



PMR 3101

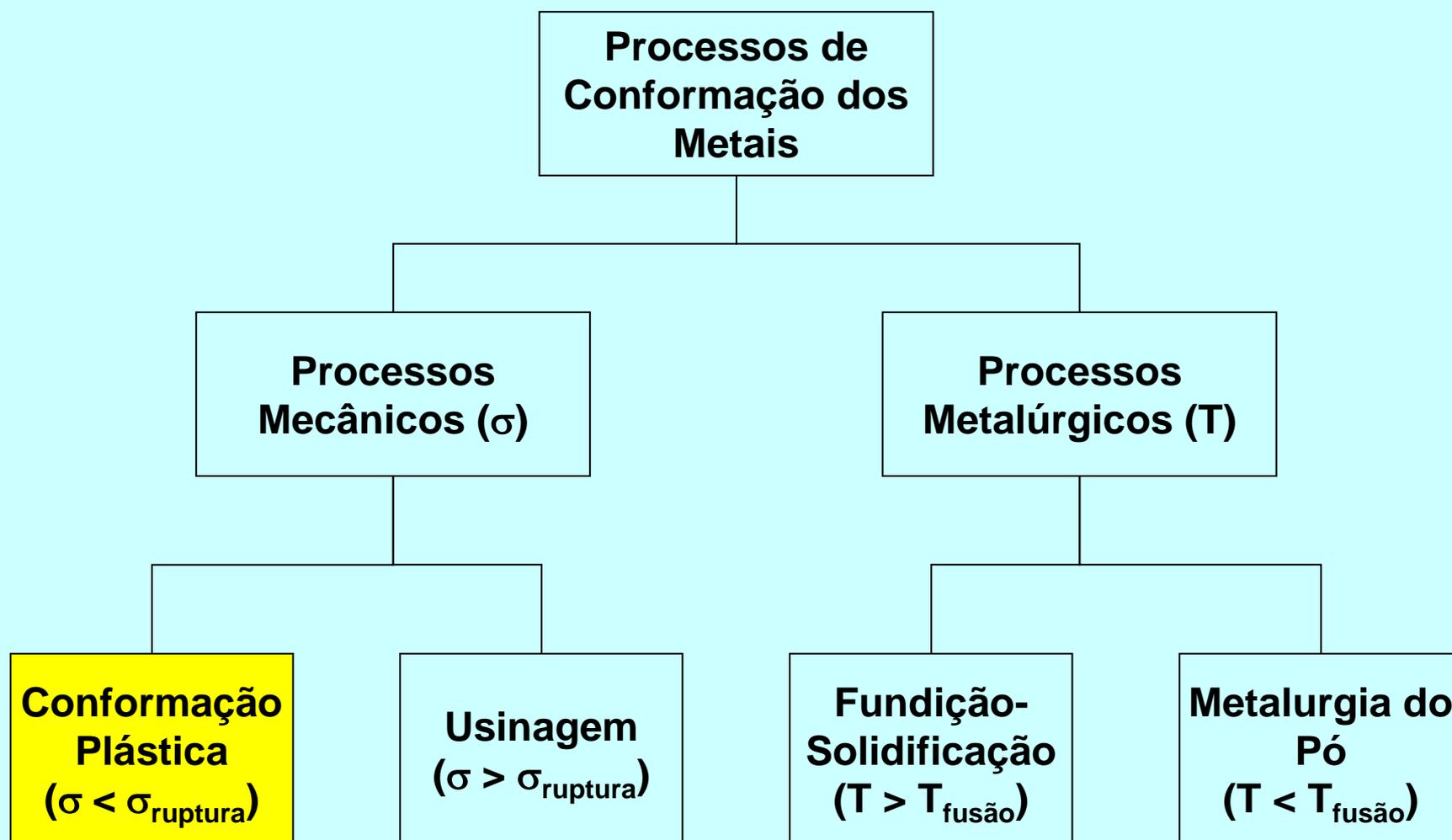
INTRODUÇÃO À

MANUFATURA MECÂNICA

Aula 6:

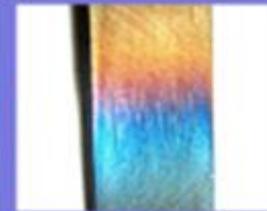
Processos de Fabricação por

Conformação Plástica





Divisão dos processos de fabricação por Conformação

Processos de Fabricação					
1	2	3	4	5	6
Formas primárias	Formas conformadas (secundárias)	Usinagem	Uniãoes	revestimentos	alterações de propriedades dos materiais
					





Conformação do material

- Processo de fabricação no qual ocorre modificação tri-dimensional da forma por meio da **conformação plástica**, sem contudo alterar a massa ou a coesão do material
- Conformação plástica: Modificação da forma/dimensões de um corpo metálico pela ação de tensões mecânicas sem que haja remoção de material
- Cerca de 80% dos produtos manufaturados na indústria metal mecânica sofrem uma ou mais operações de conformação plástica.



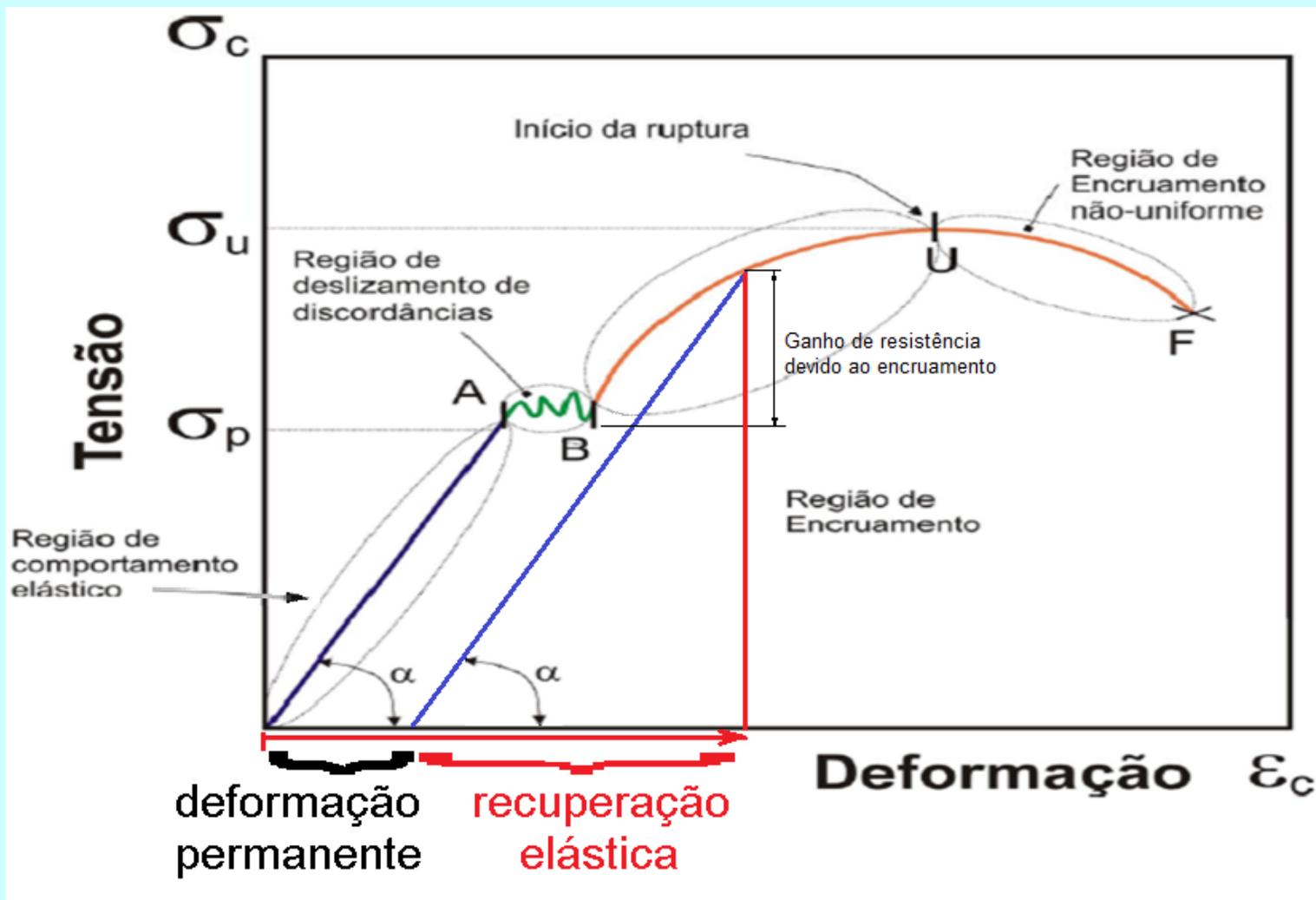
PROPRIEDADES MECÂNICAS/MICROESTRUTURAIS NA CONFORMAÇÃO

☞ Dentre as várias propriedades mecânicas que um material apresenta, as principais para os processos de conformação são:

- MÓDULO DE ELASTICIDADE
- LIMITE DE ESCOAMENTO (TENSÃO DE ESCOAMENTO)
- TENSÃO MÁXIMA (região de encruamento)
- RESILIÊNCIA
- DUCTILIDADE
- TENACIDADE À FRATURA

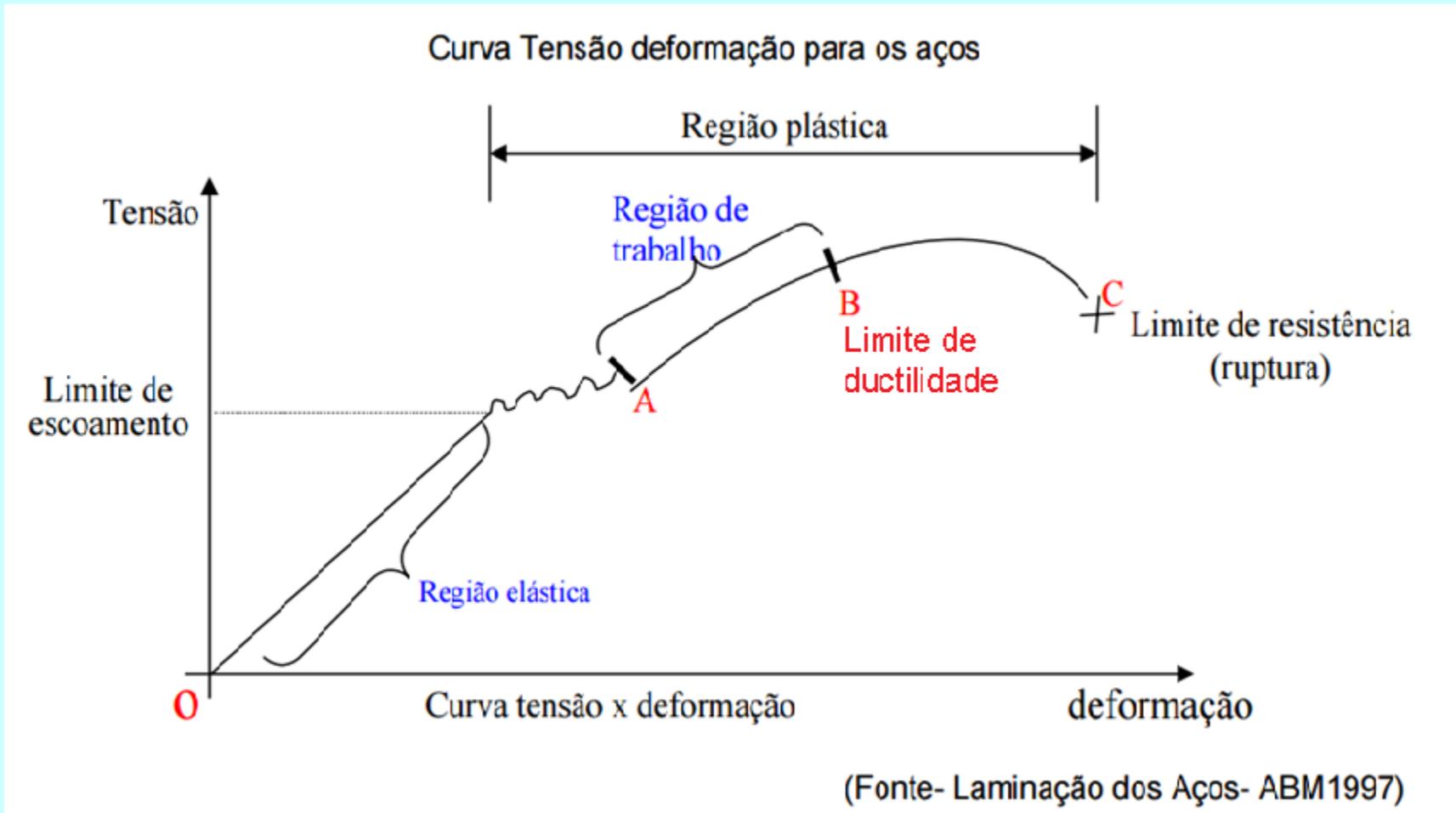


COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS SOB TENSÃO:





REGIÃO DE TRABALHO NA CONFORMAÇÃO:





Parâmetros de Ductilidade:

A ductilidade é definida como a capacidade do material se deformar plasticamente sem apresentar trincas.

O ensaio de tração fornece os seguintes parâmetros de ductilidade do material:

Alongamento total:

$$\%Al. = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100\%$$

**Redução de área
ou estrição:**

$$\%R.A. = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\%$$



Variáveis mais significativas nos processos de conformação

Produto/Peça

- Geometria
- Precisões dimensionais, geométricas e tolerâncias
- Acabamento superficial
- Micro estrutura, propriedades mecânicas e metalúrgicas

Ambiente

- Capacidade da mão de obra disponível
- Poluição do ar, sonora e emissão de resíduos
- Controle da produção
- Equipamentos disponíveis para controle da produção (metrológicos e metalúrgicos)



Ductilidade Vs Maleabilidade

Definição de Maleabilidade: A maleabilidade é uma propriedade que descreve a capacidade de um material de ser moldado ou dobrado sem se romper. Se refere à capacidade de um material de ser batido em folhas finas. Materiais como o ouro e a prata são altamente maleáveis, o que os torna ideais para a fabricação de joias e outros objetos decorativos.

Relação entre Ductilidade e Maleabilidade: Embora sejam propriedades diferentes, a ductilidade e a maleabilidade estão relacionadas. Materiais que são dúcteis tendem a ser maleáveis, e vice-versa. Ambas as propriedades dependem da capacidade dos átomos ou moléculas no material de se rearranjar em resposta à tensão sem se separar e causar uma fratura. Por exemplo, quando um metal é batido em uma folha fina (maleabilidade), seus átomos se rearranjam, mas não se separam.



Ductilidade Vs Fragilidade

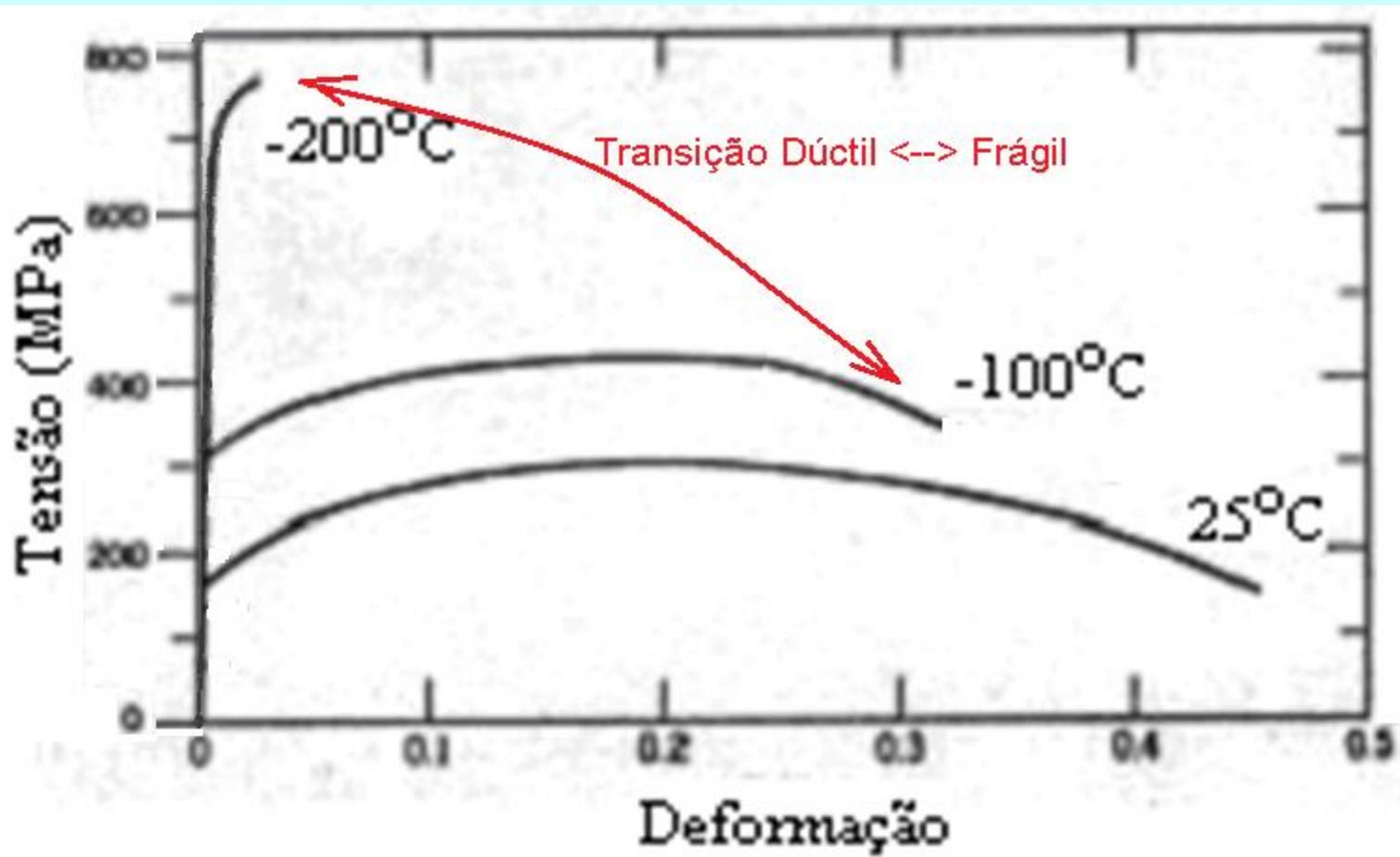
Definição de Fragilidade: A fragilidade é a propriedade de um material que se rompe sem deformação plástica significativa.

Materiais frágeis absorvem pouca energia antes da fratura, mesmo que sejam fortes. Vidro e cerâmica são exemplos de materiais frágeis.

Relação entre Ductilidade e Fragilidade: A ductilidade e a fragilidade são propriedades opostas. Materiais dúcteis podem deformar muito antes de fraturar, enquanto materiais frágeis fraturam com pouca ou nenhuma deformação. Por exemplo, um pedaço de vidro (um material frágil) quebrará se você tentar dobrá-lo, enquanto um pedaço de cobre (um material dúctil) pode ser dobrado facilmente sem quebrar.



Efeito da temperatura na curva de tração do ferro





Fatores metalúrgicos que influem na tenacidade dos aços:

Tamanho de Grão: Quanto menor o tamanho dos grãos do material policristalino menor a temperatura de transição dúctil-frágil e maior a tenacidade a uma dada temperatura. Isso porque os contornos de grão (contornos de alto ângulo) são obstáculos à propagação de trincas. Quanto passa de um grão para o outro a trinca tem que mudar de direção para continuar se propagando em um plano de clivagem. Essa mudança de direção consome energia.

Presença de Fases Frágeis: A precipitação de fases frágeis no tratamento térmico, durante o processo de fabricação ou mesmo em serviço pode fragilizar o material. Alguns exemplos são: cementita nos aços de alto carbono, fase β' nos latões, fases σ e α' nos aços inoxidáveis.

Composição Química: A presença de impurezas (ligas) pode aumentar ou abaixar a tenacidade. No aço, por exemplo, pouco enxofre e fósforo aumentam a dureza do aço, mas em grande quantidade causa fragilização. Já o níquel confere boa tenacidade ao aço, podendo ser usado em aços para fins criogênicos (uso em temperaturas inferiores a $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$).

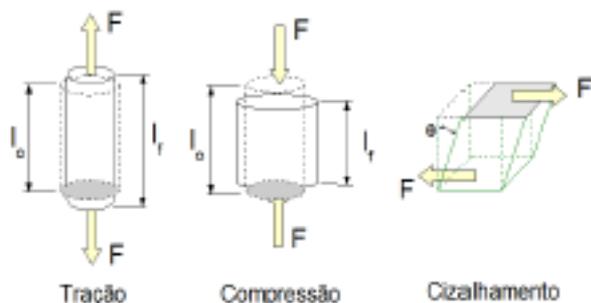


Classificação dos Processos de Conformação Mecânica

Conformação Mecânica

Quanto ao tipo de esforço predominante

- compressão direta
- compressão indireta
- tração
- flexão
- cisalhamento



Quanto a temperatura de trabalho

- *frio* $T_t < T_{recr}$
- *quente* $T_t > T_{recr}$
- *morno* $T_t \sim T_{recr}$
- *isotérmico* $T_t > T_{recr}$ constante

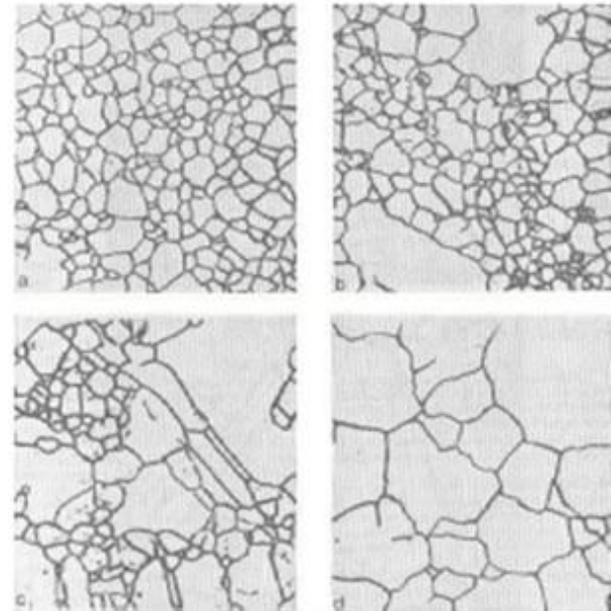
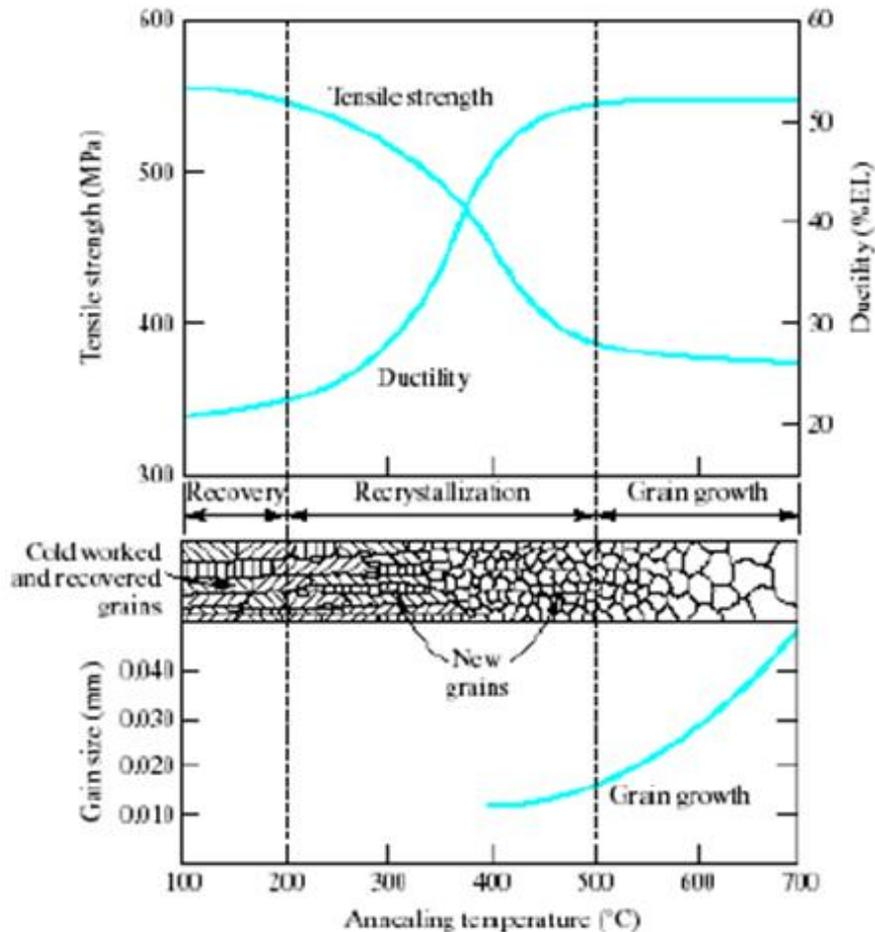
Onde:

⇒ T_t = temperatura de trabalho

⇒ T_{recr} = temperatura de recristalização



Efeito da temperatura no metais



Crescimento de grão durante recristalização (Gulhaév, pág. 103)

Mudança de propriedades e estrutura com a recuperação e a recristalização (fonte: Shackelford).



Características dos processos em função da temperatura de trabalho (T_t)

Quanto a temperatura de trabalho

- *frio* $T_t < T_{recr}$ → Pequenas deformações (relativamente)
- *quente* $T_t > T_{recr}$ → Encruamento
- *morno* $T_t \sim T_{recr}$ → Elevada qualidade dimensional e superficial
- *isotérmico* $T_t > T_{recr}$ e constante → Normalmente empregado para "acabamento"
- Recuperação elástica
- Equipamentos e ferramentas mais rígidos





Características dos processos em função da temperatura de trabalho (T_t)

Quanto a temperatura de trabalho

- *frio* $T_t < T_{recr}$
- *quente* $T_t > T_{recr}$
- *morno* $T_t \sim T_{recr}$
- *isotérmico* $T_t > T_{recr}$ e constante

- grandes deformações
- recozimento
- baixa qualidade dimensional e superficial
- normalmente empregado em operações grosseiras
- peças grandes e de formas complexas
- contração térmica, crescimento de grãos, oxidação





Características dos processos em função da temperatura de trabalho (T_t)

Quanto a temperatura de trabalho

- *frio* $T_t < T_{recr}$
- *quente* $T_t > T_{recr}$
- *morno* $T_t \sim T_{recr}$
- *isotérmico* $T_t > T_{recr}$ e constante

→ reúne as características vantajosas do trabalho a frio e a quente



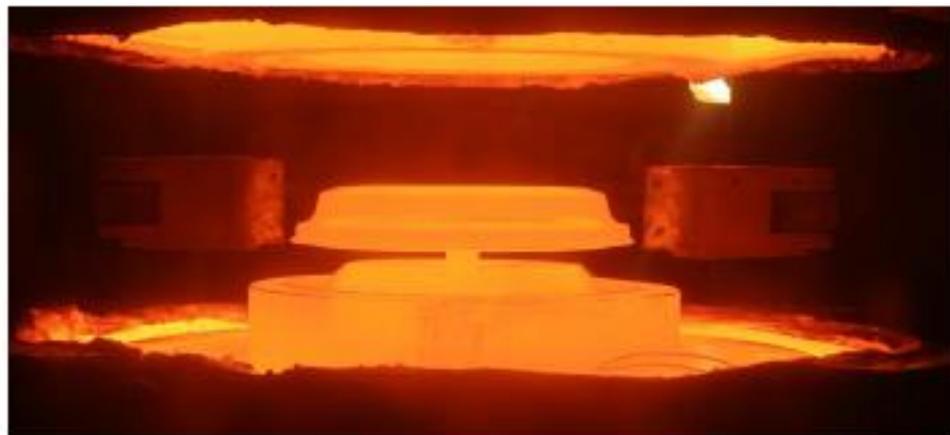
Quanto a temperatura de trabalho é MENOR que a temperatura de recristalização, mas é MAIOR que a temperatura de recuperação



Características dos processos em função da temperatura de trabalho (T_t)

Quanto a temperatura de trabalho

- *frio* $T_t < T_{recr}$
- *quente* $T_t > T_{recr}$
- *morno* $T_t \sim T_{recr}$
- *isotérmico* $T_t > T_{recr}$ e constante



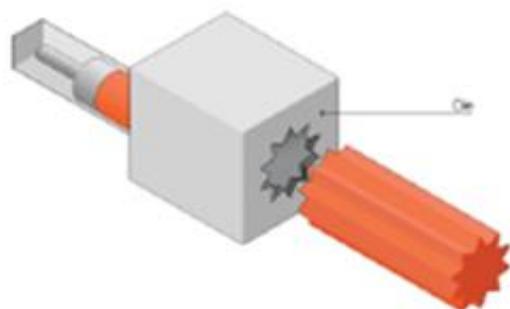
- reúne as características do trabalho a quente
- peça e ferramentas apresentam temperaturas próximas
- possibilidade de grandes deformações a taxas de deformação reduzidas



Conformação sob condições compressivas

Classificação

- Laminação
- Forjamento em matriz aberta
- Forjamento me matriz fechada
- Cunhagem
- Estrusão / trefilação





Conformação sobre condições compressivas

Vídeos exemplo

<https://www.youtube.com/watch?v=13dUL9OQFvw>

Esse é um vídeo mostrando o processo de laminação contínua.

<https://www.youtube.com/watch?v=XTU0Z-FkhtU>

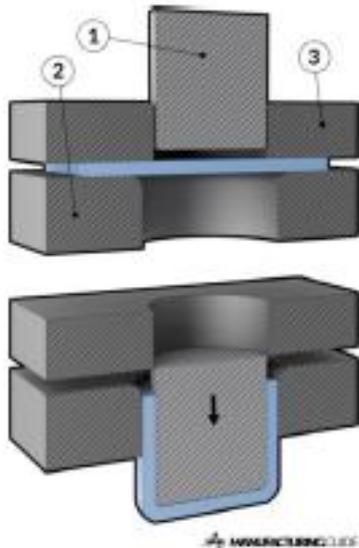
Esse é um vídeo mostrando alguns exemplos de processo de forjamento em matriz aberta. Interessante é observar a dimensão das peças



Conformação sobre condições combinadas de tração e compressão

◆ Classificação

- Embutimento profundo
- Flangeamento

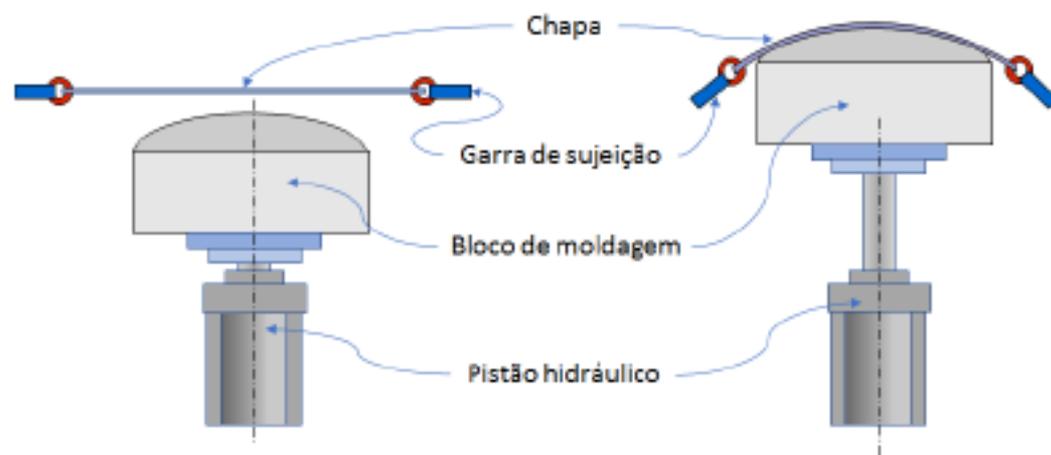




Conformação sobre condições de tração

Classificação

- Estiramento
- Expansão
- Expansão por estiramento

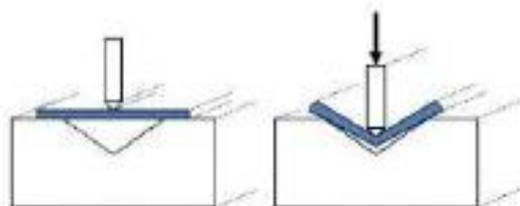




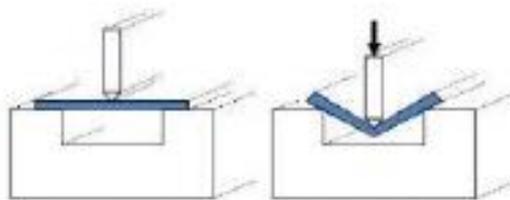
Conformação por dobramento

Classificação

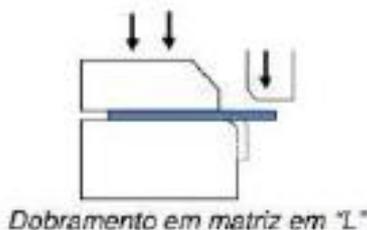
- Dobramento linear
- Dobramento circular



Dobramento em matriz em "V"



Dobramento em matriz em "U"



Dobramento em matriz em "L"



Uma dobra

Duas dobras



Três dobras





Conformação sobre condições de cisalhamento

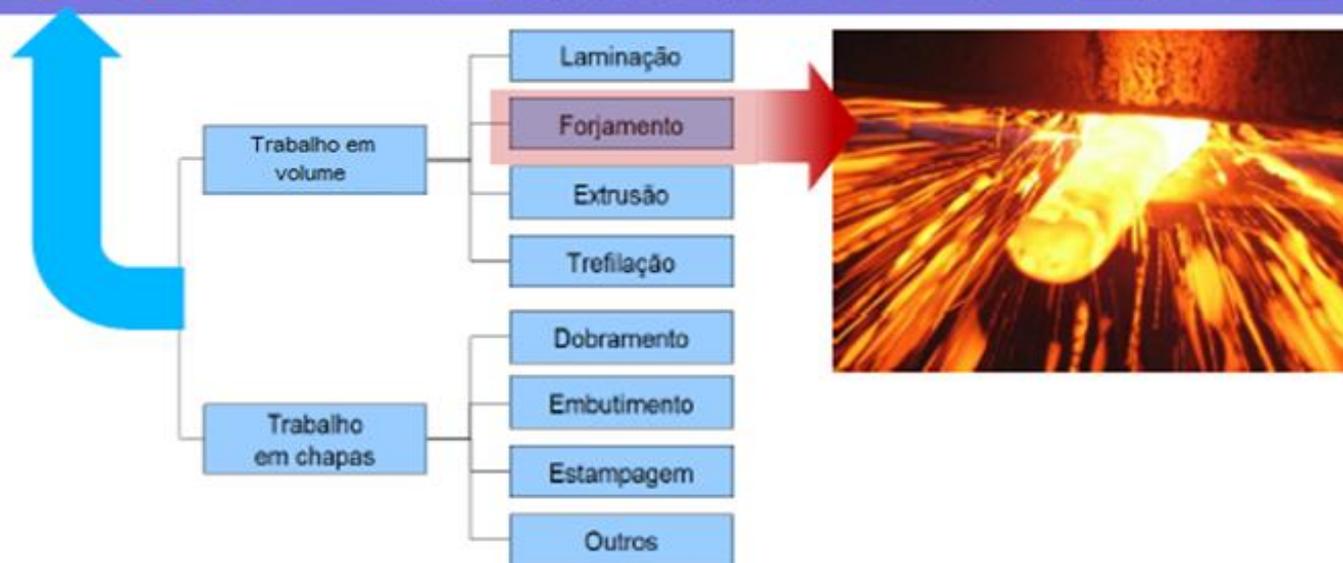
Classificação

- Torcionamento
- Estampagem





Divisão dos processos de fabricação





Forjamento

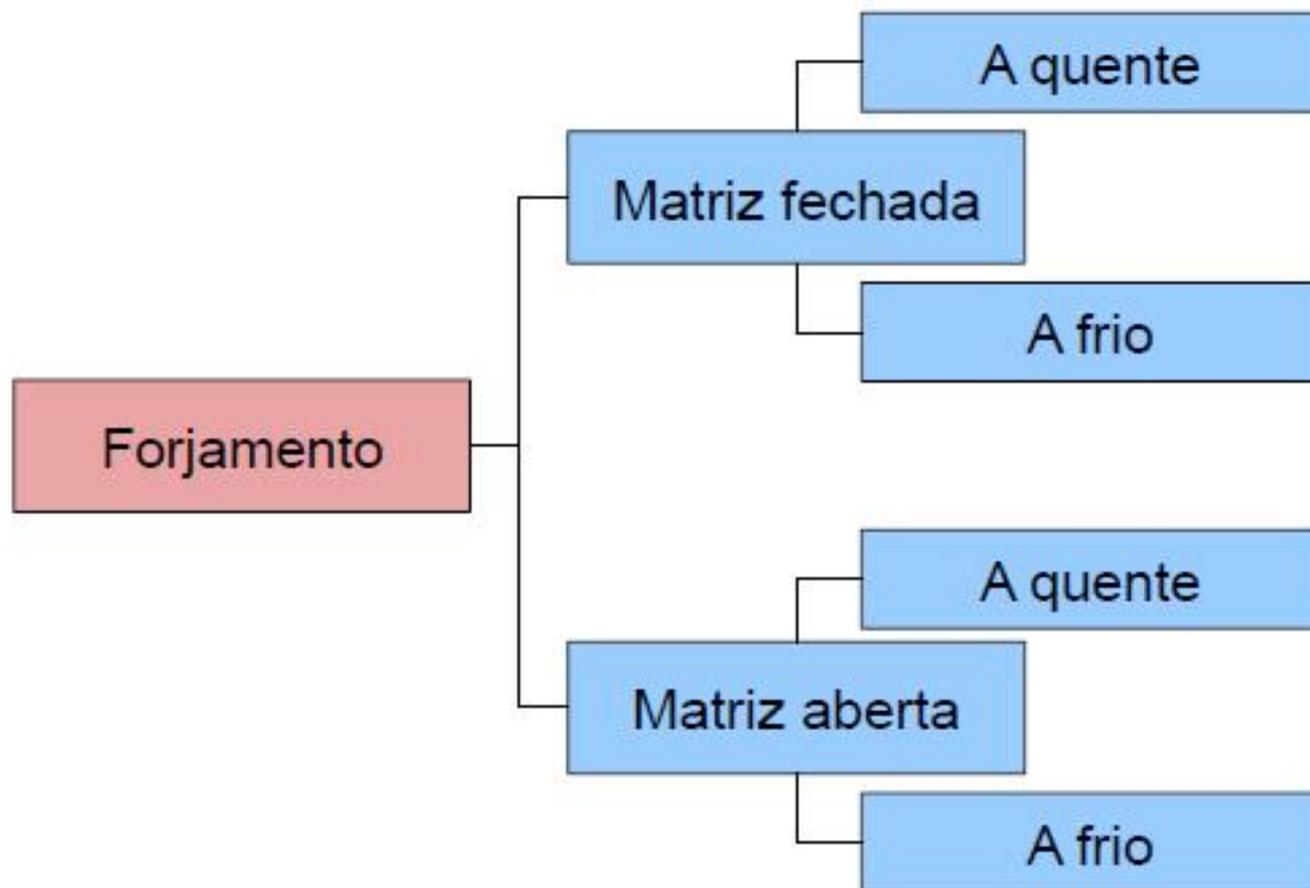
Definição

- Processo de fabricação onde a forma final do componente é obtida através da deformação plástica resultante da aplicação de pressão ou impacto promovido por uma prensa ou martelo



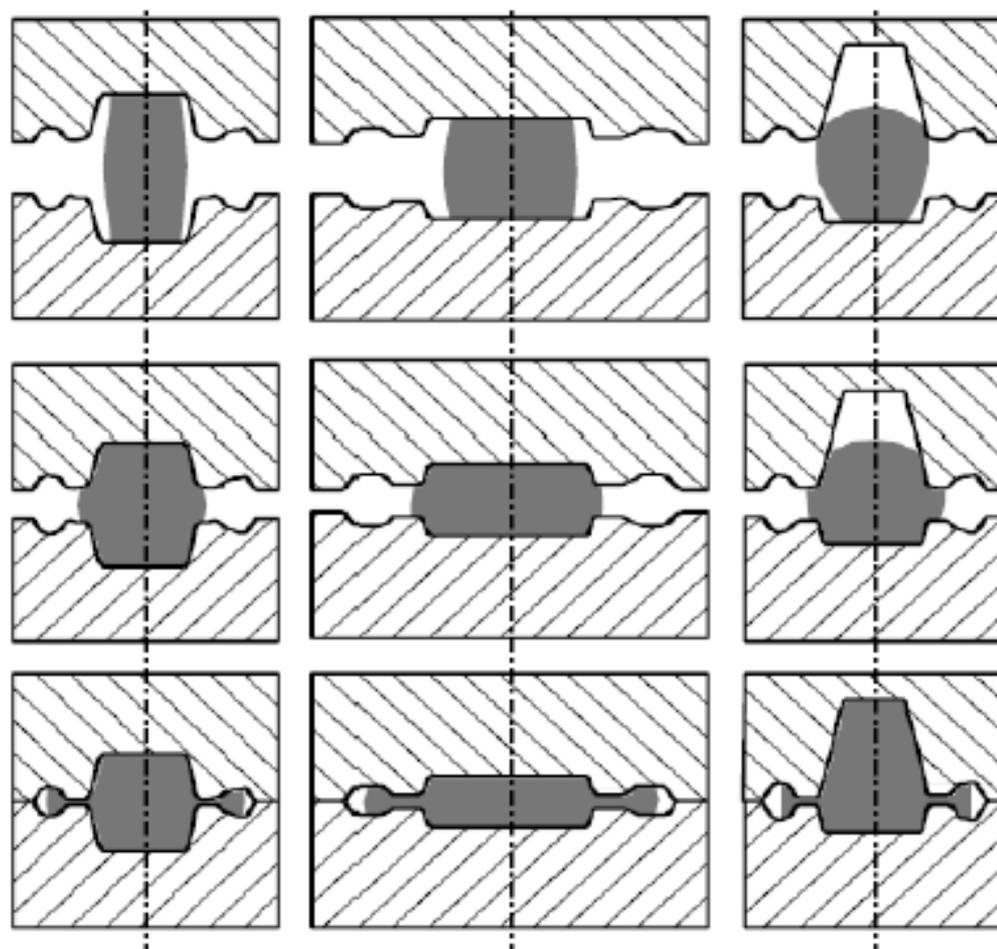


Forjamento - Classificação





Forjamento – Tipos básicos de operações quando o enchimento



Compressão

Orientação

Preenchimento

Compressão

Espalhamento

Fechamento



Forjamento

- Sequência de forjamento



- a primeira etapa confere pré-forma ao blank e é realizada a parte da sequência de conformação principal
- as fase intermediárias otimizam a distribuição da massa, antes que a forma final seja forjada.
- a seleção de uma sequência depende da interpretação dos diferentes métodos de conformação, e como estes permitem as reduções nas formas intermediárias.
- a divisão em vários estágios de formação reduz as tensões na matriz, permitindo a distribuição de forças e reduzindo o desgaste da matriz
- o preenchimento escalonado pode influenciar positivamente na qualidade do forjado
- peças de grande volume podem ser forjadas com cargas menores => economia



Texturização causada pelo forjamento





Forjamento

➤ Vantagens

- Resistência das peças
- Produtividade relativa. Serve tanto para produção em massa quanto peças de lote único
- Equipamento relativamente simples (prensa)
- Pode ser feito sem a necessidade de ferramental especial (forjamento em matriz aberta)

➤ Desvantagens

- Custos de máquinas
- Projeto e custo das ferramentas devem ser amortizados em função do número de peças a serem produzidos
- Automação simples
- O desempenho é definido por unidade de tempo e deve ser menor para o processo automatizado



Tipos de Forja

➤ Martelo de queda livre



➤ Martelo de queda livre de dupla ação



➤ Martelo pneumático



➤ Prensa excêntrica



➤ Prensa hidráulica



Máquina para Forjamento	Velocidade [$m.s^{-1}$]
Martelo de queda livre	3,6-4,8
Martelo de dupla ação	3,0-9,0
Prensa hidráulica	0,05-0,3
Prensa mecânica	0,06-1,5



Possibilidades de Defeitos em Produtos Forjados que devem ter atenção especial de projetistas e processistas:

Falta de Redução: Preenchimento incompleto do metal na cavidade da ferramenta. Isto ocorre porque o metal não fluiu como planejado na cavidade da matriz e não completou a peça, faltando partes da mesma, ou porque a força aplicada não foi suficiente para fazer isso.

Trincas Superficiais: Rachaduras que aparecem na superfície da peça, que se deve ao excessivo trabalho na superfície da peça em temperatura baixa ou por fragilidade a quente inerente ao material (metal).



Trincas nas Rebarbas: Rachaduras que aparecem nas regiões das rebarbas, após o rebarbamento (retirada do excesso de metal do forjamento). Aparecem porque o metal apresenta conformação excessiva nessa região, assim como pode apresentar impurezas oriundas da fundição ou mesmo esforço inadequado não cortando, mas sim arrancando a rebarba.

Trincas Internas: Rachaduras que aparecem na parte interna da peça, ocorrendo devido às tensões originárias por grandes deformações, temperaturas de trabalho inadequadas e impurezas presentes no metal.

Gota Fria: Aparente rachadura que apresenta o formato de uma ruga na superfície da peça e pode ser mais ou menos profunda. Isto ocorre devido a baixa temperatura de forjamento do metal ou da baixa temperatura de trabalho da matriz.



VANTAGENS E DESVANTAGENS DA APLICAÇÃO DO FORJAMENTO:

Vantagens:

- melhoria das propriedades mecânicas da peça produzindo um alinhamento direcional da microestrutura → melhoria da ductilidade, impacto e resistência a fadiga;
- Menor custo de fabricação, em virtude da mínima perda de material e poucas etapas de fabricação.

Desvantagens:

- As peças a serem forjadas geralmente necessitam de usinagem depois do processo de forjamento;
- Os equipamentos são muito caros.



Exemplos de peças forjadas



<https://www.youtube.com/watch?v=XBFWDD7Y8-U>

Vídeo sobre forjamento (34" →)

Intervalo: 10 min.

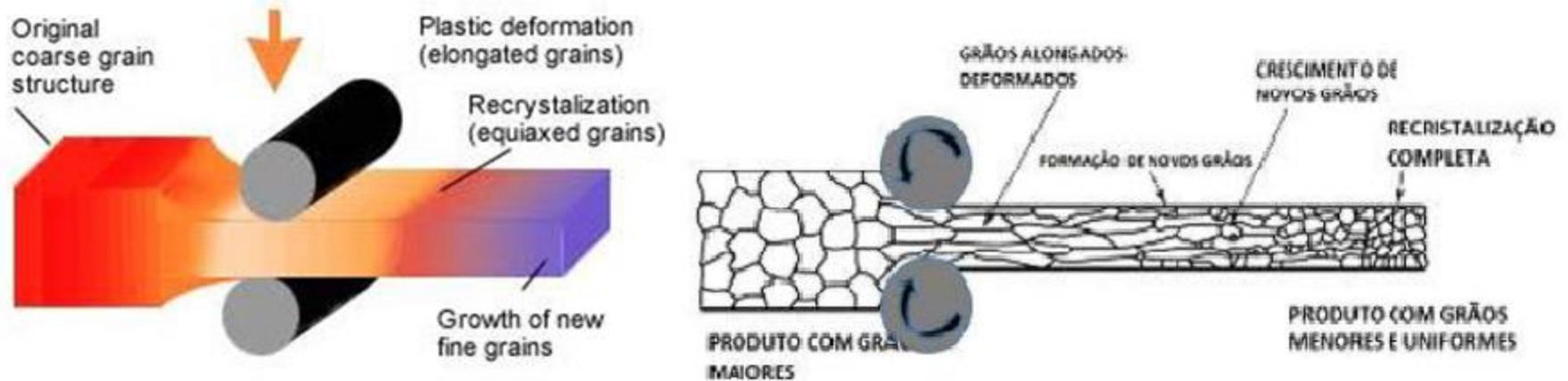


Laminação





Laminação

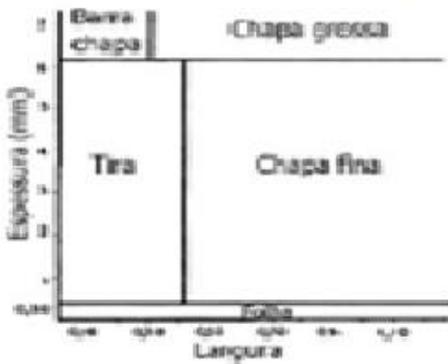


As deformações plásticas são provocadas pela pressão dos cilindros sobre o material

O arraste do corpo é dado pela atrito entre cilindros e corpo

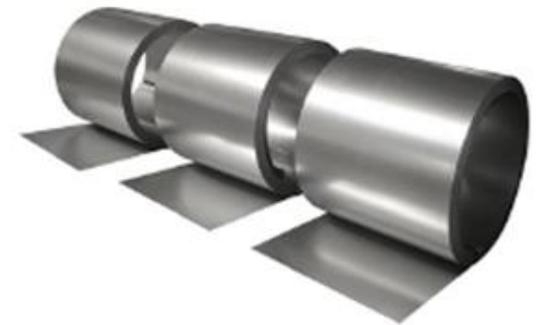


Tipos de produtos



- Planos
- Placas
- Chapas

Laminação



Não planos

- Barras
- Perfis
- Trilhos
- Vergalhões
- Tubos





Laminação a quente

Entrada



Grandes deformações

lingote fundidos
Placas
tarugos lingotados
laminados

Grandes dimensões



Geometrias complexas

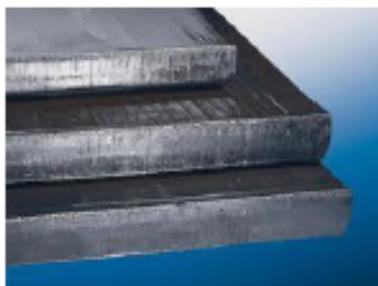


Semi acabados



Laminação a frio

Entrada



Chapas de aço
Placas
barras

Pequenas
deformações

Chapas de aço
Placas
barras

Operações de
acabamento



Superfícies regulares



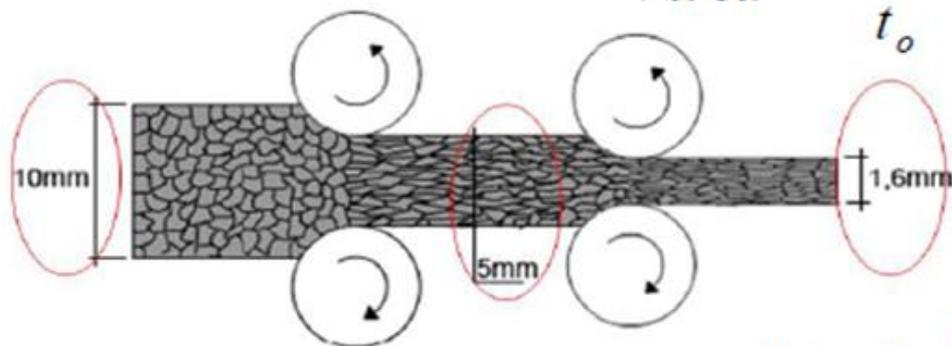
Produtos acabados



Laminação

- Percentual de redução

$$\%red = \frac{t_o - t_f}{t_o} * 100$$



$$\%red = \frac{10 - 1,6}{10} * 100 = 84 \%red$$

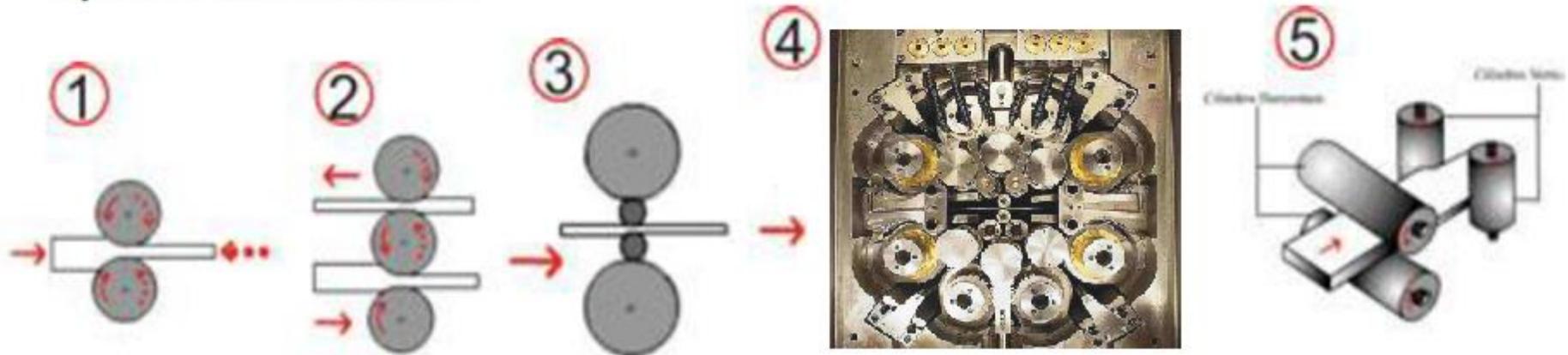
- Deformação convencional

Tomando um ponto qualquer de altura h , admitindo deformação homogênea na espessura, tem-se:

$$e = \frac{hi - h}{hi} = 1 - \frac{h}{hi}$$
$$\varepsilon = \ln \frac{h}{hi} = \ln \left(\frac{1}{1 - e} \right)$$
$$\left(\frac{h}{hi} = 1 - e \rightarrow \ln \frac{h}{hi} = \ln \frac{1}{1 - e} \right)$$



Tipos de laminadores



1 - Laminador DUO reversível, rolos com inversão de rotação

2 - Laminador TRIO – 3 cilindros

3 - Laminador QUADRUO – 4 cilindros

4 - Laminador SENDZIMIR – cilindros de trabalho finos suportados por vários outros cilindros mais grossos

5 - Laminador UNIVERSAL – 2 Rolos verticais e 2 rolos horizontais

6 - Outros

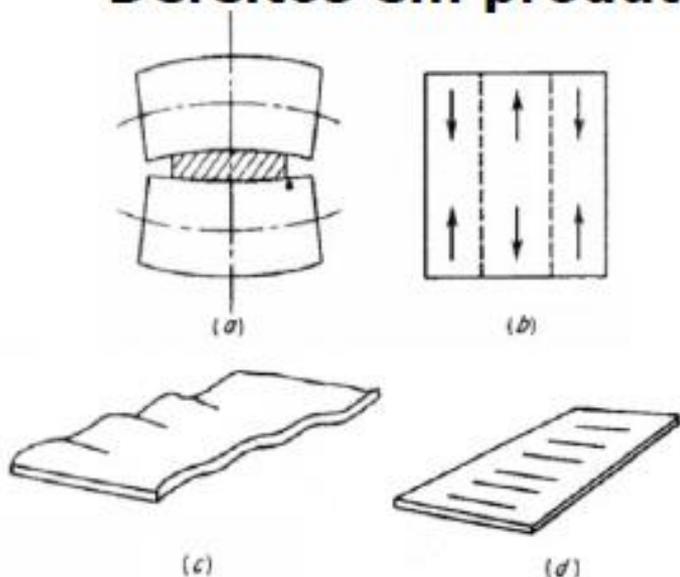


Defeitos em produtos laminados

- desvios de forma
- Irregularidades de superfície: trincas, fissuras, cascas, carepas
- internos: trincas, escamas
- chapa curva-se
- espessura uniforme sobre a largura e ao longo do comprimento
- planeza da chapa
- diferença no alongamento
- ondulações em chapas finas

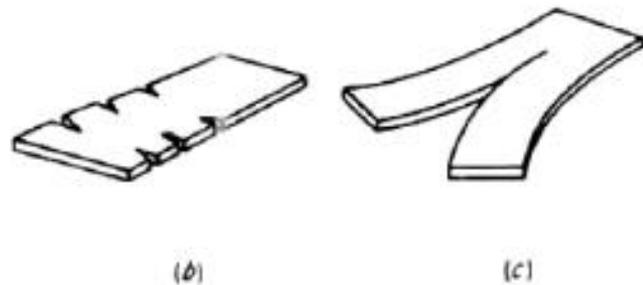
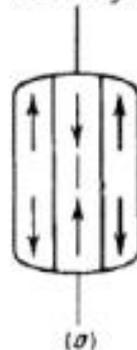


Defeitos em produtos laminados Laminação



Problemas devido a flexão dos cilindros de laminação

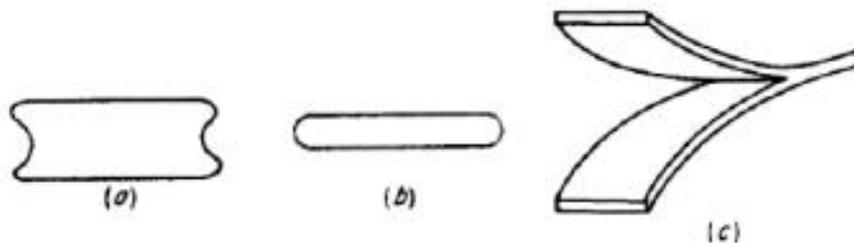
direção de laminação



Defeitos resultantes do espalhamento lateral

Se existe algum defeito metalúrgico ao longo da linha central do tarugo a fratura é do tipo boca de jacaré

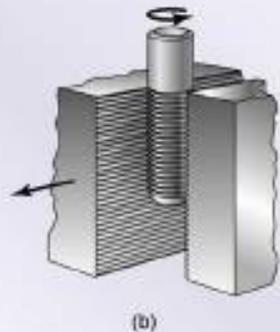
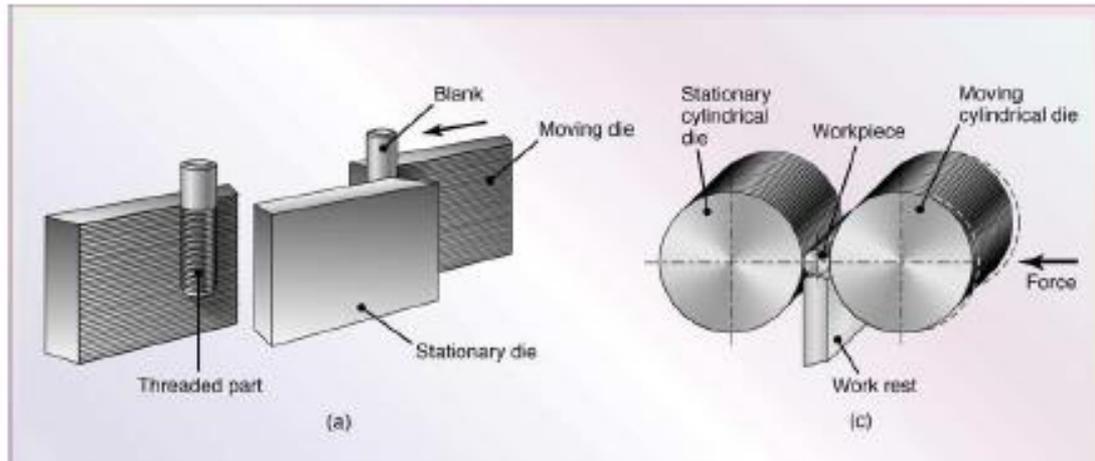
- é acentuada se ocorre qualquer empenamento da chapa.



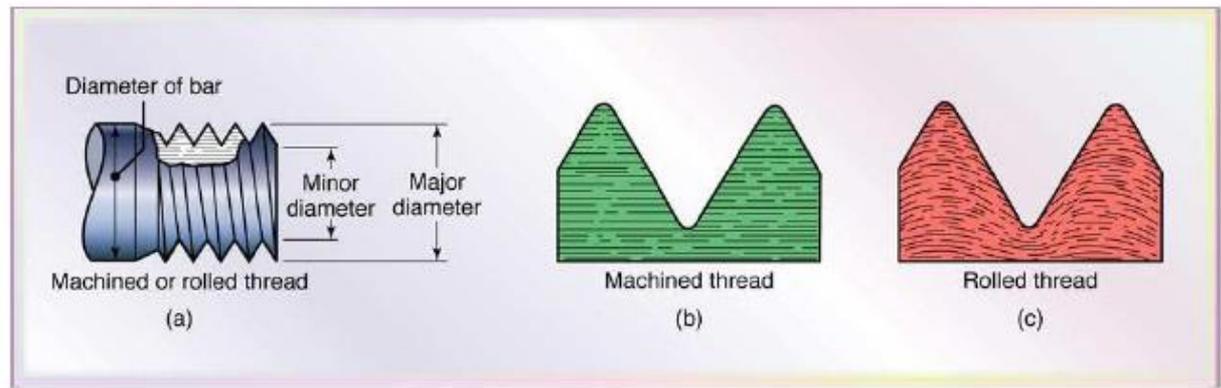
Edge distribution resulting from rolling with (a) light reduction, (b) heavy reduction and (c) allingating.



Processo de Laminação de Roscas



Roscas usinadas e laminadas





Conformação sobre condições compressivas

Vídeos exemplo

https://www.youtube.com/watch?v=Ealgu5TUTTI&list=PLWLYZ_2X89ZGO112vgkw_toeKZj2ySZyl&index=7

Esse vídeo mostra aspectos gerais da laminação até a obtenção de bobinas de aço

https://www.youtube.com/watch?v=JIM_t9QH8J8

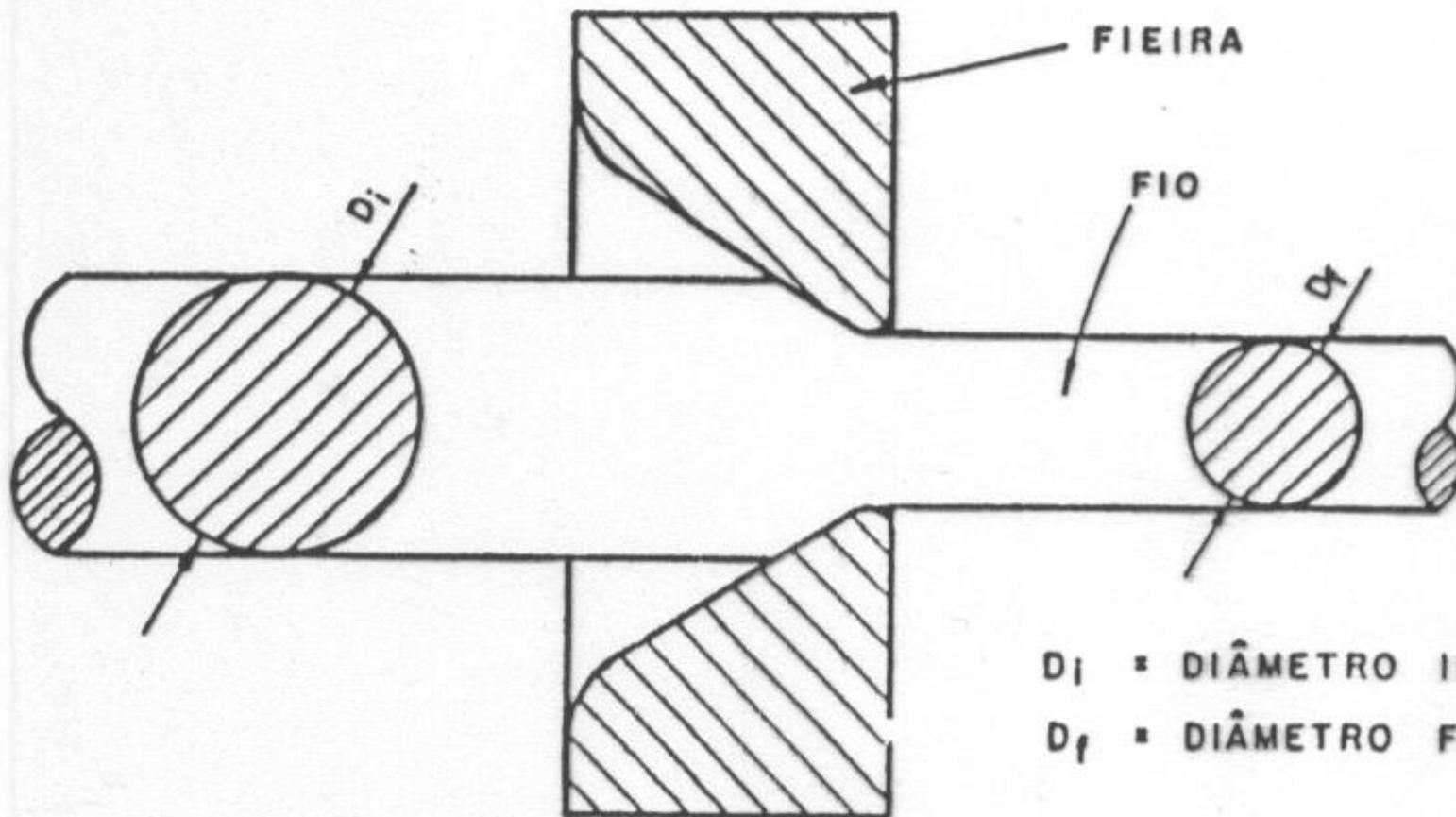
Esse vídeo mostra o efeito da laminação na estrutura cristalina do material

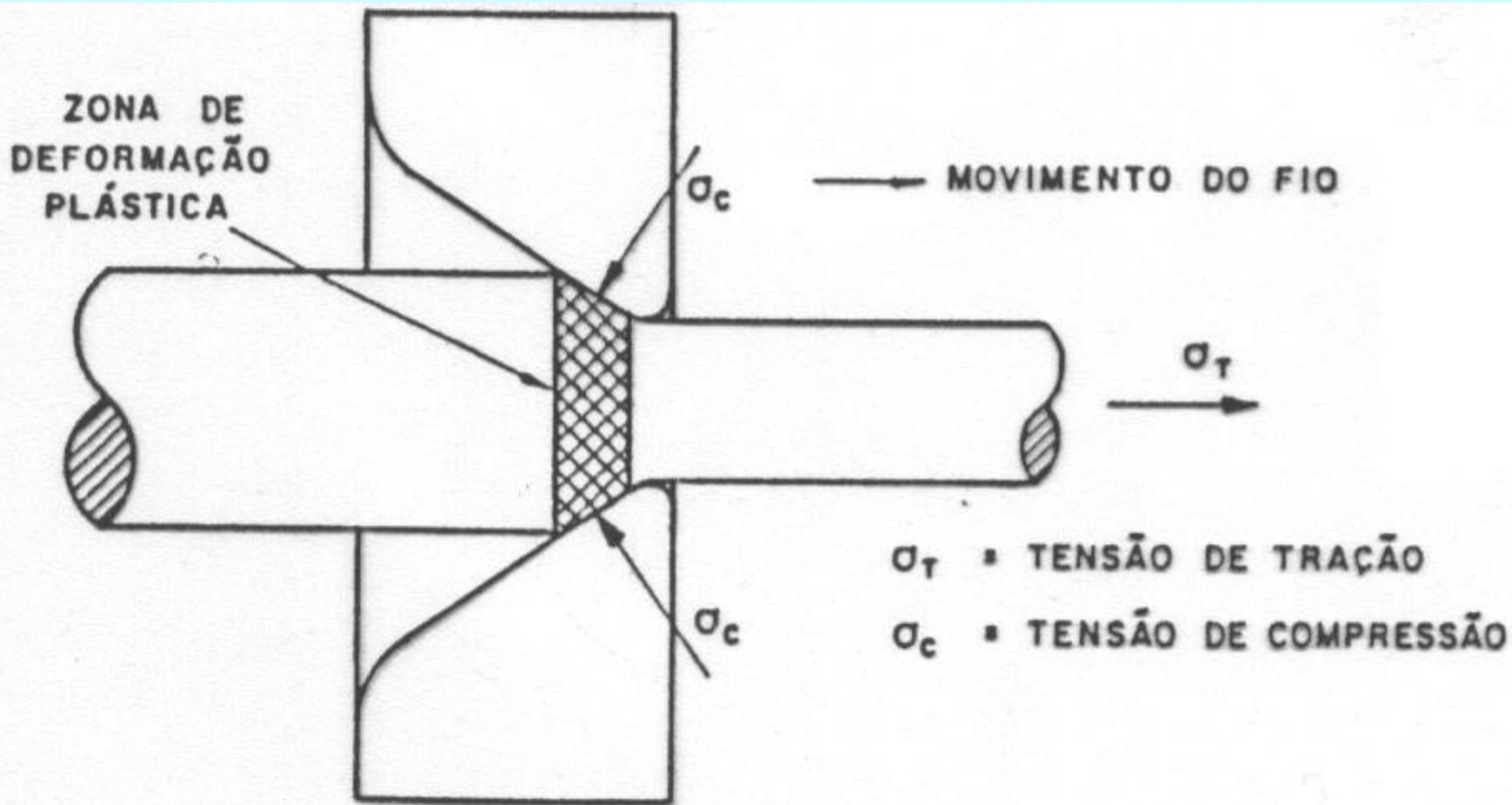


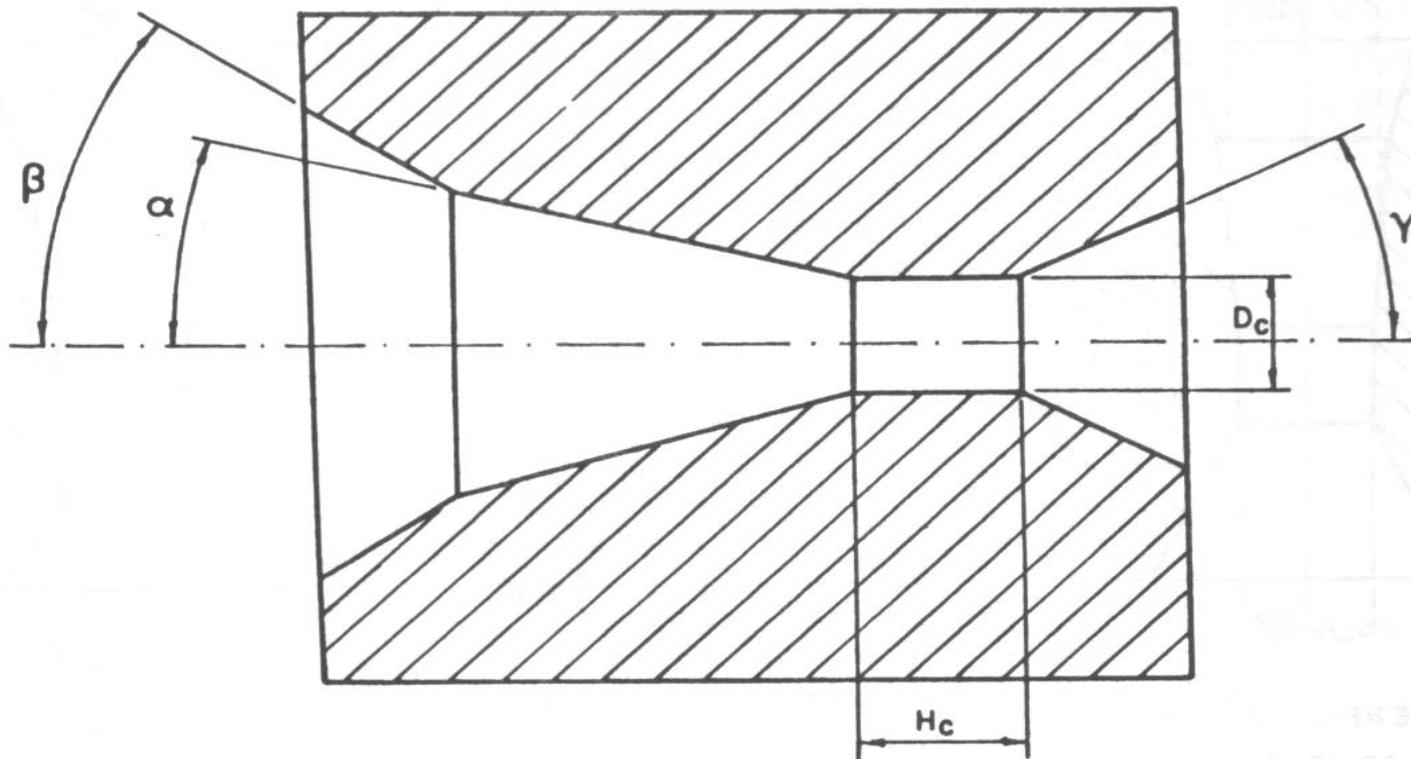
TREFILAÇÃO

- Processo em que se obtêm produtos com seções de *geometrias diversas* pela **tração** desses produtos por uma *matriz* que *define o perfil* do trefilado
- Comumente realizado a frio → *Encruamento*
- Pequenas reduções de seção por passe
- Excelente qualidade superficial e dimensional
- Propriedades mecânicas controladas

Recozimento intermediário necessário quando a queda de ductilidade associada ao aumento da resistência provoca a *queda de conformabilidade*







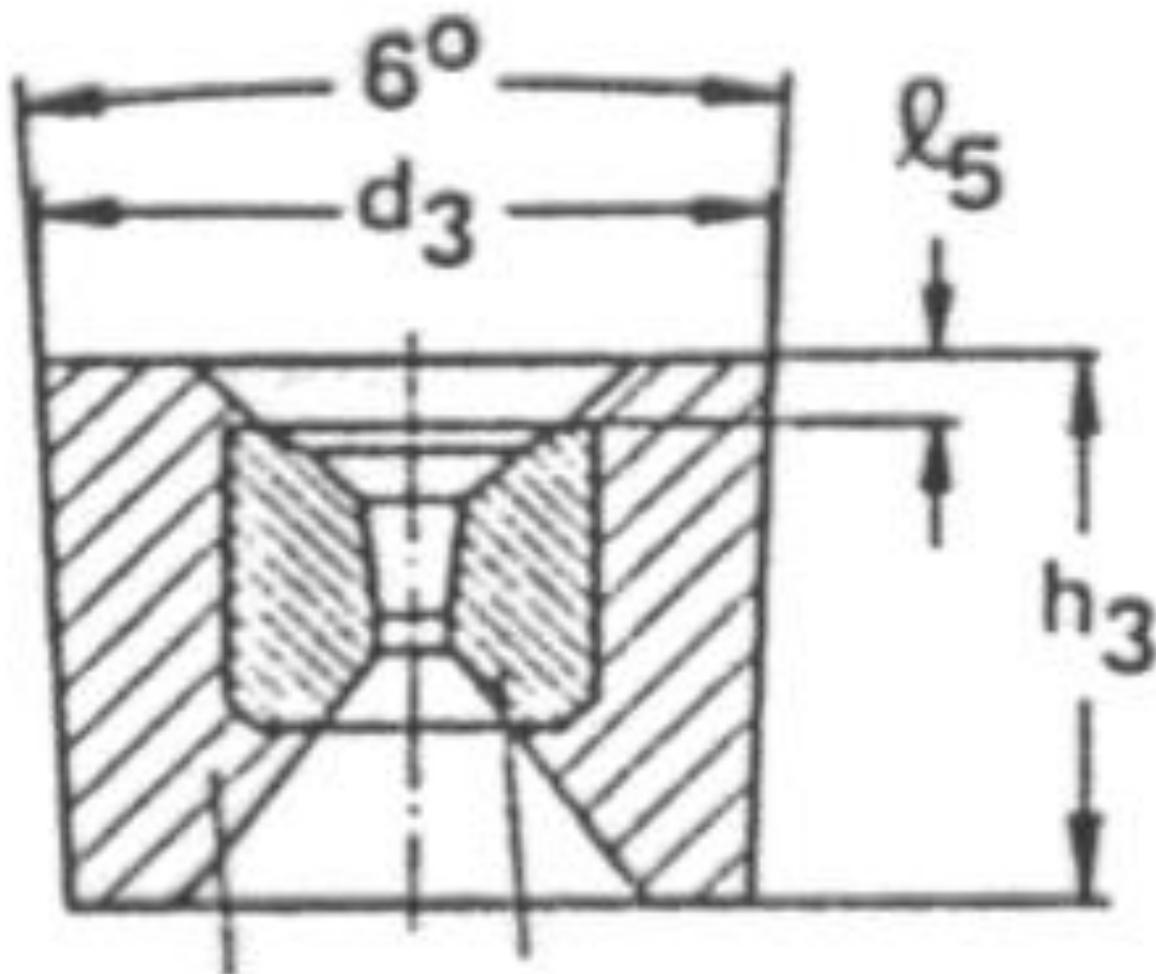
α - SEMI-ÂNGULO DO CONE DE TRABALHO
(OU SEMI-ÂNGULO DA FIEIRA)

β - SEMI-ÂNGULO DE ENTRADA

γ - SEMI-ÂNGULO DE SAÍDA

H_c - ALTURA DO CILINDRO DE CALIBRAÇÃO

D_c - DIÂMETRO DO CILINDRO DE CALIBRAÇÃO



A fieira apresenta superfície externa cônica para melhor fixação e centralização

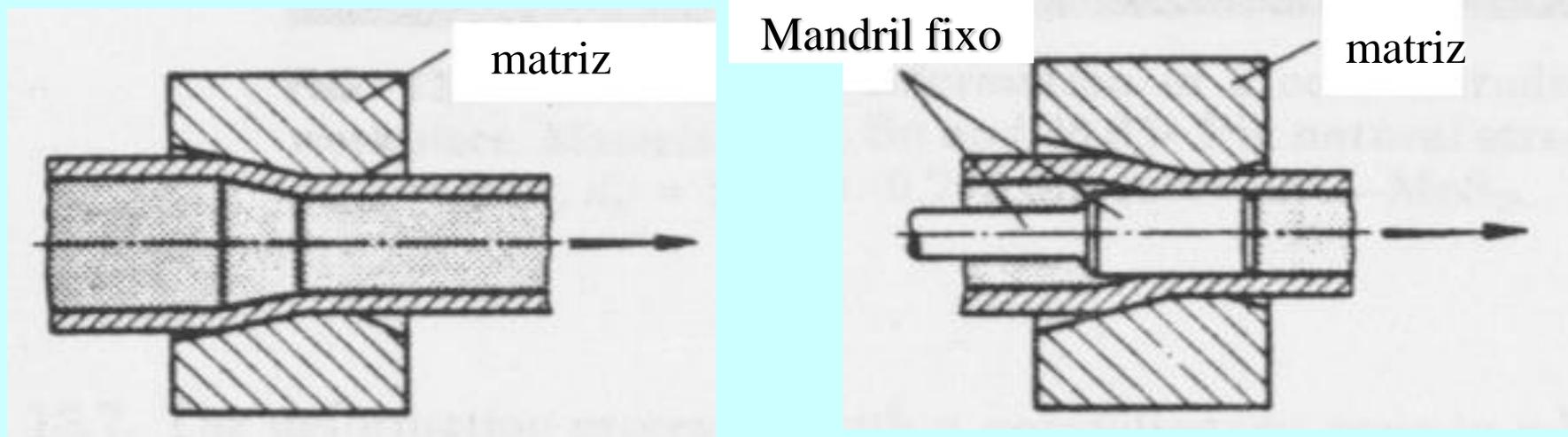
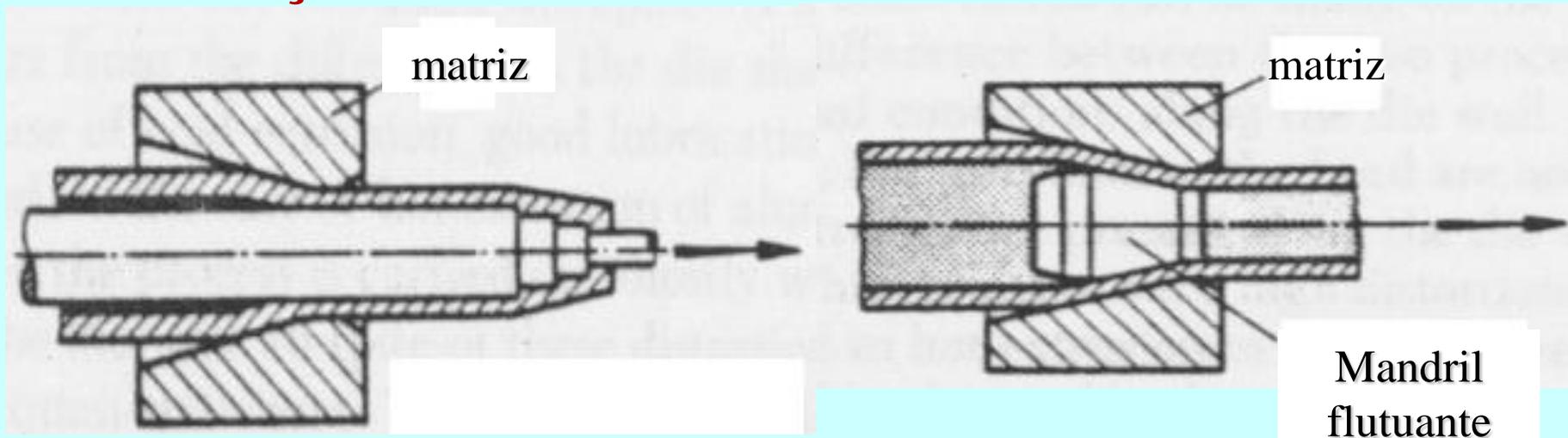


MATRIZ (FIEIRA) DE TREFILAÇÃO





TREFILAÇÃO DE PERFIS TUBULARES E VAZADOS





TREFILAÇÃO

MATÉRIA PRIMA

Barras e tubos extrudados (*não-ferrosos*) ou laminados (*ferrosos e não-ferrosos*), decapados e limpos, com qualidade superficial controlada e recozidos

PRODUTOS

Arames, fios finos, barras, perfis diversos e tubos

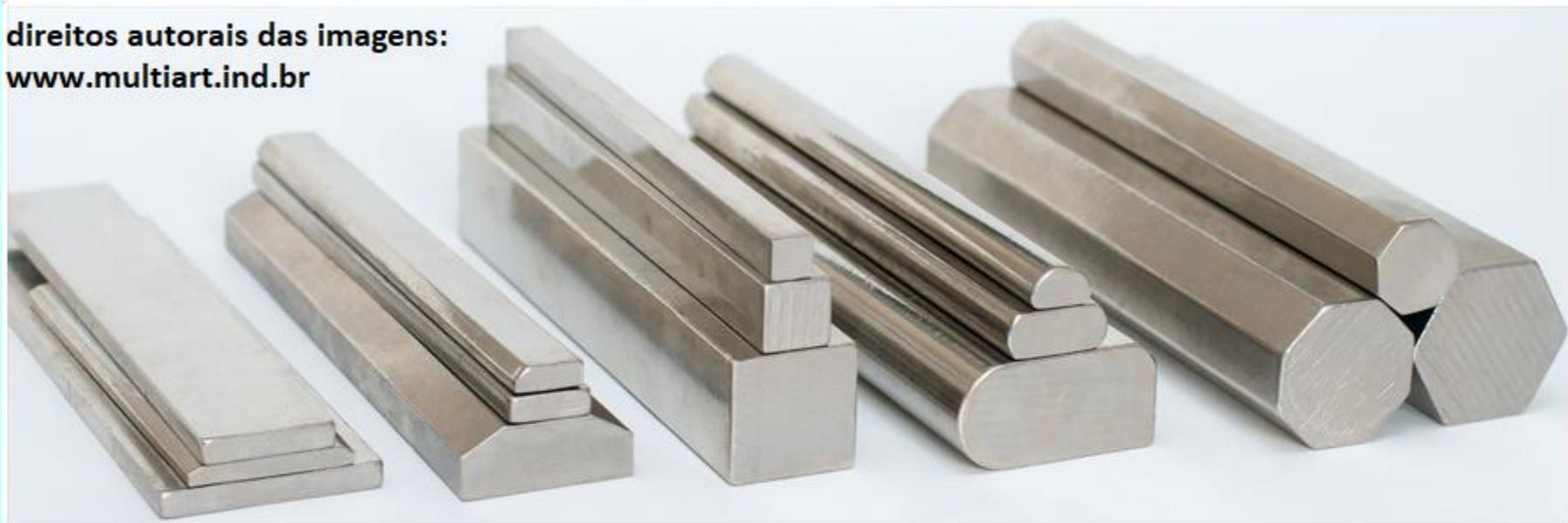
MECÂNICA DA TREFILAÇÃO

- Esforços predominantes de compressão indireta
- Atrito entre a matriz e material a trefilar
- Lubrificantes/refrigerantes
- Velocidade de trefilação: 10 m/s para fios de aço,
20 m/s para fios de cobre



Exemplos de perfis obtidos por trefilação

direitos autorais das imagens:
www.multiart.ind.br



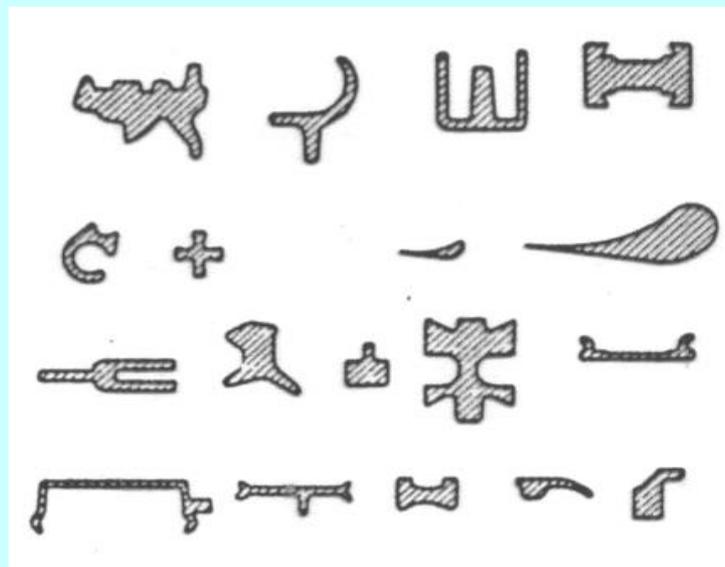
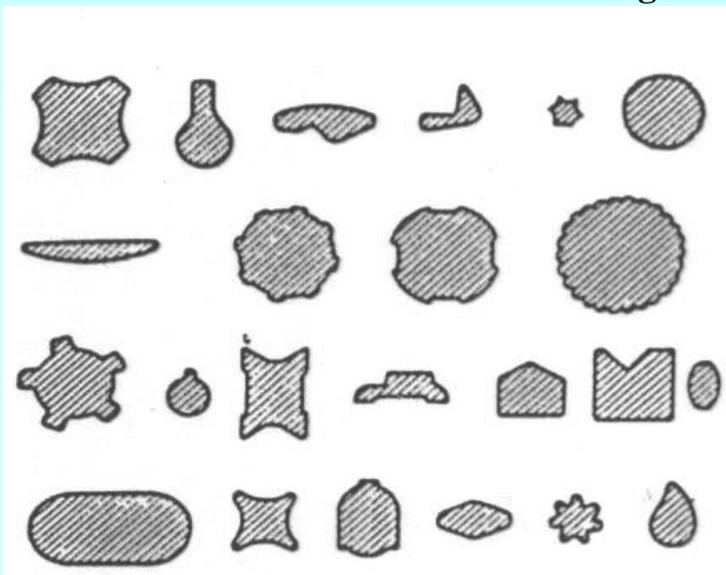
direitos autorais das imagens:
www.sidertubos.com.br



Exemplos de perfis obtidos por trefilação



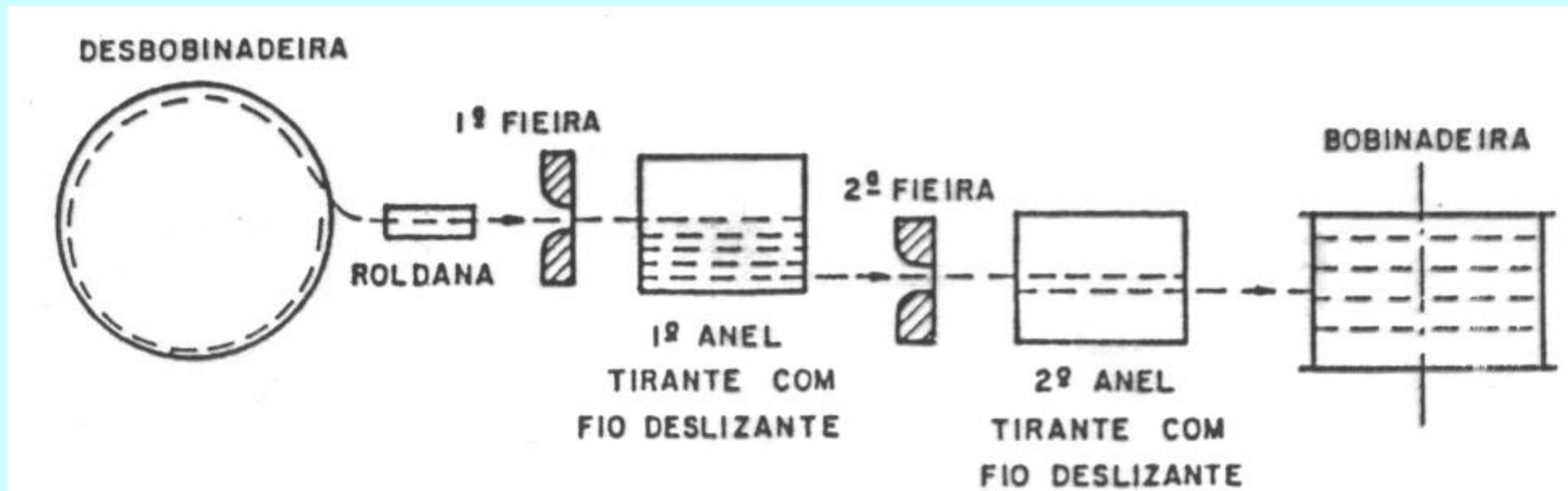
Direitos autorais das imagens: www.aluminovo.com.br





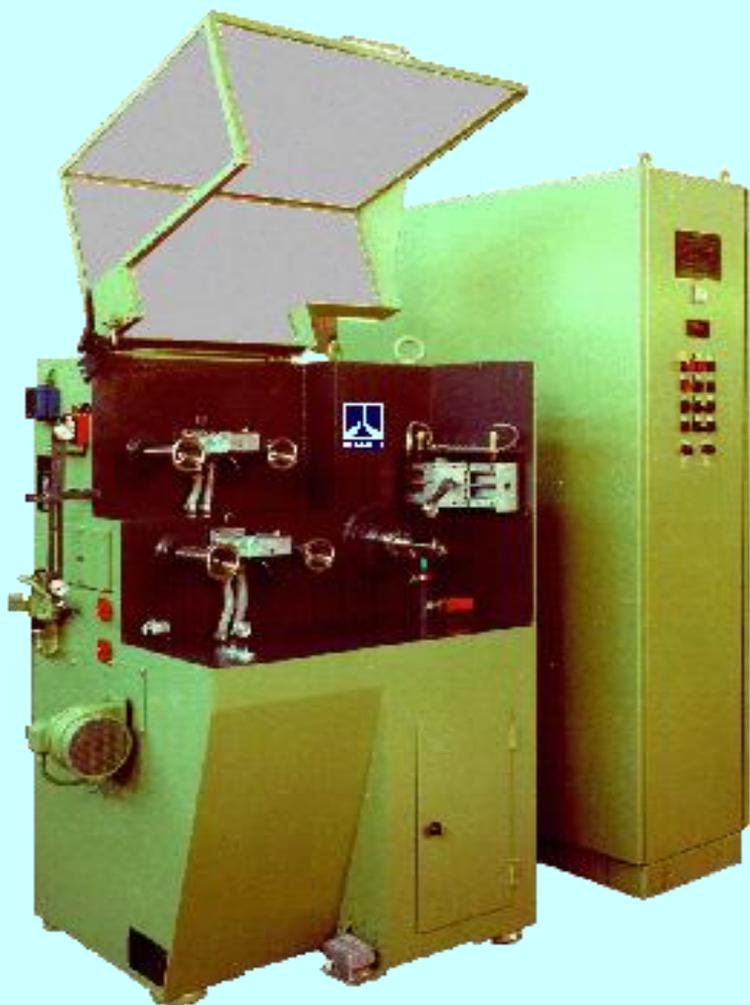
TREFILAÇÃO

MÁQUINAS DE TREFILAR





ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO





EXTRUSÃO

- Processo no qual modifica-se a *geometria/dimensões* de um corpo metálico pela sua passagem por *uma matriz* que lhe confere sua forma e dimensões finais
- Produtos com comprimento limitado ao volume do tarugo de partida

EXTRUSÃO A QUENTE

- grandes reduções de seção numa só etapa
- maioria dos processos para obter produtos contínuos semi-acabados (barras) e acabados (perfis e tubos, de tolerância folgada)

EXTRUSÃO A FRIO

- pequenas reduções de seção em vários estágios
- obtenção de peças de precisão (tolerâncias mais apertadas)



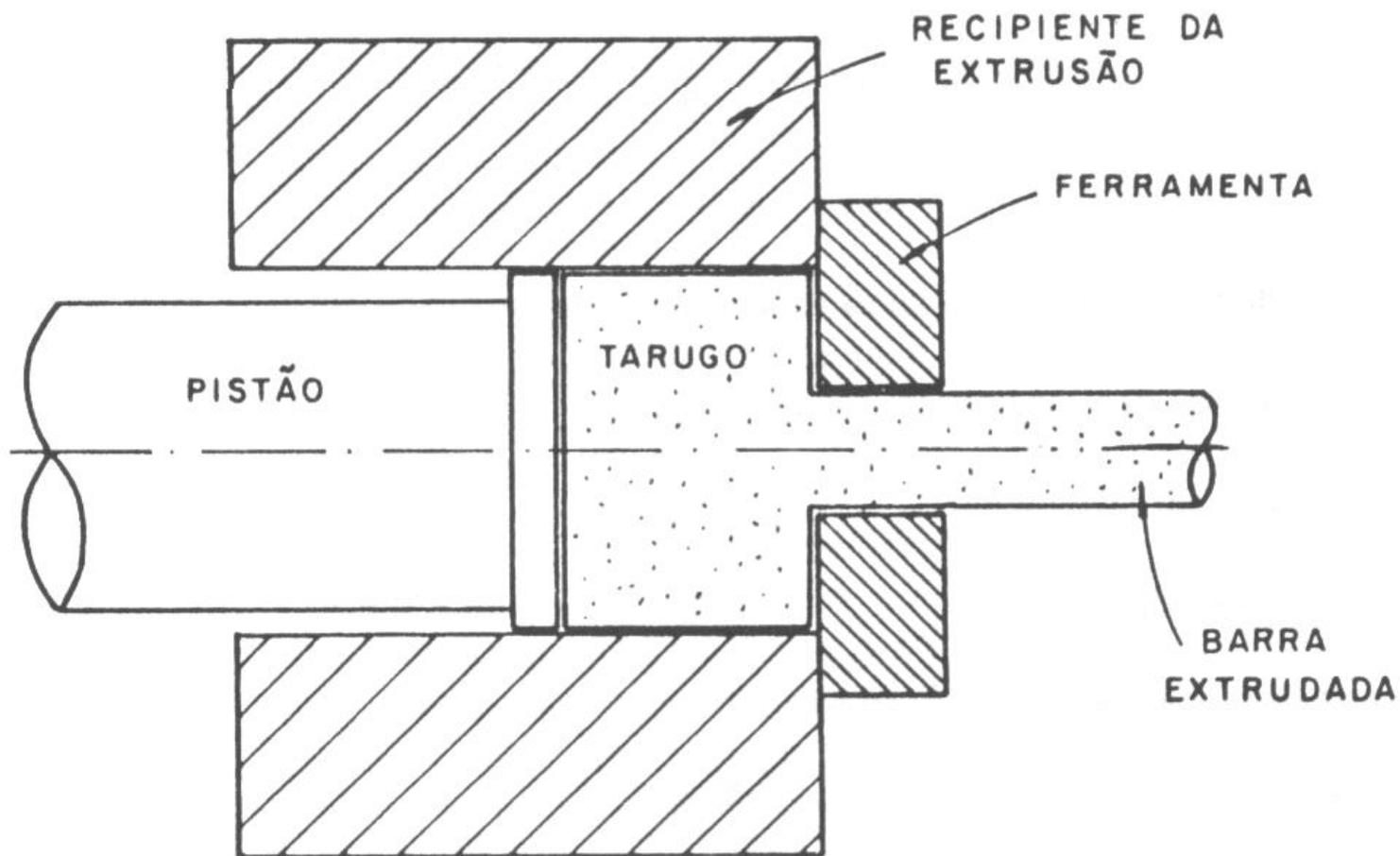
EXTRUSÃO

Variações do processo:

- 1) **Direto:**
 - movimento do material extrudado no mesmo sentido de avanço do embolo
 - com casca, para reduzir o atrito e eliminar superfície contaminada
- 2) **Inverso:**
 - movimento do material extrudado no sentido contrário ao de avanço do embolo
 - vantajoso, pois não há atrito do tarugo com o recipiente
 - limitado, pois o embolo oco (para barras) ou esbelto (para tubos) não permite a obtenção de produtos com seções reduzidas.
- 3) **Hidrostático:**
 - transmissão de pressão ao tarugo por meio de um fluido hidráulico
 - possibilidade de grandes reduções de seção a frio devido à redução do atrito

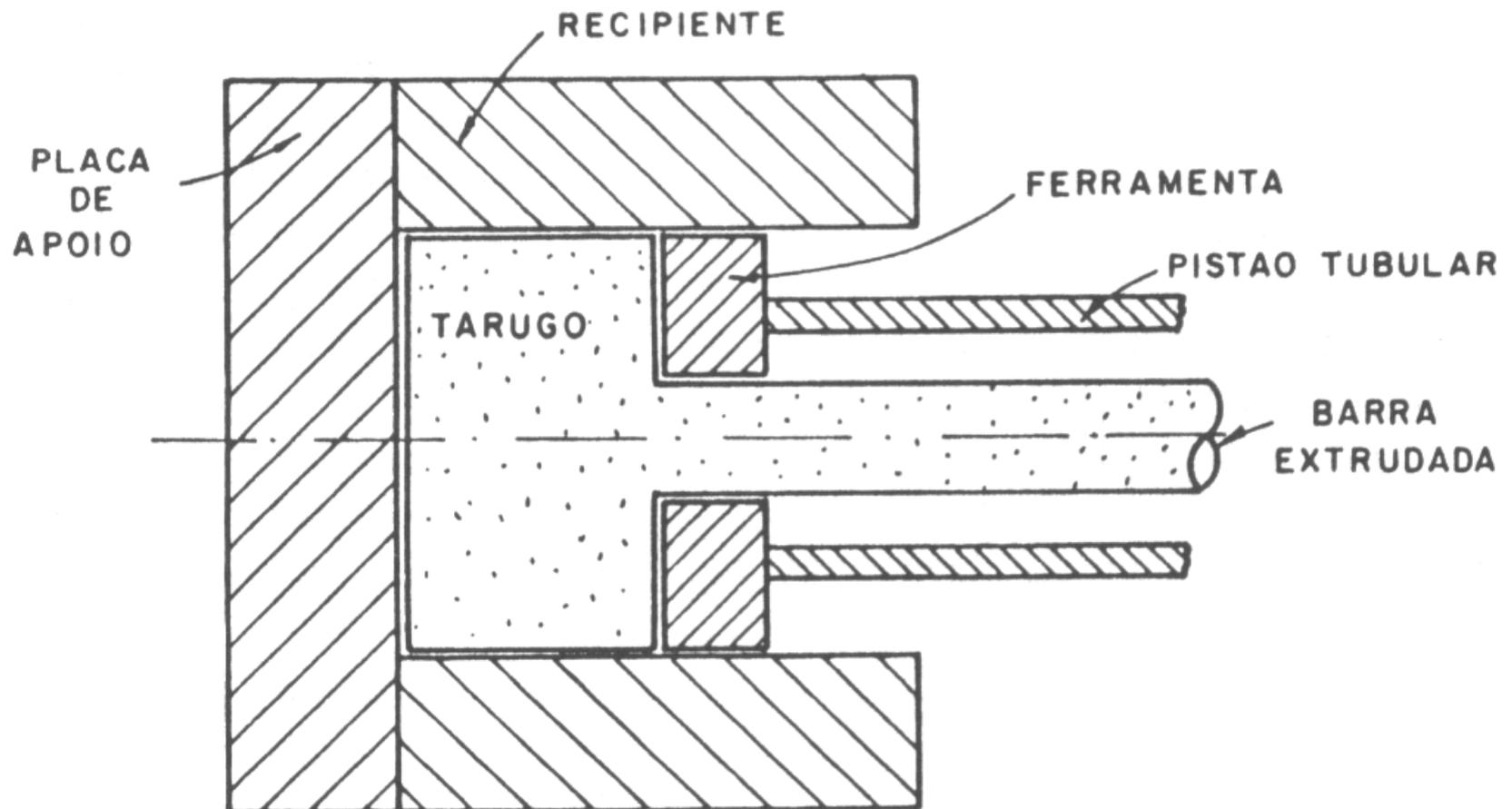


EXTRUSÃO DIRETA

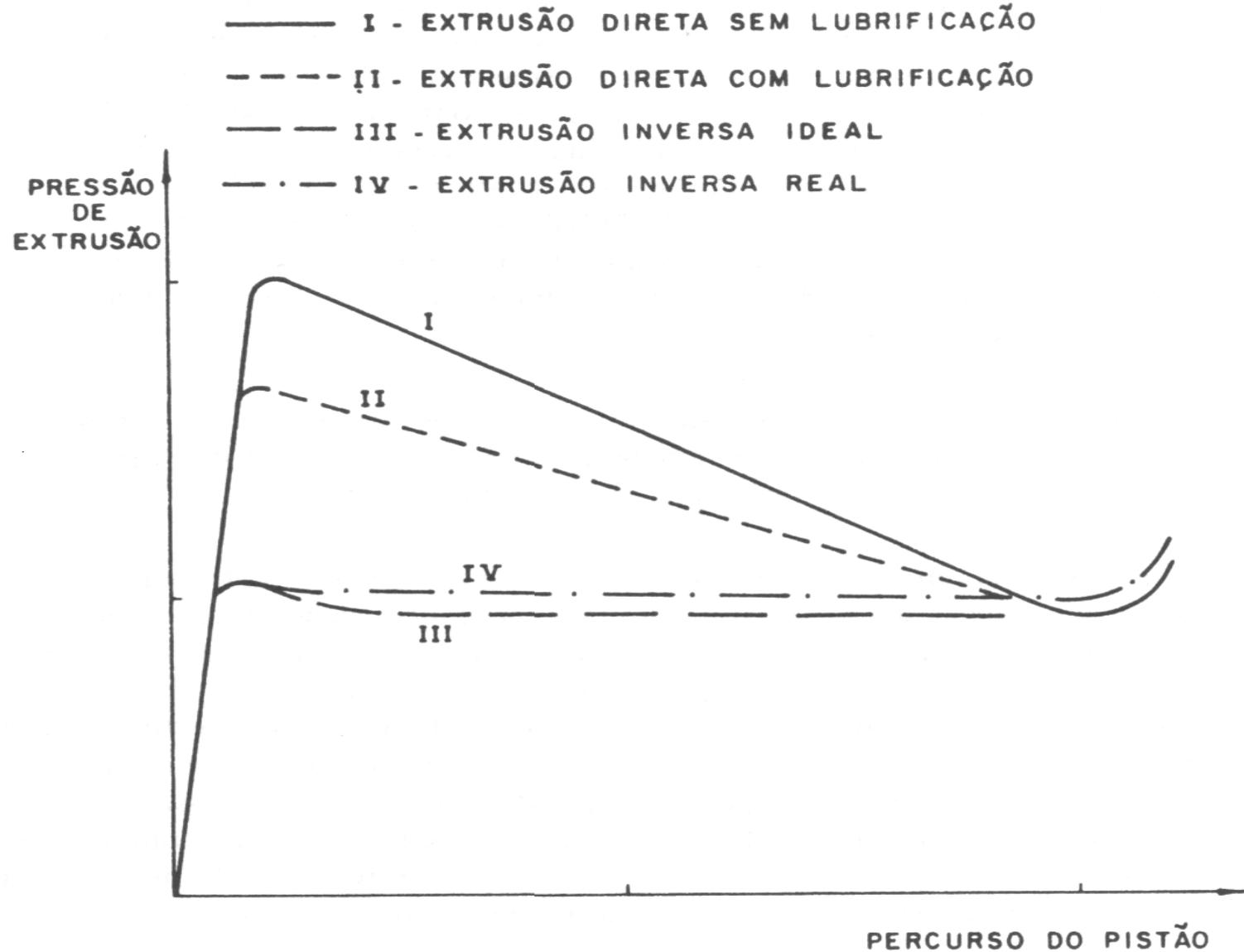




EXTRUSÃO INVERSA

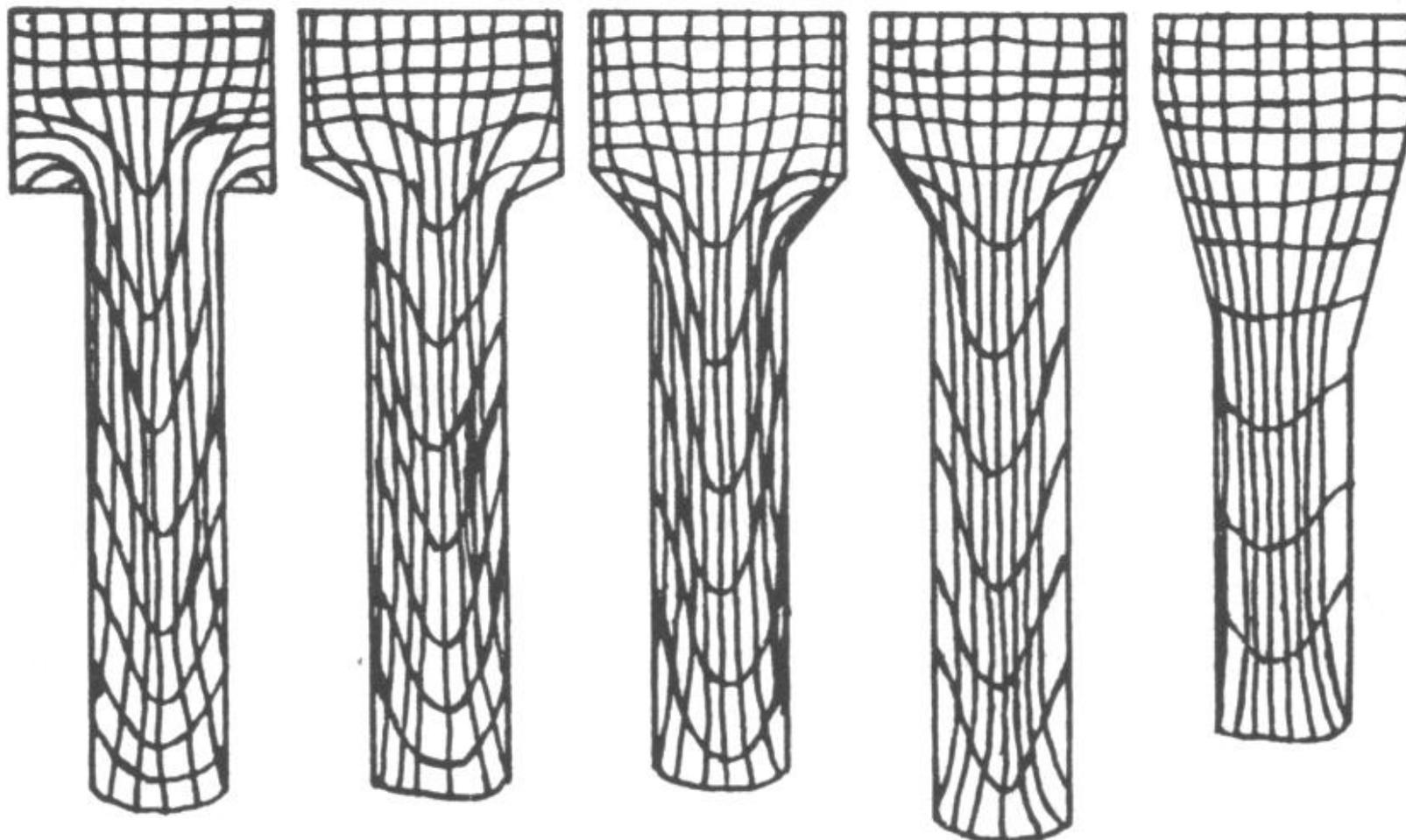


Curvas de Pressão de Extrusão

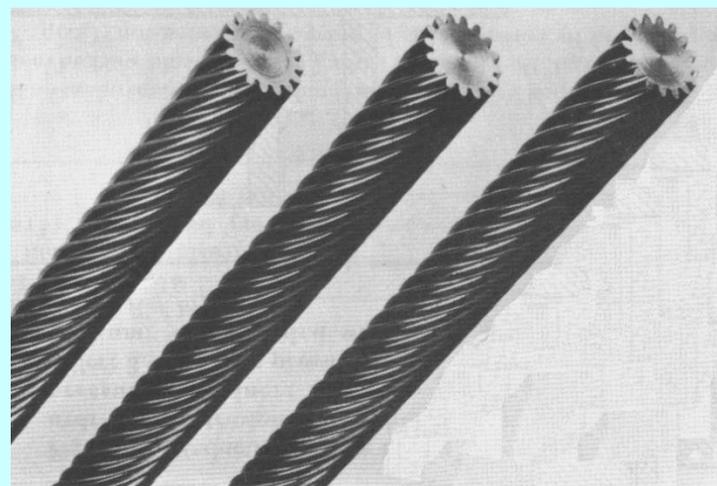
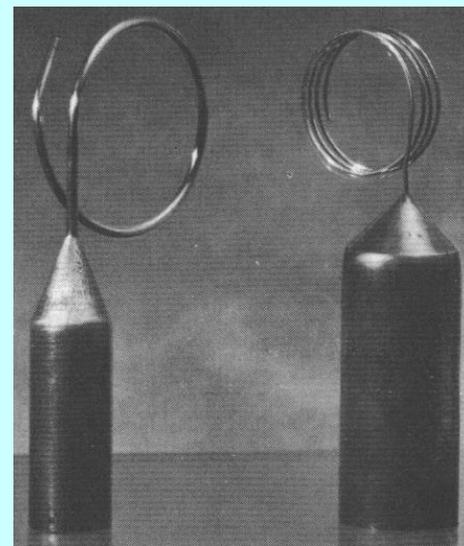
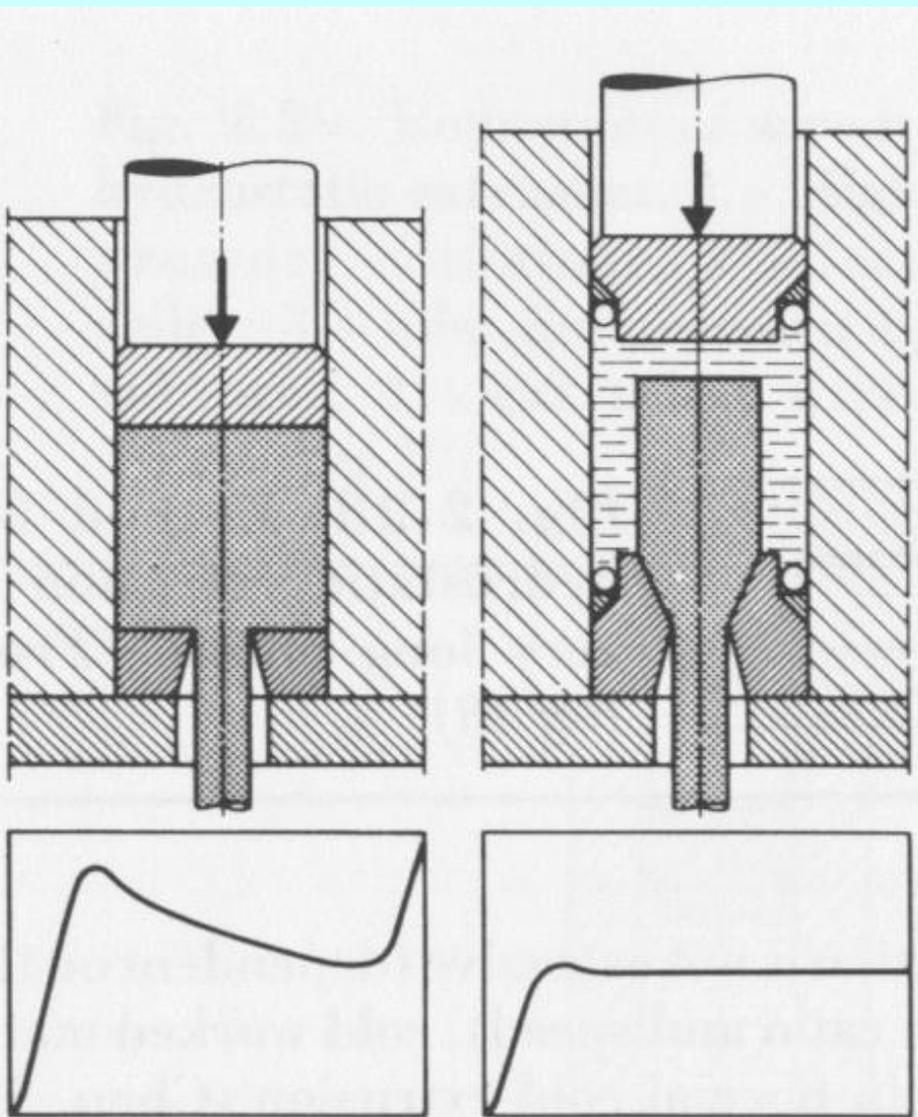




Modos de Escoamento na Extrusão



Extrusão Hidrostática

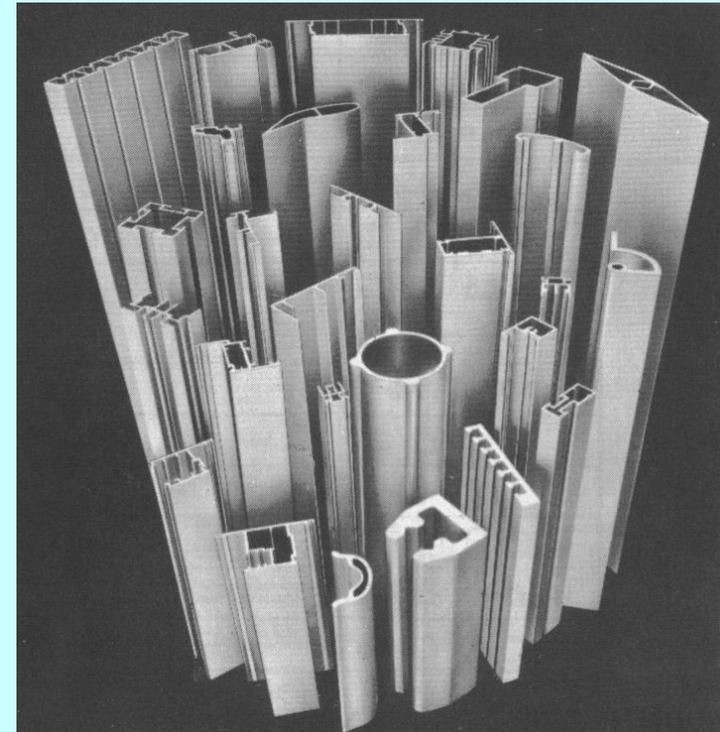
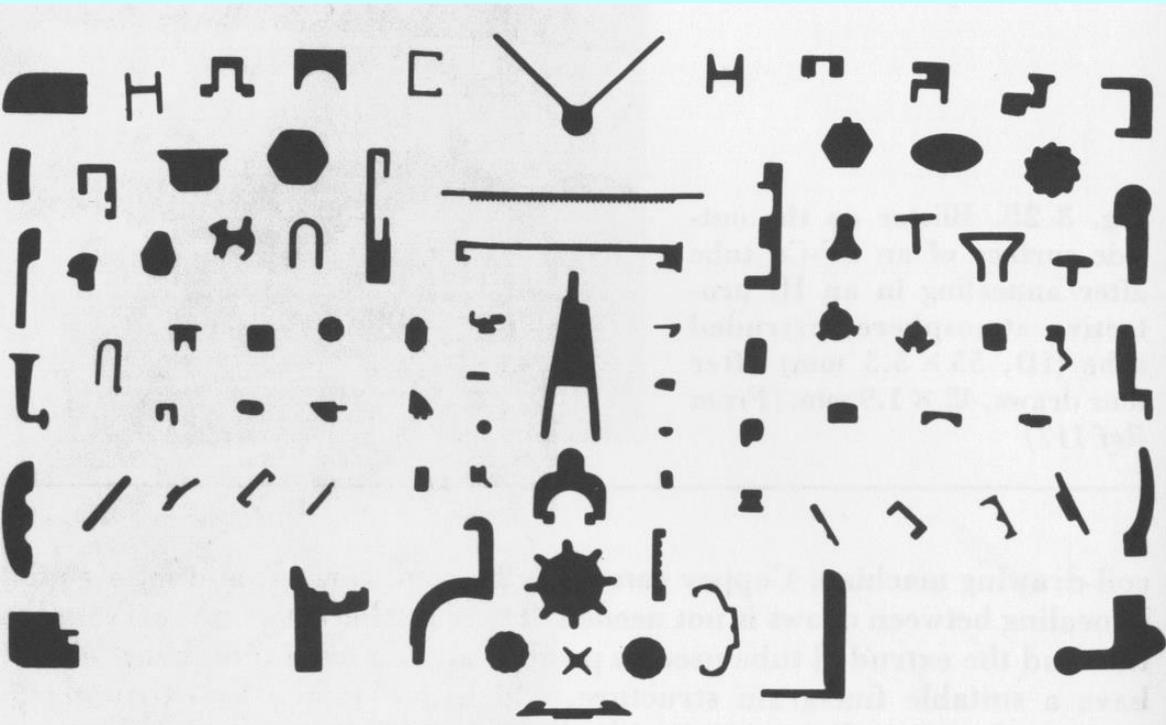




PERFIS DE PRODUTOS EXTRUDADOS A QUENTE

Perfis de cobre

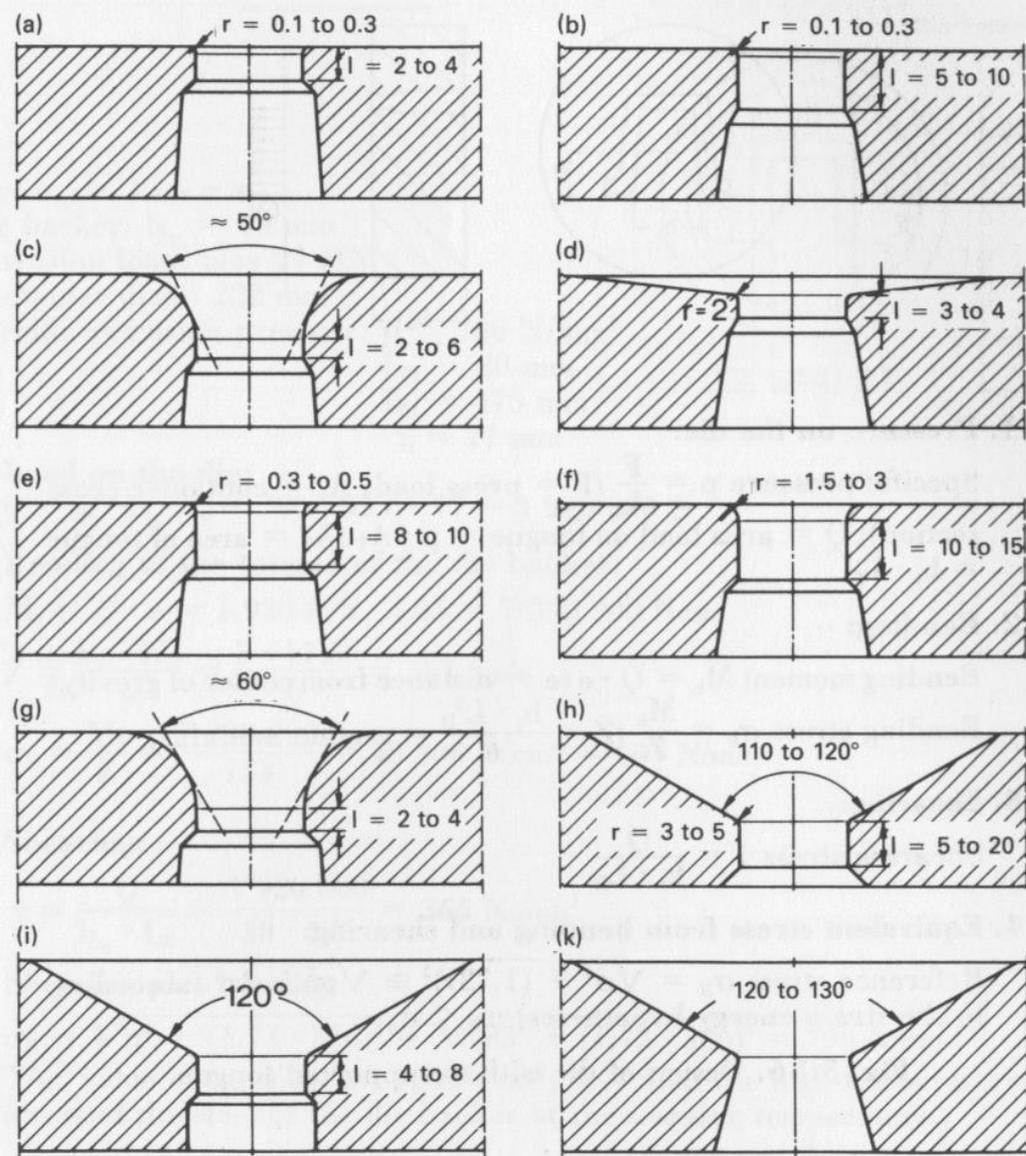
Perfis de alumínio





Geometrias de matrizes

- a) Al puro, AlMn, AlMgSi
- b) AlCuMg, AlMg, AlZnMg
- c) MgAl, MgZnZr
- d) PbCu, PbSb
- e) CuZnPb
- f) CuCd, CuSb
- g) ligas de Zn
- h) aços
- i) Ligas de Ti
- k) Ligas de Ni, Cr (altas T)





<https://www.youtube.com/watch?v=5X-xPMlbtM0>

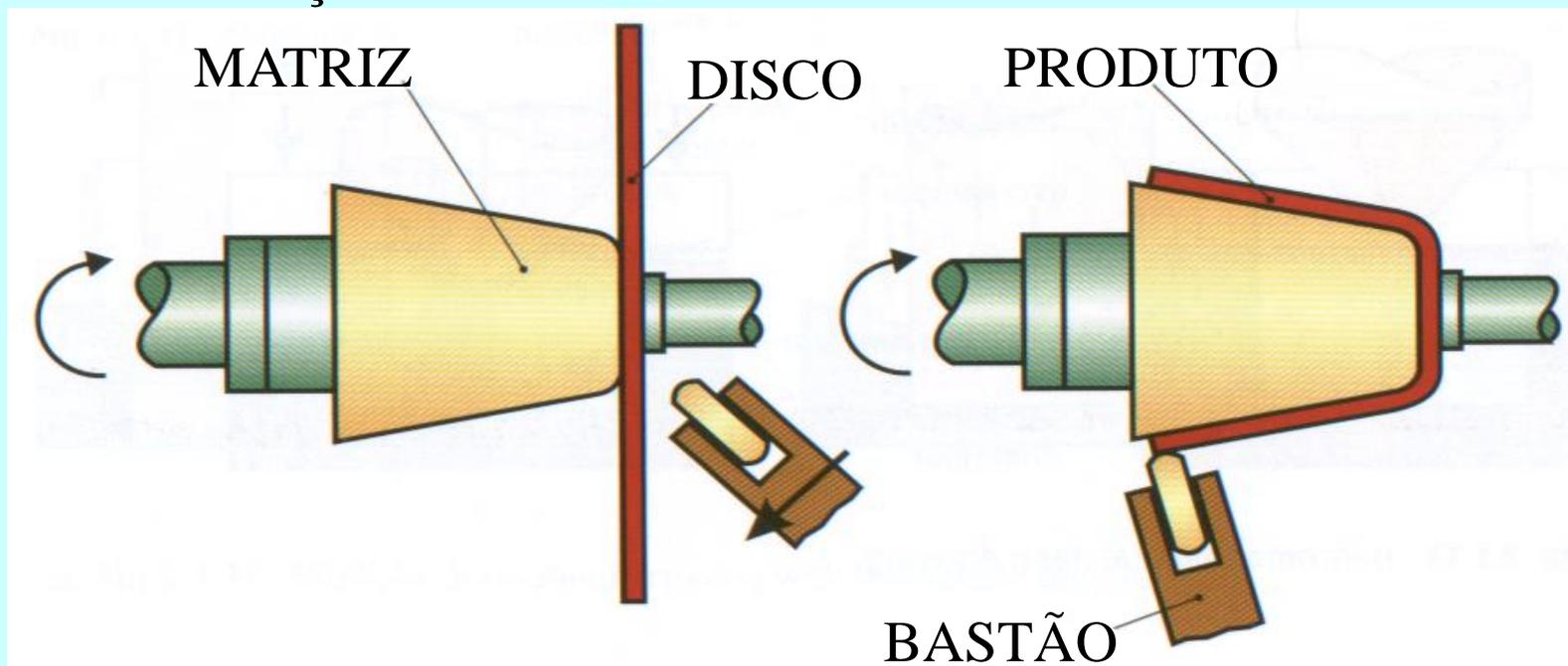
Vídeo sobre extrusão e
trefilação



REPUXO

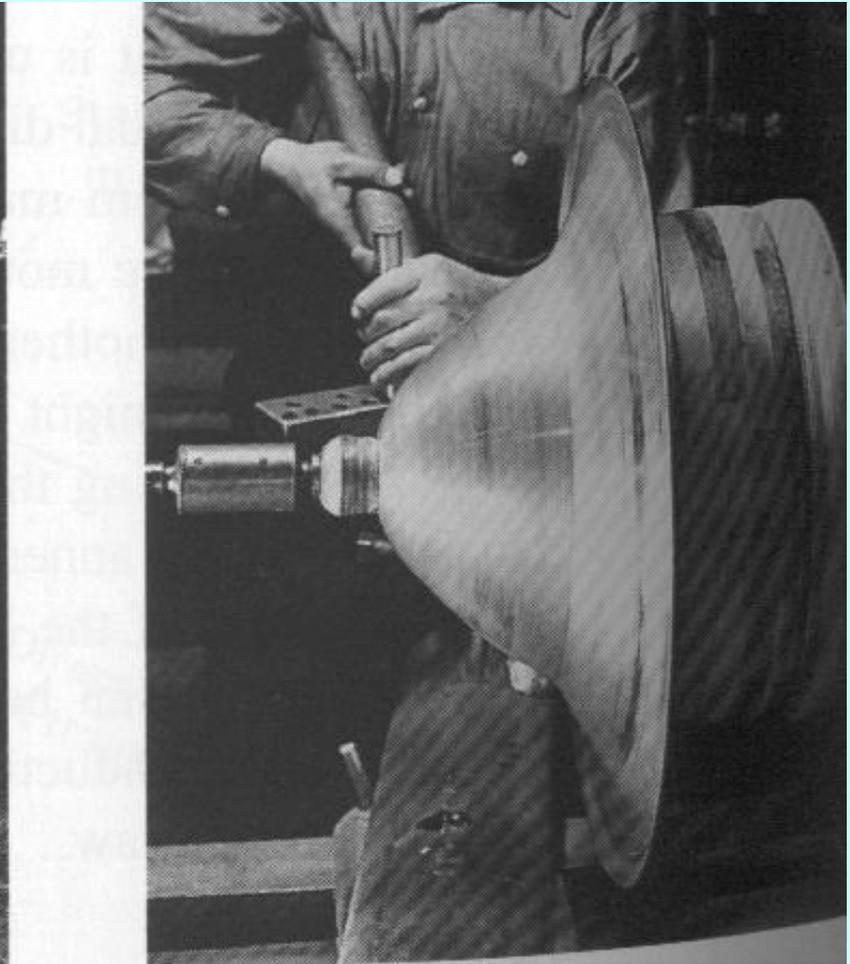
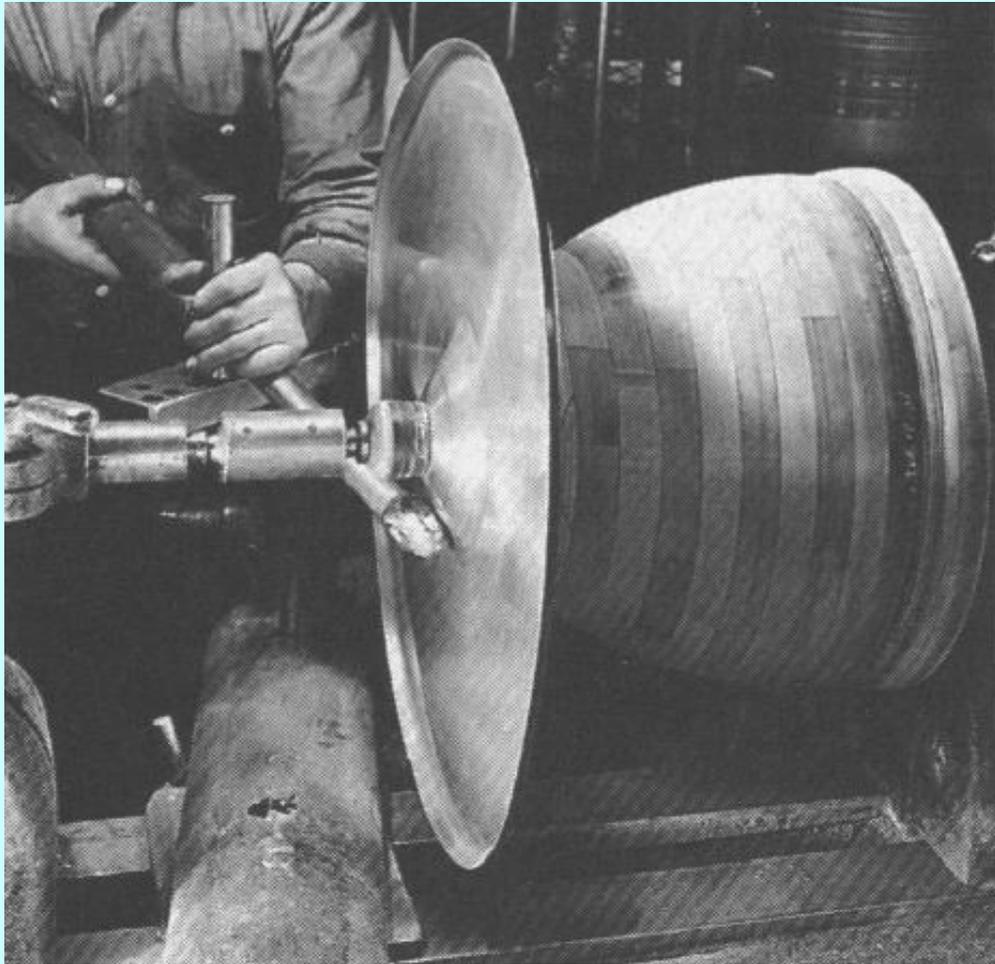
- Processo importante para obtenção de peças de grandes dimensões e lotes reduzidos.
- Equipamentos rotativos (tornos), ferramenta de conformação móvel (bastão) e ferramenta de conformação fixa (matriz única ou desmontável)

DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE REPUXO DE CHAPAS





ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO





Bibliografia

- DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- HELMAN, H. e CETLIN, P. R., **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**, Ed. Artliber, 2005.
- BRESCIANI FILHO, E. **Conformação Plástica dos Metais**. Volumes 1 e 2. Campinas: UNICAMP.
- ROWE, G.W. **Elements of Metalworking Theory**. Edward Arnold Publishers, 1979
- HONEYCOMBE, R.W.K. **The Plastic Deformation of Metals**. Edward Arnold Publishers, 1968.
- Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid. **Manufacturing, Engineering & Technology, Fifth Edition**, by. ISBN 0-13-148965-8. © 2006 Pearson Education, Inc.