



METMAT

Análise de falhas I

André Paulo Tschiptschin

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Escola Politécnica da USP



METMAT

Técnicas de análise de falha

- As falhas em serviço de peças e componentes de equipamentos podem ter um amplo espectro de causas e razões possíveis.
- Um grande número de fatores inter-relacionados deve ser entendido para que se possa determinar a causa da falha original (causa raiz).
- Quando se inicia uma análise de falha deve-se entrar no papel de Sherlock Holmes tentando resolver um caso desconcertante.





METMAT

Técnicas de análise de falha

- Como no papel de Sherlock Holmes deve-se examinar cuidadosamente todas as evidências disponíveis e construir uma hipótese (encontrar um suspeito) que possa ter cometido o crime.
- A melhor maneira de provar que uma hipótese de falha é verdadeira é repetir, em condições controladas (em laboratório) a seqüência de eventos que levaram à falha.
- Raramente isto é possível, o que faz com que fatores não controlados e não inteiramente compreendidos tenham um papel importante na causa da falha.

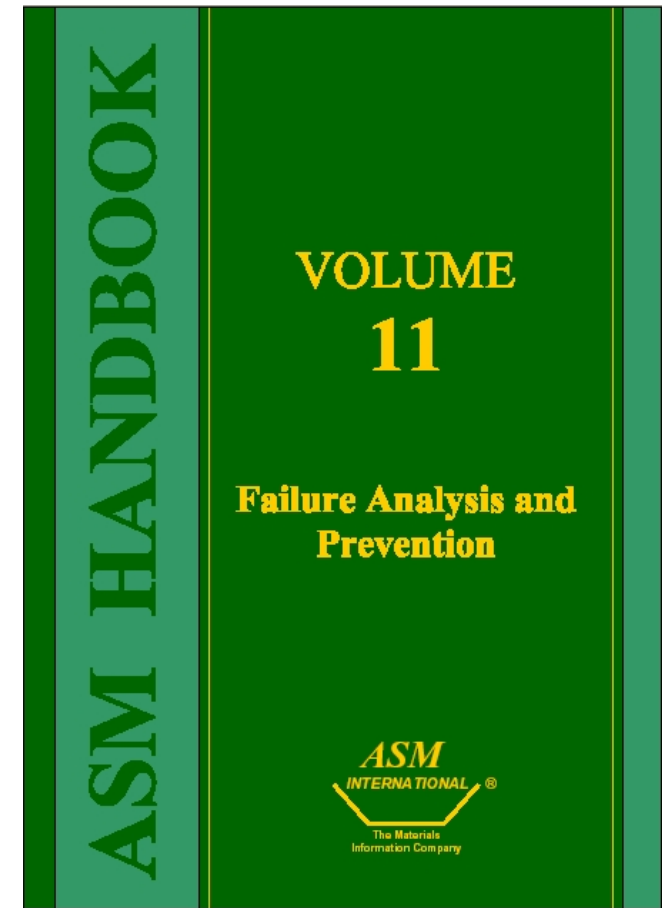




METMAT

Técnicas de análise de falhas

- Um guia básico dos procedimentos de análise de falhas pode ser encontrado no ASM Metals Handbook vol. 11, 9ª edição,
- Lá são discutidas e indicadas as várias etapas que devem ser seguidas em um procedimentos de análise de falha.





METMAT

Inicialmente não faça nada!

- O procedimento inicial entre os vários a serem adotados em uma investigação sobre a falha é NÃO FAZER NADA! Não se deve tomar nenhuma ação concreta a não ser olhar a peça fraturada, pensar e fazer perguntas detalhadas para quem esteve direta ou indiretamente envolvido com a falha.



- Os médicos em uma consulta adotam este procedimento denominado anamnese: dói aonde, quando começou, o que você comeu, já tinha sentido esta dor antes?



METMAT

Exames iniciais

- Qualquer ação mecânica do tipo cortar a peça, separar a metade fraturada, pode destruir evidências muito importantes sobre a causa raiz da falha.
- Como num caso de detetive não mexa na “cena do crime”, até que ela seja suficientemente compreendida, fotografada e analisada de forma não destrutiva.
- Podemos tirar fotos de vários ângulos, podemos gravar depoimentos, podemos solicitar desenhos da peça, especificações de material, memorial de cálculo do projeto mecânico, etc. sem que a “cena do crime tenha que ser destruída”.

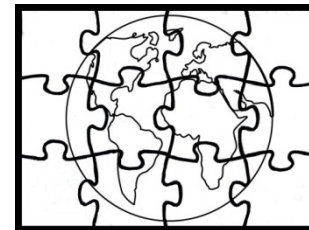




METMAT

Superfícies de fratura

- Ao separar uma lasca ou metade da peça fraturada procure não usar corte oxi-acetilênico, pois este procedimento altera a estrutura metalográfica do material.
- Não se deve esfregar a superfície de fratura, para limpá-la, pois este procedimento pode danificar as evidências do tipo de fratura ocorrido (e portanto referentes ao mecanismo envolvido e a causa raiz).
- Não tente encaixar as partes fraturadas! As pessoas têm uma compulsão a encaixar as partes fraturadas como se pudessem voltar ao estado anterior e recuperar a peça danificada. Se for necessário encaixar fazer cuidadosamente intercalando papel ou filme plástico para não danificar a superfície





METMAT

Superfícies de fratura

- Não tocar a superfície, inclusive com a mão, para não contaminá-la. Se a causa tiver contribuição de corrosão (corrosão sob tensão) a contaminação com suor ou respingo de saliva, pode mascarar a evidência.
- A tentativa de encaixar as metades fraturadas resulta da consciência que temos de que as duas metades são cópia uma da outra (em negativo). Possuem as mesmas evidências sobre as causas da fratura.
- Frequentemente em casos em que há disputa entre cliente e fornecedor, ou mesmo, uma ação conjunta de ambos, cada uma das partes fica com uma das metades da peça fraturada.
- Tomar cuidado na hora de decidir dividir as metades. No caso de dimples, estas podem ter orientação diferente (dimples ovalados) e esta evidência é **MUITO IMPORTANTE** na determinação do estado da tensão...
MODO DE CARREGAMENTO.



METMAT

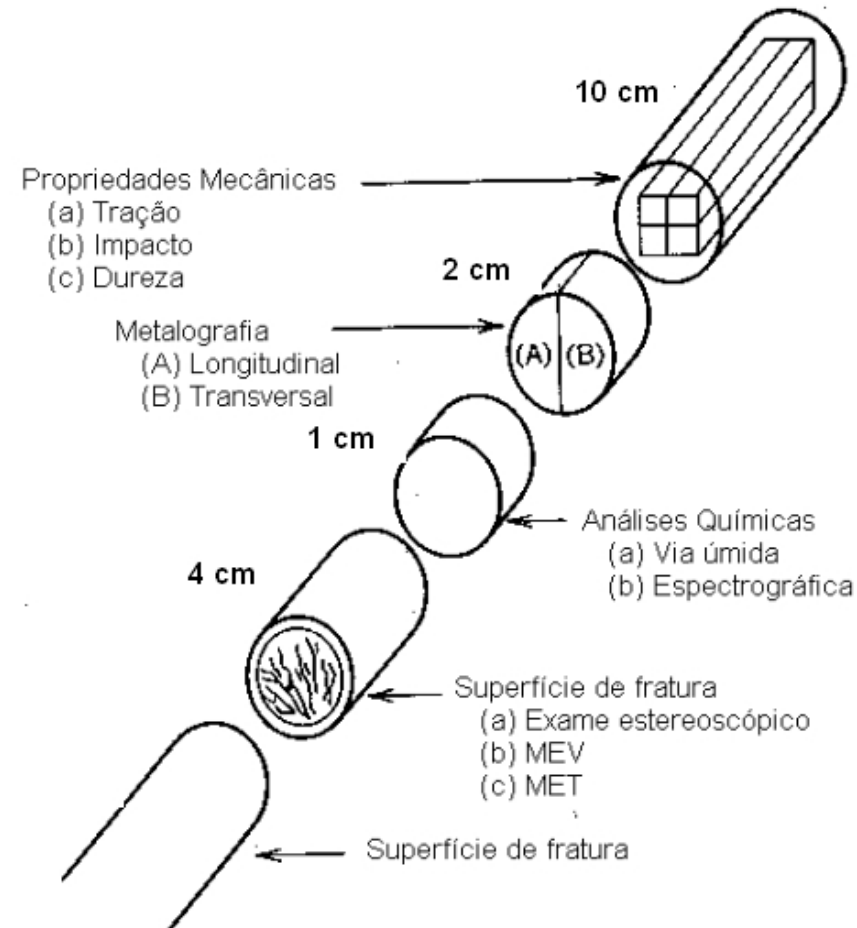
Seqüência de procedimentos

1. Coleta de dados e seleção de amostras.
2. Exame preliminar da peça fraturada (visual e fotográfico).
3. Ensaaios não destrutivos
4. Ensaaios mecânicos (incluindo dureza e tenacidade)
5. Seleção, preservação, identificação e limpeza das amostras
6. Exame macroscópico e documentação fotográfica (comparação com as características de uma peça não fraturada)
7. Análise metalográfica (microscopia óptica e microscopia eletrnica de varredura).



METMAT

Coleta de amostras





METMAT

Seqüência de procedimentos

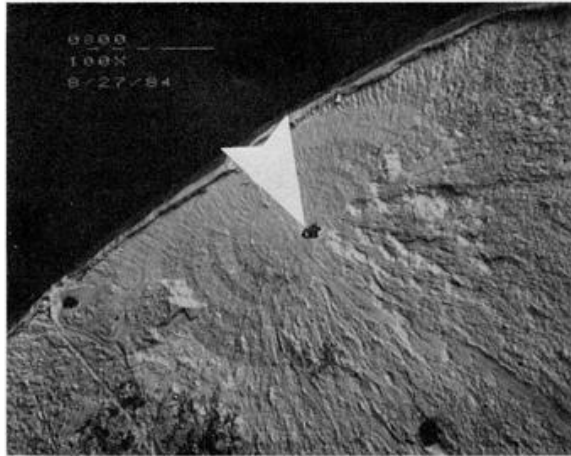
8. Análise fractográfica em lupa (estereoscópica) e em microscópio eletrônico de varredura.
9. Determinação do micro-mecanismo de falha.
10. Análise química (do material da amostra).
11. Microanálise química localizada de uma fase, uma inclusão não metálica ou de um produto de corrosão.
12. Análise do mecanismo de fratura
13. Ensaios em condições controladas de laboratório
14. Análise de todas as evidências disponíveis, formulação de conclusões, recomendações para sanar o problema e elaboração de relatório



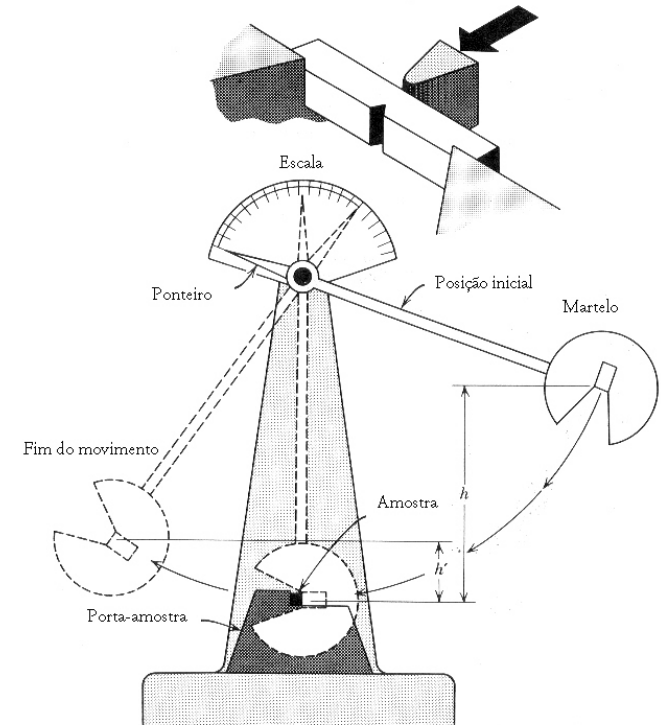
METMAT

Princípios a serem seguidos

- ✓ Localize a origem da fratura



- ✓ Procure não encaixar as partes fraturadas. Cuidado com a embalagem de peças que devem ser transportadas.
- ✓ Não realize nenhum teste destrutivo sem que tenha havido muita reflexão antes de fazê-lo





METMAT

Princípios a serem seguidos

- ✓ No caso de existirem várias fraturas de um mesmo tipo (micromecanismo) deve-se procurar se uma delas não é uma fratura por fadiga.
- ✓ Em caso positivo a fratura por fadiga é em geral a primária, sendo todas as outras consequência da primeira.
- ✓ Fadiga é responsável por uma boa parte de quebras de componentes de equipamentos na indústria.
- ✓ A menos que procedimentos específicos tenham sido tomados para prevenir a ocorrência de fadiga, nas etapas de projeto, fabricação e uso.



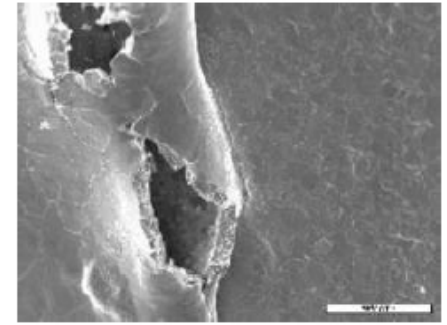
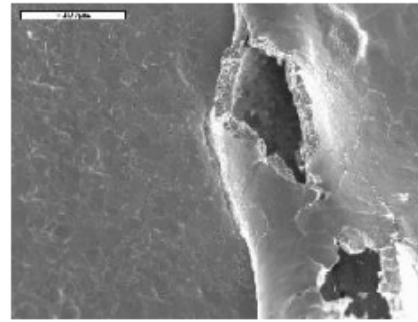
METMAT

Exame visual

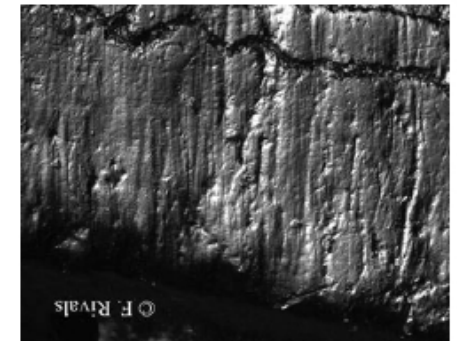
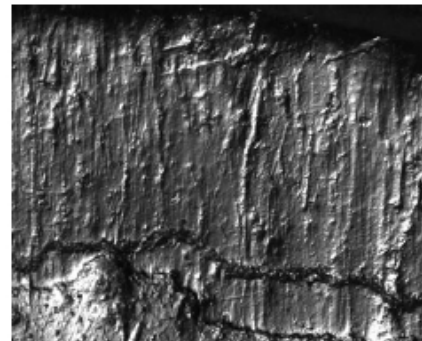
- O exame visual pode ser feito a olho nu ou utilizando uma lupa com aumentos entre 3 e 50 X no máximo.
- A iluminação tem papel fundamental na interpretação dos sinais encontrados na superfície de fratura.



Cuidado com a iluminação!!!



Blisters em liga de níquel



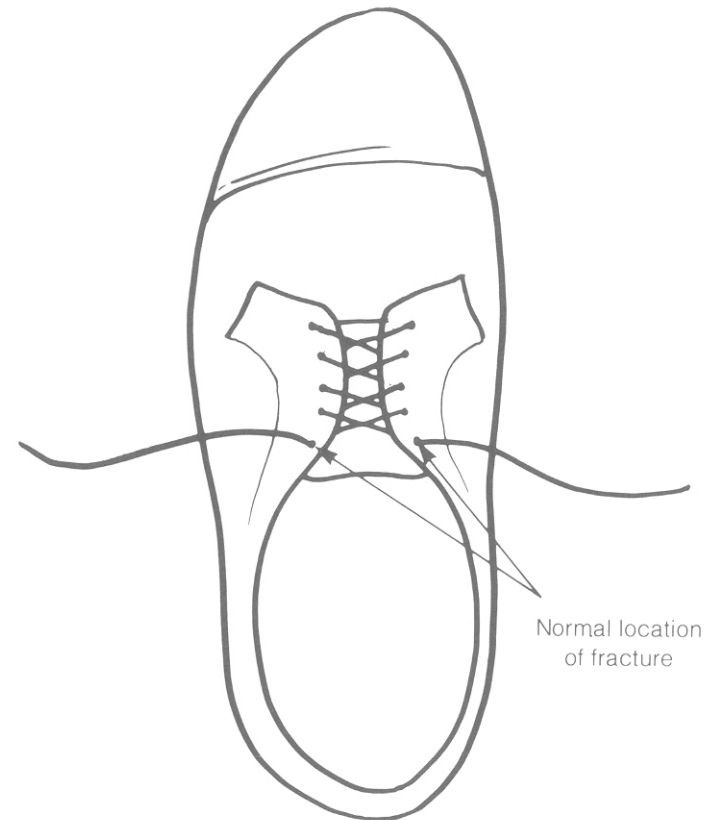
Microdesgaste no esmalte de um dente de cavalo.



METMAT

Localização da fratura

- ✓ O analista de falha deve saber em que lugar a fratura deve ser esperada.
- ✓ Qualquer desvio da posição normal deve ter sido causada por um ou mais fatores que têm que ser descobertos.
- ✓ Existem várias razões para que o cordão do sapato quebre sempre na região do último ilhós.

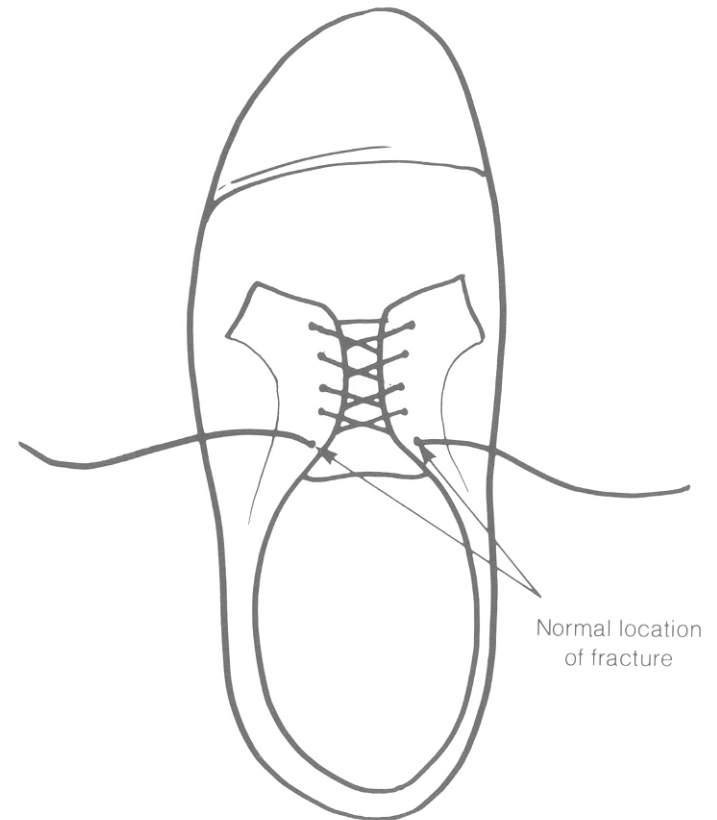




METMAT

Localização da fratura

- ✓ Quando o nó está apertado, o laço é puxado mais intensamente no último ilhós. A tensão é maior neste local.
- ✓ A maior parte do escorregamento do cordão ocorre em contato com o último ilhós. O ilhós metálico tende a desgastar as fibras do cordão e diminuir sua seção resistente.
- ✓ Como as propriedades mecânicas do cordão são homogêneas o cordão irá arrebentar na região de maior concentração de tensão e de menor seção transversal.



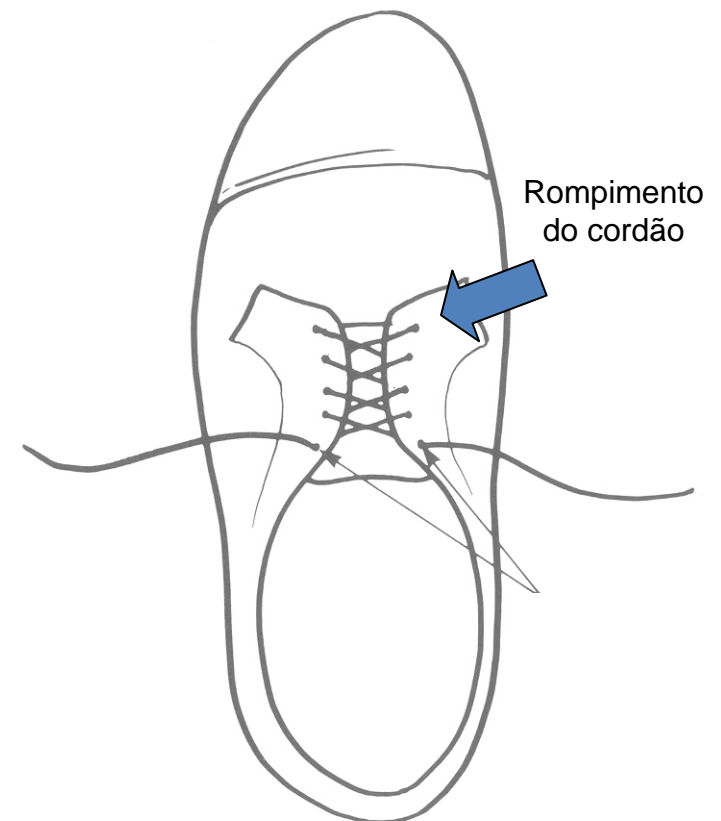
Normal location
of fracture



METMAT

Localização da fratura

- ✓ Se o cordão arrebentar no 1º ilhós, na região indicada pela seta azul, pode-se desconfiar que:
 - O cordão tenha propriedades mecânicas abaixo das especificadas;
 - O cordão tenha sido danificado por algum processo, p.e, queima por brasa de cigarro, tornando-o mais fraco na região.
- ✓ A situação aqui descrita é relativamente simples e fácil de ser entendida. Entretanto, peças metálicas com microestruturas heterogêneas, nas quais diferentes regiões podem ter sido submetidas a diferentes tratamentos térmicos ou termoquímicos, a análise torna-se mais complexa.





METMAT

Localização da fratura

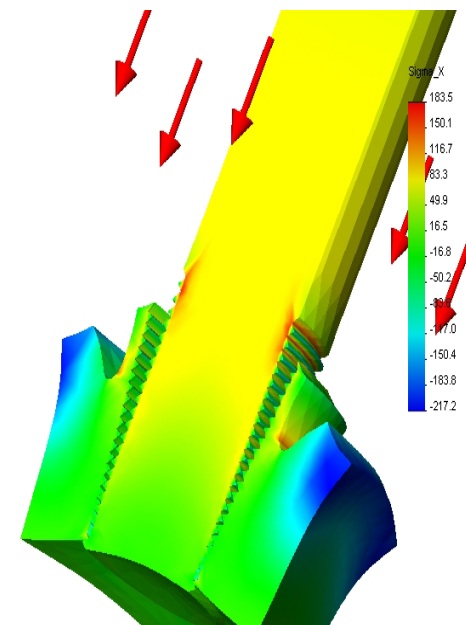
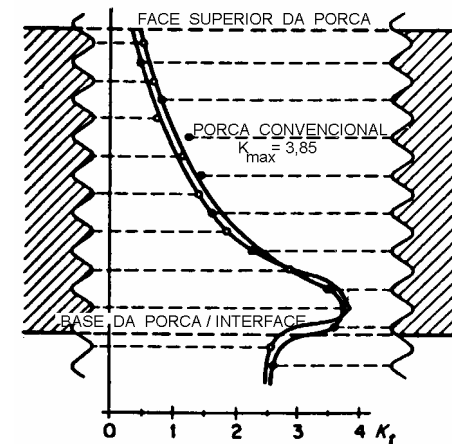
- ✓ Numa peça metálica a fratura irá ocorrer primeiro na região onde o campo de tensões excede a resistência mecânica do material.
- ✓ Em geral pode-se dizer que a fratura em peças metálicas é bem mais complicada do que se pode supor utilizando o raciocínio de que “uma corrente é tanto mais forte quanto seu elo mais fraco”.
- ✓ Muitas vezes a região de menor resistência de uma peça não fratura porque a tensão necessária para rompê-la ainda não foi atingida.
- ✓ Por outro lado uma região de alta resistência pode romper porque houve concentração ou intensificação de tensões no local.
- ✓ Tensão e deformação estão amarradas e devem sempre ser consideradas em conjunto.



METMAT

Localização da fratura

- ✓ A fratura ocorre normalmente nos locais de alta concentração de tensões, decorrente da geometria da peça: primeiro filete de rosca de um parafuso no interior de uma porca, rasgos de chaveta, raios de concordância muito pequenos, rugosidade, etc.).
- ✓ O complicador nestes casos é que por mais resistente que seja o material a intensificação de tensões devido a descontinuidades geométricas pode ser sempre superior, levando à fratura do componente.





METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

1. Sobre a superfície de fratura

✓ Qual foi o modo de fratura?

- A superfície de fratura conta a história da falha.
- Deve-se sempre associar estas informações com o histórico da utilização da peça
- Deve-se sempre examinar toda a superfície da peça e não somente uma pequena região. Lupa estereoscópica X MEV

✓ A origem da fratura está visível?

- O início da fratura ocorreu na superfície ou subsuperficialmente?
- O ponto de início da fratura depende das tensões relativas e do gradiente de tensões a que a peça está submetida.

✓ Qual a relação entre a direção de propagação da fratura e a direção esperada (normal) de propagação?

- A direção normal de propagação depende da direção das tensões que causaram a fratura.



METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

- ✓ Quantos pontos de início de fratura existem?
 - A resposta nos dá informações sobre a magnitude relativa das tensões em relação à resistência mecânica da peça.
- ✓ Há evidências de corrosão?
 - existindo evidências de corrosão é possível que peça já estivesse pré-trincada
- ✓ A aplicação das tensões foi unidirecional ou alternada?
 - Deve-se checar se a informação obtida do aspecto da fratura seja coerente com a informação sobre utilização da peça.



METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

2. Sobre a superfície da peça

- ✓ De que forma a peça entra em contato com seu par no conjunto mecânico?
 - O conhecimento e a caracterização das “marcas testemunho” do contato com outras peças que trabalham no conjunto trazem informações valiosas sobre o modo de carregamento das peças.
- ✓ Houve deformação plástica macroscópica da peça ou de sua superfície antes da fratura, durante serviço? Ou a deformação é resultante da fratura, tendo ocorrido depois da quebra?
- ✓ Existem evidências de marcas na superfície decorrentes de processos de fabricação, montagem, reparo ou utilização?



METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

3. Projeto e geometria

- ✓ Existe concentração de tensões devido a especificações de projeto?
 - (raios de concordância, rasgos de chaveta, furos de lubrificação, roscas, marcas de estampagem, etc.).
- ✓ O projeto objetivava a rigidez da peça ou tivesse flexibilidade de forma semelhante à uma mola?
- ✓ O projeto é coerente e consistente?
 - Algumas vezes o projetista não se dá conta de que no projeto há uma falha que não pode ser corrigida mesmo utilizando o melhor dos materiais (o material mais resistente).



METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

- ✓ Como a peça trabalha?
 - O funcionamento e a operação devem ser detalhadamente compreendidos.

- ✓ A geometria da peça está dimensionalmente correta?
 - Cheque a geometria e compare com o projeto.
 - Verifique se houve desgaste e a peça passou a trabalhar com folga.



METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

3. Manufatura e processamento

- ✓ Existem descontinuidades ou concentradores de tensão que possam ter causado o problema?
 - Todos os metais e ligas comerciais possuem descontinuidades microscópicas que são inevitáveis e podem ser inócuas em serviço.
 - Haveriam descontinuidades maiores que poderiam interferir no uso normal da peça (inclusões macroscópicas).
- ✓ No caso de um metal ou liga forjada, existem descontinuidades tais como inclusões, dobras, juntas soldadas, etc.?
- ✓ No caso de fundidos, existem descontinuidades tais como chupagem, gotas frias, porosidades, etc. particularmente próximas da superfície da peça?
 - Em geral estas descontinuidades situam-se em regiões mais centrais da peça, não submetidas a tensões elevadas.
 - As operações de usinagem podem, entretanto, trazê-las para regiões mais próximas da superfície.



METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

- ✓ A peça fraturada foi submetida a alguma operação de soldagem?
 - A fratura se propagou pelo cordão de solda ou pela ZTA (zona termicamente afetada)?
 - Qual a diferença de propriedades entre o metal base, o cordão de solda e a ZTA?

- ✓ A peça foi submetida a tratamento térmico ou termoquímico?
 - O tratamento térmico foi correto?
 - Erros de tratamentos térmicos são frequentemente causa de falhas em serviço.



METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

5. Sobre as propriedades do material

- ✓ As propriedades mecânicas do material estão dentro das especificações?
 - Caso as propriedades estejam dentro das especificações, será que as especificações são adequadas para a aplicação?
 - A propriedade mais fácil de ser medida é a dureza, através da qual é possível estimar o limite de resistência do material.

VPN	ROCKWELL SCALES															BRINELL		SCLERO-SCOPE	U.T.S.	
	DPH HV/10	A	B	C	D	E	F	G	H	K	15N	30N	45N	15T	30T	45T	BHN 500kg		BHN 3000kg	Kpsi
633	80		57	69						89	75	63					595	76	290	2000
613	79		56	68						88	74	62					577	75	282	1944
595	79	120	55	67						88	73	61					560	74	274	1889
577	78	120	54	66						87	72	60					543	72	266	1834

- Outros ensaios mecânicos são destrutivos e a decisão de realizá-los é muito mais delicada



METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

- ✓ As propriedades físicas do metal ou da liga são adequadas?
 - Densidade, coeficiente de expansão térmica, coeficiente de transmissão de calor, condutividade elétrica, etc.



METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

6. Relação entre Tensão Aplicada e Tensões Residuais

- ✓ As tensões residuais eventualmente existentes, antes da fratura, podem ter tido um efeito benéfico ou maléfico no desempenho de uma peça.
 - As tensões residuais são difíceis de medir, embora uma boa análise dos processos de fabricação de peças permita deduzir que tipo de tensões residuais estão presentes.
 - As tensões externas aplicadas são bem fáceis de medir e avaliar
 - Quando em serviço estas tensões são aditivas.



Perguntas a serem feitas sobre fraturas

7. Sobre peças que trabalham em contato ou vizinhas
- ✓ Qual a influência de peças adjacentes na falha?
 - É frequente a situação em que a peça fraturada não é a primária, vale dizer sua fratura se deu em consequência do mau funcionamento de algum outro componente do equipamento ou peça do conjunto.
 - ✓ Os parafusos estavam apertados?
 - Um parafuso solto causa sobrecarga em uma outra peça do conjunto. A causa primária da falha, neste caso, é o parafuso e a peça adjacente falhou secundariamente.



Perguntas a serem feitas sobre fraturas

8. Sobre o conjunto

- ✓ Existem evidências de desalinhamento que possam ter tido efeito sobre a fratura?
- ✓ Existem evidências de usinagem mal feita, conformação em desacordo com o projeto ou acúmulo de tolerâncias dimensionais, que possam ter causado interferência ou tensões anormais na peça?
- ✓ Houve deformação elástica excessiva do conjunto, de modo a fazer com que o contato entre superfícies conformes deixem de acontecer?
 - A falta do contato entre superfícies conformes previsto no projeto causa concentração de tensões e falha do componente.



METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

9. Severidade de uso

- ✓ Esta é uma área de difícil obtenção de informações confiáveis porque estão envolvidas pessoas, que em uma organização podem ficar intrinsecamente na defesa.
- ✓ Entretanto, é de extrema importância recuperar informações sobre o modus operandi do equipamento, no decorrer de seu uso e no momento em que ocorreu a falha.
 - Foi detectada vibração no equipamento? Alguém escutou barulhos antes da quebra? Saiu fumaça? Houve aquecimento?



METMAT

Perguntas a serem feitas sobre fraturas

- ✓ Existem evidências de que o equipamento tenha sido operado em condições acima de sua capacidade? Tanto no que diz respeito à velocidade de operação quanto à carga máxima suportada?
- ✓ Existem evidências de que tenha havido abuso no uso do equipamento? Por exemplo utilização da tampa do forno elétrico na aciaria para “empurrar” a carga de sucata que extravasa a altura máxima permitida.
- ✓ A manutenção é feita regularmente? São feitas as checagens de lubrificação, refrigeração, ventilação, vibração, etc.? São utilizados lubrificantes corretos?
- ✓ O equipamento é um forte candidato ao sucateamento?



Perguntas a serem feitas sobre fraturas

10. Reações com o meio ambiente

- ✓ Que reações podem ter ocorrido com a peça durante sua história?
 - Corrosão, exposição a hidrogênio, corrosão sob tensão, etc.
- ✓ A que condições térmicas a peça foi submetida?
 - Exposição de pequenas áreas a arco elétrico, dano por retífica, desgaste adesivo, eletro-erosão, etc., aquecimento intenso e localizado podem causar fratura rágil do componente nestas regiões.



METMAT

Formulação de hipóteses

- ✓ Após obter respostas para um grande número de perguntas feitas sobre a fratura do material deve-se formular hipóteses (uma ou mais de uma) sobre a seqüência de eventos ocorridos antes e até o momento da falha.
- ✓ As análises laboratoriais podem ou não confirmar as hipóteses levantadas. Muitas vezes não se consegue decidir entre duas hipótese mais prováveis e deve-se trabalhar com as duas possibilidades.
- ✓ As recomendações para procedimentos futuros constituem a base da engenharia de fabricação de componentes e a base da engenharia de processo , para que as falhas apontadas não se repitam.

ERRAR UM VEZ É HUMANO! ERRAR DUAS VEZES É BURRICE!



METMAT

Falhas por distorção

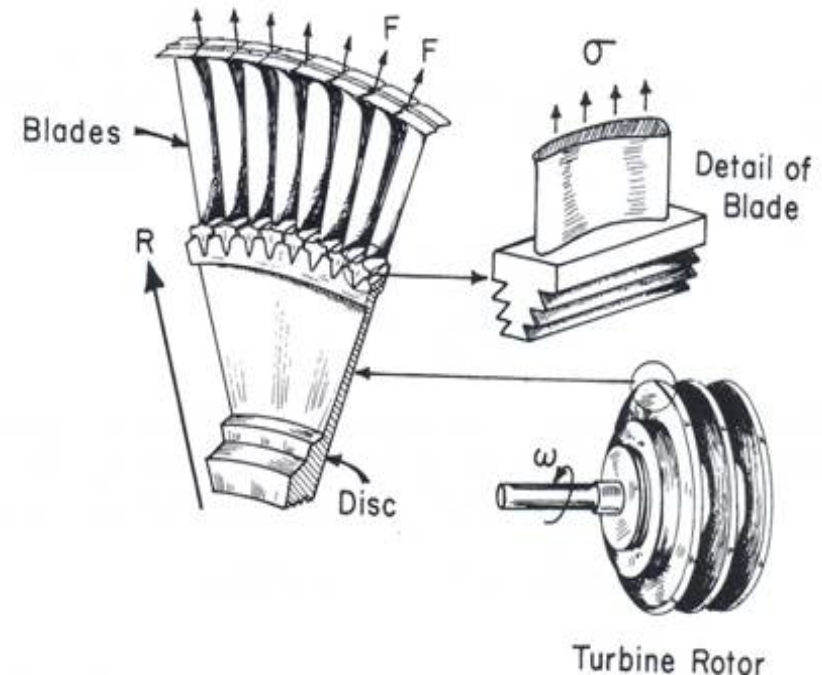
- ✓ As falhas são decorrentes da incapacidade de componentes ou equipamentos desempenharem a função para a qual foram projetados.
- ✓ Frequentemente as falhas são associadas à fratura, corrosão e desgaste.
- ✓ As falhas podem ocorrer em peças que tenham sofrido distorção ou variação dimensional, o que as tornam inadequadas para desempenhar seu papel no conjunto mecânico.
- ✓ As falhas por distorção podem constituir falhas primárias que trazem como consequência a ruptura catastrófica de outros componentes de máquinas e equipamentos.



METMAT

Distorções temporárias

- ✓ As distorções temporárias são flutuantes. Correspondem a deformações elásticas que podem levar a um mau acoplamento entre diferentes peças do equipamento, que por fim falham por desgaste, pitting, fretting, etc.
- ✓ Dentes de engrenagens costumam falhar por mau acoplamento dos dentes decorrente de distorções temporárias.
- ✓ Pás de turbina acopladas a um rotor que giram em alta velocidade, em alta temperatura, sofrem deformação elástica e podem entrar em contato com a carcaça da turbina.



$$\uparrow T \Rightarrow \downarrow E \Rightarrow \uparrow \varepsilon$$

$$\uparrow \omega \Rightarrow \uparrow F \Rightarrow \uparrow \varepsilon$$

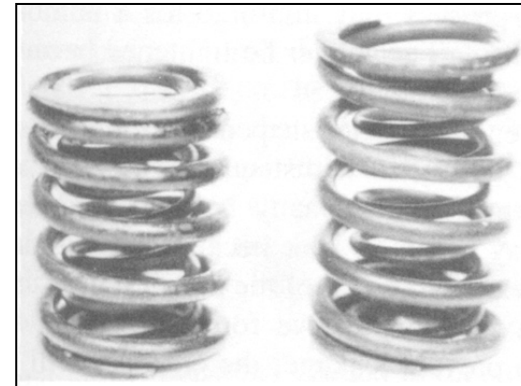


METMAT

Distorções permanentes

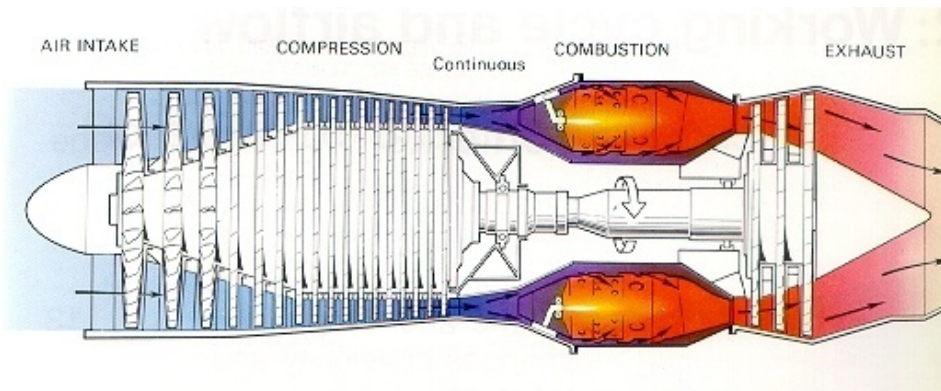
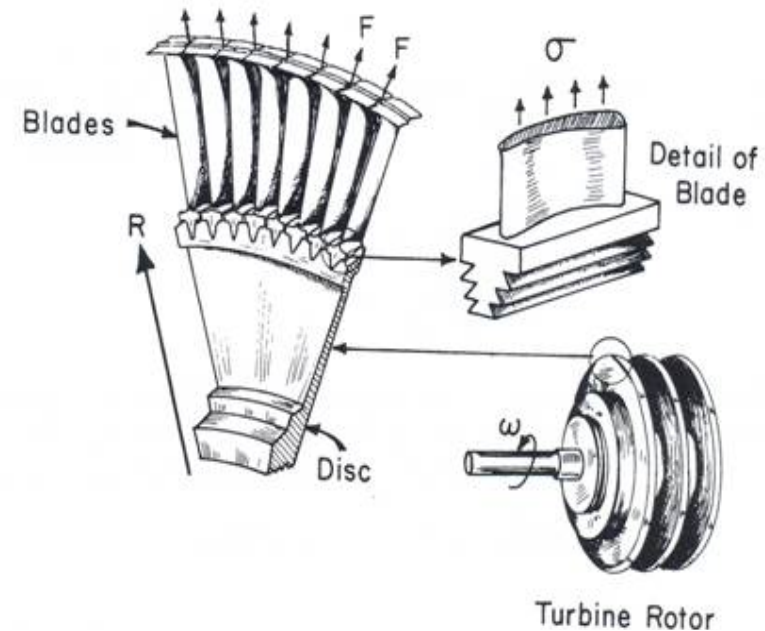
- ✓ As distorções permanentes ocorrem quando as tensões são maiores que o limite escoamento e ocorre deformação plástica do material.
- ✓ Molas podem “arriar” em serviço levando à perda da geometria inicial e à falha (sem fratura).
 - Foi sobrecarga?
 - As outras molas falharam?
 - LE diminuiu?
 - Houve exposição a temperatura?

$$\sigma > LE$$



Fluência

- ✓ Fluência pode ser definida como uma deformação plástica que ocorre ao longo do tempo sob carga constante.
- ✓ A fluência se manifesta após longos tempos de exposição do material a temperaturas elevadas.



$$\uparrow T \Rightarrow \uparrow d\varepsilon/dt$$

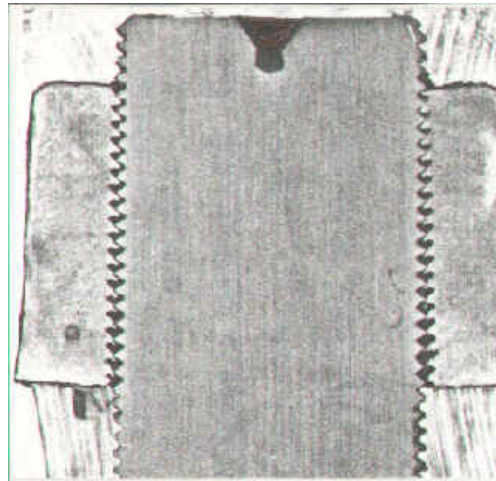
$$\uparrow \omega \Rightarrow \uparrow F \Rightarrow \uparrow \varepsilon$$



METMAT

Fluência

- ✓ Parafusos podem soltar por fluência quando expostos a temperaturas elevadas, por longos períodos, como no caso de parafusos de coletores de escape em motores de combustão interna.
- ✓ Parafusos poliméricos necessitam de reaperto freqüente pois sofrem fluência.

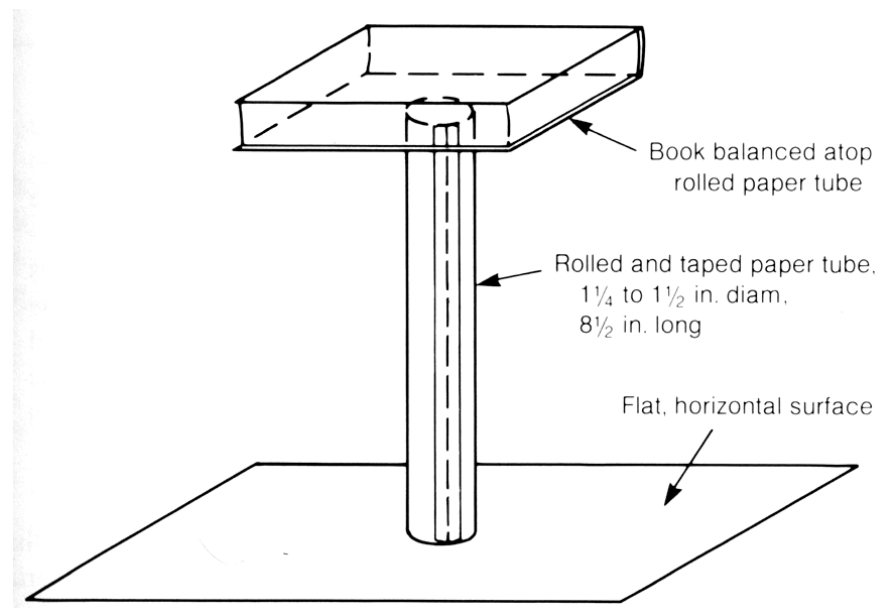




METMAT

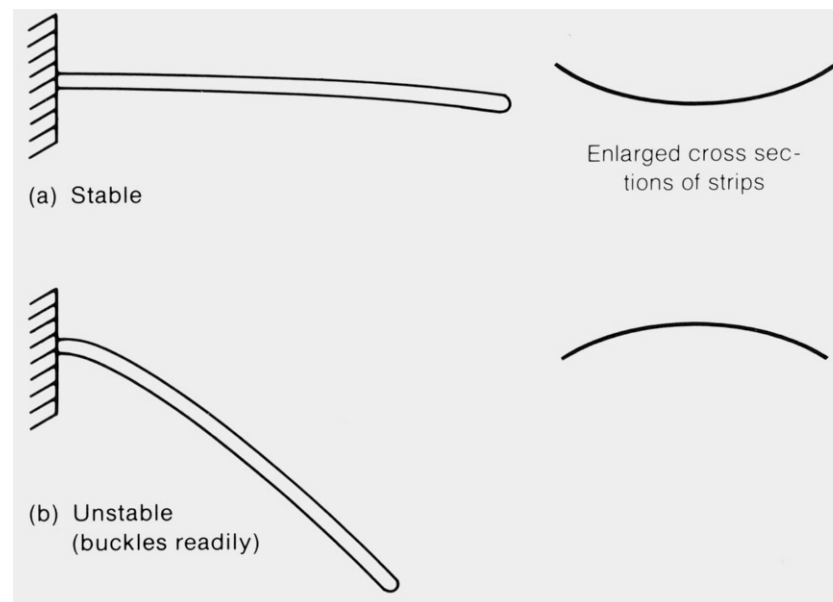
Empenamento

- ✓ Colapso de uma estrutura em consequência de instabilidade compressiva.
- ✓ Ocorre com maior frequência em perfis estruturais longos e esguios, comprimidos axialmente.



Empenamento

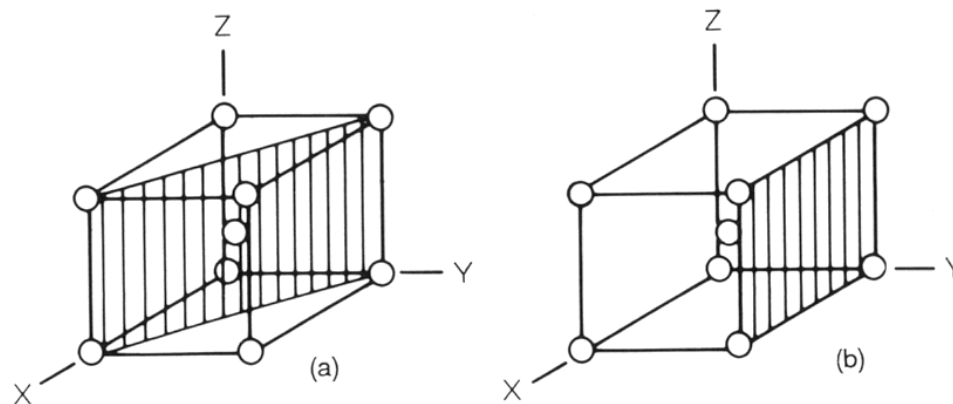
- ✓ Pode ocorrer também no lado comprimido de uma viga sujeita a esforços de flexão.



- Trenas de aço mola mantida horizontalmente como uma viga em balanço:
- (a) Com o lado côncavo na parte superior
 - (b) Com o lado convexo na parte superior

Modos de fratura (sob carregamento estático)

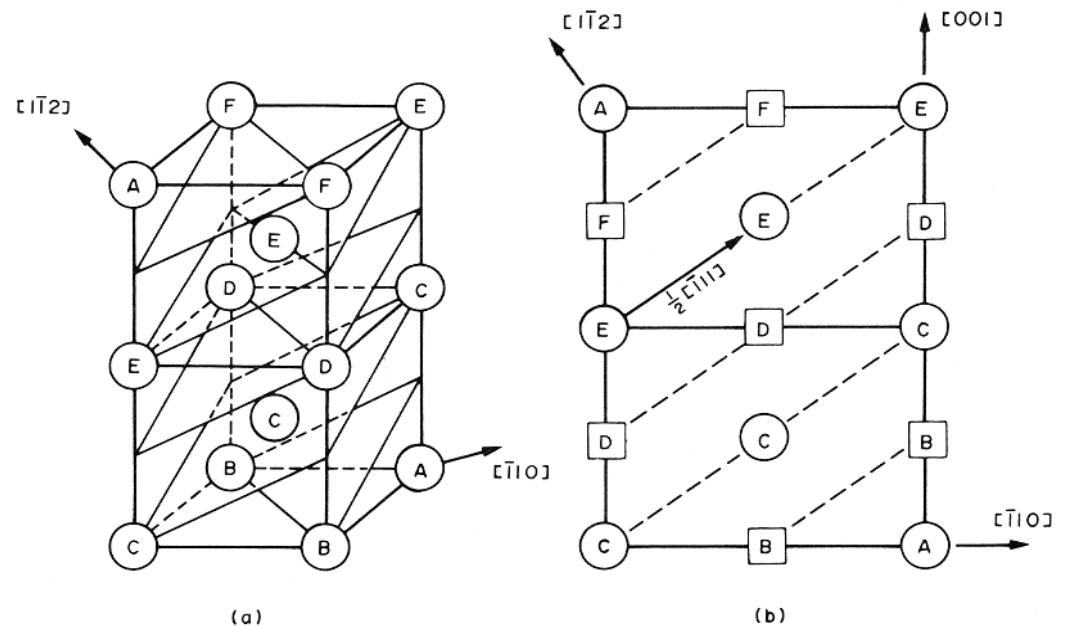
- ✓ Existem dois modos pelos quais um metal pode falhar sob cargas simples e monotônicas:
 - Por cisalhamento
 - Por clivagem
- ✓ A ocorrência destes mecanismos depende fundamentalmente da forma como o metal se comporta sob tensão.



Planos de cisalhamento (110) e clivagem (100) na estrutura CCC.

Cisalhamento

- ✓ A deformação (e fratura) por cisalhamento ocorre por escorregamento dos planos atômicos mais densos semelhante ao escorregamento de um empilhamento de cartas em um baralho.

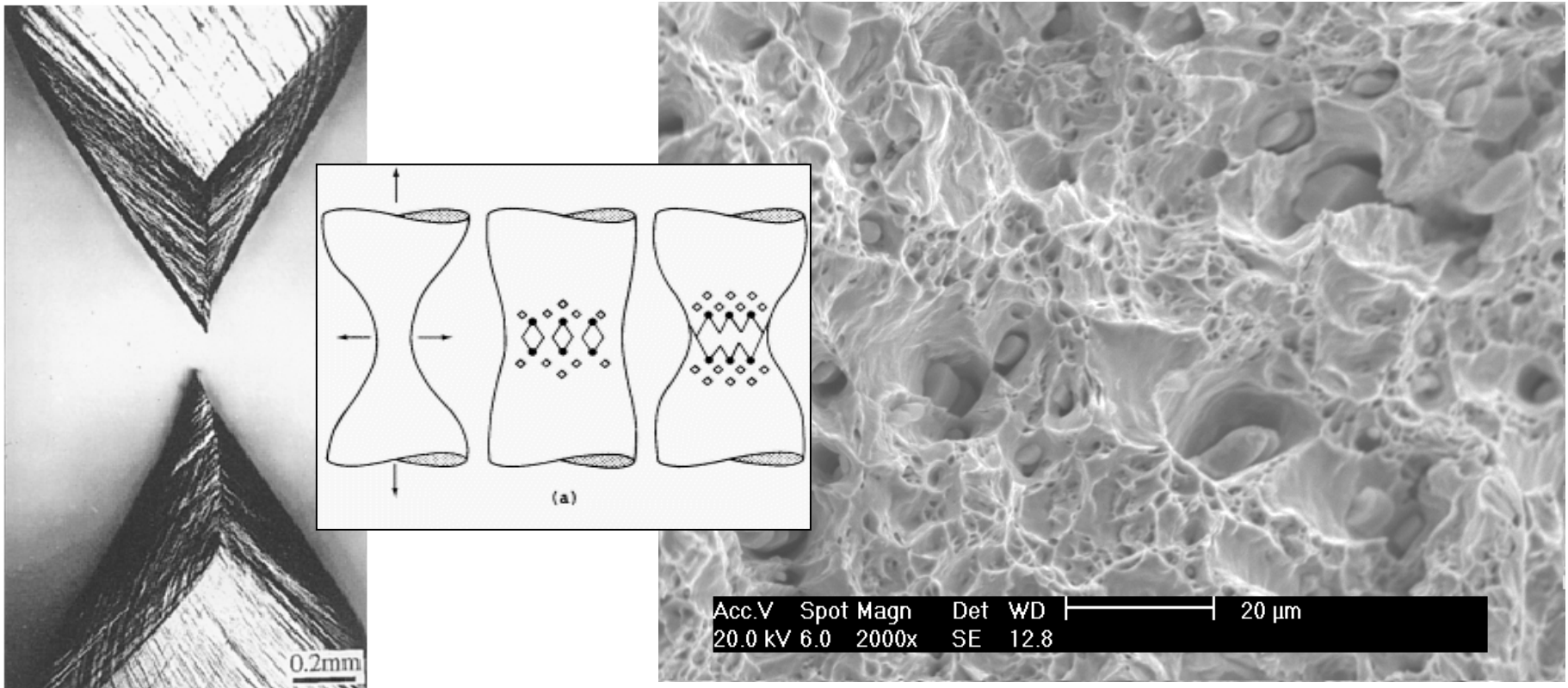


Planos de escorregamento (111) na estrutura CFC



METMAT

Fratura por cisalhamento



Fratura por cisalhamento de:

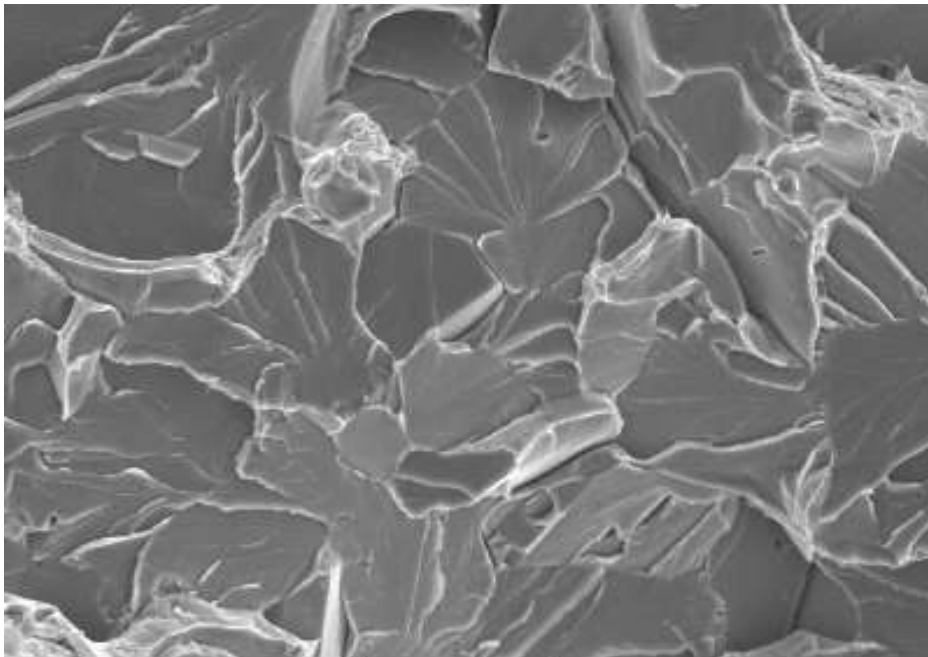
- Um metal de alta pureza (fratura em bisel ou fratura em ponta de lápis)
- Um metal com inclusões não metálicas (fratura alveolar)



METMAT

Fratura por clivagem

- ✓ Separação súbita de planos atômicos sem ocorrência de deformação plástica macroscópica prévia. Processo semelhante à separação de uma ventosa grudada em uma superfície lisa.
- ✓ A fratura por clivagem ocorre geralmente em metais duros, altamente resistentes e pouco plásticos.
- ✓ A fratura é transgranular, clara e brilhante .





METMAT

Fratura por clivagem X fratura por cisalhamento

	Cisalhamento	Clivagem
Movimento	Escorregamento	Separação de planos
Ocorrência	Gradual	Súbita
Deformação plástica	Sim	Não
Comportamento	Dútil	Frágil
Aparência	Escura e fibrosa	Clara e brilhante
Microfractografia	Estrutura de alvéolos	Clivagem



METMAT

Fatores que afetam a transição dútil-frágil dos metais (modo de fratura)

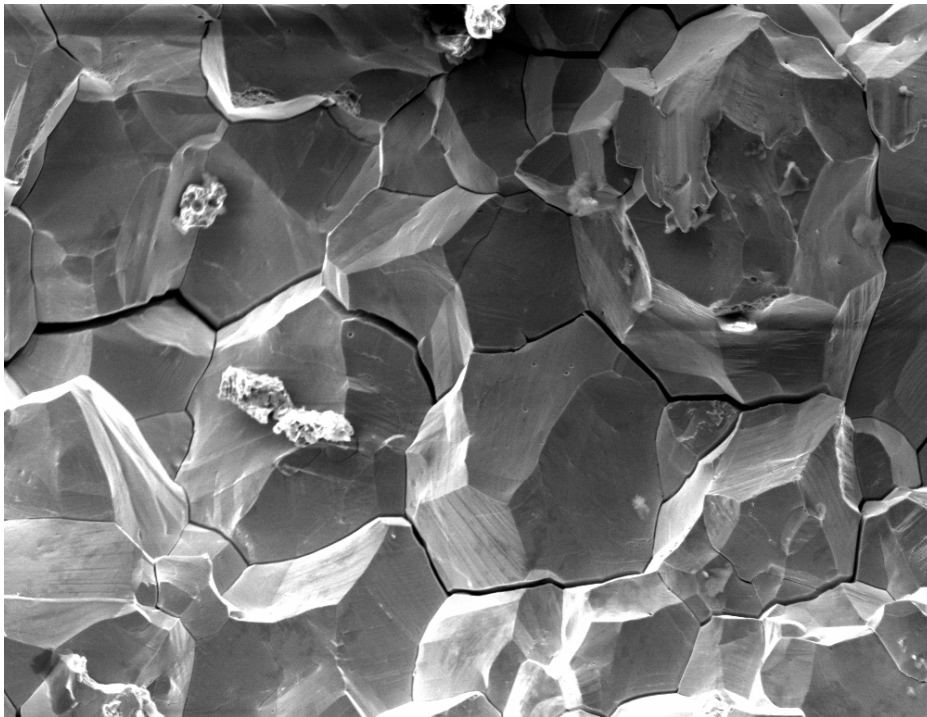
	Dútil	Frágil
Temperatura	Maior	Menor
Velocidade de carregamento	Menor	Maior
Geometria	Sem concentração de tensões	Alto fator de concentração de tensões
Tamanho	Menor e mais fino	Maior e mais grosso
Tipo de Carga	Torsão	Tensão ou compressão
Pressão hidrostática	Maior	Menor
Resistência do material	Menor	Maior



METMAT

Fratura intergranular

- ✓ Fratura intergranular ocorre quando os contornos de grão são mais fracos (menos resistentes) que os grãos do material.
- ✓ A fratura revela os contornos (superfícies) de grão do material.



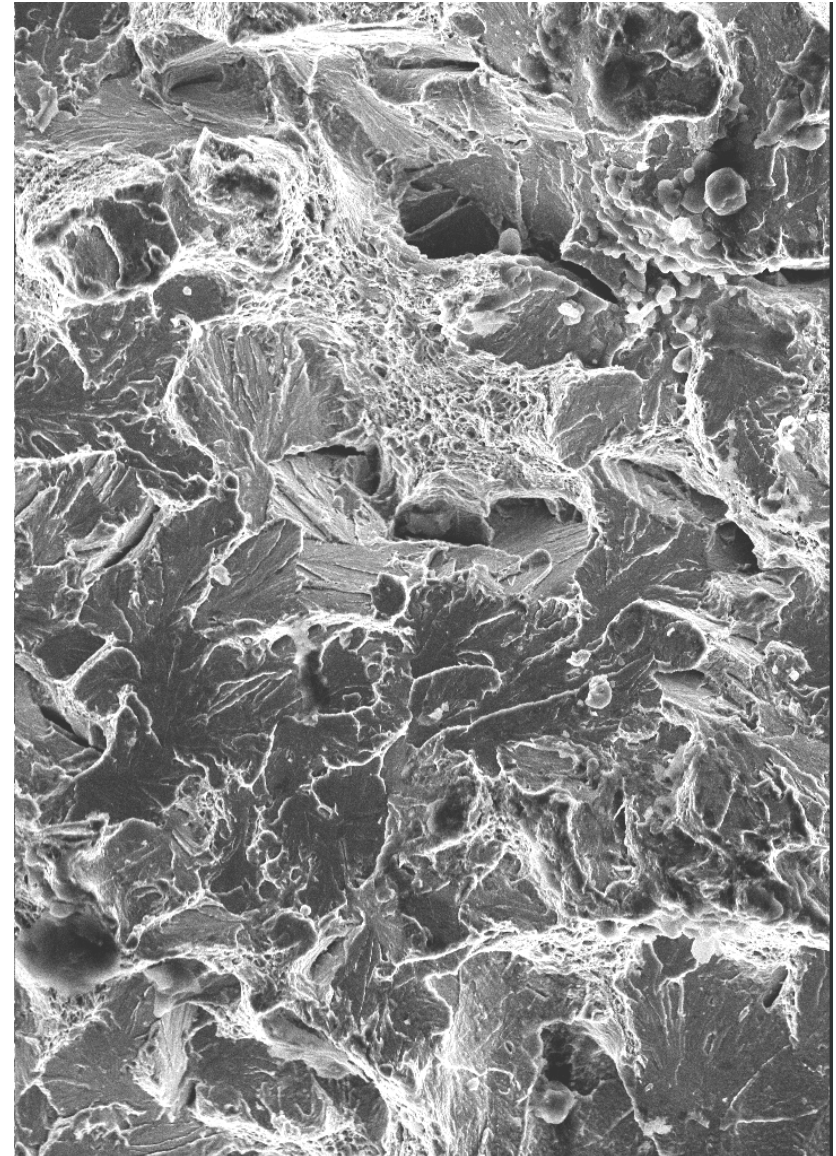
- ✓ Geralmente a fratura intergranular é causada por fatores ambientais como:
 - absorção de hidrogênio – fragilização por hidrogênio.
 - contato com metais líquidos – fragilização por metal líquido.
 - contato com certos meios corrosivos quando submetido a tensões de tração corrosão sob tensão.
 - qualquer outro mecanismo que enfraqueça os contornos de grão.



METMAT

Quasi-clivagem

- ✓ Fratura por quase-clivagem.
- ✓ Fratura típica de aços temperados e revenidos.
- ✓ Combinação dos modos de fratura por clivagem e por cisalhamento.
- ✓ Grãos orientados favoravelmente em relação ao eixo de carregamento podem sofrer escorregamento.
- ✓ Grãos orientados desfavoravelmente não sofrem escorregamento e apresentam comportamento frágil.
- ✓ Raramente as superfícies de fratura apresentam somente fratura por clivagem ou fratura alveolar (dimples).





METMAT

Fratura por Fadiga

- ✓ Fratura causada pela aplicação de ciclos alternados de carga.
- ✓ Devido ao efeito acumulativo da aplicação de tensões abaixo do LE, insuficientes para causar fratura em um único ciclo.
- ✓ A aplicação repetitiva de forças cisalhantes no cristal causam o acúmulo de micro-defeitos, que causam micro-deformação plástica, nucleando uma trinca no interior do material.
- ✓ A aplicação seguida de tensões faz a trinca crescer e se propagar lentamente através do material, até que ocorra uma trinca frágil de propagação catastrófica.



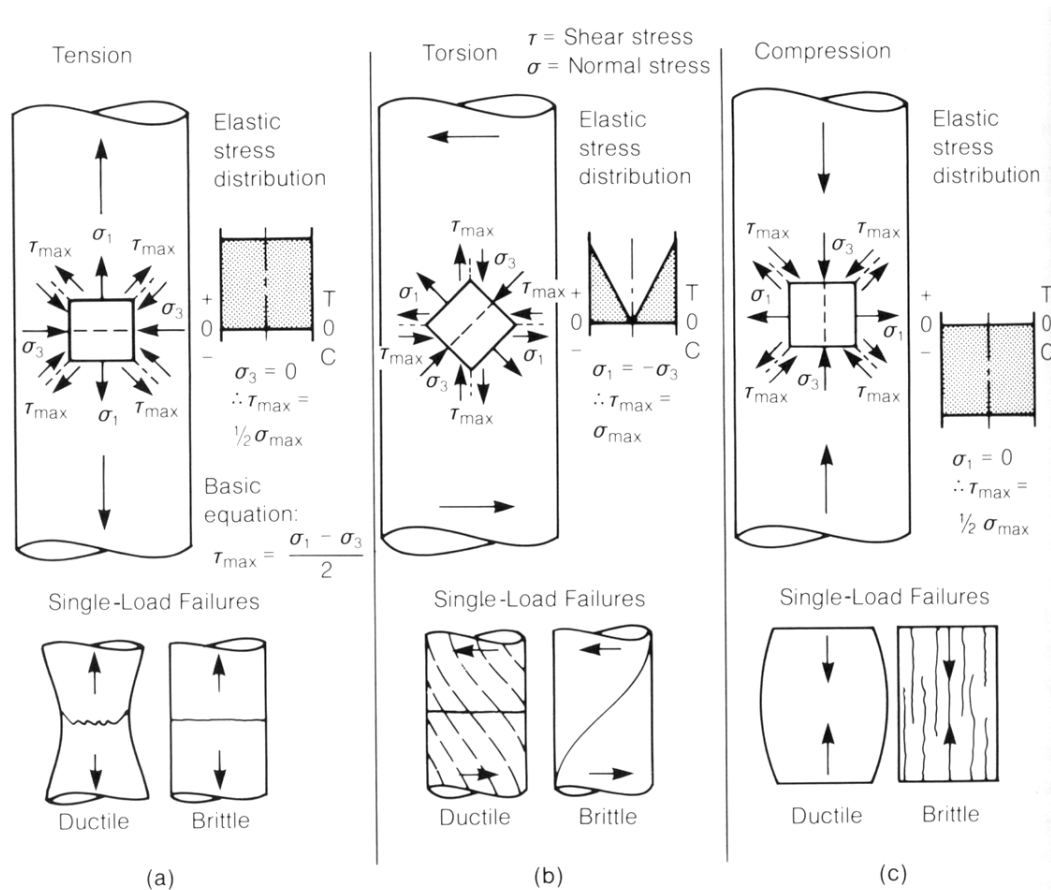
METMAT

Tensões associadas com a fratura de metais dúteis e frágeis

- ✓ Fraturas são causadas por tensões: as trincas irão ocorrer primeiro nos locais em que a tensão no local seja maior que a resistência local do material.
- ✓ A localização do início da trinca varia com os gradientes de resistência do material e com os gradientes de tensões aplicadas e residuais.
- ✓ Ao aplicar forças em qualquer peça, aparecem componentes destas forças em outras direções, originando um sistema de tensões.

Tensões associadas com a fratura de metais dúteis e frágeis

- ✓ Tensões normais (tração e compressão) e de cisalhamento em eixos sob tração, torsão e compressão puras.



Fraturas frágeis e dúteis



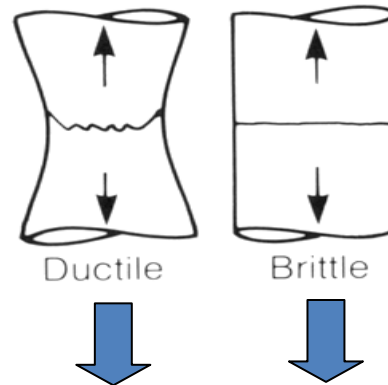
METMAT

Tração simples

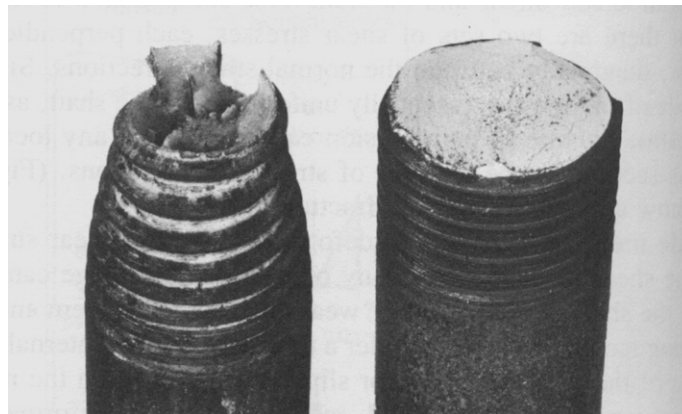
- ✓ Sob tração simples a máxima tensão de tração encontra-se no plano horizontal e as máximas tensões de cisalhamento a 45° do eixo do cilindro.

Metais dúteis deformam porque a tensão aplicada é maior que a resistência ao cisalhamento (escorregamento de planos atômicos), porém menor que resistência à fratura (separação de planos atômicos).

Single-Load Failures



Metais frágeis fraturam porque a tensão aplicada é maior que a resistência à fratura (separação de planos atômicos), porém menor que resistência ao cisalhamento (escorregamento de planos atômicos).



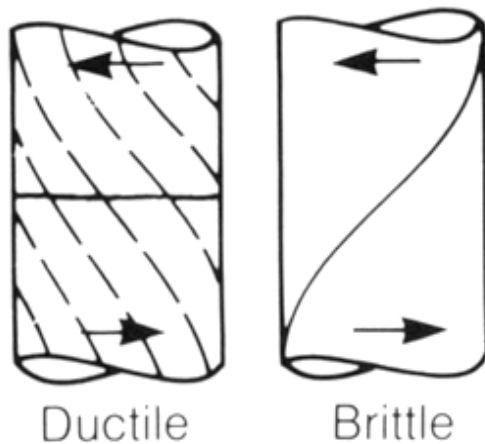


METMAT

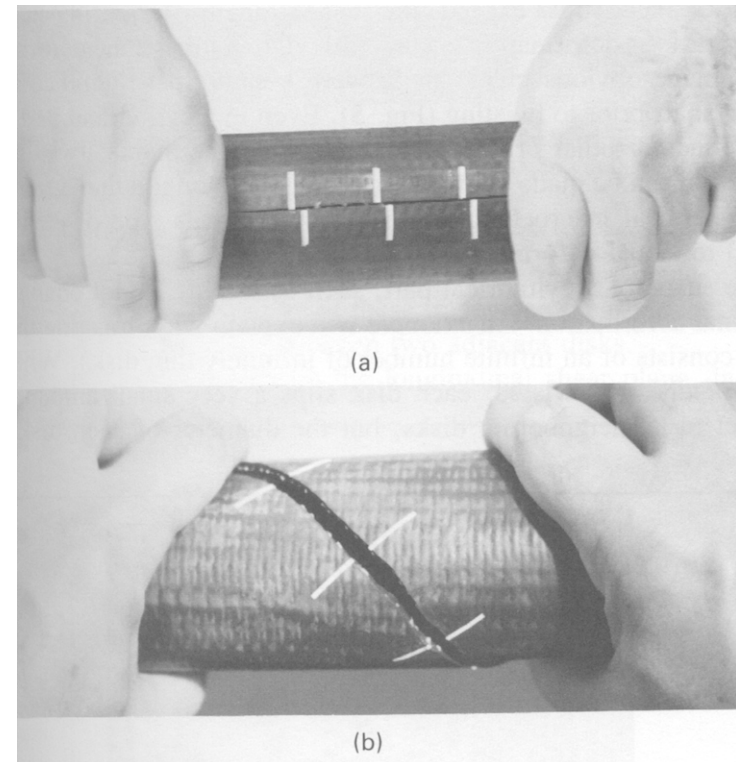
Torção simples

- ✓ Sob torção simples as máximas tensões de cisalhamento encontram-se nos planos horizontal e vertical e a máxima tensão de tração a 45° do eixo do cilindro.

Single-Load Failures



(b)



- ✓ Mangueira de radiador cortada longitudinalmente e a 45° com seu eixo.

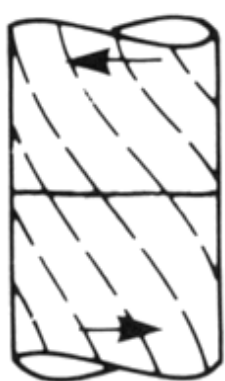


METMAT

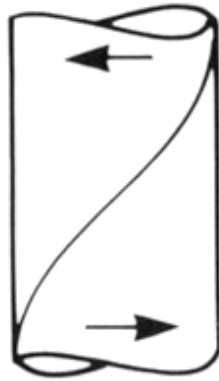
Torção simples

- ✓ Sob torção simples as máximas tensões de cisalhamento encontram-se nos planos horizontal e vertical e a máxima tensão de tração a 45° do eixo do cilindro.

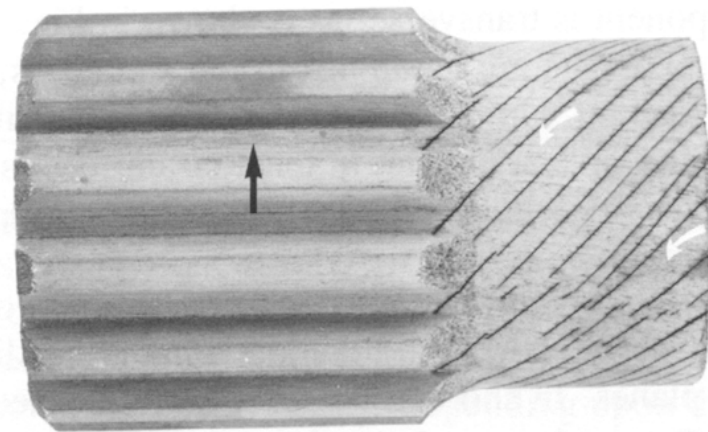
Single-Load Failures



Ductile



Brittle



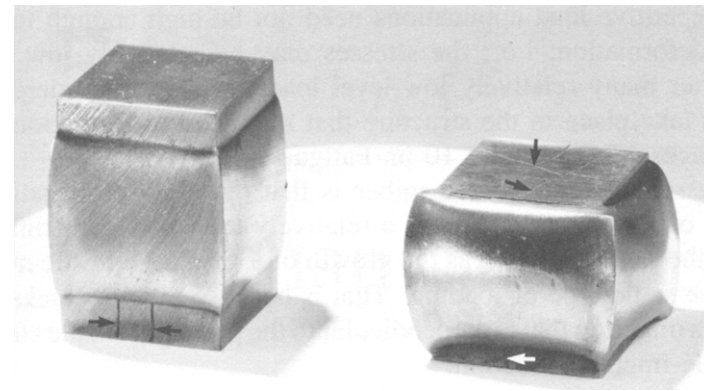
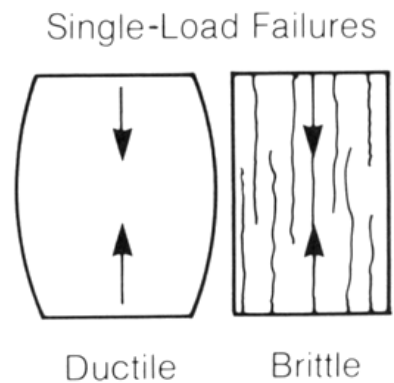
Fratura por torção de um eixo de aço cementado, mostrando trincas a 45° na camada cementada frágil e fratura transversal dútil do núcleo não cementado.



METMAT

Compressão

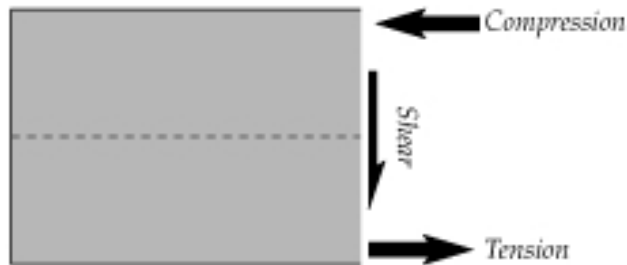
- ✓ Sob compressão a máxima tensão de tração encontra-se em um plano vertical. As máximas tensões de cisalhamento a 45° do eixo.



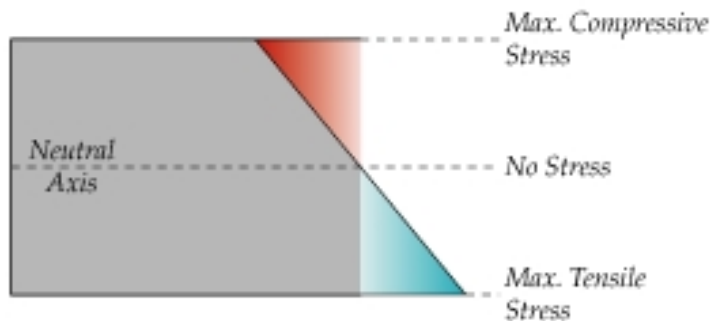
Compressão de dois cubos de aço cementados e temperados nas superfícies superior e inferior. Trincas na camada cementada indicadas pelas setas

Flexão

- ✓ Uma barra ou uma viga submetida à flexão apresenta uma distribuição de tensões ao longo da seção:
 - a máxima tensão de compressão encontra-se na superfície superior.
 - a máxima tensão de tração encontra-se na superfície inferior.
 - a máxima tensão de cisalhamento encontra-se no plano vertical.
 - as tensões normais são nulas no eixo neutro.



Sob flexão rotativa as tensões normais invertem. A região sob tração passa a ser solicitada em compressão e vice-versa.



Flexão rotativa \Rightarrow FADIGA



METMAT

Tensão X Resistência

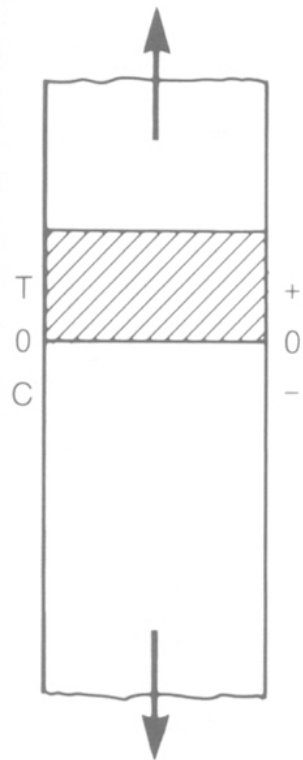
- ✓ Para compreender e visualizar as causas de falha de um componente é preciso entender o estado de tensões atuante no sistema.
- ✓ Entretanto, deve-se entender o estado de tensões **de fato** atuante no sistema e que causou a falha e não somente o previsto em projeto.
- ✓ Frequentemente o estado de tensões previsto é alterado por concentradores de tensão não previstos no projeto.



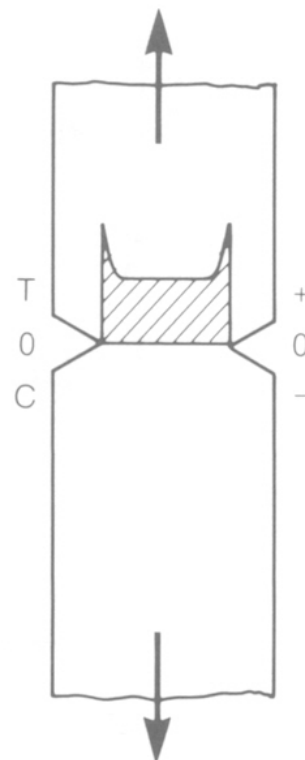
METMAT

Tração

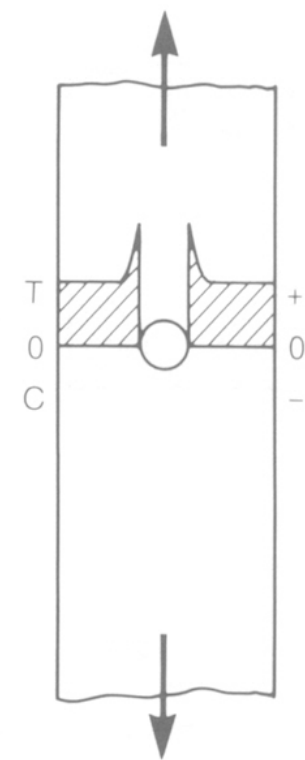
- ✓ Distribuição de tensões elásticas: tração simples



(a) No stress concentration



(b) Surface stress concentrations



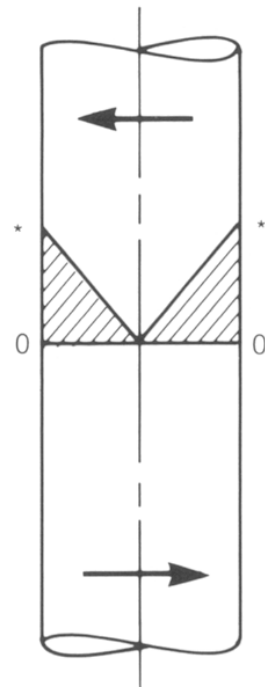
(c) Transverse hole stress concentration



METMAT

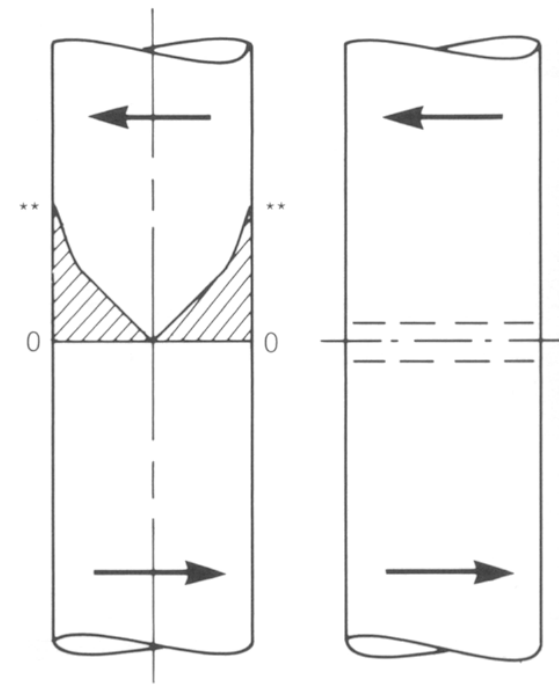
Torção

✓ Distribuição de tensões elásticas: torção simples



(a) No stress concentration

*All stress components — tension, shear, and compression — have equal magnitude.



(b) Transverse hole stress concentration

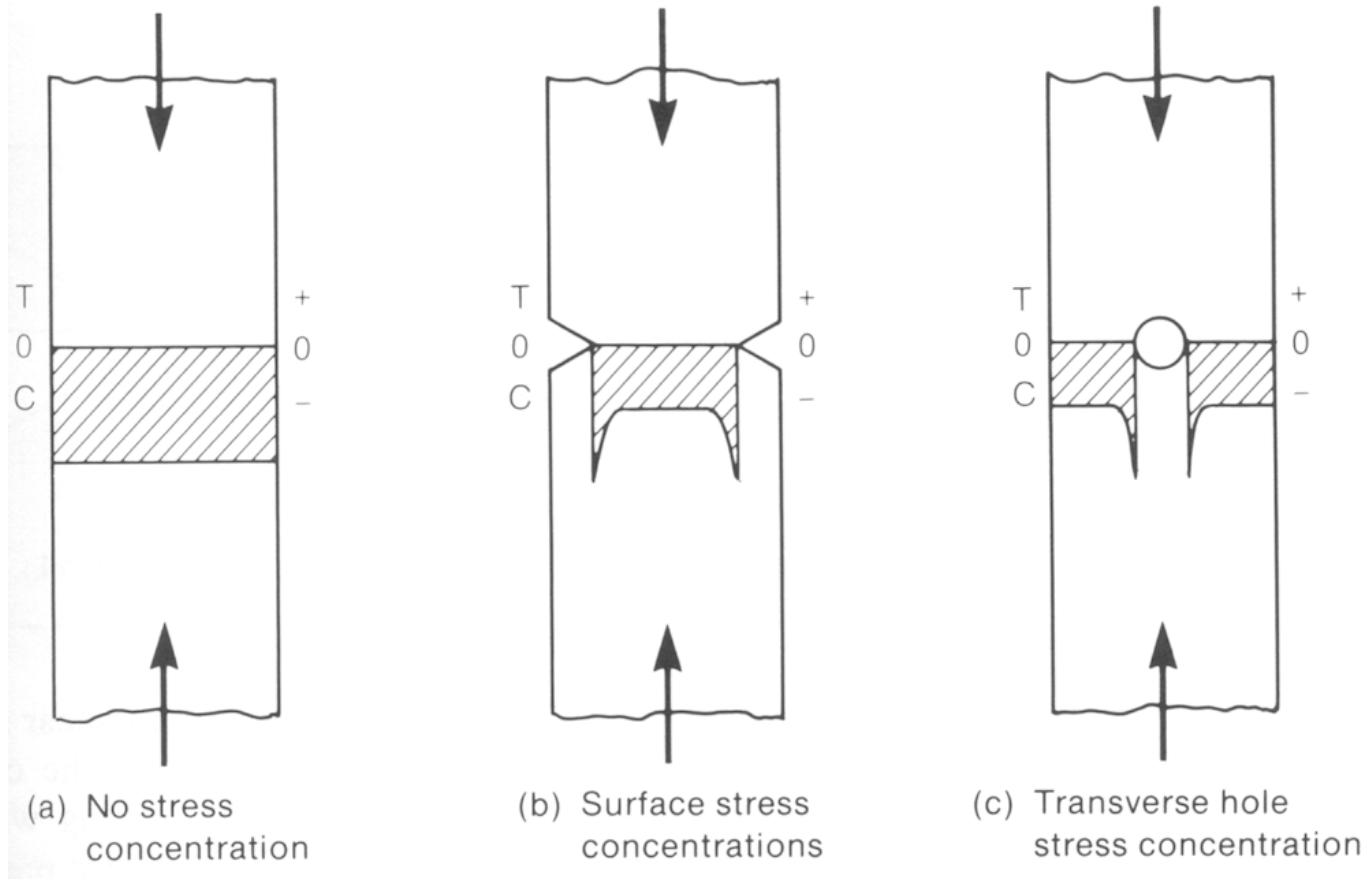
**Tension and compression stress components increase more than shear stress at a torsional stress concentration at corner of transverse hole.



METMAT

Compressão

- ✓ Distribuição de tensões elásticas: compressão simples

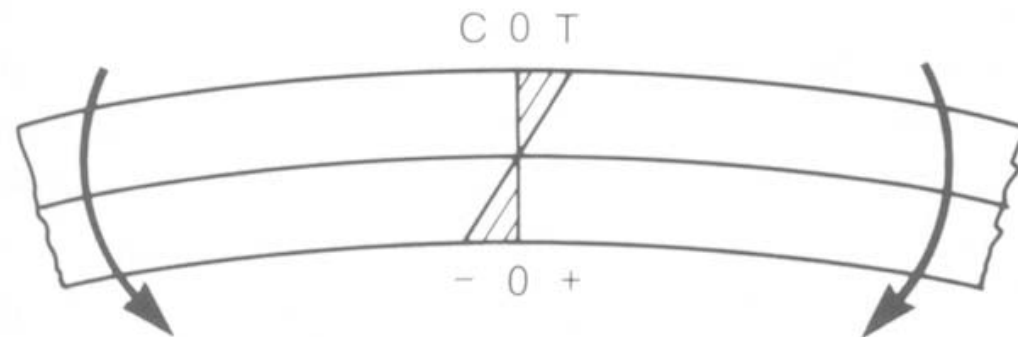




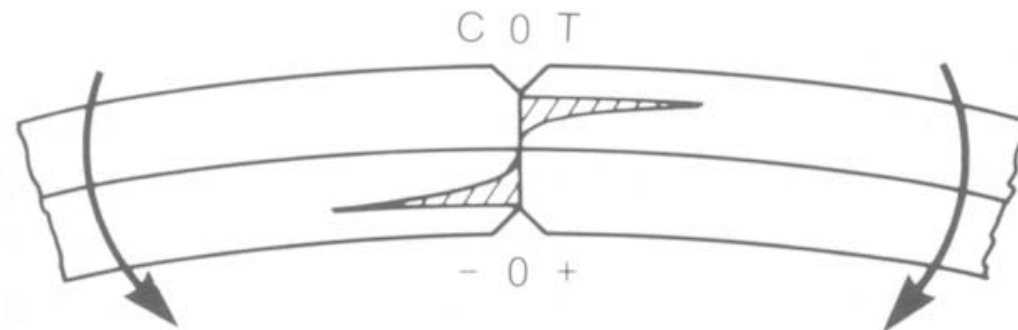
METMAT

Flexão

- ✓ Distribuição de tensões elásticas: flexão simples



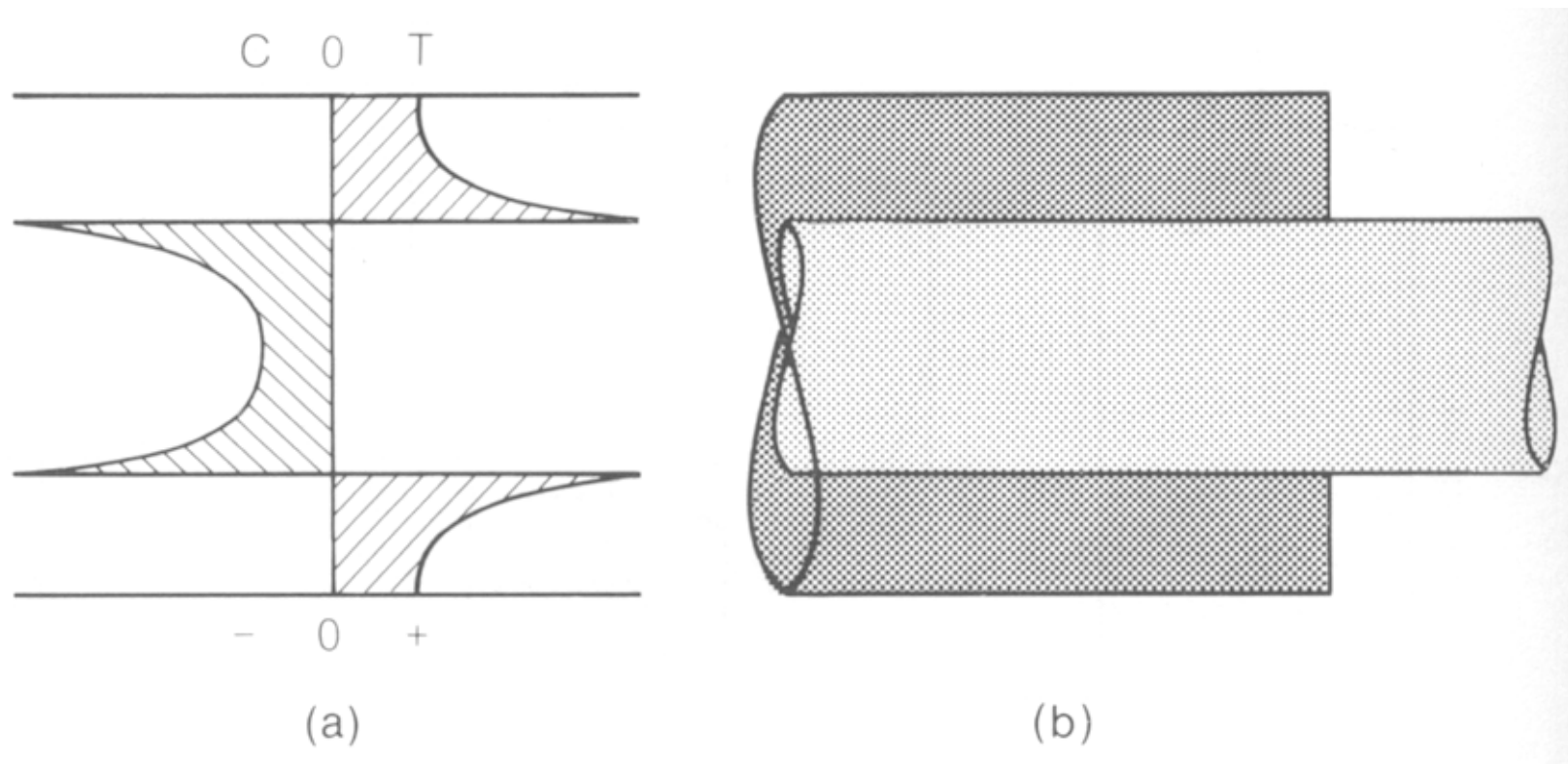
(a) No stress concentration



(b) Transverse surface stress concentrations

Fixação por interferência

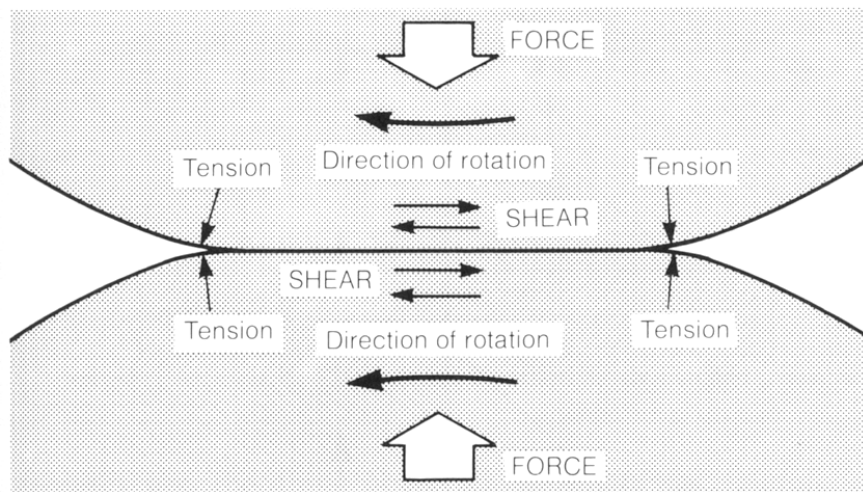
- ✓ Distribuição de tensões elásticas: fixação por interferência



As tensões são máximas na interface

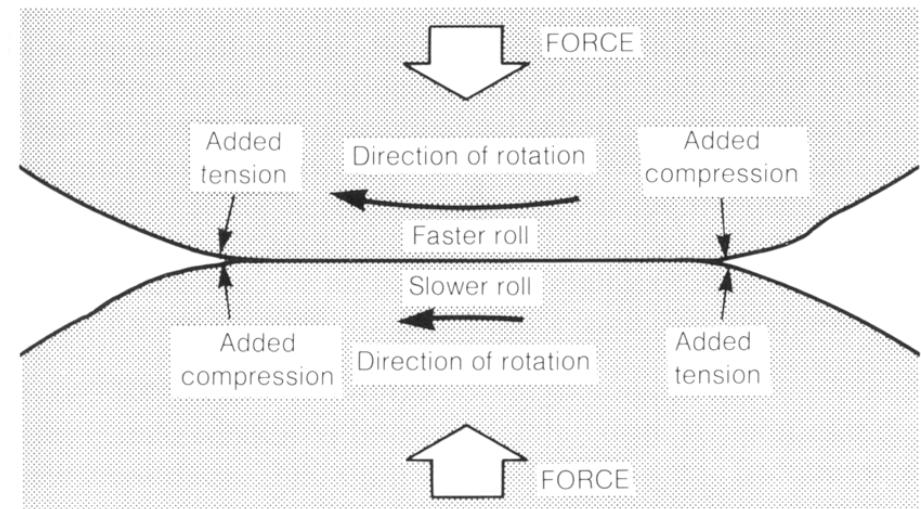
Superfícies convexas em contato

- ✓ Distribuição de tensões elásticas: superfícies convexas em contato



(a) Rolls turning at same speed

Sem deslizamento



(b) Rolls turning at different speeds

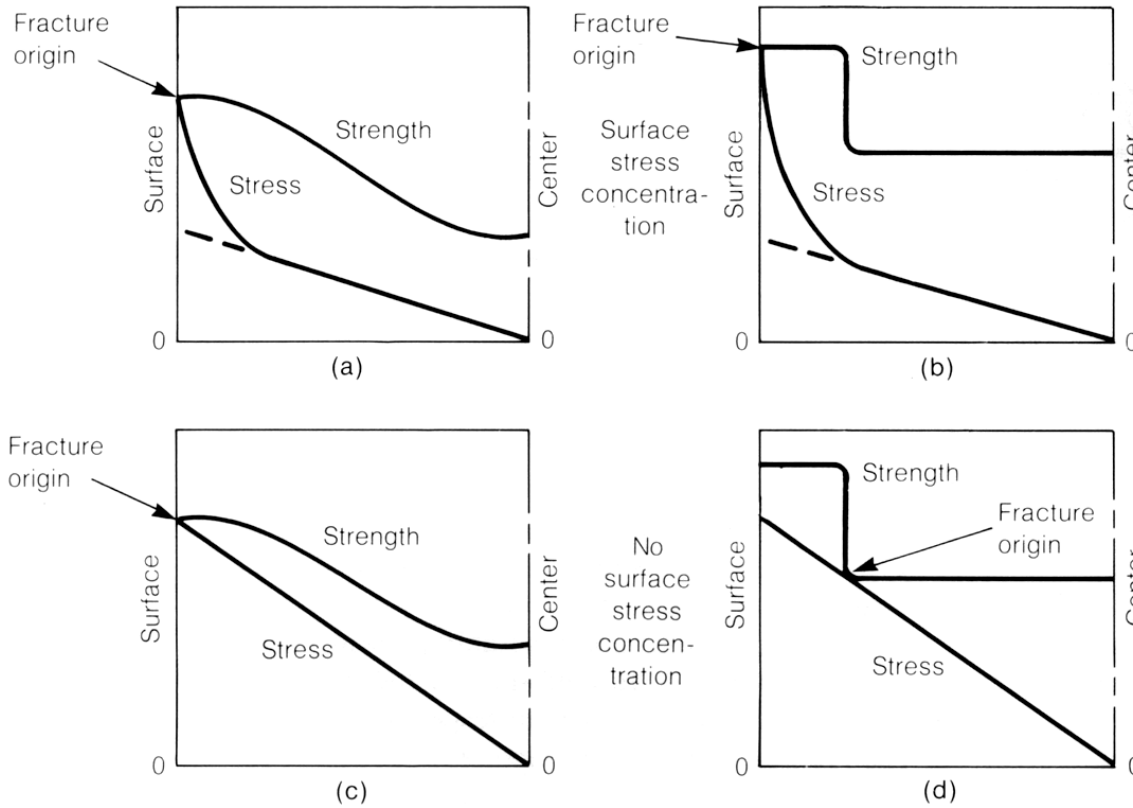
Com deslizamento



METMAT

Início de fratura sub-superficial

- ✓ Peças que possuem gradiente de resistência mecânica, devido a tratamento térmico ou termoquímico superficial ou devido a descontinuidades existentes no interior do material.



Strength gradients: (a) & (c) gradual; (b) & (d) steep
Stress gradients: (a) & (b) surface stress concentrations; (c) & (d) no stress concentrations



METMAT

Nucleação superficial X sub-superficial

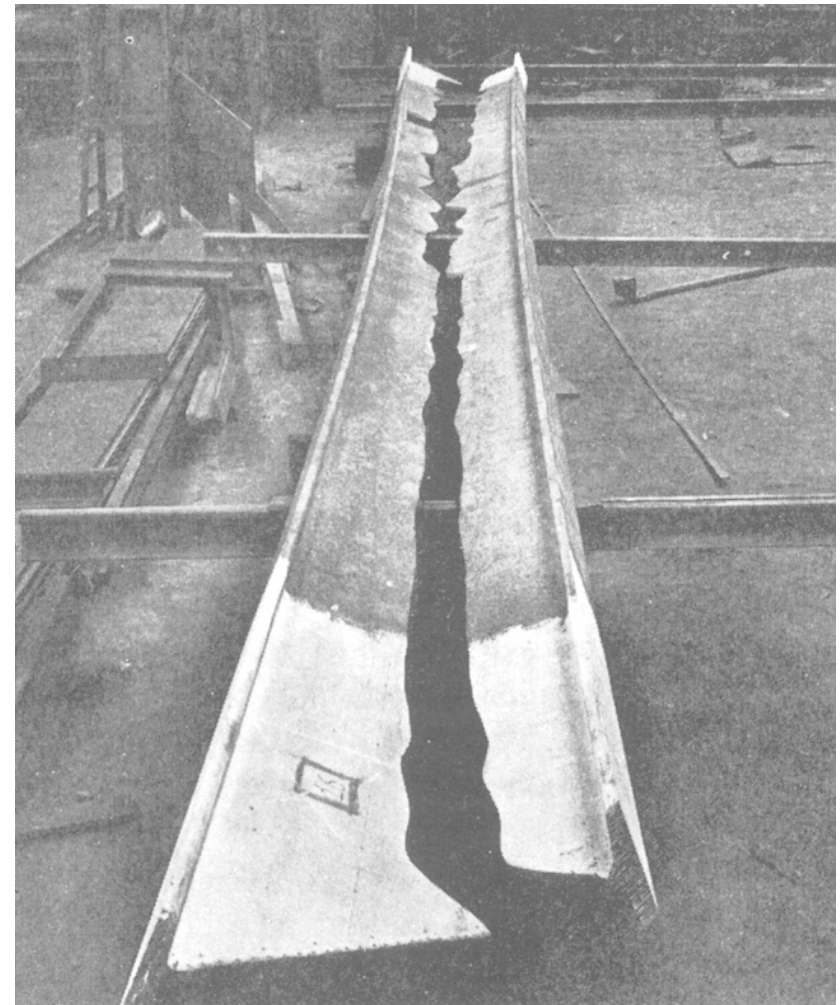
- ✓ Fraturas iniciadas na superfície ocorrem devido a concentradores de tensão, como rasgos de chaveta , filetes de rosca, canais de lubrificação, corrosão sob tensão, etc.
- ✓ Nucleação sub-superficial pode ser esperada quando não há concentradores de tensão na superfície porém existe variação brusca de propriedades:
 - Camada cementada muito fina
 - Gradiente de dureza muito acentuado
 - Núcleo muito mole



METMAT

Tensões residuais

- ✓ É desconcertante testemunhar a quebra de um componente metálico em repouso em dois ou mais pedaços, após finda as etapas de fabricação.
- ✓ Viga I de 13 metros de comprimento separada em duas metades, após corte por chama nas duas extremidades.
- ✓ Note o encurvamento da viga após fratura, devido ao relaxamento das tensões residuais de corte.





METMAT

Tensões residuais

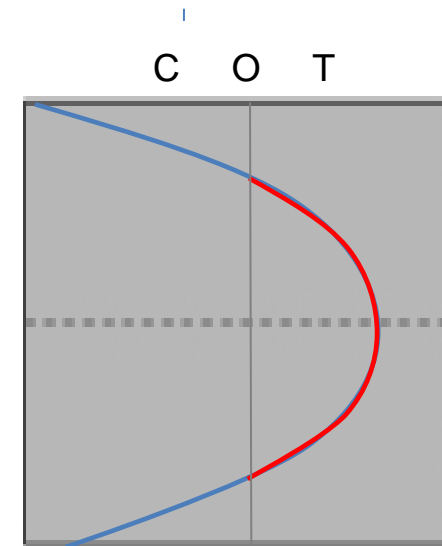
- ✓ Tensões residuais são sempre equilibradas. Se uma região tem tensões de tração a região vizinha deve ter tensões residuais de compressão - caso contrário a peça sai andando!
- ✓ Se eliminarmos uma parte da peça responsável pelo desenvolvimento de tensões residuais ocorre alívio das tensões e uma distorção cuja extensão é proporcional ao nível de tensões existentes.
- ✓ As tensões residuais têm origem em três diferentes escalas:
 - Macro: engloba toda a seção transversal da peça
 - Micro: tensões em nível de grãos ou agrupamento de grãos, cada uma com uma orientação diferente e com diferentes propriedades.
 - Escala do reticulado cristalino: as tensões e as distorções macro e microscópicas promovem distorção do reticulado cristalino. Através de medidas das distorções dos parâmetros de rede em certas direções pode-se avaliar o nível de tensões residuais.



METMAT

Tensões residuais

- ✓ As tensões residuais são afetadas pela introdução de átomos no reticulado cristalino.
- ✓ Tratamentos termoquímicos (nitretação, carbonitretação, nitrocarburação, etc.) induzem tensões de compressão na superfície tratada.
- ✓ A formação de uma camada nitretada na superfície de uma peça induz tensões de compressão nesta região e por razões de equilíbrio de tração no núcleo da peça.

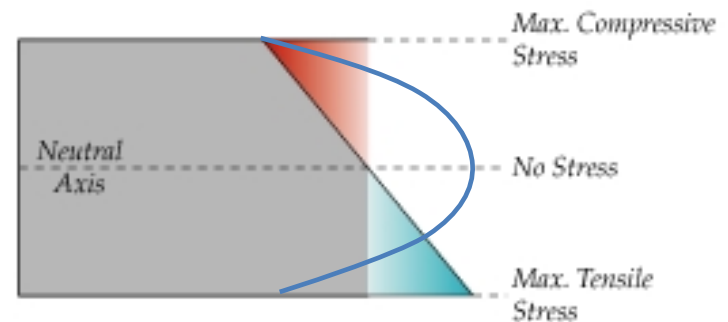
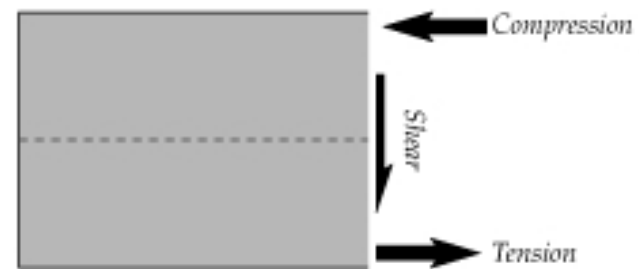




METMAT

Tensões residuais

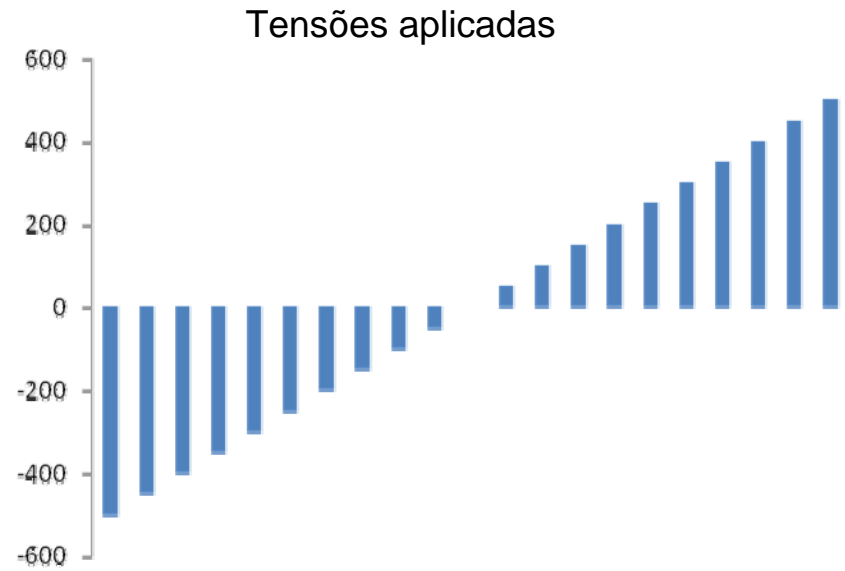
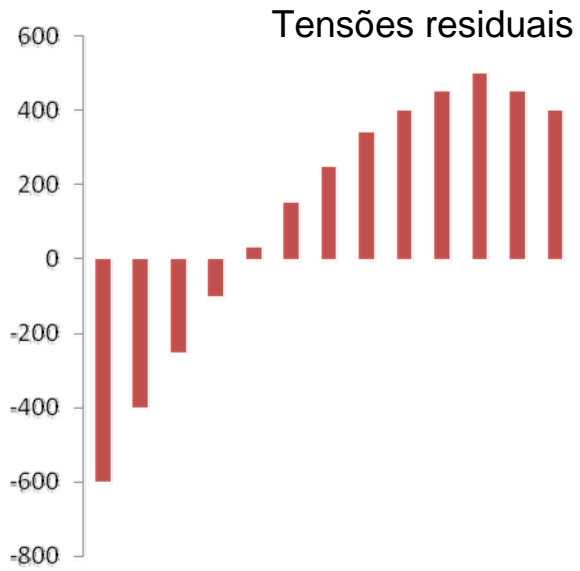
- ✓ As tensões de trabalho se somam às tensões residuais.
- ✓ Em peças submetidas a flexão rotativa (p.e. girabrequins) cilindros de trabalho, cilindros de encosto, etc.) a existência de tensões de compressão na superfície diminui a tensão de tração efetiva de trabalho e aumento a vida em fadiga.





METMAT

Tensões residuais





METMAT

Tensões residuais

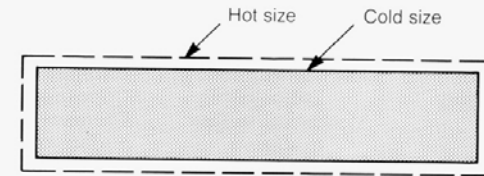
Ação térmica			Ação mecânica		Ação química
Tratamento térmico			Usinagem		Ataque químico
Alívio de tensões	Recozimento		Retífica	Polimento	
Têmpera	Revenido				
Tratamento de difusão			Trat. mecânicos de superfície		Corrosão
Cementação	Carbonitretação	Nitretação	Shot peening	Laminação superficial	
Descarbonetação	Nitrocarburação	Cianetação	Martelamento	Ballizing	
Fabricação com calor			Conformação a frio		Usinagem química
Soldagem	Corte por chama		Estiramento	Desempenamento	
Fixação por contração	Fundição		Estampagem	Fixação por interferência	
Trabalho em temperaturas elevadas			Sobrecarga em serviço		Recobrimentos
Fadiga térmica			Tensões cíclicas		Revestimentos
Usinagem por descarga elétrica			Desgaste		



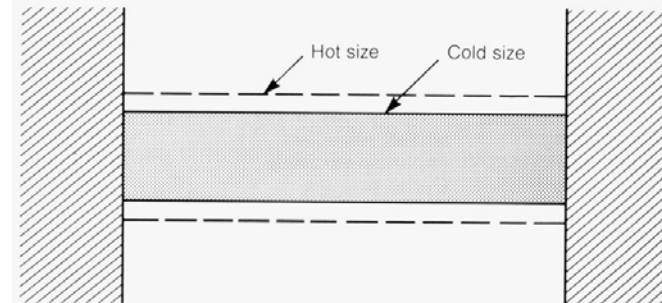
METMAT

Tensões térmicas

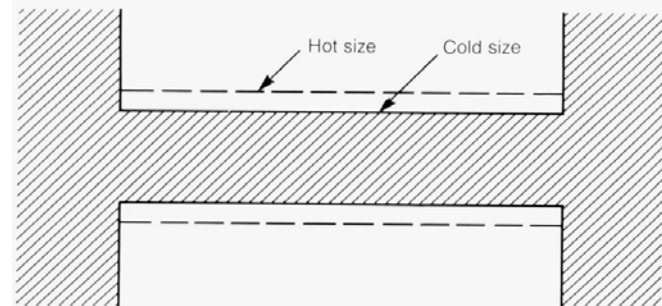
- ✓ As tensões térmicas são originadas por expansão (ou contração) diferencial durante o aquecimento ou resfriamento de um metal.
- ✓ A diferença de expansão (contração) entre as diferentes partes da peça origina tensões residuais de origem térmica.
- ✓ Dois são os fatores que devem estar presentes para gerar tensões residuais de origem térmica: calor e restrição.



(a) Unrestrained expansion and contraction



(b) Restrained expansion, unrestrained contraction



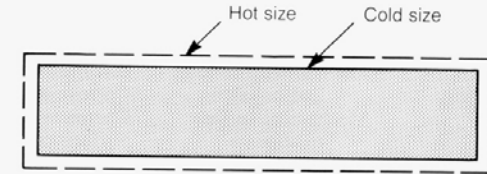
(c) Restrained expansion and contraction



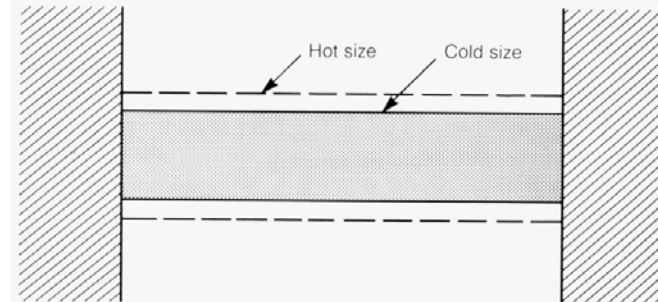
METMAT

Tensões térmicas

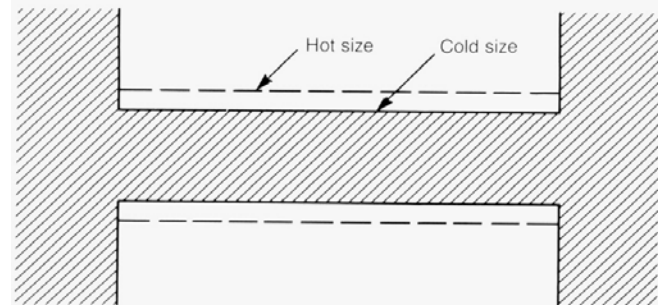
- ✓ Quando aquecida uniformemente uma barra metálica expande em todas as direções. No resfriamento a barra contrai uniformemente para as dimensões originais. Neste caso não há restrições \Rightarrow não há tensões residuais.
- ✓ No caso de aquecimento da barra entre duas colunas fixas, ocorre deformação plástica em compressão e o aumento de volume ocorre somente na direção radial, sendo impedido na direção axial. No resfriamento a contração ocorre em todas as direções e a barra cai.
- ✓ Se a barra e as colunas formam uma peça única, no aquecimento haverá deformação plástica sob tensão de compressão e o aumento de volume ocorre somente na direção radial. No resfriamento, devido à restrição imposta pelas colunas a contração ocorre somente na direção radial. A barra fica sob tensão de tração, na direção axial.



(a) Unrestrained expansion and contraction



(b) Restrained expansion, unrestrained contraction



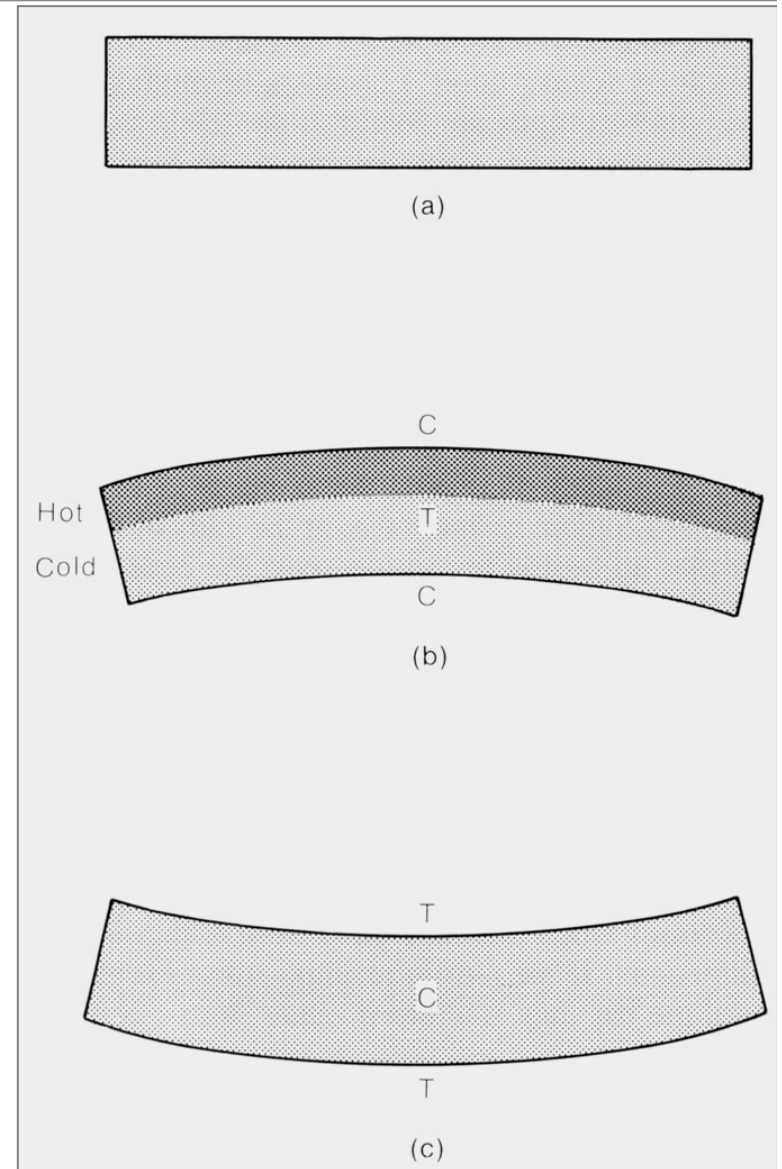
(c) Restrained expansion and contraction



METMAT

Tensões térmicas

- Se aquecermos uma placa, de um lado só, a parte aquecida expande em todas as direções
- Como há restrição da parte dura e fria, à qual a parte superior encontra-se solidária, a placa sofre empenamento.
- A parte superior fica sob compressão e a parte de baixo é tracionada. A compressão da parte quente faz com que a placa escoe plasticamente e alivie as tensões. A parte inferior da placa fica sob compressão em razão da curvatura da placa.
- No resfriamento, as tensões invertem, pois a superfície quente contrai, a parte fria da placa impede esta contração; a distorção aparece agora no sentido contrário e as tensões invertem .
- As tensões no centro da barra se tornam compressivas para equilibrar o conjunto.

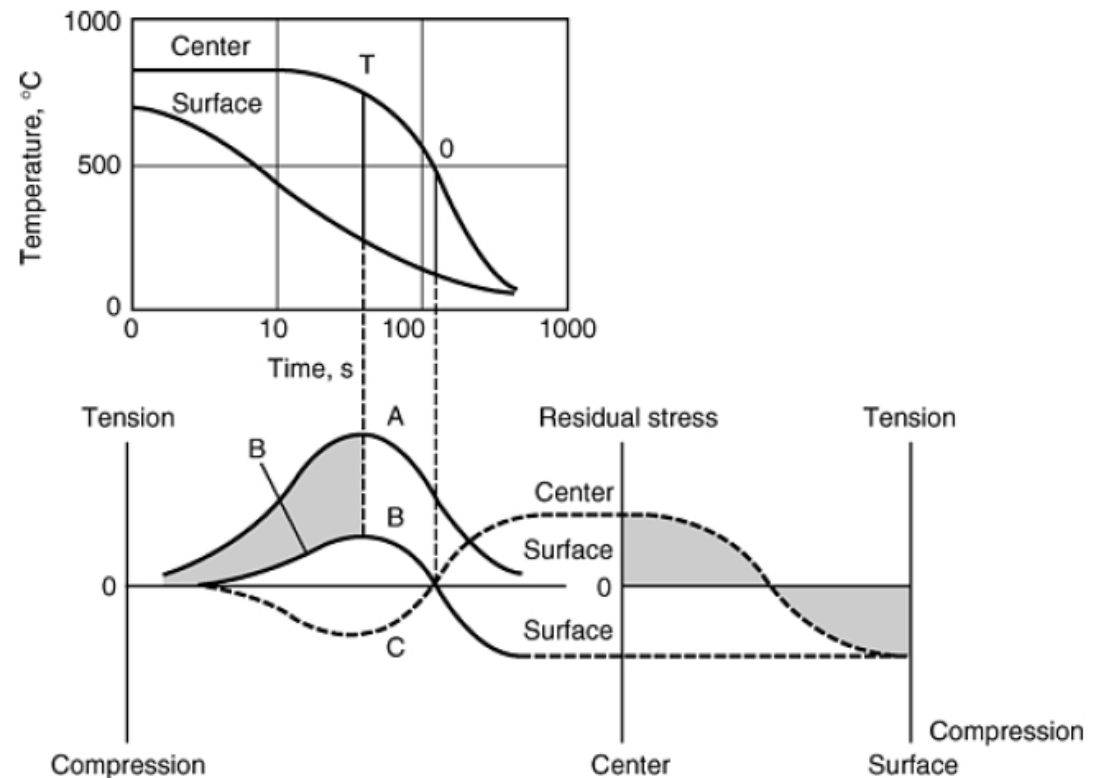




METMAT

Tensões térmicas

- ✓ As tensões térmicas podem se desenvolver no interior de uma peça por conta de restrições impostas por regiões frias da mesma.
- ✓ No resfriamento brusco (têmpera) de uma cilindro se as deformações fossem todas elásticas não se desenvolveriam tensões residuais como em (A).
- ✓ O núcleo do cilindro sofre deformação plástica ao ser comprimido pela superfície fria e dura. Após resfriamento do núcleo a superfície é “puxada” para dentro e as tensões residuais são de compressão como em (B). As tensões do núcleo são inversas como em (C).

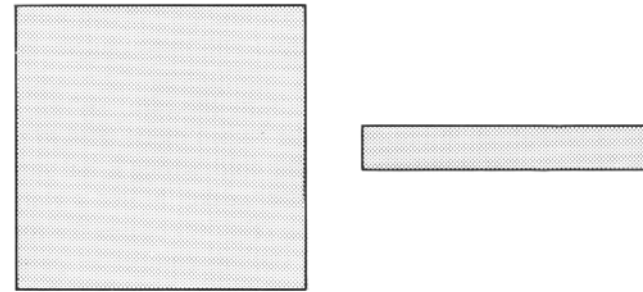




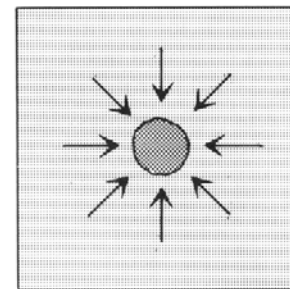
METMAT

Tensões térmicas

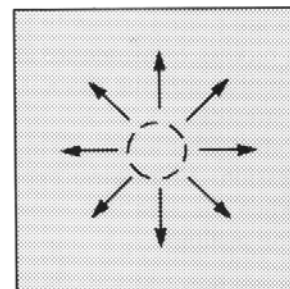
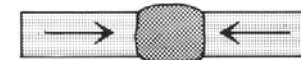
- Uma placa fina aquecida localmente (spot welding) desenvolve tensões de compressão no aquecimento e tensões de tração no resfriamento.
- No aquecimento a região aquecida “incha” e após resfriamento contrai, inclusive na direção da espessura.



(a)



(b)



(c)





METMAT

Tensões térmicas

- As tensões residuais de soldagem foram responsáveis pela fratura frágil de navios mercantes na primeira metade do século passado.
- Os tratamentos de alívio de tensões pós-soldagem são de fundamental importância para evitar fraturas em grandes estruturas soldadas.



This ship was one of 19 during World War II that had completely brittle fractures; over 200 other ships had partial brittle fractures of the hull. When tested, the fractured plates had normal ductility, as specified.



METMAT

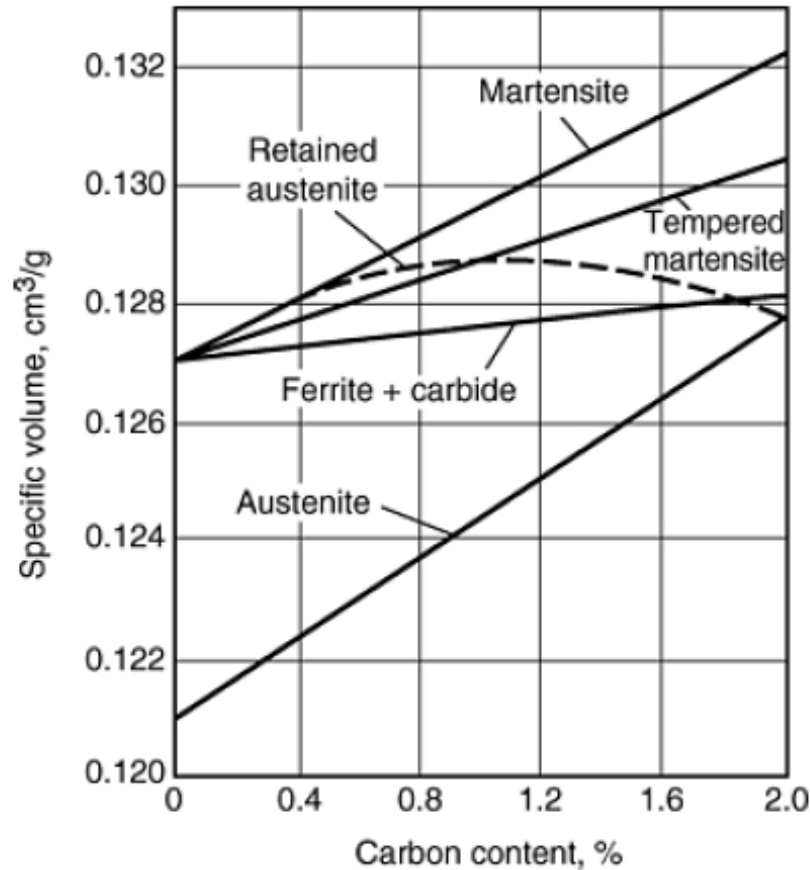
Tensões residuais de origem metalúrgica

- As tensões residuais de origem metalúrgica são causadas por expansão não uniforme de diferentes regiões da peça durante o processo de têmpera.
- Na têmpera, a transformação martensítica causa uma expansão volumétrica da ordem de 4%.
- A regra diz que a parte da peça que endurece por último fica com tensões residuais de compressão.
- A expansão volumétrica de uma região dá origem a tensões residuais de compressão quando restringida.



METMAT

Tensões residuais de origem metalúrgica



Phase	Apparent atomic volume, Å ³
Ferrite	11.789
Cementite	12.769
Ferrite + carbides	$11.786 + 0.163 C^{(a)}$
Pearlite	11.916
Austenite	$11.401 + 0.329 C^{(a)}$
Martensite	$11.789 + 0.370 C^{(a)}$

(a) C = % carbon



METMAT

Tensões residuais de origem metalúrgica

- Quanto maior a expansão na transformação de fase, maiores serão as tensões residuais de origem metalúrgica.

Reaction	Volume change, %	Dimensional change, in./in.
Spheroidite → austenite	-4.64 + 2.21 (%C)	0.0155 + 0.0074 (%C)
Austenite → martensite	4.64 - 0.53 (%C)	0.0155 - 0.00118 (%C)
Spheroidite → martensite	1.68 (%C)	0.0056 (%C)
Austenite → lower bainite ^(a)	4.64 - 1.43 (%C)	0.0156 - 0.0048 (%C)
Spheroidite → lower bainite ^(a)	0.78 (%C)	0.0026 (%C)

- Para poder prever o estado de tensões ao final de um tratamento térmico é necessário saber, não somente que fase se formam, mas também a seqüência de formação.
- Além disso é necessário levar em conta a superposição das tensões térmicas e de transformação.

Tensões térmicas e de transformação

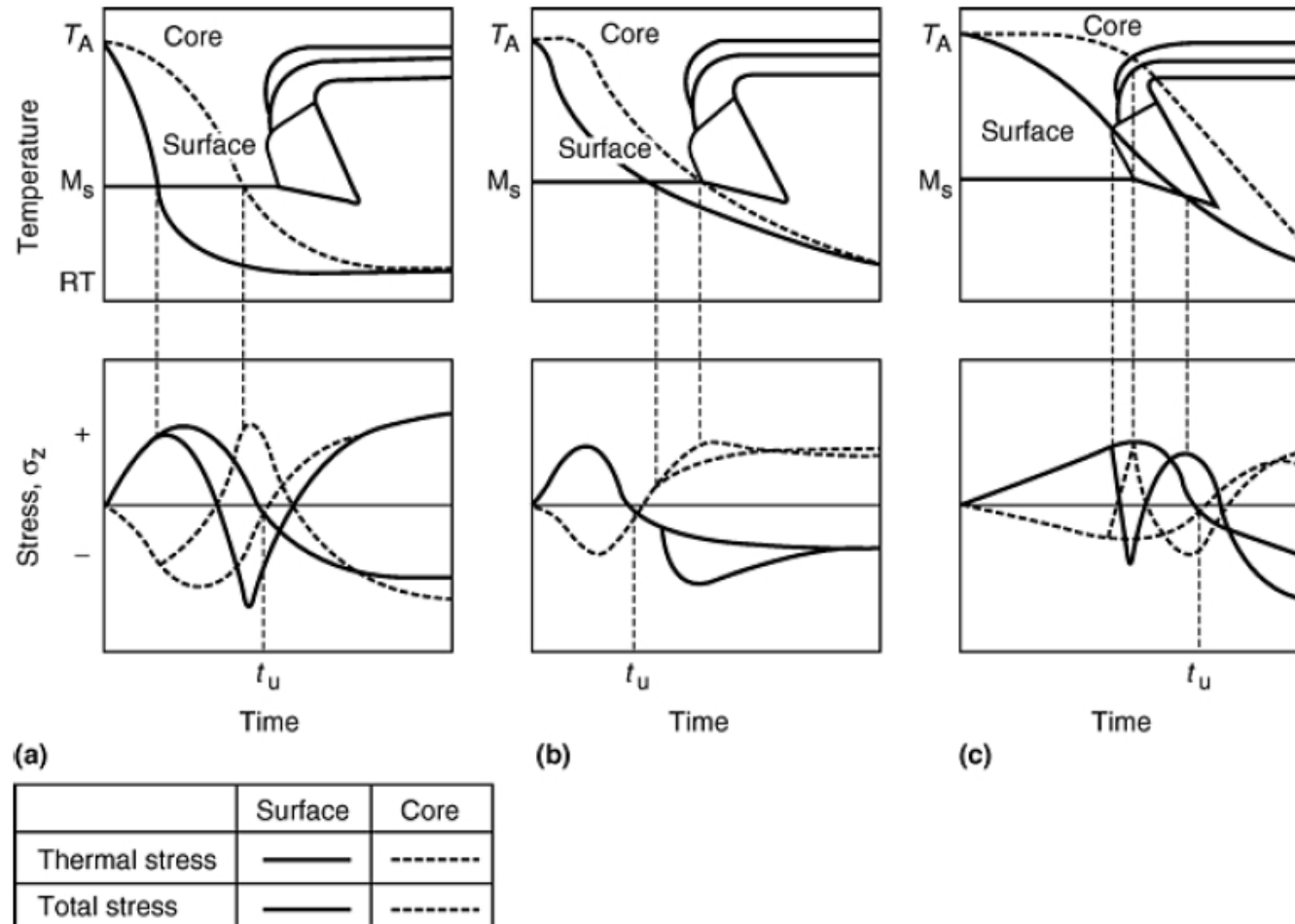


Fig. 11 Comparison of thermal and transformational stresses for three different quenching conditions. See text for details. t_u , time instant of stress reversal



METMAT

Tensões térmicas e de transformação

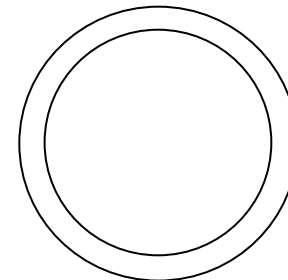
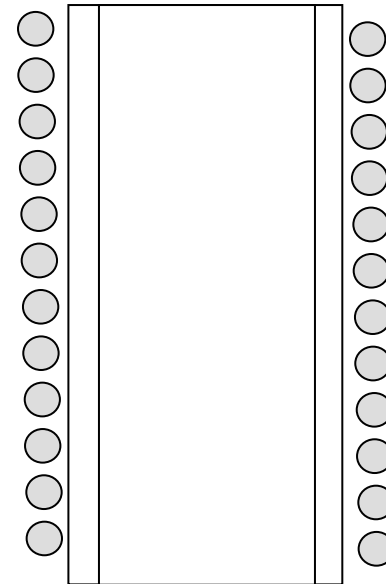
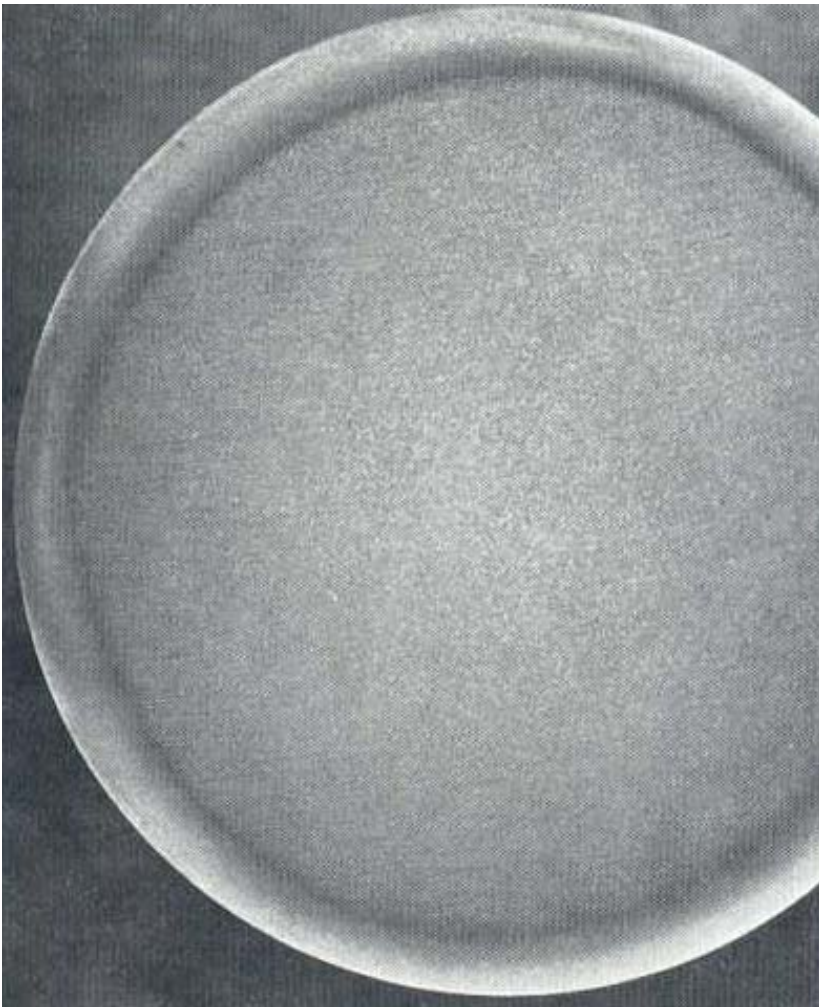
- A parte da peça que endurece por último fica com tensões residuais de compressão.
- Um aço de alta temperabilidade sofre transformação martensítica em toda sua seção (têmpera total) e a superfície fica sob tensão de tração (a primeira a transformar). Esta situação é muito perigosa.
- Um aço temperado superficialmente fica com tensões de residuais de compressão, dependendo da espessura da camada temperada.



METMAT

Tensões térmicas e de transformação

- ✓ Têmpera superficial por chama ou por indução



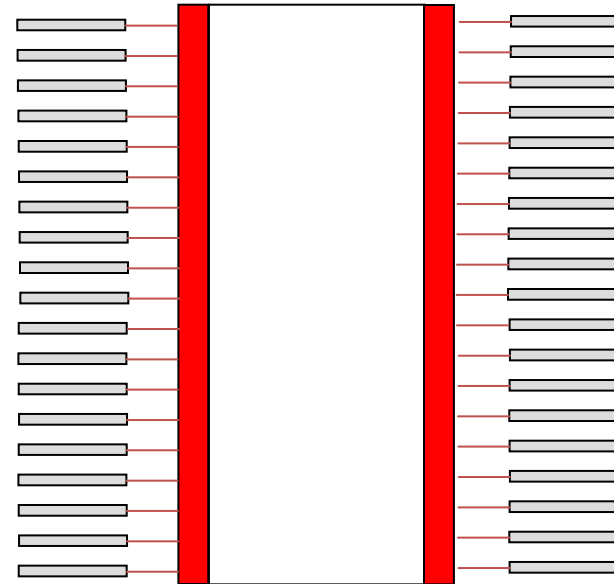
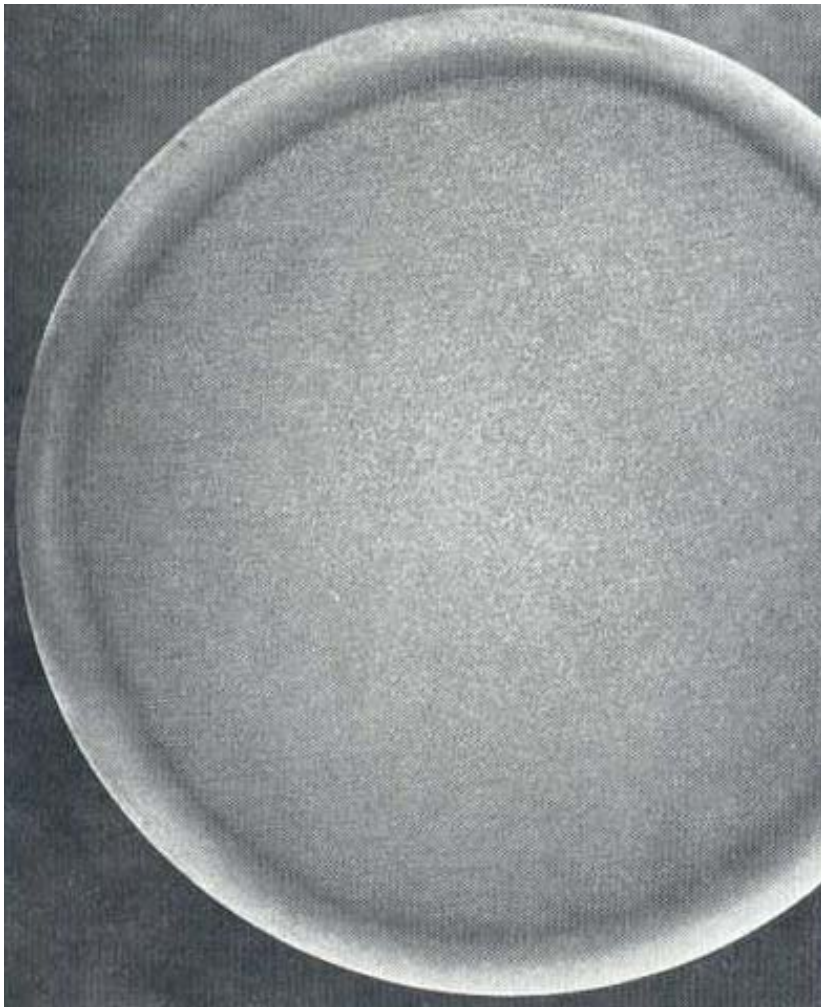
T "alta" - Deformação Plástica



METMAT

Tensões térmicas e de transformação

Têmpera superficial por
chama ou por indução



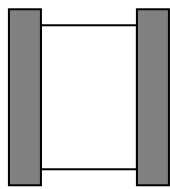
T "baixa" - Maior Resistência



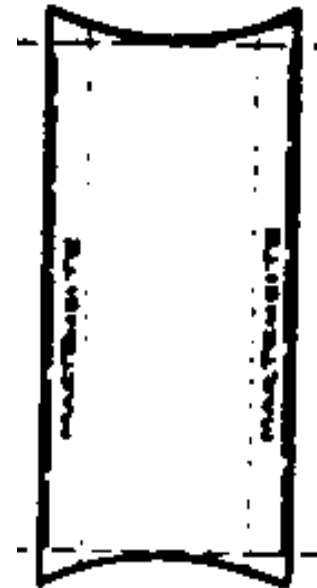
METMAT

Têmpera superficial – tensões residuais

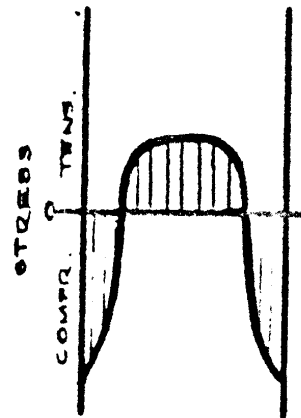
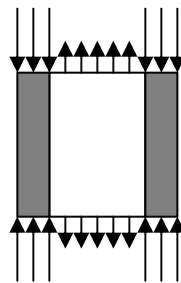
- ✓ Transformação martensítica tem uma expansão volumétrica associada de 4%
- ✓ Somente a casca é austenitizada



Tendência



- ✓ Casca e núcleo ligados



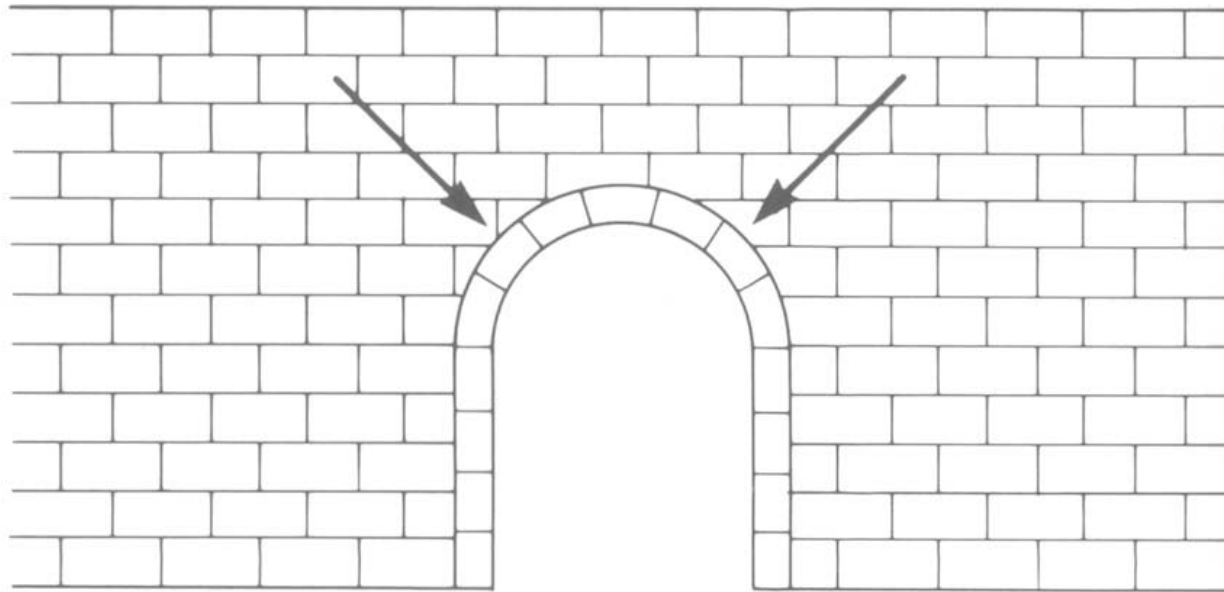
- ✓ Tensões residuais de compressão na superfície



METMAT

Tensões residuais de origem mecânica

- Uma maneira fácil de compreender a atuação de tensões residuais de origem mecânica imagine o princípio de funcionamento do arco.
- Quanto maior o peso das paredes maior é a tensão residual de compressão sobre os tijolos do arco. Os tijolos do arco são pressionados para permanecerem ao lado uns dos outros.

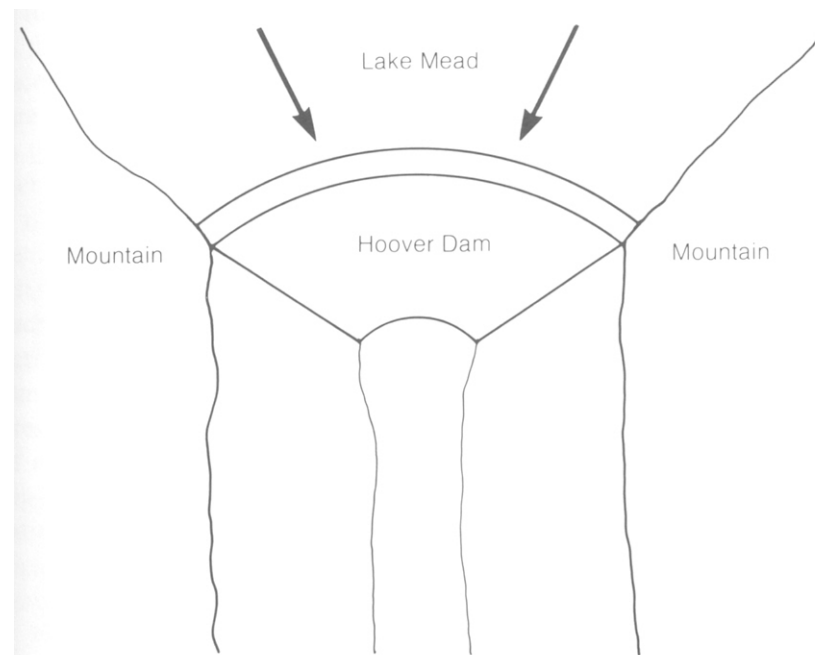




METMAT

Tensões residuais de origem mecânica

- ✓ O mesmo princípio se aplica para barragens gigantescas que retêm enormes volumes de água em represas.



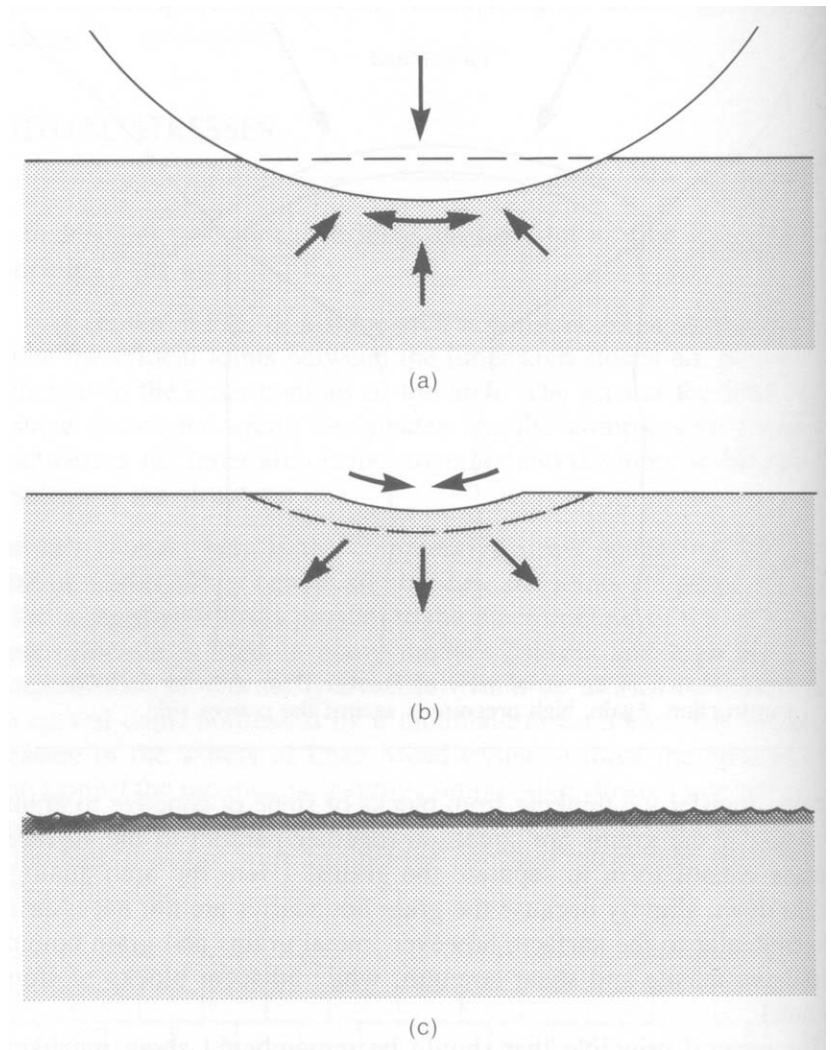
- ✓ Um metal com um enorme número de pequenos grãos tem comportamento semelhante. As tensões residuais de compressão impedem que haja crescimento de uma trinca e separação de grãos.



METMAT

Alguns princípios

- ✓ Escoamento plástico sob tensões de tração induz tensões residuais de compressão, quando a carga é aliviada, devido à recuperação elástica.
- ✓ A indentação de uma esfera na superfície causa encurvamento da mesma e tensões de tração na direção tangencial. As tensões radiais são de compressão.
- ✓ Ao aliviar a carga as tensões invertem, restando tensões residuais de compressão na superfície.



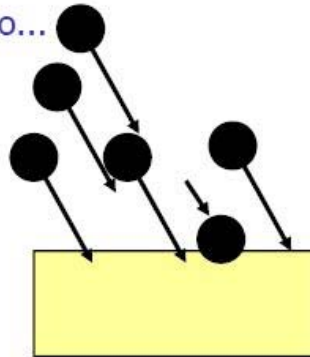


METMAT

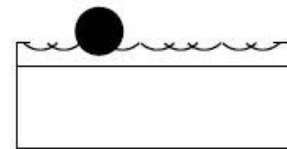
Alguns princípios

- ✓ Quando centenas de esferas incidem sobre uma superfície, a deformação plástica de uma camada superficial tende a expandi-lo sobre a peça; no alívio da carga as tensões remanescentes tornam-se de compressão.

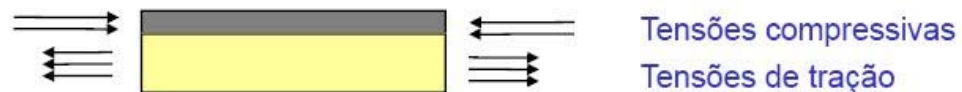
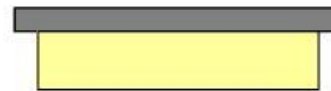
✓ Jateamento...



✓ Deformação...



✓ Tendência do material...



✓ Restrição ao movimento...



METMAT

Aplicações do método

- Encurvamento de perfis de asas de aviões podem ser feitos por shot peening. De acordo com a intensidade de shot peening a curvatura é maior ou menor.
- Desempenamento de eixos dobrados ou encurvados, pode ser conseguido fazendo-se a laminação do lado côncavo do eixo.



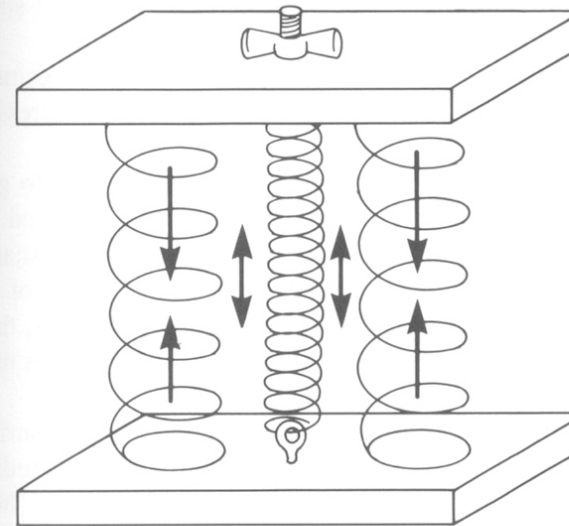
Nachman expanded the application of shot-peening, bombarding the surface of a metal with tiny steel balls, by introducing the process into the production of aircraft wings, including those of the Airbus A340 (top) and the Lockheed Super Constellation (center). Above, a wing section of a Super Constellation.



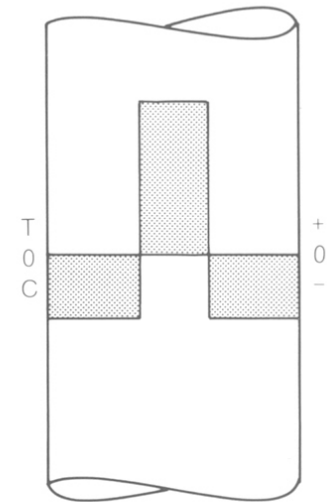
METMAT

Analogia das molas

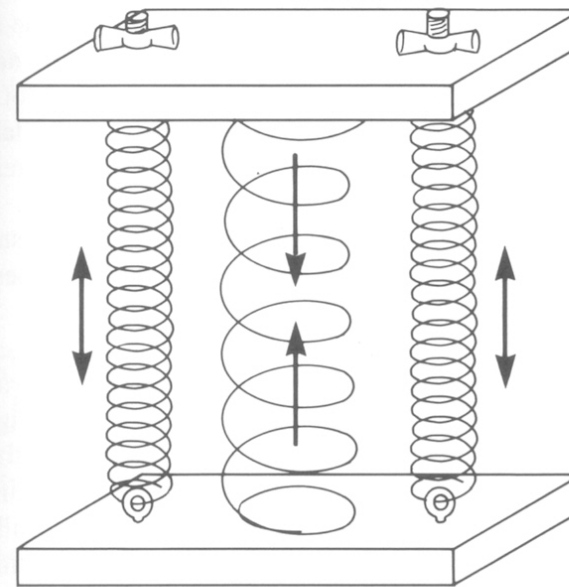
- A visualização das tensões internas em uma peça pode ser facilitada utilizando-se a analogia das molas.
- Molas de tração e compressão representam tensões residuais de tração ou compressão.
- Nas figuras o sistema encontra-se em equilíbrio



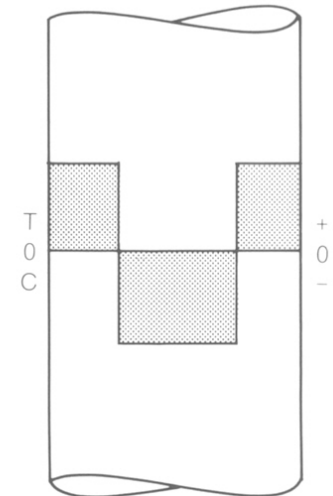
(a) Compressive stresses outside, tensile stress inside



Residual stress diagram



(b) Tensile stresses outside, compressive stress inside



Residual stress diagram

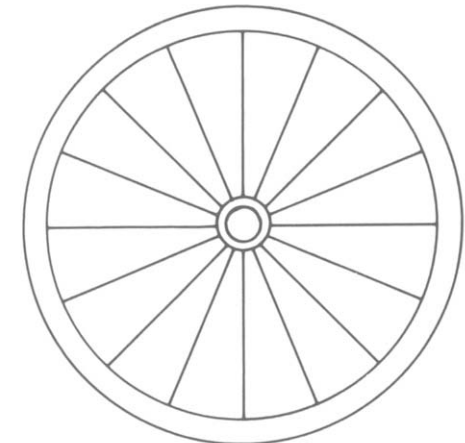
Tensões em sistemas

➤ Roda de bicicleta:

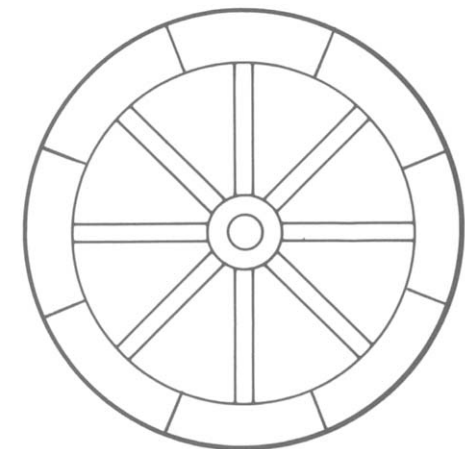
- ✓ Raios = tensão de tração
- ✓ Aro = tensão de compressão
- ✓ Cubo = tensão de tração

➤ Roda de carroça (sobre a qual foi colocada uma cinta de borracha esticada como pneu).

- ✓ Raios = tensão de compressão
- ✓ Pneu = tensão de tração
- ✓ Cubo = tensão de compressão



(a)



(b)



METMAT

Avaliação de tensões residuais

➤ Método da dissecação ou trepanação

- ✓ Se uma barra cilíndrica, com tensões residuais de compressão na superfície, é torneada, de forma a retirar a superfície sob compressão, a parte restante de menor diâmetro tende a encolher e fica mais curta (a tensão residual era de tração na região do núcleo).
- ✓ Se na mesma barra o faz-se uma trepanação do núcleo (retirada por furação ou usinagem) o tubo restante fica mais comprido.
- ✓ Ao se furar uma peça metálica com uma broca pode ocorrer:
 - travamento da broca no furo, pois há encolhimento do furo devido a tensões residuais de tração na direção radial.
 - a broca pode passar a girar folgada caso as tensões residuais na direção radial sejam de compressão.

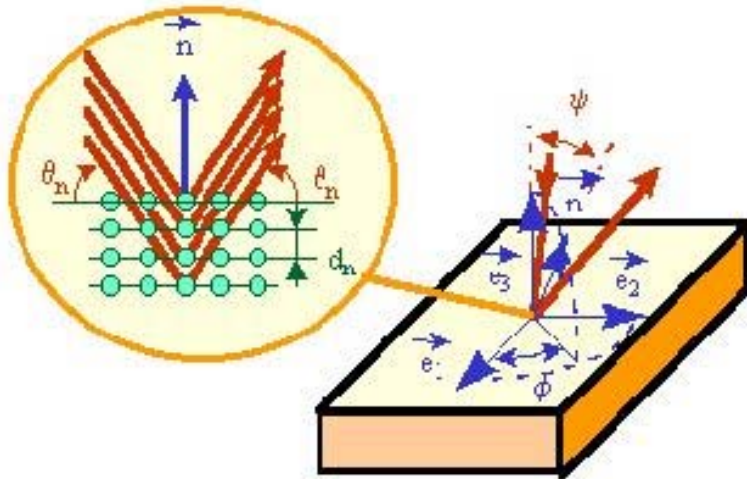


METMAT

Avaliação de tensões residuais

➤ Método dos raios-X

- ✓ Baseado em medidas dos parâmetros cristalinos medidos em três diferentes ângulos de incidência.
- ✓ As tensões de tração ou compressão distorcem o reticulado em determinadas direções.



$$\varepsilon_n = \frac{d - d_0}{d_0}$$
$$\varepsilon_n = \frac{\sin\theta_0 - \sin\theta_n}{\sin\theta_n}$$
$$\lambda = 2 d_n \sin\theta_n$$
$$\lambda = 2 d_0 \sin\theta_0$$