

Análise de Falhas

DEMEC – TM049

Prof Adriano Scheid



Colapso do Wright Flyer, 1908.



Falhas por Desgaste-Fadiga

Falhas por Desgaste-Fadiga

Introdução

Neste capítulo, serão discutidos diferentes motivos para a remoção de metal em superfícies, tais como a fadiga que produz cavidades e pites. Este processo pode ocorrer pelo contato de superfícies ou por movimento relativo entre um fluido e uma superfície.

As cavidades são um defeito crítico, uma vez que promovem concentração de tensões que podem levar à fratura do componente. Outra possibilidade é a participação dos fragmentos gerados no processo de desgaste dos componentes de uma máquina.

A fadiga discutida aqui apresenta o mesmo mecanismo resultante da aplicação de cargas cíclicas para milhares de ciclos. Entretanto, ao invés de levar à fratura da peça, somente fragmentos superficiais são removidos (pelo menos inicialmente). Estes fragmentos, quando destacados, geram pites ou cavidades nas superfícies.

Este processo é chamado Desgaste por Pitting ou **Fadiga por Tensão de Contato**.

Falhas por Desgaste-Fadiga

Existem três tipos de Comportamento

1- As cavidades iniciam como cavidades microscópicas e permanecem microscópicas ao longo da vida do componente. Neste caso, apenas um polimento ou aspecto superficial brilhante na superfície é observado.

2- As cavidades iniciam como microscópicas e gradualmente se tornam maiores durante a vida em serviço do componente.

3- Neste caso, as cavidades são grandes e à medida que o componente opera, tornam-se ainda maiores.

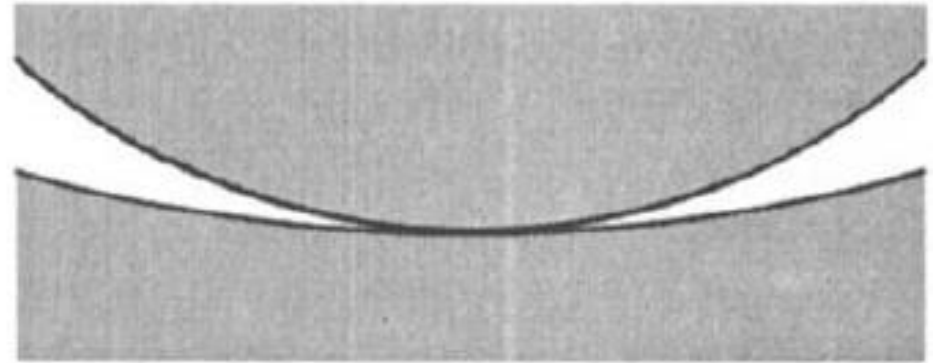
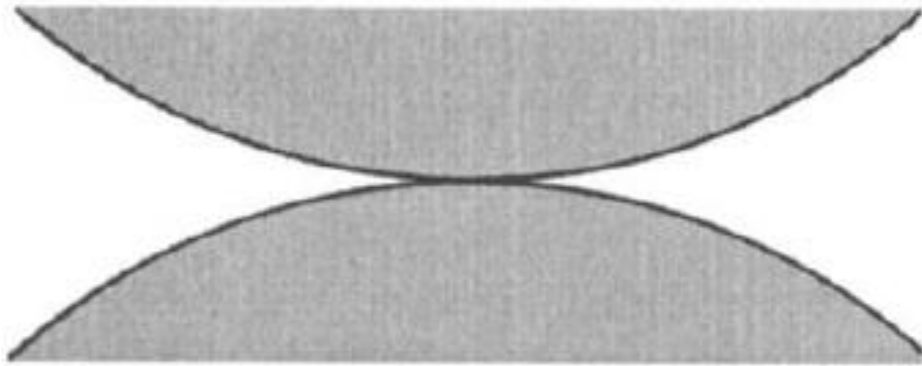
Os tipos 2 e 3 atuam destrutivamente em engrenagens de aço endurecido, buchas de mancais, eixos de came e outras peças que operam com tensões combinadas de rolamento de deslizamento.

Este fenômeno ocorre entre superfícies convexas em contato ou ainda superfícies convexas-côncavas.

Falhas por Desgaste-Fadiga

Situações que envolvem Fadiga de Tensão de Contato

Este fenômeno ocorre entre superfícies convexas em contato ou ainda superfícies convexas-côncavas.



Uma das razões que justifica a ocorrência da formação de cavidades por fadiga para superfícies em contato com tensões compressivas é que as áreas de contato estão concentradas em uma linha ou ponto de contato, dependendo da geometria do componente.

Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

A fadiga por tensões de contato pode ser subdividida em:

1- Fadiga com origem sub-superficial

2- Fadiga com origem superficial

3- Fadiga com origem em aços endurecidos superficialmente
(Fadiga por Lascamento ou Spalling)

4- Fadiga por Cavitação

Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

1- Fadiga com origem sub-superficial

É um tipo de fadiga que ocorre em aços endurecidos quando houver movimento por rolamento (puro) de um elemento em relação a outro. De fato, rolamento puro não é muito adequado, quando sabemos que a deflexão elástica está presente.

Uma vez que a máxima tensão está localizada a pequenas profundidades da superfície, este é o local normal para a nucleação da fadiga.

Enquanto na superfície os fatores geométricos são os mais comuns concentradores de tensão, para a fadiga sub-superficial estes concentradores de tensão são inclusões duras e frágeis presentes no aço.

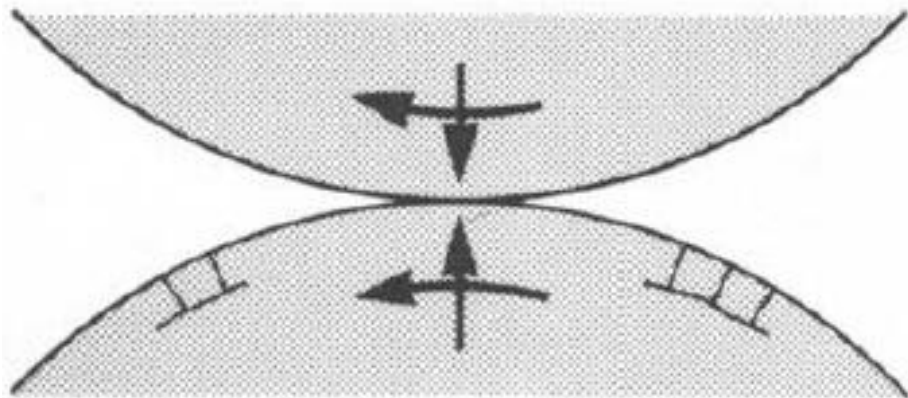
Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

1- Fadiga com origem sub-superficial

Este tipo de falha é observada em dentes de engrenagem, eixos de rolamento e buchas de rolamento.

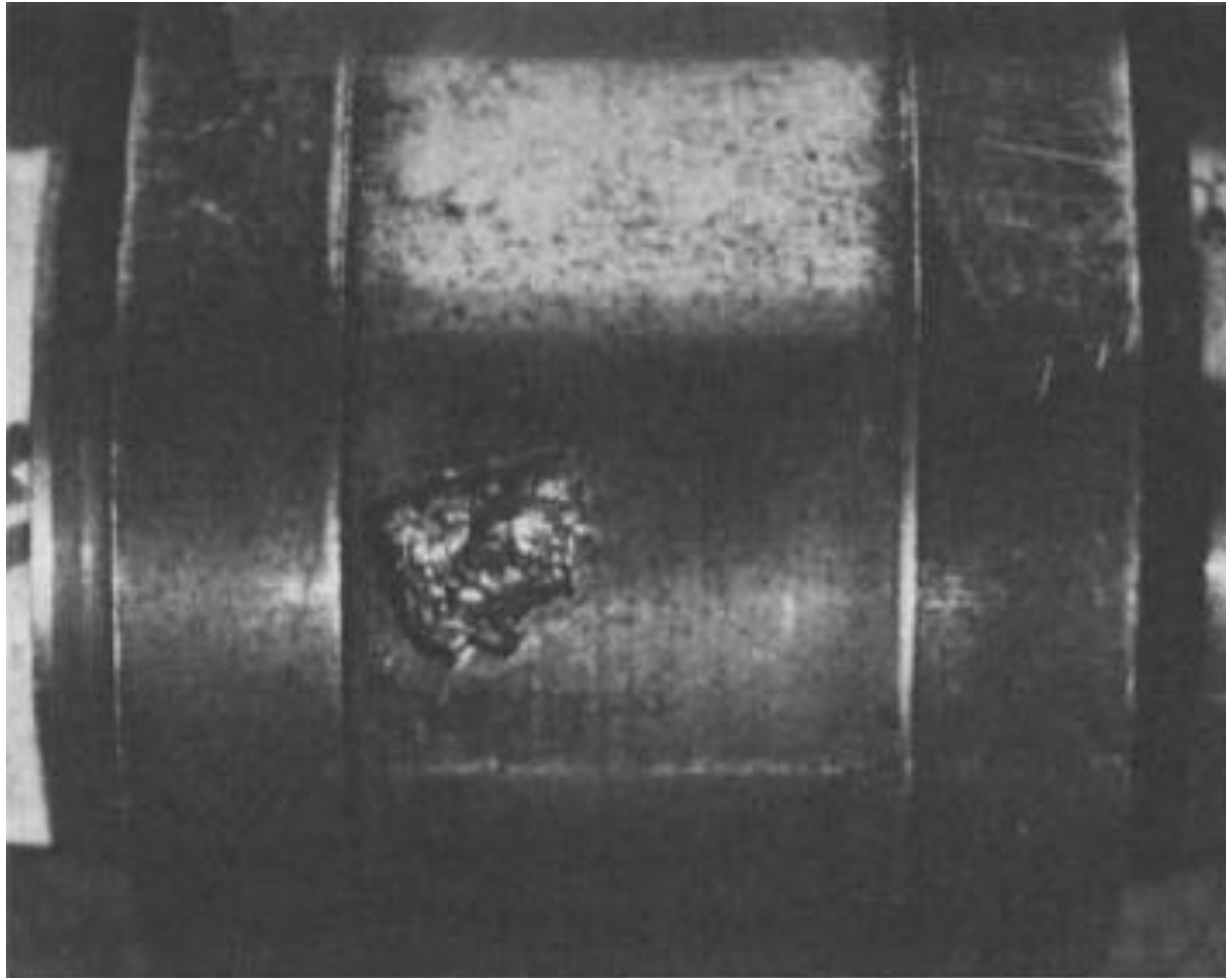
A trinca nucleia e propaga paralelamente à superfície, podendo alcançar a superfície externa.



Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

1- Fadiga com origem sub-superficial



Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

2- Fadiga com origem superficial

Este tipo de fadiga ocorre em aços endurecidos quando houver movimento por rolamento e deslizamento durante a operação. Neste caso, um mecanismo diferente e complicado aparece.

A máxima tensão de cisalhamento não está localizada abaixo, mas é trazida para a superfície devido à fricção por deslizamento e tensões trativas associadas.



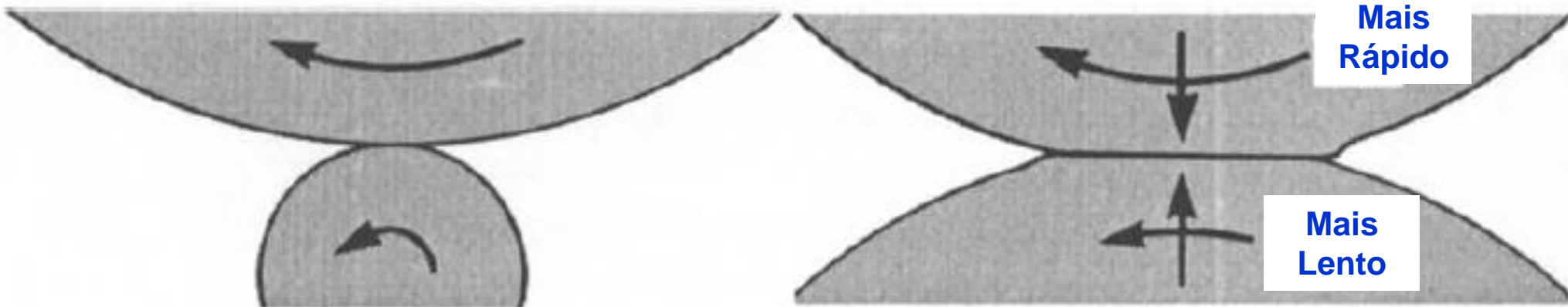
Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

2- Fadiga com origem superficial

O rolo superior roda em velocidade maior que o inferior, conforme a figura à esquerda. A figura à direita mostra que a superfície do rolo inferior é deformada para a esquerda, enquanto o rolo superior é deformado para a direita.

Usualmente os termos “Negative Sliding” e “Positive Sliding” são usados quando o sentido de rotação e deslizamento são iguais ou opostos. O primeiro caso refere-se ao rolo inferior e o segundo ao superior.



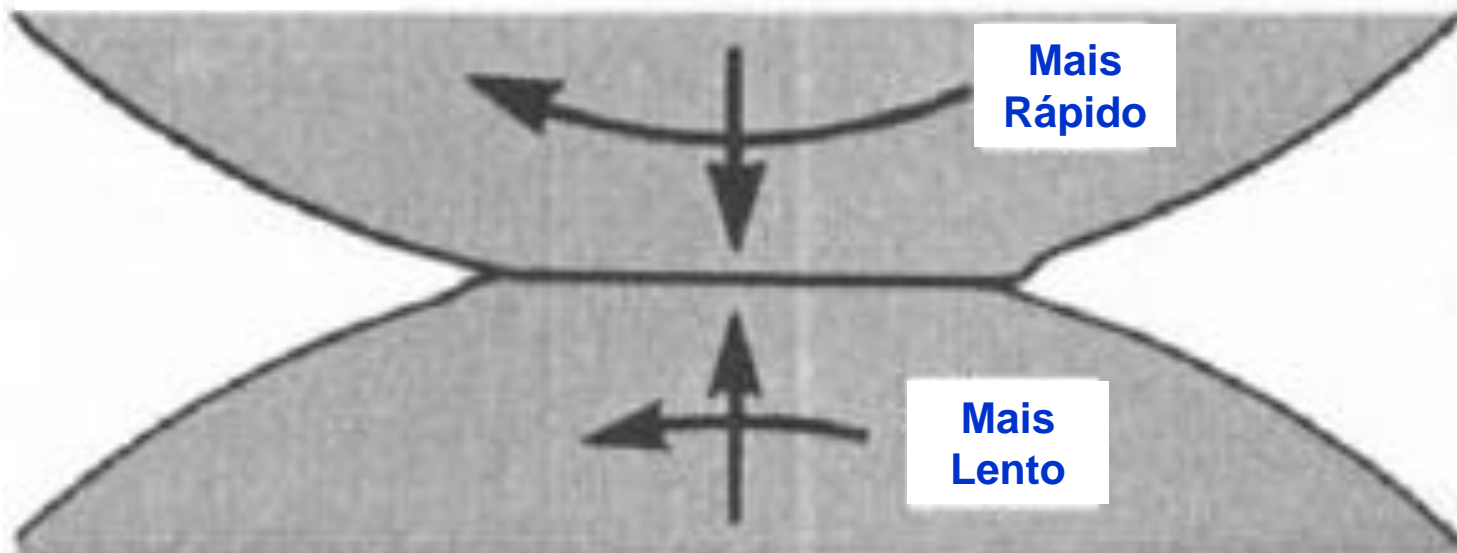
Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

2- Fadiga com origem superficial

No caso em que o “Negative Sliding” ocorre, as tensões geradas são maiores, uma vez que o rolamento ocorre em um sentido e o deslizamento no sentido oposto. Neste caso, há maior geração de tensões de fricção, térmicas e de cisalhamento e o número de revoluções é maior no rolo menor.

Positive Sliding



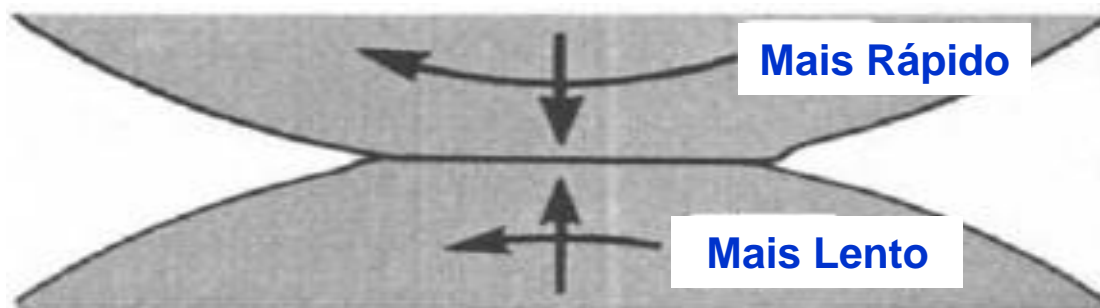
Negative Sliding

Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

2- Fadiga com origem superficial

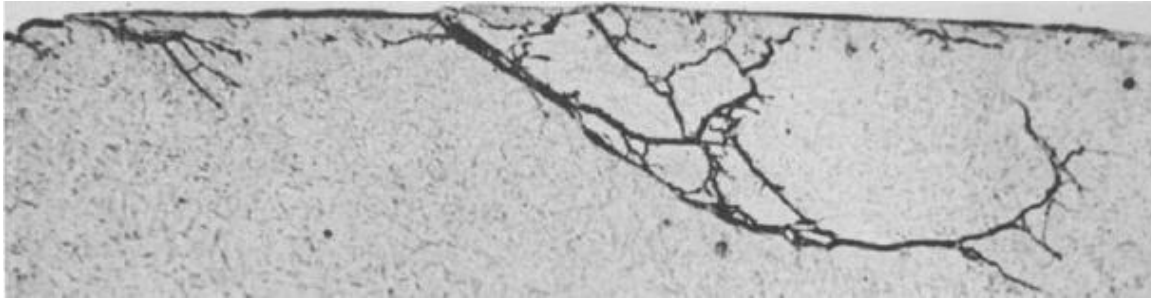
| Característica | Rolo Inferior | Rolo Superior |
|------------------------|---------------|---------------|
| Velocidade Superficial | Lento | Rápido |
| Rotação | Anti-horário | Horário |
| Rolamento | Horário | Anti-horário |
| Deslizamento | Anti-horário | Anti-horário |
| Pos. / Neg. Sliding | Negative | Positive |



Falhas por Desgaste-Fadiga

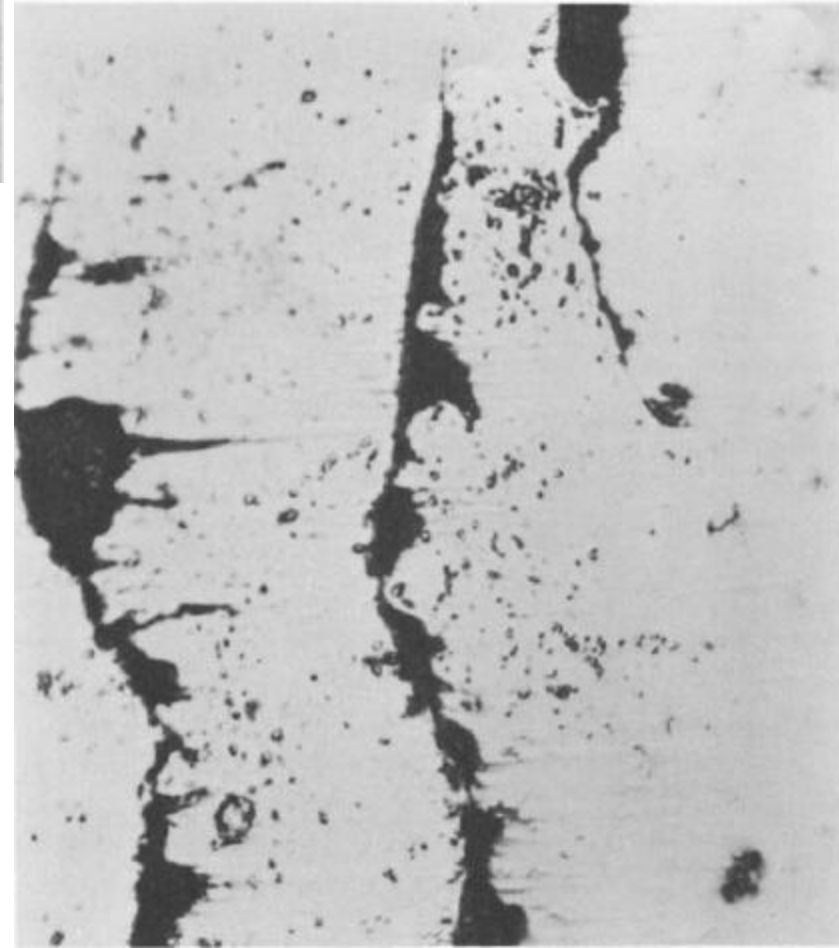
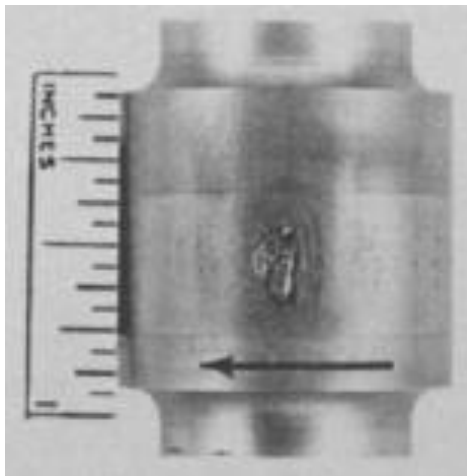
Fadiga por Tensões de Contato

2- Fadiga com origem superficial



Trincas com origem superficial

Ângulo de 45° de avanço das trincas

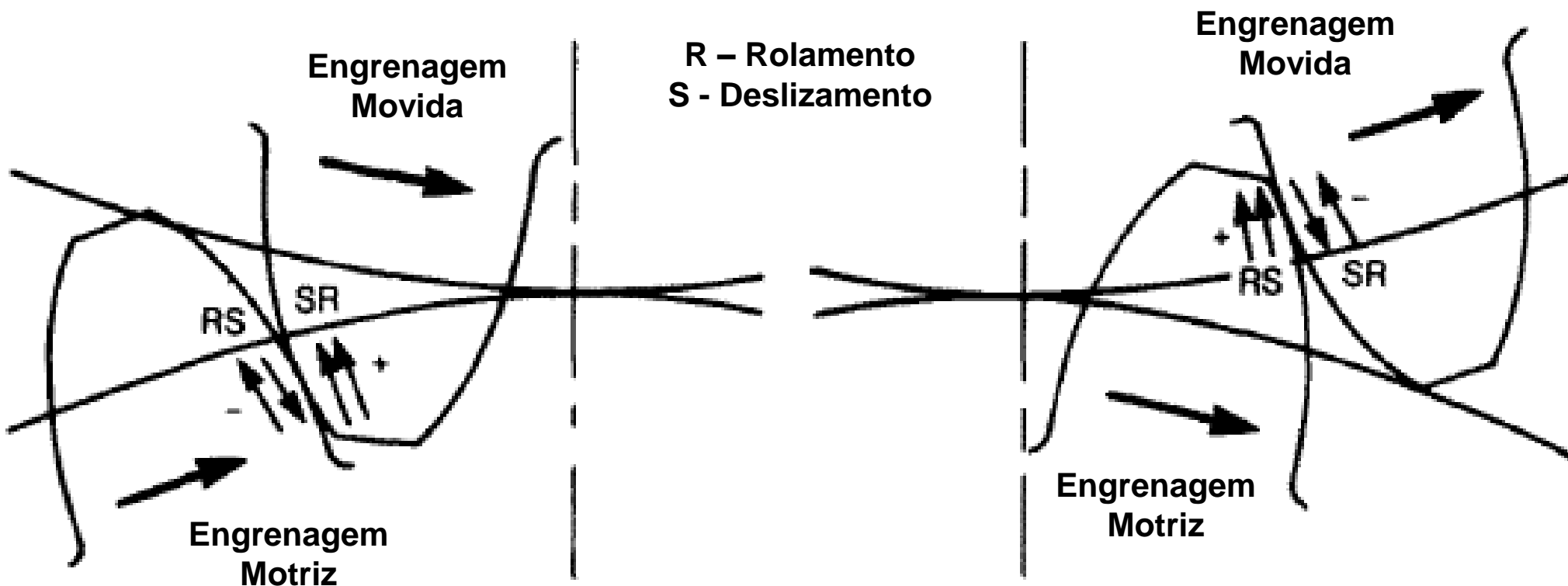


Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

2- Fadiga com origem superficial (Engrenagens)

Não há deslizamento no momento em que a direção do deslizamento se inverte (Pitch Line).

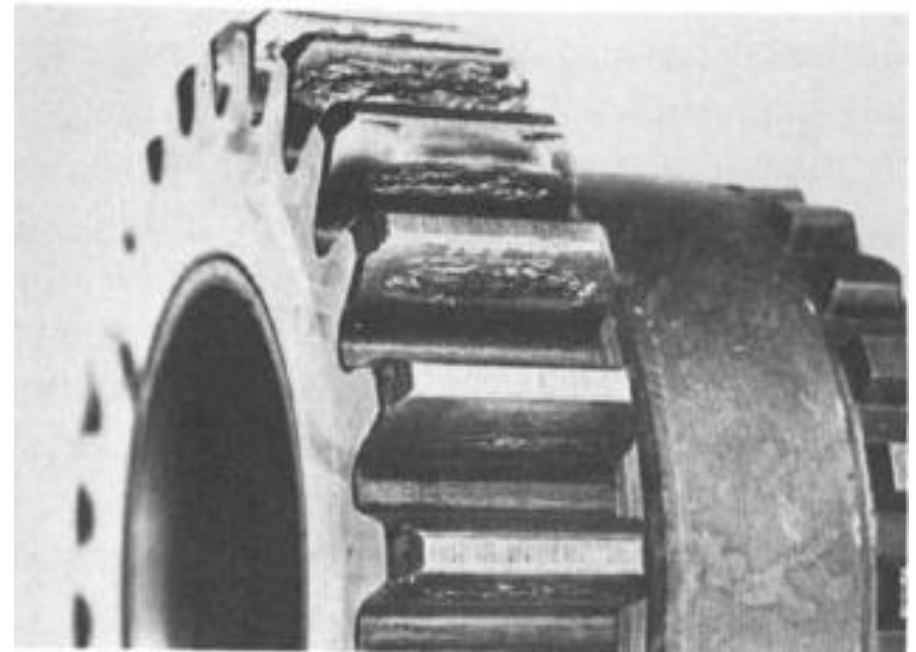
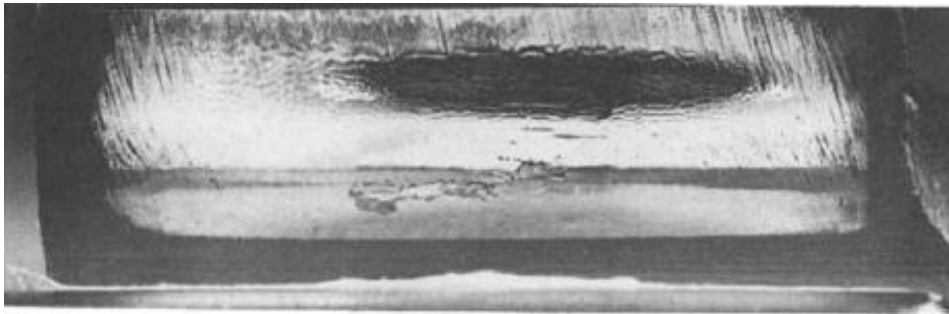


Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

2- Fadiga com origem superficial (Engrenagens)

A região de fadiga por pitting ocorre na distância entre o passo circular e a raiz do dente da engrenagem menor. Assim, a engrenagem menor é fabricada com dureza levemente superior à engrenagem maior, a fim de compensar o menor diâmetro que passa por um maior número de ciclos aplicados.



Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

3- Fadiga em Aços Endurecidos Superficialmente

Neste tipo de fadiga, muitos pedaços são subitamente removidos da superfície, causando dano extensivo às partes.

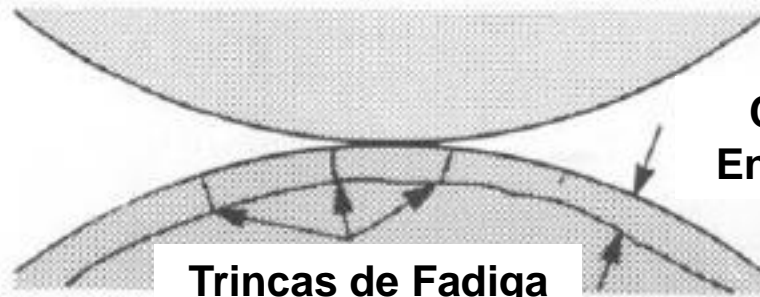
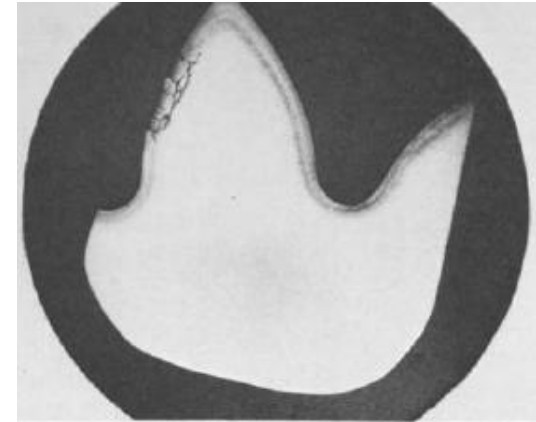
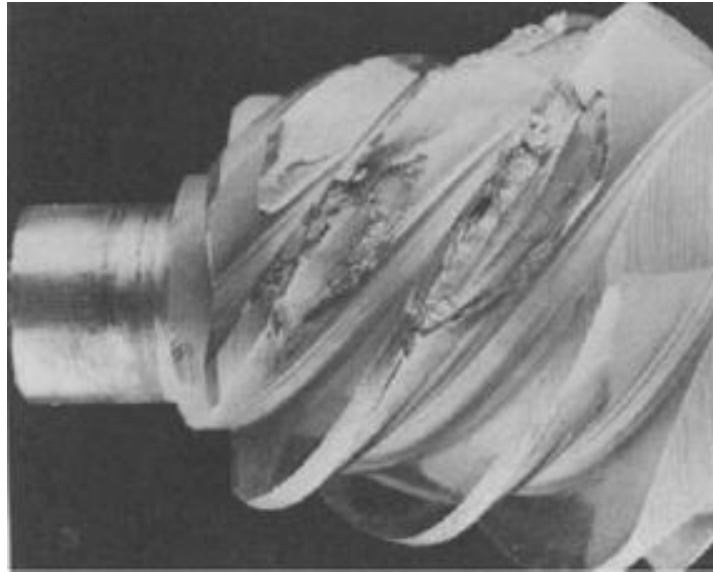
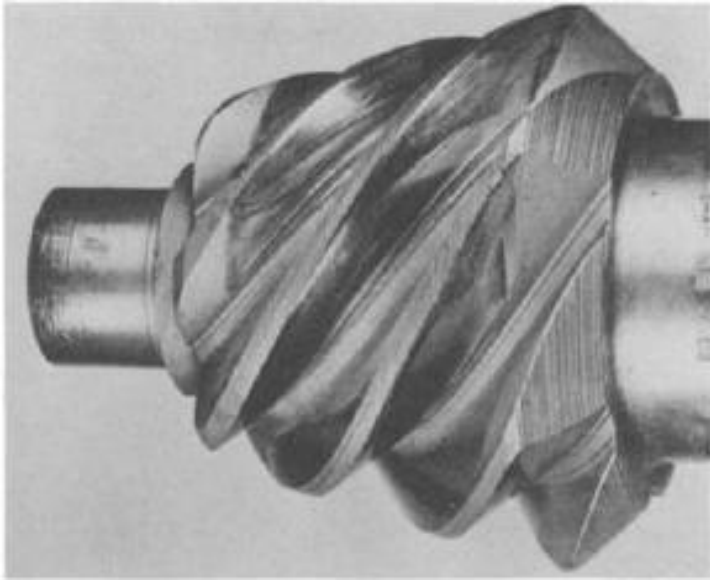
É conhecido como “Spalling” ou “Subcase Fatigue”, sendo o último preferido para referência a este tipo de falha.

É um tipo de falha parecido com a fadiga subsuperficial, entretanto, a diferença está na magnitude de escala. Enquanto a fadiga subsuperficial ocorre pouco abaixo da superfície, a fadiga em aços endurecidos superficialmente podem apresentar a falha mais abaixo da superfície, geralmente abaixo da camada endurecida, dependendo assim, do tipo de tratamento térmico realizado.

Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

A fadiga pode ser originada em profundidade como consequência das tensões de contato e pode ser tanto paralela quanto perpendicular à superfície. O aumento da profundidade de endurecimento, assim como da dureza no núcleo pode resolver o problema.



Camada
Endurecida

Trincas de Fadiga

Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

4- Fadiga por Cavitação

Este é um tipo de fadiga por tensões de contato que gera pitting causado pela vibração e movimento em vários líquidos, dos quais a água é o mais comum.

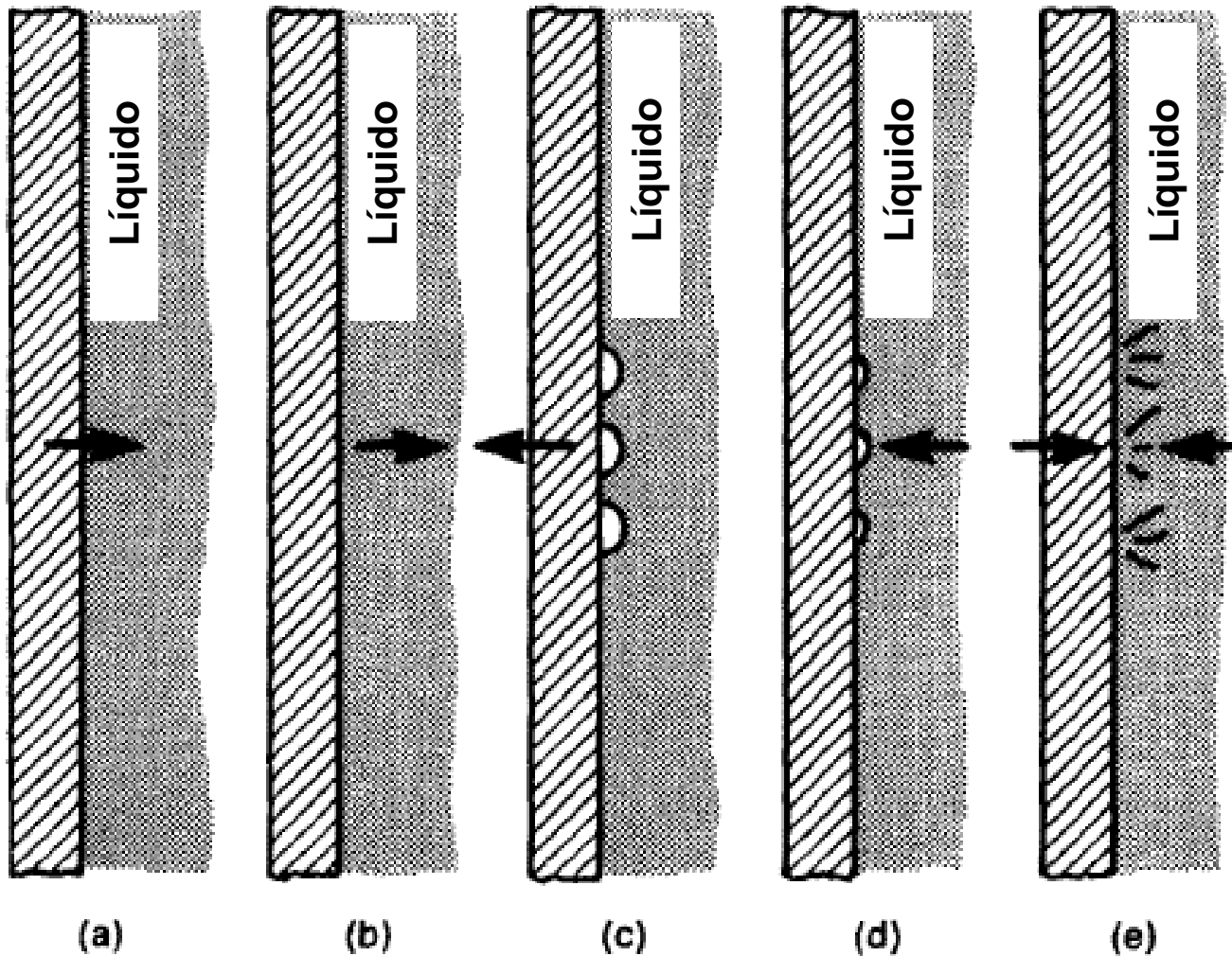
A Fadiga por pites de Cavitação é um problema em propulsores na marinha, cilindros de motores diesel, bombas hidráulicas, turbinas, entre outros.

Pites de Cavitação são caracterizados por apresentarem, algumas vezes, processos de corrosão associados e por ocorrerem em zonas de baixa pressão com uma vibração na interface metal-líquido.

Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

4- Fadiga por Cavitação



Mecanismo de Fadiga por Pites de Cavitação

a- Parede de metal se move contra a inércia do líquido.

b- O metal atinge o final do curso do movimento, com o líquido ainda se movendo para a direita.

c- Líquido se move para a direita e metal para a esquerda, induzindo a formação de bolhas.

d- Metal atinge o final de curso para a esquerda, dispondo as cavidades ao longo da interface.

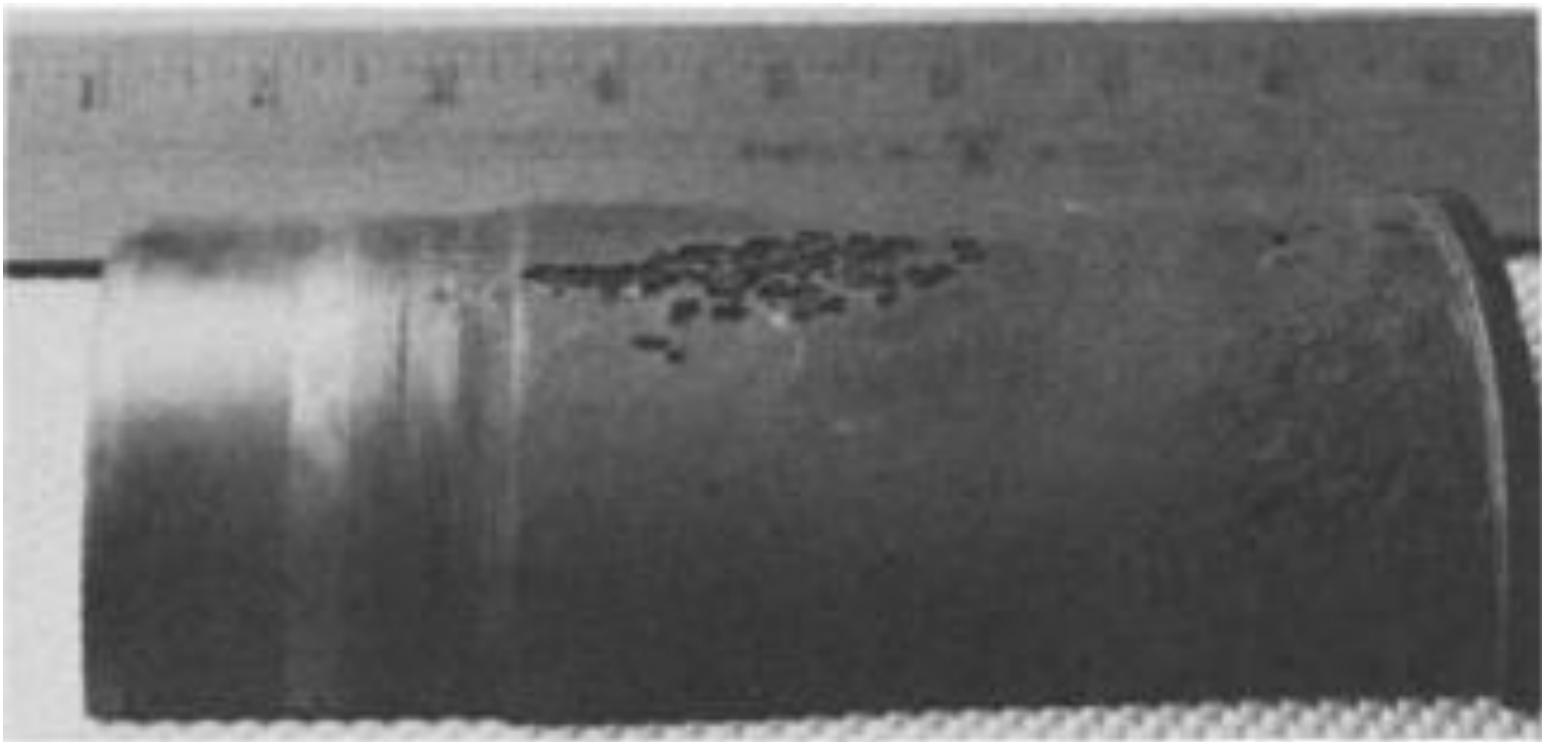
e- Metal inicia o movimento para a direita e colide com o líquido em movimento para a esquerda.

Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

4- Fadiga por Cavitação

Pites de Cavitação de um Ferro Fundido Cinzento de um cilindro de motor diesel .

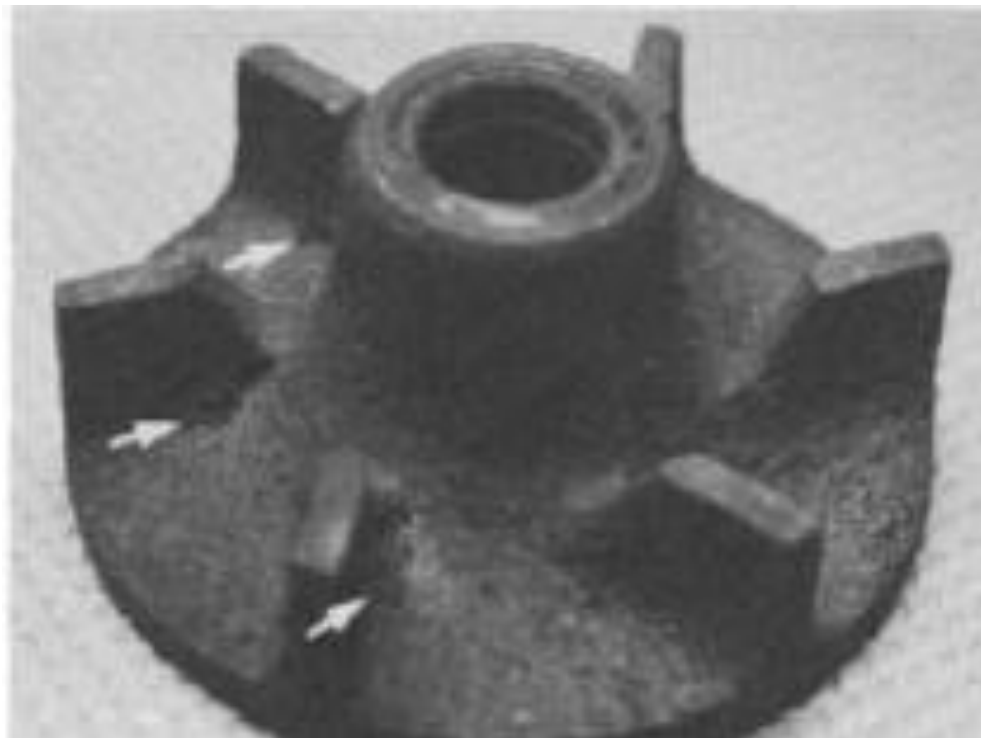


Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

4- Fadiga por Cavitação

Pites de Cavitação em palhetas de Ferro Fundido Cinzento em bomba d'água.



Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

4- Fadiga por Cavitação

As cavidades colapsam violentamente (ou implodem) devido à inércia de ambos metal e líquido devido ao movimento relativo entre ambos.

As cavidades em colapso implodem contra o metal com tensões compressivas da ordem de diversas atmosferas de pressão.

As cavidades formam-se em locais preferenciais e, à medida que ocorre o movimento relativo repetitivo, o mecanismo de fadiga avança até que os pites se formem na superfície do metal nestes locais.

Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

Prevenção da Fadiga por Cavitação

Aumentar a rigidez do componente

Redução da amplitude de vibração do componente pode ser conseguida pelo aumento da espessura ou adição de nervuras.

Melhorar e uniformizar o acabamento superficial

Se os picos e vales da superfície forem reduzidos e uniformizados, os locais para a nucleação das bolhas na interface metal-líquido serão afetados, alterando a distribuição e intensidade das mesmas.

Falhas por Desgaste-Fadiga

Fadiga por Tensões de Contato

Prevenção da Fadiga por Cavitação

Aumentar a dureza e a resistência do componente

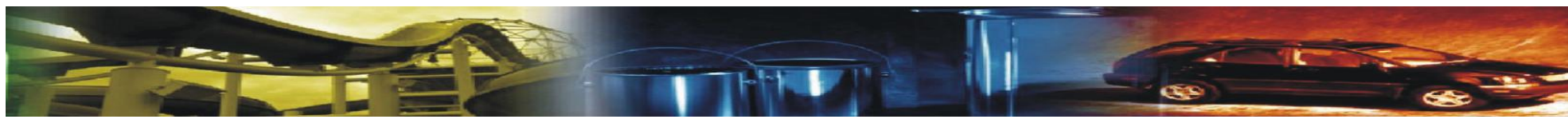
Uma vez que a fadiga por pites é essencialmente um fenômeno de fadiga, as propriedades do metal são importantes, mas provavelmente uma dureza mais alta somente retardará a ocorrência da fadiga.

Escoamento Laminar do Fluido

É possível eliminar cantos em regiões de baixa pressão.

Elevar a pressão sobre o líquido ou usar inibidores que aumentam a pressão de vapor do líquido.

Se as bolhas não se formam no líquido, não haverá dano ao metal.



Falhas por Corrosão

Falhas por Corrosão

Introdução

Corrosão pode ser definida como a deterioração do metal devido a reações químicas ou eletroquímicas com o ambiente.

Pode envolver custo da ordem de 4% do PIB, apesar de ser bastante variável, chegando à casa dos bilhões de dólares por ano.

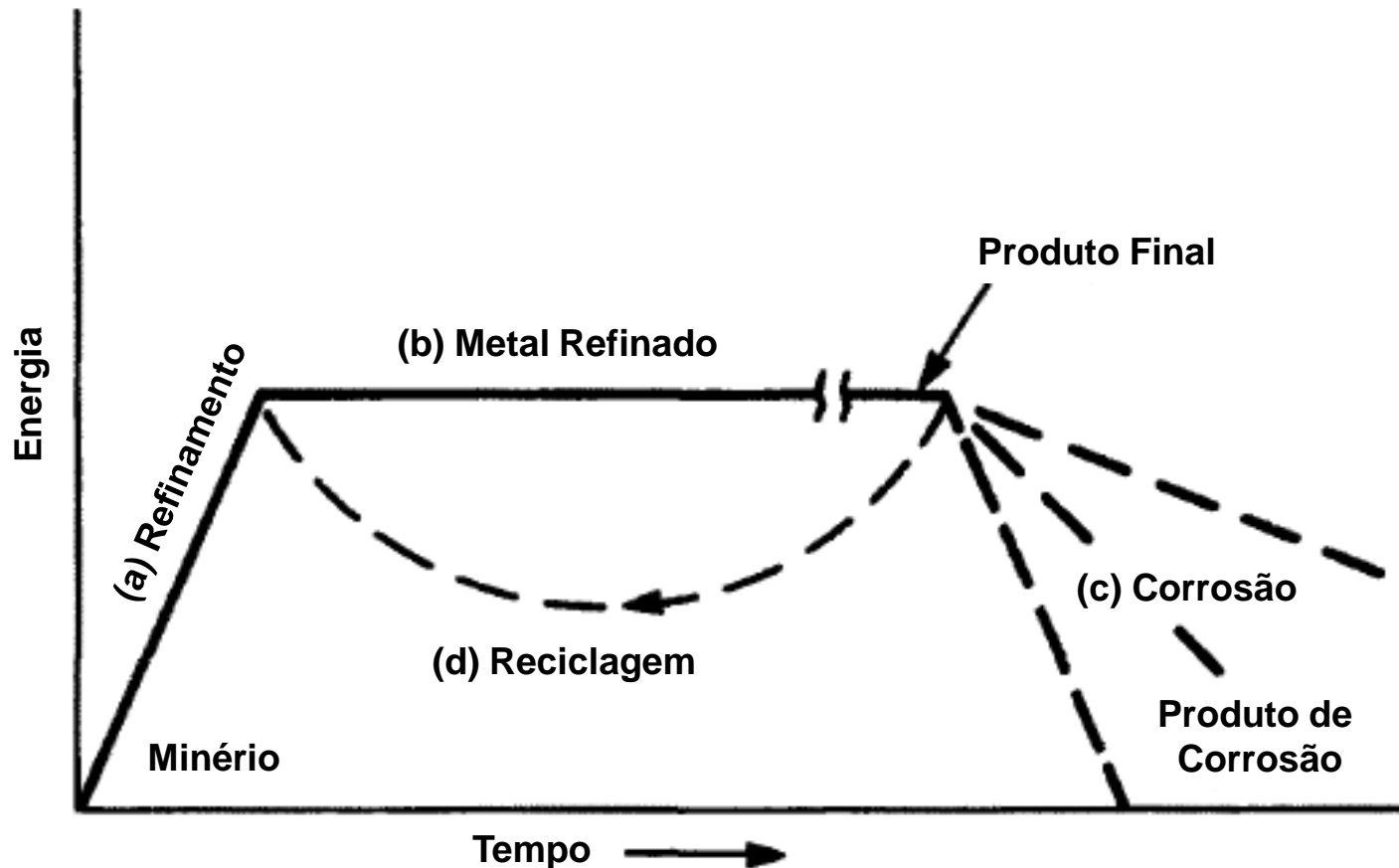
Na maior parte dos casos não envolve falha catastrófica, entretanto, nos casos em que levar à fratura pode gerar resultados catastróficos.

Serão apresentados os principais tipos de corrosão, suas interações e efeitos sobre a fratura e o desgaste e algumas possibilidades de prevenção.

Falhas por Corrosão

Ciclo de Vida de um Metal

A Corrosão é um processo natural que busca reverter a ação química do processo de refino. No estado natural, os metais apresentam-se na forma de óxidos ou sulfetos compondo os minérios.



Falhas por Corrosão

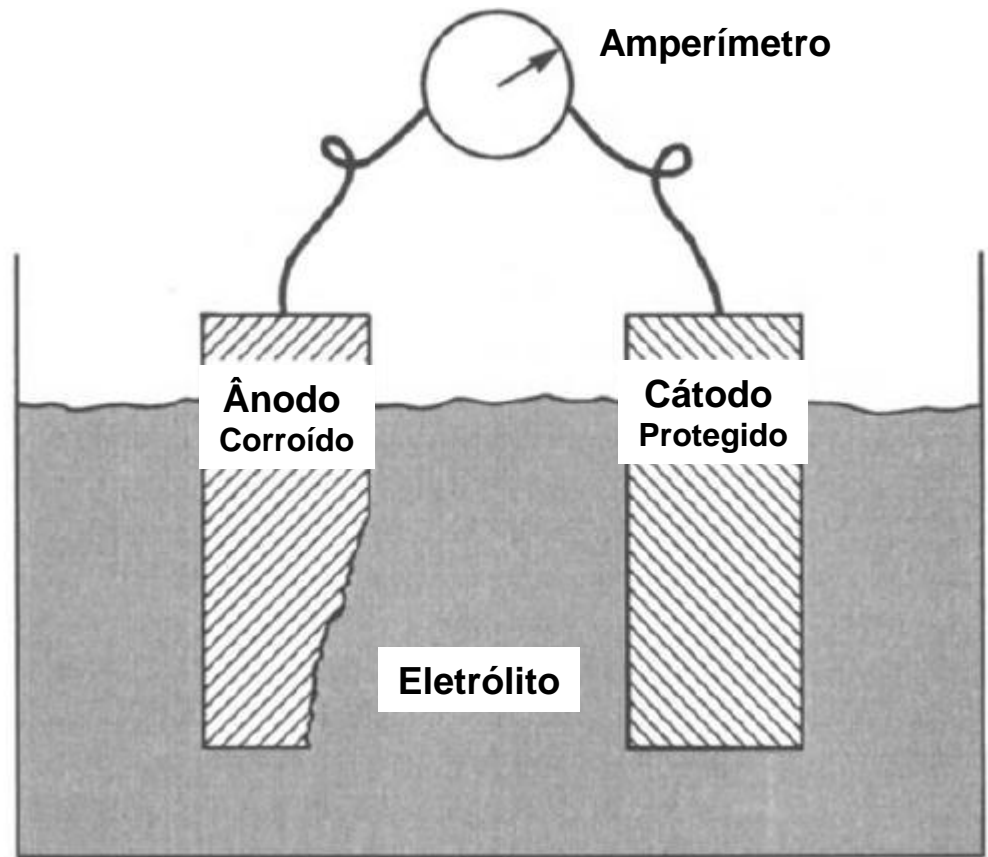
Corrosão Galvânica

A Corrosão Galvânica, causada por diferentes metais em contato e seu ambiente, é uma das mais sérias e tecnicamente desafiadoras formas de corrosão.

Os princípios básicos das reações eletroquímicas que causam a corrosão galvânica são idênticos a aqueles de uma bateria simples.

Três condições necessárias:

1- Dois metais diferentes (ou metal/grafite), 2- Contato elétrico entre os metais ou no eletrólito, 3- Líquido eletricamente condutor.



Falhas por Corrosão

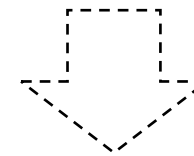
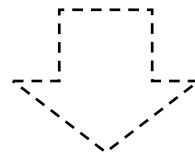
Corrosão Galvânica

Se as condições forem satisfeitas, um dos metais corroerá, o outro será protegido, liberará Hidrogênio e uma corrente elétrica será gerada.

O metal que corroe é chamado de ânodo e o protegido de cátodo.

Anódico (mais facilmente corroído)

Magnesium
Magnesium alloys
Zinc
Galvanized steel or galvanized wrought iron
Aluminum alloys
5052, 3004, 3003, 1100, 6053, in this order
Cadmium
Aluminum alloys
2117, 2017, 2024, in this order
Low-carbon steel
Wrought iron
Cast iron
Ni-Resist (high-nickel cast iron)
Type 410 stainless steel (active)
50-50 lead-tin solder
Type 304 stainless steel (active)
Type 316 stainless steel (active)
Lead
Tin
Copper alloy 280 (Muntz metal, 60%)
Copper alloy 675 (manganese bronze A)
Copper alloys 464, 465, 466, 467 (naval brass)
Nickel 200 (active)
Inconel alloy 600 (active)
Hastelloy B
Chlorimet 2
Copper alloy 270 (yellow brass, 65%)
Copper alloys 443, 444, 445 (admiralty brass)
Copper alloys 608, 614 (aluminum bronze)
Copper alloy 230 (red brass, 85%)
Copper 110 (ETP copper)



Copper alloys 651, 655 (silicon bronze)
Copper alloy 715 (copper nickel, 30%)
Copper alloy 923, cast (leaded tin bronze G)
Copper alloy 922, cast (leaded tin bronze M)
Nickel 200 (passive)
Inconel alloy 600 (passive)
Monel alloy 400
Type 410 stainless steel (passive)
Type 304 stainless steel (passive)
Type 316 stainless steel (passive)
Incoloy alloy 825
Inconel alloy 625
Hastelloy C
Chlorimet 3
Silver
Titanium
Graphite
Gold
Platinum

Catódico (menos facilmente corroído)

Falhas por Corrosão

Formas de Prevenção da Corrosão Galvânica

Evitar o contato elétrico, como pela adoção de separadores físicos ou isolamento dos metais diferentes por materiais não condutivos como plásticos, ceras, graxas, pintura, entre outros.

Eliminar o eletrólito, pois se não houver eletrólito não há corrosão galvânica. (Ex. Não há corrosão galvânica em desertos. Para umidade relativa do ar menor que 35% não há corrosão no aço carbono).

Selecionar metais próximos na série galvânica, a fim de minimizar o potencial gerado.

Adotar ânodo grande e cátodo pequeno a fim de aproveitar a relação de área anódica/catódica.

Usar inibidores de corrosão no eletrólito, como no radiador de automóvel.

Adoção de ânodos de sacrifício em estruturas sujeitas à corrosão.

Falhas por Corrosão

Corrosão Uniforme

A forma mais comum de Corrosão é a uniforme como, por exemplo, a corrosão vermelha em aços.

Outros metais como Alumínio, Cobre e Bronze formam filmes de corrosão protetores ou não, dependendo do metal e ambiente.

Macroscopicamente a corrosão é uniforme, entretanto, microscopicamente ocorrem “micropilhas” entre constituintes, o que gera a corrosão.

Formas de Prevenção:

1- Adotar metais mais nobres ou aços inoxidáveis.

2- Adoção de revestimentos protetores, como: Pintura, Oxidação superficial (anodização), Eletrodeposição de metais de sacrifício, Imersão a quente, Revestimentos soldados, Revestimentos laminados.

Falhas por Corrosão

Corrosão por Frestas (Crevice Corrosion)

É uma variação da corrosão galvânica, difícil de controlar sem um cuidado grande com o Projeto, Materiais, Engenharia e Qualidade.

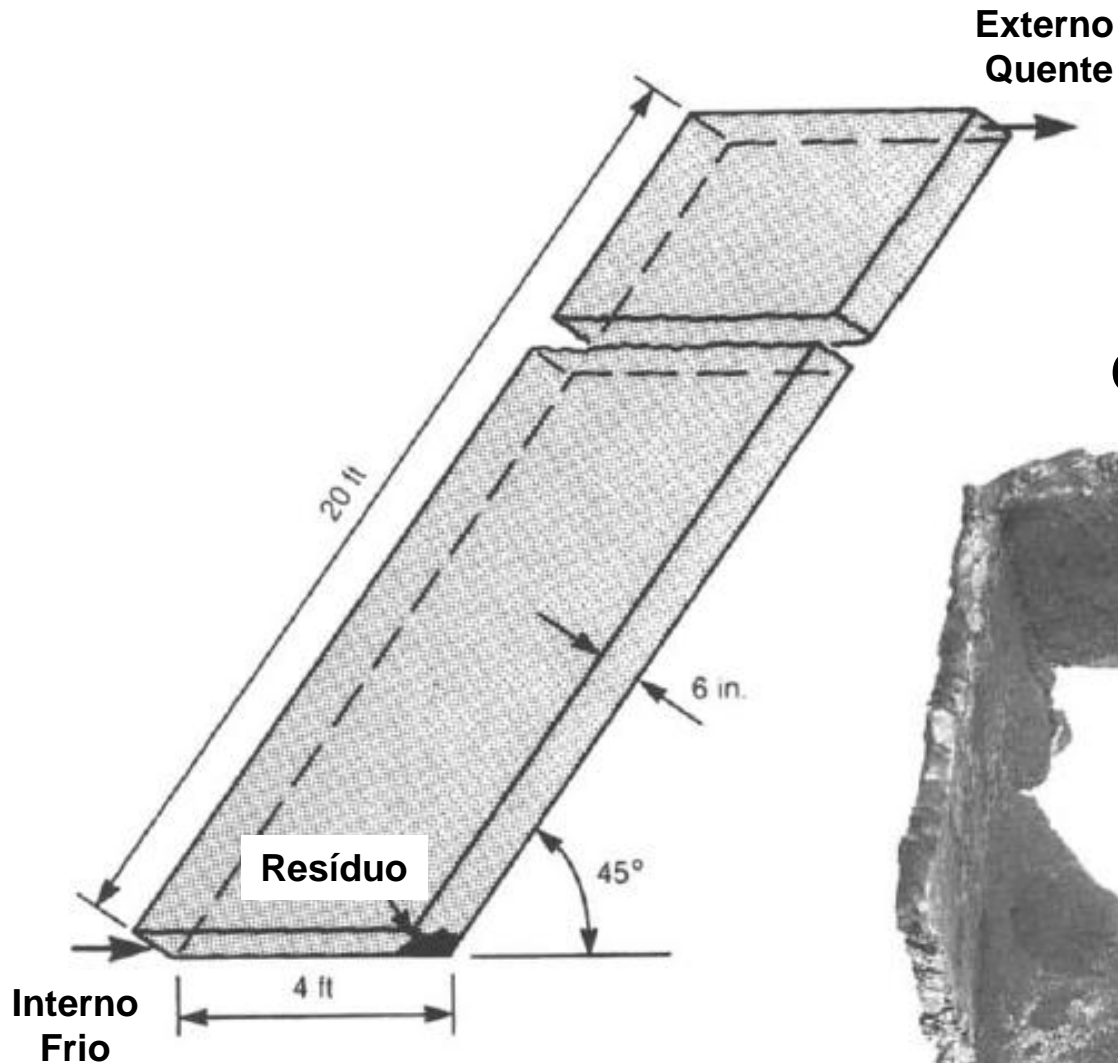
Corrosão por Frestas é usado para designar a corrosão por célula de concentração diferencial de Oxigênio. É característica do acúmulo de produtos de corrosão, sujeira, areia, entre outros.

Uma fresta ou junta entre duas superfícies ou metal com sujeira depositada é mais prontamente corroído em relação ao metal que está exposto fora da fresta. Na região da fresta, existe pequena concentração de Oxigênio (é anódica e corroe), enquanto fora da fresta existe elevada concentração de Oxigênio (é catódica e é protegida).

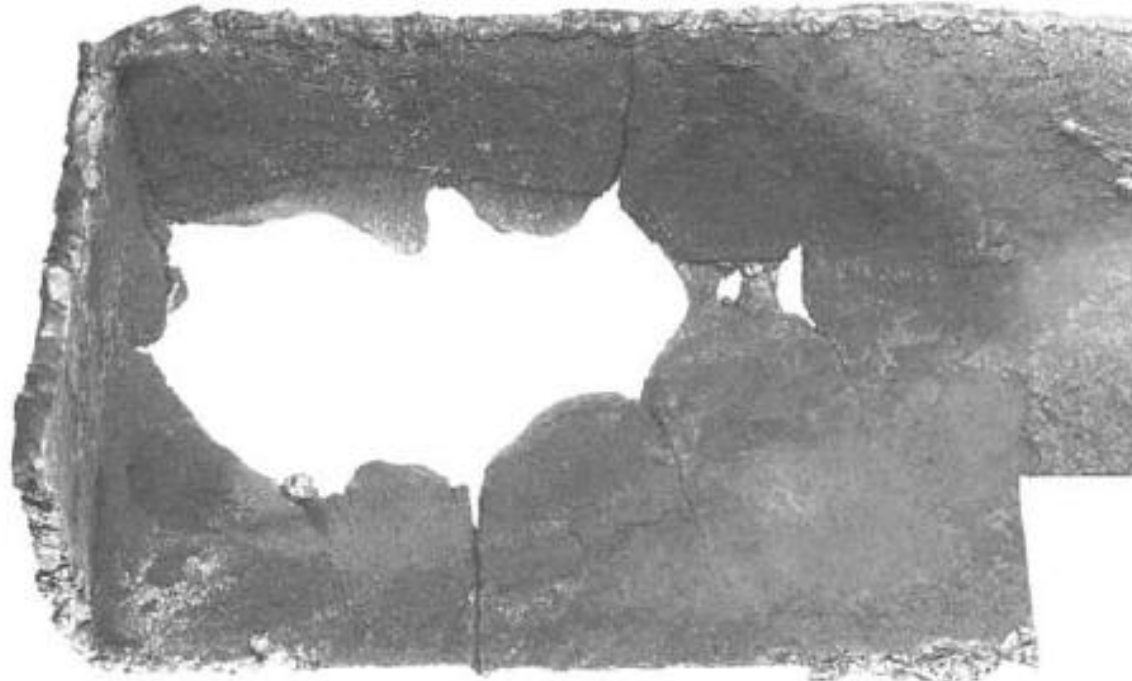
As regiões no canto da fresta tenderão a corroer e formar **pites**.

Falhas por Corrosão

Corrosão por Frestas (Crevice Corrosion)



Corrosão na região da fresta



Falhas por Corrosão

Corrosão por Frestas (Crevice Corrosion)

Formas de Prevenção:

- 1- Evitar juntas por parafusamento ou rebitamento, a menos que os metais sejam revestidos, sendo ideal que ambos tenham sido revestidos.
- 2- Preencher ou selar as frestas, evitando entrada do eletrólito.
- 3- Remover os depósitos freqüentemente, a fim de evitar acúmulos que levem a formação da fresta.
- 4- Adotar selos não absorventes, de forma a evitar a absorção de eletrólito.

Falhas por Corrosão

Trincamento por Corrosão-Tensão

É um problema crítico na indústria, uma vez que induz a fratura frágil em metais normalmente dúcteis.

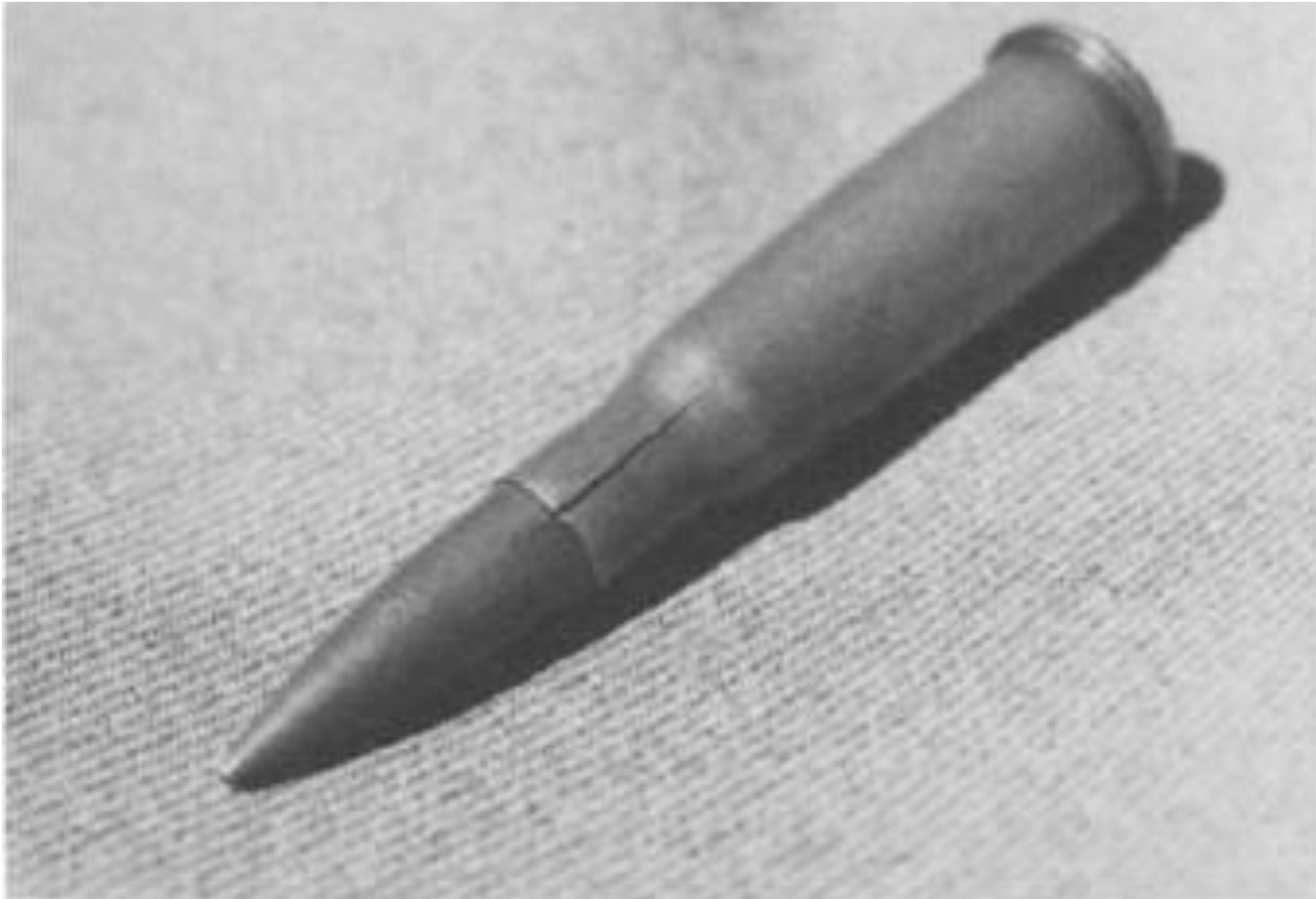
É definida como sendo o trincamento sob ação combinada de Corrosão e Tensões Trativas. As tensões podem ser aplicadas ou residuais.

Conforme o agente corrosivo e o metal, as trincas podem ser trans ou intergranulares. Como este tipo de falha leva à fratura frágil, as trincas são perpendiculares à direção da tensão trativa. Pode não haver evidência de corrosão.

Um caso clássico é o da ruptura dos cartuchos, que ocorria quando armazenados próximos a currais durante a estação das Monções (1800). A falha envolvia então o clima das monções (altas temperaturas e umidades (chuvas)), associado à amônia (NH_3) das fezes dos animais e às tensões da conformação dos cartuchos.

Falhas por Corrosão

Trincamento por Corrosão-Tensão



A prevenção deste tipo de falha envolve a remoção das tensões residuais ou do ambiente corrosivo.

Falhas por Corrosão

Trincamento por Corrosão-Tensão

É um tipo de falha progressiva, similar à fadiga. A trinca cresce gradualmente a cada período de tempo até que o tamanho crítico seja atingido.

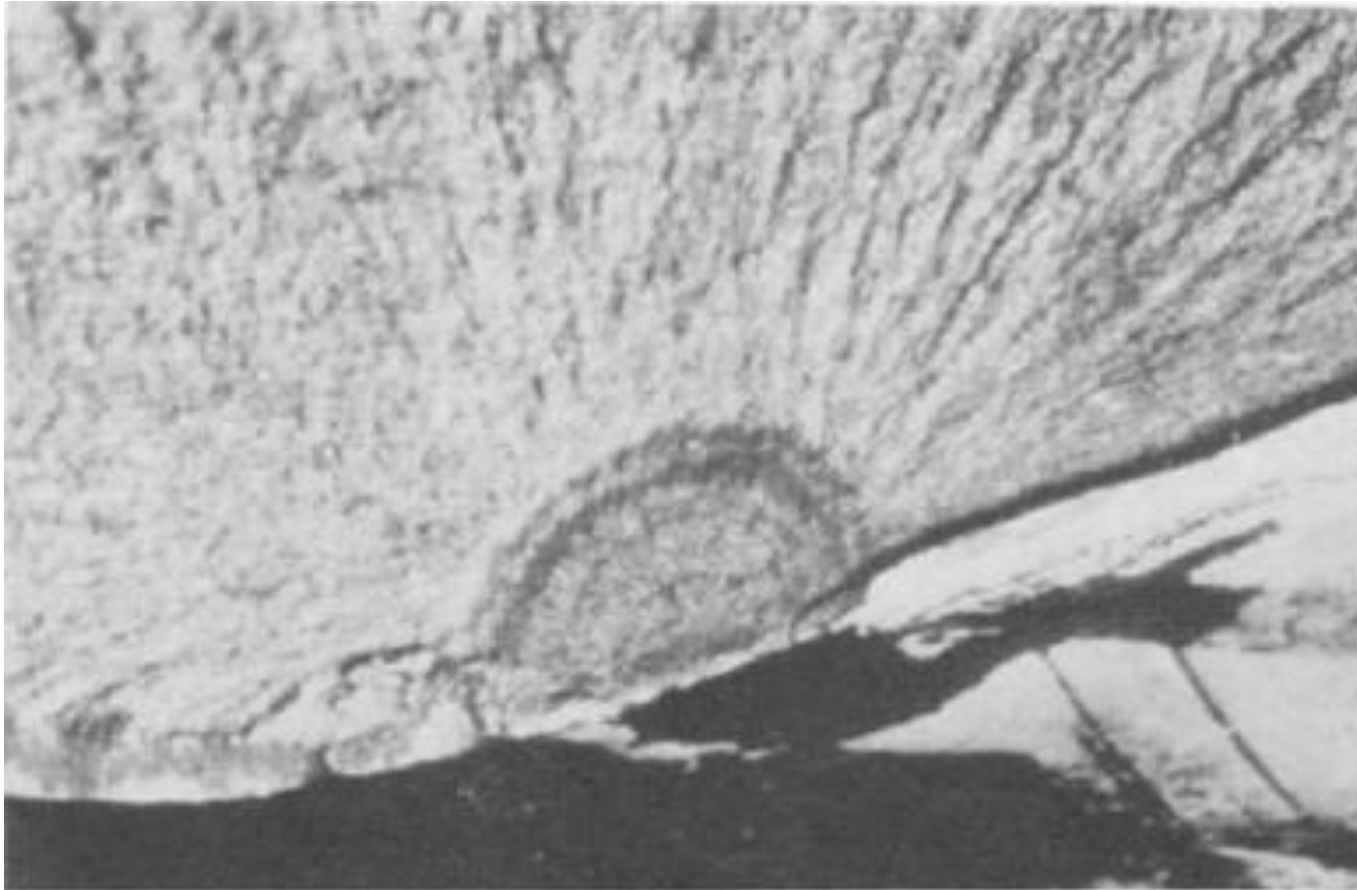
A tensão trativa pode então causar a fratura frágil súbita da seção remanescente do metal. Em outros casos, como nos cartuchos, a trinca pode avançar até que a tensão seja reduzida, parando a propagação.

Características da Falha:

- 1- Para um dado metal ou liga, somente certos tipos de ambiente corrosivo levam a este tipo de falha.
- 2- Metais puros são menos susceptíveis ao trincamento por Corrosão-Tensão em relação às ligas ou metais com impurezas.
- 3- Proteção catódica auxilia na prevenção da nucleação da trinca.
- 4- Tamanho de grão, estrutura cristalina e número de fases afetam este tipo de falha.

Falhas por Corrosão

Trincamento por Corrosão-Tensão



Marcas com aspecto similar à marcas de praia de fadiga, entretanto, esta é uma falha por trincamento Corrosão-Tensão e as marcas são de avanço da trinca na corrosão, uma vez que a peça operou estaticamente.

Falhas por Corrosão

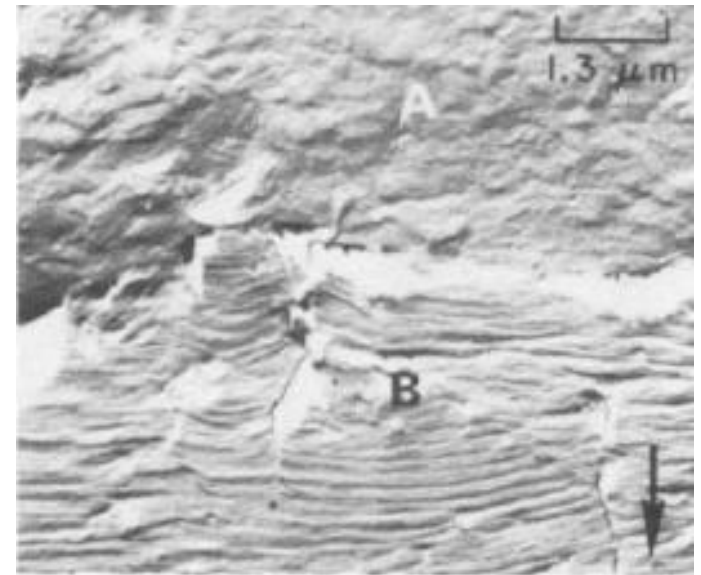
Corrosão-Fadiga

Enquanto o trincamento por corrosão-tensão é um tipo de falha originada pela aplicação de carga estática, a corrosão-fadiga é essencialmente uma fratura por fadiga agravada pela ação do ambiente.

Definição:

“Efeito da aplicação de tensões flutuantes ou repetitivas em um ambiente corrosivo, caracterizado por uma vida menor do que aquela desenvolvida separadamente pela aplicação de tensões cíclicas ou da presença do ambiente corrosivo”.

Efeito da avaliação em fadiga da liga 2024-T3 – A em vácuo e B ao ar.

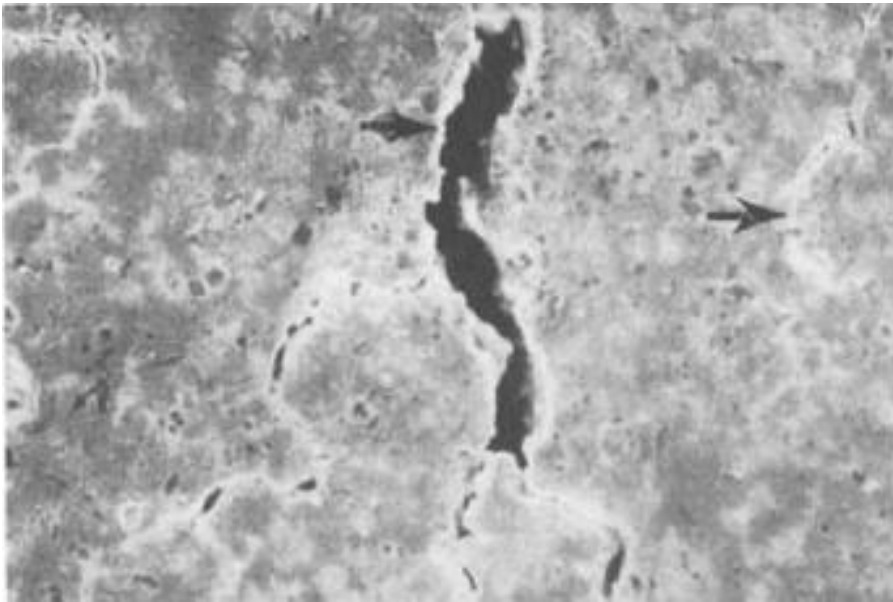


Falhas por Corrosão

Corrosão-Fadiga

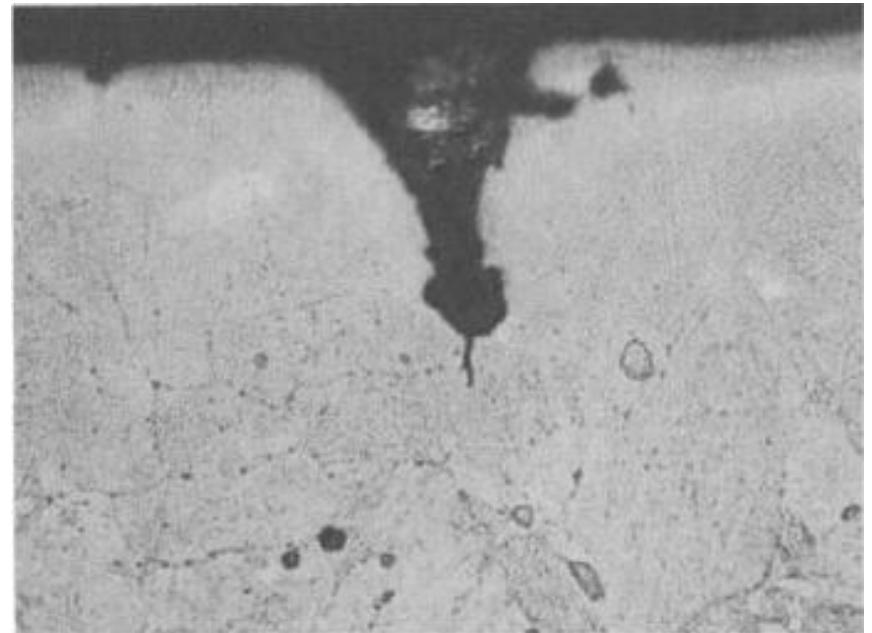
Usualmente a fadiga inicia a partir de pequenos pites na superfície corroída, os quais agem como concentradores de tensão. Em outros casos, a trinca pode ter iniciado e os agentes de corrosão aceleram a propagação.

Superfície Aço 17-4PH



Seção Transversal

(trinca de fadiga iniciada)

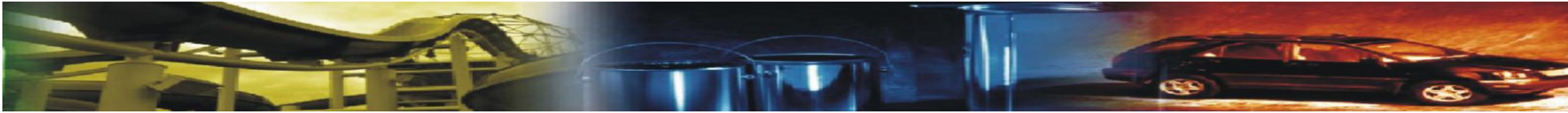


Falhas por Corrosão

Corrosão-Fadiga

Formas de Prevenção:

- 1- Eliminar a corrosão por pintura ou revestimento.
- 2- Alterar o material para um mais resistente à corrosão, como aço inoxidável.
- 3- Reduzir as tensões trativas que estão atuando no processo de fadiga, como pela adoção de tensões de trabalho menores.
- 4- Adotar técnicas que induzam tensões residuais compressivas na superfície, como Shot peening ou tratamentos termoquímicos.



Falhas em Elevada Temperatura

Falhas em Elevada Temperatura

Introdução

Os principais tipos de falha em elevada temperatura são:

1- Fluência

2- Fadiga de Alto e Baixo Ciclo

3- Fadiga Térmica

4- Degradação (instabilidade Metalúrgica)

5- Combinações destes modificados pelo ambiente.

Falhas em Elevada Temperatura

1- Fluência

Fluência é a deformação dependente do tempo ou gradual mudança na forma da peça que está sujeita a uma tensão.

A Fluência é a razão que justifica calçados velhos serem mais confortáveis que os novos, uma vez que os materiais fluíram ao longo do tempo e tomaram o formato do pé.

A fluência ocorre em três estágios:

a- No primeiro estágio, após o efeito imediato de deformação elástica observado na aplicação da carga, o metal passa por aumento na deformação plástica, sob decrescente taxa de deformação. Ocorre nos primeiros momentos depois da carga aplicada.

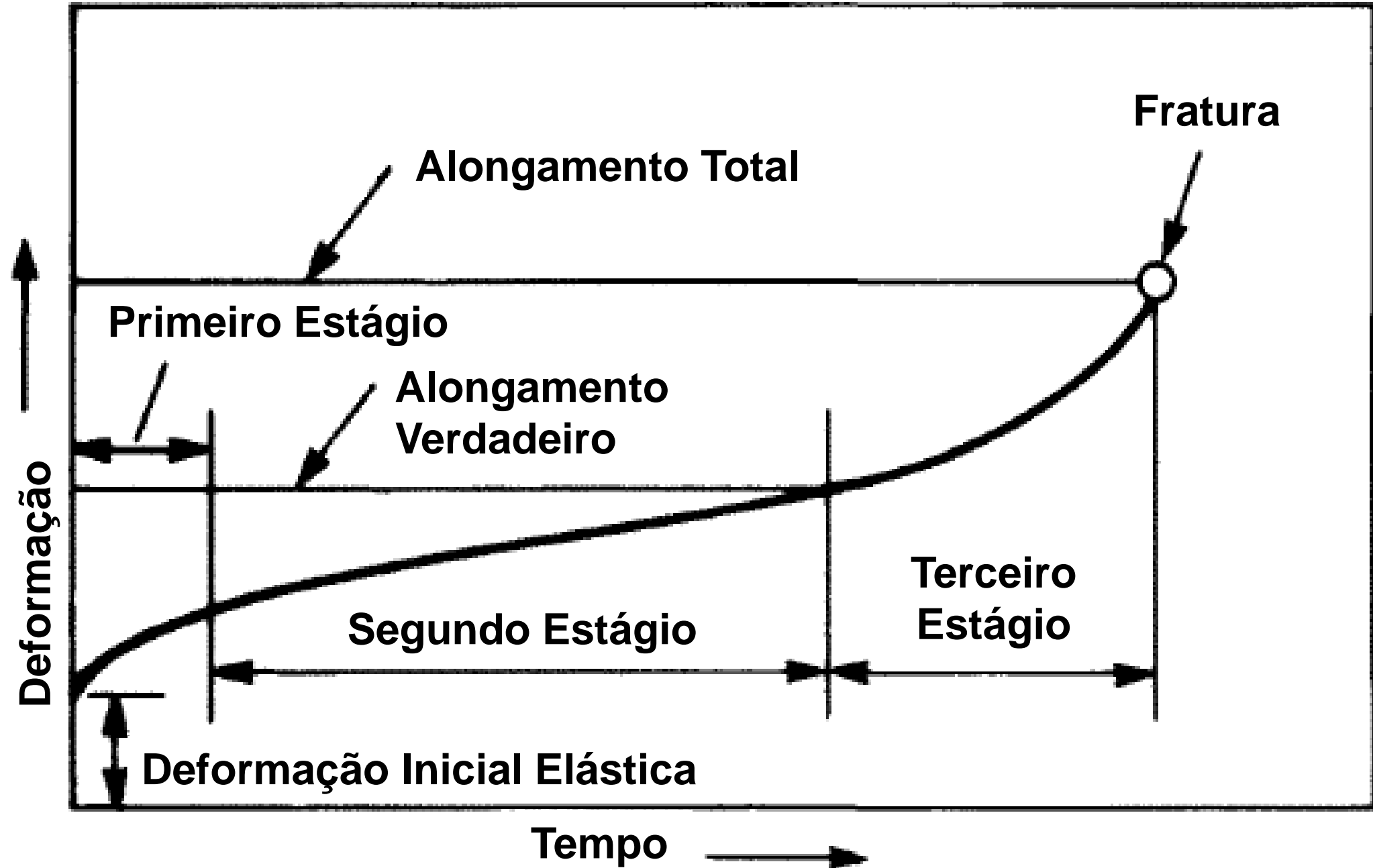
Falhas em Elevada Temperatura

B- O segundo estágio ou fluência secundária, é essencialmente uma **condição de equilíbrio entre o trabalho a frio e a recristalização**. Neste estágio, o metal está estirando sob tensão, mas não tão rapidamente como no primeiro estágio.

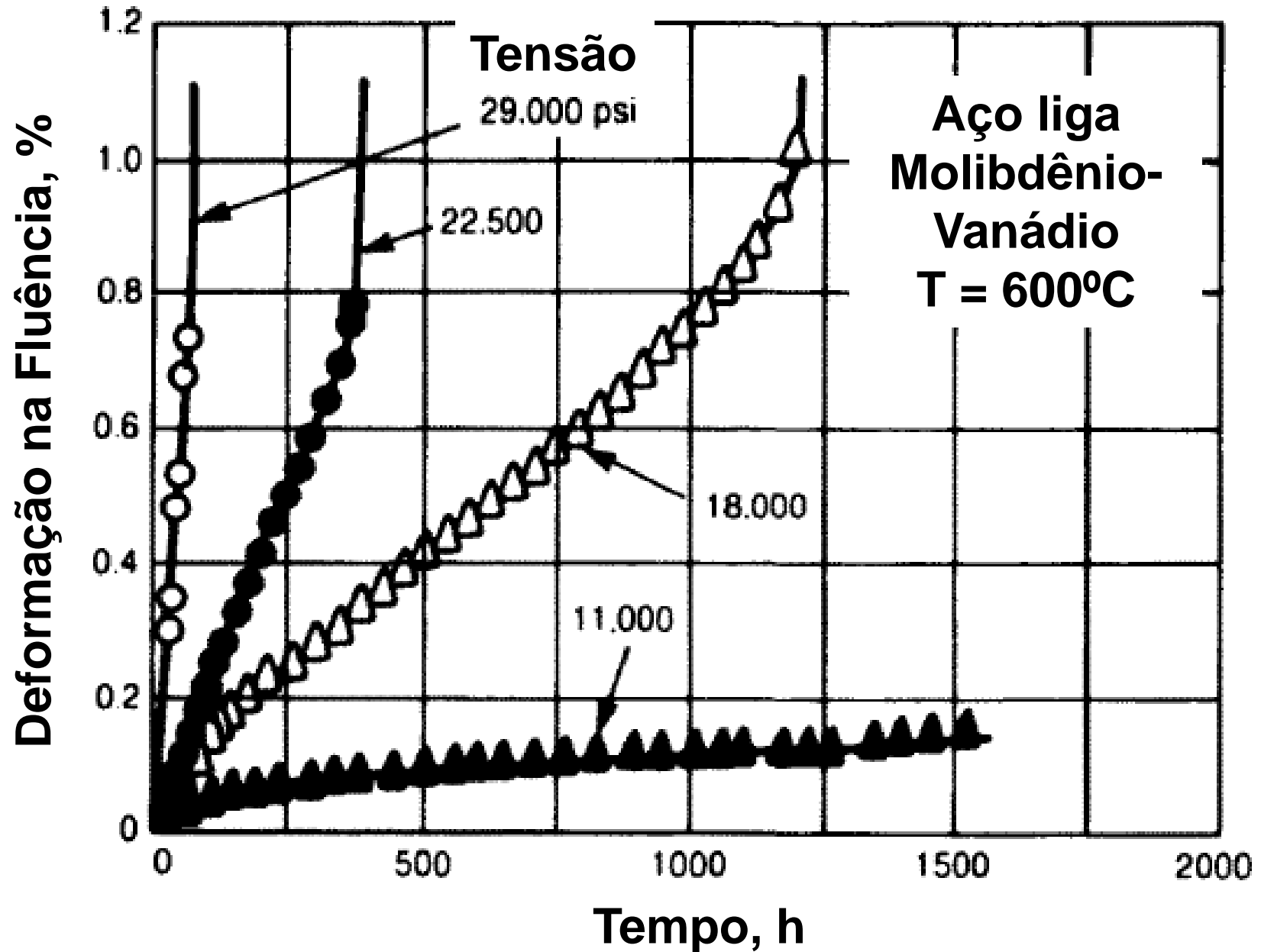
c- O estágio 3 ou fluência terciária, envolve a crescente elevação da deformação antes da fratura. **Resulta de modificações metalúrgicas que permitem o aumento da deformação, normalmente envolvendo a redução de área ou empescoçamento**. Mesmo havendo endurecimento por trabalho a frio, este não é suficiente para suportar o aumento no fluxo de material (deformação).

Em alguns casos, os três estágios não estão presentes no processo de fluência. O primeiro, o segundo e/ou o terceiro estágios podem ser suprimidos, como resultado da combinação entre a tensão e/ou temperatura.

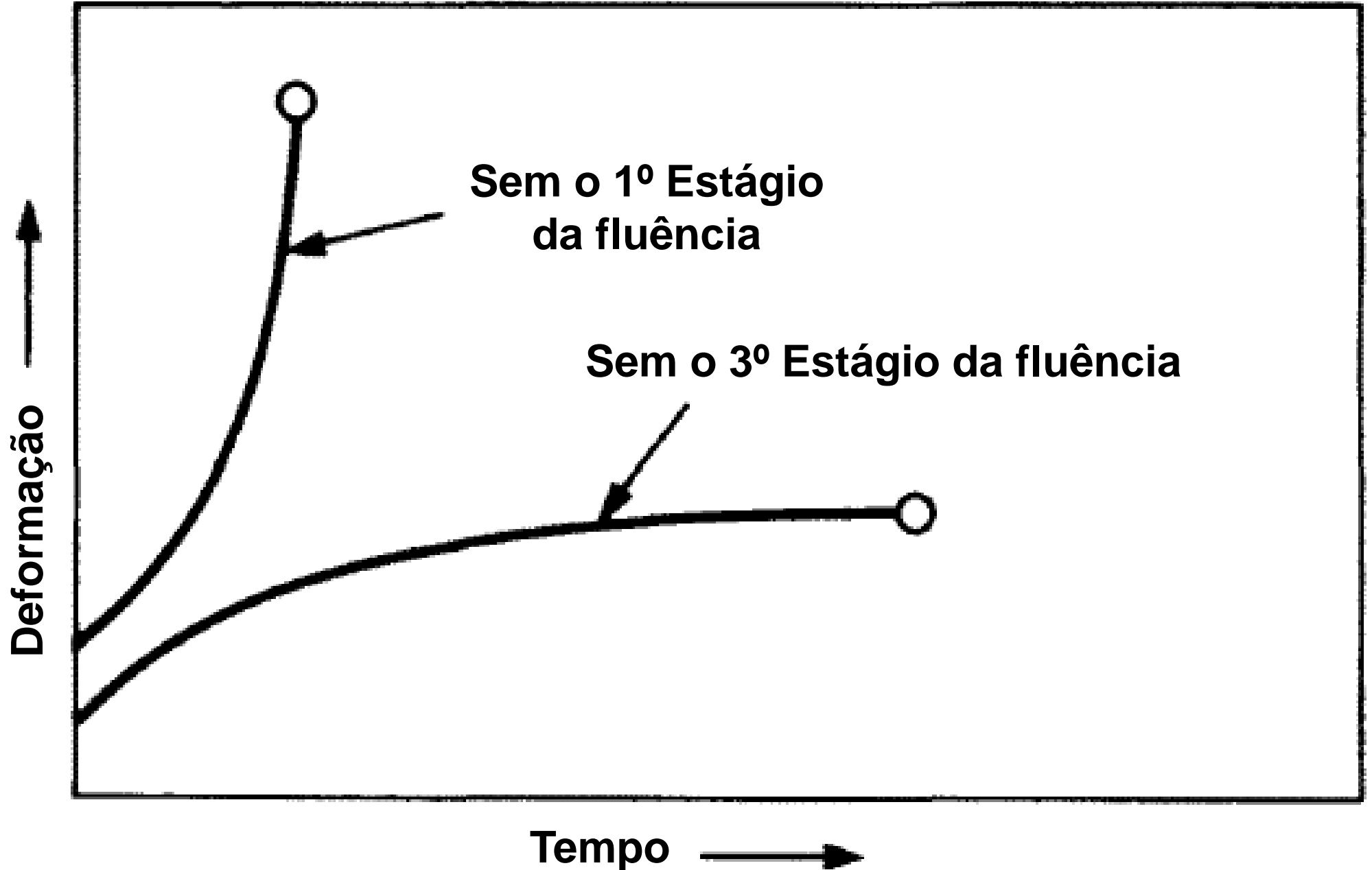
Falhas em Elevada Temperatura



Falhas em Elevada Temperatura



Falhas em Elevada Temperatura



Falhas em Elevada Temperatura

As falhas por fluência são usualmente fáceis de identificar, principalmente pela deformação envolvida. Entretanto, dependendo da liga, a fratura por fluência pode ser tanto dúctil quanto frágil.

A fratura frágil por fluência ocorre de forma intergranular e com deformação e redução de área nula.

A fratura dúctil por fluência ocorre de forma transgranular e é acompanhada por alongamento/redução de área visível.

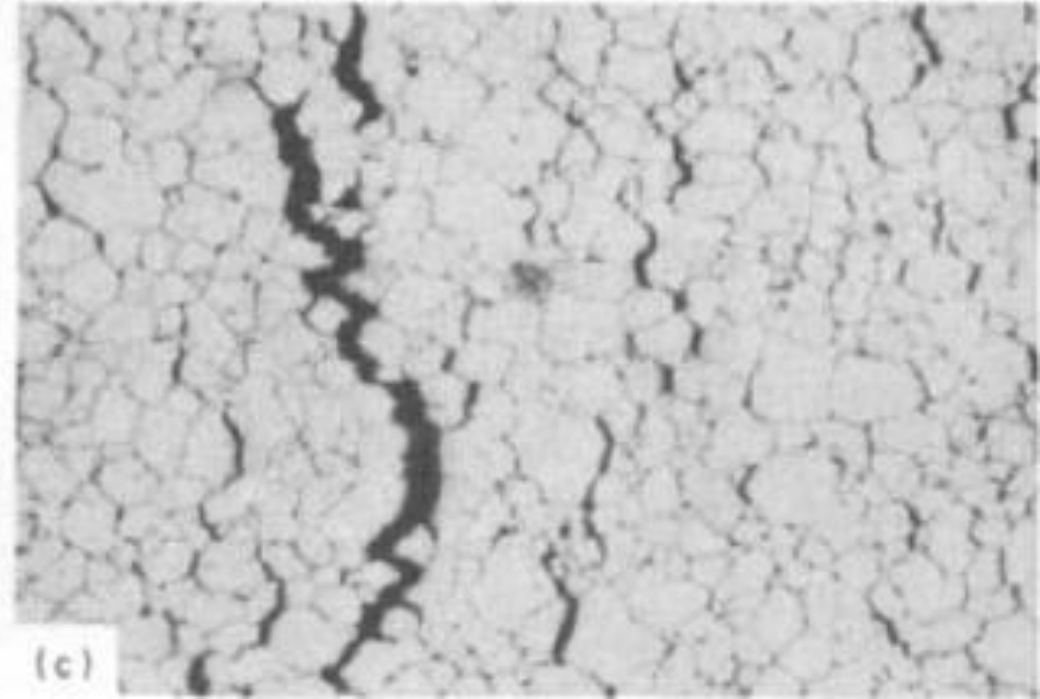
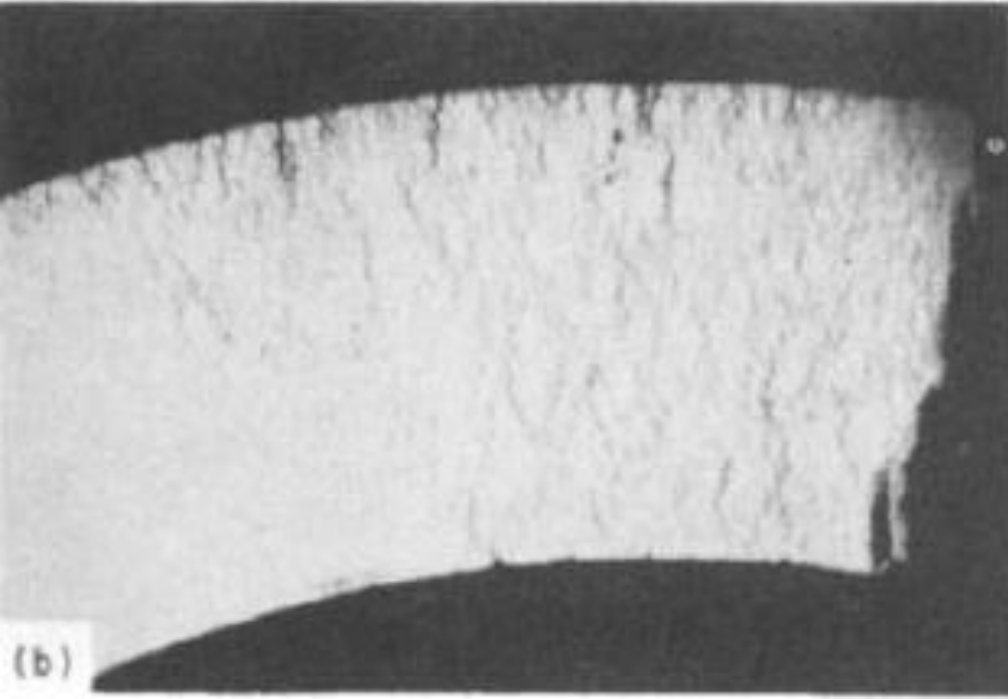
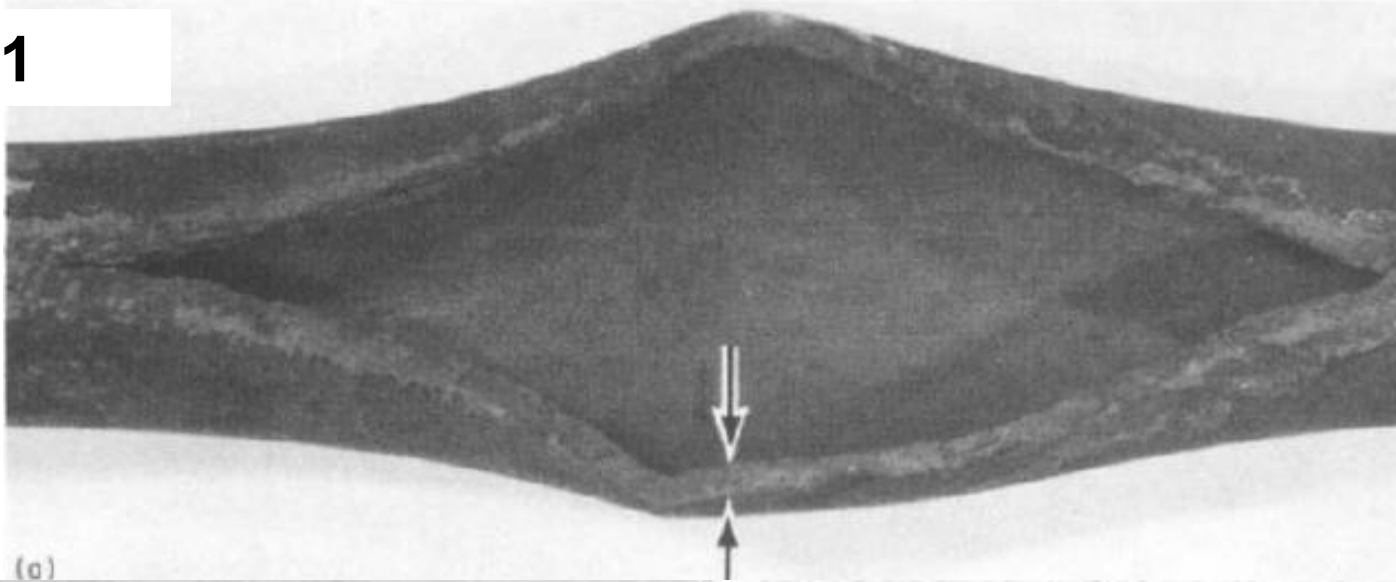
O tipo de fratura depende não só da temperatura, mas da taxa de deformação.

Se a temperatura for constante, a fratura inter ou transgranular dependerá da taxa de deformação.

Se a taxa de deformação for constante, o tipo de fratura dependerá da temperatura. Para baixas taxas de deformação com longos tempos até a ruptura **ou** altas temperaturas, a fratura resultante é intergranular.

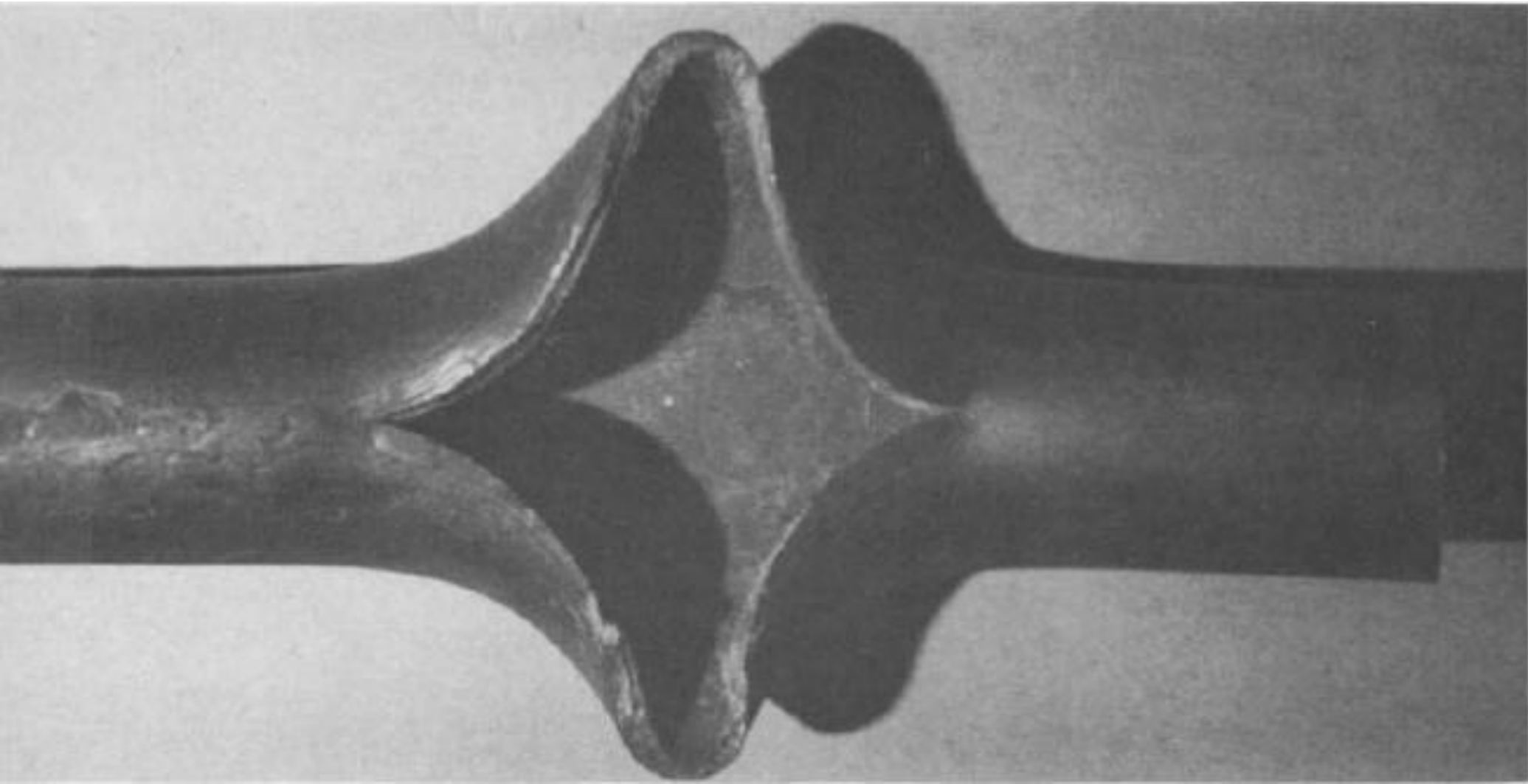
Falhas em Elevada Temperatura

AISI 321



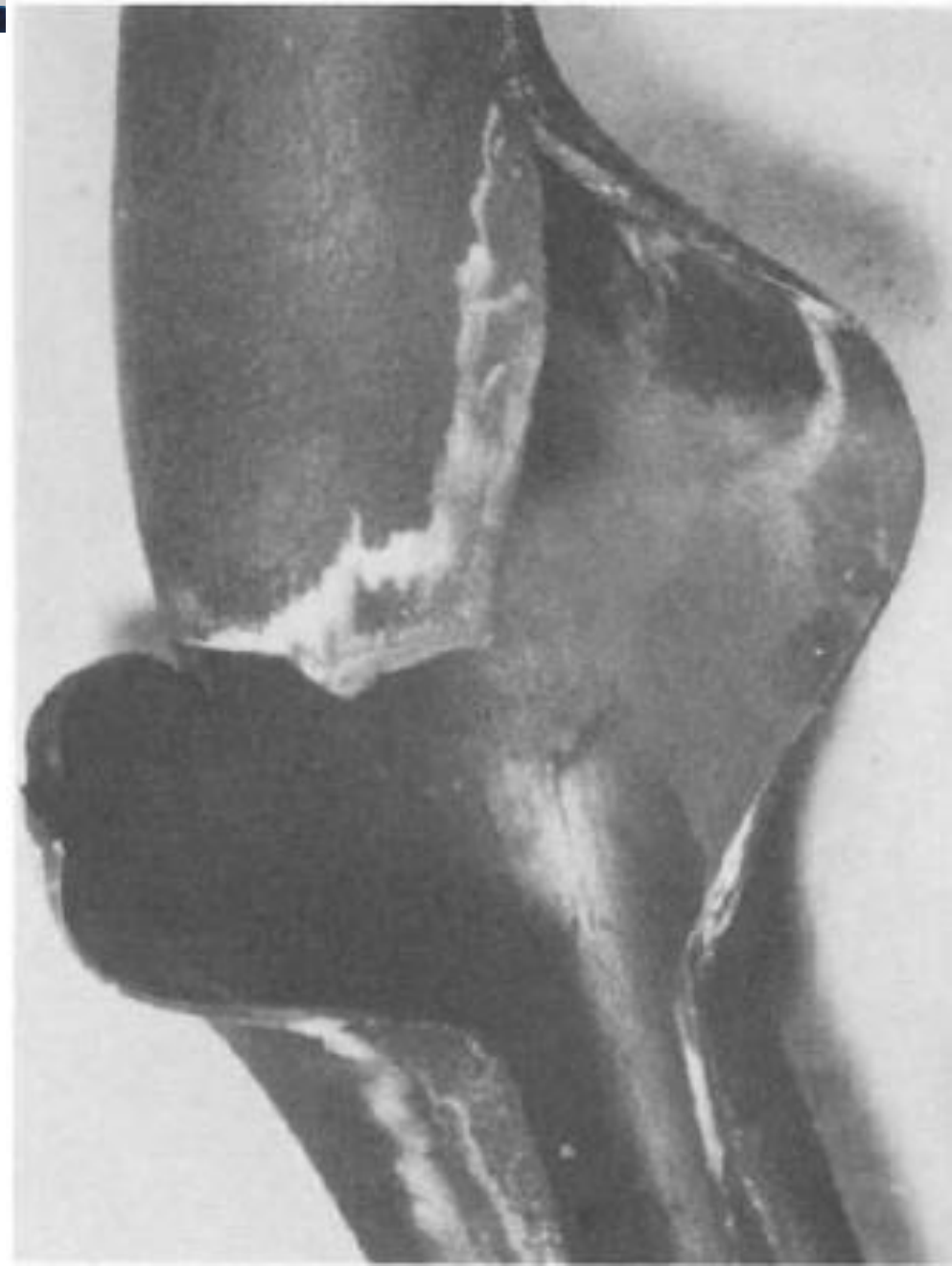
Falhas em Elevada Temperatura

ASME SA-213



Falhas em Elevada Temperatura

ASME SA-213



Falhas em Elevada Temperatura

2- Fadiga em Alta Temperatura

O efeito da temperatura sobre a resistência à fadiga é marcante:

“A resistência à fadiga diminui com o aumento da temperatura. A correlação depende da liga e da temperatura.”

Em alguns casos, a operação pode alternar carga estática e cíclica, alternando um processo de fluência e fadiga, reduzindo a vida útil do componente em elevada temperatura.

3- Fadiga Térmica

A fadiga pode ser causada tanto por tensões cíclicas mecânicas como por tensões cíclicas térmicas.

Trincas de fadiga térmica são resultado de ciclos de aquecimento/resfriamento, produzindo expansão e contração alternadas.

Falhas em Elevada Temperatura

3- Fadiga Térmica

Quando o metal resfria, ocorre a contração, promovendo a formação de tensões residuais trativas caso o componente tenha restrição ao livre movimento.

No caso de aquecimento e resfriamento sucessivos, contração e expansão ocorrem promovendo a propagação da trinca a cada resfriamento.



Falhas em Elevada Temperatura

4- Degradação - Instabilidade Metalúrgica em Alta Temperatura

Tensão, tempo, temperatura e ambiente podem agir alterando a estrutura metalúrgica durante a vida em serviço, contribuindo para a falha pela redução da resistência. Estas alterações microestruturais são referidas como instabilidade metalúrgica.

Entre as mais comuns alterações estão:

- Recristalização
- Envelhecimento
- Precipitação de segunda fase
- Transformações de fase metaestáveis
- Trincamento Corrosão-Tensão.

Falhas em Elevada Temperatura

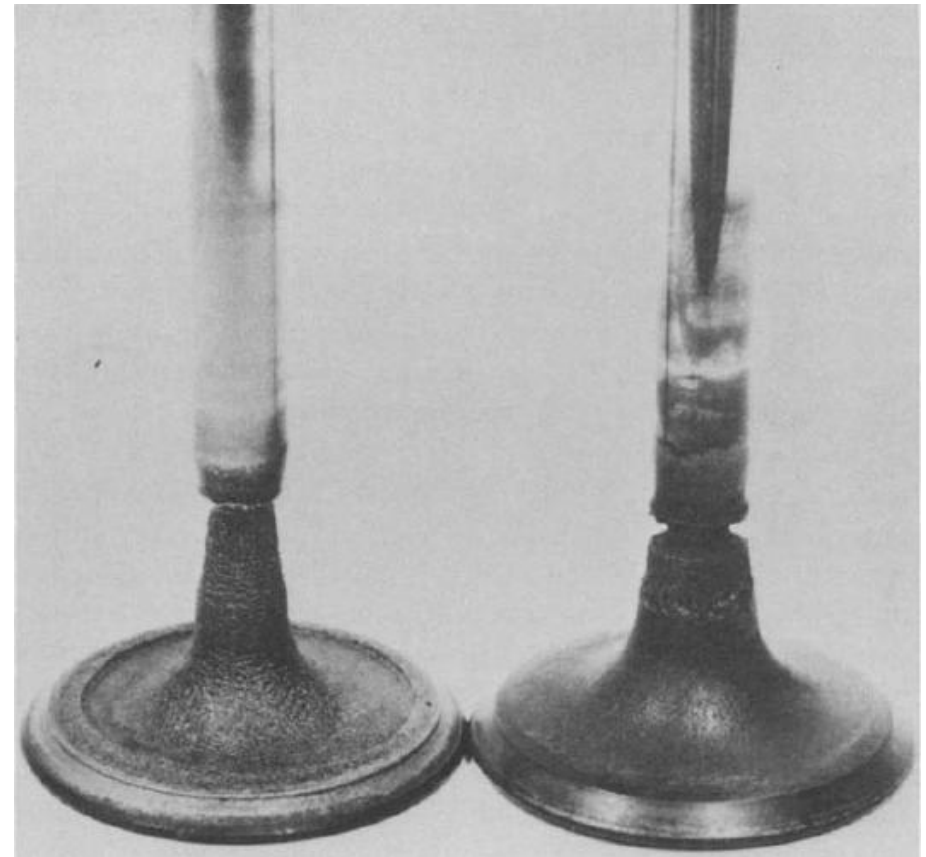
5- Falha Induzida pelo Ambiente

Corrosão e Corrosão-Erosão

Alguns tipos de falhas ocorrem quando componentes operam em ambientes onde existe um fluido em alta velocidade e alta temperatura. Em adição o fluido promove ação corrosiva, acelerando a falha.

Exemplos deste tipo de condição são válvulas de exaustão de motores a combustão interna, palhetas de turbinas e geradores, fornos, dutos e tubulações que conduzem ar aquecido.

Corrosão-Erosão em válvula.

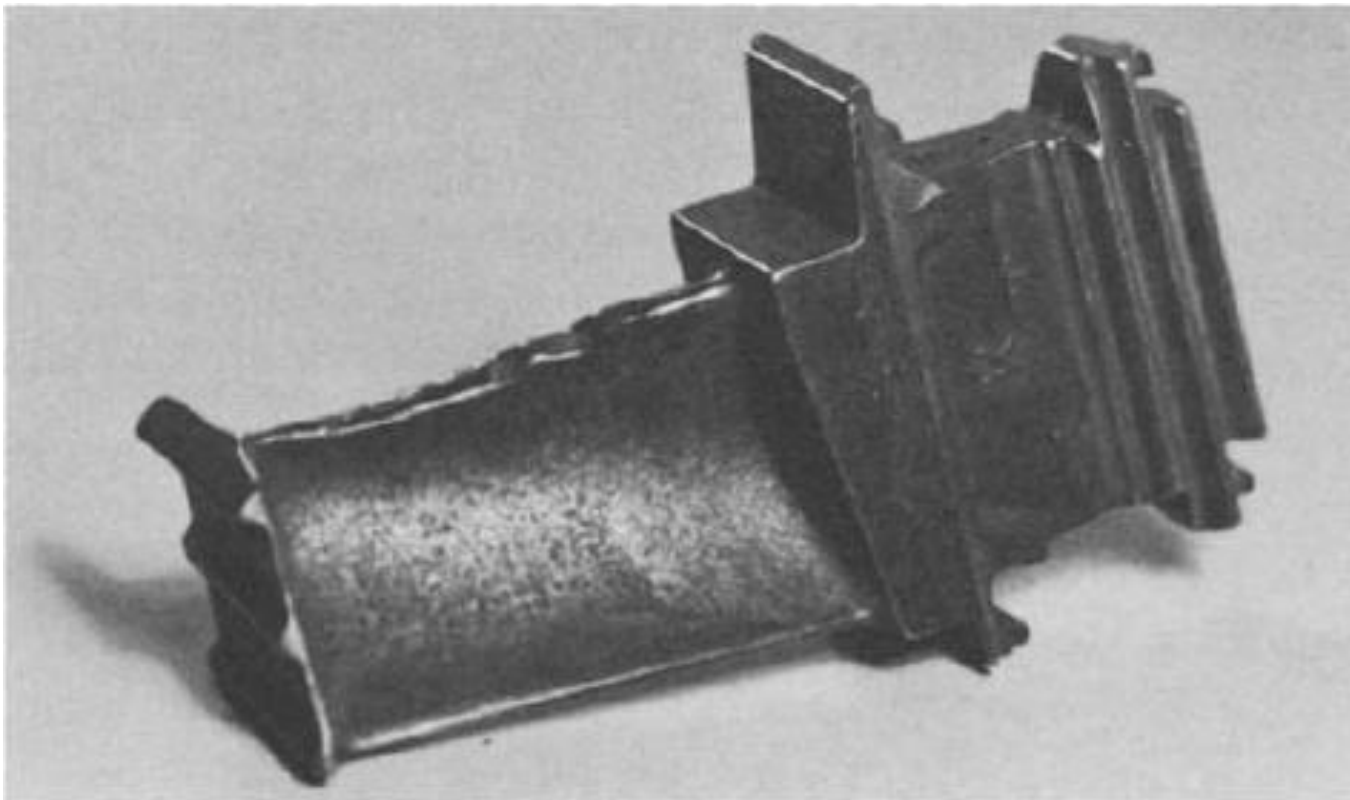


Falhas em Elevada Temperatura

5- Falha Induzida pelo Ambiente

Corrosão-Erosão

Corrosão-Erosão em **alta temperatura** causada por sulfetação ou corrosão a quente, induzida pelo **elevado teor de Enxofre** no combustível.



Falhas em Elevada Temperatura

5- Falha Induzida pelo Ambiente

Oxidação Geral

Em diversas aplicações, a corrosão generalizada é muitas vezes o maior problema (formação de carepa).

Este fenômeno é particularmente agravado quando o componente está exposto a ciclos de aquecimento-resfriamento que promove o destacamento destas camadas de oxidação, expondo o metal a nova oxidação.

Aços Inoxidáveis Ferríticos (409) são aplicados a sistemas de exaustão automotivos, uma vez que apresentam excelente resistência à oxidação e custo relativamente baixo. Em certas condições, podem formar óxidos que expandem e contraem junto com o metal base, ou seja, apresentam excelente aderência.

Falhas em Elevada Temperatura

5- Falha Induzida pelo Ambiente

Carburização

O problema de Carburização em aços, especialmente aços inoxidáveis utilizados em fornos em elevadas temperaturas, é um fenômeno comum em muitas aplicações industriais.

A base do problema de Carburização em alta temperatura de aços inoxidáveis é que rapidamente o Carbono se combina com o Cromo, formando vários tipos de Carbonetos.

Desta forma, o teor de Cromo livre é reduzido (justamente o elemento de confere resistência em alta temperatura e resistência à corrosão) nos contornos de grão, promovendo a fratura intergranular. O Carbono também leva à formação de tensões residuais, uma vez que altera o coeficiente de expansão da liga.

Falhas em Elevada Temperatura

5- Falha Induzida pelo Ambiente

Contato com Metal Líquido

Uma das razões que torna as ligas para alta temperatura inadequadas para o trabalho em contato com metal líquido é que a temperatura induz a precipitação de carbonetos de Cromo nos contornos de grão ou Sensitização.

A sensitização é o resultado do decréscimo do teor de Cromo nos contornos de grão, levando à corrosão, trincamento e fratura intergranular.

Outro problema que pode ocorrer é a reação de componentes do metal líquido e da liga usada, fenômeno chamado de Corrosão em metal líquido. É comum em matrizes de injeção de Alumínio e Componentes de pote de Galvanização por Imersão a Quente (HDG).