



**Labconf**

Laboratório de Conformação Mecânica - UFPR



# FORJAMENTO



***Conformação – TM 262***

**Prof. Paulo Marcondes, PhD.  
DEMEC / UFPR**

# FORJAMENTO



☒ Histórico;

☒ Conceito;

*"Forjamento é o nome genérico para operações de conformação mecânica efetuadas com esforço de **compressão** sobre um material dúctil, de tal modo que ele tende a assumir o contorno ou perfil da ferramenta de trabalho."*

# CARACTERÍSTICAS GERAIS

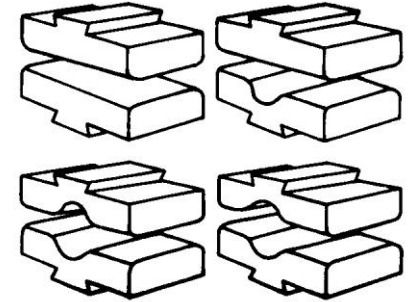


Fig. 7.1 Exemplos de matrizes para forjamento em matriz aberta.

- Tipos básicos:
  - Conformação a quente;
  - Conformação a frio.

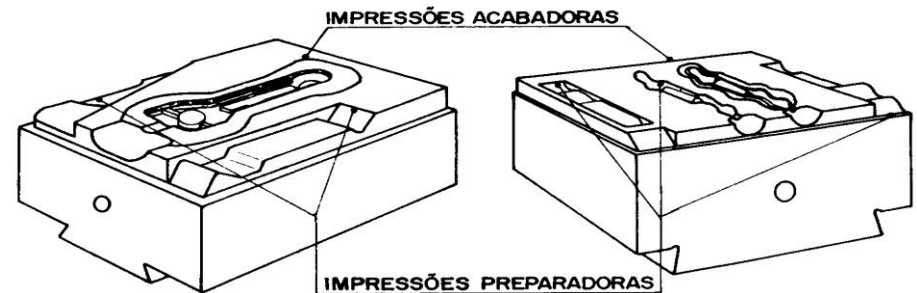


Fig. 7.6 Exemplos de matrizes para forjamento em matrizes fechadas.

- Classificação;
  - Forjamento livre ou em matriz aberta (ferramentas côncavas ou planas);
  - Forjamento em matriz fechada;

# CARACTERÍSTICAS GERAIS

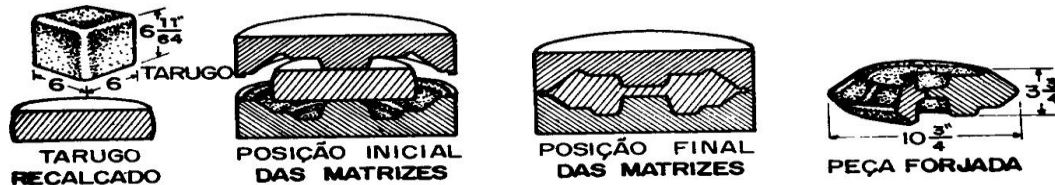


Fig. 7.2 Forjamento de uma peça em uma matriz fechada.

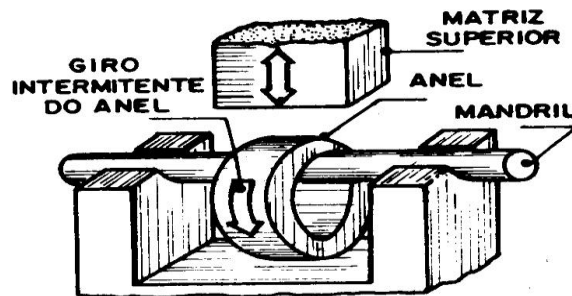


Fig. 7.3 Forjamento de um anel em matriz aberta.

Nomenclatura típica de forjamento

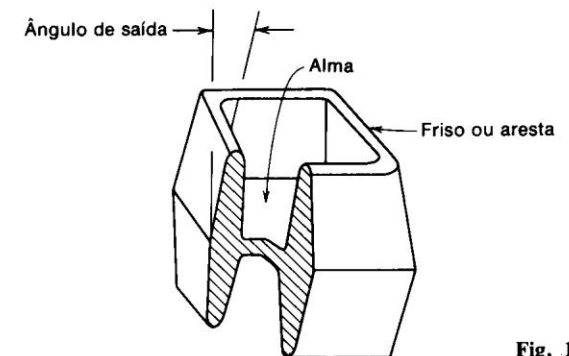


Fig. 16

# CARACTERÍSTICAS GERAIS



- Etapas do forjamento;

Corte → aquecimento → pré-conformação → forjamento → rebarbação

- Materiais utilizados:

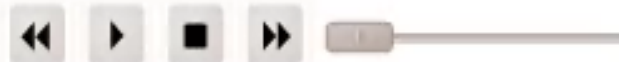
- Aços (comuns, ligados, ferramenta, estruturais e inoxidáveis);
- Ligas (Cu, Al, Mg, Ni e Ti).

# FORJAMENTO LIVRE



- Matrizes planas e simples;

Conformação  
Forjamento em Matriz Aberta



# OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- Operações simples de conformação por forjamento;
  - Matrizes abertas ou ferramentas especiais;
  - Produzir peças acabadas e simples;
  - Redistribuir a massa de uma peça bruta para posterior forjamento em matriz.
  - Recalque, estiramento, laminação, alargamento, fendilhamento, extrusão, etc.

# OPERAÇÕES UNITÁRIAS



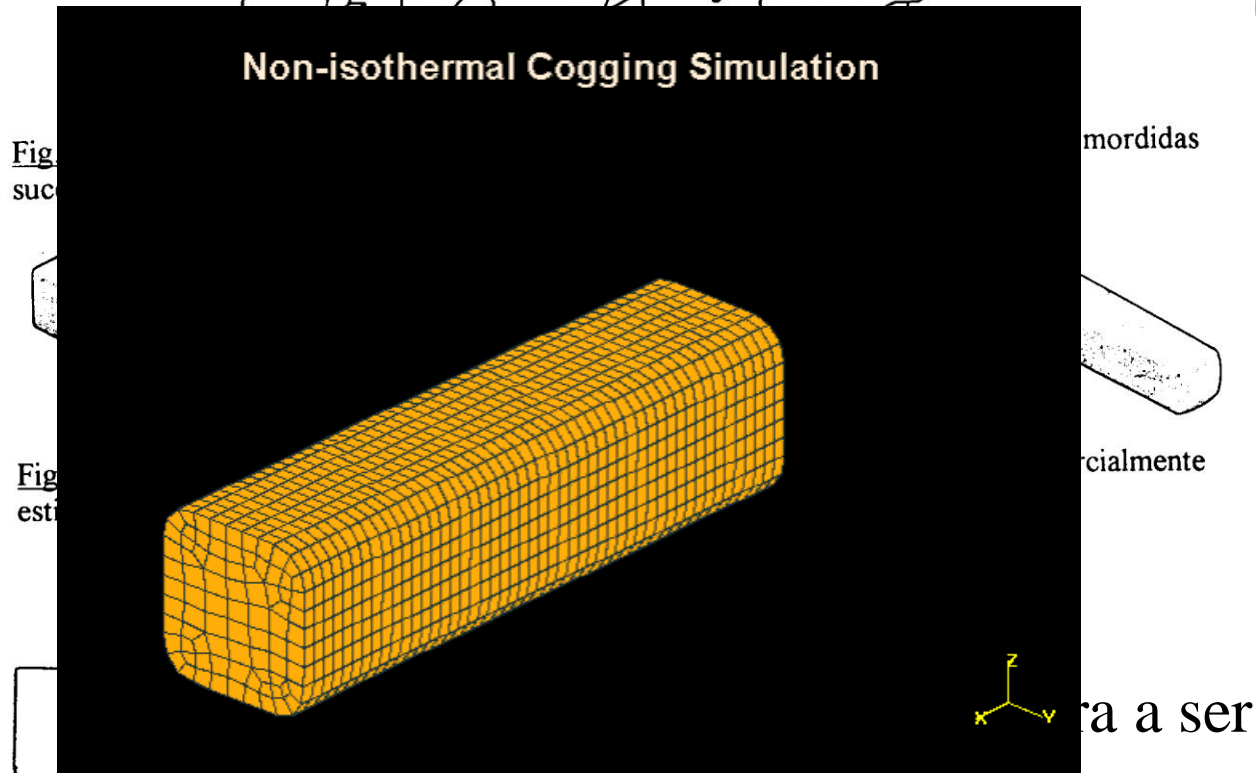
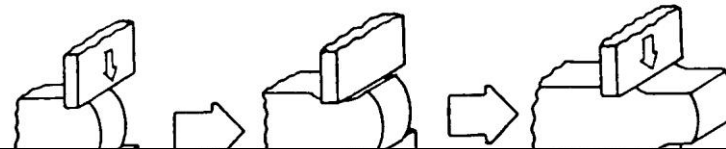
- Recalque ou recalçamento;

- Compressão direta do material entre um par de ferramentas de face plana ou côncava, visando primariamente reduzir a altura da peça e aumentar a sua secção transversal.



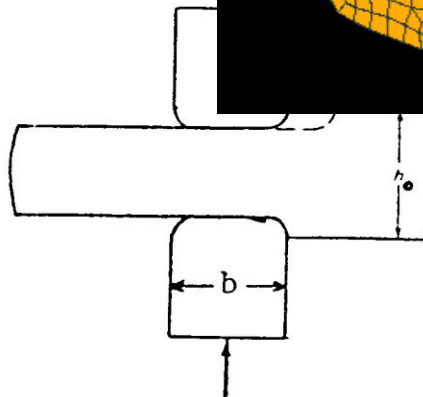


Estiramento



efetuada e grande:

**Recobrimento as mordidas.**



# OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- Estiramento;

- Visa aumentar o comprimento de uma peça às custas da sua espessura.



# OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- Encalcamento;

- Redução da secção de uma porção intermediária da peça, por meio de uma ferramenta ou impressão adequada.



# OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- Rolamento;

- Operação de distribuição de massa ao longo do comprimento da peça, mantendo-se a secção transversal redonda enquanto a peça é girada em torno do seu próprio eixo.



# OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- Alargamento;

- Aumenta a largura de uma peça reduzindo sua espessura.



# Alargamento e estiramento

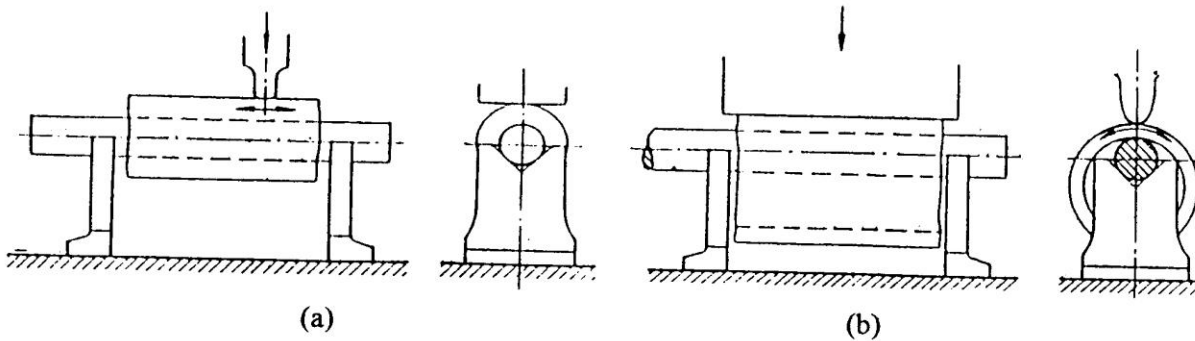


Fig. III.2.21: (a) Estiramento e (b) alargamento de peça tubular curta sobre mandril [7].

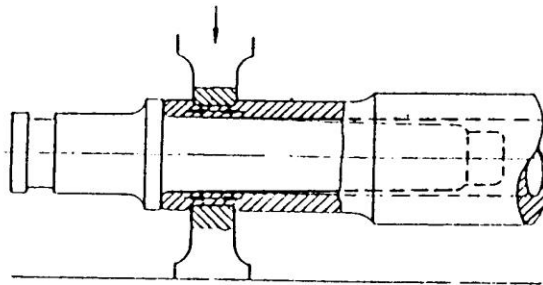
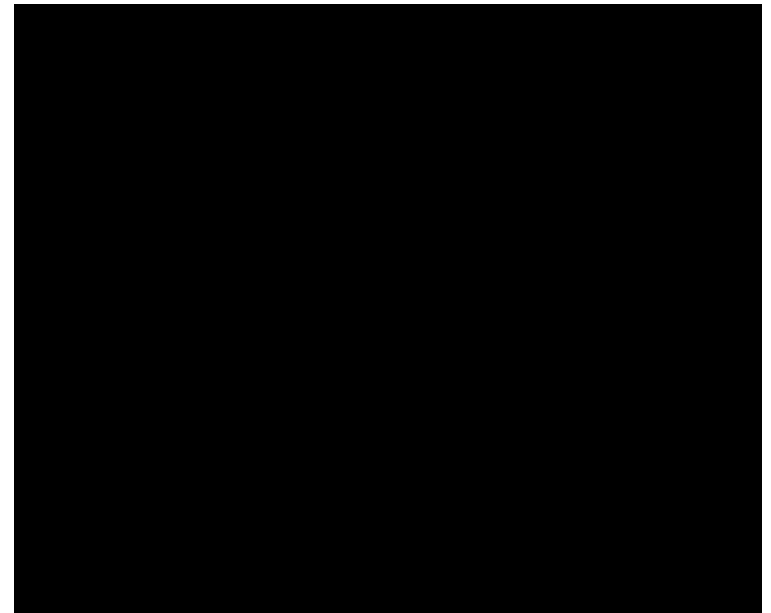


Fig. III.2.22: Estiramento de peça tubular longa sobre mandril, em uma prensa hidráulica [7]



# OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- Furação;

- Abertura de um furo em uma peça, geralmente por meio de um punção de formato apropriado.



# Furação

Aplicação de punção ou mandril sobre a peça.

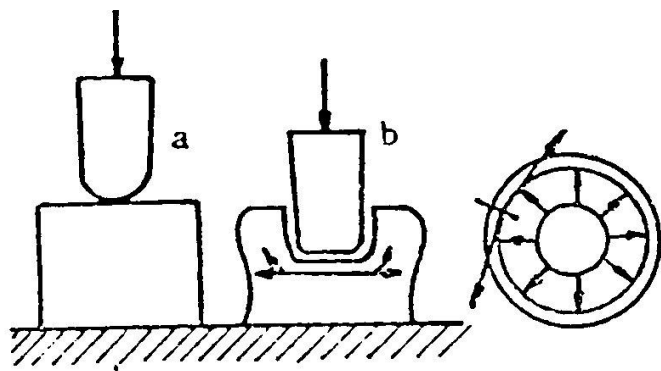


Fig. III.2.27: (a) Início do processo de furação; (b) fluxo de material durante a operação; (c) tensões trativas secundárias que surgem na peça [2].

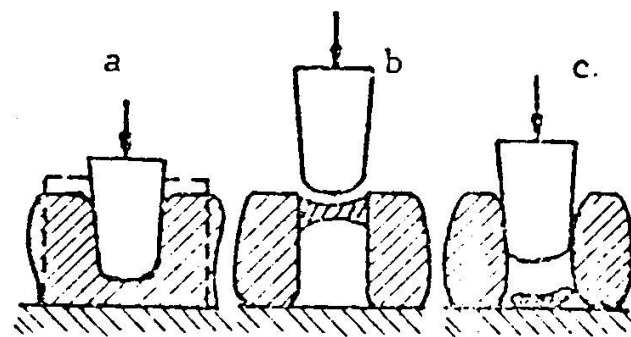


Fig. III.2.28: Abertura de um furo passante com auxílio de um punção flutuante maciço [2].

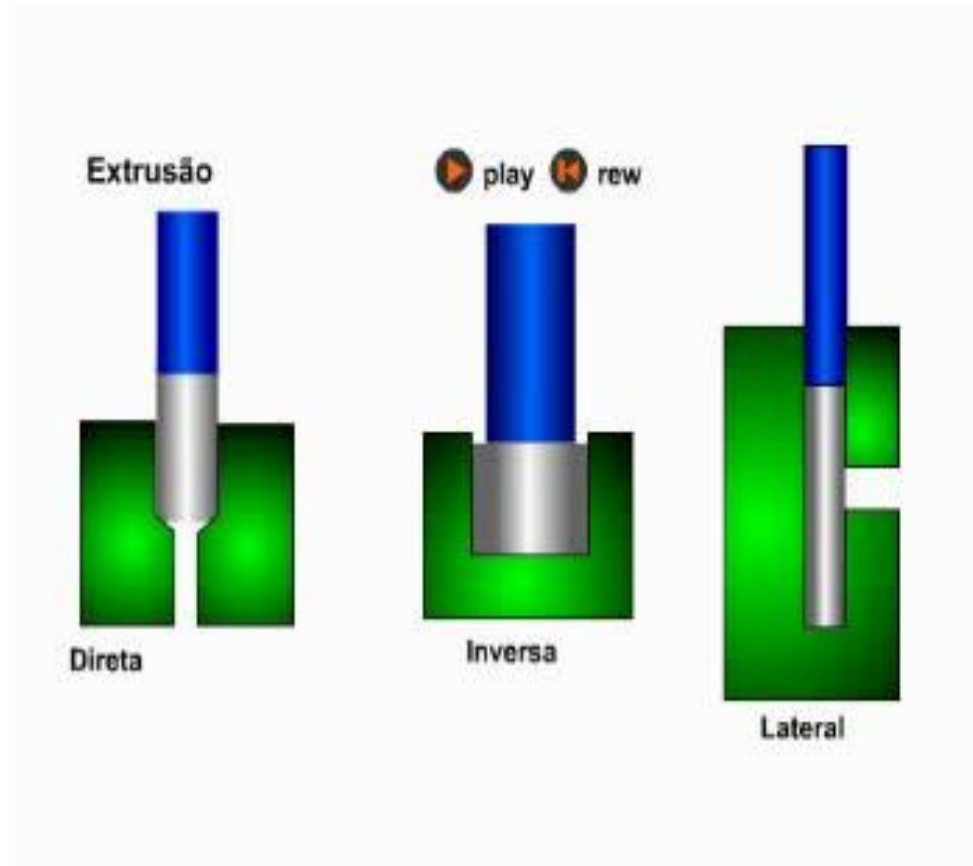


# OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- Extrusão;

- O material é forçado a passar através de um orifício de secção transversal menor que a da peça.

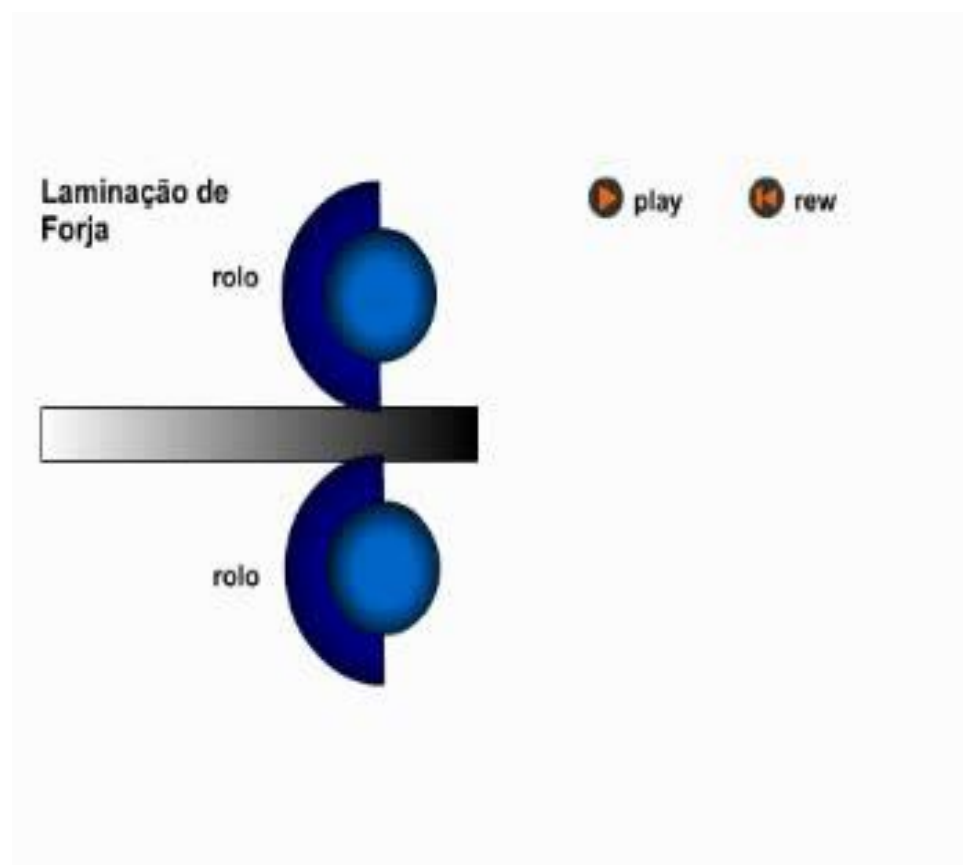


# OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- Laminação de forja;

- Redução e da secção transversal de uma barra passando-a entre dois rolos que giram em sentidos opostos, tendo cada rolo um ou mais sulcos de perfil adequado, que se combina com o sulco correspondente do outro rolo.

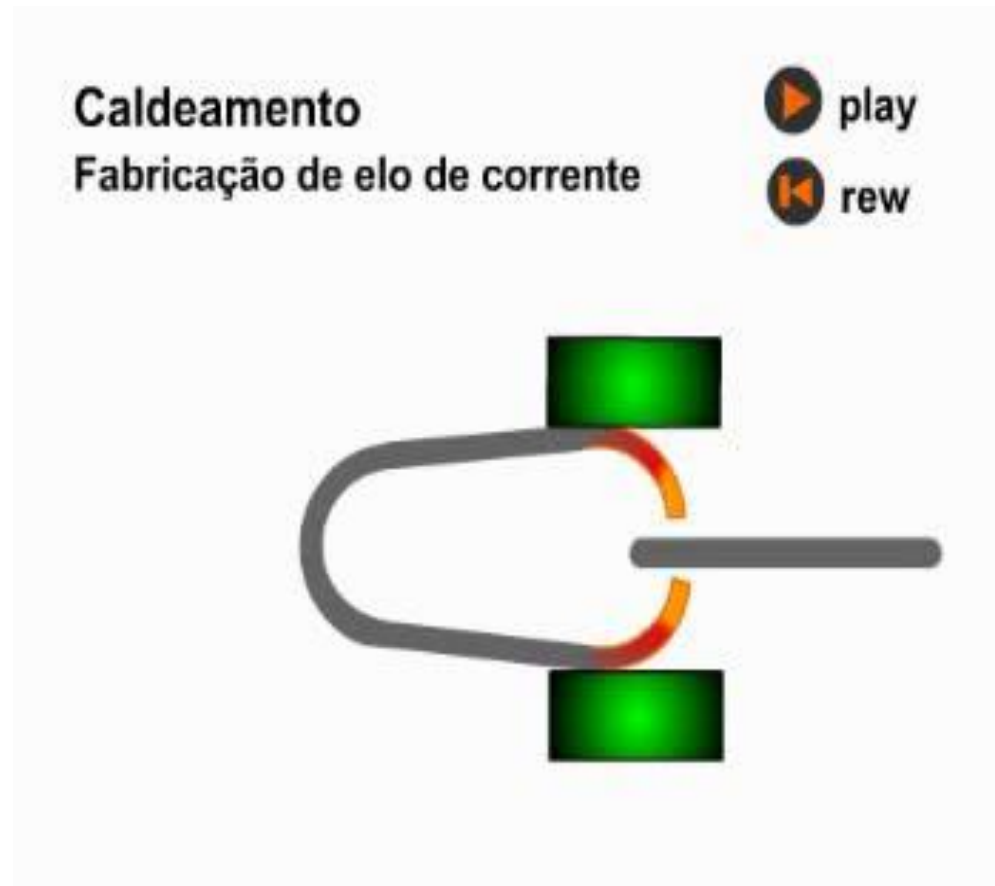


# OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- Caldeamento;

- Visa produzir a soldagem de duas superfícies metálicas limpas, postas em contato, aquecidas e submetidas à compressão.

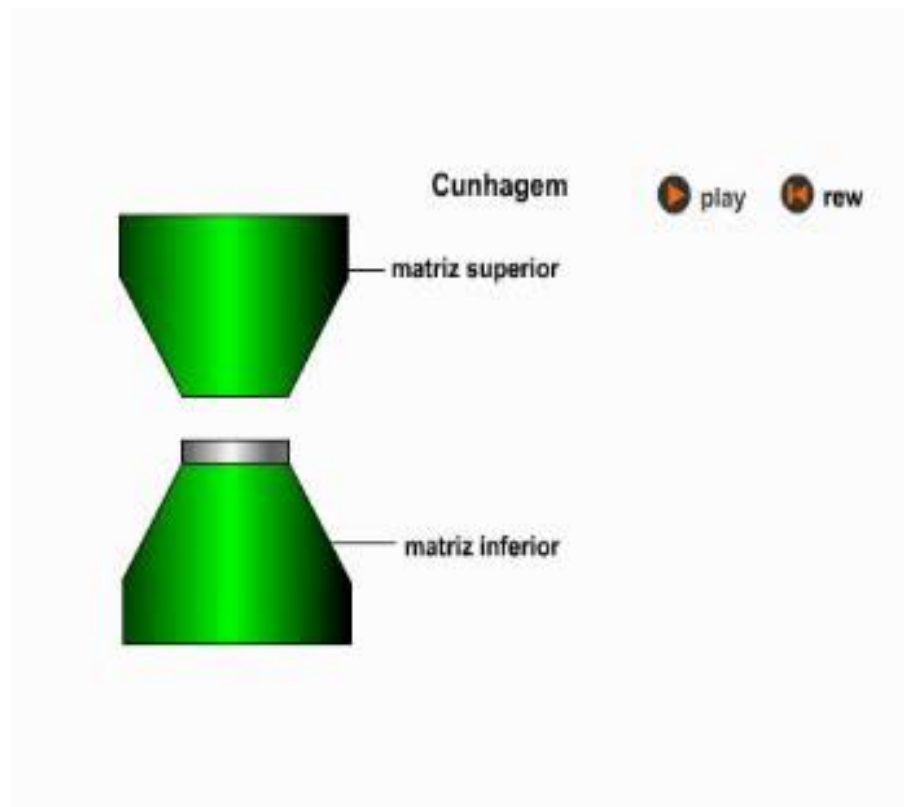


# OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- **Cunhagem;**

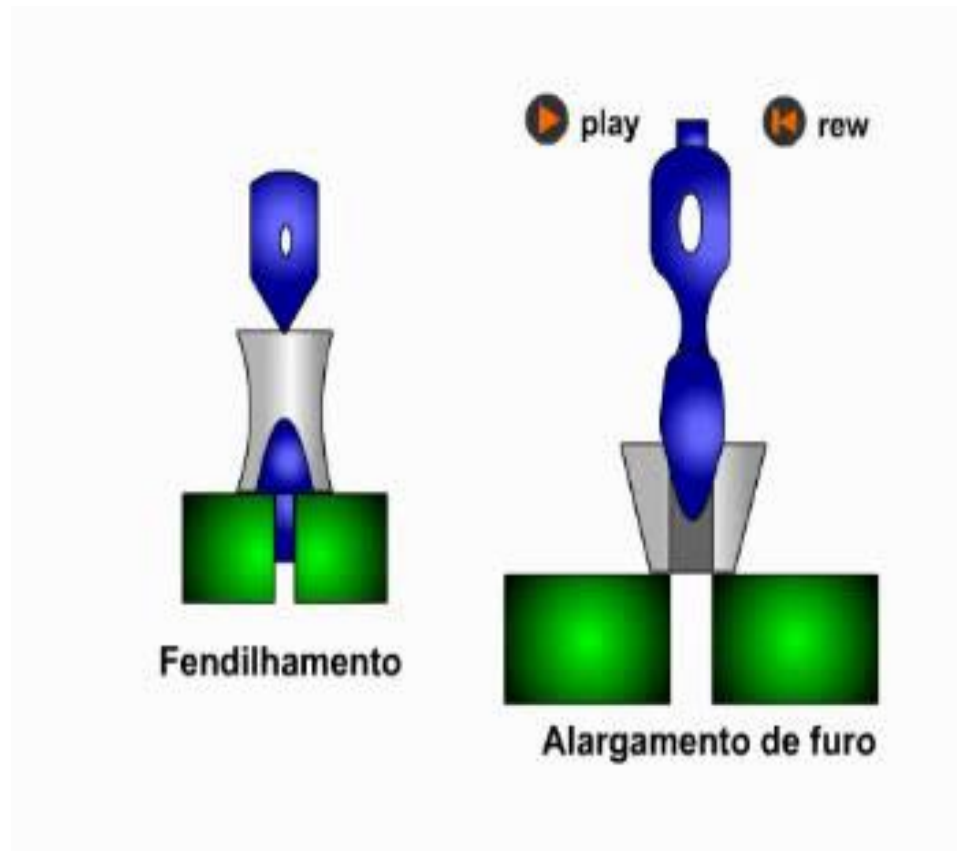
- Geralmente realizada a frio, empregando matriz fechada ou aberta, visa produzir uma impressão bem definida na superfície de uma peça, sendo usada para fabricar moedas, medalhas talheres e outras peças pequenas, bem como para gravar detalhes de diversos tipos em peças maiores.



# OPERAÇÕES UNITÁRIAS

- Fendilhamento;

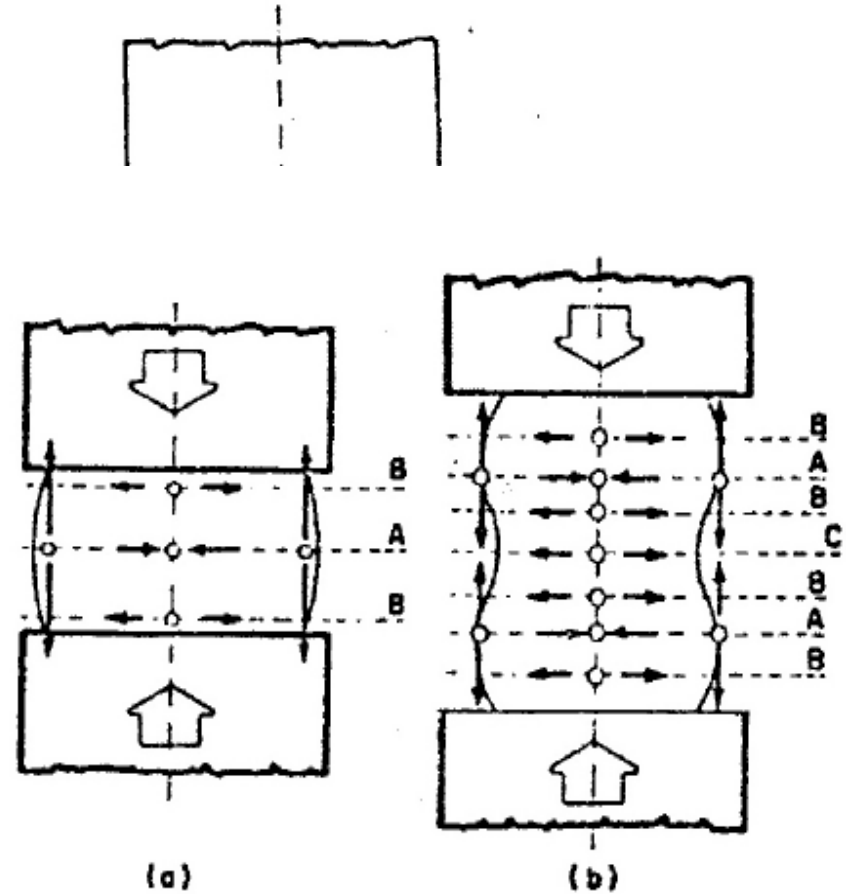
- Consiste em separar o material, geralmente aquecido, por meio de um mandril de furação provido de gume; depois que a ferramenta foi introduzida até a metade da peça, esta é virada para ser fendilhada do lado oposto.



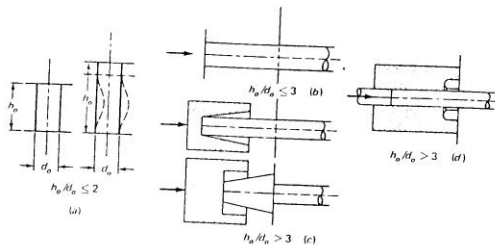
# CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

- Recalque de peças cilíndricas;

- Deformação homogênea e heterogênea;
- Aumento da pressão na interface;
- Zona de fluxo restringido;
- Barrilamento;
- Para  $h/D < 1,4$  – um bojo;
- Para  $h/D = 1,4$  e  $1,6$  – dois bojos;
- Para  $h/d > 1,6$  ?? e  $h/d > 3$  ???



– T€



referências;

Fig. III.2.11. Limites impostos pela flambagem no recalque de peças longas (a) entre matrizes planas; (b) no encabeçamento simples de uma barra; (c) no encabeçamento com pré-forma cônica; e (d) no encabeçamento com estampo-guia e matriz fechada [5]

# CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

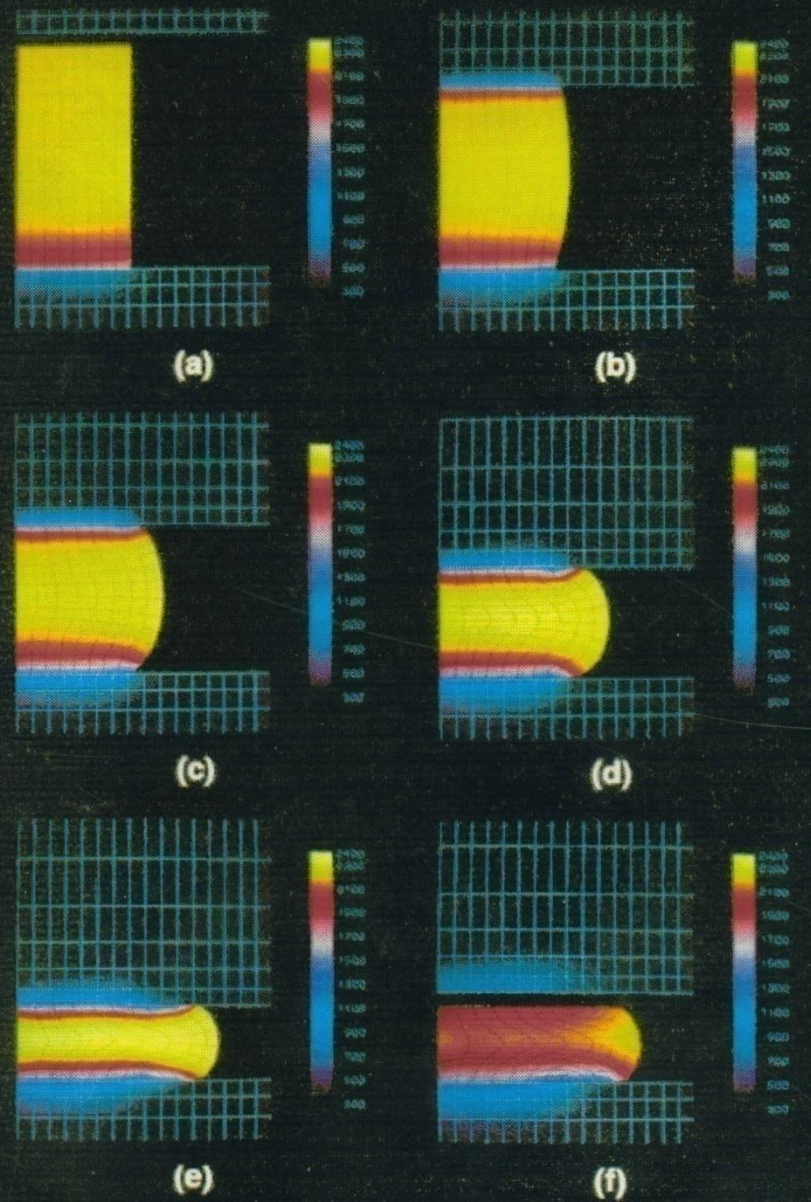
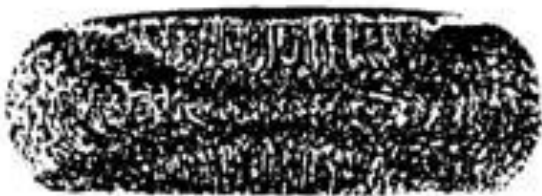
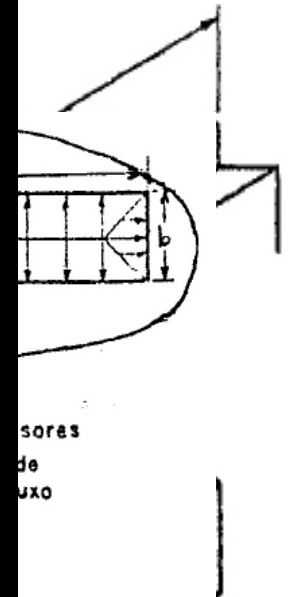
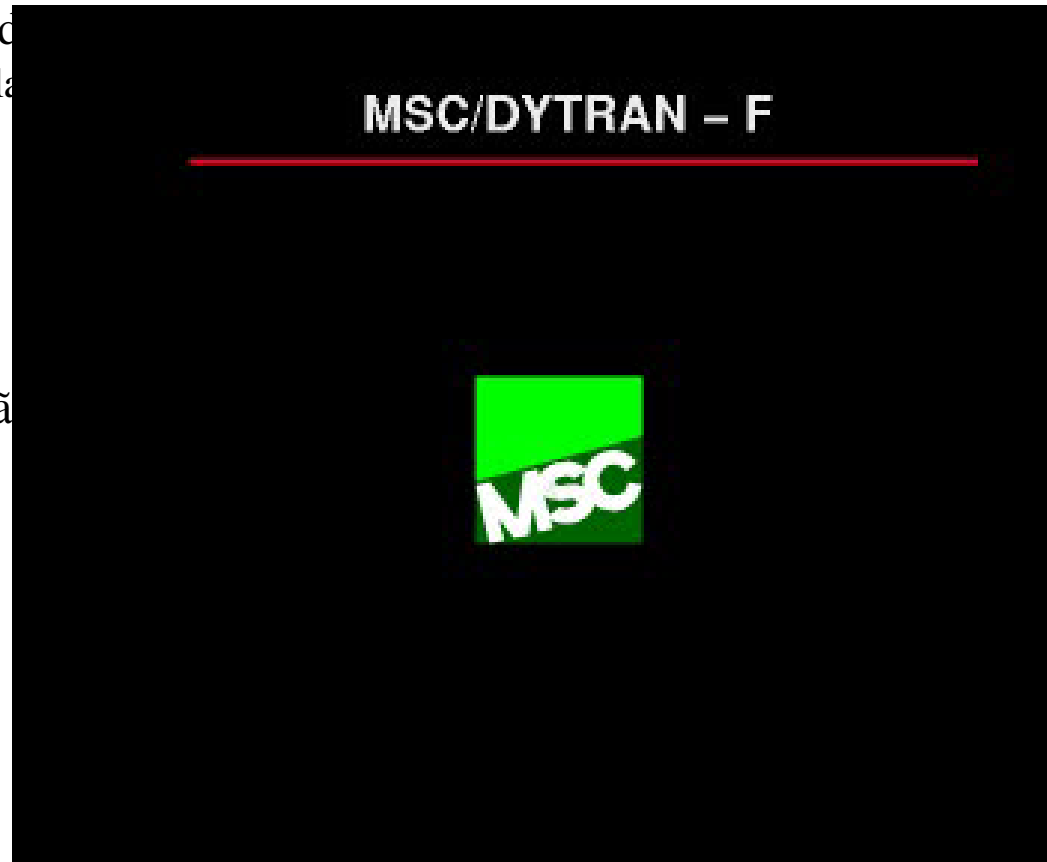


FIG. 12.4 Predicted temperature distributions and grid distortions at various stages of hot compression process [22]. (a) At the end of free resting (elapsed time  $t = 6s$ ); (b) 16.67% reduction in height ( $t = 6.375s$ ); (c) 33.34% reduction in height ( $t = 6.750s$ ); (d) 50.00% reduction in height ( $t = 7.125s$ ); (e) 66.67% reduction in height ( $t = 7.500s$ ); (f) at the end of 3s free resting after deformation ( $t = 10.5s$ ).

# CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO



- Recalque de peças prismáticas;
  - Secções transversais tendem a se arredondar;
  - Divisores de fluxo
    - Controla
  - Custo;
  - Deformação





# Recalque, estiramento, rolamento



# FORJAMENTO EM MATRIZ FECHADA

- Matriz em duas metades (impressões);

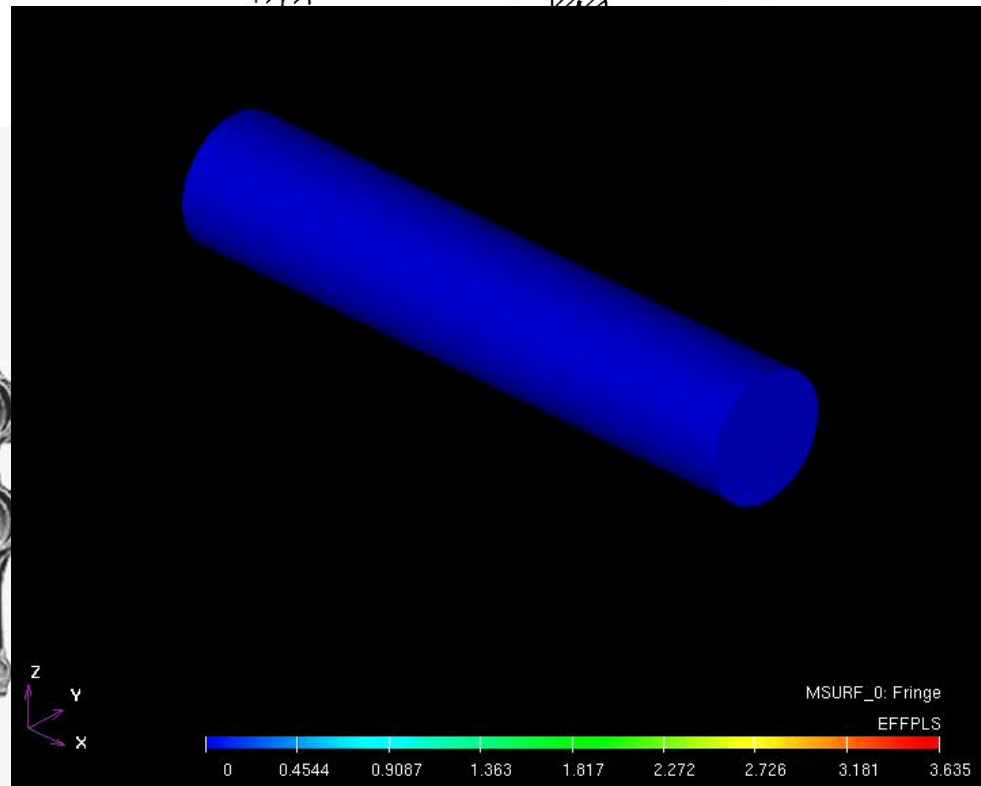
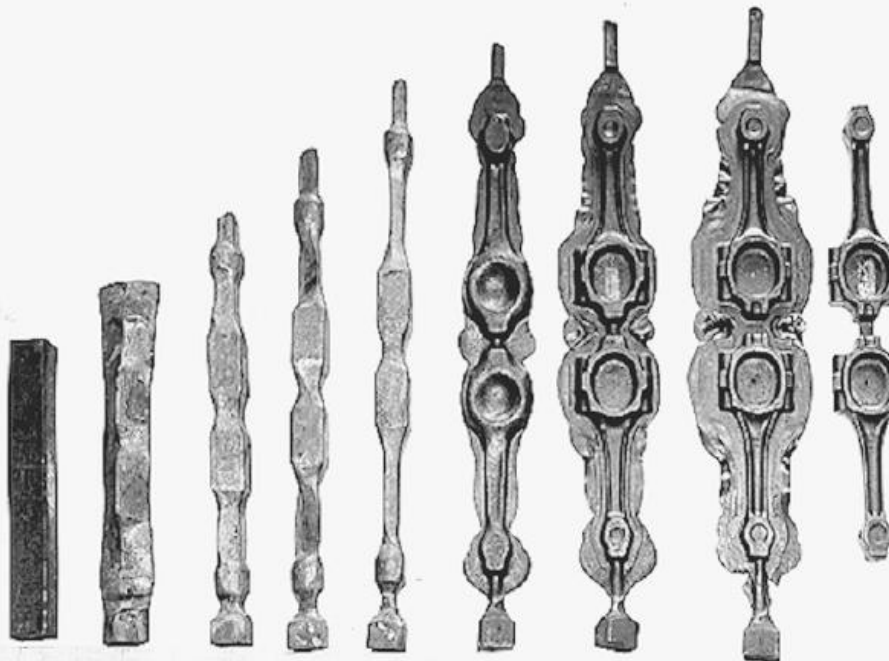
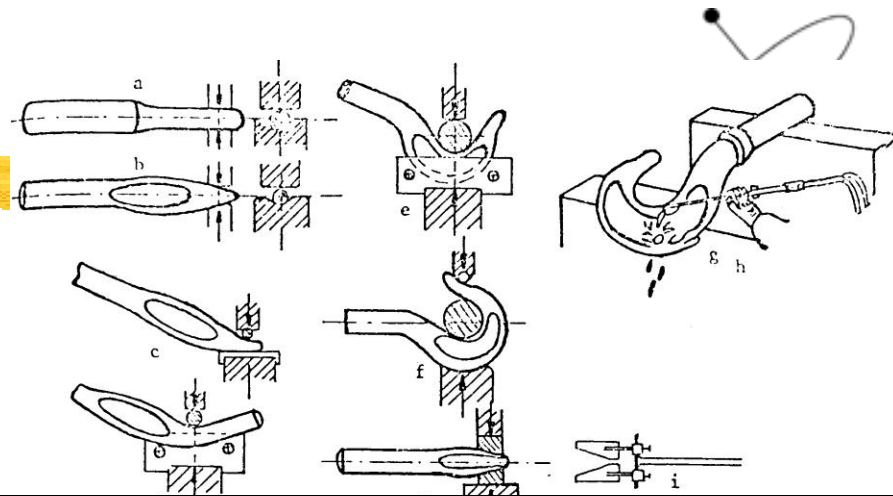


# FORJAMENTO EM MATRIZ FECHADA



# FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA / FECHADA

- Operações intermediárias;
  - Distribuição de massa;
  - Dobramento;
  - Formação as secção transversal;

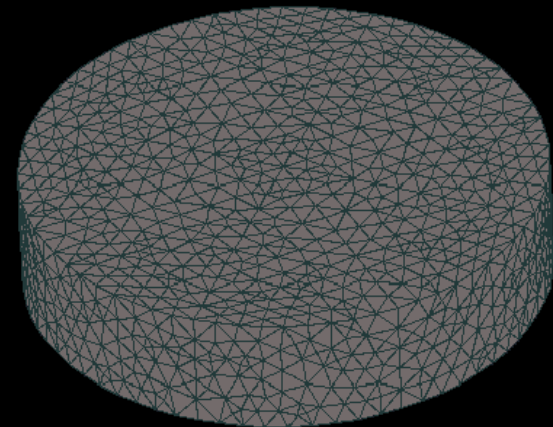


# FORJAMENTO EM MATRIZ FECHADA

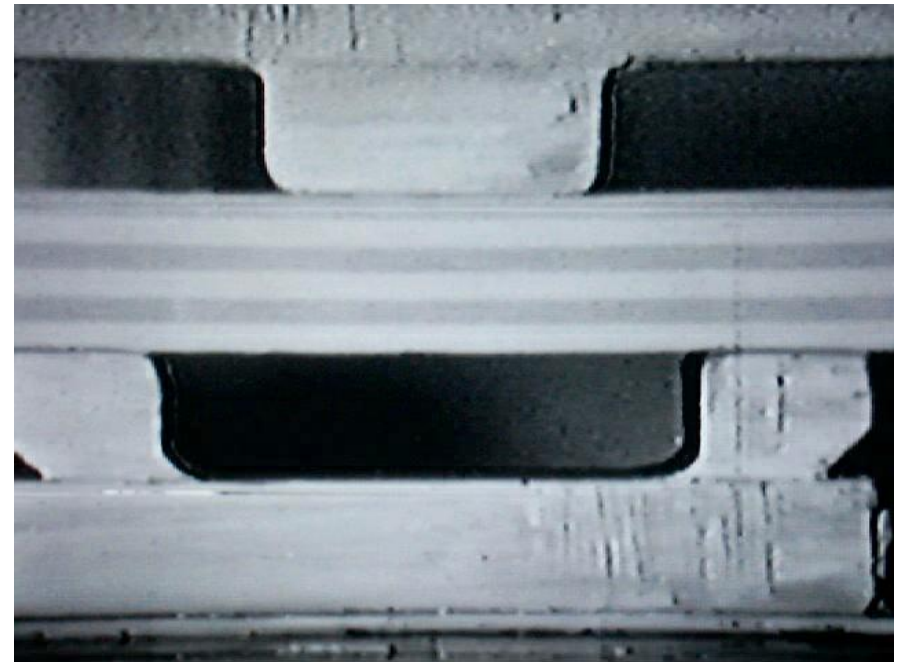
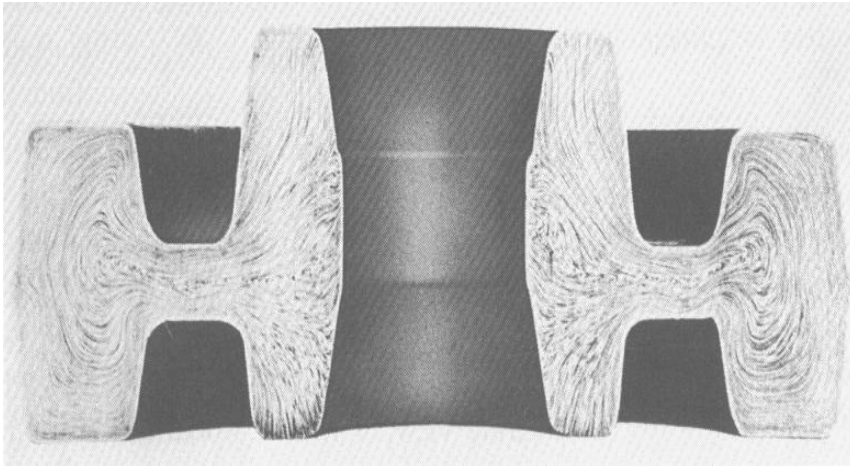


Formato do tarugo inicial

Step -1 Strain ( Effective )



# FIBRAMENTO MECÂNICO NO FORJAMENTO



# CLASSIFICAÇÃO DE SPIES

## Classificação das formas de peças forjadas em matriz



















Clas. à fo. Form	Classe quanto à forma 3 Formas muito alongadas  $l > b \geq h$	Sub-grupo	Sem elementos subsidiários	Elementos subsidiários paralelos ao eixo da forma principal	Com elemento bifurcado aberto ou fechado	Com elementos subsidiários assimétricos ao eixo da forma principal	Com dois ou mais elementos subsidiários de tamanhos similares
		Grupo quanto à forma					
Este e os	Grupos de partes com comprimento de eixo longitudinal pronunciado: 1. Partes curtas $l > 3b$ 2. Comprimento médio $l = 3 \dots 8b$ 3. Partes longas $l = 8 \dots 16b$ 4. Partes muito longas $l > 16b$ O número do grupo devido ao comprimento é adicionado após uma barra: exemplo: 334/2	31	311 	312 	313 	314 	315 
		32	321 	322 	323 	324 	325 
		33	331 	332 	333 	334 	335 

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

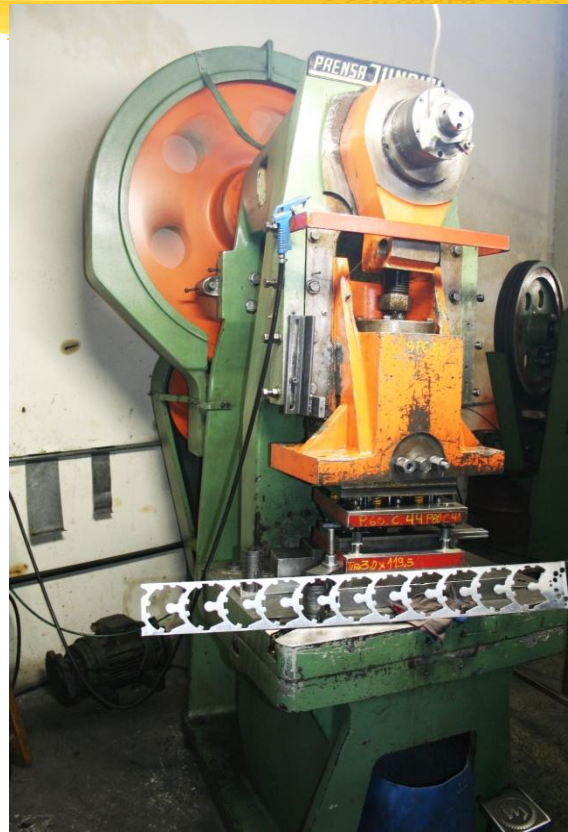
# OPERAÇÕES SECUNDÁRIAS



- Rebarbação;
    - Prensa de excêntrica;
  - Furação;
  - Desempeno;
  - Calibragem.
- 
- Acabamento superficial;
    - Tamboreamento;
    - Jateamento;
    - Decapagem química;
      - Neutralização.



# PROCESSO PRODUTIVO



- ⌘ Posteriormente ela é levada para uma prensa excêntrica que faz um recorte em três estágios para garantir alta qualidade dos furos.

# PROCESSO PRODUTIVO



- ⌘ A cada 11 peças é feita uma verificação dimensional e de qualidade do processo

# PROCESSO PRODUTIVO



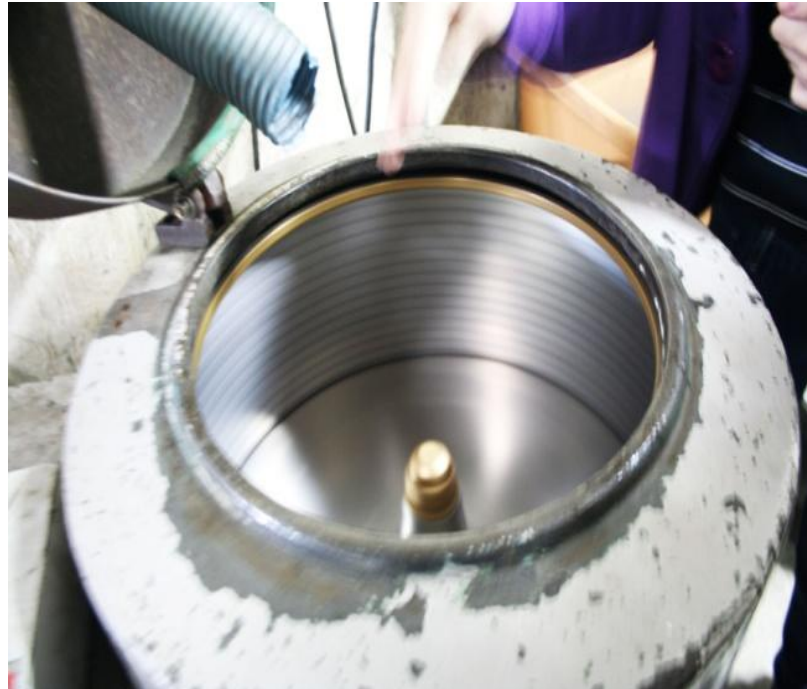
- ⌘ Na seqüência a peça sofre um processo de tamboreamento (tambor vibratório cheio de chips de porcelana) que tem por objetivo polir e tirar as rebarbas do produto.

# PROCESSO PRODUTIVO



- ⌘ O produto é, então, encaminhado para um processo de lavagem com detergente neutro, para não manchar o alumínio

# PROCESSO PRODUTIVO



- ⌘ Coloca-se, então o produto em uma centrífuga equipada com um assoprador de alta potência para uma secagem de boa qualidade.

# REBARBAÇÃO



- Funções da rebarba;
  - Válvula de segurança;
  - Regular o escapamento do metal em excesso.

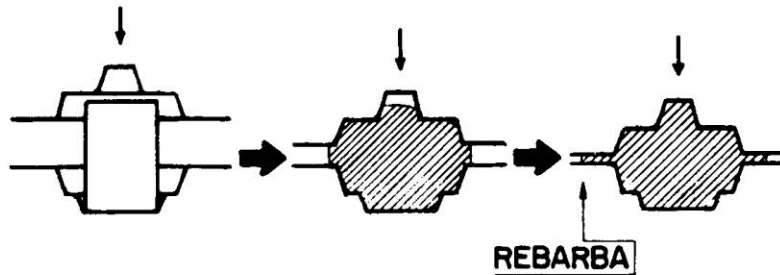


# REBARBAÇÃO

- Deve-se dimensionar a rebarba de modo que a extrusão do metal através da garganta seja mais difícil do que o preenchimento do mais intrincado detalhe das matrizes;
- Um dimensão excessiva da rebarba, pode criar cargas de forjamento intensas demais, resultando em problemas de desgaste ou quebra das matrizes.
  - Para peças complexas, projetar b/h alto;
  - Para peças simples, projetar b/h baixo;



# Dimensionamento da rebarba



## Tipos de bacia de rebarba

Fig. 7.7 Formação de rebarbas durante o forjamento em matrizes fechadas.

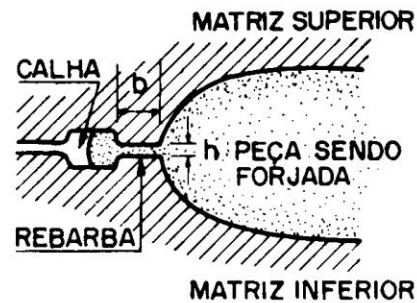
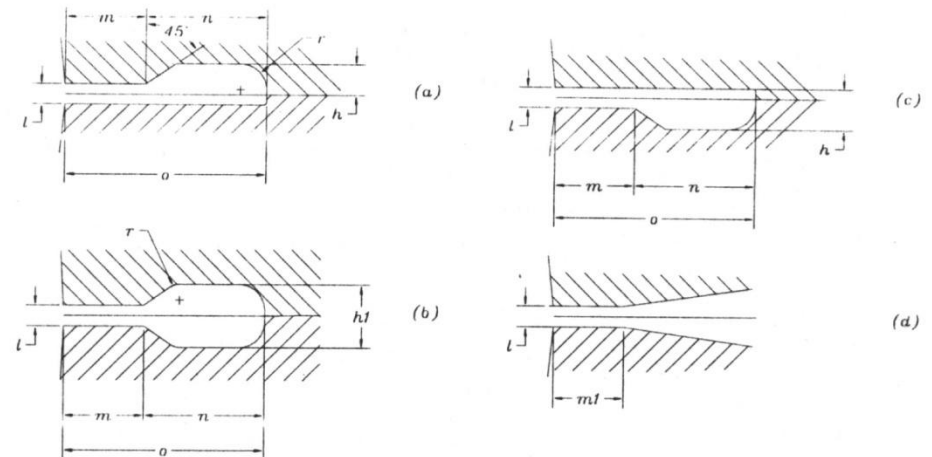


Fig. 7.8 Calha para evitar a extensão exagerada da rebarba.





# CRITÉRIOS DE PROJETO

- Projeto de peças e matrizes;

- As paredes laterais da peças recalçadas devem ter, sempre que possível, a forma arredondada;

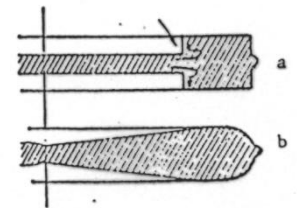
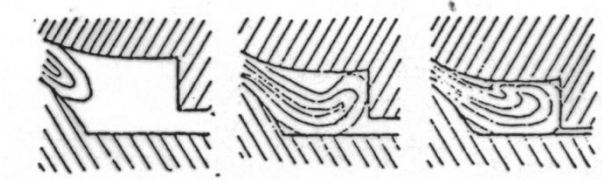
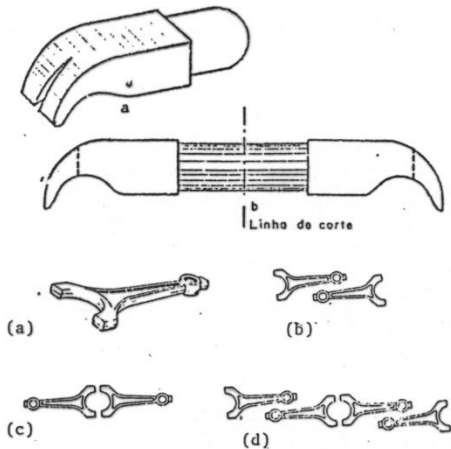
- Devem ser evitados cantos vivos;

- Todas as superfícies paralelas à direção de forjamento devem ser inclinadas e com alma progressiva;

- Devem ser evitados furos finos (normais à direção de forjamento);

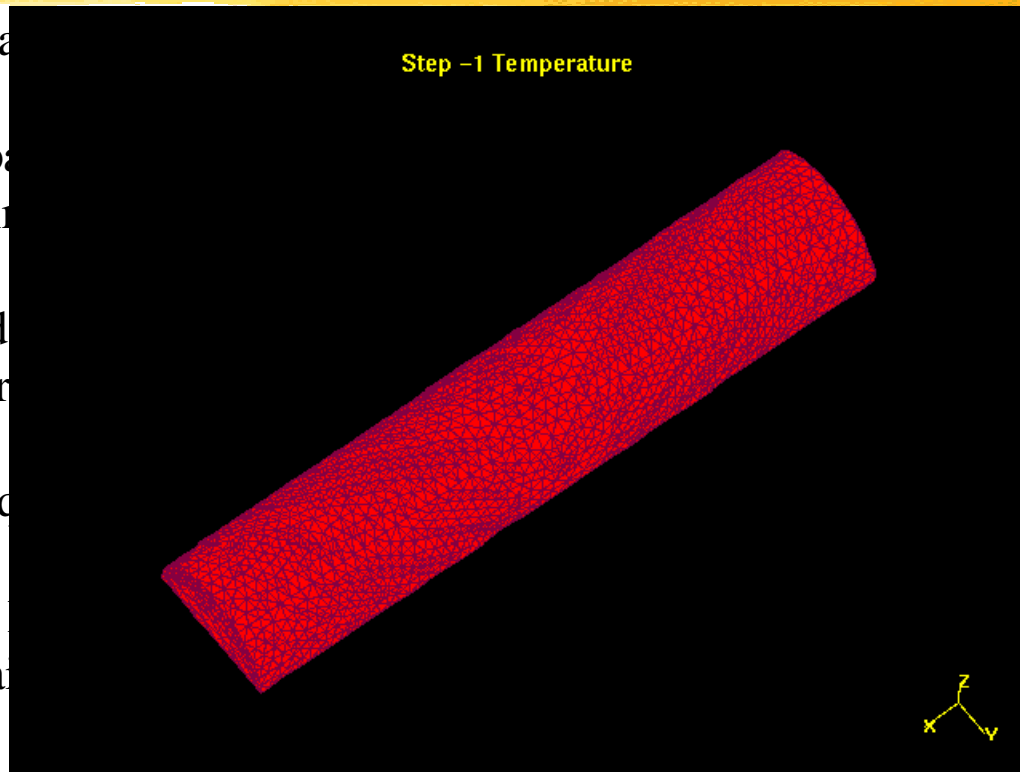
- Devem-se evitar encaixes (reentrâncias laterais);

- Devem-se evitar peças com grande assimetria de forma e volume;



# CRITÉRIOS DE PROJETO

- Não forjar
- A rebarba
- preenchido
- Subdividido
- posterior
- Sempre c
- Deve-se
- obter ma



remoção e ao

tualmente,

usinagem;

s, de modo a se

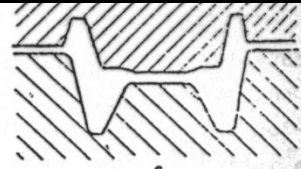
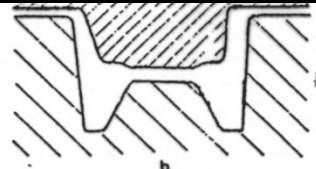
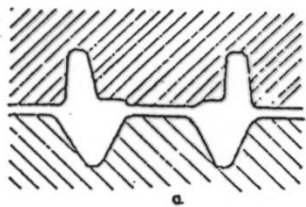
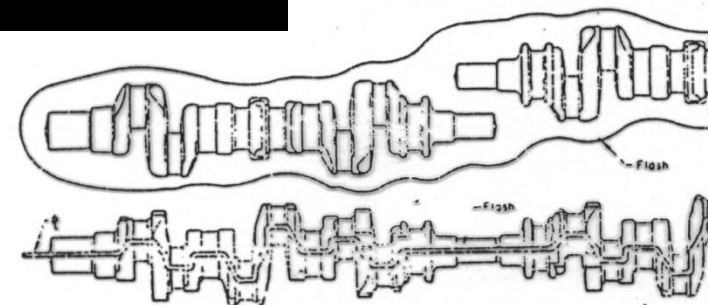
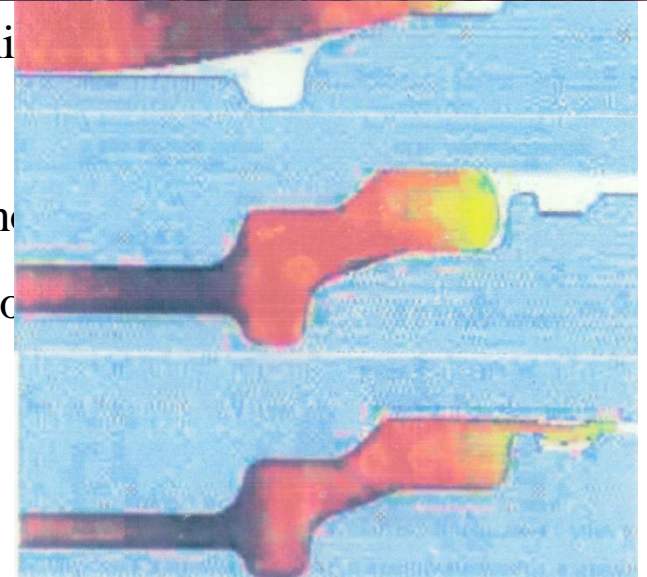


Fig. III.3.18: Exemplo de posicionamento da rebarba influenciando na qualidade da peça: (a) posição desfavorável; (b) posição que assegura boa qualidade, mas implica em matrizes muito caras; (c) solução intermediária, com melhor desempenho que (a) e menor custo que (b).



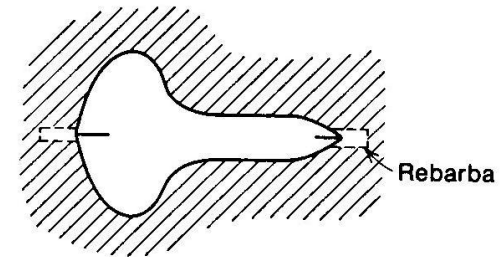
# CRITÉRIOS DE PROJETO

- Simulações numéricas;
  - Estudar as características de escoamento;
  - Facilitar o desenvolvimento de matrizes;
  - Reduzir os custos e os tempos associados;
- Aquecimento das peças;
  - Conformação a quente é utilizada de modo a diminuir a força necessária para a deformação do material;
  - O aquecimento pode ser realizado através de forno, porém há o problema de empobrecimento superficial de carbono.



# DEFEITOS DE FORJADOS

- Penetração incompleta do forjamento;
  - Deformação superficial;
  - Utilizar máquinas de maior capacidade;
- Trincamento superficial;
  - Temperatura insuficiente;
  - Tensões secundárias trativas;
  - Controlar os parâmetros do processo;
- Trincamento devido a rebarbação;
  - A trinca pode penetrar na peça;
  - Projetar a rebarba com  $b/h$  baixo;
  - Posicionar corretamente a rebarba;



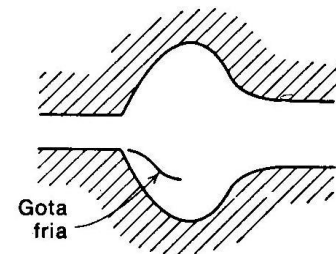
(a)

# DEFEITOS DE FORJADOS



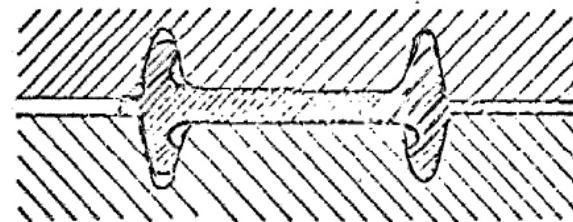
- Defeitos de dobra:

- Descontinuidade originada quando duas superfícies do metal se dobras uma contra a outra;
- Preenchimento parcial devido ao canto vivo;
- Resfriamento localizado e atrito excessivo;



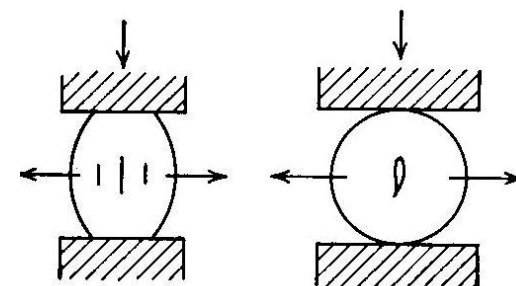
- Falha de enchimento:

- Ocorre quando um determinado local profundo da matriz não é preenchido;
- Atrito excessivo;
- Presença de resíduos de lubrificante ou carepa;
- Evita detalhes finos (resfriamento local);



- Trincamento interno:

- Resultado das tensões trativas secundárias;
- Adequação das ferramentas;



# EQUIPAMENTOS DE FORJA

Quadro 16.1 Valores típicos da velocidade para diferentes equipamentos de forja †

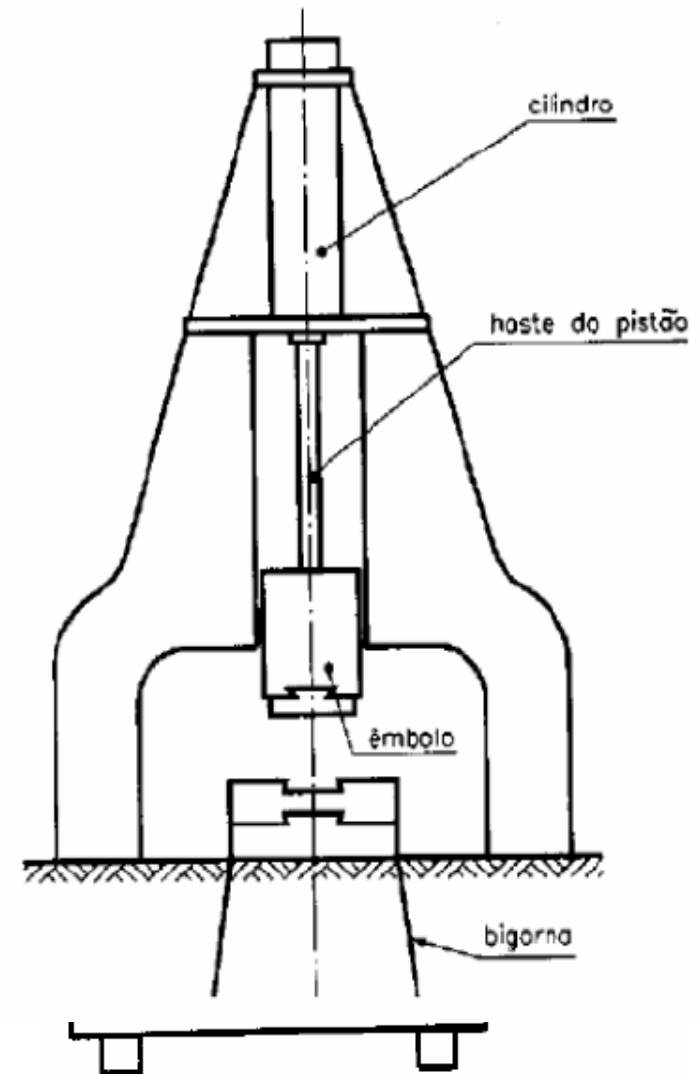
<i>Máquinas de forja</i>	<i>Faixa de velocidade</i>	
	<i>pés/s</i>	<i>m/s</i>
Martelo de queda livre	12—16	3,6—4,8
Martelo mecânico	10—30	3,0—9,0
Máquinas HERF	20—80	6,0—24,0
Prensas mecânicas	0,2—5	0,06—1,5
Prensas hidráulicas	0,2—1,0	0,06—0,30



- Para uma seleção de engenharia, deve-se levar em conta principalmente a energia de conformação fornecida pela máquina;
- Martelos e prensas de fricção são máquinas de capacidade limitada, pois a conformação cessa quando a quantidade de energia disponível no golpe é entregue à peça, sendo necessário golpes adicionais se a peça ainda não estiver completamente forjada;
- Prensas excêntricas (rebarbação) e de manivela trabalham com um curso fixo, ou seja, a conformação estará concluída quando o excêntrico atingir o ponto morto inferior;
- Prensas hidráulicas são limitadas pela carga máxima fornecida, pois quando a força exigida se iguala à capacidade do equipamento, o êmbolo deste cessa.

# EQUIPAMENTOS

- Martelos de forja;
  - Golpes rápidos e sucessivos;
  - Deformação superficial.
  - Pontas de eixo, virabrequins;
- Prensas;
  - Compressão em baixa velocidade
  - Deformação resultante regular;



# EQUIPAMENTOS DE FORJA



- MARTELOS:
  - Martelos de bigorna:
    - Queda livre;
    - Queda acelerada (duplo efeito);
  - Martelos de contragolpe:
    - Verticais;
    - Horizontais;
- PRENSAS
  - Hidráulicas:
  - Mecânicas:
    - Verticais:
      - › Excêntrico (rebarbação);
      - › Manivela;
      - › Fricção;
    - Horizontais:
      - › Recalcadoras horizontais;

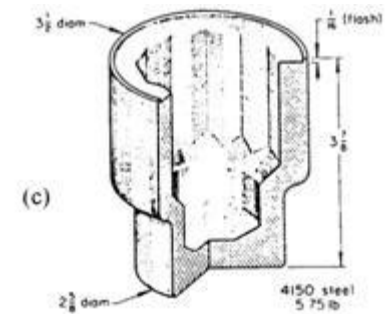
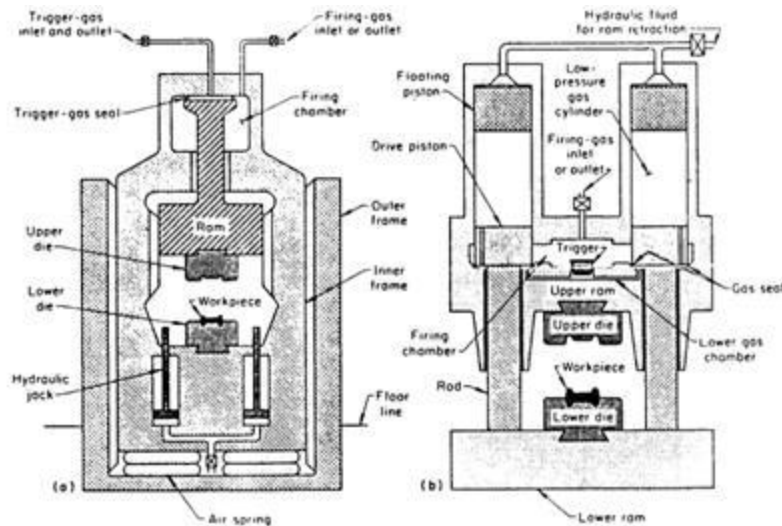


# EQUIPAMENTOS DE FORJA



- MÁQUINAS ESPECIAIS:

- Recalcadoras elétricas;
- Máquinas de forjamento rotativo;
- Máquinas de forjamento de alta energia (HERF);



# EQUIPAMENTOS DE FORJA

## FORJAMENTO ROTATIVO

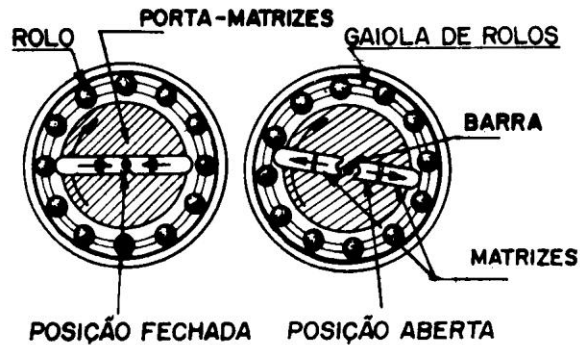


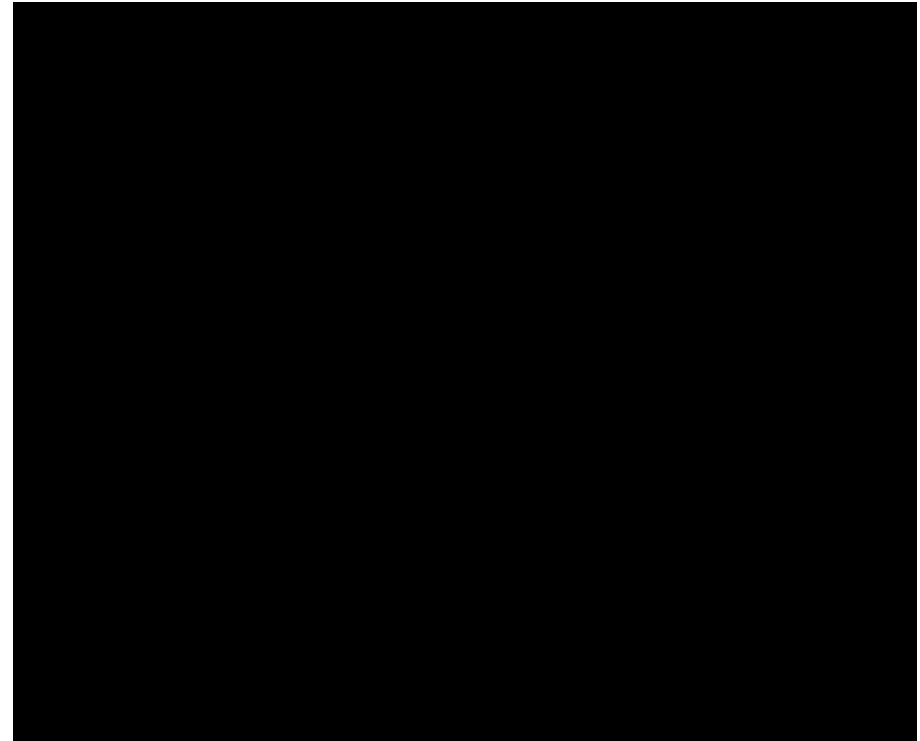
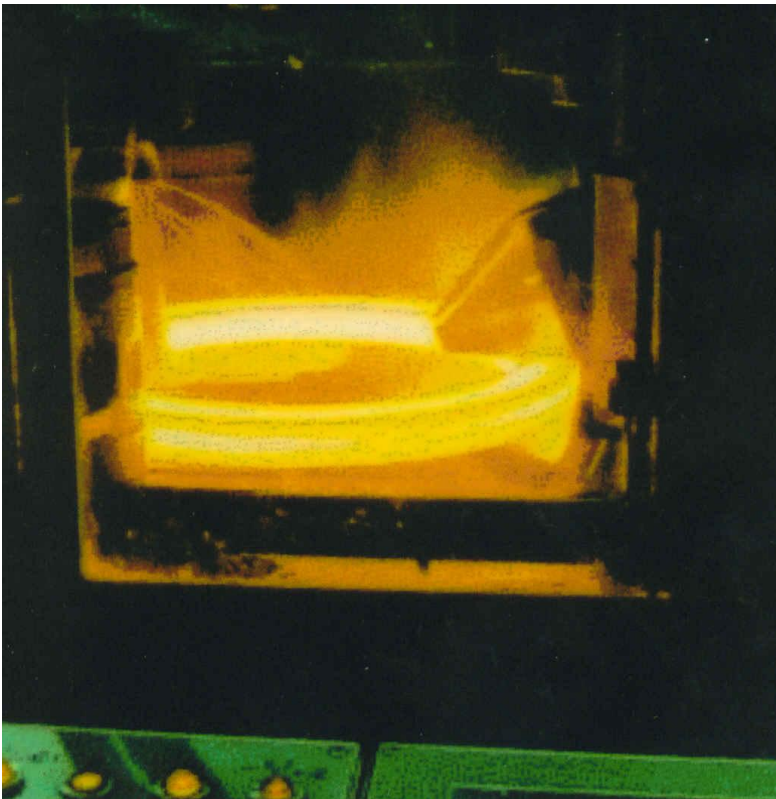
Fig. 7.13 Princípio de funcionamento de uma máquina de forjamento rotativo.



# EQUIPAMENTOS DE FORJA



LAMINADORES DE FORJAR (Rolamento);



# EQUIPAMENTOS DE FORJA

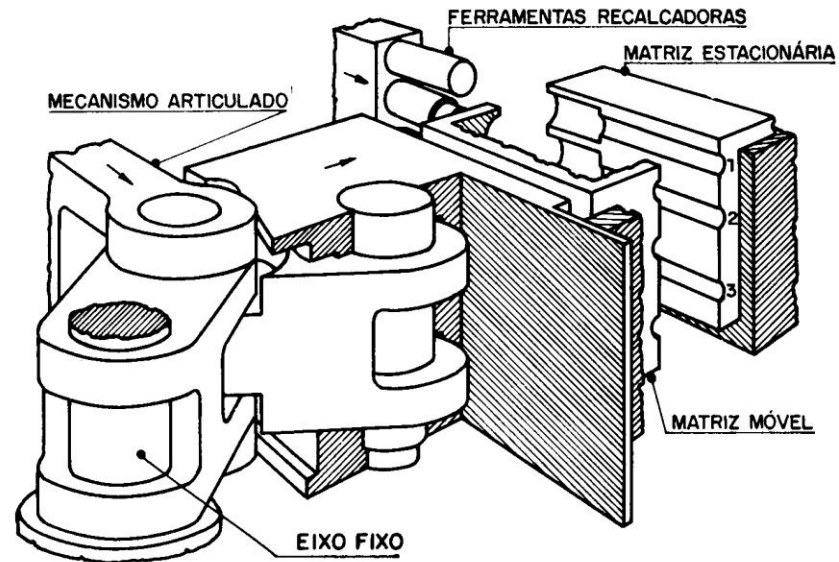


Fig. 7.11 Esquema de funcionamento de uma recalçadora.

## Recalçadora horizontal

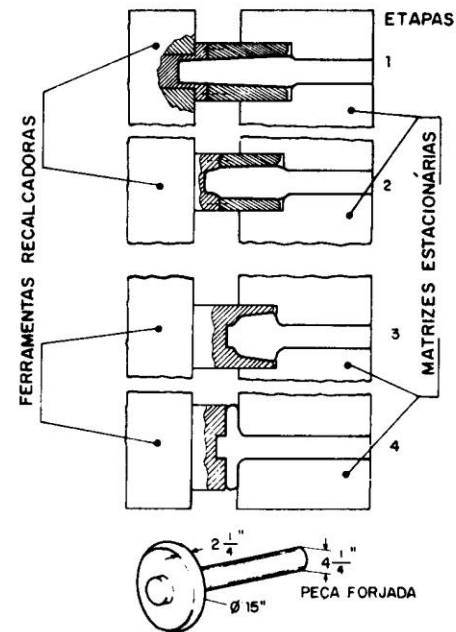
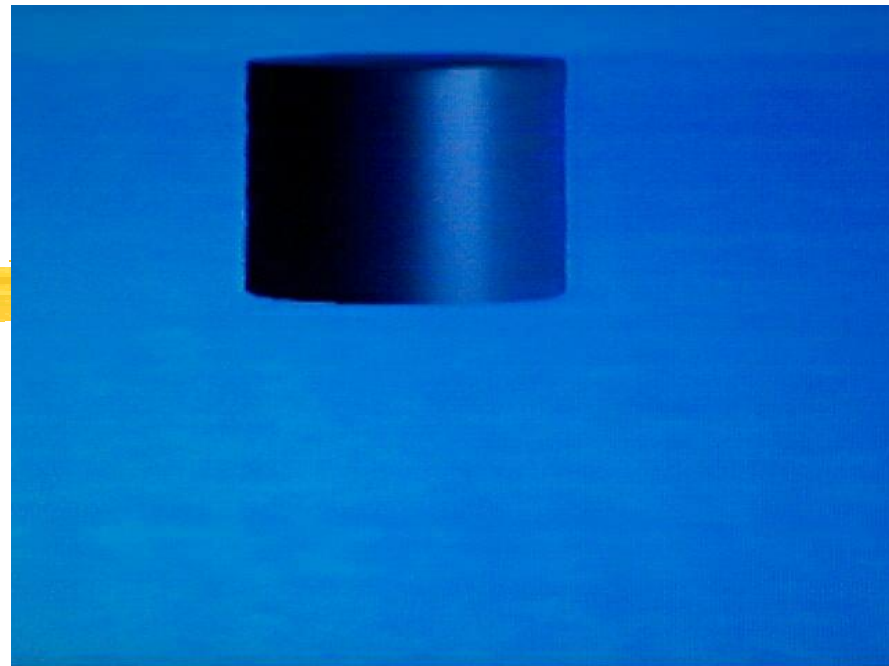


Fig. 7.12 Etapas de fabricação de peça típica de uma recalçadora.

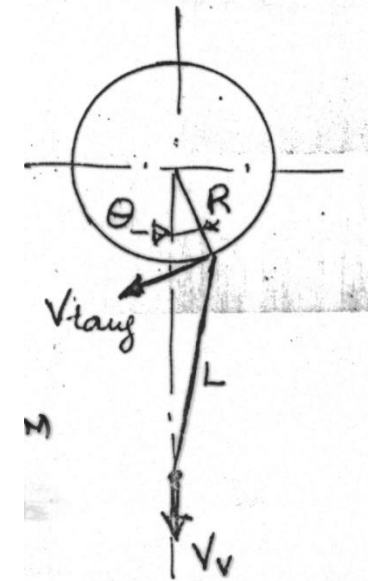
# Recalcadora horizontal: à frio e à quente



# EQUIPAMENTOS DE FORJA

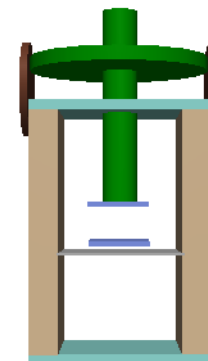


- Prensas de excêntrico;



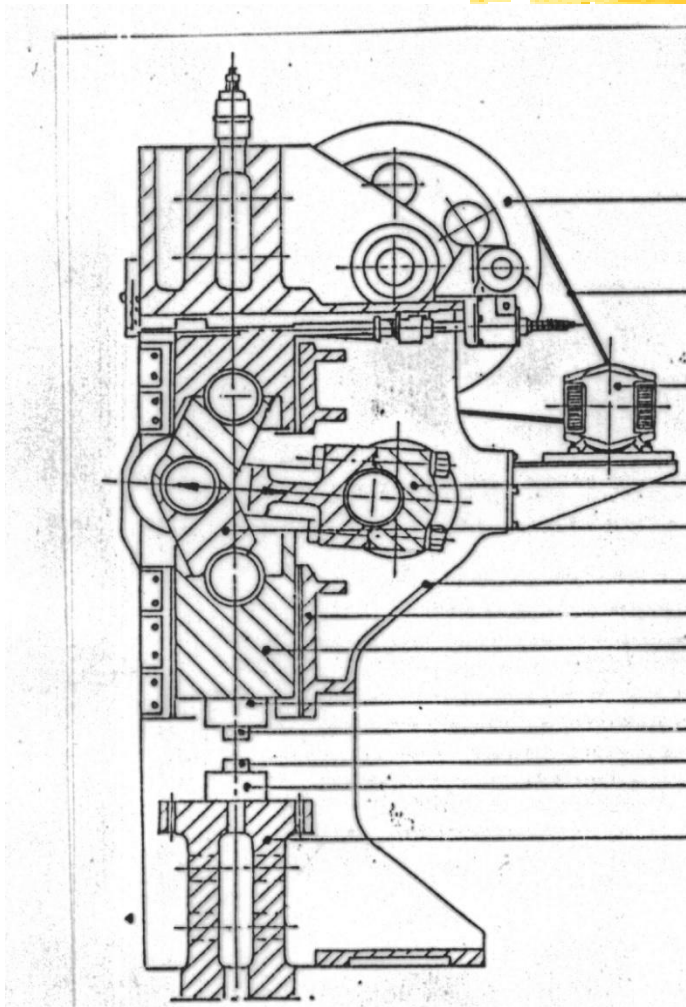
# EQUIPAMENTOS DE FORJA

- Prensa de fricção;



# EQUIPAMENTOS DE FORJA

- Prensa de joelho;

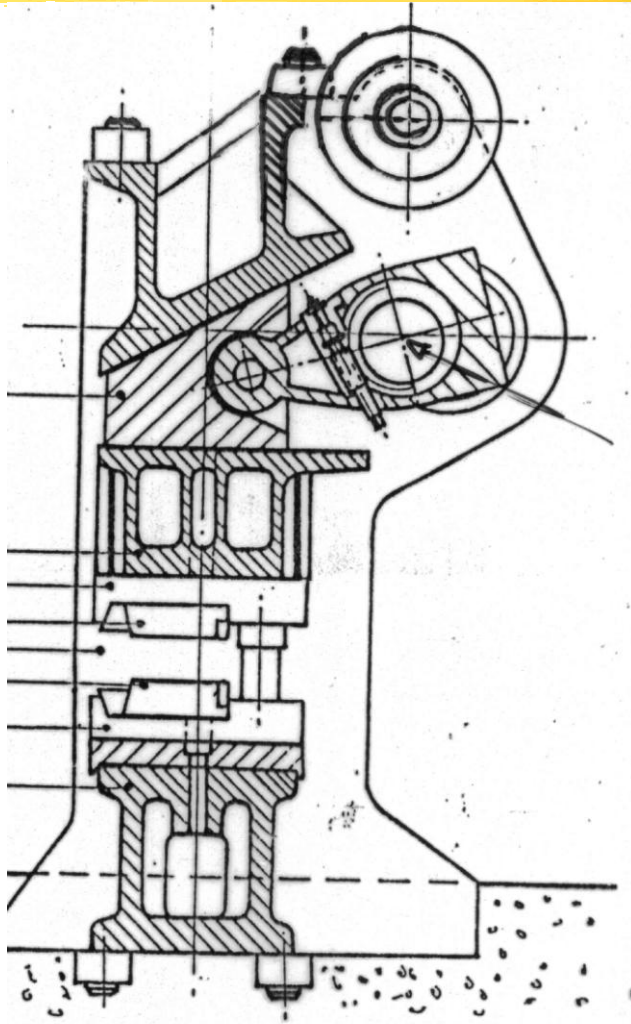


- Curso longo
- Bastante ríidas



# EQUIPAMENTOS DE FORJA

- Prensa de cunha;



- Bastante rígidas

# EQUIPAMENTOS DE FORJA



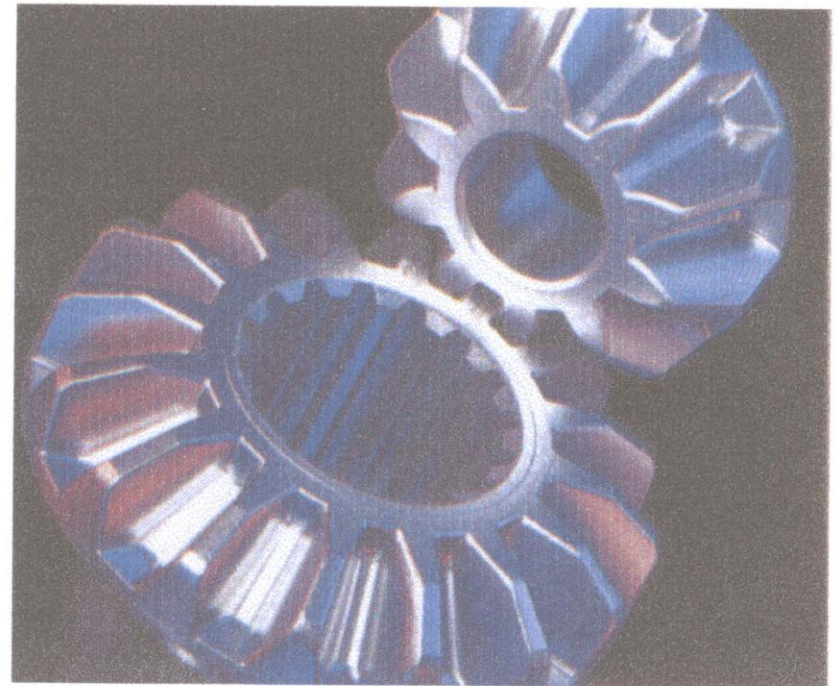
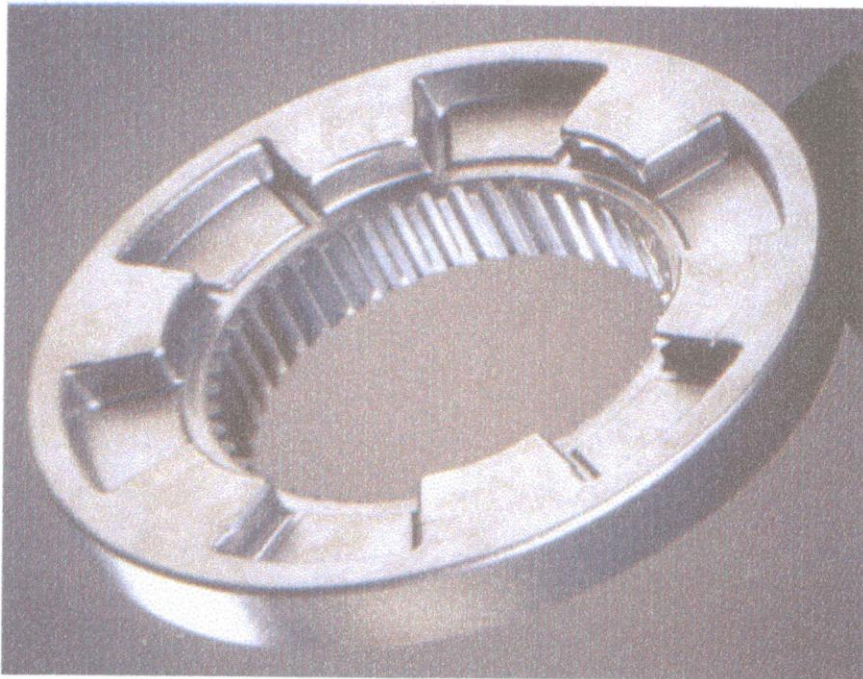
- Prensas hidráulicas;



# EQUIPAMENTOS DE FORJA

- Forjamento orbital;

## Forjamento Orbital



**Fig. 2.10** Stages in orbital forging

# Defeito X tipo de equipamento

