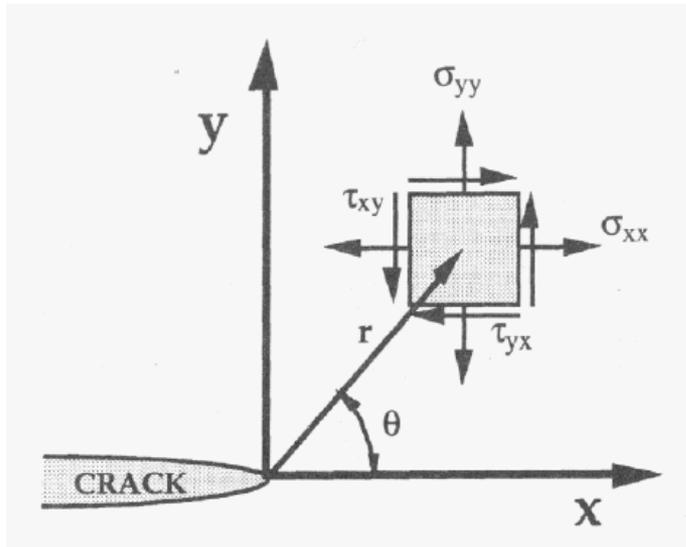
- Considerou uma placa infinita contendo uma trinca de comprimento $2a$.
- Introduziu um tipo específico de função-tensão complexa.
- Resolveu o Campo de Tensões Elásticas na ponta da trinca.

Harold M. Westergaard (1888 – 1950)



Introdução à Mecânica da Fratura

Estado de tensão na vizinhança da trinca em modo I

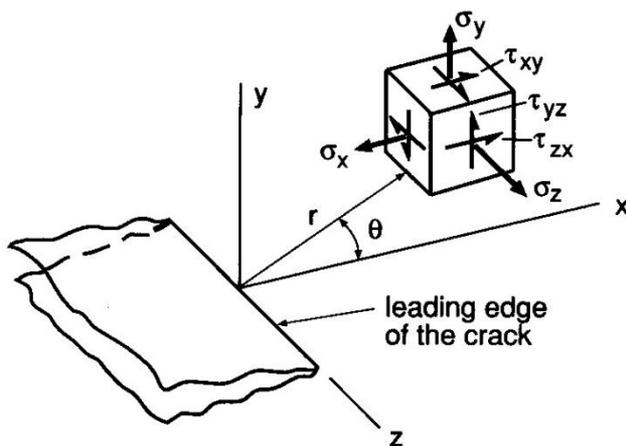


- Resultado do desenvolvimento analítico

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

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

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



Sob predominância de deformação plana, tem-se ainda:

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



Introdução à Mecânica da Fratura

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.

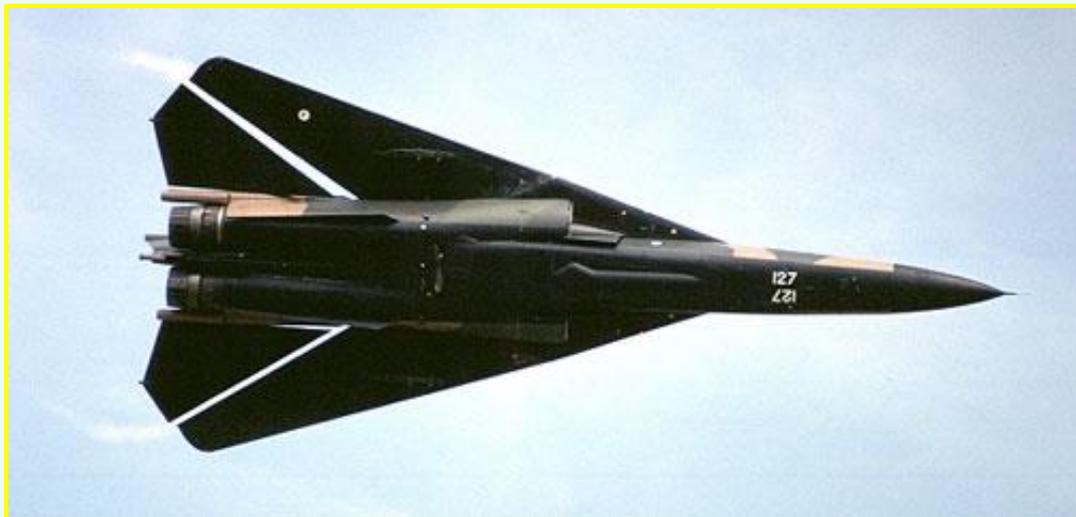
*Verifica-se a **existência de um valor crítico** K_c deste Fator, para o qual ocorre a propagação instável da trinca. Este valor crítico depende do material e do estado de tensão.*



O Caso do F-111

Um Projeto Problemático

- 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

Um Projeto Problemático

- 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 voo.
- 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.



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”.



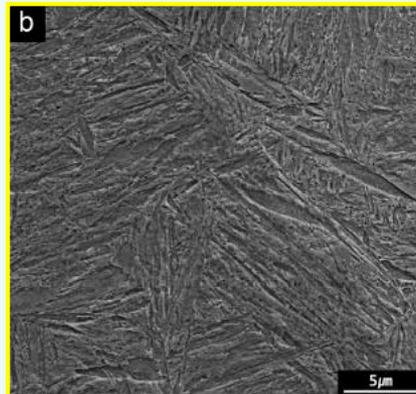
O Caso do F-111

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)



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

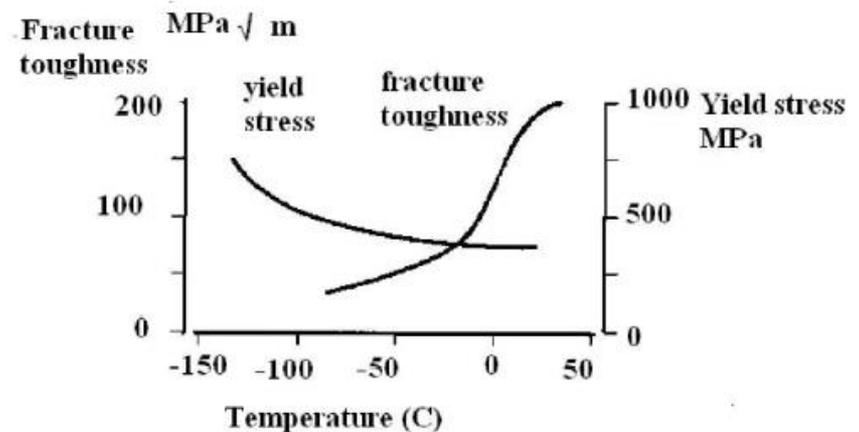
O Caso do F-111

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”.



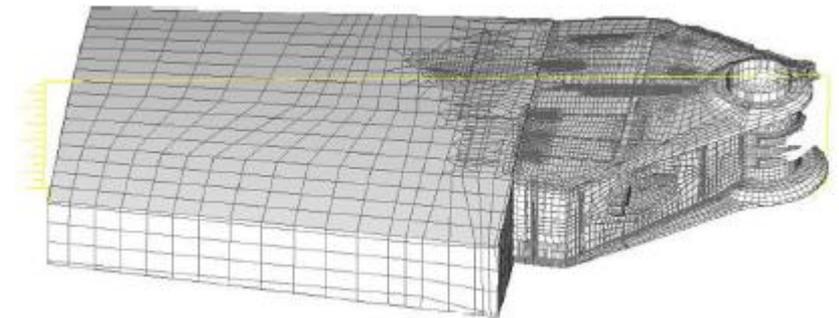
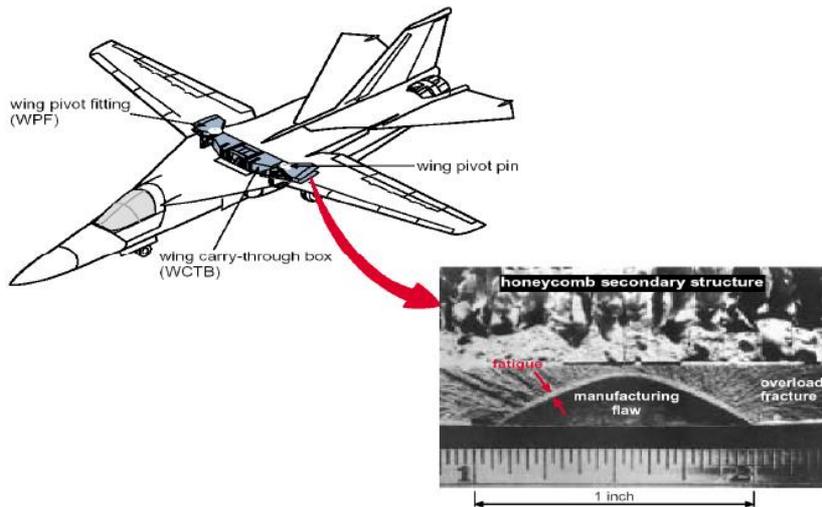
O F-111 foi o único avião na história que dependeu do “Cold Proof Test” para a sua operação segura.



O Caso do F-111

Tolerância ao Dano

- 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.



Exemplo de Análise de Falha: Serpentina de um Tanque de Armazenamento

Dados do Equipamento

- Tanque de armazenamento com serpentina de aquecimento.
- Componente falhado: tubo de diâmetro 3 polegadas da serpentina.
- Temperatura de operação: Interna à serpentina = 154°C , Externa = 55°C.
- Pressão de operação da serpentina: 0,44 MPa (4,5 kgf/cm²).
- Fluido: Interno = Vapor , Externo à serpentina = Emulsão (água + óleo + sal + gás).
- Contaminantes: 50 ppm de cloretos na emulsão.
- Material especificado do tubo: Aço inoxidável 316L.
- Tempo de operação: 5 anos.

(Referência: Pelliccione et al, Análise de Falhas em Equipamentos de Processo, Editora Interciência)



Exemplo de serpentina para tanque

Serpentina: Dispositivo muito usado em indústrias química, siderúrgica, alimentícia etc. Pode ter várias funções, sendo eficiente como aquecedor ou resfriador. A serpentina para tanques é muito usada para o controle de temperatura em tanques de armazenamento. Também usadas em navios, onde a temperatura da carga deve ser controlada.



Exemplo de Análise de Falha: Serpentina de um Tanque de Armazenamento

Serpentina: Esse dispositivo pode ser fabricado com diversos materiais, dependendo dos parâmetros de processos e dos fluidos responsáveis pela troca térmica. Os materiais mais utilizados em serpentinas para tanques são aços-carbono, aços inoxidáveis, cobre e alumínio, mas também podem ser utilizados outros tipos de materiais de acordo com a necessidade de cada processo. Quanto à forma construtiva desse tipo de equipamento, geralmente adota-se configurações espirais planas ou helicoidais, contendo tubos lisos ou aletados.



Exemplos de serpentinas para tanques



Exemplo de Análise de Falha: Serpentina de um Tanque de Armazenamento

Histórico da Falha e Inspeção Visual

- Durante a operação de separação de água e óleo de uma emulsão, o tubo da serpentina de aquecimento do tanque falhou. O trecho trincado do tubo da serpentina foi removido e encaminhado para análise do mecanismo de falha.
- Na inspeção visual, observou-se uma fratura longitudinal de aspecto frágil. Em outra região do tubo, constatou-se a presença de trincas ramificadas propagadas pela margem da solda.

(Referência: Pelliccione et al, Análise de Falhas em Equipamentos de Processo, Editora Interciência)

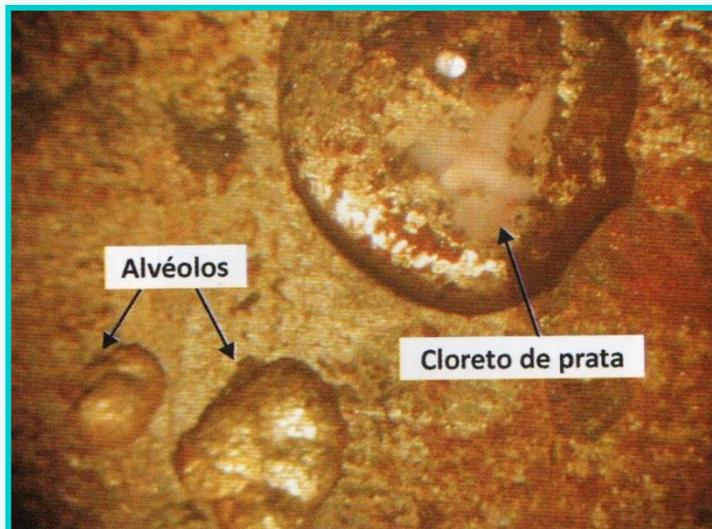


Inspeção visual do tubo falhado

Exemplo de Análise de Falha: Serpentina de um Tanque de Armazenamento

Identificação do Material e Ensaio Químico para detecção de cloreto

- Realizada análise de composição química por meio de espectrometria de raios X, o material do tubo foi identificado como aço inoxidável austenítico AISI 316.
- O tubo não apresentou indício de corrosão na superfície interna, mas apresentou corrosão puntiforme na superfície externa.
- Realizou-se ensaio químico qualitativo com adição de AgNO_3 (nitrato de prata) na superfície do tubo. Neste ensaio, os cloretos existentes na superfície de interesse reagem com o nitrato de prata, tendo como produto de reação um precipitado de cor branca característica (cloreto de prata). O ensaio evidenciou a presença de cloretos na superfície externa do tubo falhado.



Superfície externa do tubo falhado, observando-se alvéolos e cloretos



EEL-USP
Escola de Engenharia de Lorena

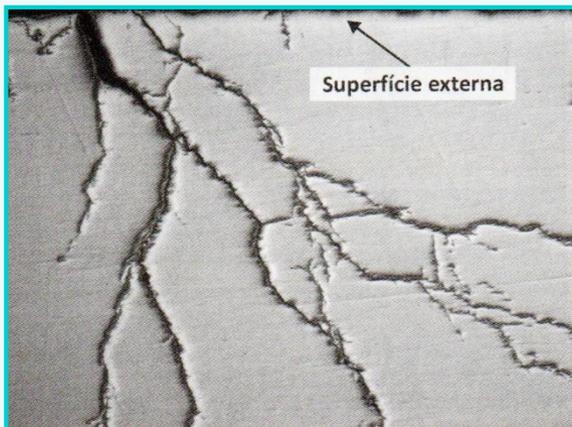
Exemplo de Análise de Falha: Serpentina de um Tanque de Armazenamento

Análise Metalográfica

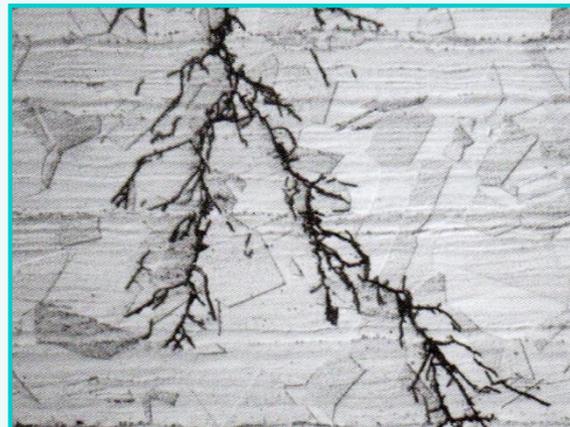
- Realizada análise metalográfica após corte do tubo com retirada de amostras para observação da seção transversal. Observaram-se trincas ramificadas que nuclearam na superfície externa, características de corrosão sob tensão.

Conclusões

- Composição química do material do tubo em conformidade com o projeto.
- O componente apresentou corrosão puntiforme e corrosão sob tensão a partir da superfície externa. O fluido em contato possuía água e cloretos, sendo o eletrólito responsável pela corrosão.
- A falha do tubo foi devida às trincas causadas por corrosão sob tensão.
- Causa raiz: o material especificado para o tubo não era adequado ao serviço.



Sem ataque, aumento 260 ×



Ataque com ácido oxálico, aumento 260 ×

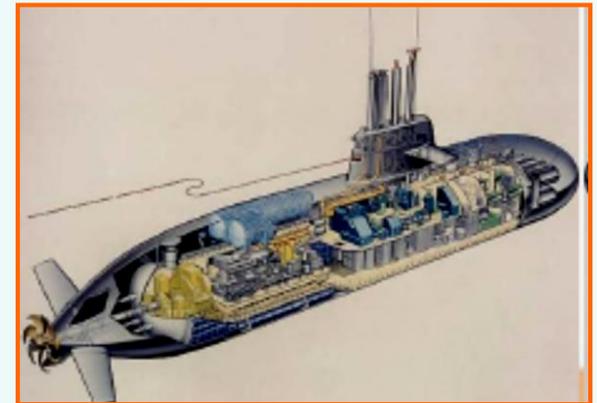
Fotos da seção transversal do tubo, apresentando trincas ramificadas transgranulares



Prevenção de Falhas

Exemplo: seleção de material para tubulações e vasos de pressão com base em critérios da Mecânica da Fratura

Vaso de Pressão: “Designa genericamente os recipientes estanques, de qualquer tipo, dimensões, formato ou finalidade, capazes de conter um fluido pressurizado. Dentro dessa definição abrangente inclui-se uma enorme variedade de equipamentos, desde os mais simples como uma panela de pressão de cozinha, até os mais sofisticados reatores nucleares” (*Pedro C. Silva Telles*).

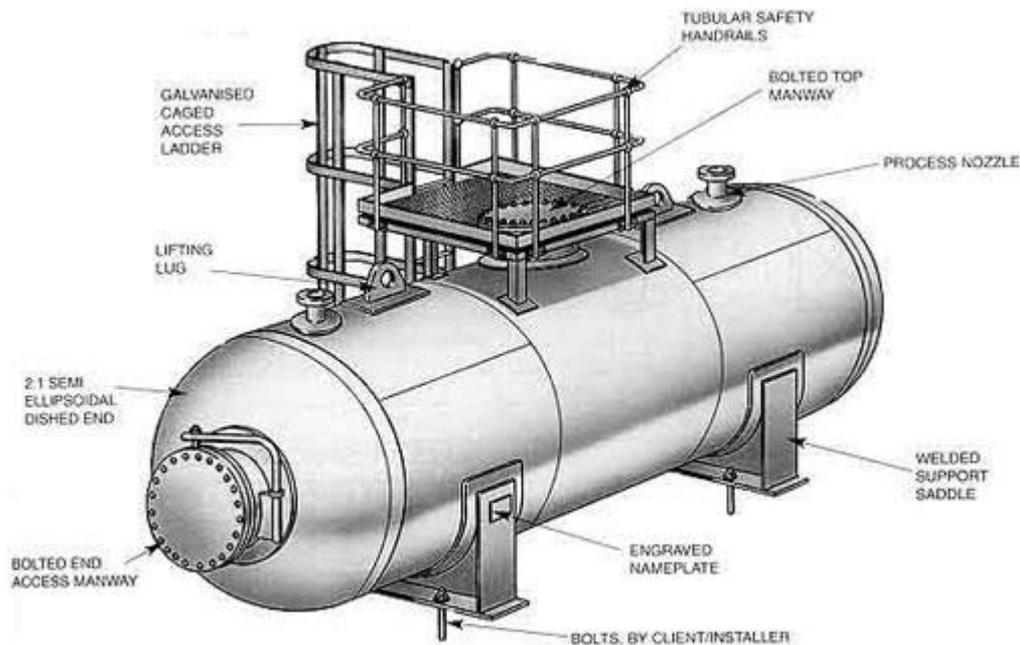


Prevenção de Falhas

Definição da NR-13: Vasos de pressão são equipamentos que contêm fluidos sob pressão interna ou externa, diferente da atmosférica.

Em fins do século XIX e início do XX, com o aumento da mecanização e industrialização, ocorreram inúmeros acidentes e explosões de caldeiras e vasos de pressão.

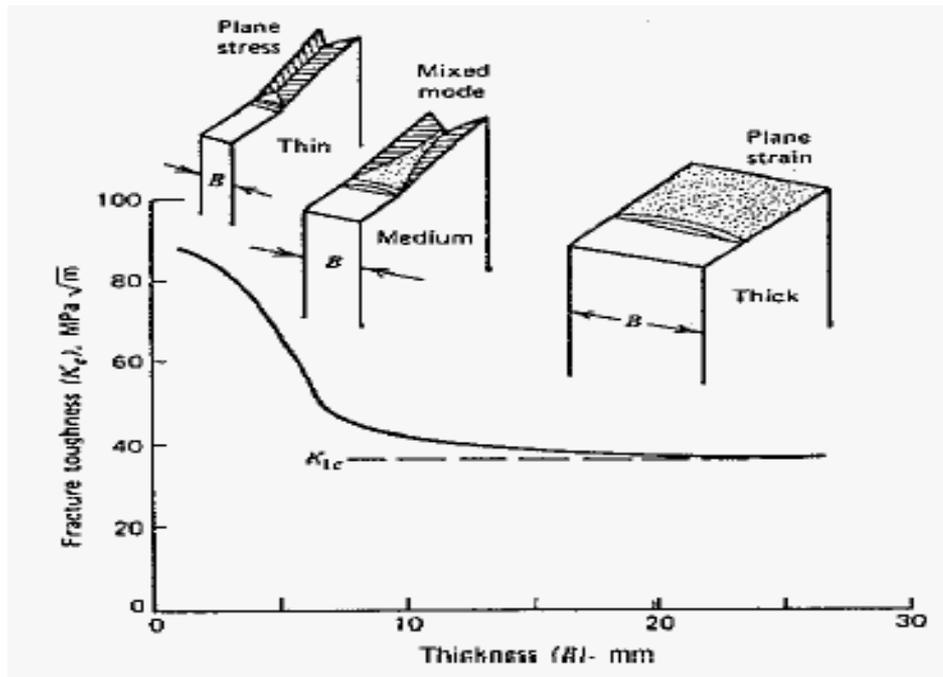
A ASME gerou um código para o projeto, fabricação, inspeção e testes de equipamentos, incluindo caldeiras e vasos de pressão (ASME VIII div. I). No Brasil a ABNT NBR 16528 define requisitos para vasos de pressão.



Tenacidade à Fratura

Nos metais, o material à frente da trinca deforma-se plasticamente, mantendo as tensões finitas. 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 depende do estado de tensão na ponta da trinca. Observa-se que K_c varia com a espessura da amostra, diminuindo assintoticamente à medida que a deformação plana predomina.



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

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

Material selection

Design stress

Allowable flaw size or NDT flaw detection



Tenacidade à Fratura

Table 8.1 Fracture Toughness and Corresponding Tensile Properties for Representative Metals at Room Temperature

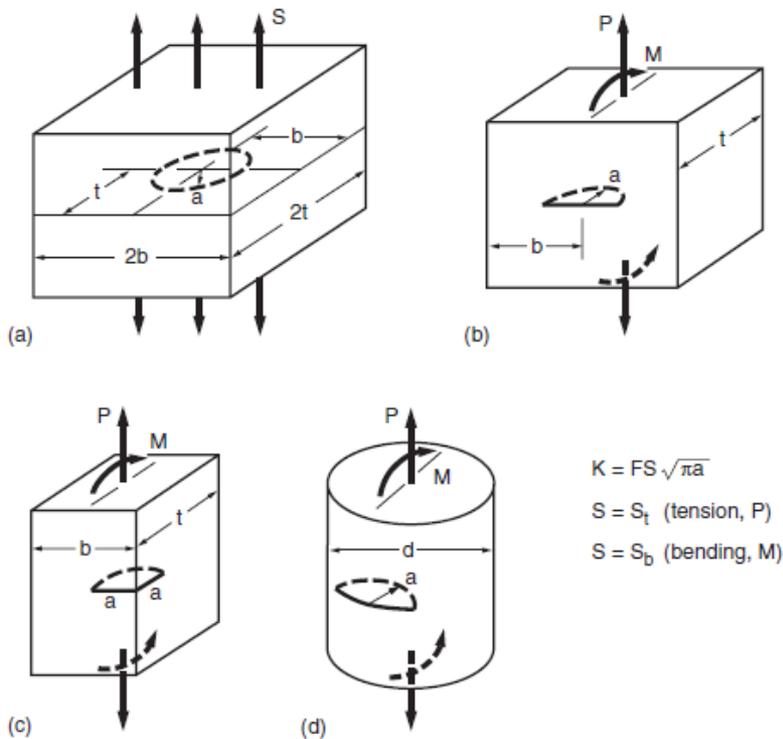
Material	Toughness K_{Ic}	Yield σ_o	Ultimate σ_u	Elong. $100\epsilon_f$	Red. Area $\%RA$
	MPa \sqrt{m} (ksi \sqrt{in})	MPa (ksi)	MPa (ksi)	%	%
<i>(a) Steels</i>					
AISI 1144	66 (60)	540 (78)	840 (122)	5	7
ASTM A470-8 (Cr-Mo-V)	60 (55)	620 (90)	780 (113)	17	45
ASTM A517-F	187 (170)	760 (110)	830 (121)	20	66
AISI 4130	110 (100)	1090 (158)	1150 (167)	14	49
18-Ni maraging air melted	123 (112)	1310 (190)	1350 (196)	12	54
18-Ni maraging vacuum melted	176 (160)	1290 (187)	1345 (195)	15	66
300-M 650°C temper	152 (138)	1070 (156)	1190 (172)	18	56
300-M 300°C temper	65 (59)	1740 (252)	2010 (291)	12	48



Ensaio para determinação da Tenacidade à Fratura de um aço



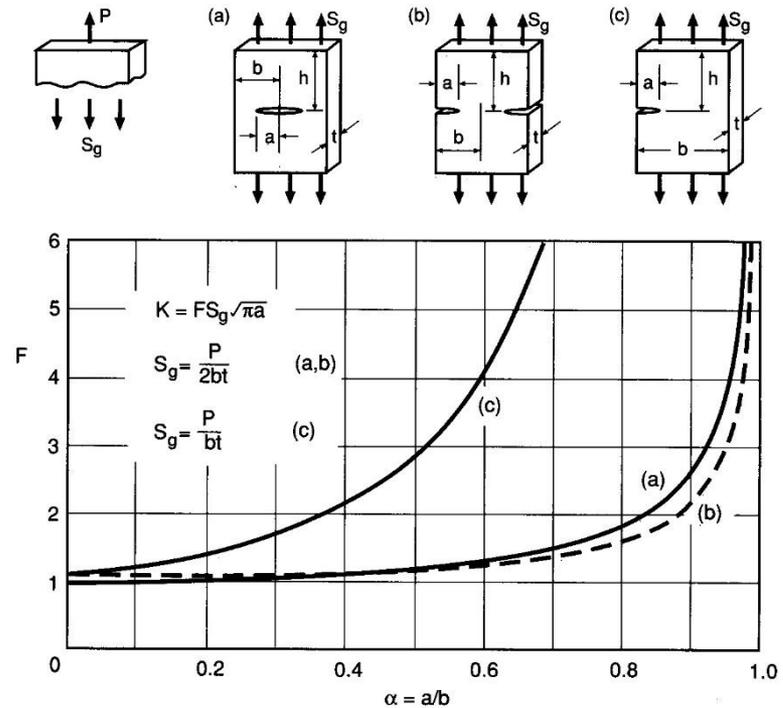
Aplicação em Projeto e Seleção de Materiais



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

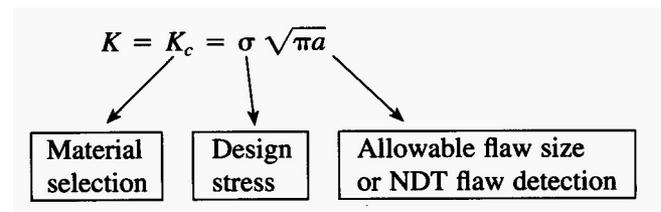
$$S = S_t \text{ (tension, } P)$$

$$S = S_b \text{ (bending, } M)$$



Case	S_t	S_b	F for small a	Limits for $\pm 10\%$ on F
(a)	$\frac{P}{4bt}$	—	$\frac{2}{\pi} = 0.637$	$\frac{a}{t}, \frac{a}{b} < 0.5$
(b)	$\frac{P}{2bt}$	$\frac{3M}{bt^2}$	0.728	$\frac{a}{t} < 0.4, \frac{a}{b} < 0.3$
(c)	$\frac{P}{bt}$	$\frac{6M}{bt^2}$	0.722	$\frac{a}{t} < 0.35, \frac{a}{b} < 0.2$
(d)	$\frac{4P}{\pi d^2}$	$\frac{32M}{\pi d^3}$	0.728	$\frac{a}{d} < 0.2$ or 0.35^1

Note: ¹Different limits for tension or bending, respectively.



Critério “leak-before-break” para vasos de pressão

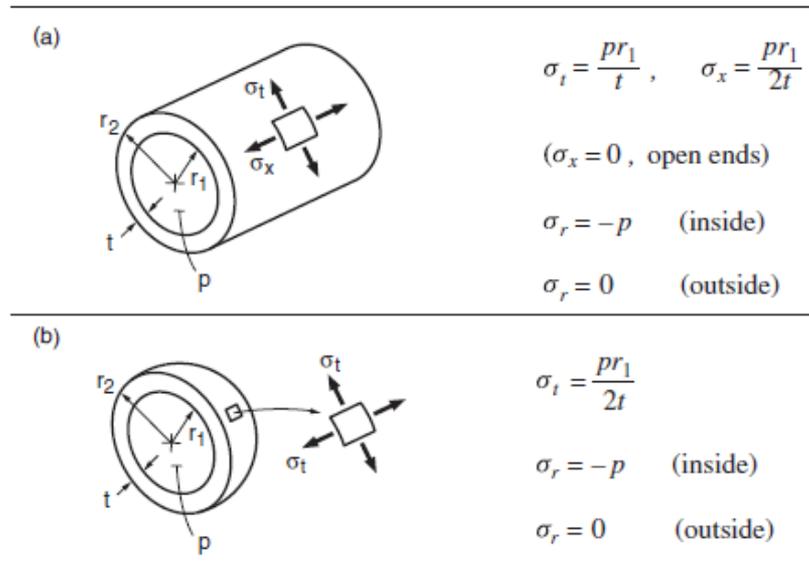


Figure A.7 Approximate stresses in thin-walled pressure vessels, (a) tubular and (b) spherical. For (a), the approximations are within 5% for $t/r_1 < 0.1$, and 10% for $t/r_1 < 0.2$. For (b), they are within 5% for $t/r_1 < 0.3$, and 10% for $t/r_1 < 0.45$.

Exemplo: Vaso de pressão de parede fina, cilíndrico ou esférico, trinca embutida de comprimento “ $2c$ ”.

A profundidade vale “ c ”.

Tendo o material (Kc) e a tensão, calcula-se o comprimento crítico:

$$c_c \geq t$$

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

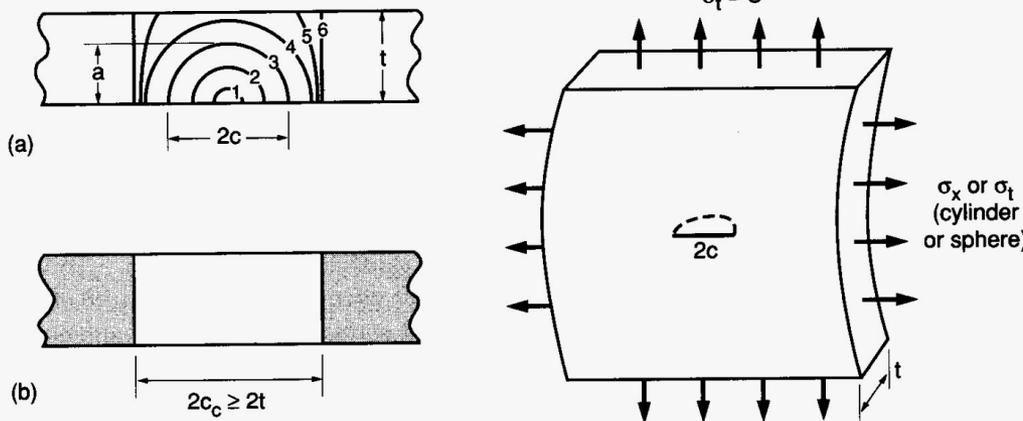
$$F = 1$$

$$c \approx a \quad c_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2$$

Trinca pode crescer de duas maneiras:

- Penetrar gradualmente a parede, causando um vazamento antes da ruptura brusca.
- Fratura frágil repentina (explosão) antes da ocorrência de um vazamento.

✓ No instante da fratura, temos $K = K_{Ic}$



Critério “leak-before-break” para vasos de pressão

Exemplo: Um vaso de pressão esférico de parede fina é feito com aço ASTM A517-F, operando à temperatura ambiente. A espessura da parede é 10 mm, o diâmetro interno é 1,5 m e a pressão de trabalho é 6 MPa.

Pede-se:

- Verifique se o critério *leak-before-break* é satisfeito neste equipamento.
- Determine o fator de segurança (relação entre K e K_c) contra a fratura frágil.

Formulário

$$K = FS\sqrt{\pi a}, \quad F = 1 \quad c \approx a$$

$$\sigma_t = \frac{pr_1}{2t} \quad c_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2 \quad c_c \geq t$$

Respostas

$$\sigma_t = \frac{pr_1}{2t} = \frac{(6 \text{ MPa})(750 \text{ mm})}{2(10 \text{ mm})} = 225 \text{ MPa} \quad c_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{187 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}}{225 \text{ MPa}} \right)^2 = 0.220 \text{ m} = 220 \text{ mm}$$

Portanto, o critério é satisfeito.

No instante da falha, a profundidade da trinca é igual à espessura, ou seja: $c = a = t$

$$K = FS\sqrt{\pi a} = 1(225 \text{ MPa})\sqrt{\pi(0.01 \text{ m})} = 39.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$X_K = \frac{K_{Ic}}{K} = \frac{187 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}}{39.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}} = 4.69$$



Prevenção de Falhas

Inspeção e Ensaios Não Destrutivos (vídeo)



FIM do Capítulo 6