

**PMR 3301**  
**COMPLEMENTOS DE**  
**FABRICAÇÃO MECÂNICA**

**AULA 4**

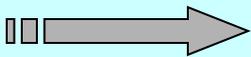
**Processos no estado sólido:**  
**Processos de conformação**  
**(laminação, extrusão, forjamento) –**  
**Processos convencionais e seus**  
**principais aspectos**

# CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

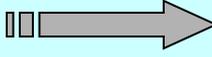
## 1 - forma do produto final

- *chapas, perfis*  *laminação, estampagem*
- *tubos, fios, barras*  *trefilação, extrusão*

## 2 - tamanho da região de deformação

- *localizada*  *laminação, trefilação, extrusão*
- *generalizada*  *estampagem, forjamento*

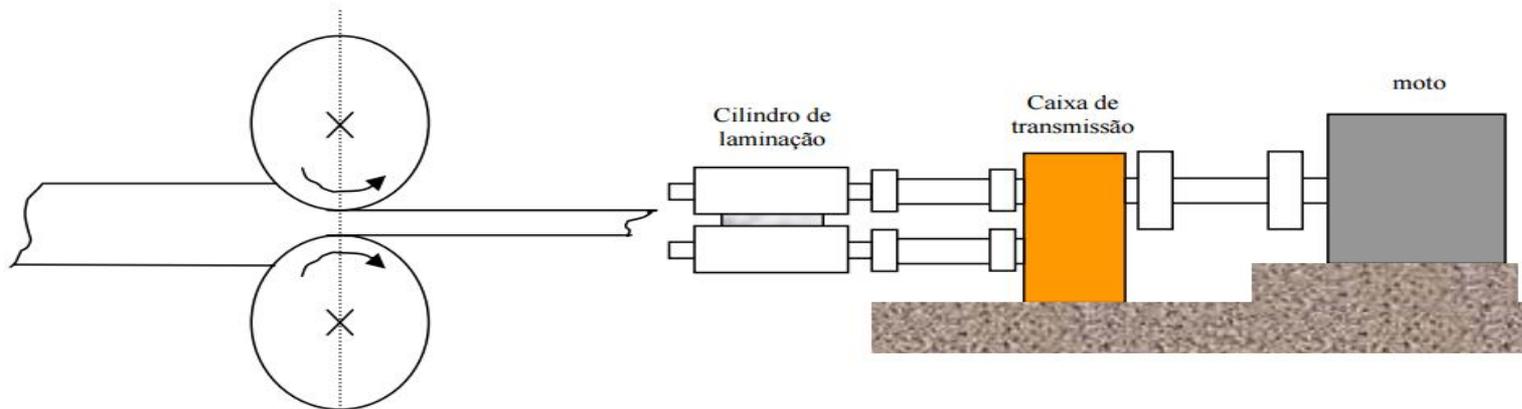
## 3 - escoamento do material

- *contínuos*  *laminação, trefilação, extrusão*
- *intermitentes*  *estampagem, forjamento*

## 4 - produtos obtidos

- *semi-acabados*  *processos primários*
- *acabados*  *processos secundários ou finais*

# Processo de Laminação



Desenho Esquemático do sistema de acionamento de um laminador a frio  
(Fonte - CSN)

Processo	Força Preponderante	Trabalho		Semi-produtos ou produtos	
		a quente	a frio	Aços	Não-ferrosos
Laminação	Compressão direta	X		Placas Chapas Barras Perfis	Placas Chapas Barras
			X	Chapas	

# LAMINAÇÃO

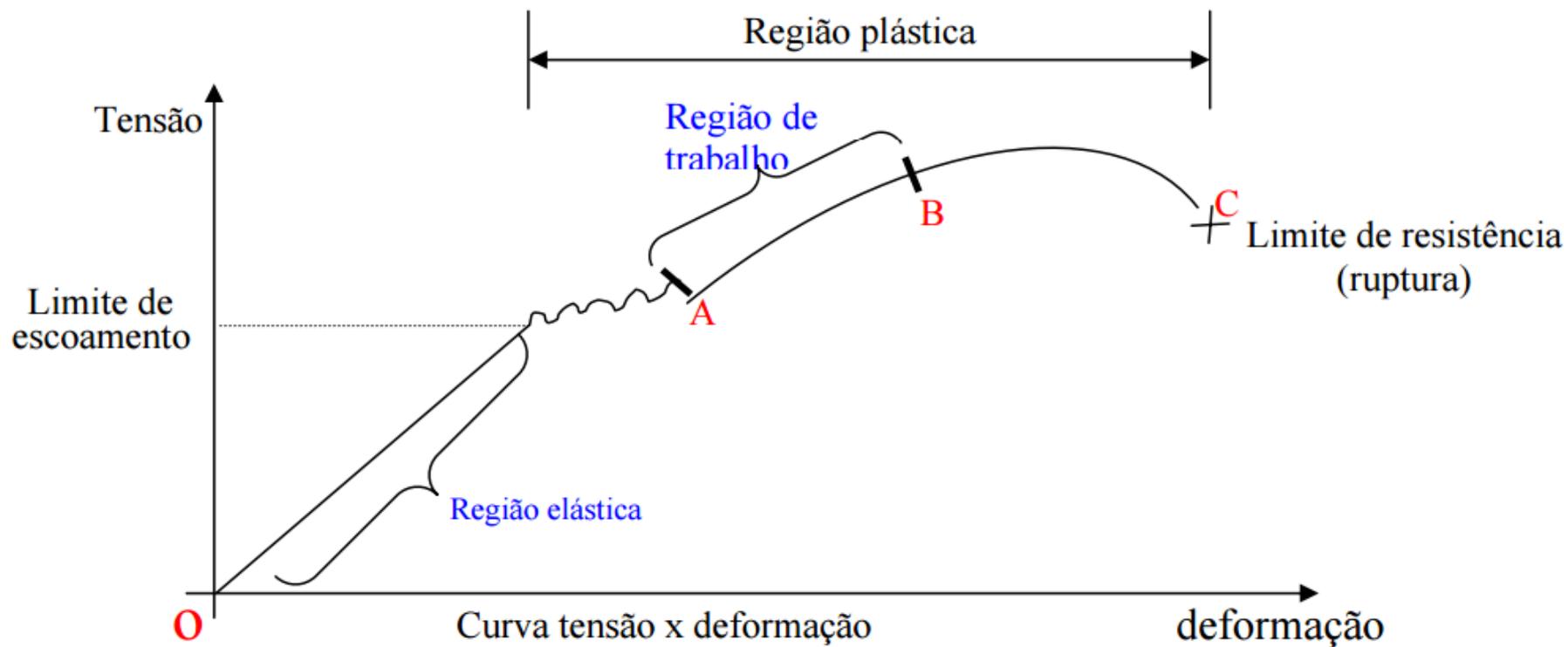
- Processo no qual modifica-se a *geometria/dimensões* de um corpo metálico pela passagem entre *dois ou mais cilindros laminadores*:

→ *diminuição da seção transv.* → *aumento do comprimento*  
*aumento da largura*

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



*arraste pelo atrito*



Curva Tensão deformação para os aços  
(Fonte- Laminação dos Aços- ABM1997)

# LAMINAÇÃO

## Cilindros de laminação:

- **aços carbono e aços-liga: para desbaste**
- **aços-liga e ferros fundidos: para processos intermediários**
- **ferros fundidos: para acabamento**

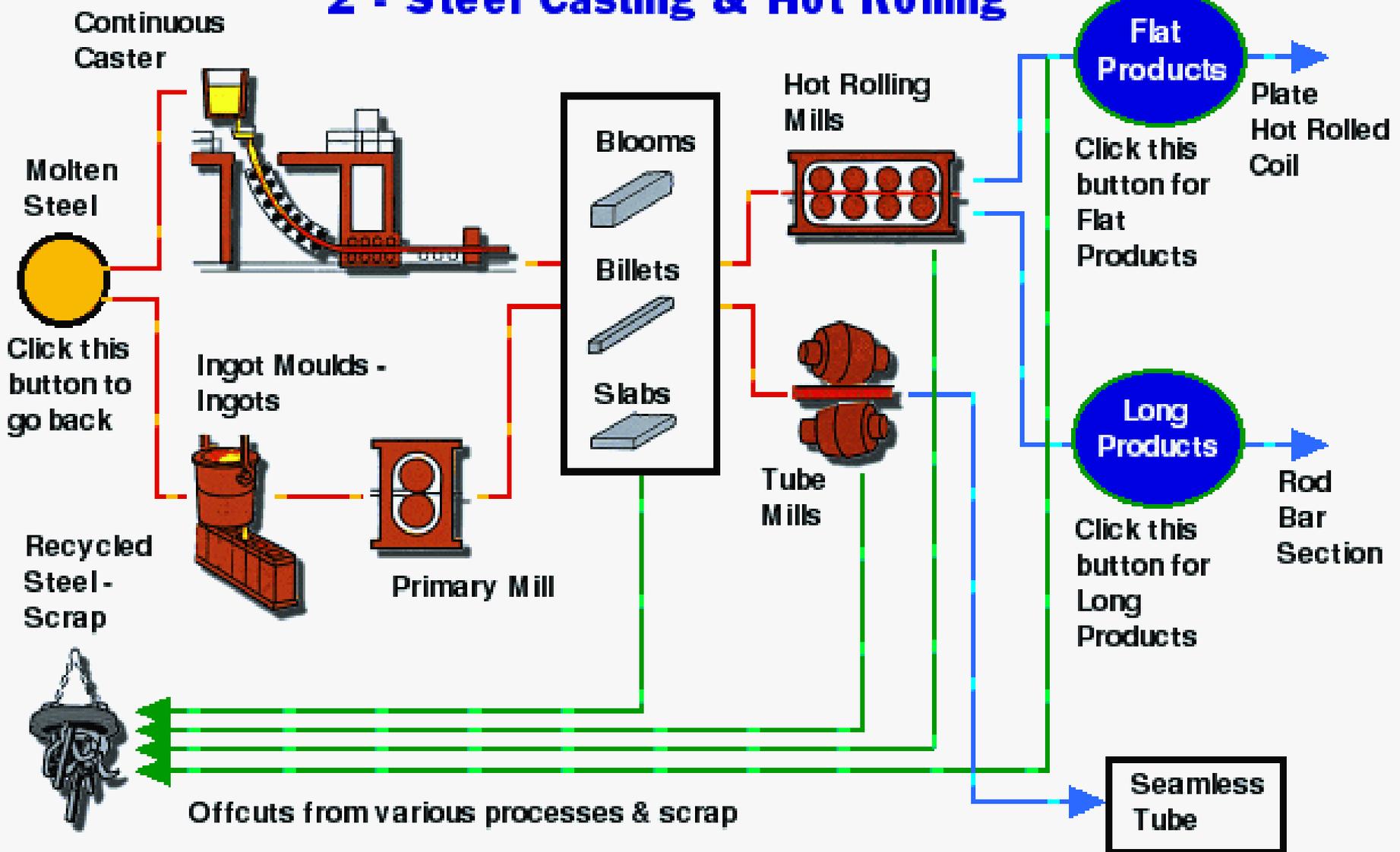
## Exemplos de processos e produtos em laminação:

- **laminação de produtos planos de aço**
- **laminação de perfis de aço**

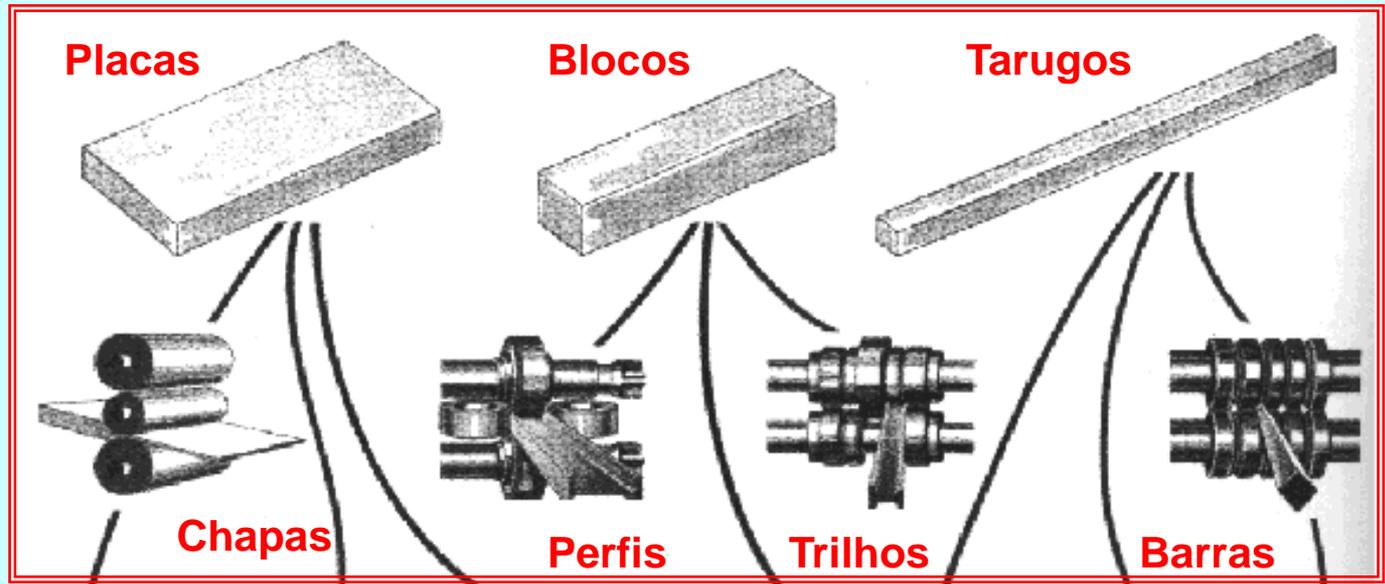
## Defeitos em produtos laminados

- **desvios de forma**
- **irregularidades de superfície: trincas, fissuras, cascas, carepas**
- **internos: trincas, escamas, impurezas**

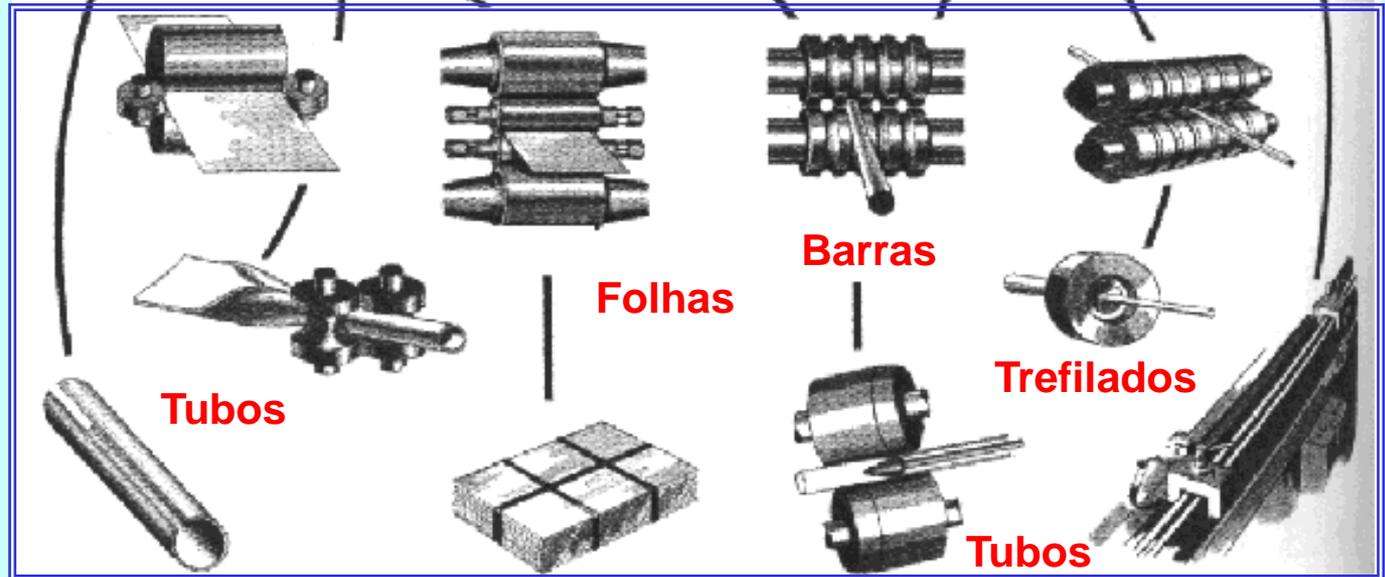
## 2 - Steel Casting & Hot Rolling



# Laminação a quente



# Laminação a frio



## LAMINAÇÃO A QUENTE

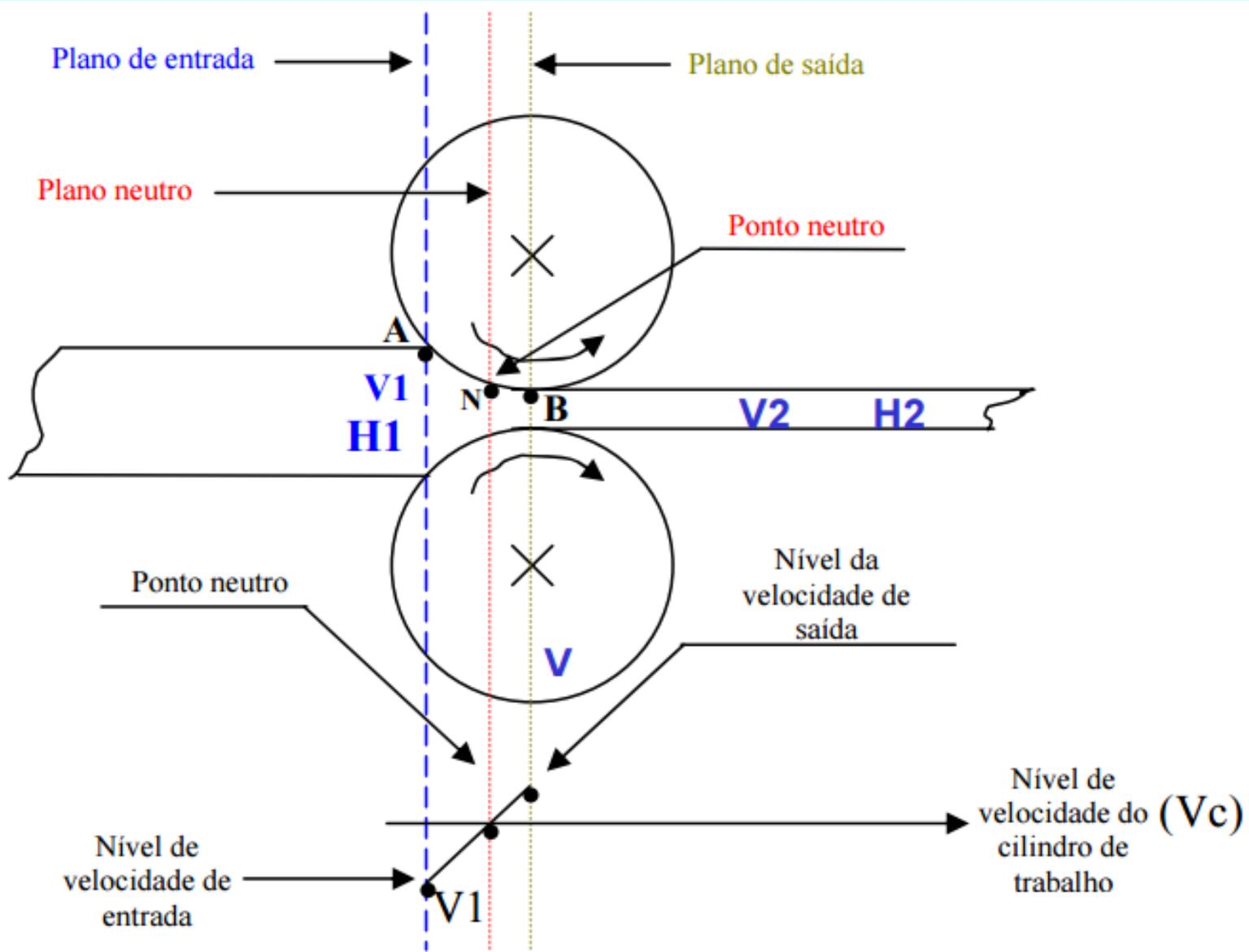
- **Matéria-prima: lingotes fundidos, placas e tarugos lingotados, laminados**
- **preparação, “desbaste”**
- **grandes deformações**
- **grandes dimensões**
- **geometrias complexas**
- **produtos semi-acabados**

## LAMINAÇÃO A FRIO

- **Matéria-prima: chapas e barras laminadas a quente**
- **operações de acabamento**
- **pequenas deformações**
- **superfícies regulares, menor rugosidade**
- **produtos acabados**

# MECÂNICA DA LAMINAÇÃO

- Esforço predominante: compressão direta
- Arco de contato
- Ponto neutro: pressão máxima dos cilindros sobre a peça
- Ângulo de laminação: ângulo de contato, ângulo de ataque, ângulo de mordida
- Forças de atrito: no sentido da laminação até o ponto neutro e contrário a partir dele → tendência de movimento para trás e para frente da peça a laminar
- Carga de laminação: força de separação dividida pela área de contato → Tensão de laminação
  - *Área de contato menor*
  - *Força de separação menor*
- Cilindros de diâmetros menores →
  - *Forças de atrito menores*
  - *Maior rigidez e precisão*
  - *Aplicação nos quádruplos e múltiplos*



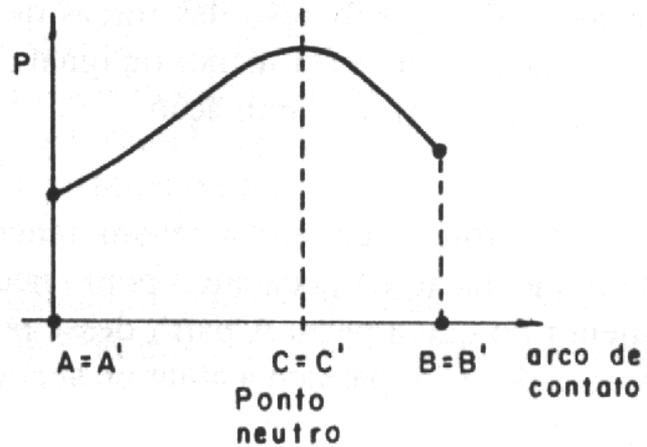
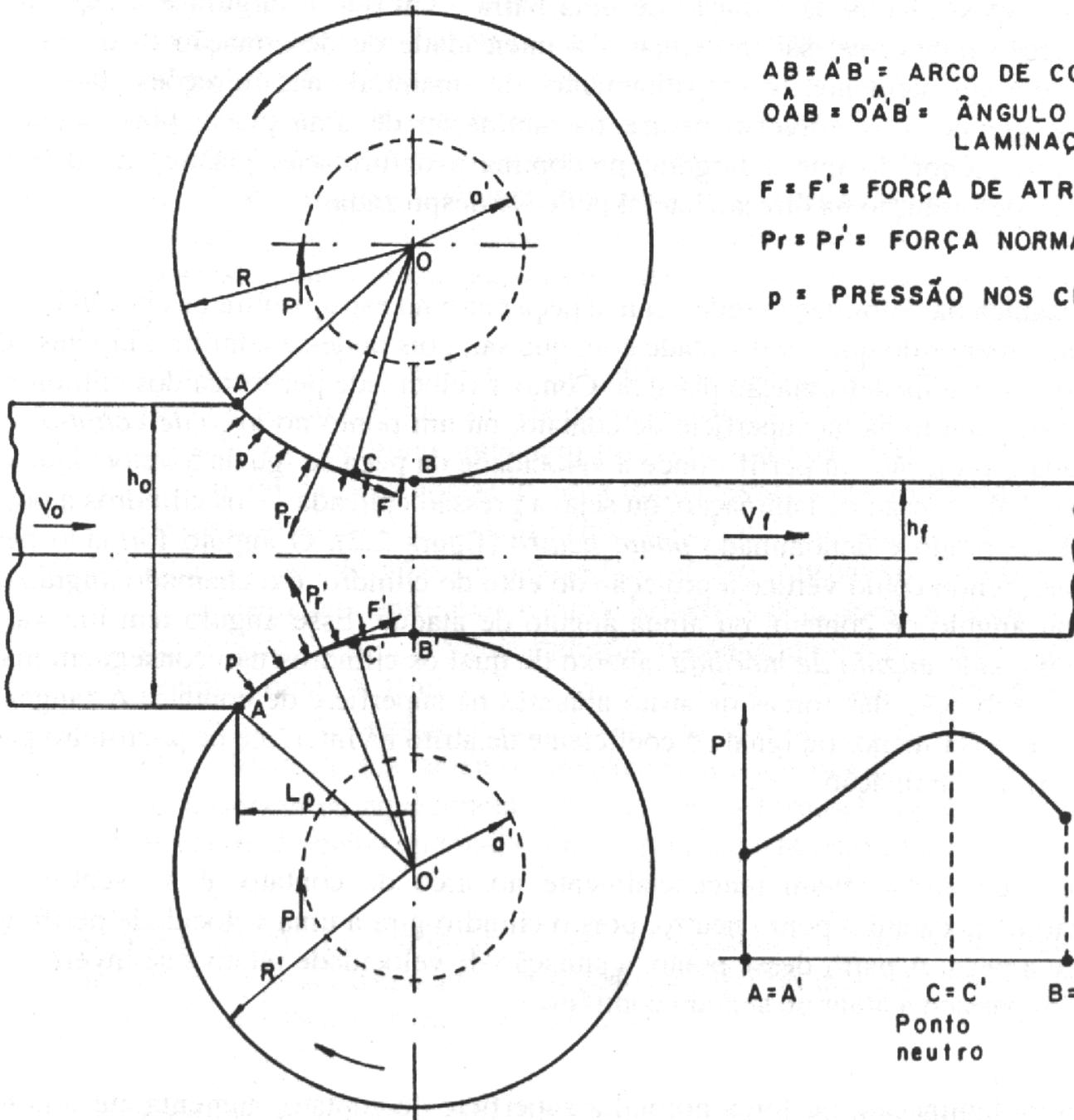
Arco de contato na laminação  
 (Fonte – Laminacão a frio dos acos CSN)

$AB = A'B' =$  ARCO DE CONTATO  
 $\hat{O}AB = \hat{O}'A'B' =$  ÂNGULO DE LAMINAÇÃO

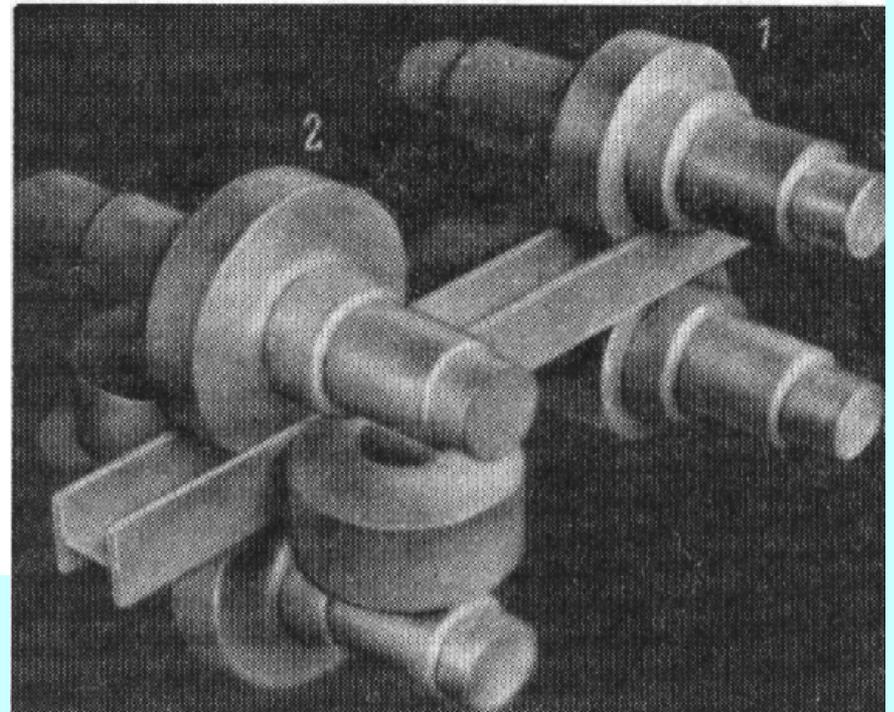
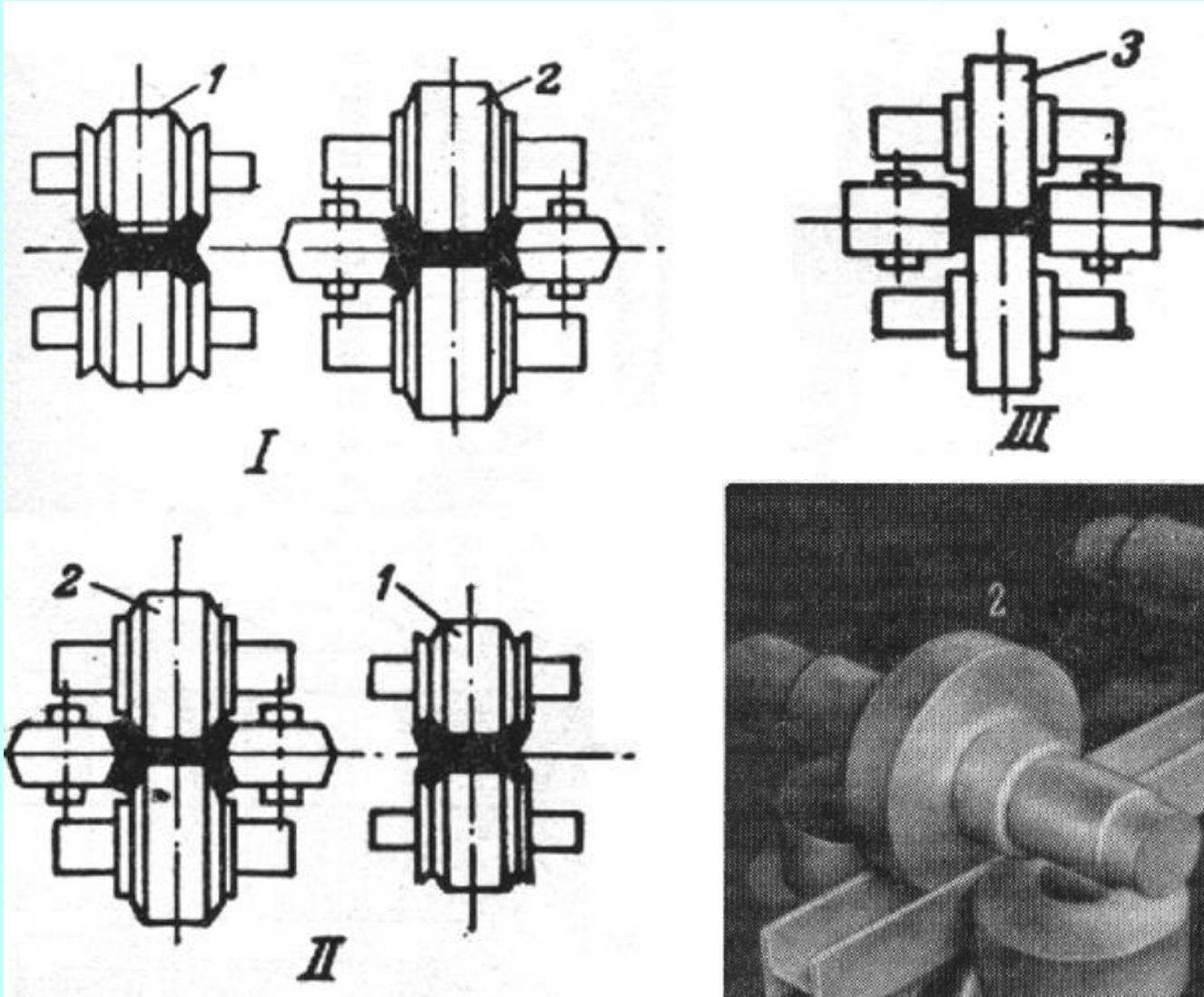
$F = F' =$  FORÇA DE ATRITO

$P_r = P_r' =$  FORÇA NORMAL

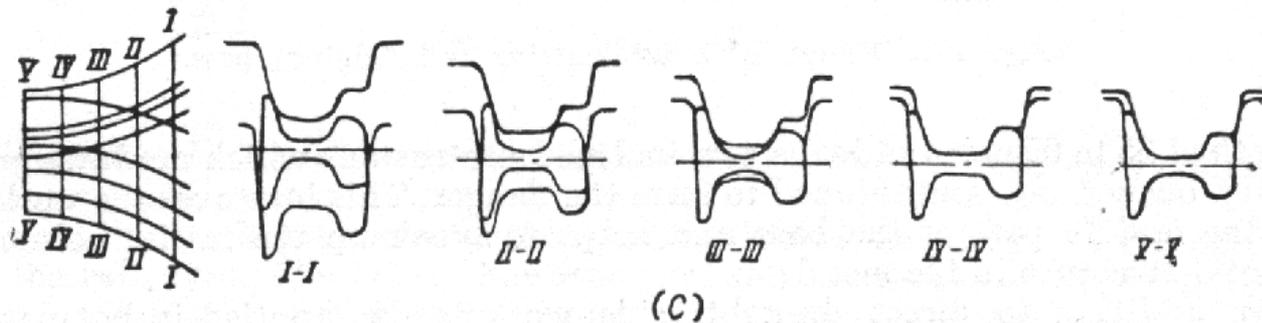
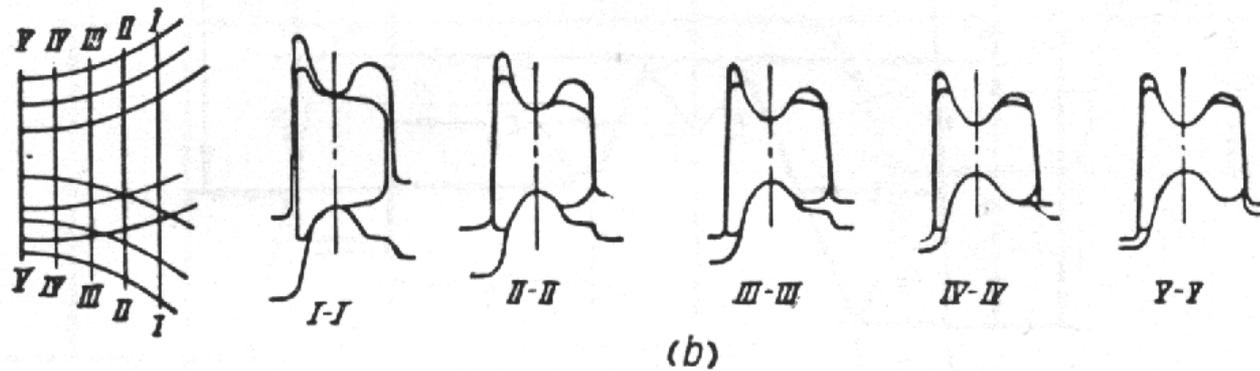
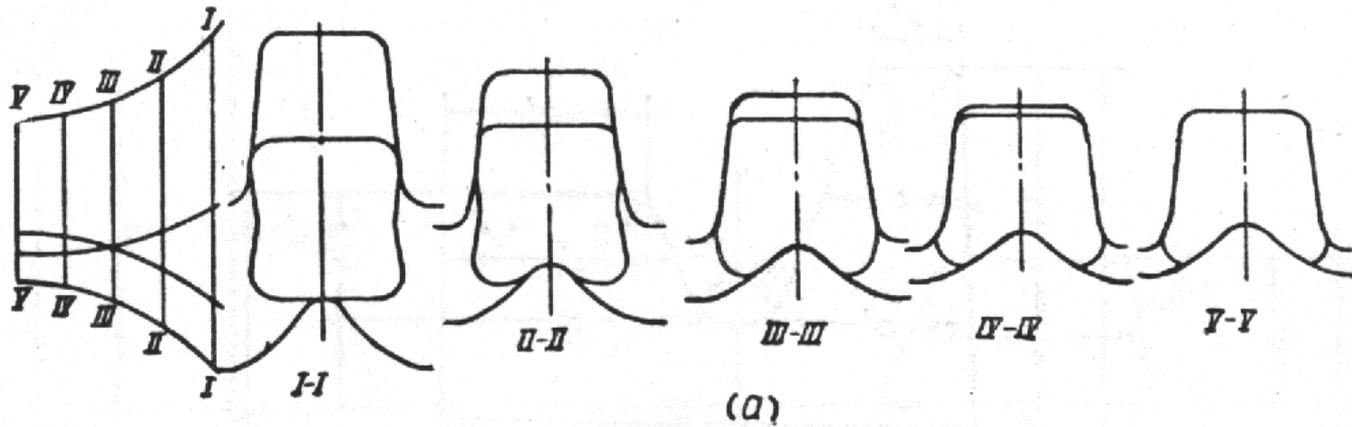
$p =$  PRESSÃO NOS CILINDROS



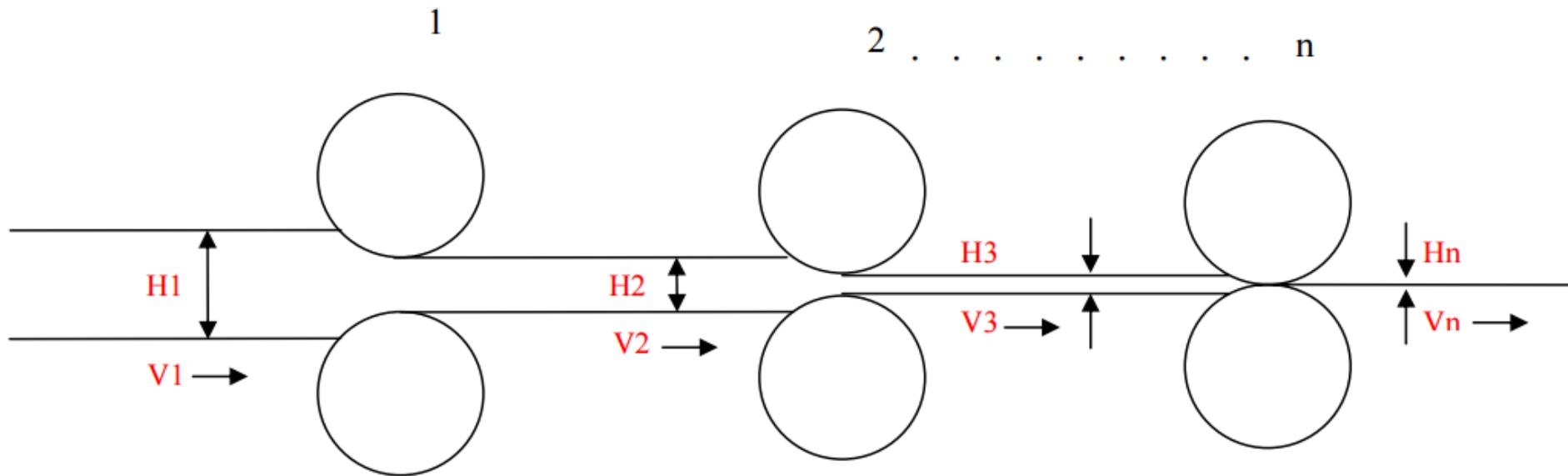
# Sequência de laminação de uma viga perfil I



# Sequência de laminação de um trilho ferroviário

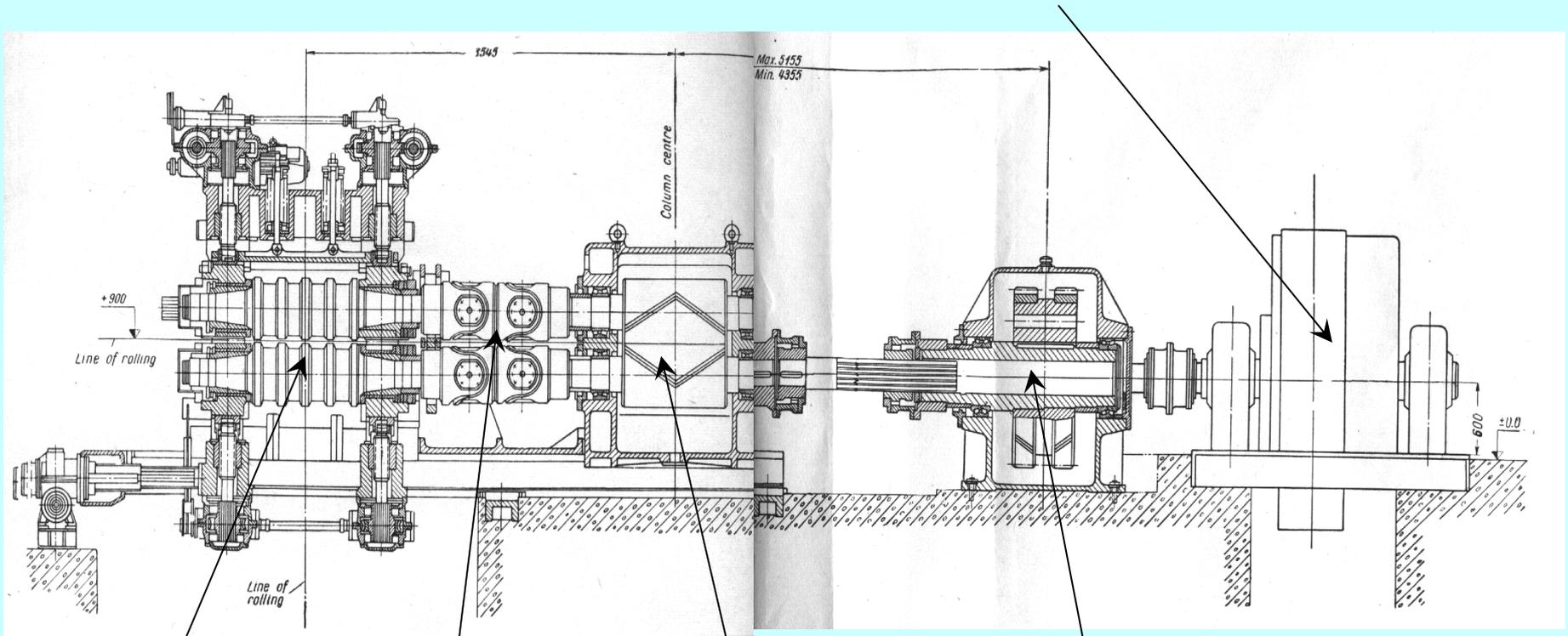


# Conservação de Massa (Volume) na laminação



Fluxo de massa constante na laminação  
(Fonte – Laminação a frio dos aços CSN)

# Laminador de preparação (Motor elétrico de 1000 kW)



Cilindros

Juntas  
universais

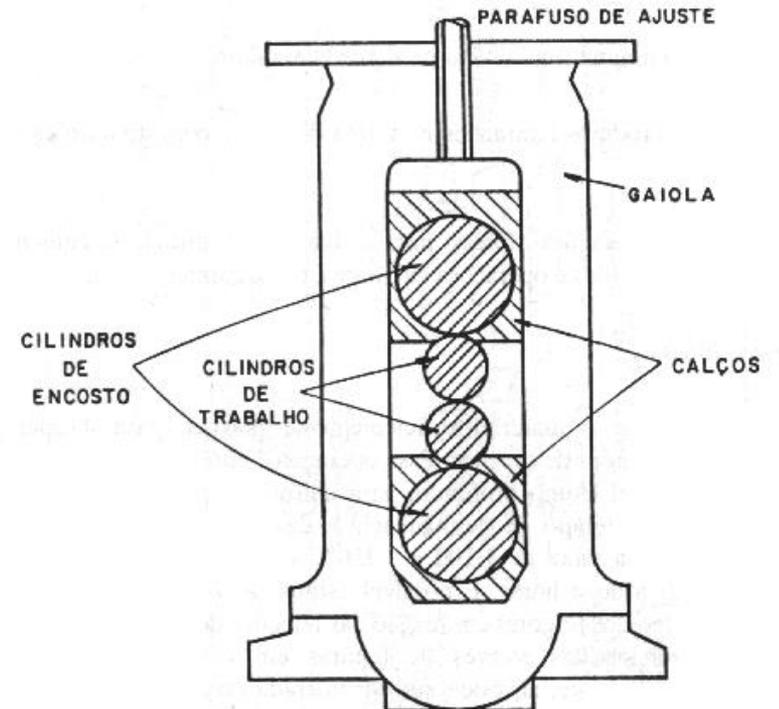
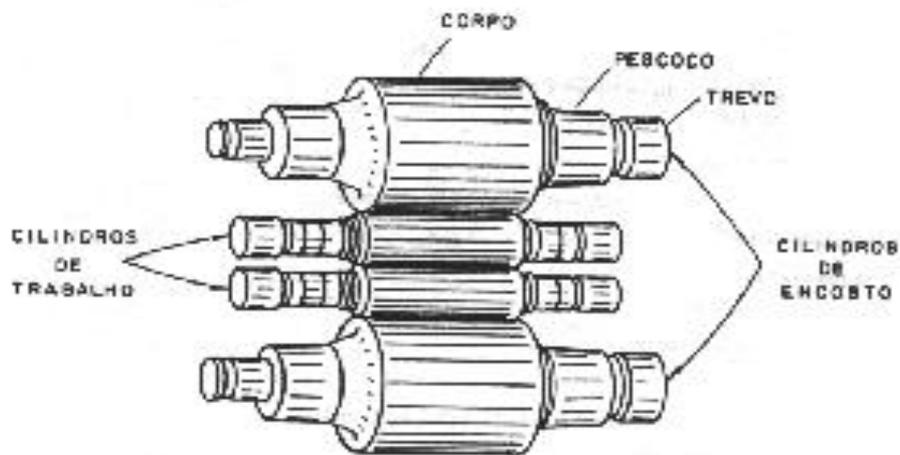
Distribuição

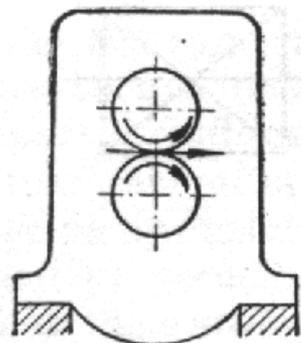
Redutor

# TIPOS DE LAMINADORES:

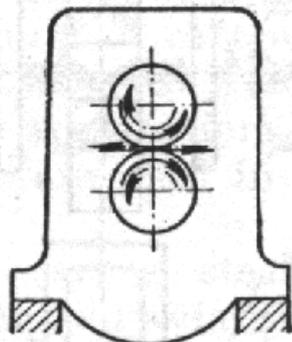
- duo reversível: usado na LQ para “desbaste” de lingotes e para esboço
- trio: usado na LQ para chapas e placas
- quádruplo, quádruplo reversível: usado em LQ e LF para chapas grossas e planos
- linhas contínuas: chapas de espessura média e fina a quente
- Sendzimir: usado na LF para chapas finas
- Mannesmann: usado na LQ e LF de tubos sem costura, com o uso de mandris
- Seqüencial: usado na LQ e LF de perfis e tubos com costura a partir de tiras

# Componentes de um laminador quádruplo

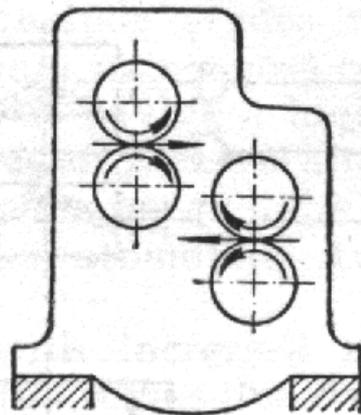




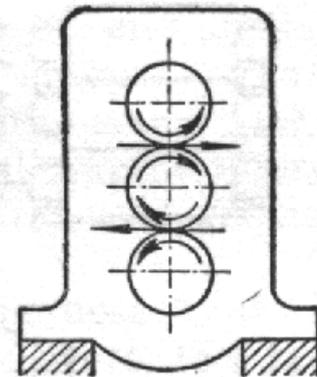
1



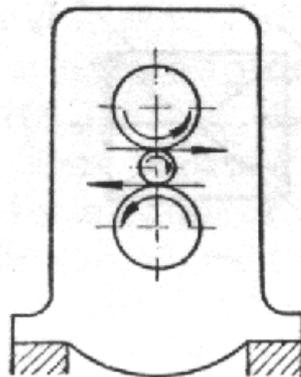
2



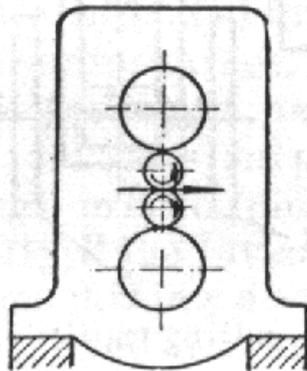
3



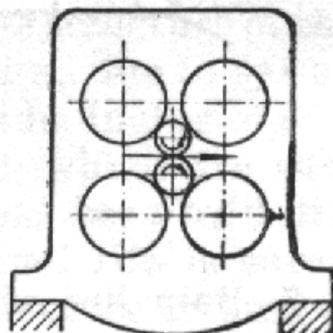
4



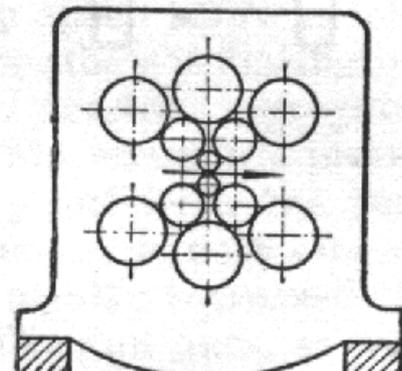
5



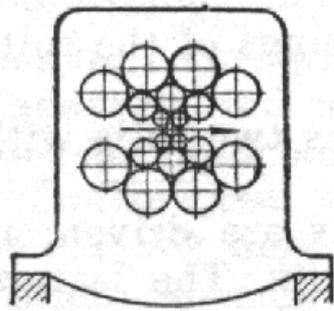
6



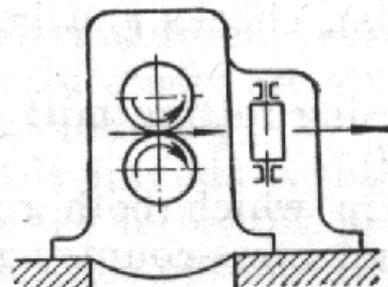
7



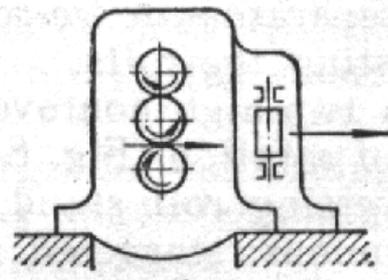
8



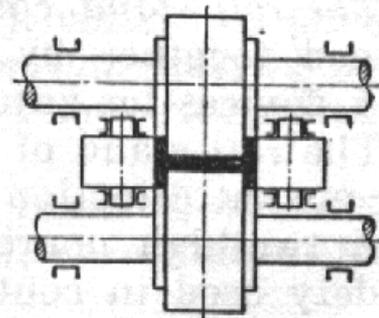
9



10



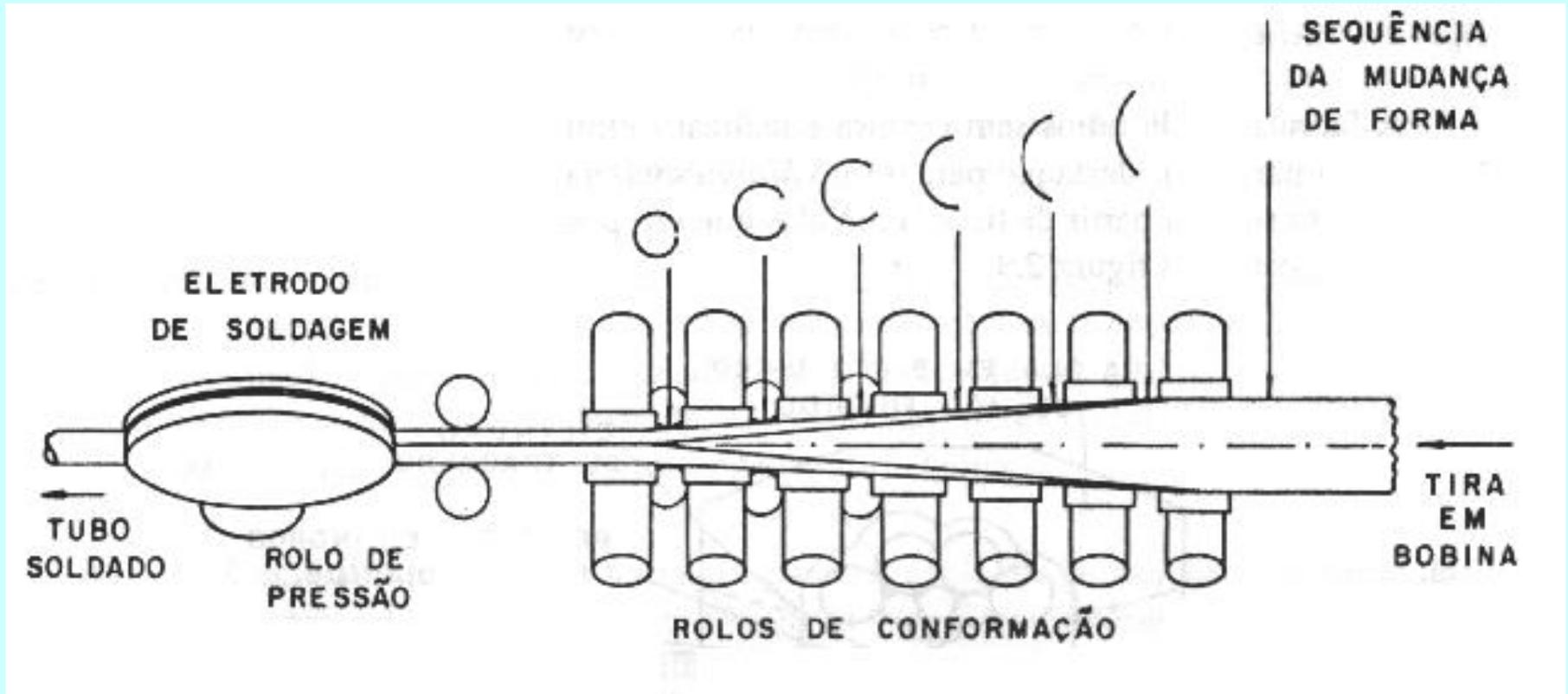
11



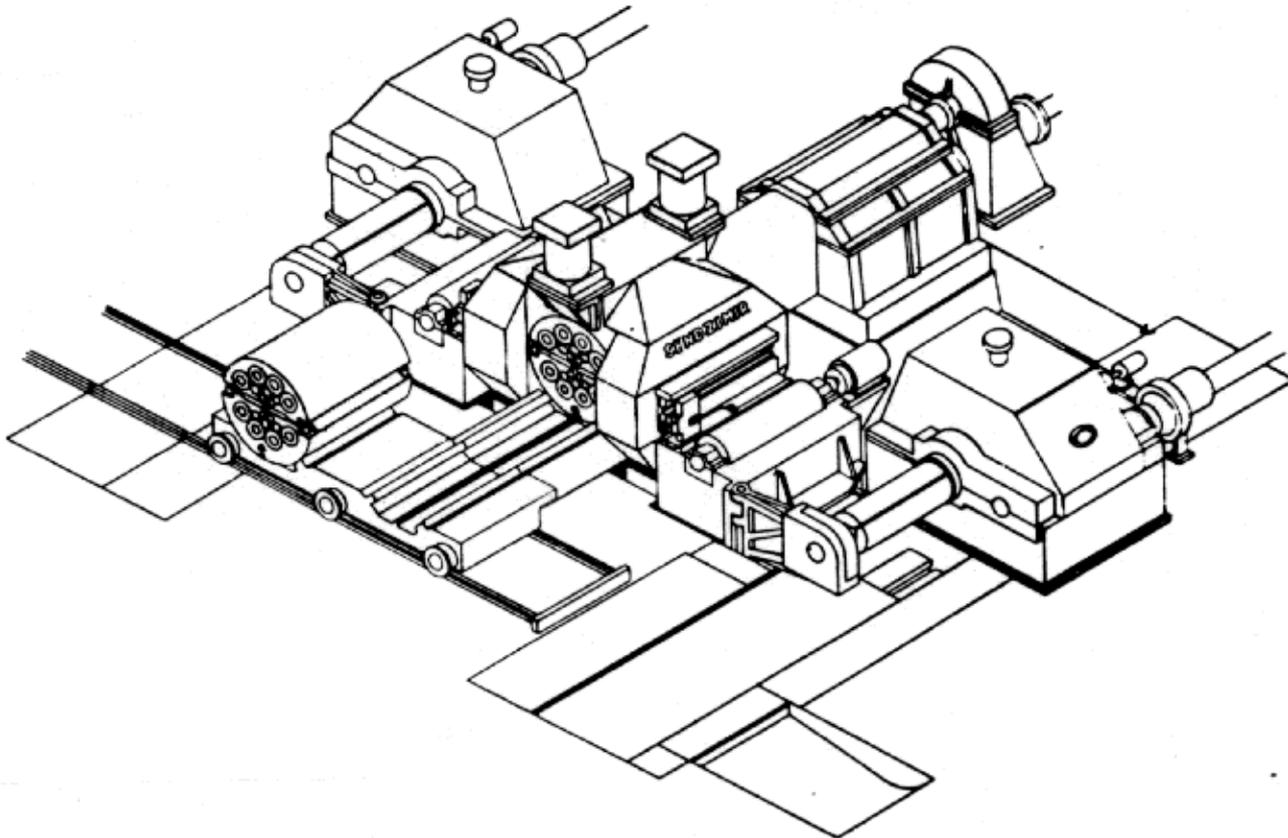
12

## Laminador de tubos com costura

Tubos com diâmetro interno entre **10 e 114 mm** e espessura de parede entre **2 e 5 mm**

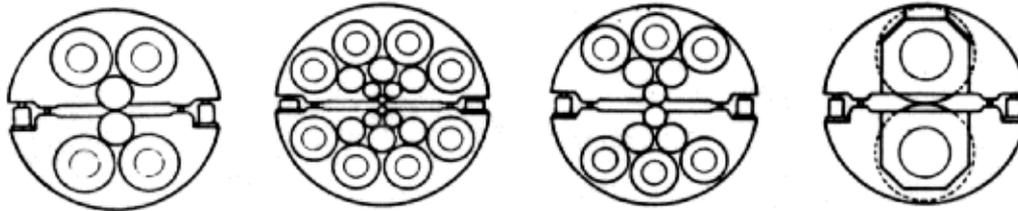


# Laminador Sendzimir



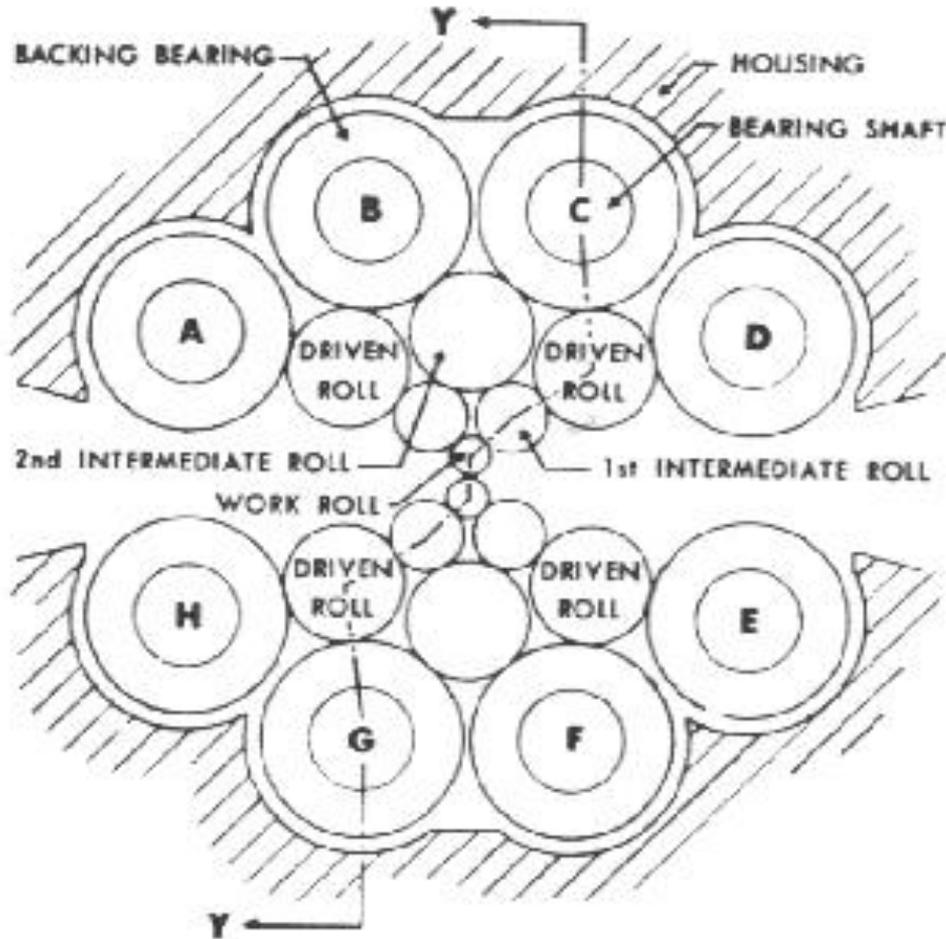
Sistema de  
troca rápida de  
cilindros

(1 a 2 minutos)



“Cartuchos” inseridos hidraulicamente

# Laminador Sendzimir



Arranjo 1-2-3-4

com 20  
cilindros

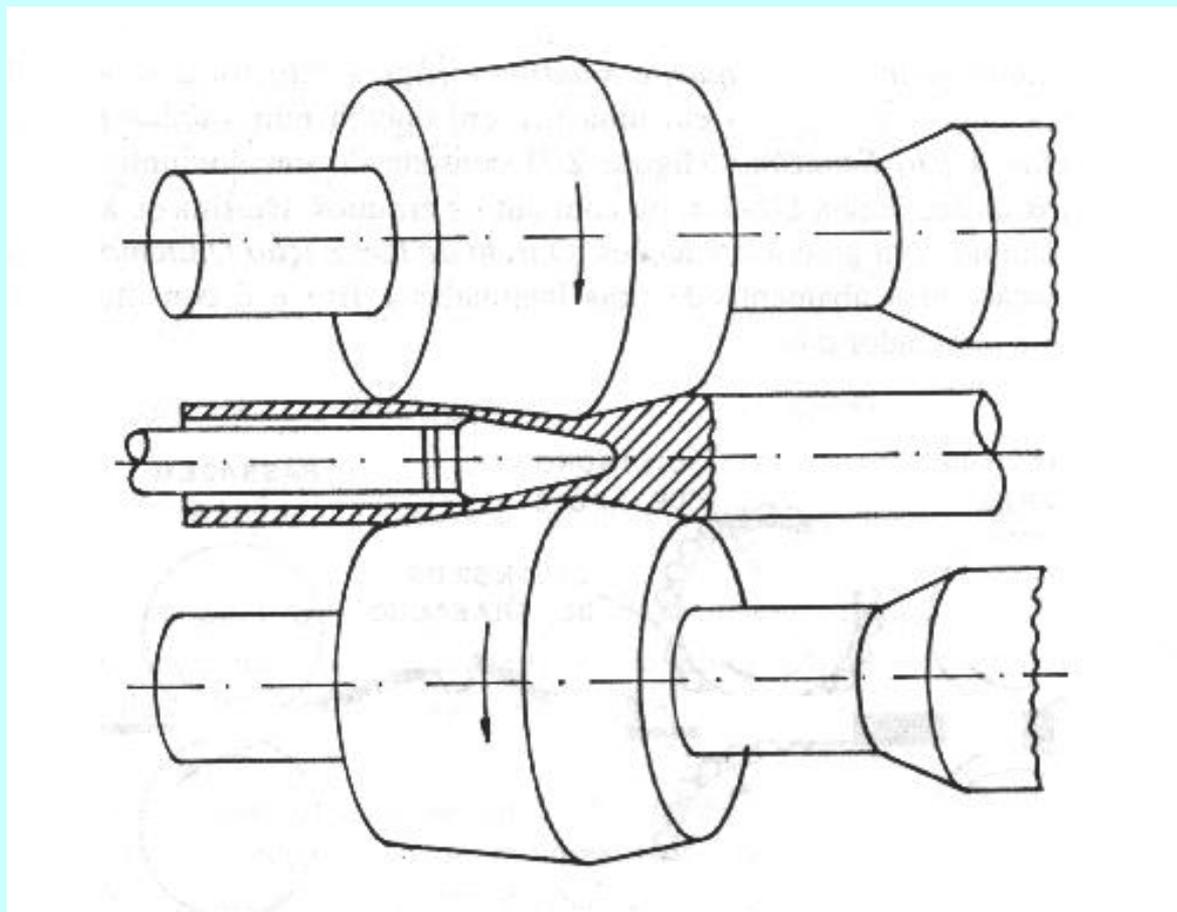
Folhas de aço  
inox e aço-Si

$t = 5$  a  $50 \mu\text{m}$

$\text{tol} = 1$  a  $5 \mu\text{m}$

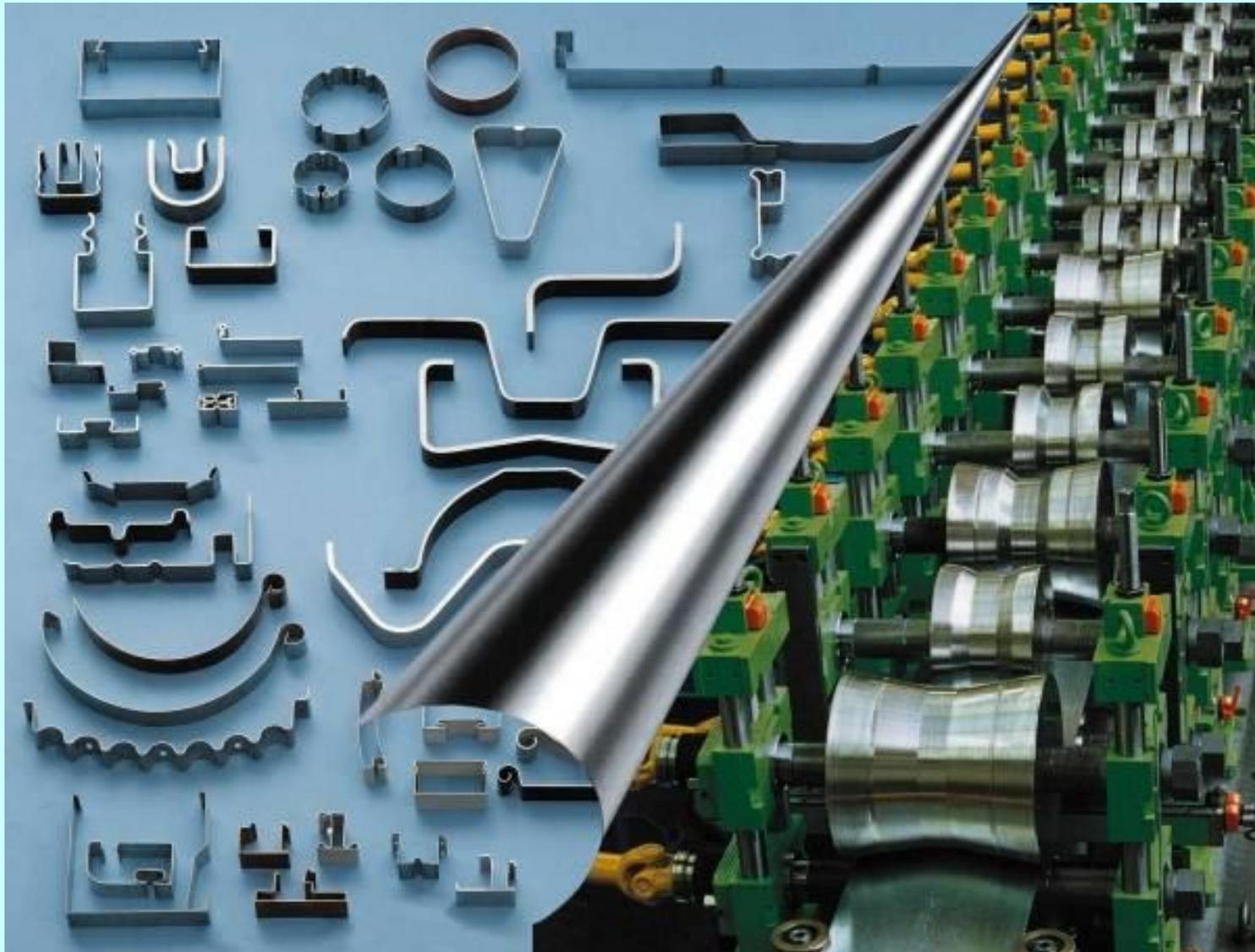
# Laminador mandrilador para tubo sem costura

## Processo Mannesmann



Tubos com  
diâmetro interno  
entre **57 e 426 mm**,  
com espessura  
entre **3 e 30 mm**

# Laminador sequencial de perfis



# **AUTOMAÇÃO NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO**

O verdadeiro objetivo da automação não é a redução da mão de obra, como geralmente se pensa.

Na laminação, seu objetivo fundamental é aumentar a Confiabilidade, produtividade, consistência do processo, e qualidade, agregando valor ao produto e reduzindo seu custo de fabricação.

Ex. controle automático da espessura do laminado (AGC - Automatic Gage Control); controle do reaquecimento de placas; definição dos esquemas de passe; minimização das perdas metálicas (melhor distribuição do layout); maximização da planicidade (ausência de ondulações) e controle do resfriamento do esboço, tanto durante como após a laminação.

# **AUTOMAÇÃO NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO**

Um dos grandes objetivos a serem alcançados pela automação dos laminadores é prever, de forma confiável e precisa, as propriedades mecânicas do produto laminado, a partir de sua composição química e parâmetros de processo efetivamente aplicados.

Isso permitiria dispensar os onerosos e demorados ensaios mecânicos que são feitos atualmente para avaliar o produto, além de caracterizar os níveis de flutuação de propriedades mecânicas ao longo do comprimento do laminado (informação muito útil para o cliente que irá processá-lo).

# Demandas do Mercado Siderúrgico

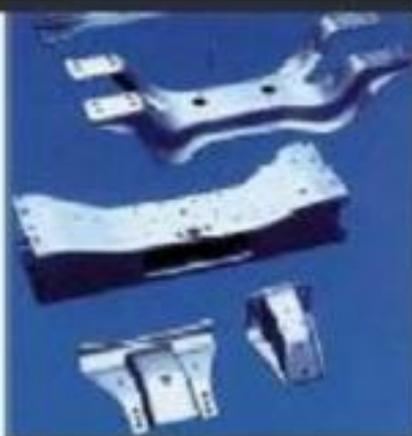


**Alta Flexibilidade  
de Produção**



**Tolerâncias  
Rígidas**

**Custos Minimizados  
de Investimento  
e Operação**

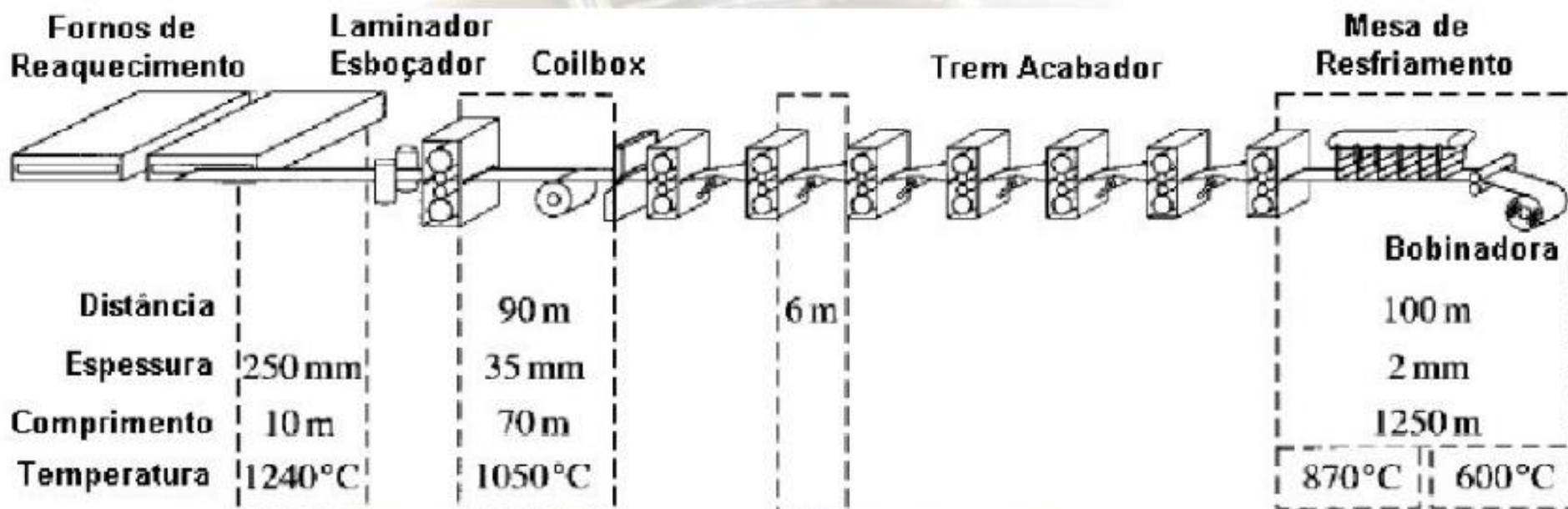


**Materiais  
Avançados**

**Operação Estável  
e Alta Disponibi-  
lidade da Planta**



# Laminação de Tiras a Quente



Primeiro LTQ Plenamente Automatizado:

**Spencer Steel Works, Llanwern, South Wales, Outubro 1964**

Computador GE412 projetado por **Arnold Spielberg**

# Modelos Matemáticos do LTQ

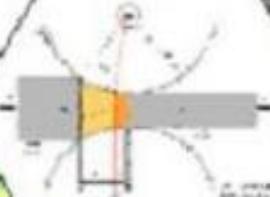
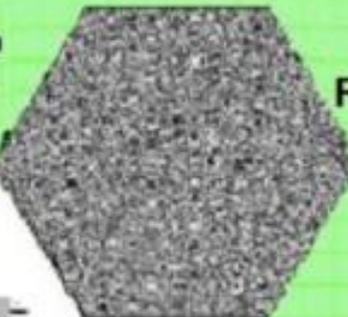
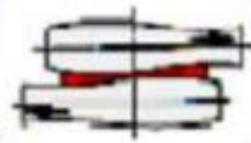
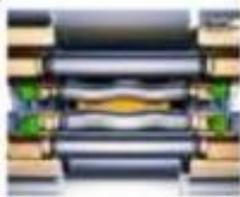
Nível 2

Controle de Perfil,  
Coroa e Planicidade

Cálculo do  
Esquema  
de Passes

Modelo de  
Recristalização

Controle Dinâmico de  
Perturbações no Perfil

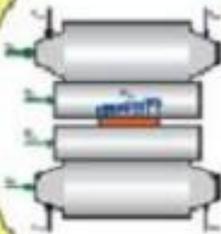


Controle de  
Espessura

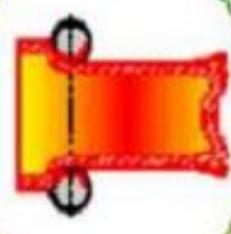


Base de  
Dados de  
Materiais

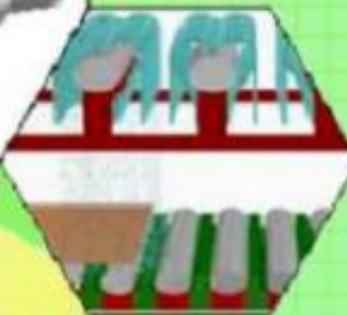
Controle de  
Nivelamento



Controle de  
Largura



Modelo e Controle  
de Resfriamento



Nível 1

**PMR 3301**  
**COMPLEMENTOS DE**  
**FABRICAÇÃO MECÂNICA**

**Processo de Fabricação**  
**por Estampagem**

# PROCESSO DE ESTAMPAGEM

- Processos para conformação de superfícies

Deformações localizadas → Chapas e folhas

Produtos: peças isoladas

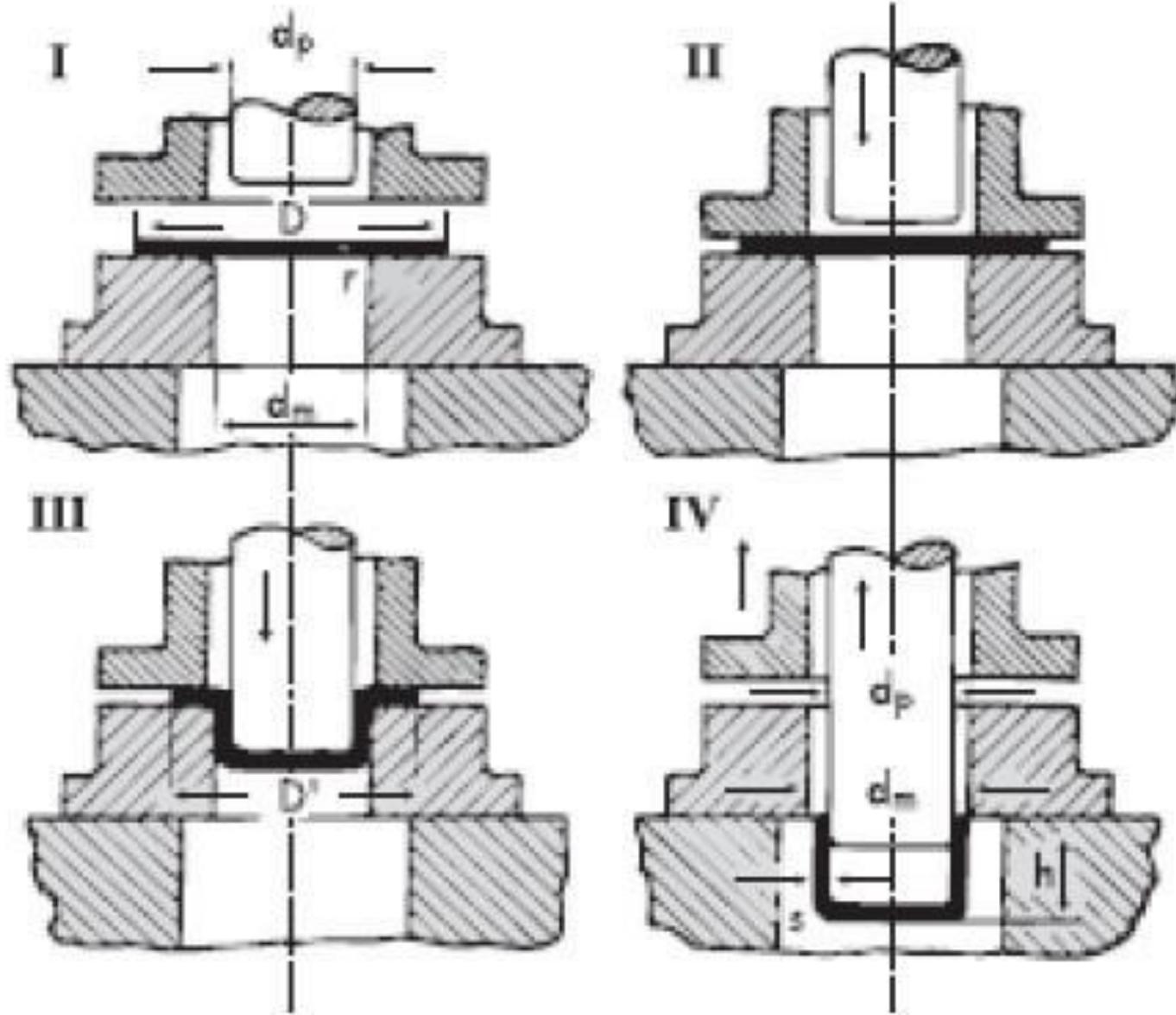
- Esforços:

Flexão, Compressão, Cisalhamento, Estiramento  
de acordo com o processo e o produto

## ESTAMPAGEM PROFUNDA

- Copos e caixas
- Estampos progressivos
- Outros processos por estampagem

# PROCESSO DE ESTAMPAGEM



# MECÂNICA DA ESTAMPAGEM PROFUNDA

## ELEMENTOS CONSTRUTIVOS:

- Punção, matriz, sujeitador, extrator

## SUJEITADOR:

- Evita o enrugamento da aba e do copo
- Pressões de sujeição entre 5 e 10 kgf/cm<sup>2</sup>

## ESFORÇOS PREDOMINANTES NAS REGIÕES DO COPO

- De acordo com a região e a fase do processo, os esforços podem ser de compressão, tração ou flexão
- Nível dos esforços e afinamento da espessura dependem do atrito entre chapa e ferramentas

## EQUIPAMENTOS DE ESTAMPAGEM

- Movimento alternativo: prensas
- Movimento contínuo: laminadores, calandras

# ESTAMPAGEM – CARACTERÍSTICAS GERAIS

- Normalmente realizado a frio
- A quente, somente para chapas espessas

MATÉRIA PRIMA (deve ter boa ductilidade):

- Laminados a frio delgados de aços (aço doce), ligas de alumínio e Ligas de cobre

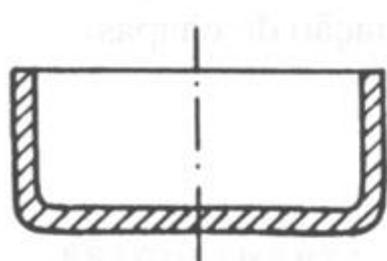
## ESTAMPAGEM PROFUNDA

- Em vários estágios, dependentes do coeficiente limite de embutimento
- Material de partida na forma de discos
- Para peças pequenas: processos contínuos, com estampas progressivos

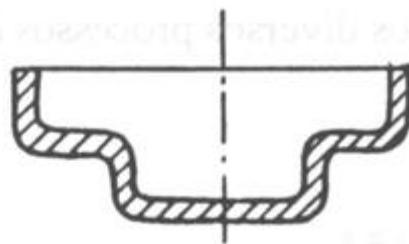
## CONFORMAÇÃO EM GERAL

- Estágio único ou múltiplos de acordo com a complexidade da geometria
- Material de partida: tiras, “blank”

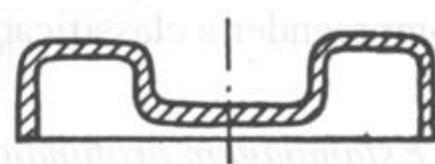
( VISTAS EM CORTES DE PERFIL COM SIMETRIA AXIAL )



**ESTAMPAGEM**



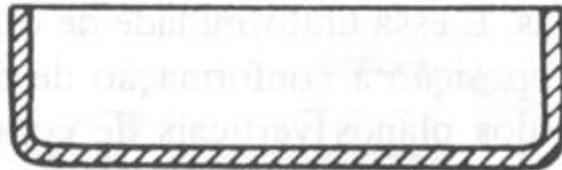
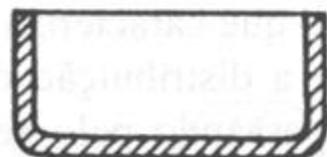
**REESTAMPAGEM**



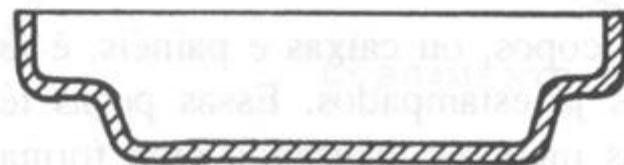
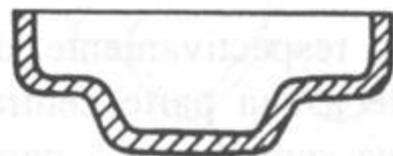
**REESTAMPAGEM REVERSA**

CONFORMAÇÃO DE CAIXAS

( 2 VISTAS EM CORTES DE PERFIL DE CADA PEÇA )

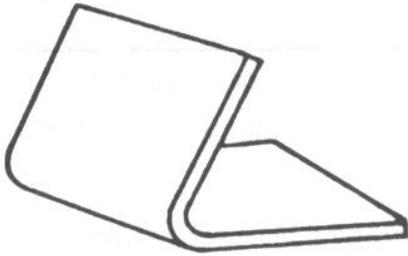


**ESTAMPAGEM**



**REESTAMPAGEM**

**DOBRAMENTO**



**FLANGEAMENTO**

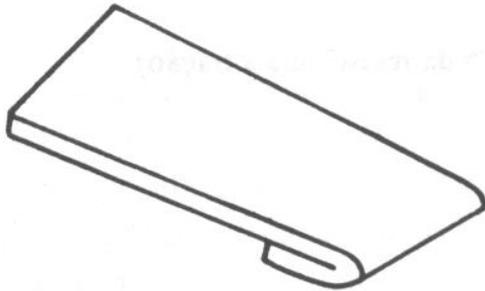


**RETO**

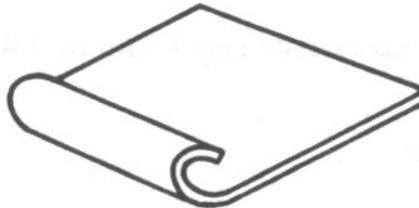


**DE FURO**

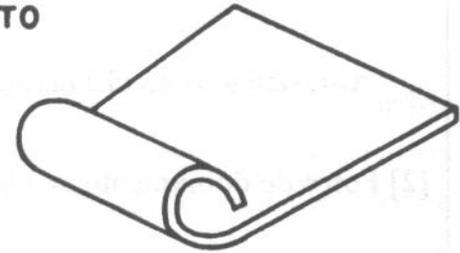
**REBORDAMENTO**



**ENROLAMENTO**

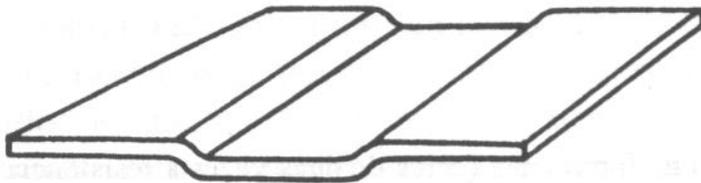


**PARCIAL**

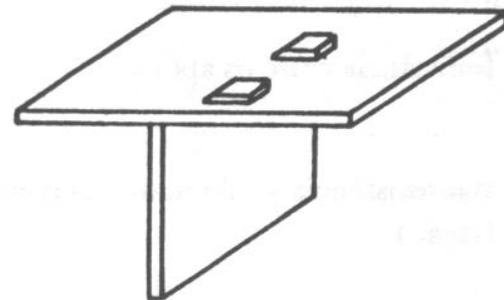


**TOTAL**

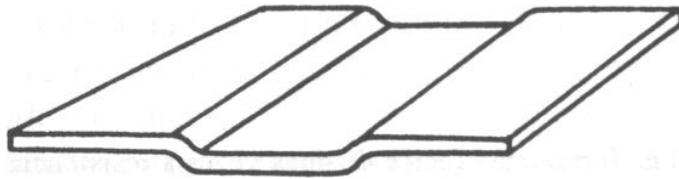
**NERVURAMENTO**



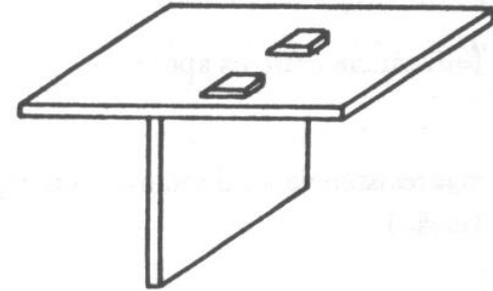
**ESTAQUEAMENTO**



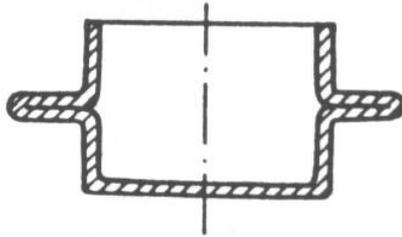
**NERVURAMENTO**



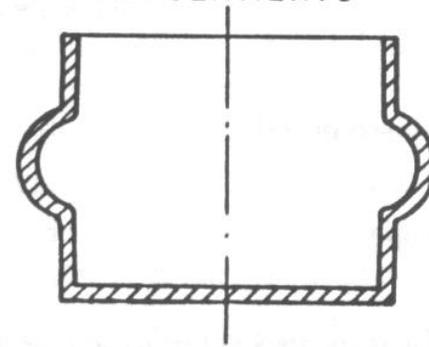
**ESTAQUEAMENTO**



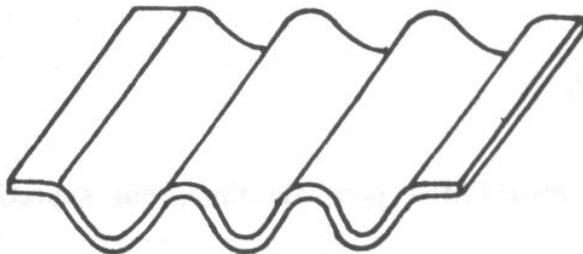
**PREGUEAMENTO**



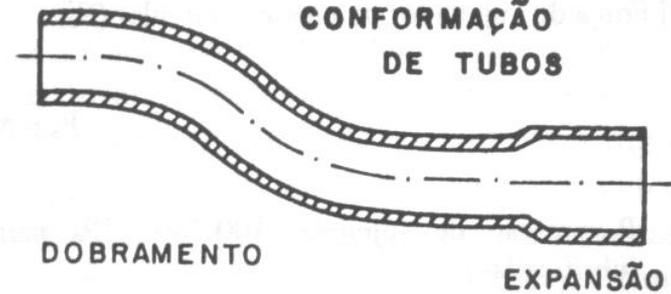
**ABAULAMENTO**



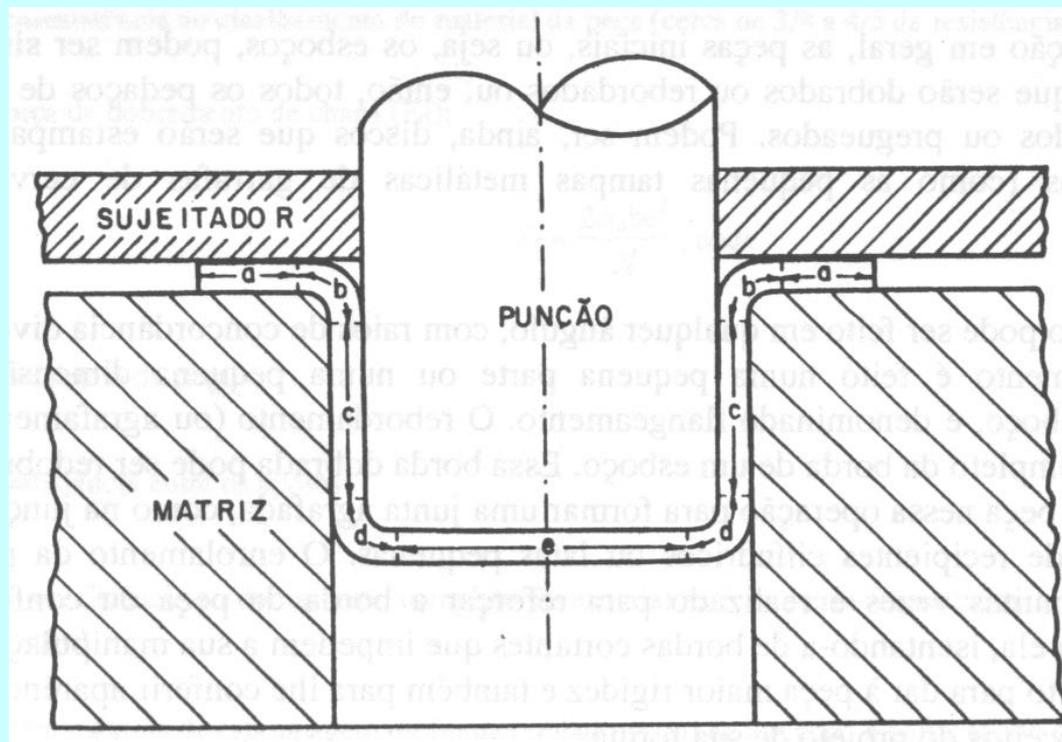
**CORRUGAMENTO**



**CONFORMAÇÃO  
DE TUBOS**



# ESFORÇOS NA ESTAMPAGEM



(a) : REGIÃO DA ABA DO COPO

(b) : REGIÃO DO DOBRAMENTO NA MATRIZ

$$D < 2(a+b+c+d)+e$$

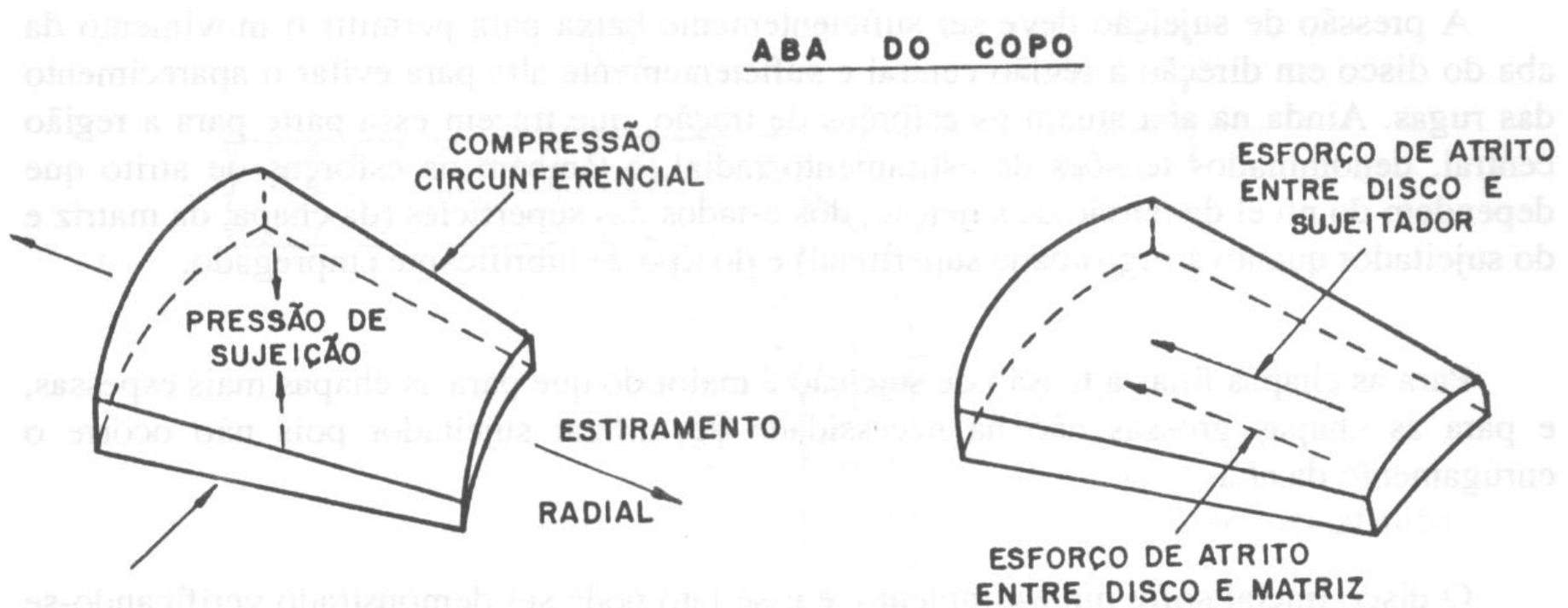
(c) : REGIÃO LATERAL DO COPO

D = diâmetro do  
disco inicial

(d) : REGIÃO DO DOBRAMENTO NO PUNÇÃO

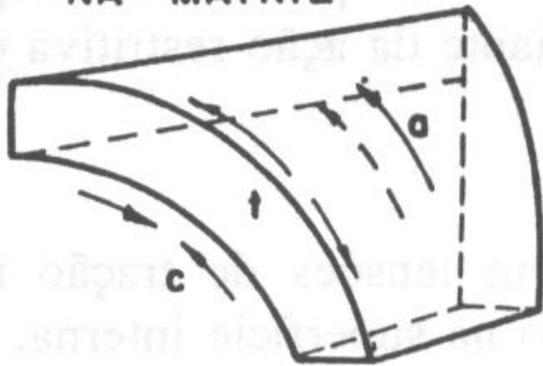
(e) : REGIÃO DO FUNDO DO COPO

# ESFORÇOS NA ESTAMPAGEM



## REGIÃO DE DOBRAMENTO

NA MATRIZ

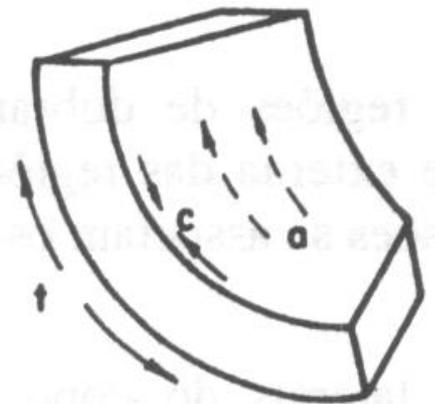


TENSÃO DE TRACÃO ( $t$ )

TENSÃO DE COMPRESSÃO ( $c$ )

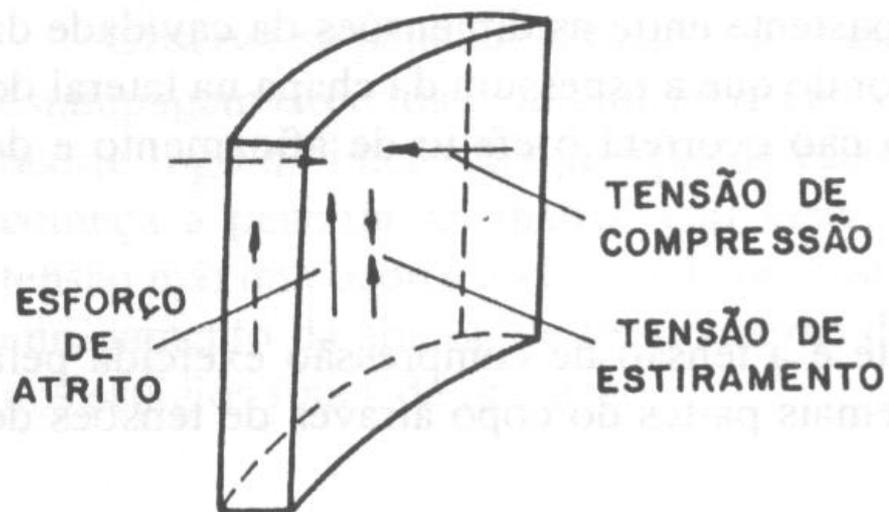
TENSÃO DE ATRITO ( $a$ )

NO PUNÇÃO

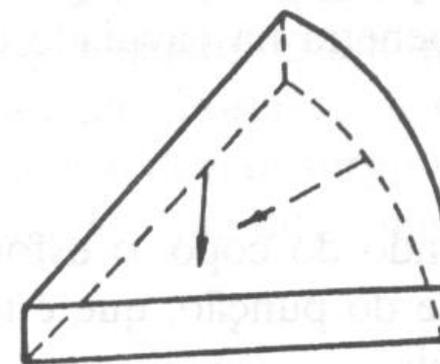


# ESFORÇOS NA ESTAMPAGEM

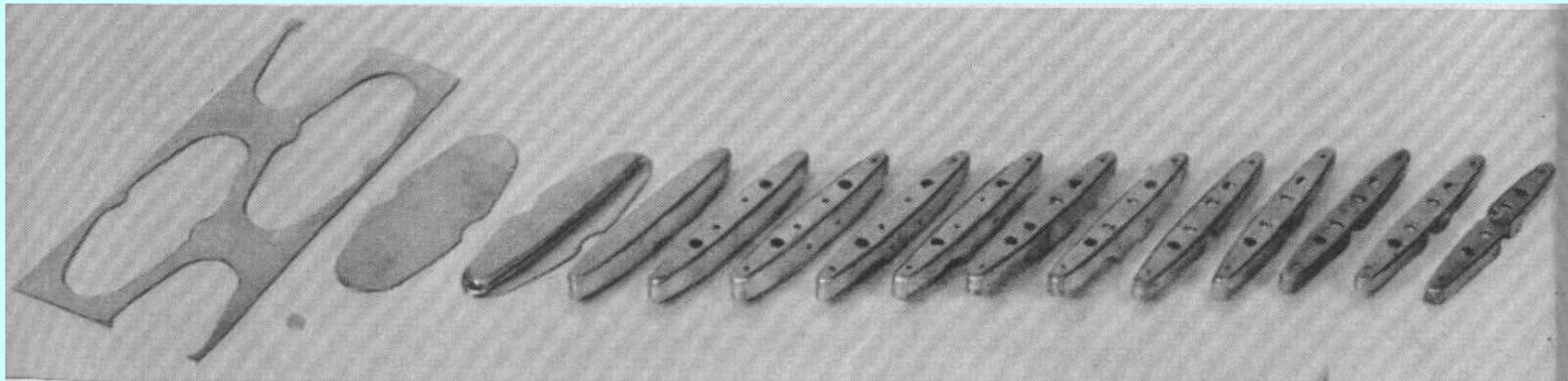
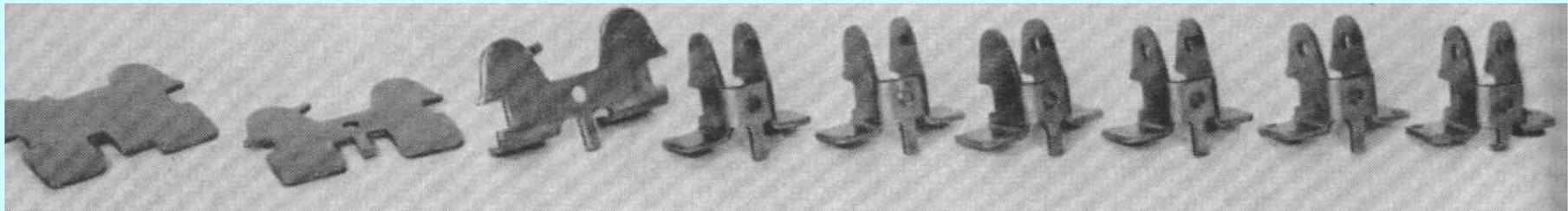
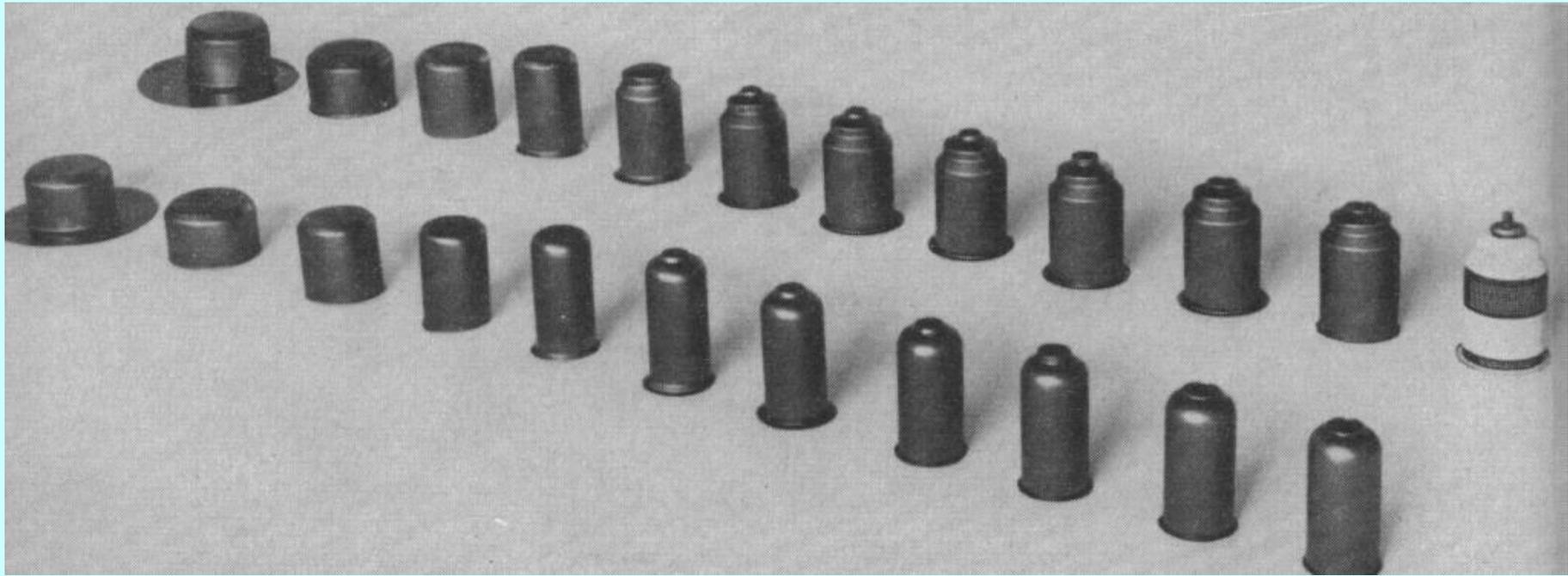
## LATERAL DO COPO



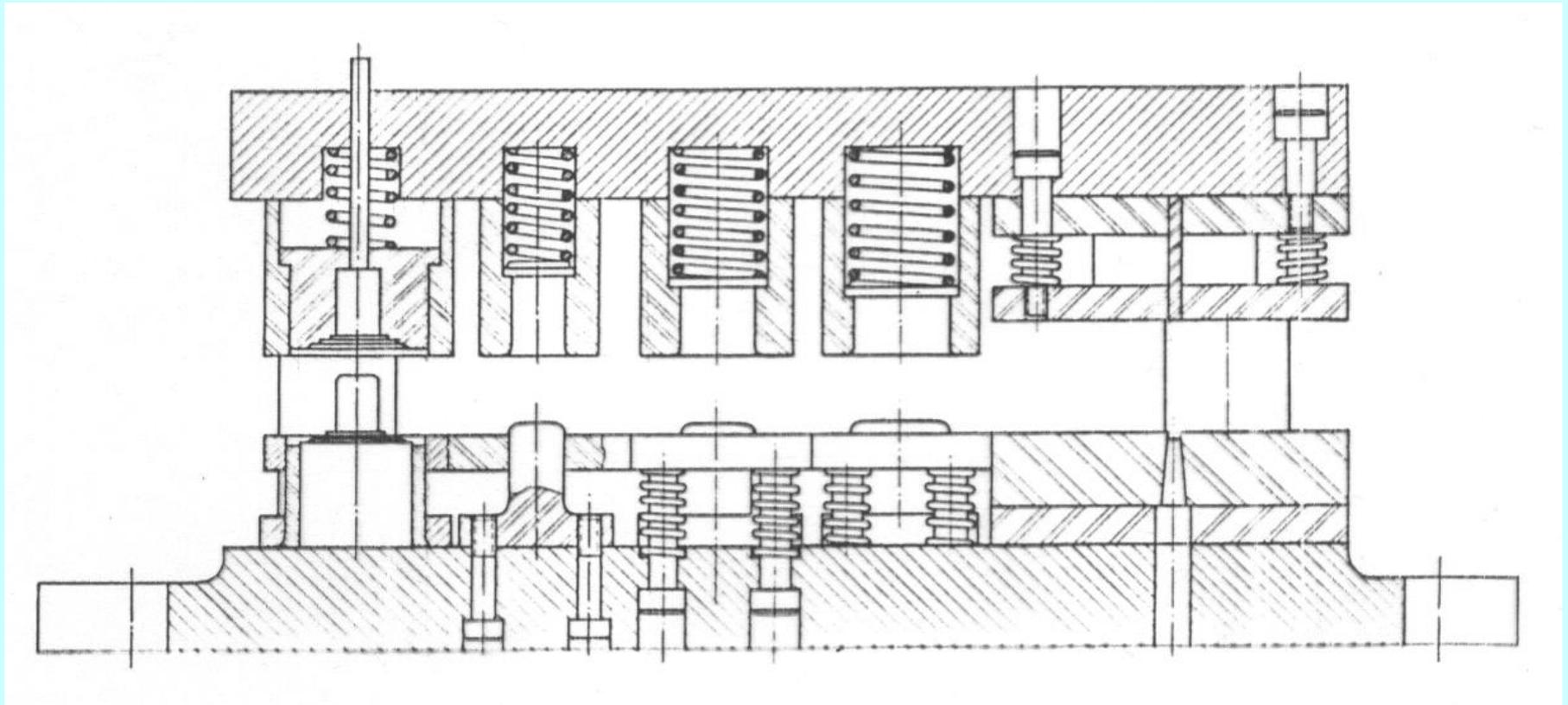
## FUNDO DO COPO



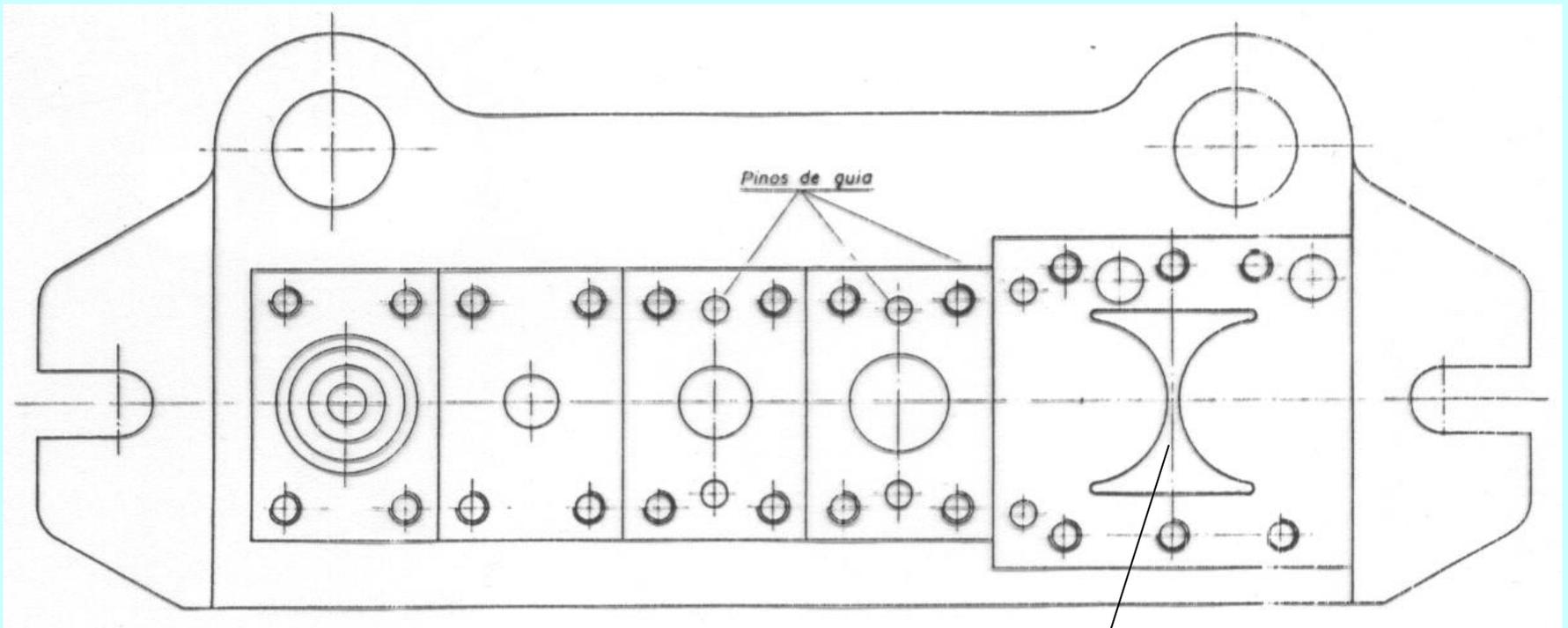
TENSÃO DE COMPRESSÃO  
PREDOMINANTE (ASSOCIADA  
A PROVÁVEL ESFORÇO  
DE ATRITO)



# ESQUEMA DE UM ESTAMPO PROGRESSIVO

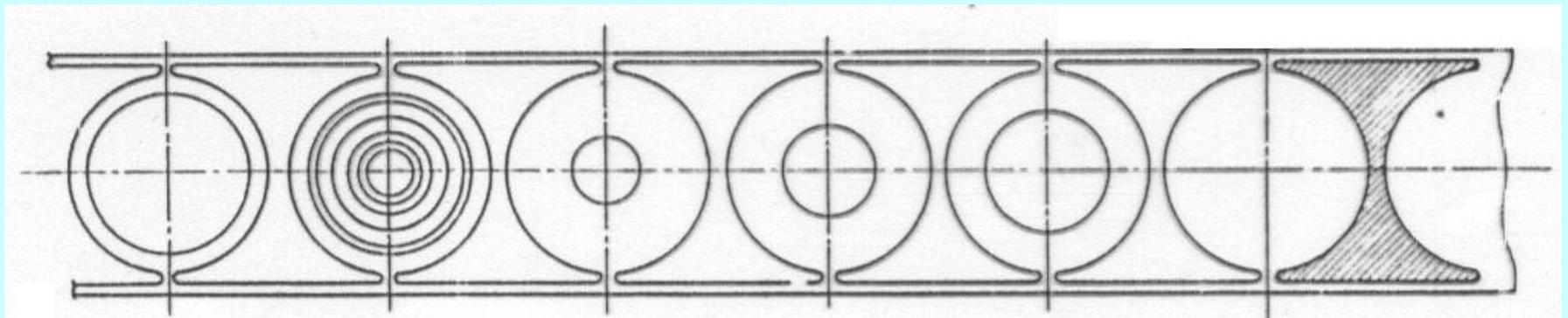


# ESQUEMA DE UM ESTAMPO PROGRESSIVO

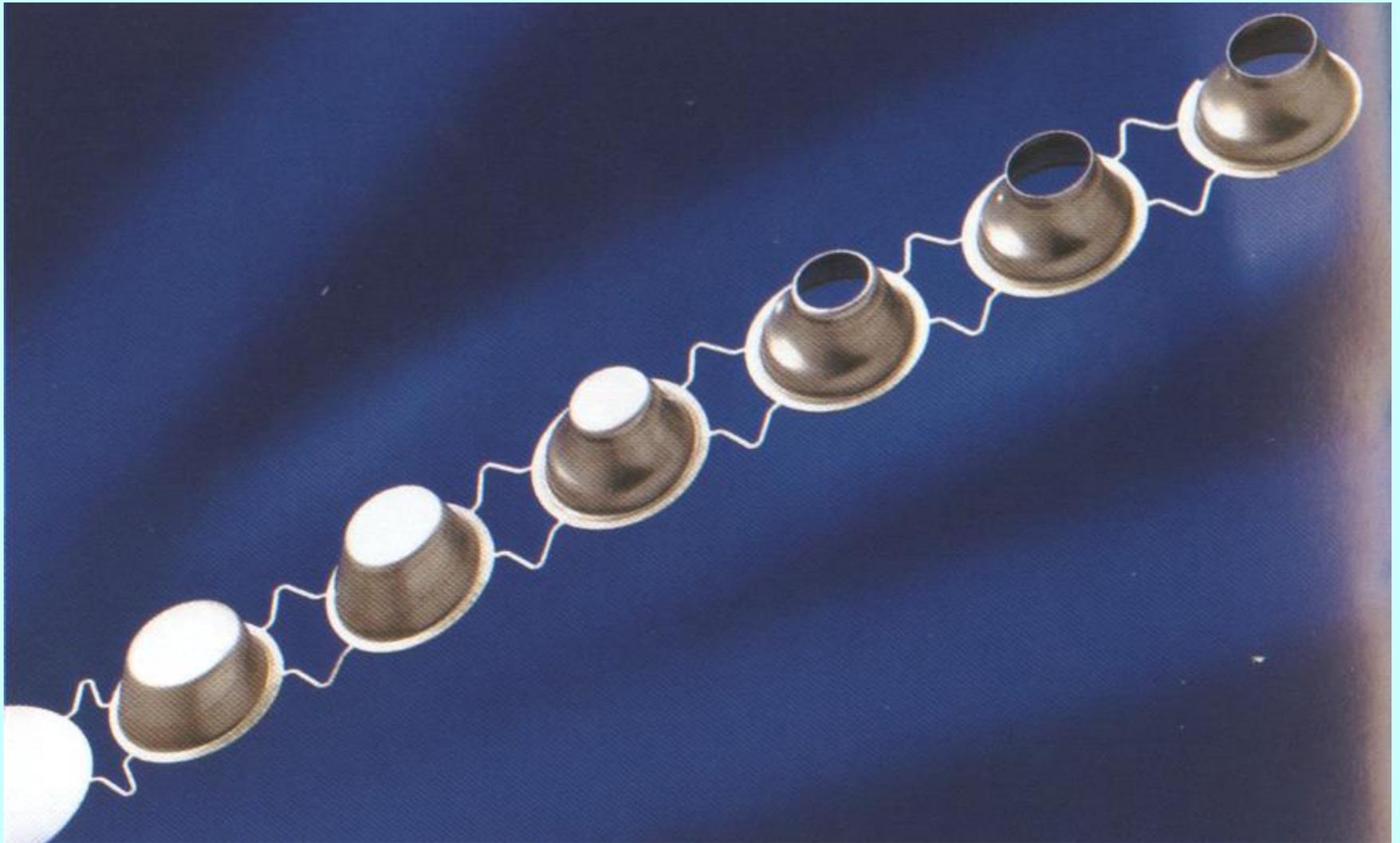


FACA DE  
AVANÇO

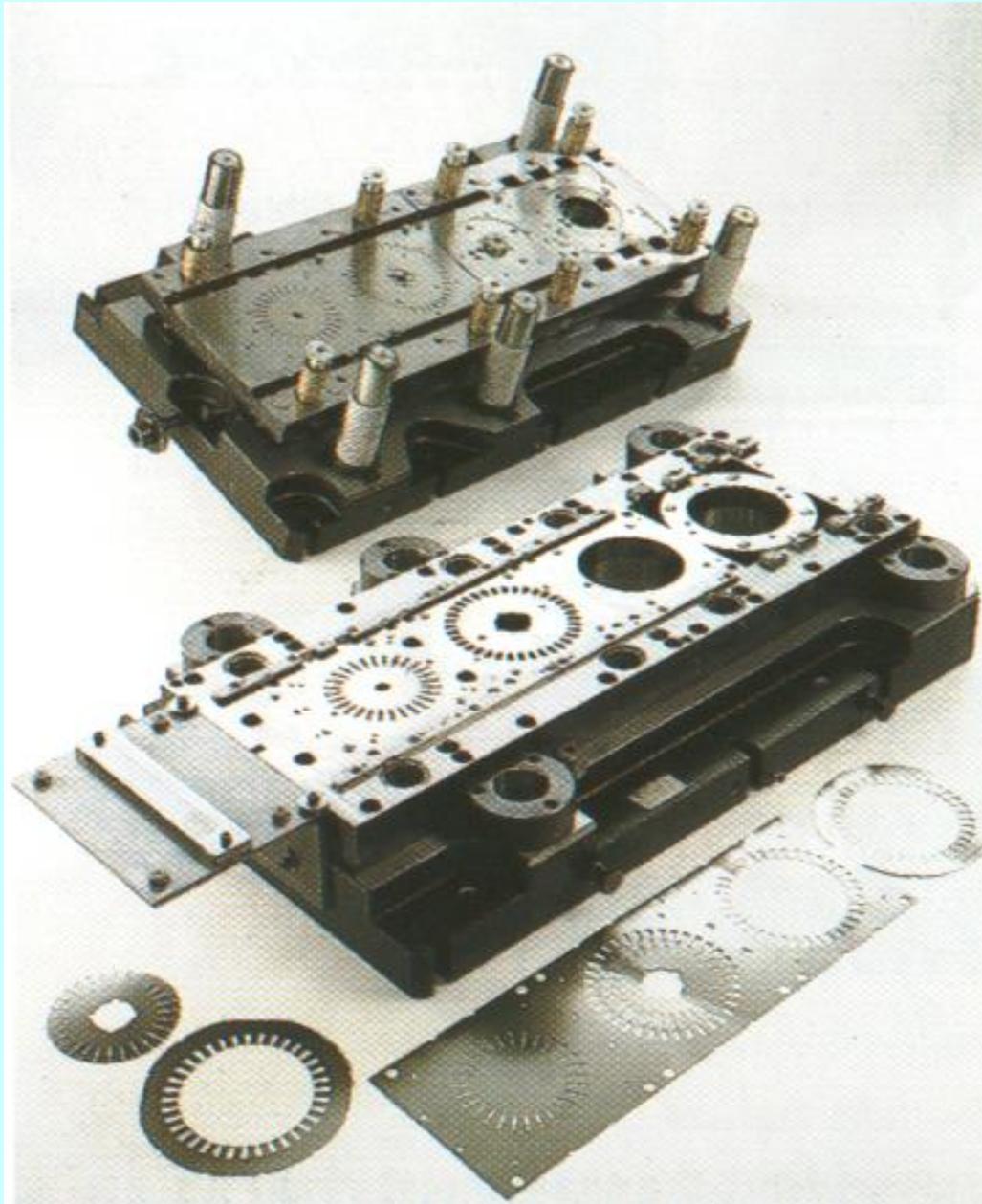
# ESQUEMA DE TIRA OBTIDA EM ESTAMPO PROGRESSIVO



# TIRA OBTIDA EM ESTAMPO PROGRESSIVO



# ESTAMPO PROGRESSIVO



# PRENSA TRANSFER PARA ESTAMPAGEM



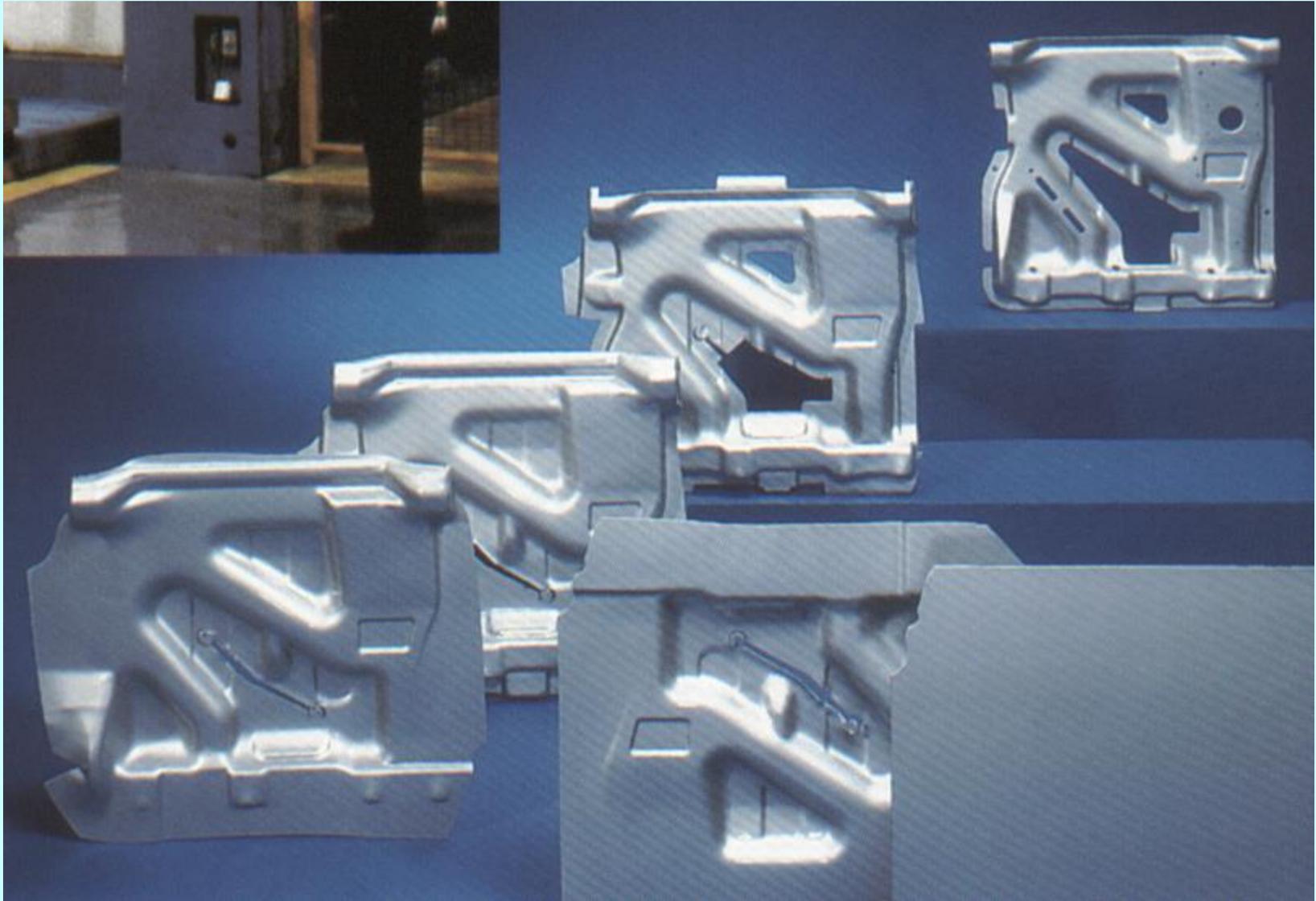
# MATRIZ DE ESTAMPAGEM

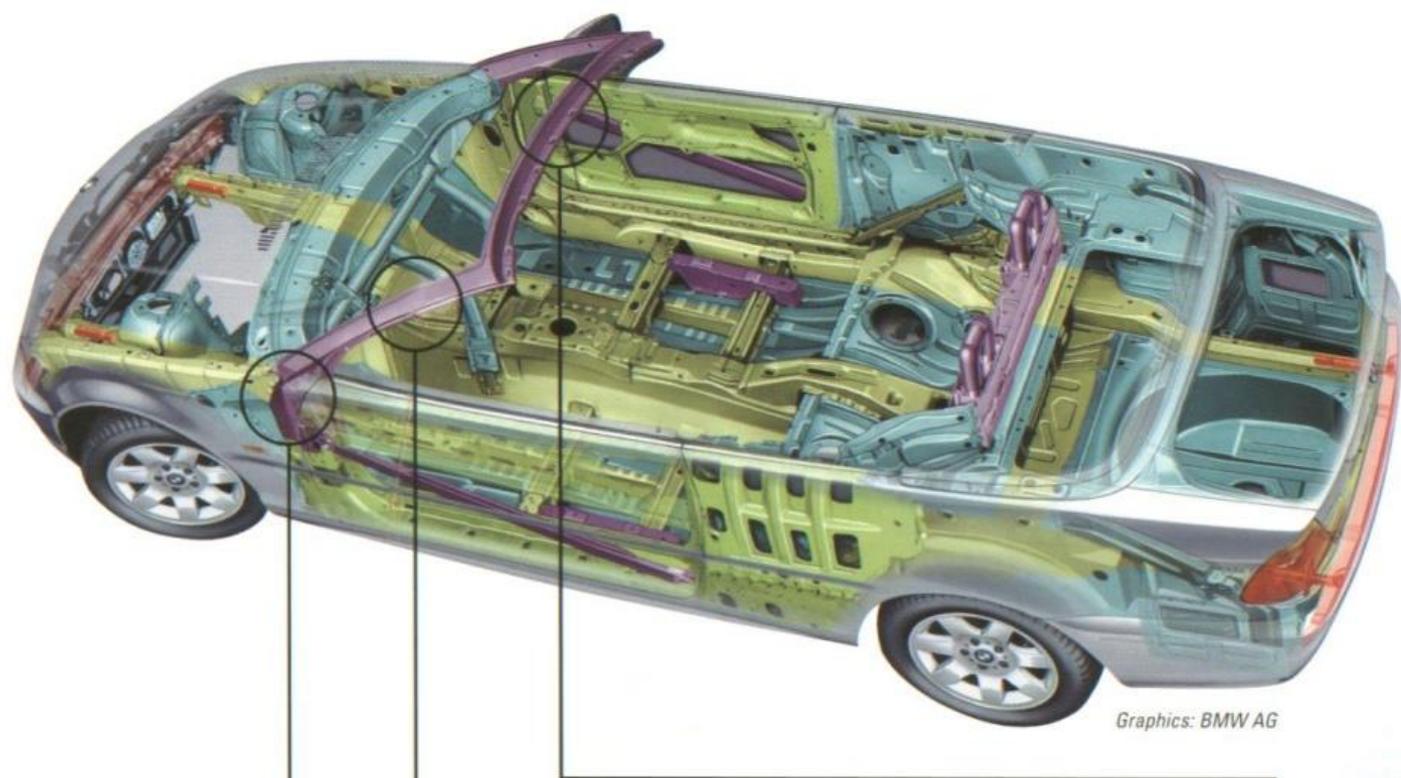


# MATRIZ DE ESTAMPAGEM



# SEQÜÊNCIA DE CHAPAS ESTAMPADAS





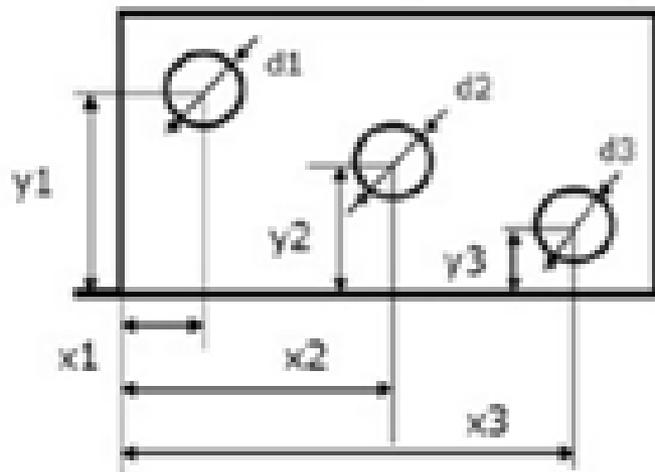
Graphics: BMW AG





# Distribuição das forças na estampagem

Para evitar problemas diversos, como rebarbas excessivas, desgastes severos da ferramenta, vibrações e desbalanceamentos, é preciso distribuir as forças segundo um baricentro.



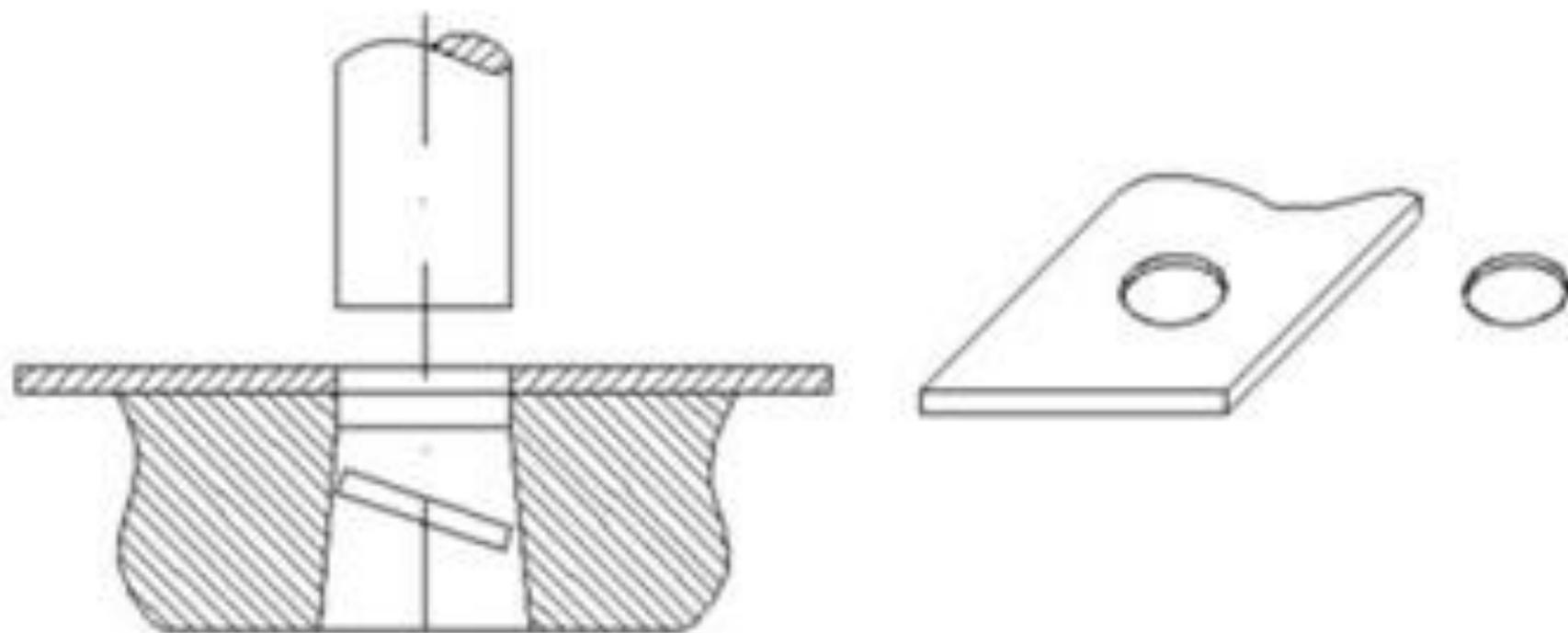
$$xG = \frac{P_1x_1 + P_2x_2 + P_3x_3}{P_1 + P_2 + P_3}$$

$$yG = \frac{P_1y_1 + P_2y_2 + P_3y_3}{P_1 + P_2 + P_3}$$

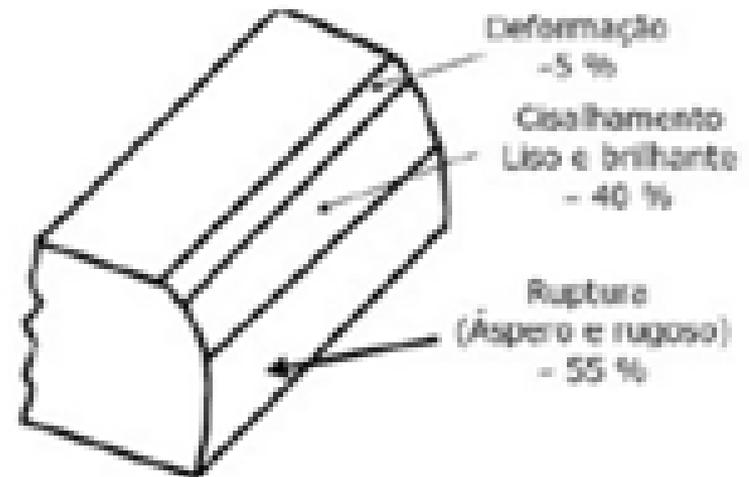
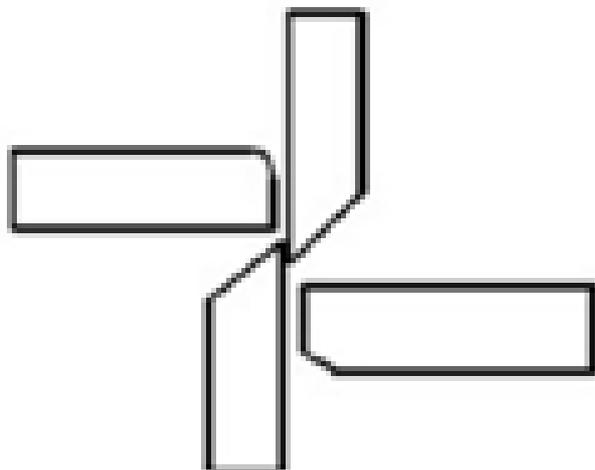
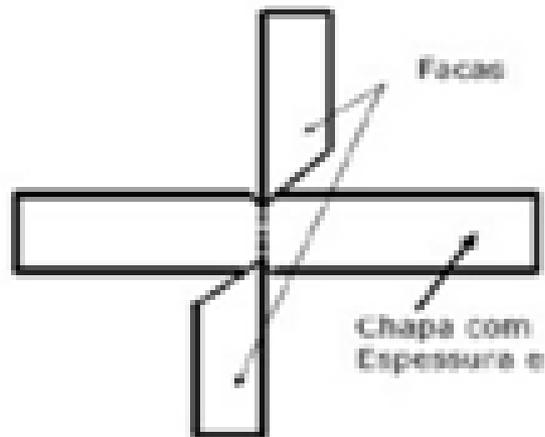
$P$  = força de estampagem

# Operações de Corte

**Puncionamento** – É a obtenção de figuras geométricas por meio de punção e matriz através de impacto.



# Operações de Corte



# Força de corte

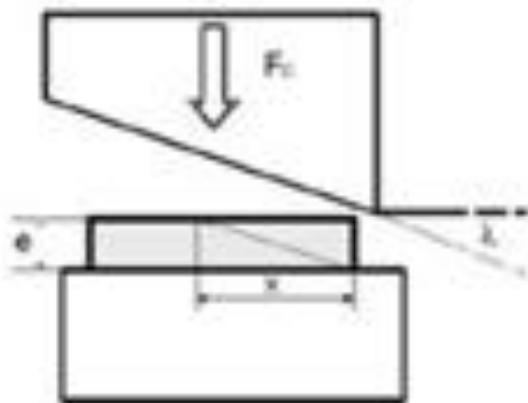
$$F_c = \tau_{rup} \cdot A_c$$

$F_c$  = Força de corte

$\tau_{rup}$  = Tensão de ruptura por cisalhamento

$A_c$  = a área de corte

# Força de Corte Tesoura Guilhotina



$$\frac{e}{x} = \operatorname{tg} \lambda \quad (1)$$

$$A_c = \frac{e \cdot x}{2} \quad (2)$$

$$F_c = A_c \cdot \tau_{cis}$$

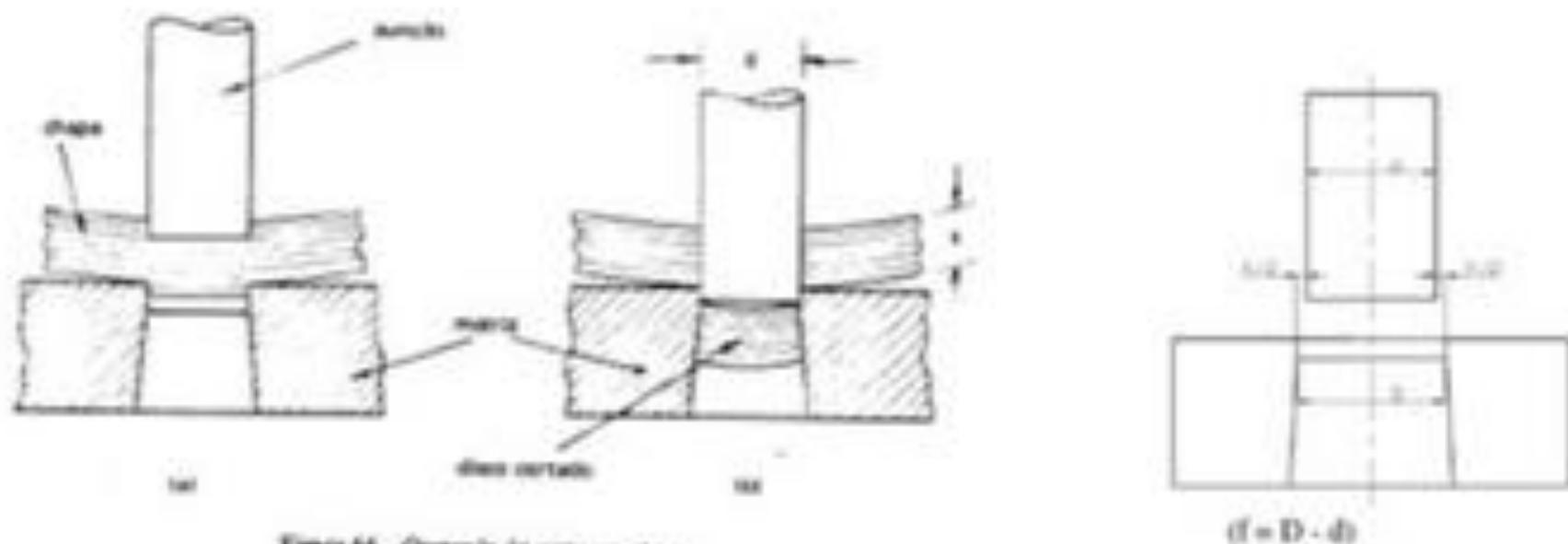
$$A_c = \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \frac{e^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \lambda} \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} F_c = \frac{e^2 \cdot \tau_{cis}}{2 \cdot \operatorname{tg} \lambda} \quad (4)$$

$e$  = espessura da chapa

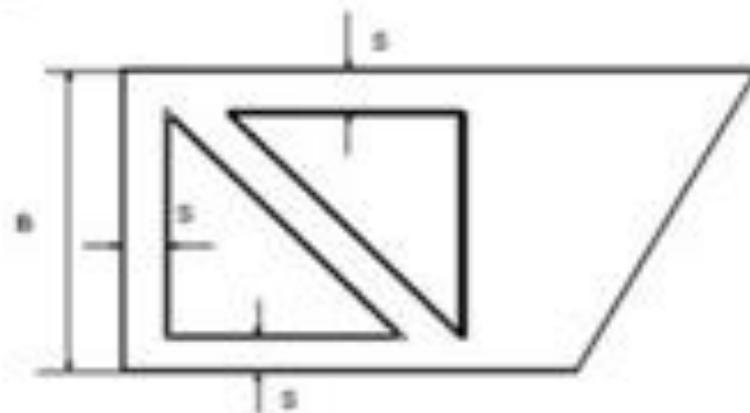
# Puncionamento

- Operação realizada com o estampo (punção-matriz)



## Layout de corte

- No puncionamento é necessário haver um espaçamento ( $s$ ) entre as arestas de corte.

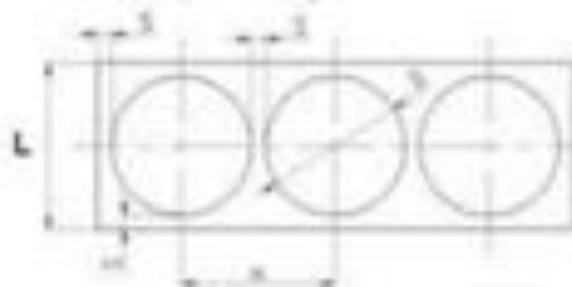


$S = 0,4e + 0,8 \text{ mm}$
$S = 2 - 2e$
$S = 1,5 (0,4e + 0,8 \text{ mm})$
$S = 1,5 (2 - 2e)$

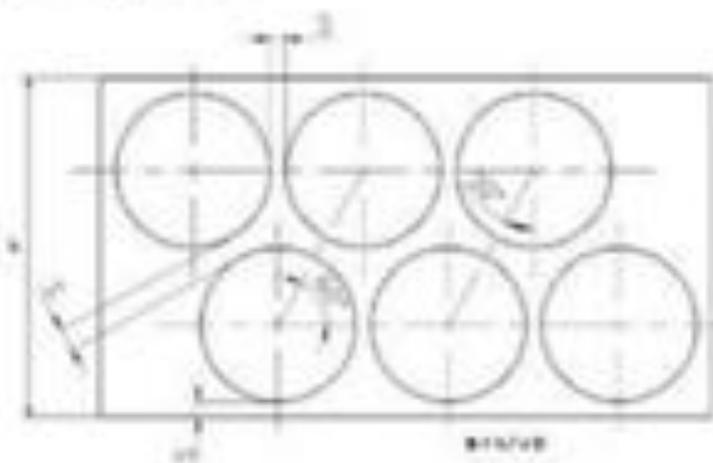
$B \leq 70\text{mm} ; e \geq 0,5$
$B \leq 70\text{mm} ; e < 0,5$
$B \geq 70\text{mm} ; e \geq 0,5$
$B \geq 70\text{mm} ; e < 0,5$

# Exemplos de layout

- Estampos simples, com um punção



- Estampos com dois punções

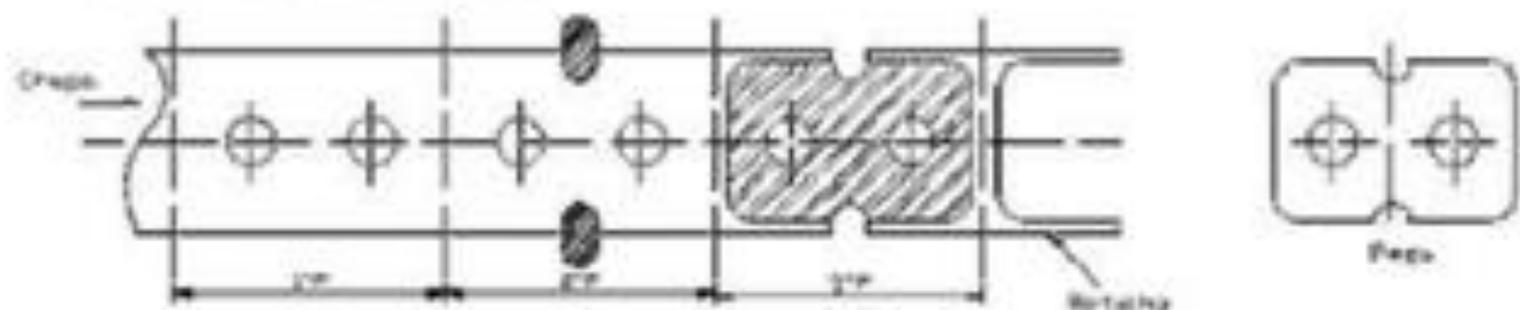


# Layout de Chapas

- O estudo do layout visa obter o máximo aproveitamento (rendimento) da chapa.
- O layout depende de:
  - Limites das prensas (carga e dimensões);
  - Volume de produção;
  - Sentido da laminação (em alguns casos);
  - Características dos materiais (espaçamentos).
- $\eta = \frac{\text{área das peças}}{\text{área da tira}}$  = rendimento da tira.
- $\eta = \frac{\text{área das peças}}{\text{área da chapa}}$  = rendimento da chapa (ou bobina).

# Estampos Progressivos

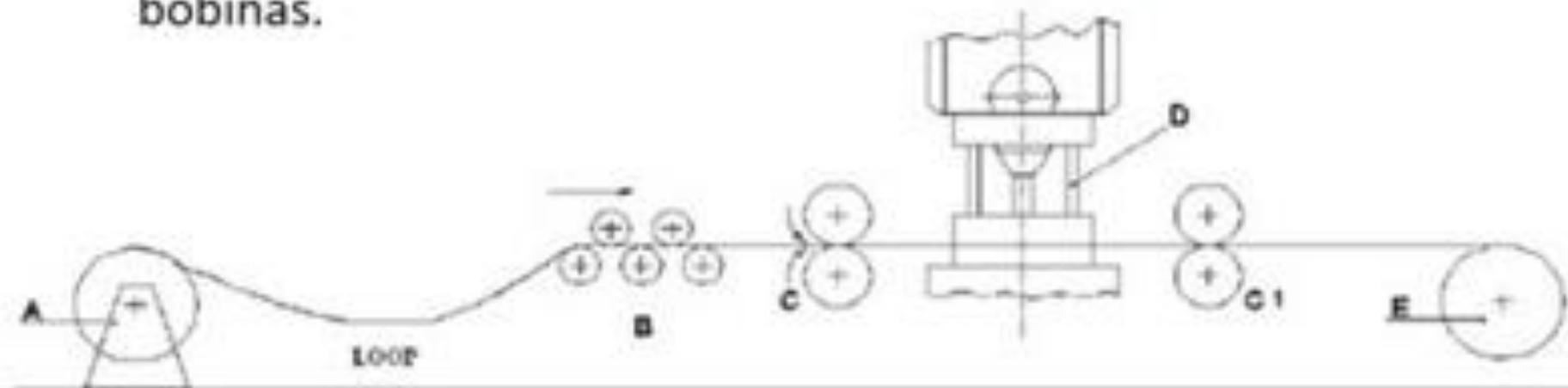
- No estampo progressivo anterior:
  - 1º passo – corte do retalho lateral e marcação do passo, corte do furo interno
  - 2º passo – corte do rasgo para completar a forma do furo interno.
  - 3º passo – passo morto.
  - 4º passo – separação das peças.
  
- Outro exemplo



- 1º Passo – corte dos furos internos
- 2º Passo – execução do recorte externo
- 3º Passo – corte do contorno e separação do retalho

# Grandes Produções

- Estampos com alimentadores automáticos e tiras na forma de bobinas.



Esquema de um processo utilizado em alta produção

A – bobina de material enrolado

B – endireitadora de chapa

C – alimentador automático (empurrando a fita)

C1 – Alimentador automático após a ferramenta (puxando a fita)

D – estampo

E – bobina de retalho



**Prensa Excêntrica.**  
Acionamento mecânico por rotação de eixos excêntricos.  
Golpes rápidos por impacto (tipo martelamento)  
Limitadas às características da ferramenta e sistemas de alimentação.

## Prensa hidráulica

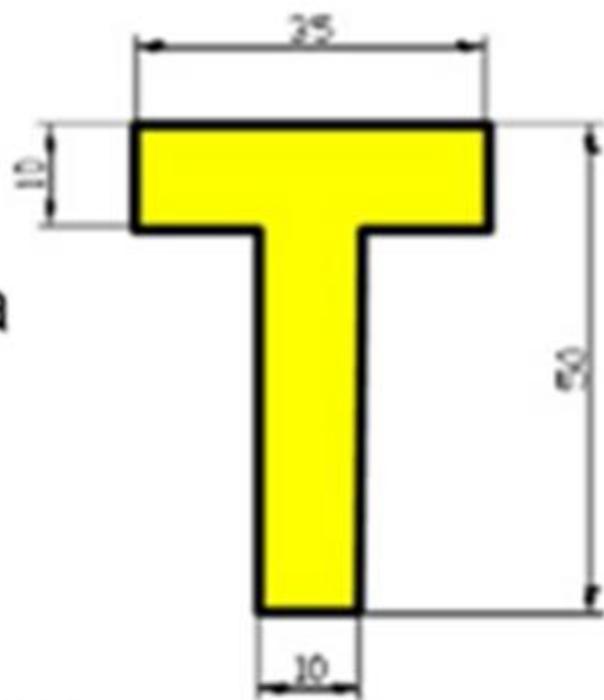


Acionada por pistão hidráulico.

Golpes em velocidade constante e controlada.

## Exercício

Dados o desenho da peça e demais informações abaixo, faça um layout de estampagem e calcule o rendimento da chapa.



### **(Layout otimizado)**

- Dimensões da chapa: 2000 x 1000 mm.
- Largura máxima da tira: 120 mm (limitação máq.).
- Espaçamento requerido entre peças e nas bordas da tira  $s = 2$  mm.

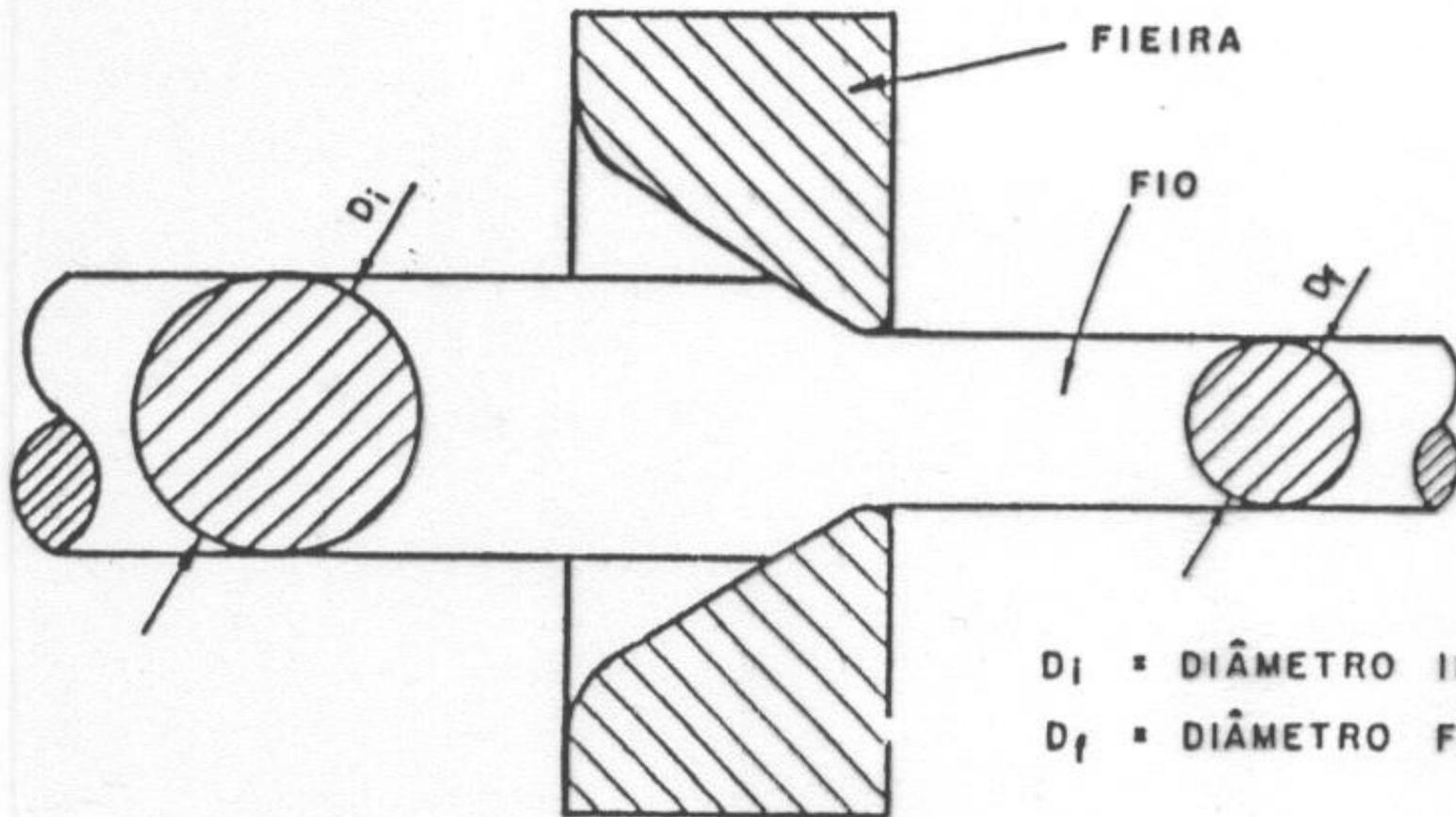
**PMR 3301**  
**COMPLEMENTOS DE**  
**FABRICAÇÃO MECÂNICA**

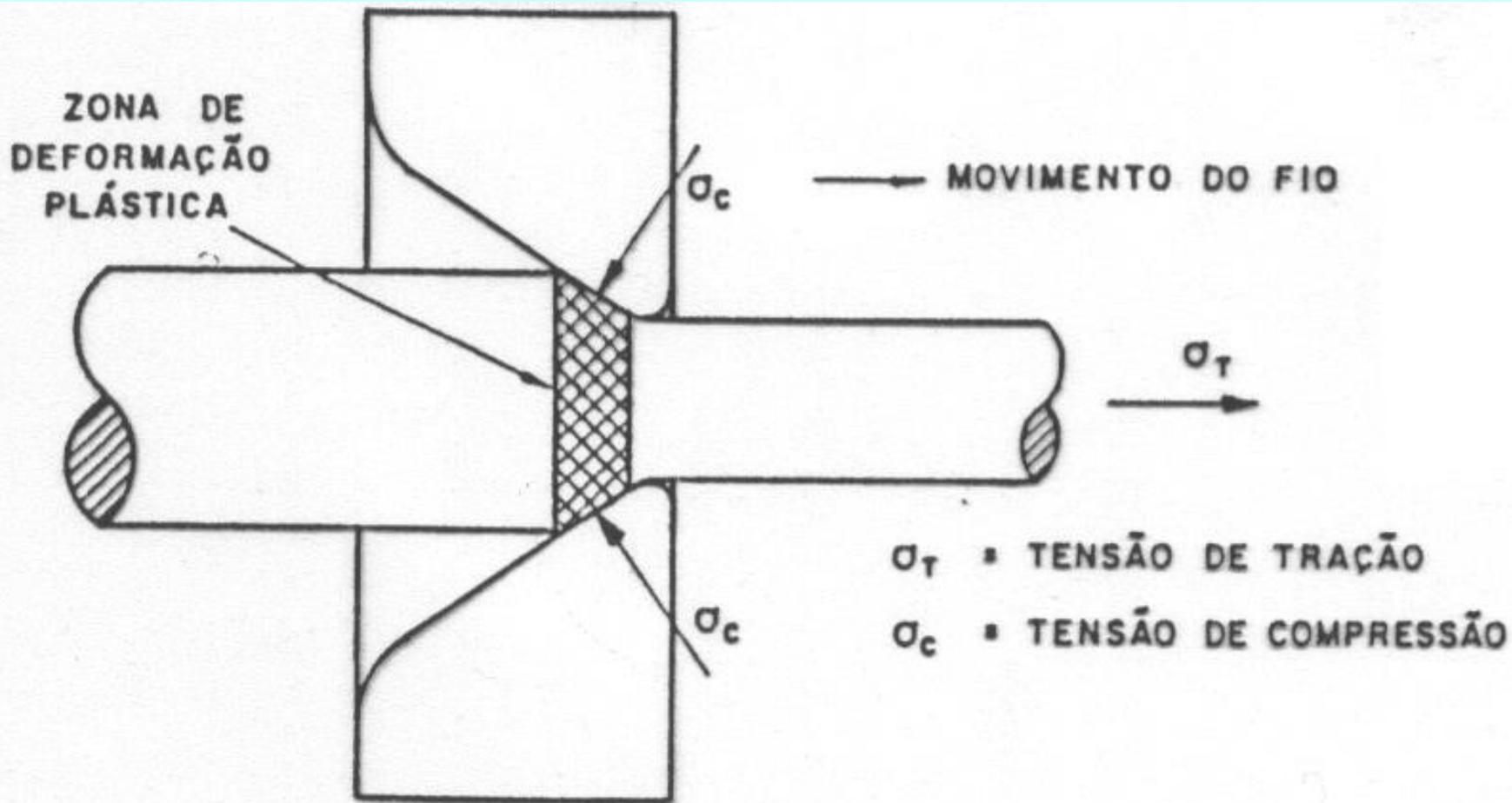
**Processos de Fabricação por**  
**Trefilação e Extrusão**

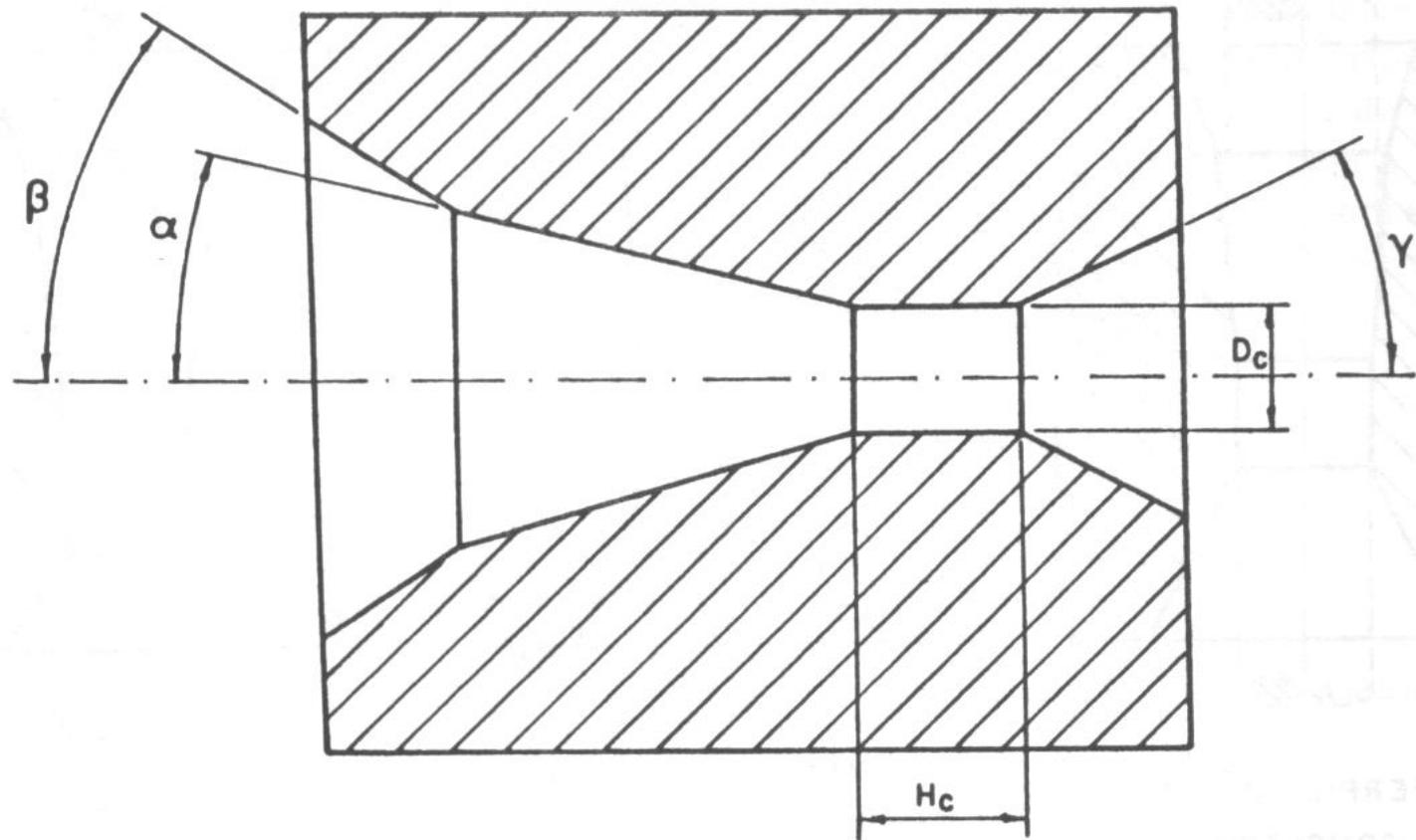
# TREFILAÇÃO

- 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***







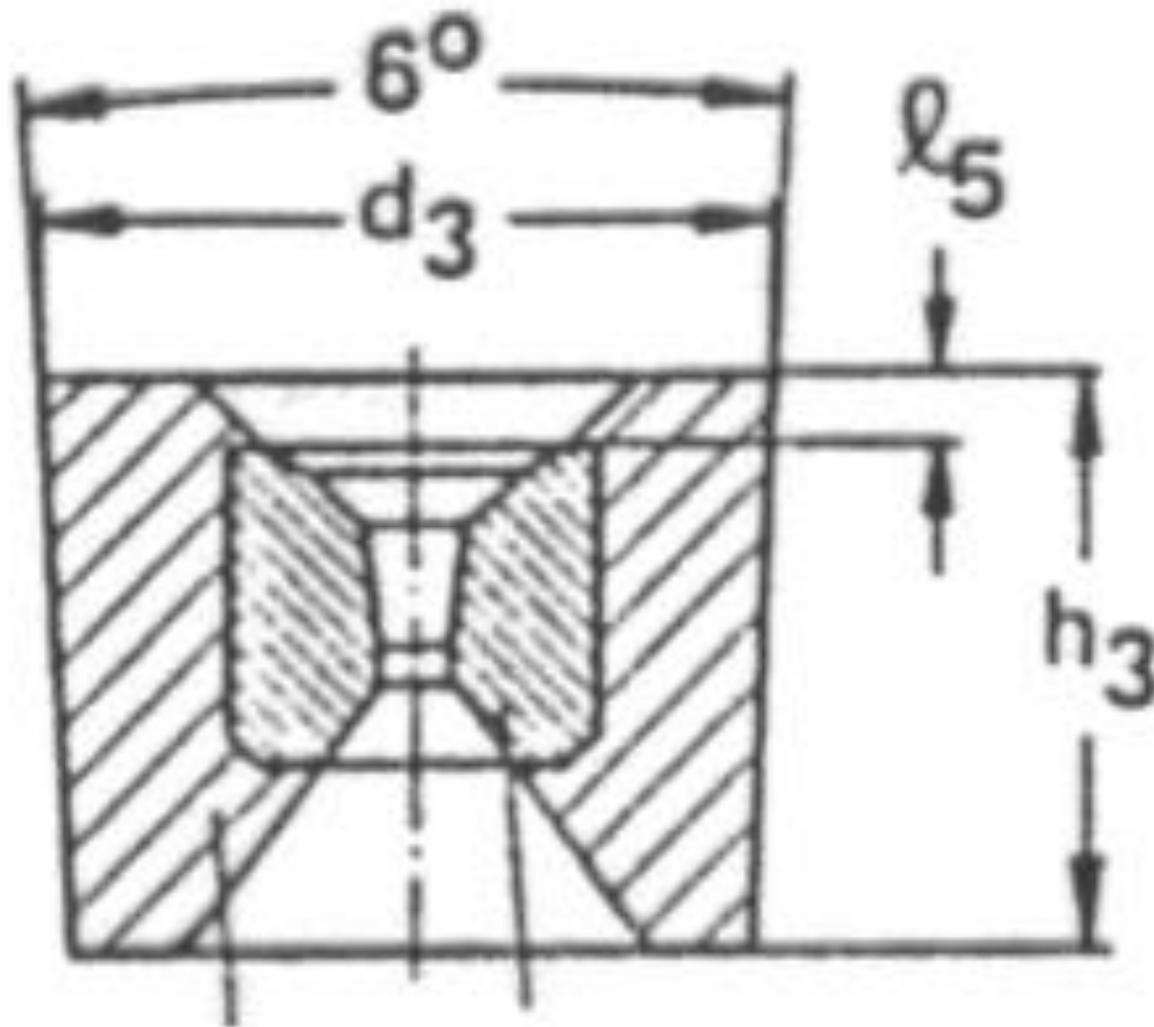
$\alpha$  - SEMI-ÂNGULO DO CONE DE TRABALHO  
( OU SEMI-ÂNGULO DA FIEIRA )

$\beta$  - SEMI-ÂNGULO DE ENTRADA

$\gamma$  - SEMI-ÂNGULO DE SAÍDA

$H_c$  - ALTURA DO CILINDRO DE CALIBRAÇÃO

$D_c$  - DIÂMETRO DO CILINDRO DE CALIBRAÇÃO

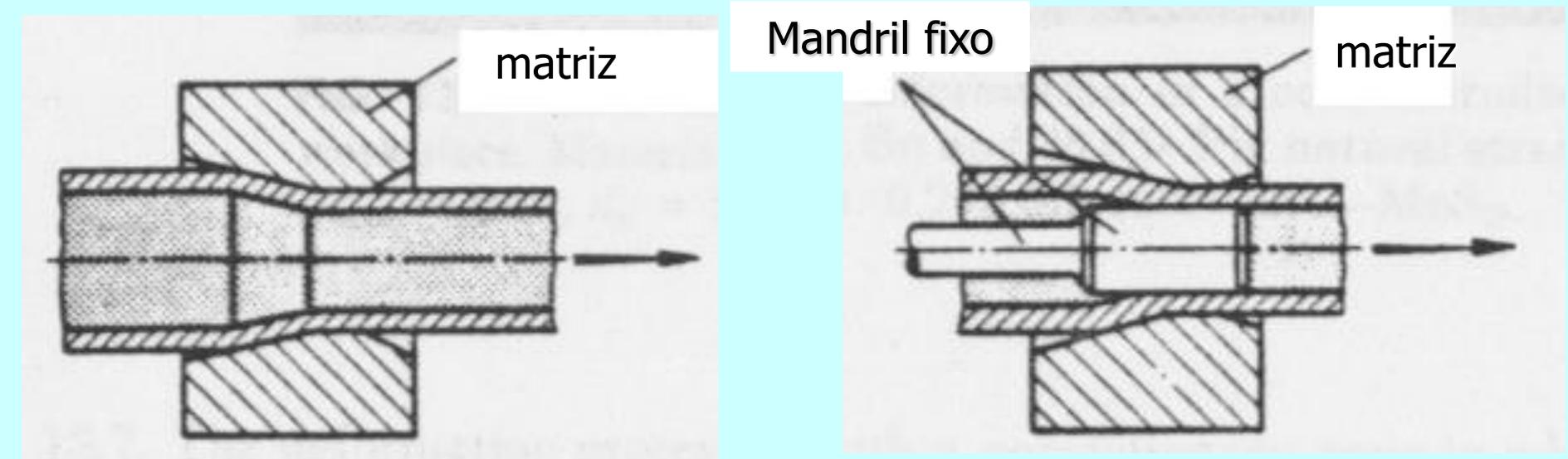
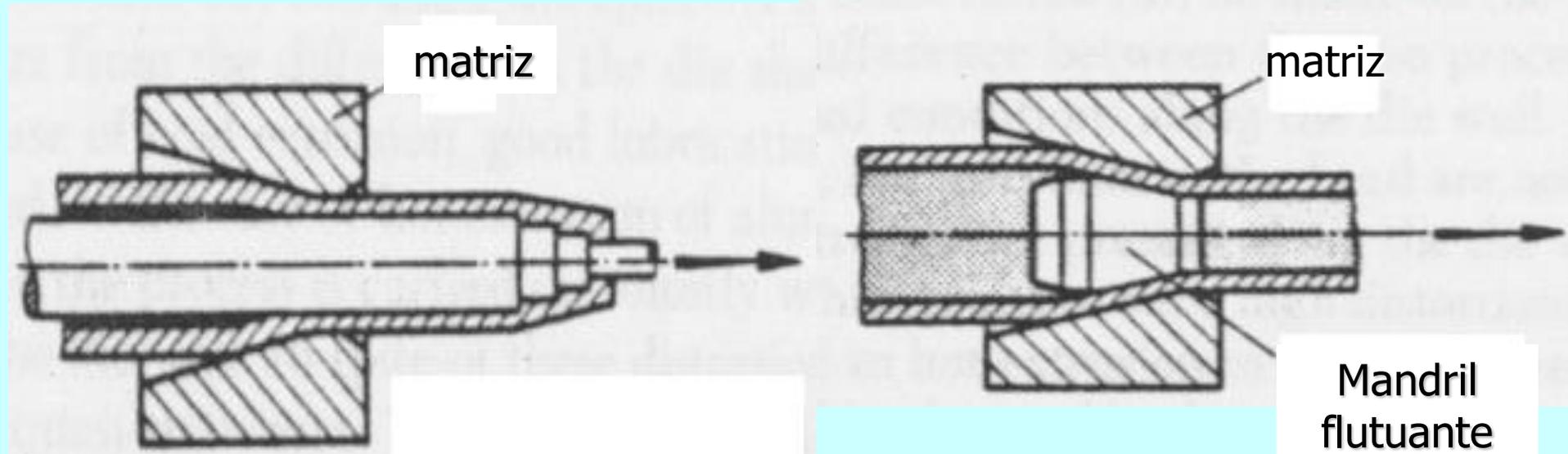


A fieira apresenta superfície externa cônica para melhor fixação e centralização

# 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

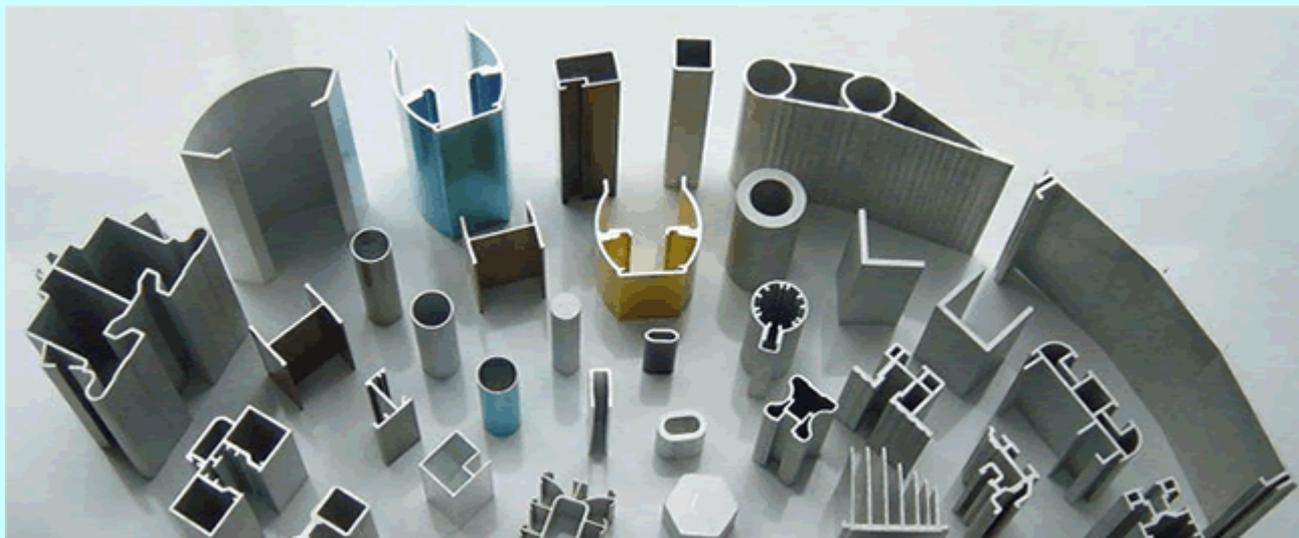
# Exemplos de perfis obtidos por trefilação

direitos autorais das imagens:  
[www.multiart.ind.br](http://www.multiart.ind.br)

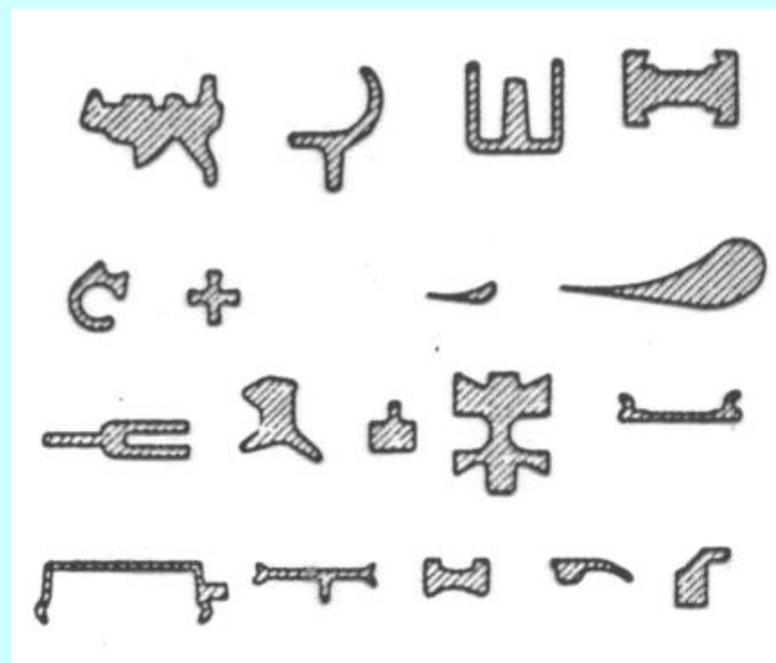
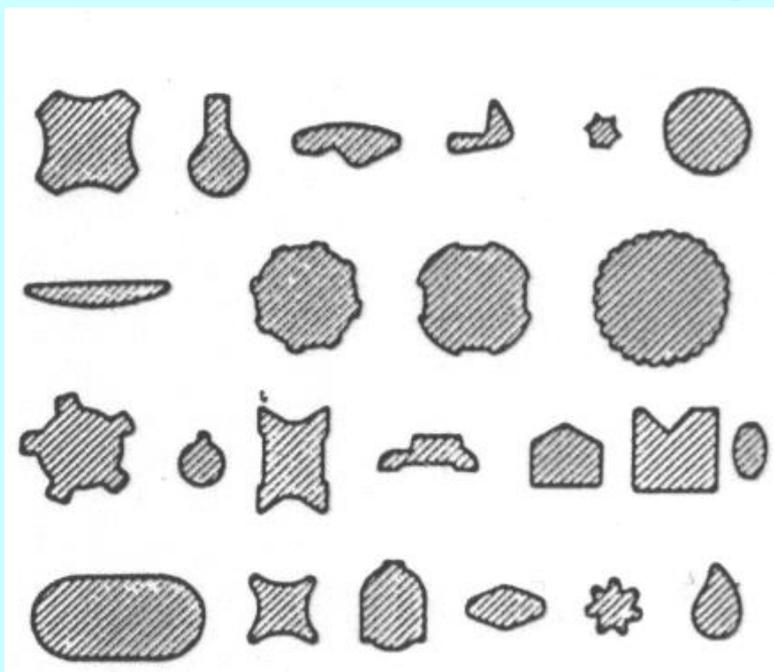


direitos autorais das imagens:  
[www.sidertubos.com.br](http://www.sidertubos.com.br)

# Exemplos de perfis obtidos por trefilação



Direitos autorais das imagens: [www.aluminovo.com.br](http://www.aluminovo.com.br)



# TREFILAÇÃO

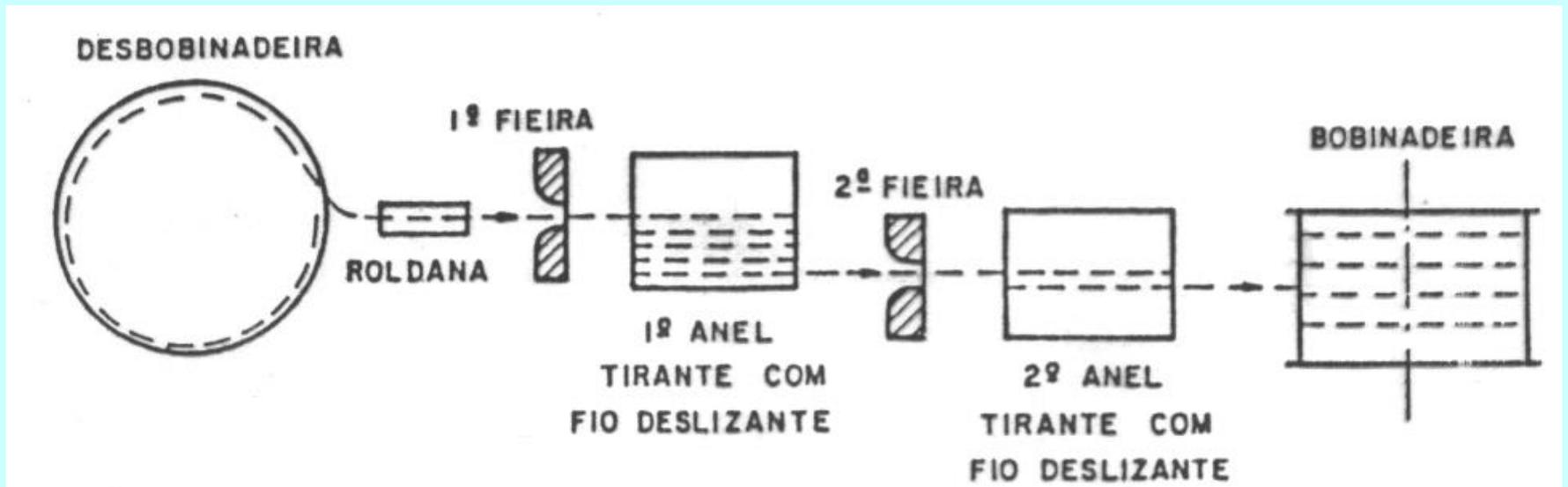
## MECÂNICA DA TREFILAÇÃO

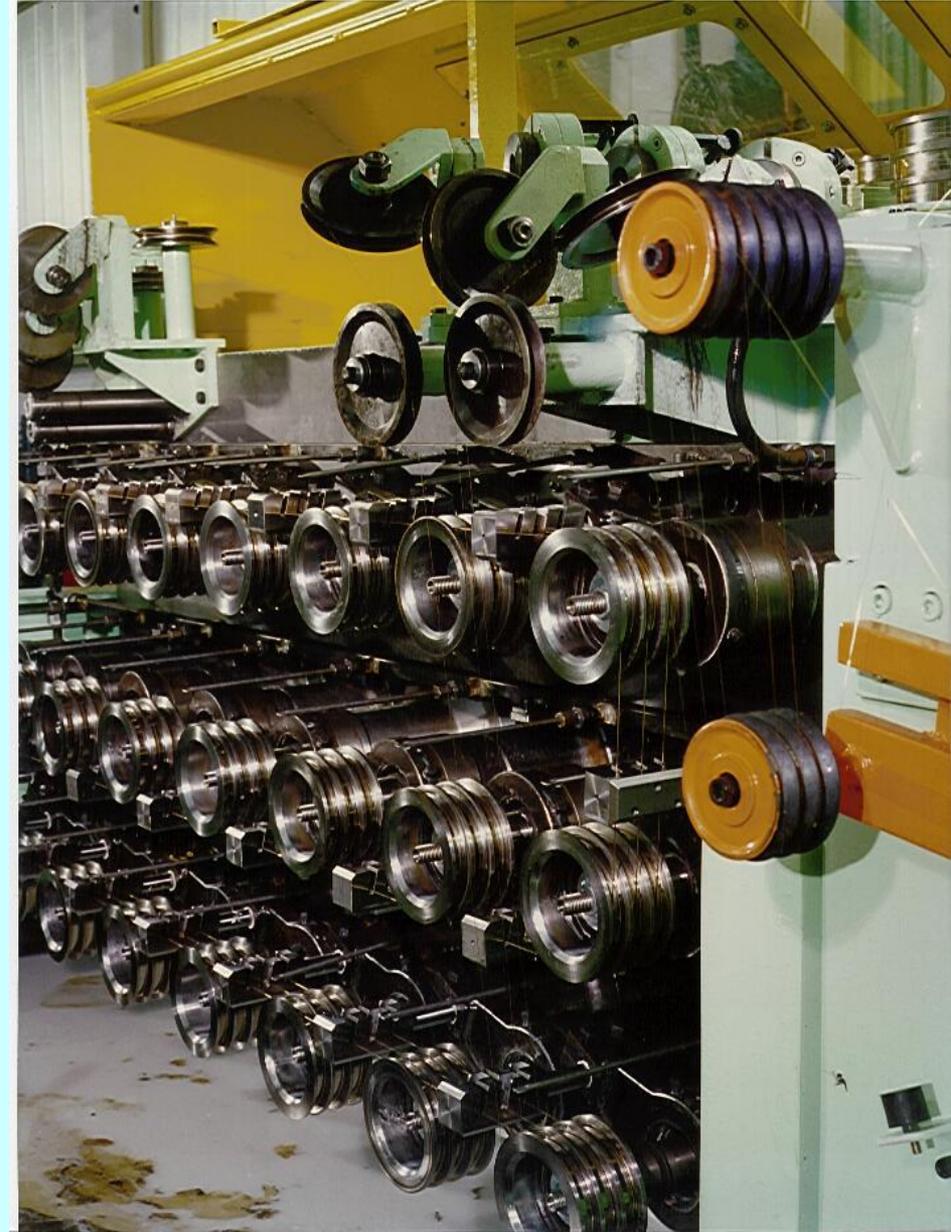
- Geometria da ferramenta
    - *Cone de entrada*
    - *Cone de trabalho* → *Região de deformação*
    - *Região de calibração*
    - *Cone de saída*
  - Materiais para ferramentas:
    - *Diamante: para fios com diâmetros menores que 2 mm*
    - *Metal duro: para fios maiores que 2 mm*
- Núcleos encarcaçados em suportes de aço*



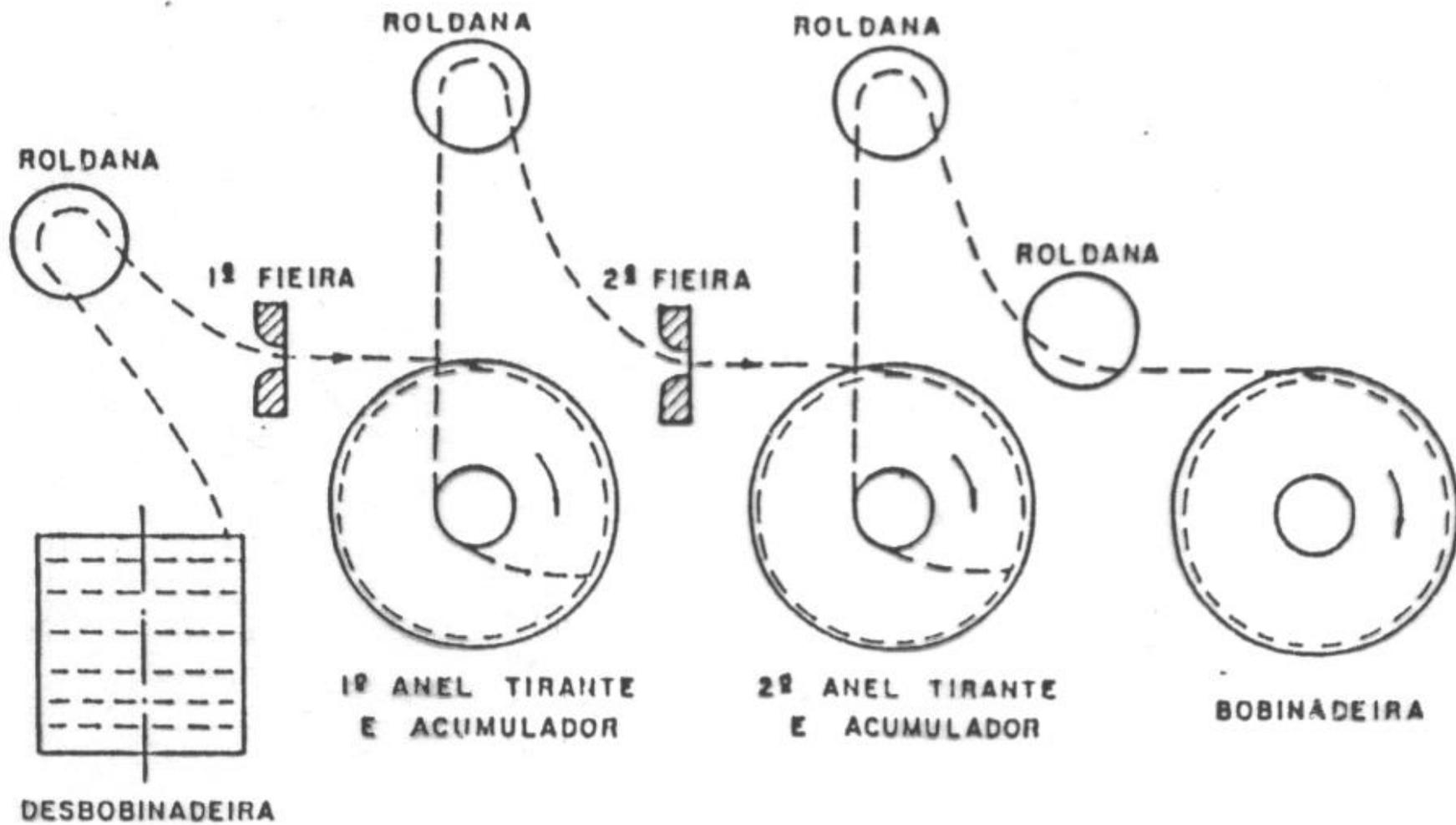
# TREFILAÇÃO

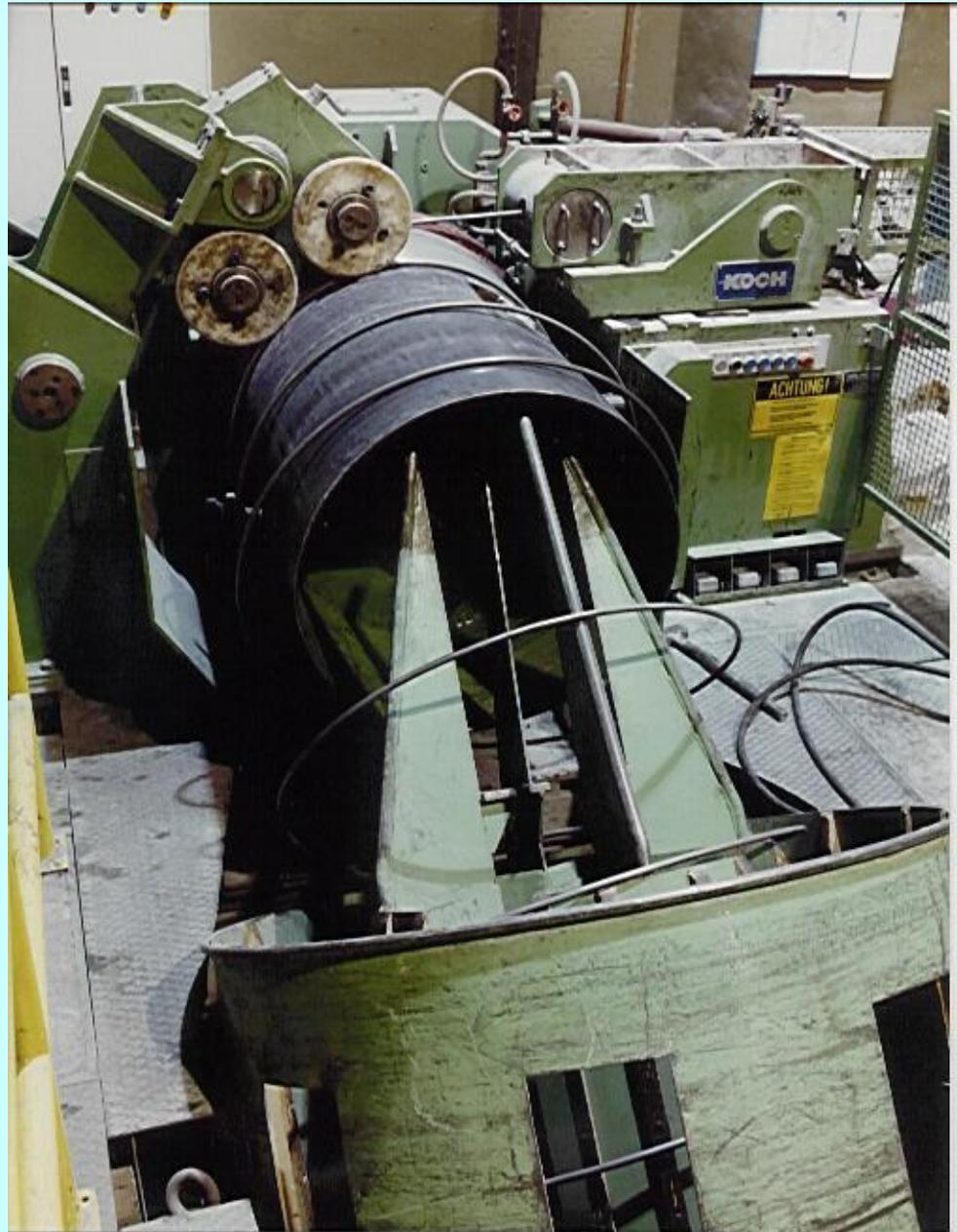
## MÁQUINAS DE TREFILAR













Aeroel

# MEDIDOR DE DIÂMETRO LASER PARA TREFILAS - WIRELINEXY

## DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Wireline.XY é um sistema de medição a Laser especialmente projetado para monitorar o diâmetro e a ovalidade de fios de aço e cobre, especialmente desenvolvido pensando nas dificuldades da medição de diâmetro em linha em processos de trefilação (controle do diâmetro em trefilas secas e trefilas finas).

O sistema foi projetado para trabalhar na indústria de fios, verificando o diâmetro durante a trefilação, com alta precisão e confiabilidade, pois **a medição não é afetada pela vibração e pela velocidade do fio.**



# 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)

## EXTRUSÃO A FRIO

- pequenas reduções de seção em vários estágios
- obtenção de peças de precisão

# 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

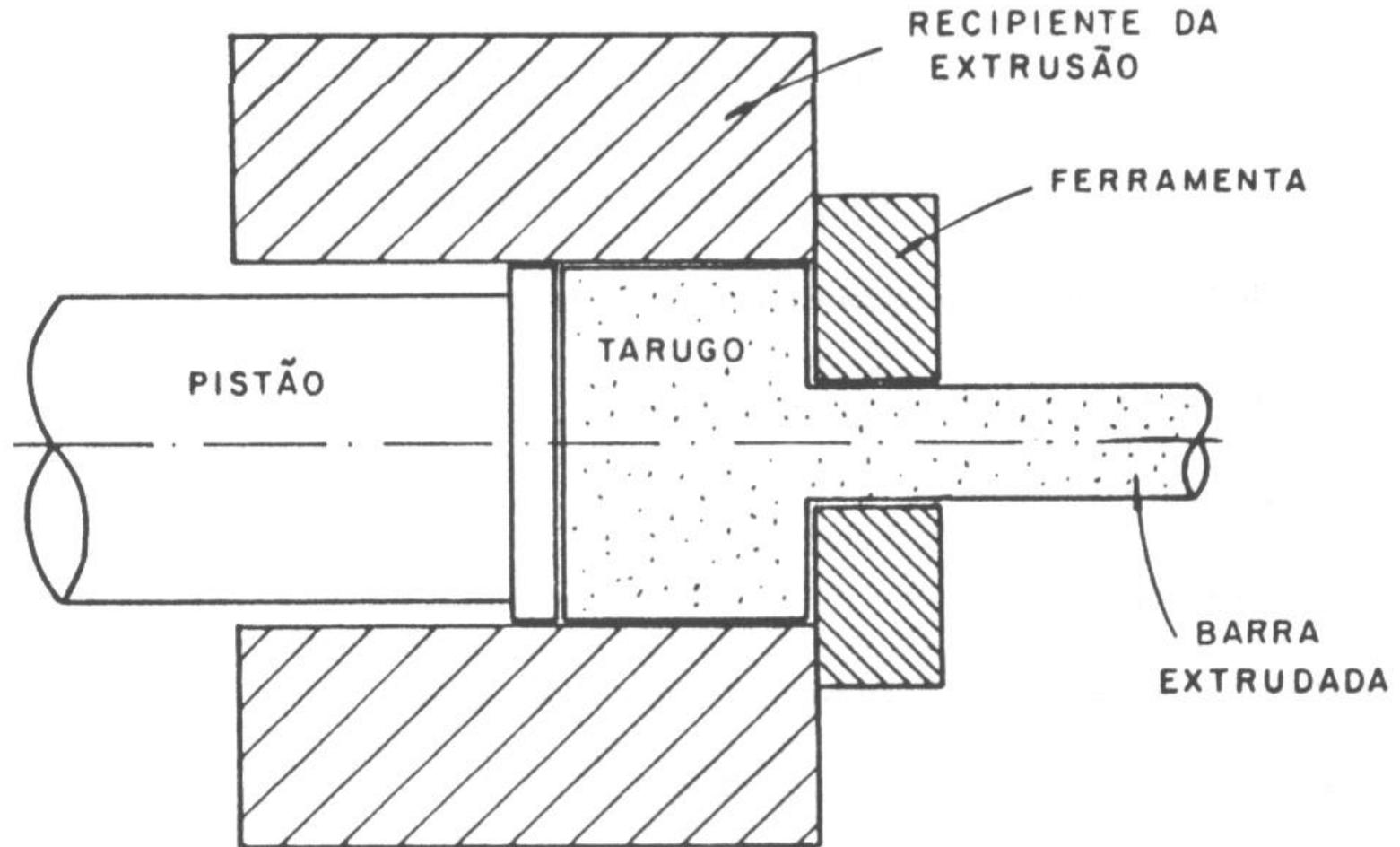
## **Equipamentos de extrusão:**

- prensas hidráulicas (horizontais para extrusão a quente e verticais para extrusão a frio) com capacidade de 1000 a 8000 T
- ação contínua, por acionamento hidro-pneumático ou oleodinâmico

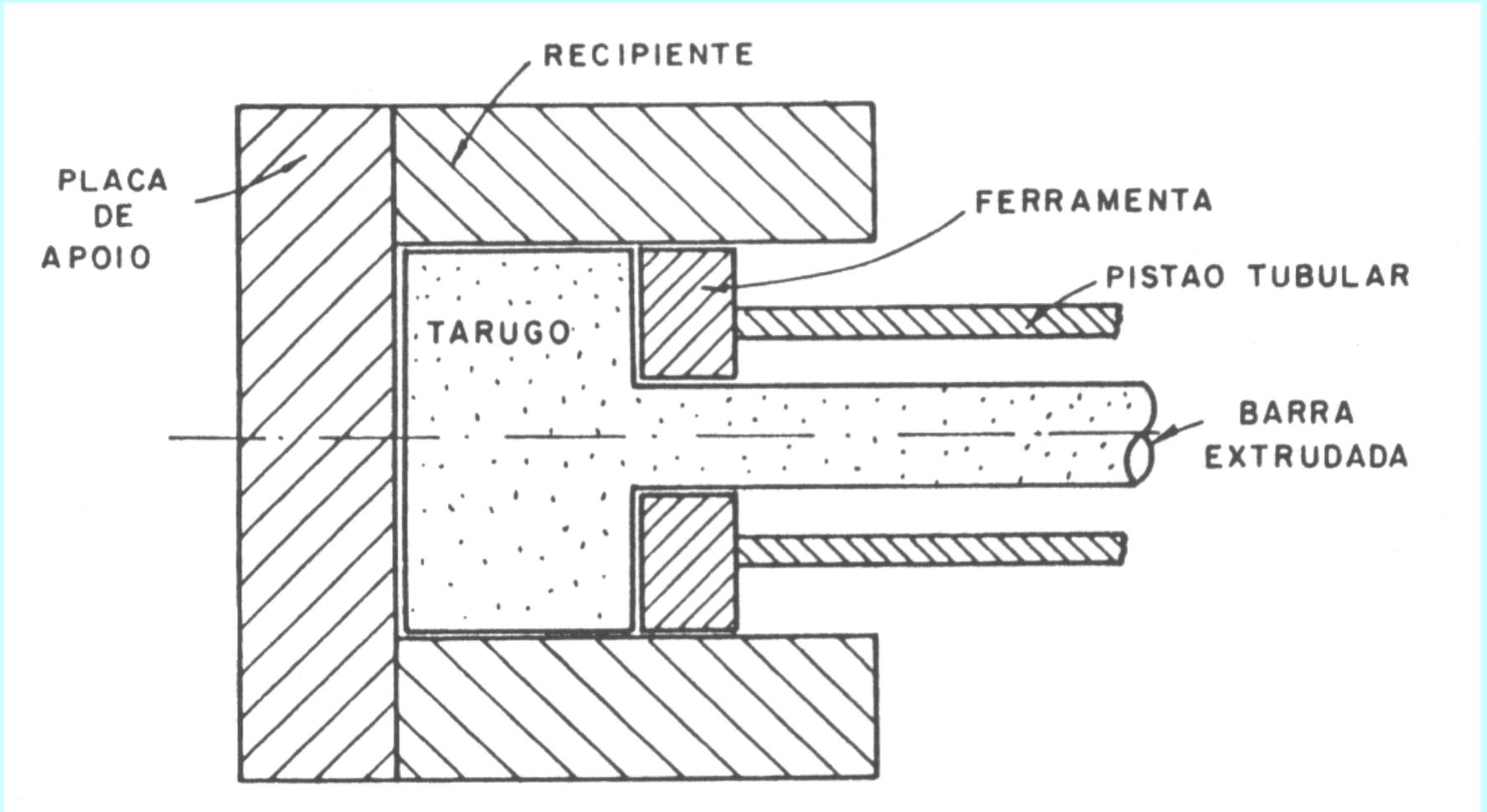
## **Equipamentos auxiliares:**

- sistemas de corte de barras
- sistemas de retrocesso do pistão
- fornos para aquecimento de tarugos (indutivos para maior rapidez e uniformidade de aquecimento)
- controle da atmosfera de aquecimento

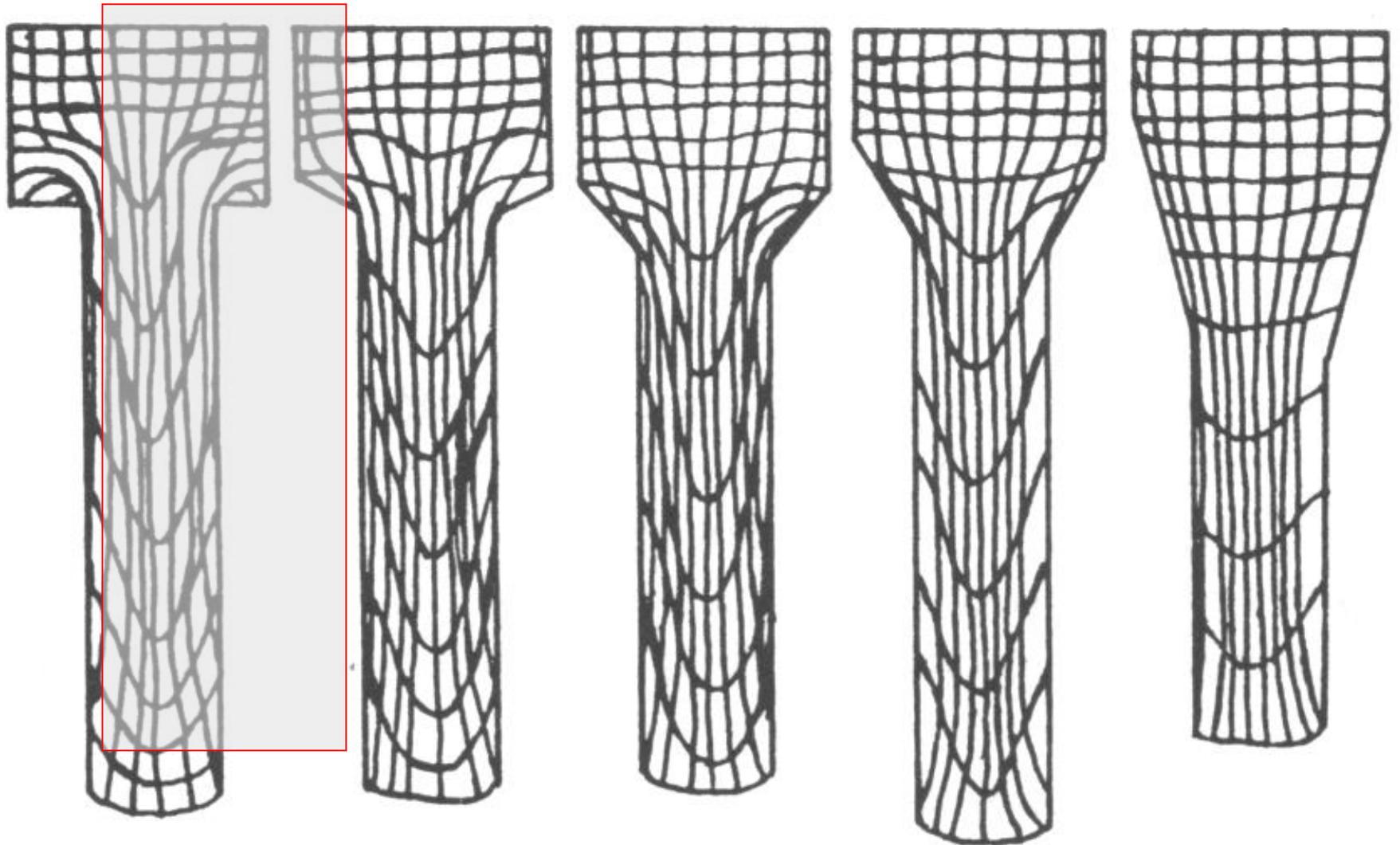
# EXTRUSÃO DIRETA



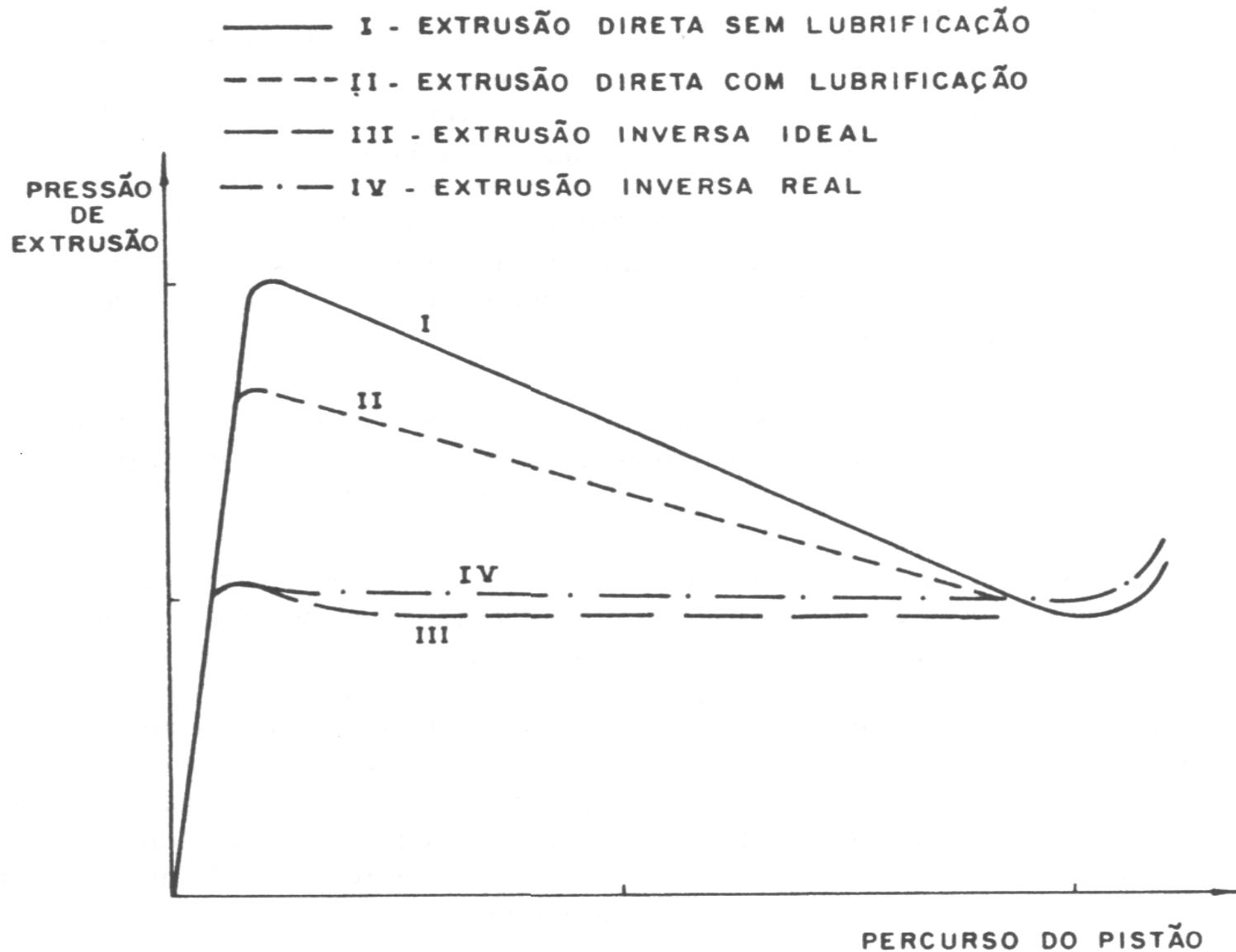
# EXTRUSÃO INVERSA



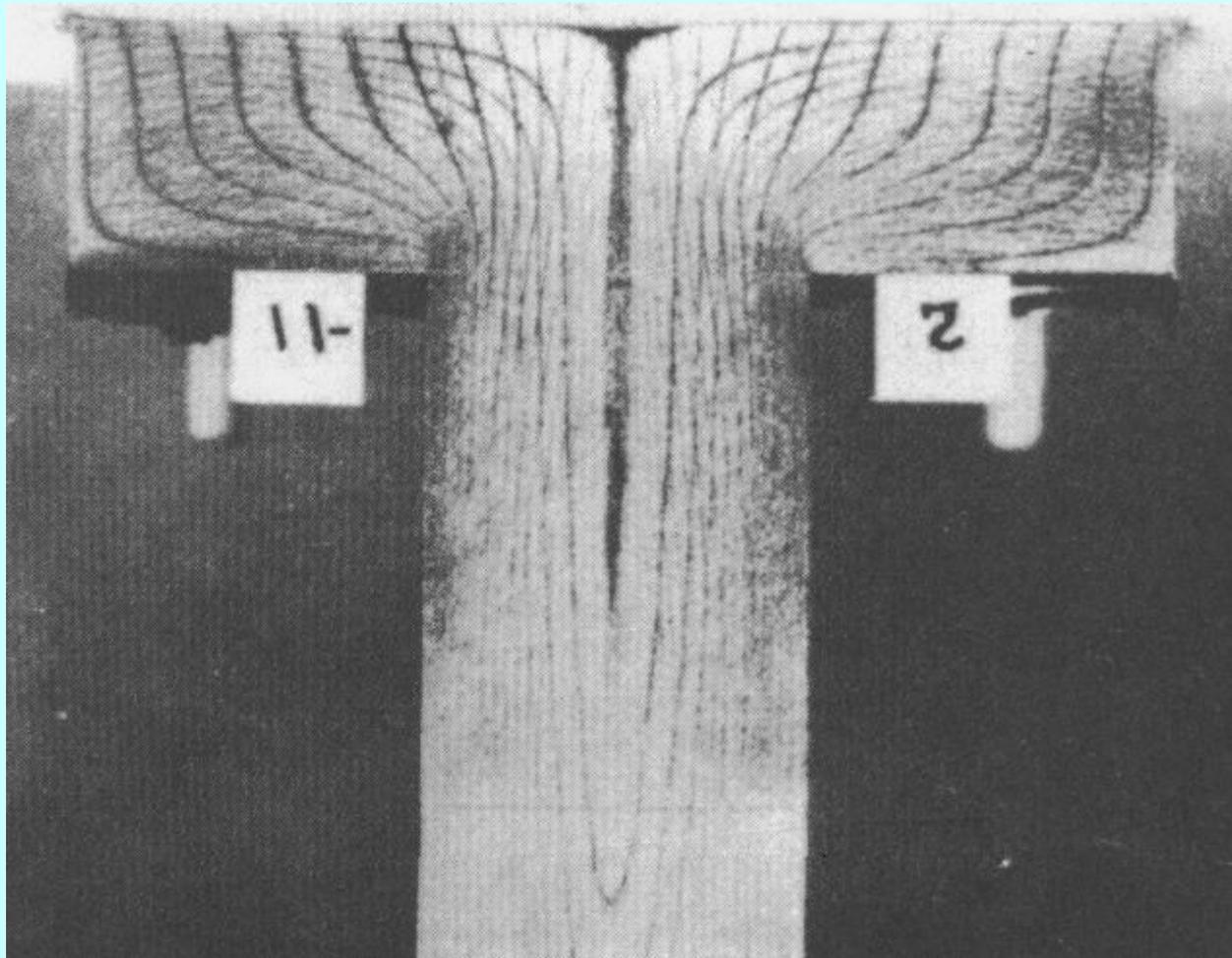
# Modos de Escoamento na Extrusão



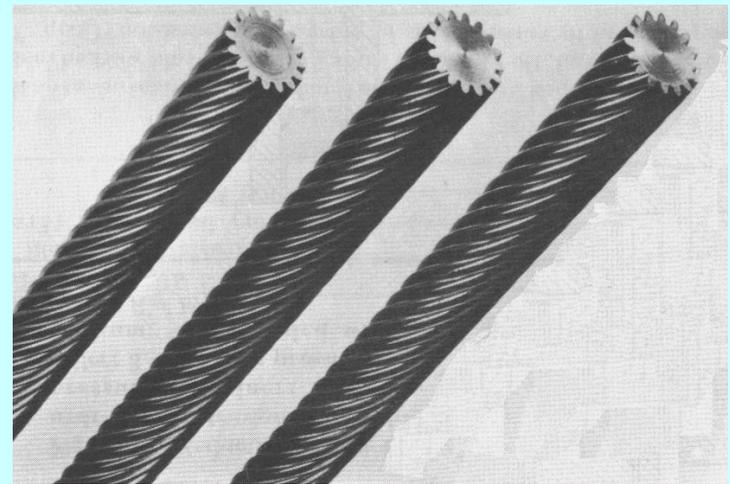
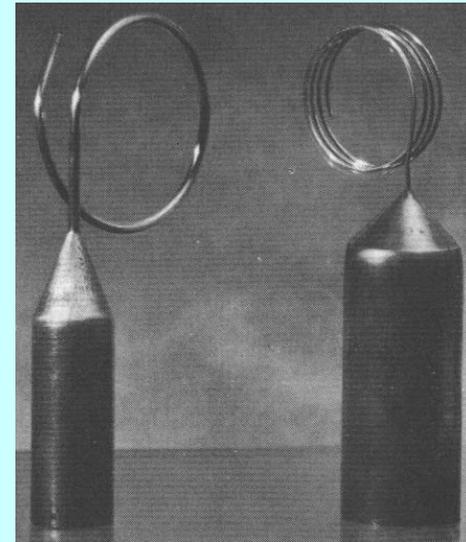
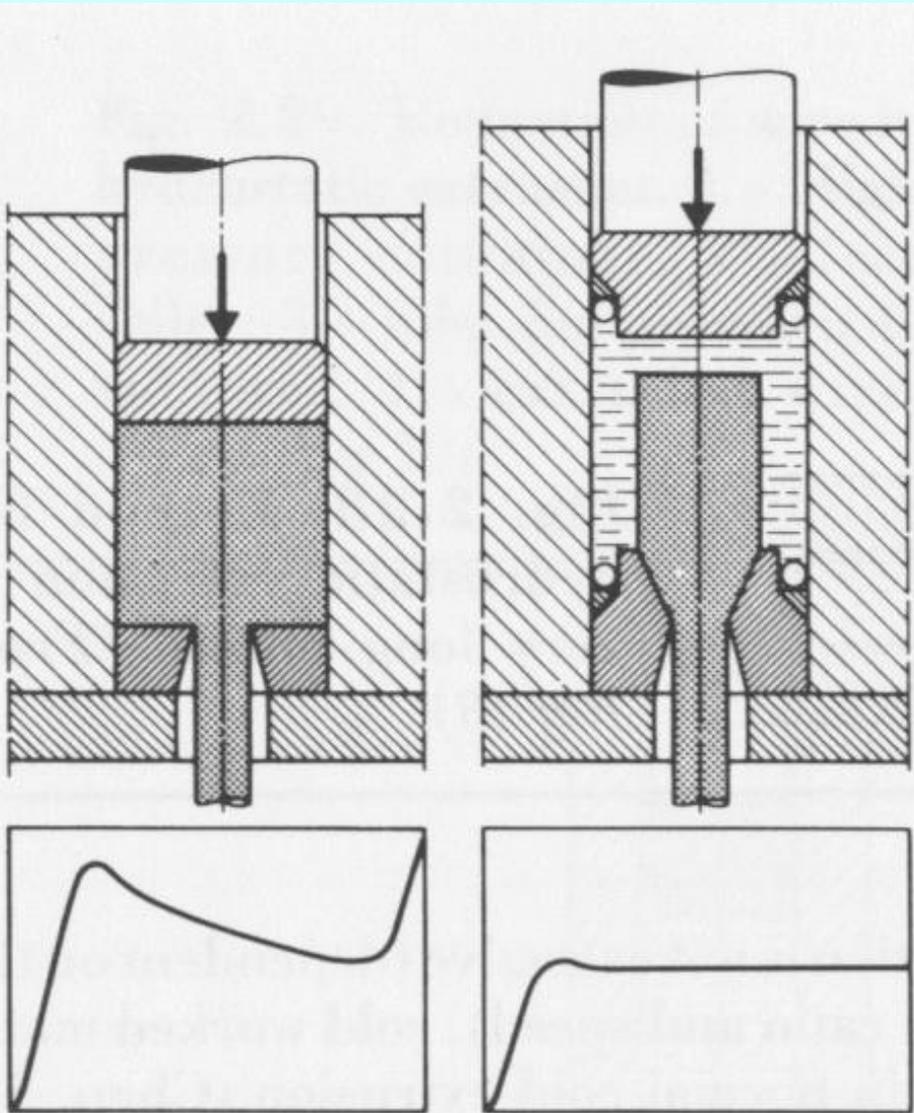
# Curvas de Pressão de Extrusão



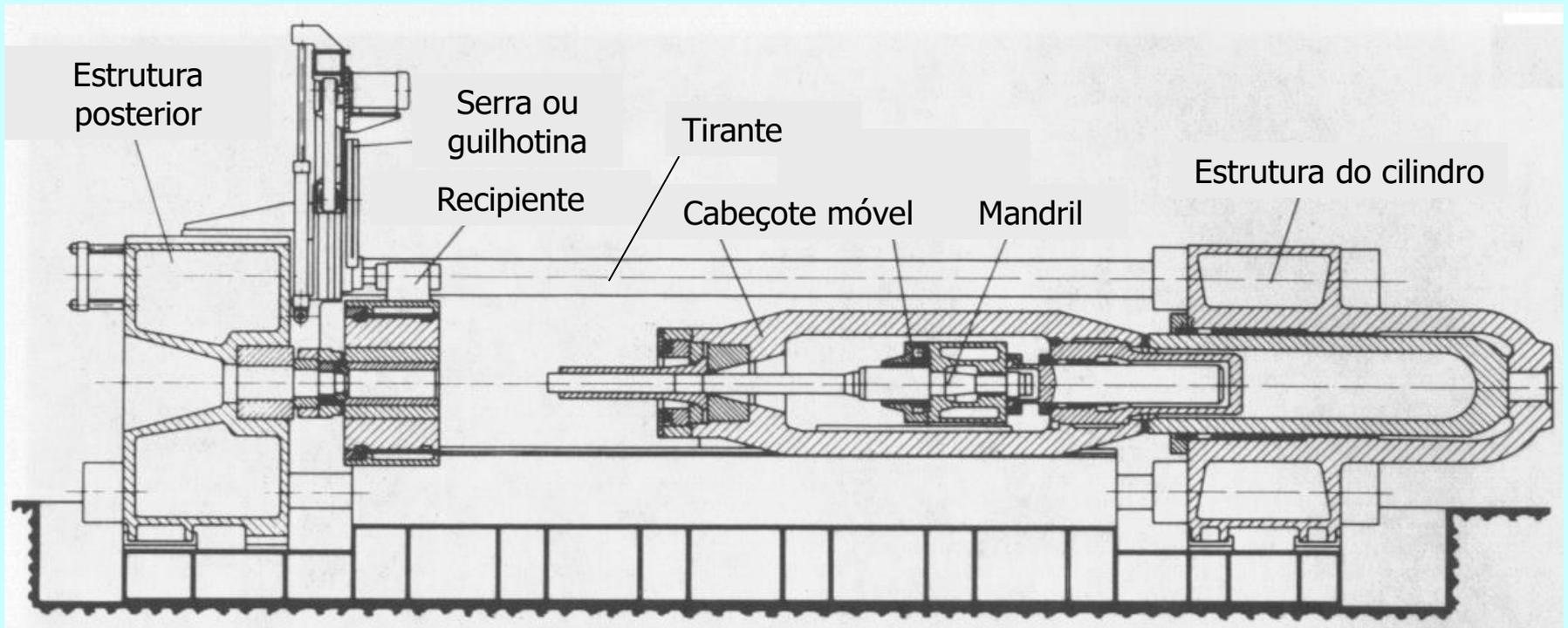
# Representação do defeito de intrusão



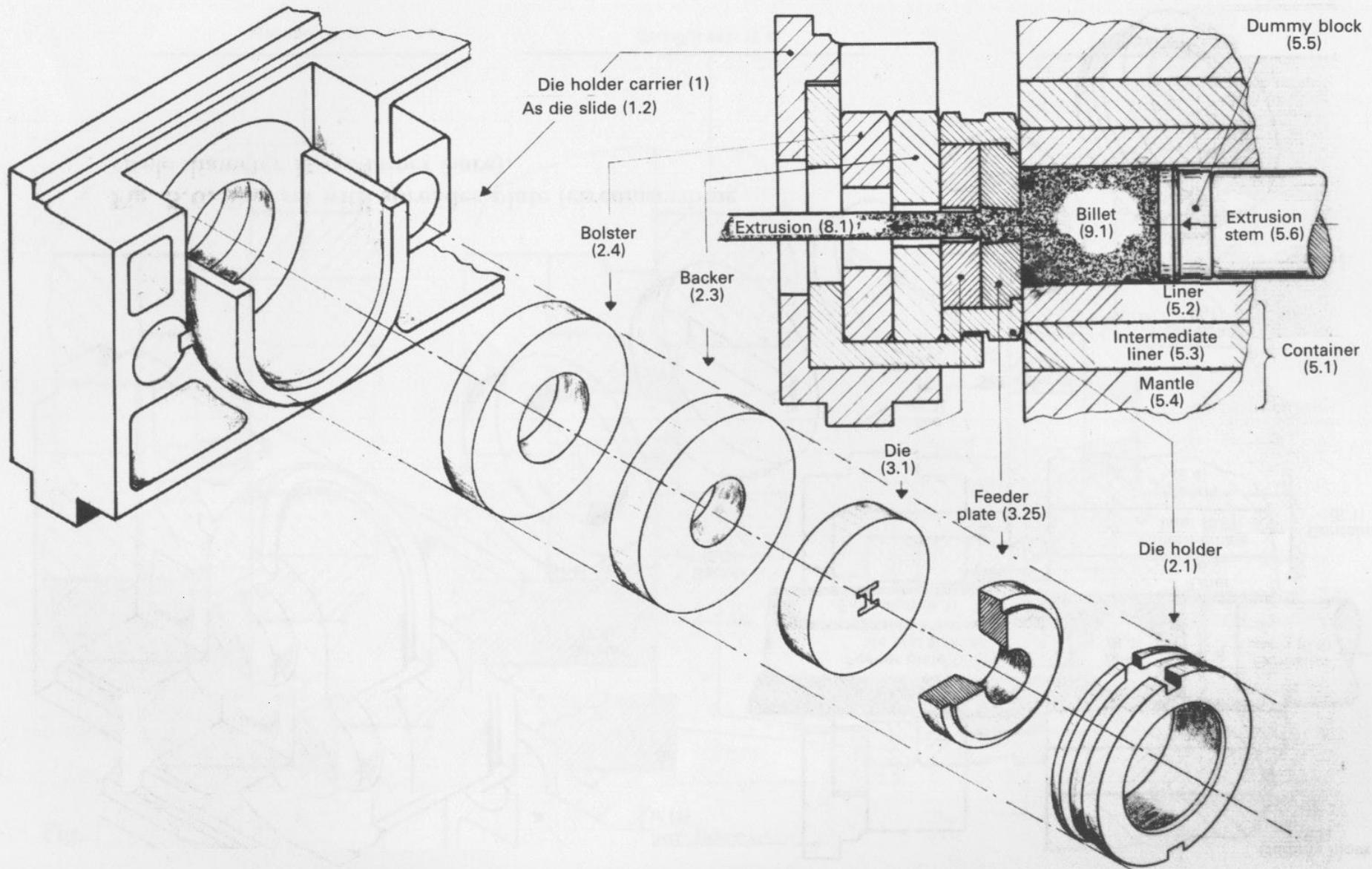
# Extrusão Hidrostática



# Componentes de uma prensa horizontal hidráulica para extrusão a quente



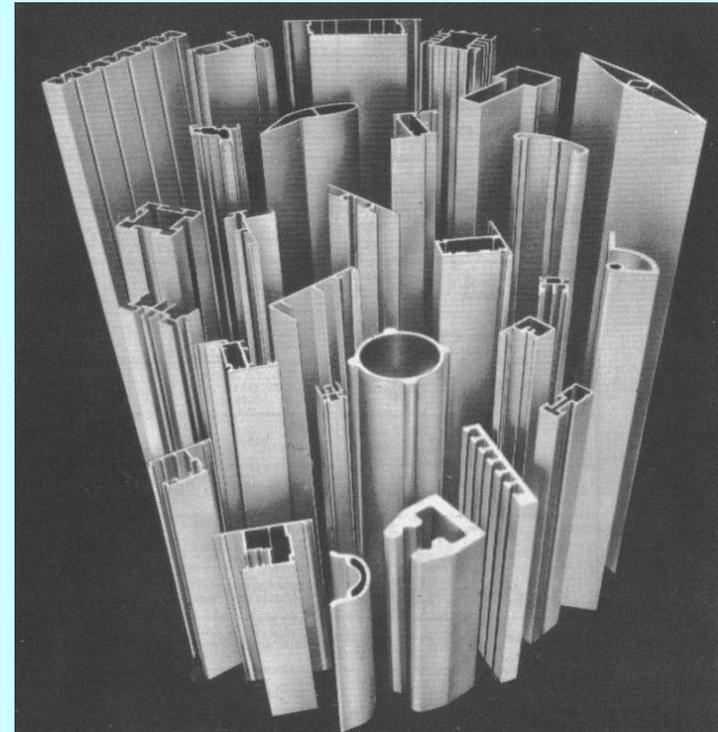
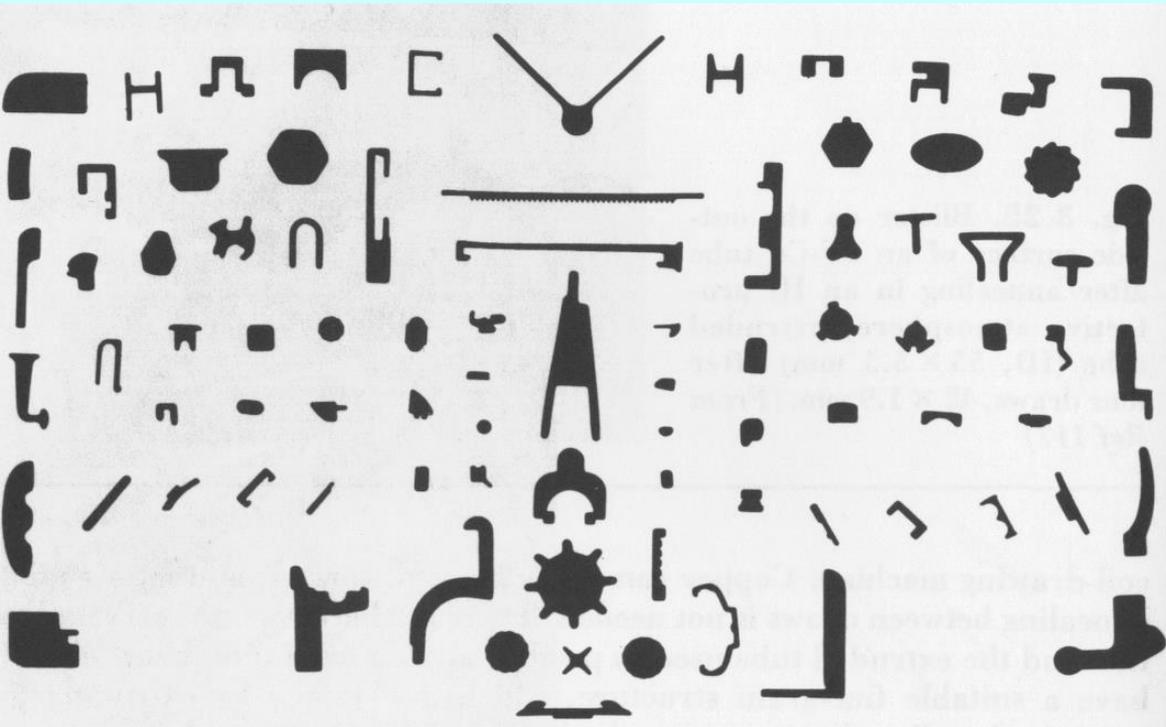
# Componentes de ferramental para extrusão a quente



# PERFIS DE PRODUTOS EXTRUDADOS A QUENTE

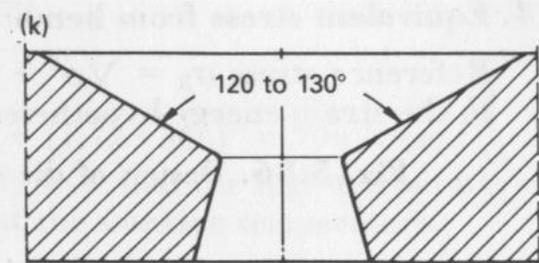
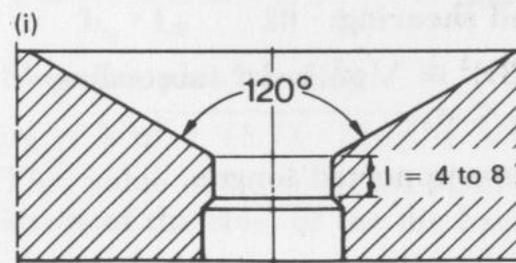
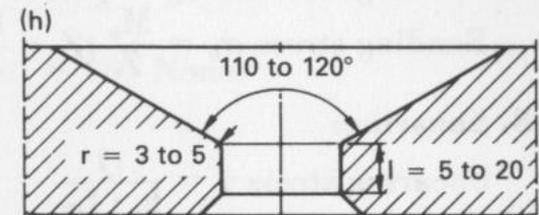
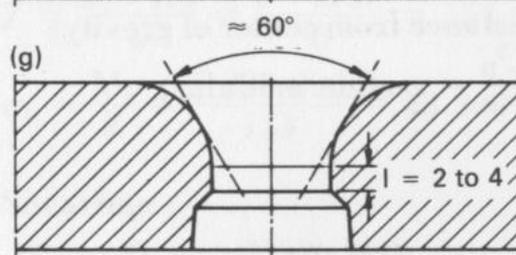
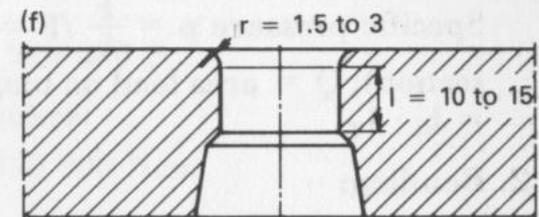
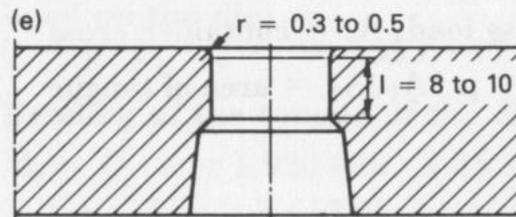
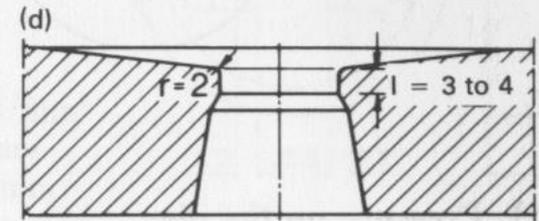
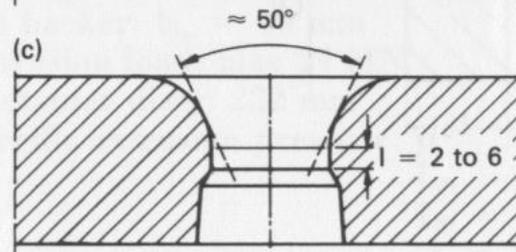
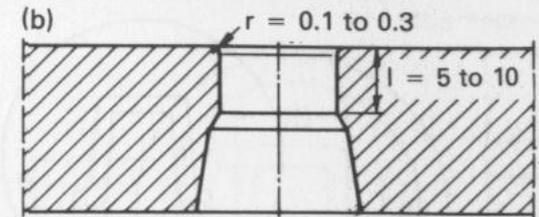
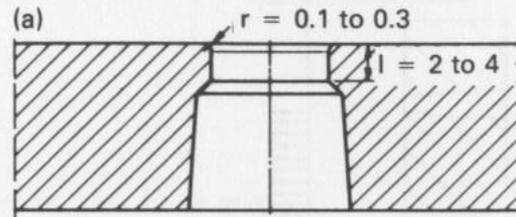
Perfis de cobre

Perfis de alumínio

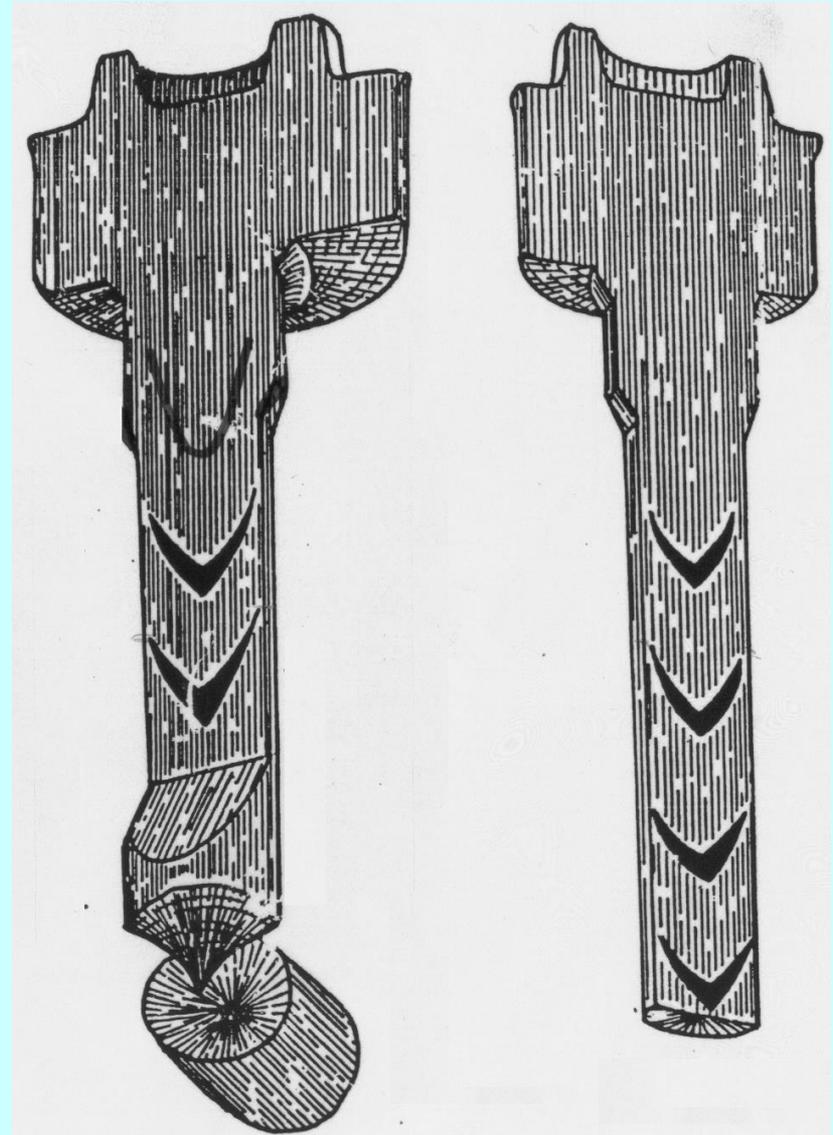
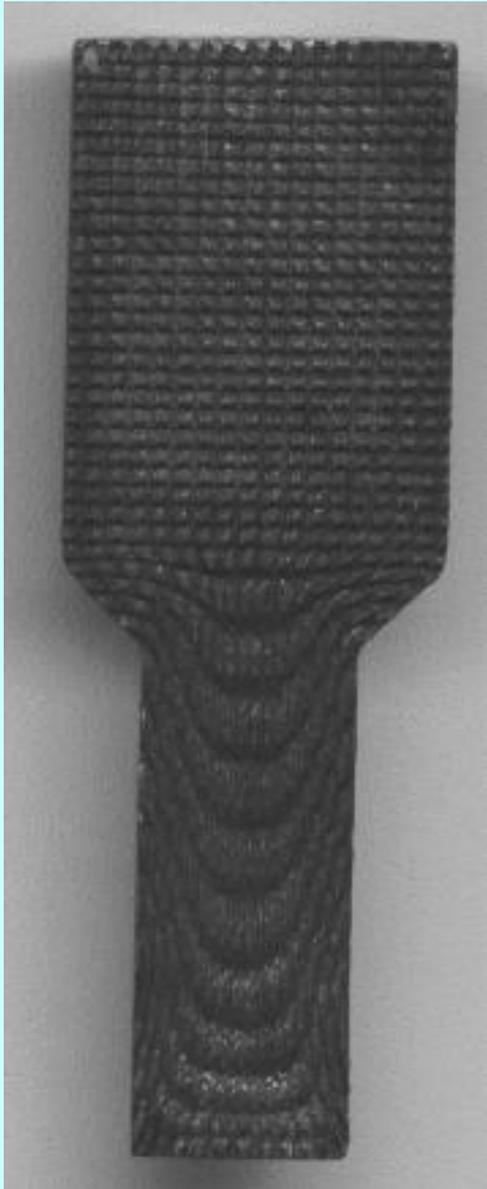


# Geometrias de matrizes

- 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)



# Defeito "chevron" causado pela extrusão a frio



# **COMO AUTOMATIZAR OU CONTROLAR ESSES PROCESSOS?**

- **Utilizando sensores, atuadores e sistemas de controle (automação)**
  - **Sensor de temperatura,**
  - **Sensor de pressão/força,**
  - **Sensor de deslocamento (controle dimensional/de posição),**
  - **Planejamento de processos auxiliado por computador,**
  - **etc.**

**PMR 3301**  
**COMPLEMENTOS DE**  
**FABRICAÇÃO MECÂNICA**

**Processo de Fabricação**  
**por Forjamento**

# O QUE É O FORJAMENTO?

→ É a deformação volumétrica de um bloco de metal nas mais variadas formas geométricas e com grandes deformações plásticas pela **ação de tensões compressivas diretas**.

Ação por meio de golpes (martelos) ou contínua (prensas hidráulicas, excêntricas e de parafuso) podem ser num **sistema aberto ou fechado em matrizes**.

Este processo de fabricação está dividido em três grandes grupos: **forjamento a frio, a quente e a morno**.

Essa classificação é dependente da temperatura na qual as operações de forjamento ocorrem.

# CARACTERÍSTICAS DO FORJAMENTO

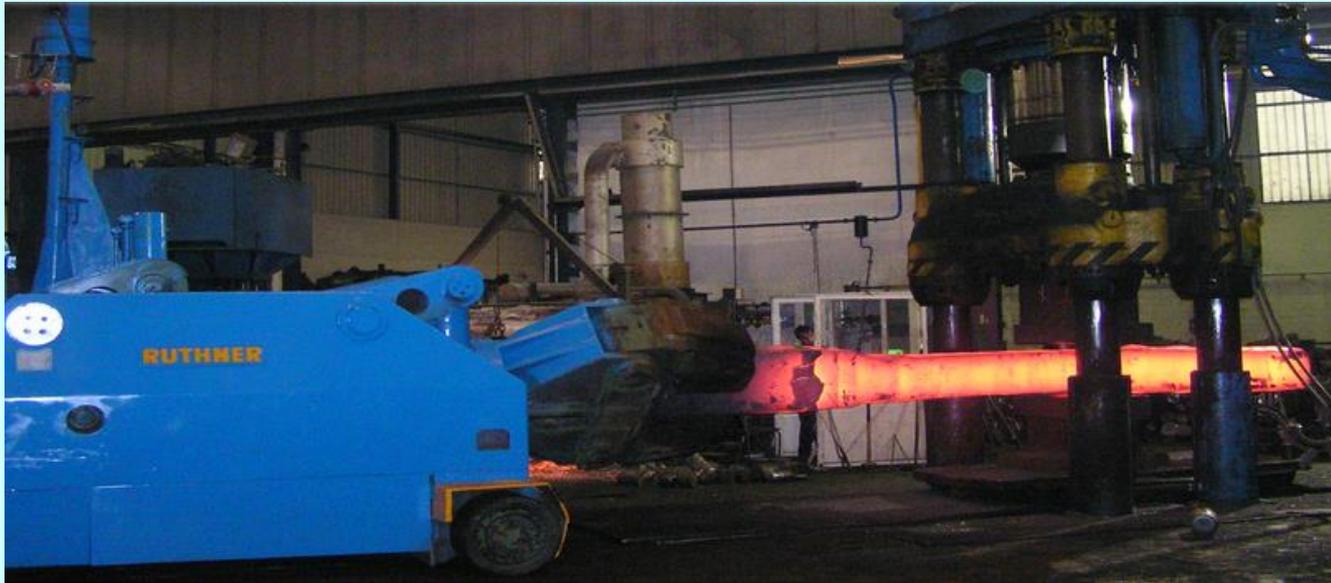
## I) LIVRE:

- formas simples (anéis, eixos)
- peças de grandes dimensões
- baixa produtividade
- normalmente realizado em martelos

## II) EM MATRIZES FECHADAS:

- para peças de geometrias complexas
- alta produtividade
- maior homogeneidade estrutural
- melhor qualidade dimensional
- normalmente realizado em prensas

# FORJAMENTO LIVRE



# FORJA- MENTO EM MATRIZ

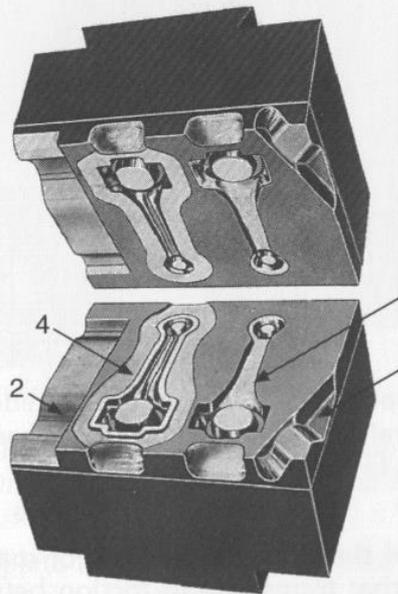


Prensa Excêntrica.  
Acionamento mecânico  
por rotação de eixos  
excêntricos.  
Golpes rápidos por  
impacto (tipo  
martelamento)  
Limitadas às  
características da  
ferramenta e sistemas  
de alimentação.

## Prensa hidráulica



Acionada por  
pistão hidráulico.  
  
Golpes em  
velocidade  
constante e  
controlada.



# CARACTERÍSTICAS DO FORJAMENTO

## A QUENTE:

- **operação mais comum**
- **para formas complexas**
- **recristalização (alívio de tensão, refino de grão)**
- **oxidação e contração térmica: sobremetais**

## A FRIO:

- **para peças de geometrias mais simples**
- **encruamento**
- **tolerâncias mais fechadas**

## A MORNHO:

- **características intermediárias das obtidas entre o forjamento a quente e a frio**

## **RECORDANDO: NOS TRABALHOS DE DEFORMAÇÃO**

**A quente:** é definido como a deformação sob condições de temperatura e taxa de deformação tais que processos de **recuperação e recristalização ocorrem simultaneamente com a deformação;**

**A frio:** é a deformação realizada sob condições em que os processos de **recuperação e recristalização não são efetivos. Como o encruamento não é aliviado, a tensão de conformação aumenta com a deformação;**

**A morno:** ocorre uma **recuperação parcial da ductilidade** do material e a tensão de conformação situa-se numa faixa intermediária entre o trabalho a frio e a quente. No trabalho a morno não se formam novos grãos, ou seja, **não há recristalização.**

## COMO DEFINIR A TEMPERATURA DE TRABALHO?

A fixação da temperatura é variável, sendo uma dependência do tipo de metal que se deseja forjar.

Em geral seus limites são fixados pelo aumento excessivo de força quando a temperatura é muito baixa (limite inferior) e pela oxidação em temperatura alta.

Todavia, é necessário um conhecimento bem detalhado do comportamento do material com o qual se está trabalhando, ou seja, conhecer a tensão de escoamento, as perdas por oxidação, o alongamento e as zonas de transformação de fase em função da temperatura. Todos esses parâmetros devem ser conhecidos para se evitar defeitos e otimizar o processo.

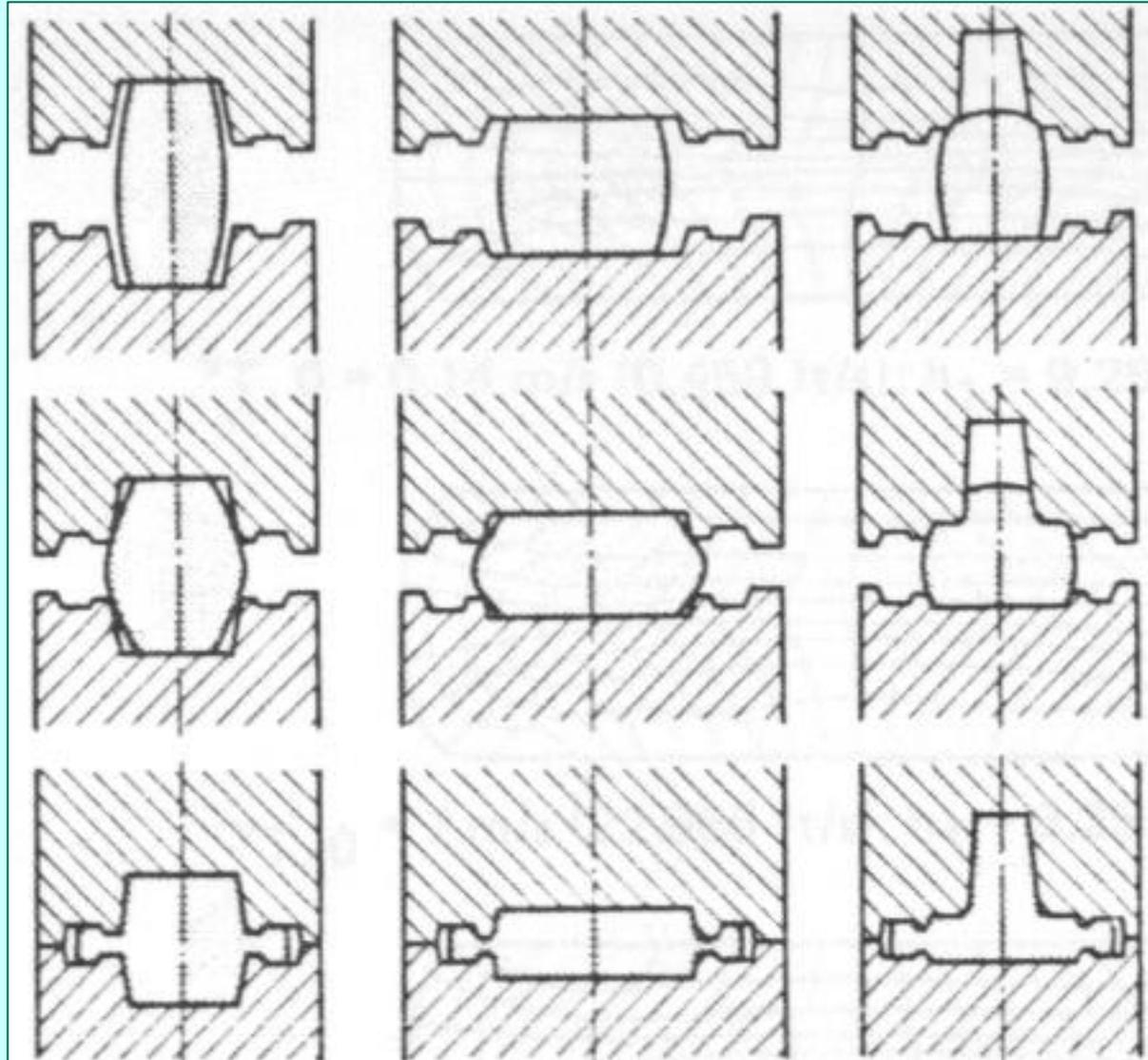
# ETAPAS DO FORJAMENTO

## Sequência de processamento

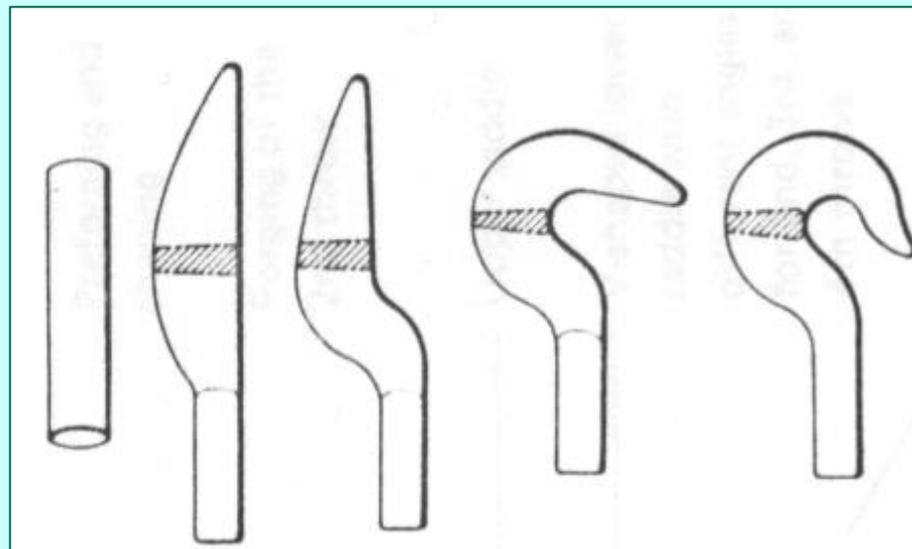
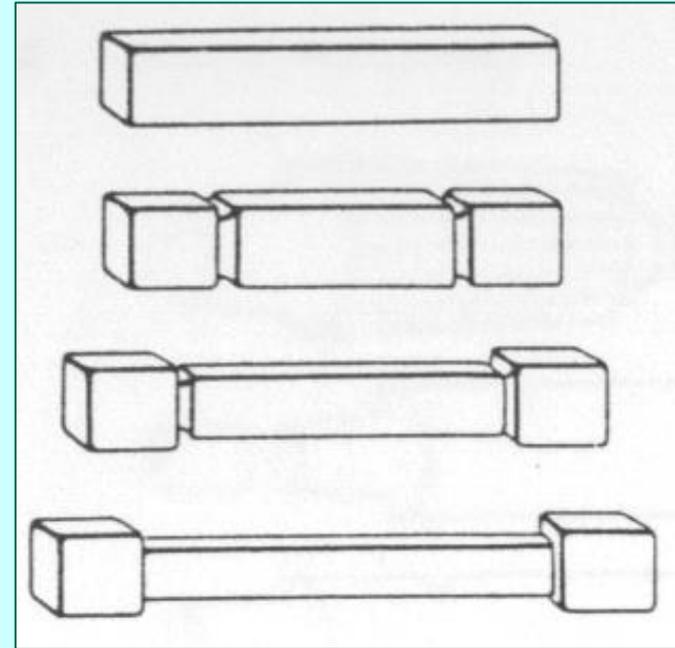
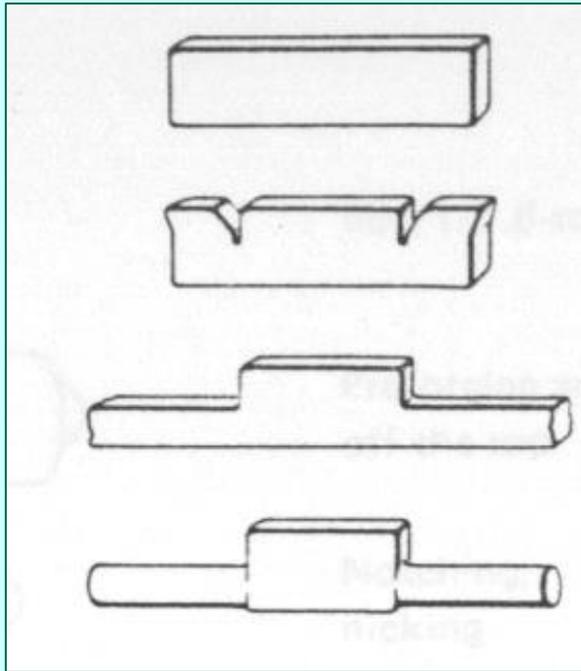
- corte (Blanc), aquecimento
- limpeza, **etapas de forjamento**
- rebarbação, normalização
- limpeza

- **Etapas de forjamento:** esboçadora, formadora, calibradora

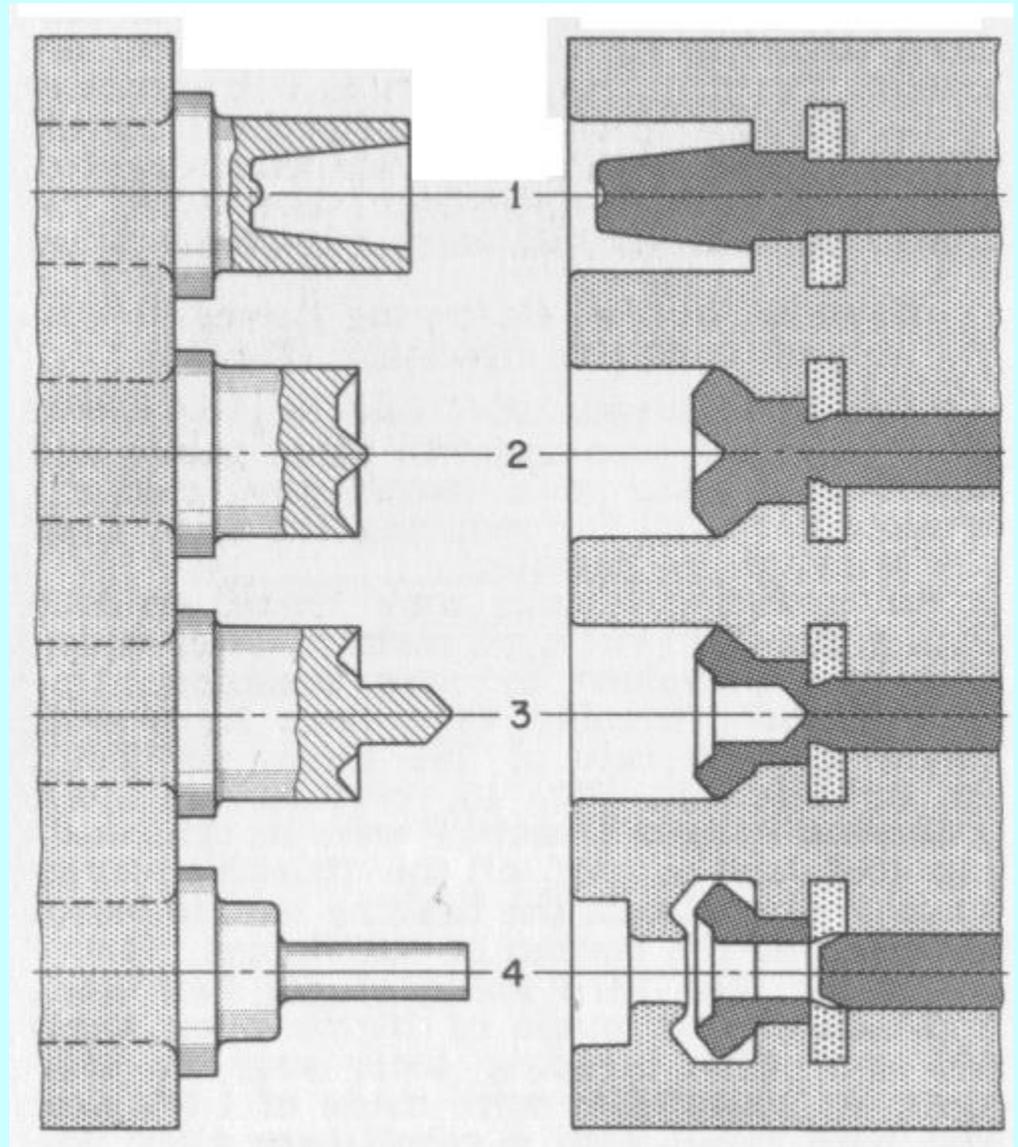
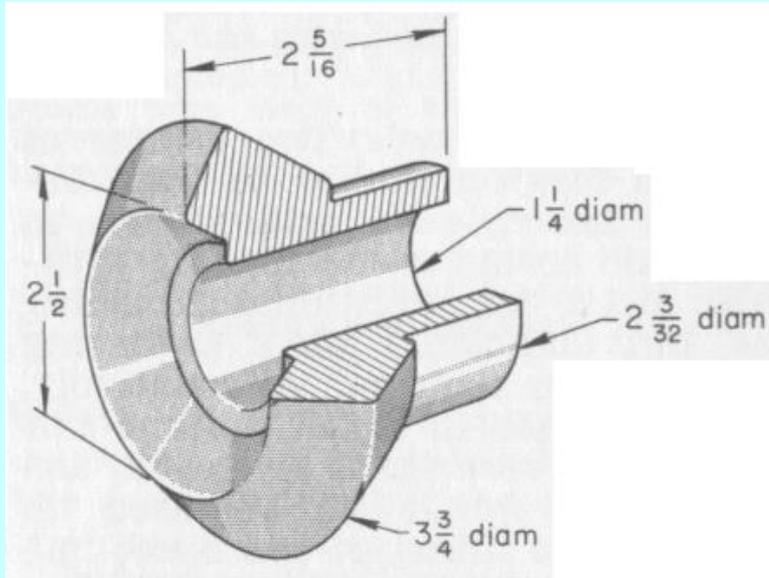
# Exemplo de sequência de forjamento



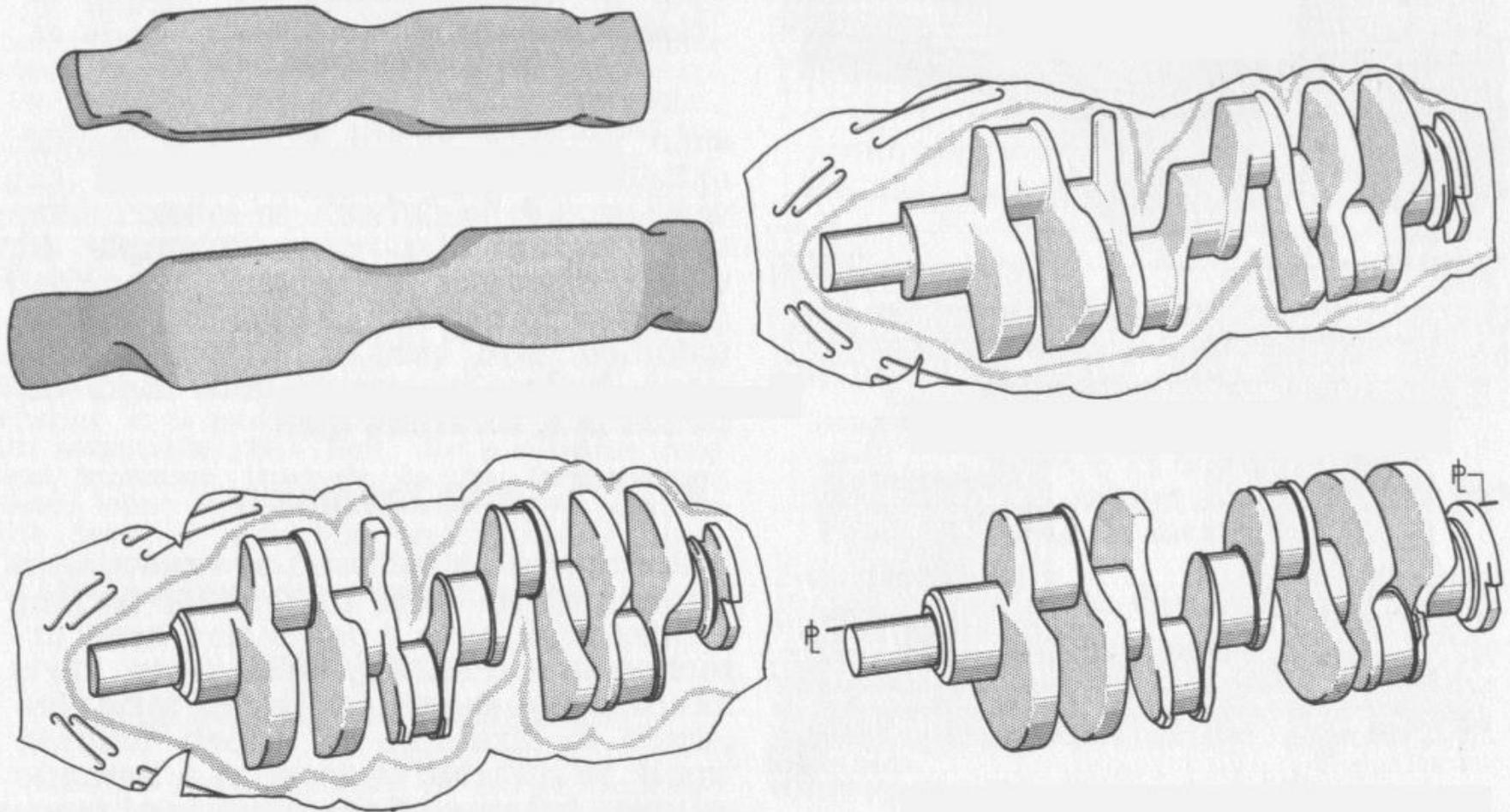
# Exemplo de sequência de forjamento

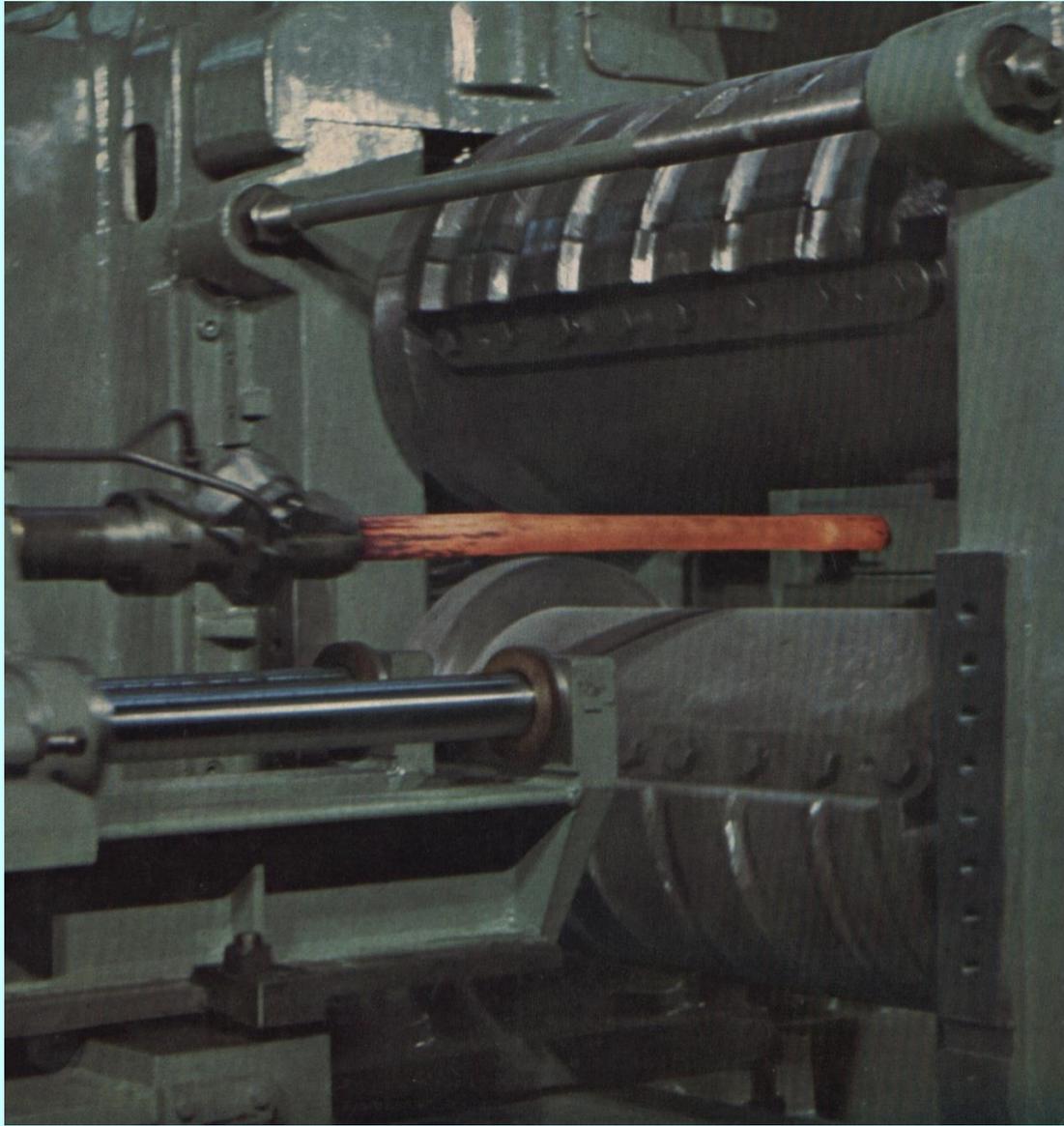


# Exemplo de sequência de forjamento

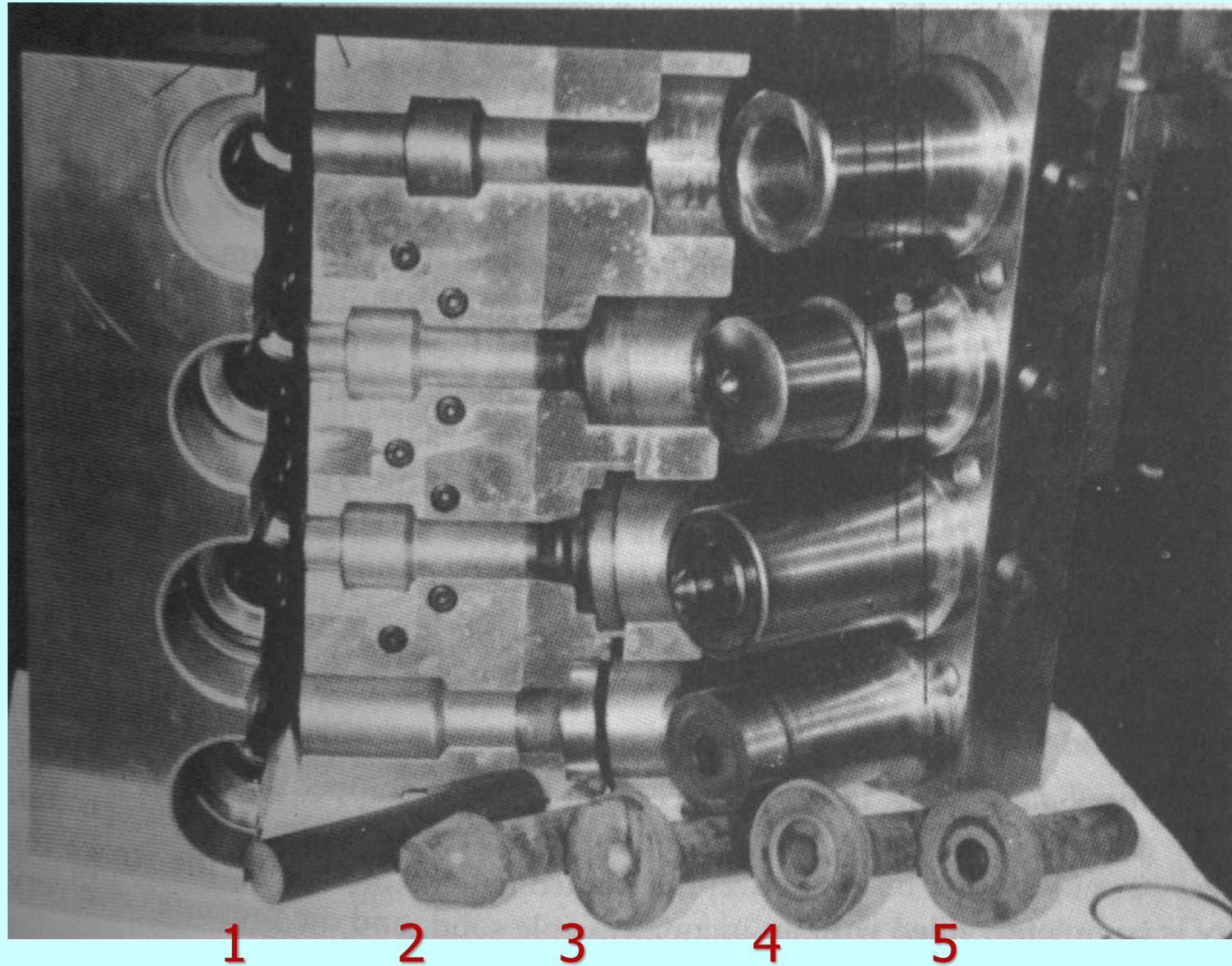


# Exemplo de sequência de forjamento

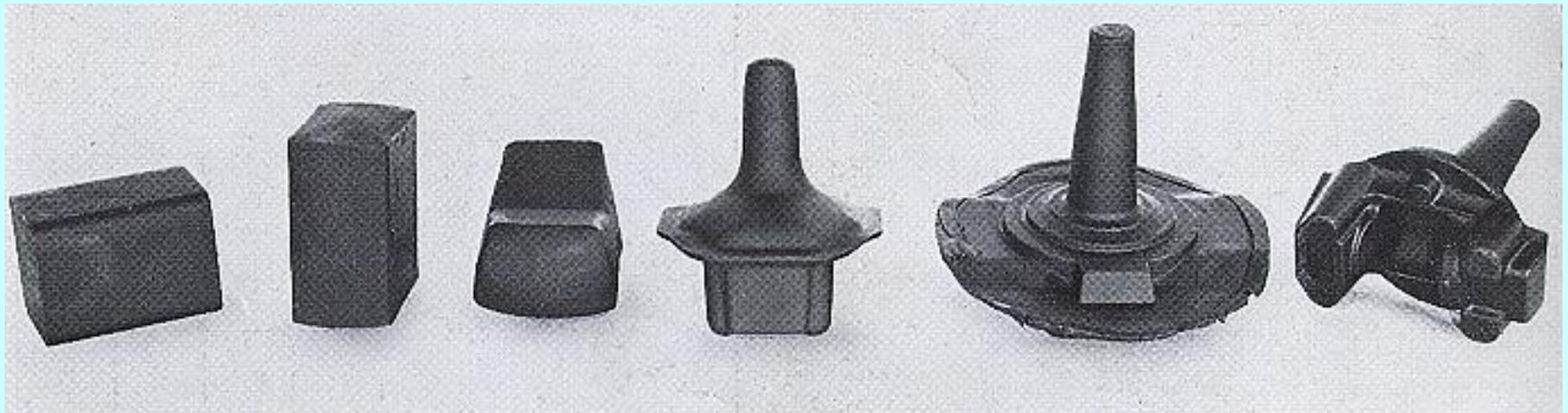




# Exemplo de sequência de etapas de forjamento



# Exemplo de sequência de forjamento



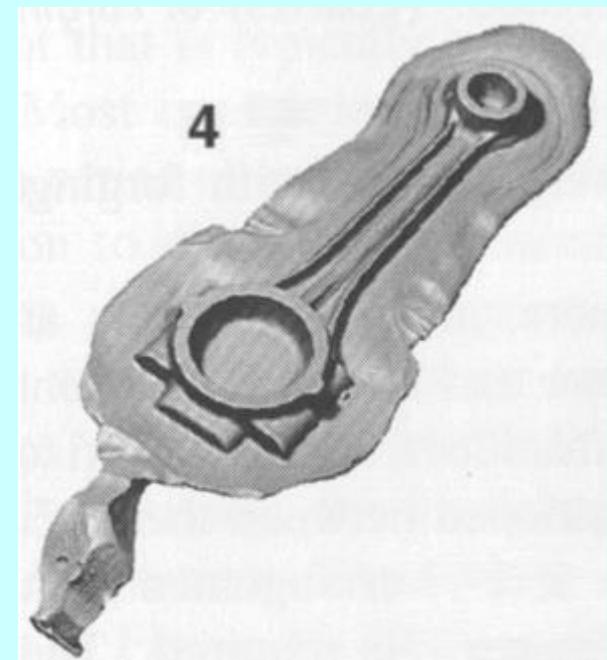
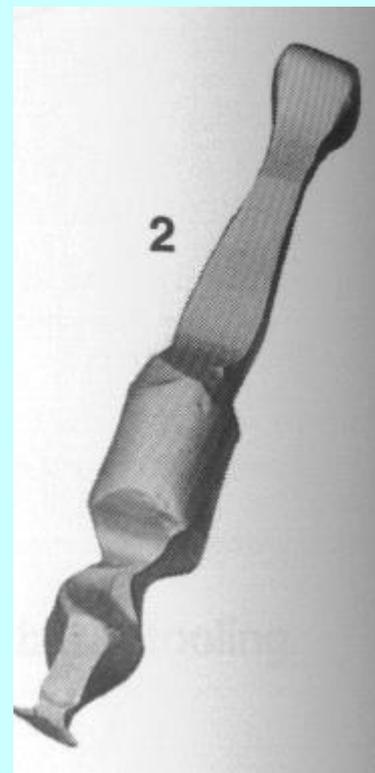
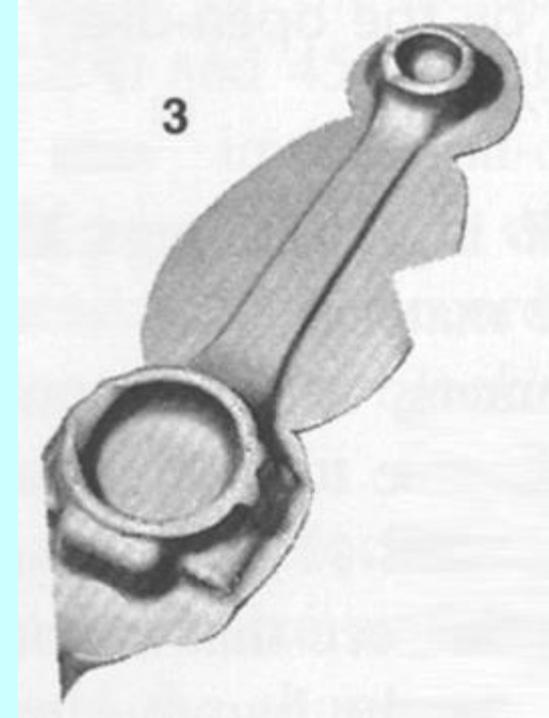
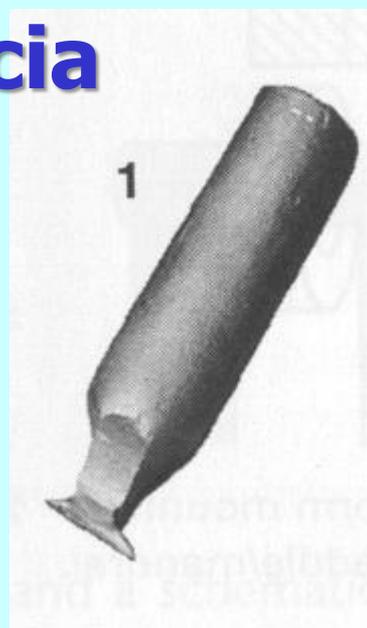
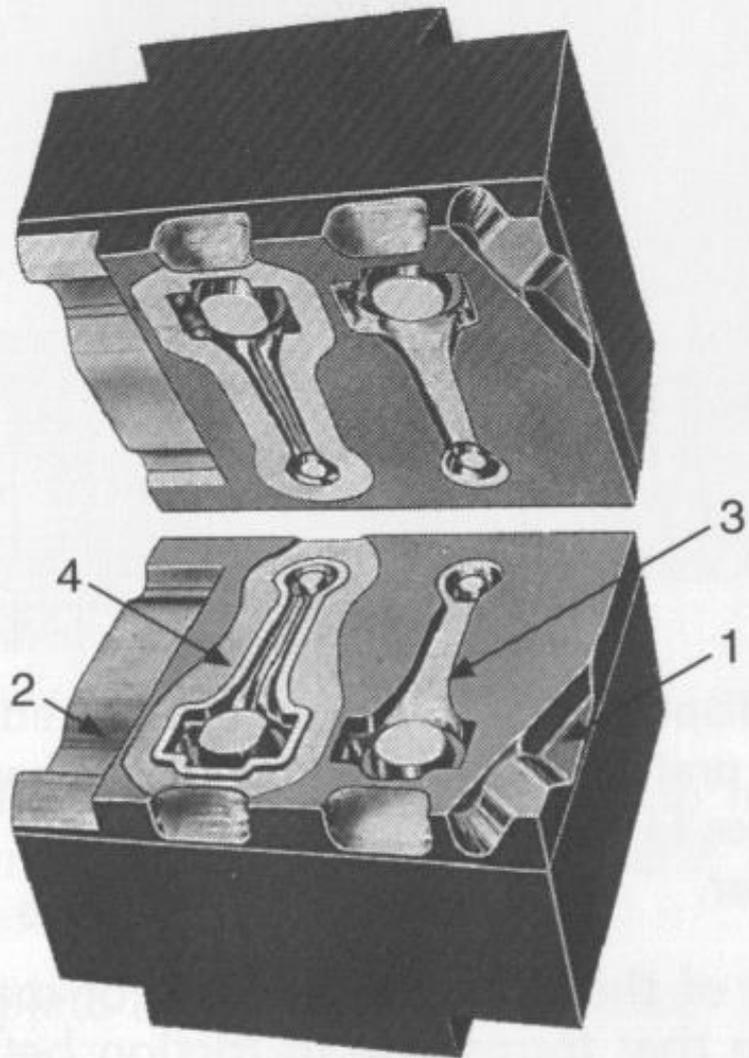
Tarugo cortado e esboçado

Primeiro forjamento

Forjamento Final

Peça rebarbada

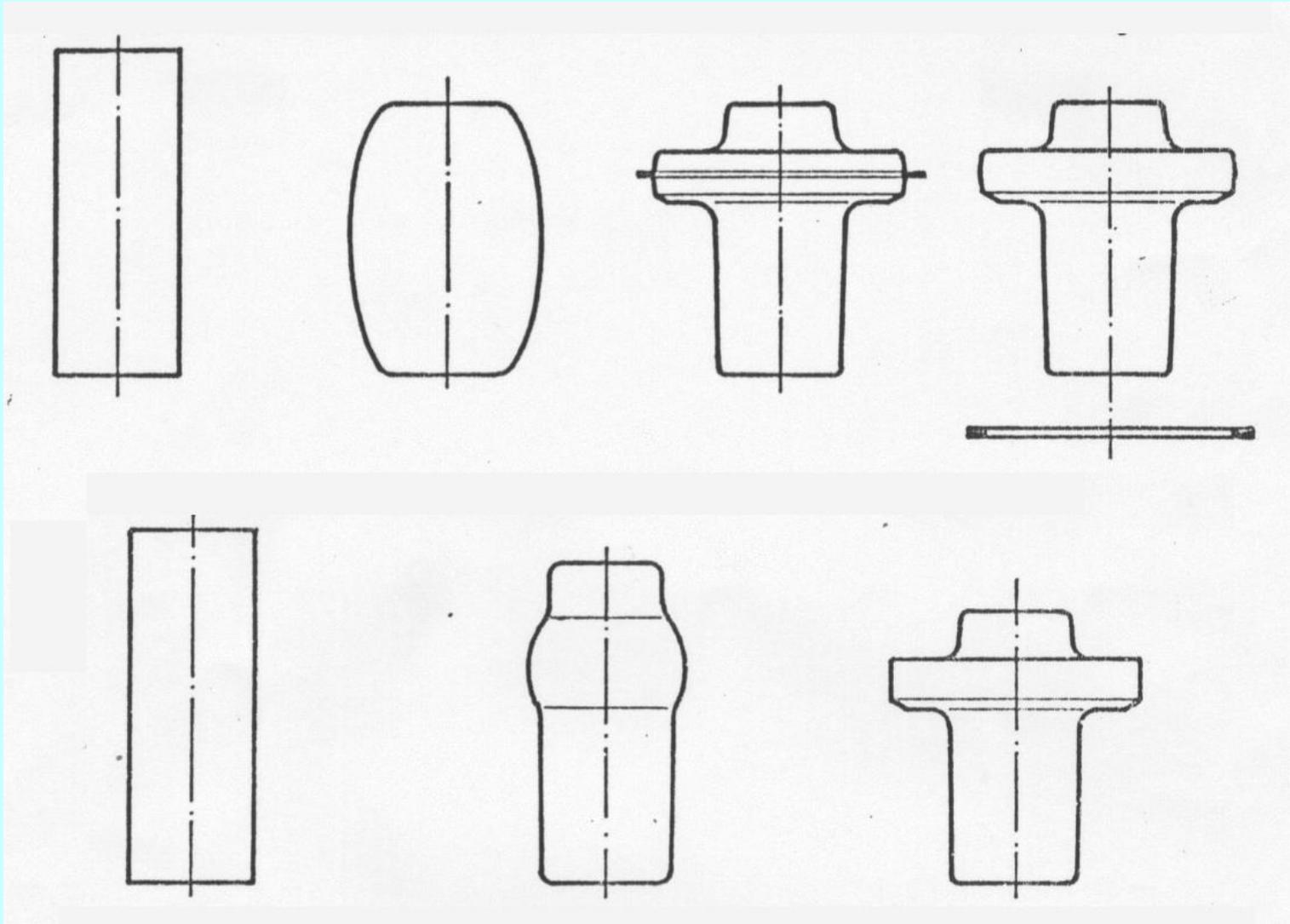
# Exemplo de sequência de forjamento



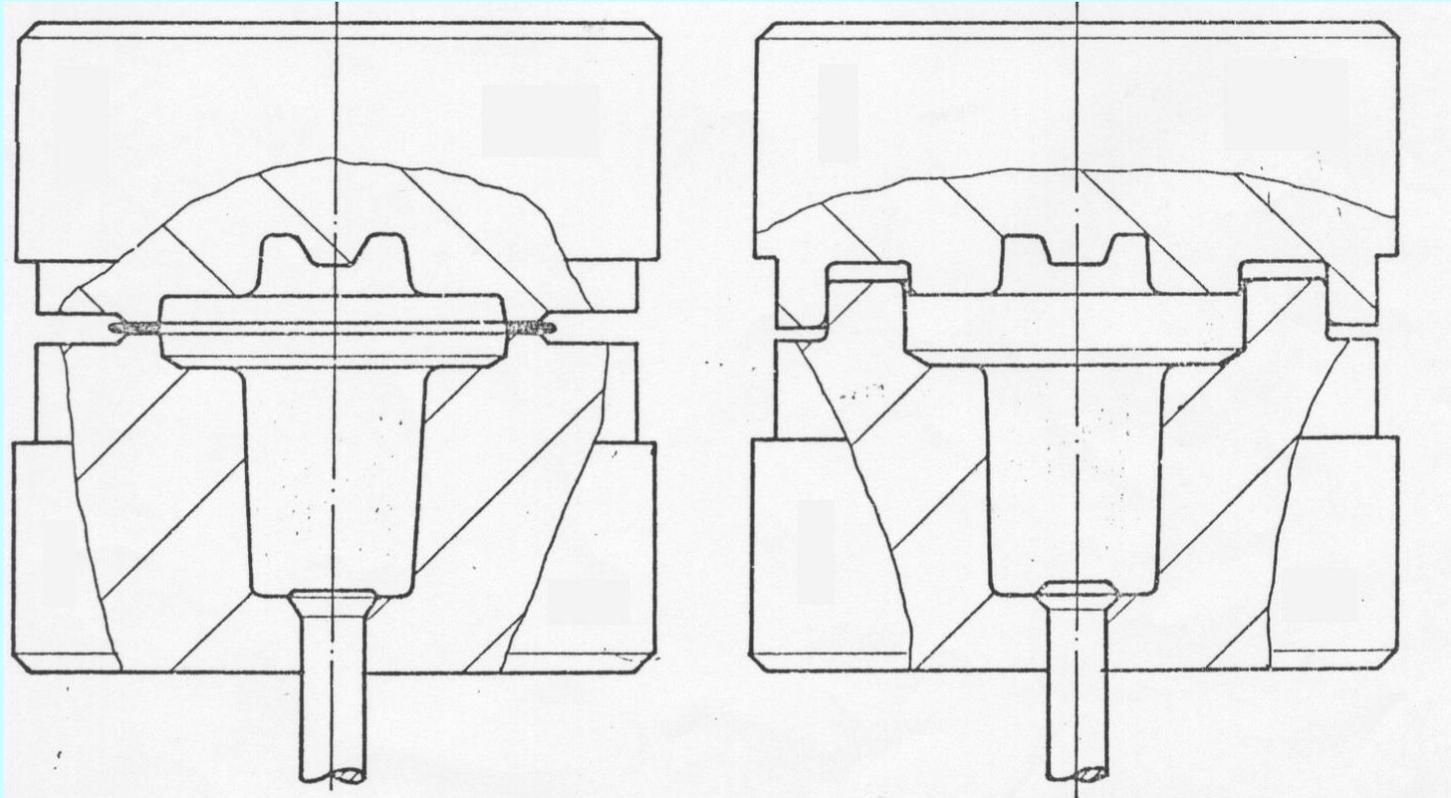
# Microestrutura obtida pela sequência de forjamento



# Exemplo de sequência de forjamento



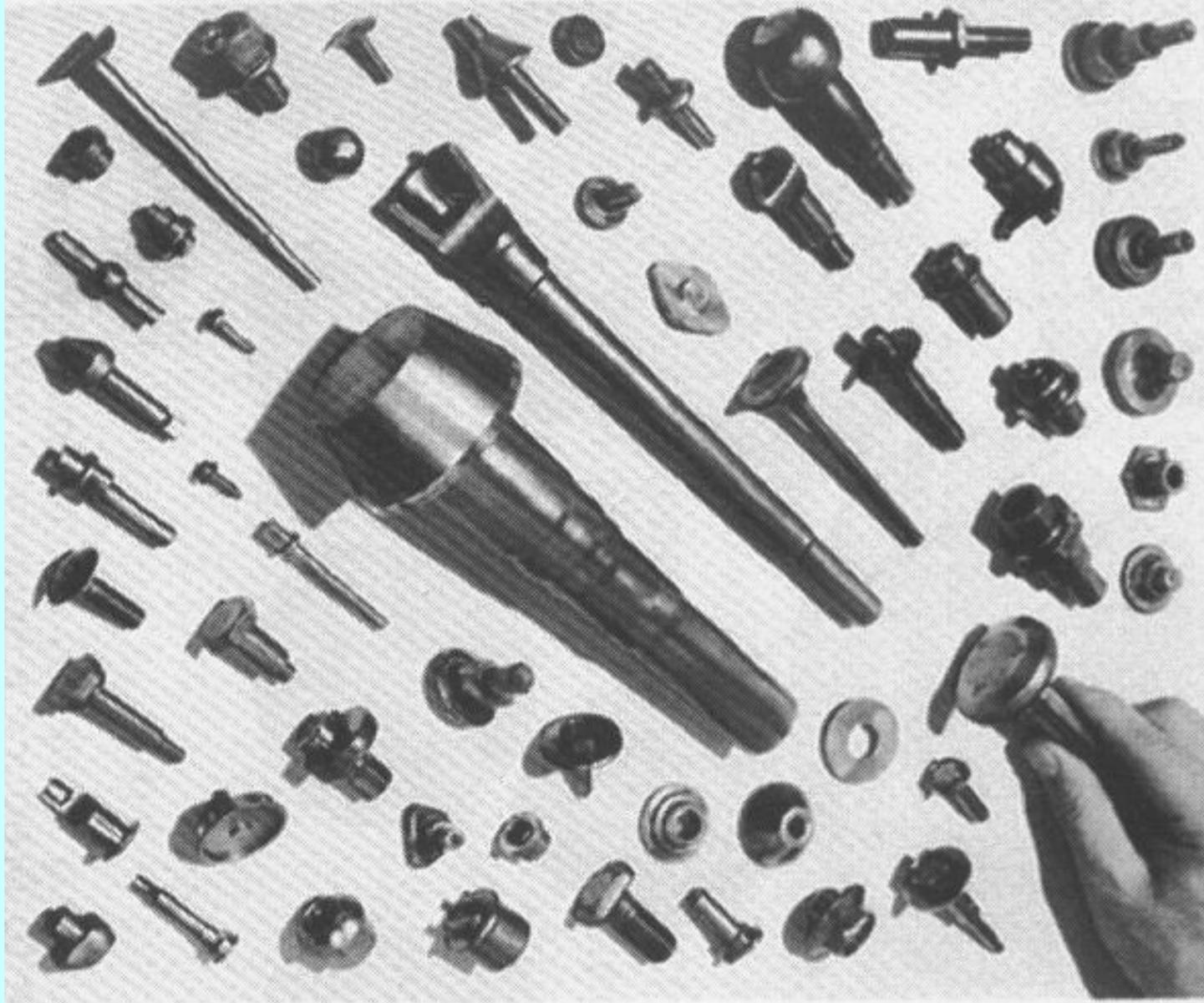
# Exemplo de sequência de forjamento



# Exemplo de sequência de forjamento



# Exemplos de peças forjadas

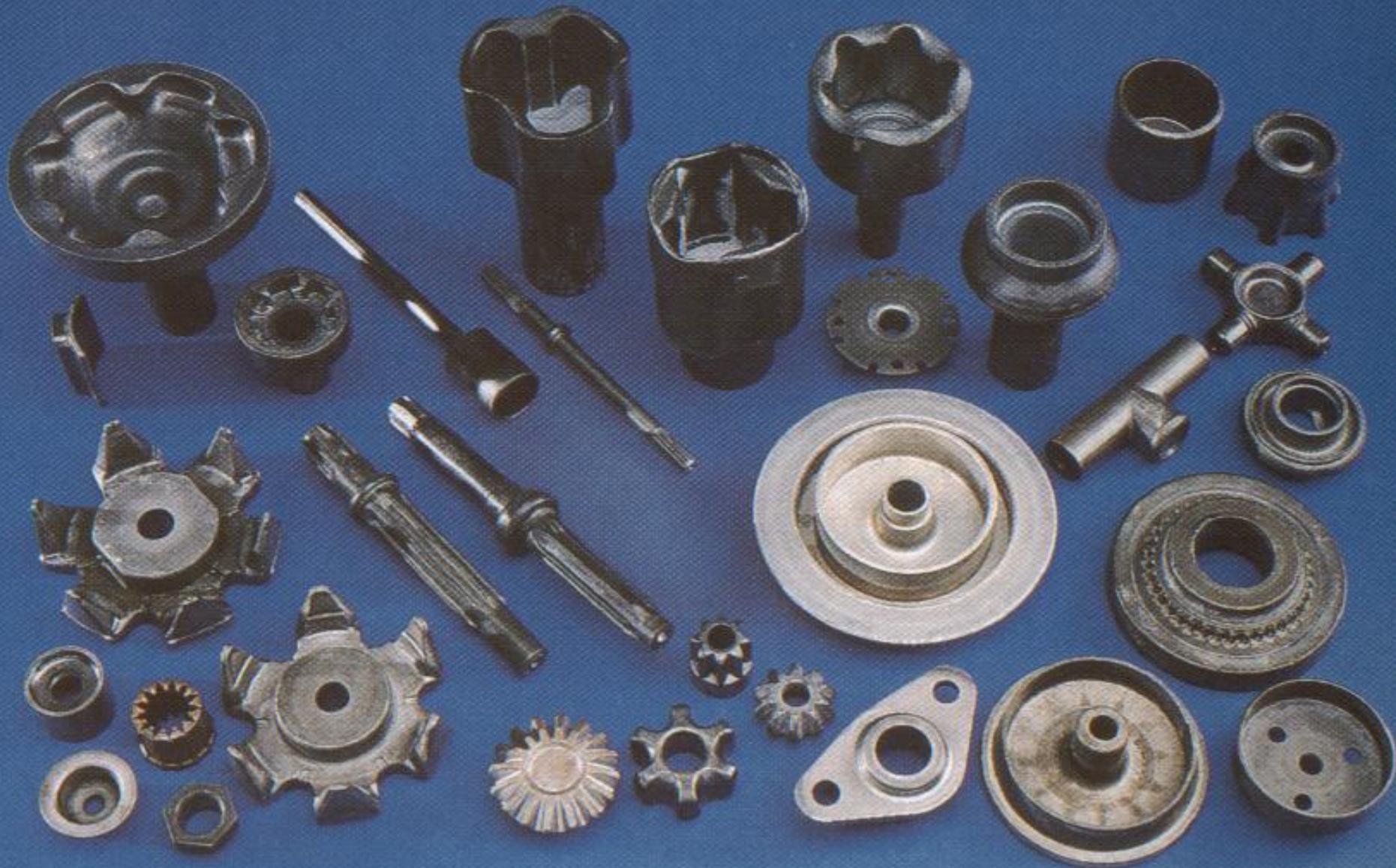


# Exemplos de peças forjadas

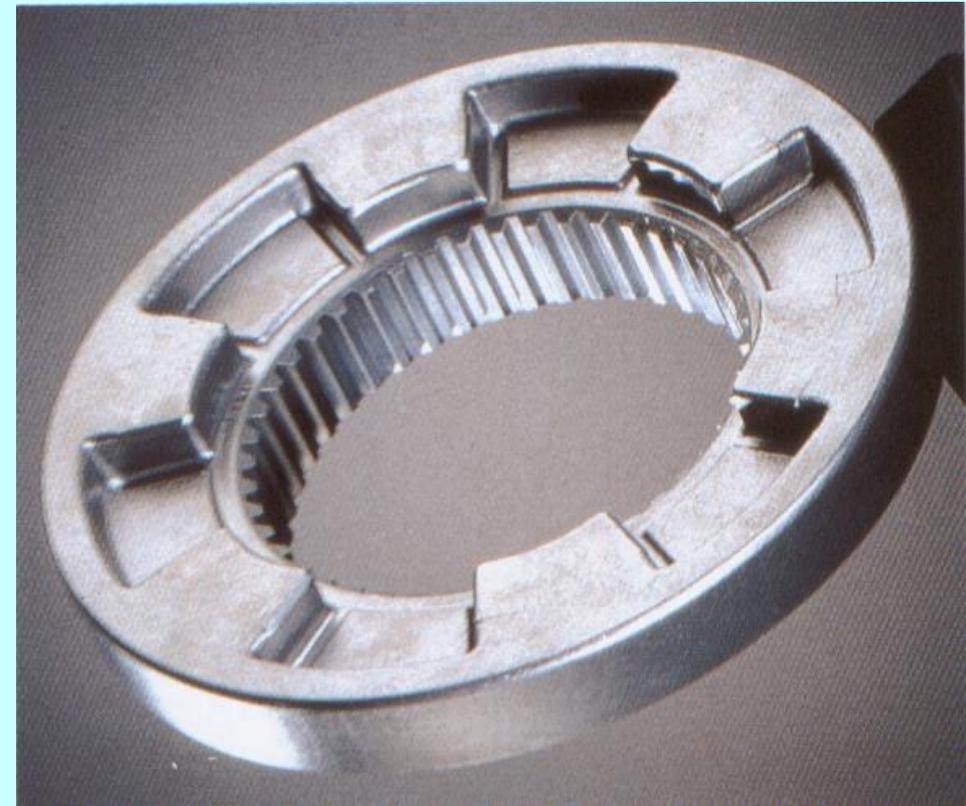
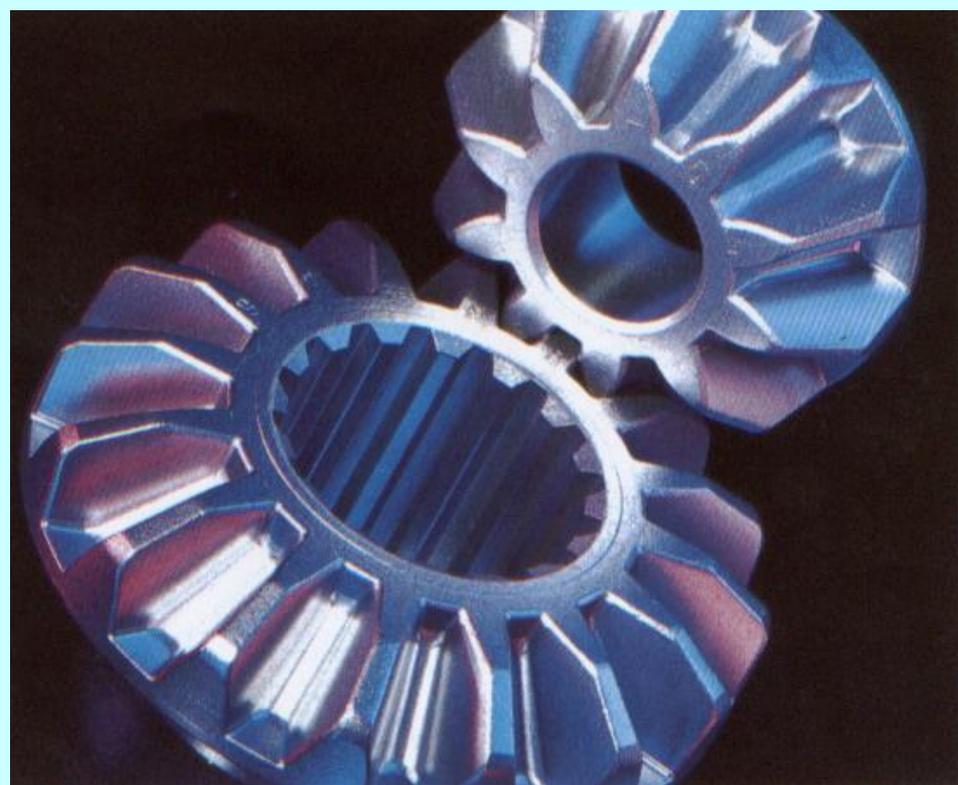


Fonte: AçoPeças Ltda.

# Exemplos de peças forjadas



# Exemplos de peças forjadas



# **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 impurezas oriundas da fundição ou porque quando ao se rebarbar o esforço aplicado é muito lento, 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, elevadas temperaturas de trabalho 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.

# Automação no forjamento

Diversas técnicas produtivas são adotadas para se conseguir forjar peças e melhorar as características metalúrgicas, algumas dessas técnicas são milenares, com baixo grau tecnológico, caras e demoradas e outras técnicas são de última geração e com elevado grau de automatização.

Nestas técnicas mais modernas é comum o uso de programas computacionais complexos, que proporcionam ganho de tempo e redução de desperdício de energia e material, conhecidos como CAD/CAM, quando do estudo das deformações que o material irá sofrer no seu forjamento.

Desenvolvimento da informática



Introdução dos sistemas CAD, CAM e CAPP entre outros, aplicados como ferramentas de auxílio no planejamento de processos de forjamento.



Métodos de "tentativa e erro" + métodos baseados na experiência adquirida pelos profissionais, projetistas e engenheiros da área



Auxílio na automação dos diversos procedimentos, atuando como fonte de informações e organização de dados para o planejamento de novos processos.