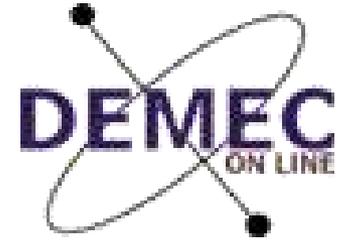




Labconf

Laboratório de Conformação Mecânica - UFPR



FORJAMENTO



Conformação – TMEC 027

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

CARACTERÍSTICAS GERAIS

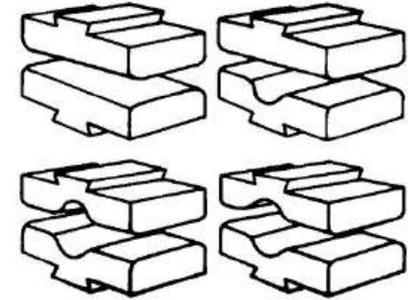


Fig. 7.1 Exemplos de matrizes para forjamento em matriz aberta.

- 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

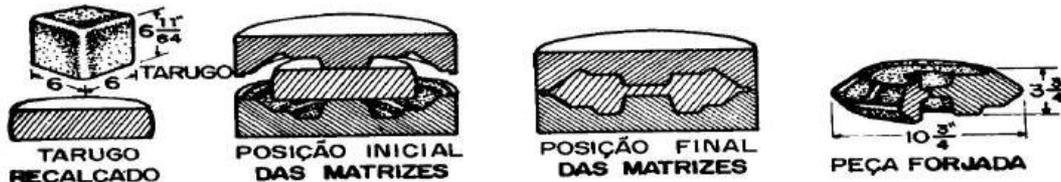


Fig. 7.2 Forjamento de uma peça em uma matriz fechada.

Nomenclatura típica de forjamento

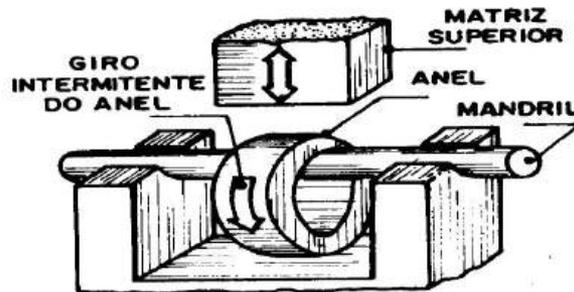


Fig. 7.3 Forjamento de um anel em matriz aberta.

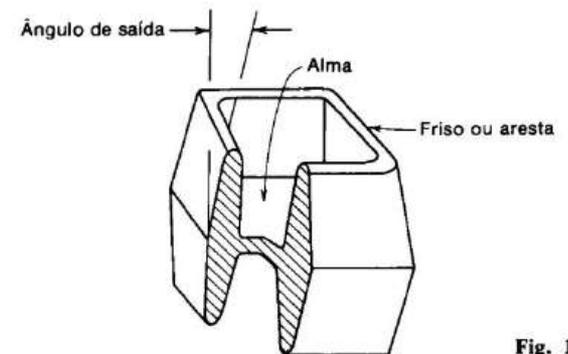


Fig. 16

FORJAMENTO LIVRE



- Matrizes planas e simples;

Conformação
Forjamento em Matriz Aberta



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

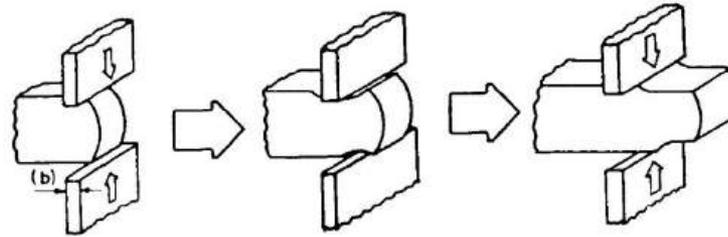


Fig. III.2.15: Esquema do estiramento à forja de uma barra prismática por mordidas sucessivas.

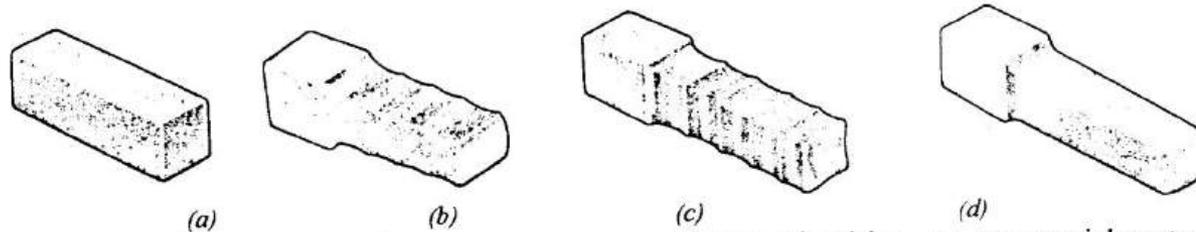
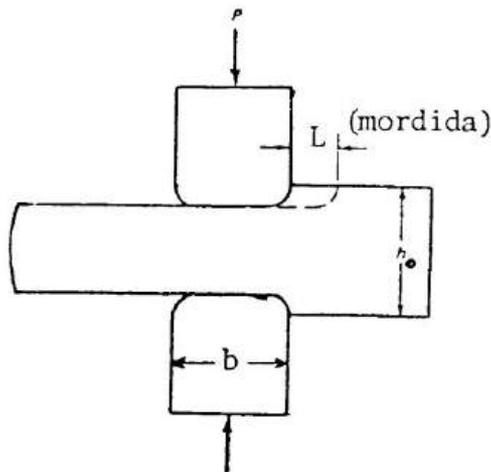


Fig. III.2.16: Formas sucessivas que assume uma barra prismática, ao ser parcialmente estirada à forja, mantendo a secção quadrada ao final [8].



Se a redução na espessura a ser efetuada é 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

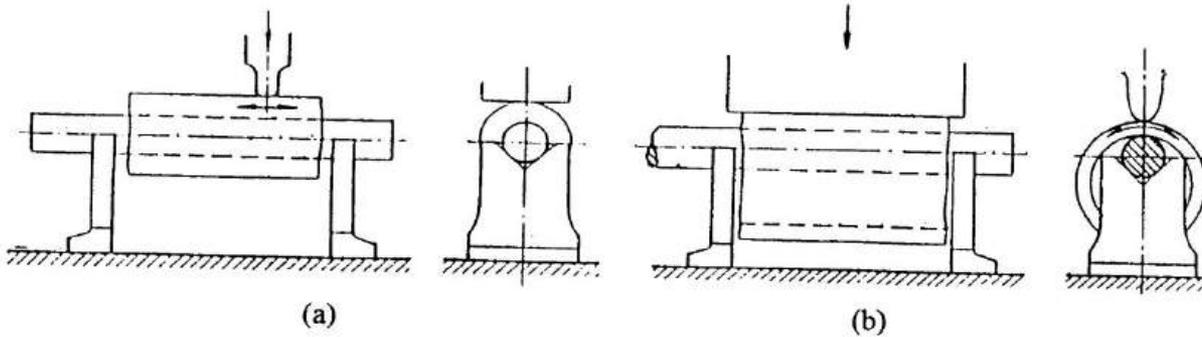


Fig. III.2.21: (a) Estiramento e (b) alargamento de peça tubular curta sobre mandril [7].

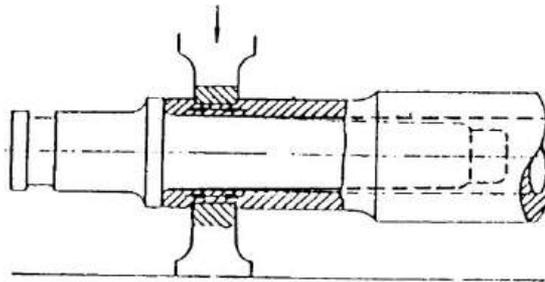
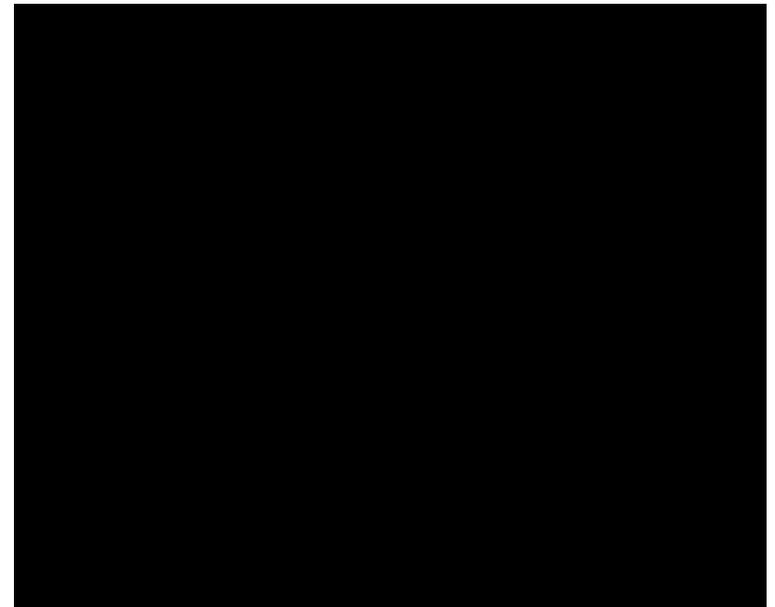


Fig. III.2.22: Estiramento de peça tubular longa sobre mandril, em uma prensa hidráulica [7]



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.

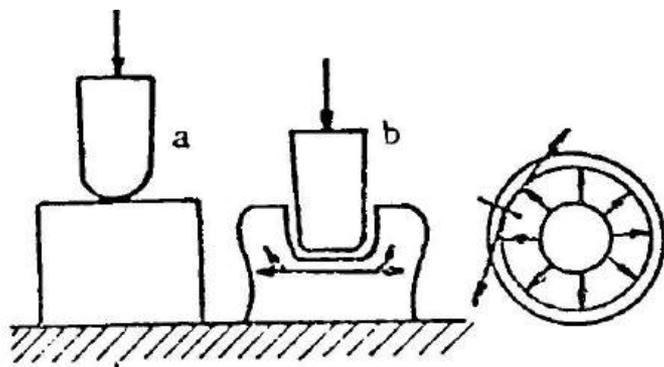


Fig. III.2.27: (a) Início do processo de furação; (b) fluxo de material durante a operação; (c) tensões trativas secundárias que surgem na peça [2].

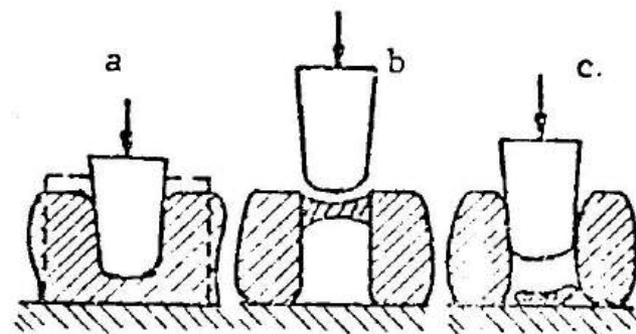
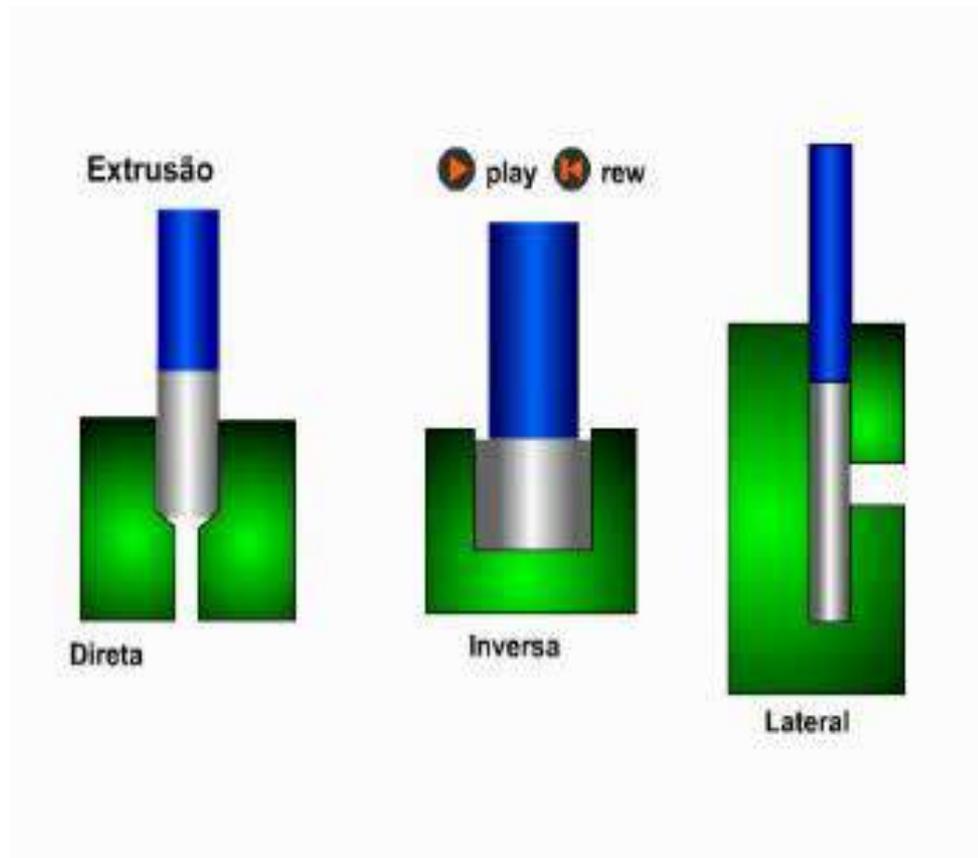


Fig. III.2.28: Abertura de um furo passante com auxílio de um punção flutuante maciço [2].

OPERAÇÕES UNITÁRIAS

- Extrusão;

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

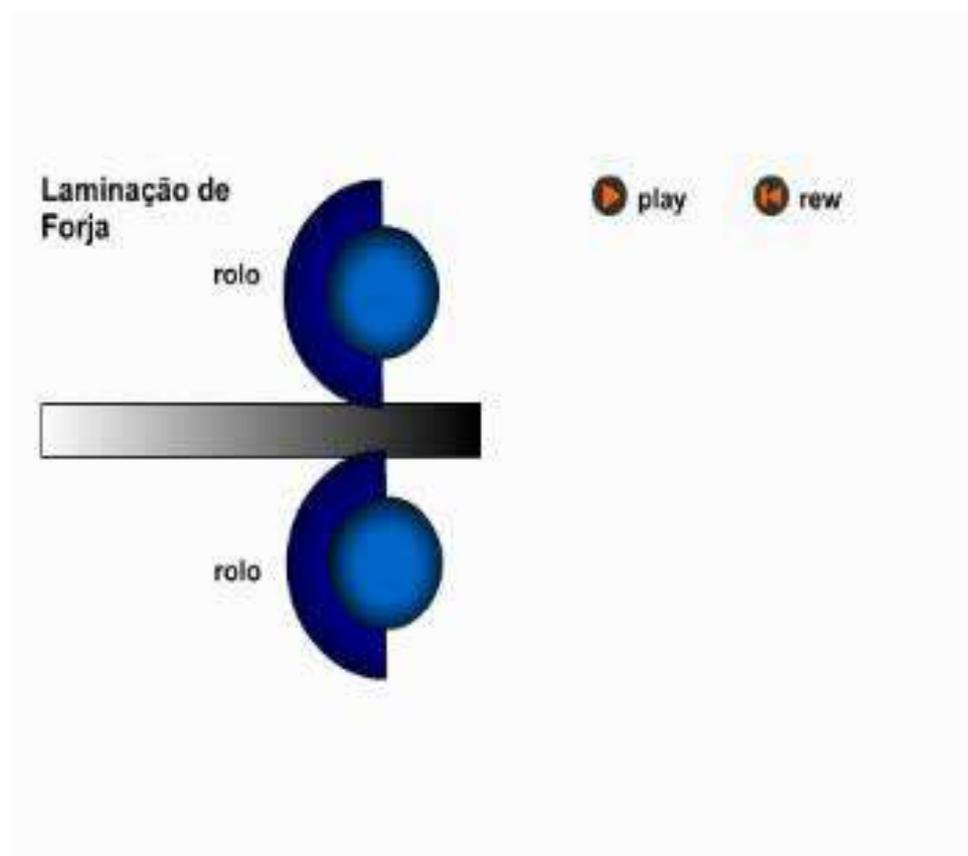


OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- 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.

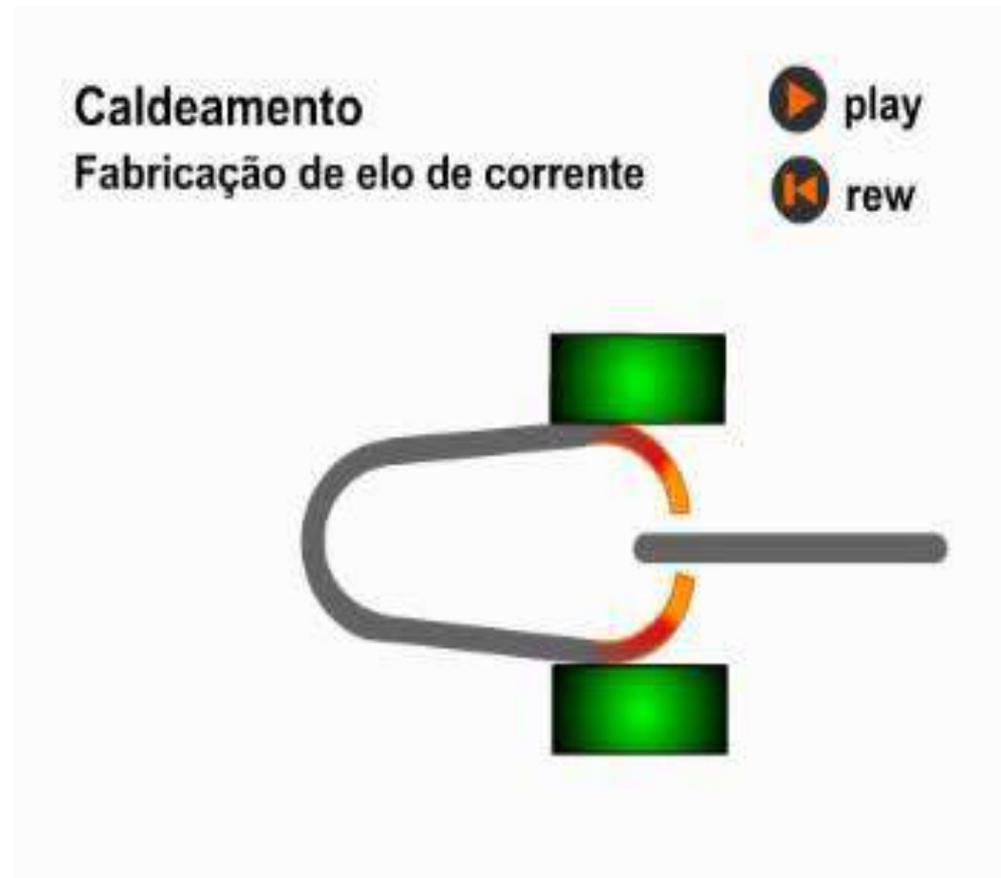


OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- Caldeamento;

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

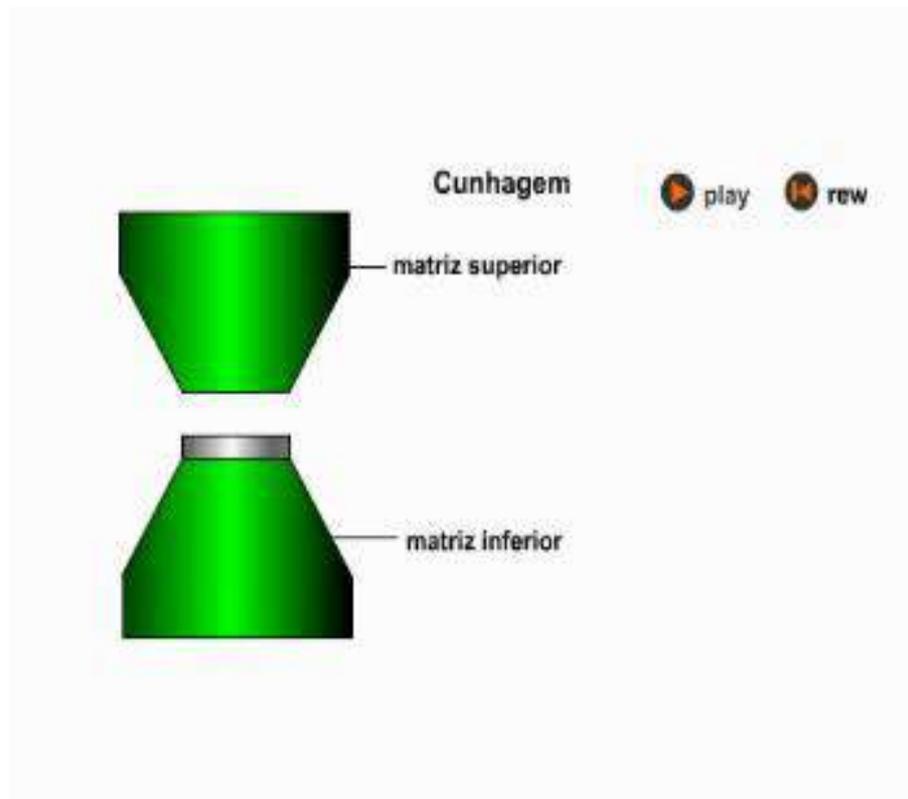


OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- 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.

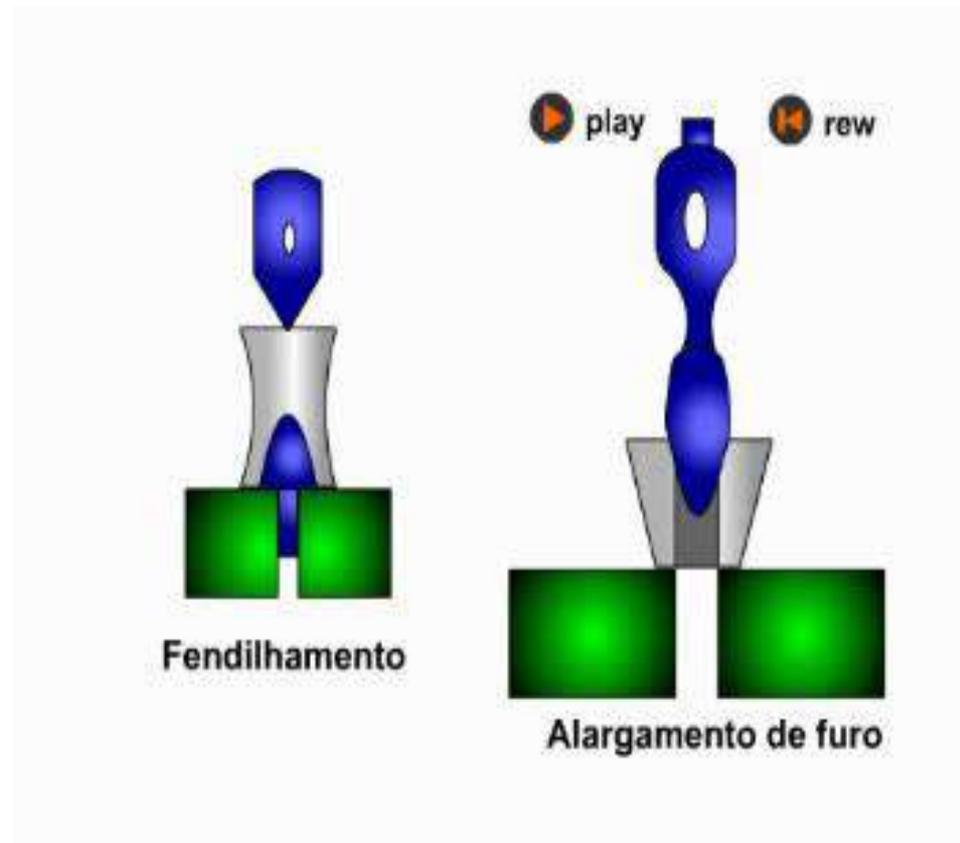


OPERAÇÕES UNITÁRIAS



- 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 $h/d > 3$???

- Tensões residuais (secundárias);

- Trativas, compressivas e circunferenciais;

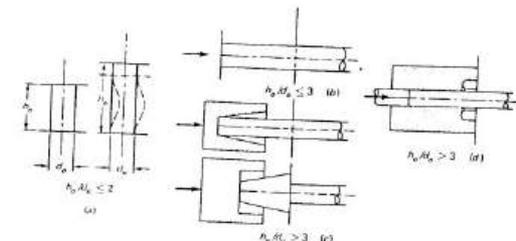
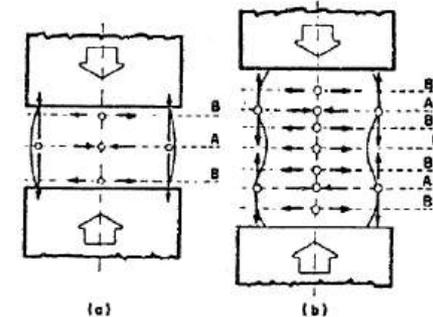
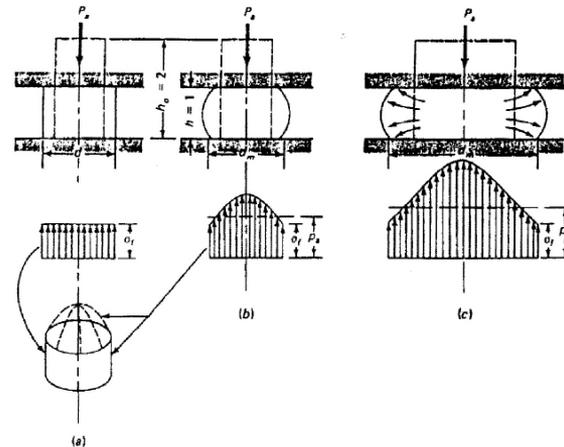
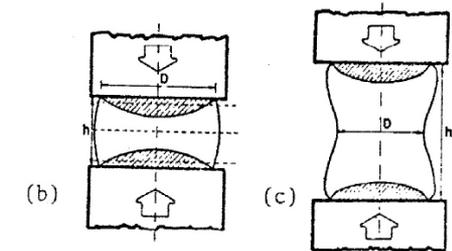
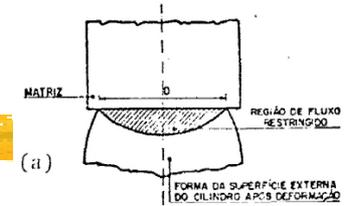


Fig. III.2.11. Limites impostos pela flambagem no recalque de peças longas (a) entre matrizes planas; (b) no encabecamento simples de uma barra; (c) no encabecamento com pre-forma cônica; e (d) no encabecamento com estampo-guia e matriz fechada [5].

CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

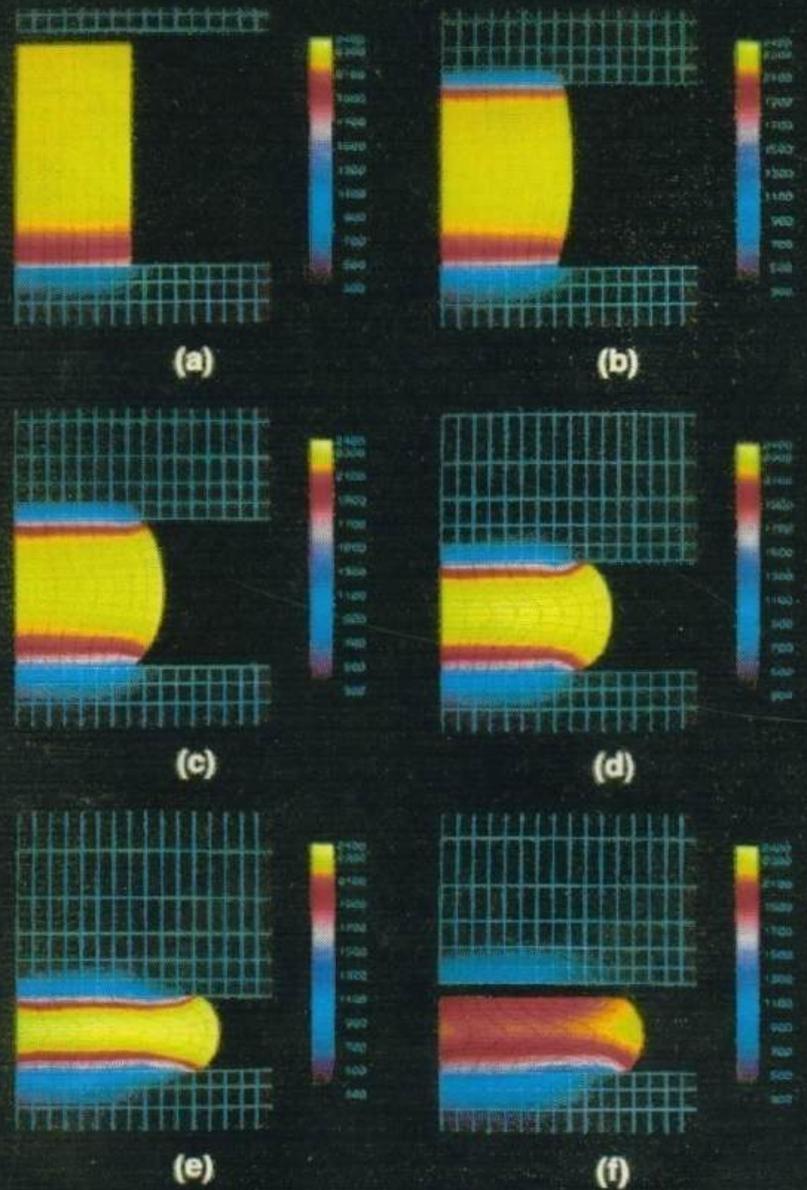
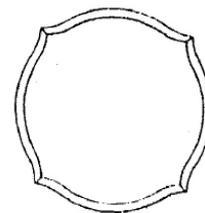
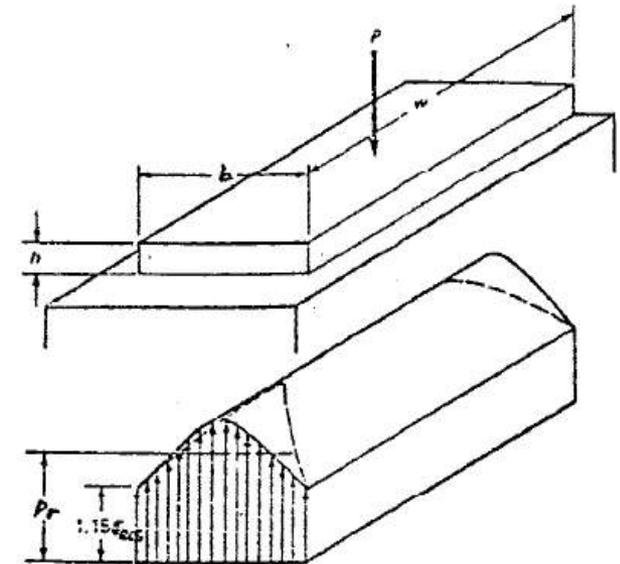
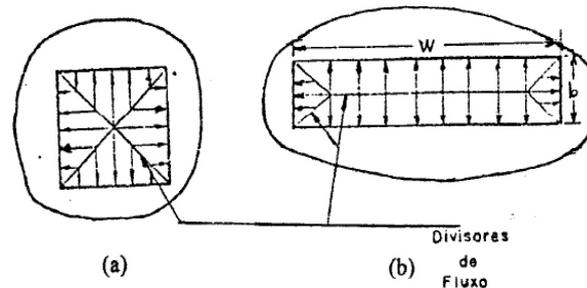


FIG. 12.4 Predicted temperature distributions and grid distortions at various stages of hot compression process [22]. (a) At the end of free resting (elapsed time $t = 6s$); (b) 16.67% reduction in height ($t = 6.375s$); (c) 33.34% reduction in height ($t = 6.750s$); (d) 50.00% reduction in height ($t = 7.125s$); (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;
 - Controlam o escoamento do material na deformação plástica;
 - Custo;
 - Deformação plana.



(c)

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;

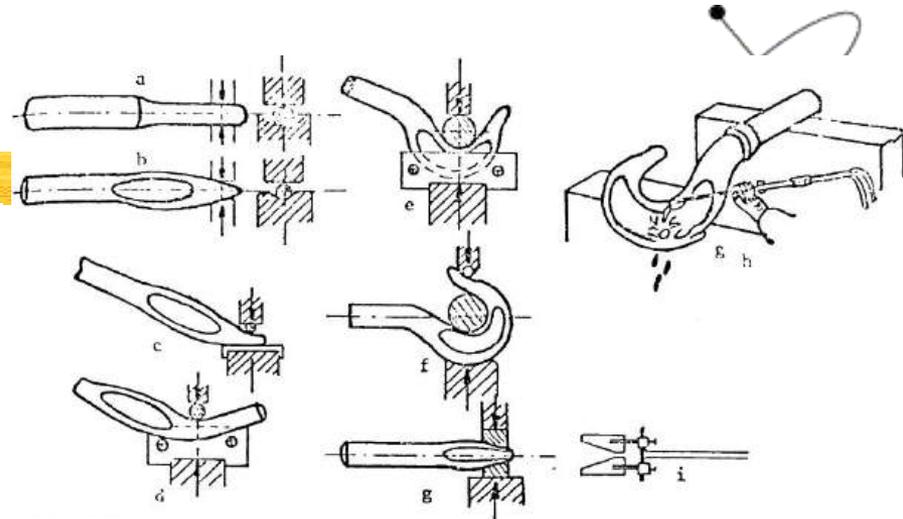
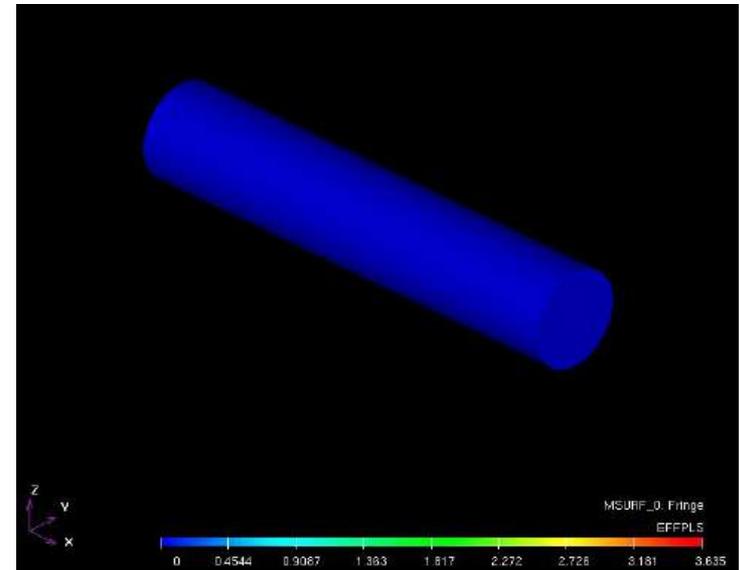
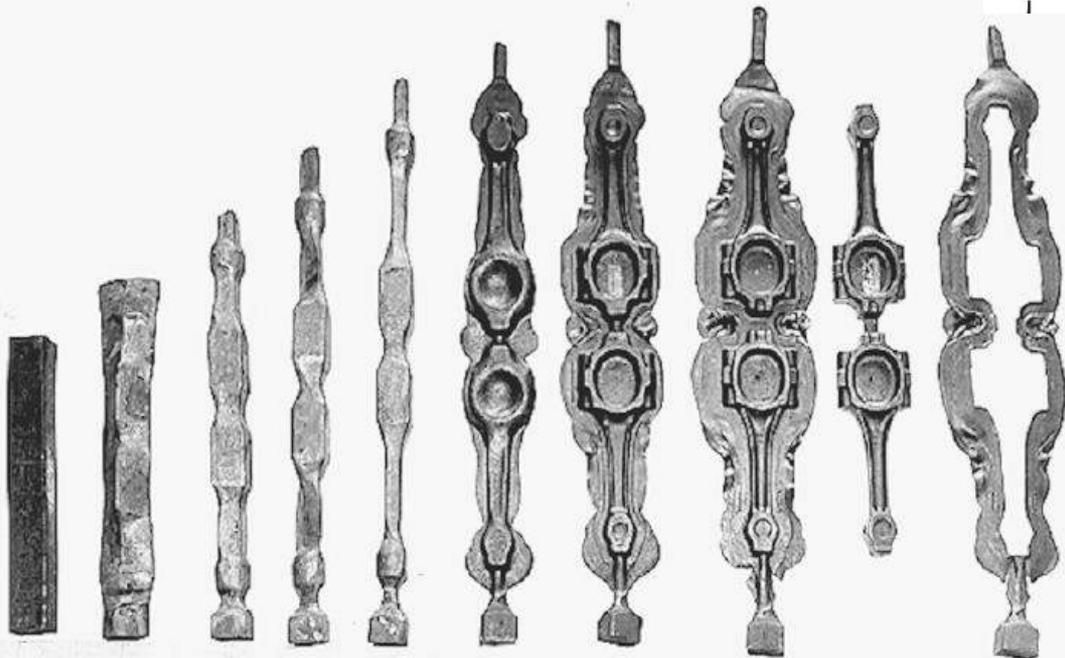
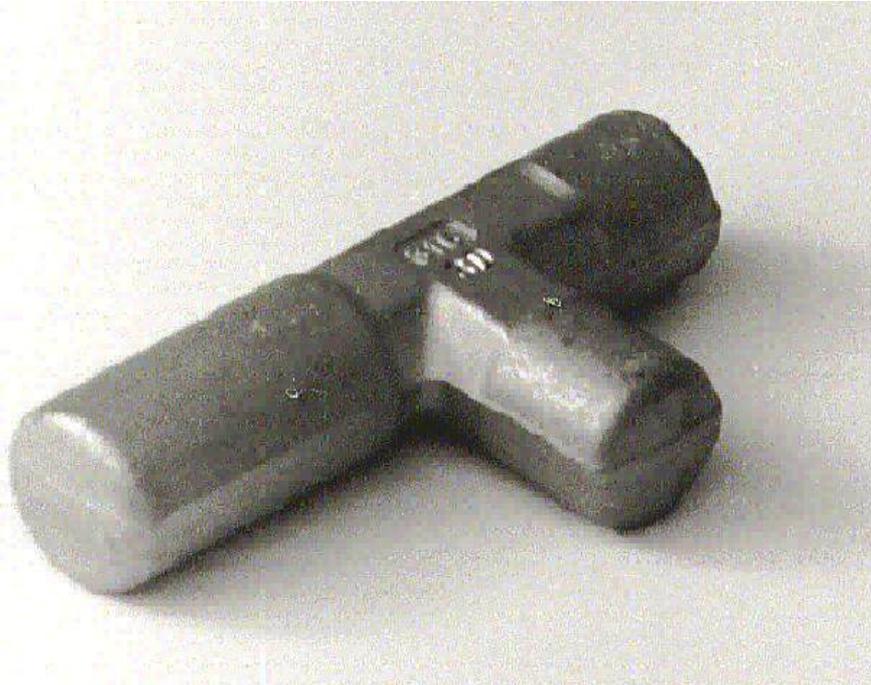


Fig. III.2.35. Etapas da fabricação de um gancho de grandes dimensões: (a) Estiramento prévio da barra, com rolamento; (b) conformação do corpo, com recalque prévio do trecho a ser curvado; (c) e (d) etapas de pré-dobramento; (e) e (f) curvamento da porção central; (g) acabamento lateral; (h) limpeza da peça pronta com maçarico de oxiacetil (escarificação); (i) gabarito deslocável para verificação das secções transversais [2].

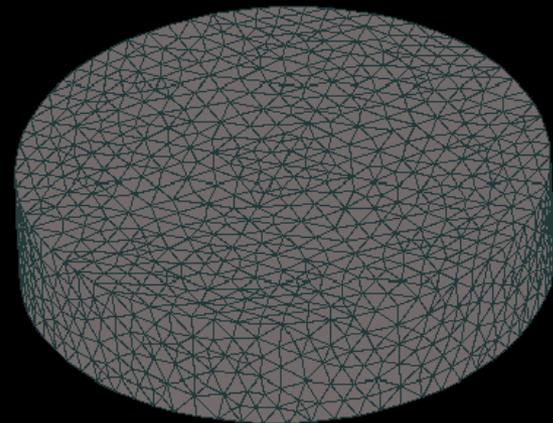


FORJAMENTO EM MATRIZ FECHADA

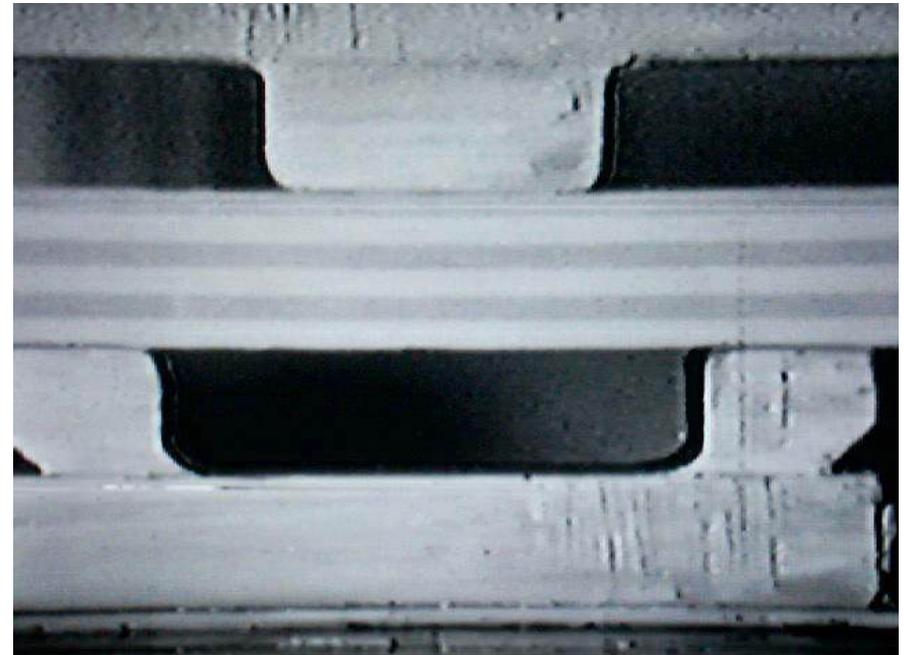
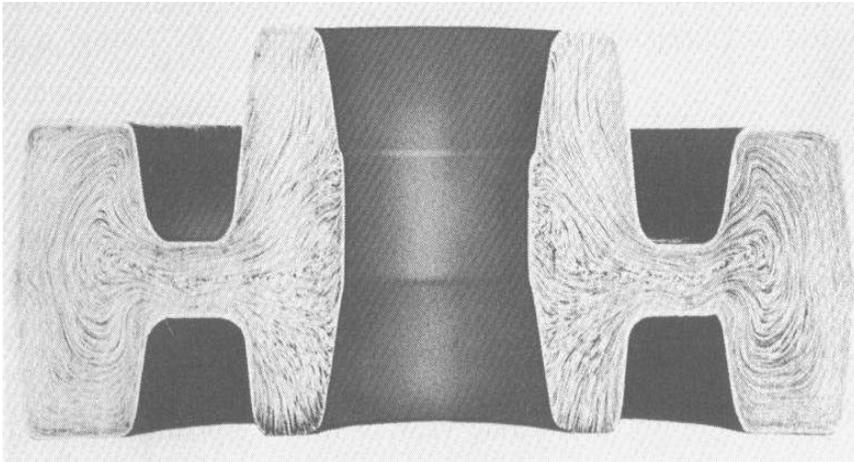


Formato do tarugo inicial

Step -1 Strain (Effective)



FIBRAMENTO MECÂNICO NO FORJAMENTO



OPERAÇÕES SECUNDÁRIAS



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

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.

REBARBAÇÃO

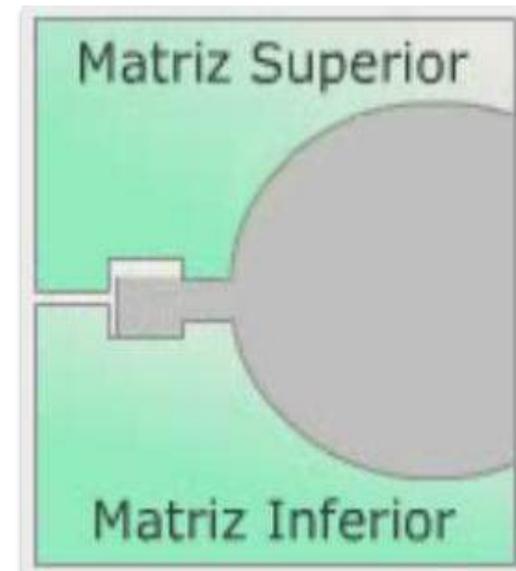


- Funções da rebarba;
 - Válvula de segurança;
 - Regular o escapamento do metal em excesso.

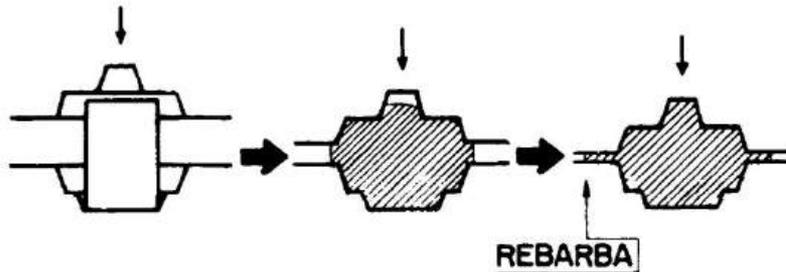


REBARBAÇÃO

- 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.

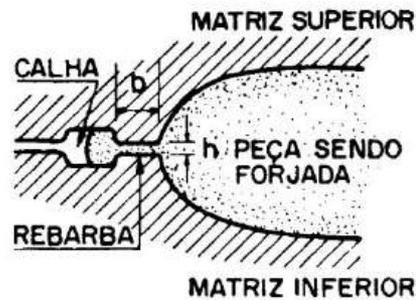
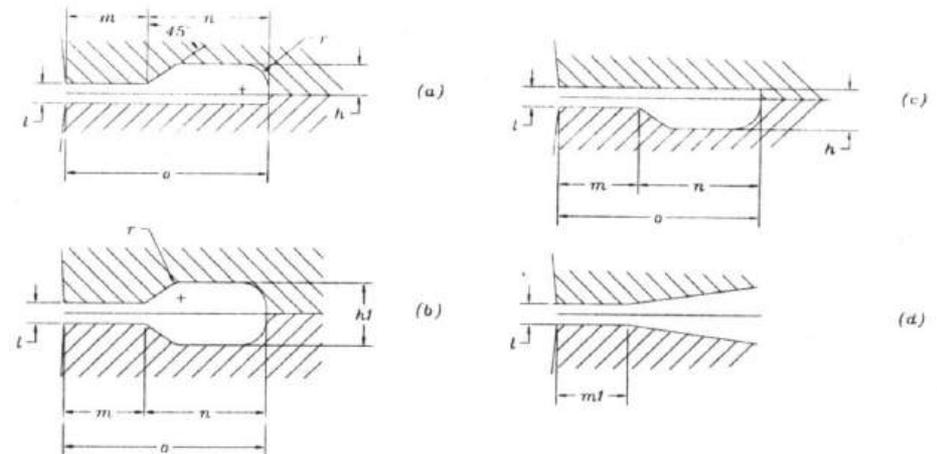


Fig. 7.8 Calha para evitar a extensão exagerada da rebarba.



CRITÉRIOS DE PROJETO

- Projeto de peças e matrizes;

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

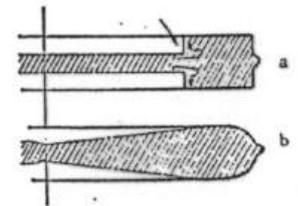
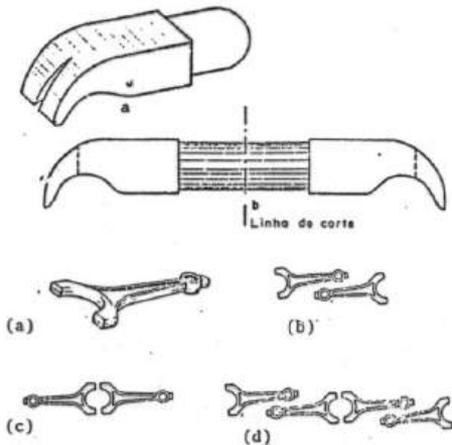
- Devem ser evitados cantos vivos;

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

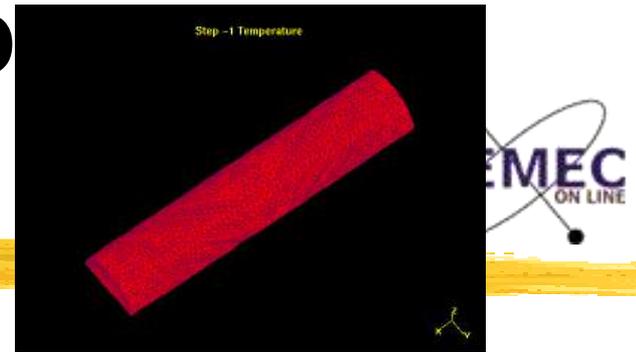
- Devem ser evitados furos finos (normais à direção de forjamento);

- Devem-se evitar encaixes (reentrâncias laterais);

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



CRITÉRIOS DE PROJETO



- Não forjar furos pequenos;
- A rebarba deve ser posicionada no local mais adequado a sua remoção e ao preenchimento completo da cavidade da matriz;
- Subdividir peças complexas por peças simples forjadas individualmente, posteriormente unidas por algum processo adequado;
- Sempre que necessário, as peças recebem sobremedidas para usinagem;
- Deve-se levar em conta o efeito da contração térmica das peças, de modo a se obter maior precisão no processo.

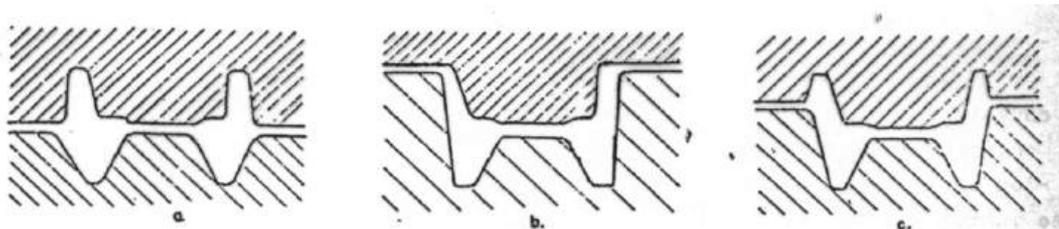
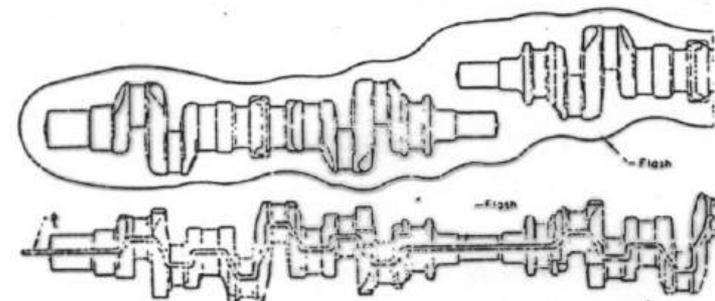


Fig. III.3.18: Exemplo de posicionamento da rebarba influenciando na qualidade da peça: (a) posição desfavorável; (b) posição que assegura boa qualidade, mas implica em matrizes muito caras; (c) solução intermediária, com melhor desempenho que (a) e menor custo que (b).

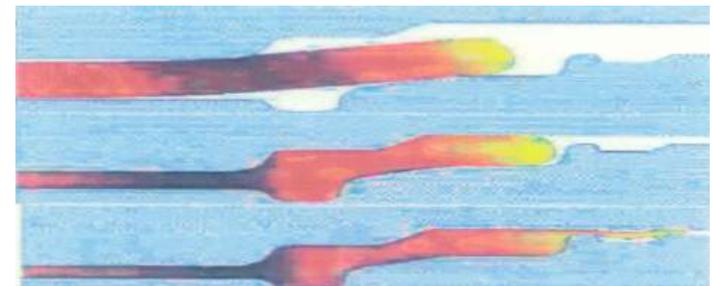
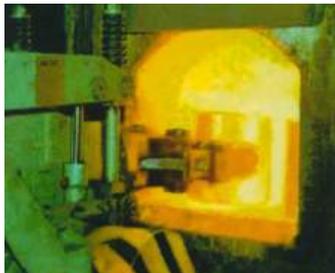


CRITÉRIOS DE PROJETO



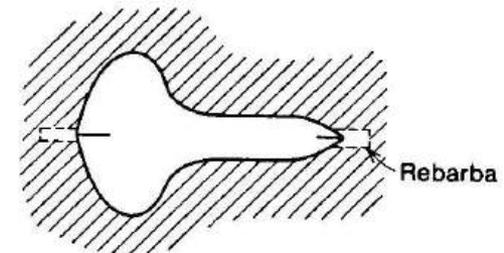
- Simulações numéricas;
 - Estudar as características de escoamento do material;
 - Facilitar o desenvolvimento de matrizes e ferramentas de forjamento;
 - Reduzir os custos e os tempos associados ao desenvolvimento de novas peças;

- Aquecimento das peças;
 - Conformação a quente é utilizada de modo a diminuir os esforços necessários para a deformação do material;
 - O aquecimento pode ser realizado através de fornos de indução, evitando o problema de empobrecimento superficial de carbono (descarbonetação);



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;



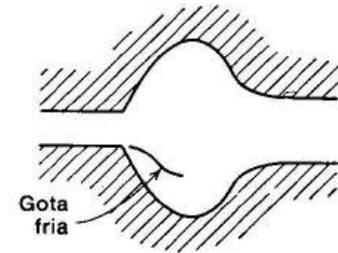
(a)

DEFEITOS DE FORJADOS



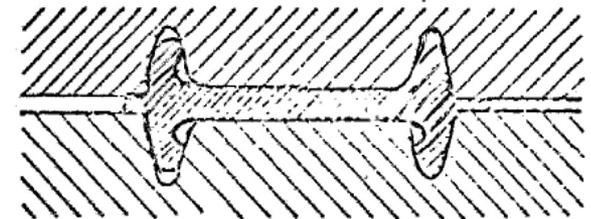
- Defeitos de dobra:

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



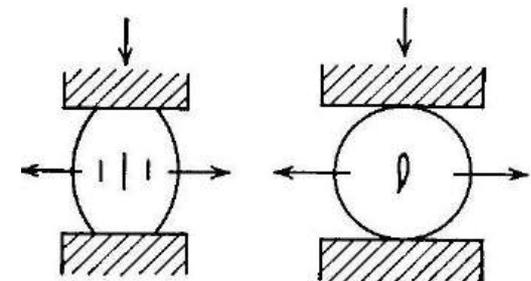
- Falha de enchimento:

- 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 †

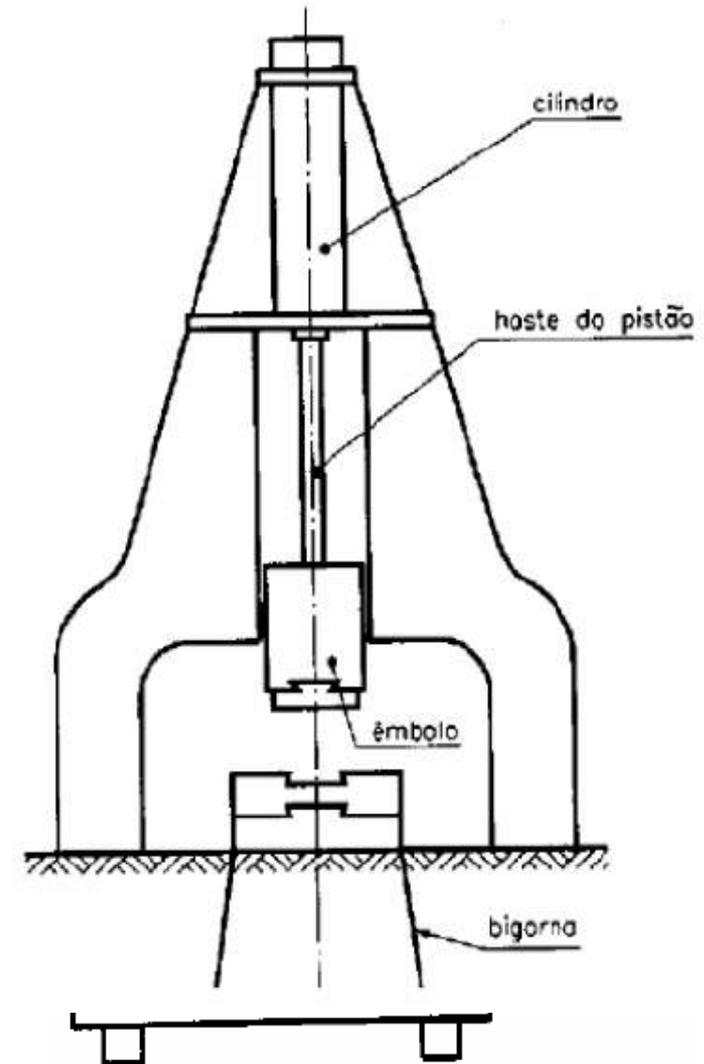
<i>Máquinas de forja</i>	<i>Faixa de velocidade</i>	
	<i>pés/s</i>	<i>m/s</i>
Martelo de queda livre	12—16	3,6—4,8
Martelo mecânico	10—30	3,0—9,0
Máquinas HERF	20—80	6,0—24,0
Prensas mecânicas	0,2—5	0,06—1,5
Prensas hidráulicas	0,2—1,0	0,06—0,30



- 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



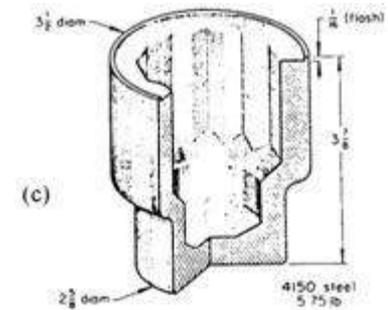
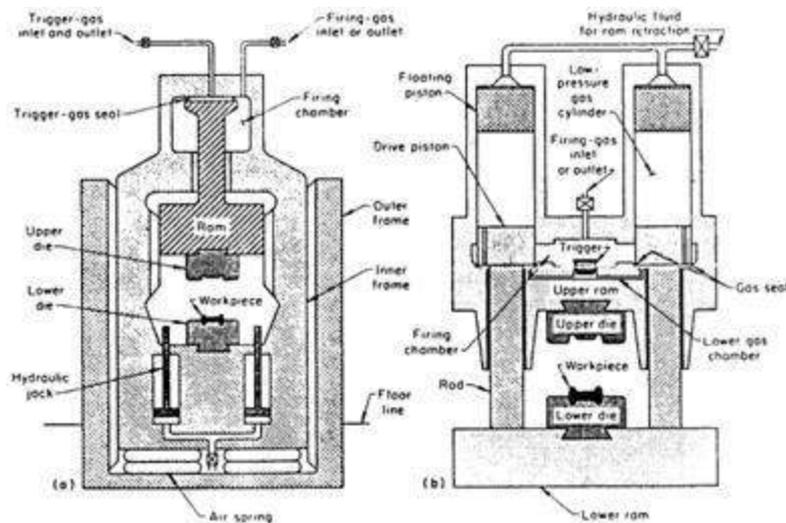
- MARTELOS:
 - Martelos de bigorna:
 - Queda livre;
 - Queda acelerada (duplo efeito);
 - Martelos de contragolpe:
 - Verticais;
 - Horizontais;
- PRENSAS
 - Hidráulicas:
 - Mecânicas:
 - Verticais:
 - › Excêntrico (rebarbação);
 - › Manivela;
 - › Fricção;
 - Horizontais:
 - › Recalcadoras horizontais;

EQUIPAMENTOS DE FORJA



- MÁQUINAS ESPECIAIS:

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



EQUIPAMENTOS DE FORJA

FORJAMENTO ROTATIVO

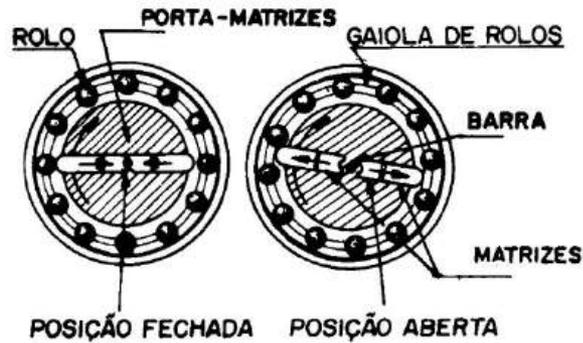


Fig. 7.13 Princípio de funcionamento de uma máquina de forjamento rotativo.



EQUIPAMENTOS DE FORJA



LAMINADORES DE FORJAR (Rolamento);



EQUIPAMENTOS DE FORJA

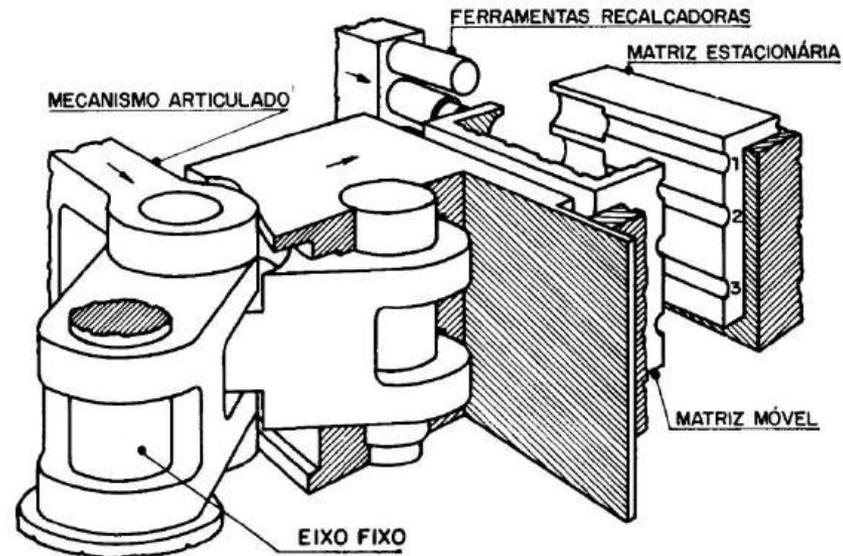


Fig. 7.11 Esquema de funcionamento de uma recalçadora.

Recalçadora horizontal

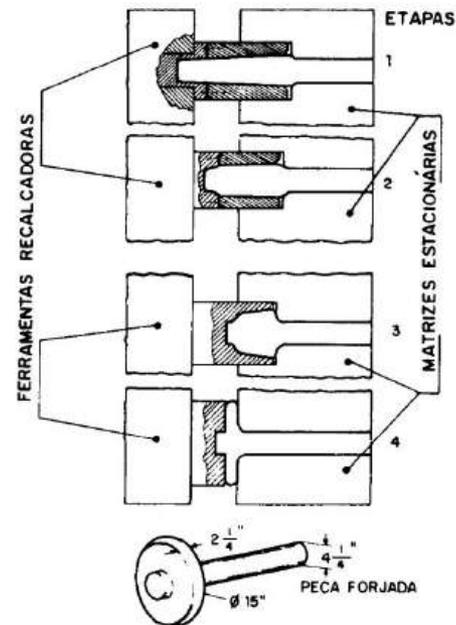
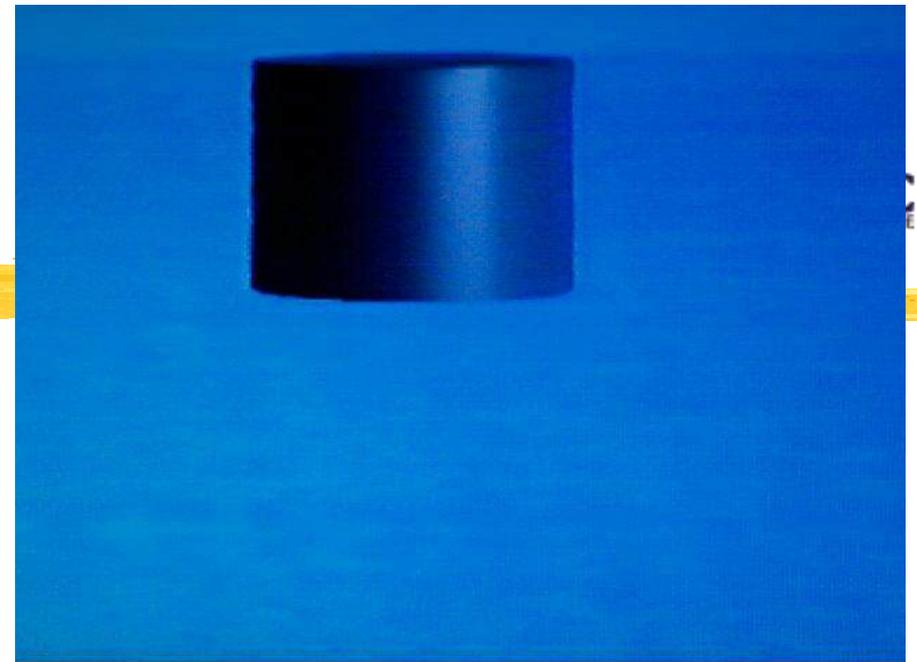


Fig. 7.12 Etapas de fabricação de peça típica de uma recalçadora.

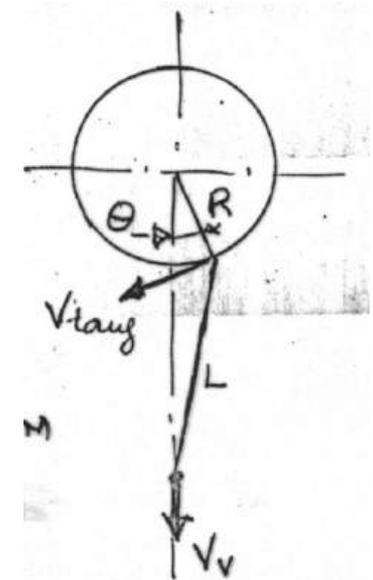
Recalcadora horizontal: à frio e à quente



EQUIPAMENTOS DE FORJA



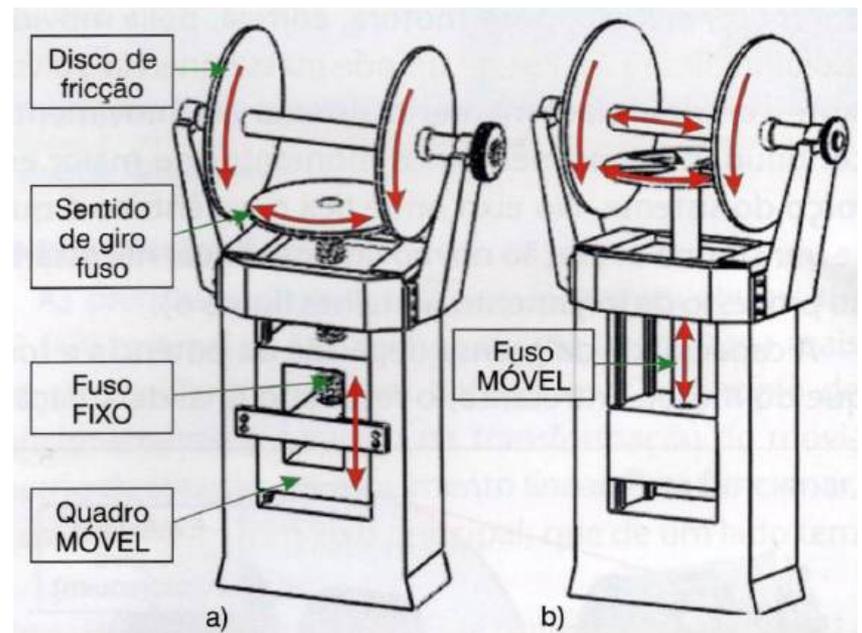
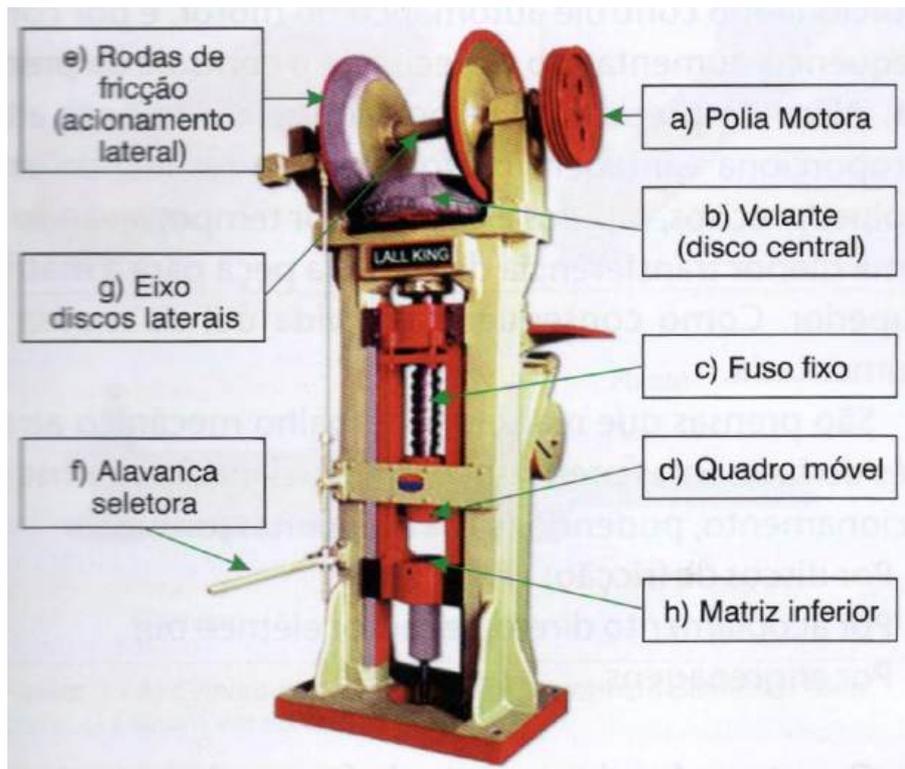
- Prensas de excêntrico;



EQUIPAMENTOS DE FORJA

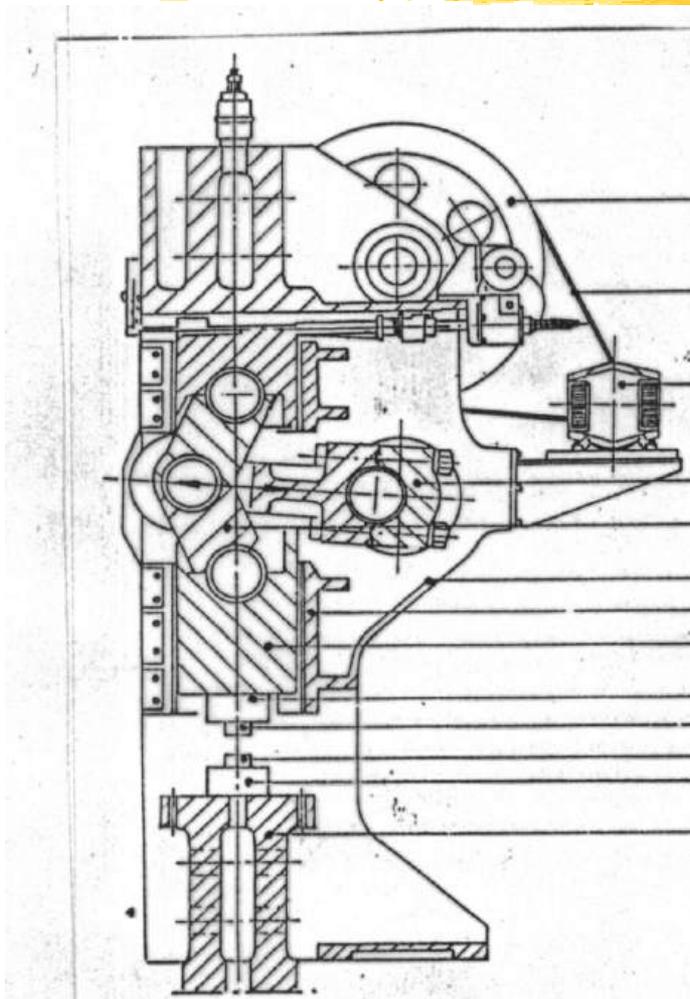
- Prensa de fricção;





EQUIPAMENTOS DE FORJA

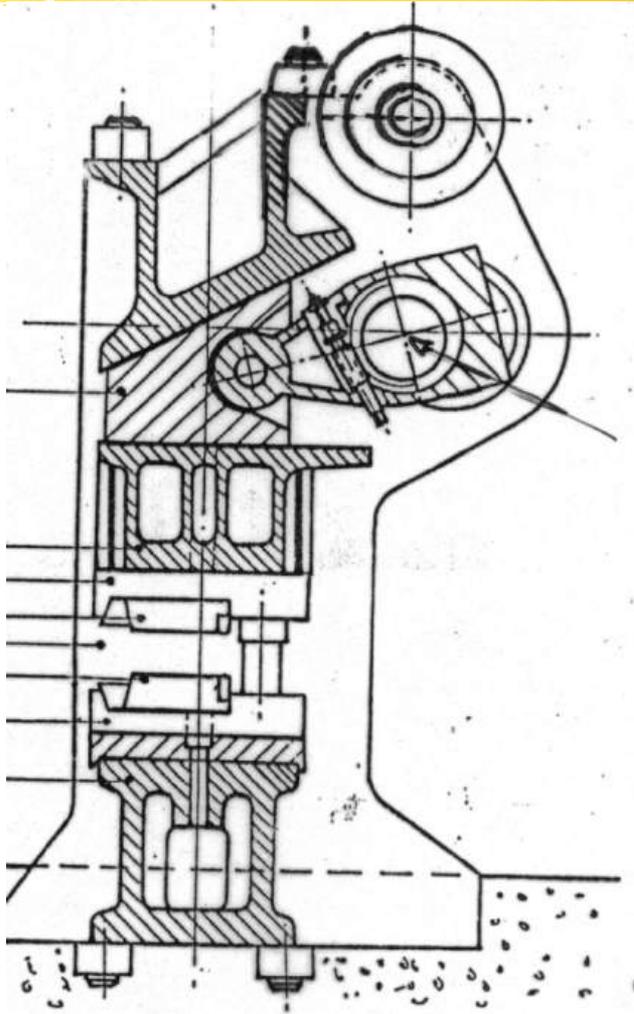
- Prensa de joelho;



- Curso longo
- Bastante rígidas

EQUIPAMENTOS DE FORJA

- Prensa de cunha;



- Bastante rígidas

EQUIPAMENTOS DE FORJA



- Prensas hidráulicas;



EQUIPAMENTOS DE FORJA

- Forjamento orbital;

Forjamento Orbital

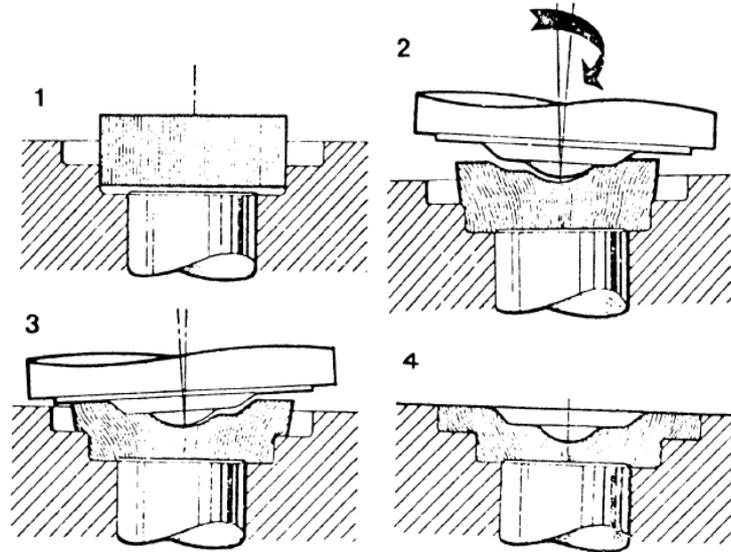
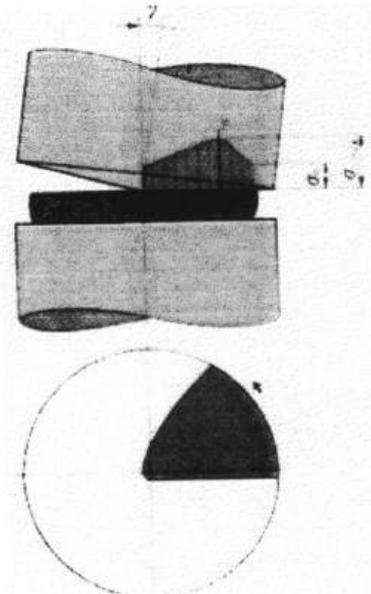
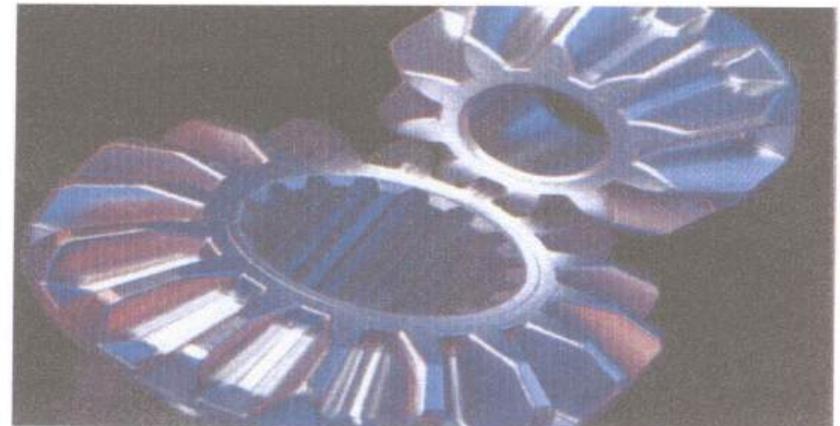


Fig. 2.10 Stages in orbital forging



Defeito X tipo de equipamento

