

Conformação Plástica

- Deformação plástica de metais
- Encruamento e Recristalização
- Processos de conformação

Deformação de Monocristal

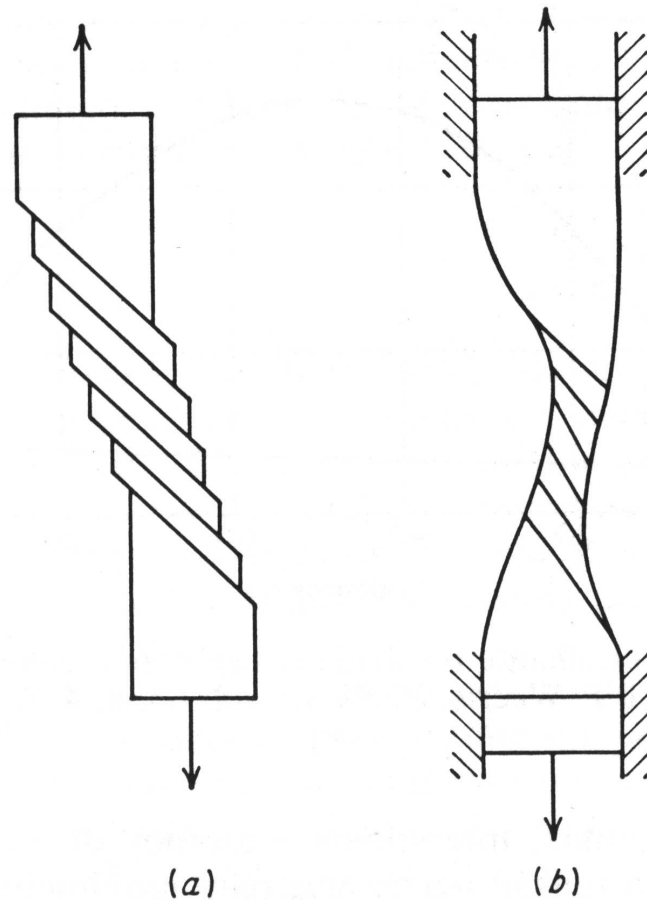


Fig. 4.22 (a) Deformação em tração de um monocristal, sem restrição; (b) rotação dos planos de deslizamento devido à restrição.

Deformação de Monocristal

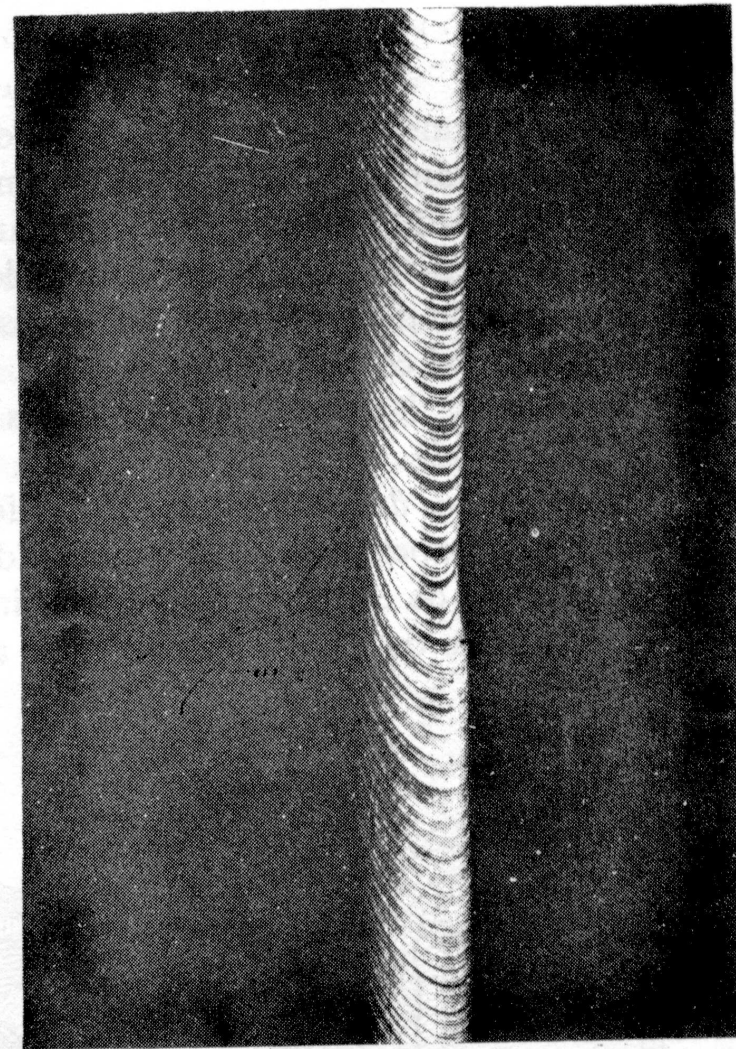
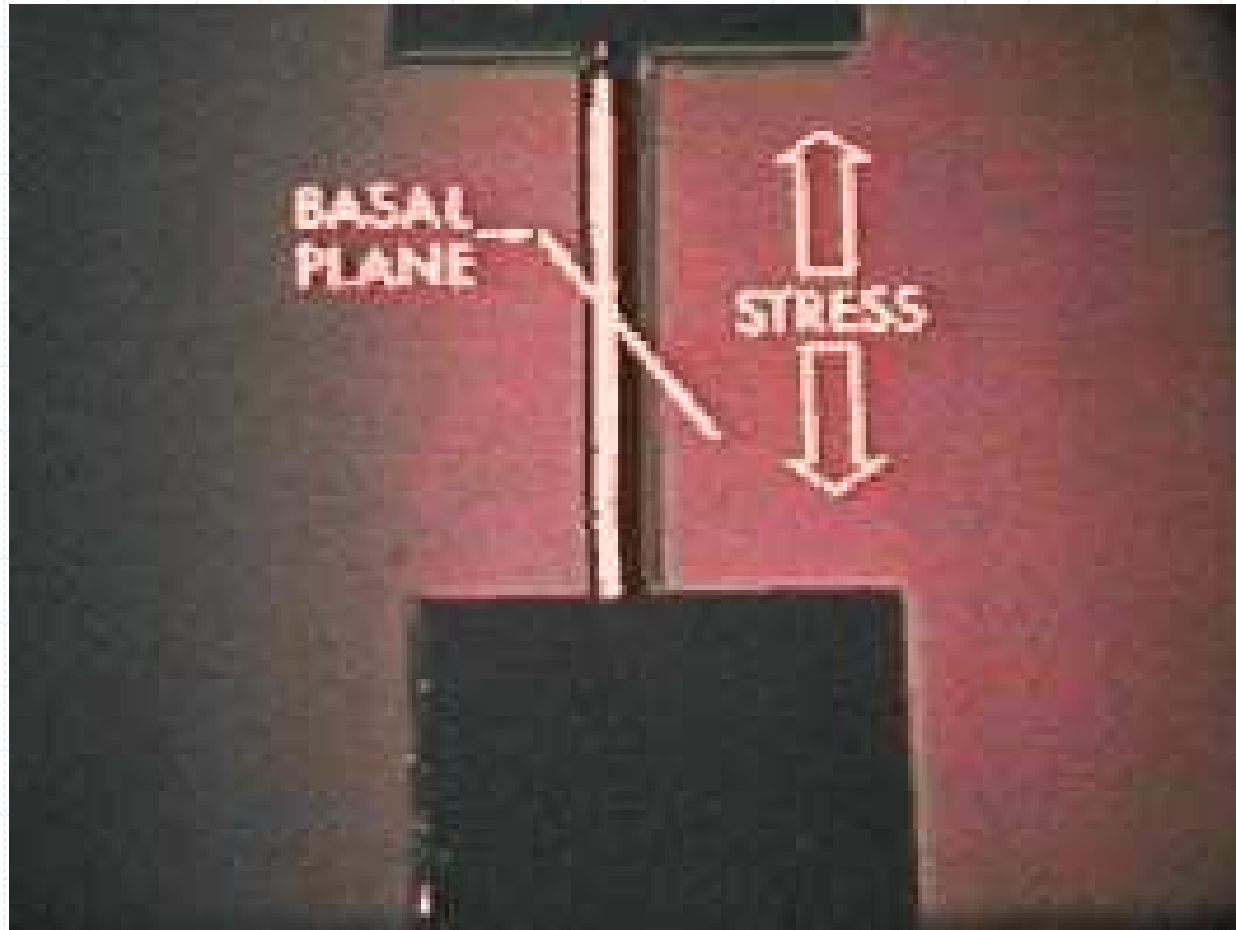


Fig. 6-11. Corpo de prova de um monocristal de um metal hc. O escorregamento ocorre paralelo ao plano cristalino de escorregamento mais fácil (Constance Elam, *The Distortion of Metal Crystals*. Oxford: Clarendon Press, 1935).

Deformação de Monocristal



Deformação de Policristalinos



Fig. 6-23. Cobre policristalino deformado plásticamente (25 ×). Os traços dos planos de escorregamento aparecem na superfície polida do metal (B. A. Rogers).

Lei de Schmid

$$\tau_e = \frac{F}{A_0} \cos \phi \cos \lambda$$

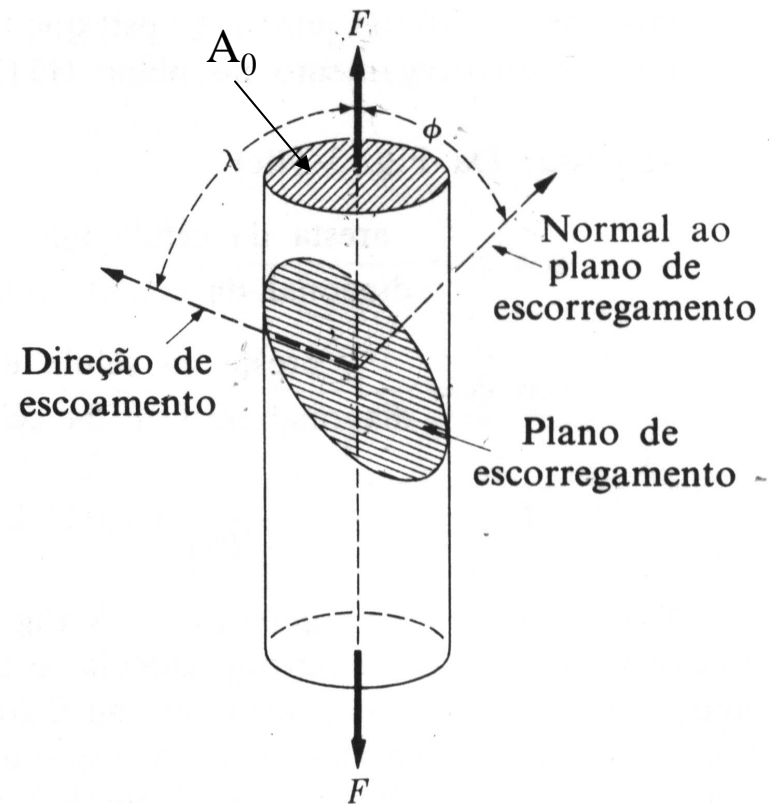


Fig. 6-14. Figura mostrando os ângulos λ e ϕ usados na determinação da tensão crítica de escorregamento.

Hipótese inicial de cisalhamento



Link

Discordância em cunha

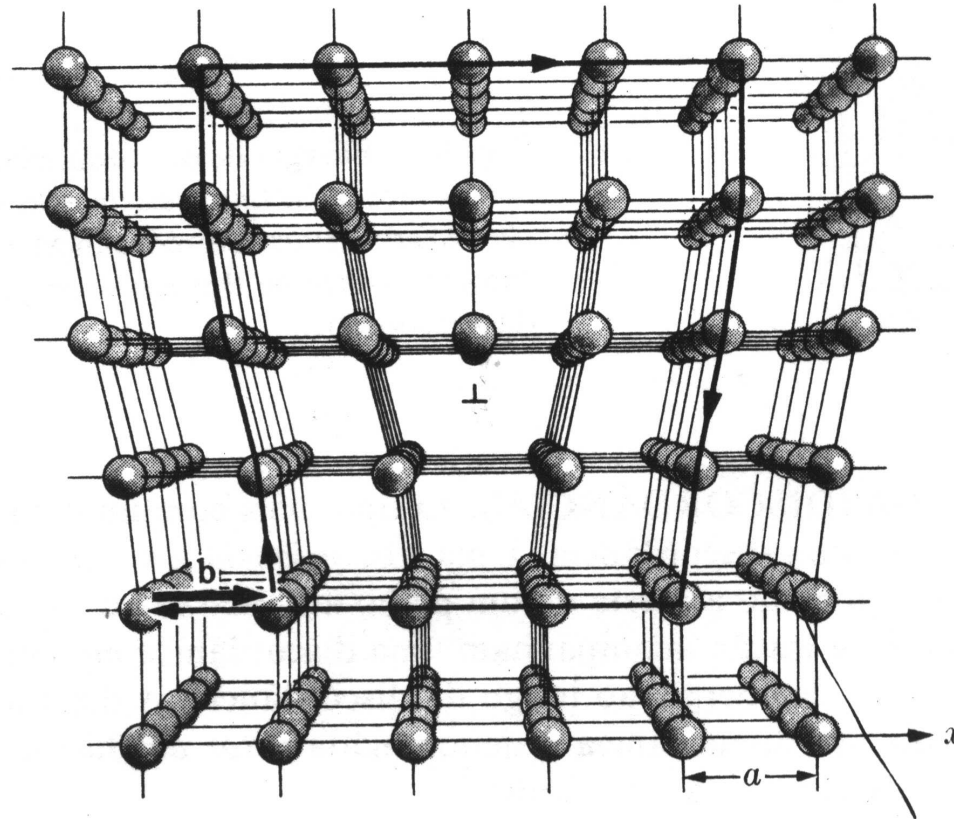


Fig. 4-10. Discordância em cunha. Um defeito de linha ocorre na aresta de um plano atômico extra. (Guy, A. G., *Elements of Physical Metallurgy*, Reading, Mass.: Addison Wesley, 1959, pág. 110).

Discordância em hélice

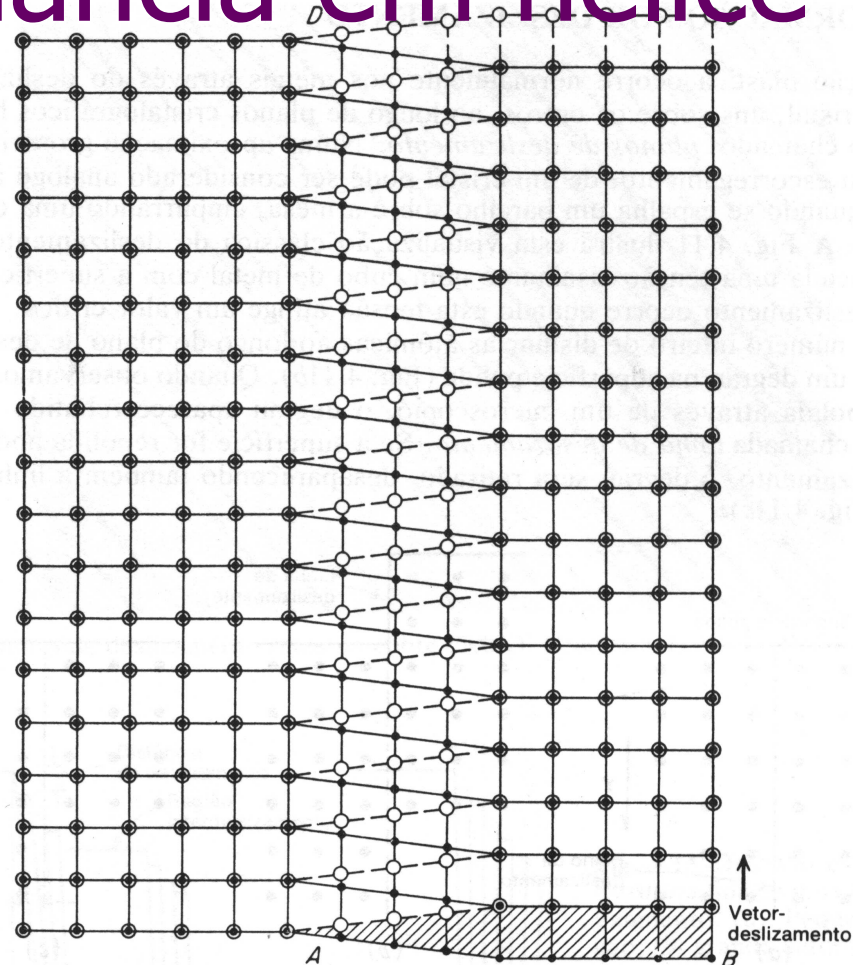
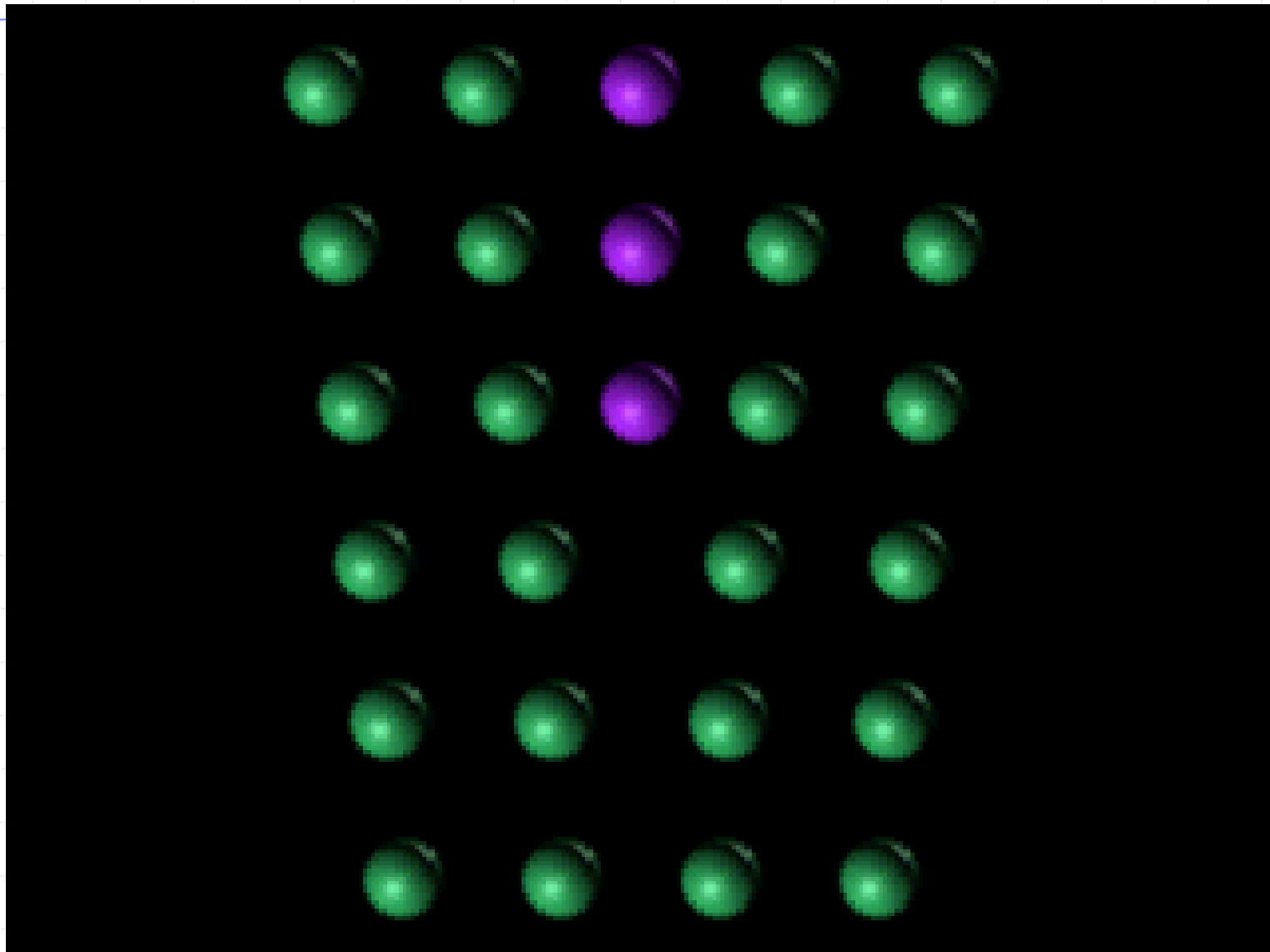


Fig. 4.10 Arranjo atômico em volta da discordância espiral mostrada na Fig. 4.9. O plano da figura é paralelo ao plano de deslizamento. A área deslizada é $ABCD$, e AD é a discordância-espiral. Os círculos abertos representam os átomos imediatamente acima do plano de deslizamento; os círculos fechados são os átomos no plano imediatamente abaixo do plano de deslizamento. (De W. T. Read, Jr., *Dislocations in Crystals*, p. 17, McGraw-Hill Book Company, New York, 1953.)

Movimento (cunha)



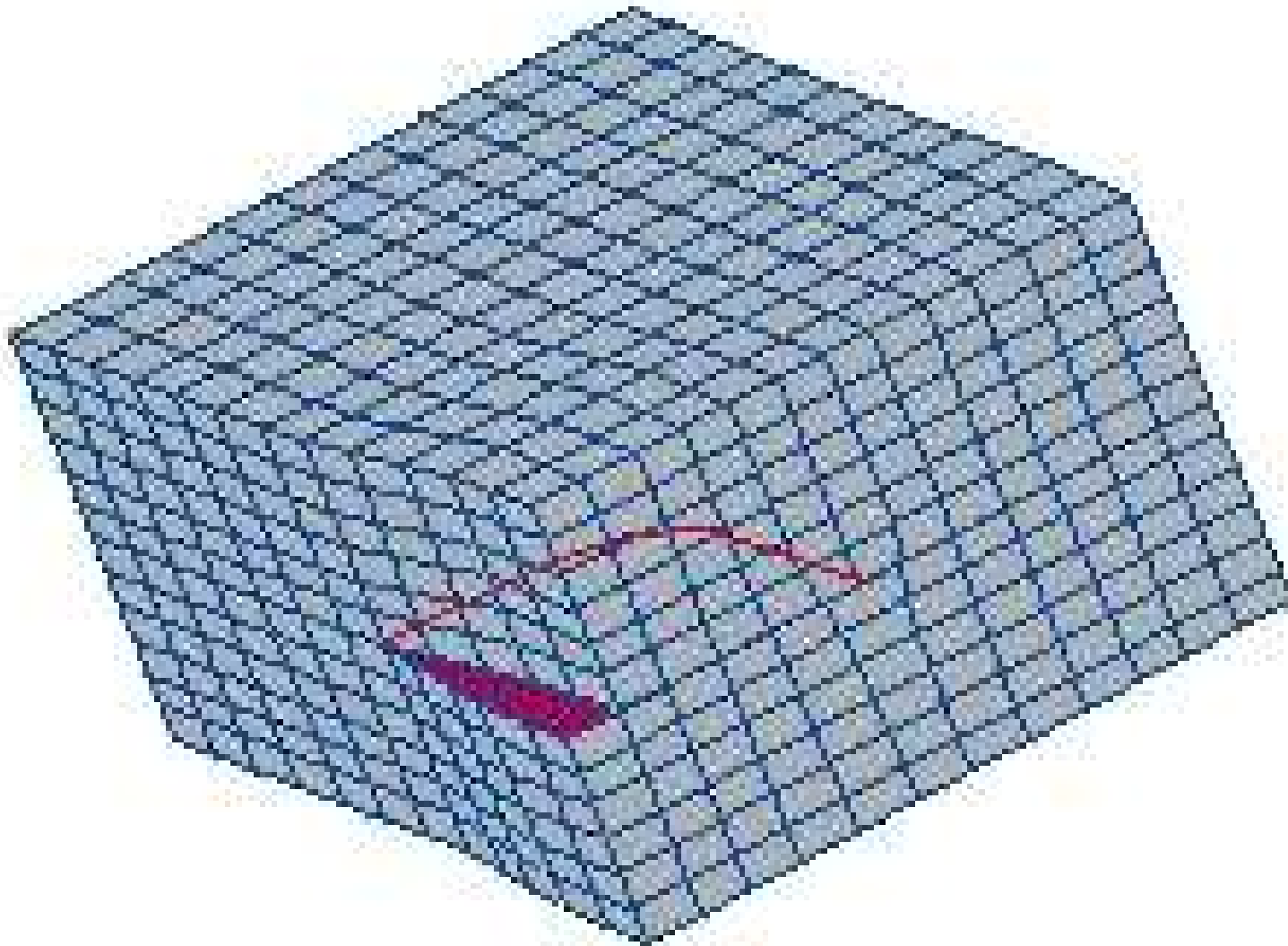
Movimento (cunha)

Link

Movimento (hélice)

Link

Movimento (mista)



Movimento (laço)

Link

Filme real

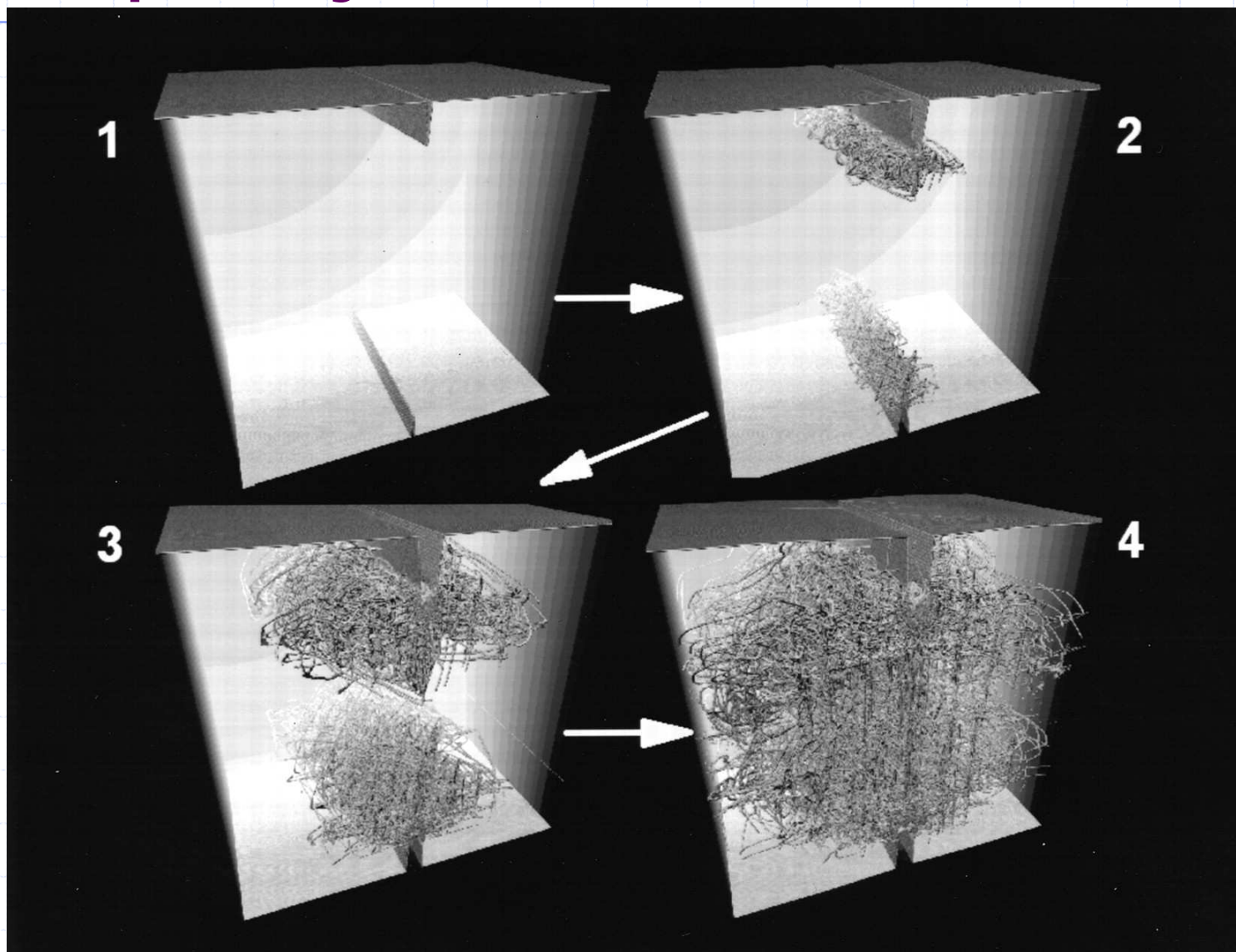


Filme real
(MET)

Fonte de discordâncias

Link

Multiplicação



Barreira ao movimento (contorno de grão)

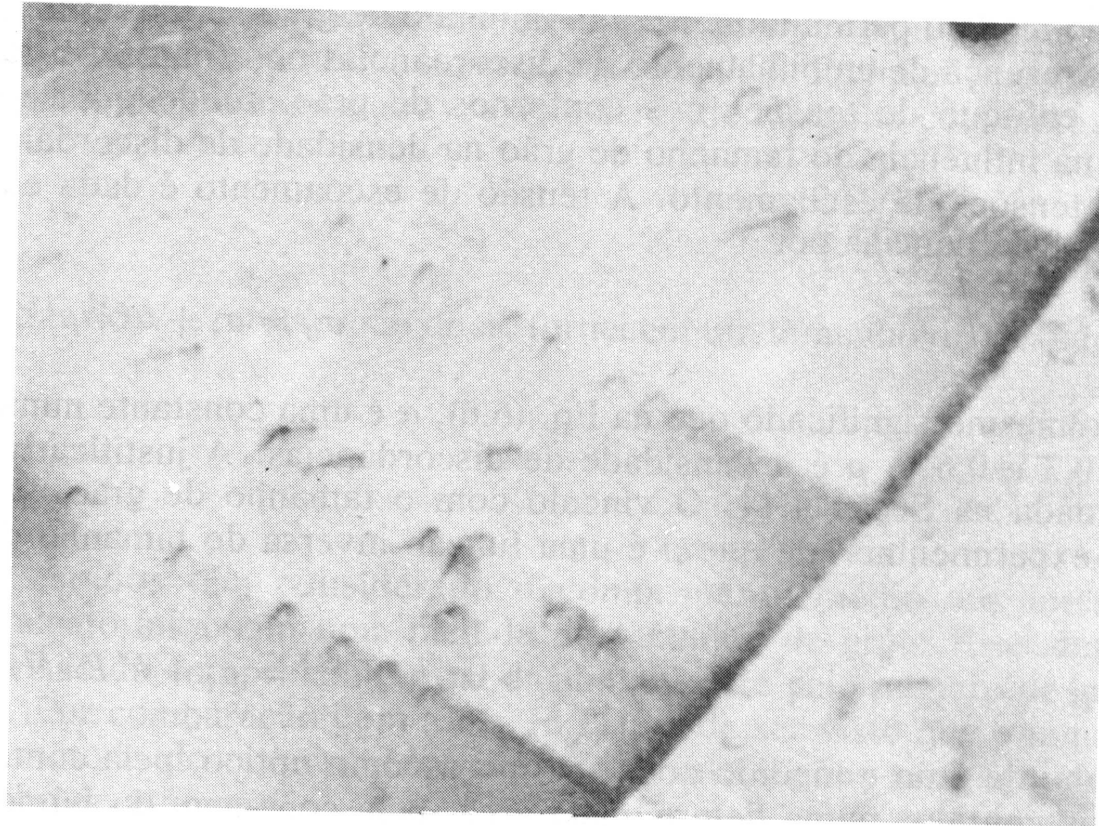
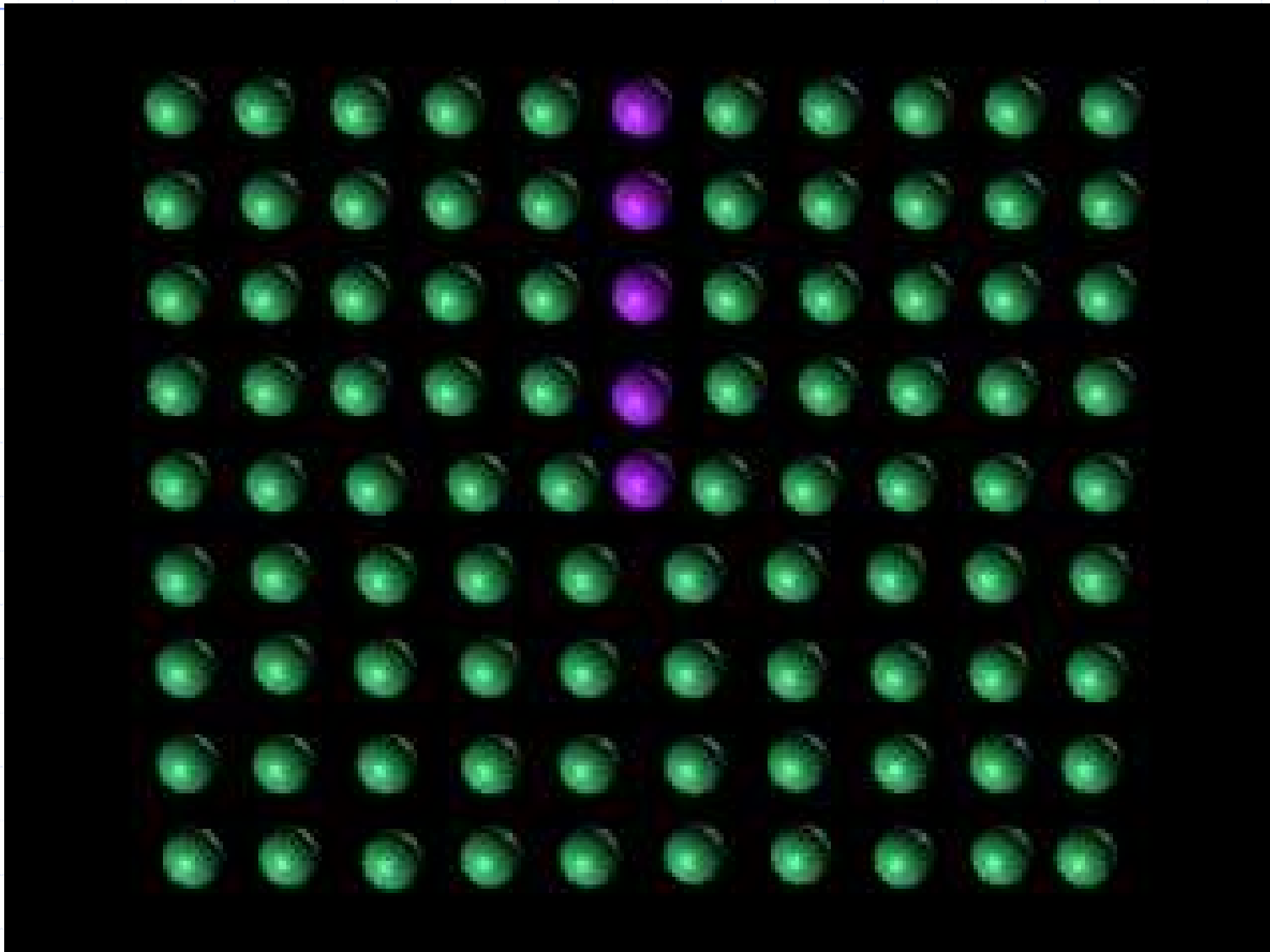


Fig. 6.1 Discordâncias empilhadas contra um contorno de grão como observadas com um microscópio eletrônico numa folha fina de aço inoxidável (17.500 X). (De M. J. Whelan, P. B. Hirsch, R. W. Horne e W. Bollman, *Proc. R. Soc.*, Londres, vol. 240A, p. 524, 1957.)

Endurecimiento (soluto)



Deformação

Link

Encruamento

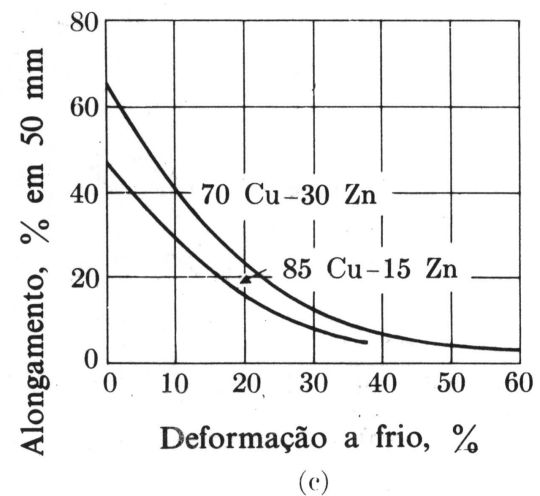
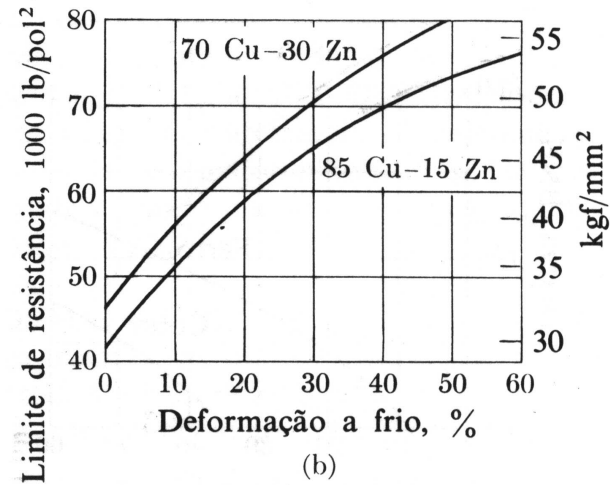
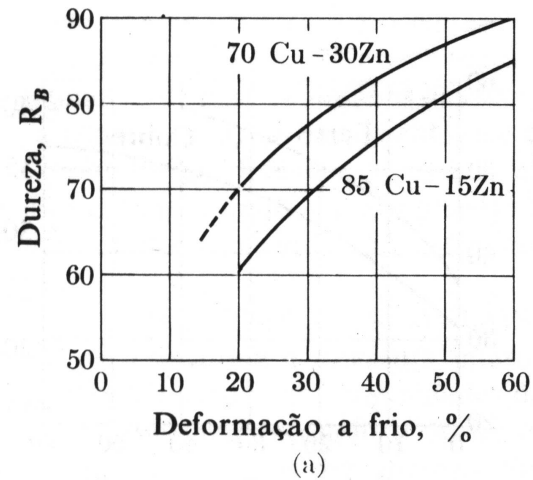


Fig. 6-25. Deformação a frio *versus* propriedades mecânicas (latões).

Recristalização

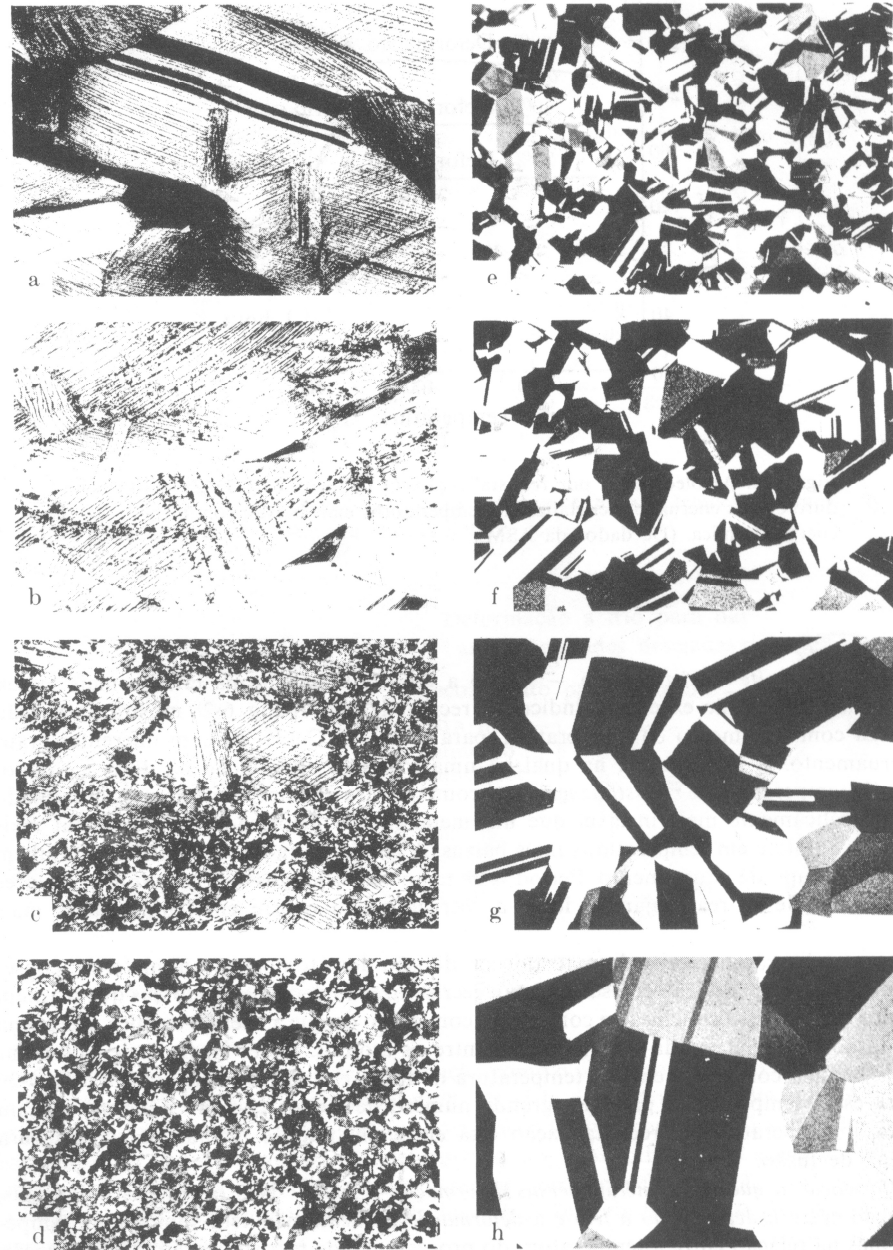


Fig. 6-27. Recristalização de latão encruado ($40\times$). (J. E. Burke, General Electric Co., Shenectady, N. Y.). De (a) a (h) pode-se ver a recristalização e o crescimento dos grãos em temperaturas elevadas.

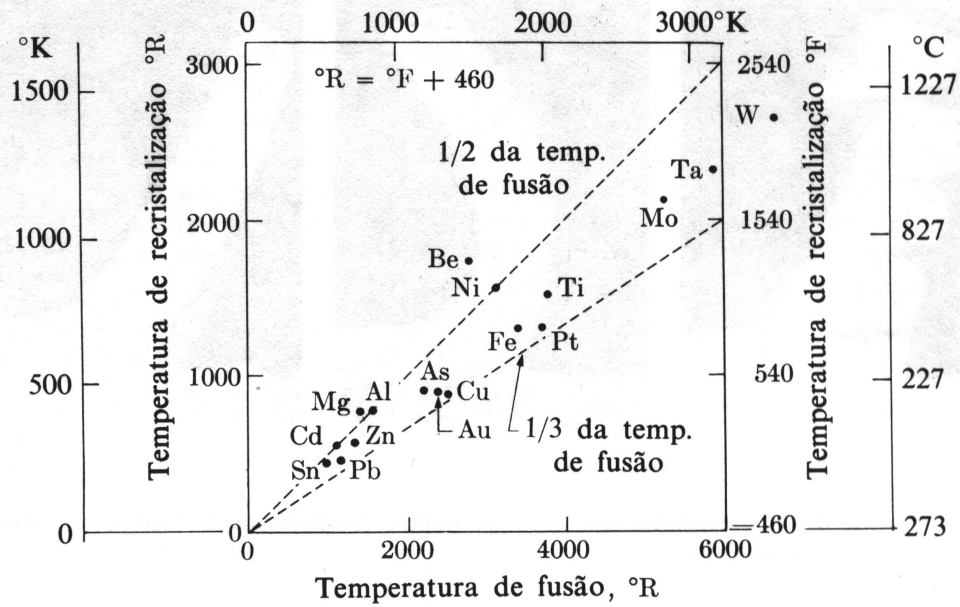


Fig. 6-29. Temperatura de recristalização *versus* temperatura de fusão. A temperatura média de recristalização é cerca de metade da temperatura absoluta de fusão.

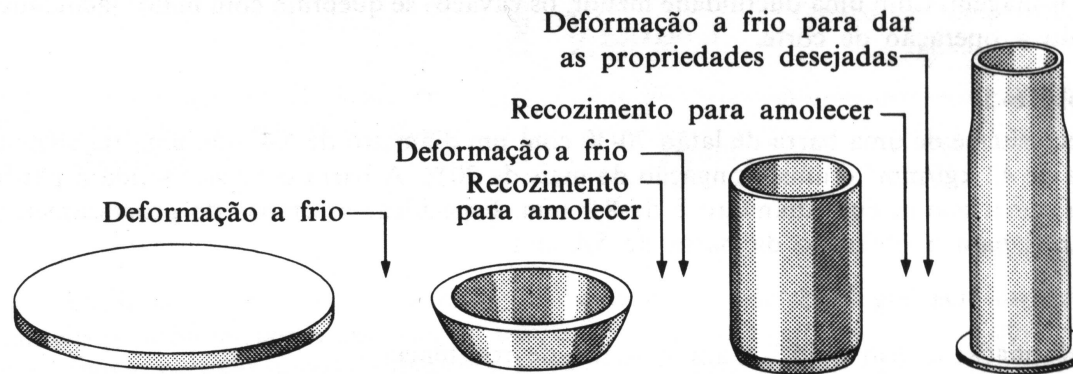


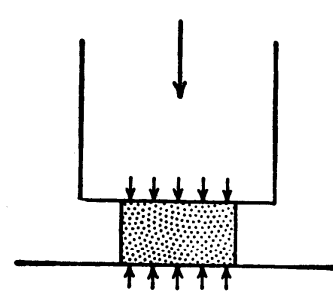
Fig. 6-30. Ciclos de deformação a frio e recozimento (cápsula para cartuchos).



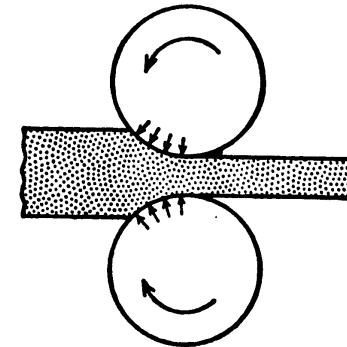
Processos de Conformação Plástica

Processos

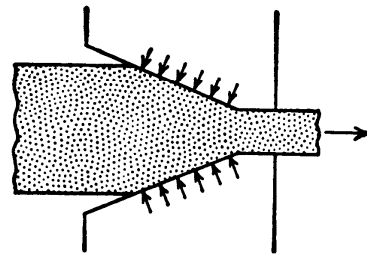
Exemplos típicos



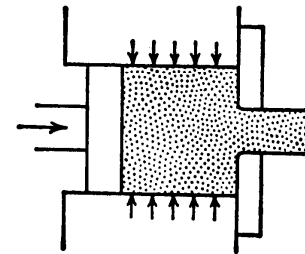
Forjamento



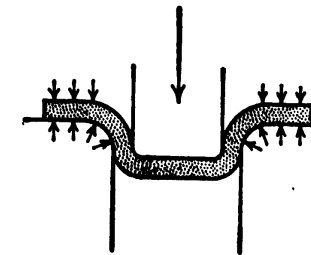
Laminação



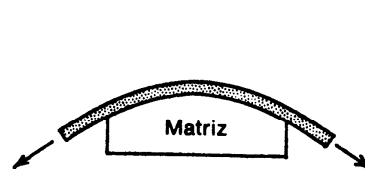
Trefilação



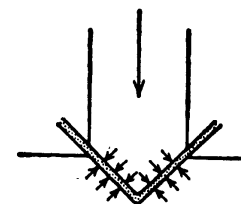
Extrusão



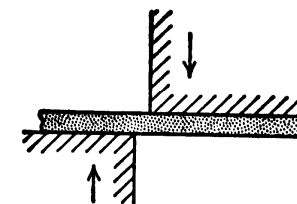
Embutimento profundo



Estiramento



Dobramento



Cisalhamento

Fig. 15.1 Operações típicas de conformação.

Fenômenos presentes

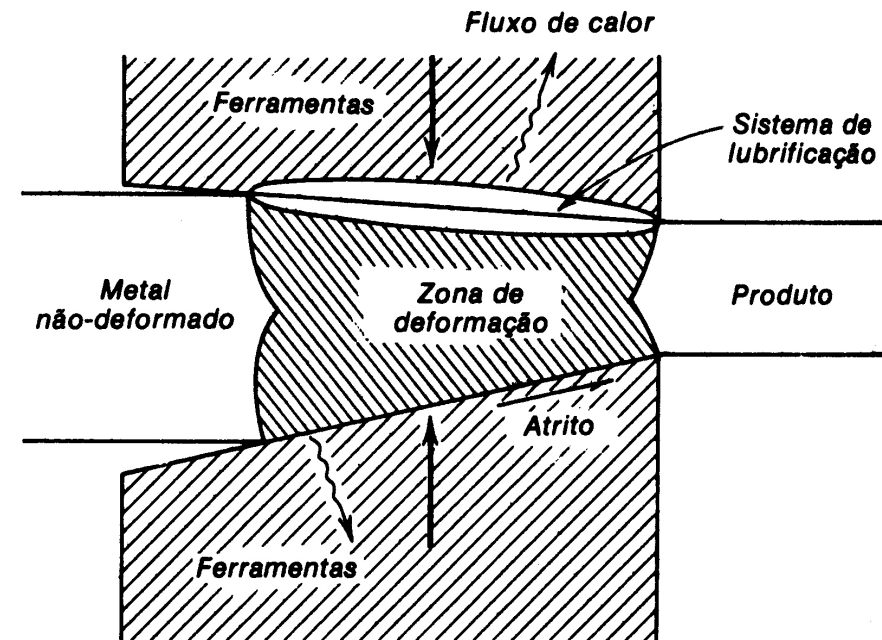


Fig. 15.2 Sistema de um processo de deformação.

Efeito do Atrito

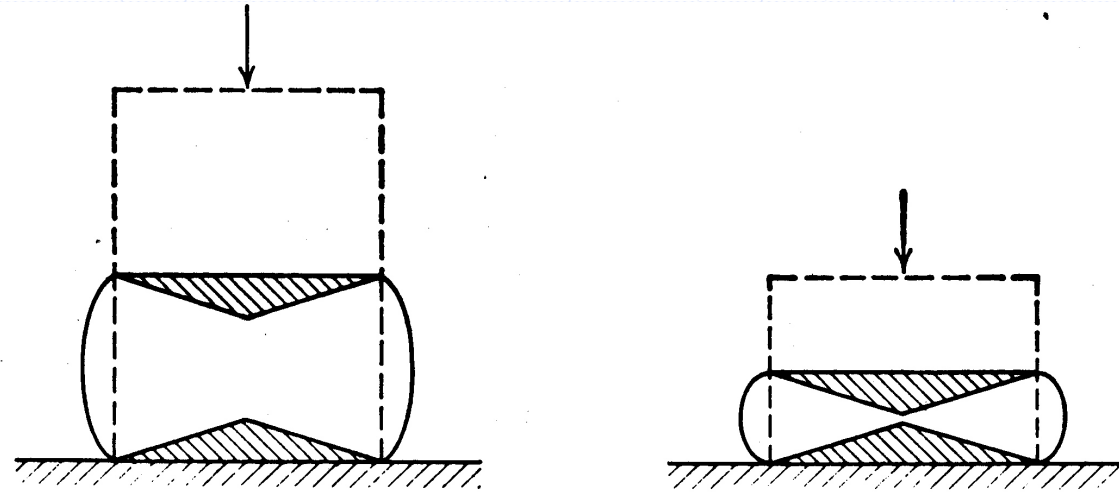
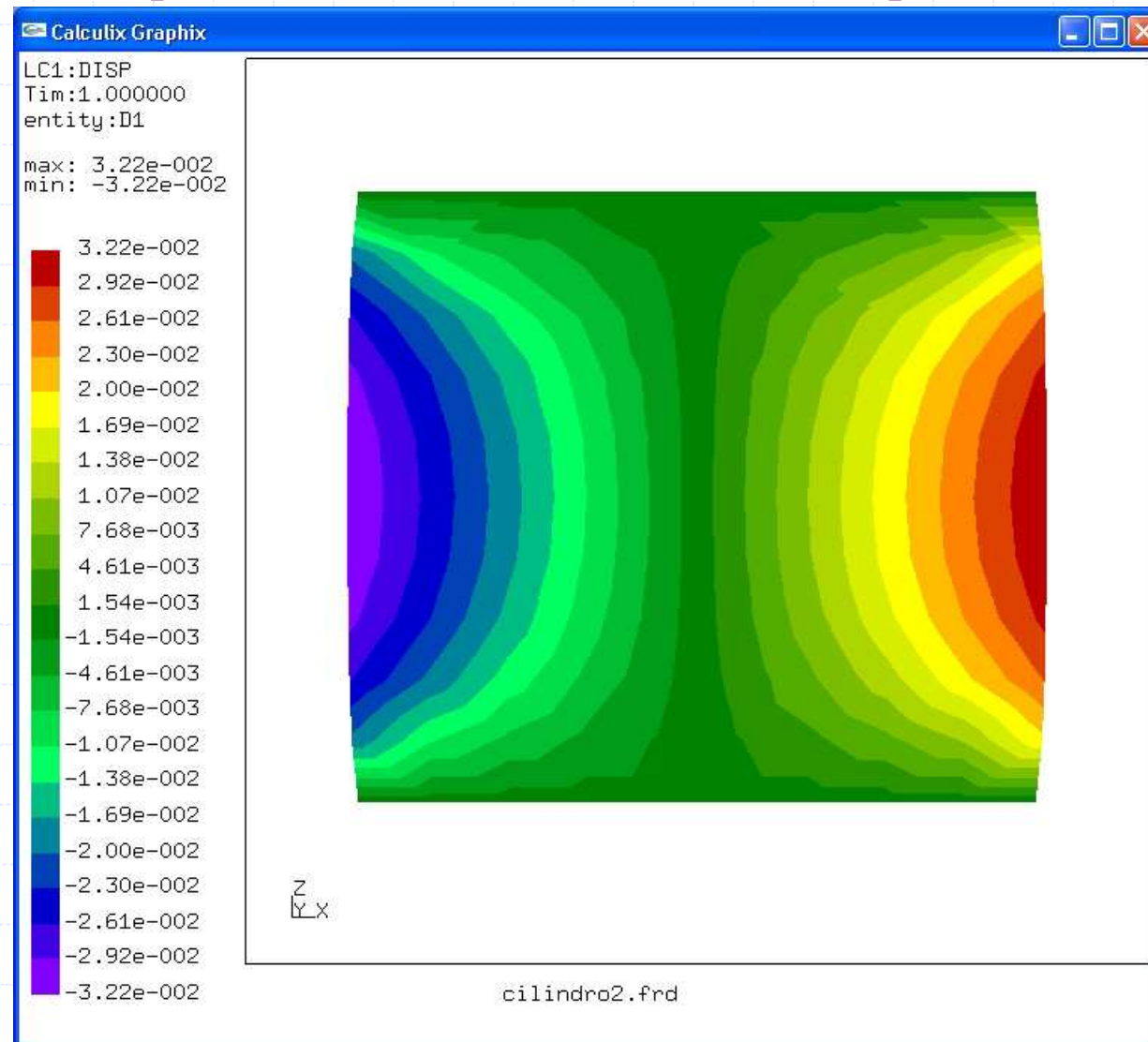


Fig. 15.7 Regiões não-deformadas (hachuradas) devido ao atrito nas extremidades de um corpo de prova de compressão.

Tensões (efeito do atrito)



"Fibras"

Fig. 15.15 Estrutura fibrosa em um produto trabalhado, revelada por macroataque (5×).

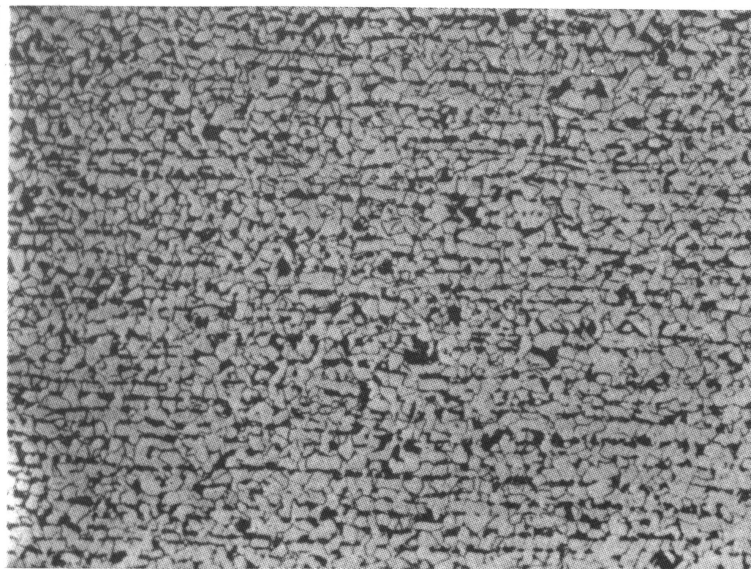
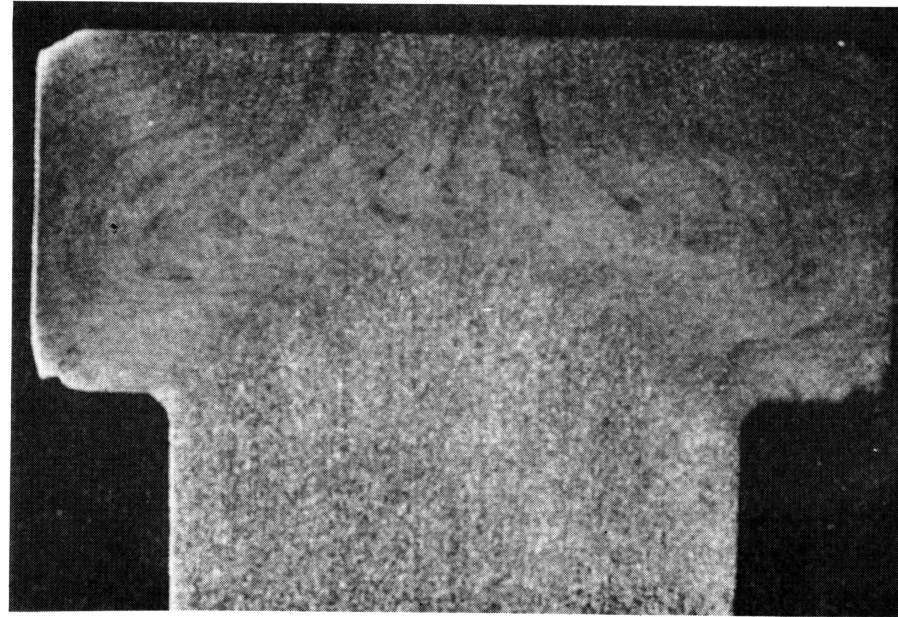
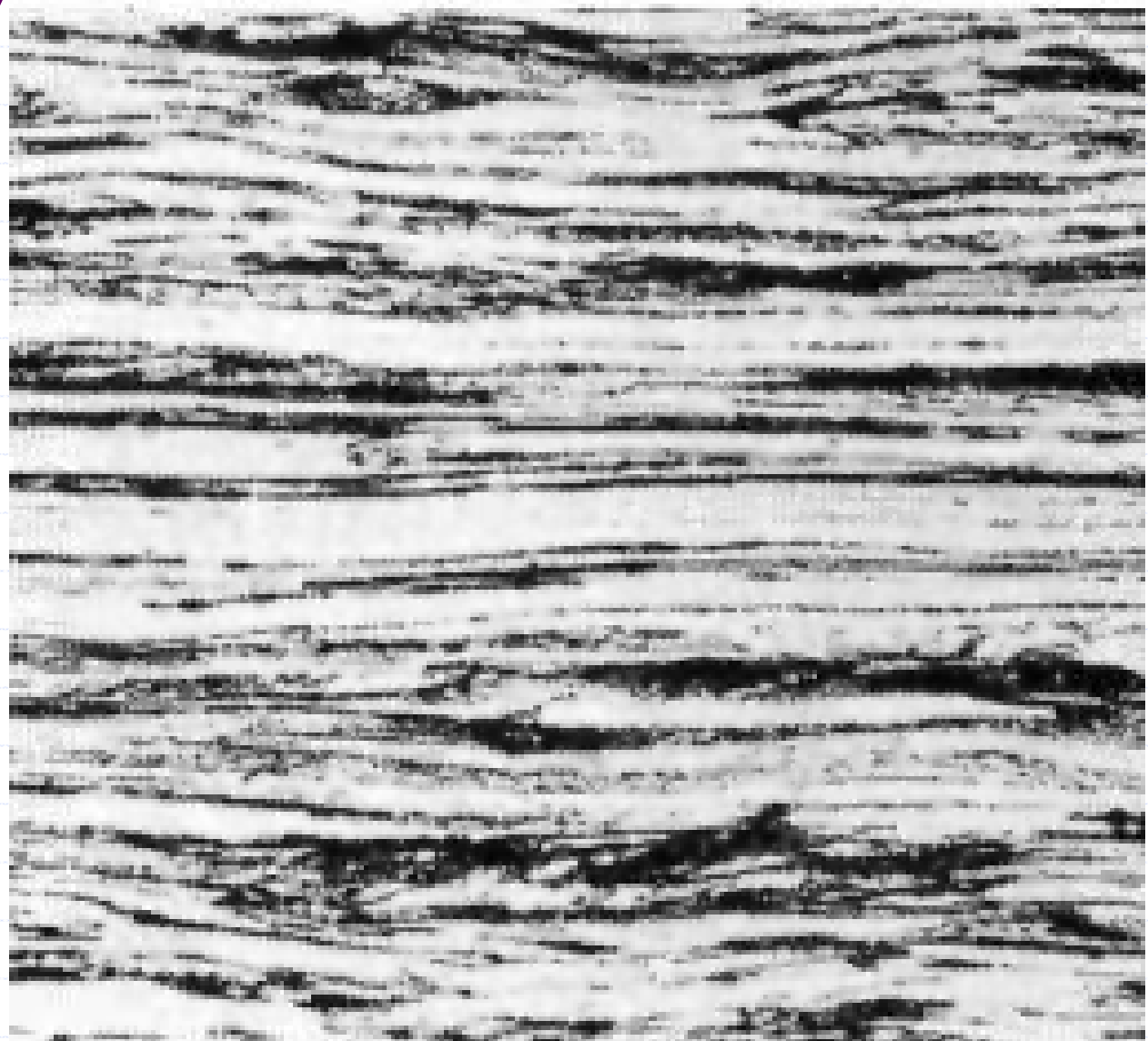


Fig. 15.16 Estrutura fibrosa e em bandas na direção longitudinal de uma chapa grossa de aço doce laminado a quente (100 ×).

“Fibras”



Tensões na laminação

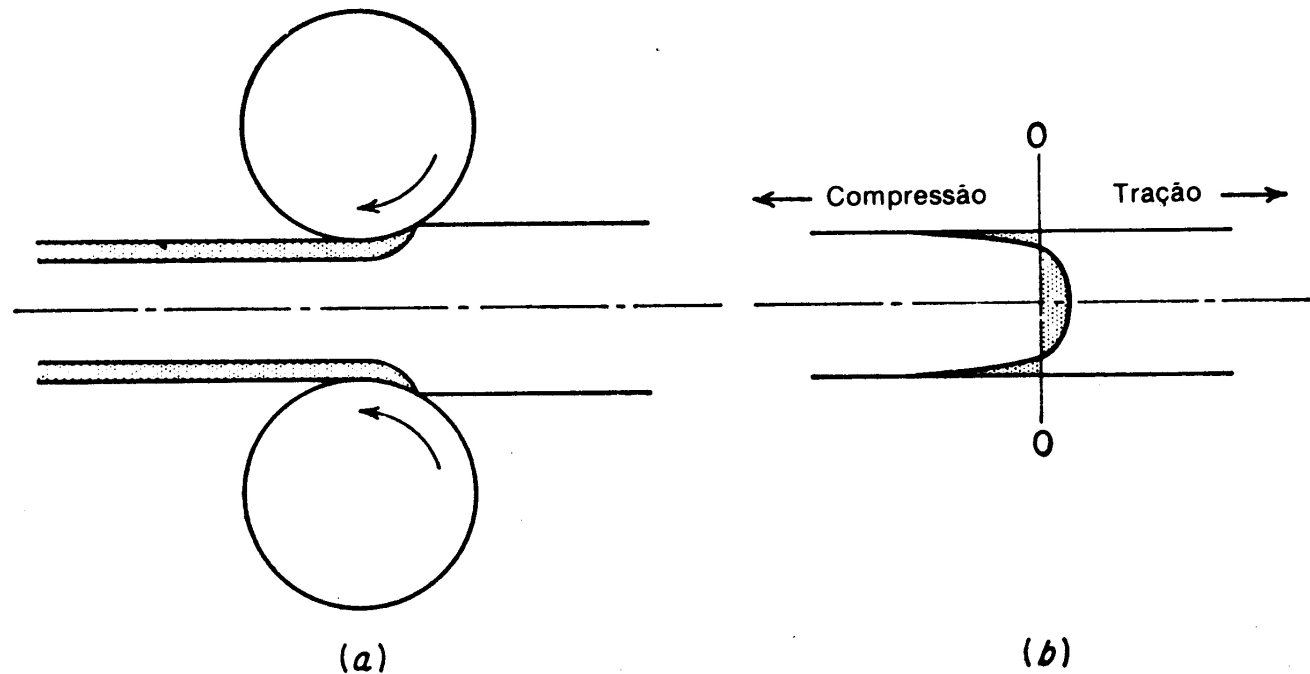
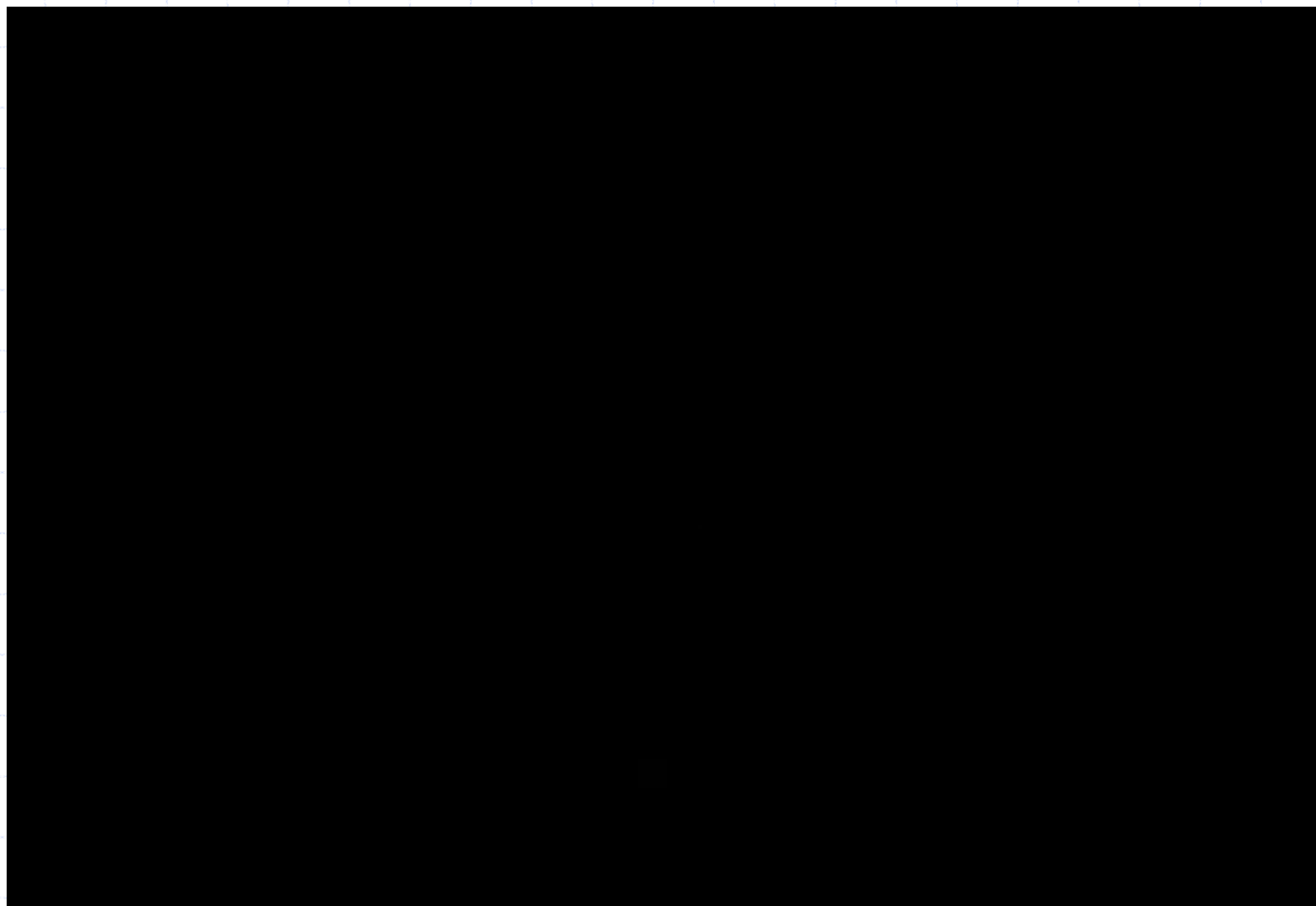


Fig. 15.33 (a) Deformação heterogênea na laminação de chapa fina; (b) representação esquemática da distribuição resultante da tensão residual longitudinal ao longo da espessura de chapa.

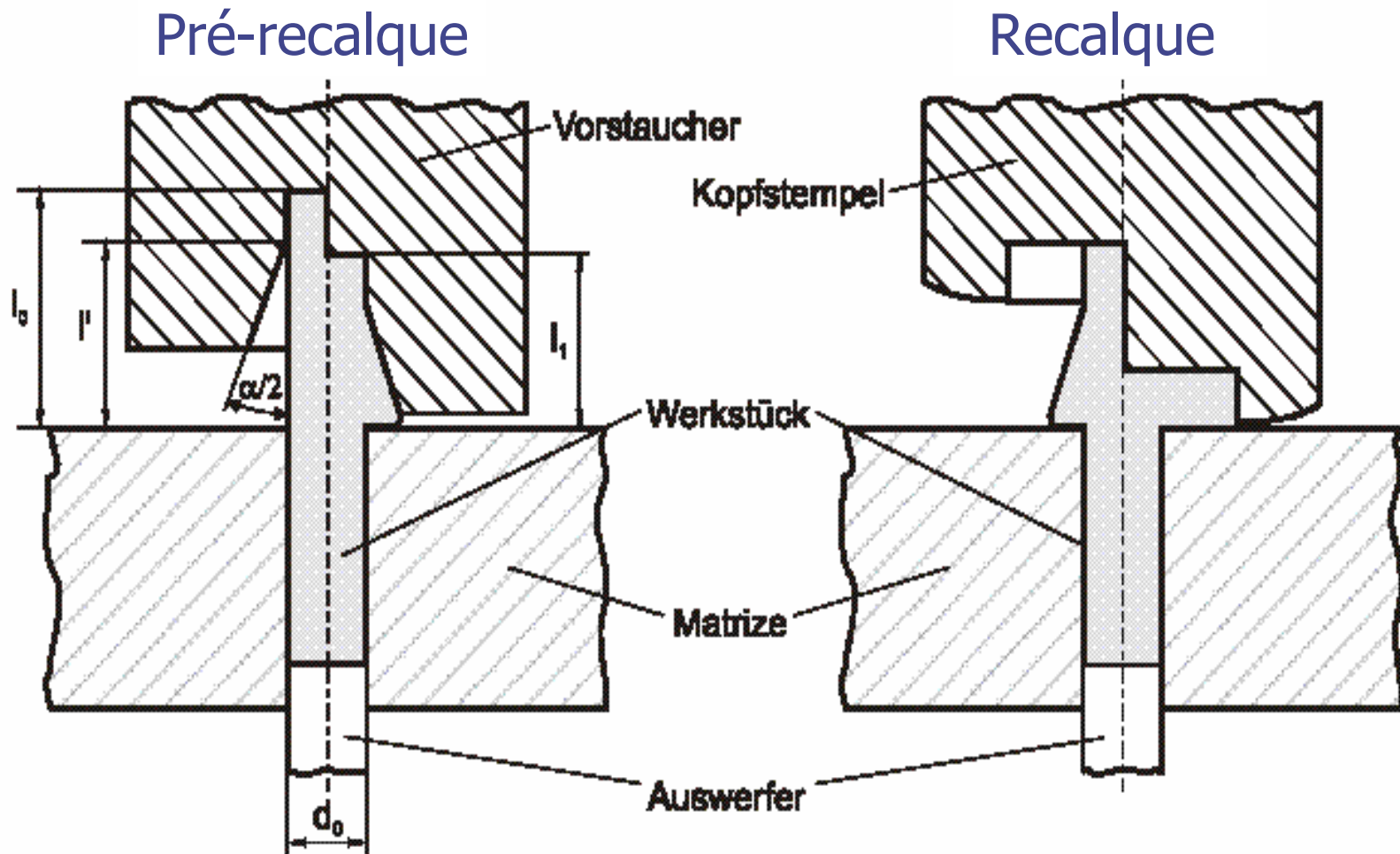
Forjamento livre



Forjamento livre

Videos: Marreta

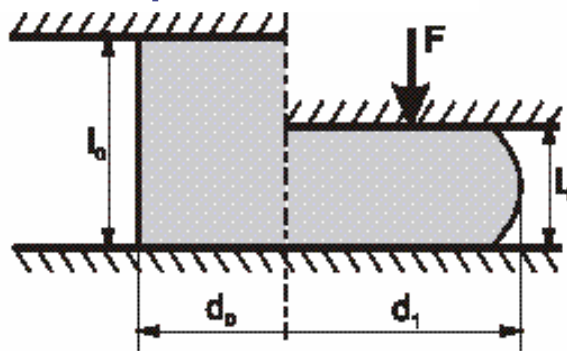
Forjamento (Recalque)



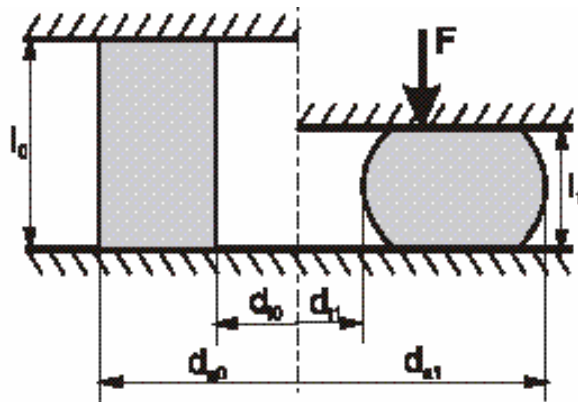
Recalque (frio ou quente)

operação básica de conformação de volumes

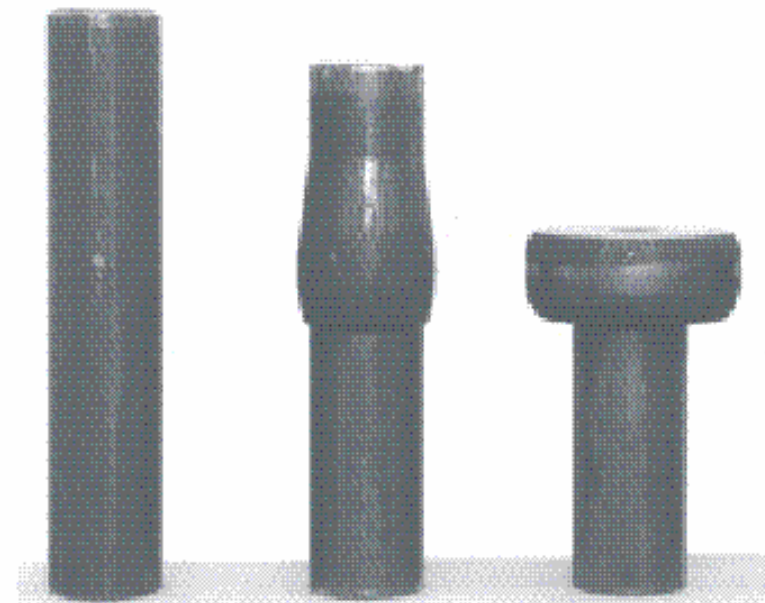
Recalque de anel



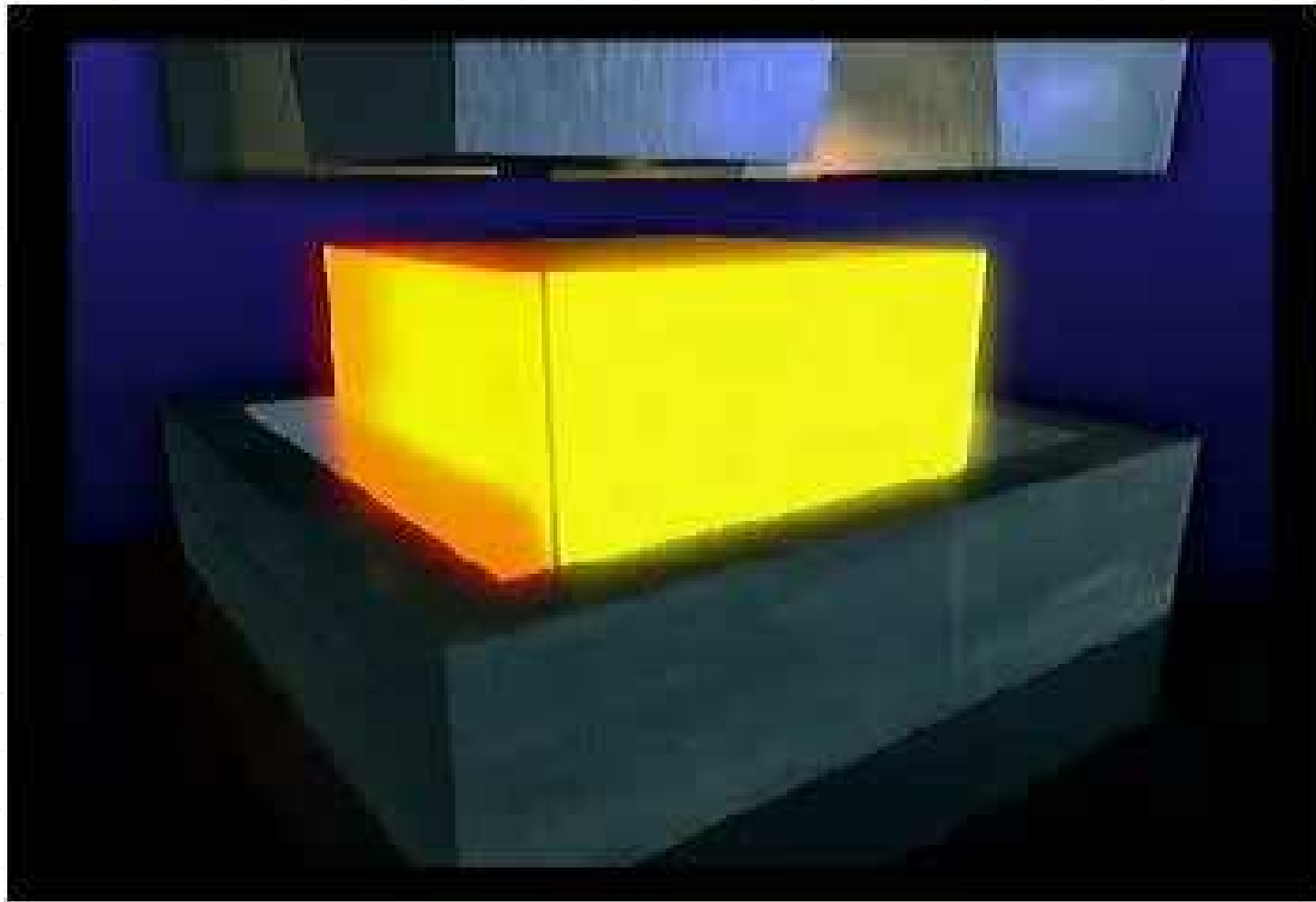
Recalque de cilindro



Exemplo



Forjamento em matriz



Operações

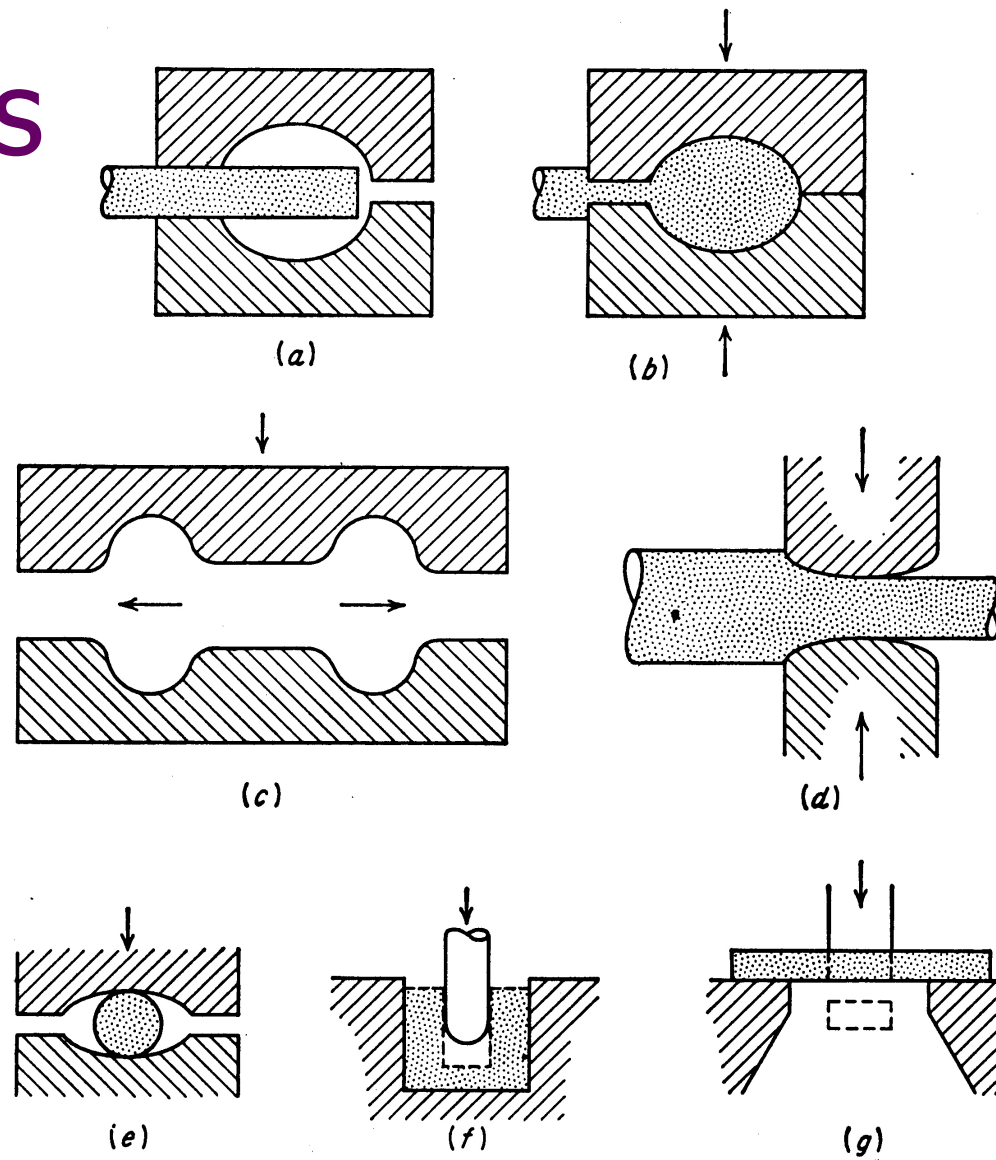


Fig. 16.1 Operações de forjamento. *a, b*, Expansão; *c*, desbaste; *d*, estiramento; *e*, forjamento em estampo; *f*, mandrilagem; *g*, puncionamento.

Matriz com rebarba

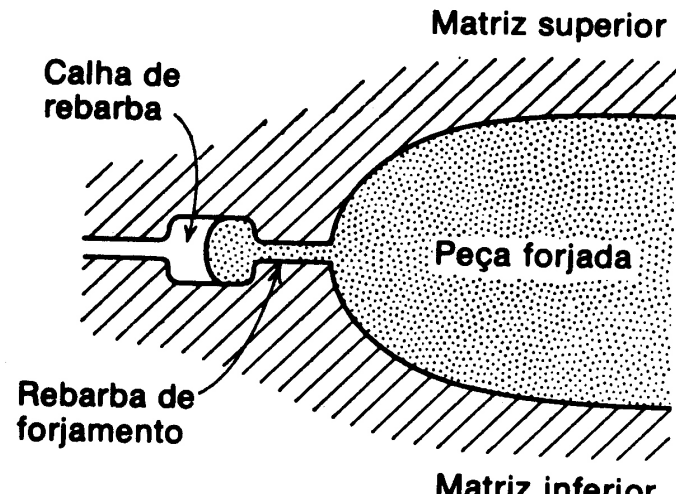


Fig. 16.2 Vista em corte de uma matriz de forja.

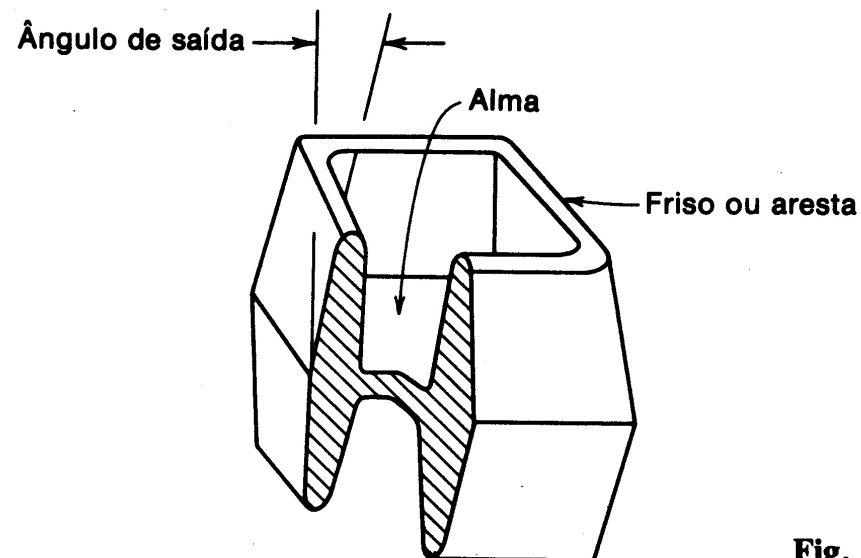


Fig. 16.4 Nomenclatura típica de forjamento.

Forjamento em matriz

Videos: Manga de eixo

Defeitos

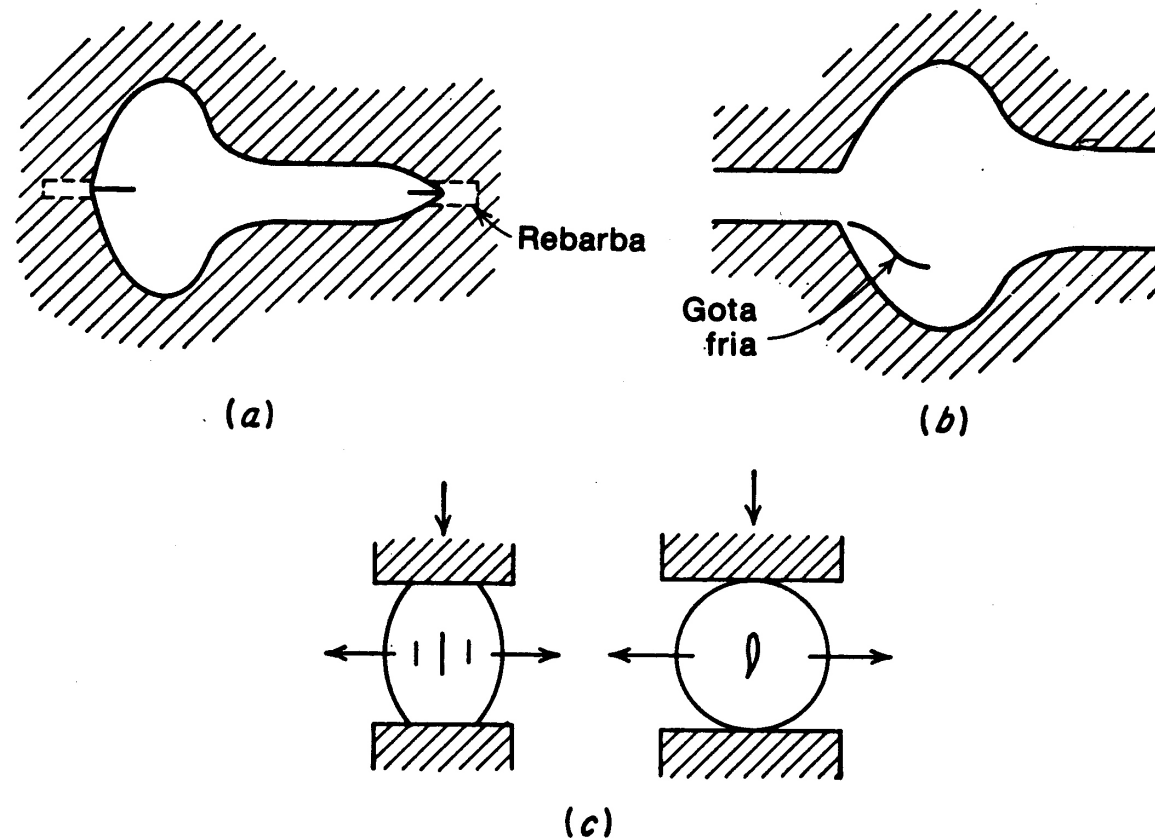
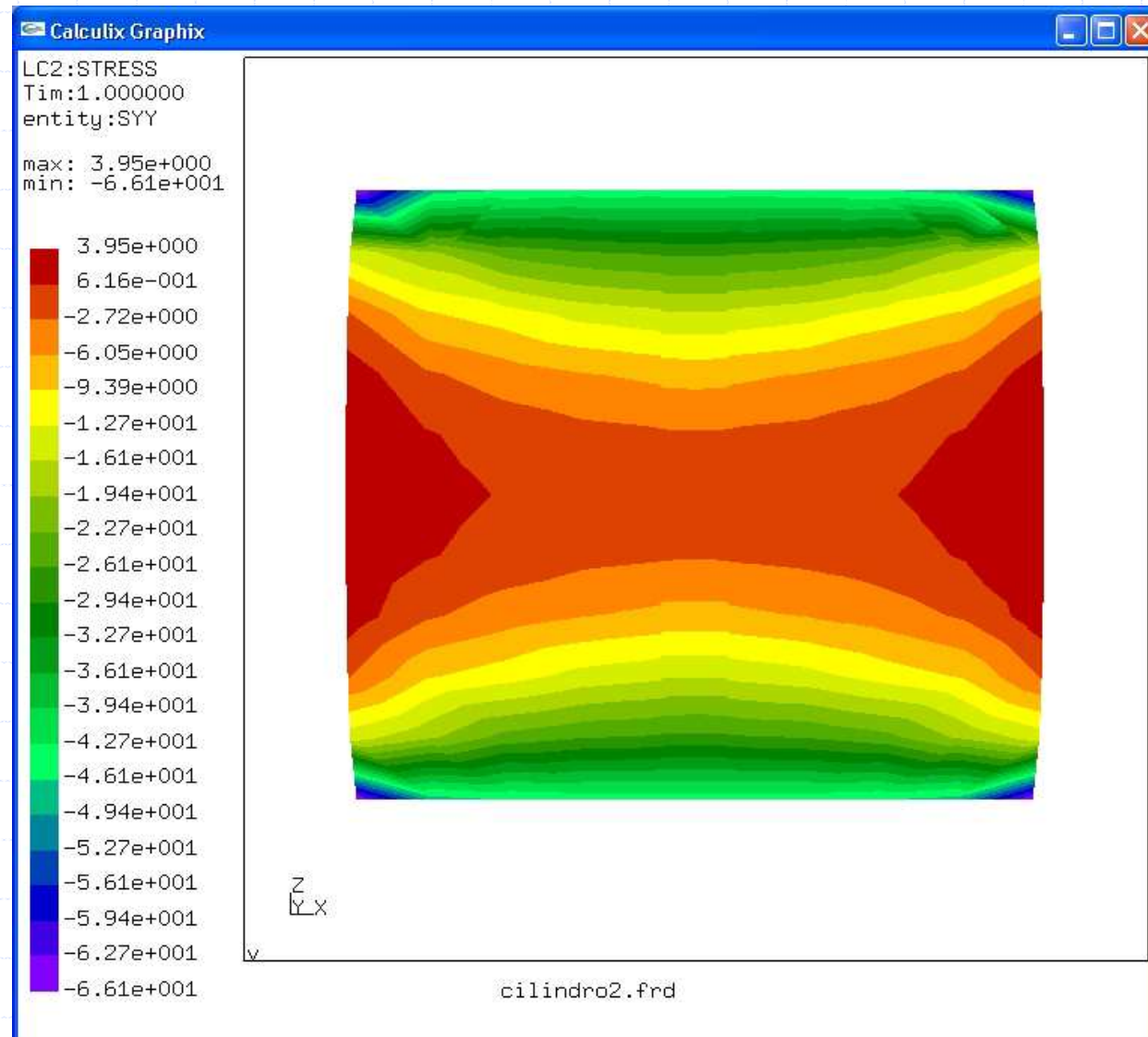
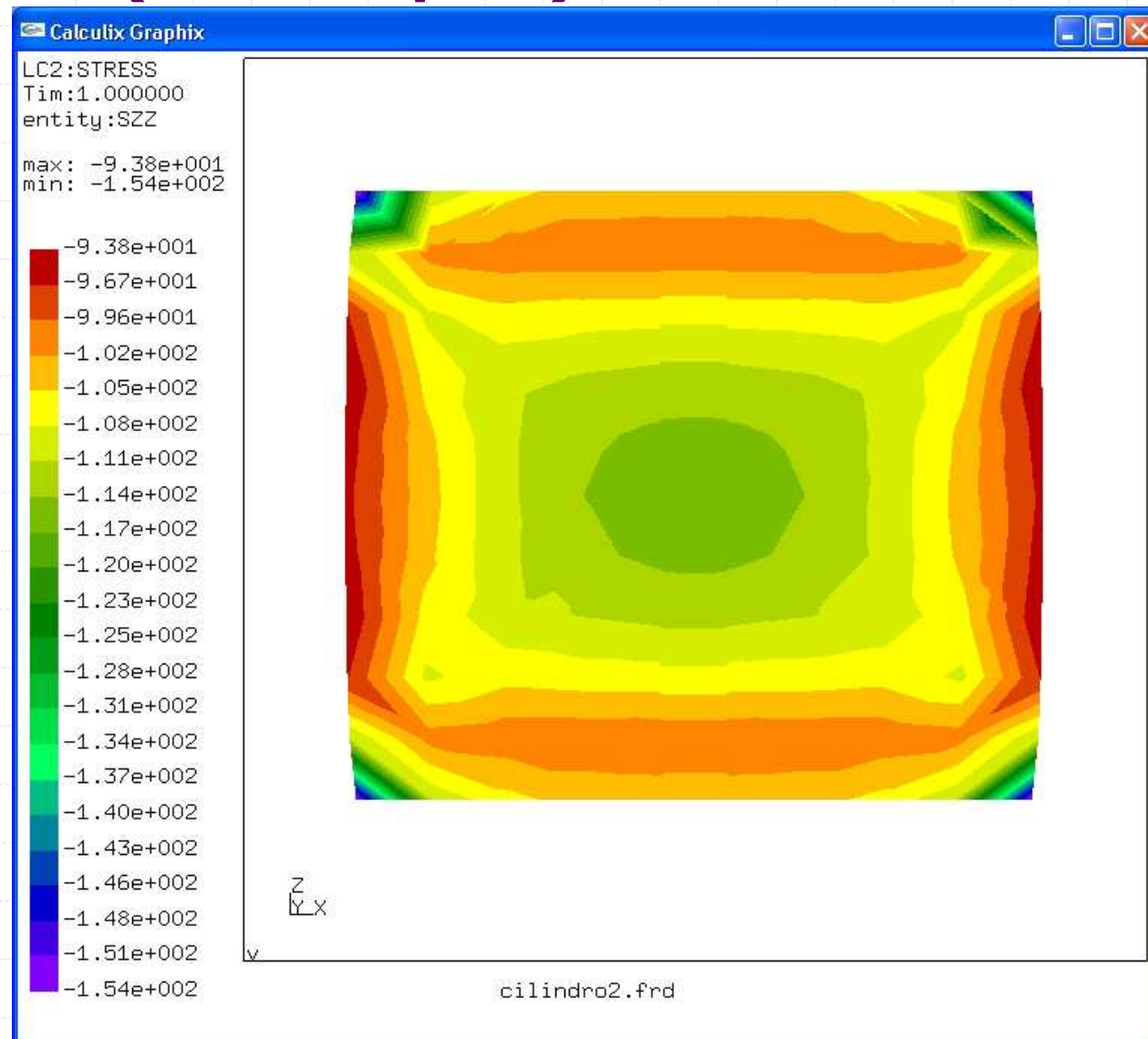


Fig. 16.12 Defeitos de forja típicos. *a*, Trincamento na rebarba; *b*, gota fria ou dobra; *c*, trincamento interno devido a tensões de tração secundárias.

Tensões (recalque)



Tensões (recalque)



Prensas

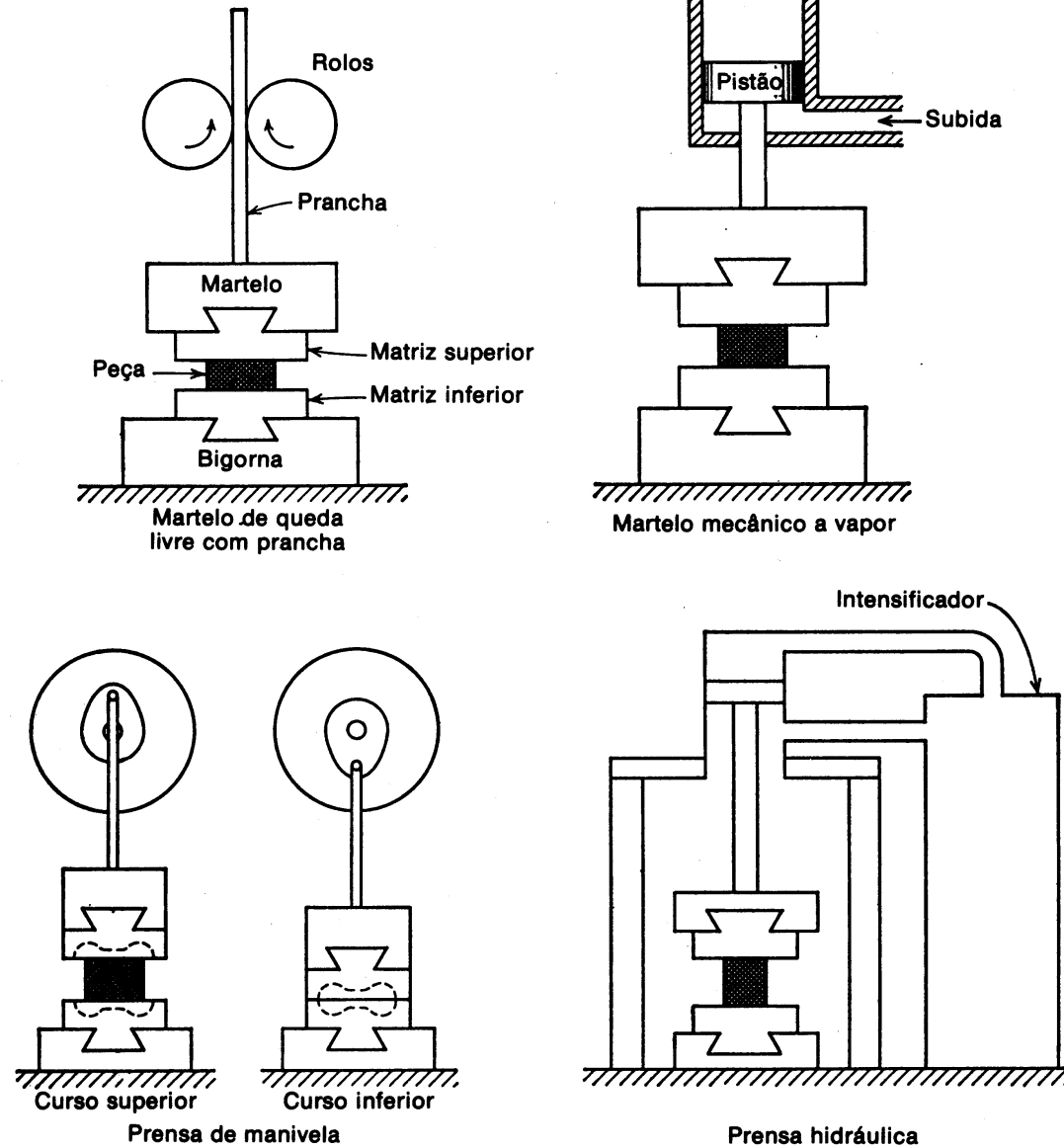
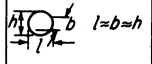
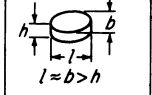


Fig. 16.5 Desenhos esquemáticos de equipamentos de forja.

Formas

Classe quanto à forma 1 Formas compactas  Esférico e cúbico	Subgrupo 101 Sem elementos subsidiários 102 Elementos subsidiários unilaterais 103 Elementos subsidiários rotacionais ou radiais 104 Elementos subsidiários rotacionais e unilaterais	101 Sem elementos subsidiários		102 Elementos subsidiários unilaterais		103 Elementos subsidiários rotacionais ou radiais		104 Elementos subsidiários rotacionais e unilaterais			
		Sem elementos subsidiários		Com ressalto		Com ressalto e furo		Com borda		Com ressalto e borda	
Classe quanto à forma 2 Forma de disco  Partes em contornos circulares, quadrados e similares Corte transversal com partes em balanço curtas, núcleo bruto de ressalto e formas alongadas (flanges, válvulas etc.)	Sub-grupo Grupo quanto à forma 21 Forma de disco com elemento unilateral 22 Forma de disco com elemento bilateral	211		212		213		214		215	
		222		223		224		225			


Classe quanto à forma 3 Formas muito alongadas  Grupos de partes com comprimento de eixo longitudinal pronunciado: 1. Partes curtas $l > 3b$ 2. Comprimento médio $l = 3 \dots .8b$ 3. Partes longas $l = 8 \dots .16b$ 4. Partes muito longas $l > 16b$ O número do grupo devido ao comprimento é adicionado após uma barra; exemplo: 334/2	Sub-grupo Grupo quanto à forma 31 Elemento da forma principal com eixo reto 32 Eixo longitudinal da forma principal curvada em um plano 33 Eixo longitudinal da forma principal curvada em vários planos	311		312		313		314		315	
		321		322		323		324		325	
		331		332		333		334		335	

Fig. 16.9 Classificação quanto à forma para o forjamento. (Segundo Spies.) (Extraído de *Forging Equipment, Materials, and Practices*, p. 113, MCIC-HB-03, Battelle Memorial Laboratories, Columbus, Ohio, 1973.)

Extrusão

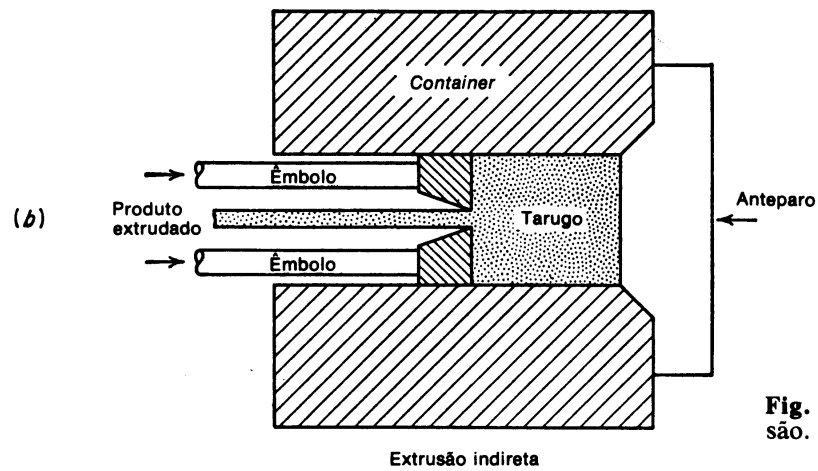
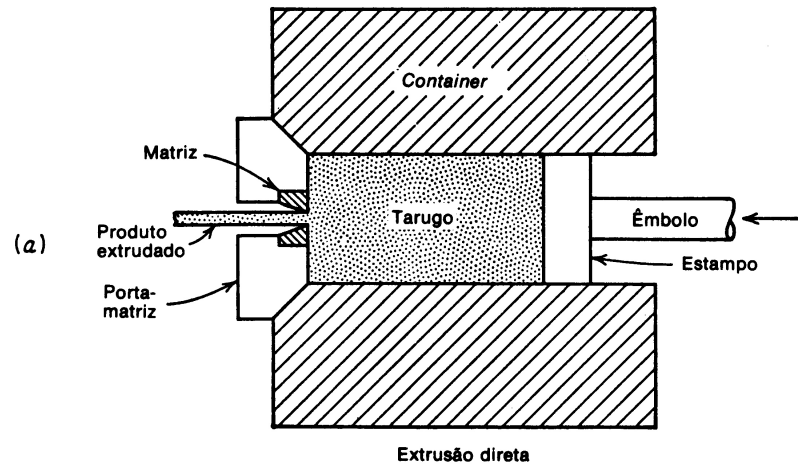


Fig. 18.1 Tipos de extrusão.

Matrizes

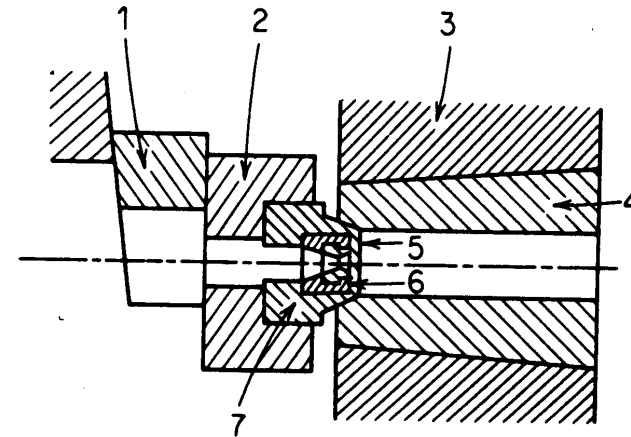


Fig. 18.3 Arranjo típico das ferramentas de extrusão. (Segundo Schey.)

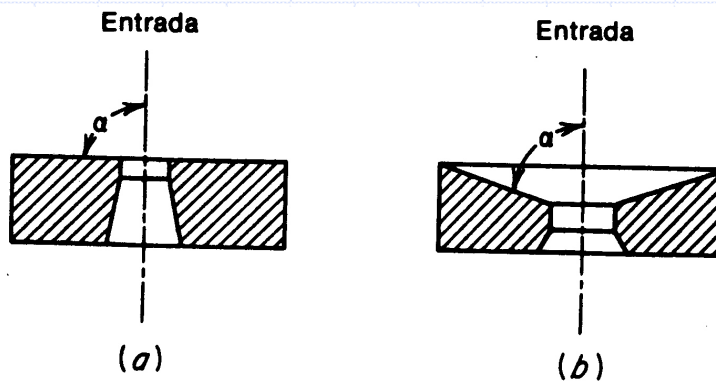
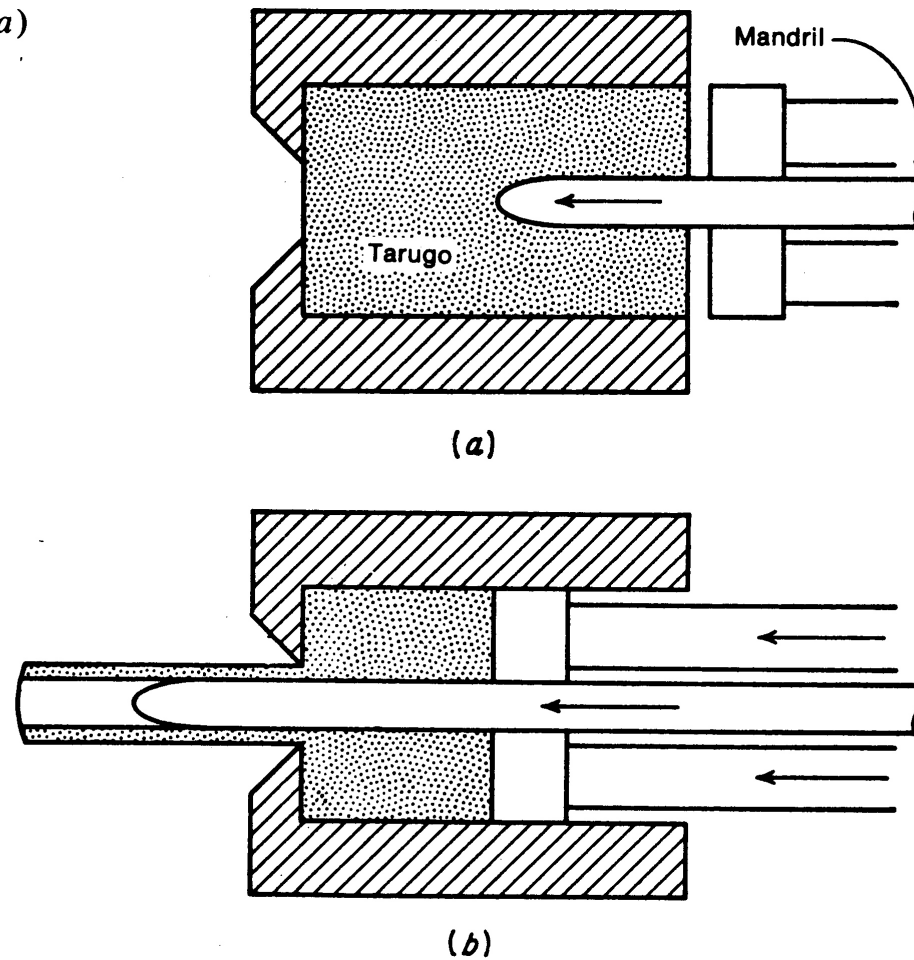


Fig. 18.4 Matrizes de extrusão típicas. (a) Matriz de faces planas; (b) matriz cônica.

Extrusão de tubos

Fig. 18.8 Extrusão de tubos. (a) Mandrilamento; (b) extrusão.



Extrusão de tubos

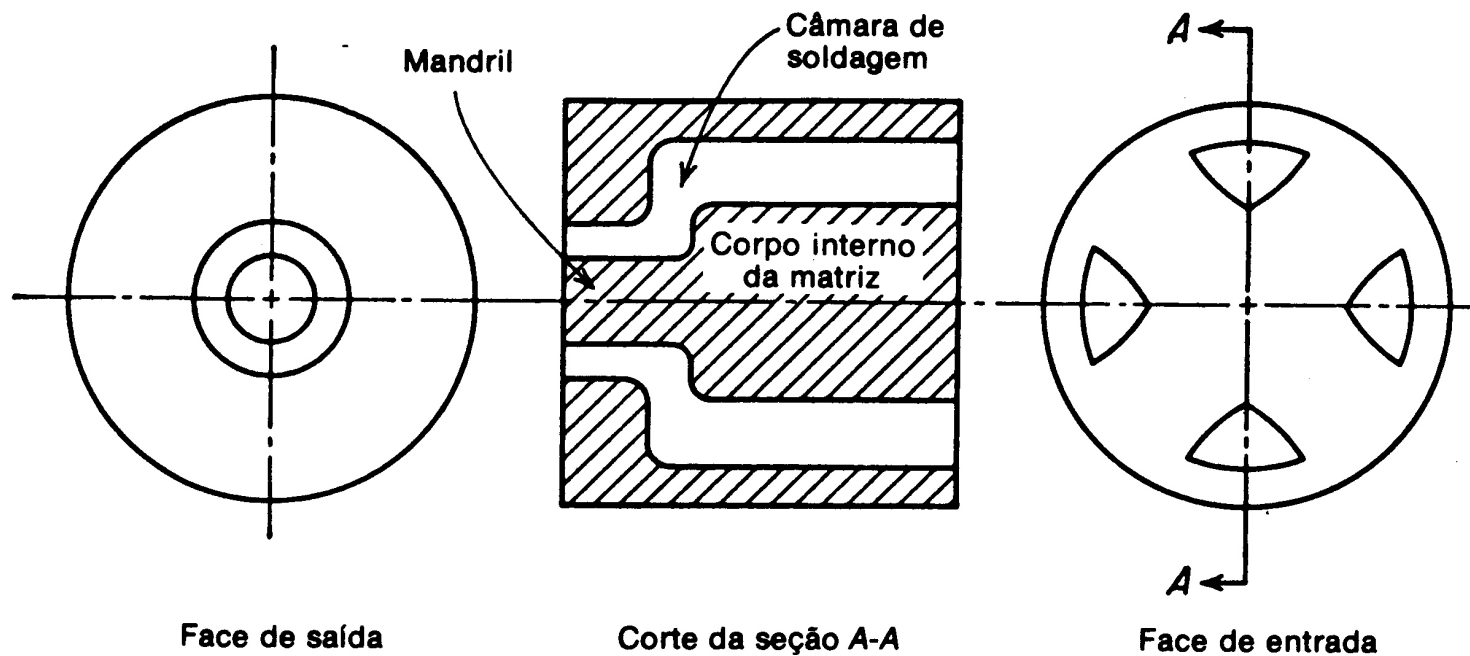


Fig. 18.9 Matriz de extrusão de tubos sem mandril.

Extrusão: exemplos

Videos:

Perfilados de Al

Cilindros de Al

Laminação

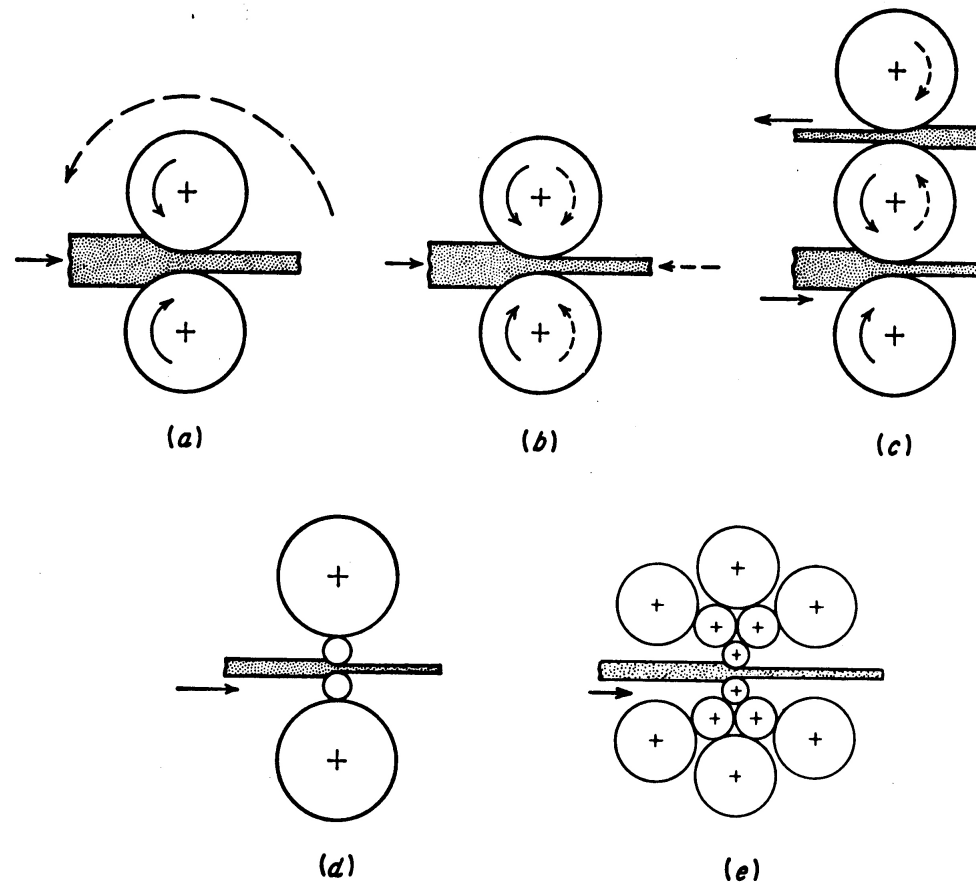


Fig. 17.1 Arranjos típicos de rolos para laminadores. (a) Laminador duo; (b) laminador duo reversível; (c) laminador trio; (d) laminador quádruo; (e) laminador agrupado.

Exemplo

◆ Video: folha de Al

Trem de laminação

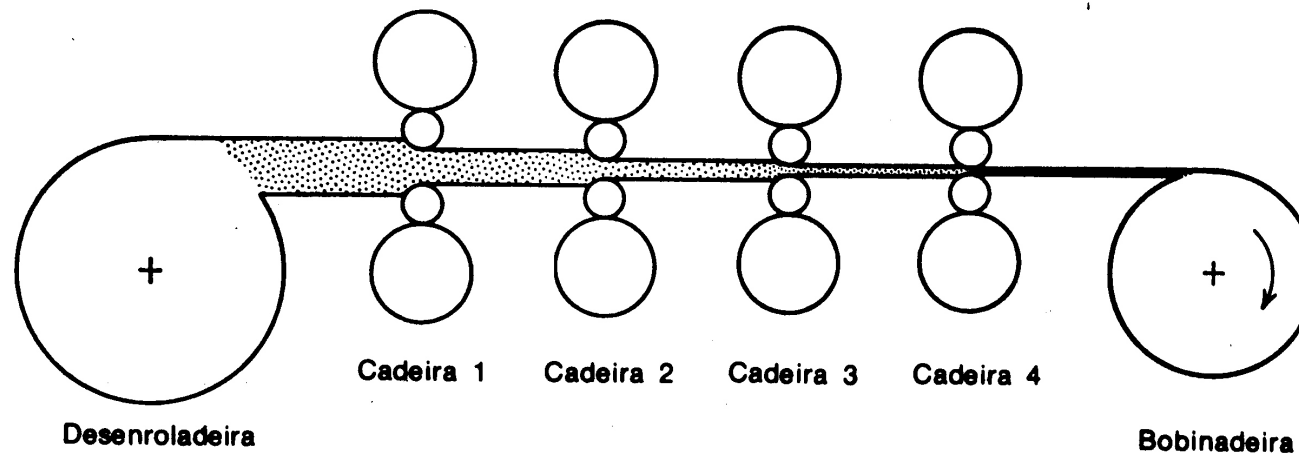
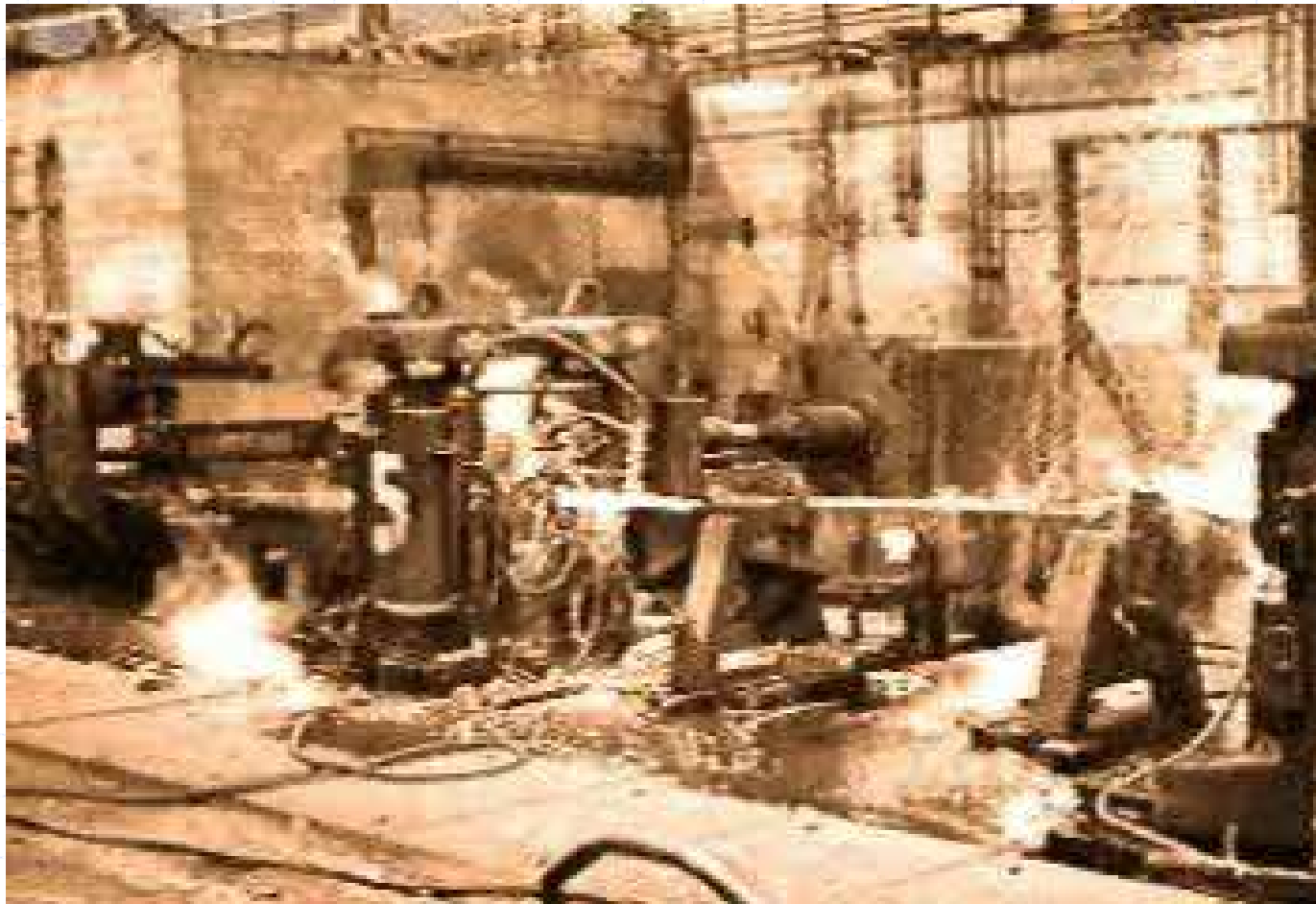


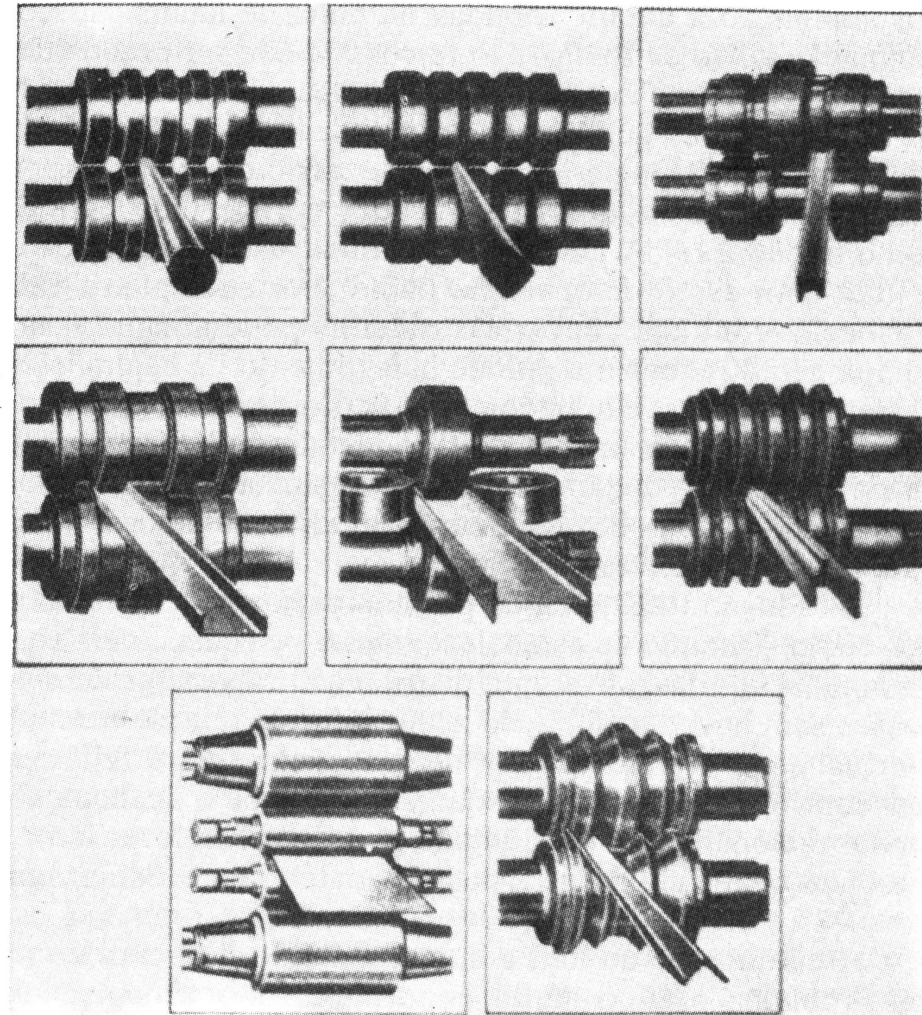
Fig. 17.2 Desenho esquemático da laminação de tiras num laminador contínuo de quatro cadeiras.

Trem de laminação



Laminação de barras e perfis

Fig. 17.4 Laminação de barras e perfis estruturais. (American Iron e Steel Institute.)



Exemplos

Video: Laminação

Laminação de Tubos

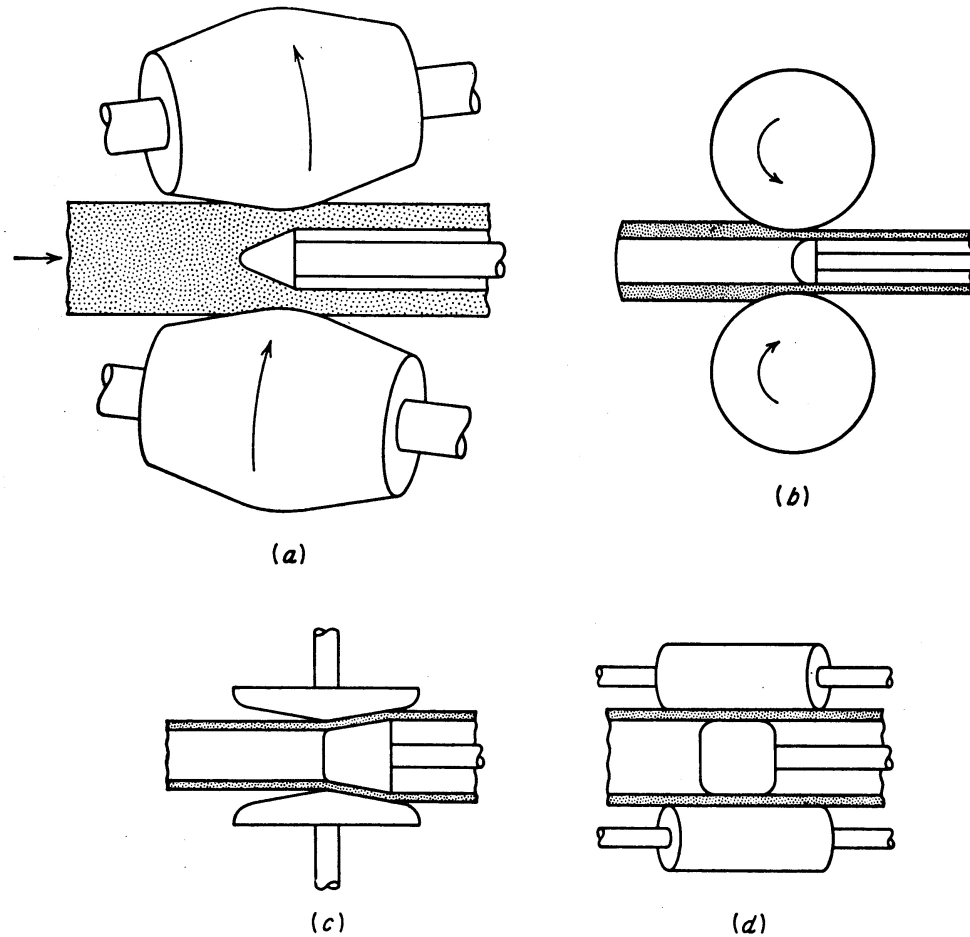
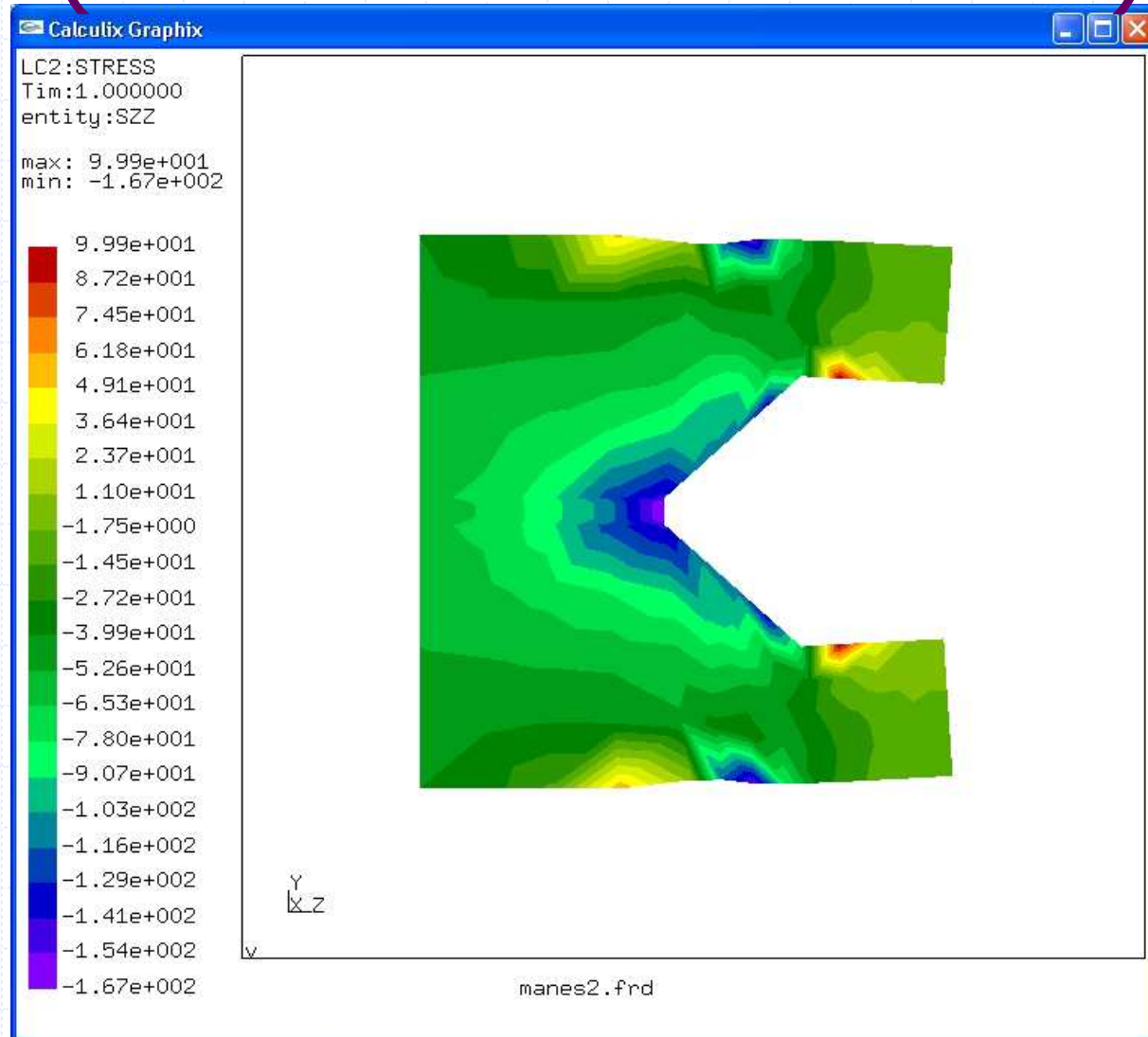
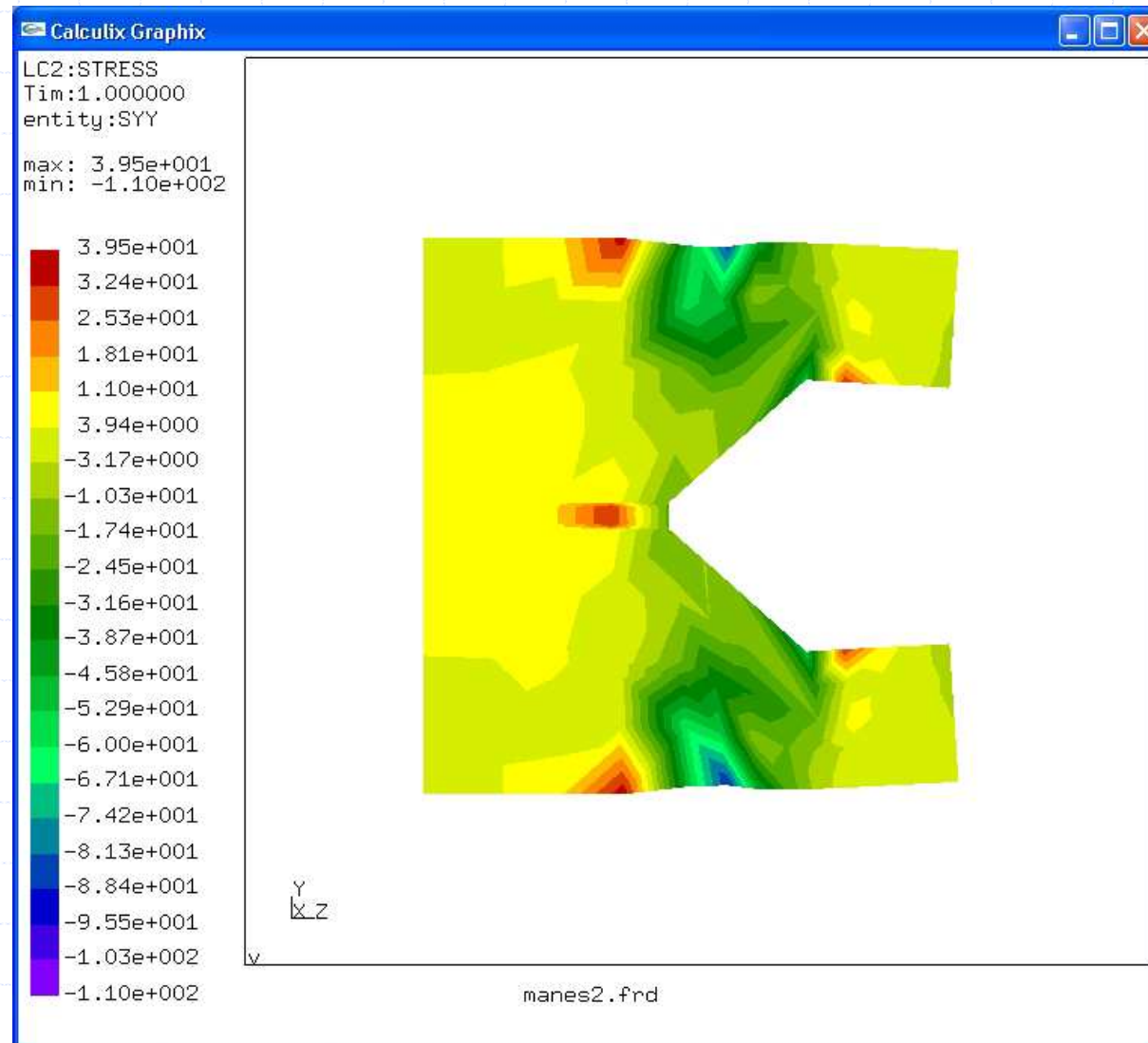


Fig. 18.10 (a) Laminador Mannesmann; (b) rolo laminador-mandrilador; (c) laminador *three-roll piercing*; (d) retificadora-polidora.

Tensões (Processo Mannesmann)



Tensões (Processo Mannesmann)



Defeitos

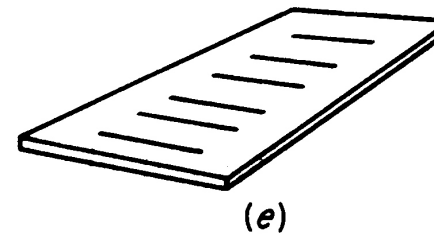
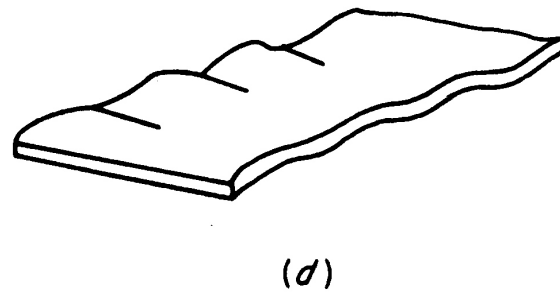
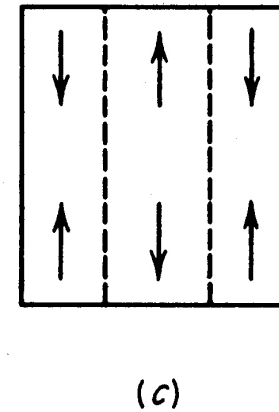
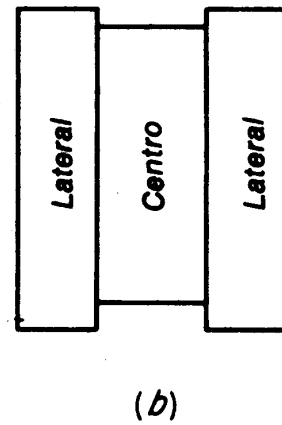
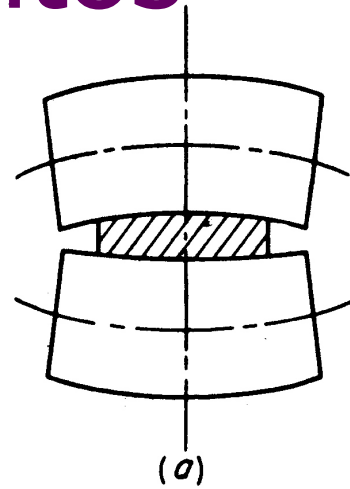


Fig. 17.9 Conseqüências do encurvamento dos rolos para produzir arestas alongadas.

Defeitos

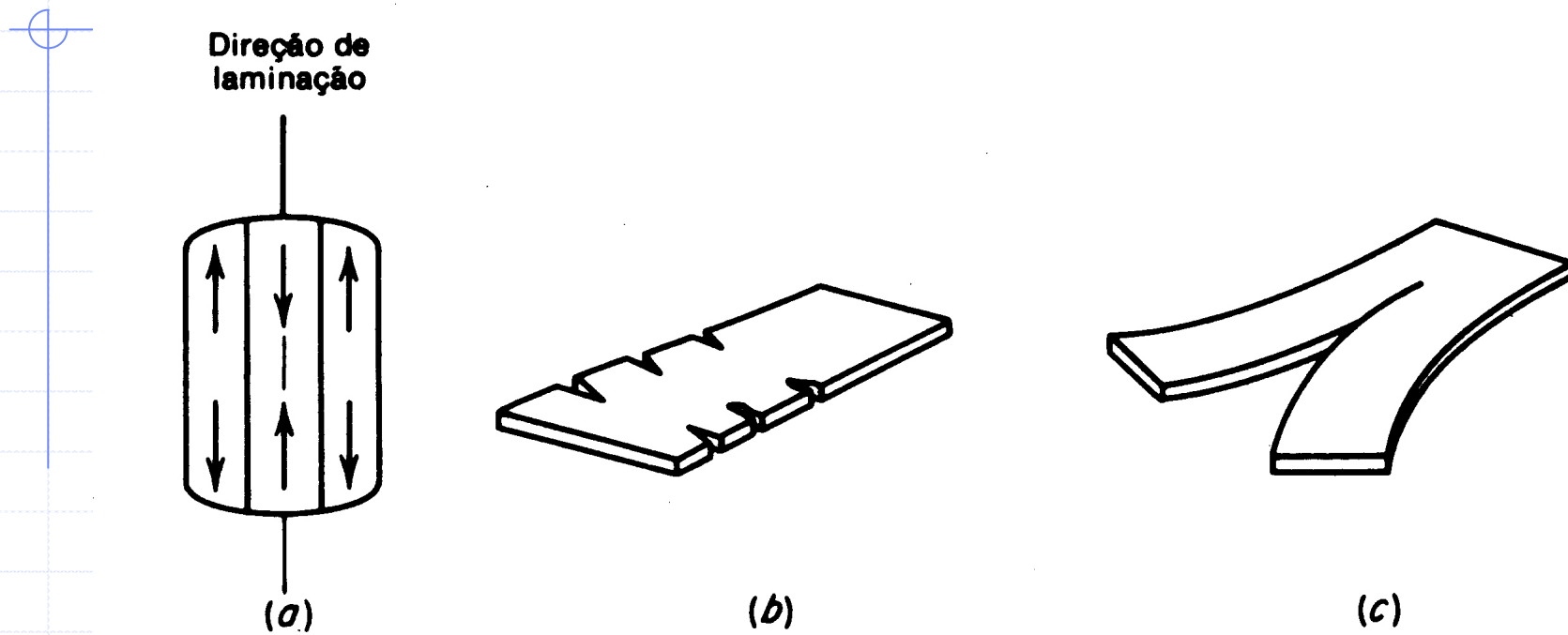
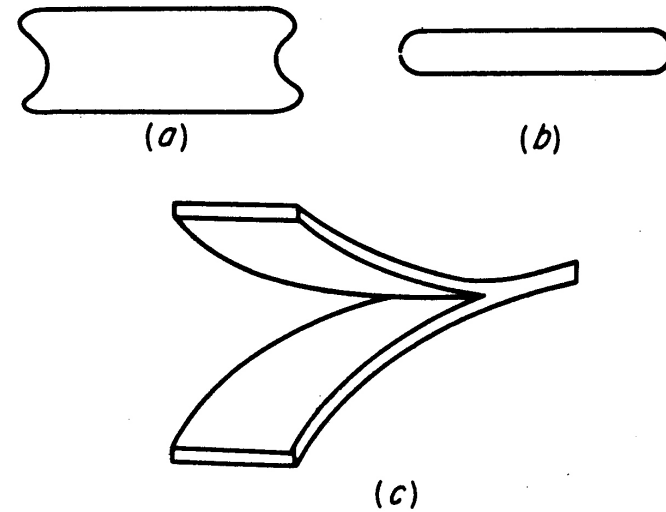


Fig. 17.10 Defeitos resultantes do espalhamento lateral.

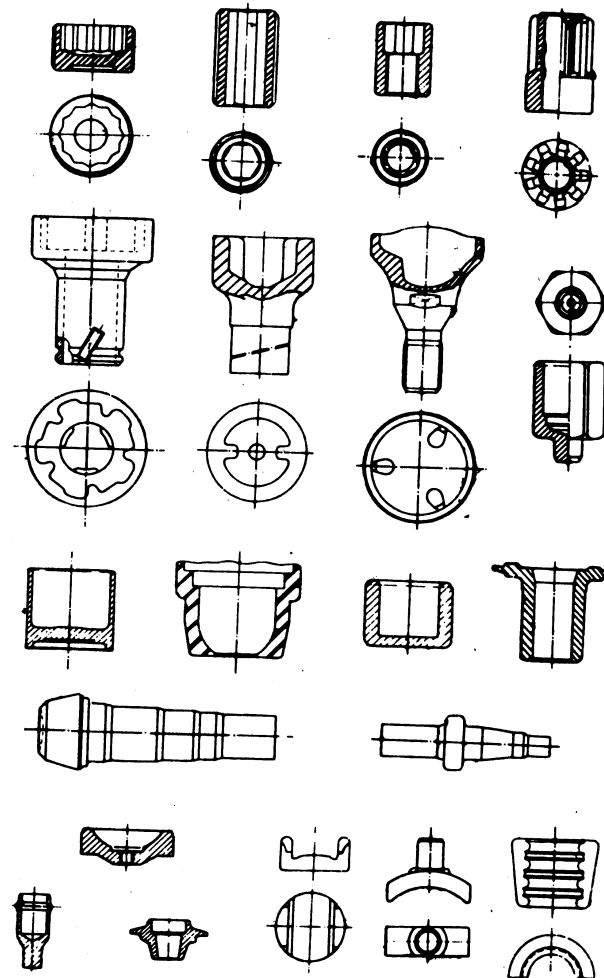
Defeitos

Fig. 17.11 Efeito nas arestas resultante da laminação com (a) leve redução, (b) intensa redução, (c) fratura “rabo de peixe”.



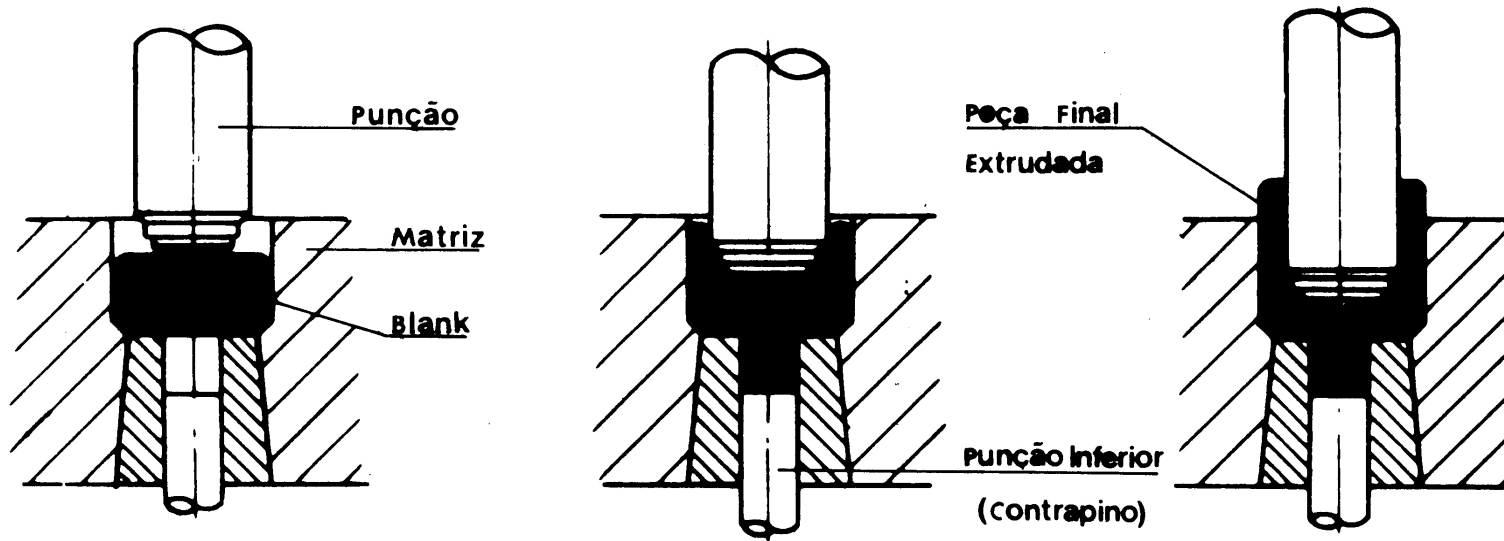
Combinação de Operações

Forjamento + extrusão +
Laminação, etc.



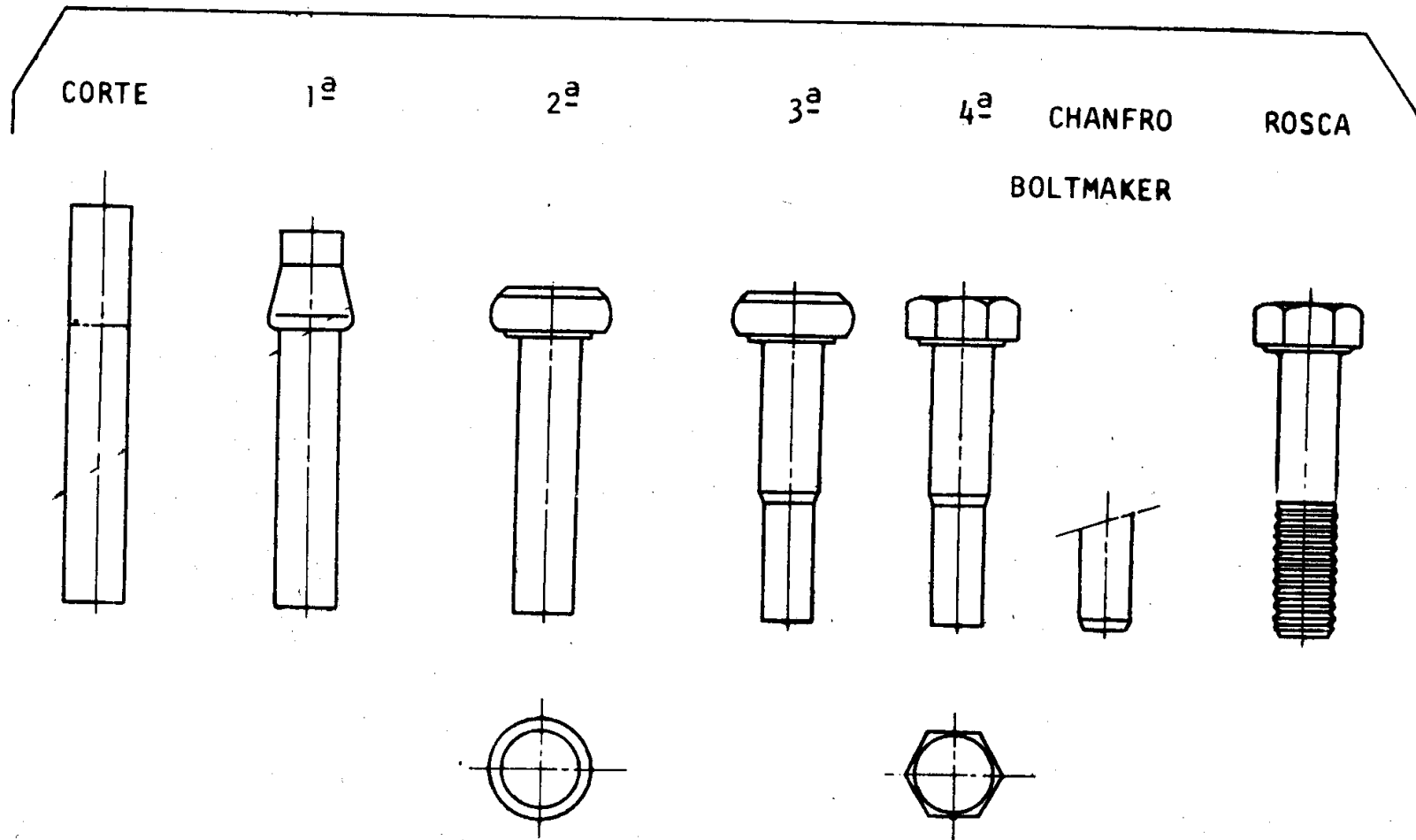
Exemplo

3:



Exemplo (parafuso)

ESTAMPAGEM A FRIO - PRENSA 4 ESTÁGIOS + CHANFRO + ROSCA



Exemplo

Video: Parafusos e Porcas

Trefilação

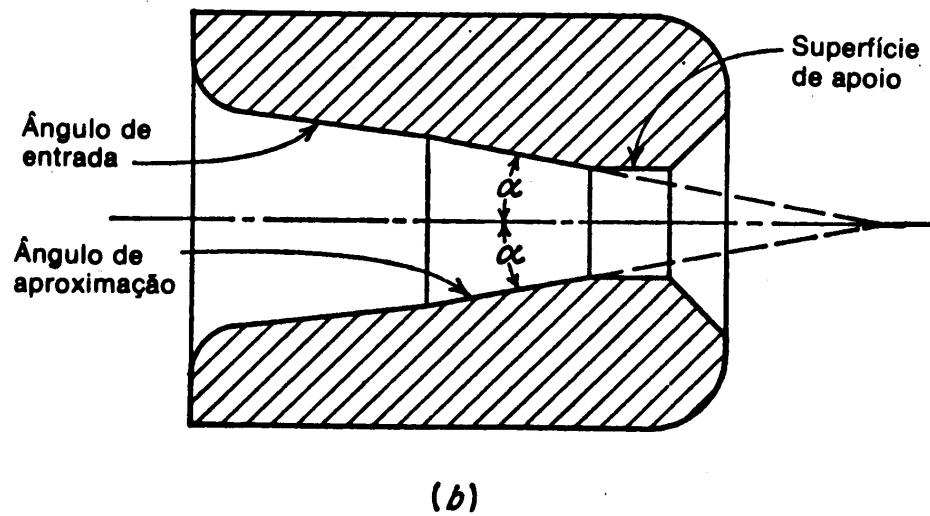
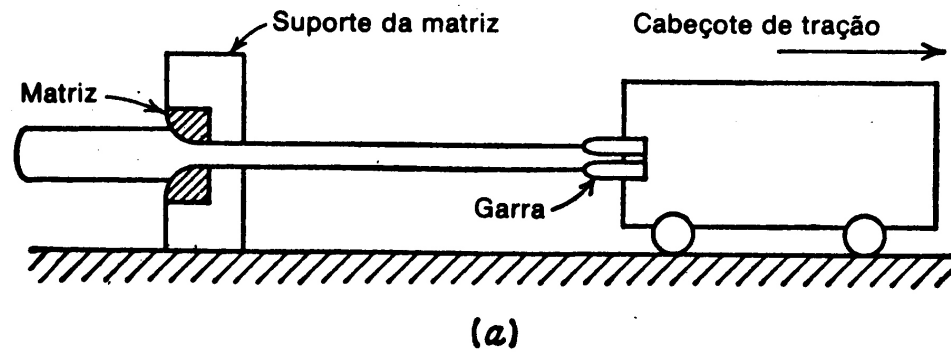


Fig. 19.1 (a) Desenho esquemático de uma bancada de trefilação; (b) seção transversal de uma matriz (fieira) de trefilação.

Equipamento básico

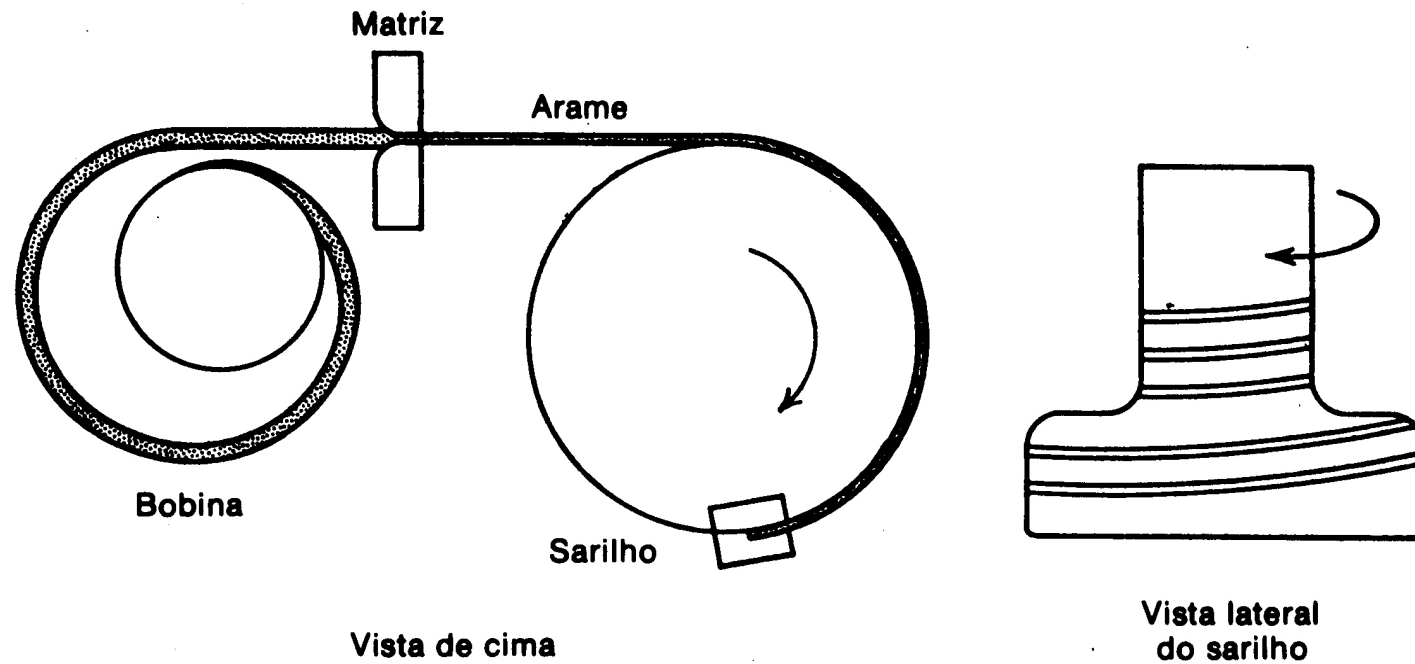


Fig. 19.2 Equipamento para trefilação de arames (esquemático).

Trefilação

Video: Trefila

Trefilação de tubos

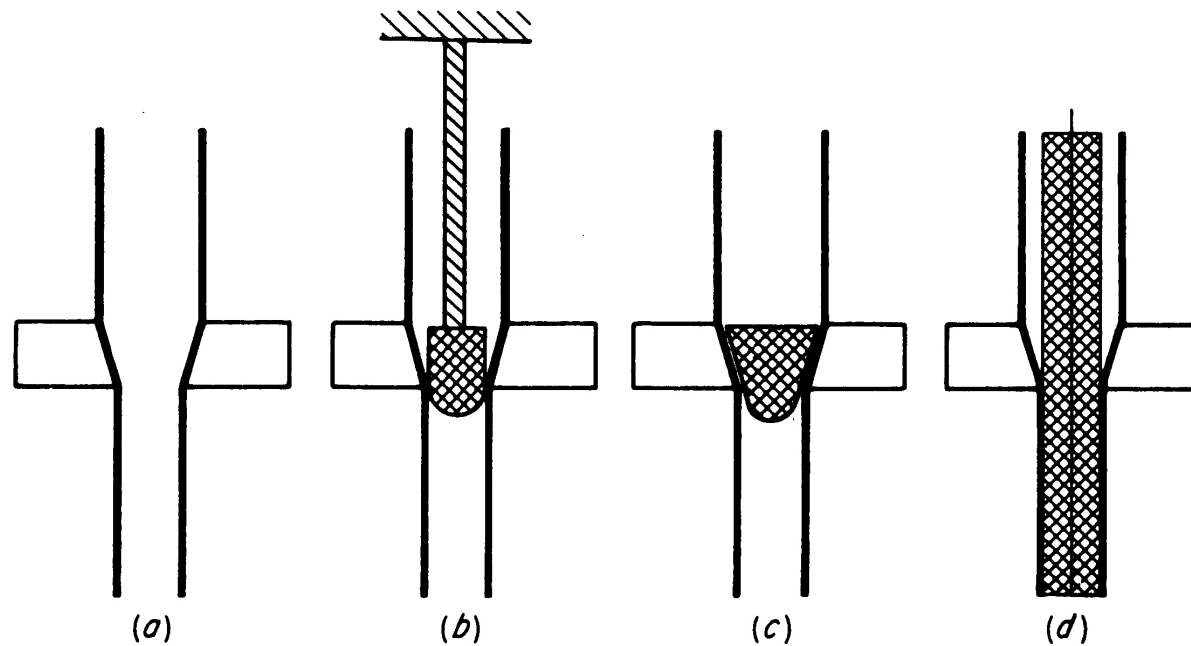


Fig. 19.8 Métodos de trefilação de tubos. (a) Sem suporte interno; (b) plugue fixo; (c) plugue flutuante; (d) mandril passante.

Conformação de chapas

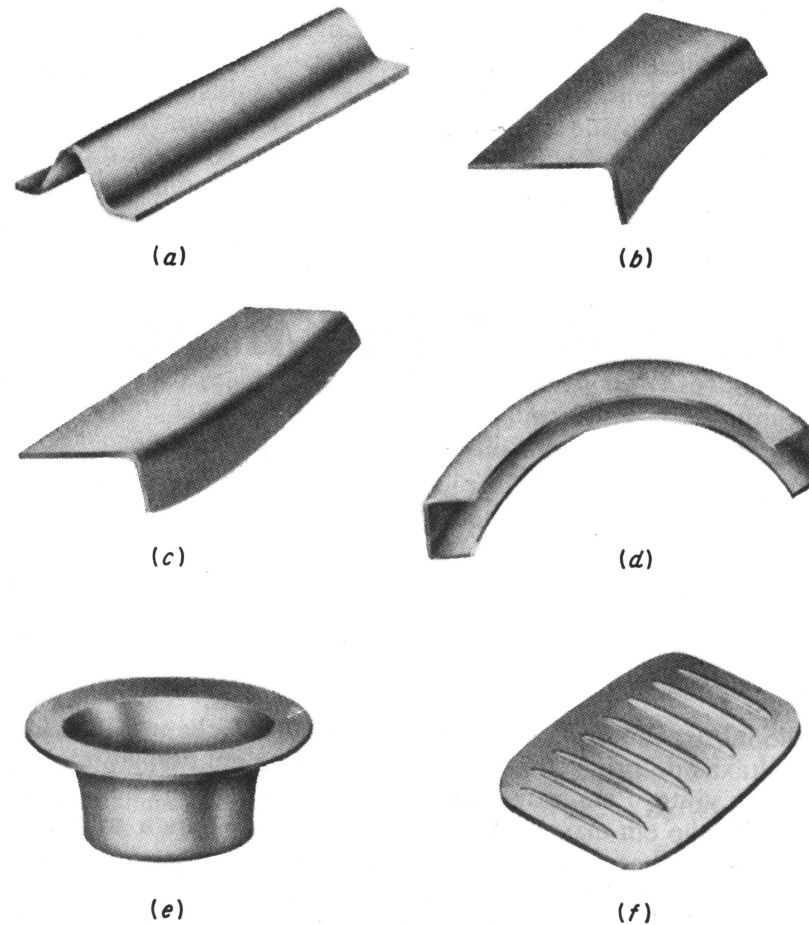


Fig. 20.1 Perfis típicos de conformação. (a) Simplesmente encurvado; (b) flange estirado; (c) flange contraído; (d) seções curvas; (e) copo embutido; (f) seção corrugada.

Recorte (cisalhamento)

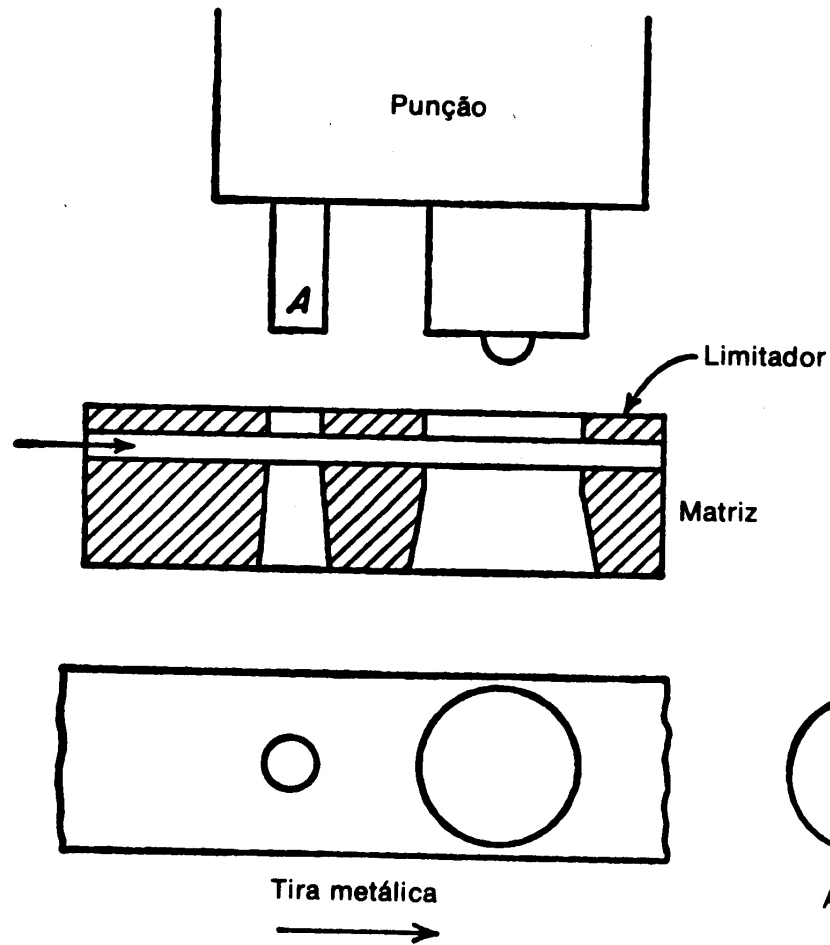


Fig. 20.2 Matriz para recorte e perfuração progressivos.

Recorte (cisalhamento)

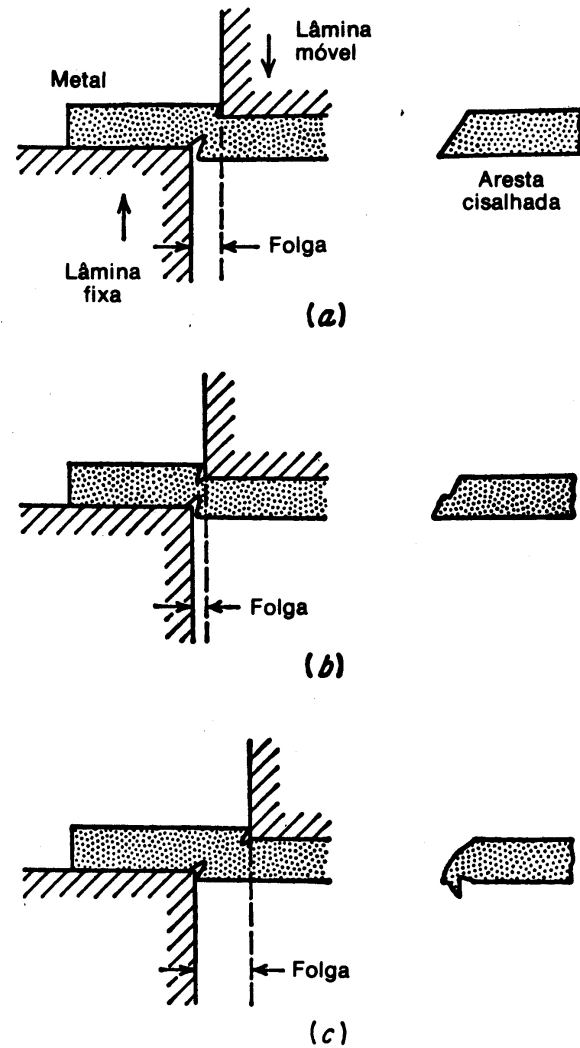


Fig. 20.6 Corte de metal em prensa. (a) Folga adequada; (b) folga insuficiente; (c) folga excessiva.

Dobramento

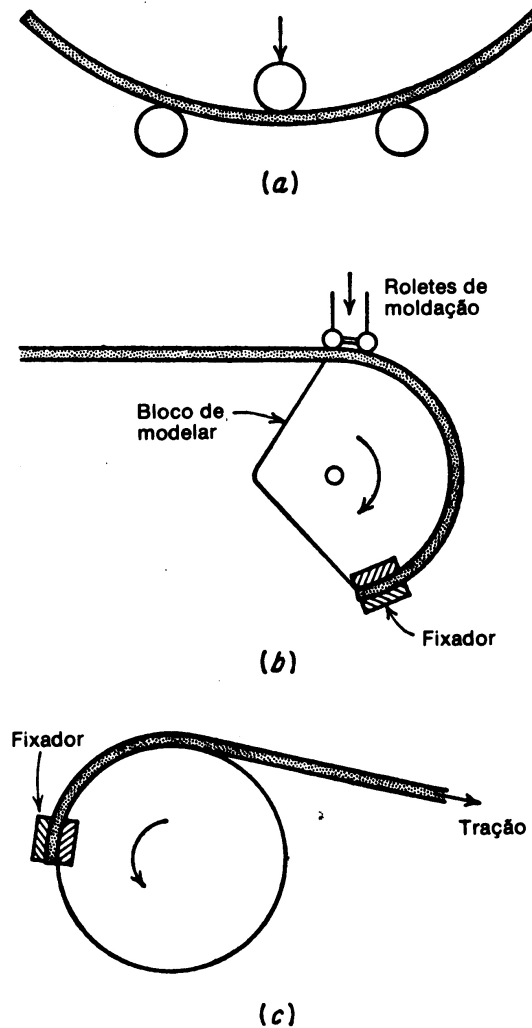


Fig. 20.4 Métodos de dobramento e perfilamento. (a) Máquina de dobrar com três roletes; (b) máquina de dobrar do tipo wiper; (c) conformação por embrulho (*wrap forming*).

Estiramento

Fig. 20.3 Conformação com borracha (processo Guerin).

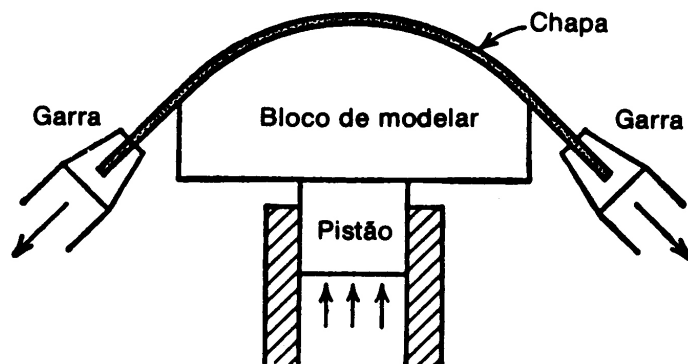
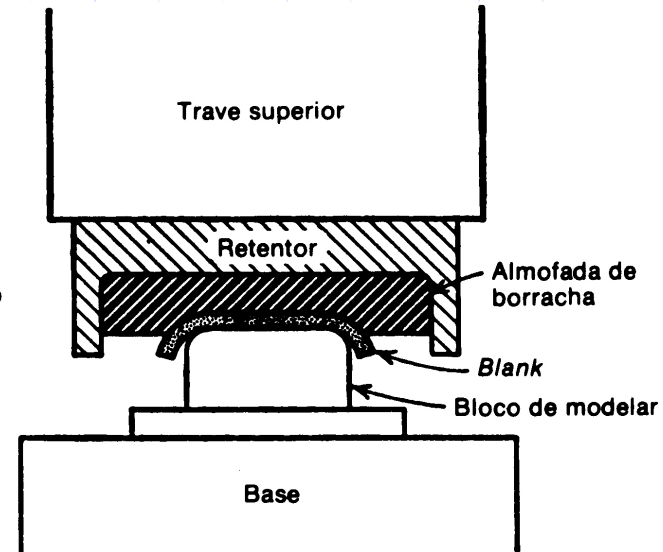


Fig. 20.10 Operação de estiramento por tração.

Repuxamento

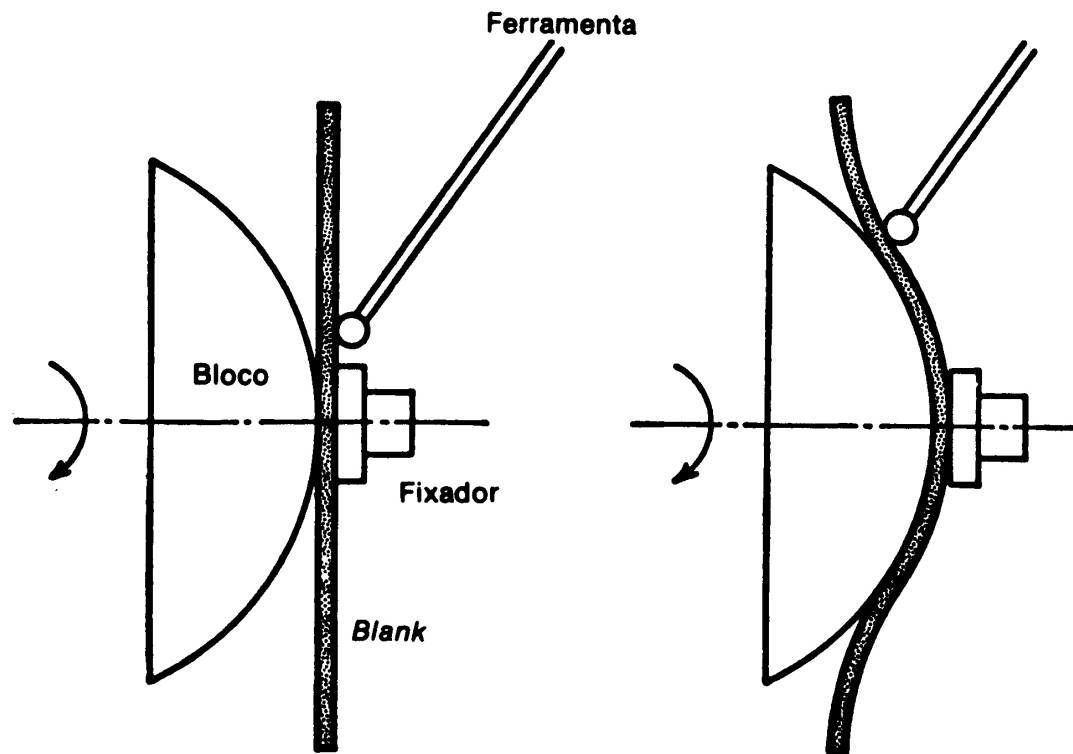


Fig. 20.5 Repuxamento manual.

Videos: Painéis, formas, refletores, etc.

Estampagem

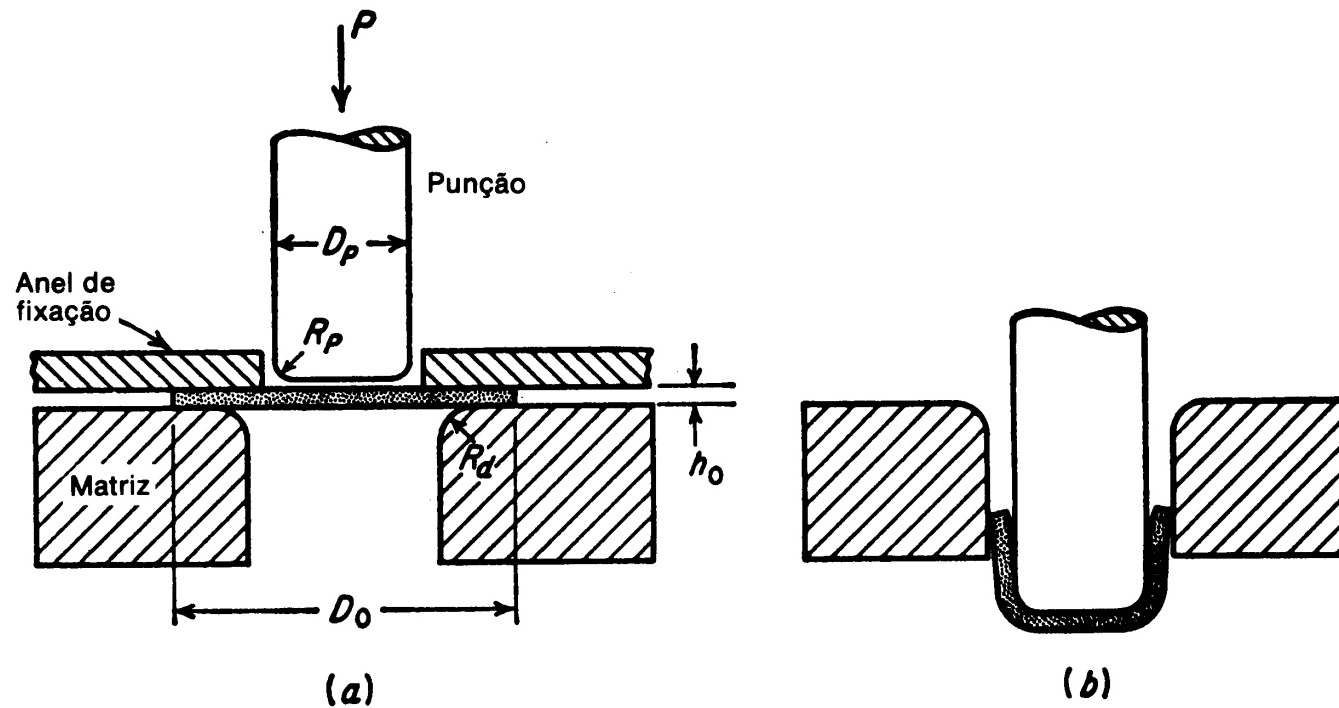


Fig. 20.13 Estampagem profunda de um copo cilíndrico. (a) Antes da estampagem; (b) após a estampagem.

Estampagem (expansão)

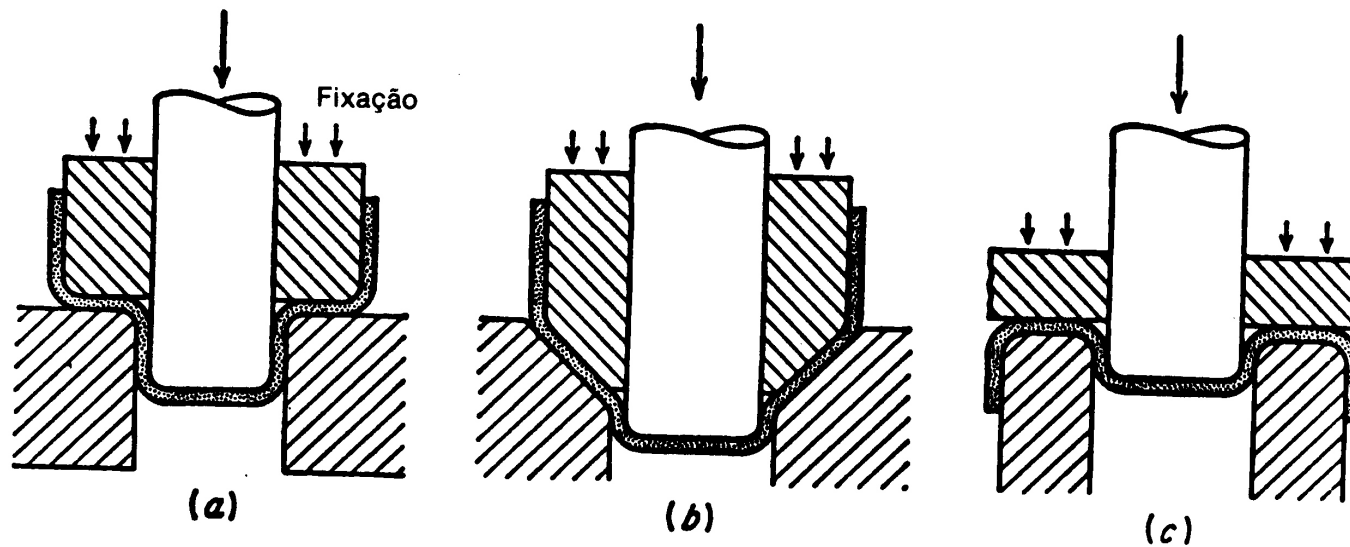


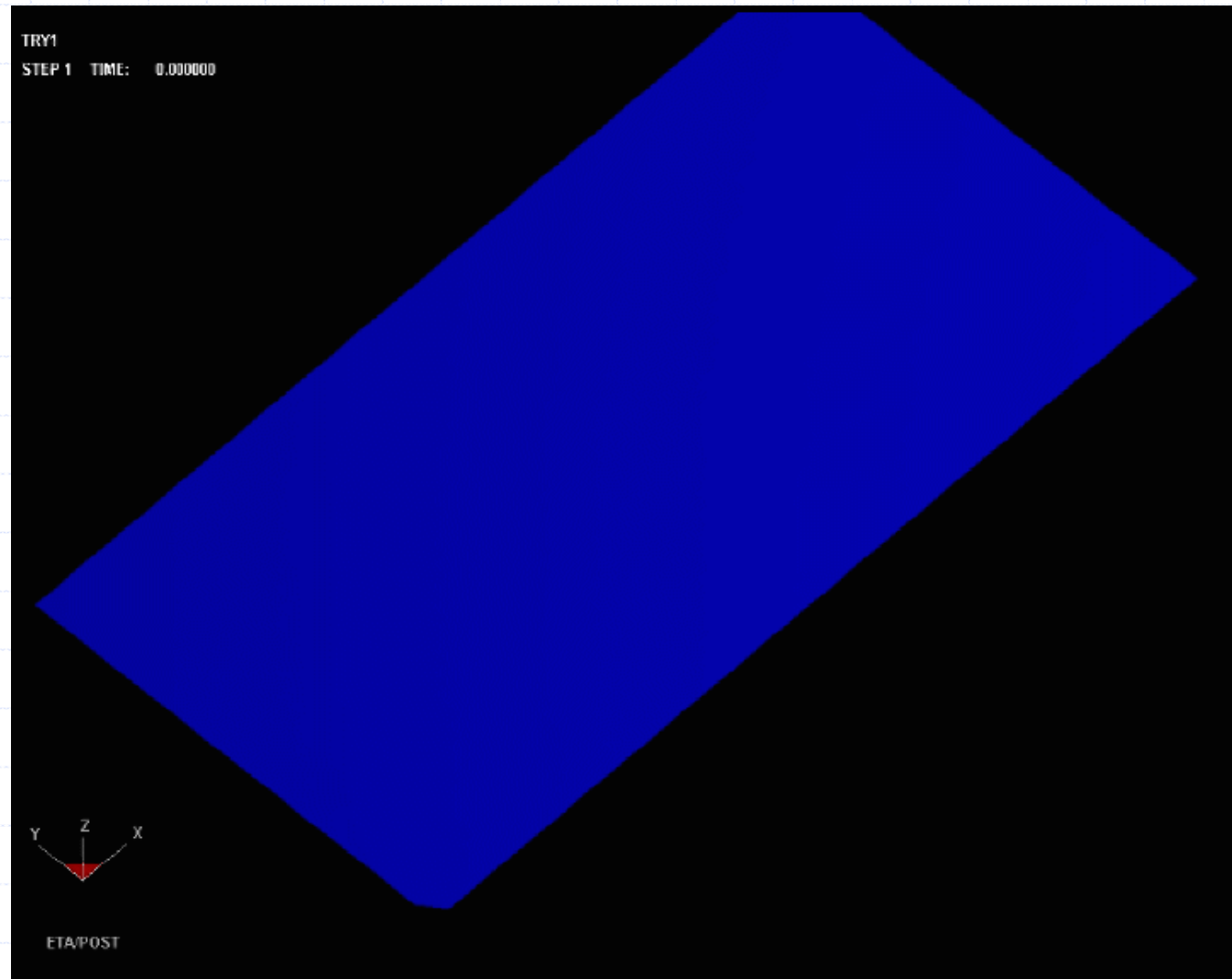
Fig. 20.16 Métodos de expansão de copos embutidos. (a) Expansão direta; (b) expansão direta com matriz cônica; (c) expansão indireta.

Exemplos

◆ Vídeos:

- Latas de Al
- Cilindro de aço

Estampagem



Limites para a estampagem

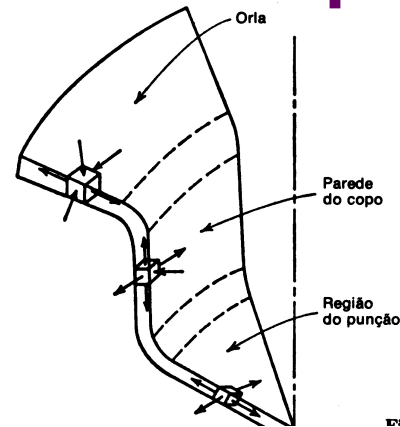


Fig. 20.14 Tensões e deformação presentes em uma

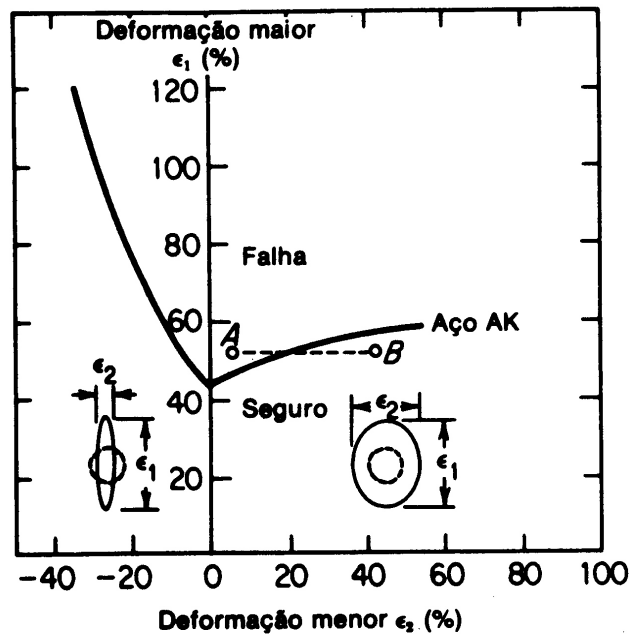
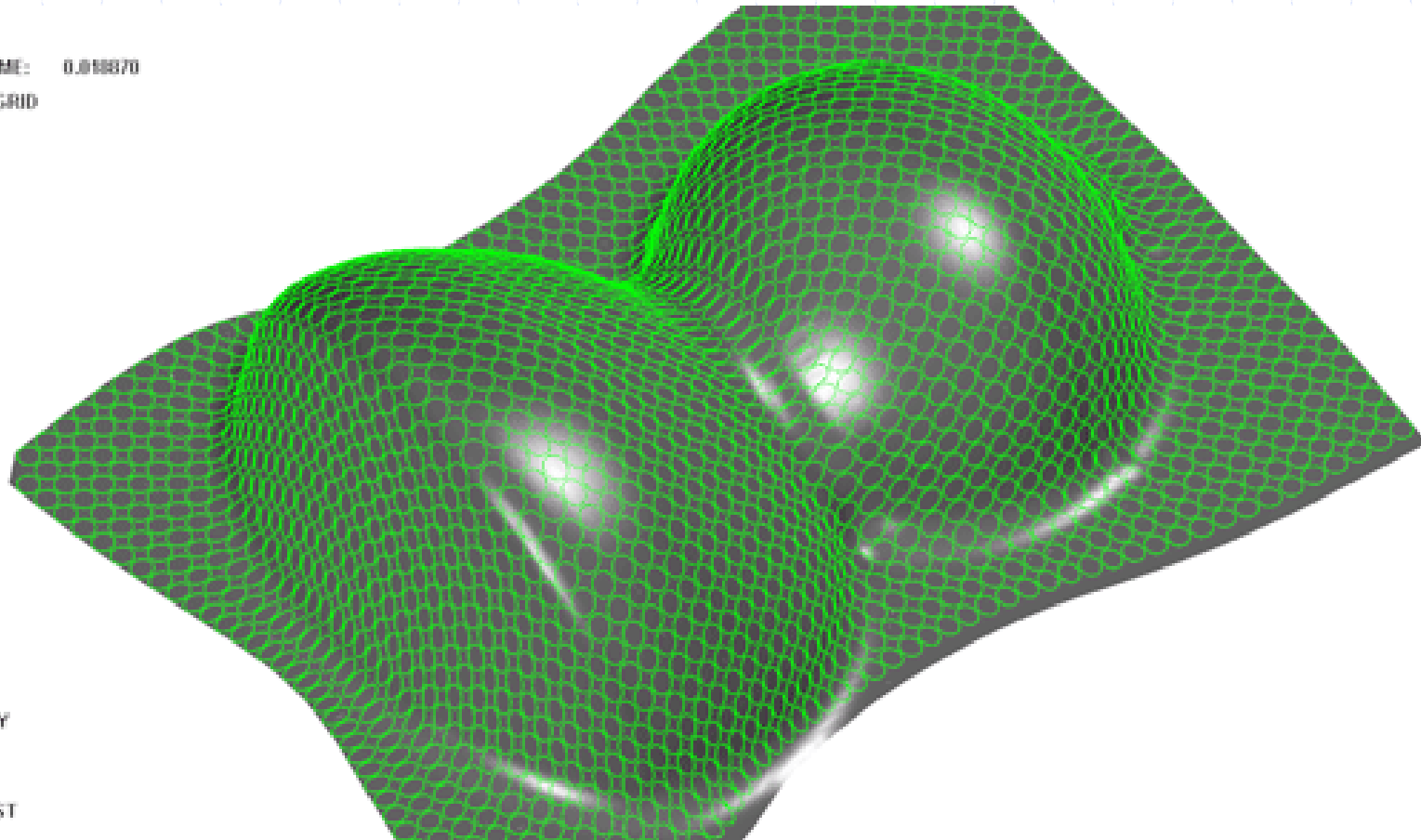


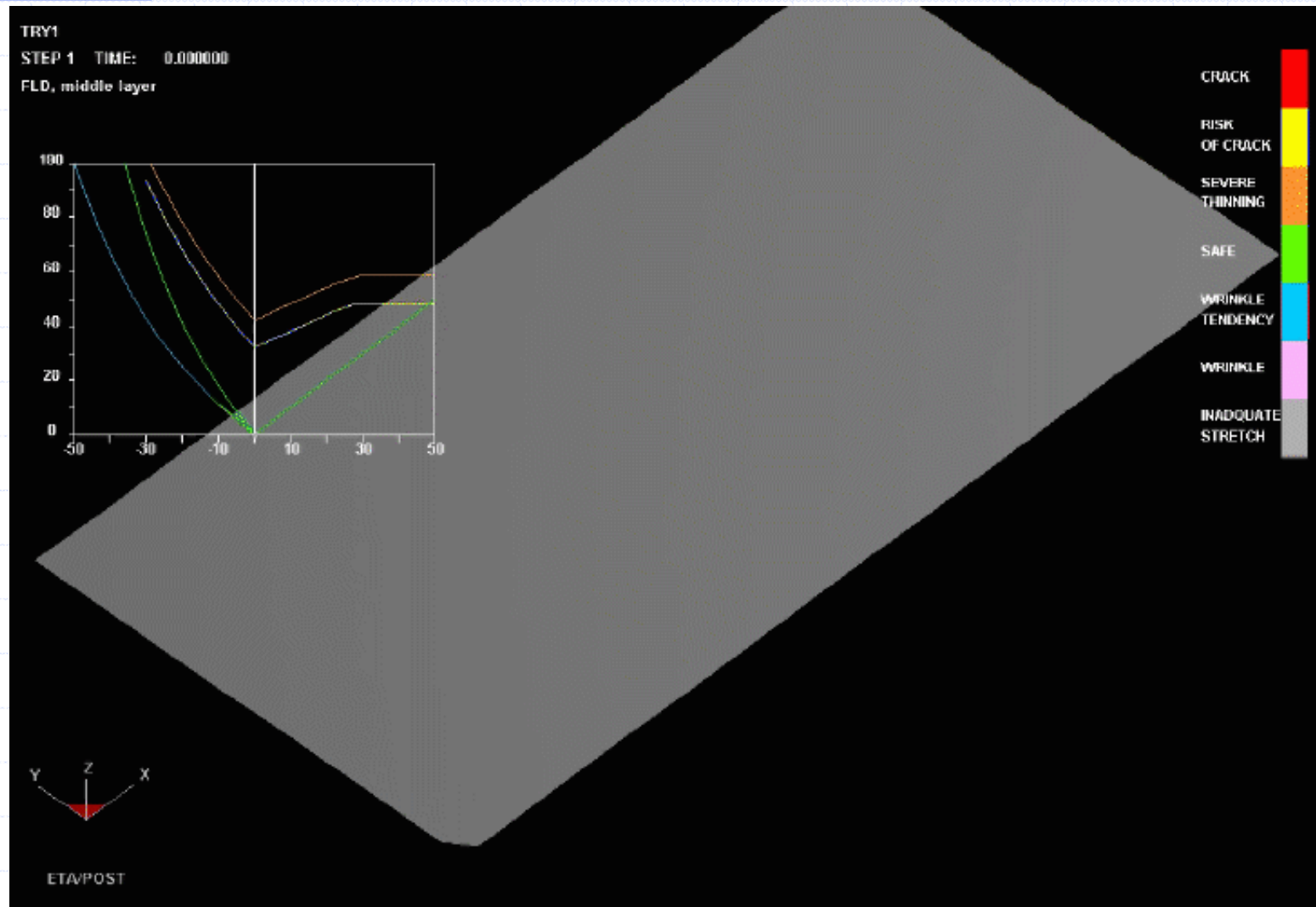
Fig. 20.19 Diagrama limite de conformação de Keller-Goodwin.

Método de cálculo

TRY-4
STEP 6 TIME: 0.000070
CIRCULAR GRID



Exemplo (limites para estampagem)



Nervuras de distensão

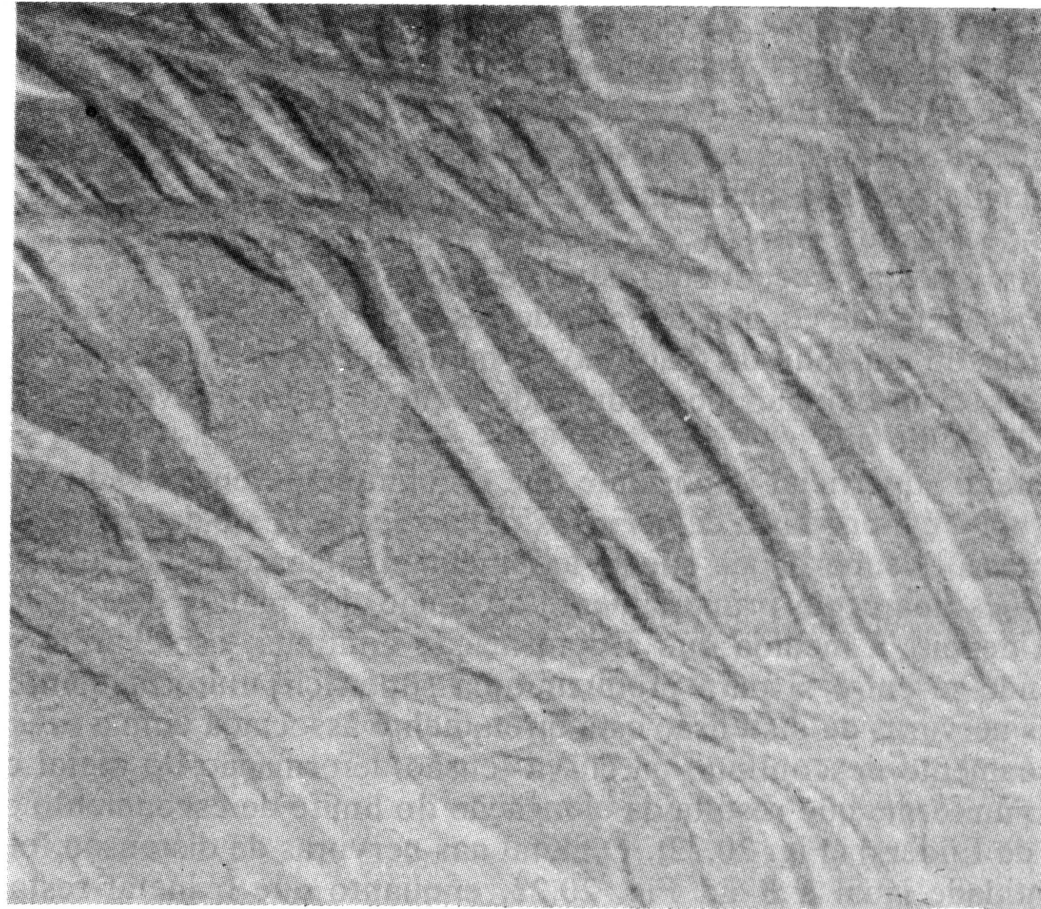


Fig. 20.21 Nervuras de distensão em chapa de aço baixo-carbono. (Cortesia de E. R. Morgan e *Met. Prog.*, junho de 1958, p. 89.)

Bibliografia

- ◆ KIMINAMI, Claudio S.; CASTRO, Walman B. e OLIVEIRA, Marcelo F. Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos, Blucher, São Paulo, 2013.
- ◆ KALPAKJIAN, Serope e SCHMID, Steven. Manufacturing processes for engineering materials, 5a ed., Pearson Education, New Jersey, 2007.
- ◆ Dieter, G.E., Metalurgia Mecânica, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1981.
- ◆ ASM International. ASM Handbooks Online, <http://http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp>