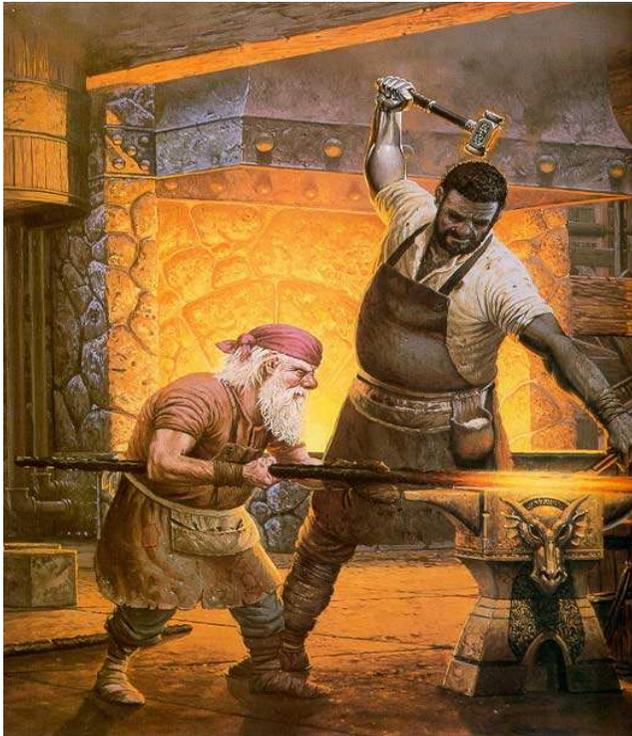


Processo de Forjamento

Histórico



A conformação foi o primeiro método para a obtenção de formas úteis.

Fabricação artesanal de espadas por martelamento (forjamento).

Histórico

Observava-se que as lâminas de espadas exaustivamente deformadas ficavam mais fortes que as pouco deformadas.

Hoje sabemos que este resultado é alcançado devido ao refino de grão e ao próprio direcionamento estrutural, além da redução das impurezas e encruamento.



Forjamento

Operação de conformação mecânica para dar forma aos metais através de martelamento ou esforço de compressão (prensagem), tendendo a fazer o material assumir o contorno da ferramenta conformadora, chamada matriz ou estampo.



Comparação:

Forjamento a quente	Forjamento a frio
Produção de peças	Produção de peças
Grande importância técnico-econômica	Inclui os processos: - extrusão - recalque - cunhagem (troquelagem)
Tensões reduzidas Pouco ou nenhum encruamento Microestrutura mais homogênea	Tensões elevadas e encruamento → alta solicitação da ferramenta
Alta forjabilidade	Forjabilidade limitada
Retrabalho de peças grandes	Peças pequenas de aço ou metais não ferrosos
Tolerância de fabricação de ruim a média	Pouco retrabalho
Superfície com carepa	Boa qualidade superficial
Temperaturas de forjamento: Aço > 1000 C (até 1050 C) Ligas de alumínio 360 C ... 520 C Ligas de cobre 700 C ... 800 C	

Produtos obtidos por conformação



LAMINADOS

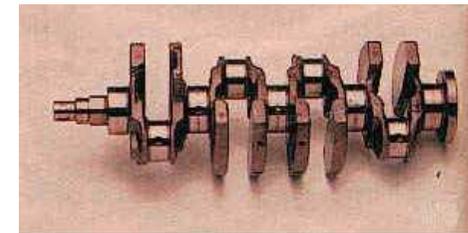


TREFILADOS

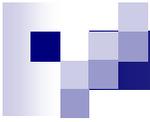


EXTRUDOS

Atualmente cerca de 80% dos produtos manufaturados sofrem uma ou mais operações de conformação para a obtenção de peças com formas úteis, tais como tubos, barras, chapas finas além de peças com seu formato final.



FORJADA



Produtos Forjados

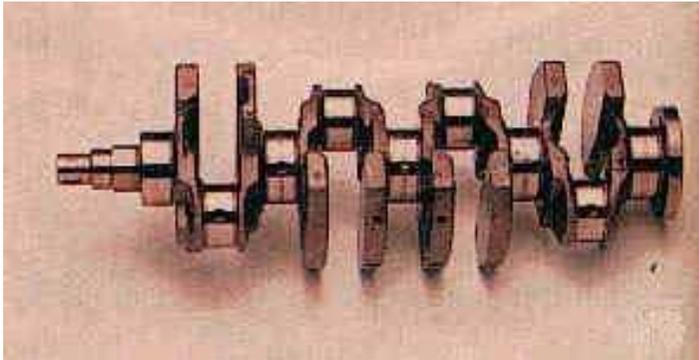


Exemplo de produto obtido por forjamento:

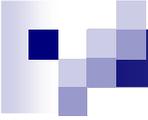


Facas produzidas por forjamento.

Aplicação:



Produtos acabados ou semi acabados com alta resistência mecânica destinados a sofrer grandes esforços e solicitações em sua utilização.

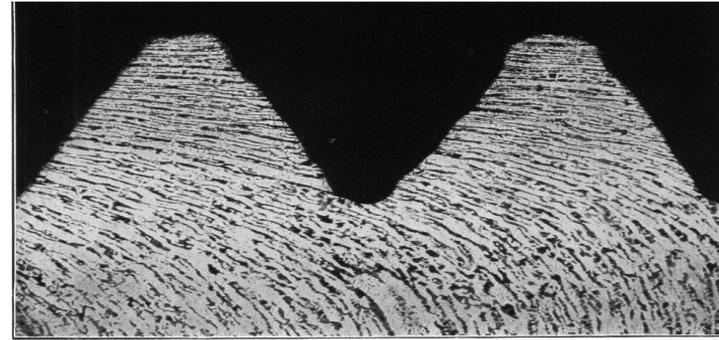


Vantagens do forjamento

- Melhoria da microestrutura
- Resistência maior
- Melhor acabamento superficial que a fundição.
- Melhor distribuição das fibras

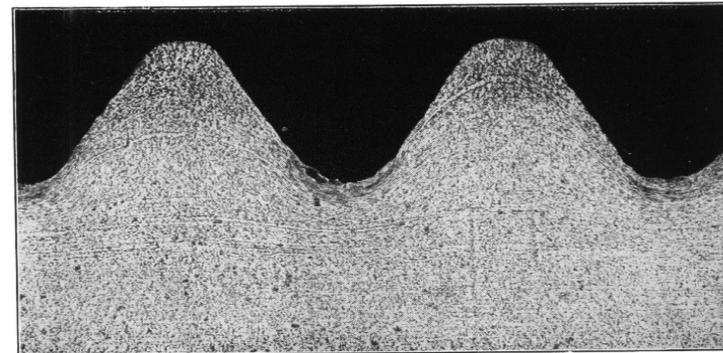
Porque forjar?

Rosca usinada.



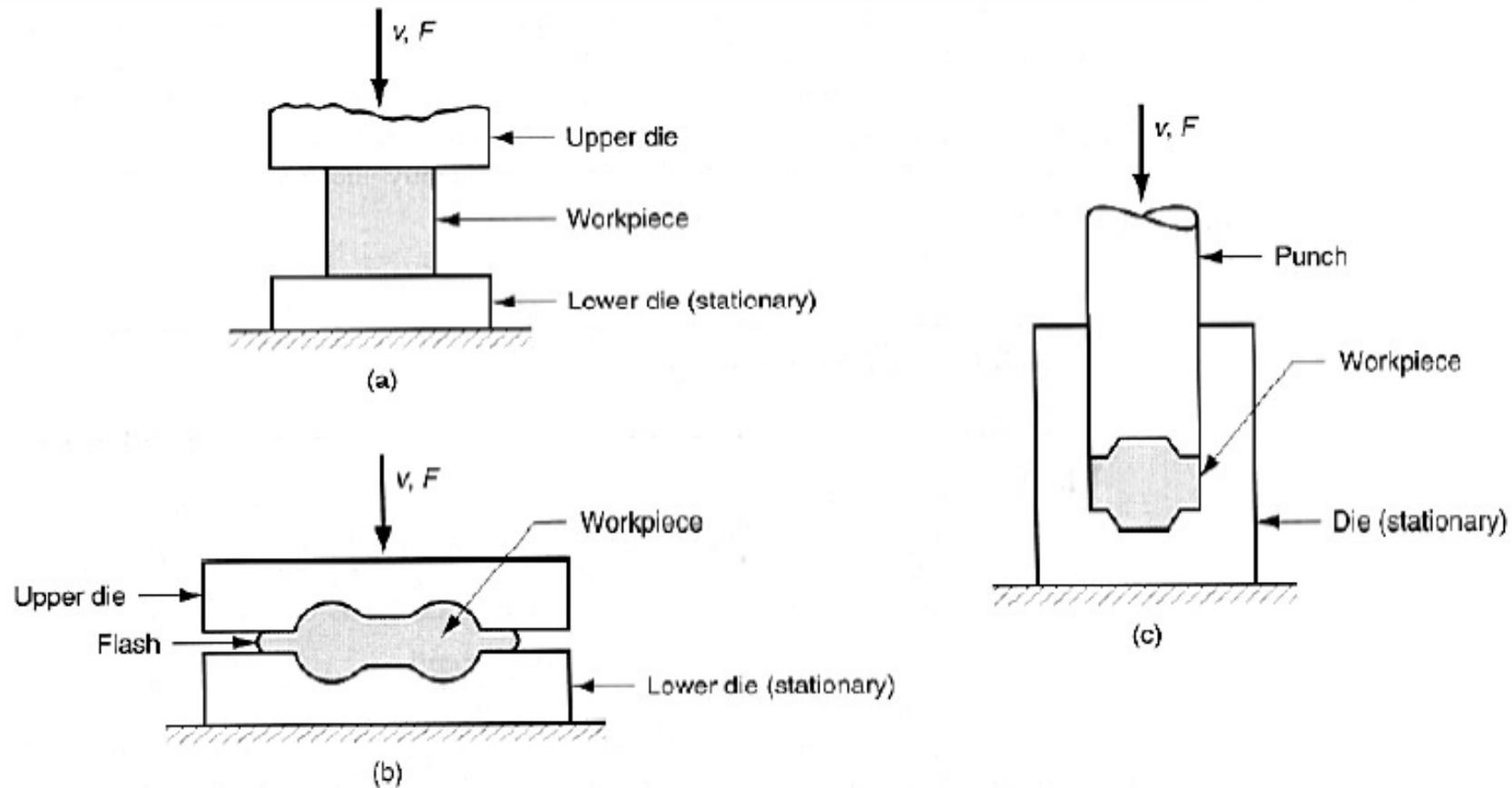
— Filetes de rosca de porca. Nota-se, pela deformação da textura a'inhada que o furo central da porca foi estampado (da direita para a esquerda) e depois se processou o corte dos filetes com macho. Ataque: nítrico. 23 x.

Rosca produzida por forjamento.



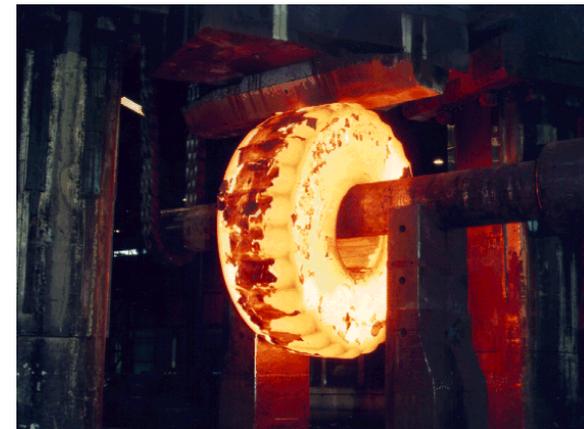
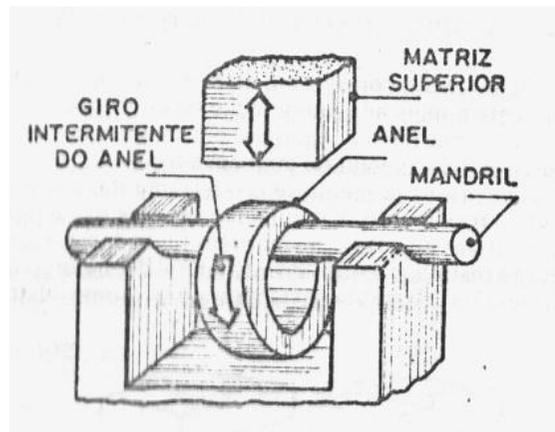
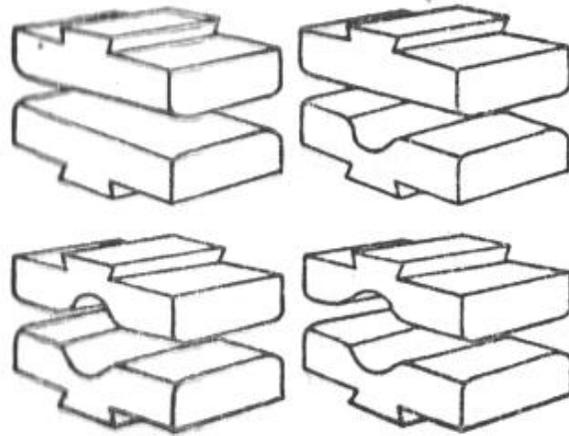
— Filetes de rosca de parafuso produzidos por rolamento. Nota-se a deformação das fibras do material por esse trabalho e também que a deformação é máxima no fundo dos filetes. Ataque: nítrico. 23 x.

Forjamento

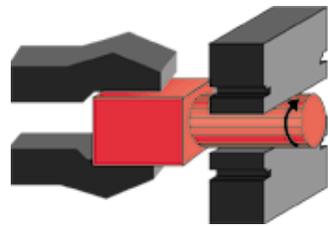


Tipos de forjamento: (a) matriz aberta; (b) matriz fechada com rebarba; (c) matriz fechada sem rebarba

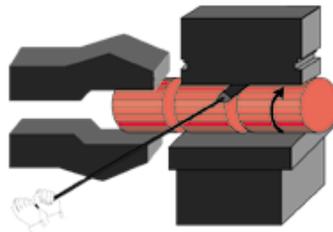
Tipos de forjamento: matriz aberta



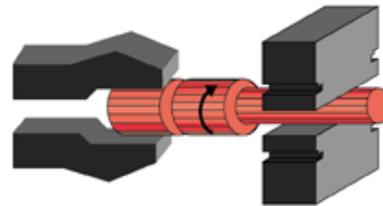
Estágios de forjamento em matriz aberta



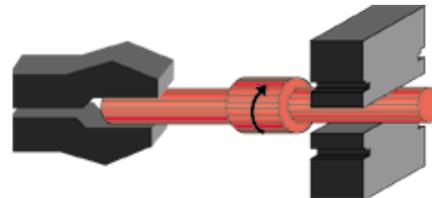
(a) Forjar o tarugo aquecido no diâmetro máximo



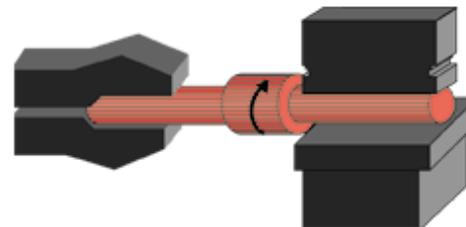
(b) Ferramenta para marcar a localização das partes



(c) Forjamento do lado direito



(d) Forjamento do lado esquerdo



(e) Témimo (controle dimensional)



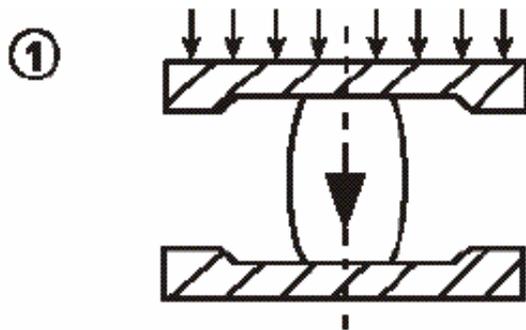
Tipos de forjamento: matriz fechada

Os processos de forjamento em sentido restrito são:

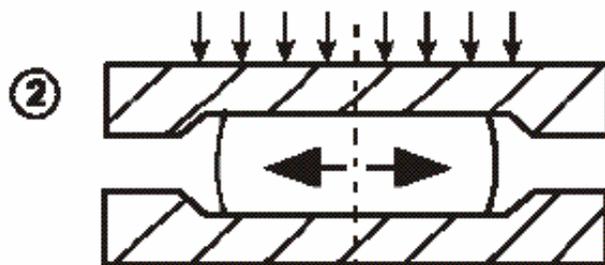
- . Recalque em matriz
- . Forjamento em matriz fechada sem rebarba
- . Forjamento em matriz fechada com rebarba

Tipos de forjamento: matriz fechada

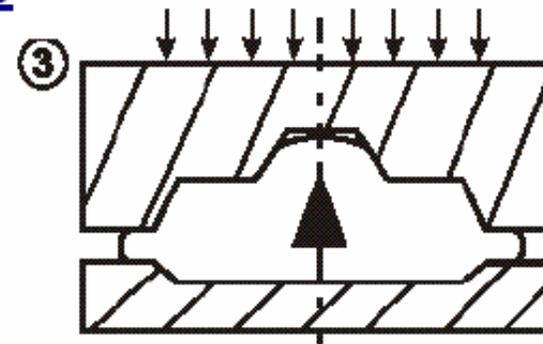
Modos básicos de fluxo do material forjado



Recalque



Expansão



Expansão com extrusão

Etapas subseqüentes de fabricação

- calibração
- tratamento térmico
- retirada da carepa
- usinagem de acabamento

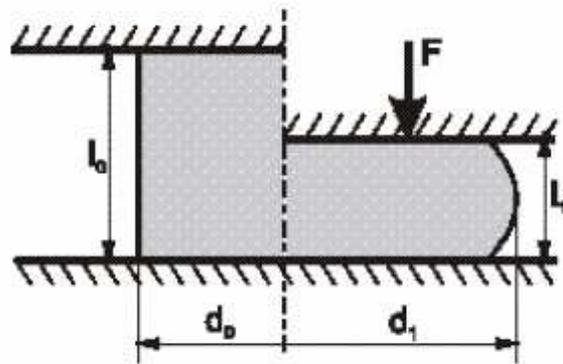


Tipos de forjamento: matriz fechada

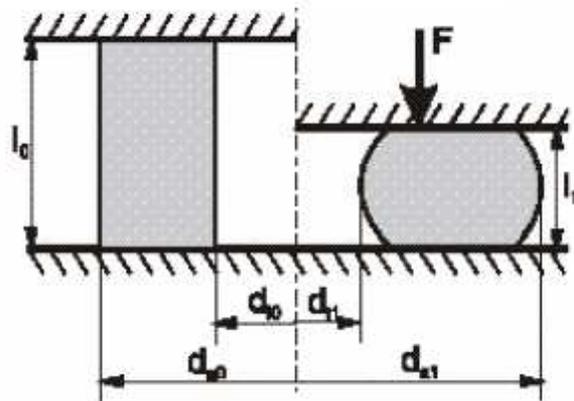
- Recalque	- Redução da altura inicial sem grande expansão lateral e sem grande deslizamento relativo entre peça e ferramenta.
- Expansão / Alargamento	- escoamento lateral do material com grande trecho de deslocamento peça-ferramenta. - Fluxo de material \perp ao movimento da ferramenta.
- Expansão com extrusão	- preenchimento de cavidades ocas da ferramenta pela ampliação local da altura inicial com deslocado relativamente longo escoamento lateral do material após o preenchimento do canal de rebarba. - Fluxo de material \perp e \parallel ao movimento da ferramenta.

Recalque

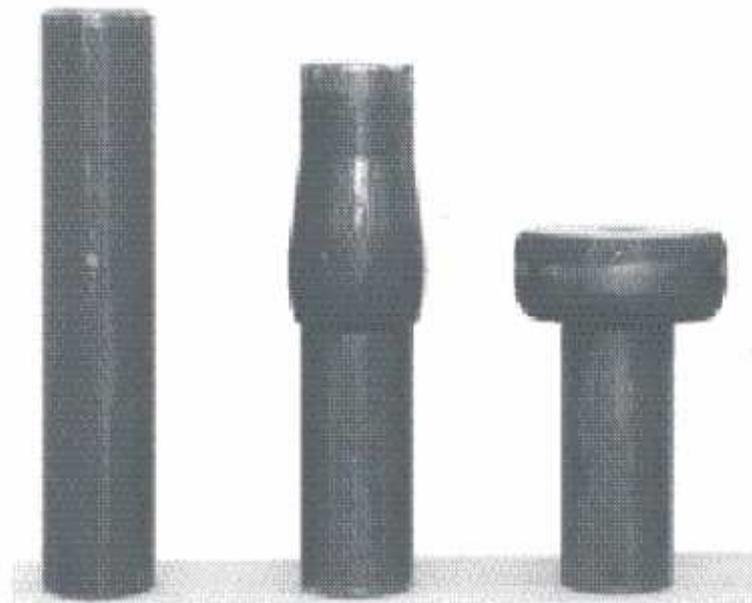
Recalque de Cilindro



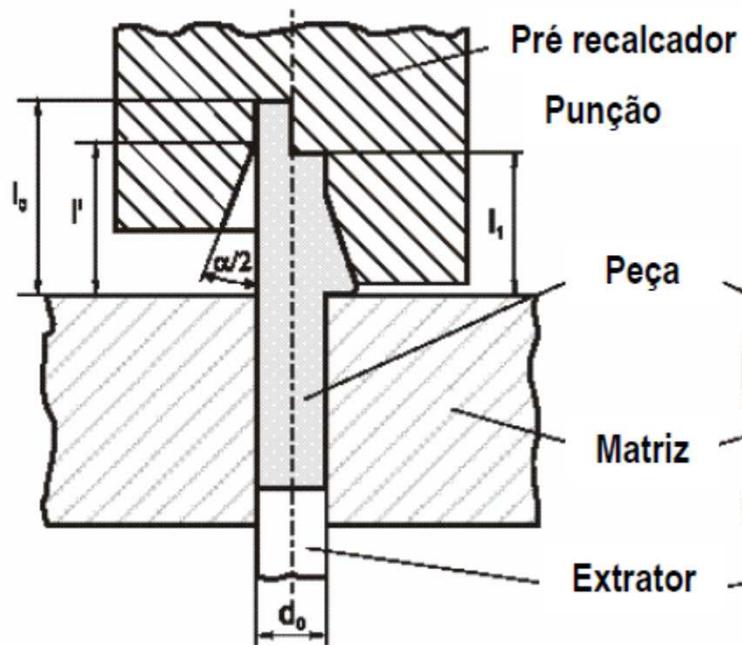
Recalque de Anel



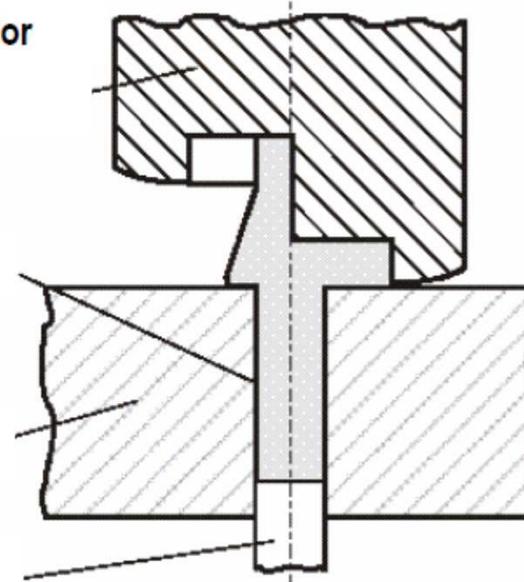
Exemplo de Fabricação:
Recalque inicial e final da
Cabeça de um parafuso



Pré-Recalque



Recalque Final



Processo de recalque duplo (pré-recalque e recalque final)

Razão de Recalque

$$s = l_0 / d_0$$

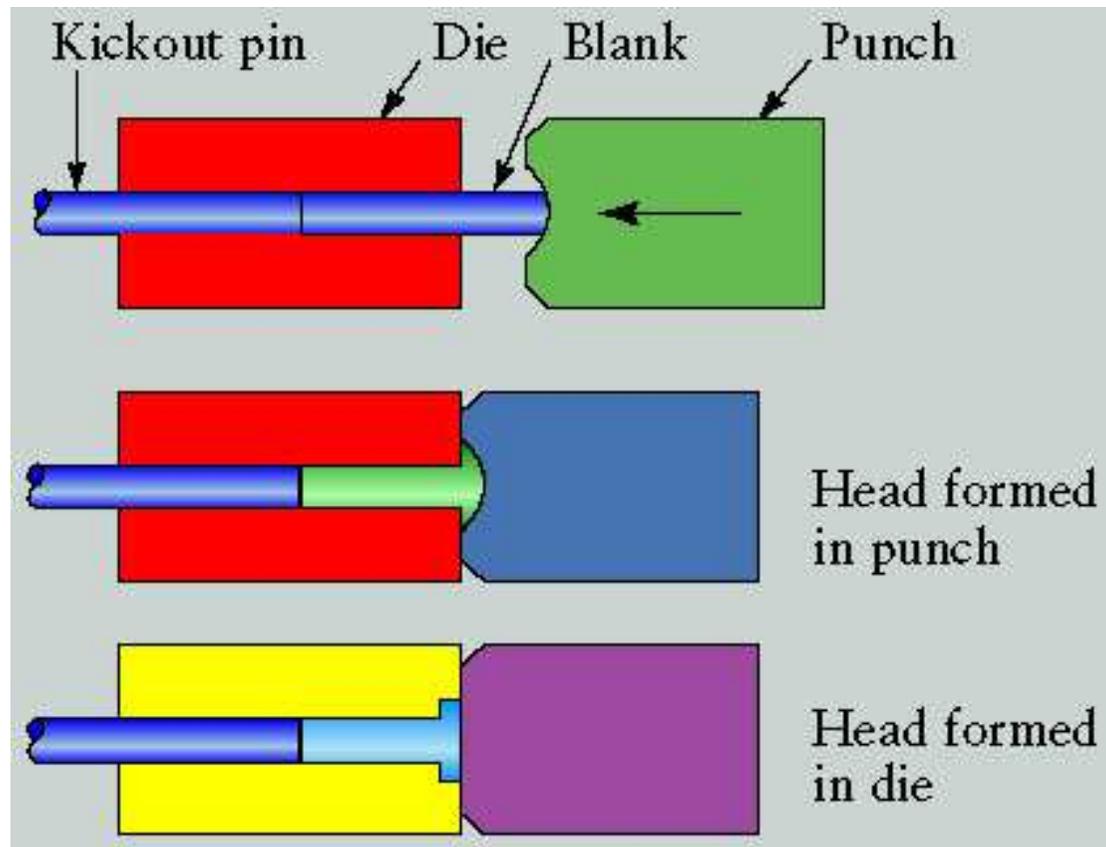
s : depende da geometria, da superfície e do paralelismo do prato de compressão, da peça, bem como do lubrificante. No recalque a frio vale:

$s \leq 2,3$ processo de compressão simples (1 Etapa)

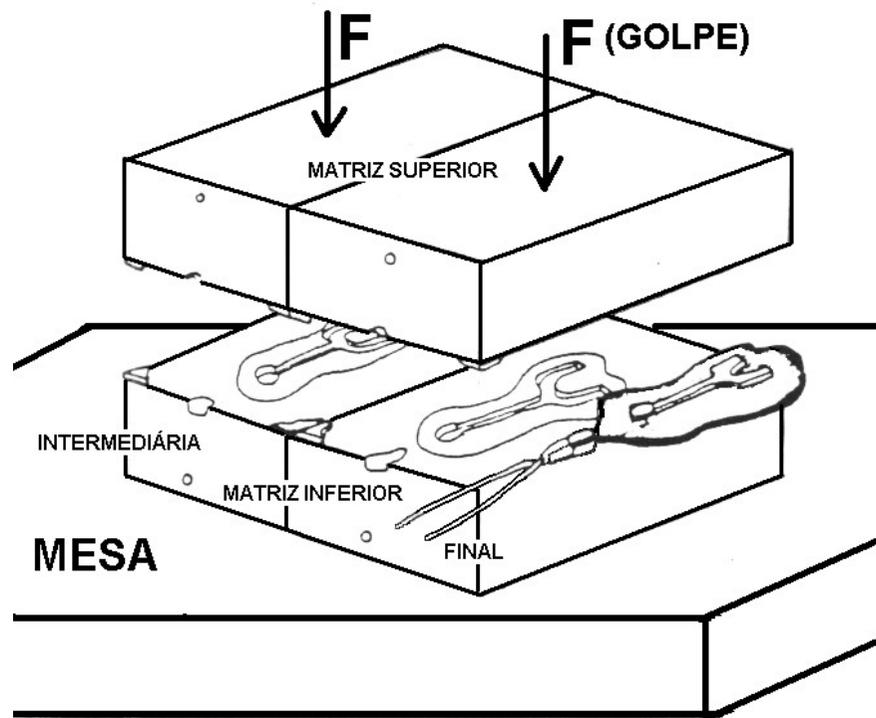
$s \leq 4,5$ processo de compressão duplo (2 Etapas)

$s > 4,5$ até 20 processo de compressão múltiplo.

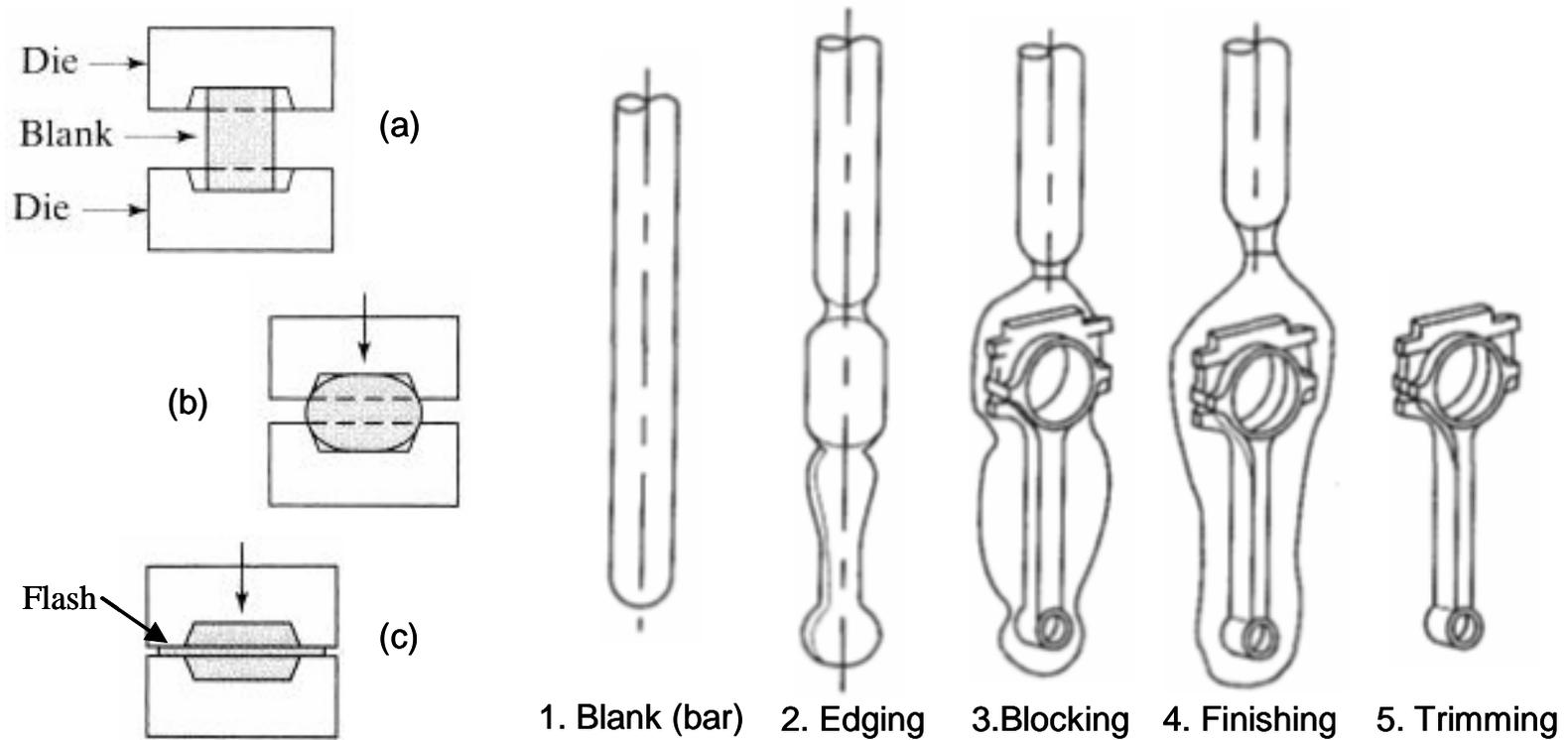
Recalque



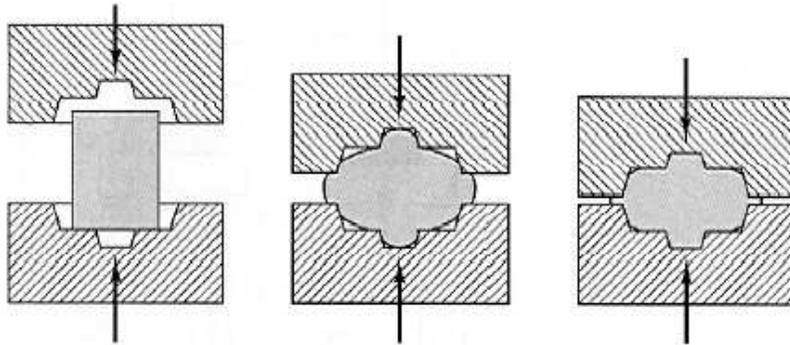
Tipos de forjamento: matriz fechada



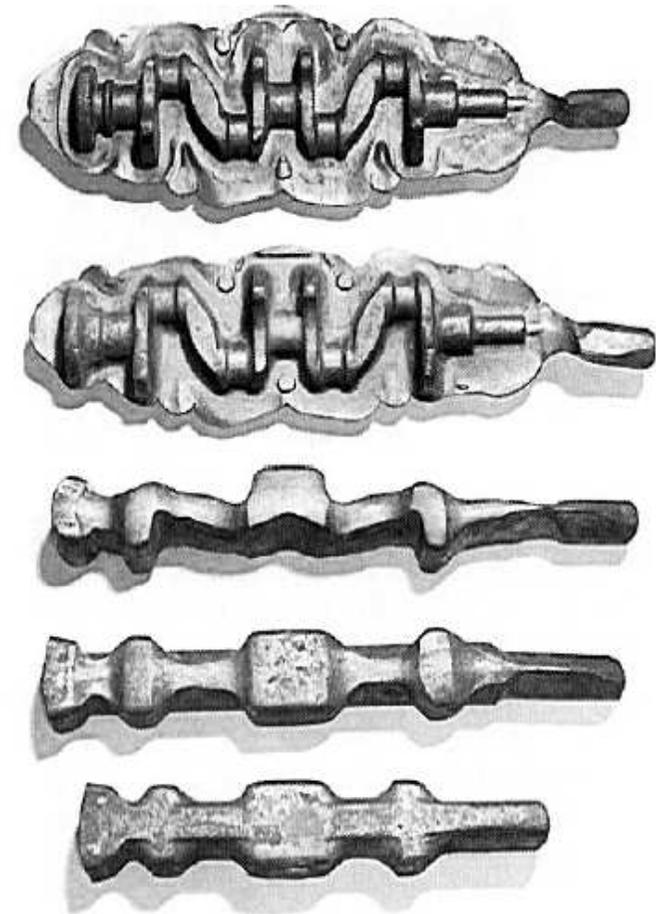
Estágios de impressão de forjamento em matriz fechada



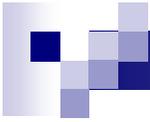
Estágios de impressão de forjamento em matriz fechada



Schematics of the impression-die forging process showing partial die filling at the beginning of flash formation in the center sketch, and the final shape with flash in the right-hand sketch



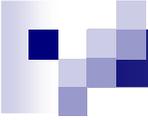
Stages (from bottom to top) in the formation of a crankshaft by hot impression-die forging



Forjamento em Matriz Fechada

Obtenção de uma Chave de Boca



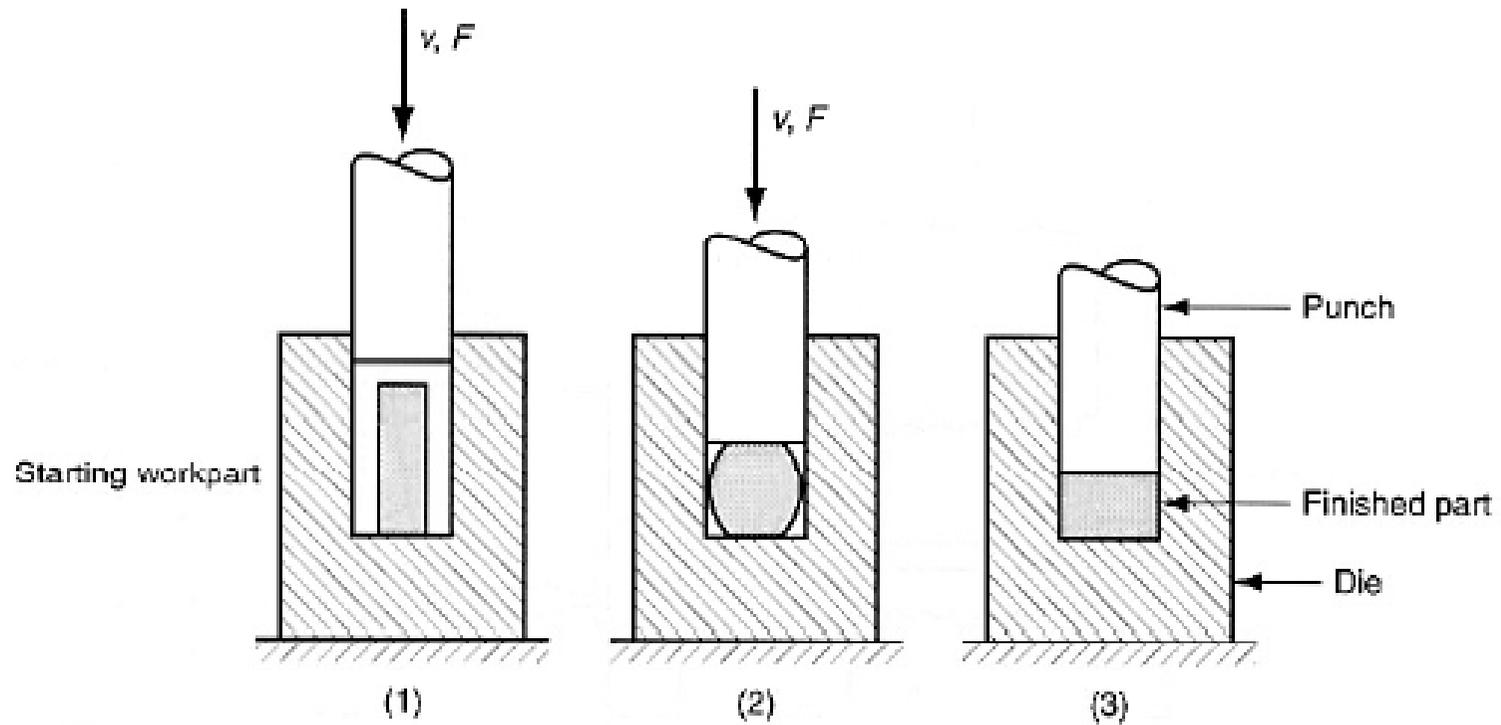


Matriz fechada

A rebarba tem duas funções:

- "válvula de segurança" para o excesso de metal na cavidade da matriz, garantindo quantidade de metal suficiente para encher toda a cavidade da matriz.
- De maior importância é que a rebarba regula o escape do metal, portanto uma rebarba muito fina aumenta muito a resistência de escoamento do sistema de maneira que a pressão sobe para valores bem altos, assegurando que o metal preencha todos os espaços da cavidade da matriz.

Estágios de impressão de forjamento em matriz fechada sem rebarba





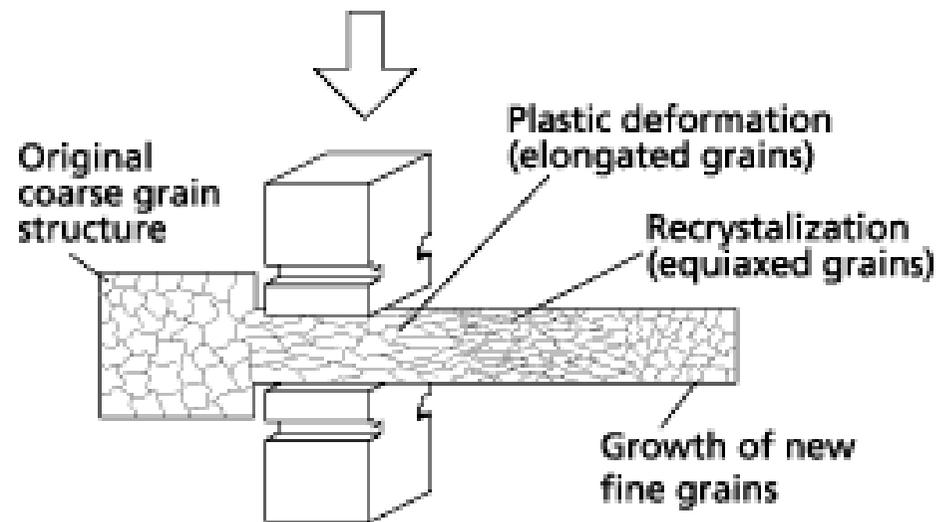
Matriz aberta x matriz fechada

Forjamento livre	Forjamento em matriz fechada
Simple, sem relação entre a forma da peça e a da ferramenta	Matriz relacionada com a forma peça
<u>meta</u> : preparação de tarugos / formas tubulares para a fabricação final (forjamento parcial em matriz / usinagem)	<u>meta</u> : possibilita boa precisão de dimensional e de formas.

Qualidade de Partes Forjadas

Acabamento superficial/controlado dimensional :
melhor que produtos fundidos

Mais resistentes e mais tenaz que fundidos, de mesmo material



Matrizes de Forjamento





Matrizes de Forjamento

- As matrizes de forjamento normalmente possuem várias cavidades de impressão, sendo uma para cada etapa de processamento do produto por forjamento. As matrizes de forjamento são submetidas a altas tensões de compressão, a altas solicitações térmicas e ainda a choque mecânico.
- Devido a essas solicitações, são requeridas as seguintes características dos materiais para matrizes: alta dureza, boa tenacidade, boa resistência à fadiga, alta resistência mecânica a quente e a alta resistência ao desgaste.



Seleção da Matriz

- Requisitos básicos
 - Resistência ao impacto
 - Resistência à abrasão
 - Resistência à fadiga térmica
 - Resistência ao desgaste
 - Resistência ao amolecimento pelo calor
 - Resistência à altas pressões

EQUIPAMENTOS



Prensas





Martelos e Prensas

Usam-se duas classes básicas de equipamentos para a operação de forja:

o martelo: que aplica golpes de impacto rápidos sobre a superfície do metal;

e as prensas: que submetem o metal a uma força compressiva aplicada relativamente de uma forma lenta.



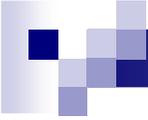
Prensas (Mecânicas ou Hidráulicas)

Características:

- Lenta
- Peças grandes
- Matrizes são mais baratas
- Melhor acabamento
- Distribuição de fluxo uniforme (def. Plástica)

■ Desvantagens:

- Custo elevado do equipamento
- Maior troca térmica
- Tempo suficiente para produzir camada de óxido que dificulta solda e perda de calor



Martelo

- Características

- Energia dissipada \Rightarrow perto da superfície da peça
- Deformações maiores perto da superfície
- Normalmente o ângulo de saída é maior
- Várias pancadas para produzir a peça
- Devido ao impacto é necessário matrizes especiais de elevado custo



Martelos e Prensas

Martelos :

alta taxa de deformação
alta energia, limitada pela
energia cinética do martelo

- de queda livre : acionados por correia ou tábua;
- mecânicos;
- pneumáticos.

Prensas :

capacidade de deformação controlada
pelo curso e força disponível em
determinadas posições

- mecânicas;
- hidráulicas.



Comportamento mecânico do material na conformação

- Região plástica da curva tensão-deformação real é de maior interesse porque refere-se a um material deformado plasticamente
- Na região plástica, o comportamento do metal é representado pela curva de fluxo:

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$$

em que K = coeficiente de resistência; e n = expoente de encruamento

- Curva de fluxo baseada na tensão real e deformação real

FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA

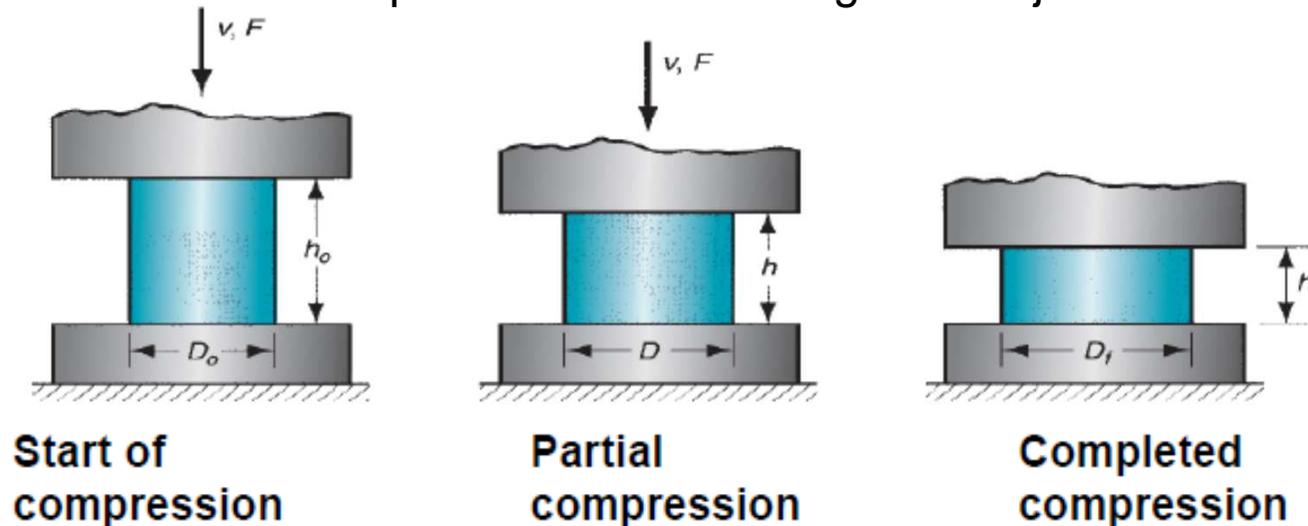
Considerando que as **condições são ideais** (sem atrito), as deformações são homogêneas, ou seja, o diâmetro aumenta uniformemente quando a altura decresce.

Em condição Ideal:

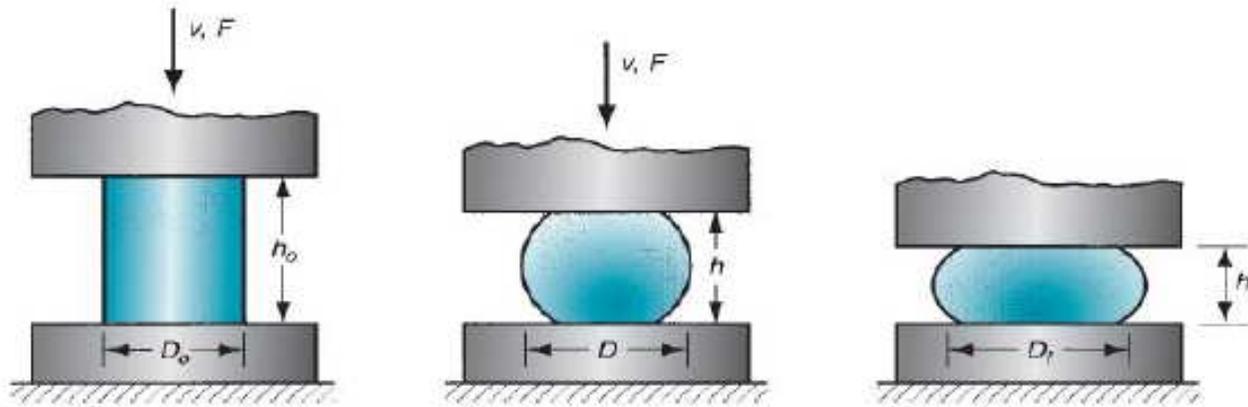
$$\varepsilon = \ln (h_o/h)$$

$$F = \sigma_f A$$

Em que: ε é a **deformação aplicada**, F é a força necessária para forjar e σ_f é a tensão de fluxo correspondente a ε no estágio do forjamento



Considerando o Atrito e a razão D/h



Start of
compression

Partial
compression

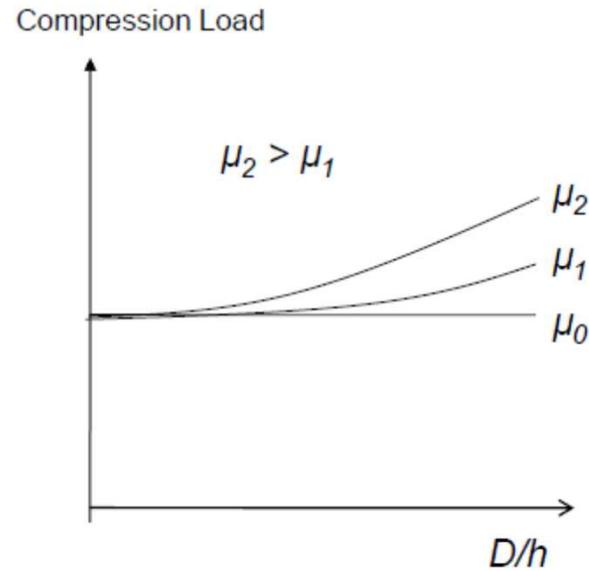
Completed
compression

$$F = K_f \sigma_f A$$

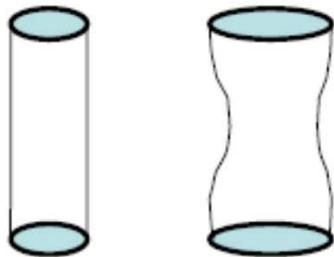
$$K_f = 1 + \frac{0.4 \mu D}{h}$$

Em que: K_f é o fator de forma no forjamento; μ é o coeficiente de atrito; D é o diâmetro e h a altura

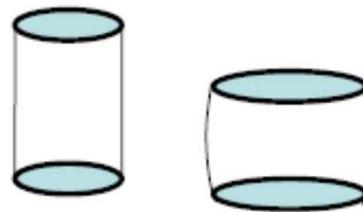
Efeito da razão D/h na carga



Effect of h/D ratio on barreling:

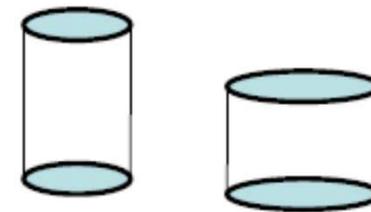


Long cylinder: $h/D > 2$



Cylinder having $h/D < 2$

Com atrito



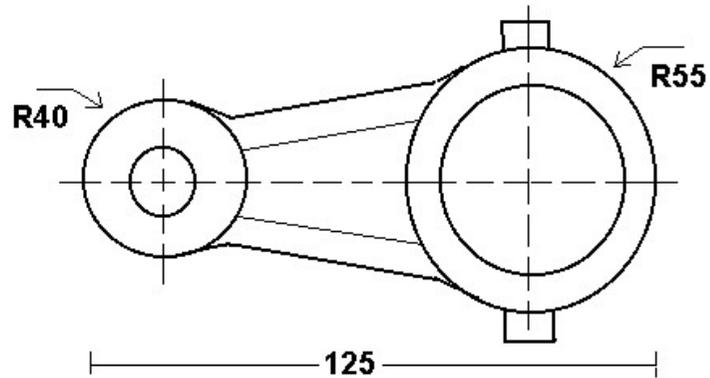
Frictionless compression

Projeto

- Engloba a definição de todas as atividades, etapas, dimensões, sequência de operações, materiais e tratamentos relacionados com a fabricação de uma dada peça.
- O projeto se baseia nas informações iniciais do que se deseja produzir.



Informações para o projeto:



- Desenho da peça:
- Material
- Quantidade:
- Tratamento térmico:



Daí resultam:

- Tipo de forjamento (equipamento) ;
- Número de matrizes e suas dimensões (ferramentaria) ;
- Tratamento térmico das matrizes ;
- Massa, forma e dimensões iniciais do material a ser forjado ;
- Equipamentos auxiliares ;
- Fornos e temperaturas de aquecimento e reaquecimento das diversas etapas;
- etc...

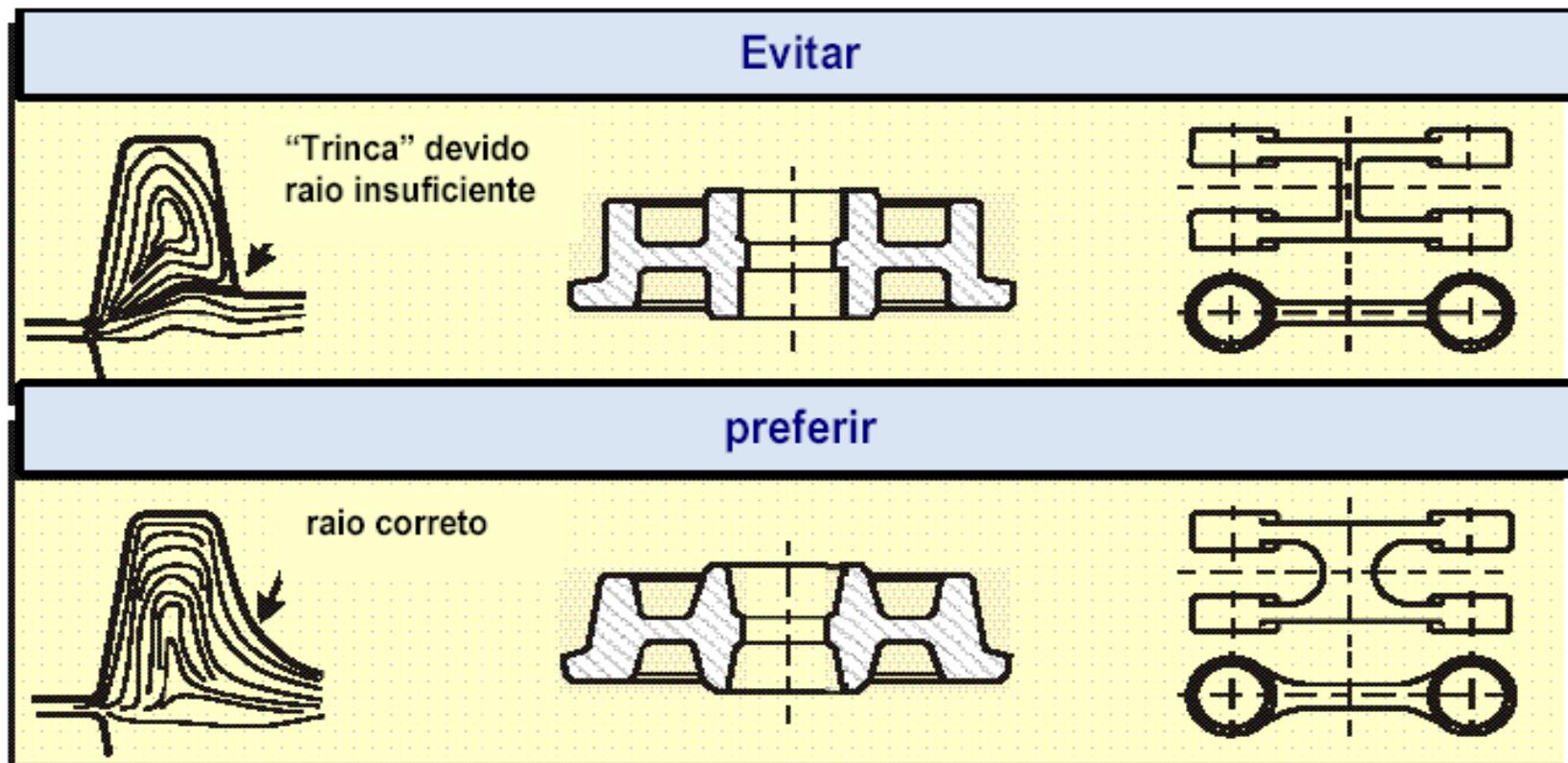


Projeto:

O projeto deve prever:

- sobremetal para usinagem;
- ângulos de saída para as superfícies que forem paralela a direção de forjamento;
- raios de concordância para os cantos

Projeto:





Forjamento simples - operações básicas:

- ❑ **Corte da Matéria Prima:** serra, disco abrasivo, cisalhamento, chama, etc...
- ❑ **Aquecimento:** feito em fornos a óleo, gás, elétricos, etc, a uma temperatura adequada para facilitar a deformação;
- ❑ **Conformação:** pode ser feita em mais de uma operação - algumas preparatórias - usando-se forjamento aberto ou em matrizes fechadas;
- ❑ **Rebarbamento:** remoção do material que normalmente fica em excesso na peça;
- ❑ **Acabamento:** limpeza e tratamento.



Tolerâncias/Processos

- Forjamento a quente – 2,50 mm a 1,25 mm
- Forjamento a Frio – 0,1 mm
- Fundição - 1,5 mm
- Fundição de Precisão – 0,03 mm
- Sinterizado – 0,1 mm – 0,01 mm
- Usinado – 0,01 mm – 0,0005 mm



Referências

Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica - CBCM
(Metal Forming Innovation Center - MFC)

Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação e tratamento –
Volume II - Vicente Chiaverini

Apostila: PMR – 2202 Introdução Manufatura Mecânica
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha. Escola Politécnica da USP

Kalpakjian, S. & Schmid, S. R. – Manufacturing Engineering and
Technology – Ed. Prentice Hall 4 ed. EUA, 2001

Internet:

[source:www.scotforge.com]