



Falhas por desgaste

Análise de falhas III

André Paulo Tschiptschin



Falhas decorrentes de desgaste

- Desgaste pode ser definido como remoção indesejável de material de superfícies em contato decorrente de uma ação mecânica.
- Somente um entendimento detalhado do histórico de utilização e de operação da peça permite compreender os mecanismos atuantes no desgaste do material.
- Em muitos casos não é possível conduzir uma boa investigação a respeito da falha, simplesmente examinando a peça desgastada.

Tipos de desgaste

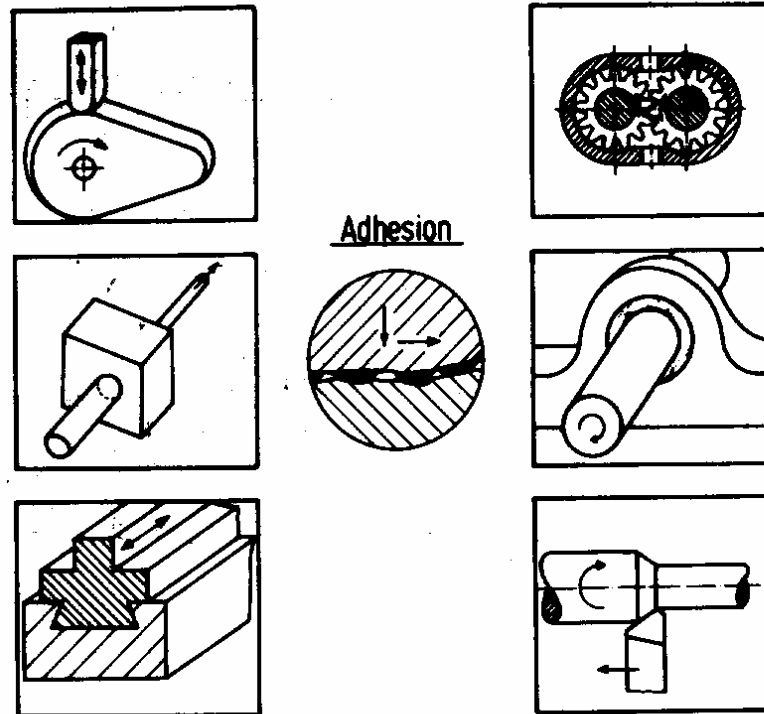
➤ Wulpi classifica o desgaste em duas categorias:

Desgaste I	Desgaste II
Desgaste abrasivo	Fadiga de contato
1. Desgaste erosivo	1. Fadiga de contato superficial e sub-superficial
2. Desgaste por retifica	2. Fadiga de contato com origem sub-camada
3. Desgaste por sulcamento	3. Fadiga por cavitação
Desgaste adesivo	
Desgaste por fretting	



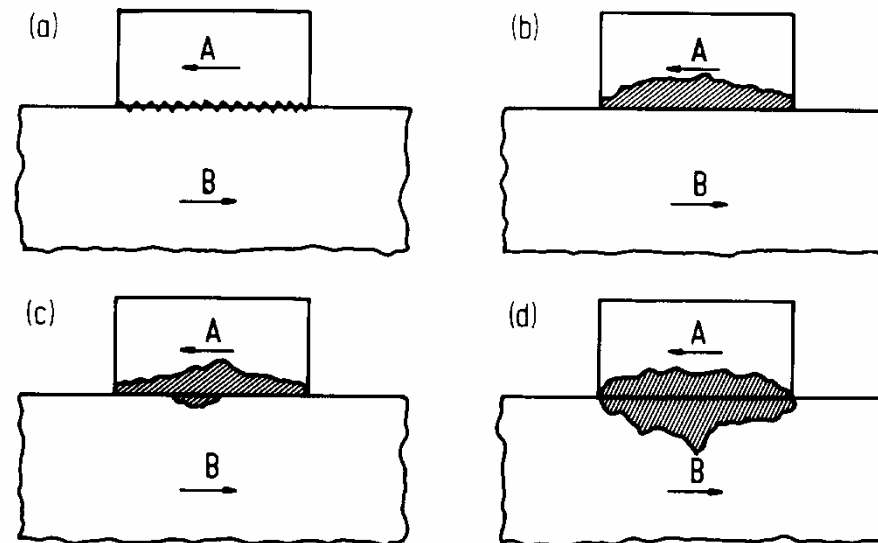
METMAT

Desgaste adesivo



O desgaste adesivo ocorre quando duas superfícies escorregam uma em relação à outra. Pressões locais muito altas são exercidas pelas asperezas em contato, com deformação plástica, adesão e formação de junções.

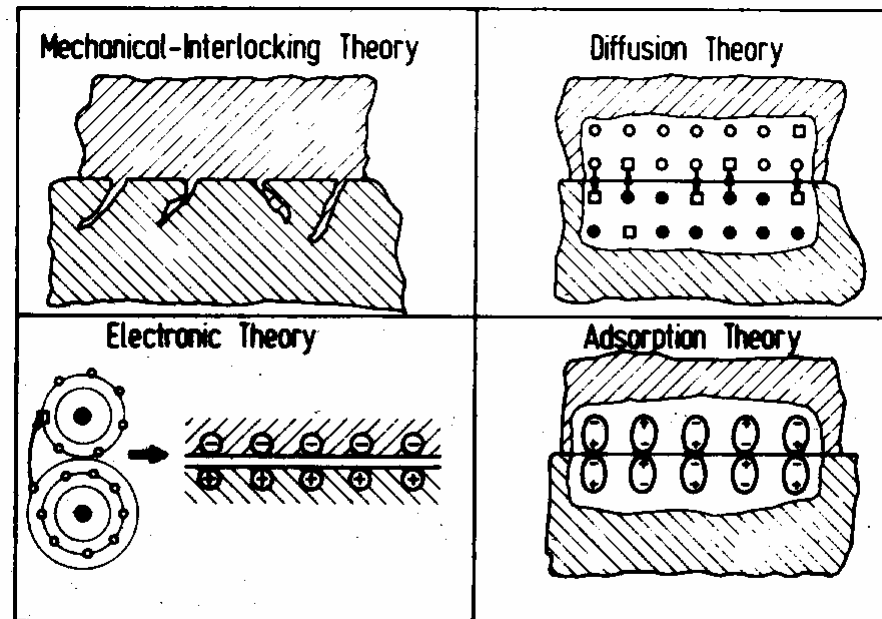
Desgaste adesivo



Ruptura de junções:

- a) na própria interface.
- b) no material mais mole (A).
- c) predominantemente no material mais mole (A), mas também em B (mais duro).
- d) em ambos.

Mecanismos de adesão



Interferência mecânica (interpenetração de irregularidades superficiais)

Difusão (átomos e moléculas se difundem através da interface)

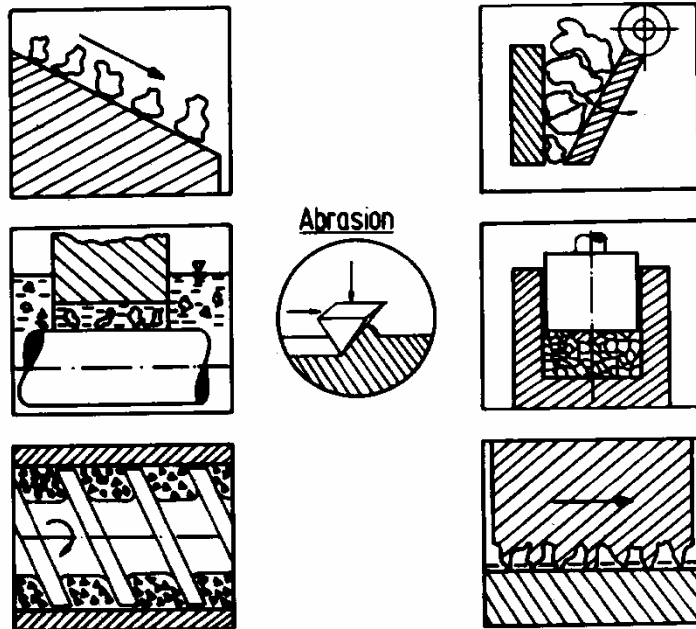
Transferência eletrônica entre corpos em contato com diferentes bandas eletrônicas.

Adsorção química com formação de ligações fortes e/ou ligações de Van der Waals.



METMAT

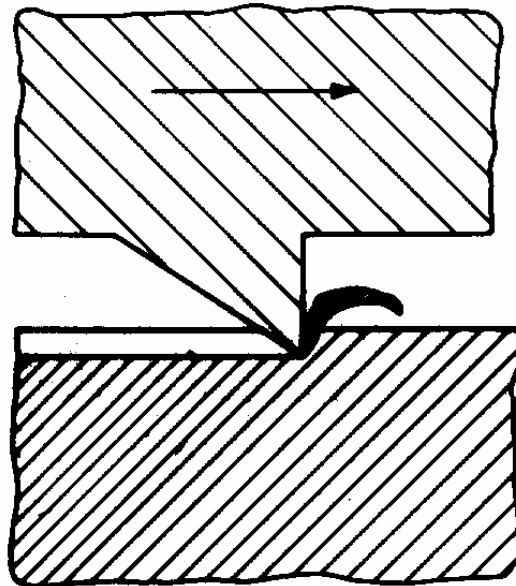
Abrasão



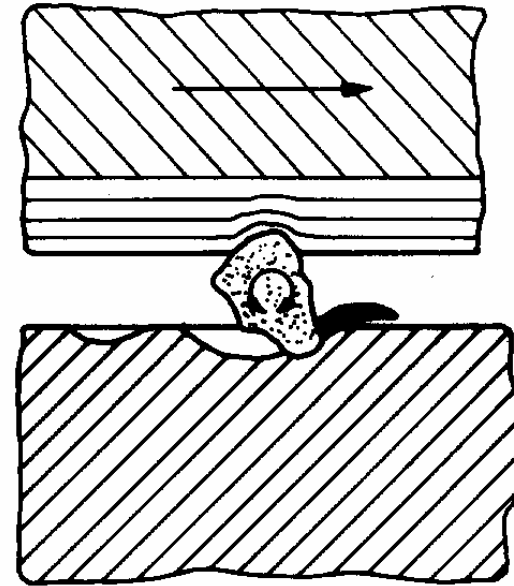
- Desgaste abrasivo ocorre quando há deslocamento de material provocado por partículas de alta dureza existentes entre as duas superfícies em movimento ou embebidas em uma ou nas duas superfícies em movimento.
- As partículas de alta dureza podem ter como origem o produto do processamento de minérios (sílica, alumina, etc.), fragmentos metálicos altamente encruados removidos da superfícies em contato, asperezas de usinagem de uma das superfícies em contato.

Tipos de abrasão

2- Body Abrasion



3- Body Abrasion

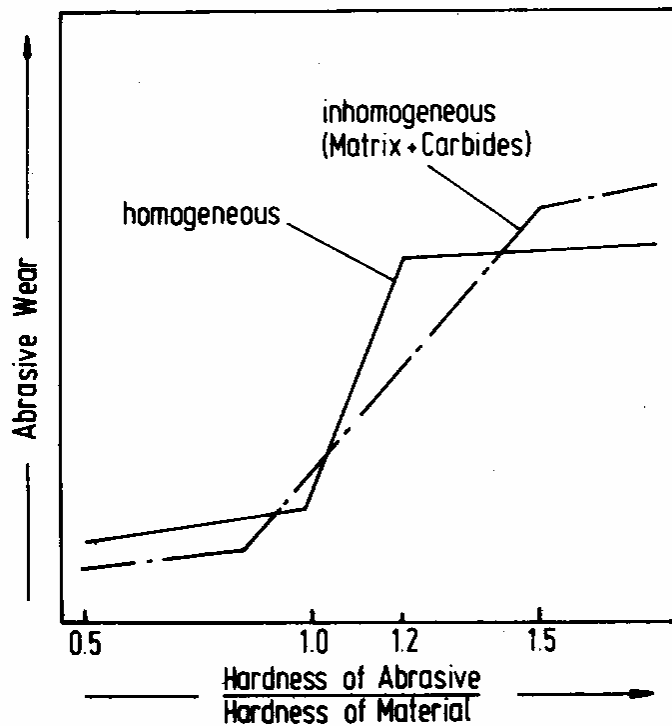


Abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos



METMAT

Abrasão

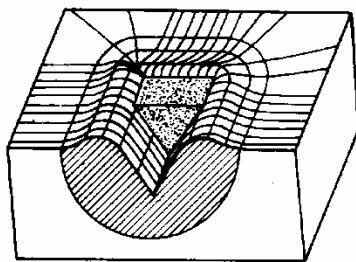


- Sistemas hidráulicos sujos, extrusoras de plástico contendo carga, moinhos e britadores, matrizes utilizadas em metalurgia do pó e a própria operação de usinagem.
- Observa-se uma transição entre regime de desgaste brando para desgaste severo quando a relação entre as durezas da partícula abrasiva e do material se tornam maiores que 1.

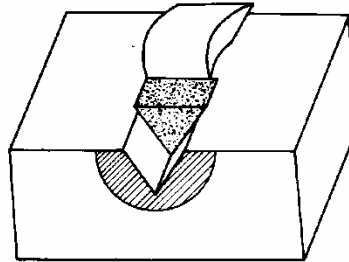


METMAT

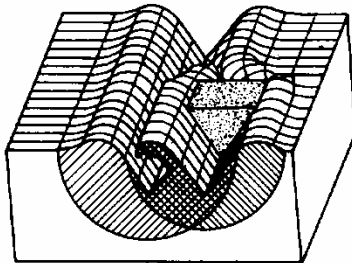
Abrasão



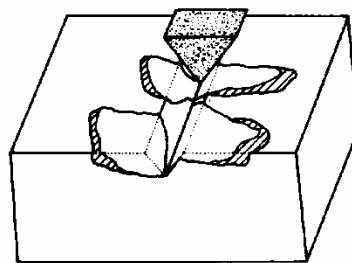
Microploughing



Microcutting



Microfatigue



Microcracking

➤ Quatro micromecanismos são responsáveis pelo desgaste abrasivo:

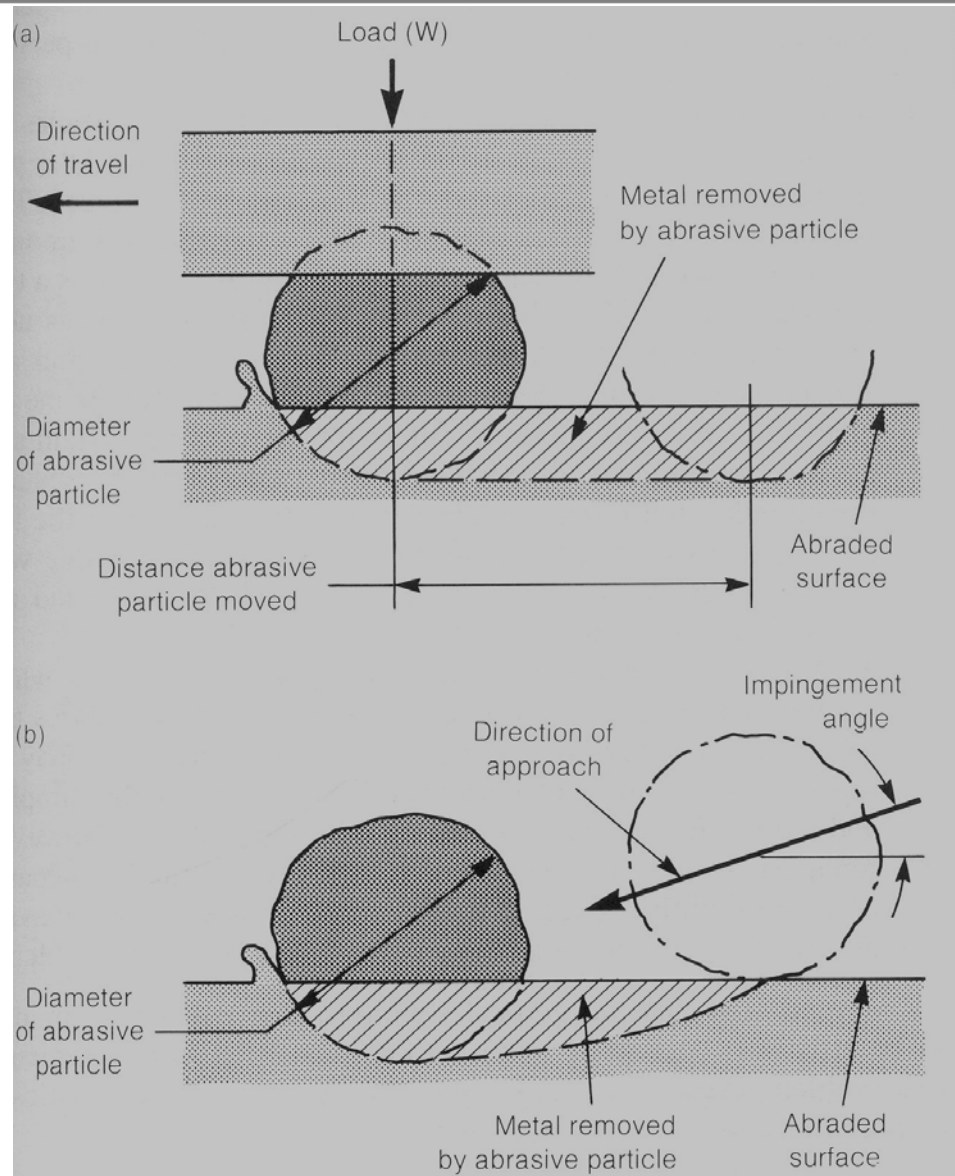
- ✓ a) microssulcamento
- ✓ b) microcorte
- ✓ c) microfadiga
- ✓ d) microtrincamento



METMAT

Corte ou sulcamento

- Contato a três corpos: desgaste abrasivo pela ação de corte ou sulcamento de partículas contidas em um tribo-sistema, sob pressão de outras partículas ou outro corpo. Desgaste em operação de retífica. Desgaste oxidativo a três corpos.
- Contato a dois corpos. Erosão em que as partículas são impulsionadas contra a superfície por um fluido (líquido ou gás).

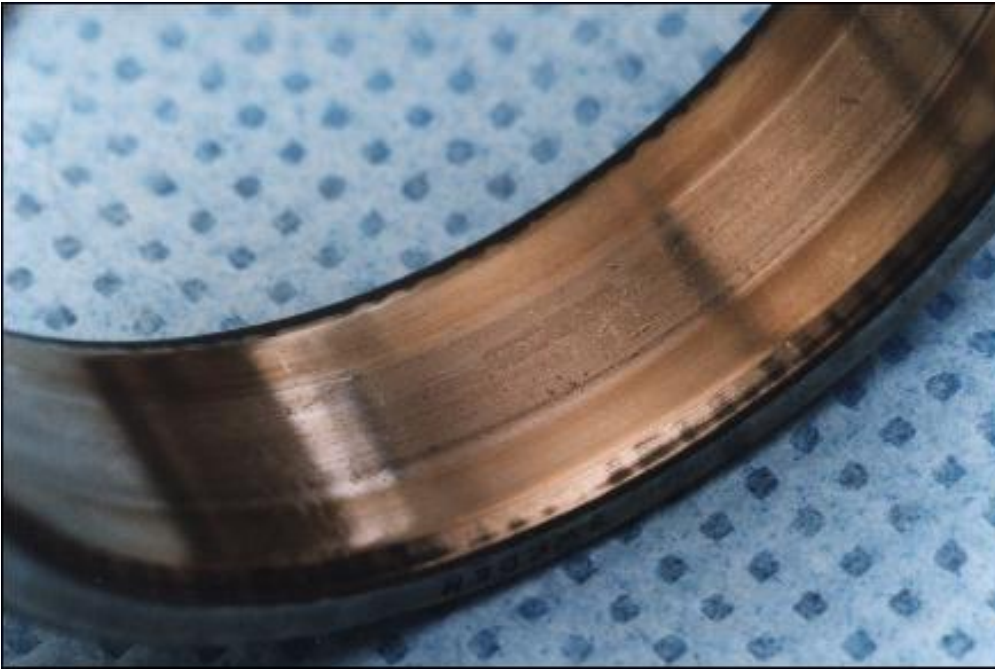




Ações para minimizar o desgaste abrasivo

- Aumento de dureza: nem sempre funciona, pois há situações em que o aumento de dureza provoca aumento de fragilidade, facilitando a ocorrência de micromecanismos de fratura.
- Remoção de partículas estranhas. A utilização de filtros de óleo, ar e água é fundamental para impedir ou diminuir a presença de partículas abrasivas em circulação no sistema.
- Substituição de peças gastas. Prever em projeto a possibilidade de substituir partes gastas com facilidade.
- Recuperação de partes gastas por usinagem ou por deposição de camadas por processos a arco ou processos de aspersão.

Desgaste abrasivo



- Pequenas partículas abrasivas de areia ou de cavacos que eventualmente presentes no sistema de lubrificação desgastam as pistas de rolamento de mancais e rolamentos.
- A quantidade de partículas abrasivas aumenta à medida em que o material do mancal vai sendo gasto. O desgaste se torna acelerado até que o mancal perde sua funcionalidade.



Desgaste erosivo

- Erosão ocorre quando partículas carregadas por um fluido (ou o próprio fluido) em velocidade, rolam contra a superfície.
- Cada partícula em contato com a superfície promove sulcamento ou corte, removendo pequenas partículas (debris). Milhares de partículas causam dano significativo à superfície da peça.
- Bombas, hélices e impelidores, rotores e ventiladores, linhas de vapor e bicos injetores, equipamentos de jateamento de areia ou de jato de granalha.
- O movimento relativo entre as partículas e o metal é condição essencial para ocorrência de erosão.

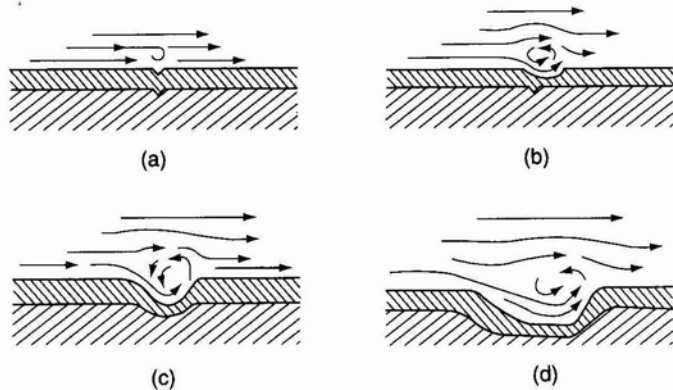


METMAT

Desgaste erosivo-(corrosivo)

- Pode-se identificar o desgaste erosivo ao se observar remoção de camadas ou recobrimentos pouco resistentes como tintas e vernizes.

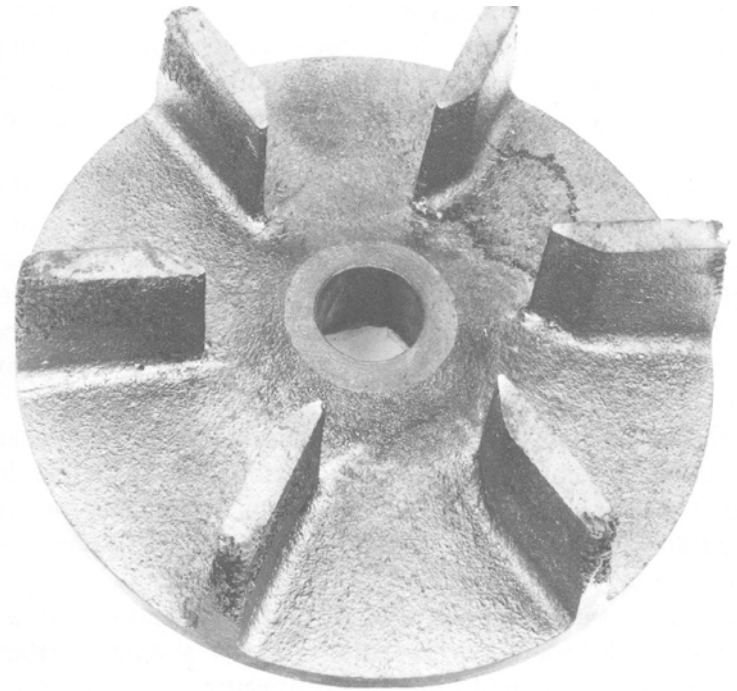
Desgaste erosivo-corrosivo de um aço inoxidável



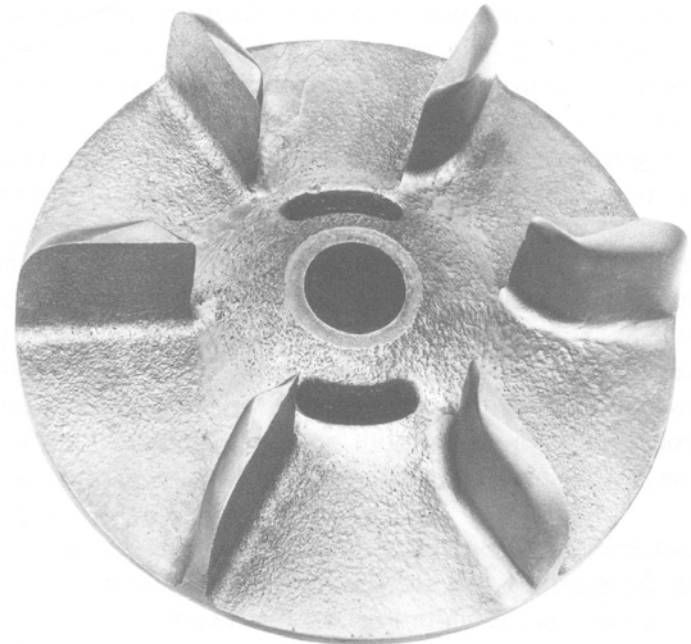
- Ocorre em pás de hélices e ventiladores, em sua parte de trás - parte côncava - submetidas a pressão positiva.
- Sulcamento ou formação de marcas de erosão.

Desgaste erosivo

- ✓ Arredondamento de arestas.
- ✓ Rotor de bomba de água, fabricado em ferro fundido cinzento.
- ✓ Arredondamento de arestas das palhetas, decorrente da ação da areia contida na água bombeada.



(a)



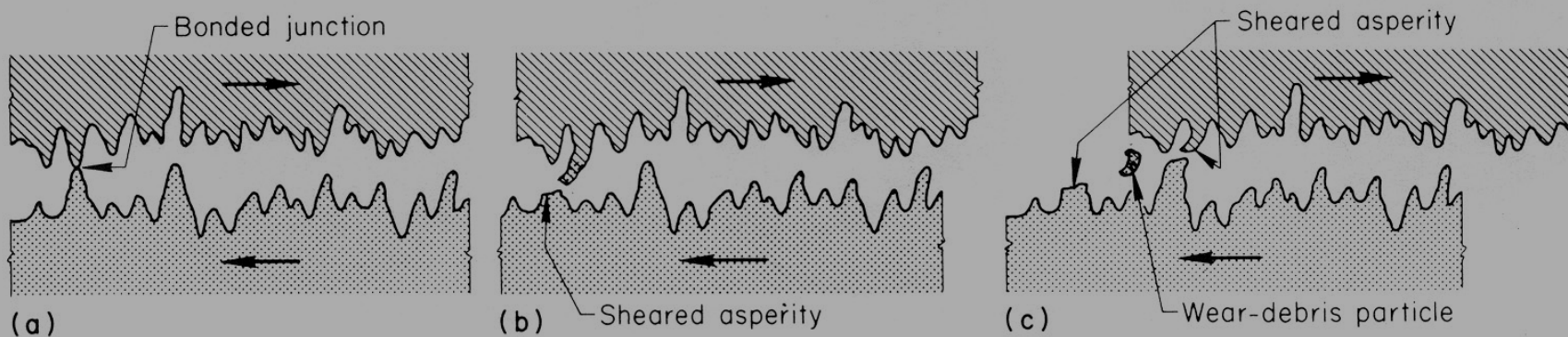
(b)



METMAT

Desgaste adesivo

- ✓ Desgaste causado pela formação e posterior arrancamento de junções formadas por soldagem ou micro-soldagem.



As the surfaces slide across each other, a bonded junction (a) is torn from one peak, or asperity (b), then is sheared off by impact with a larger, adjacent peak to form a particle of wear debris (c). The peaks are greatly exaggerated in this sketch, but the principle is accurate; metal also may be transferred from one surface to another by the microwelding process. Arrows indicate direction of sliding.

Fig. 8. Schematic illustration of one process by which a particle of wear debris is detached during adhesive wear. (Ref 1)

Desgaste adesivo

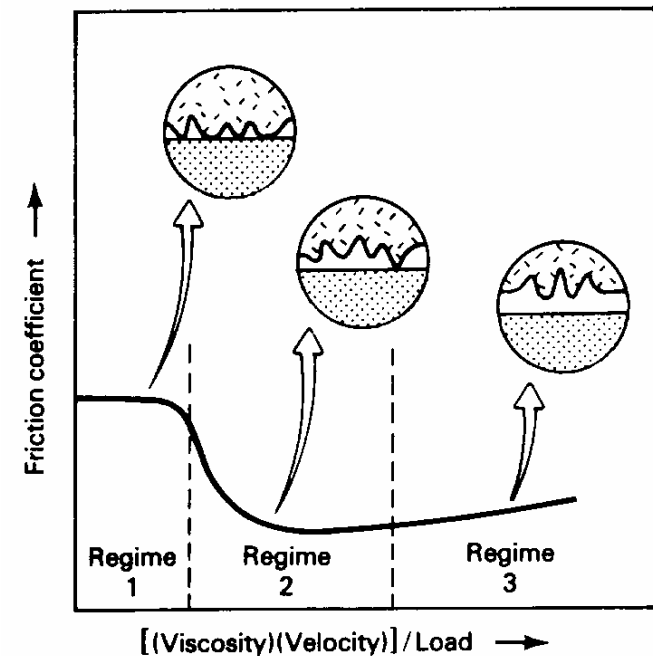
- O coeficiente de atrito varia com o regime de lubrificação

Regime 1 - Lubrificação limite (asperezas estão em contato)

Regime 2 - Lubrificação com filme fino (asperezas parcialmente em contato)

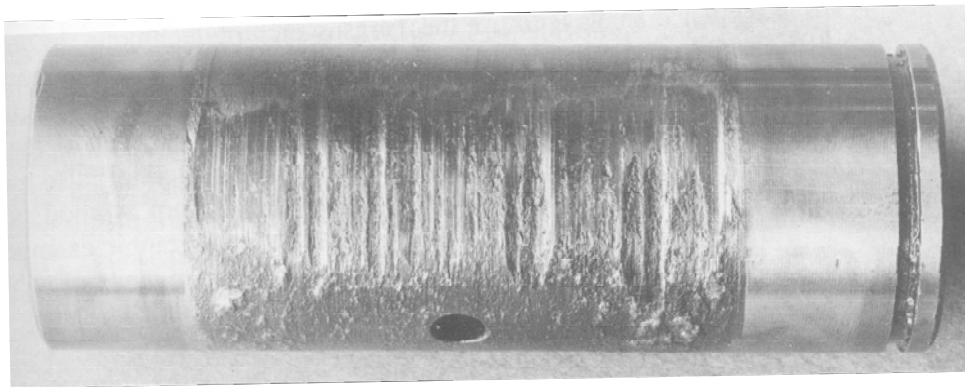
Regime 3 - Lubrificação com filme grosso (não há contato entre asperezas - Lubrificação Hidrodinâmica)

- No Regime 1 de lubrificação limite as asperezas entram em contato possibilitando o mecanismo de junção de asperezas



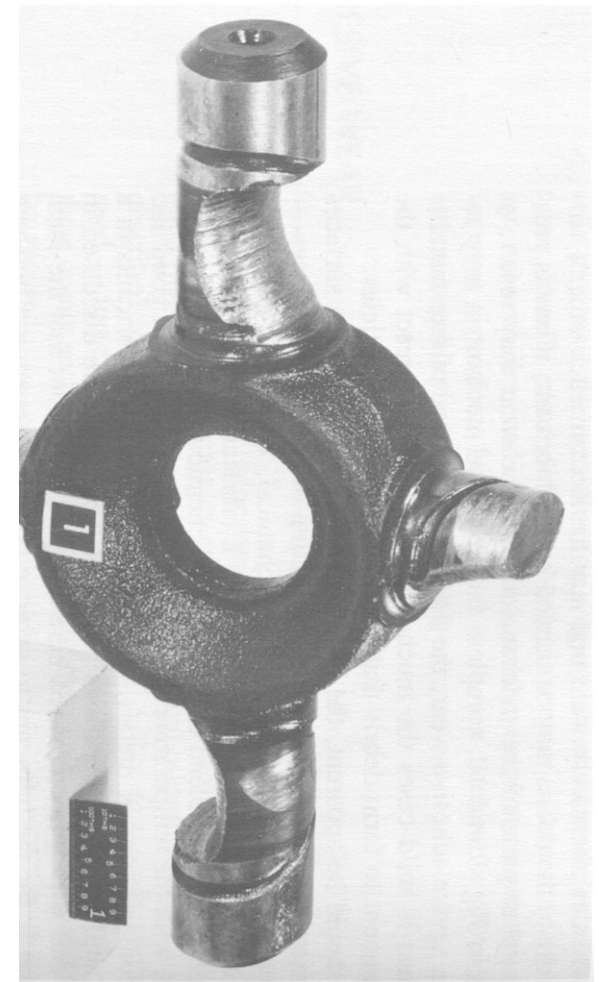
Desgaste adesivo

- ✓ Desgaste causado pela formação e posterior arrancamento de junções formadas por soldagem ou micro-soldagem.



Desgaste adesivo causado por falta de lubrificação.

- ✓ Contato metal-metal pode ocorrer devido lubrificação inadequada.
- ✓ O calor gerado pelo atrito é suficiente para causar microfusão de asperezas.





METMAT

Fretting

- Em juntas mecânicas, vibrações de pequena amplitude podem provocar micro-escorregamentos entre as superfícies ao longo das zonas de contato. Duas conseqüências podem ocorrer resultantes deste fenômeno:
 - 1) o desgaste por fretting - quando os micro-escorregamentos relativos provocam um desgaste superficial;
 - 2) a fadiga por fretting (FF) - quando os micro-escorregamentos relativos, associados a concentração de tensão causada pelo contato mecânico, acelera os processos de nucleação e de crescimento de trincas nos componentes



METMAT

Desgaste por fretting

- ✓ Processo especial de desgaste que ocorre na área de contato entre duas peças, sob a ação de carga e sujeitas a movimento relativo causado por vibração ou alguma outra causa. Ocorre em acoplamentos estacionários.
- ✓ O dano por fretting pode ser identificado pela presença de ferrugem (pó de óxido ou hidróxido de ferro) e pela aparência áspera e “corroída” da superfície que apresenta pites de desgaste.

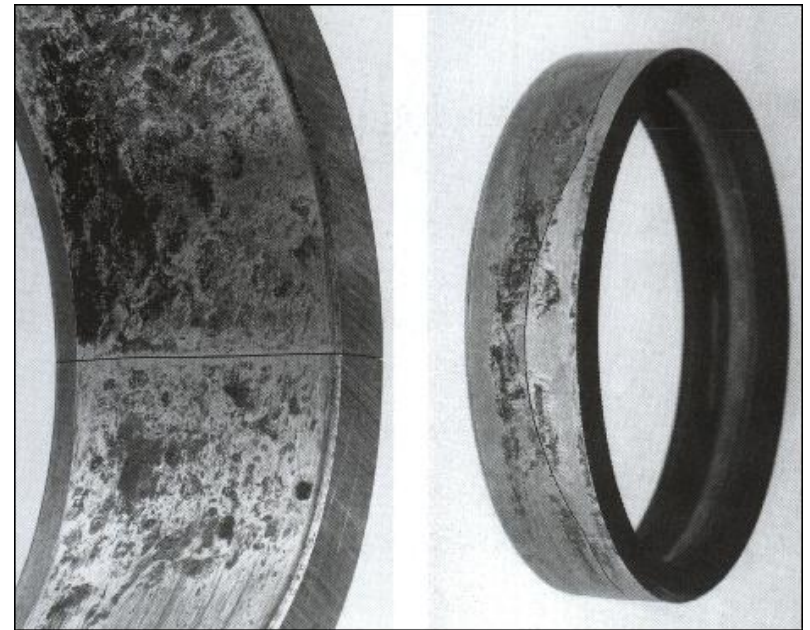




METMAT

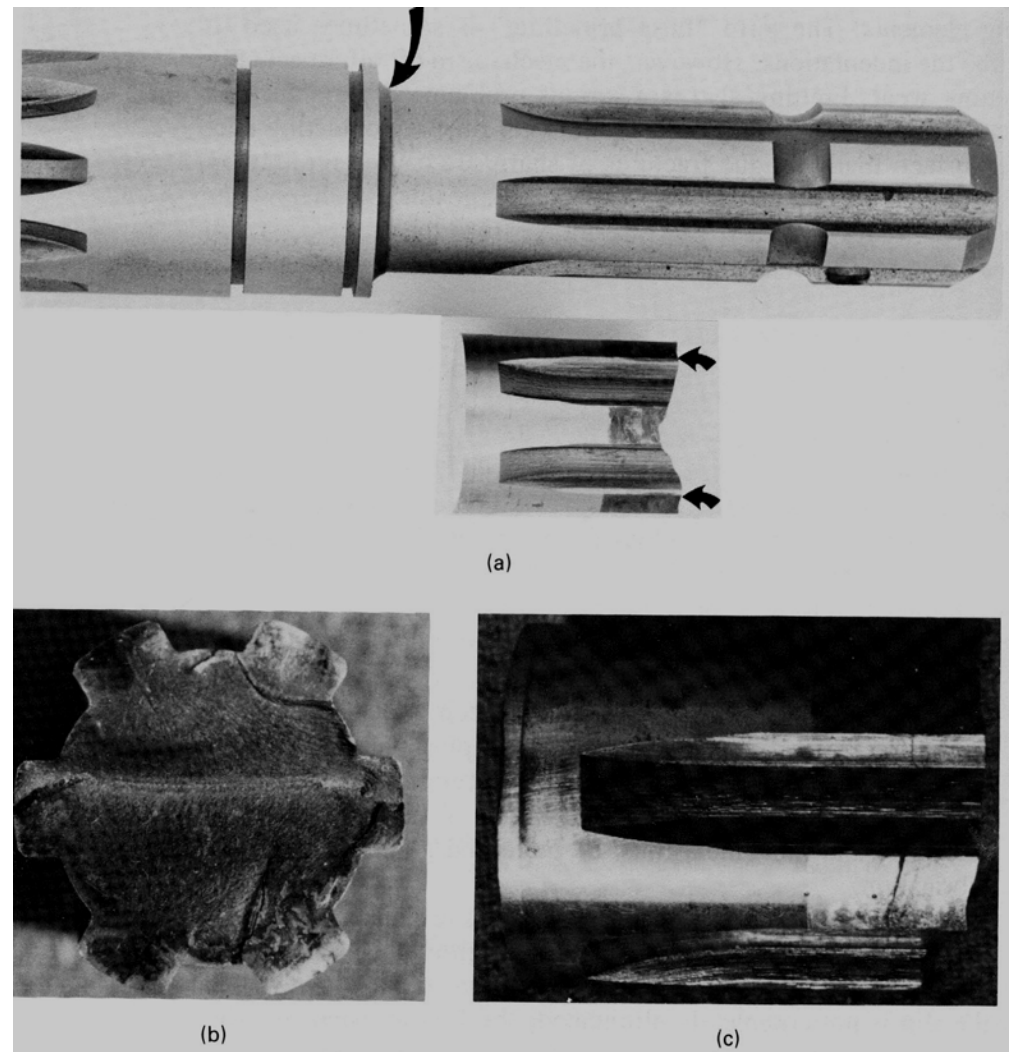
Desgaste por fretting

- Como o acoplamento é estacionário, há uma tendência a acumular na junta, as asperezas arrancadas por fretting.
- Os debrís são freqüentemente constituídos por óxidos dos metais em contato. Dá-se ao fenômeno o nome de desgaste oxidativo.
- Dependendo do tipo de óxido formado, o debrís pode ser avermelhado, amarronzado ou preto.
- Quando misturado com óleo ou graxa o debrís é chamado de “lama vermelha”.



Fretting e fadiga

- Fadiga em eixo splined iniciada por fretting
- A nucleação ocorreu na superfície mais externa independente da existência de entalhe (temperado por indução)





Como minimizar desgaste por fretting

- Eliminar a vibração.
- Eliminar possibilidade de escorregamento no acoplamento, através de travamento das superfícies, p.e por interferência. Cuidado, pois pode piorar (aumento da tensão).
- Utilização de um elastômero no acoplamento.
- Lubrificação da junta com lubrificantes específicos para esta finalidade, p.e. , Mo_2S .
- Tratamentos para induzir tensão residual de compressão na superfície.



Formação de cavidades na superfície

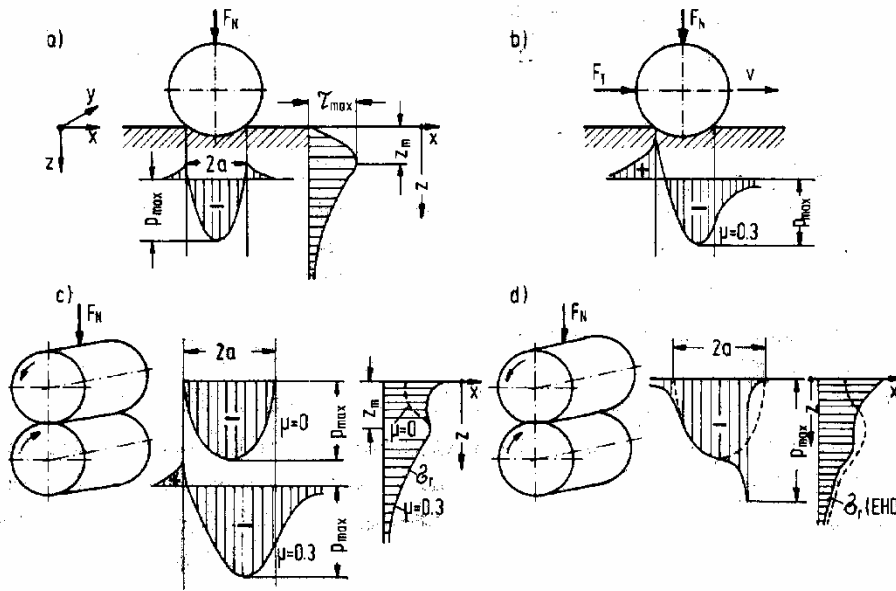
(por rolamento, deslizamento e cavitação)

- Cavidades podem se formar, na superfície de peças em contato mecânico, sob a ação de tensões elevadas, por um processo denominado fadiga de contato.
- A fadiga, neste caso, ocorre pelo mecanismo já discutido anteriormente de escorregamento (movimentação de discordâncias) sob a ação de tensões alternadas em milhares de ciclos.
- A diferença é que ao invés de fraturar, pequenos pedaços da peça vão sendo removidos, pela ação de trincas sub-superficiais, resultando em pites e cavidades.
- A formação destes pites constitui o fator limite na capacidade de suportar carregamento de uma peça.



METMAT

Tensões de Hertz



a =raio do círculo em contato

R = raio da esfera

E =módulo elástico

F_N = Força normal

O raio da área de contato de uma esfera com um plano é dado por:

$$a = 1,11 \left(\frac{F_N \cdot R}{E} \right)^{1/3}$$

$$p_{\max} = -0,388 \left(\frac{F_N \cdot E^2}{R^2} \right)^{1/3}$$

e a pressão máxima de contato:

$$\tau_{\max} = 0,31 p_{\max}$$

$$Z_m = 0,47 a$$

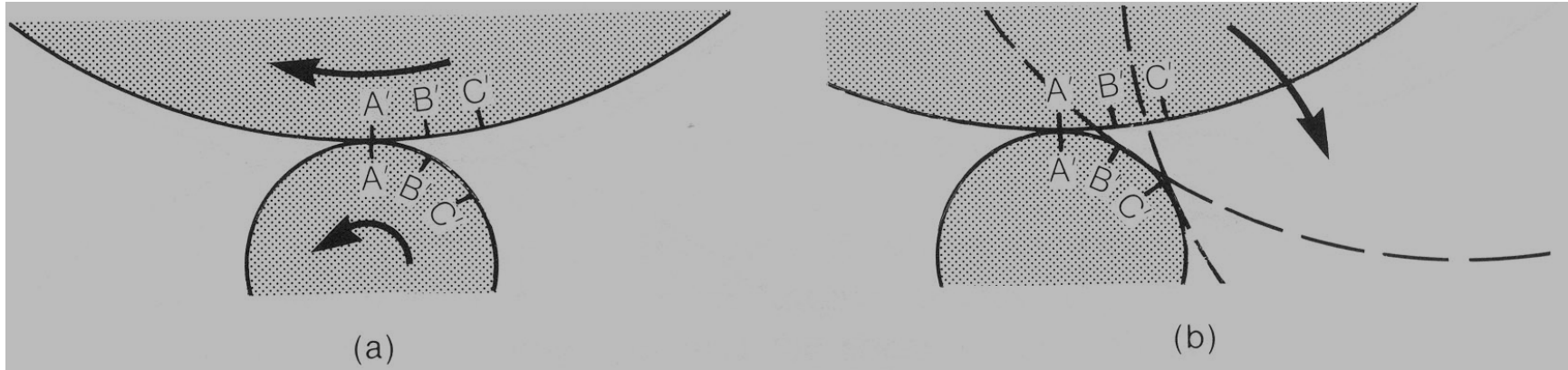
a máxima tensão de cisalhamento ocorre a uma profundidade Z_m



METMAT

Nucleação sub-superficial

- Quando as superfícies estão em contato por rolamento, o ponto de contato se movimenta no sentido contrário ao da rotação do cilindro.
- A tensão de cisalhamento máxima é sub-superficial .



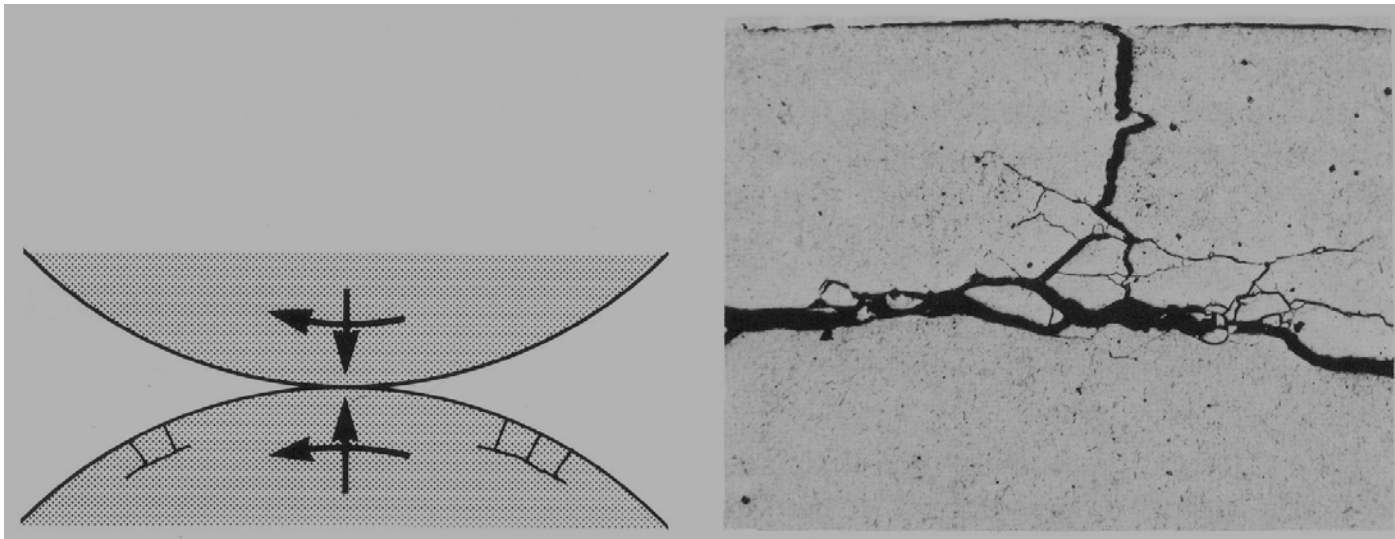
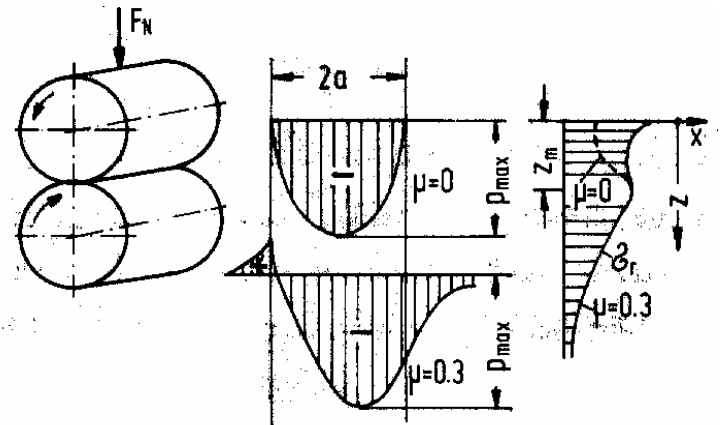


METMAT

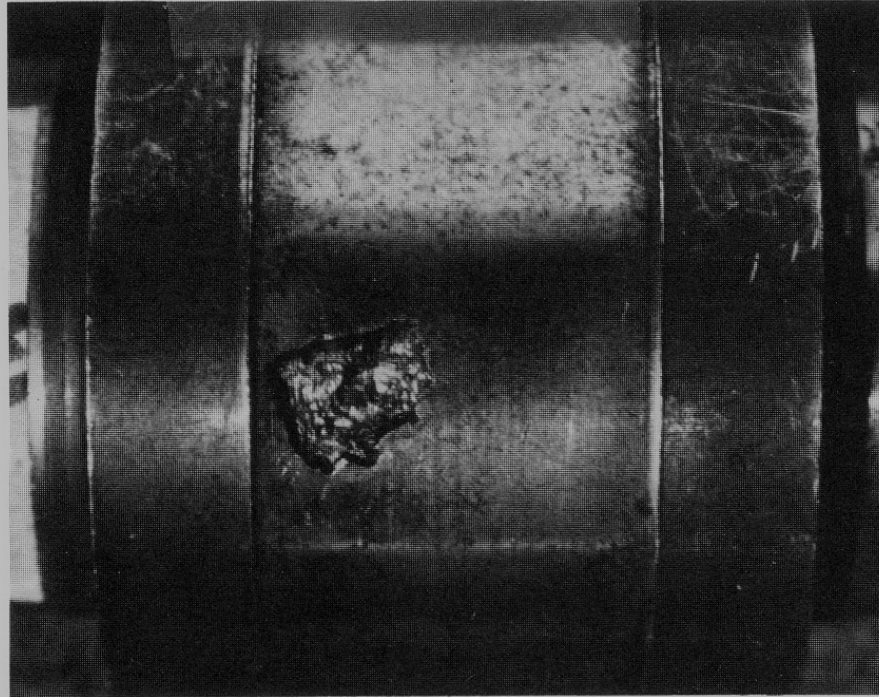
Formação de pites

(nucleação sub-superficial)

- Nucleação sub-superficial nos locais em que a tensão de cisalhamento é máxima.
- As trincas nucleiam em inclusões não metálicas duras e frágeis, concentradoras de tensão como e se propagam paralelamente e perpendicularmente à superfície. As trincas envolvem pedaços de metal que caem formando os pites.
- É difícil localizar as inclusões que nuclearam o pite.



Formação de pites



When this specimen was tested in essentially pure rolling, a steep-sided, irregularly shaped pit was formed and the test was stopped. The extremely high force needed to cause subsurface pitting is shown by the plastic deformation at the sides of the wear track formed by the mating roller, which was 5 in. in diameter.

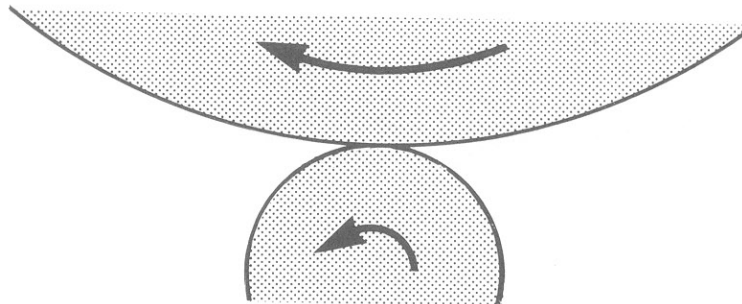
Fig. 3. A subsurface-origin pit in a carburized and hardened alloy steel test roller caused by fatigue in the manner shown in Fig. 2.



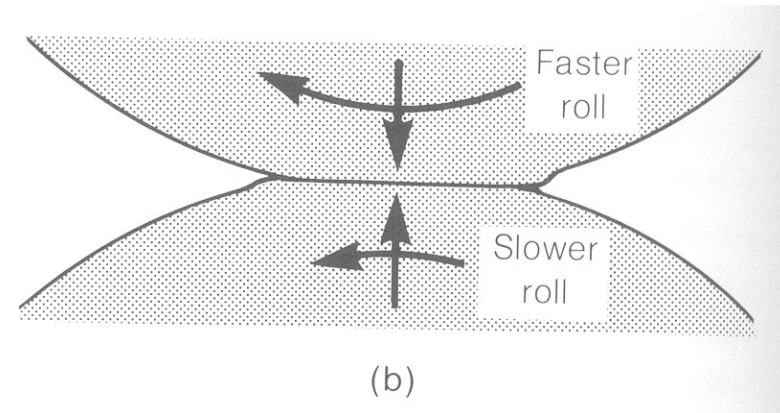
METMAT

Nucleação superficial

- Quando o contato envolve rolamento/deslizamento a configuração de tensões muda e é mais complicada.
- A tensão máxima de cisalhamento não se localiza mais abaixo da superfície. Desloca-se para a superfície devido à ação das forças de atrito decorrentes do deslizamento e das forças de tração associadas.



(a)



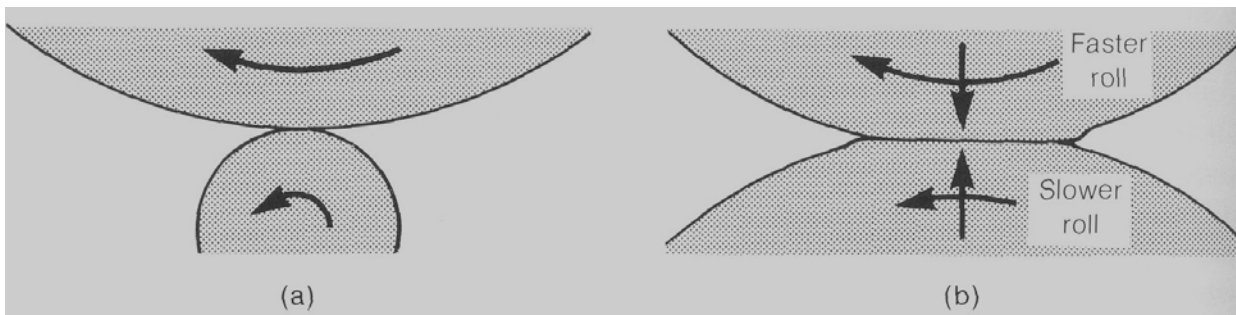
(b)



METMAT

Rolamento/deslizamento

- Como o cilindro grande gira com maior velocidade há uma tendência a arrastar a superfície do cilindro menor para a esquerda ou no sentido anti-horário.
- A direção de arraste do cilindro superior é para a direita, ou seja também no sentido anti-horário.
- A direção de deslizamento é oposta à direção de escorregamento no cilindro menor, enquanto no cilindro maior estas direções coincidem.
- Utiliza-se o termo “deslizamento negativo” quando rolamento e escorregamento ocorrem em sentidos opostos e “deslizamento positivo” quando ambos ocorrem no mesmo sentido.



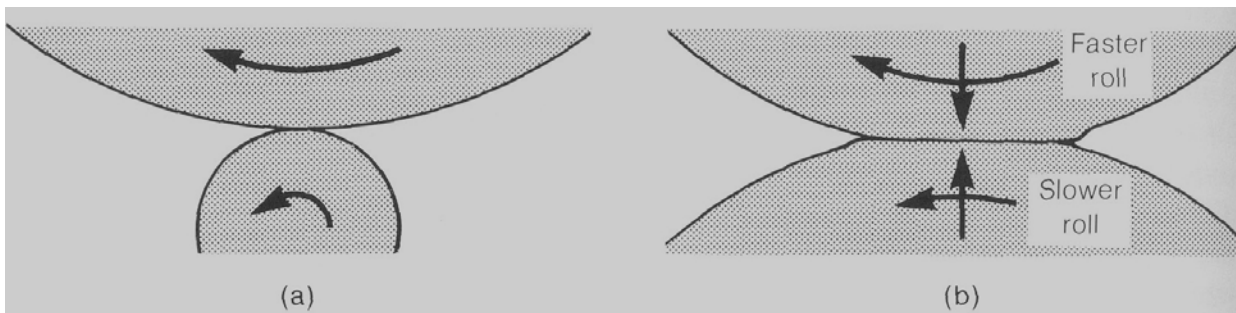
	<u>Lower roller</u>	<u>Upper roller</u>
Surface velocity	Slower	Faster
Rotation	CCW	CW
Rolling	CW	CCW
Sliding	CCW	CCW
P/N sliding	Negative	Positive



METMAT

Rolamento/deslizamento

- Como a superfície do cilindro menor, em deslizamento negativo está rolando em uma direção e sendo arrastada em direção oposta, as tensões devidas ao atrito, as tensões térmicas e as tensões de cisalhamento tendem a ser maiores.
- Além disso as tensões no cilindro menor são maiores.
- A probabilidade de falha por formação de pite é maior no cilindro menor .



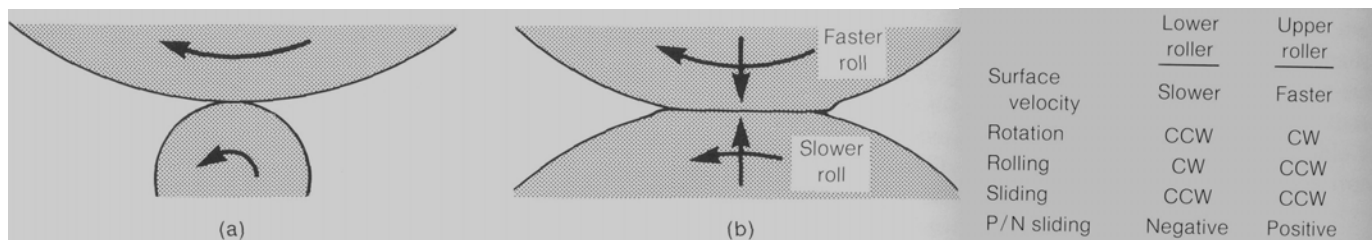
	Lower roller	Upper roller
Surface velocity	Slower	Faster
Rotation	CCW	CW
Rolling	CW	CCW
Sliding	CCW	CCW
P/N sliding	Negative	Positive



METMAT

Rolamento/deslizamento

- Em equipamentos em que o contato é rolamento e deslizamento combinados, é necessário conhecer as velocidades relativas e as direções de rolamento e deslizamento, para entender o mecanismo de desgaste.
- A direção de rolamento é definida como a direção na qual o ponto de contato se move; a direção de rolamento é sempre oposta à direção de rotação.
- Deslizamento positivo corresponde a deslizamento na mesma direção do rolamento. Deslizamento negativo ocorre na direção oposta à direção de rolamento.





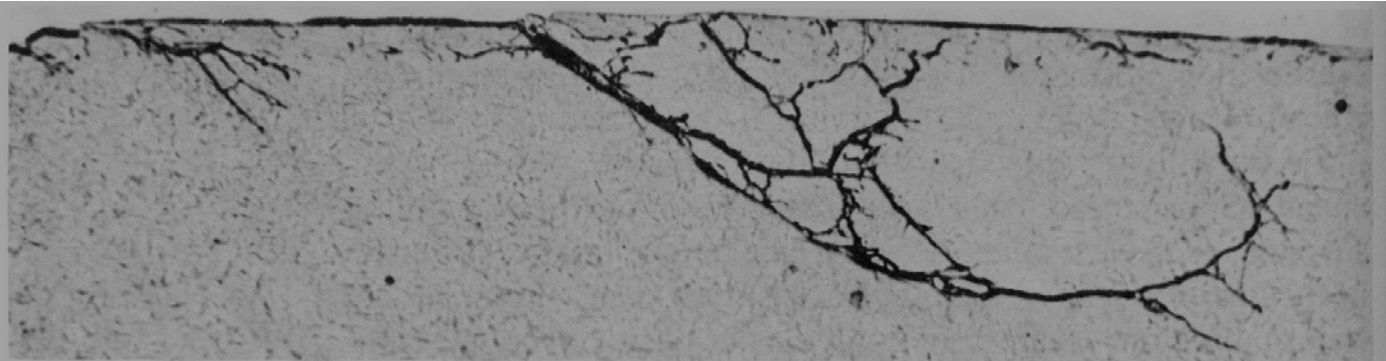
Fadiga de contato

- A maior parte das falhas por fadiga de contato ocorrem na região de deslizamento negativo, pois as tensões de cisalhamento nesta região são maiores.
- Deslizamento negativo ocorre na região “dedenda” de dentes de engrenagem, na superfície de cames seguidores e em dispositivos em que uma das partes tem velocidade menor.
- Aços temperados e revenidos sofrem pites após 20 a 30 milhões de ciclos para tensões de contato de 2400 MPa, quando há combinação de rolamento/deslizamento (65%/35%).
- Quando há somente rolamento a tensão de contato crítica para causar pites é de cerca de 4000 MPa.



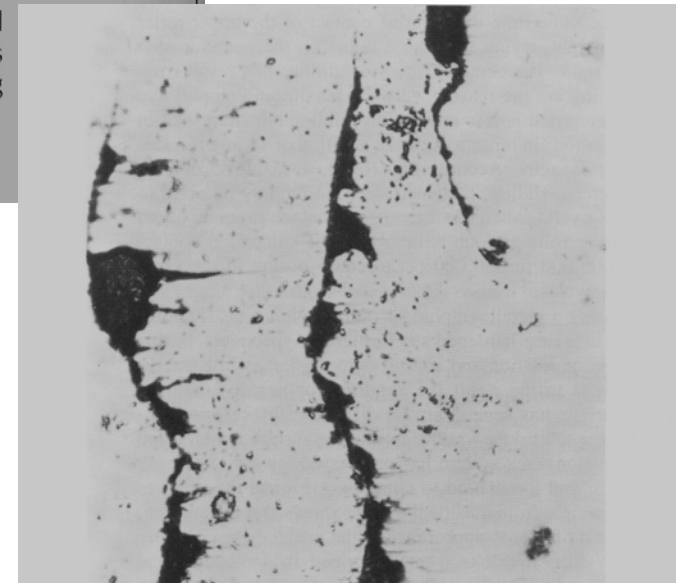
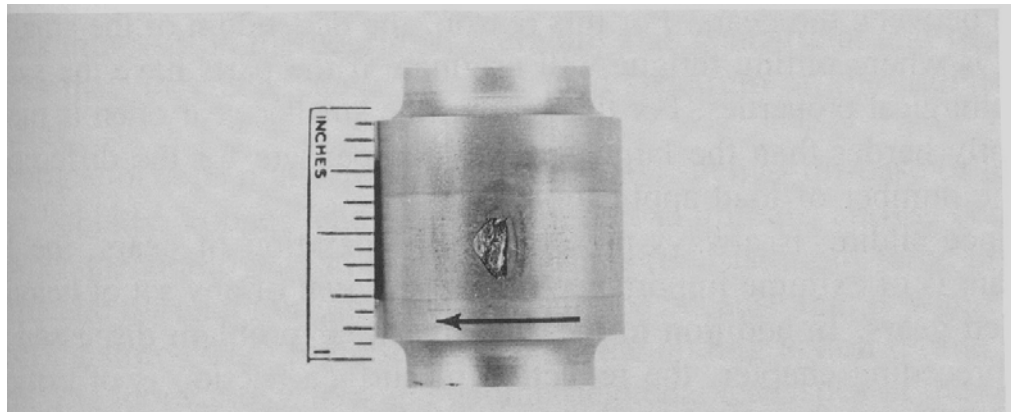
METMAT

Pites de fadiga de contato



The negative-sliding member (lower and slower roller in Fig. 5b) forms small diagonal cracks from the surface inward at an angle. Some of these cracks may proceed deeper into the hardened steel, as seen in this section. The orientation is the same as in Fig. 5(b), in which the sliding is to the left and the rolling is to the right, producing negative sliding.

Fig. 6(a). Cross section through a nearly complete surface pit (max depth about 0.010 in.) in a roller test specimen.



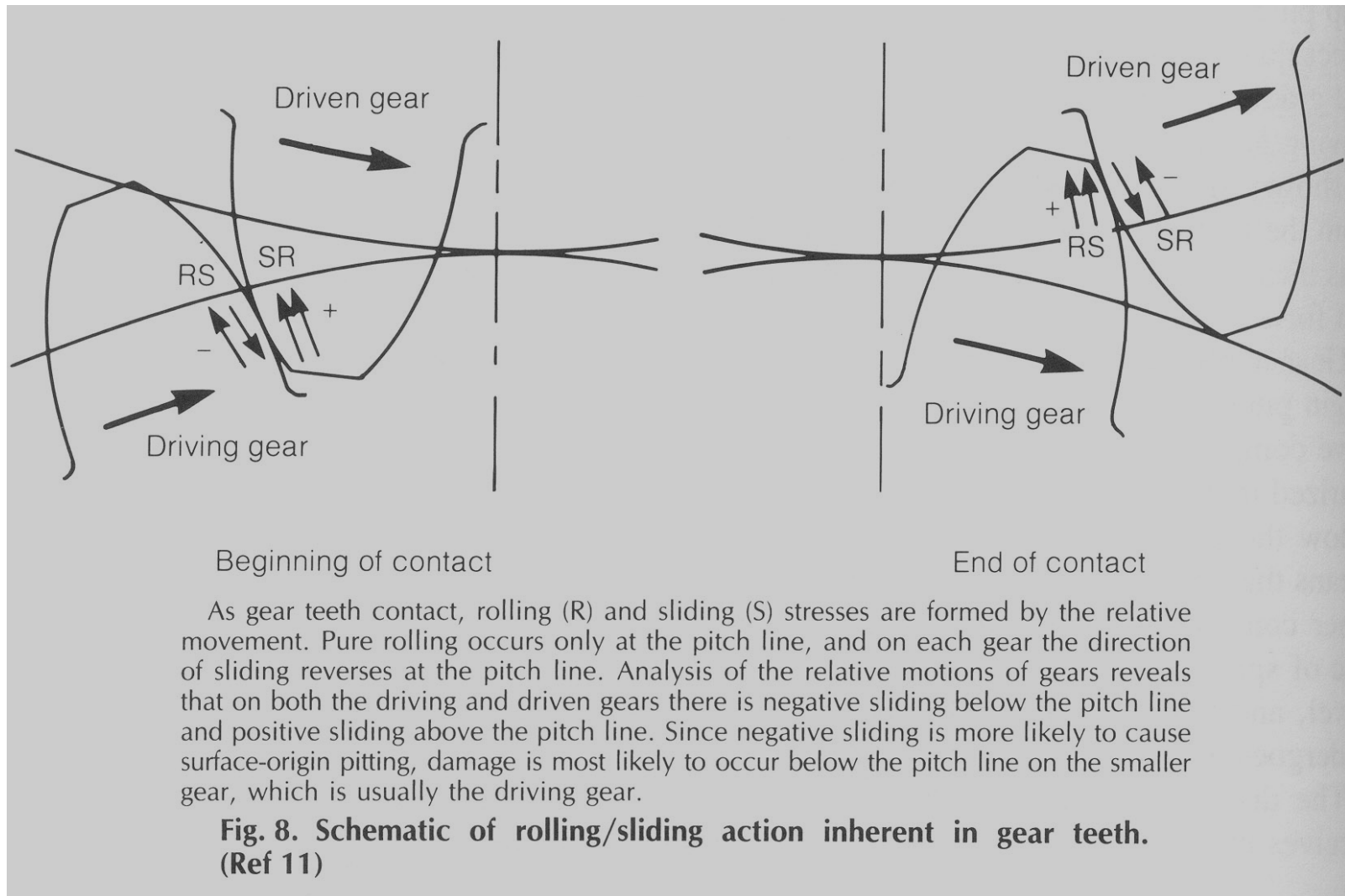
The many small, V-shaped cracks are the outer view of diagonal surface cracks like those seen in Fig. 6(a). As a crack progresses deeper into the steel, the "V" widens on the surface. Eventually a V-shaped volume of metal becomes totally surrounded by crack, falls out, and leaves an arrowhead-shaped pit, which rapidly changes shape under continued loading. Sliding direction is to the left, rolling to the right.

Fig. 6(b). Highly magnified view (1000×) of the surface of a negative-sliding roller.



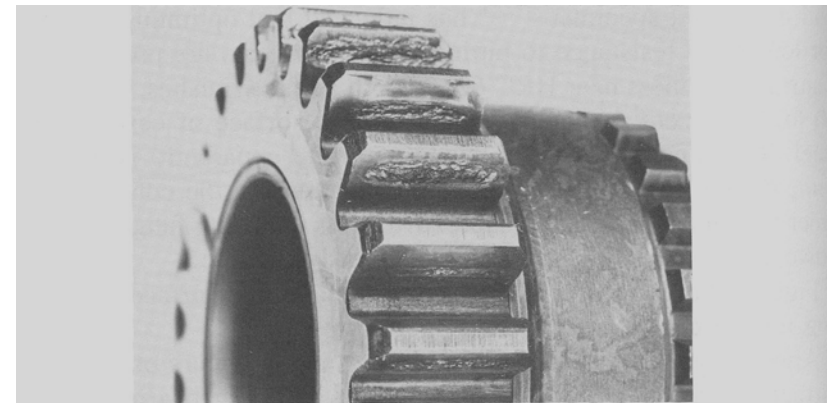
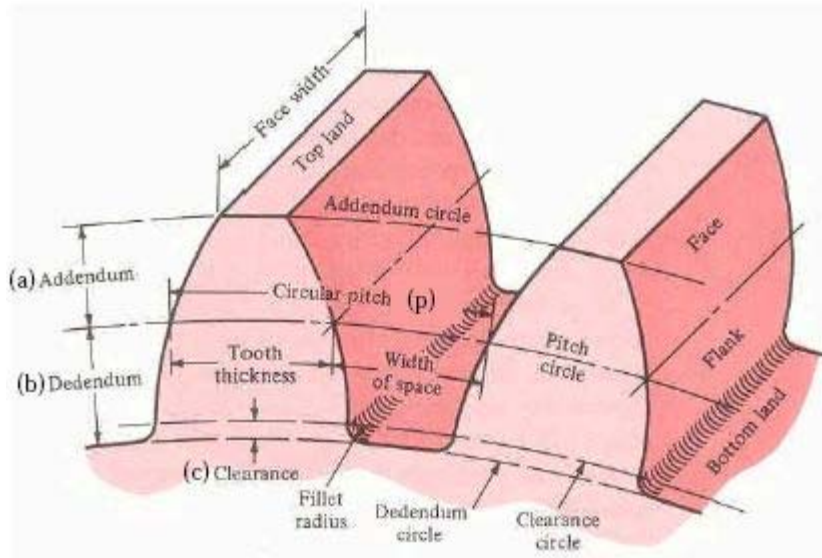
METMAT

Pites em engrenagens

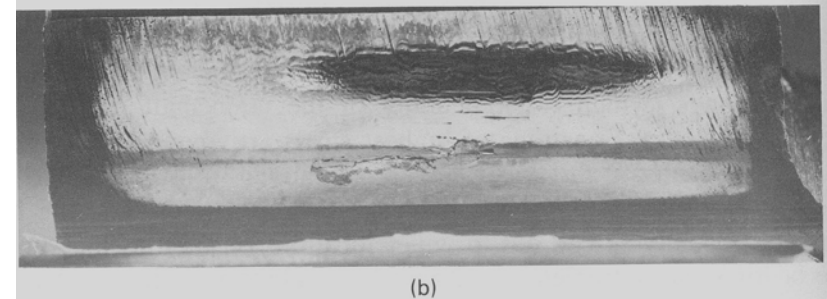


Rolamento/deslizamento em engrenagens

		Direção de deslizamento		
	Direção de rolamento	Reentrância (Dedendum)	Saliência (Addendum)	Em relação ao círculo primitivo
Engrenagem motriz	Para cima (direção do topo)	Para baixo (direção da raiz)	Para cima (direção do topo)	Para fora
Engrenagem solta	Para baixo (direção da raiz)	Para cima (direção do topo)	Para baixo (direção da raiz)	Em direção a



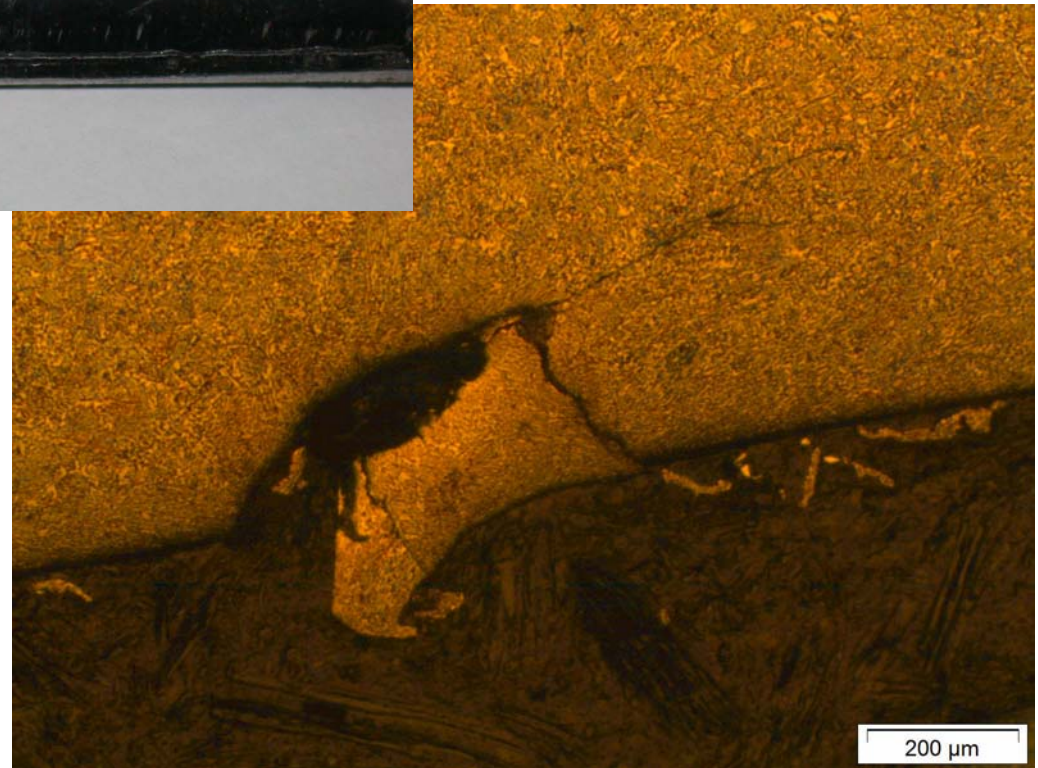
(a)



(b)

Pites em engrenagens

(pinhão de conjunto redutor)



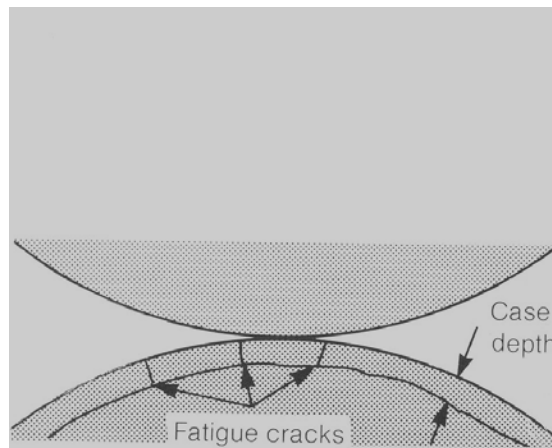
- O pinhão quebrou por fadiga nucleada na raiz de um de seus dentes.
- O pinhão foi fabricado em aço 8620, não tendo sido, entretanto, cementado.
- A dureza superficial é muito baixa para resistir às tensões de contato, tendo havido a formação de pites.



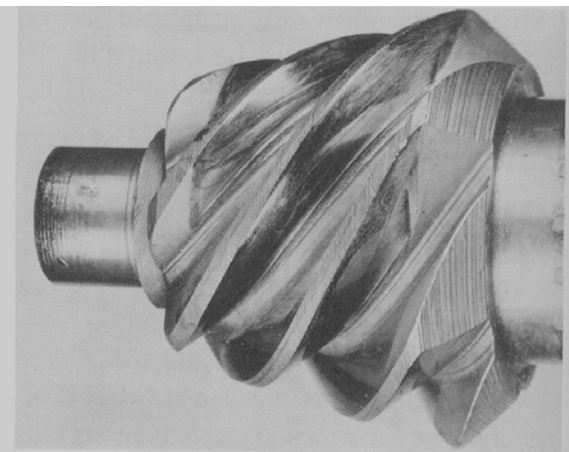
METMAT

Nucleação na região da sub-camada

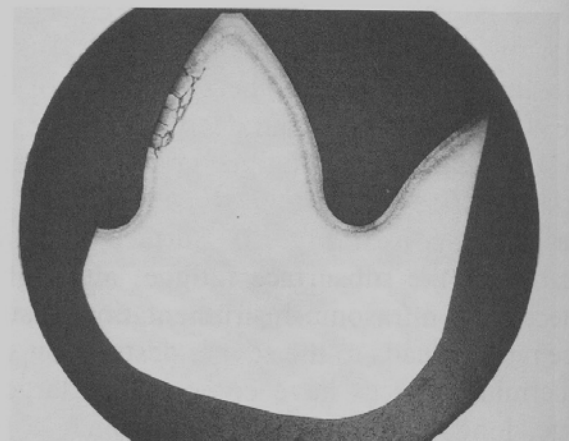
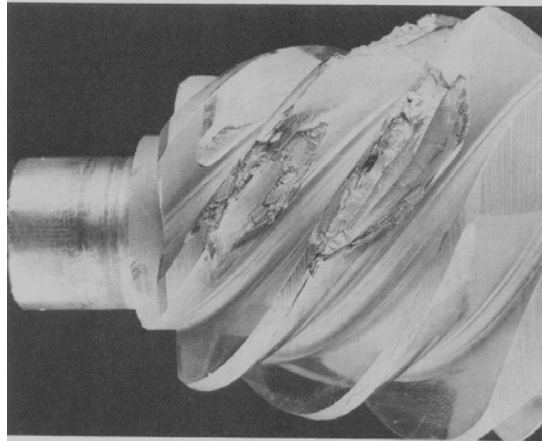
- Quando a fadiga é originada na região da sub-camada (cementada, temperada por indução, etc.) é às vezes chamada de spalling (lascamento).



(a)



(b)



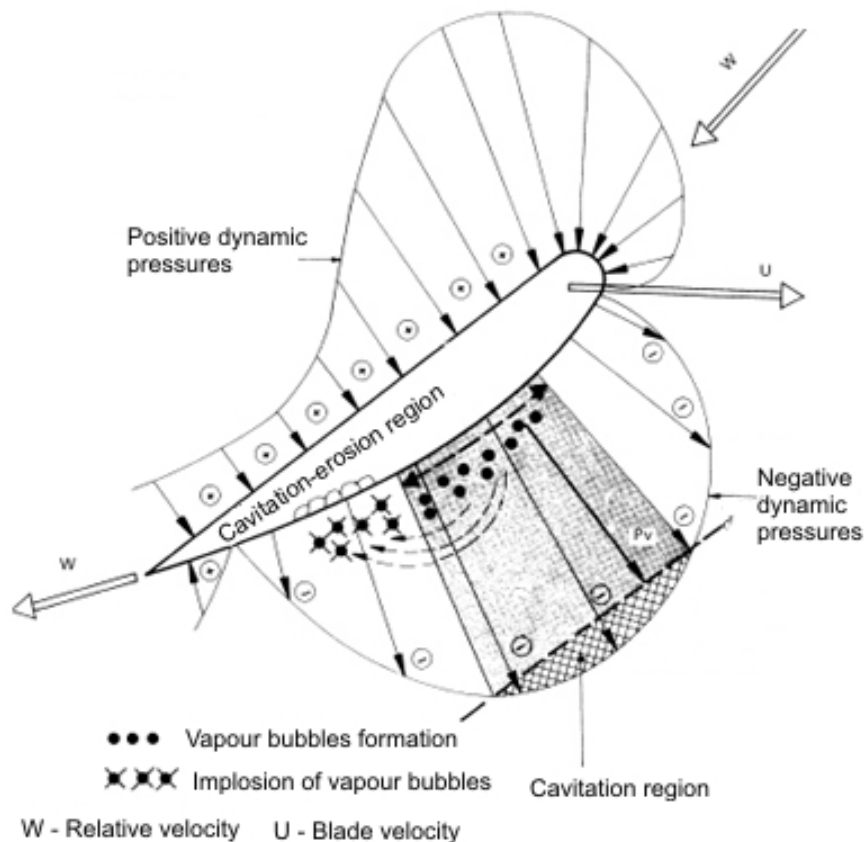


METMAT

Características da Fadiga de Contato

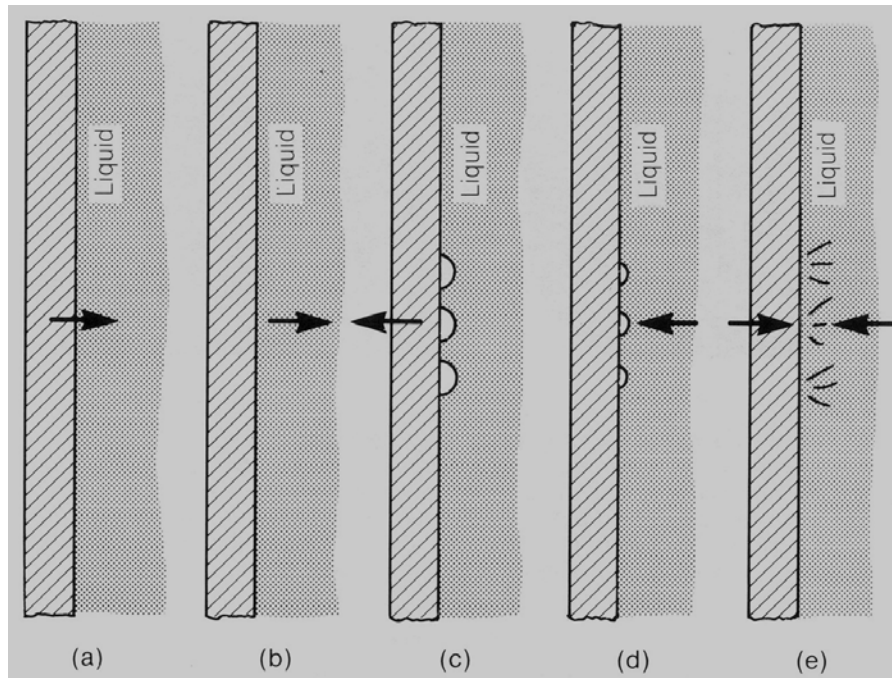
	Pite nucleado na superfície	Pite nucleado na sub-superfície	Pite nucleado na sub-camada
Origem	Superfície em micropites	A uma pequena distância da superfície, geralmente em inclusões não metálicas.	Próximo da região de transição entre a camada tratada e o núcleo
Tamanho inicial	Pequeno	Pequeno	Grande
Relação Área/Profundidade	Pequena	Pequena	Grande
Forma inicial	Ponta de flecha e depois irregular	Irregular	Gouge and ridged
Ângulo da trinca com relação à superfície	Agudo	Aproximadamente paralelo na base e perpendicular nas laterais	Aproximadamente paralelo na base e perpendicular nas laterais
Aparecimento	Gradual	Súbito	Súbito

Fadiga por cavitação



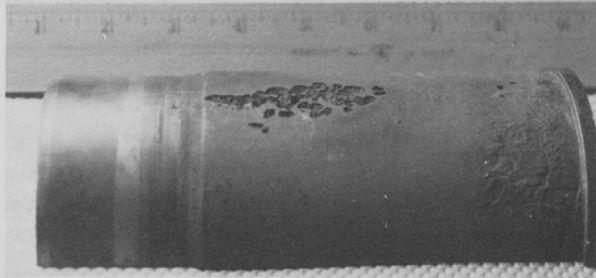
- Formação e implosão de bolhas de vapor.
- Devido às condições hidrodinâmicas ocorre queda e violenta aumento de pressão.
- A implosão das bolhas provoca pressões de milhares de MPa, nas paredes da peça.

Mecanismos de cavitação

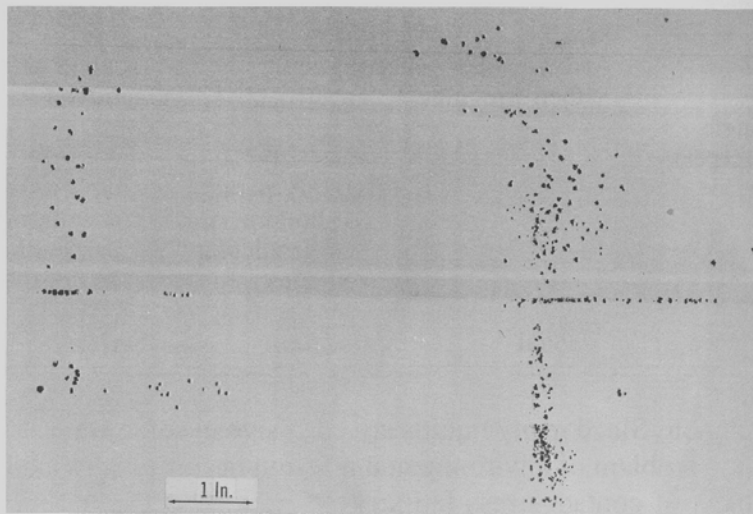


- Os pites de cavitação podem perfurar as paredes da peça.
- Parecem pites de fadiga. Ocorrem sempre nas regiões de baixa pressão na interface entre o metal e o líquido em vibração rápida.
- As bolhas colapsam e implodem em certas posições, correspondentes à regiões de baixas pressões, formando aglomerados e sua distribuição acompanha a corrente do líquido.

Fadiga por cavitação



(a)

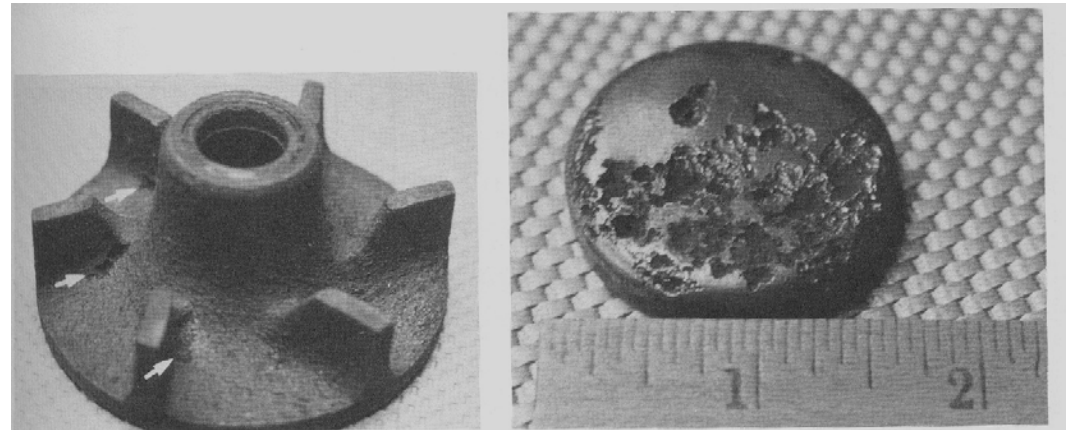


(b)

(a) Cavitation pitting on a gray cast iron diesel-engine cylinder sleeve. The pitted area is several inches long, and the pits nearly penetrated the thickness of the sleeve. Note the clustered appearance of the pits at preferred locations.

(b) Cavitation pitting on another gray cast iron diesel-engine cylinder sleeve unwrapped by a special photographic process. Again, note the clustered locations, with the most severe pitting on the thrust side of the sleeve, against which the piston slides on the power stroke of the combustion cycle. The lighter pitting at left is on the opposite, or anti-thrust, side of the sleeve.

Fig. 11. Cavitation pitting fatigue.



(c)

(d)

(c) Cavitation pitting at preferred locations on the vanes of a gray cast iron water-pump impeller. This impeller rotated in a clockwise direction; the arrows show some of the pits which were formed in the metal on the suction side of the vanes.

(d) Cavitation pitting which perforated this steel freeze plug from a gasoline engine, causing leakage of coolant which could have damaged the engine. Vibration of the wall of the engine block at this location caused this type of damage on the coolant side.

Fig. 11 (continued)



METMAT

Falhas em temperaturas elevadas

- O termo “temperatura elevada” tem que ser definido, para podermos avaliara as propriedades dos metais.
- Temperatura homóloga T_H é a razão entre a temperatura considerada e a temperatura de fusão do metal ou liga $T_H = T/T_F$ (K).
- Considera-se “temperatura elevada” quando T_H é maior que $0,5 T_F$.
- As “temperaturas elevadas” são bastante diferentes para os diferentes metais.



METMAT

Falhas em temperaturas elevadas

Table 1. Approximate Values for the Lower Limit of Elevated-Temperature Behavior for Several Metal and Alloy Systems (Ref 1)

Metal	Degrees	
	Fahrenheit	Celsius
Aluminum alloys	400	205
Titanium alloys	600	315
Carbon and low-alloy steels	700	370
Austenitic, iron-base high- temperature alloys	1000	540
Nickel-base and cobalt-base high-temperature alloys	1200	650
Refractory metals and alloys	1800–2800	980–1540

be required when stress, time, temperature, and environment have acted to change the metallurgical microstructure of the component.



Fluência

- Fluência é definida como a deformação dependente do tempo, ou mudança gradual de forma de um aparte metálica, sob a ação de uma tensão ou carga constantes.
- Pode ocorrer sob diversos estados de tensão, embora sob certas condições pode não ocorrer a fratura.
- As análises sobre o comportamento dos metais em fluência são geralmente feitas supondo a ação d tensões de tração.

Fluência

- A deformação por fluência pode ser descrita ocorrendo em três estágios:
1. Estágio I onde ocorrem deformações crescentes com velocidade de deformação decrescente.
 2. Estágio II onde há equilíbrio entre mecanismos de encruamento e de recuperação. A velocidade de deformação é praticamente constante.
 3. Estágio III. Aumento gradual de deformação com aumento da velocidade de deformação até levar à fratura. Mecanismo de escorregamento em contornos de grão

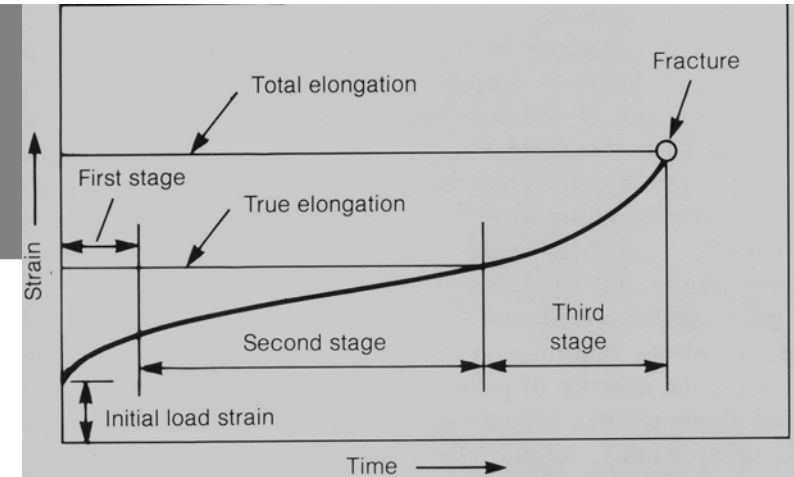


Fig. 1. Schematic tension-creep curve, showing the three stages of creep. (Ref 1)

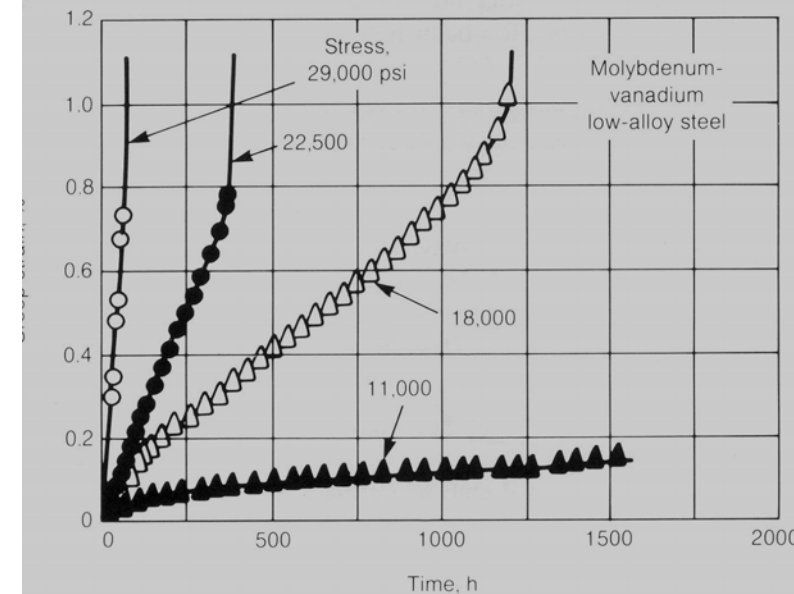


Fig. 2. Creep curves for a molybdenum-vanadium low-alloy steel under tension at four stress levels at 600 °C (1112 °F). (Ref 1)

- Dependendo das condições os metais podem não apresentar os três estágios.

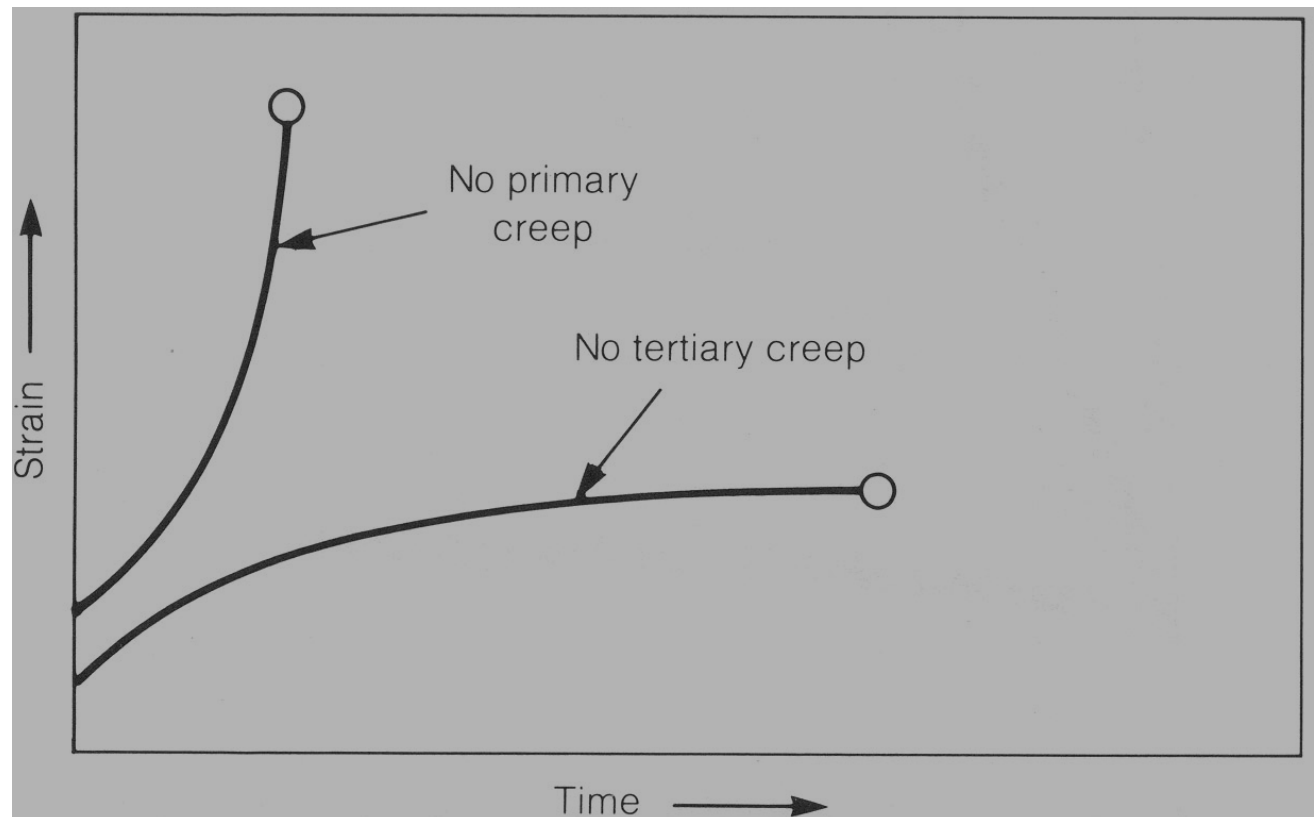


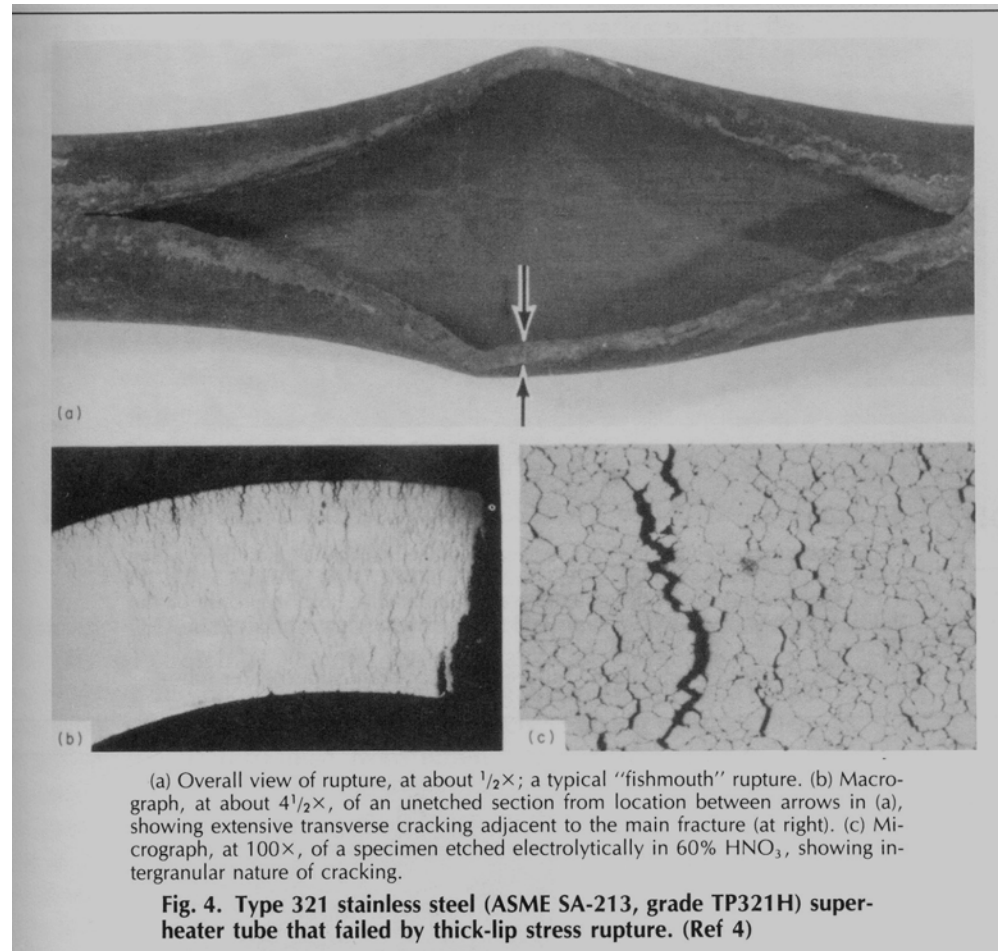
Fig. 3. Creep curves showing no primary creep and no tertiary creep.
(Ref 1)



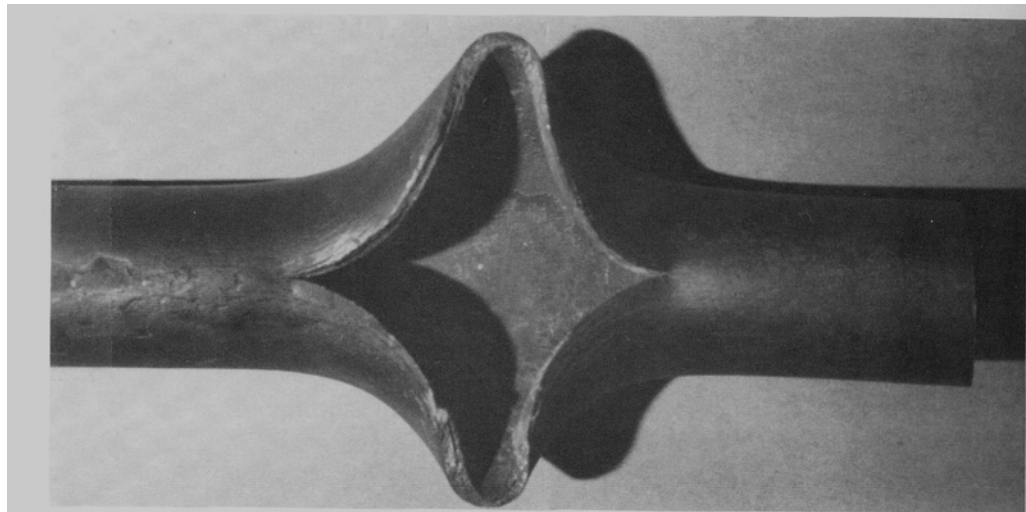
Fraturas por fluência

- A fratura por fluência é de fácil identificação.
- Sempre ocorre deformação plástica macroscópica.
- A fratura por fluência, entretanto, pode ser do tipo dútil ou frágil.
- A fratura frágil é intergranular e ocorre com pouco ou nenhum empescoçamento.
- A fratura dútil é transgranular e acompanhada por deformação macroscópica e empescoçamento.
- A ocorrência de fratura transgranular frágil ou intergranular depende da taxa de deformação e da temperatura.
- Baixas taxas de deformação, altas temperaturas e tempos de fratura longos, favorecem a fratura intergranular. Mecanismo de escorregamento em contornos de grão.

Fratura de lábios grossos



Fratura de lábios grossos



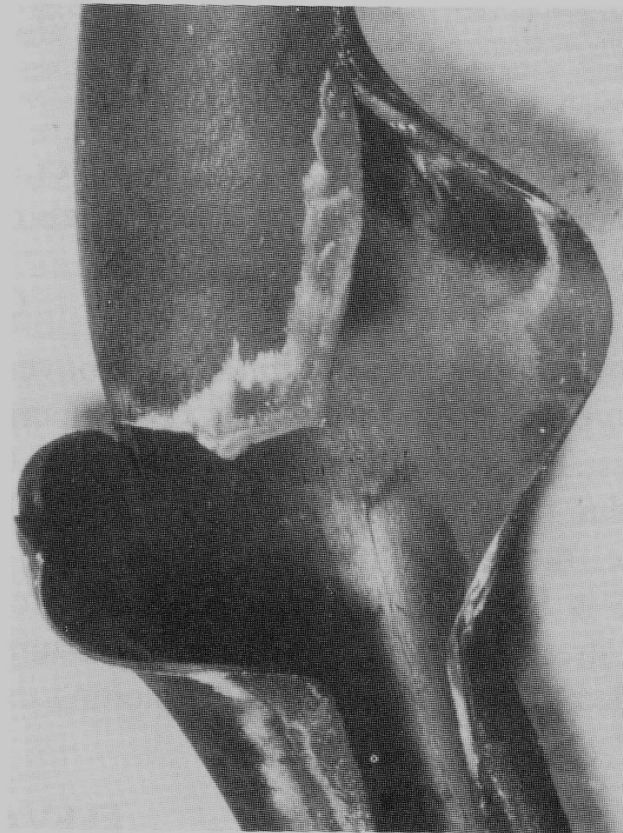
The tube bent away from the fracture because of the reaction force of the escaping steam. The material was ASME SA-213 T22 (0.15 max C, 1.90 to 2.60 Cr, 0.87 to 1.13 Mo). Hardness was HRB 96–98. Scale about 0.012 in. thick is present on the inside, tending to prevent heat transfer and causing overheating to about 1525–1575 °F.

Fig. 5. Thick-lip “fishmouth” failure of a 2-in.-diam superheater tube.



METMAT

Fratura de lábios finos



This rupture exhibits a "cobra" appearance as a result of lateral bending under the reaction force imposed by escaping steam. The tube was a 2½-in.-OD, 0.250-in.-wall boiler tube made of 1.25Cr-0.5Mo steel (ASME SA-213).

**Fig. 6. Thin-lip rupture in a boiler tube, caused by rapid overheating.
(Ref 4)**

Fadiga térmica



Advanced burning originated from the large crack. Additional thermal fatigue cracks are also present on the valve face. Engine efficiency rapidly deteriorates from increasing loss of compression when very hot exhaust gases blast through the open passage (also called "blow-by").

Fig. 7. Thermal fatigue crack in the hard facing alloy on an exhaust valve from a heavy-duty gasoline engine. Macrograph at about $2^{1/2}\times$.

- O aquecimento e resfriamento alternados produzem expansão e contração repetitivos.
- No resfriamento, se a contração for restringida o metal fica com tensões residuais de tração, podendo levar à formação de trincas de fadiga térmica.
- As trincas de fadiga costumam formar redes de trincas.
- Tubulações podem ser projetadas em formas curvas para evitar as tensões desenvolvidas durante expansão e contração.



METMAT

Corrosão erosão em alta temperatura

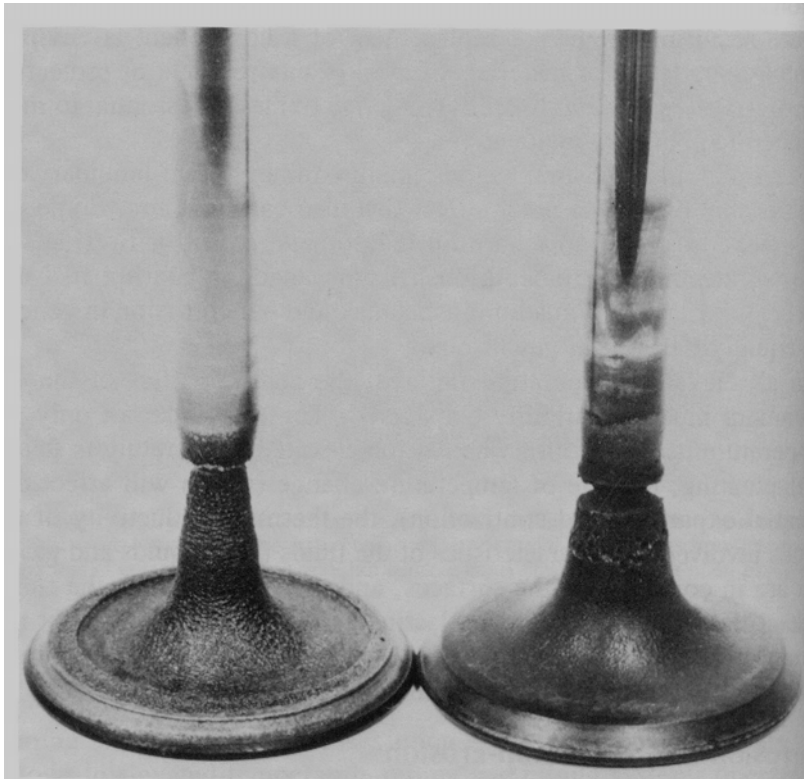
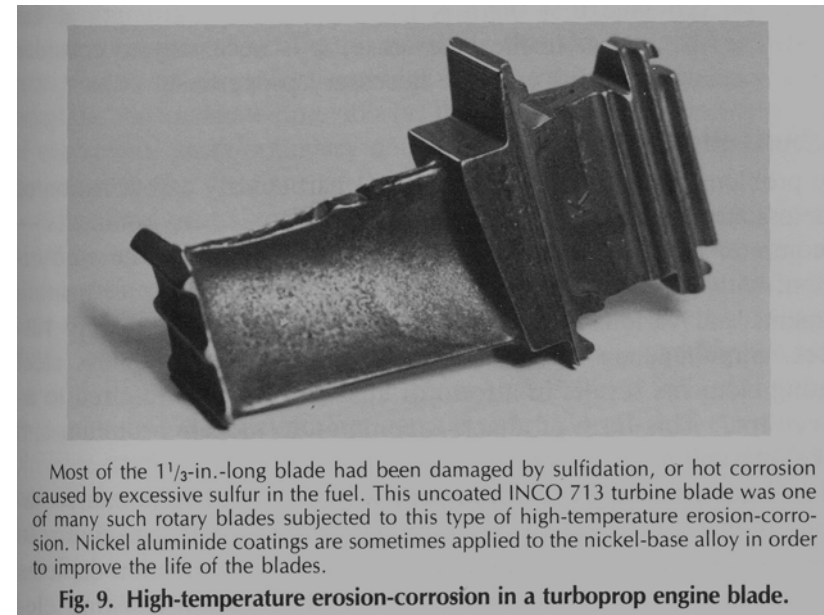


Fig. 8. Severe localized erosion-corrosion of two gasoline-fueled engine exhaust valves made from a nickel-base superalloy operating between 1400 and 1500 °F. The exhaust gas damage in the underhead radius and stem was identified as lead oxide corrosion, aggravated by bromine from the gasoline.

Erosão-corrosão por óxido de chumbo



Most of the 1 $\frac{1}{3}$ -in.-long blade had been damaged by sulfidation, or hot corrosion caused by excessive sulfur in the fuel. This uncoated INCO 713 turbine blade was one of many such rotary blades subjected to this type of high-temperature erosion-corrosion. Nickel aluminide coatings are sometimes applied to the nickel-base alloy in order to improve the life of the blades.

Fig. 9. High-temperature erosion-corrosion in a turboprop engine blade.

Erosão-corrosão por sulfetação

Queima



Fig. 11(a). Incipient burning on the valve face of an automotive engine exhaust valve caused by microporosity in the hard facing alloy. Macrograph at about $2\frac{1}{2}\times$.



The very hot exhaust gases (or "blow-by") rushing through the cavity removed the underhead deposits adjacent to the burned area, as shown by the arrows. Continued operation of the valve in Fig. 11(a) would ultimately lead to this type of damage.

Fig. 11(b). Severe, destructive burning (or "guttering") in an automotive-engine exhaust valve. Macrograph at about $2\times$.

- O superaquecimento de peças e componentes pode literalmente levar à sua queima.
- Perda de funcionalidade e de propriedades por alteração drástica da estrutura e degradação assistida por interação com atmosferas oxidantes.