



Análise de Falhas

PG-MEC - TM703

Prof Adriano Scheid

2010



Colapso do Wright Flyer, 1908.



Técnicas de Análise de Falhas

Introdução:

Uma **FALHA** pode ser definida com sendo o evento que resulta na impossibilidade de operação de uma peça, componente ou sistema.

Uma **Fratura** é usualmente o mais sério tipo de falha e pode levar a um resultado desastroso. **Distorções, Desgaste e Corrosão** são outros tipos de falha e que, algumas vezes, levam à fratura.



Procedimento para Análise de Falhas

Em seguida serão apresentados os principais estágios da análise de falhas, entretanto, deve ser enfatizado que:

- 1- O mais importante passo inicial é “fazer nada” ou, simplesmente, estudar as evidências, pensar sobre o componente que falhou, perguntar detalhes sobre como ocorreu a falha, tomar nota de todas as informações relativas ao ocorrido.**
- 2- É usual fazer registros das partes que falharam usando técnicas de estereoscopia e fotografia, a fim de registrar o estado das peças.**



Técnicas de Análise de Falhas

Os **13** estágios da Investigação:

1- Coletar dados básicos do componente, operação e manutenção

2- Realizar exame preliminar da parte que falhou e registrar por fotografia

3- Exame macroscópico com registro fotográfico (superfície de fratura, trincas secundárias e outros fenômenos de superfície).

4- Seleção, identificação, preservação, limpeza de amostras (comparação com componentes que não falharam)

5- Inspeccionar por meio de técnicas não-destrutivas

6- Executar ensaios mecânicos (dureza, tenacidade, ...)



Técnicas de Análise de Falhas

Os **13** estágios da Investigação:

7- Seleção e preparação de amostras metalográficas

8- Microscopia Ótica e Eletrônica de Varredura

9- Determinação do micromecanismo de falha

10- Análise química (núcleo, local, superficial, de produtos de corrosão, depósitos ou revestimentos, além de análise por EDS)

11- Análise de Mecânica da Fratura

12- Testes sob condições de serviço simuladas

13- Análise de todas evidências, formulação de conclusões e escrita do relatório.



Técnicas de Análise de Falhas

Três princípios que devem ser cuidadosamente seguidos:

1- Localização da Origem da Fratura

Nenhum procedimento de laboratório deve impedir a análise que permita identificar a origem da fratura. É desejável ter as duas superfícies de fratura em condição não danificada.

2- Não junte as superfícies de fratura, exceto se for feito com muito cuidado

As superfícies de fratura são frágeis e danificam facilmente. A proteção das superfícies de fratura é importante, especialmente se forem analisadas em MEV. As superfícies deverão ser adequadamente armazenadas, protegidas da corrosão e do contato com os dedos.

3- Nenhum teste destrutivo deverá ser realizado sem avaliação criteriosa

Corte, usinagem e esmeril podem arruinar a investigação. Exames destrutivos somente deverão ser realizados após esgotar a análise prévia, com registros dos dados e fotografias.



Técnicas de Análise de Falhas

Questões a serem feitas sobre Fraturas

1- Superfície de Fratura:

Qual é o modo de fratura?

a- A origem da fratura é visível? Está localizada na superfície ou abaixo dela? (A localização depende da tensão relativa e gradientes de tensão)

b- Qual é a relação entre a direção de fratura e as direções esperadas?

c- Quantas origens de fratura existem?

d- Existe evidência de corrosão, pintura ou outro material estranho na superfície de fratura?

e- A tensão foi unidirecional ou alterou a direção?



Técnicas de Análise de Falhas

Questões a serem feitas sobre Fraturas

2- Superfície do Componente:

a- Qual é o campo de contato da superfície do componente? (aparecem como regiões levemente mais polidas e revelam como o componente foi carregado em serviço)

b- A superfície do componente foi deformada por carregamento em serviço?

c- Existem danos no componente devidos a montagem, manufatura, reparo ou serviço?

3- Projeto e Geometria do Componente:

a- Existe concentração de tensão relacionada à fratura? (raios, splines, chavetas, etc)

b- O componente foi concebido para rigidez ou para ser flexível como uma mola?



Técnicas de Análise de Falhas

Questões a serem feitas sobre Fraturas

3- Projeto e Geometria do Componente:

- c- O componente apresenta projeto adequado?**
- d- Como é o componente em relação à sua montagem?**
- e- O dimensionamento da peça foi adequado?**

4- Manufatura e Processamento:

- a- Existem descontinuidades internas ou tensões que podem levar à falha?**
- b- Se o componente foi conformado, como estão os aspectos como dobras, tamanho de grão, inclusões ou outras descontinuidades? O mesmo para fundidos, soldados, usinados, ...**
- c- Se o componente foi tratado termicamente, como está a profundidade de endurecimento, descarbonetação, revenimento, microestrutura?**



Técnicas de Análise de Falhas

Questões a serem feitas sobre Fraturas

5- Propriedades do Material:

- a- As propriedades mecânicas atendem a especificação?**
- b- As propriedades são adequadas para a aplicação?**

6- Relação entre a tensão aplicada e as tensões residuais:

Tensões residuais podem ter efeito benéfico ou não ao componente. Devem ser avaliadas as tensões residuais, normalmente por técnicas de difração de raios-X.

7- Componentes adjacentes ao que falhou:

- a- Qual foi a influência dos componentes adjacentes sobre a falha?**
- b- Os fixadores (parafusos) foram adequadamente fixados? (torque)**



Técnicas de Análise de Falhas

Questões a serem feitas sobre Fraturas

8- Montagem:

- a- Existe evidência de desalinhamento na montagem?**
- b- Existe evidência de componentes fora de dimensões? (interferência na montagem)**

9- Condições de serviço:

É um campo de difícil investigação, que normalmente envolve posturas defensivas. Mesmo assim, é importante investigar, entrevistar e coletar dados.

- a- Existe evidência de sobrecarga ou excesso de velocidade?**
- b- Houve manutenção adequada da máquina ou componente?**
- c- Qual é a condição geral da máquina?**



Técnicas de Análise de Falhas

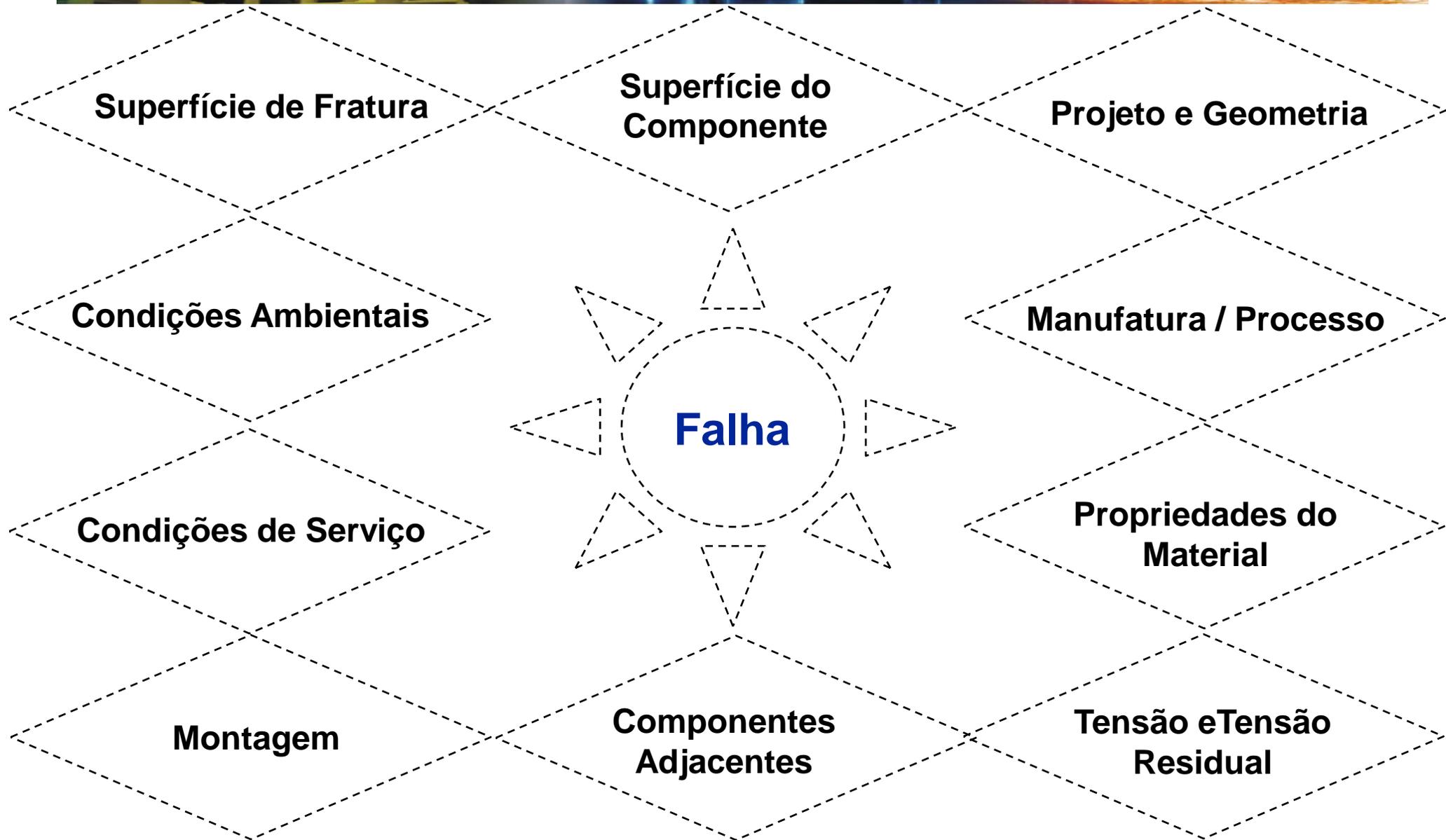
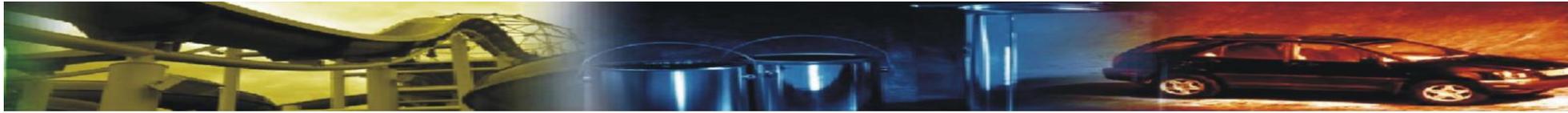
Questões a serem feitas sobre Fraturas

10- Condições Ambientais:

Devem ser observados a manufatura, embalagem, estocagem, manutenção e serviço, levando em conta que historicamente os componentes estão sujeitos a falhas que envolvem o meio ambiente, a partir de processos corrosivos e temperatura.

a- Que tipo de reações químicas podem ter ocorrido durante a vida do componente?

b- A que temperatura o componente foi exposto durante o serviço? (Baixas temperaturas – transições dúctil-frágil, altas temperaturas – degradação / desgaste)





Falhas por Distorção

Introdução

O termo “Falha” tem sido usado com significado de incapacidade de um componente de cumprir com sua função concebida por quaisquer razões.

Distorções tem sido identificadas prontamente como resultado da mudança na forma ou tamanho e são acompanhadas por tensões residuais.

Falhas por Distorção são sérias pois podem levar a outros tipos de falha ou podem levar ao colapso de estruturas, como pontes e colunas.

Distorções em elevadas temperaturas (fluência), dependem do projeto do componente e das propriedades do material em elevada temperatura.



Falhas por Distorção

Tipos de Distorção

Distorções de Tamanho: mudanças de volume (aumento ou redução).

Distorções de Forma: Estiramento, dobramento, torção ou flambagem.

Distorções Temporárias: Uma vez que os metais apresentam elasticidade, surge uma distorção mesmo para pequenas tensões (molas, pontes).

Em algumas peças, a deflexão pode ser suficiente para causar a interferência com outros componentes. Engrenagens devem ter projeto cuidadoso para evitar esta interferência entre dentes.



Falhas por Distorção

Tipos de Distorção

Distorções Permanentes: São resultado do escoamento em serviço, fluência ou flambagem.

Escoamento em Serviço:

Ocorre quando a carga de serviço excede o limite de escoamento do material, resultando em deformação permanente. Uma mola, por exemplo, perde a sua altura original quando isto acontece.

Este tipo de falha envolve a análise da microestrutura, dureza, condições de serviço (carga, temperatura).

Fluência:

A fluência é um fenômeno dependente do tempo em que a deformação ocorre em componentes carregados permanentemente quando expostos a elevadas temperaturas.

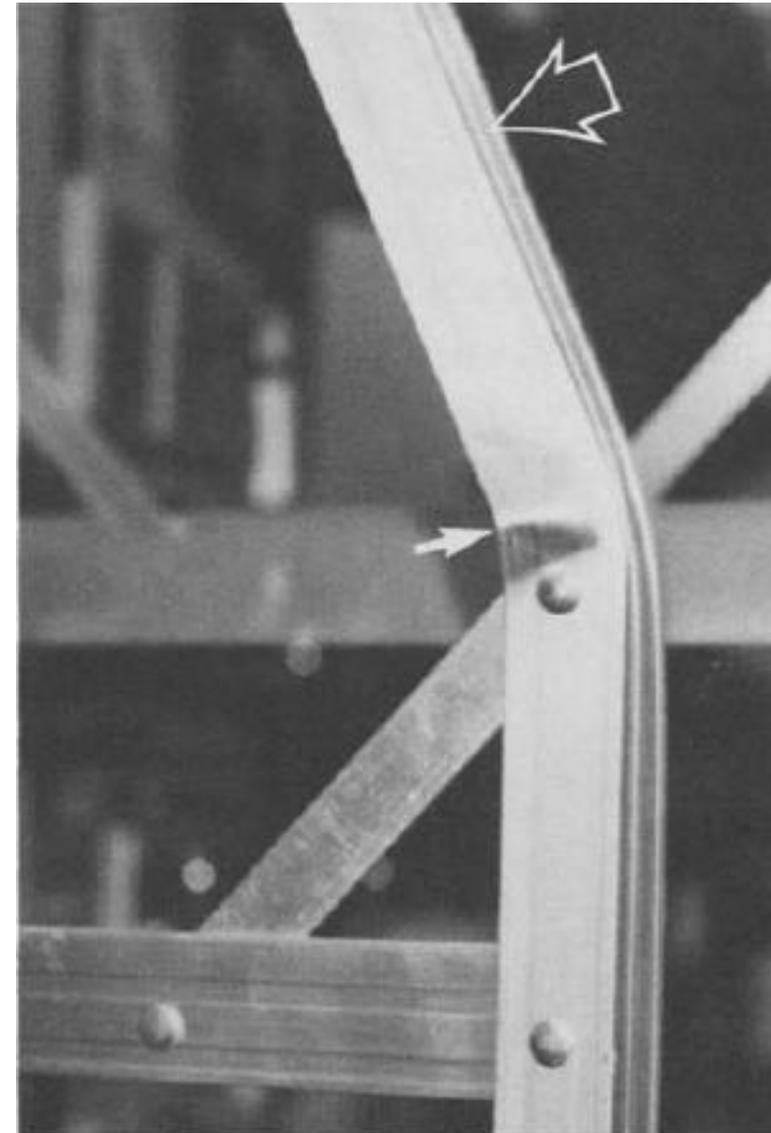


Falhas por Distorção

Tipos de Distorção

Flambagem:

É definida como o colapso que ocorre devido à instabilidade em compressão. É comum quando longas colunas são comprimidas na direção axial.





Modos de Fratura em Carga Monotônica

Introdução

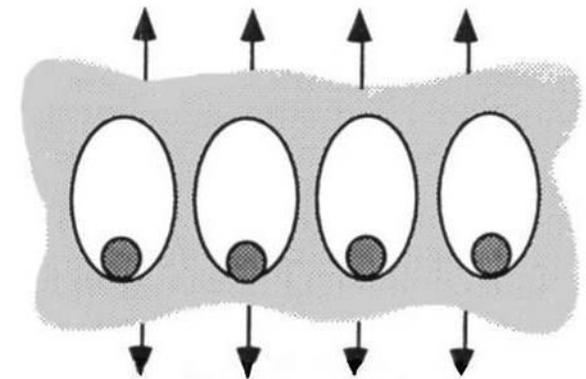
Existem dois modos em que os metais podem fraturar sob cargas únicas ou monotônicas: Cisalhamento e Clivagem. Estes dependem de como a estrutura cristalina do metal se comporta sob carregamento.

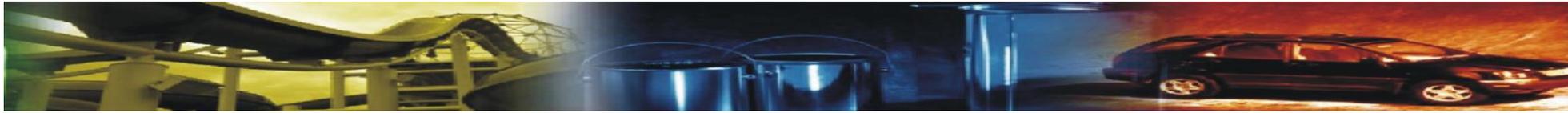
Cisalhamento:

A deformação por cisalhamento representa a movimentação de planos de átomos na estrutura cristalina. Quando a tensão supera o limite de escoamento, ocorre o escorregamento irreversível em planos de átomos.

Se a tensão é elevada até a fratura, a deformação pelo cisalhamento leva à formação de pequenas microcavidades nas regiões de maior tensão. Estas microcavidades então coalescem e se interconectam.

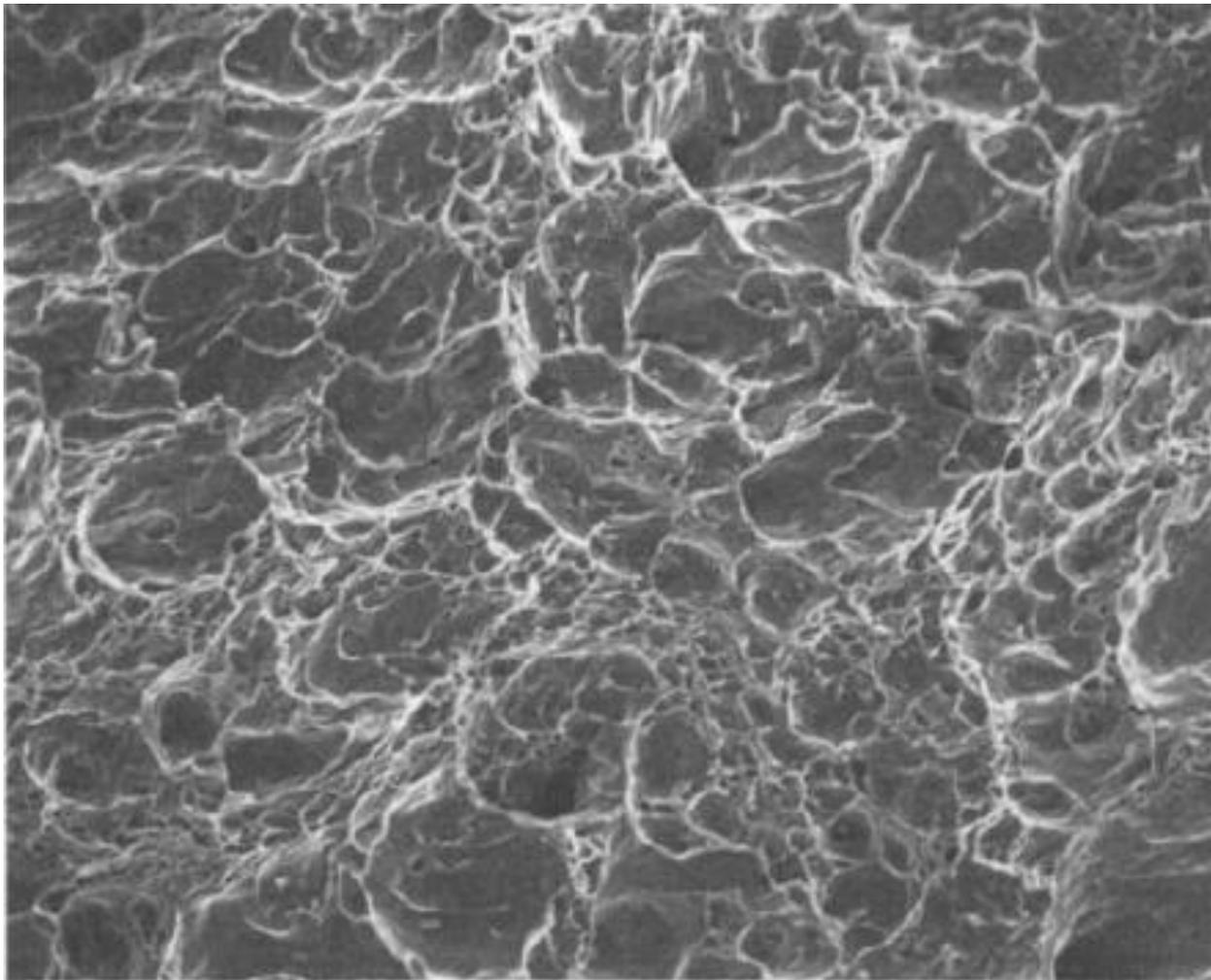
A superfície de fratura apresenta muitas metades de microcavidades, chamadas de “dimples”, em cada lado da fratura.





Modos de Fratura em Carga Monotônica

Fratura por Cisalhamento (Coalescência de Microcavidades)





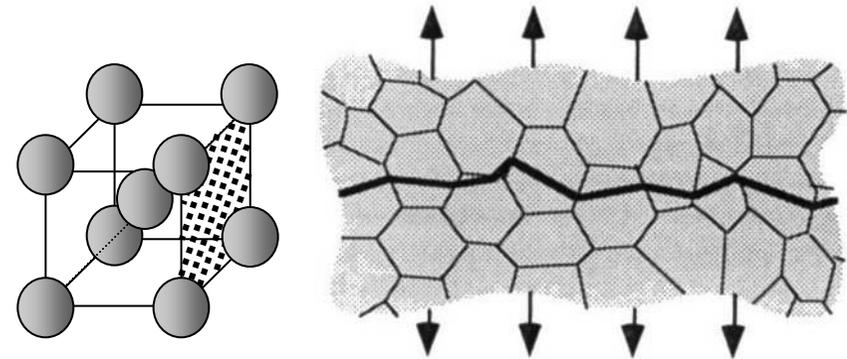
Modos de Fratura em Carga Monotônica

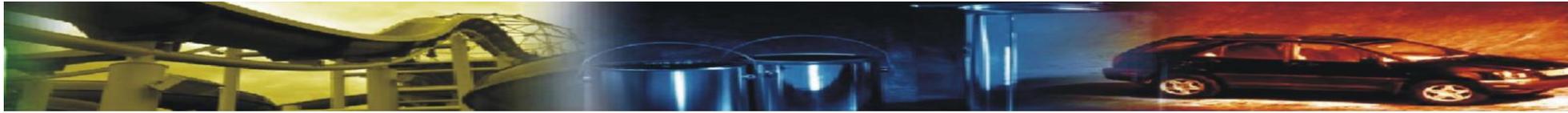
Clivagem:

Uma diferença básica da clivagem está no modo de separação da célula unitária. A separação ocorre repentinamente entre uma face da célula unitária e a face gêmea da célula adjacente. Nenhuma deformação está presente, pelo menos em escala macroscópica.

A Clivagem ocorre em metais de dureza e resistência relativamente elevada embora, sob certas condições (como baixa temperatura), metais que normalmente fraturam por cisalhamento podem fraturar por clivagem. Metais que cristalizam com estrutura CFC (Alumínio e Aço Inoxidável Austenítico) não fraturam por clivagem.

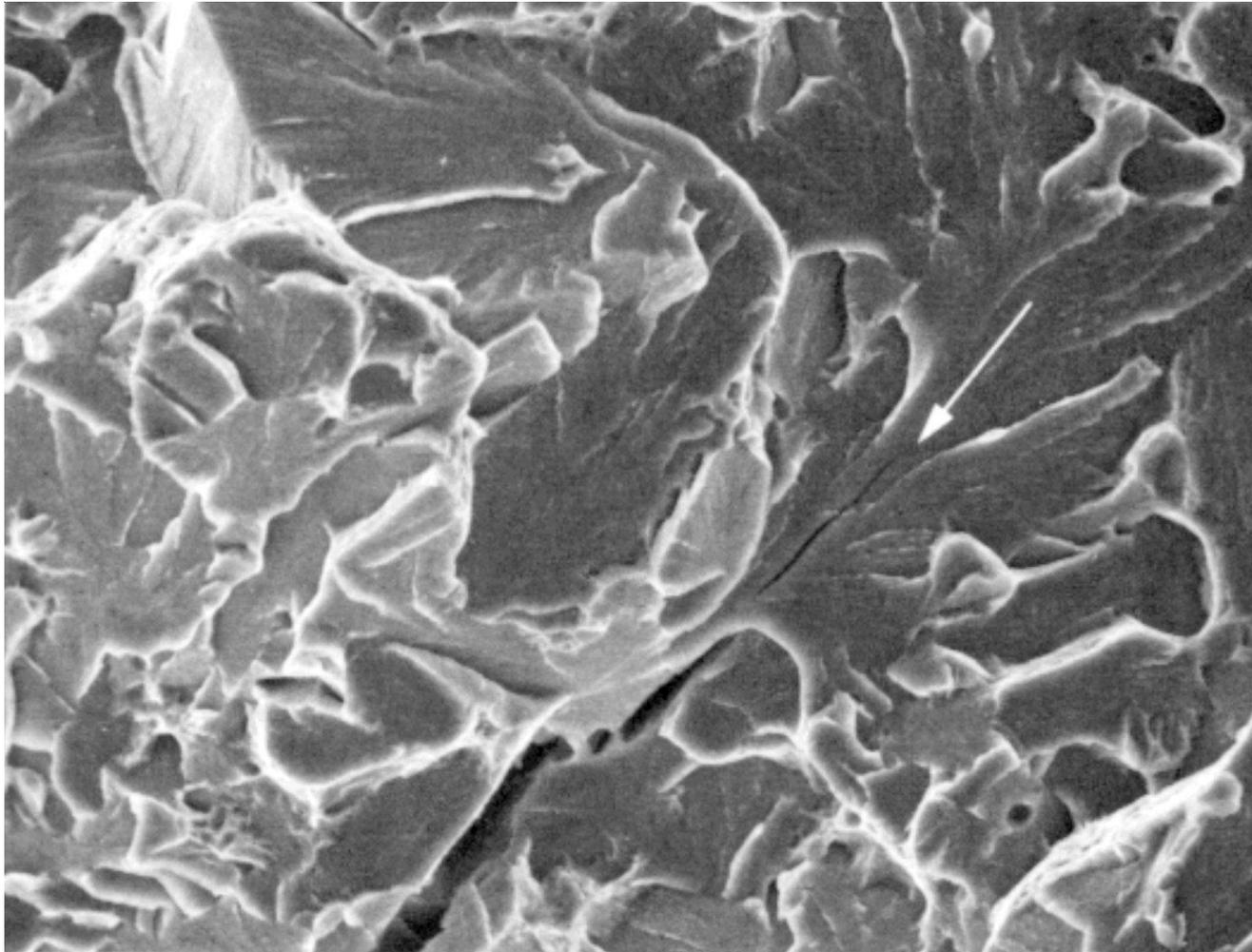
Em escala microfractográfica, a clivagem ocorre *ao longo dos planos das faces das células unitárias*, mas são vistas como uma fissuração dos grãos, com nenhuma relação aos seus contornos.





Modos de Fratura em Carga Monotônica

Fratura por Clivagem





Modos de Fratura em Carga Monotônica

Diferenças entre a Fratura por Cisalhamento e Clivagem:

Fator	Cisalhamento	Clivagem
Movimento	Escorregamento	Destacamento
Ocorrência	Gradual	Súbita
Deformação	Sim	Não
Comportamento	Dúctil	Frágil
Aparência visual da Fratura	Fosca e Fibrosa	Brilhante
Microfractografia	Ruptura por “Dimples”	Clivagem

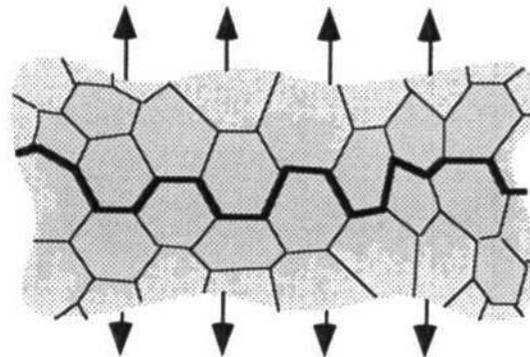


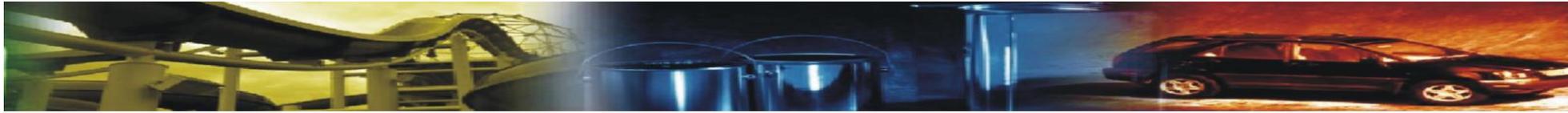
Outros Modos de Fratura em Carga Monotônica

Fratura Intergranular

Modo de fratura que ocorre quando os contornos dos grãos estão mais fracos (fragilizados) em relação ao interior dos grãos. Neste caso, a fratura ocorre preferencialmente ao longo dos contornos dos grãos, e não através dos mesmos.

É possível visualizar em MEV os lados dos grãos ou suas facetas. Este tipo de falha é típica da presença de agentes externos, como absorção de Hidrogênio, elevadas temperaturas e certos processos corrosivos quando o metal está sob tensão, processos de sensitização (aços inoxidáveis), entre outros.





Modos de Fratura em Carga Monotônica

Fratura Intergranular

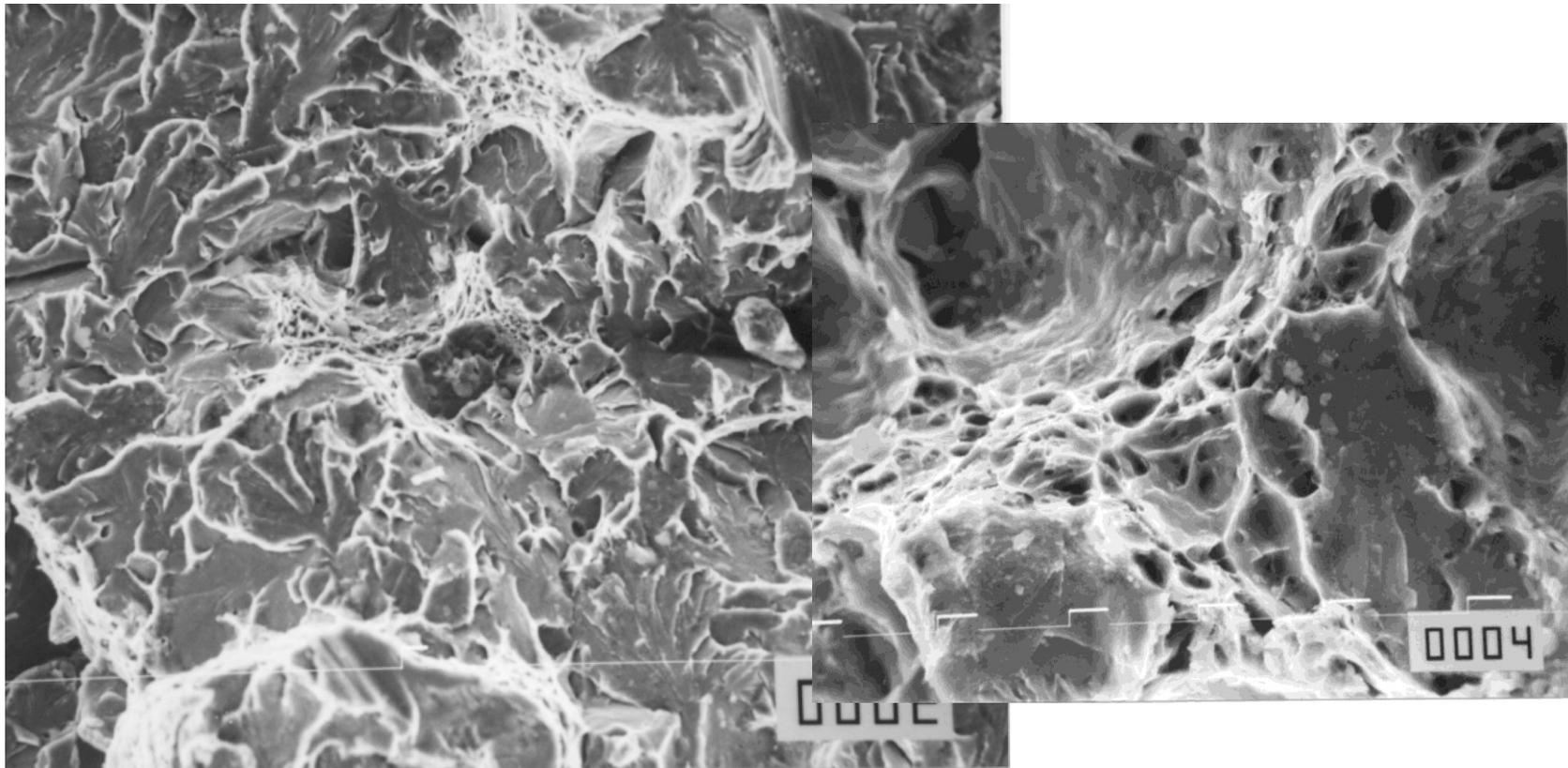




Modos de Fratura em Carga Monotônica

Fratura por Quase-Clivagem

Modo de fratura que ocorre em aços Temperados e Revenidos. É considerado uma combinação de cisalhamento e clivagem devido à presença de “microdimples” nos planos da fratura por clivagem.





Outros Modos de Fratura

Fratura por Fadiga

Não é causada por um carregamento monotônico como os modos anteriores. É o resultado do efeito cumulativo de um grande número de carregamentos com tensão insuficiente para causar fratura nos modos anteriores.

As cargas repetitivas, resultantes de milhares de ciclos de aplicação antes da fratura, exercem uma ação de cisalhamento na estrutura cristalina, que tende a causar inevitavelmente a formação de defeitos que tendem a se juntar, desenvolvendo uma microtrinca em certos cristais vulneráveis.

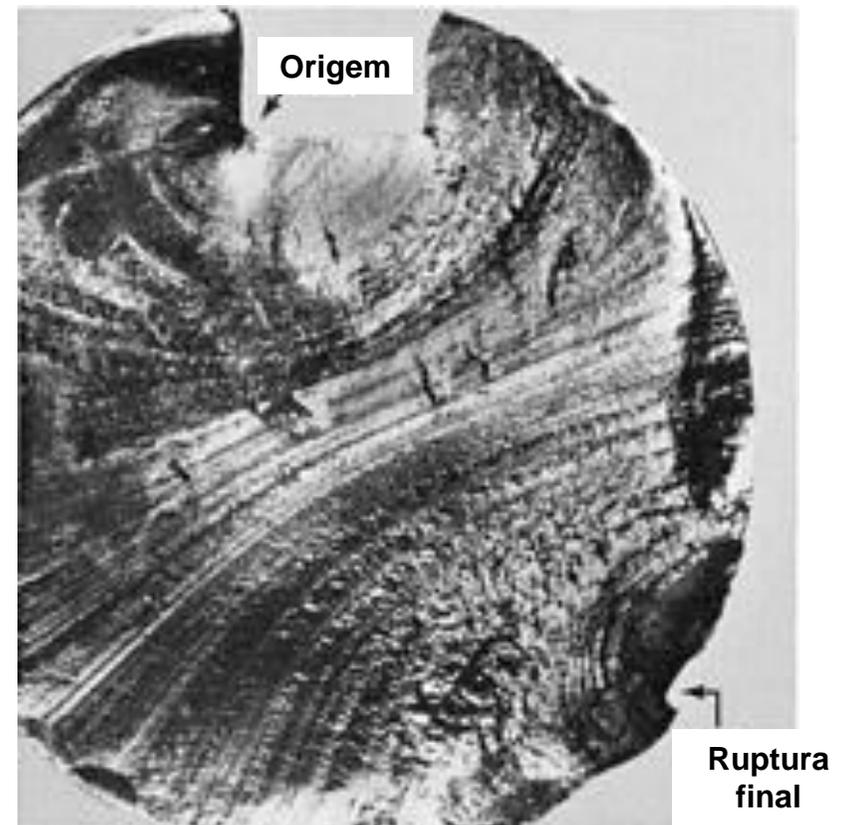
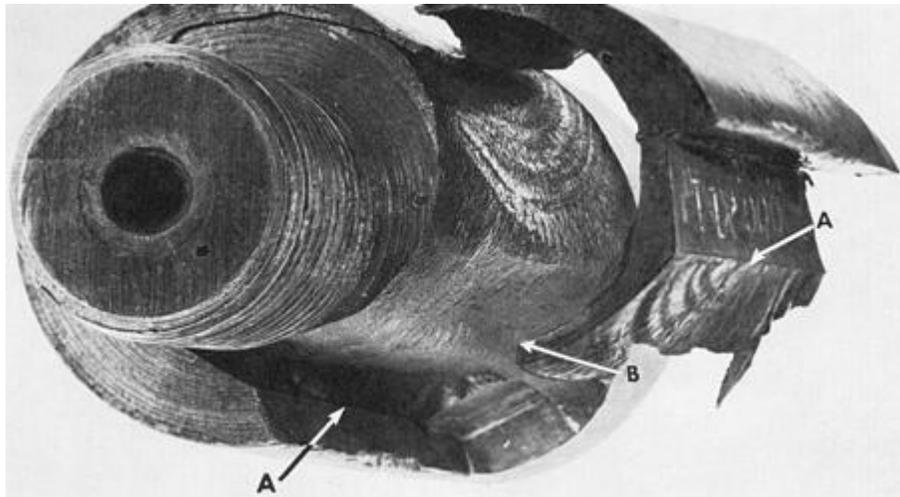
As tensões repetitivas automaticamente localizam os cristais com a orientação mais fraca nas regiões de elevada tensão. O carregamento cíclico contínuo faz com que as trincas cresçam gradualmente, tornem-se mais profundas e desenvolvam taxa crescente de avanço.

À medida que a profundidade das trincas aumenta, a resistência da seção resistente do metal diminui.



Outros Modos de Fratura

Fraturas por Fadiga



Marcas de Praia Visíveis

Fatores que afetam a relação Dúctil-Frágil

Temperatura

Em todos os metais, comportamento dúctil é mais comum em elevadas temperaturas a menos que outro fator complicador (normalmente ambiental) apareça. Por outro lado, comportamento frágil é mais comum em baixas temperaturas, especialmente para metais CCC.

Taxa de Carregamento

Baixas taxas de carregamento tendem a promover comportamento dúctil, permitindo que o cisalhamento ocorra em certos planos cristalográficos. Elevadas taxas de carregamento promovem comportamento frágil, uma vez que a deformação leva tempo para ocorrer. Portanto, menor tempo para aplicação da carga, menos deformação pode ocorrer.

Pressão Hidrostática

Um material normalmente frágil apresenta comportamento dúctil quando submetido a elevadas pressões hidrostáticas.

Fatores que afetam a relação Dúctil-Frágil

Geometria

Quando não há entalhe ou concentração de tensões, a deformação por cisalhamento deve ocorrer, uma vez que as elevadas tensões aplicadas podem ser distribuídas, resultando em comportamento dúctil. A presença de entalhe severo ou concentração de tensões impede a distribuição de tensões, resultando em fratura frágil.

Tamanho

Por razões metalúrgicas e geométricas, seções finas tendem a fraturar de forma dúctil, enquanto grandes seções tendem a apresentar fratura frágil. Isto é justificado pela maior probabilidade de existir descontinuidades no material (concentrações de tensão) para grandes seções. Em adição, um estado triaxial de tensões aparece mais facilmente em seções grandes.

Fatores que afetam a relação Dúctil-Frágil

Tipo de Carregamento

Um eixo solicitado por tensões de torção apresenta maior tendência a comportamento dúctil, enquanto o mesmo eixo solicitado por tração ou compressão é frágil. Este comportamento é válido para aços de alta resistência e dureza.

Resistência

Em geral, baixa dureza e resistência apresentam fratura dúctil, enquanto materiais de elevada dureza e resistência tendem a ser frágeis.

Exceção:

1- Ferro fundido cinzento apresenta baixa dureza, entretanto, exibe comportamento frágil. Este comportamento é induzido pelos veios de grafita. O efeito geométrico das extremidades pontiagudas dos veios de grafita resulta em grande número de concentradores de tensões ou entalhes e sobrepõe a ductilidade na ruptura que é característica do comportamento dúctil.

Fratura Frágil

Introdução

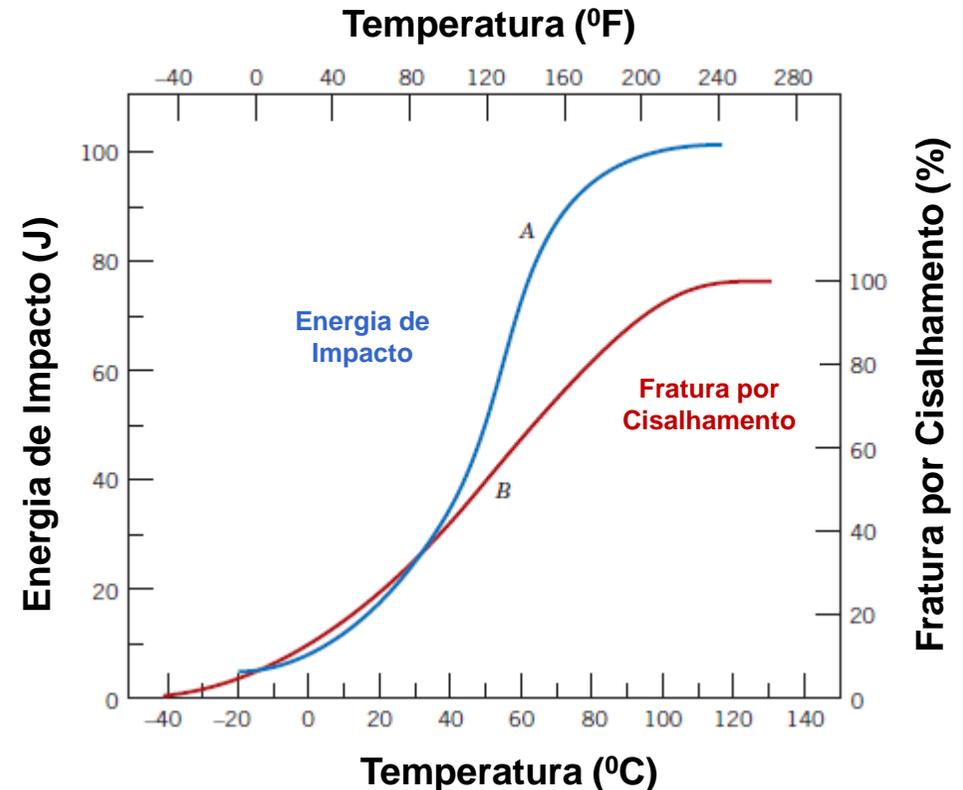
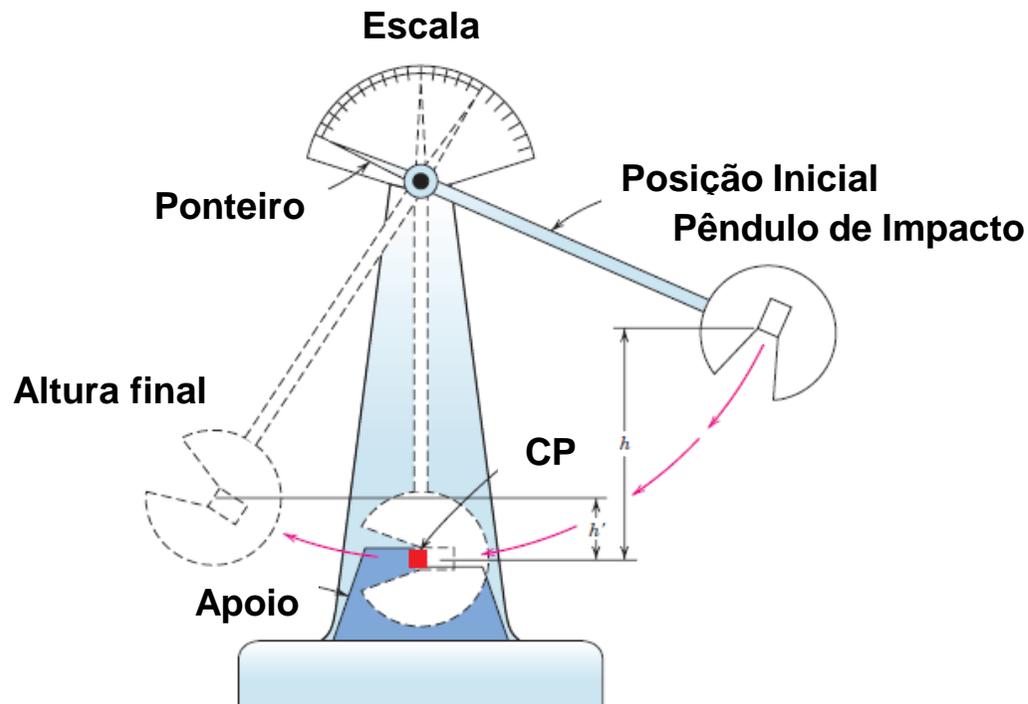
Fratura frágil é aquela em que pouca ou nenhuma deformação ocorre antes da fratura. Este tipo de fratura ocorre em metais de elevada dureza e resistência mecânica, com baixa tolerância à descontinuidades.

Fratura Dúctil é aquela onde considerável deformação plástica ocorre antes da fratura. É usualmente acompanhada por baixa dureza e resistência e considerável tolerância a descontinuidades no material.

Transição Dúctil-Frágil

Este tipo de comportamento ocorreu primeiramente em grandes e contínuas estruturas como vasos de pressão, tubulações, navios de guerra, pontes e outras estruturas restritas, freqüentemente construídas por soldagem.

Histórico: 250 navios na 2ª guerra mundial apresentaram fratura frágil, tendo aços dúcteis como matéria-prima. Destes, 19 romperam ao meio.





Fratura Frágil

Fratura Frágil em Aços Normalmente Dúcteis

Fatores que devem estar presentes simultaneamente para causar fratura frágil:

1- Concentração de Tensões:

Pode ser um defeito de soldagem, uma trinca de fadiga, trinca corrosão-fadiga ou entalhe de projeto como canto “vivo”, rasgo de chaveta ou raio de concordância.

Concentrações de tensão estão freqüentemente presentes pelo projeto, em função da necessidade de cantos “vivos”, furos, chavetas e de forma não intencional por defeitos de fabricação ou uso.

Um grande cuidado tem sido dedicado à prevenção destes fatores que geram concentração de tensão nos metais podendo, mesmo assim, ocorrer e influenciar no comportamento dos aços.

Fratura Frágil

Fratura Frágil em Aços Normalmente Dúcteis

Fatores que devem estar presentes simultaneamente para causar fratura frágil:

2- Tensão Trativa:

A tensão trativa deve apresentar magnitude suficiente para causar deformação plástica microscópica na concentração de tensão. Pode ser tanto uma tensão aplicada como uma tensão residual.

Durante o carregamento em serviço, o aparecimento de tensões trativas é muitas vezes inevitável. Por outro lado, cuidado especial pode ser dedicado para que tensões residuais estejam ausentes ou sejam minimizadas.

3- Temperatura Baixa:

Em baixas temperaturas, a possibilidade de ocorrência de fratura frágil será maior. A temperatura de transição dúctil/frágil pode ser superior à ambiente para alguns aços.

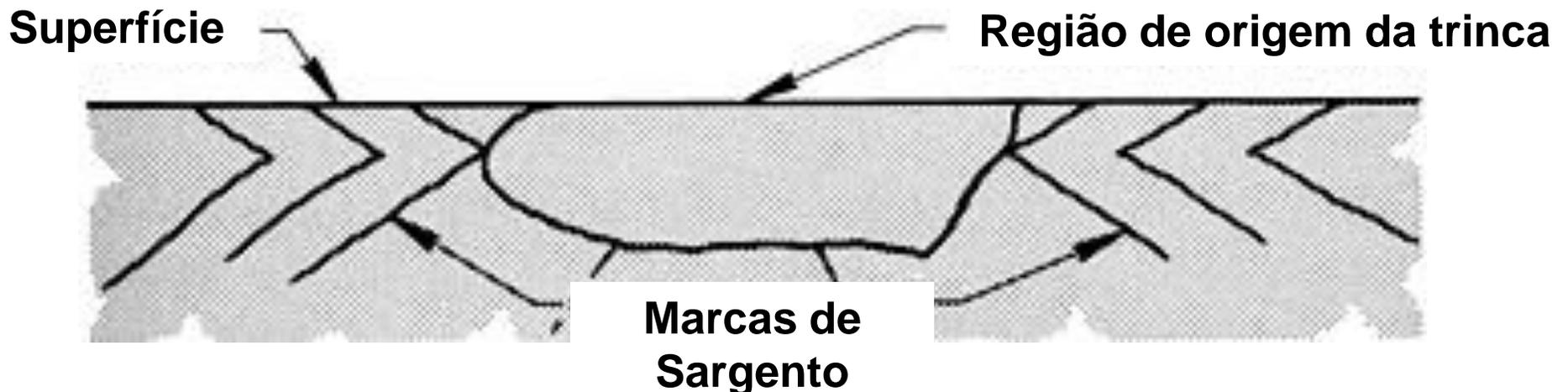
Para certas aplicações a temperatura pode ser controlada, mas não em todos os casos. Neste caso, o aço deve ser o fator de controle.

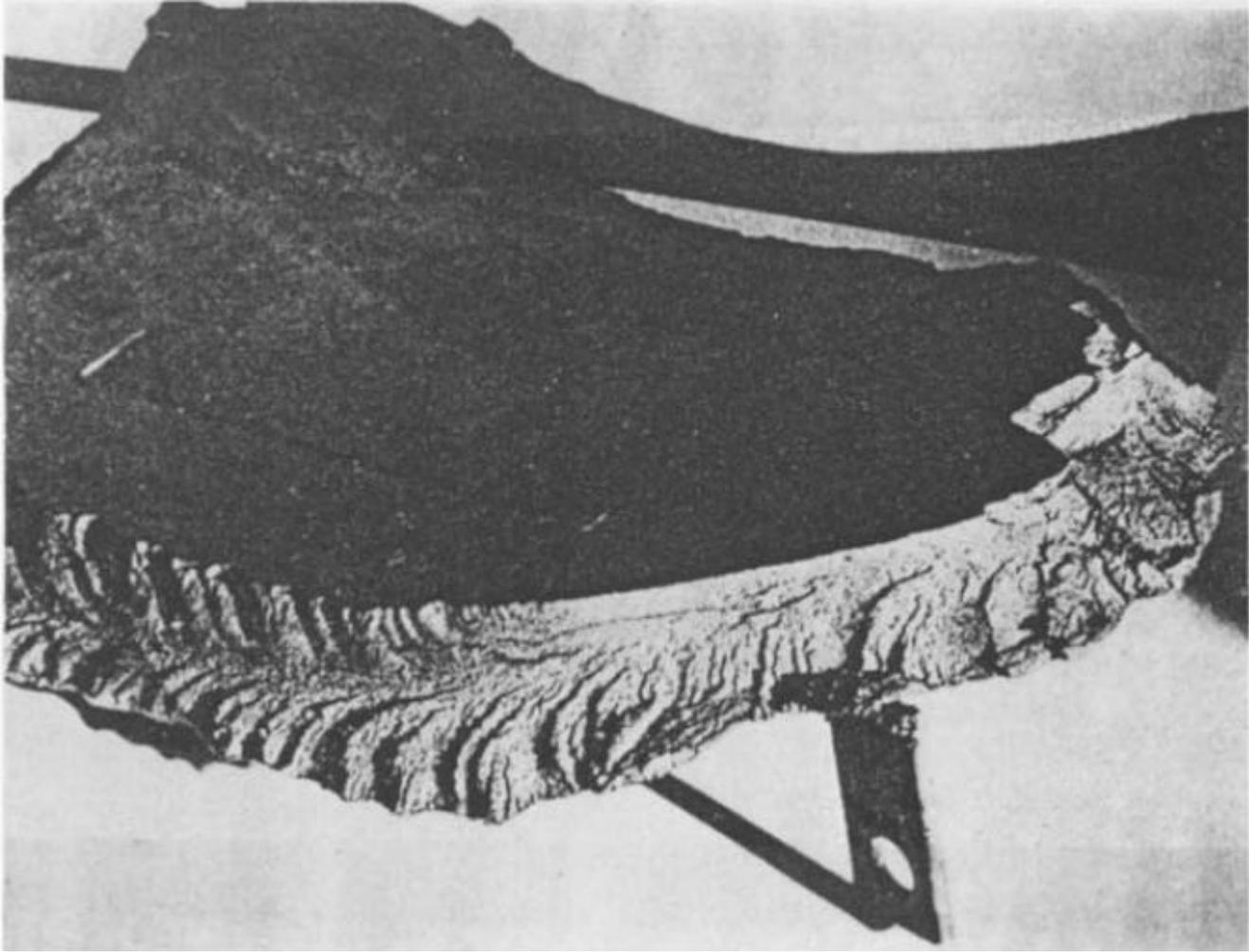
Fratura Frágil

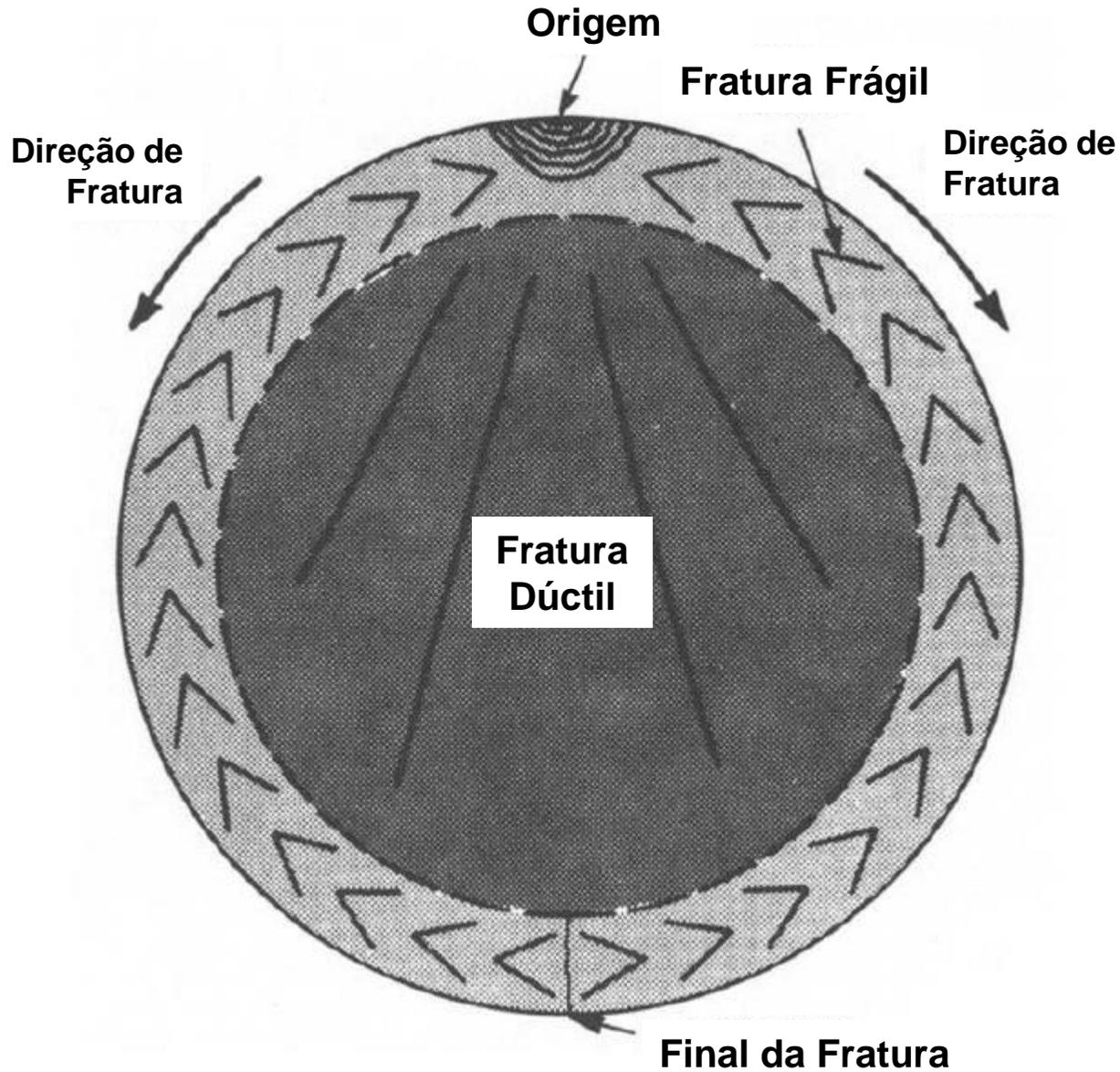
Fratura Frágil em Aços Normalmente Dúcteis

Características da fratura frágil que permitem a sua adequada identificação:

- 1- Não existe deformação plástica na região de fratura frágil
- 2- A superfície da fratura frágil é perpendicular à direção da tensão trativa
- 3- Normalmente (não sempre) marcas na superfície de fratura indicam a origem por uma região escurecida. No caso de aços planos, barras chatas ou regiões endurecidas, marcas de sargento em formato V apontam para a origem da fratura.







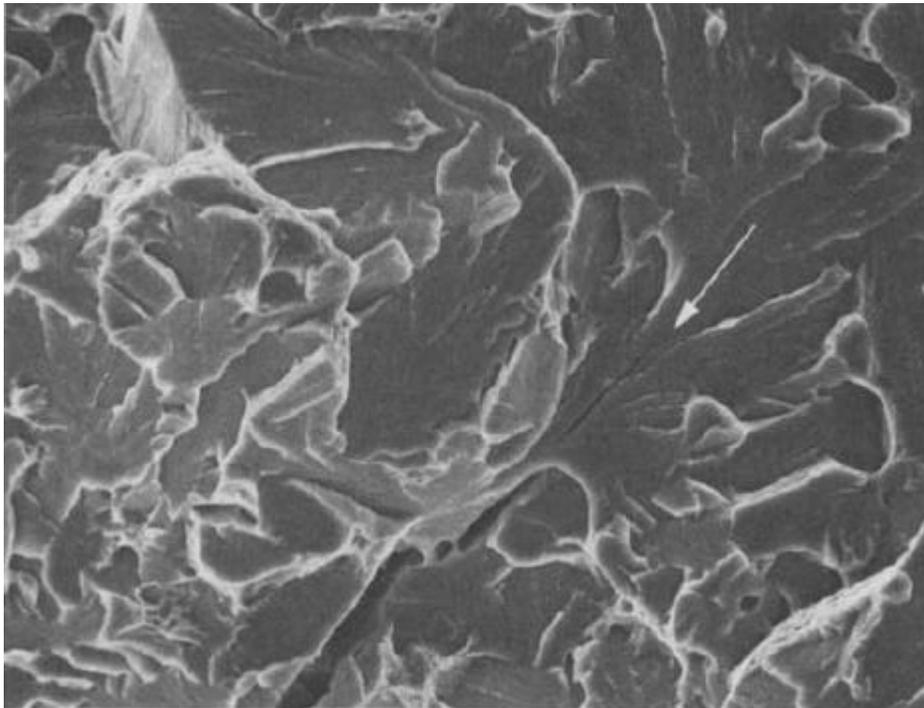
Fratura em Aço Endurecido por Indução. Fadiga a partir de raio de concordância originou a fratura frágil.

Fratura Frágil

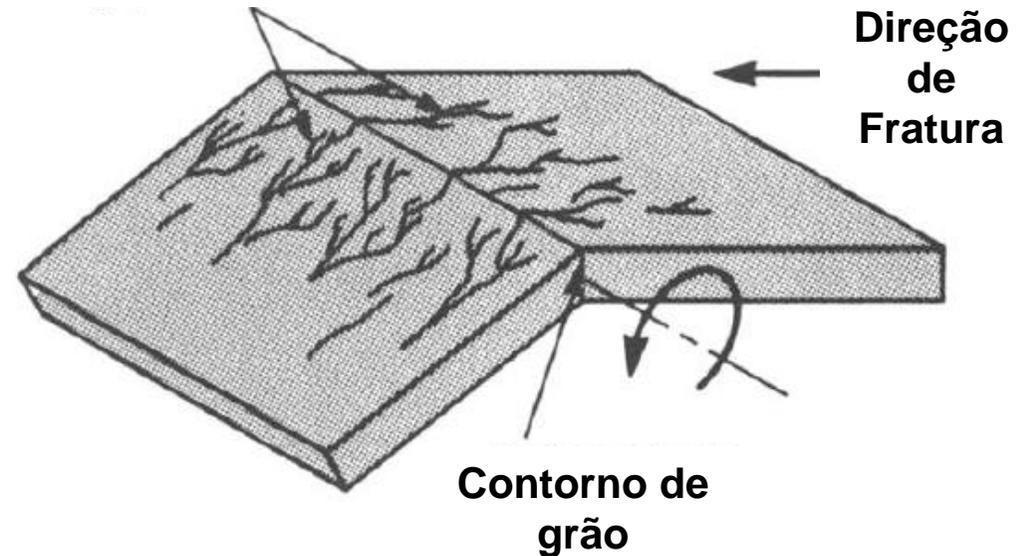
Aspectos Microestruturais da Fratura Frágil - Clivagem

A Fratura Frágil usualmente se propaga tanto por clivagem quanto intergranularmente. A Fratura frágil é caracterizada pelo destacamento de planos cristalinos ou grãos sem relação aos contornos dos grãos.

A clivagem é referida como transcristalina ou transgranular, já que a fratura ocorre através dos grãos.



Planos de Clivagem

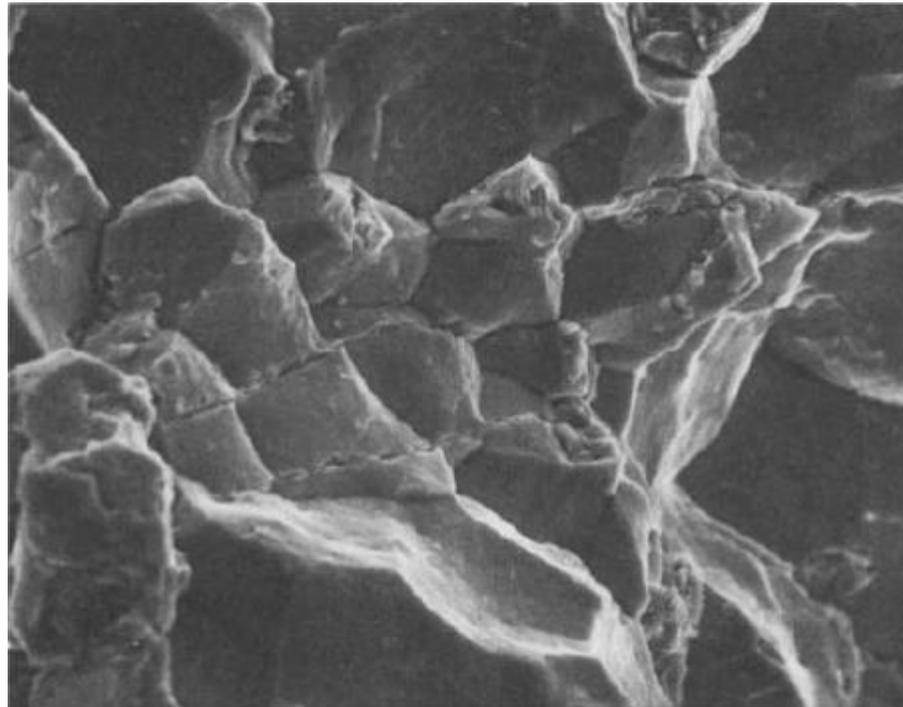


Fratura Frágil

Aspectos Microestruturais da Fratura Frágil - Intergranular

Fratura frágil intergranular é aquela que segue os contornos de grão, enfraquecidos por diversas razões.

Uma analogia pode ser feita a uma parede de tijolos, em que a fratura ocorre através do cimento que une os diversos tijolos. O cimento é análogo ao contorno dos grãos.



Fratura Frágil

Aspectos Microestruturais da Fratura Frágil - Intergranular

Principais formas de fragilização que levam a este tipo de fratura:

1- Envelhecimento por Deformação

Aços baixo Carbono efervescentes ou semi-acalmados (capeados) fortemente conformados a frio e posteriormente aquecidos em recozimento ou Galvanização por imersão a quente ou ainda pintados que passam por estufa, estão sujeitos à fragilização ao envelhecimento por deformação.

2- Envelhecimento por Têmpera

Aços baixo Carbono (0,04 – 0,12wt%) quando resfriados rapidamente na faixa de 560°C podem precipitar carbonetos na estrutura e passar por endurecimento devido à precipitação. Algumas vezes, a fragilização ocorre várias semanas depois do tratamento térmico.

3- Fragilidade Azul

Aços aquecidos entre 230 e 370°C podem desenvolver oxidação azul. Quando resfriados, estes aços apresentam redução notável da ductilidade e resistência ao impacto, induzida pela precipitação de carbonetos.

Fratura Frágil

Aspectos Microestruturais da Fratura Frágil - Intergranular

Principais formas de fragilização que levam a este tipo de fratura:

4- Fragilidade ao Revenido

Fragilização que ocorre em aços ao Manganês, Silício, Níquel, Cromo, quando estão na presença de Antimônio, Estanho ou Arsênio. Esta fragilização ocorre entre 370 e 575°C.

5- Fragilidade entre 400 e 500°C

Aços inoxidáveis ferríticos com grão refinado, normalmente dúcteis, se tornarão frágeis se mantidos entre 400 e 500°C por longos períodos de tempo.

6- Formação de Fase Sigma

Longo serviço entre 560 e 980°C pode causar a formação de fase Sigma dura e frágil em aços ferríticos ou austeníticos.

Fratura Frágil

Aspectos Microestruturais da Fratura Frágil - Intergranular

Principais formas de fragilização que levam a este tipo de fratura:

7- Grafitização

A formação de grafita pode ocorrer na ZAC de aços Carbono e Carbono-Manganês, mantidos em temperaturas superiores a 425°C por períodos prolongados. A fragilização depende da forma, distribuição e tamanho da grafita formada.

8- Compostos Intermetálicos

Exposição de aços galvanizados por um longo período em temperatura logo abaixo da temperatura de fusão do Zinco causa difusão do Zinco para o interior do aço. O resultado é a formação de intermetálico frágil Ferro-Zinco nos contornos de grão.

9- Fragilização ao Hidrogênio

Os átomos de Hidrogênio difundem rapidamente nos aços durante processos de decapagem ácida, eletrodeposição, soldagem a arco com eletrodos úmidos e exposição a ambientes com sulfeto de Hidrogênio.

Fratura Frágil

Aspectos Microestruturais da Fratura Frágil - Intergranular

Principais formas de fragilização que levam a este tipo de fratura:

10- Corrosão sob Tensão

A exposição simultânea à tensões (aplicadas ou residuais) e a ambiente corrosivo, podem causar a fratura frágil em componentes metálicos. A fratura pode ser inter ou transgranular. Quando um dos agentes causadores for eliminado, a falha não ocorrerá.

11- Fragilização em Metal Líquido

Alguns metais, quando expostos a metal líquido, podem fraturar de forma frágil. Normalmente devem estar presentes tensões trativas.

Fratura Dúctil

Introdução

Fratura Dúctil é aquela onde considerável deformação plástica ocorre antes da fratura. É usualmente acompanhada por baixa dureza e resistência e considerável tolerância a descontinuidades no material.

A fratura dúctil resulta da aplicação de força excessiva ao metal, que tem a capacidade de se deformar permanentemente ou plasticamente antes da fratura.

Características da Fratura Dúctil

- 1- Existe considerável deformação plástica na região de fratura dúctil.
- 2- Fraturas dúcteis são aquelas em que a tensão de cisalhamento aplicada excede a resistência ao cisalhamento antes que quaisquer outros modos de fratura possam ocorrer.
- 3- A aparência da fratura dúctil é fosca e fibrosa. Isto é causado pela deformação na superfície de fratura.

Fratura Dúctil

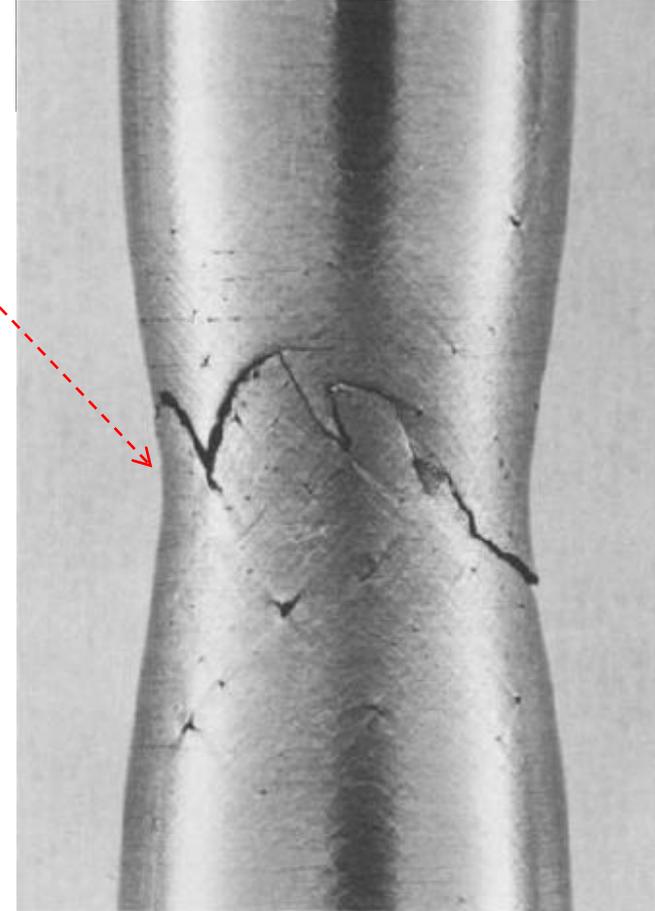
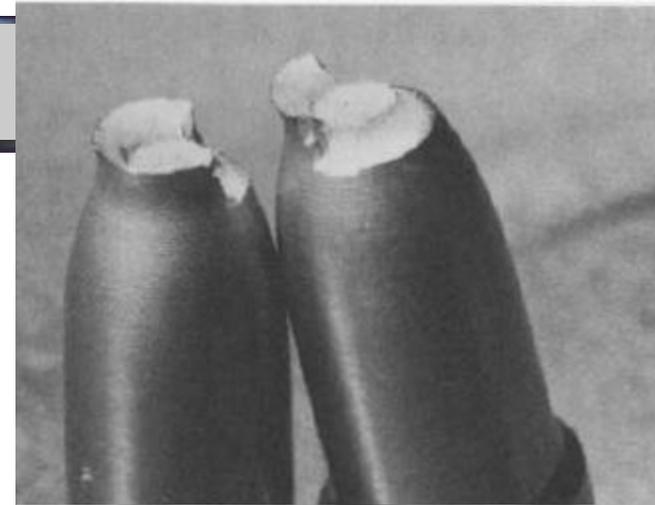
Um exemplo clássico de fratura dúctil é o empescoçamento de um corpo de prova submetido a ensaios de tração uniaxial. Esta é a chamada fratura taça-cone.

O empescoçamento indica que ocorreu extensiva deformação ou alongamento dos grãos do metal na região de estricção.

Tensões de cisalhamento dominam a deformação e a fratura dúctil. Em muitos casos, a fratura ocorre a 45° ou plano de máxima tensão de cisalhamento.

A fratura dúctil é originada a partir de muitas pequenas fraturas internas, chamadas de microcavidades (próximas ao centro da região de estricção).

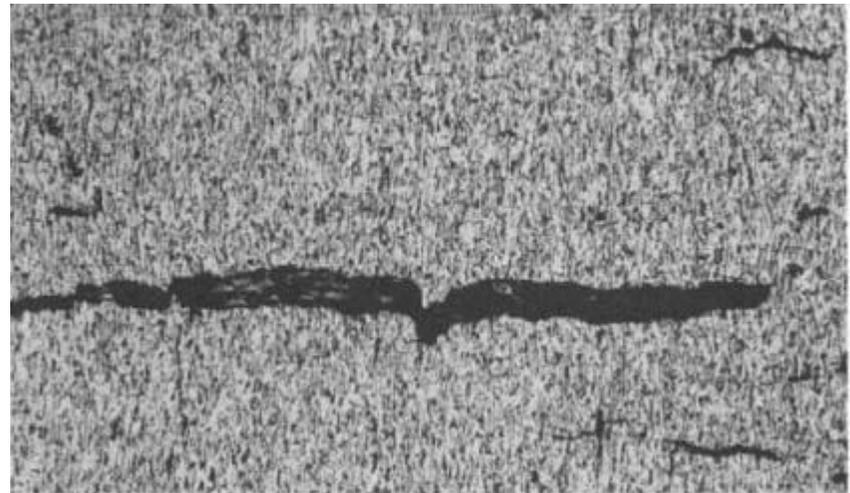
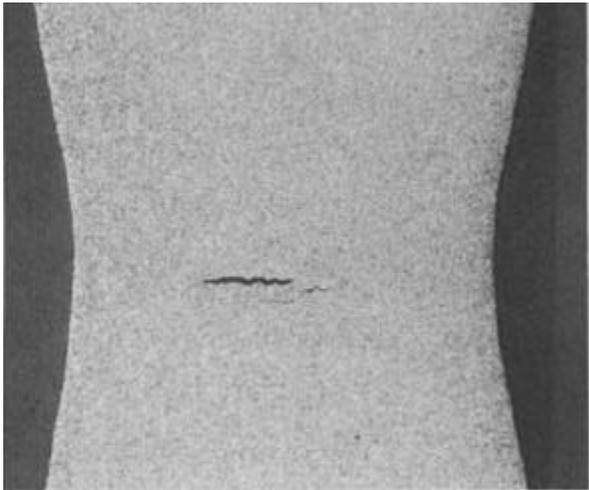
A fratura dúctil inicia no centro da região de estricção e se propaga para fora. Antes de atingir a superfície, a fratura muda de direção e segue um ângulo de 45° .



Fratura Dúctil

Aspectos Microestruturais da Fratura Dúctil

Detalhamento do que ocorre antes da fratura dúctil de um aço SAE 1020.

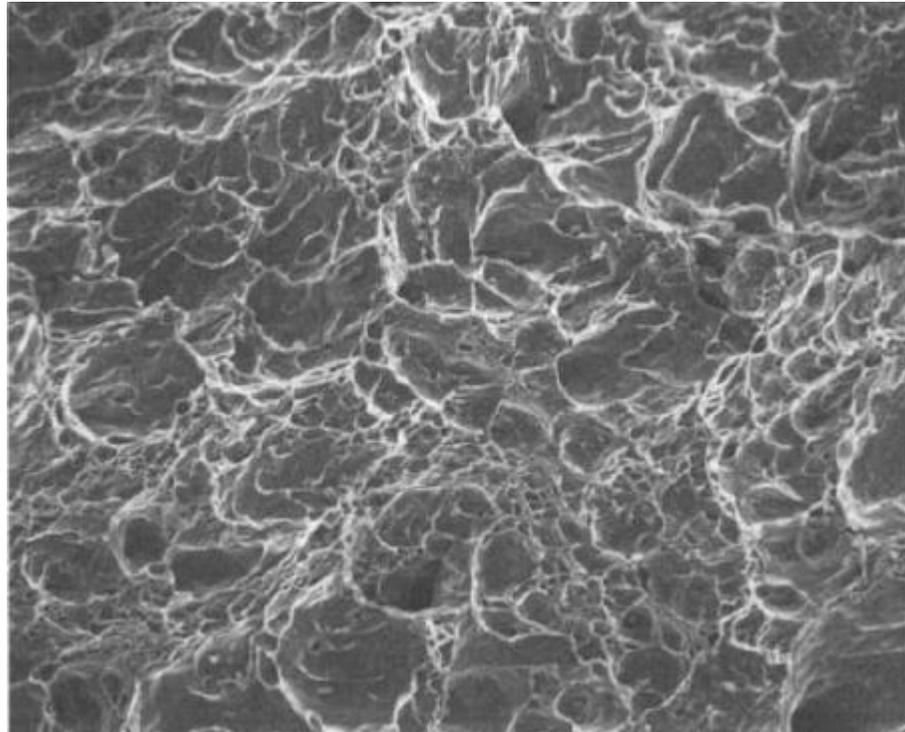


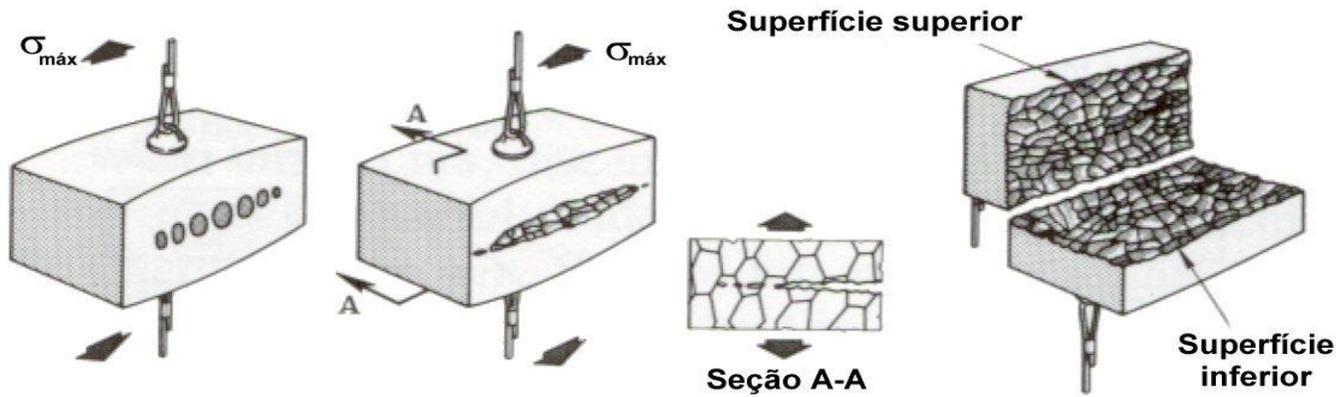
Fratura Dúctil

Aspectos Microestruturais da Fratura Dúctil

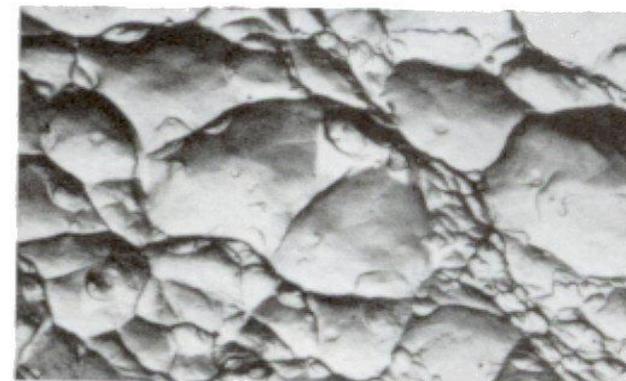
A fratura ocorre pelo coalescimento de microcavidades (“dimples”) que prossegue à medida que a fratura avança.

A análise da fratura de um metal dúctil é uma grande quantidade de “dimples” ou metades de cavidade, que podem ser observadas facilmente por um MEV.



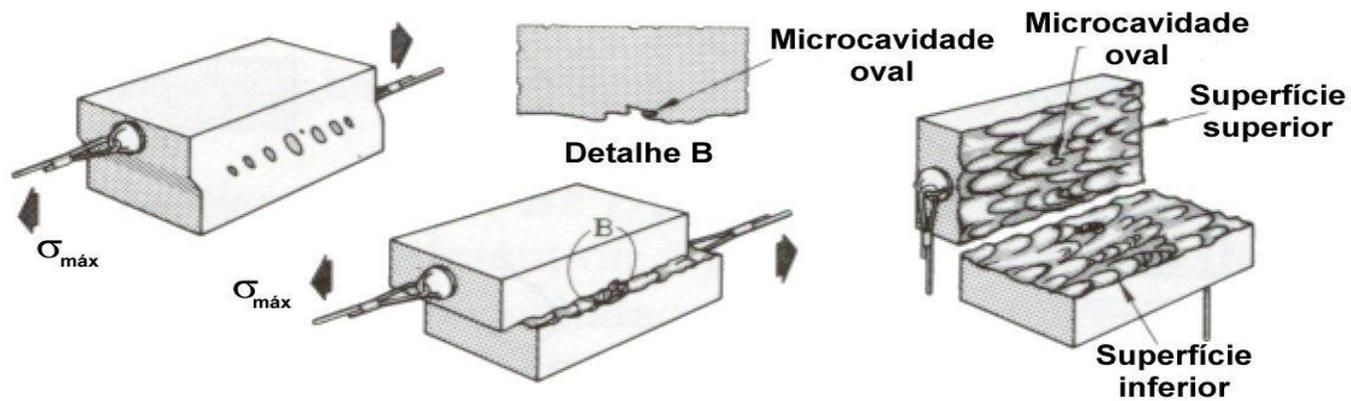


Microcavidades equiaxiais (tração)

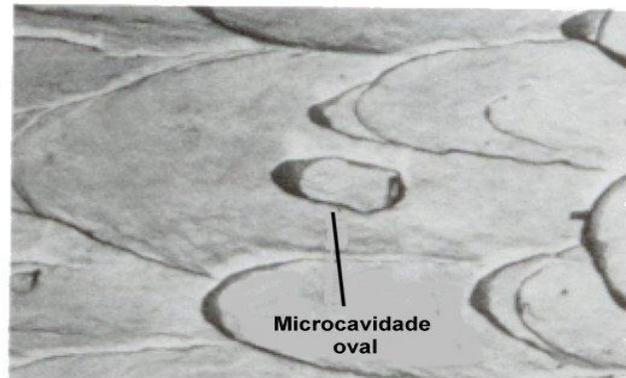


Fractografia MET (réplica)

5300 X

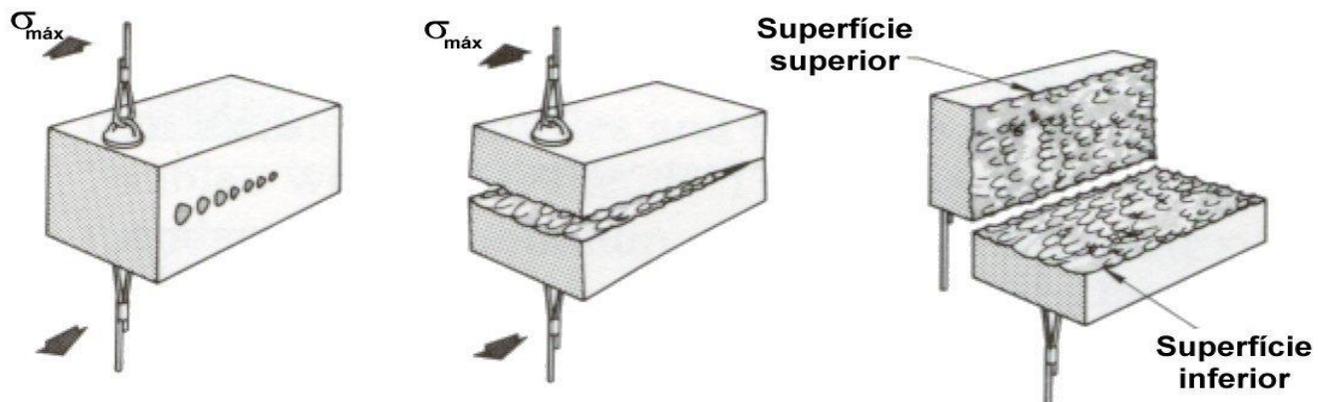


Microcavidades alongadas (cisalhamento)

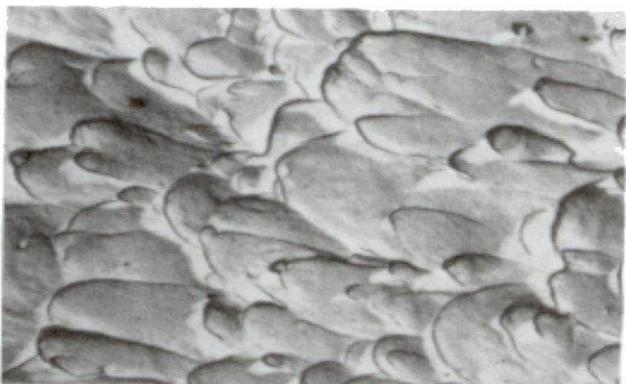


Fractografia MET (réplica)

5400 X



Microcavidades alongadas (rasgamento trativo)



Fractografia MET (réplica)

6500 X

Fratura por Fadiga

Introdução

Fraturas por Fadiga são consideradas o mais sério tipo de fratura em elementos de máquinas, pois este tipo de fratura ocorre em condições normais de serviço, sem sobrecarga excessiva e em condições usuais de operação.

Conceito de Fadiga:

“Fenômeno que leva à fratura sob tensões repetitivas ou oscilantes de máximo valor menor que a resistência do material. A fratura por Fadiga é progressiva, iniciando como mínimas trincas que crescem sob ação das tensões cíclicas”.

A fratura por fadiga envolve mudanças submicroscópicas na estrutura cristalina dos metais sob ação de cargas relativamente baixas e repetitivas. Estas mudanças submicroscópicas levam à formação de pequenas trincas que podem crescer sob carregamento cíclico e atingir tamanho grande, levando à fratura do componente.

Uma vez iniciada, a fratura por fadiga pode propagar-se por elevadas tensões e baixo ciclo ou baixas tensões e alto ciclo.

Fratura por Fadiga

A fratura final pode ter características frágeis ou dúcteis, dependendo do material e das circunstâncias da falha.

Existem três estágios da Fadiga:

Estágio 1- Iniciação da Trinca

É o estágio mais complexo da fratura por fadiga. Os fenômenos submicroscópicos são difíceis de visualizar, descrever e observar. Estes fenômenos que ocorrem sob uma única carga não são significativos, entretanto, quando milhões de ciclos são aplicados, este efeito passa a ser importante e causa o chamado “Dano Cumulativo”.

O início da fratura por fadiga ocorre em um local de tamanho que varia entre dois e cinco grãos do material. Para uma severa concentração de tensão, o local de iniciação pode ser extremamente pequeno. Podem existir inúmeros locais para a iniciação de uma trinca de fadiga.

Fratura por Fadiga

Estágio 2 – Propagação

Após a criação de uma trinca, esta se torna uma concentradora de tensões aguda e tende a direcionar a mesma para o interior do metal à medida que cada ciclo de tensão é aplicado.

A tensão local na ponta da trinca é extremamente elevada devido ao efeito de entalhe e, com cada ciclo de tensão aplicado que promove o avanço da trinca, forma-se um estriado em muitos casos (não sempre). O estriado é muito pequeno e define a posição da trinca a um dado instante.

Estágio 3 – Ruptura

À medida que a propagação da trinca de fadiga ocorre, a seção resistente é reduzida até que a mesma não suporte mais a carga aplicada. O modo de fratura neste estágio pode ser tanto dúctil quanto frágil.

Fratura por Fadiga

Aspectos Microscópicos da Fadiga

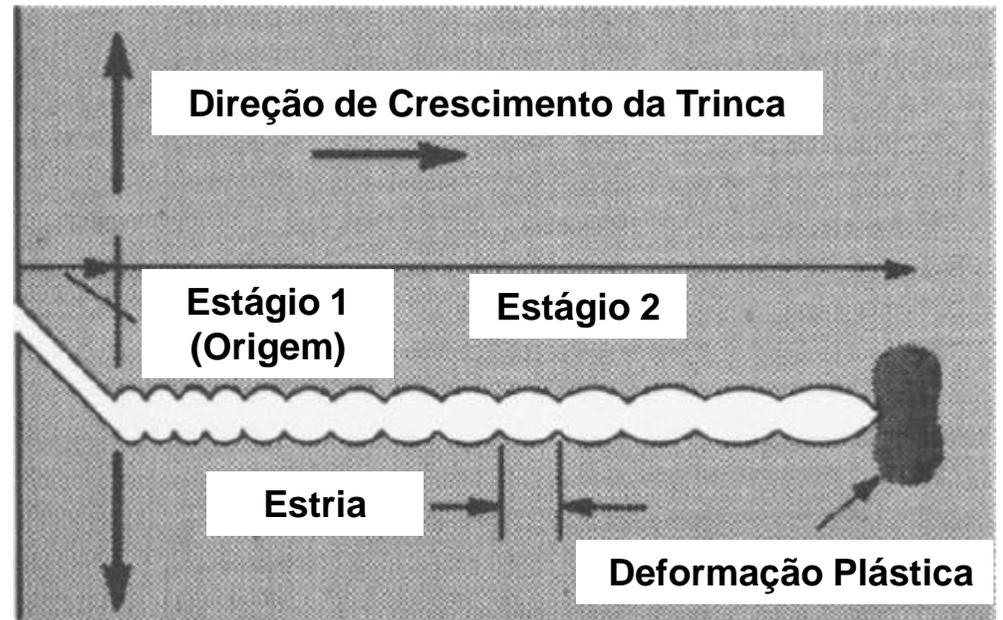
As estrias são a maior característica microscópica da fratura por fadiga, embora nem sempre presentes na superfície da fratura.

A trinca de fadiga é considerada o defeito mais agudo ou concentrador de tensões que pode existir, sendo atribuído raio zero na ponta da trinca.

Cada vez que a trinca é aberta por uma tensão trativa com magnitude suficiente, a ponta da trinca deforma-se plasticamente abrindo a sua ponta em escala microscópica. Isto causa o avanço da fratura, criando a estria aparente na superfície de fratura.



Estrias em CP de Alumínio



Fratura por Fadiga

Aspectos Microscópicos da Fadiga

As estrias não estão presentes em aços de elevada resistência, devido à baixa ductilidade. Por outro lado, metais de baixa dureza também não formam estrias de fácil observação, uma vez que a baixa resistência deixa estes metais mais vulneráveis ao dano por fadiga (deformação na ponta da trinca).

Falta de Deformação:

Uma vez que a iniciação da fadiga não requer elevada tensão, existe pequena ou nenhuma deformação aparente no componente fraturado por fadiga. Caso a máxima tensão não ultrapasse o limite de escoamento, não haverá deformação plástica visível no componente, a não ser na região do estágio 3.

Quando o componente for submetido a elevadas tensões e baixo ciclo, pode haver deformação, dependendo da relação tensão-deformação. A diferença entre “elevada tensão - baixo ciclo” e “baixa tensão – alto ciclo” é normalmente atribuída à presença de deformação visível ou não no componente fadigado.

Fratura por Fadiga

Aspectos Microscópicos da Fadiga

Marcas de Praia:

Marcas de Praia são o único fator encontrado em diversas fraturas por fadiga e a sua presença é positiva auxiliando a identificação das fraturas por fadiga.

Marcas de praia são referidas em relação ao aspecto macroscópico da fratura e indicam interrupções nos períodos de propagação das fraturas por fadiga em metais dúcteis.

Não devem ser confundidas com estrias, embora estejam muitas vezes presentes nas superfícies de fratura. Devem existir milhares de estrias entre duas marcas de praia.

Marcas de Praia formam-se quando:

1- A deformação plástica microscópica na ponta da trinca de fadiga ocorre em períodos de parada de máquina ou quando a tensão cíclica não é elevada o suficiente para promover o crescimento da trinca de fadiga.

Fratura por Fadiga

Aspectos Microscópicos da Fadiga

Marcas de Praia formam-se quando:

Durante a parada da máquina, a ponta da trinca endurece por deformação e este endurecimento leva a criação de uma barreira temporária à propagação da trinca, que ocorre quando a máquina retorna à atividade.

2- Diferenças no tempo de corrosão na propagação da trinca de fadiga

Áreas próximas à origem da trinca de fadiga estão sujeitas a maior tempo de corrosão, podendo indicar diferentes estágios de corrosão, aparecendo como marcações até a ruptura final.

3- Grandes mudanças na magnitude ou frequência de carregamento

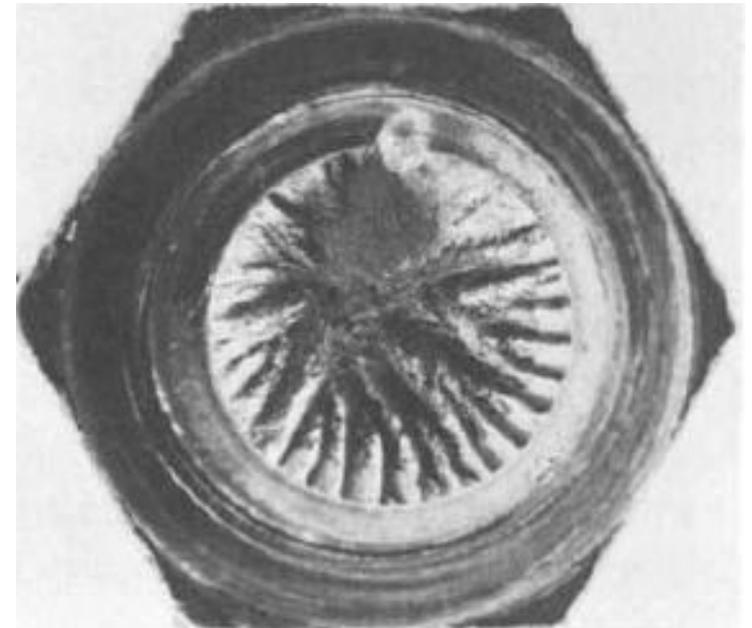
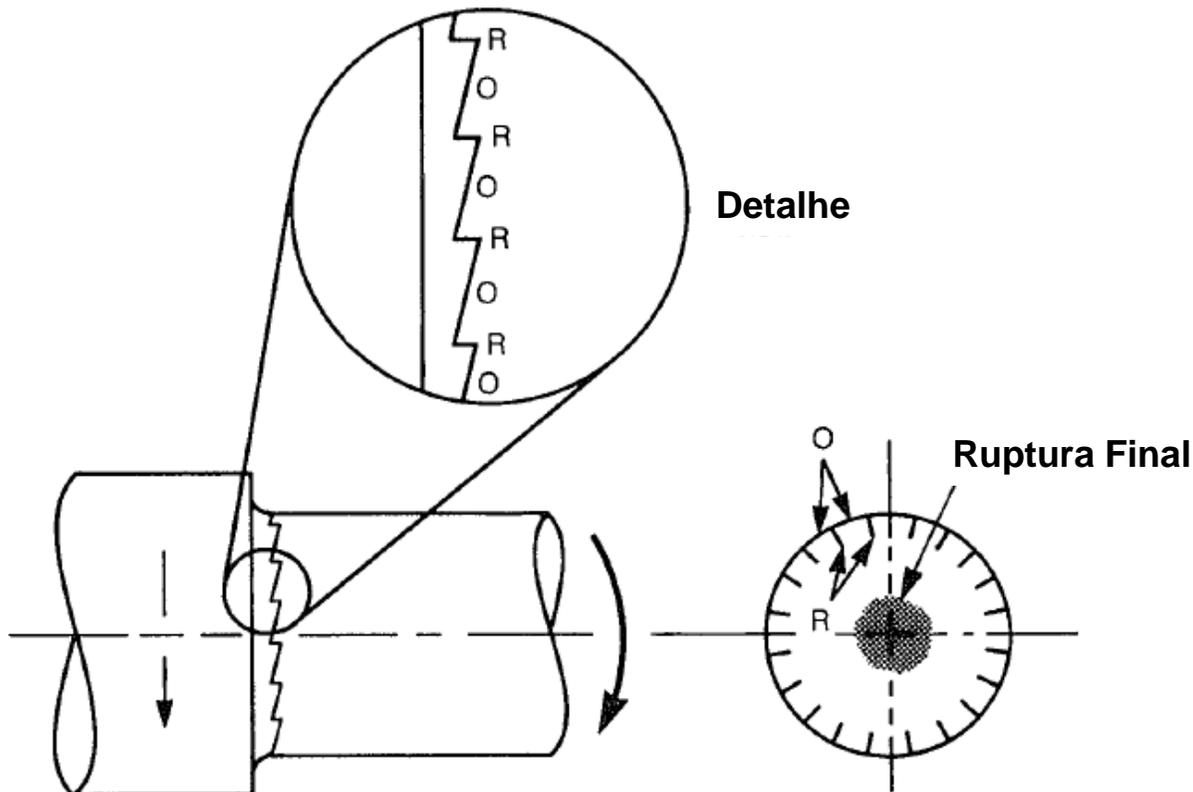
O mais comum é o aumento na carga que induz à formação de marcas gigantes.

Fratura por Fadiga

Aspectos Microscópicos da Fadiga

Marcas de Fenda (Ratchet Marks):

Marcas de Fenda ou Marcas de Catraca são formadas quando diversos locais de origem de fadiga adjacentes uns aos outros são formados e cada origem iniciará a propagação de sua própria trinca de fadiga. Quando uma trinca inicia e se sobrepõe à outra origem, forma-se um degrau.



Fratura por Fadiga

Similaridades entre **Estrias** e Marcas de Praia

Identificação da ponta da trinca de fadiga

Estrias e Marcas de Praia identificam a posição da ponta da trinca de fadiga em um dado tempo. Da mesma forma que os anéis em troncos de árvore representam a idade da árvore, as estrias indicam o número de ciclos de carga aplicados no estágio 2 de propagação da trinca de fadiga (a contagem de estrias é não usual, não prático). Uma vez que o número de ciclos referentes ao primeiro estágio é desconhecido, da mesma forma o número total de ciclos do componente.

Expansão a partir da Origem da Fadiga

Estrias e Marcas de Praia expandem a partir da origem no formato circular ou semicircular. Uma analogia pode ser feita com as ondulações que se propagam quando uma pedra é atirada na água.

Similaridade de Aparência

Ambos são relativamente paralelos e não cruzam outras advindas de diferentes origens da fadiga.

Fratura por Fadiga

Similaridades entre **Estrias** e Marcas de Praia

Ausência em algumas Superfícies de Fratura

Algumas fraturas por fadiga não apresentam Estrias ou Marcas de Praia. Ligas de elevada dureza e resistência mecânica não formam Estrias durante o estágio de propagação da trinca.

Estrias são de difícil observação, especialmente no início da propagação, pois apresentam espaçamento pequeno entre elas. As estrias podem ter sido expostas à corrosão, além da interação pelo contato das duas superfícies de fratura, dificultando a sua observação.

Quando o componente operar continuamente ou com breves interrupções, as marcas de praia não serão observadas. As marcas de praia normalmente aparecem como resultado das mudanças ou interrupções na carga ciclicamente aplicada.

Fratura por Fadiga

Similaridades entre **Estrias** e Marcas de Praia

Confusão por Fatores Falsos

Danos provocados pelo contato entre as superfícies pré ou pós-fraturadas podem formar marcas paralelas que algumas vezes lembram estrias. Entretanto, a orientação de estrias é normalmente previsível caso a origem de fratura tenha sido identificada e, desta forma, a orientação das marcas de contato podem ser identificadas e eliminadas da análise.

“Dimples” extremamente alongados podem produzir marcas paralelas, especialmente em materiais dúcteis sob esforços de torção. Estas marcas podem ser confundidas com as estrias.

Campos escurecidos de trincas de têmpera podem ser confundidas com marcas de praia. Análise metalográfica cuidadosa deve ser realizada para avaliar, por exemplo, dobras de laminação, que normalmente vem acompanhadas por descarbonetação. Desta forma, pode-se assegurar a correta análise da falha.

Fratura por Fadiga

Diferenças entre **Estrias** e Marcas de Praia

Tamanho

O tamanho é a diferença mais óbvia. Estrias são saliências extremamente pequenas e visíveis somente com um MEV. Por outro lado, as Marcas de Praia são maiores que as estrias e são normalmente visíveis a olho nú.

Causa

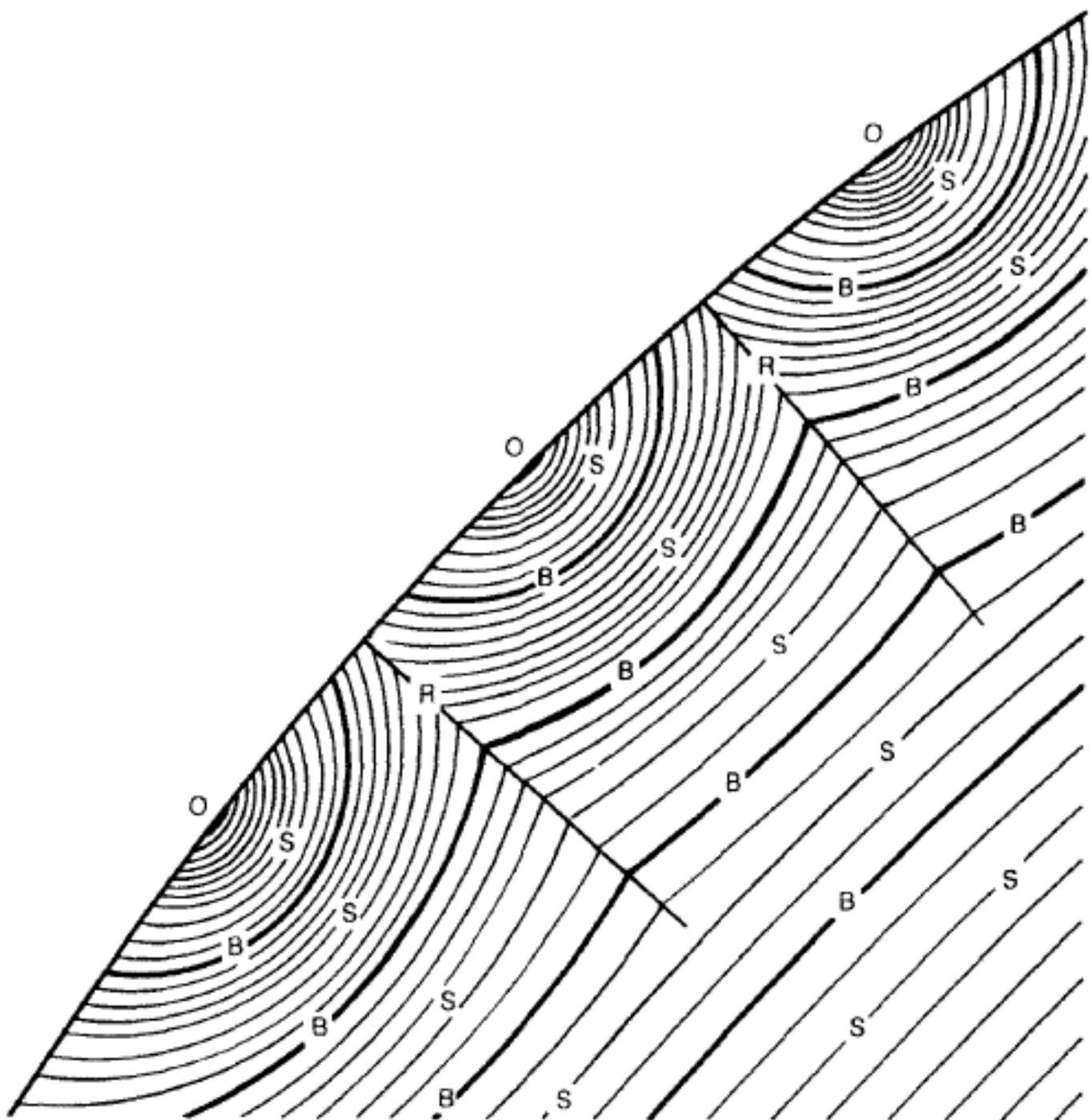
Os fatores causadores de estrias e de marcas de praia são diferentes. Estrias representam o avanço na ponta da trinca pela aplicação de um carregamento para muitos metais dúcteis. Marcas de praia localizam a posição da trinca quando o carregamento cíclico é interrompido por um período de tempo, corrosão estava presente ou houve aumento na carga.

Origem - O

Estrias - S

Marcas de Praia - B

Marcas de Fenda - R

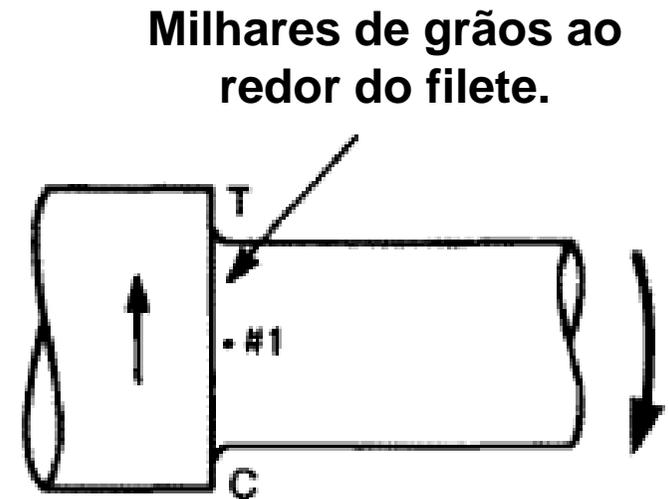


Fratura por Fadiga

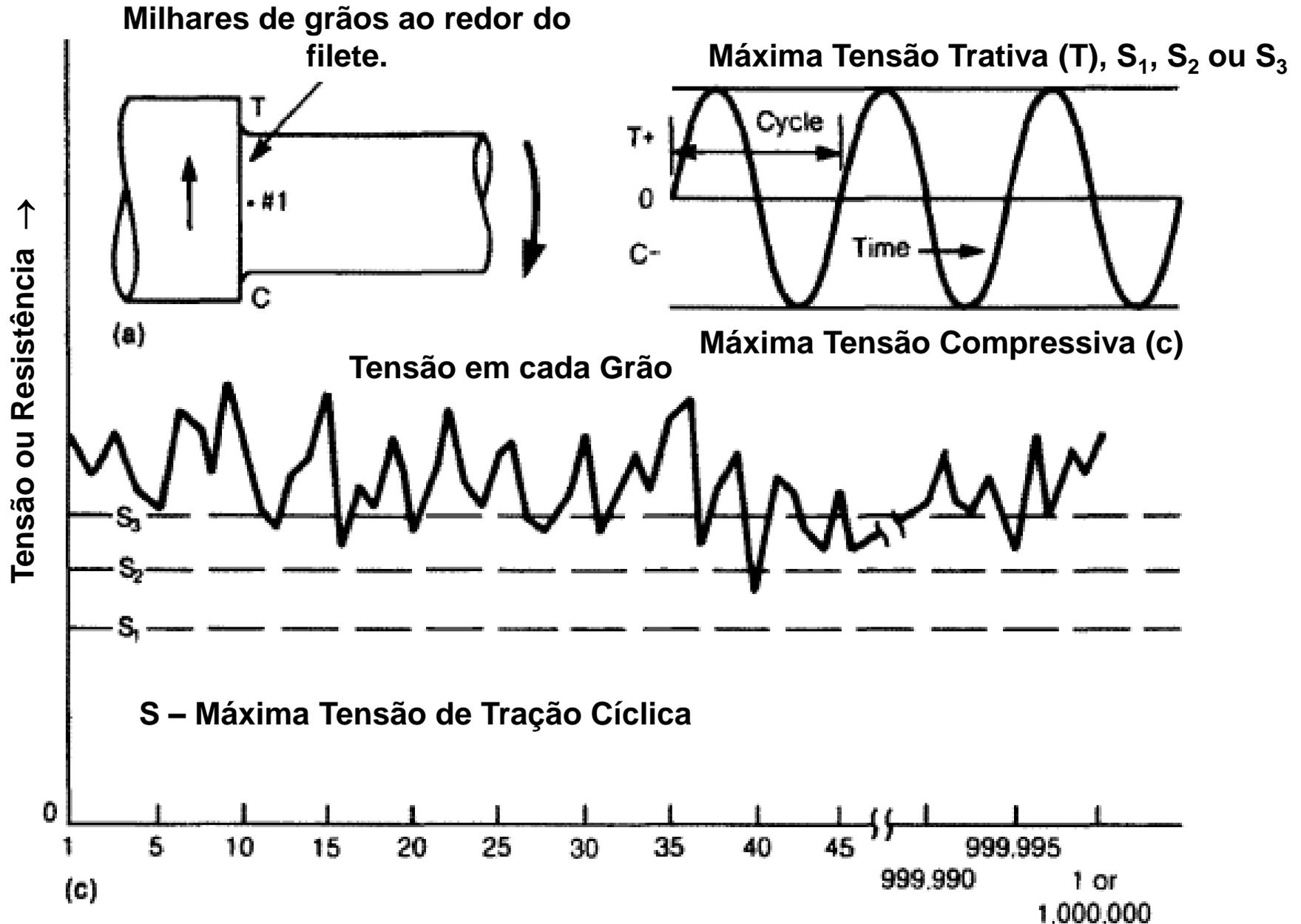
Relação entre Tensão e Resistência na Fadiga

Para o entendimento do fenômeno de Fadiga bem como o seu diagnóstico, a relação tensão versus resistência assume importância crítica. Desta relação, depende o sucesso ou a falha de um componente. Uma vez que o número de origens de fadiga em uma dada fratura por este modo depende desta relação, os engenheiros devem determinar o número de origens em uma falha.

A figura mostra um desenho esquemático de um eixo com dois diâmetros que gira sob tensões de flexão (dobramento). Neste exemplo, o raio de concordância entre os diferentes diâmetros é a região crítica de tensão. Com o eixo girando, os grãos passarão pela posição do grão #1.



Fratura por Fadiga



Fratura por Fadiga

Relação entre Tensão e Resistência na Fadiga

Para cada grão na região do filete a resistência é diferente, tendo em vista a orientação cristalina do grão, diferentes defeitos, quantidade de inclusões, microestrutura individual, entre outros fatores.

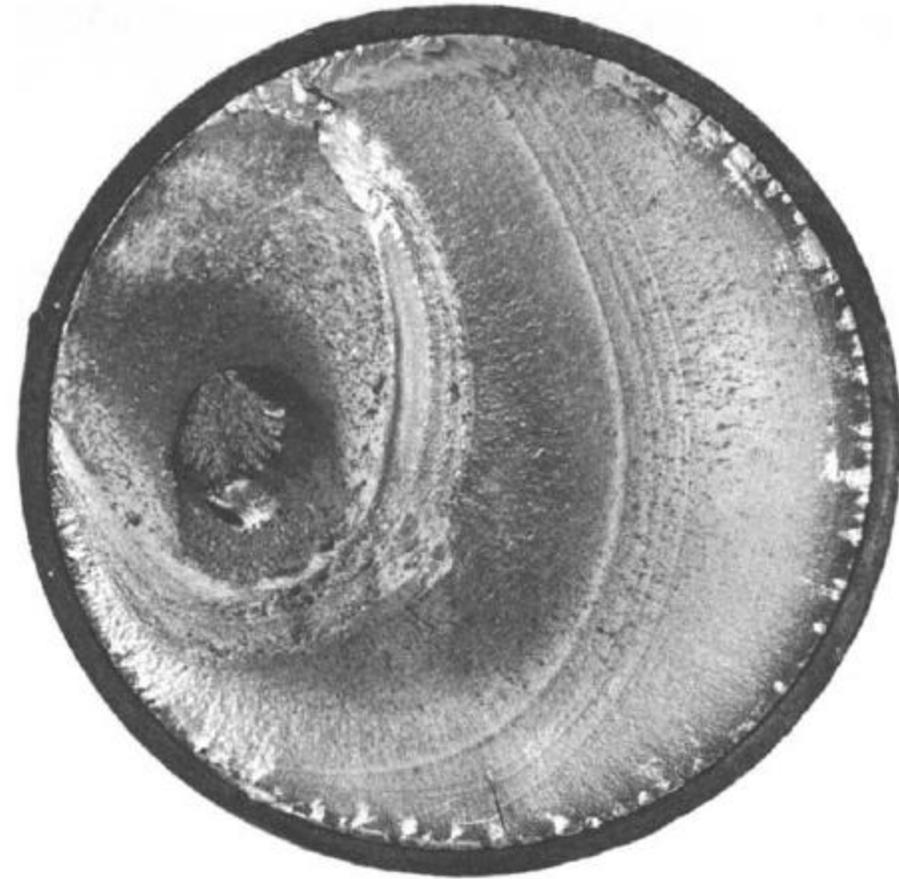
Quando uma tensão é aplicada abaixo de S_1 , nada ocorrerá com o eixo, tendo em vista que a tensão é menor que a tensão do grão menos resistente (#40).

Se a tensão é elevada para S_2 , existe grande possibilidade de haver modificações na estrutura cristalina do grão #40, caso a rotação neste nível de tensões ocorra. Isto pode levar à fratura por fadiga com origem no grão #40.

Entretanto, se S_3 é aplicada, a tensão ultrapassa a tensão em diversos grãos (~11 dos grãos analisados na figura) e, neste caso, o eixo deverá ter vida em serviço reduzida em relação ao nível S_2 .

Se o eixo está balanceado, a fratura deverá ser tipo Marcas de fenda (ratchet marks) com final da fratura no centro. Caso contrário, iniciará no lado de maior tensão, propagando-se em direção ao outro lado.

Fratura por Fadiga



Fratura por Fadiga

Como a vida em Fadiga por ser aumentada?

Existem dois caminhos:

1- Elevar a resistência

Pode ser conseguida pela elevação da dureza, adotando tratamentos térmicos mais efetivos ou adotando liga (aço) de melhor qualidade ou menor nível de inclusões e descontinuidades.

2- Reduzir a tensão de trabalho

O nível de tensões resultante pode ser reduzido pela alteração de projeto, permitindo um raio de concordância maior, adoção de técnicas que induzem tensões residuais compressivas (shot peening, deformação ou tratamentos termoquímicos).

Fratura por Fadiga

Teste de Fadiga em Laboratório

Introdução

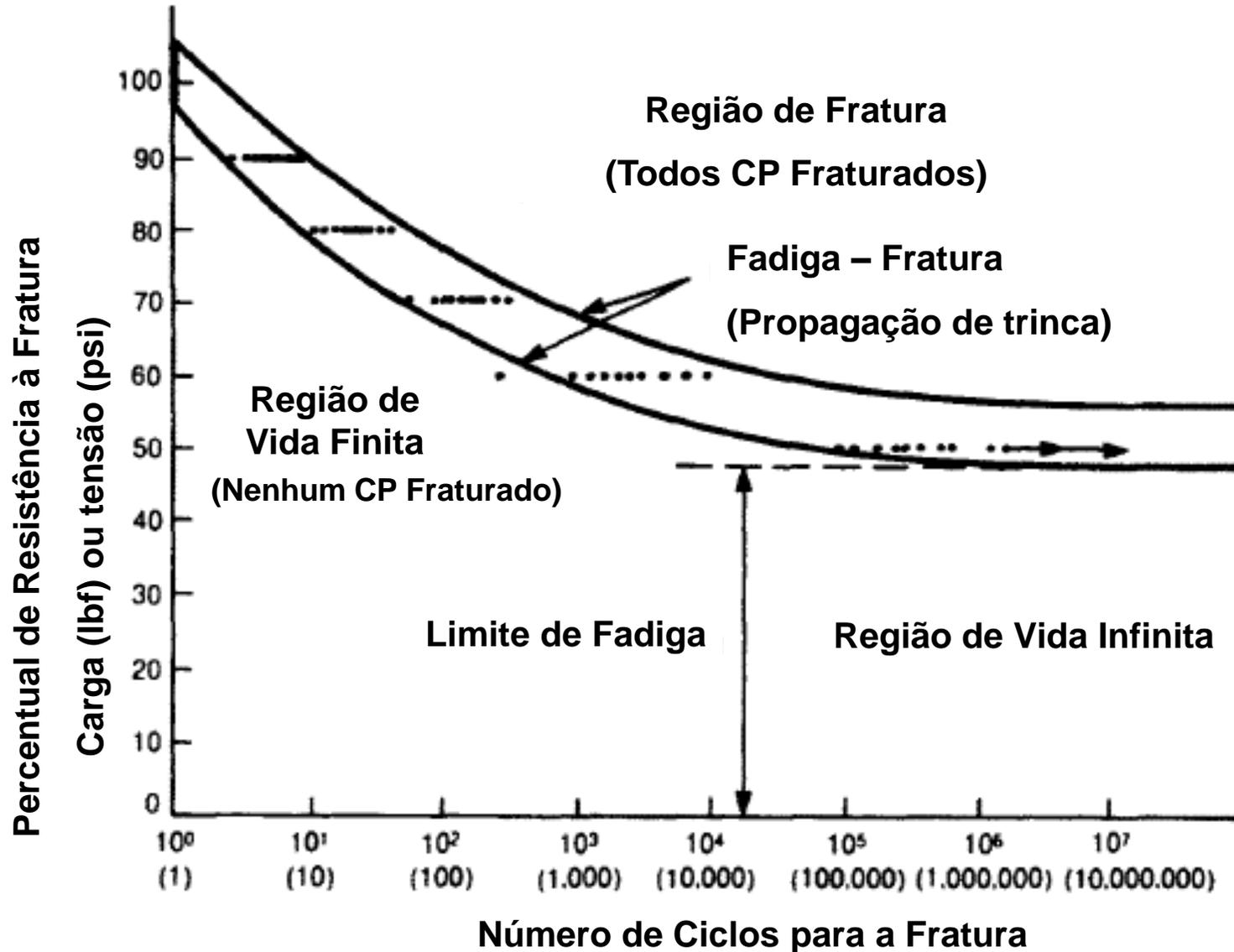
A realização de testes e avaliações de fadiga podem ser um tanto frustrantes, uma vez que freqüentemente não são ensaiados corpos de prova em número suficiente, número reduzido de máquinas para ensaio, tempo / dinheiro para conduzir testes significativos.

Adicionalmente, podem existir muitas variáveis para avaliar, dispersão elevada nos resultados, corpos de prova que fraturam em modos diferentes do esperado devido a problemas na máquina ou nos próprios corpos de prova.

Alguns dos problemas que ocorrem com a avaliação da vida em fadiga serão discutidos à seguir.

Fratura por Fadiga

Teste de Fadiga em Laboratório – Diagrama S-N



Fratura por Fadiga

Teste de Fadiga em Laboratório

Interpretação

O eixo vertical pode ser tanto a carga quanto a tensão e é o máximo valor atingido durante o ciclo, conforme pico da curva de carregamento senoidal.

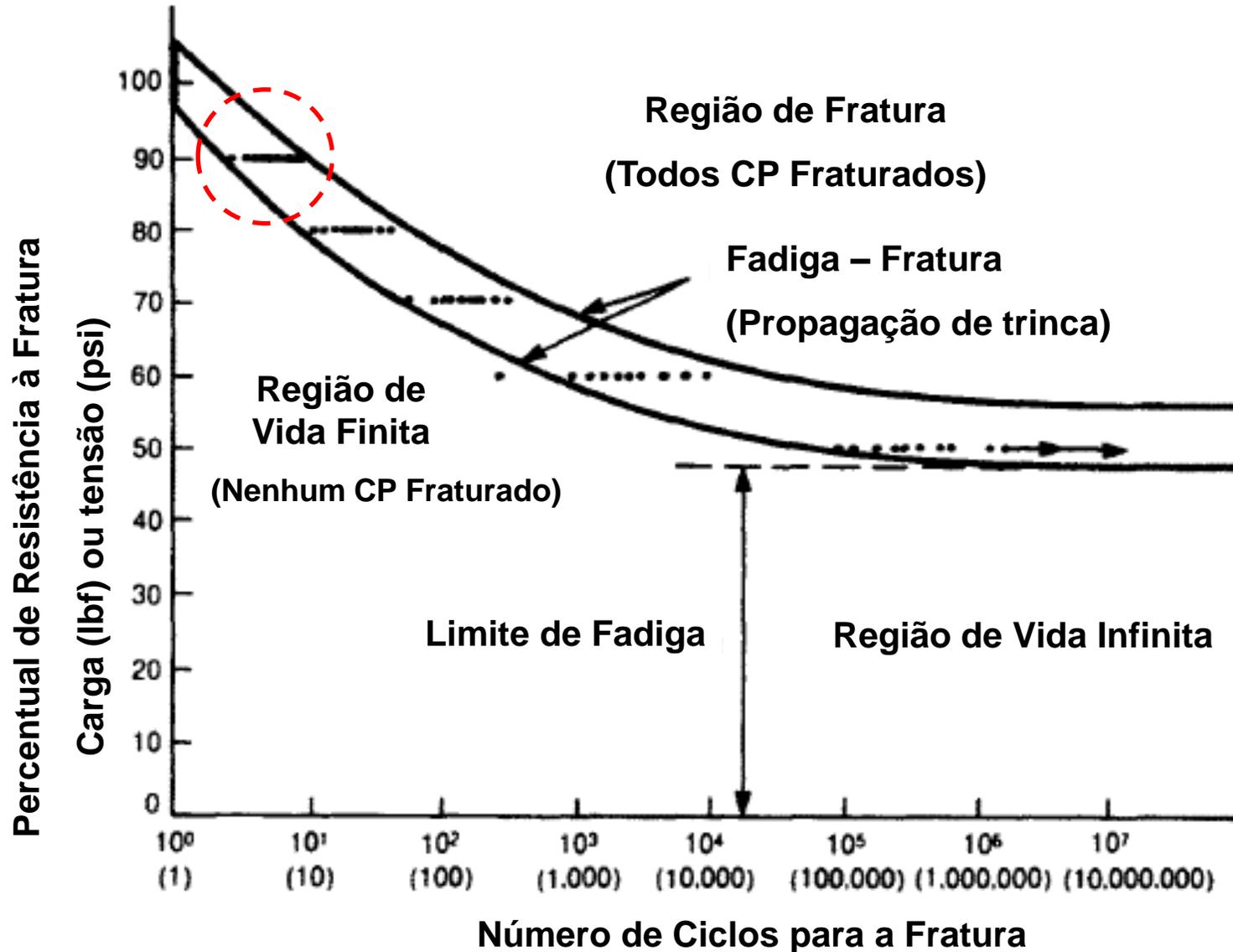
O eixo horizontal representa o número de ciclos de carga aplicados para causar a fratura. Esta escala é logarítmica, pelas diversas ordens de grandeza que podem aparecer, estendendo-se desde um até um milhão, cinco milhões, dez milhões de ciclos ou até mais.

Como a fratura monotônica é considerada 100%, então para propósito de ilustração, este será o ponto de partida, uma vez que o CP não pode sustentar carga maior sem fraturar.

Intuitivamente, se a tensão aplicada for de 90% da carga de fratura, mais de um carregamento será necessária para provocar a fratura do CP. Quando dez pontos são submetidos ao teste de carga a 90%, notamos que os dez pontos representam a vida em fadiga do material. Os pontos parecem próximos devido à escala usada, entretanto, podem variar em até o dobro do menor valor obtido.

Fratura por Fadiga

Teste de Fadiga em Laboratório – Diagrama S-N



Fratura por Fadiga

Teste de Fadiga em Laboratório

Interpretação

Neste região de elevada tensão, a deformação plástica do corpo de prova é grande, analogamente à dobra de um clip.

Os componentes não são intencionalmente projetados para o trabalho neste regime e fraturas normais de fadiga não apresentam deformação plástica visível.

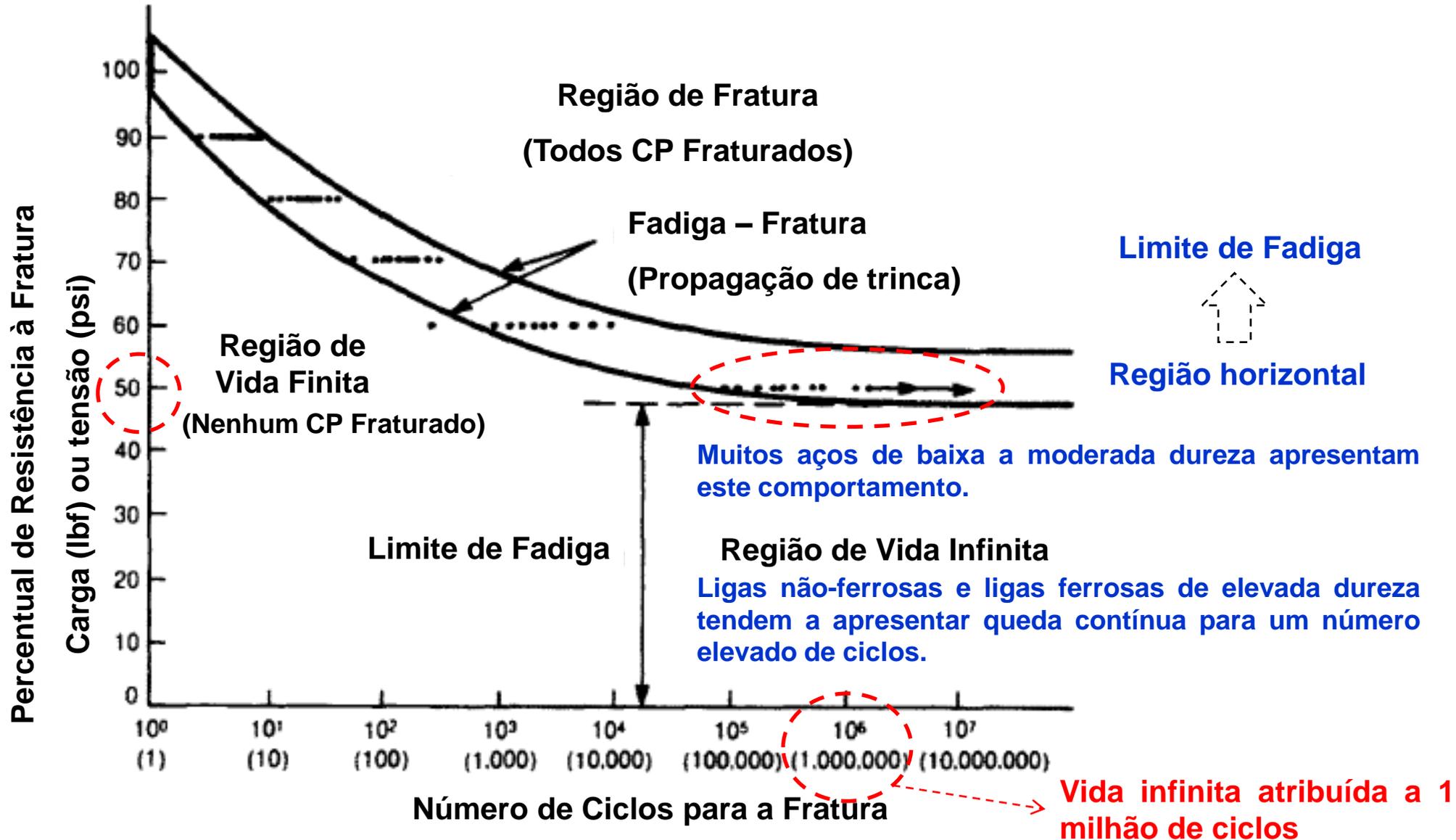
Quando a carga é reduzida para 80%, a dispersão da vida em fadiga passa a 3:1. Para 70% da carga, a vida em fadiga passa a variar em até 5:1 (relação entre a mais longa e a mais curta vida em fadiga).

Vejamos que a 60%, um dos CPs falha a 150 ciclos, enquanto os normais para esta tensão estejam entre 1000 e 10000 ciclos. Neste caso, a investigação é em vão e o resultado deve ser descartado.

Quando reduzimos a 50% da carga, a vida em fadiga cresce dramaticamente, onde chegamos na região horizontal (plana) do diagrama S-N.

Fratura por Fadiga

Teste de Fadiga em Laboratório – Diagrama S-N

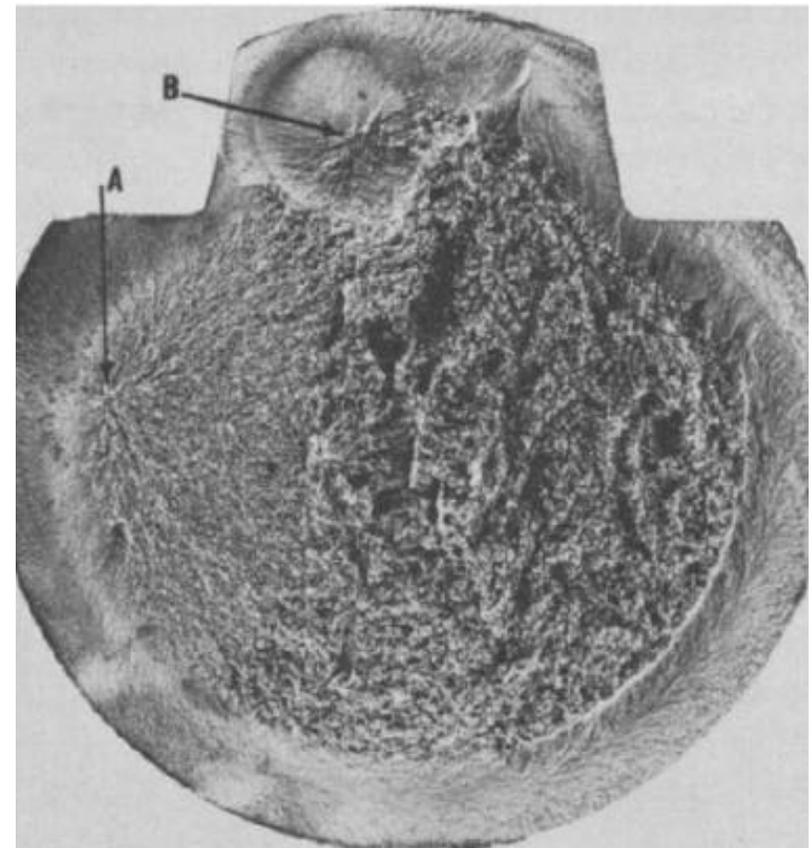


Fratura por Fadiga

Outros tipos de Falha por Fadiga

Fadiga com Origem Subsuperficial

A fratura resultante da fadiga com origem subsuperficial pode ser ilustrada a partir das figuras abaixo. Este tipo será tratado posteriormente.



Fratura por Fadiga

Outros tipos de Falha por Fadiga

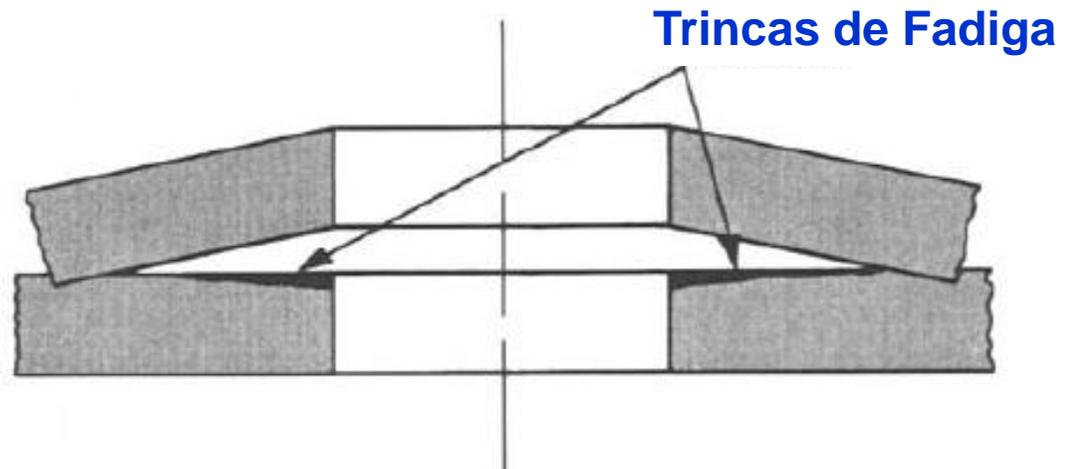
Fadiga sob Forças Compressivas

A fratura ocorre nas regiões tensionadas de componentes submetidos a tensões compressivas em uso.

Princípio de geração de tensões residuais:

“Para a deformação plástica de um metal por tensões trativas, caso a carga seja removida, surgem tensões residuais compressivas” e vice versa. Assim, um componente deformado sob compressão, desenvolverá tensões residuais trativas.

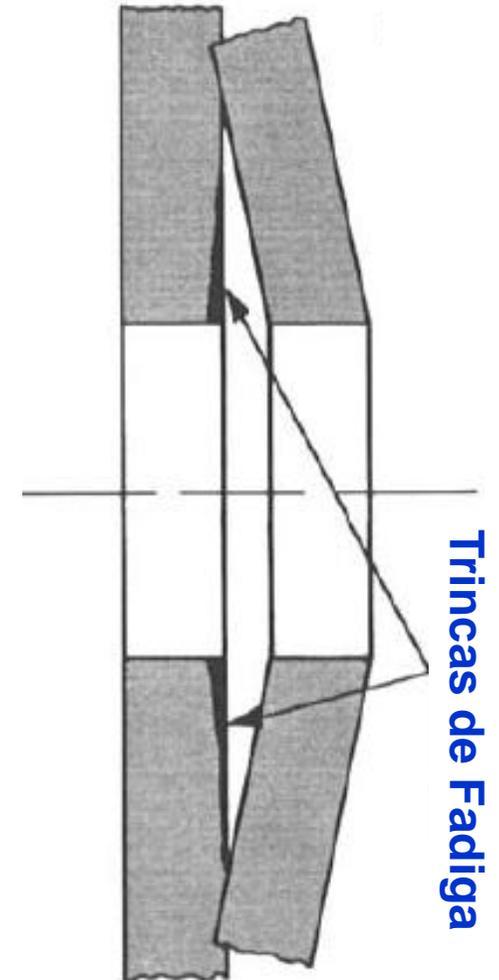
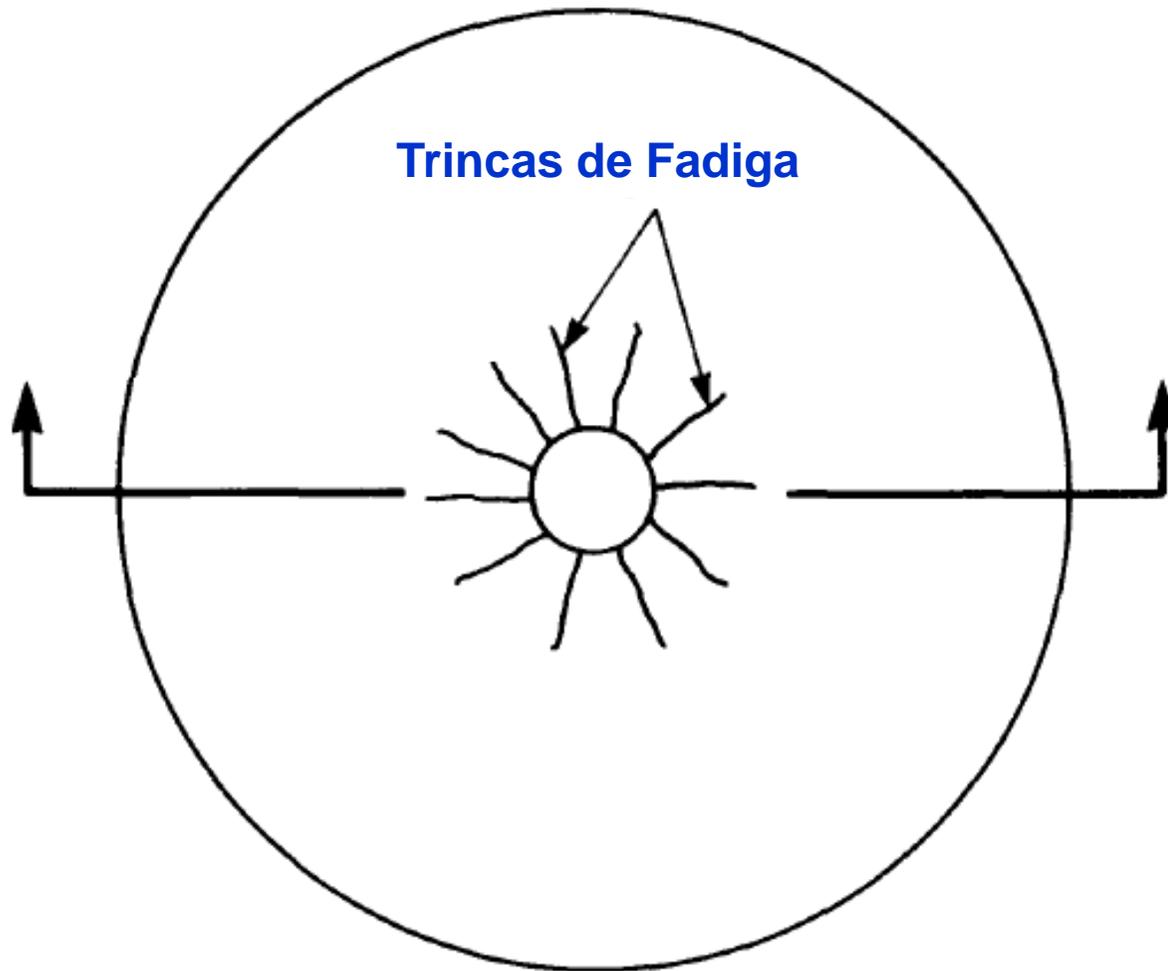
Molas Belleville ou molas prato.



Fratura por Fadiga

Outros tipos de Falha por Fadiga

Fadiga sob Forças Compressivas (ações: elevar Re e Trabalhar com o projeto).



Fratura por Fadiga

Outros tipos de Falha por Fadiga

Fadiga Térmica

A fratura por fadiga térmica ocorre não por tensões mecânicas repetitivas, mas por tensões térmicas cíclicas.

Princípio básico de formação de tensões

“A região do metal que esfria por último desenvolve tensões residuais trativas” e, também, para o surgimento de tensões residuais térmicas, é necessário que exista calor e restrição.

Neste caso, toda região sujeita a aquecimento e resfriamento e que desenvolve tensões trativas no resfriamento, está susceptível à nucleação e propagação de uma trinca de fadiga. O pico de tensão que leva à propagação ocorre no resfriamento.

A ação para reduzir a propensão à fadiga térmica envolverá a redução da restrição à expansão / contração ou alteração da forma (projeto). Um exemplo é a adoção de juntas de expansão.

Fratura por Fadiga

Outros tipos de Falha por Fadiga

Corrosão-Fadiga

Se o processo de fadiga não é complicado o suficiente, este se tornará caso adicionarmos um ambiente corrosivo.

Corrosão-Fadiga é uma ação combinada entre carregamentos cíclicos e ambiente corrosivo, de forma a produzir a origem superficial da trinca de fadiga.

A resistência à fadiga de um metal é maior em ambiente inerte onde não há corrosão, quando comparamos a resistência do mesmo metal sujeito a um ambiente corrosivo.

Elevada Tensão Nominal

Baixa Tensão Nominal

Sem concentração de tensão

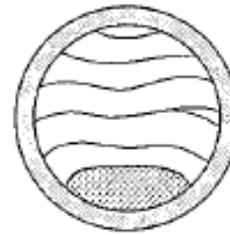
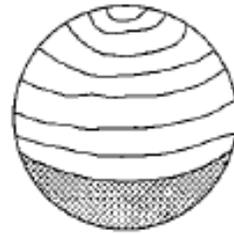
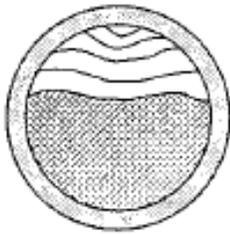
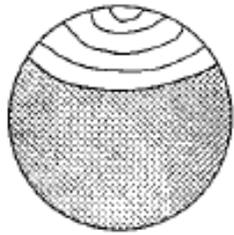
Média concentração de tensão

Severa concentração de tensão

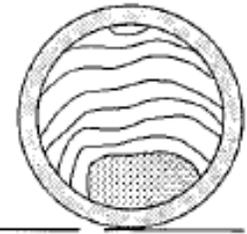
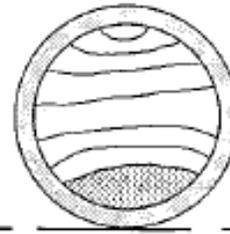
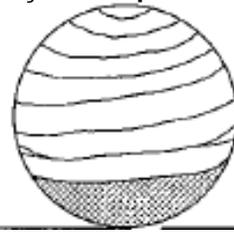
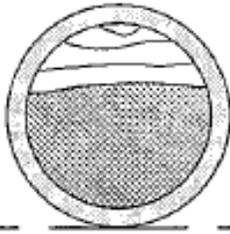
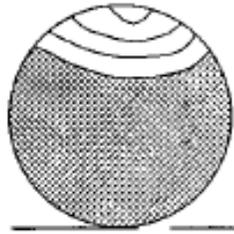
Sem concentração de tensão

Média concentração de tensão

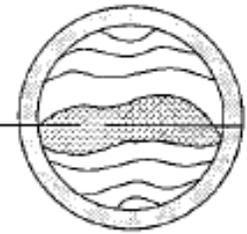
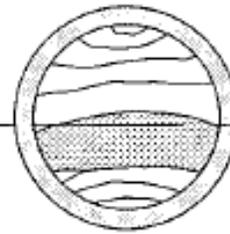
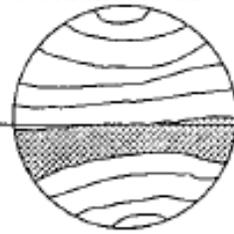
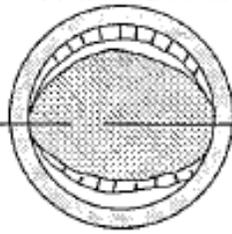
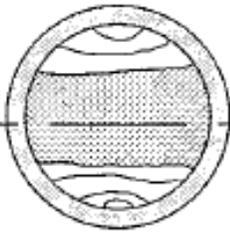
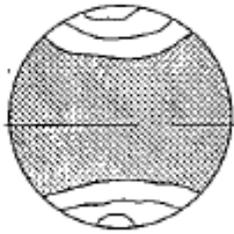
Severa concentração de tensão



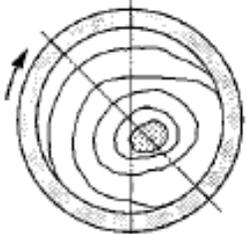
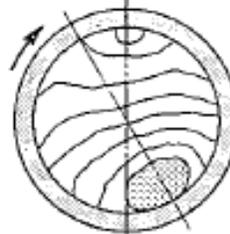
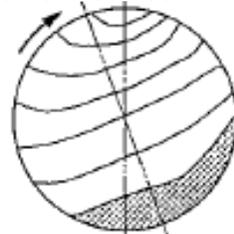
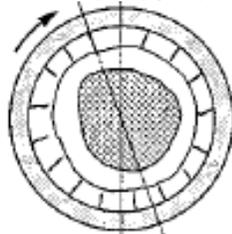
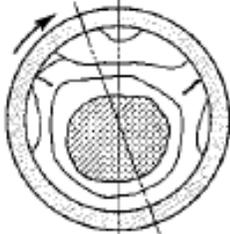
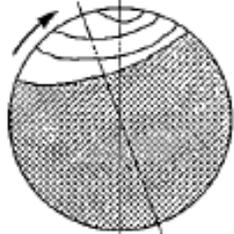
Tração – Tração ou Tração-Compressão



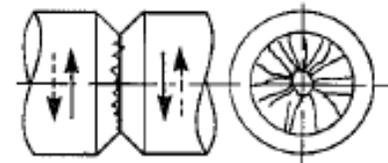
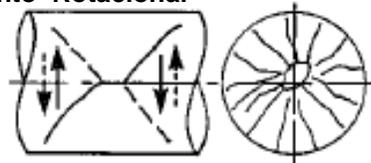
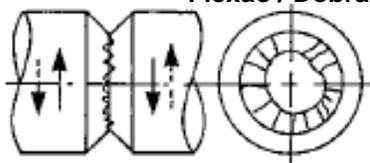
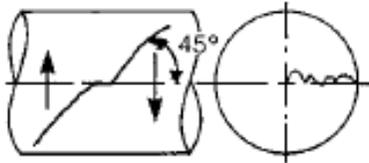
Flexão / Dobramento Unidirecional



Flexão / Dobramento Reverso



Flexão / Dobramento Rotacional



Torção

Zona de Fratura Rápida

Entalhe concentrador de tensão

Elevada Tensão Nominal

Baixa Tensão Nominal

Sem concentração de tensão

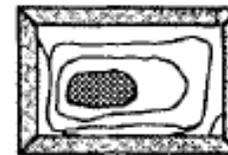
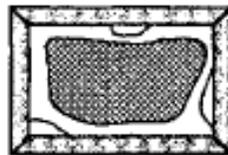
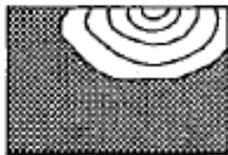
Média concentração de tensão

Severa concentração de tensão

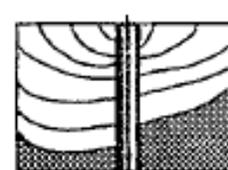
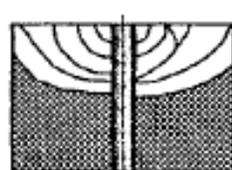
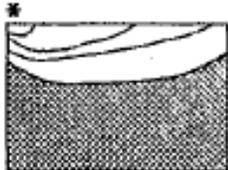
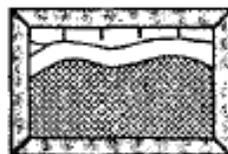
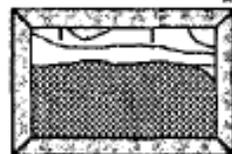
Sem concentração de tensão

Média concentração de tensão

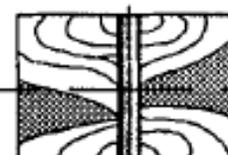
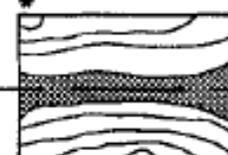
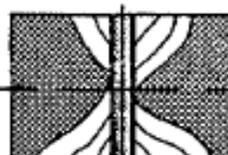
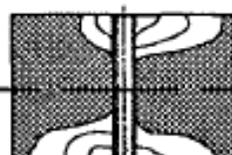
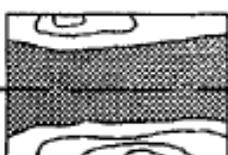
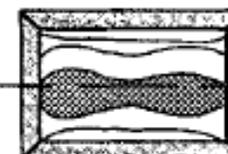
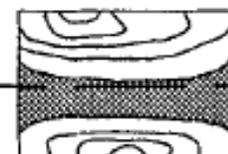
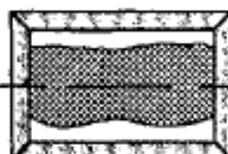
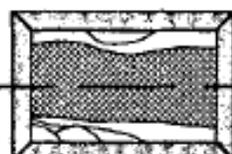
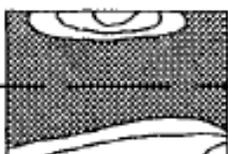
Severa concentração de tensão



Tração – Tração ou Tração-Compressão



Flexão / Dobramento Unidirecional



Flexão / Dobramento Reverso

* Asteriscos indicam a origem da trinca no canto. O início nos cantos é favorecido pela presença de marcas de usinagem.

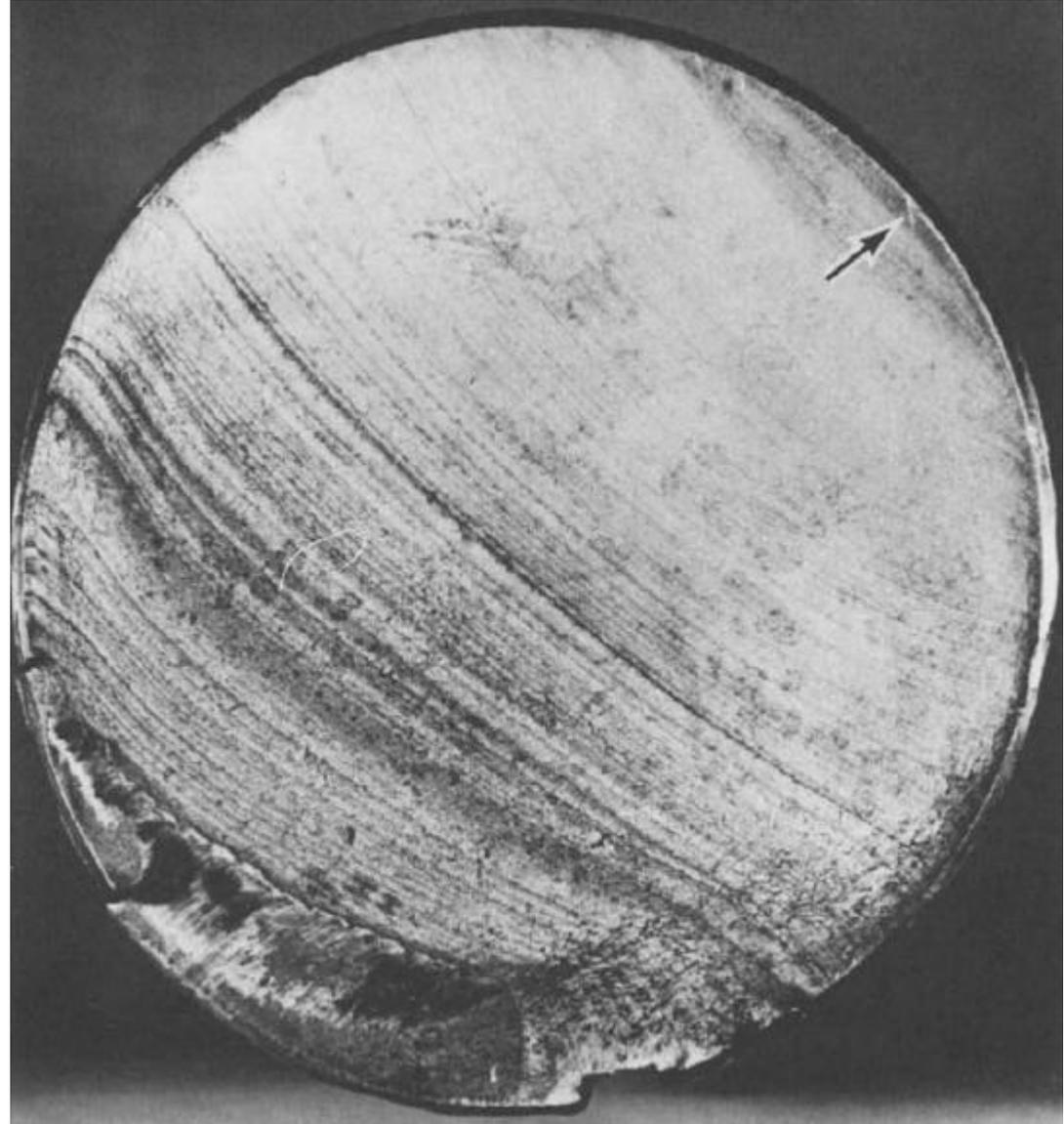
 Zona de Fratura Rápida

 Entalhe concentrador de tensão

Fratura por Fadiga

Exemplos de Fratura por Fadiga

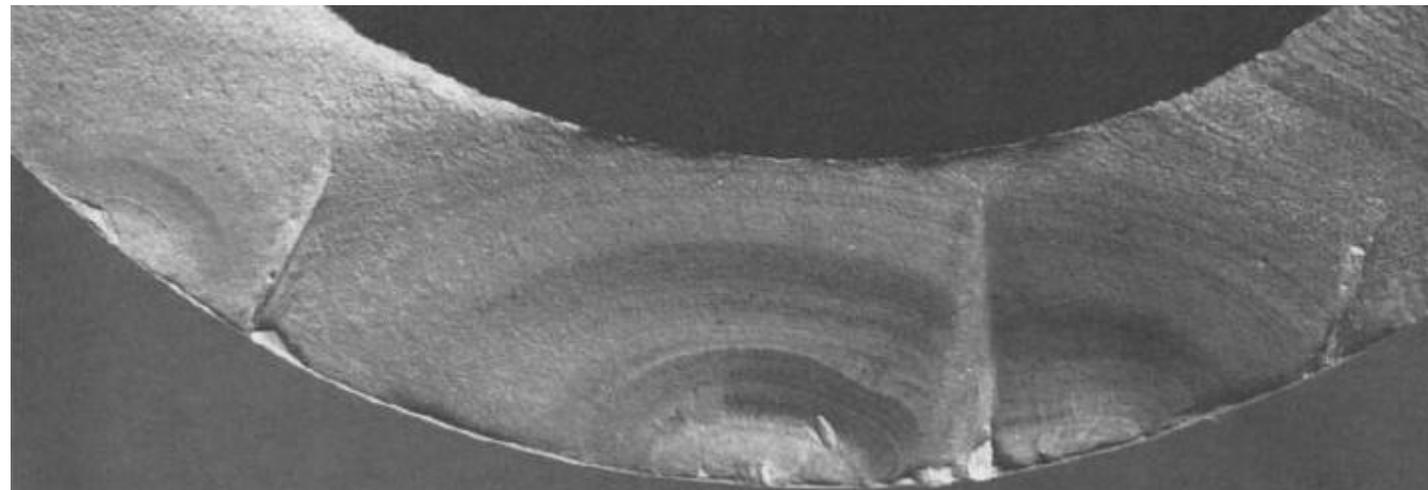
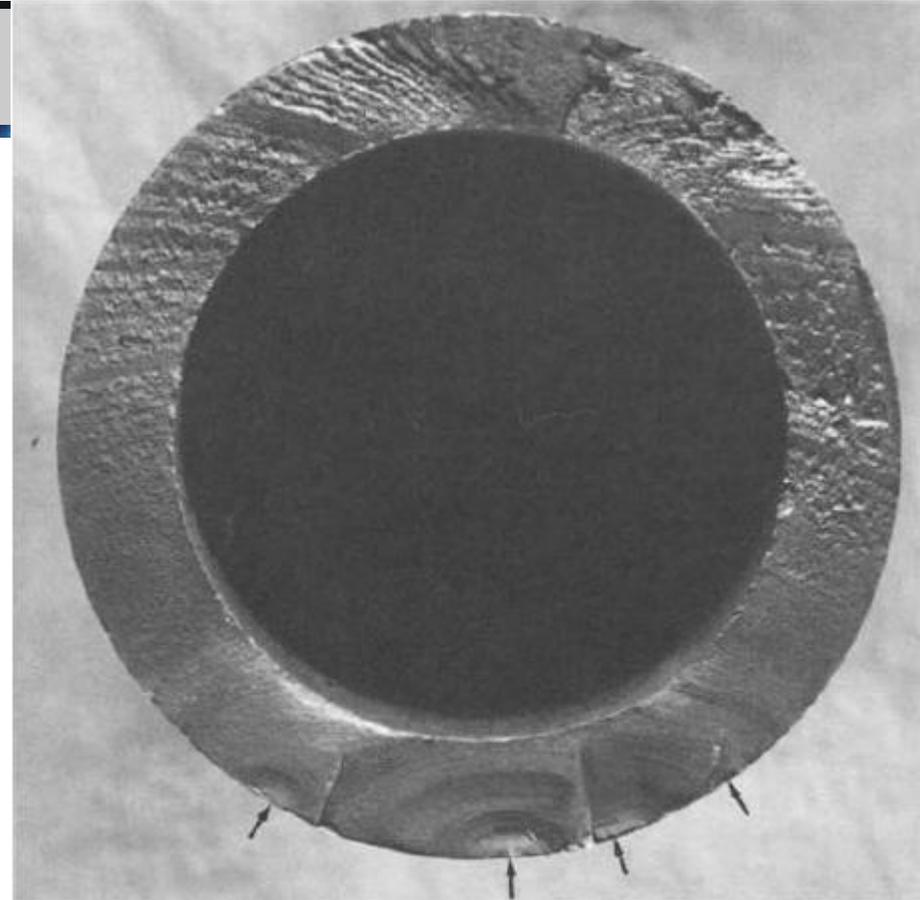
Aço médio Carbono, com origem de fratura a partir de uma marca de usinagem. O trabalho do componente foi em carga baixa, uma vez que a fadiga se estendeu ao longo de quase toda a seção.



Fratura por Fadiga

Exemplos de Fratura por Fadiga

tubo de aço com 3,6 polegadas de diâmetro, mostrando quatro origens de fadiga. Marcas de praia são claramente observadas. Carga de flexão unidirecional.



Fratura por Fadiga

Exemplos de Fratura por Fadiga

Fadiga em flexão reversa em eixo de 1,6 polegadas de diâmetro para um aço SAE 1046.

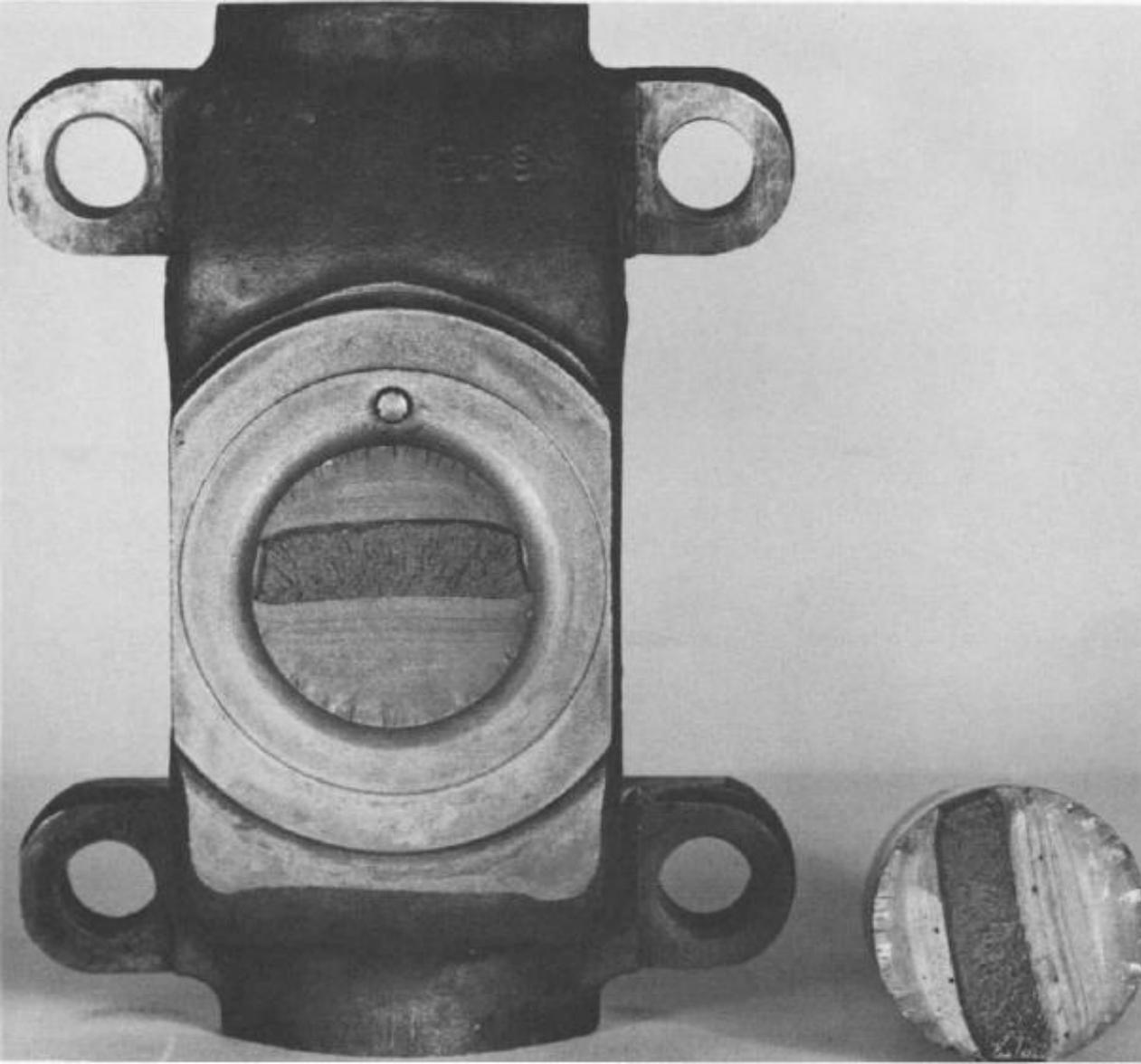
Fadiga simétrica, de cada lado, finalizando a ruptura no centro.

Marcas em C indicam dano na fratura durante o processo de falha.



Fratura por Fadiga

Exemplos de Fratura por Fadiga

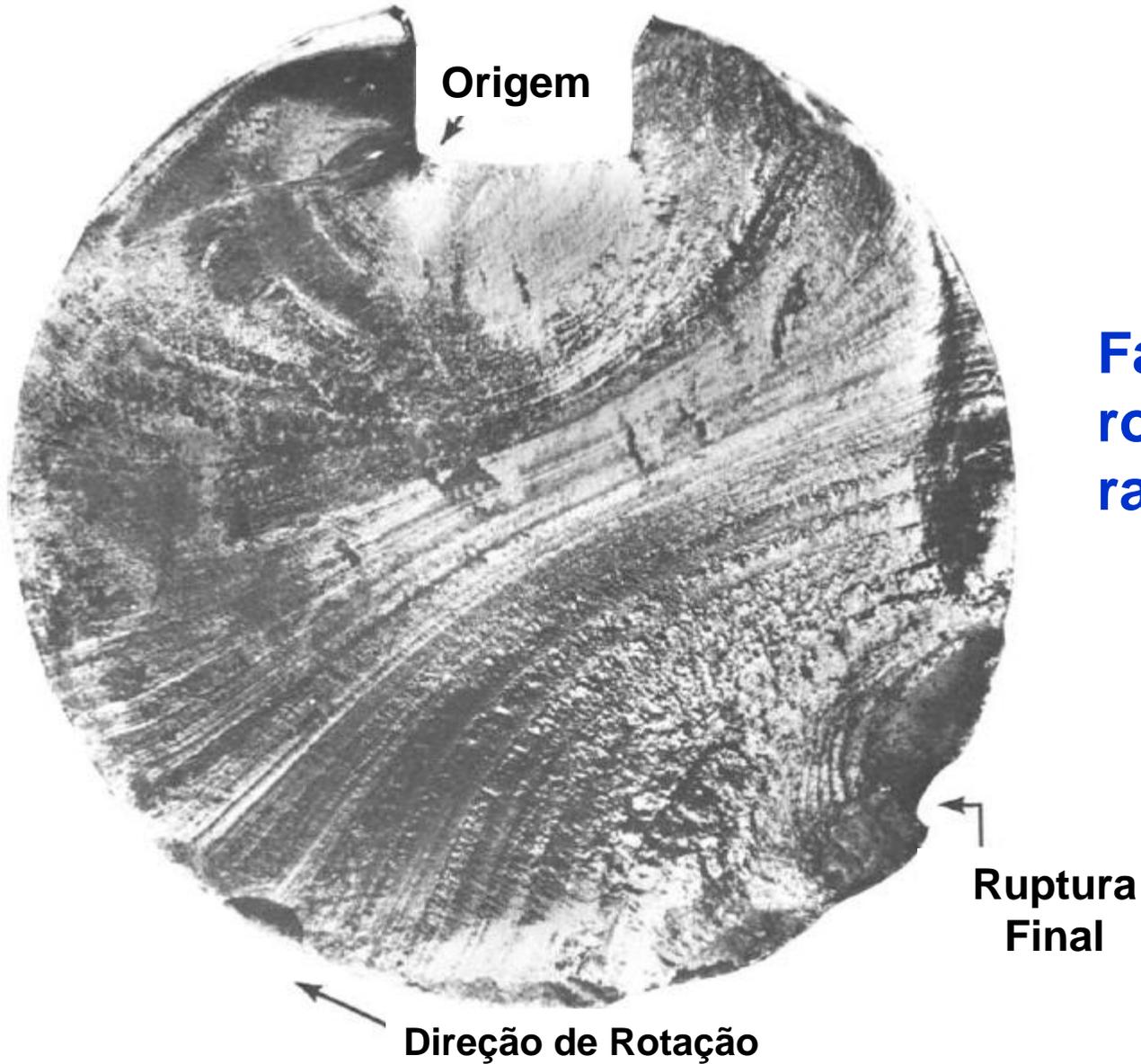


Fadiga reversa em flexão, com aplicação de tensões não uniformes, resultando em Fadiga não simétrica.

Marcas de Fenda e marcas de praia visíveis, com fratura final deslocada do centro.

Fratura por Fadiga

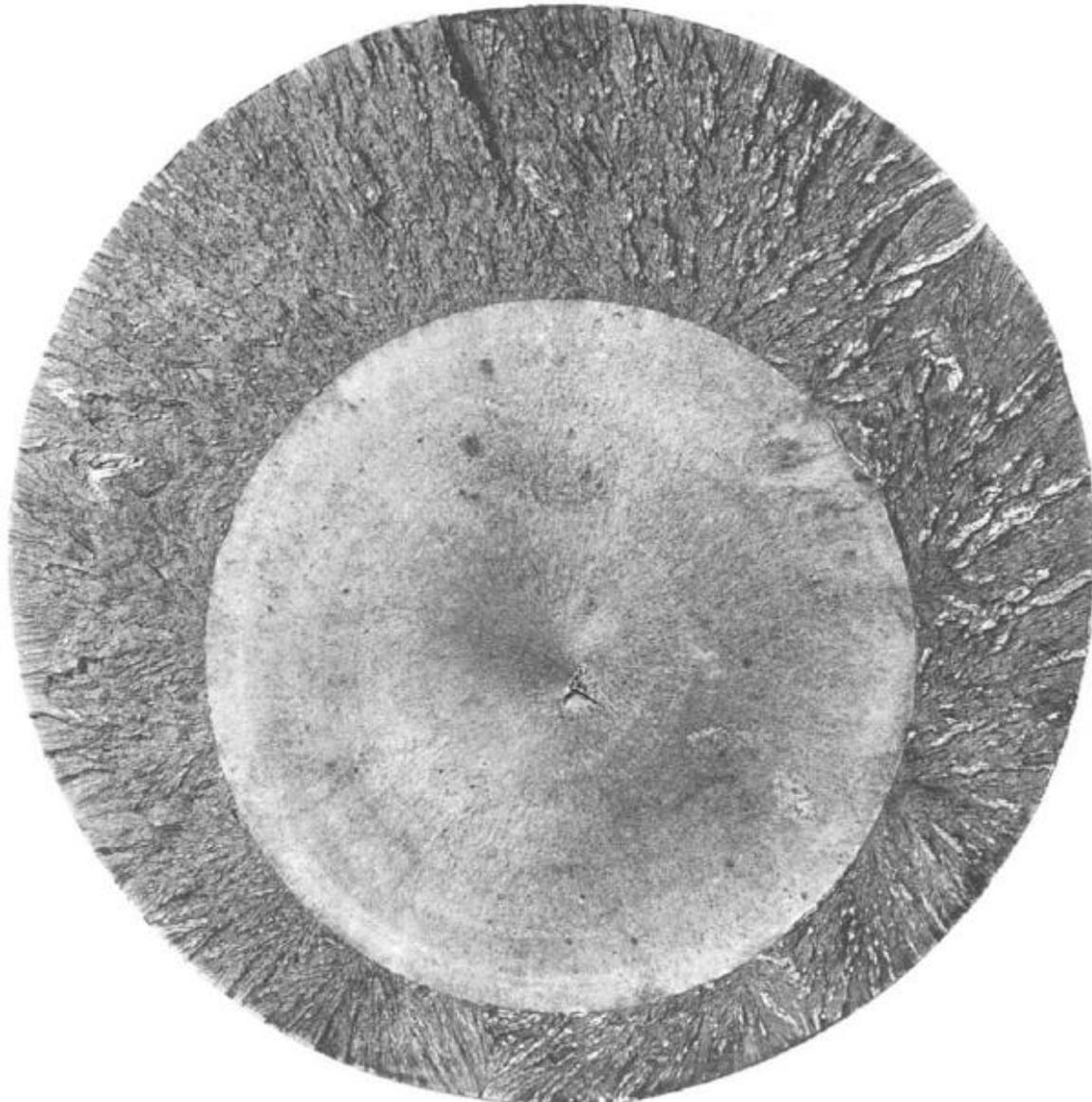
Exemplos de Fratura por Fadiga



Fadiga por flexão rotacional, a partir do rasgo de chaveta.

Fratura por Fadiga

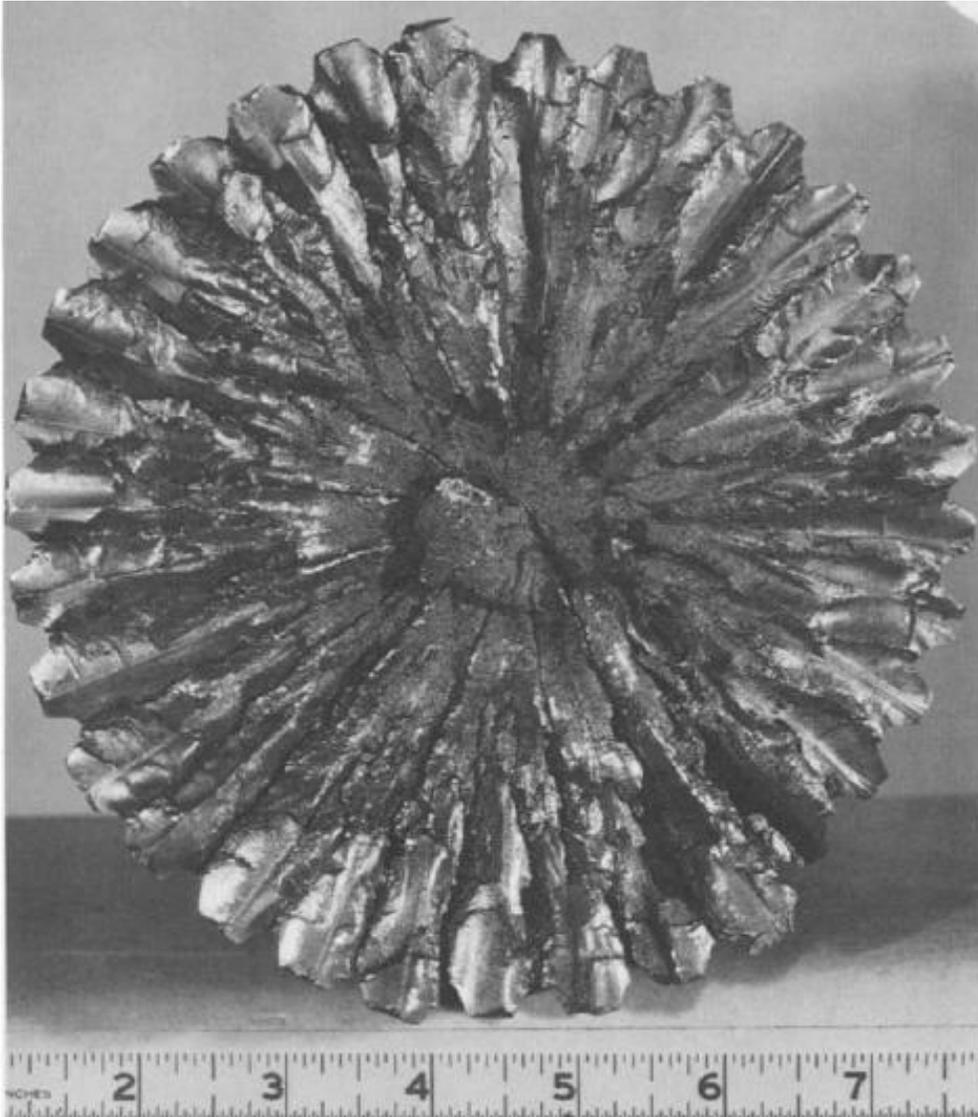
Exemplos de Fratura por Fadiga



Fadiga trativa com origem no centro de um eixo forjado. Um defeito de forjamento central induziu a nucleação e crescimento do centro para fora. Aço Carbono.

Fratura por Fadiga

Exemplos de Fratura por Fadiga



Fadiga torcional reversa em um eixo com recartilhado (spline) com múltiplas fraturas por fadiga.

Cada um dos 32 dentes apresenta duas trincas de fadiga, cada uma a 45° com o eixo.

Fratura por Fadiga

Exemplos de Fratura por Fadiga

Fadiga por flexão em diversos dentes da engrenagem de aço SAE 8620 Cementado e endurecido a 60HRC.

O dente A fraturou antes, apresentando a maior área de fadiga, originada no filete na lateral do dente. A fratura do primeiro induziu a fadiga dos demais dentes.





Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Introdução

Desgaste é definido como sendo a remoção indesejável de material de superfícies em contato por ação mecânica.

O desgaste de componentes é um problema que envolve um custo elevado de operação de máquinas, além de muitas pessoas envolvidas na substituição dos mesmos. Ao mesmo tempo, eliminar o desgaste pode levar à falência de muitas empresas que sobrevivem pela reposição dos seus produtos.

O desgaste é considerado um tipo de deterioração. Em muitos casos, pode ser minimizado pela adoção de lubrificantes, filtragem, engenharia de materiais, projeto adequado, entre outros.

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Tipos Comuns de Desgaste

Os tipos mais comuns de desgaste são:

1- Desgaste Abrasivo

- Desgaste Erosivo (colisão de partículas)
- Desgaste por contato com superfície abrasiva (lixamento)
- Desgaste por Goivadura

2- Desgaste Adesivo

3- Desgaste por Atrito diferencial

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Tipos Comuns de Desgaste

1- Desgaste Abrasivo

Pode ser caracterizado por uma única palavra: Corte.

O desgaste abrasivo ocorre quando partículas duras suspensas em um fluido ou projeções da superfície de rolos ou deslizamento sob pressão contra outra superfície, causam o corte da outra superfície.

Características importantes:

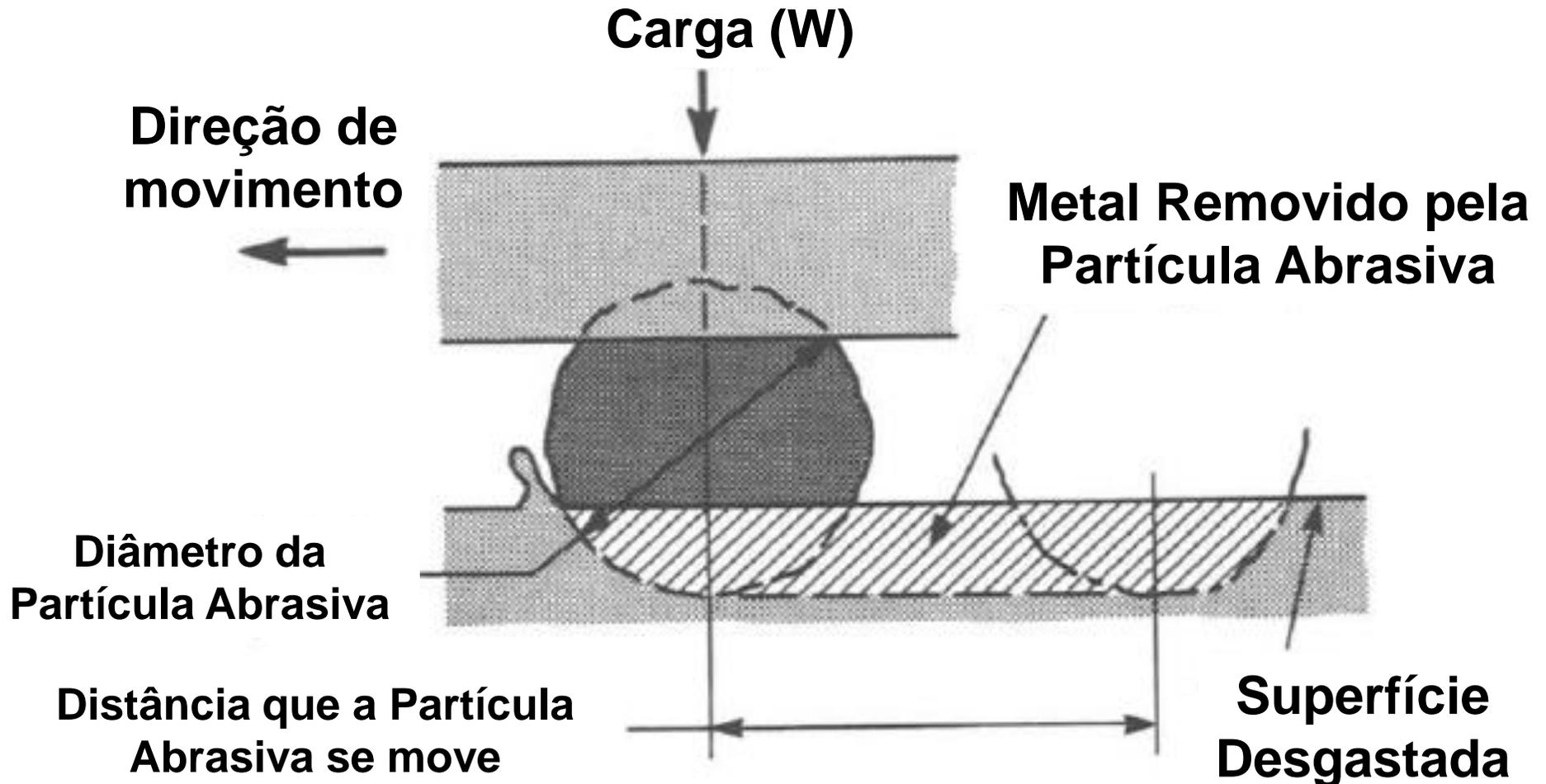
a- O corte do metal causa distorção microscópica na estrutura da superfície, formando um fragmento distorcido que é removido.

b- Calor é gerado pela fricção entre os materiais.

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Tipos Comuns de Desgaste

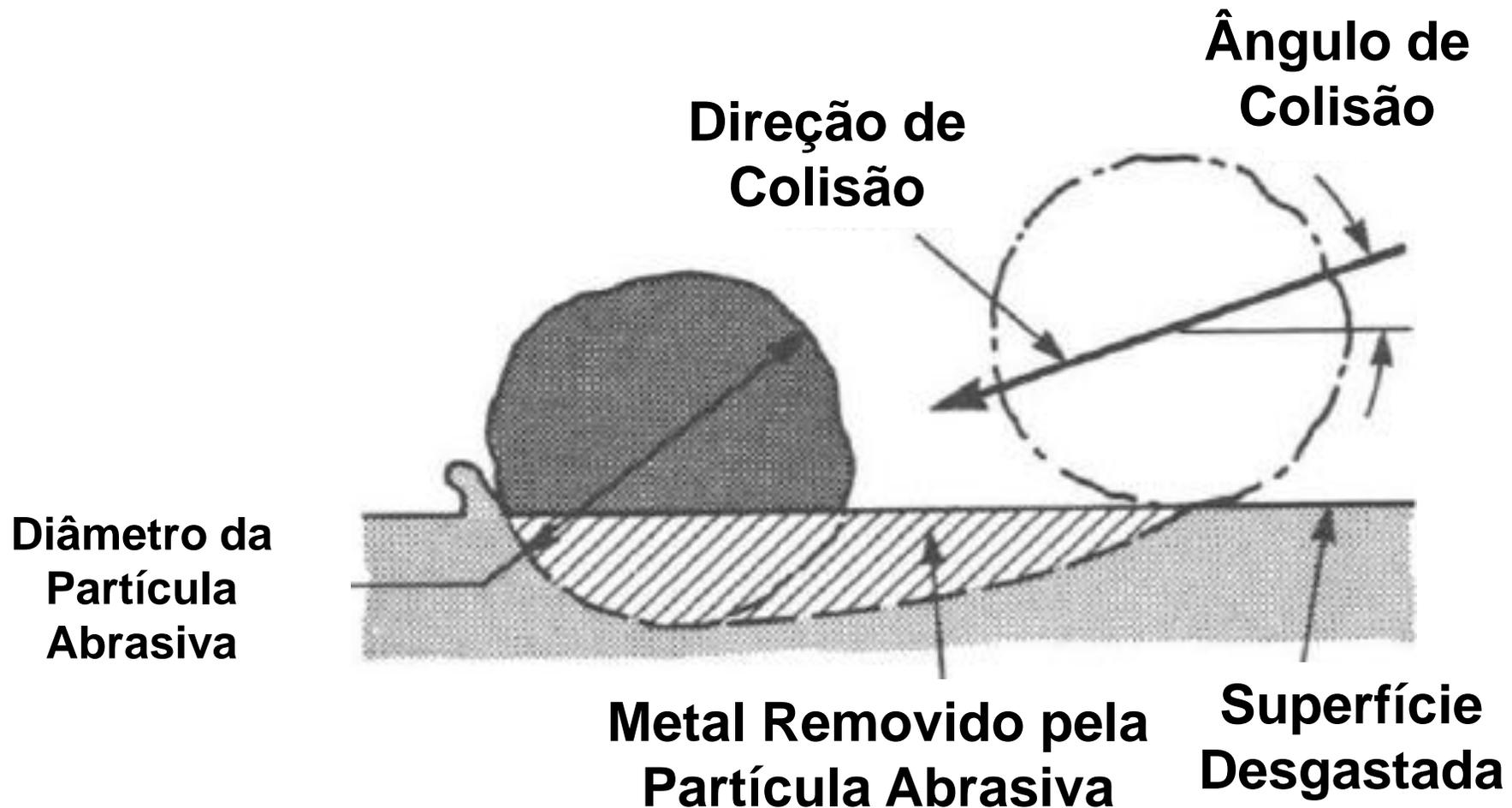
1- **Desgaste Abrasivo (Grinding ou Gouging)**, ocorre quando a partícula está presa entre duas superfícies.



Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Tipos Comuns de Desgaste

1- **Desgaste Abrasivo (Erosion):** Ocorre quando a partícula colide sobre a superfície a um dado ângulo.



Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

1- Soluções gerais para o Desgaste Abrasivo

Aumento da Dureza Superficial

Em diversos casos parece ser a mais óbvia solução, como para ferramentas de corte, facas de corte, ferramentas em geral. O aumento da dureza, entretanto, pode levar à fratura frágil (aumento da tendência) que resulta em pior comportamento do que o próprio desgaste.

Remoção das Partículas Externas

Parece também óbvio que se existem partículas abrasivas, a sua eliminação anularia o desgaste. Este é o motivo que leva à adição de filtros de ar, água e óleo usados em vários tipos de máquinas. Motores de carro usam filtros de ar, óleo e combustível, no sentido de eliminar este fator.

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

1- Soluções gerais para o Desgaste Abrasivo

Substituição do Componente Desgastado

Uma forma comum de conviver com o desgaste é substituir o componente desgastado por um novo. Entretanto, a substituição pode não ser prática em muitas situações, devido à acessibilidade, custos de parada de máquina, disponibilidade de peças de reposição em situações de emergência.

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Desgaste Erosivo (Erosive Wear)

Ocorre quando partículas em um fluido ou outro meio colide sobre a superfície em alta velocidade. Cada partícula abrasiva que colide na superfície promove a remoção de uma partícula desta.

Uma partícula não promove expressiva mudança na superfície, entretanto, inúmeras partículas podem levar a dano severo.

Áreas com desgaste erosivo tem sido observadas em bombas, válvulas, rotores e turbinas, além do interior de tubulações com dobras a 90° , em que existe movimento relativo de um agente abrasivo.

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

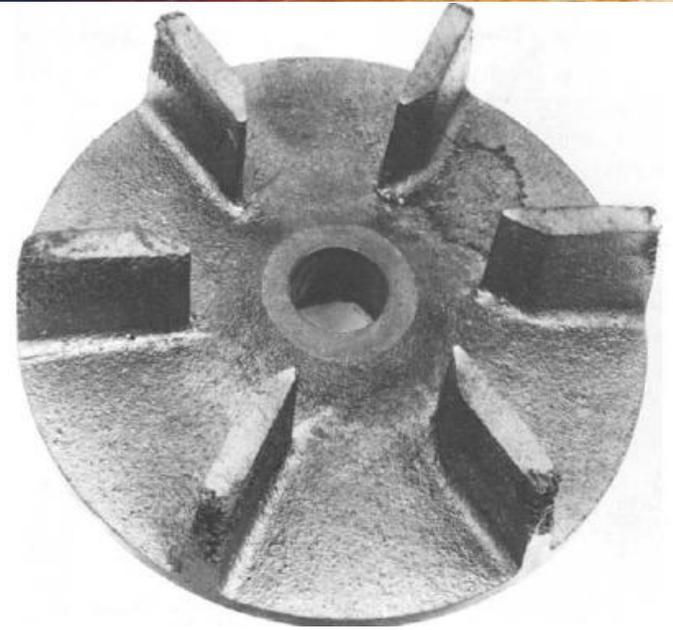
Desgaste Erosivo (Erosive Wear)

Características do Desgaste Abrasivo

1- Remoção geral de material ou revestimentos de baixa dureza

2- Arranhamento com formação de canais de remoção de material (Grooving)

3- Arredondamento de cantos ou mudanças na forma do componente.



Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Desgaste por Lixamento (Grinding Wear)

Ocorre quando as partículas sujeitas a elevadas tensões e baixa velocidade cortam a superfície e muitos pequenos arranhamentos (grooves) se formam.

Este tipo de desgaste envolvendo elevada tensão e baixa velocidade é característico de ferramentas agrícolas, peças de contato com a terra, mineração, sapatas de escavadeira, facas de corte, entre outros.

É característico pelo desgaste de áreas de elevada tensão, particularmente em cantos, causando mudança na forma.

Este tipo também pode ser associado ao aparecimento de uma superfície mais polida que as demais regiões, como resultados do contato com pequenas partículas abrasivas.

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

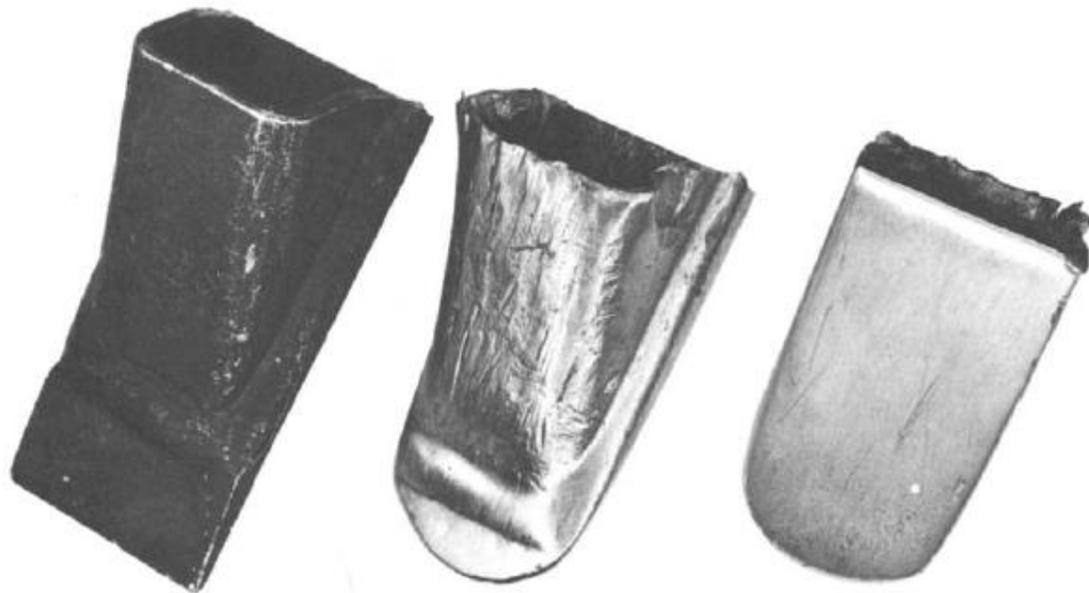
Desgaste por Goivagem (Gouging Wear)

Este tipo de desgaste é causado por impacto de elevada tensão causados em taludes, que tendem a cortar fragmentos de desgaste da superfície do metal.

Este tipo de serviço é encontrado em escoramento de encostas em desabamento, mineração, perfuração de poços de petróleo, processamento de cerâmicas, etc.

Aços Hadfield:

Desenvolvido a cem anos atrás por Robert Hadfield na Inglaterra. É um aço Manganês austenítico que transforma para Martensita por deformação.



Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Desgaste Adesivo (Adhesive Wear)

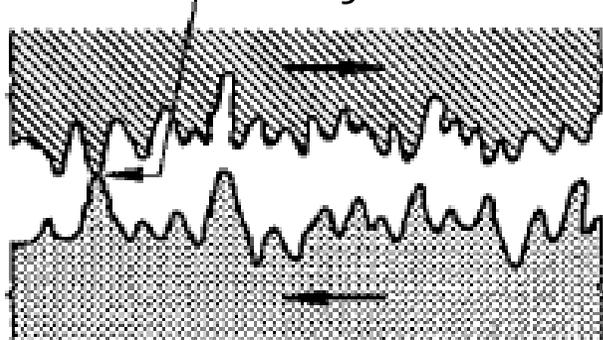
Pode ser caracterizado por uma palavra: soldagem ou microsoldagem.

(a) Quando os picos de rugosidade de uma superfície encontram outras, ocorre a microsoldagem pelo aquecimento gerado pela fricção das superfícies.

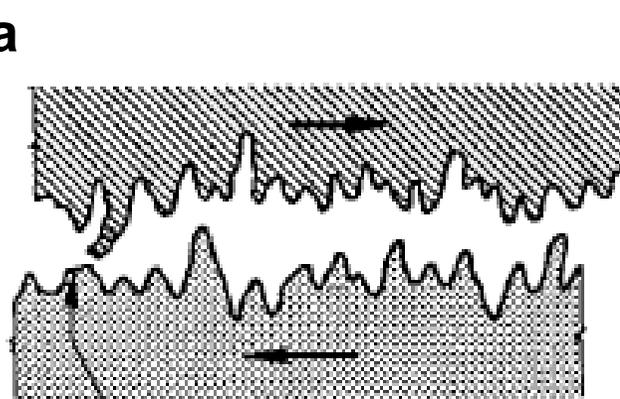
(b) A continuação do deslizamento faz a rugosidade ser reduzida em uma das superfícies, enquanto aumentada na outra.

(c) Este pico mais alto formado em (b) agora está apto a interagir novamente com a outra superfície.

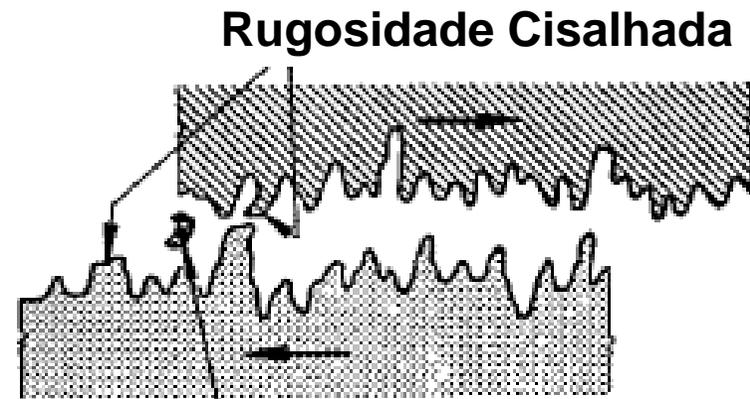
Junção Soldada



(a)



(b) **Rugosidade Cisalhada**

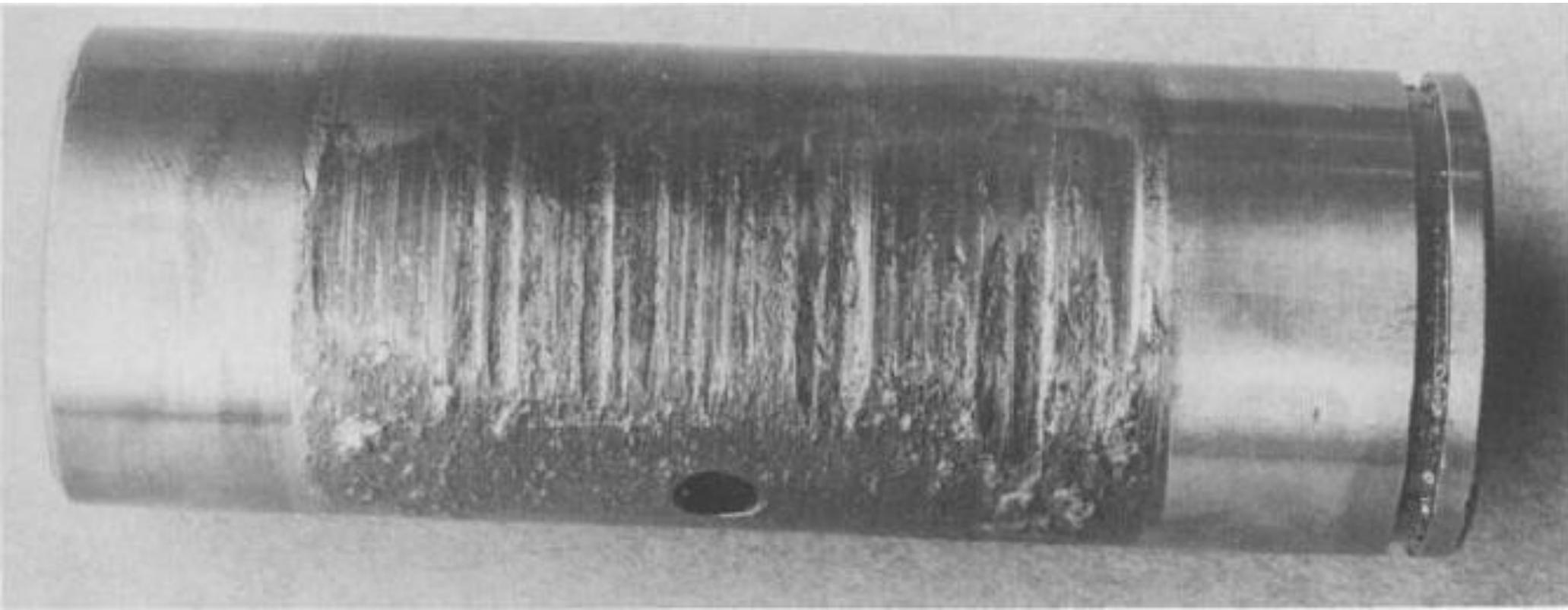


(c) **Partícula do Desgaste**

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Desgaste Adesivo (Adhesive Wear)

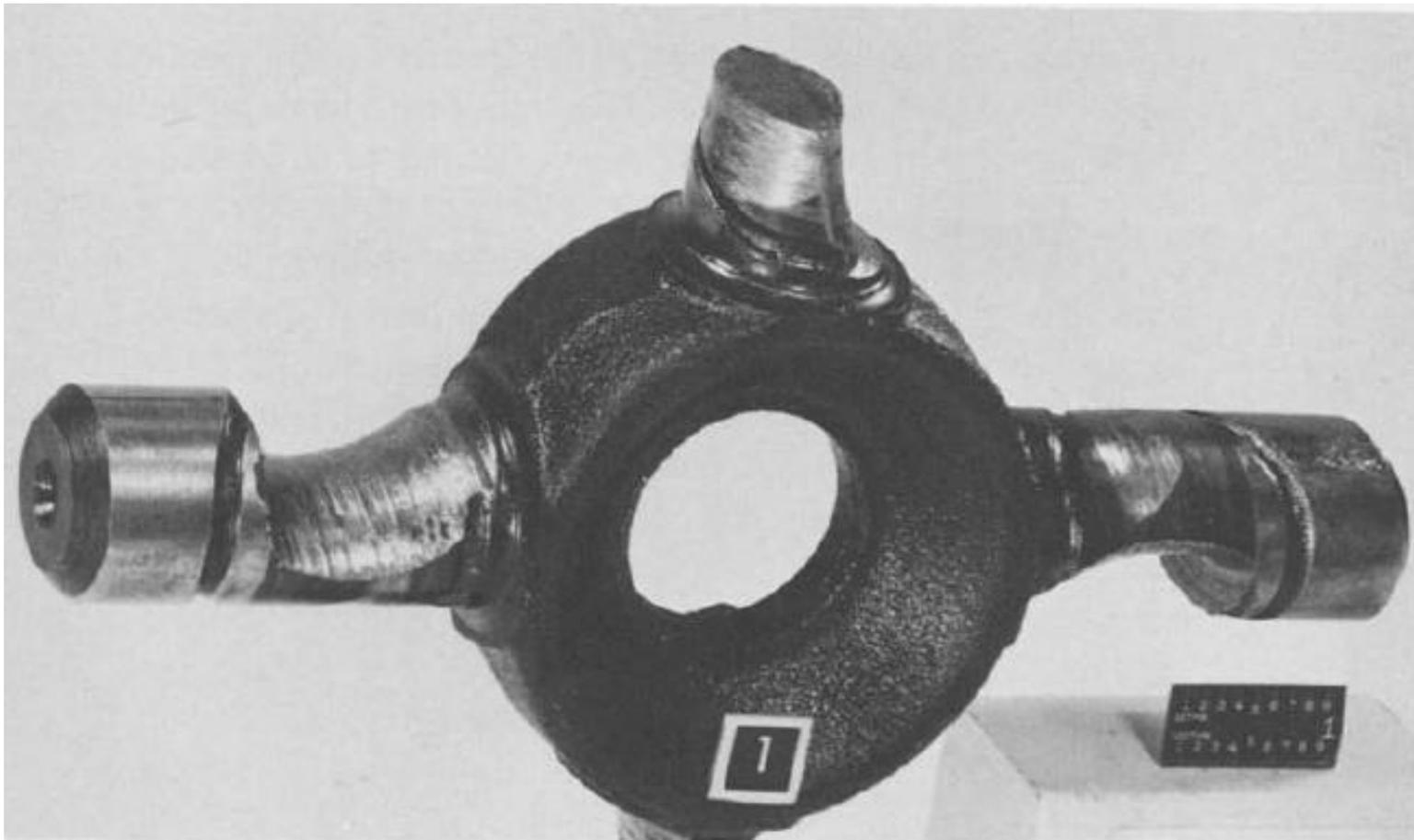
Desgaste Adesivo Severo em pino de eixo que girou sem lubrificante. Aço Carbono Cementado.



Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Desgaste Adesivo (Adhesive Wear)

Desgaste Adesivo de uma cruzeta seguido de fratura na região de desgaste severo. Resultou de lubrificação inadequada. Aço Carbono Cementado.



Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Desgaste Adesivo

Além do aquecimento gerado pela fricção, alta o suficiente para causar a microsoldagem, a temperatura é também elevada o suficiente para causar tratamento térmico indesejado na superfície do metal.

O desgaste adesivo é similar à queima de retífica e ambos podem induzir o revenimento de regiões subsuperficiais ou endurecimento com alterações microestruturais nos aços, resultando em martensita não revenida (branca) que é extremamente susceptível ao trincamento devido à sua elevada dureza e fragilidade.

Estas trincas podem levar à fratura frágil ou fratura por fadiga, dependendo do carregamento e aplicação.

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Prevenção do Desgaste Adesivo

Uma vez que o desgaste adesivo é causado por elevadas temperaturas localizadas, a temperatura do interior do lubrificante deve ser mantida baixa.

Adoção de metais em contato que são insolúveis uns nos outros. Se dois metais não são soldáveis, o resultado é a eliminação do desgaste adesivo. Este princípio é usado para a seleção de materiais para buchas de deslizamento. Não usa-se aço contra aço na fabricação de buchas (não intencionalmente). Quando for o caso, usa-se revestir com Prata ou Ouro ou outra técnica pode ajudar a evitar o desgaste adesivo.

Seleção de superfícies polidas, uma vez que serão reduzidas as imperfeições às quais o lubrificante precisa penetrar. Isto quer dizer que filmes contínuos de lubrificante são preferidos.

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Prevenção do Desgaste Adesivo

Superfícies quimicamente sujas ou a adoção de filmes químicos são frequentemente usados a fim de evitar o contato metal-metal. Superfícies com fosfatos ajudam a separar a superfície metal-metal, especialmente no início de operação de um equipamento. Neste caso, a superfície com malha de fosfato auxilia a manter o lubrificante.

Óleos especiais vem sendo desenvolvidos nos últimos anos para formar filmes monomoleculares na superfície dos aços. São usados onde existe altas velocidades de deslizamento.

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Desgaste por Atrito Diferencial (Fretting Wear)

Pode ser caracterizado de forma similar ao desgaste adesivo, uma vez que ocorre a microsoldagem. A diferença para o adesivo é que no “Fretting” as superfícies estão estacionárias umas às outras.

Entretanto, quando mínimas defleções elásticas ou pequeno movimento relativo ocorre, o movimento cíclico de amplitude extremamente pequena é suficiente para causar a microsoldagem de ambas superfícies.

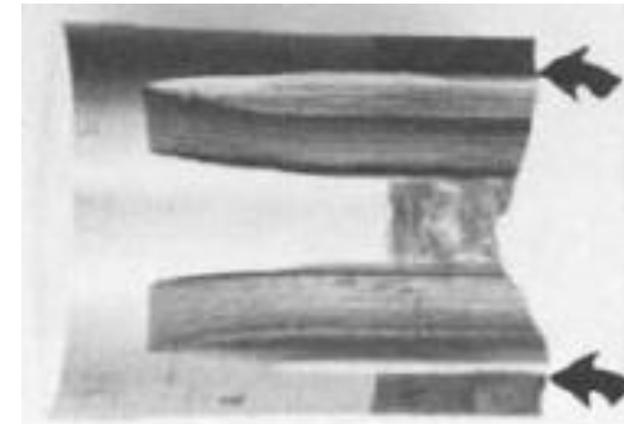
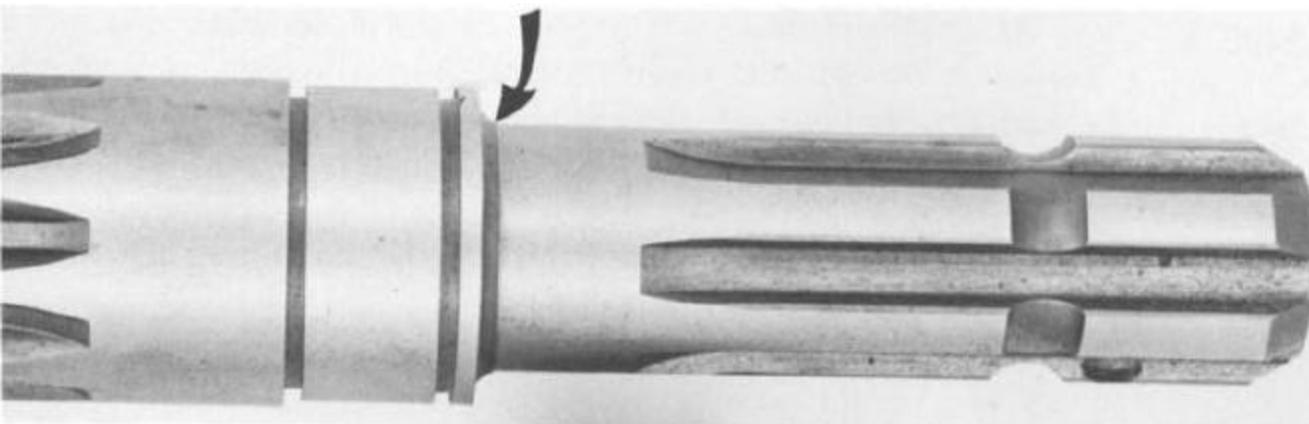
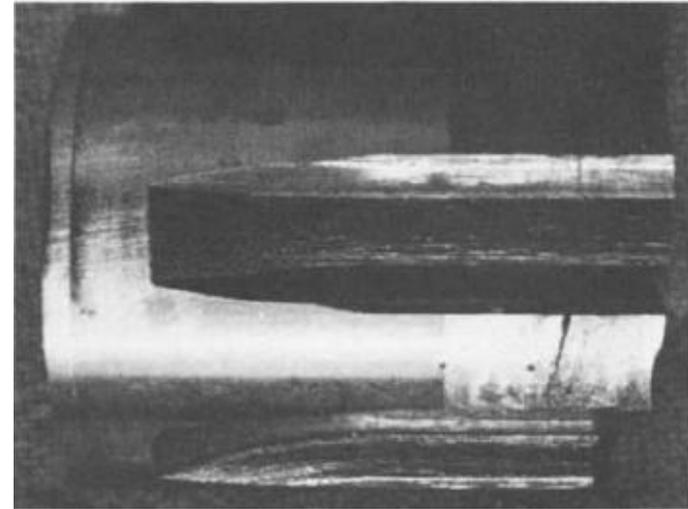
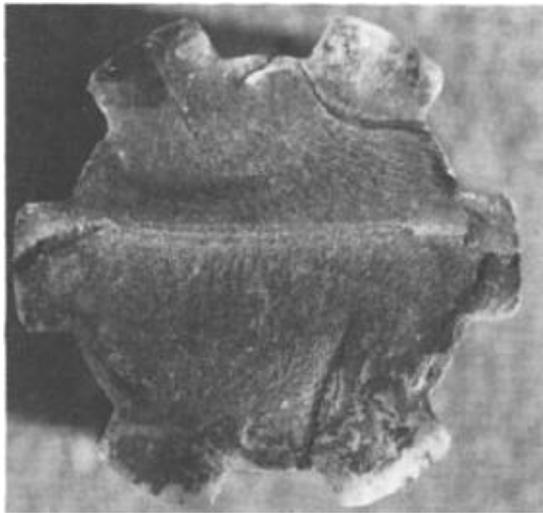
Fretting wear é também conhecido como Fretting Corrosion (corrosão de atrito acelerado por vibrações diferenciais na região interfacial).

Este tipo de desgaste ocorre em juntas estacionárias que estão fixadas por parafusamento, pinos ou outros mecanismos.

Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Desgaste por Atrito Diferencial (Fretting Wear)

Fadiga originada do desgaste por Atrito Diferencial, partindo do diâmetro externo do dente do recartilhado.



Falhas por Desgaste: Abrasivo e Adesivo

Desgaste por Atrito Diferencial (Fretting Wear)

Formas de prevenção do Fretting Wear:

- Eliminar ou reduzir a vibração - Esta solução pode vir acompanhada por artifícios anti-vibração, alterar secções a fim de alterar a frequência de vibração natural.
- Eliminar ou reduzir o deslizamento na interface – Algumas vezes pode ser elevada a pressão entre as superfícies ou elevação da rugosidade.
- Adoção de Elastômero na junta – Projetar uma nova junta com uso de luvas de elastômeros, absorvendo as vibrações e prevenindo o contato metal-metal.
- Introdução de tensões residuais compressivas superficiais auxiliam a prevenir a falha causada por este tipo de desgaste. (Shot peening, surface rolling). Podem ser realizada a nitretação da superfície.