



# Fratura por fadiga

## Análise de falhas II

André Paulo Tschiptschin

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Escola Politécnica da USP



## Fratura por fadiga

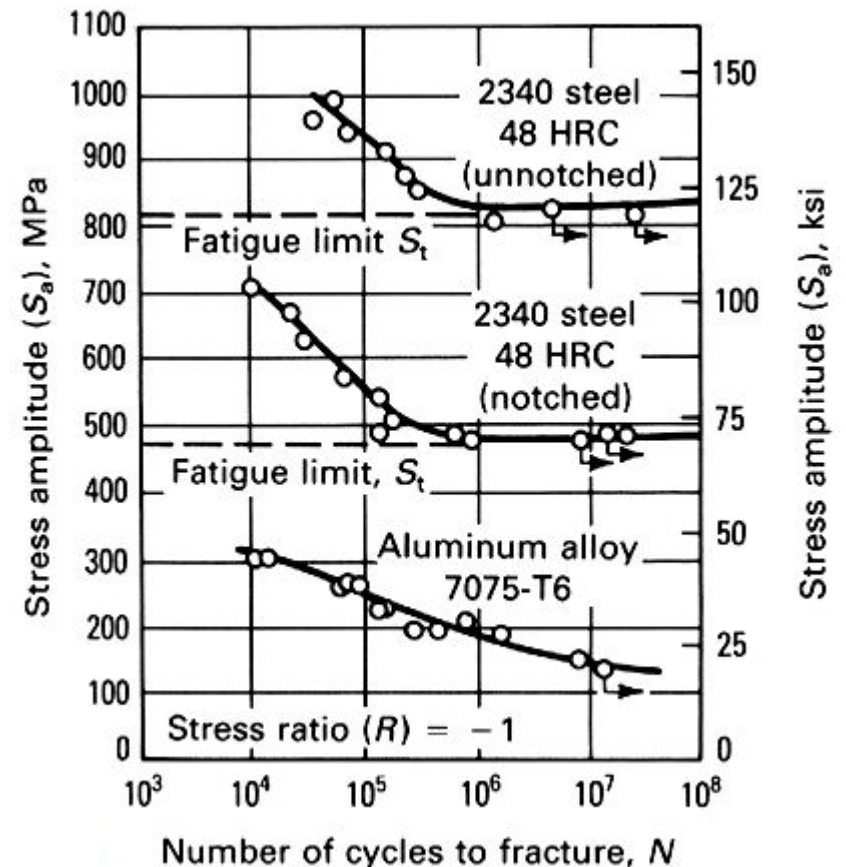
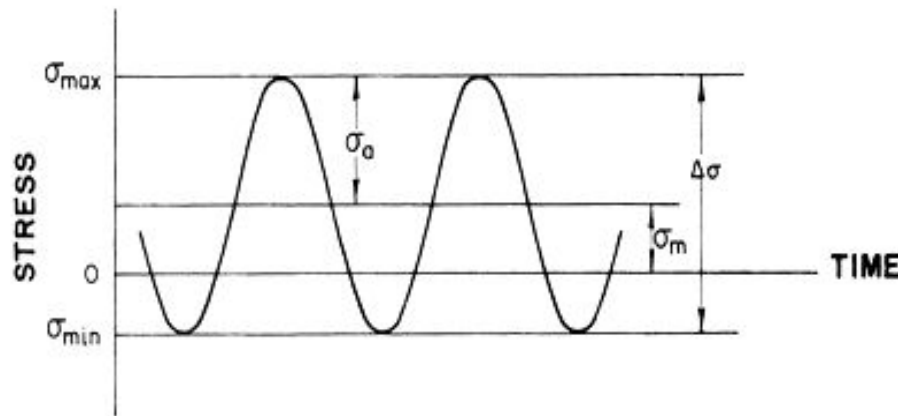
- A fratura por fadiga é considerada a mais séria das formas de fratura pois ocorre sob cargas aplicadas baixas, em condições normais de operação.
- A fratura ocorre inesperadamente sem avisar que algo errado possa estar acontecendo.
- Pode-se definir fadiga como o fenômeno que leva à fratura sob tensões flutuantes alternadas, menores que o limite de resistência do material.
- A fratura por fadiga ocorre de maneira progressiva, iniciando com a formação de pequenas trincas, que crescem sob ação de tensões flutuantes.



METMAT

# Tensões alternadas e vida em fadiga

- Através de ensaios de fadiga pode-se determinar o número de ciclos  $N$ , a que uma peça ou um material pode ser submetido, sob tensão alternada, sem fraturar.
- Os parâmetros  $\sigma_m$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ ,  $\Delta\sigma$  e  $\sigma_a$  são definidos no gráfico.

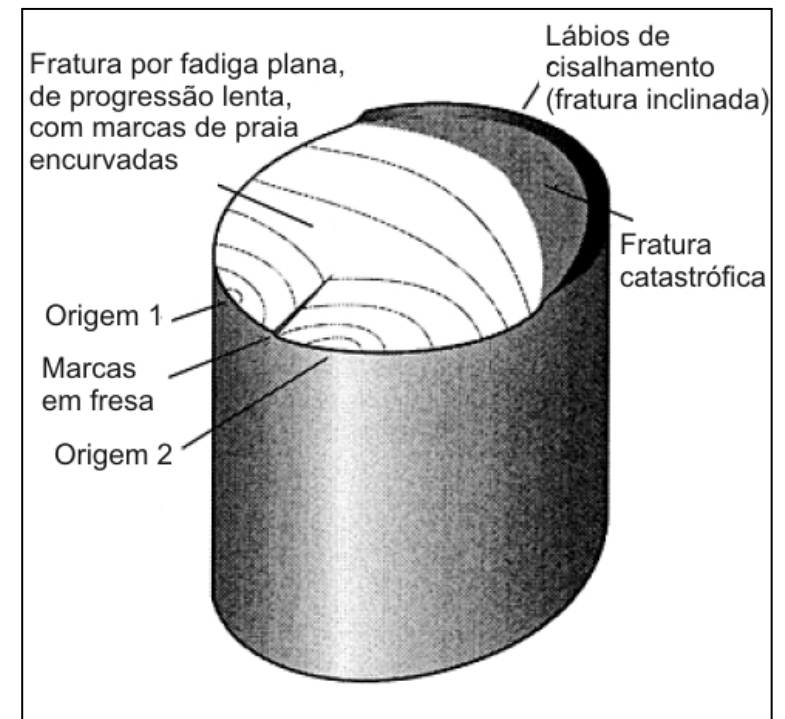




METMAT

## Aspecto macroscópico da fratura por fadiga

- Possui um ou mais pontos de origem.
- Propaga-se em um plano normal às tensões de tração, de forma lenta e progressiva.
- Degraus (marcas em fresa) separam as diferentes frentes de propagação da fratura.
- Marcas de praia concêntricas podem se formar.
- A fratura final se propaga catastróficamente por sobrecarga.
- Ao final formam-se lábios de cisalhamento, deixando uma superfície de fratura inclinada.

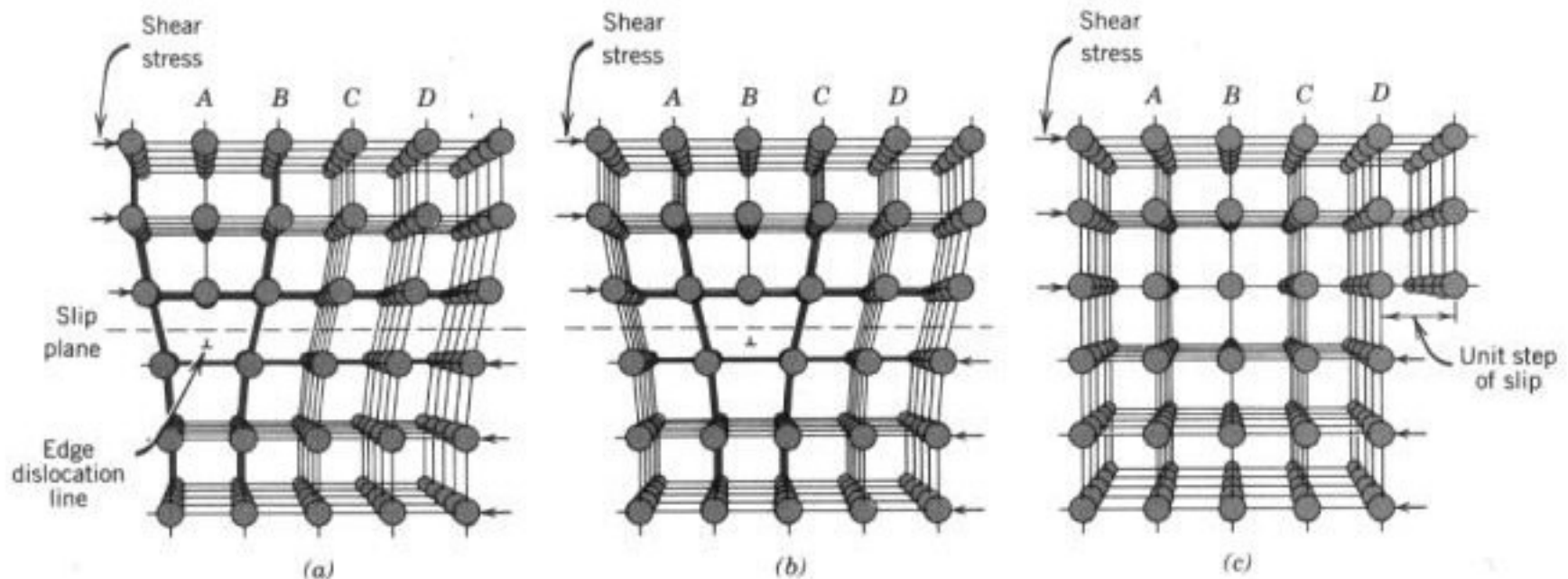




METMAT

## Três estágios da fratura por fadiga

- Estágio I – Iniciação. É o estágio mais complexo e mais pesquisado. Caso se consiga prevenir a nucleação de pequenas trincas, a fratura por fadiga simplesmente não ocorre.

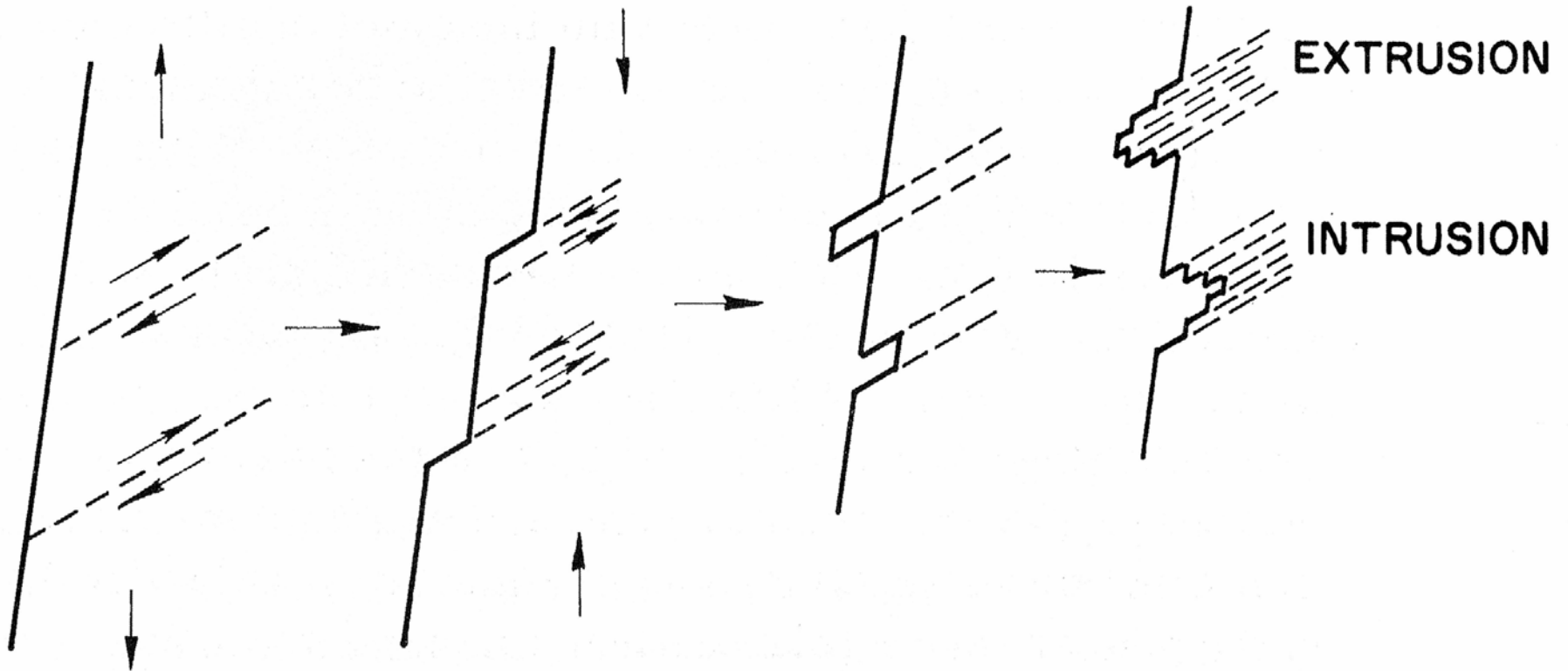


*Deformação plástica produzida pela movimentação de uma discordância em cunha*



METMAT

## Estágio I – Intrusões e extrusões

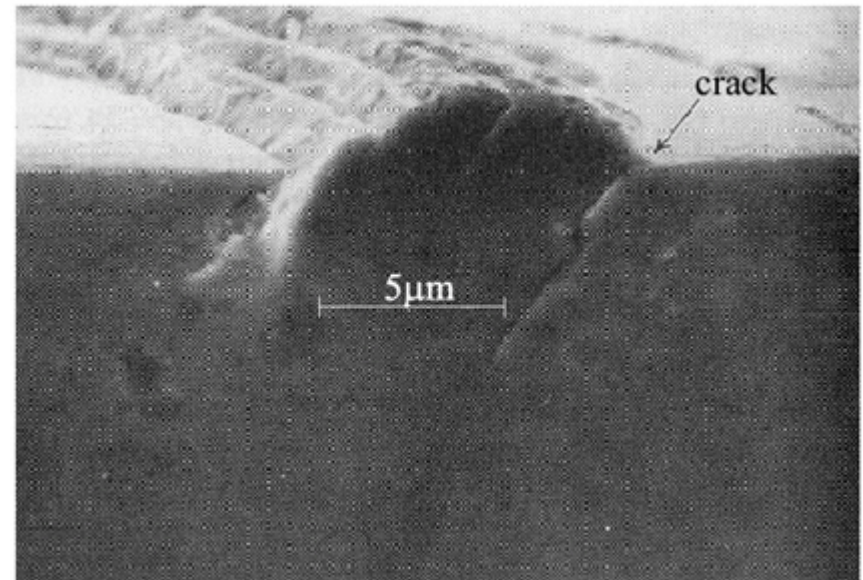
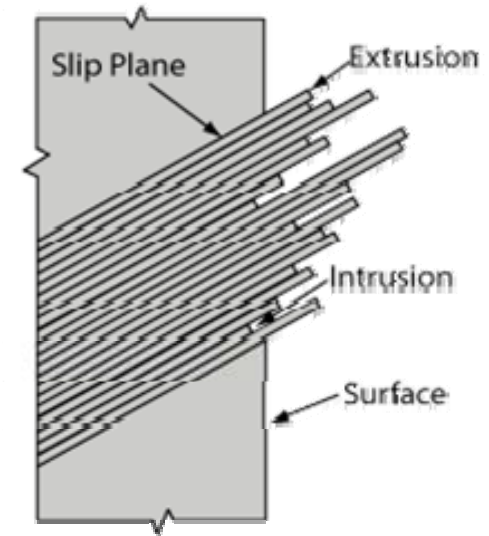




METMAT

## Estágio I - Intrusões e Extrusões

- Sob tensões de cisalhamento alternadas as discordâncias se movimentam (baralho de cartas) no interior do material e formam degraus na superfície, chamados degraus de escorregamento.
- Os danos causados neste primeiro estágio ocorrem numa extensão de aproximadamente 5 grãos.
- Os degraus de escorregamento dão origem à formação de intrusões e extrusões.
- A trinca se propaga paralelamente à direção de máxima tensão de cisalhamento.

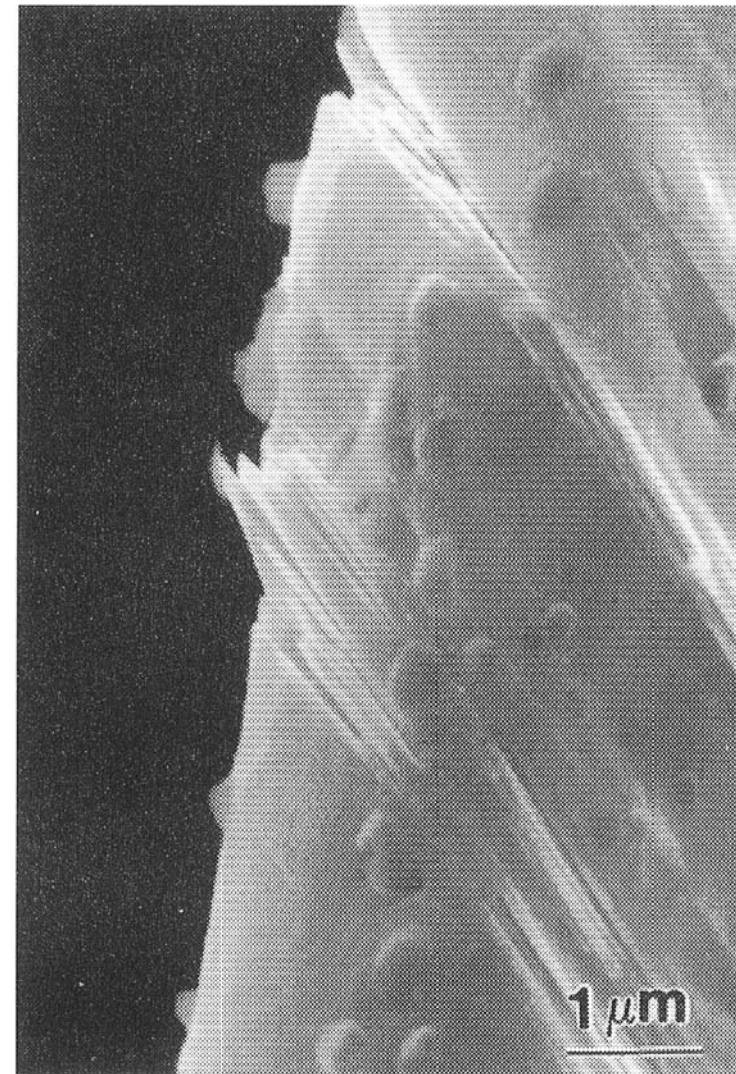
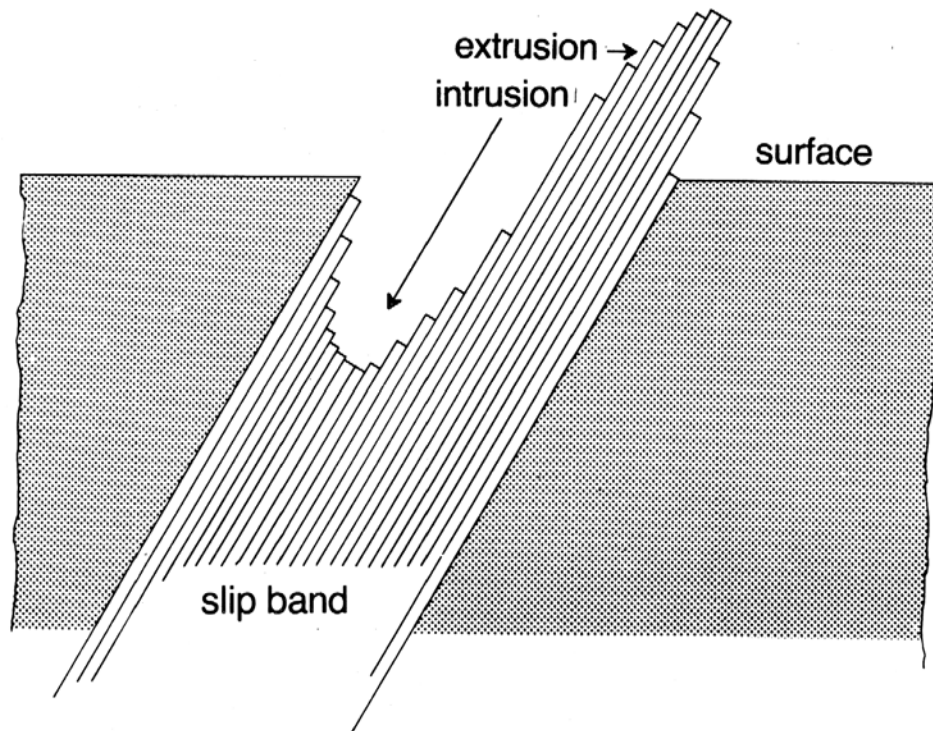


(Suresh 1991)



METMAT

## Estágio I - Intrusões e Extrusões



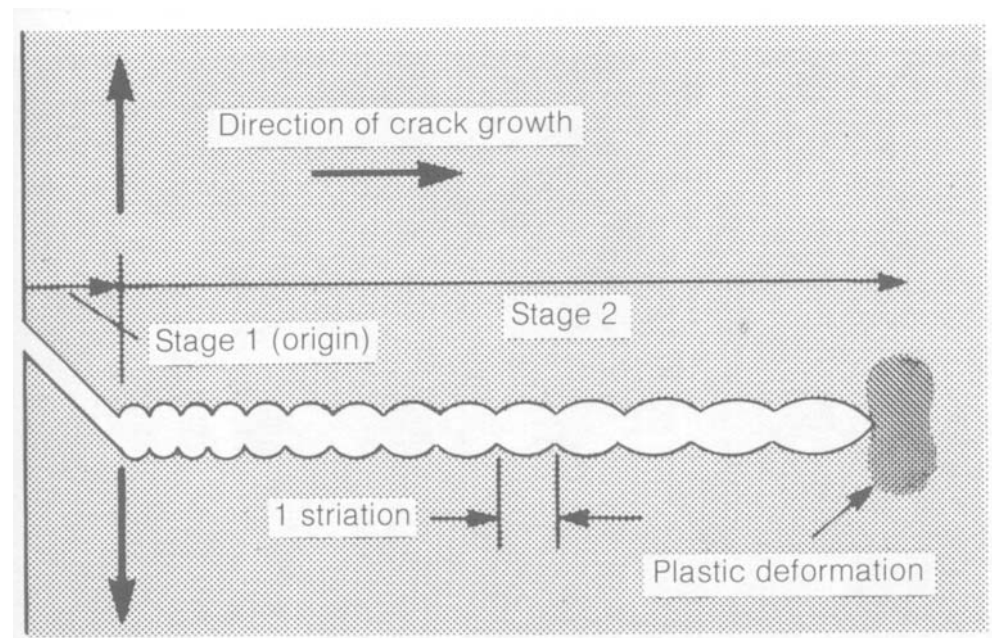




METMAT

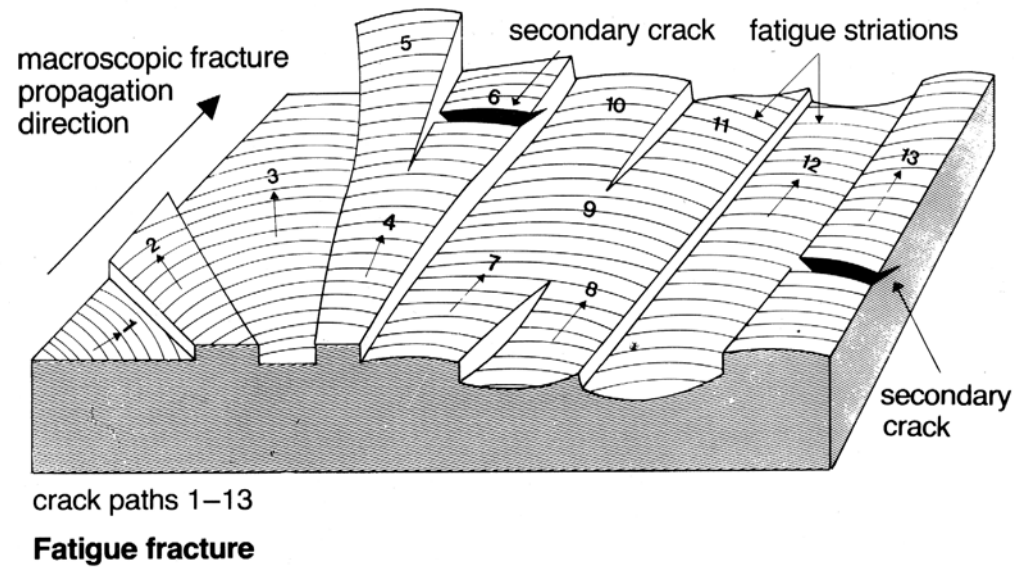
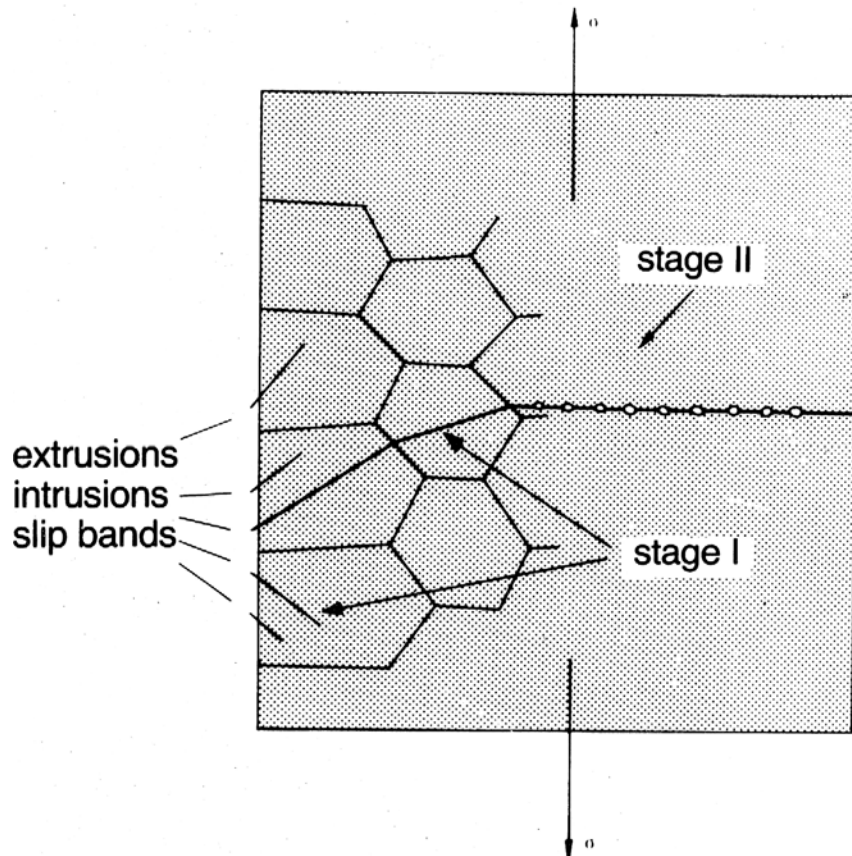
## Estágio II - Propagação

- O Estágio II corresponde à propagação da trinca, que passa a crescer em plano normal à direção de máxima tensão de tração, caracterizando uma trinca frágil.
- A cada ciclo de aplicação de tensões de tração a trinca anda formando uma estria.
- A cada ciclo, o espaçamento entre estrias aumenta, para tensão aplicada constante.
- Na ponta da trinca há elevada concentração de tensões e ocorre intensa deformação plástica.

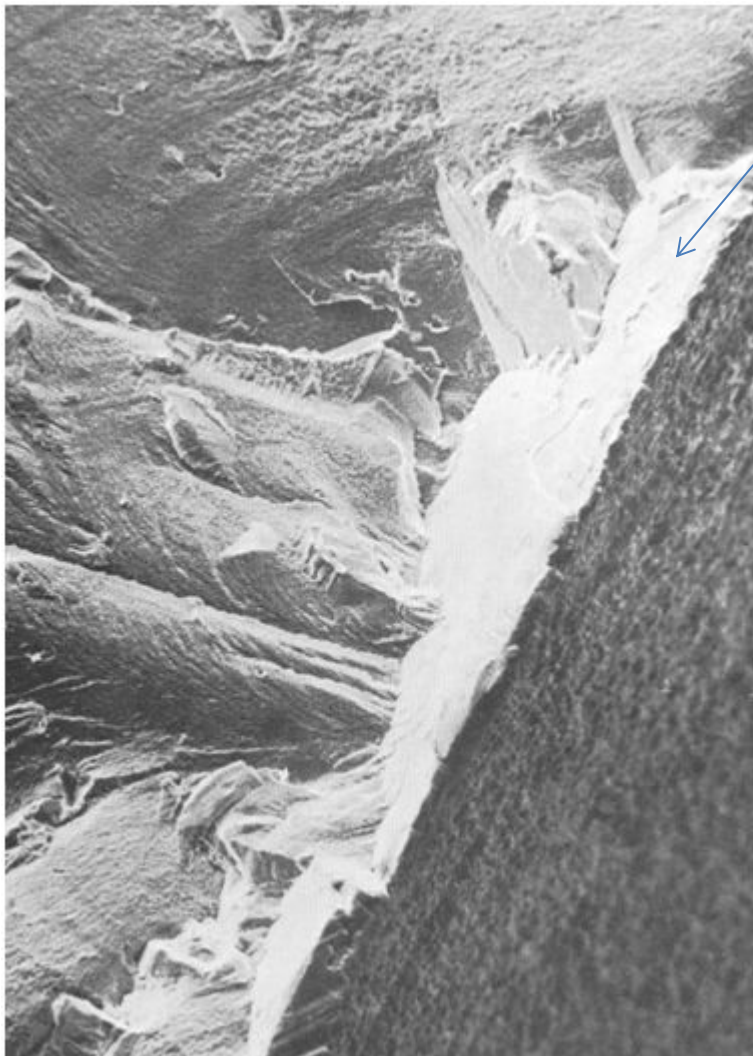


Estrias se formam em escala microscópica e somente são vistas ao Microscópio Eletrônico de Varredura.

# Estágio II - Propagação

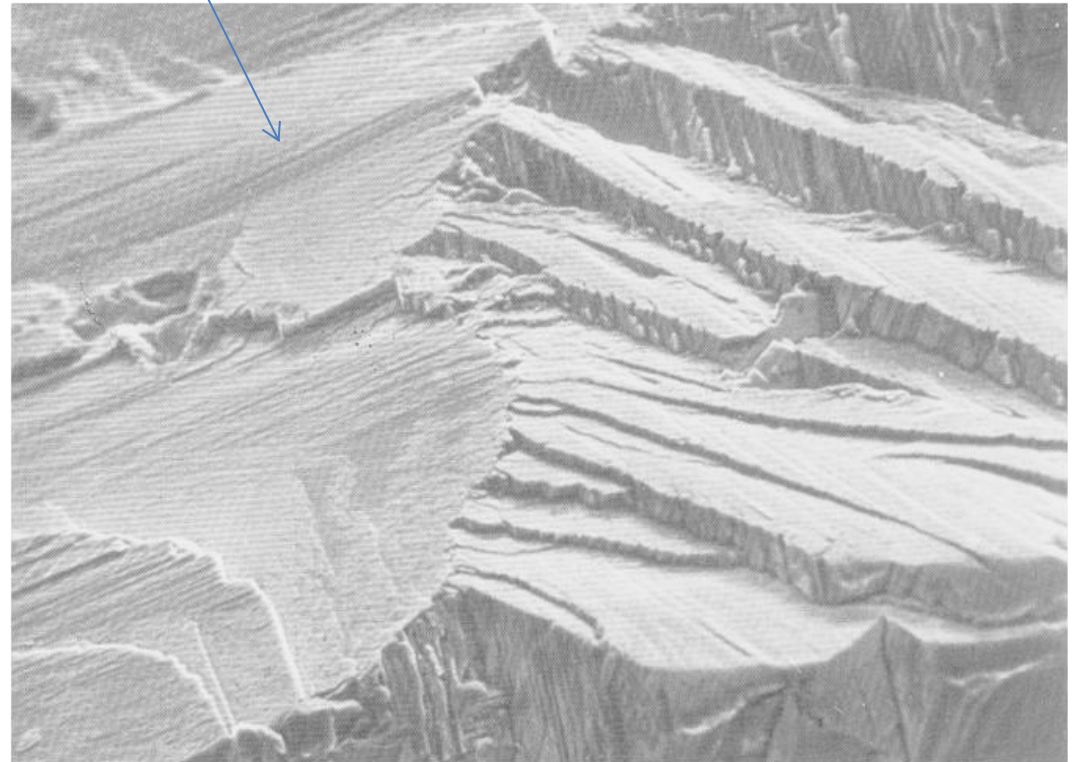


## Transição entre estágio I e estágio II



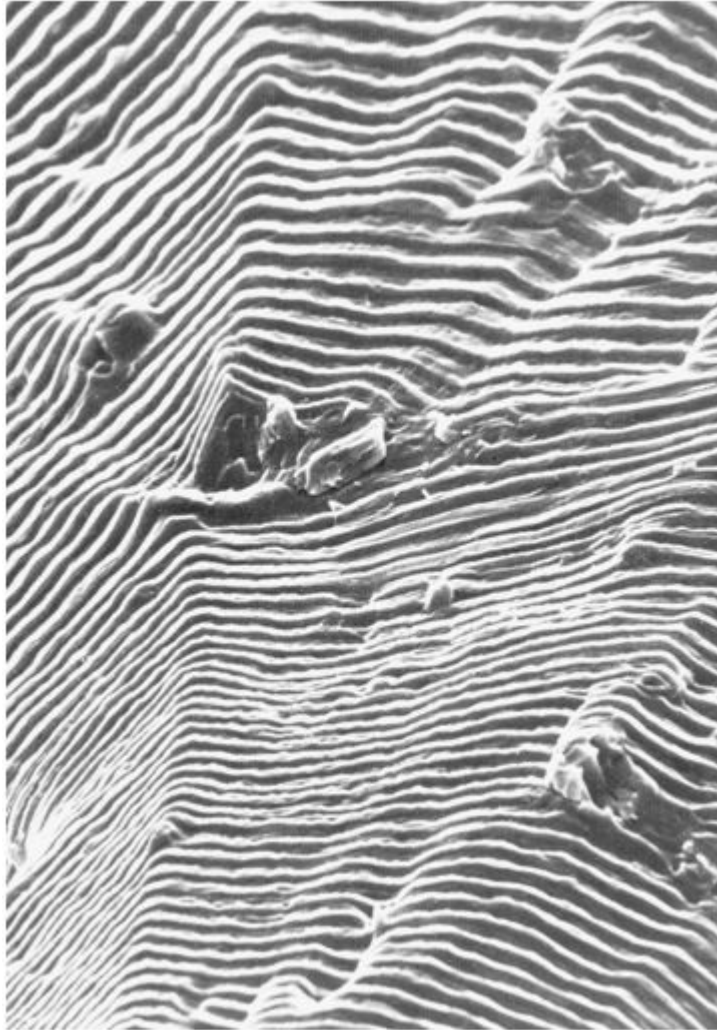
Palheta de turbina em liga de níquel

Estágio I

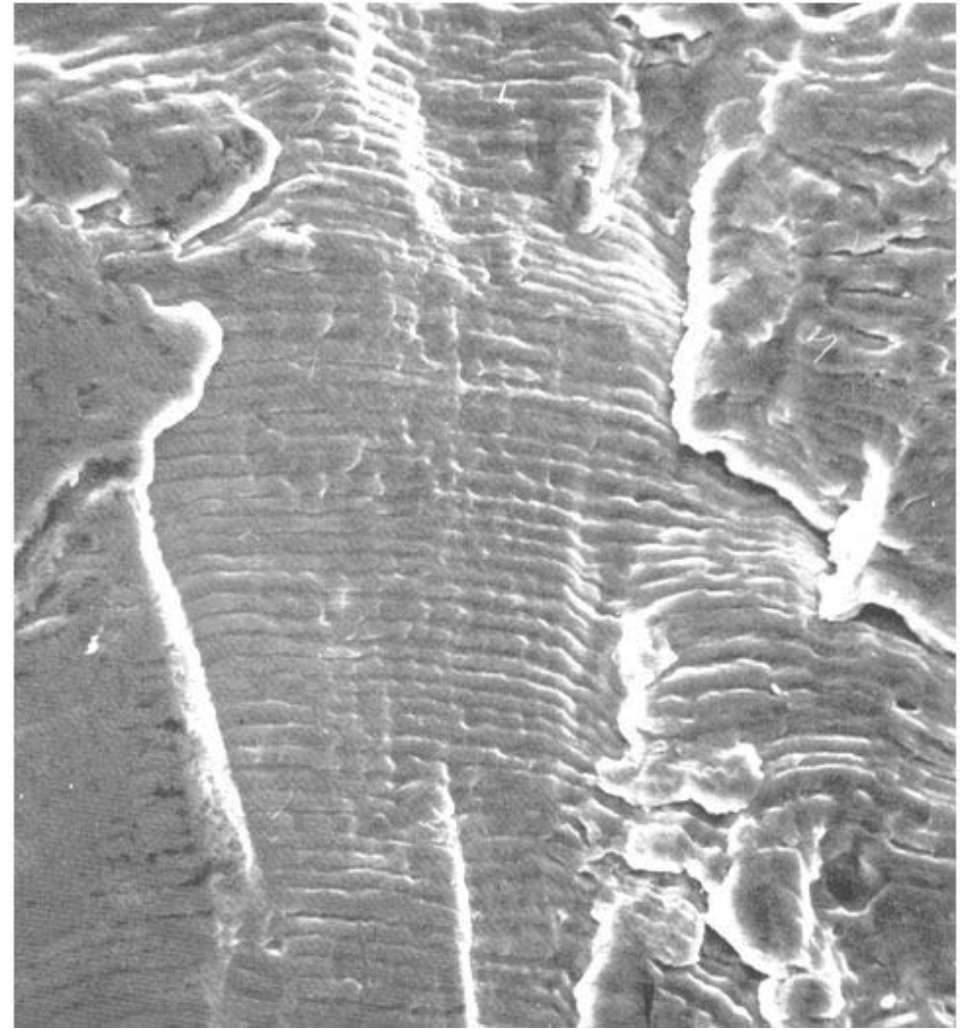


Nimocast 713 V

## Formação de estrias

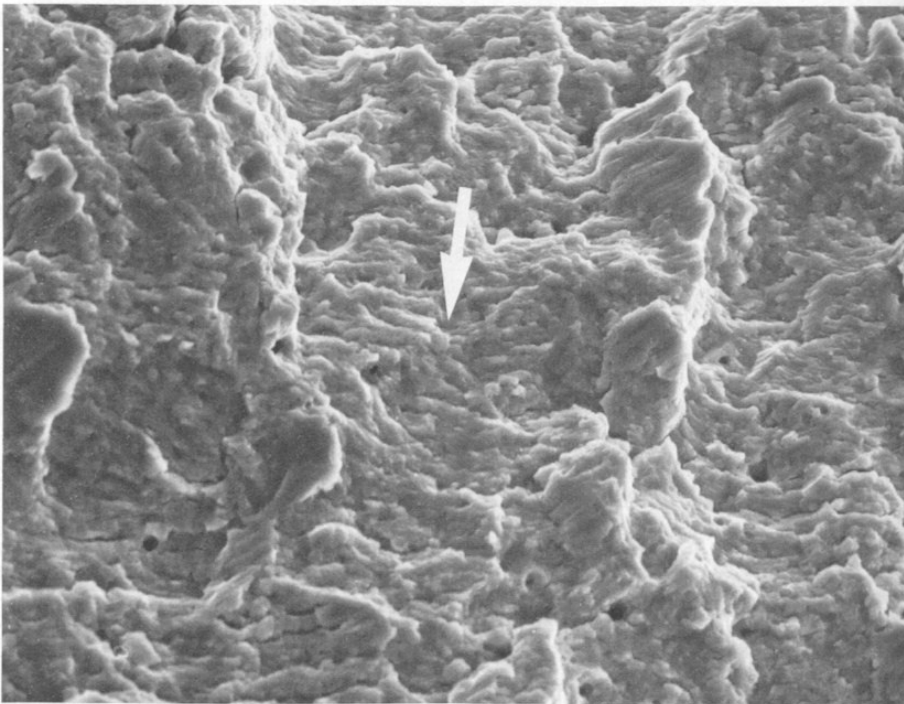


Nimonic 80



Aço inoxidável AISI 304

## Formação de estrias



This scanning electron microscope fractograph shows the roughly horizontal ridges which are the advance of the crack front with each load application. The crack progressed in the direction of the arrow. 2000 $\times$ ; shown here at 90%.

**Fig. 3(a). Fatigue striations in low-carbon alloy steel (8620).**



In this test, the specimen was loaded 10 cycles at a high stress, then 10 at a lower stress, and alternated with these stresses as the fatigue crack continued to propagate. This produced 10 large striations, then 10 small striations, alternately, across the fracture surface. 4900 $\times$ . (Ref 5)

**Fig. 3(b). Fatigue striations showing the result of spectrum loading in a laboratory test of aluminum alloy 7075-T6.**

## Estágio III – Fratura final

- Como a seção resistente da peça vai diminuindo, resultado da propagação da fratura no estágio II, num determinado momento atinge-se a tensão crítica para ruptura da peça – Estágio III.
- A fratura em estágio III, ao contrário da propagação de trinca em estágio II, é catastrófica e pode ocorrer por micromecanismo frágil (clivagem) ou dútil (formação de alvéolos).
- A localização da área final de fratura traz informações importantes sobre a relação entre a tensão aplicada e a resistência do material.



METMAT

## Estágio III – Fratura final

- A tensão crítica para ocorrência de ruptura catastrófica é dada por:

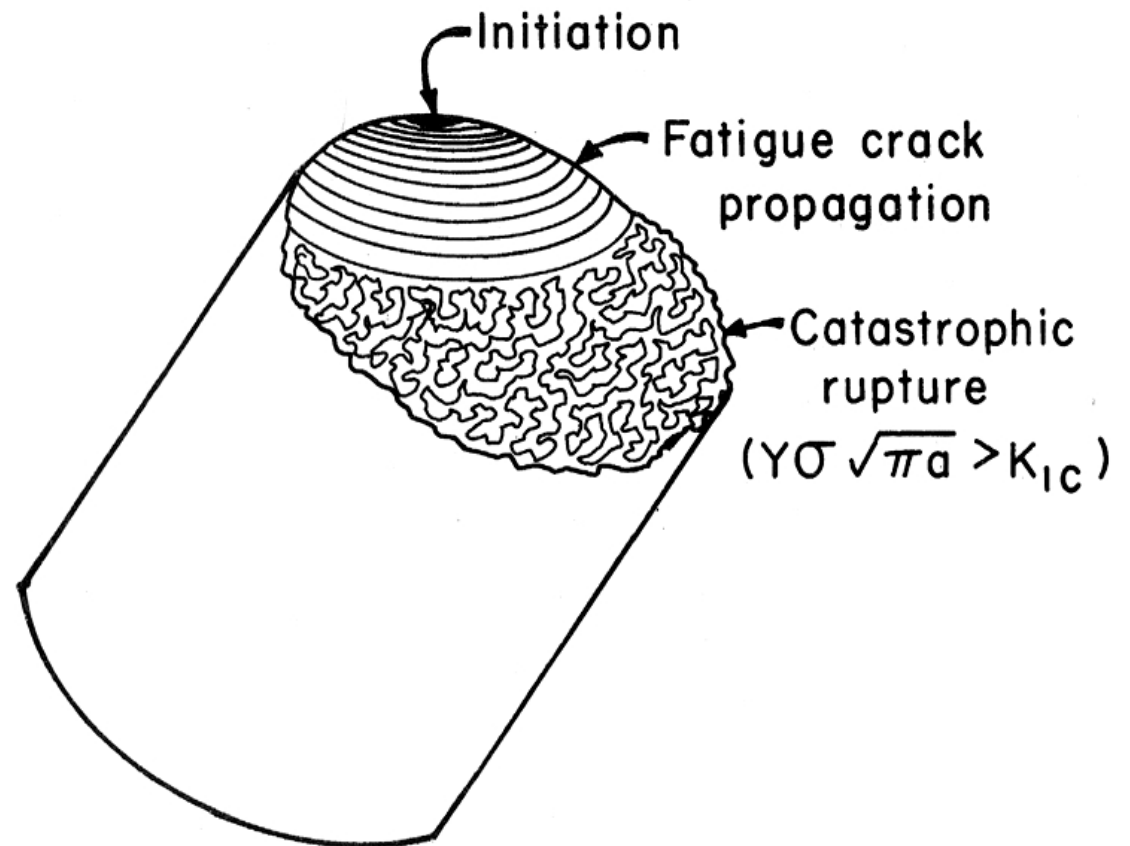
$$\sigma \sqrt{\pi a} > K_{IC}$$

Sendo:

$\sigma$  a tensão aplicada

$a$  o comprimento da trinca

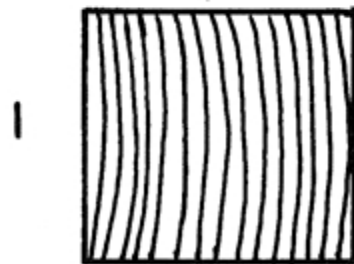
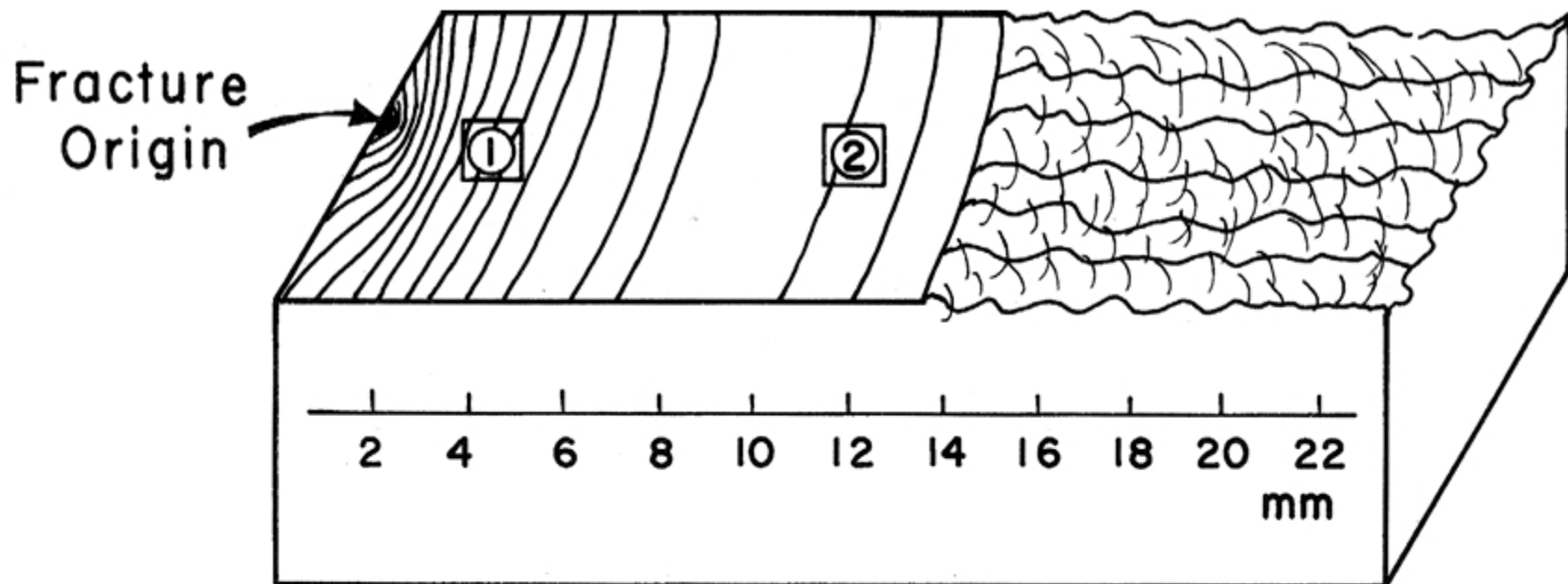
$K_{IC}$  a tenacidade à fratura



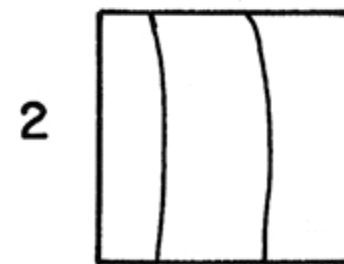


METMAT

## Espaçamento de estrias



0.1 mm



0.1 mm



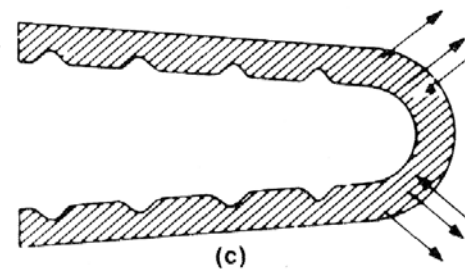
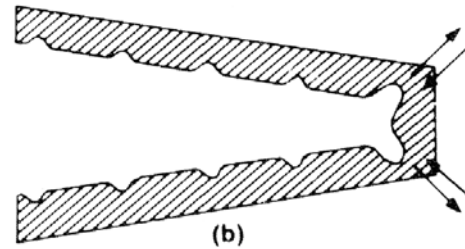
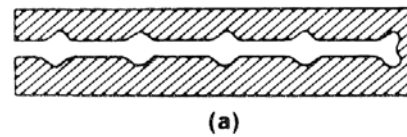


## Características microscópicas da fratura por fadiga

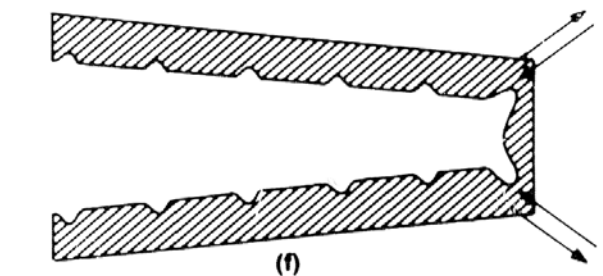
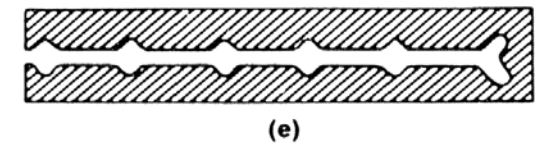
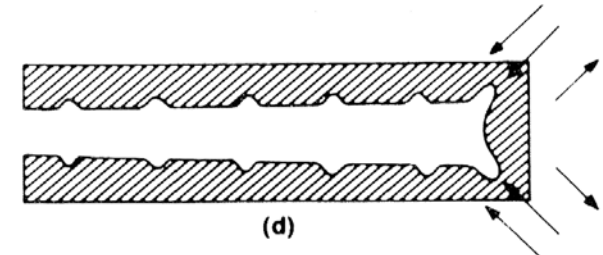
- As estrias constituem a característica microscópica típica da fratura por fadiga, embora muitas vezes não se possa detectá-las.
- A ponta da trinca é extremamente aguda e concentra tensões à sua frente.
- A cada passo à frente da trinca sob a ação de uma tensão crítica, a trinca anda e deforma plasticamente a matriz metálica, promovendo o arredondamento da ponta da trinca.

## Estágio II – Mecanismo de formação de estrias em material dútil

- Abertura da trinca de fadiga sob a aplicação de tensões alternadas.
- O arredondamento da ponta da trinca ocorre sob ação das tensões de cisalhamento a  $45^\circ$ .
- A cada ciclo uma nova estria é formada.



(a) unstressed  
 (b) small tensile stress  
 (c) maximum tensile stress



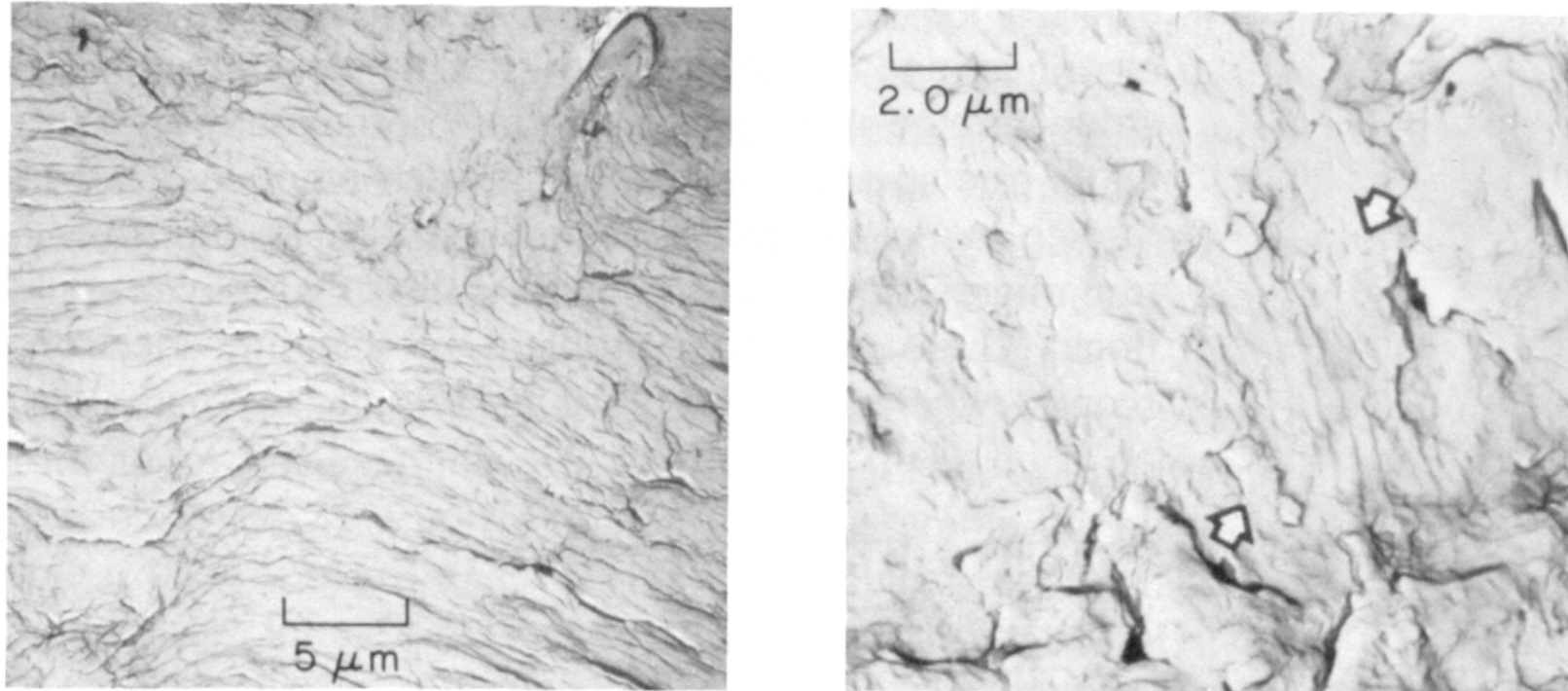
(d) small compressive stress  
 (e) maximum compressive stress  
 (f) small tensile stress



## Estrias em materiais muito duros ou muito moles

- As estrias são de difícil visualização em metais e ligas muito duros ou muito moles.
- Em aços com dureza maior que 50 HRC as estrias ou não se desenvolvem ou não são muito visíveis, devido à falta de ductilidade. À medida em que a dureza aumenta, as estrias se tornam cada vez mais difíceis de serem visualizadas.
- Em metais muito moles como o alumínio comercial é difícil ver estrias de fadiga.

## Estrias em materiais muito duros ou muito moles



**Fig. 4. (Left) Fatigue striations in a fracture surface of soft aluminum alloy 1100. 2000 $\times$ . (Right) Poorly formed striations (between arrows) on a fatigue-fracture surface of D-6ac steel with a tensile strength of 1795 to 1930 MPa (260 to 280 ksi). 4900 $\times$ . (Both from Ref 5)**

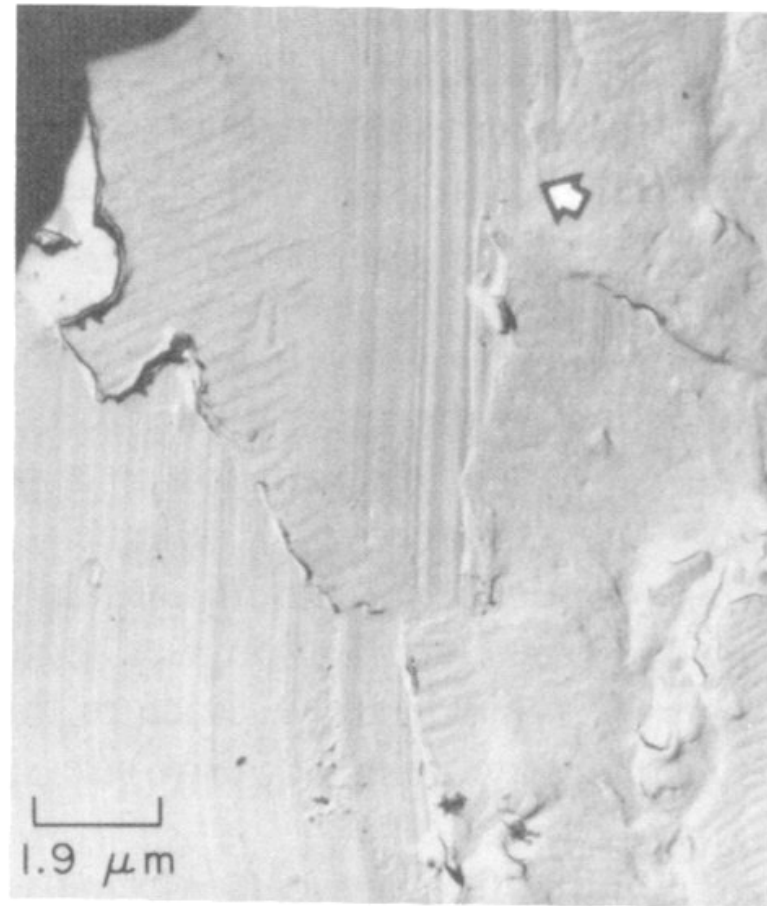


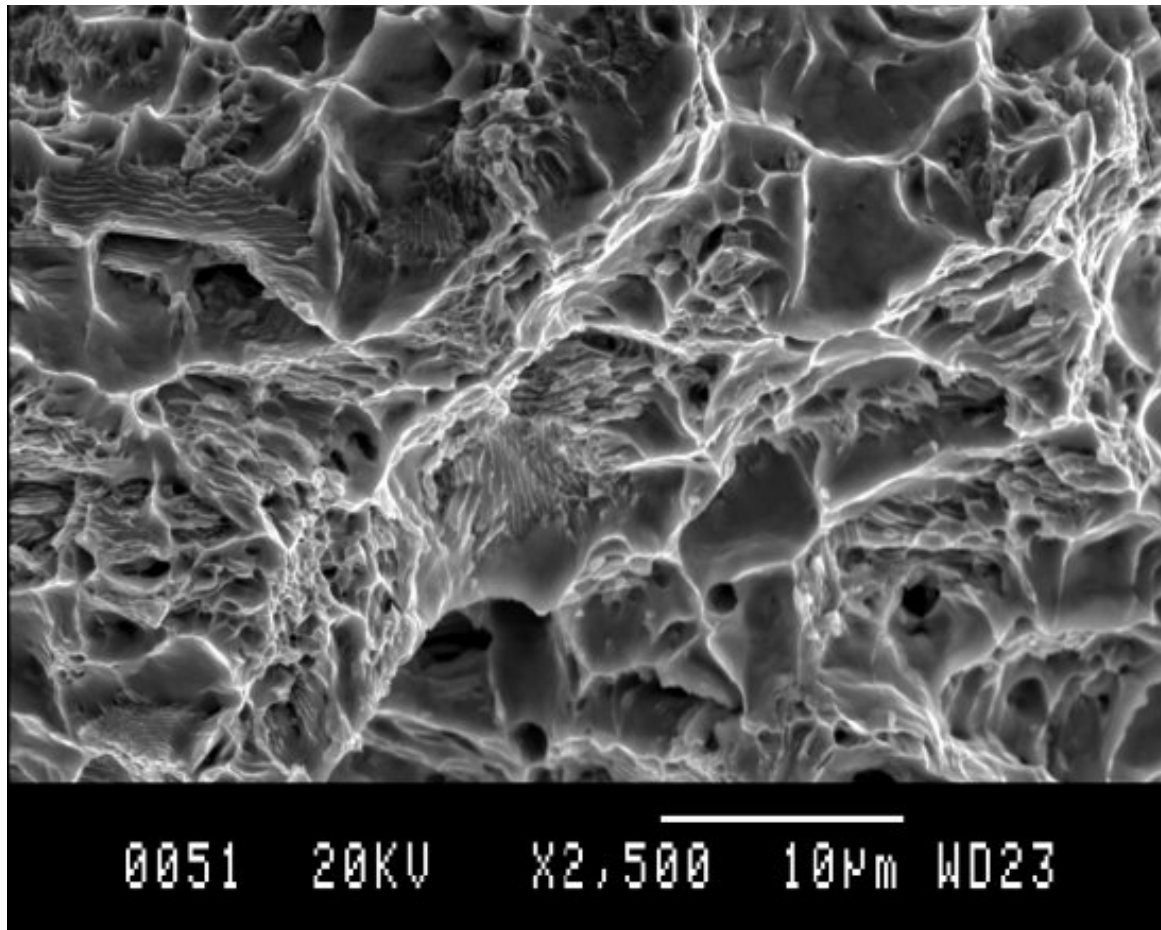
Fig. 5. Rub marks (at arrow) on the surface of a fatigue fracture in aluminum alloy 7075-T6. 5400 $\times$ . (Ref 5)



METMAT

## Artefatos

- Dimples alongados em estruturas lamelares (perlita)



## Características macroscópicas da fratura por fadiga

- A maior parte da informação sobre o modo e as causas da fratura por fadiga pode ser obtida a partir de um exame macroscópico da fratura, com aumentos de no máximo 50 X.
- Fraturas por fadiga de alto ciclo têm como característica ausência de deformação plástica macroscópica: a nucleação ocorre sob tensões muito baixas, geralmente abaixo do limite de escoamento do material.
- Somente a região de fratura final pode apresentar deformação plástica.
- Fratura por fadiga sob altas tensões aplicadas (fadiga de baixo ciclo) pode apresentar deformação plástica macroscópica.
- Exemplo: fratura de um clip dobrado várias vezes até a fratura.





METMAT

## Marcas de praia

- Marcas de praia são marcas macroscópicas, visíveis a olho nu, características da interrupção dos períodos de propagação da fratura no estágio II.
- Marcas de praia não são estrias e não devem ser confundidas com as mesmas.
  - ✓ Podem se formar em períodos de repouso da estrutura, por relaxação plástica na ponta da trinca parada.
  - ✓ Correspondem a regiões em que a taxa de corrosão ou oxidação é maior devido à inatividade mecânica do componente.



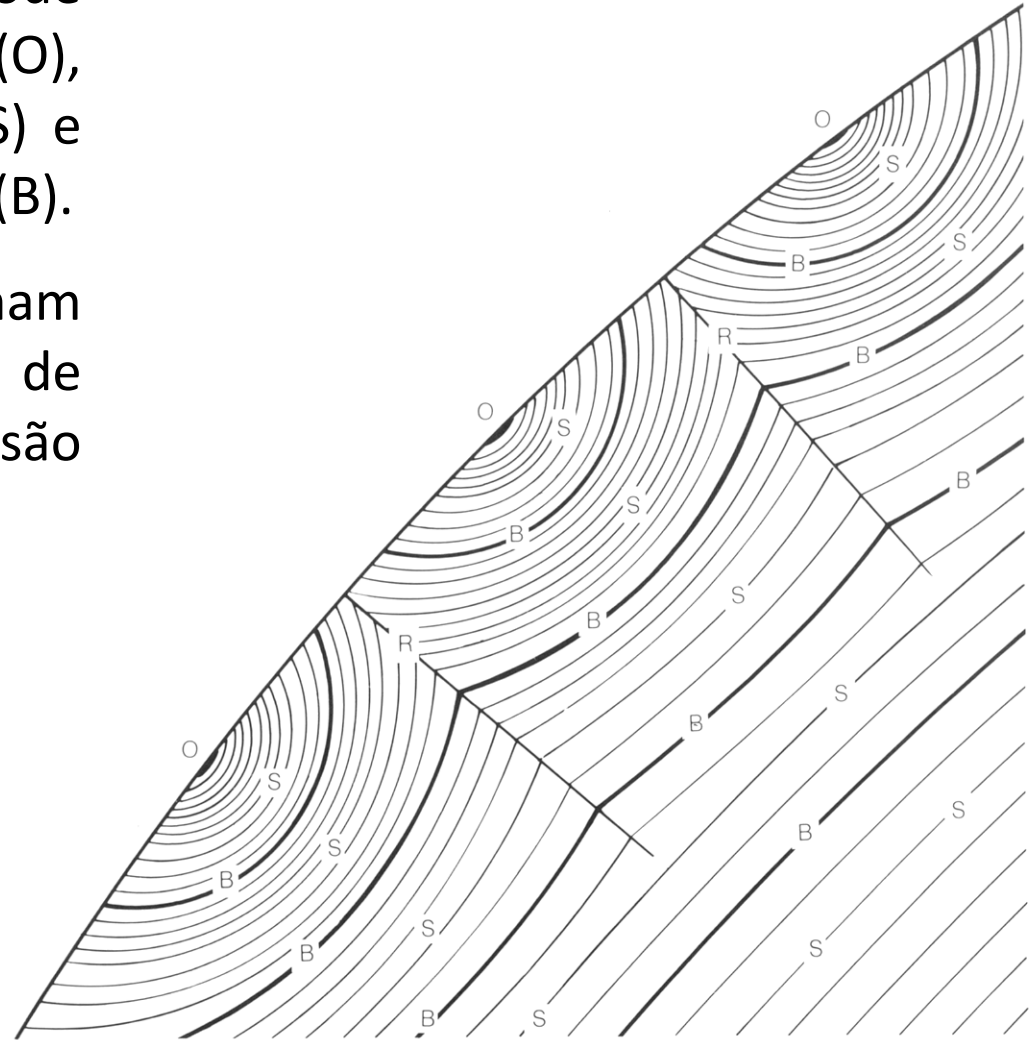




METMAT

## Marcas de praia

- Uma fratura por fadiga típica pode apresentar, pontos de origem (O), estrias de fadiga “striations” (S) e marcas de praia “beach marks” (B).
- As marcas de praia se formam quando os ciclos alternados de aplicação de carga são interrompidos.
- Fratura por fadiga ocorrida em ensaio de laboratório nunca apresenta marcas de praia.





# Marcas em forma de fresa

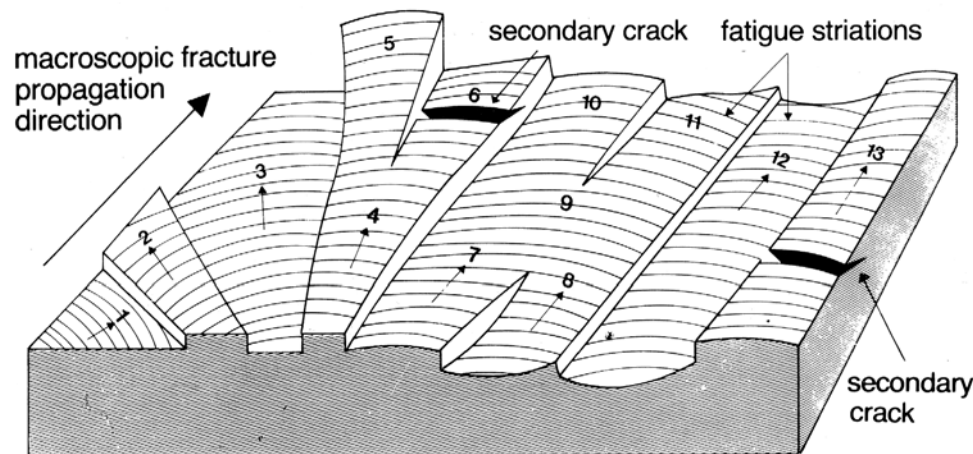
(Ratchet marks)

- **As marcas em forma de fresa** são encontradas na superfície de componentes em que existe forte concentração de tensões (p.e. devido a entalhes).
- São marcas perpendiculares à superfície em que a fratura por fadiga foi originada.
- As marcas em forma de fresa são muito úteis para identificar fraturas por fadiga e permitem localizar e contar as múltiplas origens de fadiga.
- Os diferentes planos de origem das trincas são unidos por meio de degraus ou cumes de rasgamento (tear ridges).
- Frequentemente as marcas de fresa são amassadas devido ao movimento relativo das duas metades da superfície de fratura.

# Marcas em forma de fresa

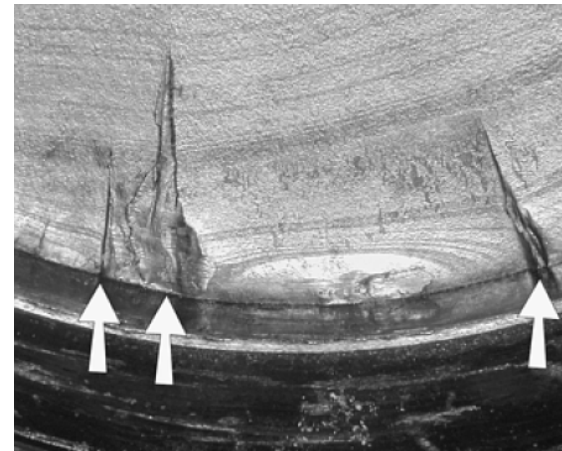
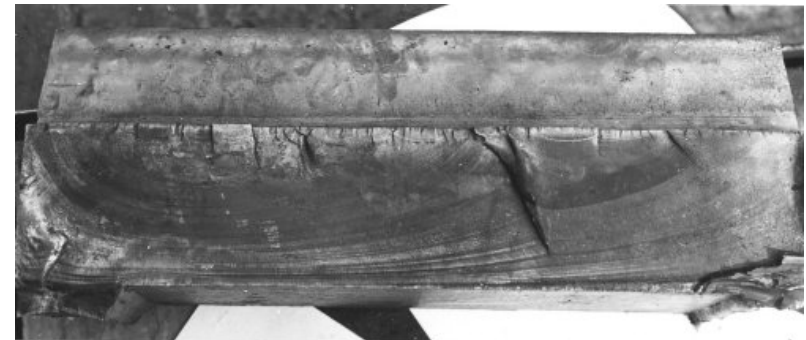
(Ratchet marks)

- Em peças planas, tais como molas chatas, as marcas são inicialmente perpendiculares à superfície de origem da fadiga, mas podem mudar de direção caso o esforço seja de flexão unidirecional.



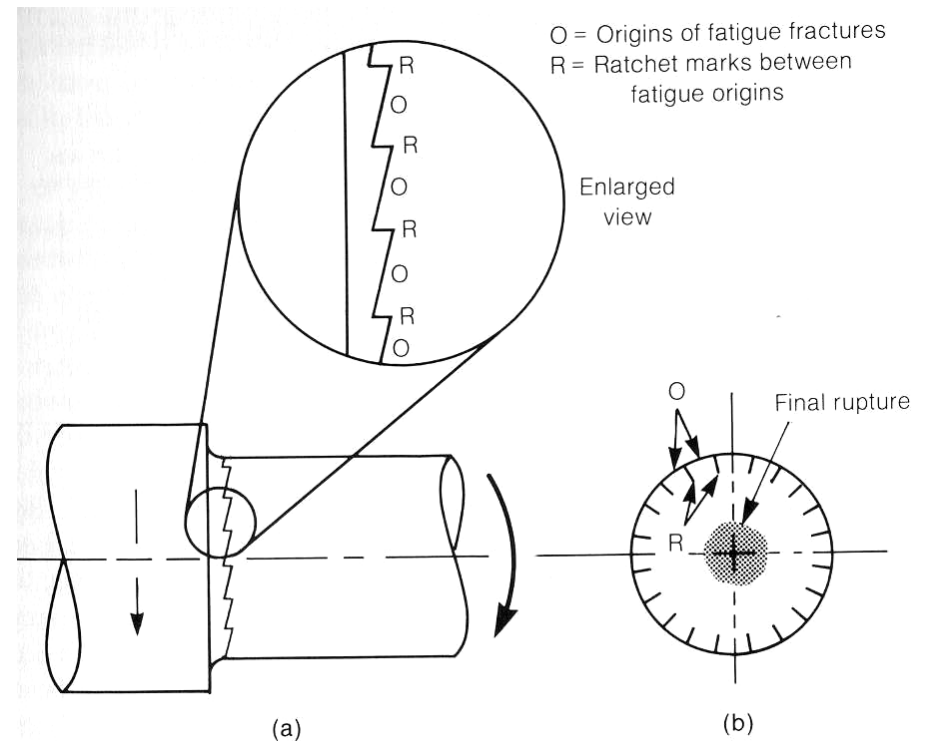
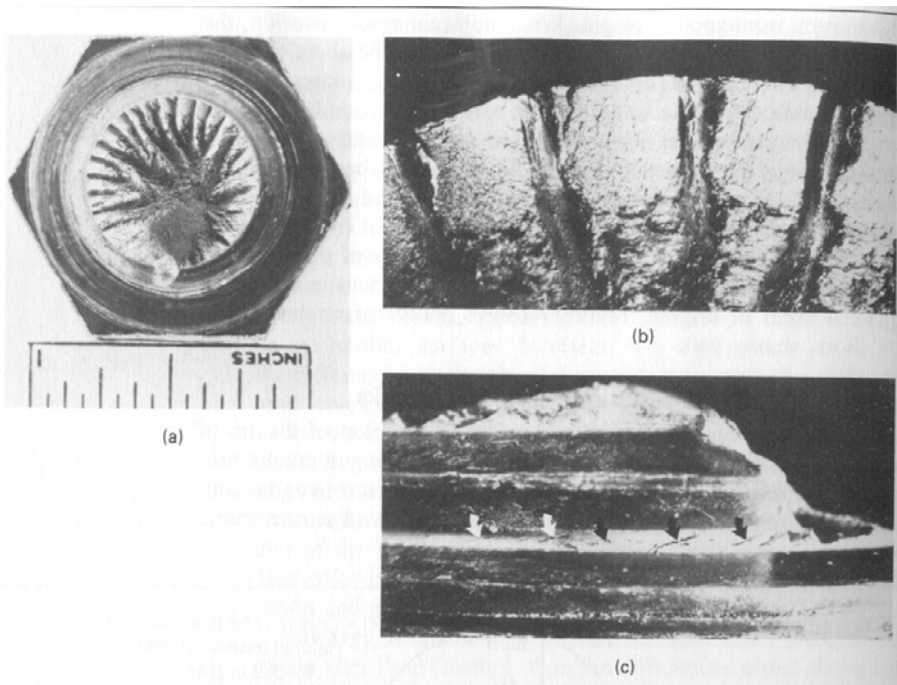
crack paths 1-13

**Fatigue fracture**



# Marcas em forma de fresa

- Em peças de seção circular, as marcas em forma de fresa são radiais apontando para o centro.

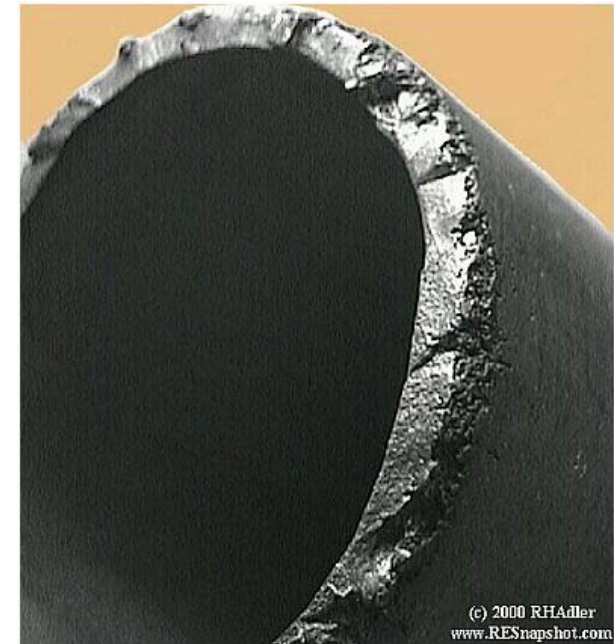




METMAT

## Marcas em forma de fresa

- As marcas em forma de fresa não constituem a origem da fratura por fadiga; cada uma destas marcas separa duas superfícies de fratura adjacentes.
- À medida em que as trincas se aprofundam, as trincas originadas em cada um dos pontos de início tendem a crescer juntas e se tornar uma única superfície de fratura com inúmeras origens.
- O número de marcas de fresa é igual a  $N_0$  (número de origens de trincas de fadiga) ou a  $(N_0 - 1)$ . A identificação do número de marcas em forma de fresa é importante para determinar o número de locais de nucleação de trincas de fadiga.



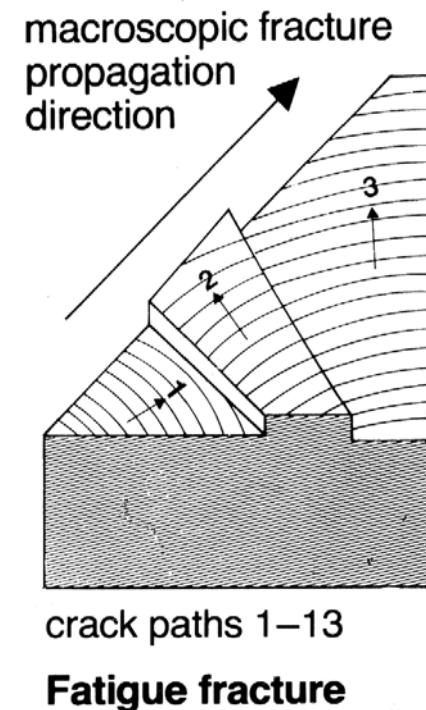
## Semelhanças entre estrias e marcas de praia

- Tanto estrias quanto marcas de praia identificam a posição em que a ponta da trinca se encontrava em um determinado tempo a partir do início da propagação.
- Ambas se propagam a partir do ponto ou dos pontos de origem da fratura, de forma circular ou semi-circular, de maneira análoga à das ondulações que se formam na água em torno do ponto em que uma pedra foi jogada.



## Semelhanças entre estrias e marcas de praia

- Tanto estrias quanto marcas de praia são constituem pequenos degraus na superfície, que nunca se cruzam .
- Cada estria e marca de praia corresponde a uma frente de propagação gradual de uma trinca e portanto seu cruzamento é impossível.



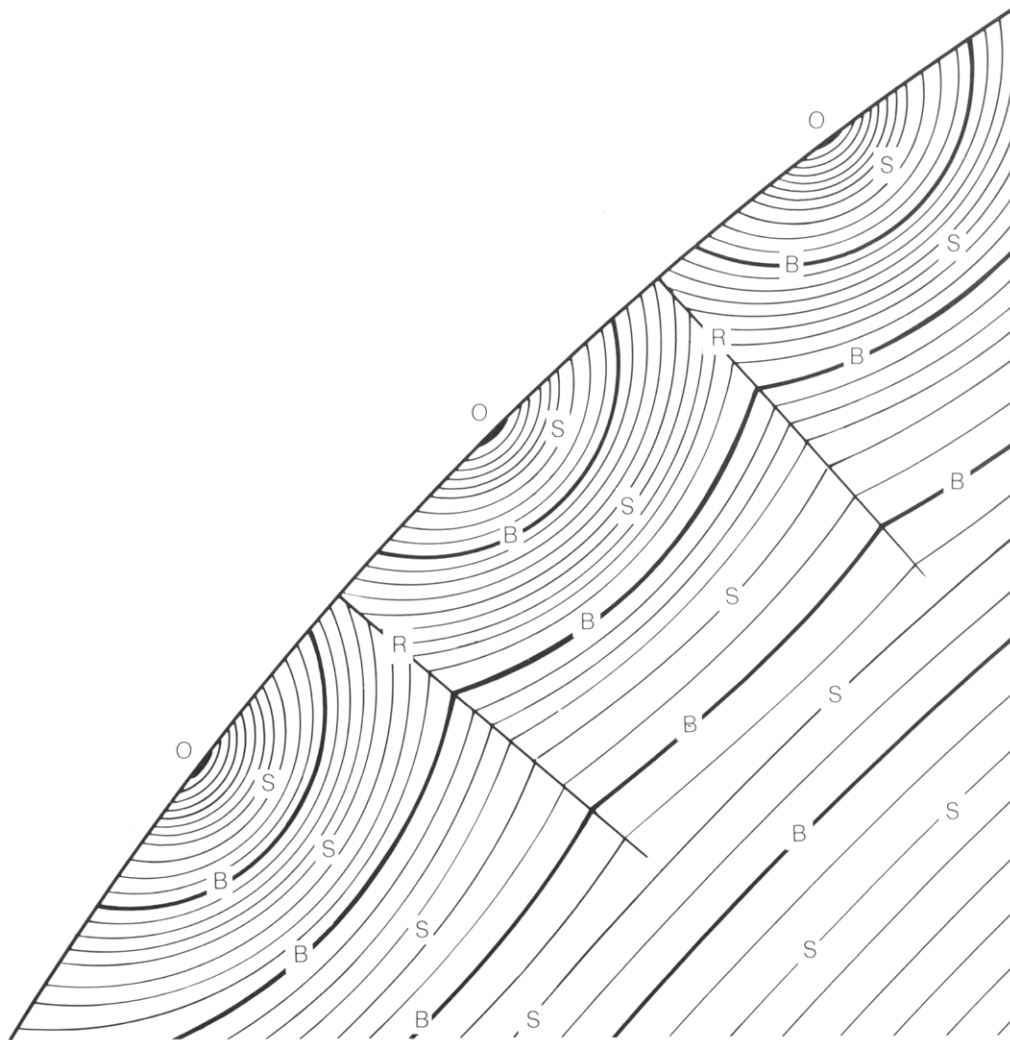


## Diferenças entre estrias e marcas de praia

- A diferença mais importante entre estrias e marcas de praia é o tamanho. As estrias são degraus muito pequenos, somente visíveis no microscópio eletrônico.
- Marcas de praia são visíveis a olho nu e podem não aparecer, caso a aplicação das tensões seja extremamente regular.
- Marcas de praia são indícios de interrupção do ciclo de aplicação de cargas. As estrias, por outro lado, se formam ao final da aplicação de cada um dos milhares de ciclos de aplicação de carga alternada.
- Caso a superfície de fratura tenha sofrido amassamento, corrosão ou tenha sido danificada durante operação de limpeza, fica muito difícil ver as estrias e também em alguns casos as marcas de praia.



## Diferenças entre estrias e marcas de praia

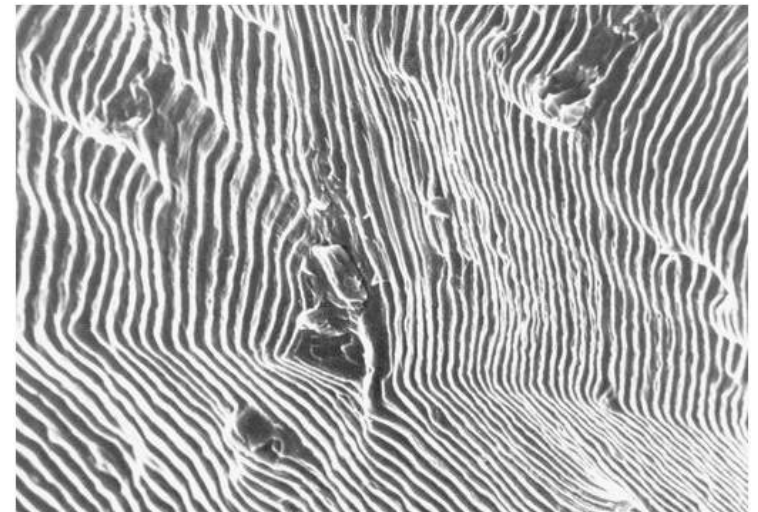




METMAT

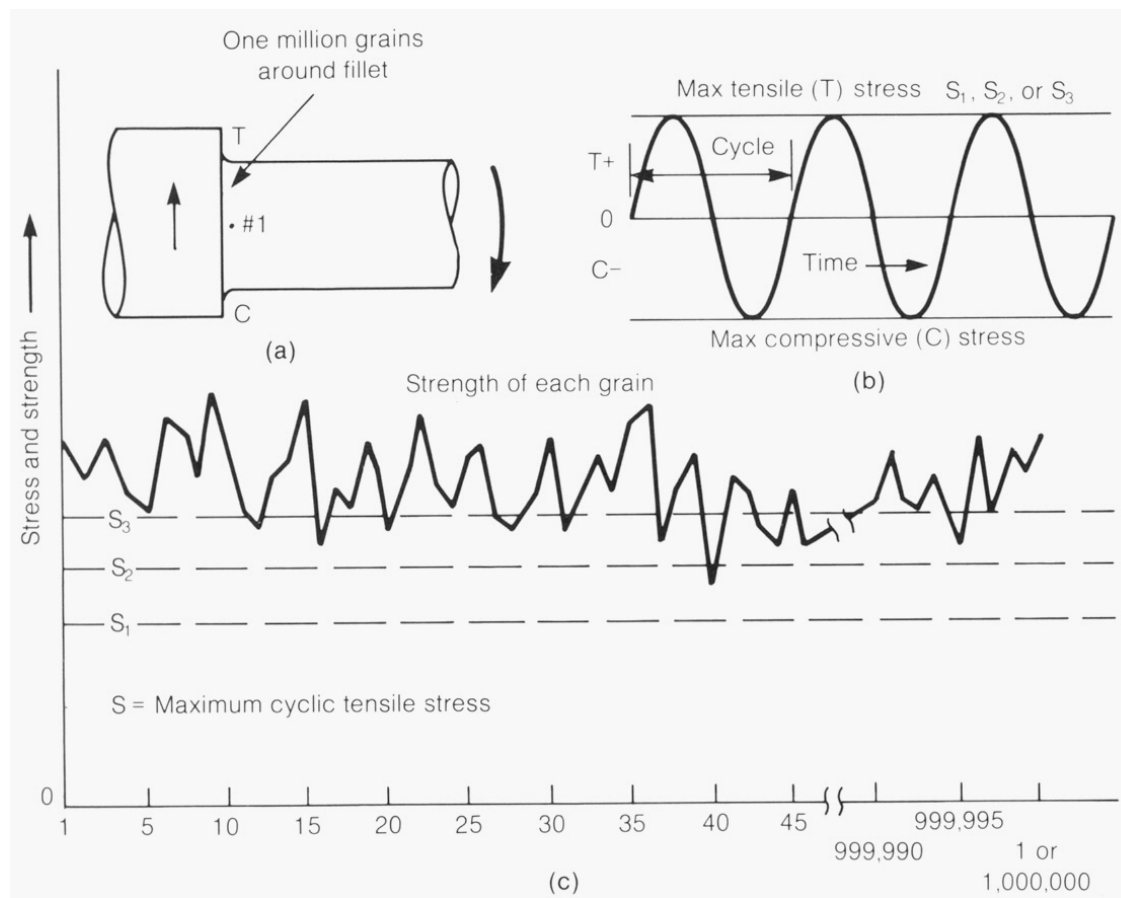
## Número ciclos e número de estrias

- Analogia com os anéis na seção de um tronco de árvore, onde cada anel corresponde a um ano de vida.
- A contagem do número de estrias, embora difícil, permite dizer o número de vezes que a carga foi aplicada durante a propagação da trinca (estágio II).
- Esta informação não é, entretanto, útil para saber o número total de ciclos, pois não se sabe quantos ciclos foram aplicados no estágio I.



## Relação entre tensão aplicada e resistência

- A sobrevivência ou falha de uma peça depende da relação entre a tensão aplicada e a resistência à fadiga do material.

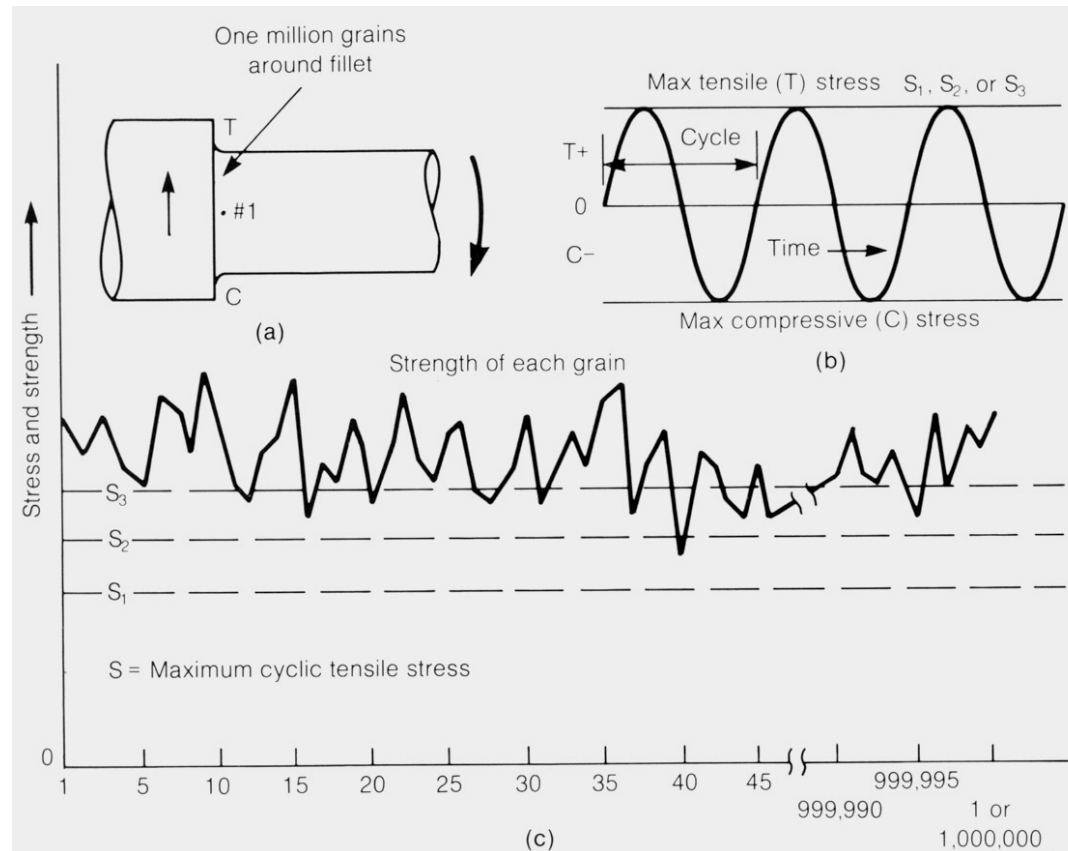




METMAT

## Relação entre tensão aplicada e resistência

- Se a máxima tensão de tração superar a resistência à fadiga de um ou mais de um dos grãos existentes na região do raio de concordância, a fadiga começa em estágio I, podendo ocorrer vários pontos de nucleação



## Fadiga em flexão rotativa

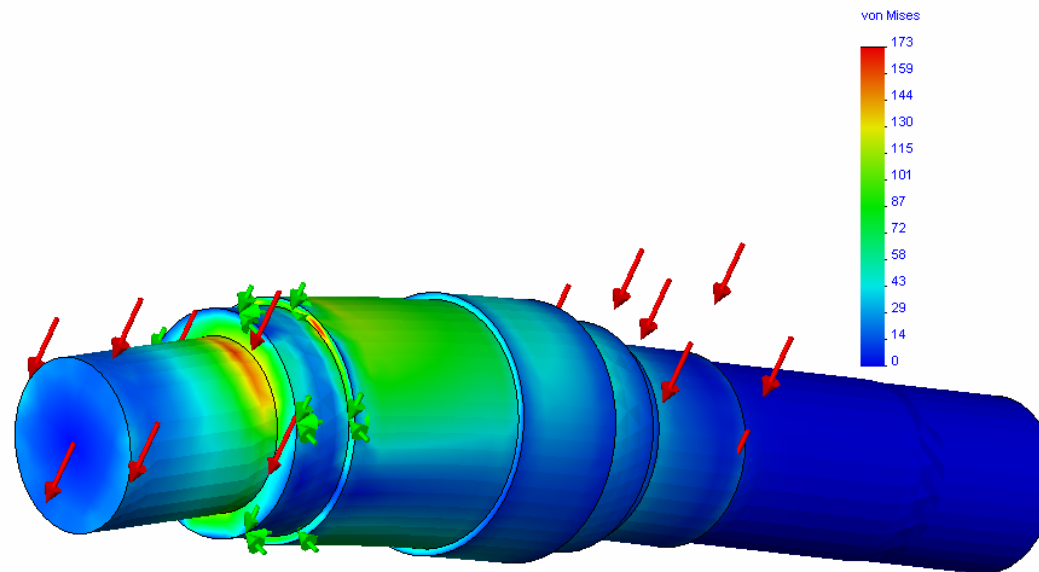


Presence of numerous ratchet marks (small shiny areas at surface) indicates that fatigue cracks were initiated at many locations along a sharp snap-ring groove. The eccentric pattern of oval beachmarks indicates that the load on the shaft was not balanced; note final rupture area (stage 3) near left side.

**Fig. 10. Surface of a fatigue fracture in a 1050 steel shaft, with hardness of about HRC 35, that was subjected to rotating bending.**

## Avaliação das tensões atuantes em componentes mecânicos

- É importante conhecer as tensões de carregamento a que uma peça é submetida, em decorrência da intensificação das tensões de trabalho devido à sua geometria, sua qualidade superficial e de entalhes eventualmente existentes.



- Para este fim pode-se utilizar programas de elementos finitos que simulam a condição de utilização de uma peça ou componente permitindo avaliar as tensões atuantes.



METMAT

# Limite de Fadiga

- O limite de fadiga do material constitui elemento de grande importância para a seleção dos aços.
- São determinados em ensaios em que se submetem os corpos de prova a um número muito elevado de ciclos de carga de intensidade variada, até atingir-se uma tensão que o material suporta indefinidamente.

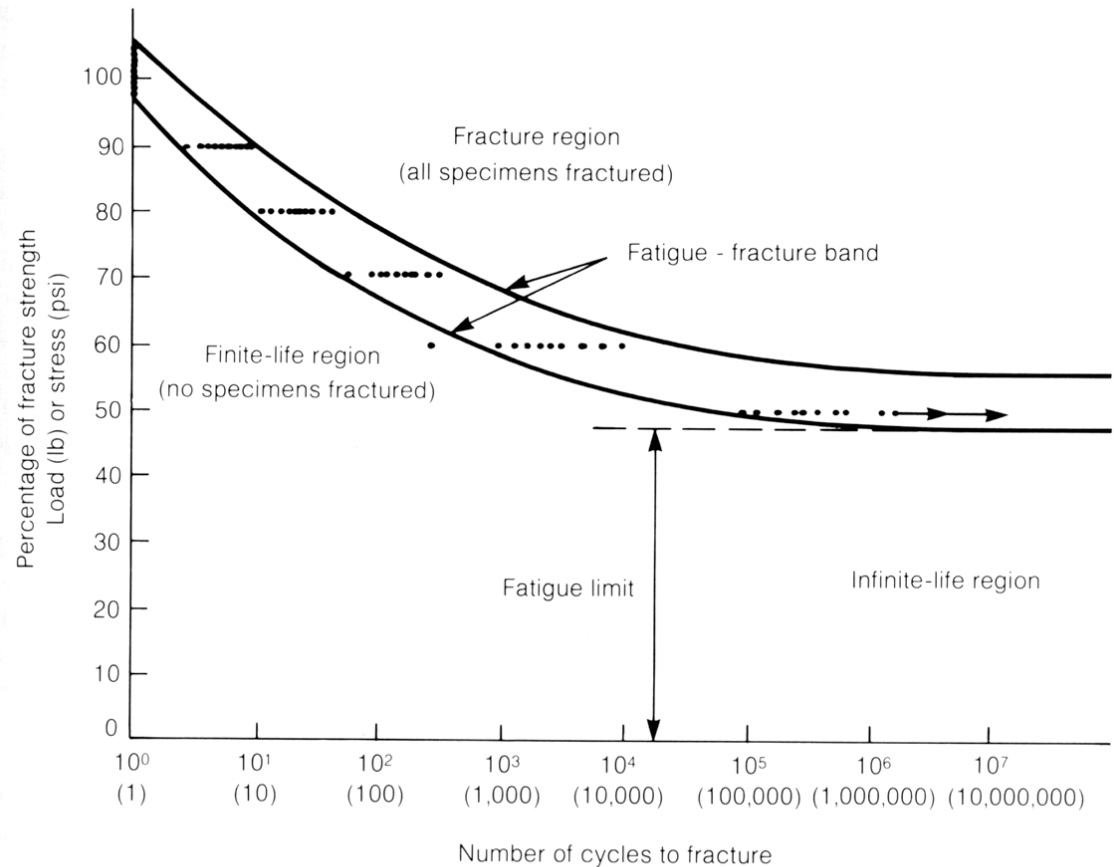


Fig. 11. Typical fatigue (S-N) diagram of laboratory fatigue testing of medium-strength ferrous metal. See text.



METMAT

## Estimativas de Limite de Fadiga

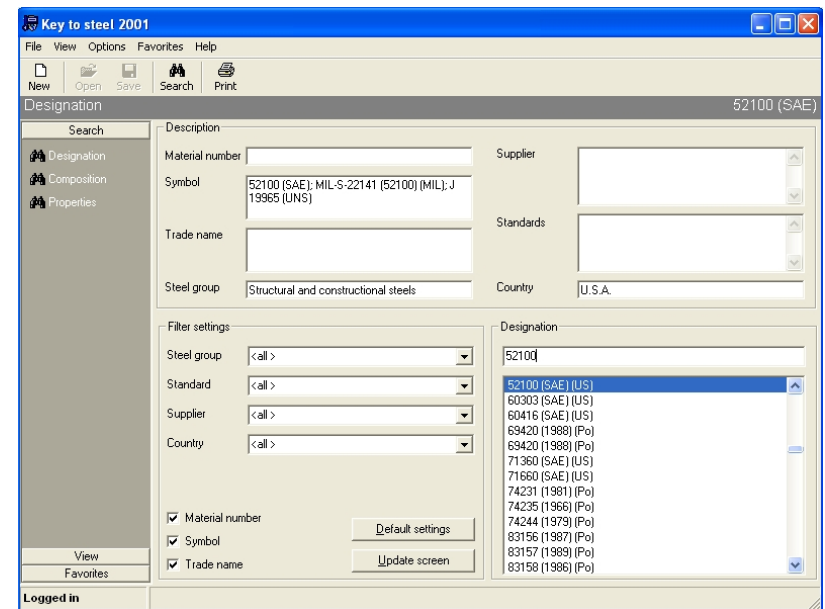
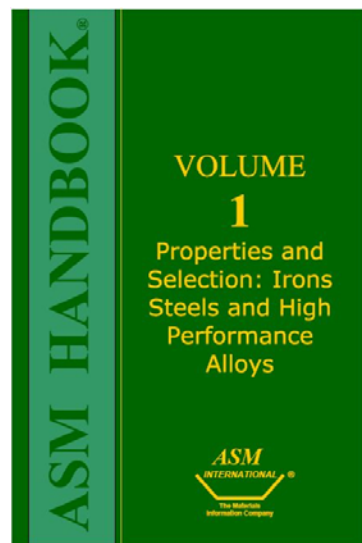
- Na falta de dados experimentais, usam-se, para os aços, fórmulas empíricas que relacionam os limites da fadiga com o Limite de Resistência (LR).
  - ✓ **Limite de fadiga sob flexão alternada =  $0,50 \times LR$**
  - ✓ **Limite de fadiga sob torção alternada =  $0,28 \times LR$**
  - ✓ **Limite de fadiga sob tração/compressão alternadas =  $0,30 \times LR$ .**
- A experiência tem mostrado que esses valores se aproximam dentro de  $\pm 20\%$  dos Limites de Fadiga determinados em ensaios dinâmicos. Entretanto, a aplicação dessas fórmulas pressupõe superfície polida, tratamento térmico perfeito, estrutura metalográfica uniforme em toda a seção (especialmente sem ferrita livre), ausência de corrosão, etc.



VPN	ROCKWELL SCALES															BRINELL		SCLERO-SCOPE	U.T.S.		
DPH HV/10	A	B	C	D	E	F	G	H	K	15N	30N	45N	15T	30T	45T	BHN 500kg	BHN 3000kg		Kpsi	Mpa	
800	84		64	74						92	81	71					722		88		
772	83		63	73						91	80	70					705		87		
746	83		62	72						91	79	69					688		85		
720	82		61	72						91	79	68					670		83		
697	81		60	71						90	78	67					654		81	320	2206
674	81		59	70						90	77	66					634		80	310	2137
653	80		58	69						89	76	64					615		78	300	2069
633	80		57	69						89	75	63					595		76	290	2000
613	79		56	68						88	74	62					577		75	282	1944
595	79	120	55	67						88	73	61					560		74	274	1889
577	78	120	54	66						87	72	60					543		72	266	1834
560	78	119	53	65						87	71	59					523		71	257	1772
544	77	119	52	65						86	70	57					512		69	245	1689
528	77	118	51	64						86	69	56					496		68	239	1648
513	76	117	50	63						86	69	55					481		67	233	1607
498	75	117	49	62						85	68	54					469		66	227	1565
484	75	116	48	61						85	67	53					455		64	221	1524
471	74	116	47	61						84	66	51					443		63	217	1496
458	74	115	46	60						84	65	50					432		62	212	1462
446	73	115	45	59						83	64	49					421		60	206	1420

# Informações técnicas

- ✓ Neste sentido são importantes as folhas de dados que informam as reais propriedades mecânicas dos materiais utilizados na construção e montagem, de máquinas e equipamentos, como o limite de escoamento, o limite de resistência, limite de fadiga, tenacidade e alongamento.
- ✓ Estas informações podem ser obtidas em Handbooks ou catálogos tipo a Chave dos Aços:

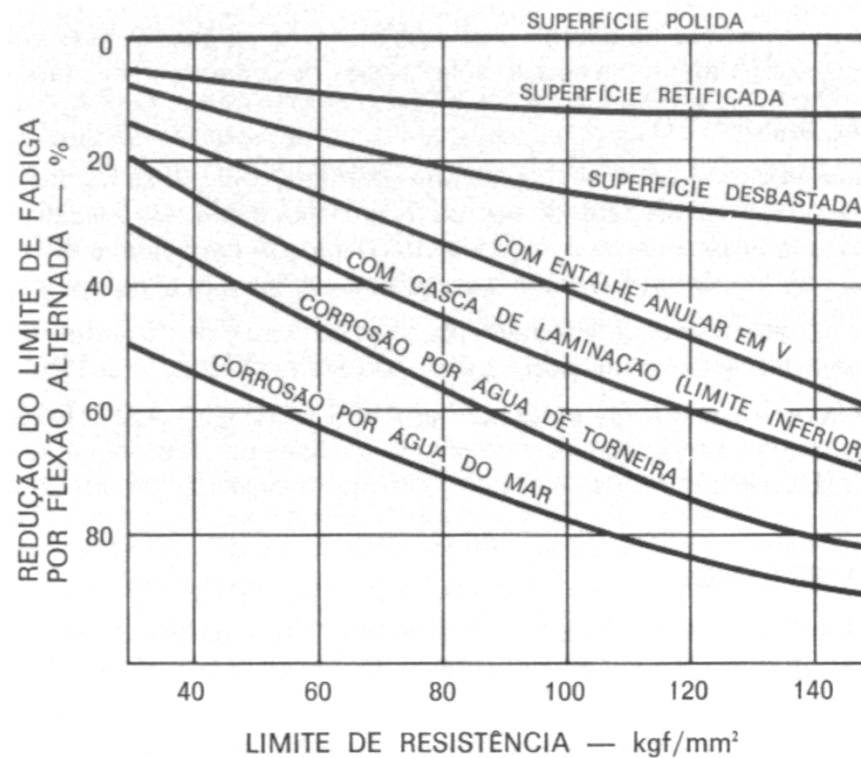




METMAT

# Acabamento superficial

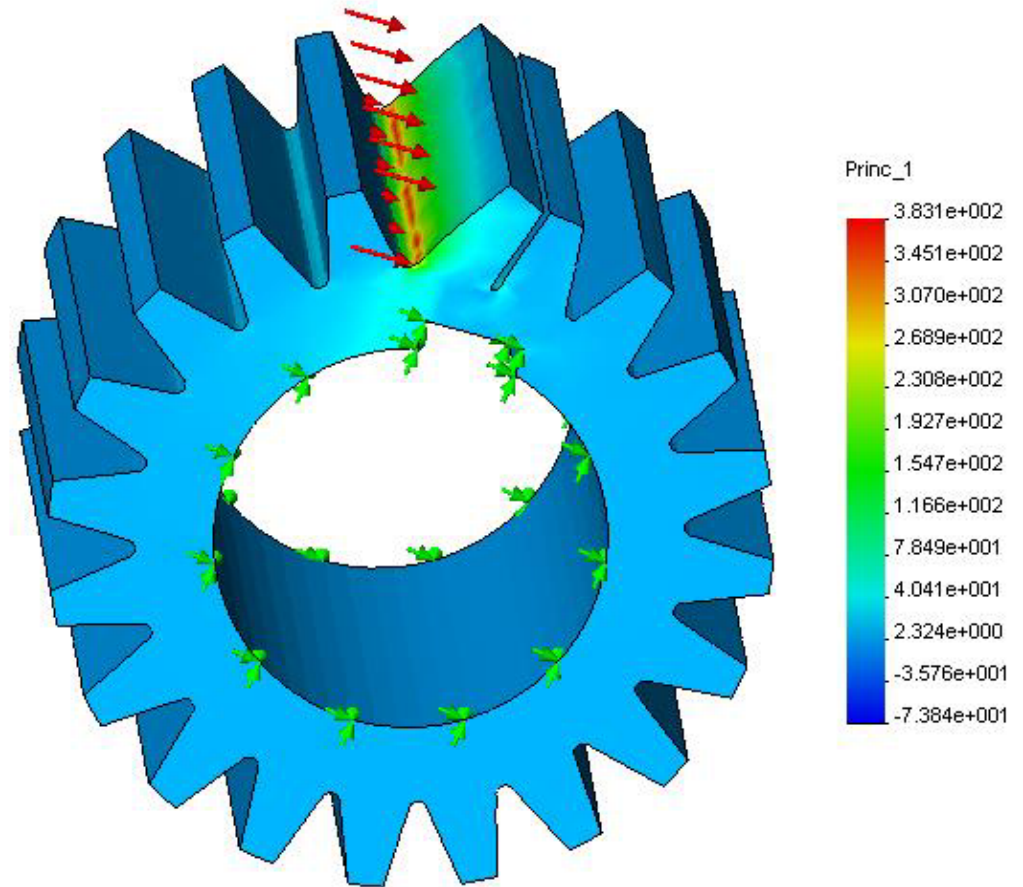
- ✓ A Figura abaixo elaborada pela Associação dos Engenheiros Alemães (VDI), indica a redução do limite de fadiga por flexão alternada, provocada por diversos fatores, expressa em função do limite de resistência do aço.



Efeito da qualidade do acabamento superficial, presença de entalhes e de corrosão na redução do limite de fadiga dos aços.

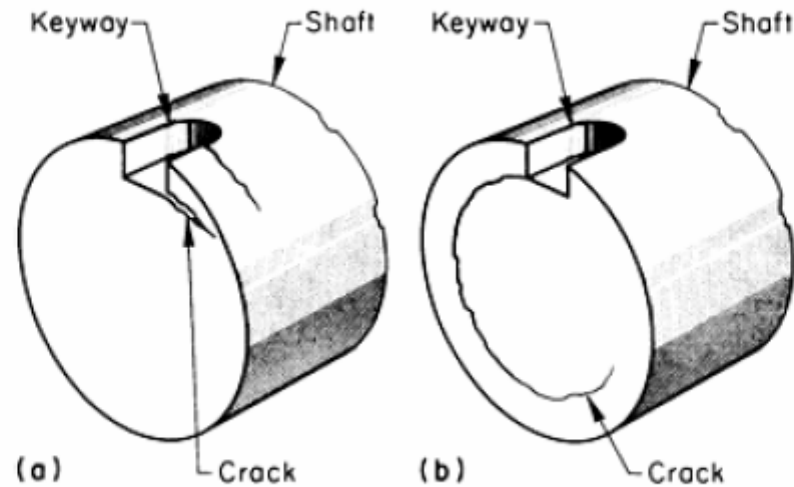
## Efeito da presença de entalhes na intensificação de tensões

- ✓ A presença de entalhes, como por exemplo rasgos de chaveta, pode causar elevada concentração de tensões em certas regiões da peça que passam a trabalhar sob tensão maior que o limite de fadiga do material, possibilitando sua ruptura.

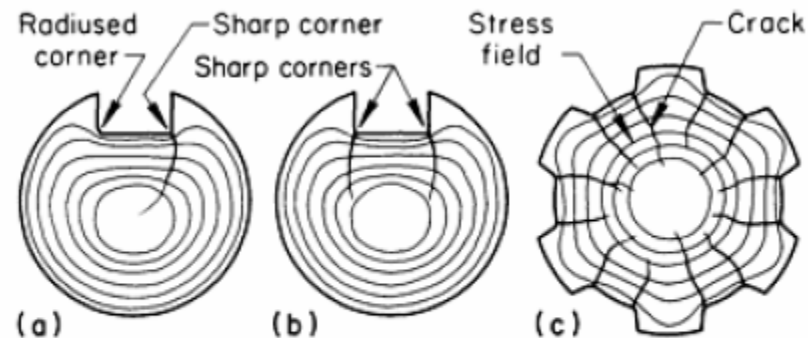


Concentração de tensão na raiz do dente de uma engrenagem causado por mau posicionamento de rasgo de chaveta.

## Efeito da presença de entalhes na intensificação de tensões



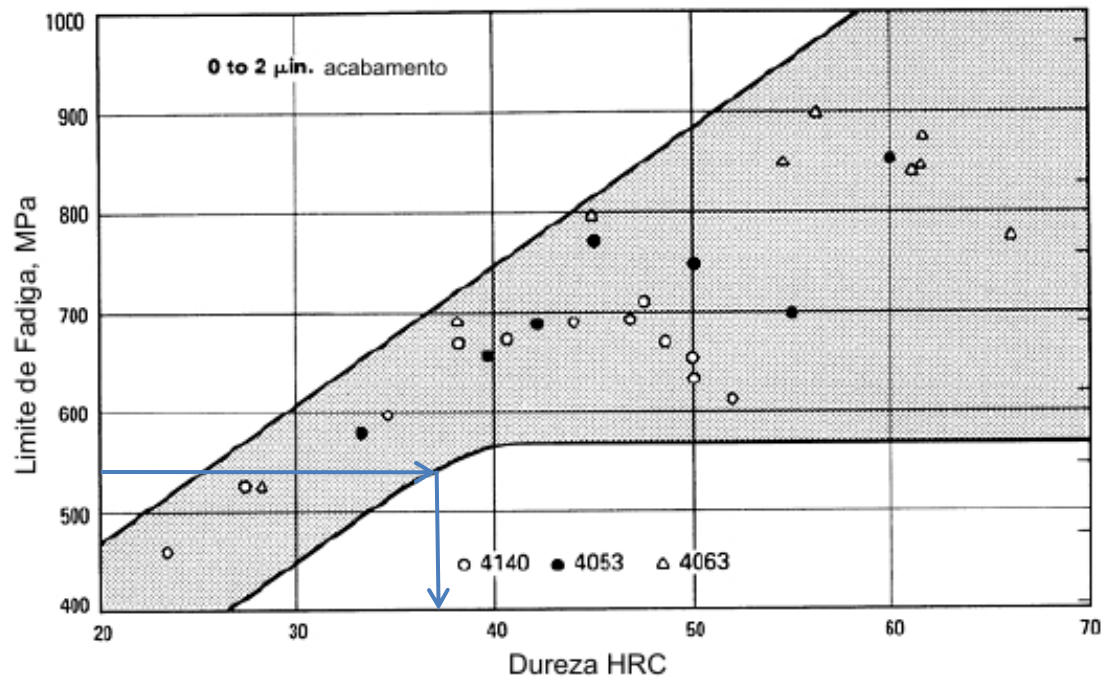
**Fig. 14 Peeling-type cracks in shafts. (a) and (b) Cracks originated at keyways.**



**Fig. 15 Stress fields and corresponding torsional-fatigue cracks. (a) and (b) Shaft with keyway. (c) Shaft with splines**

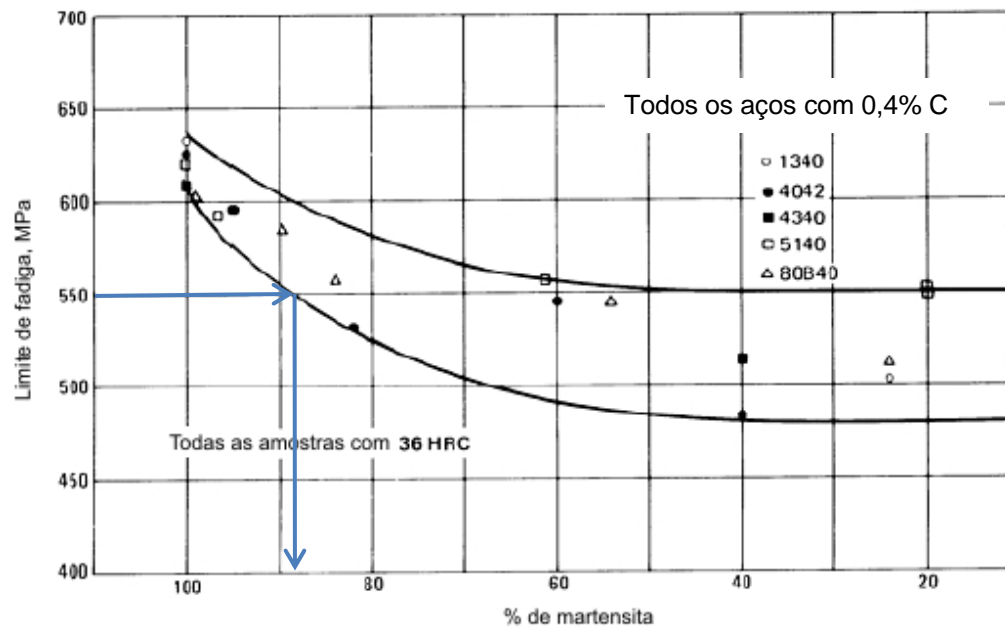
## Dureza e Limite de Fadiga

- ✓ A dureza tem efeito marcante na resistência à fadiga de peças de aço para construção mecânica. Quanto maior a dureza maior a resistência à fadiga até um certo limite a partir do qual a relação não é mais linear.



## % de Martensita e Limite de Fadiga

- ✓ Além da dureza, outras variáveis têm influência sobre a resistência à fadiga dos aços temperados e revenidos.





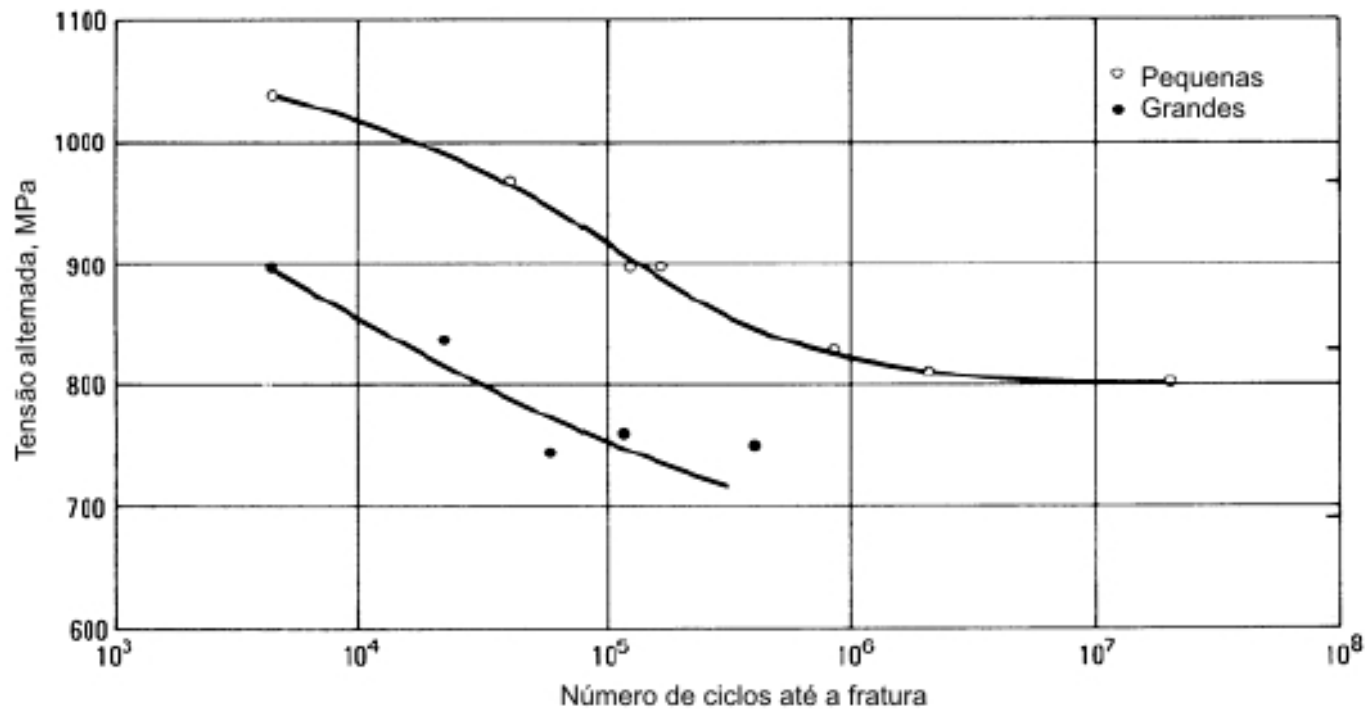
## % de Martensita e Limite de Fadiga

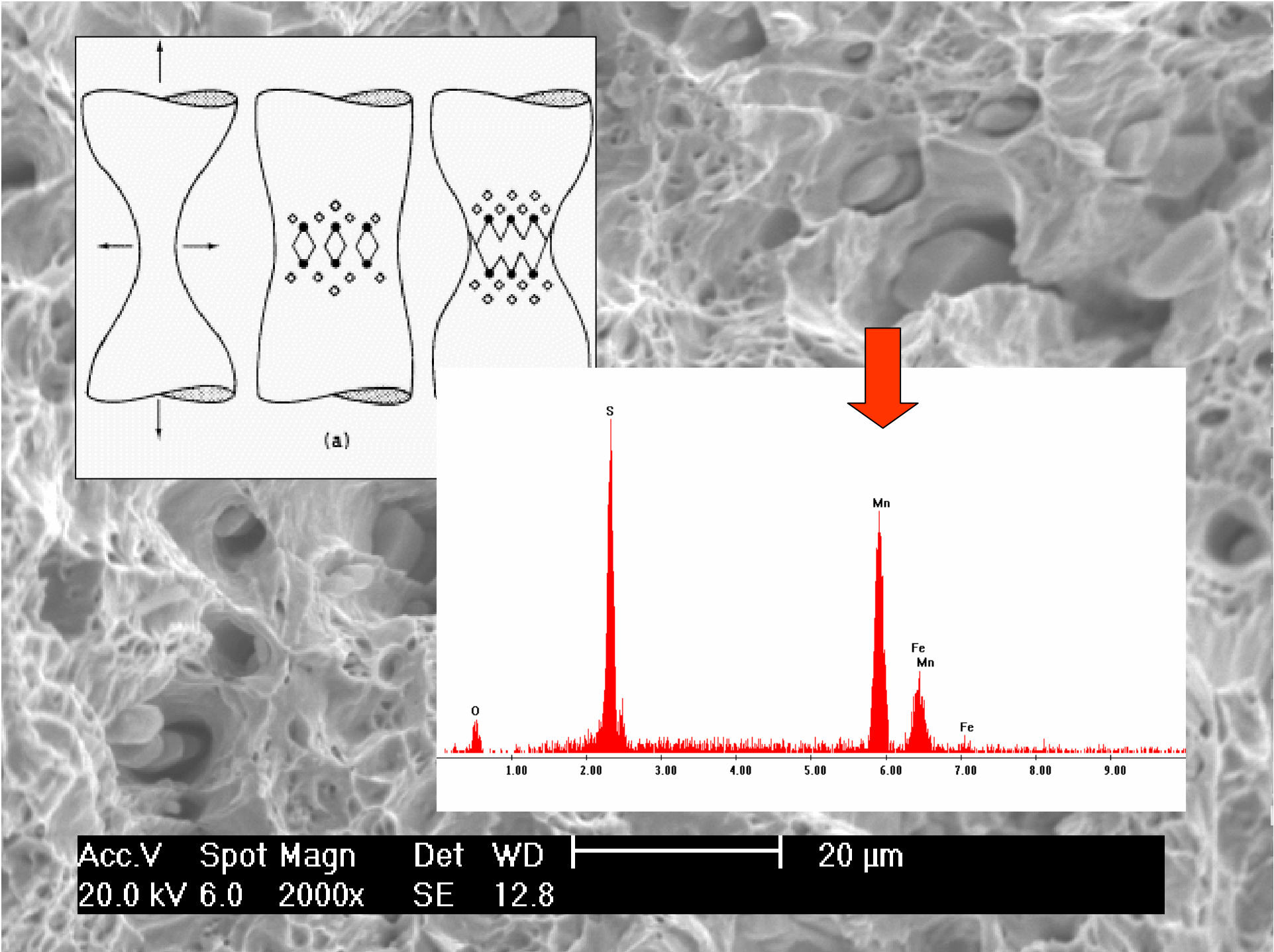
- ✓ As estruturas constituídas de 100% de martensita revenida apresentam a mais elevada resistência à fadiga. A presença de outros microconstituintes (perlita e ferrita) bem como inclusões não metálicas, diminui a vida em fadiga dos aços para construção mecânica.
- ✓ Existe uma recomendação dos fabricantes de veículos militares apontando um teor mínimo de 85% de martensita a  $\frac{3}{4}$  do raio, para eixos de veículos automotores.



## Efeito de inclusões não metálicas no Limite de Fadiga dos Aços

- ✓ Efeito do tamanho das inclusões não metálicas na vida em fadiga.

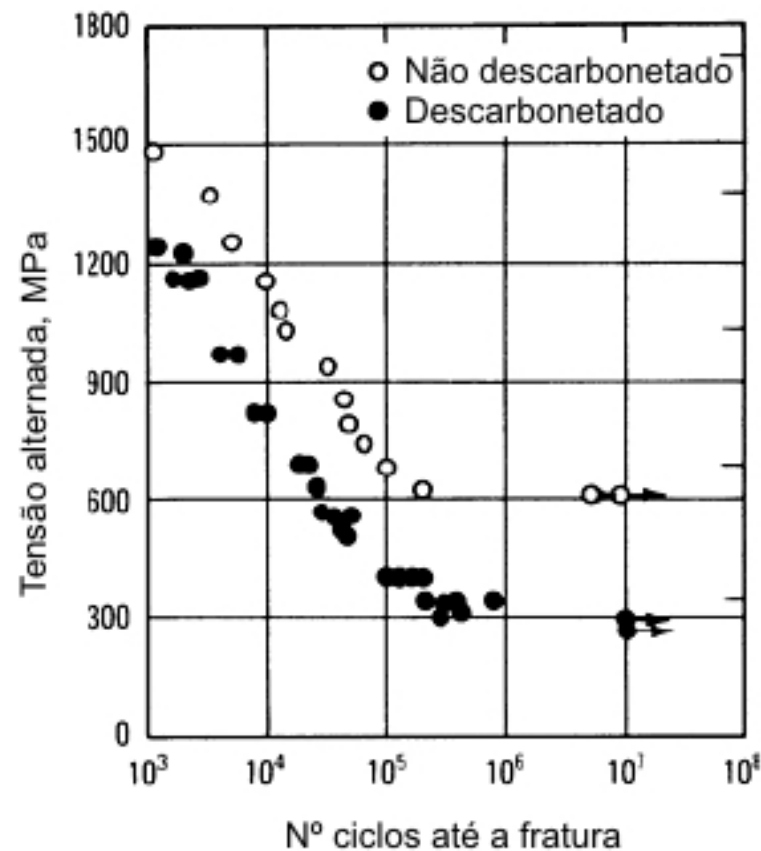




Acc.V	Spot	Magn	Det	WD	20 μm
20.0 kV	6.0	2000x	SE	12.8	

## Efeito da descarbonetação no Limite de Fadiga dos Aços

- ✓ A descarbonetação ocorre quando não se tomam cuidados para proteger a peça colocada em atmosferas oxidantes



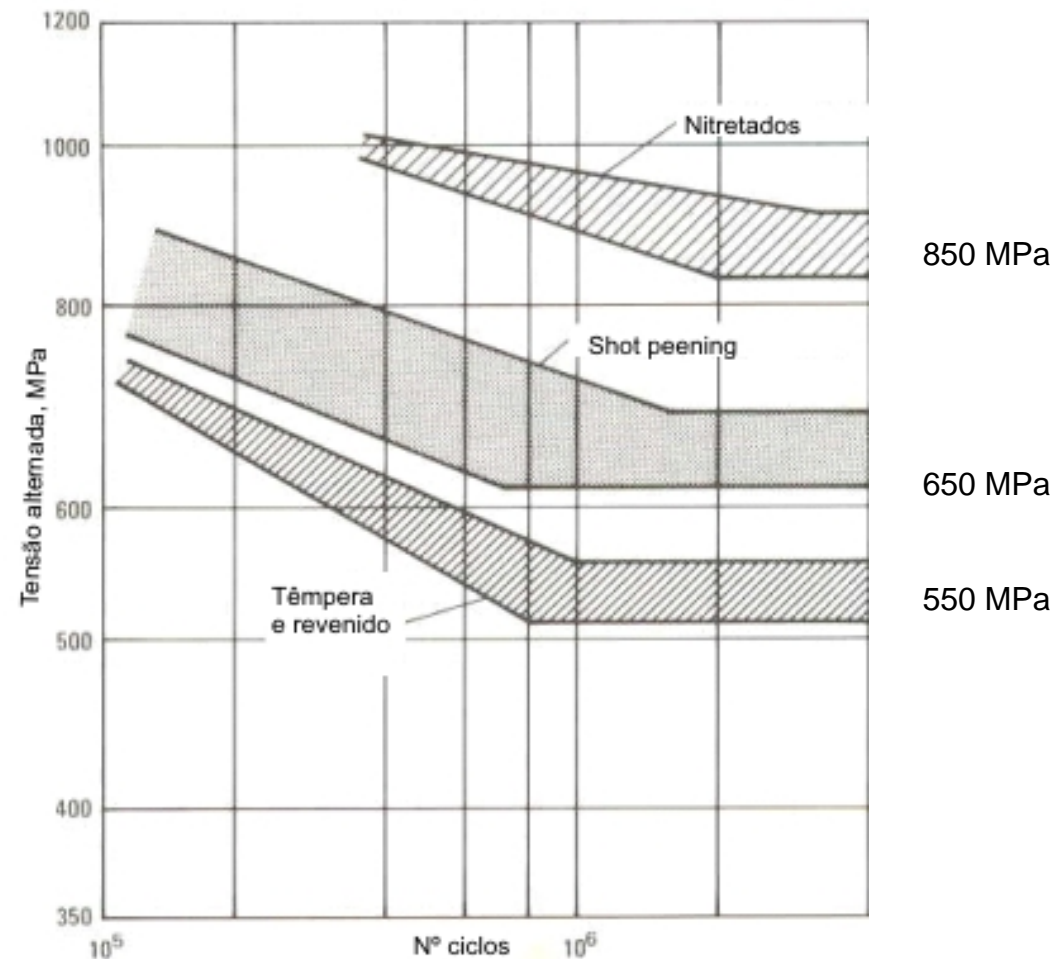
Efeito da descarbonetação na vida em fadiga.



# Tensões residuais

- ✓ A presença de tensões residuais de compressão na superfície da peça aumenta consideravelmente a vida em fadiga.
- ✓ Tensões residuais de compressão surgem em peças cementadas, peças temperadas superficialmente, nitretadas ou deformadas superficialmente por jateamento com granalha de aço ("shot peening").

# Tensões residuais compressivas

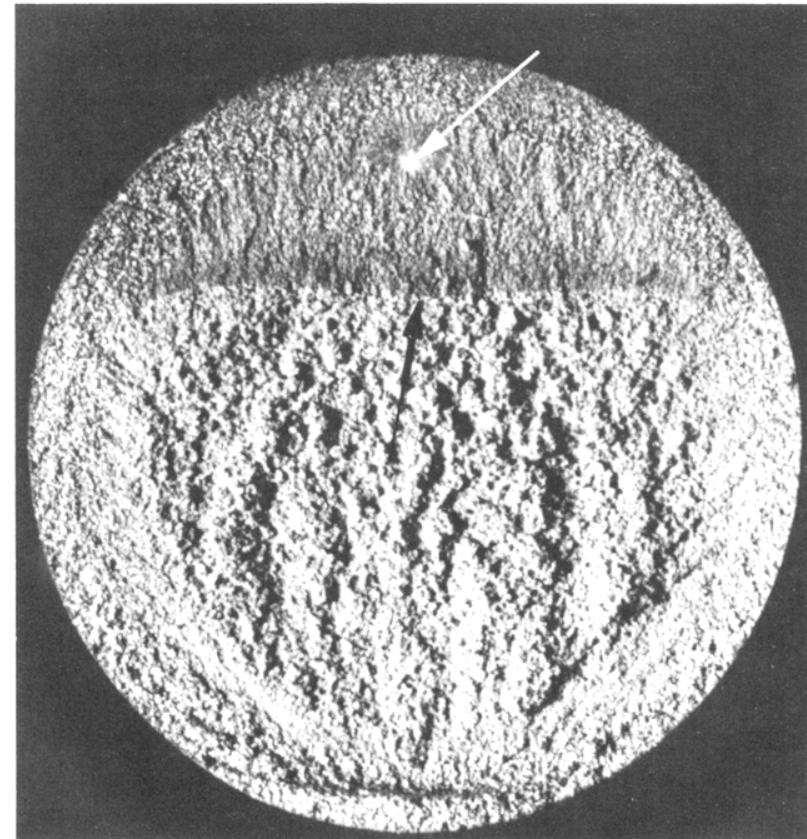
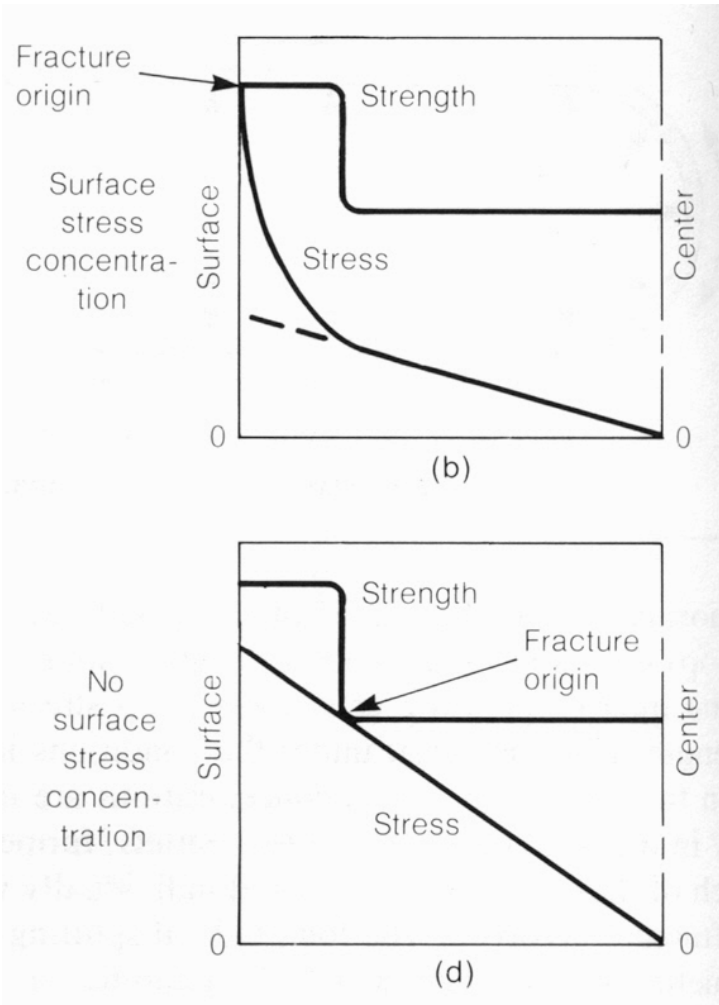


Limites de fadiga de virabrequins fabricados com o mesmo material, temperados e revenidos para a mesma dureza, sob diferentes estados de tensões residuais.



METMAT

# Origem de fadiga sub-superficial



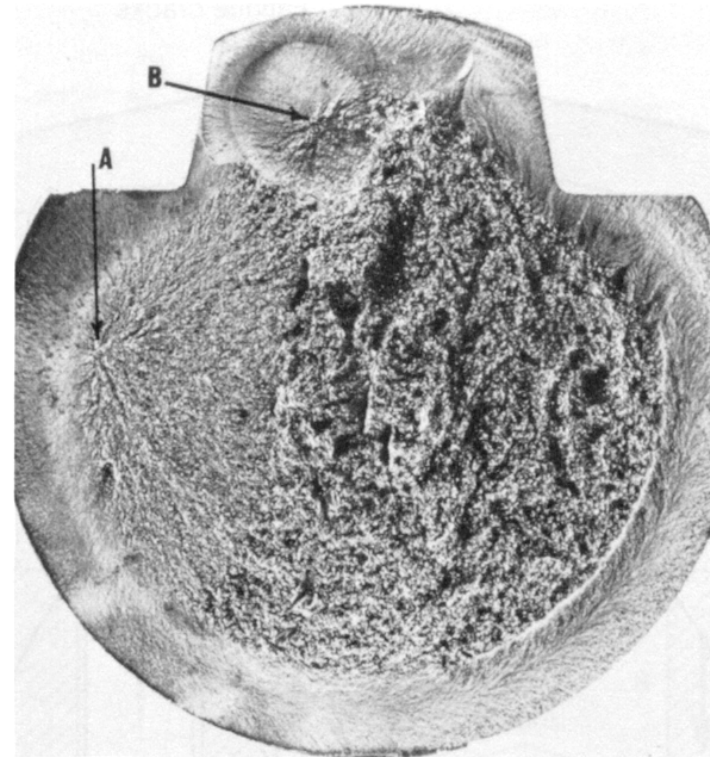
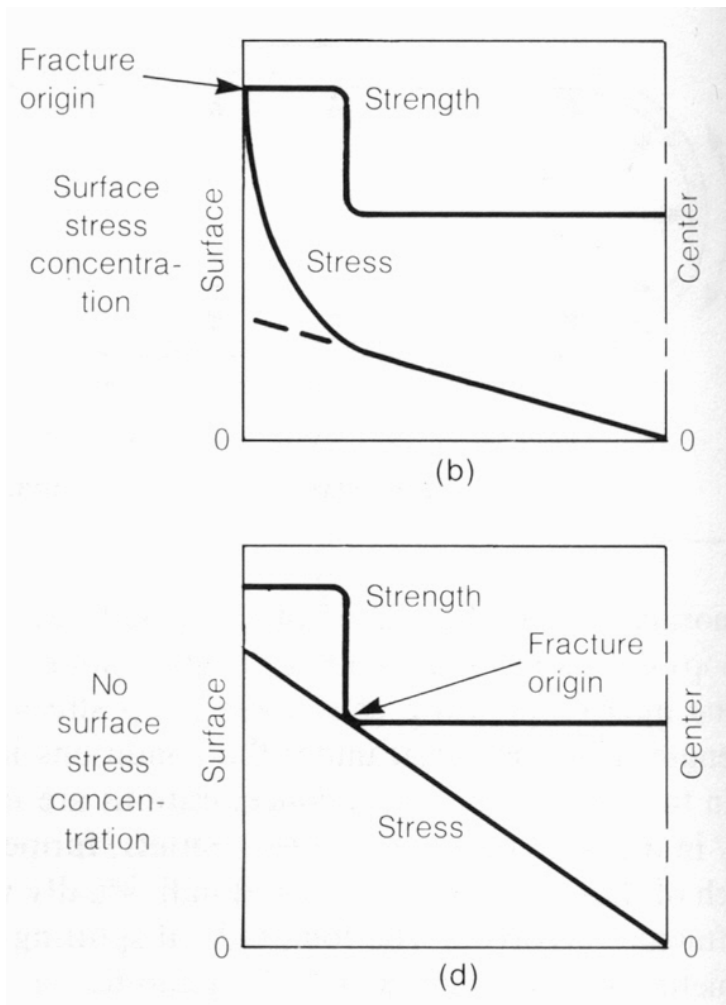
Test was stopped because fatigue crack went about one third of the way around the 0.250-in.-diam test specimen, after being continuously tested at a maximum bending stress of 150,000 psi for 9,300,000 cycles. Crack penetrated partway through the core (black arrow) but was left for many months until the specimen was deliberately broken open (light-colored area). The dark color of the original fatigue fracture area was the result of corrosion from the atmosphere in the laboratory. 12 $\times$ .

**Fig. 12(a). Subsurface fatigue origin (white arrow) on a reversed bending fatigue specimen of carburized low-carbon alloy steel.**



METMAT

# Origem de fadiga sub-superficial

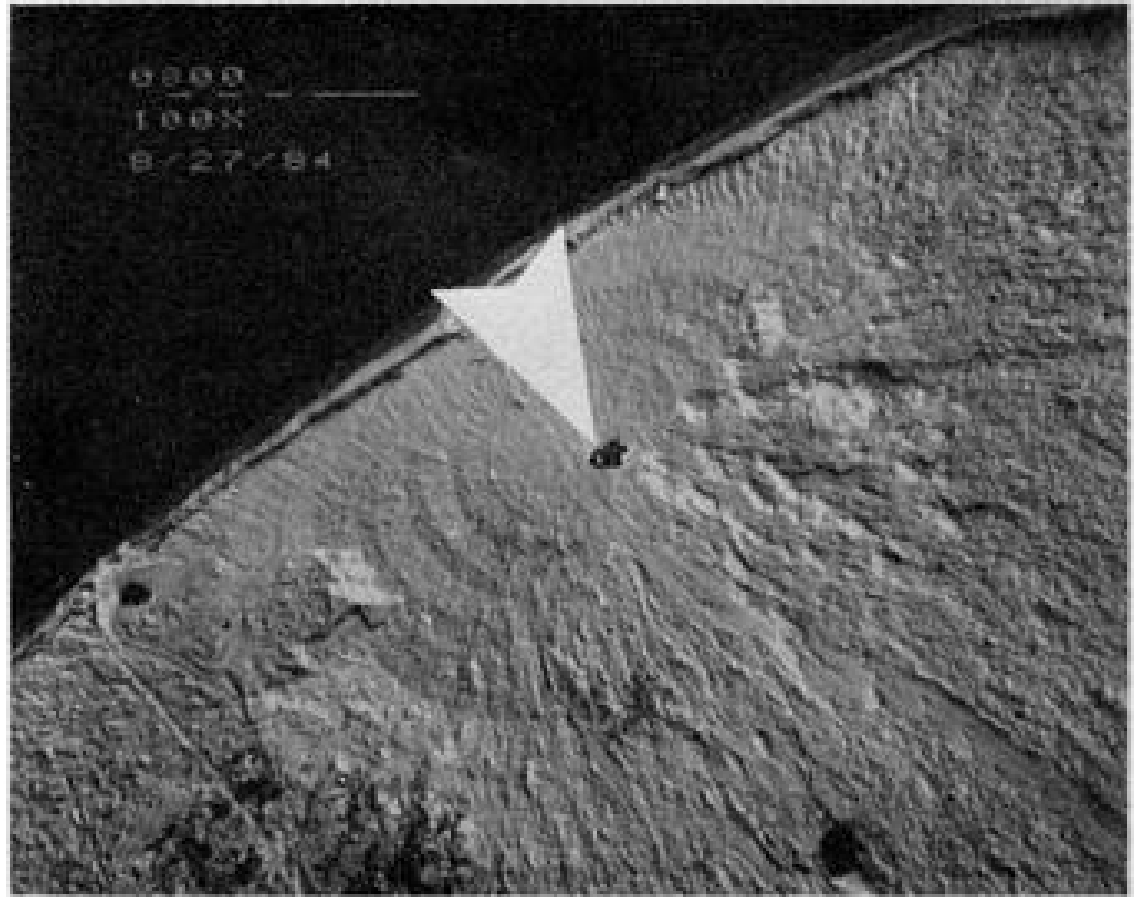


The primary fatigue fracture originated at A, while a smaller crack was progressing at B. Note that no beachmarks are visible because of the continuous testing and that both origins are near the inner edge of the induction-hardened zone. The larger fatigue crack (from A) was in the left third of the fracture before it triggered a brittle fracture in the case (notice the chevron marks at lower right) and ductile fracture in the core. (Ref. 5)

**Fig. 12(b). Subsurface-origin fatigue fracture in an induction-hardened 3.25-in.-diam 1541 steel axle which was continuously tested in rotating bending fatigue in the laboratory.**

## Origem de fadiga sub-superficial

- ✓ As inclusões não metálicas duras, como os óxidos, concentram tensões no interior da peça, facilitando enormemente a nucleação de trincas de fadiga.



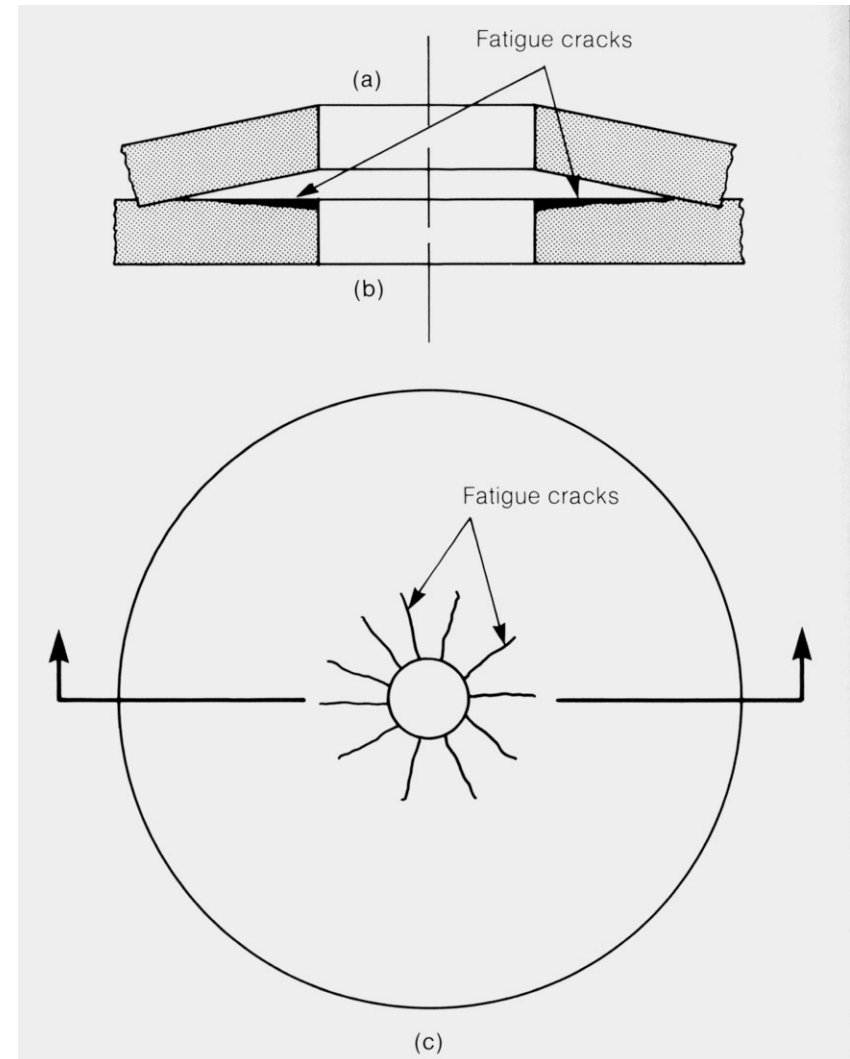




METMAT

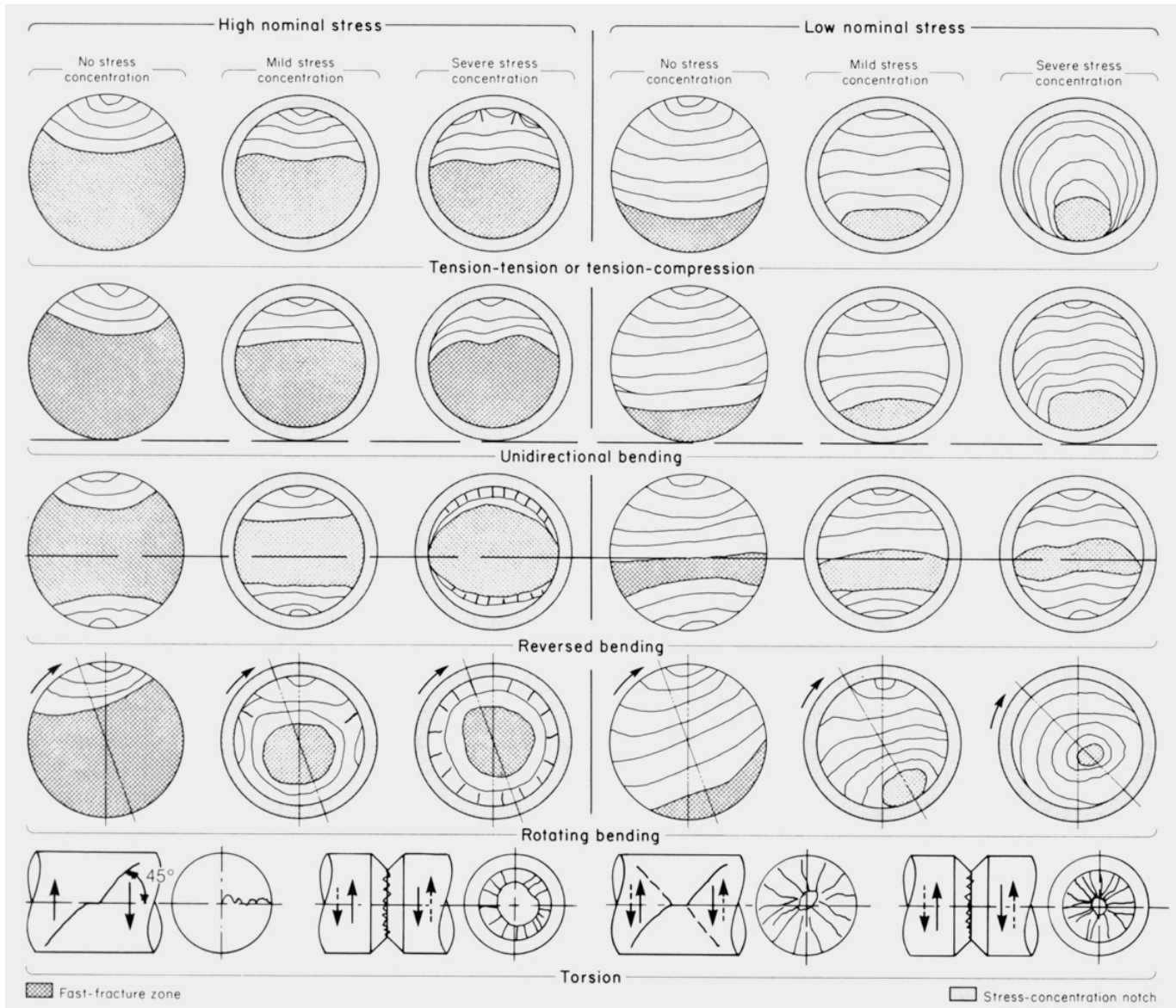
# Fadiga sob compressão

- ✓ Escoamento plástico sob tensões de tração geram tensões residuais de compressão, quando a carga é aliviada.
- ✓ Escoamento plástico sob tensões de compressão geram tensões residuais de tração, quando a carga é aliviada.
- ✓ A mola prato existente em sistemas de embreagem é um caso típico.



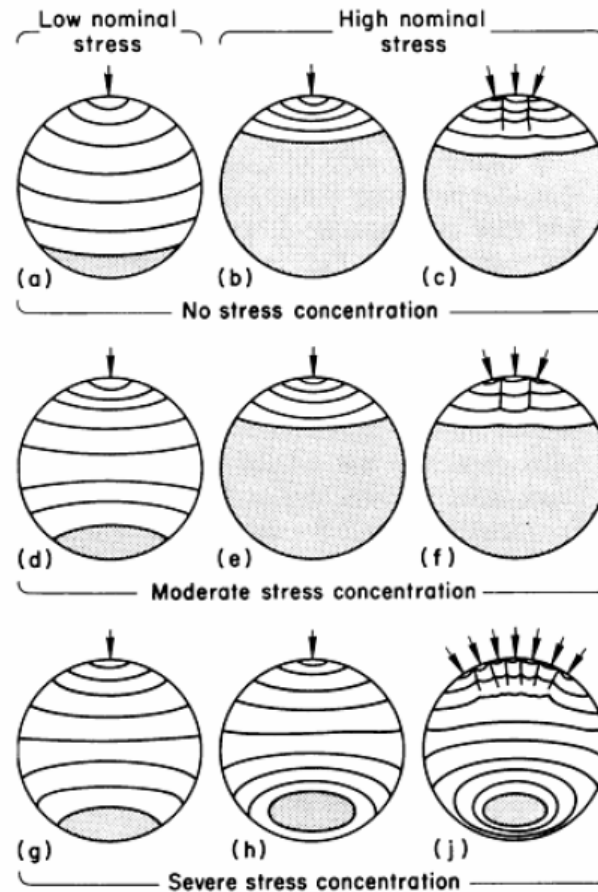
# Marcas de praia em superfícies de fratura

(em função da tensão e do nível de concentração de tensões)



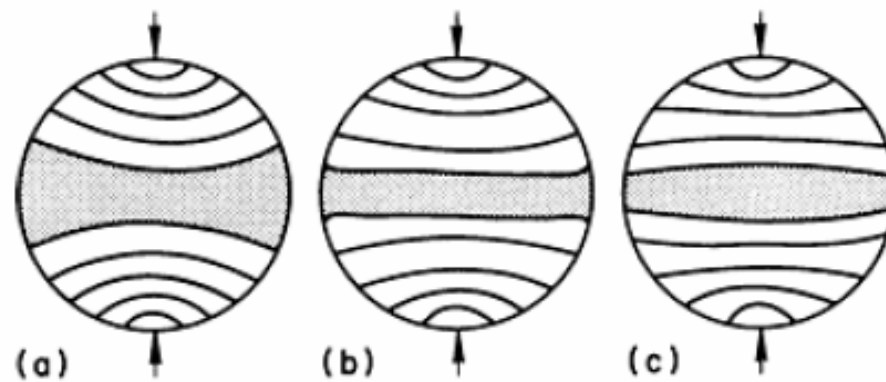
# Marcas de praia em superfícies de fratura

(em função da tensão e do nível de concentração de tensões)



**Fig. 2** Fatigue marks produced from single origins at low and high nominal stresses and from multiple origins at high nominal stresses. Fatigue marks are typical for a uniformly loaded shaft subjected to unidirectional bending. Arrows indicate crack origins; final-fracture zones are shaded.

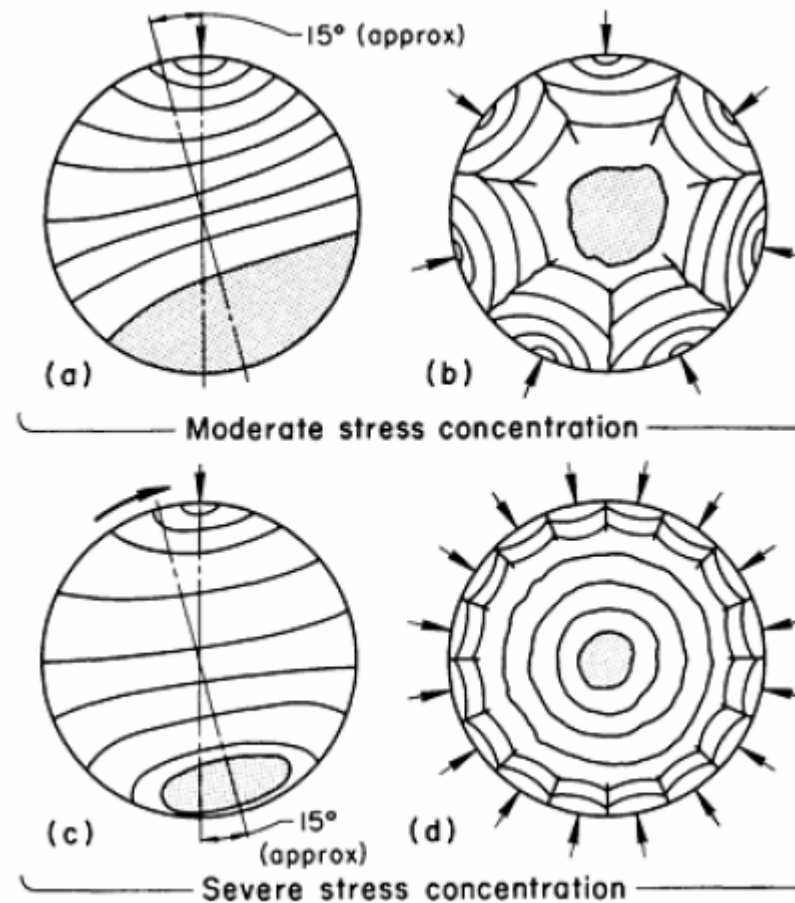
## Marcas de praia em superfícies de fratura (em função da tensão e do nível de concentração de tensões)



**Fig. 4 Typical fatigue marks on the fracture surface of a uniformly loaded nonrotating shaft subjected to reversed-bending stresses. (a) No stress concentration. (b) Moderate stress concentration. (c) Severe stress concentration. Arrows indicate crack origins; shaded areas are final-fracture zones.**

## Marcas de praia em superfícies de fratura

(em função da tensão e do nível de concentração de tensões)



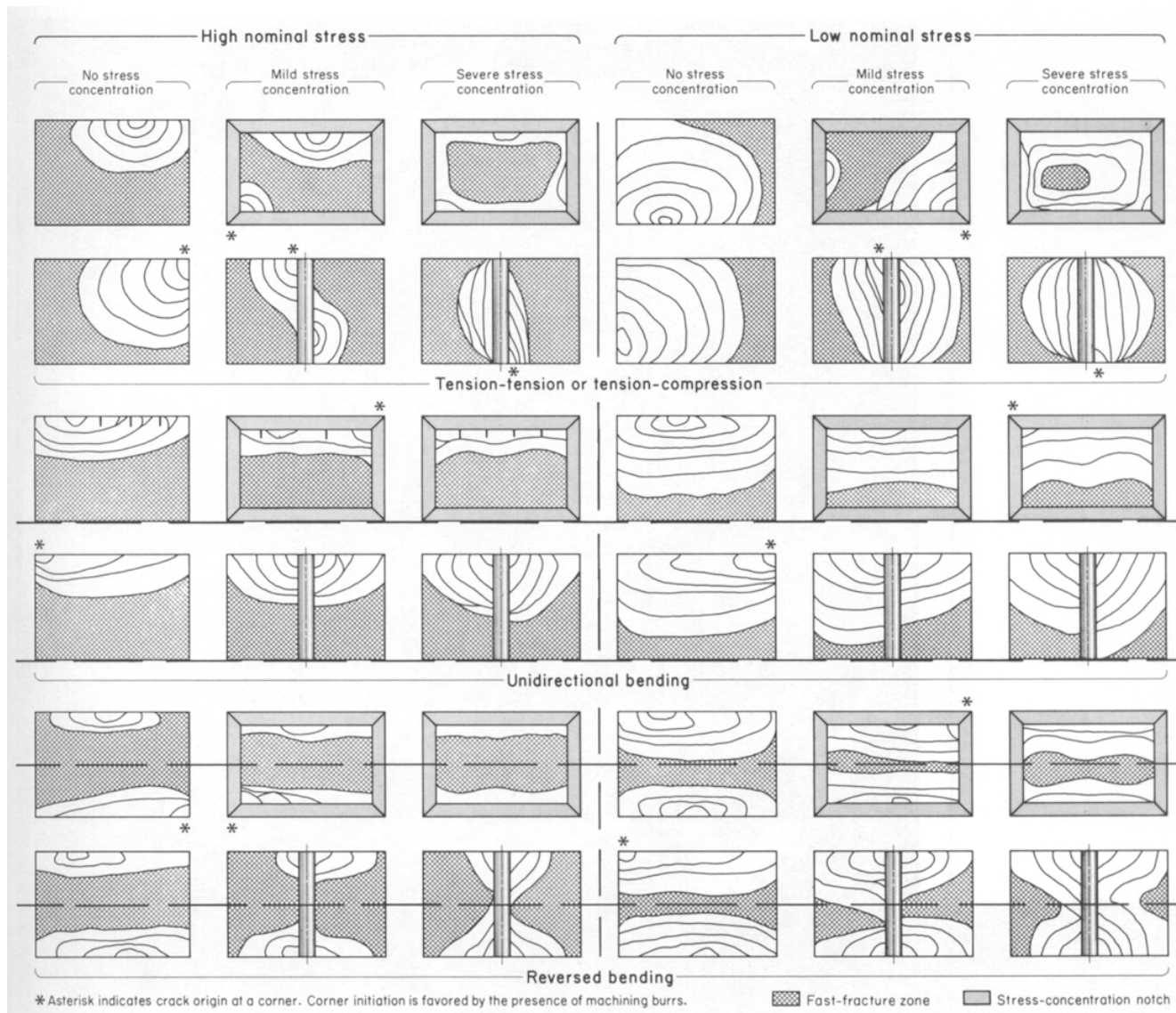
**Fig. 5** Typical fatigue marks on the fracture surface of a uniformly loaded rotating shaft. Marks are produced from single and multiple origins (arrows) having moderate and severe stress concentration; shaded areas are final-fracture zones. Shaft rotation is clockwise.



METMAT

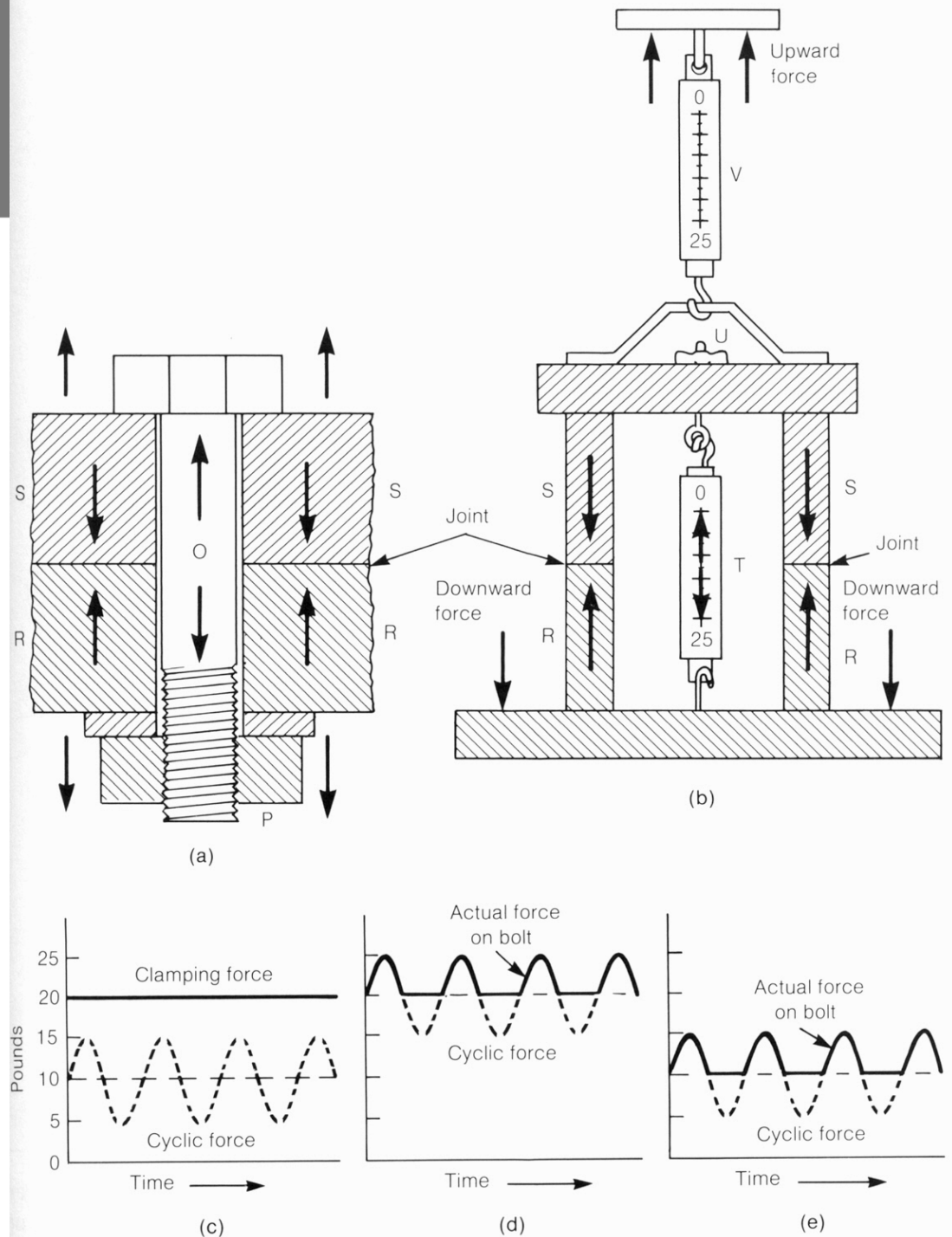
# Marcas de praia em superfícies de fratura

(em função da tensão e do nível de concentração de tensões)



# Fadiga de parafusos

- A fratura por fadiga de um parafuso somente pode ocorrer se a força aplicada (que tende a deformar ou fraturar o parafuso) excede a força de aperto.
- Isto ocorre se:
  - ✓ a força cíclica aplicada é muito alta, ou
  - ✓ a força de aperto é muito baixa, ou
  - ✓ ambas as situações se dão simultaneamente.
- Um parafuso trabalha como se fosse uma mola de alta rigidez.



# Fadiga de parafusos

- ✓ Em (a) uma força de tração, no parafuso O e na porca P, pressionam as peças R e S com uma força de aperto representada pelos vetores. A força de tração no parafuso, originada pelo aperto da porca, é igual à força de aperto que fecha a junta.
- ✓ O esquema em (b) mostra um balanço de mola T de 25 kgf, que pode ser ajustado por uma porca U para dar aperto na junta.
- ✓ Uma outra balança de mola V pode ser puxada para cima tentando separar a junta.

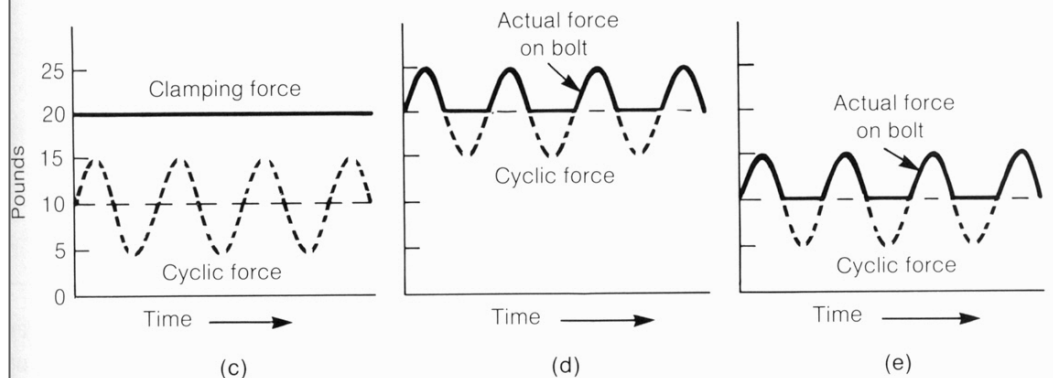
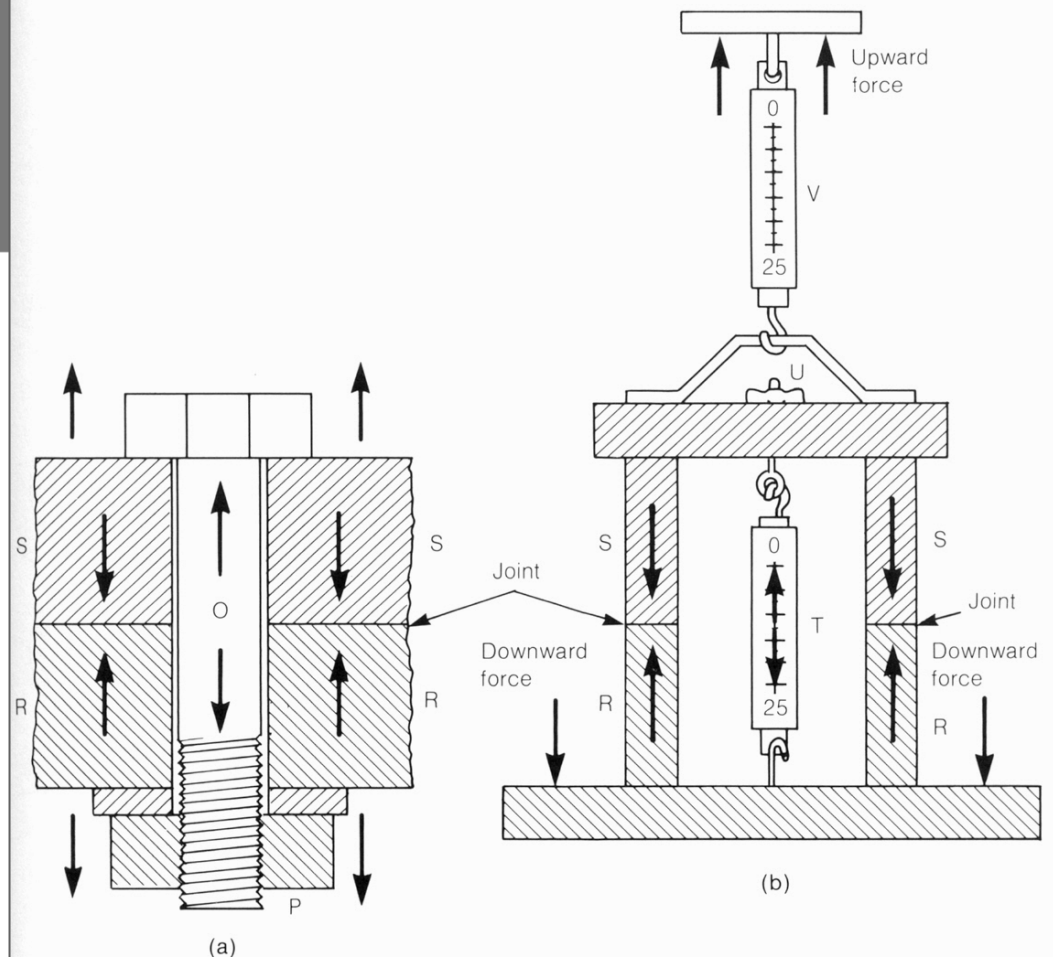


Fig. 14. Demonstration of fatigue of a bolted joint. See text for discussion.



# Fadiga de parafusos

- ✓ Se a força de aperto é ajustada para 20 kgf, a junta não separa (nem a força no parafuso excede 20 kgf), se a força aplicada em V não for maior que 20 kgf gráfico (c), onde a carga cíclica varia entre 5 e 15 kgf.
- ✓ Se a carga cíclica for aumentada para uma faixa entre 15 e 25 kgf. A força máxima no parafuso sobe para 25 kgf (arranjo em série) (d). Quando isto ocorre a junta separa e o parafuso sofre uma força cíclica, que pode levar à fratura por fadiga do parafuso.
- ✓ Se a carga de aperto for diminuída para 10 kgf, a carga cíclica aplicada à junta novamente excede a carga de aperto, a junta separa e o parafuso fica sujeito à fratura por fadiga (e).

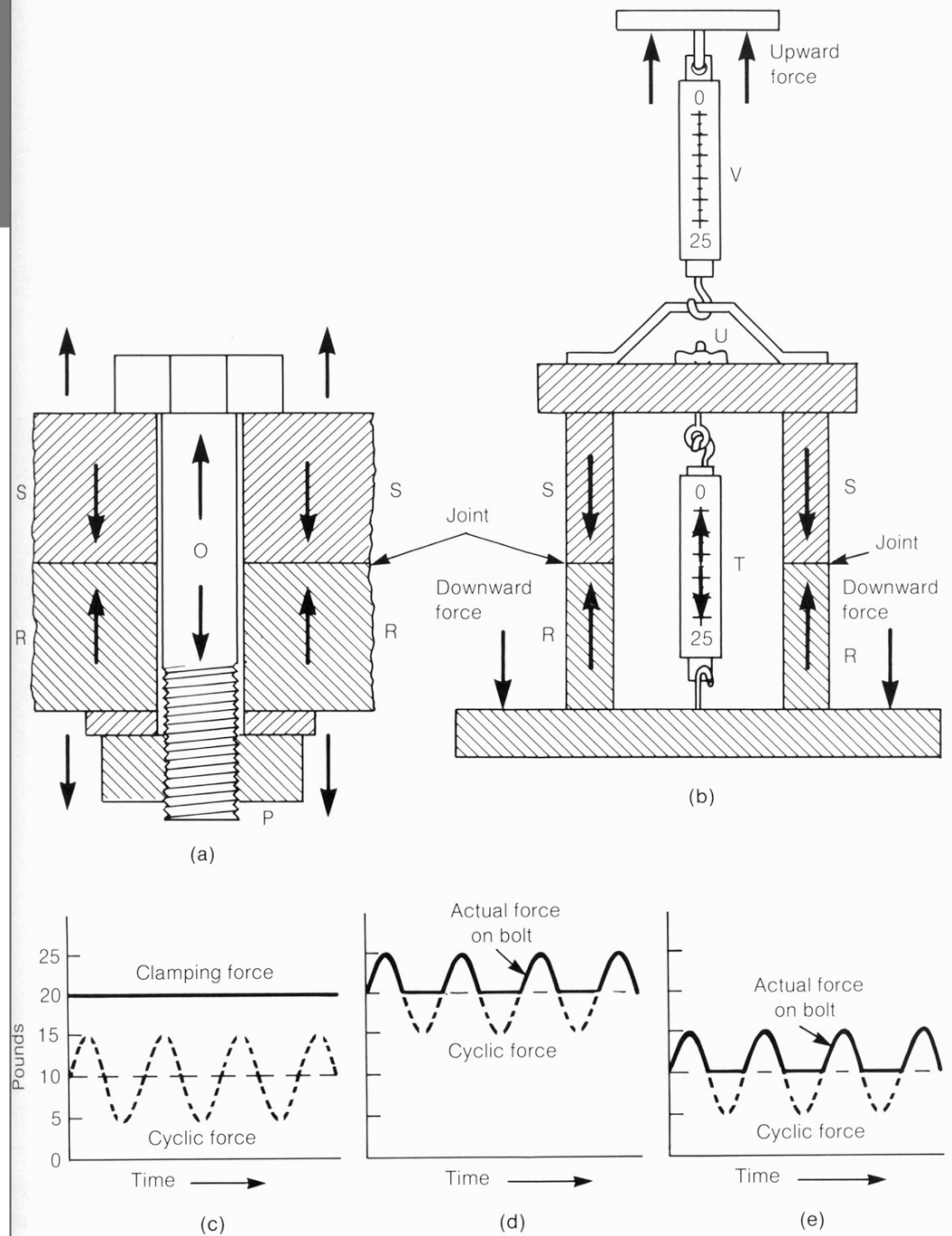


Fig. 14. Demonstration of fatigue of a bolted joint. See text for discussion.



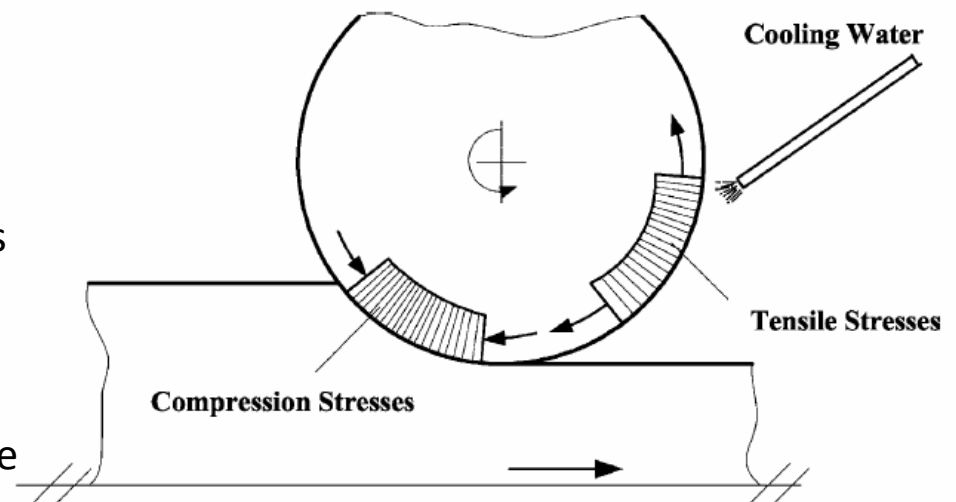
METMAT

# Fadiga térmica

Durante laminação, devido ao contato com as tiras ou barras, aquecidas a 1250 °C, a superfície do cilindro é aquecida até temperaturas da ordem de 500 a 600 °C, em tempos de um a dois segundos e em seguida resfriados até 80°C em cerca de 4 segundos.

As variações térmicas promovem fadiga térmica acentuada em uma profundidade de 1 a 2 mm: tensões compressivas longitudinais e transversais são geradas à medida em que a superfície do cilindro é aquecida até que o cilindro sofra deformação plástica (determinada pelo limite de escoamento na temperatura e pelo coeficiente de expansão térmica da liga).

Durante o ciclo de resfriamento são geradas tensões de tração e escoamento plástico adicional.



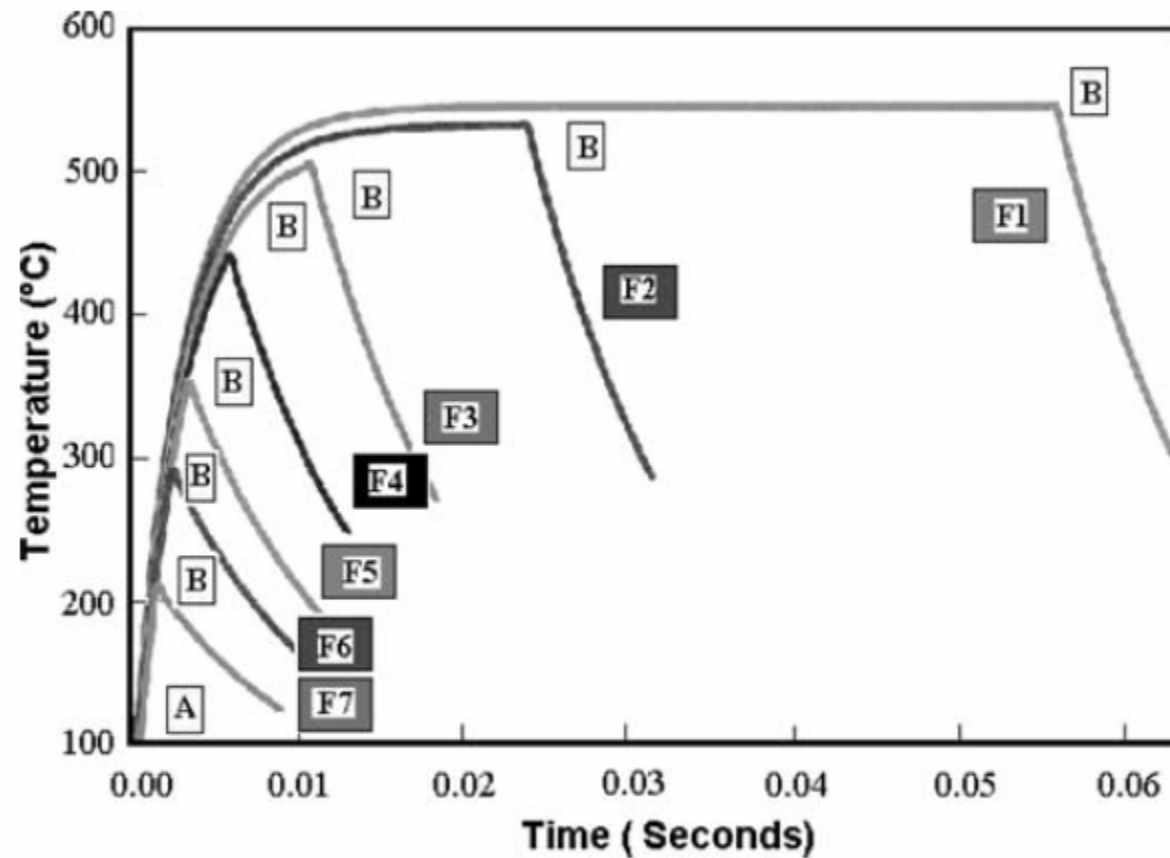


Fig. 3. Surface temperature variation in the finishing stands of HSM.

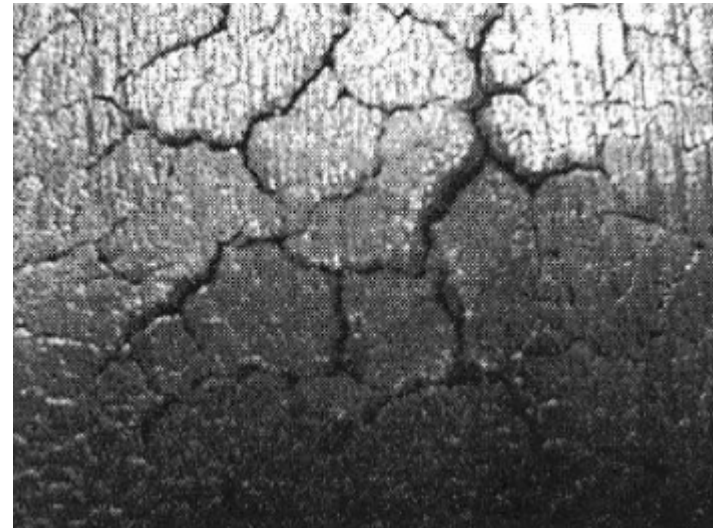
# Fadiga térmica

As tensões térmicas são tão elevadas que um padrão de trincas se desenvolve logo após um período curto de trabalho

As trincas são mais profundas nos cilindros nas primeiras cadeiras de laminação

Essas trincas crescem e se ramificam devido às elevadas tensões geradas a cada rotação, no contato entre o cilindro de trabalho e o cilindro de encosto. As tensões de Hertz atingem 2000 MPa.

O cilindro de trabalho sofre, também, oxidação e processos de desgaste abrasivo



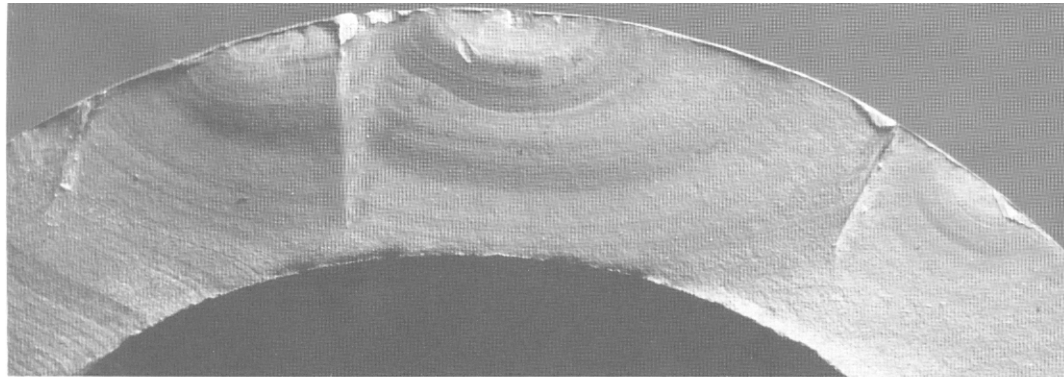
# Fraturas por fadiga



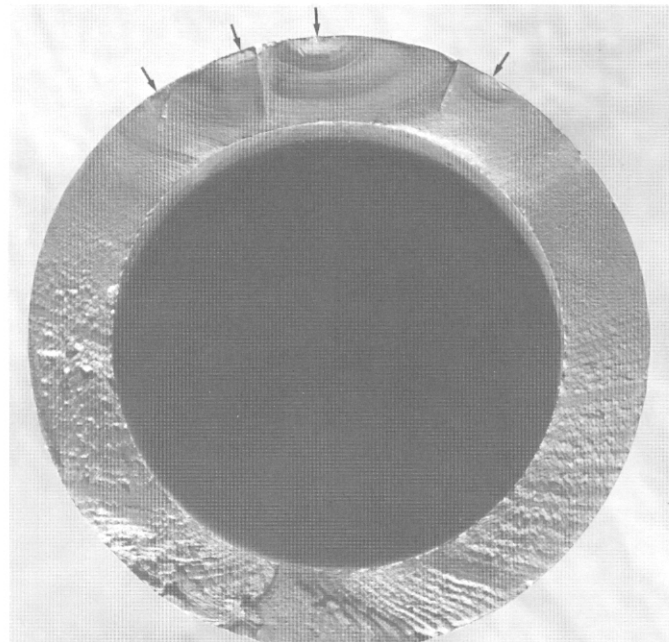
# Fraturas por fadiga



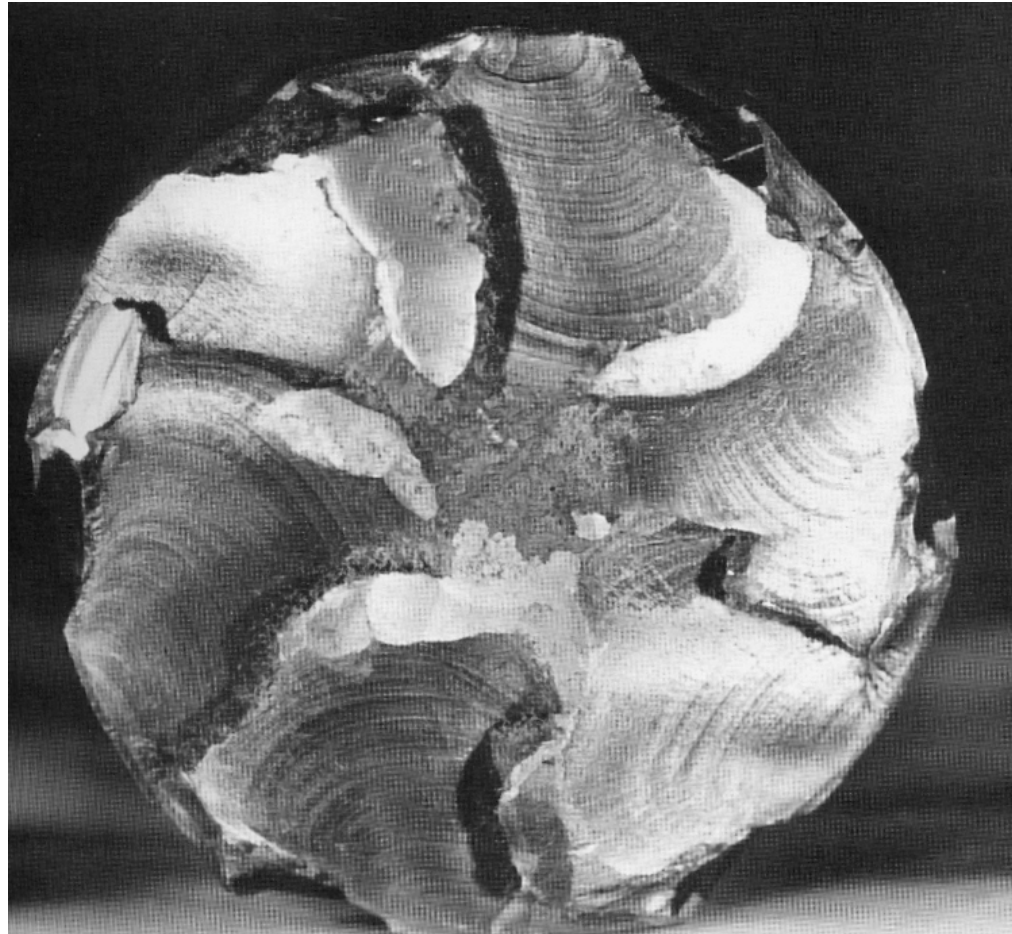
# Fraturas por fadiga



(a)



# Fraturas por fadiga

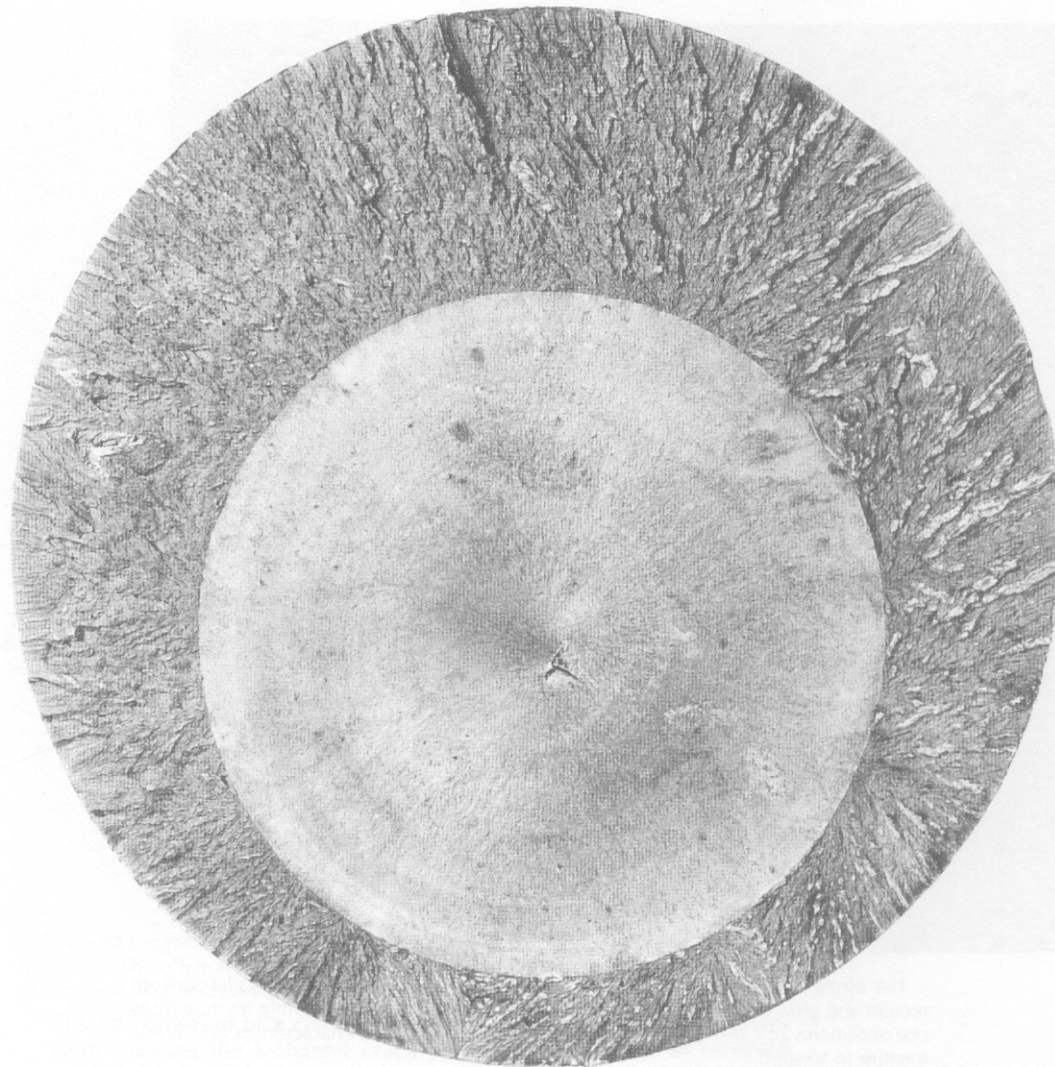






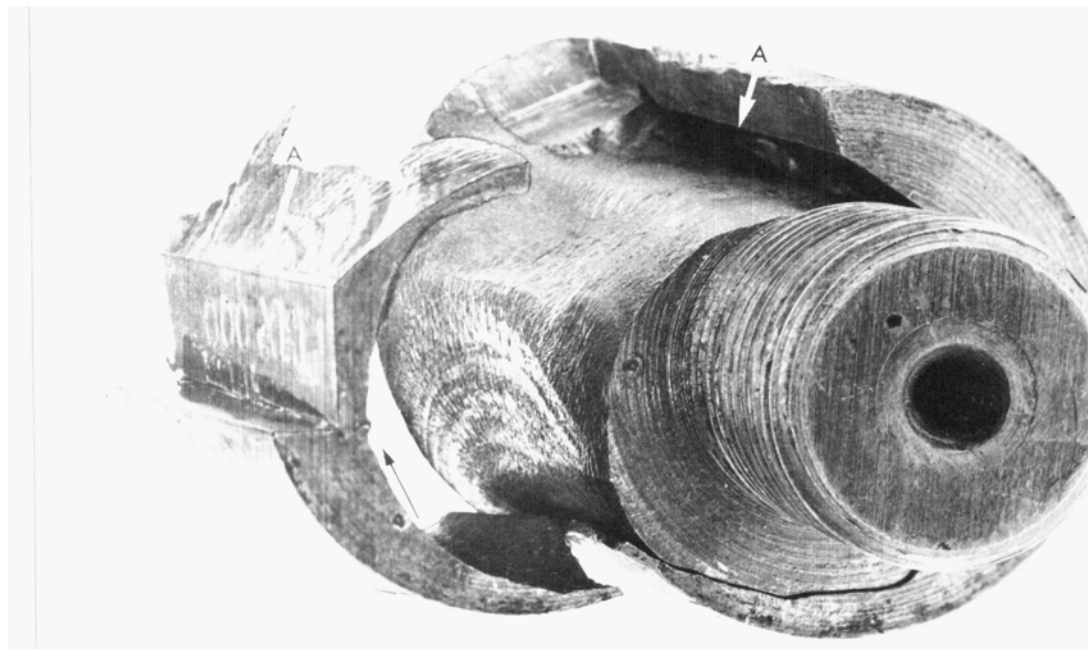
METMAT

# Fraturas por fadiga



In an axially loaded part such as this, fatigue fracture can start anywhere in the cross

# Fraturas por fadiga

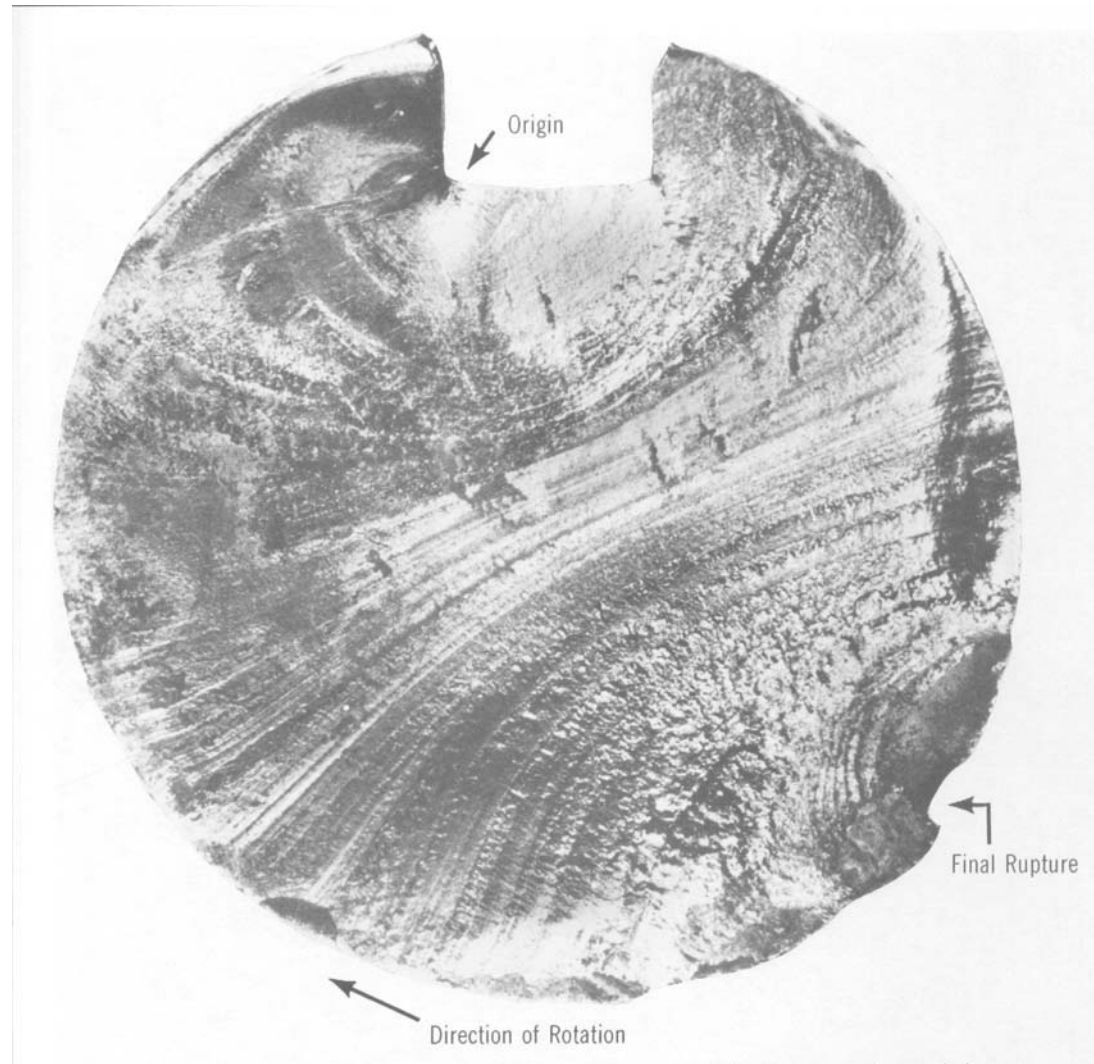


# Fraturas por fadiga

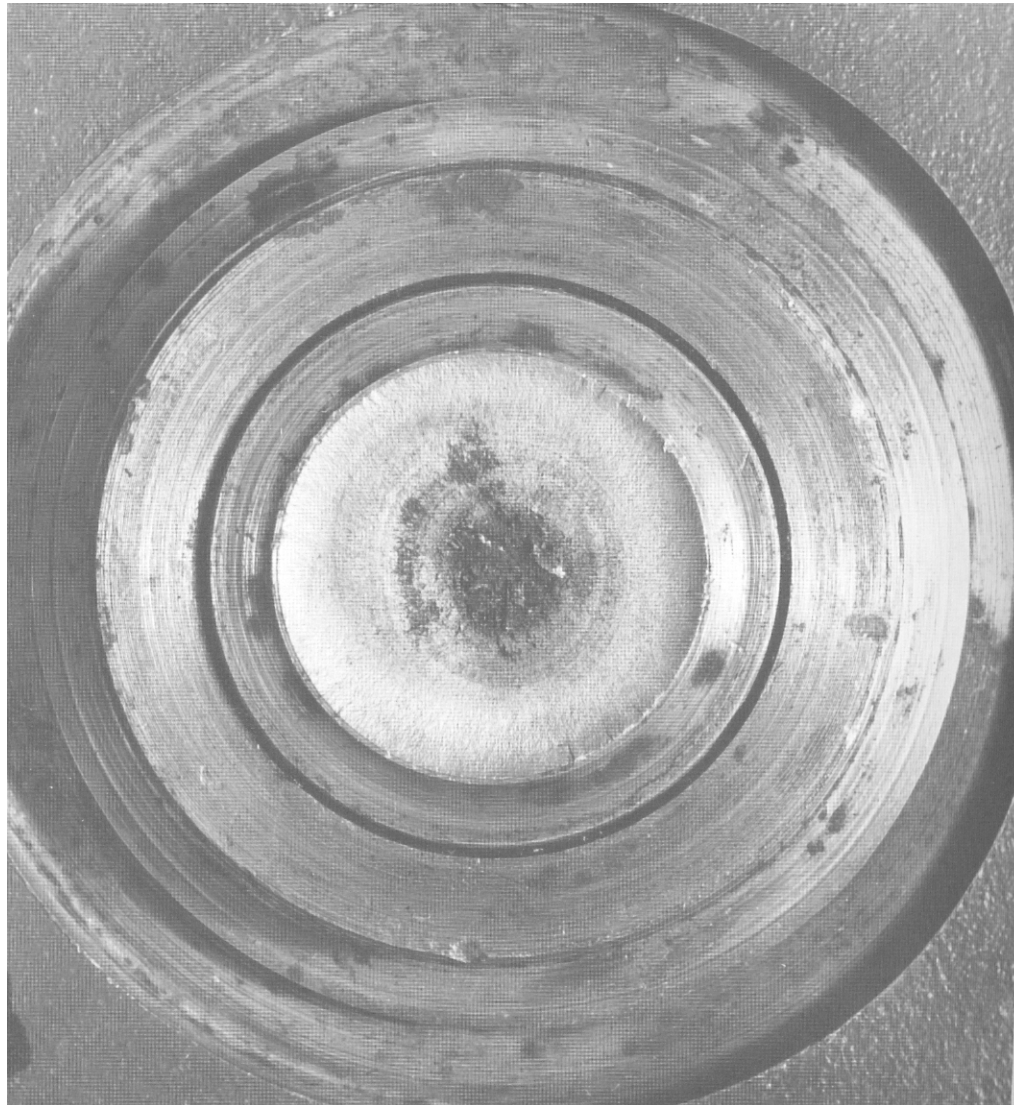




METMAT



# Fraturas por fadiga



## Lascamento de cilindros

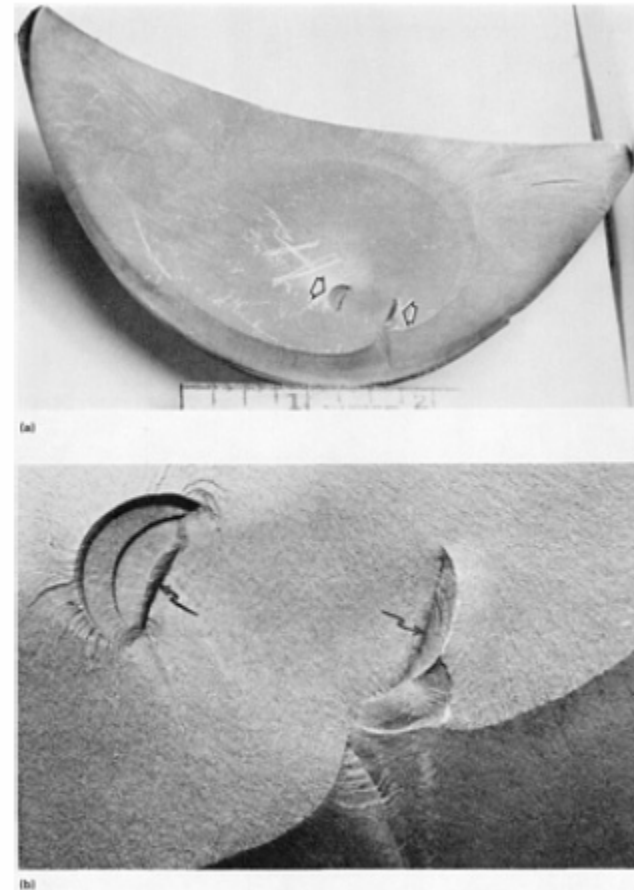
Spalling is the primary cause of premature failures of forged hardened steel rolls. Spalls are sections that have broken from the surface of the roll. In nearly all cases, they are observed in the outer hardened zone of the body surface, and they generally exhibit well-defined fatigue beach marks. The most common spalls are the circular spall and the line spall. Circular spalls exhibit subsurface fatigue marks in a circular, semicircular, or elliptical pattern. They are generally confined to a particular body area. A line spall has a narrow width of subsurface fatigue that extends circumferentially around the body of the roll. Most line spalls originate at or beneath the surface in the outer hardened zone. Figure 55 shows a classic example of a circular spall that formed beneath the surface in a hardened steel roll. The very clear development of the fatigue marks out to the overload zone is evident. Radial marks can be observed all around the overload portion starting from the last fatigue mark.



**Fig. 55** Circular spall that began at a large subsurface inclusion in a hardened steel roll

## Lascamento de cilindros

Figure 56 shows a circular spall that formed at the body shoulder of a forged hardened steel roll. Two small thumbnail-shaped fatigue cracks (see enlarged view) served as the origin. These two origins were connected by subsurface cracks (not shown). The overall view of the spall shows that the region around the two origins is relatively featureless. However, a faint ring around the two origins suggests that the crack propagated outward from the two origins, stopped, and then fractured by overload.



**Fig. 56** Circular spall from the shoulder of a forged, hardened alloy steel mill roll with two small fatigue origins. A subsurface crack connected the two fatigue zones. Note that the spall surface is relatively featureless. (a) About actual size. (b) 5.5×



METMAT

## Lascamento de cilindros

Figure 57 shows another circular spall--the mating fracture on the roll body rather than the spalled portion. The well-define fatigue origin (arrow) and beach marks are visible. The overload portion of the fracture exhibits much more detail than the previous failure. The overload portion exhibits a high density of ridge marks, and it appears to have grown cyclically in that there are a number of arrest points in its growth.

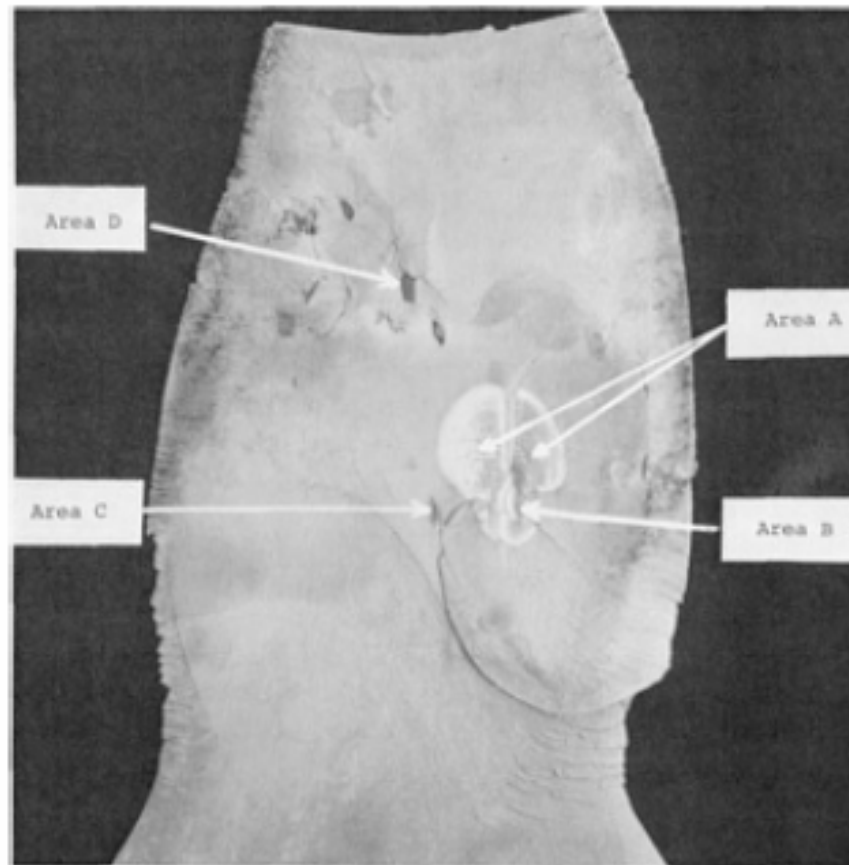


**Fig. 57** Circular spall on the surface of a forged, hardened alloy steel mill roll. The arrow indicates the fracture origin. Note the fatigue marks showing the growth away from the origin, followed by brittle fracture. 0.68x



## Lascamento de cilindros

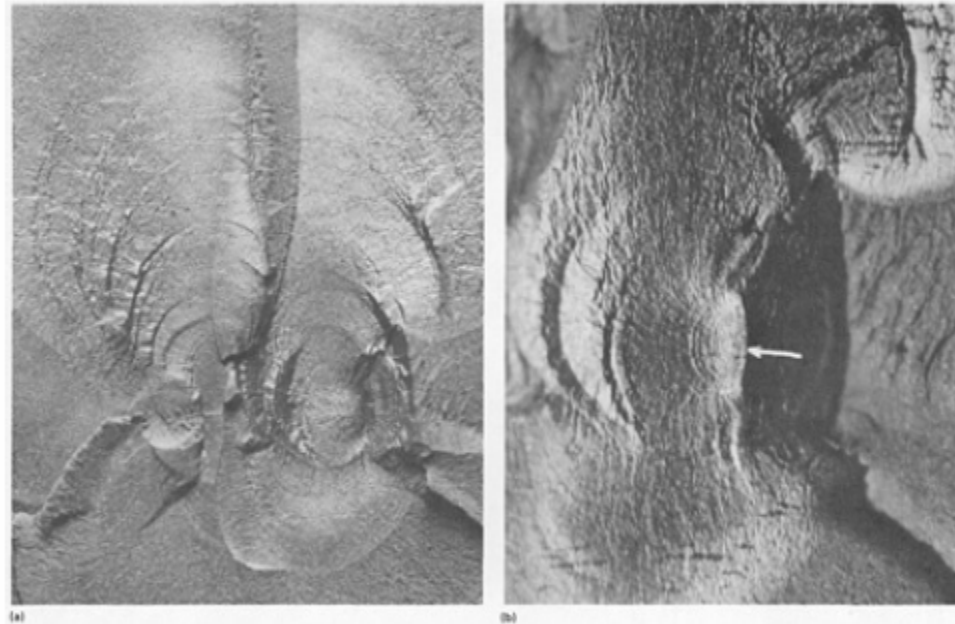
Figure 58 shows a circular spall from a forged hardened steel roll with well-defined fatigue origins (areas A and B) and other regions, such as areas C and D, away from the origin that exhibit beach marks. Enlargements of areas A to D are shown in Fig. 59 and 60. It is clear that the spall originated from the multiple fatigue origins in the light-colored area (A and B) near the center. However, it appears that other fatigue origins, such as at areas C and D, were also growing when the overload fracture occurred.



**Fig. 58** Spalled section from a forged, hardened alloy steel mill roll showing three regions with fatigue beach marks. The large, shiny region appears to be the origin. See Fig. 59 and 60 for close-up views of areas A, B, C, and D. 0.73x



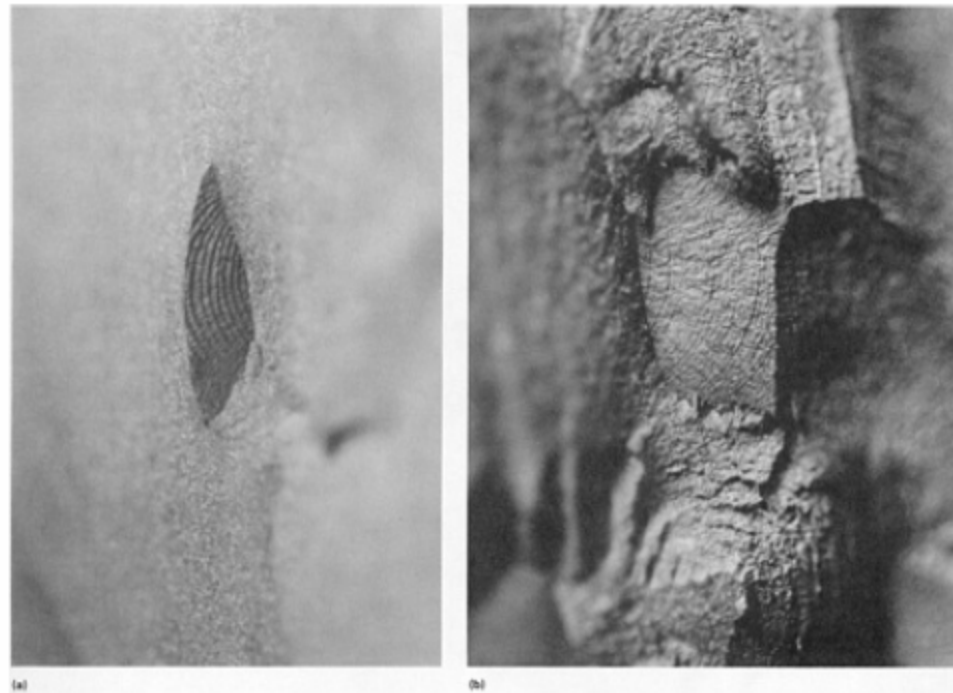
METMAT



**Fig. 59** Close-ups of the primary initiation site of the spall shown in Fig. 58. (a) Area A. 4x. (b) Area B. 8x. See also Fig. 60.



METMAT

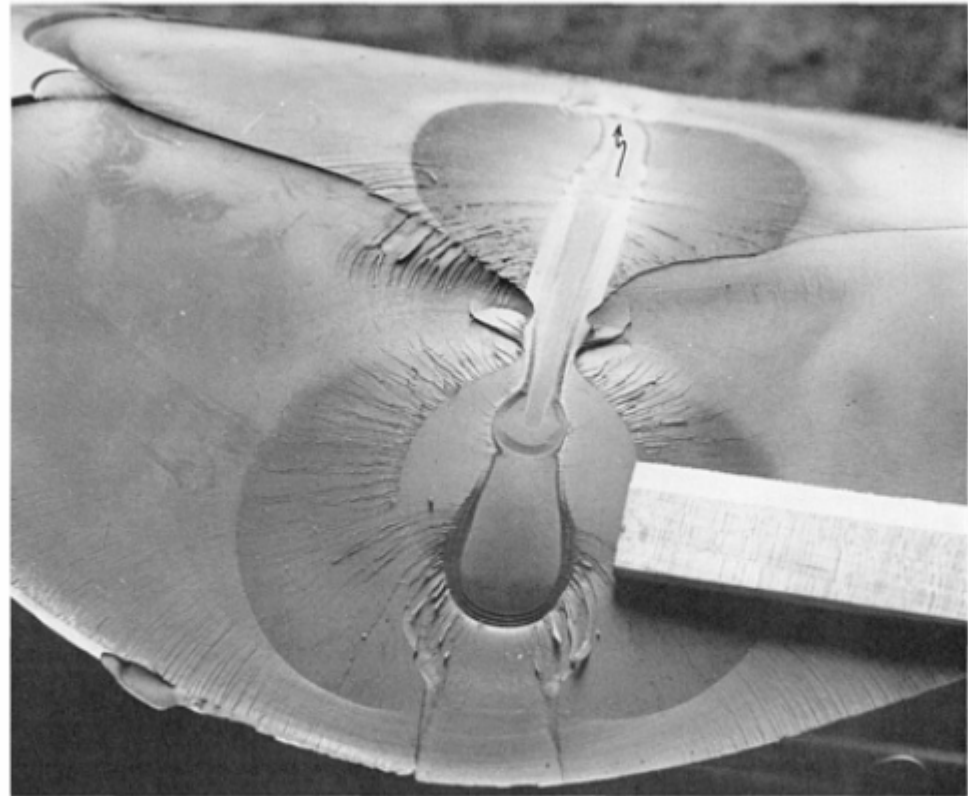


**Fig. 60** Close-ups of two regions of the spall surface shown in Fig. 58 that exhibited fatigue beach marks. (a) Area C. 10 $\times$ . (b) Area D. 9 $\times$ . See also Fig. 59.



METMAT

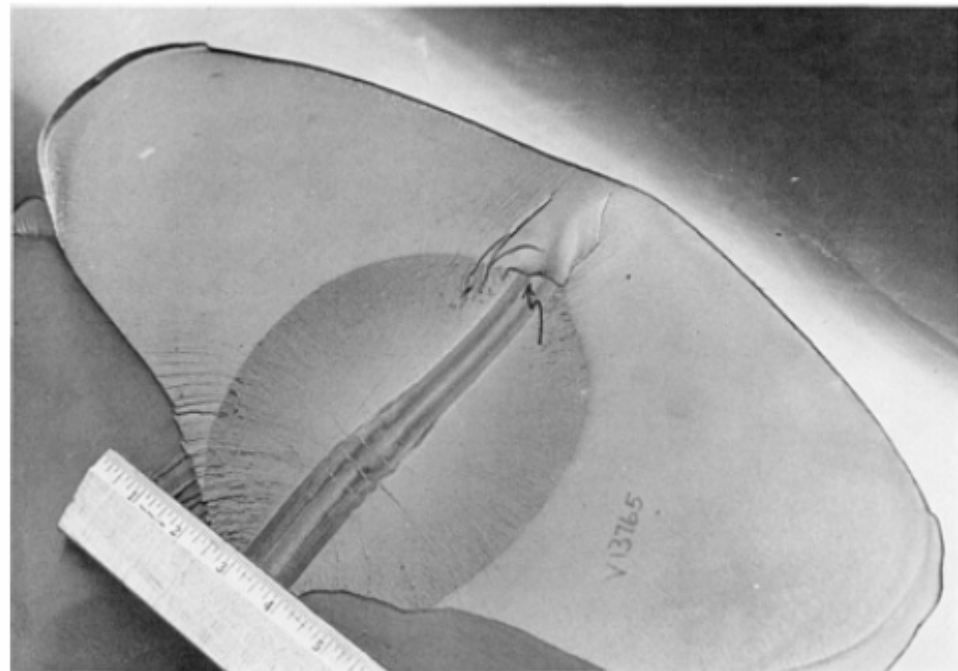
Figures 61 and 62 show two views of a line spall fracture in a 545-mm diameter forged hardened steel roll. The term line spall comes from the linear shape of the fatigue portion of the fracture that initiated rupture. In a line spall, the linear fatigue portion often runs part way around the periphery; the overload portion and the overall shape of the spalled section need not be linear.



**Fig. 61** Example of a line spall in a forged, hardened alloy steel mill roll. Note that the portion that spalled off broke as two sections, with the fractures propagating from the two circular fatigue regions growing from the line spall. The arrow at the top indicates that the spall continued under the unbroken roll surface. Ultrasonic examination showed that it progressed another 137 mm ( $5\frac{3}{8}$  in.) under the surface at a maximum depth of 11 mm ( $\frac{7}{16}$  in.). The subsurface, unspalled portion of the roll is shown in Fig. 63; Fig. 62 is another view of the line spall.

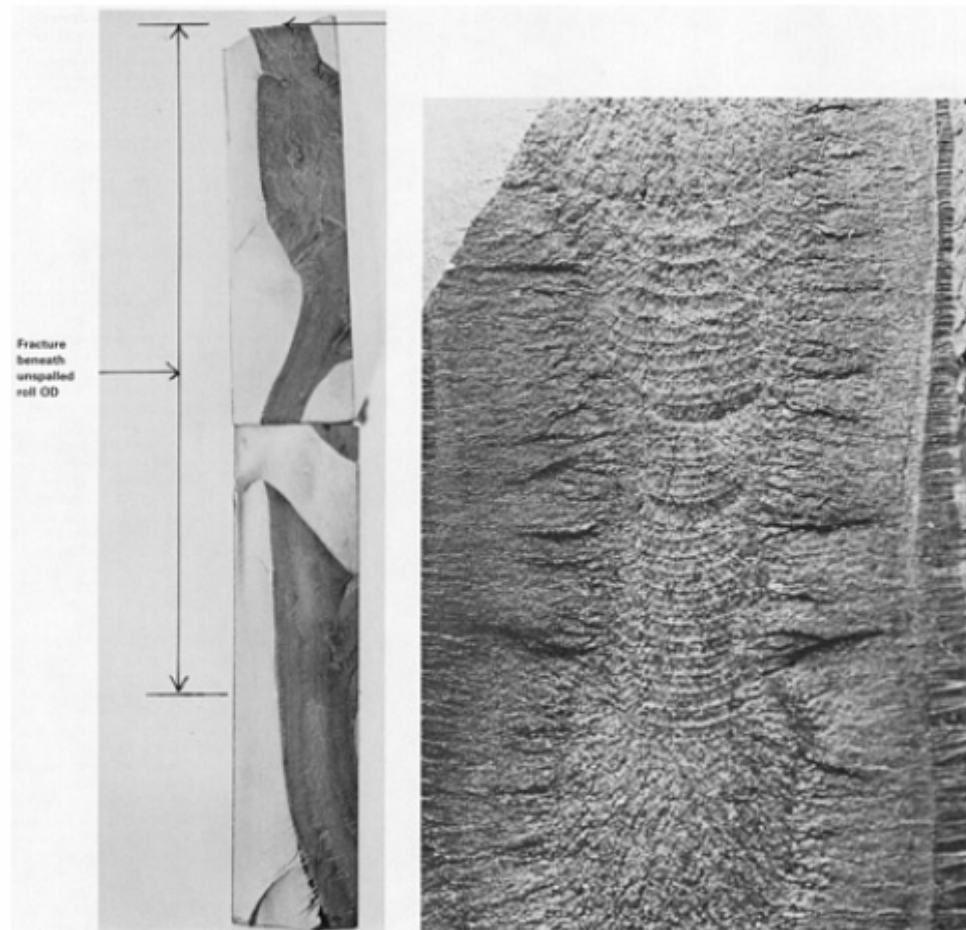
## Lascamento de cilindros

The arrows in Fig. 61 and 62 indicate the portion of the line spall that extended under the unbroken portion of the roll body. This area was opened and is shown in Fig. 63, along with an enlarged view of the fatigue marks at the origin of the line spall. Figures 61 and 62 show that the spalled portion broke off as two pieces. The radial marks around the two spalled regions (Fig. 61 and 62) show how the overload portion of the fracture formed around the line spall.



**Fig. 62** Another view of the line spall shown in Fig. 61. The arrow indicates the location of the line spall under the unfractured surface. See also Fig. 61 and 63. 0.6x

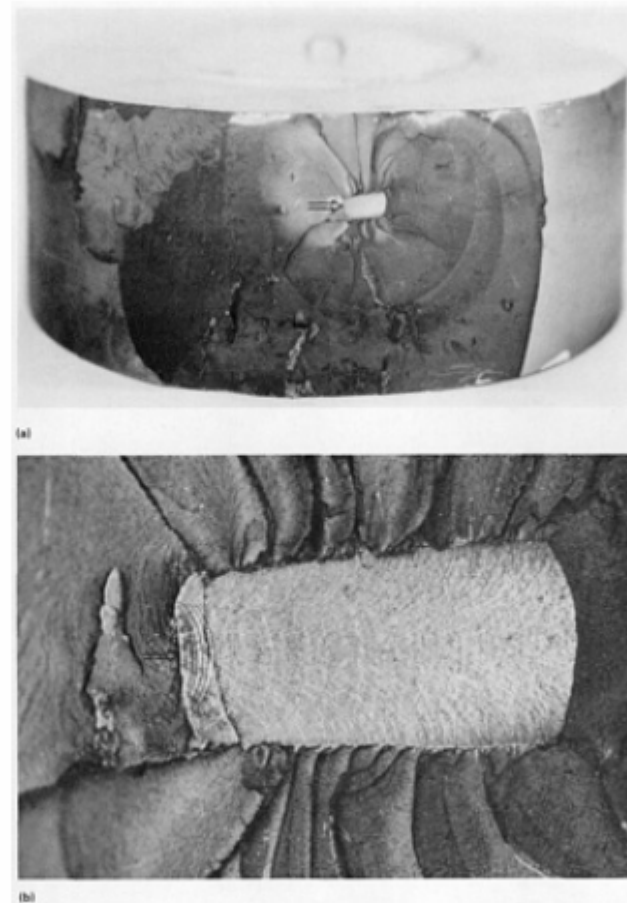
## Lascamento de cilindros



**Fig. 63** The line spall fracture surface beneath the unspalled roll surface (see Fig. 61 and 62), revealed by sectioning and fracturing. The smooth, white fracture region formed when the spall was opened. The arrow at the top indicates the origin, shown at the right at higher magnification, which revealed beach marks.

## Lascamento de cilindros

Figure 64 shows another example of a line spall on a hardened steel roll body. In this case, the spall is rather small and did not progress far before the section spalled off. The enlarged view shows a well-defined fatigue origin (arrow). The ridge marks emanating from the fatigue area clearly reveal the crack growth direction in the overload portion.



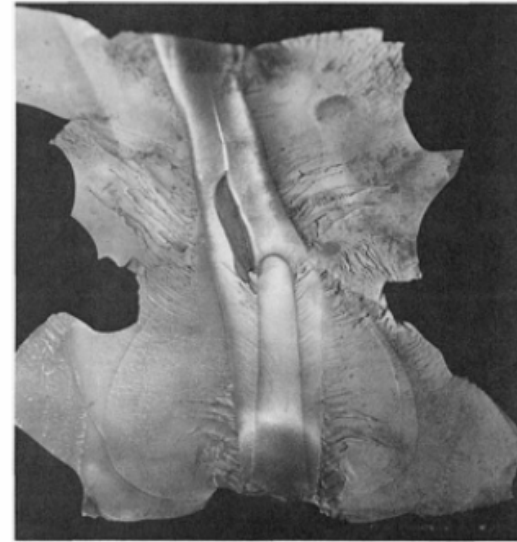
**Fig. 64** Example of a line spall in a forged, hardened steel roll. (a) Section containing the spall cut from the roll. The arrow indicates the origin of the fracture, about 6 mm (0.25 in.) below the roll surface. (b) The fracture origin at 6.5 $\times$ . Fatigue beach marks originate at the arrow; gross fracture marks can be seen radiating from the fatigue zone.



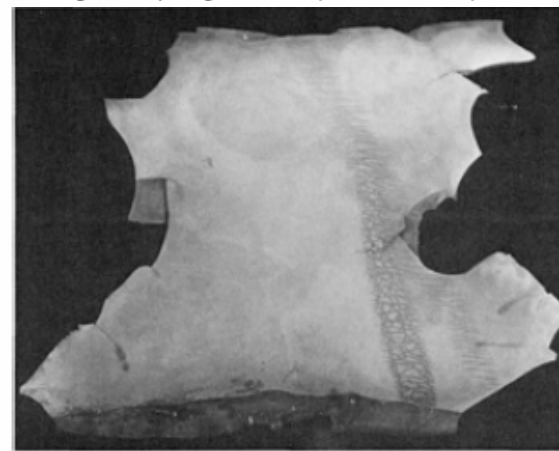
METMAT

## Lascamento de cilindros

Figure 65 shows another example of a line spall fracture from a hardened steel roll. Fine fatigue marks can be seen in the finger-shaped portion of the line spall fracture at the bottom of the macrograph. The marks indicate that the crack growth direction was from the arrow at the bottom of the picture and toward the top. After the linear portion in the center of the spall formed, final rupture occurred from the linear portion outward, as indicated by the ridge marks in the overload zone and their origin at the boundary of the linear portion of the spall. Figure 66 shows the outer roll surface of the spall, that is, the reverse side shown in Fig. 65. Macroetching of the surface revealed two intersecting craze crack patterns indicative of abusive service conditions.



**Fig. 65** Macrograph showing a line spall that broke off a forged, hardened alloy steel roll. The central region of the fracture shows evidence of crack growth by fatigue. Final rupture occurred by brittle fracture. See also Fig. 66.



**Fig. 66** The roll surface of the spall shown in Fig. 65 after macroetching with 10% aqueous  $\text{HNO}_3$ . Etching revealed a craze crack pattern similar to heat checks, caused by abusive service conditions. About 0.5x