

Introdução ao Projeto e Manufatura

Conformação Plástica dos Metais

LUCIANA MONTANARI

Conformação:

- É o processo de transformação dos materiais (metálicos), através da ação de tensões mecânicas sem que haja remoção de material;
- A modificação ocorre na forma, na dimensão e nas propriedades físicas dos materiais.

Propriedades de Interesse

Melhora - propriedades mecânicas:

- Resistência à Tração;
- Dureza;
- Tenacidade;

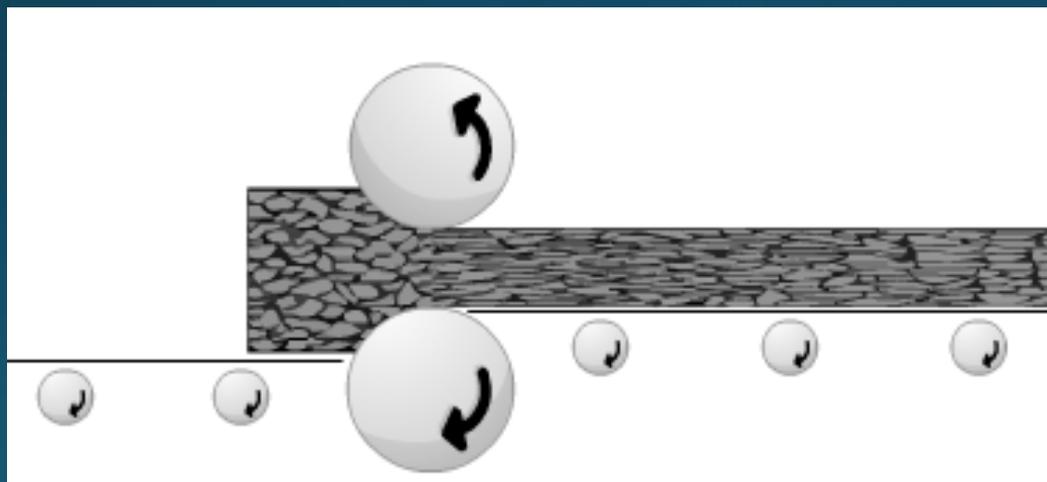
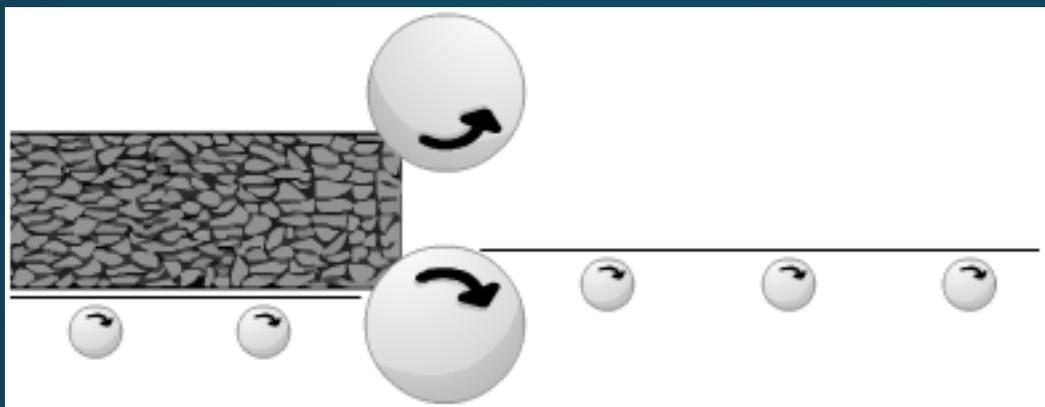
Características serão função:

- **da matéria prima utilizada:**
 - composição química;
 - estrutura metalúrgica (natureza, tamanho, forma);
- **das condições impostas pelo processo:**
 - o tipo e o grau de deformação;
 - a velocidade de deformação;
 - a temperatura em que o material é deformado.

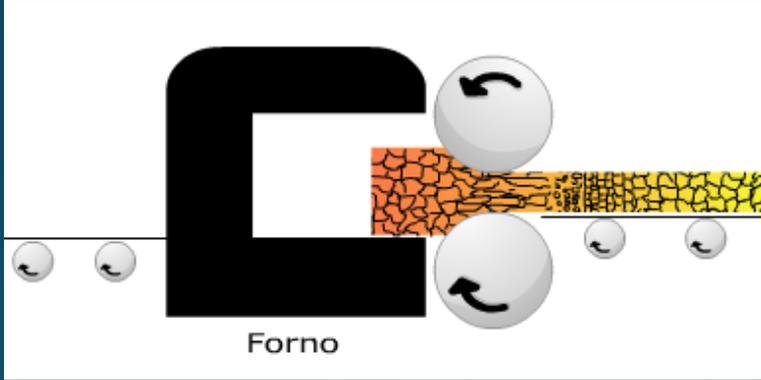
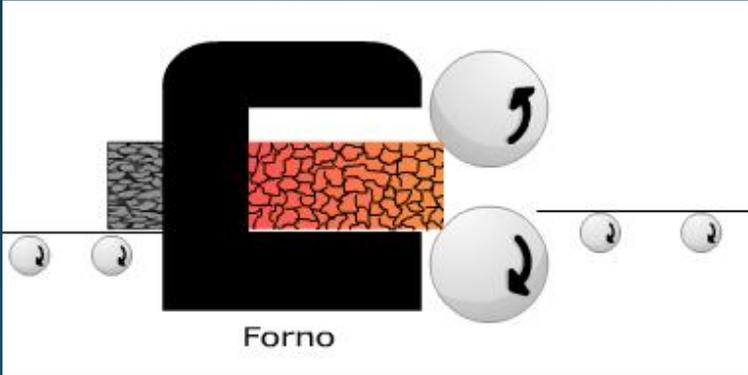
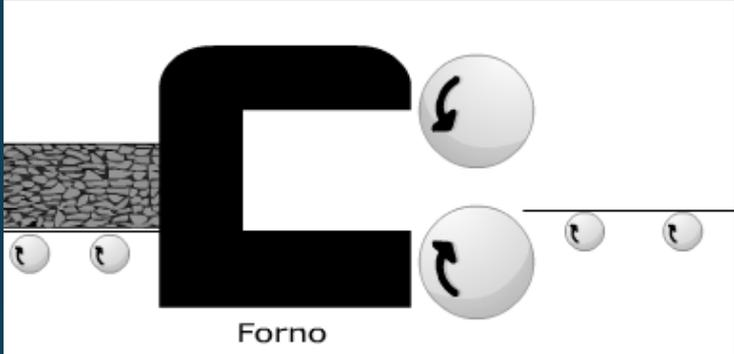
Influência da Temperatura

- **A QUENTE** - aquele que é executado em temperaturas acima de $0,5T_f$
- **A MORNADO** - executado na faixa compreendida (grosseiramente) entre $0,3$ e $0,5 T_f$
- **A FRIO** - aquele que é executado entre 0 e $0,3 T_f$

A Frio



A Quente



Tipos de processo de deformação

1. Deformação Volumétrica

- Laminação
- Forjamento
- Extrusão
- Trefilação de barras e fios

2. Deformação na chapa

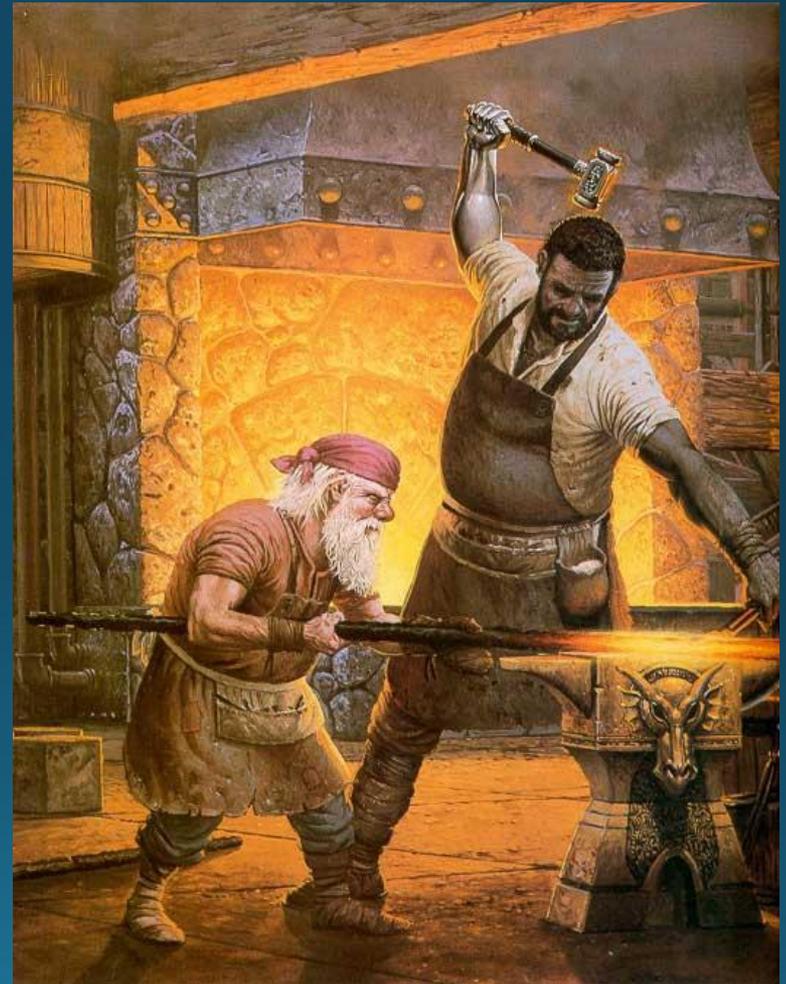
- Conformação de Chapas
- Dobra
- Estampagem profunda
- Corte
- Processos miscelânea

Principais processos de conformação

O forjamento - a alteração de forma é realizada através de forças de compressão exercidas por ferramentas atuadas por martelos de queda ou por prensas hidráulicas, mecânicas, ou de fricção.

A tecnologia do forjamento permite fabricar peças com dimensões e formas geométricas muito diversificadas numa gama muito variada de materiais metálicos.

O campo de aplicação desta tecnologia estende-se a um conjunto de indústrias muito vasto, das quais se destacam pela sua importância; a dos transportes (automóvel, aeronáutica, ferroviária e naval), a militar, a do fabrico de maquinaria industrial e a de produção de energia.



Forjamento

Aplicações

Indústria de
automóveis

Aeroespacial

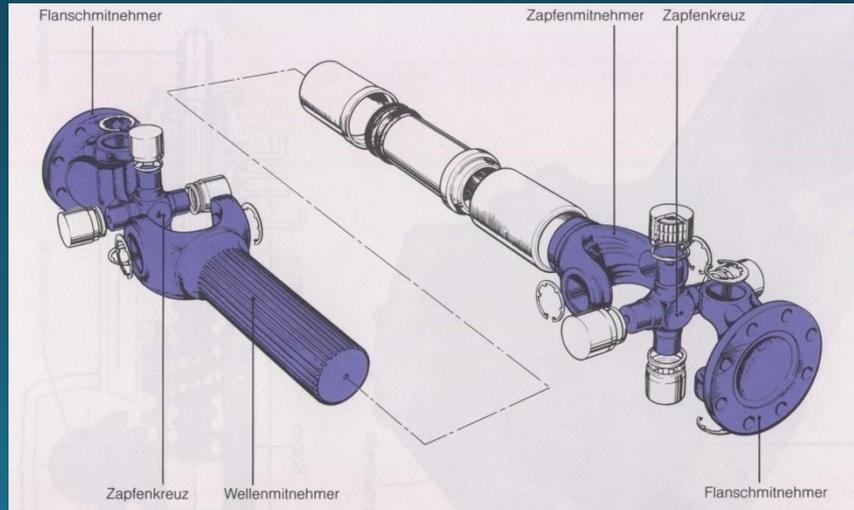
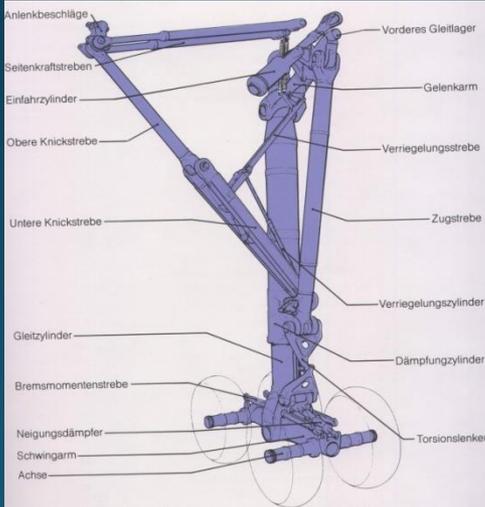
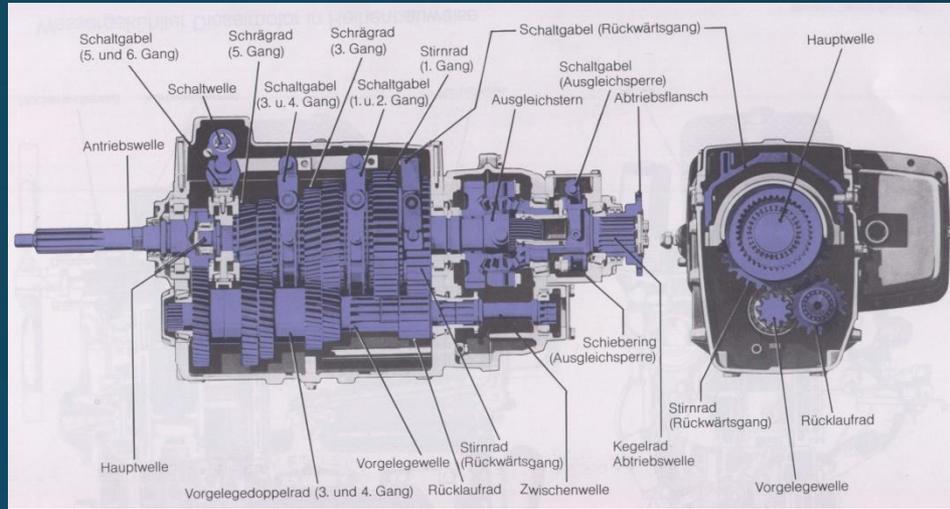
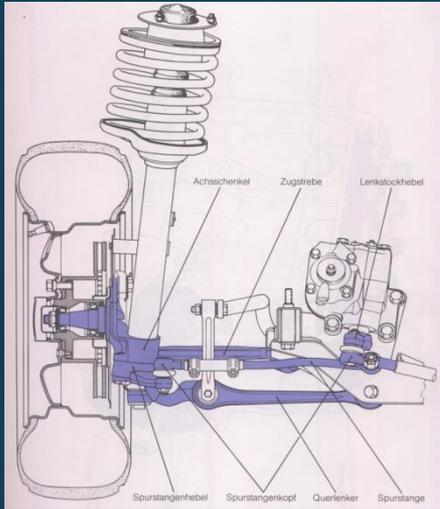
Militar

Agrícola

Mineira



Exemplos de aplicação de peças forjadas em automóveis, caminhões e aviões.



Forjamento

Peças forjadas em um automóvel (250 peças):

Componentes do motor: Válvulas, árvore de cames, bielas, etc.

Componentes da transmissão: Engrenagens cônicas, anéis sincronizadores, juntas, eixos, cubos de embreagem, etc.

Componentes do chassis e da suspensão: Cubos da roda, braços e triângulos de suspensão, etc.

Componentes da direção: Colunas, rótulas, barras de torção, eixos de direção, etc.

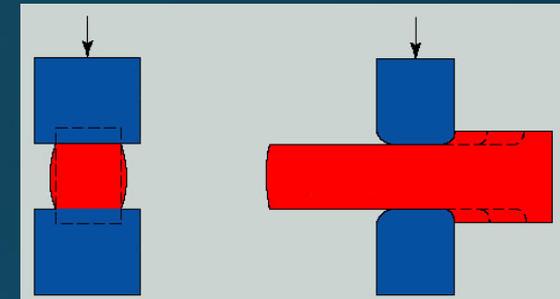
Classificação dos processos de forjamento

Os processos de forjamento podem ser classificados com base no tipo de ferramenta que trabalha a peça:

Forjamento em matriz aberta

O escoamento do material não é, ou é apenas ligeiramente, constringido lateralmente.

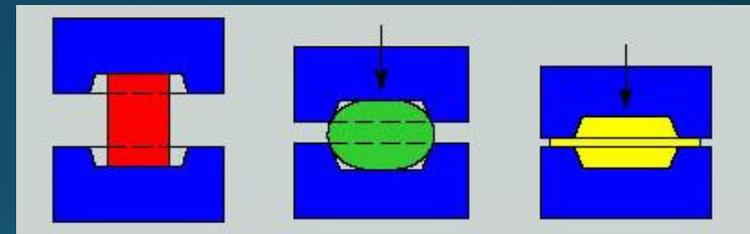
As ferramentas possuem geometrias simples.



Forjamento em matriz fechada

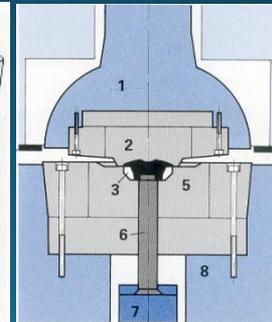
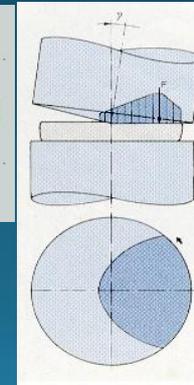
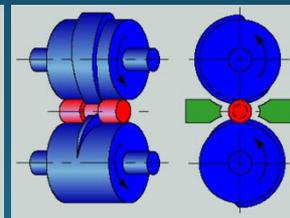
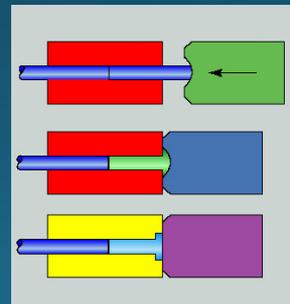
O escoamento do material é constringido lateralmente.

As ferramentas possuem a forma negativa da peça a fabricar.

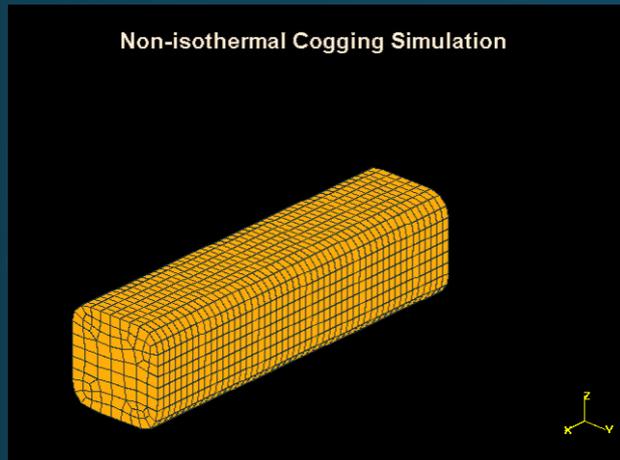


Outros tipos de forjamento

Compressão axial (ou recalçagem),
Forjamento por intermédio de rolos,
Forjamento orbital e rotativo.



Forjamento em matriz aberta



As ferramentas possuem geometrias simples e aplicam forças de compressão localizadas. O constrangimento lateral é pequeno o ou, muitas vezes, inexistente. A forma final da peça é obtida por intermédio da manipulação da matéria-prima entre golpes sucessivos.

Principais vantagens:

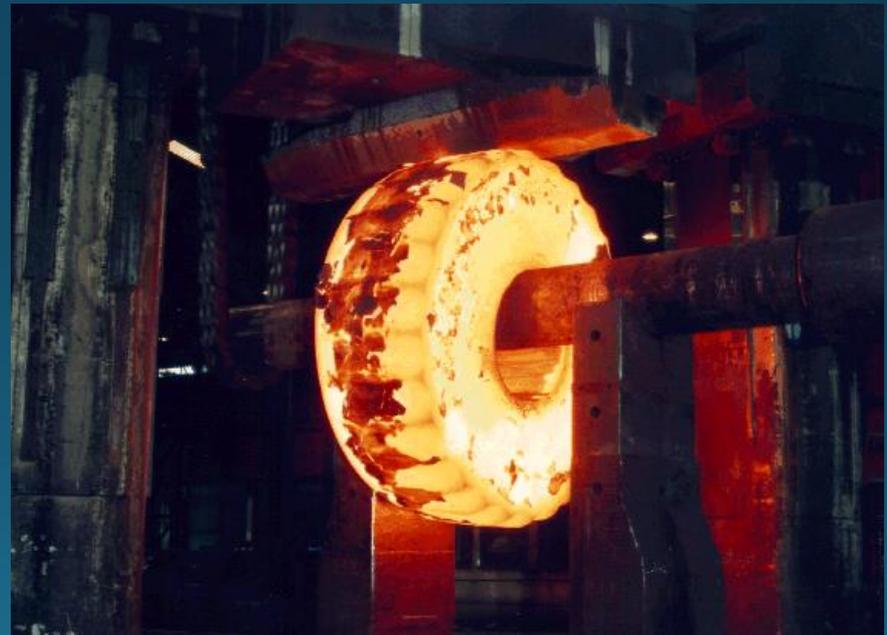
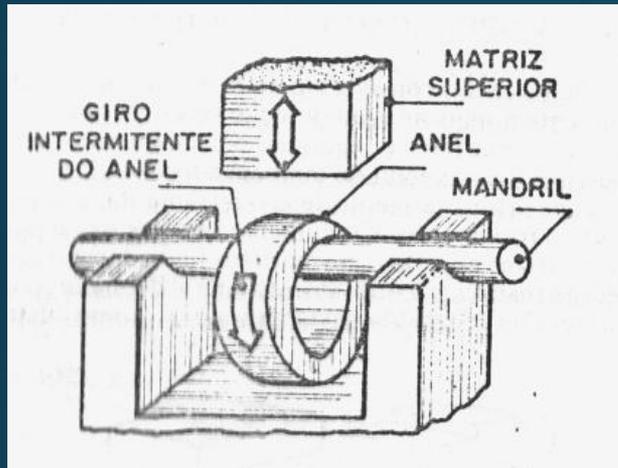
- i) Baixo custo de operação.
- ii) A geometria das ferramentas não depende das peças a forjar.
 - a) Aplicabilidade adequada à fabricação de pequenas séries.
 - b) Adequabilidade à fabricação de peças com dimensões, geometrias e pesos muito variados.
- iii) Excelentes propriedades mecânicas (resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e resistência à fadiga).

Principais desvantagens e limitações:

- i) Apenas pode ser aplicado a formas geométricas simples.
- ii) Não permite obter tolerâncias de fabricação apertadas. A geometria final das peças é obtida por forjamento em matriz fechada ou usinagem.
- iii) Possui uma cadência de produção baixa.
- iv) Necessita de operários especializados e com algum grau de perícia.



Forjamento em matriz fechada aberta



Forjamento em matriz fechada

O material é disponibilizado na forma de varão ou barra.

A pré-forma obtém-se por corte do varão ou barra e a sua geometria tem de assegurar o enchimento completo das cavidades das matrizes.

As matrizes possuem a forma negativa das peças a fabricar de modo a constrangerem a deformação plástica da pré-forma.

Forjamento convencional

Destinado ao fabricação de peças com rebarba.

A complexidade de forma e as tolerâncias geométricas das peças enquadram-se nos padrões gerais de fabricação.



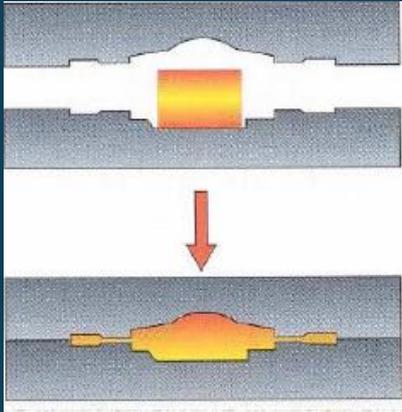
Forjamento de precisão

Destinado à fabricação de peças na forma final ou quase final, sem rebarba significativa.

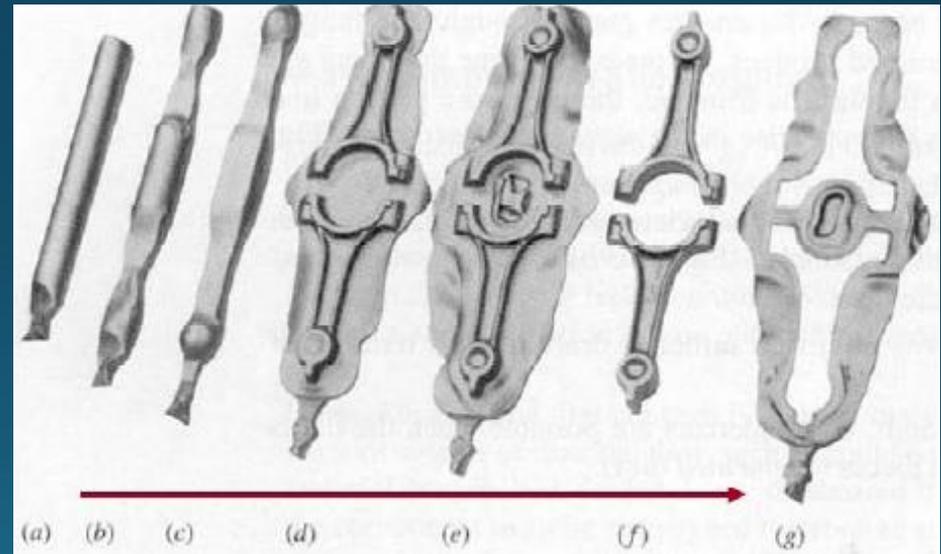
As tolerâncias geométricas das peças são bastante mais apertadas do que as habitualmente utilizadas no forjamento convencional.



Forjamento em matriz fechada



Seqüência de fabricação de uma biela.



Matriz aberta x matriz fechada

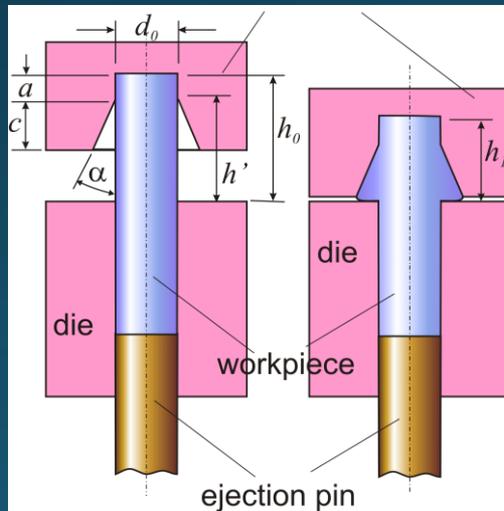
| Forjamento livre | Forjamento em matriz fechada |
|--|--|
| Simple, sem relação entre a forma da peça e a da ferramenta | Matriz relacionada com a forma peça |
| <u>meta</u> : preparação de tarugos / formas tubulares para a fabricação final (forjamento parcial em matriz / usinagem) | <u>meta</u> :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

Outros tipos de forjamento

A compressão axial (recalcagem ou encabeçamento) - utilizada na fabricação de parafusos e rebites.



Defeitos característicos



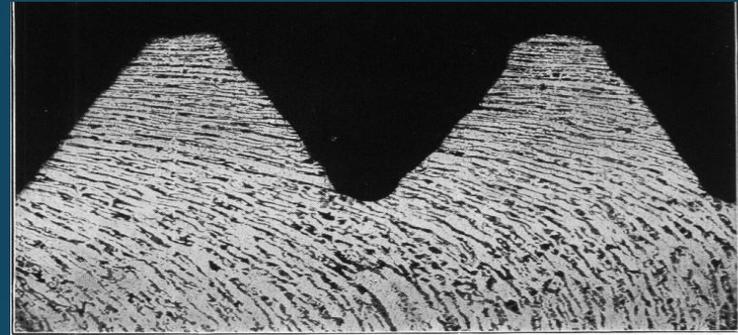
| Upsetting ratio h_0/d_0 | Cone angle 2α (deg.) | Guide length a (mm) | Conical portion c (mm) |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 2.5 | 15 | $0.6 d_0$ | $1.37 d_0$ |
| 3.3 | 15 | $1.0 d_0$ | $1.56 d_0$ |
| 3.9 | 15 | $1.4 d_0$ | $1.66 d_0$ |
| 4.3 | 20 | $1.7 d_0$ | $1.56 d_0$ |
| 4.5 | 25 | $1.9 d_0$ | $1.45 d_0$ |

Vantagens do forjamento

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

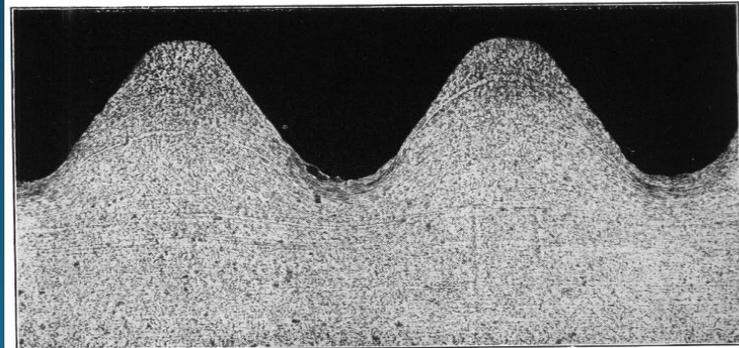
Porque forjar?

Rosca usinada.



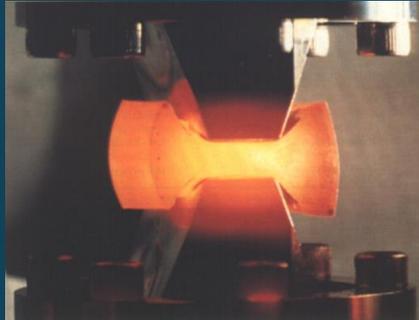
— Filetes de rosca de porca. Nota-se, pela deformação da textura a'inhada que o furo central da porca foi estampado (da direita para a esquerda) e depois se processou o corte dos filetes com macho. Ataque: nítrico. 23 x.

Rosca produzida por forjamento.



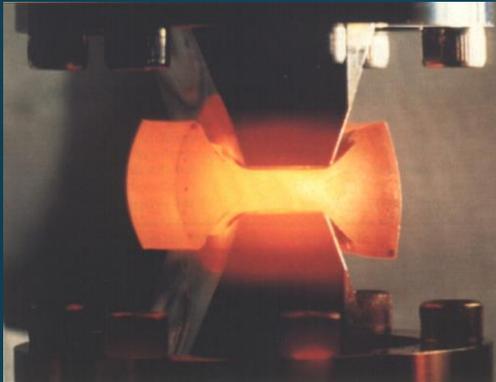
— Filetes de rosca de parafuso produzidos por rolamento. Nota-se a deformação das fibras do material por esse trabalho e também que a deformação é máxima no fundo dos filetes. Ataque: nítrico. 23 x.

Forjados x Usinados



- Maior flexibilidade quanto ao tamanho da peça, já que não existe limitação com respeito ao tamanho da placa ou barra disponível
- Grãos orientados com respeito à forma aumentando a resistência no sentido de solicitação
- Uso mais econômico e ambiental dos materiais
- Menor número de operações

Forjados x Sinterizados



- Mais resistentes
- Ausência de porosidade
- Maior flexibilidade no projeto
- Matéria-prima mais barata e disponível

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

Forjamento a frio

Possibilita vantagens como:

- propriedades mecânicas melhoradas;
- superfície final com baixa rugosidade;
- tolerância dimensional mais fechada;
- economia de matéria-prima, já que para uma dada peça;
- o peso inicial do tarugo para esse processo de conformação é bem menor quando comparado ao forjamento a quente.

Forjamento a quente



Corte



Forjamento a quente



Usinagem -
Rebarbas



Acabamento



Têmpera e revenimento - as peças passam por transformações microestruturais, conferindo resistência à tração, flexão, dobramento e abrasão, com dureza apropriada, conforme projeto.



Jato de Granalha



Galvanoplastia



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 | |

Temperatura de aquecimento da matéria prima – forjamento a frio vs. a quente

Ligas metálicas mais utilizadas em operações de forjamento a frio



Aços ao carbono
(fosfatação / lubrificação sabão)

| Tipo de Material | Identificação |
|--------------------------------|--|
| Aços ao carbono e aços ligados | (AISI) 1010, 1015, 1020, 1035, 1045 3115 4130, 4140 5115, 5140 8620 |
| Aços inoxidáveis | (AISI) Ferríticos - 410, 430, 431 Austeníticos - 302, 304, 316, 321 |
| Ligas de alumínio | (Aluminum Association) 1050, 1070, 1100, 1285 2017, 2024 3003 5052, 5152 6053, 6063, 6066 7075 |
| Ligas de cobre | Grande variedade com destaque especial para os cobsres da série C10000 e os latões das séries C20000 e C30000. |

Temperaturas recomendadas para o forjamento a quente de alguns materiais



| Material | Temperatura de forjamento (°C) |
|-----------------------------|--------------------------------|
| Aços carbono e aços ligados | 850 – 1150 |
| Aços inoxidáveis | 1100 – 1250 |
| Ligas de alumínio | 400 – 550 |
| Ligas de magnésio | 250 – 350 |
| Ligas de cobre | 600 - 900 |
| Ligas de titânio | 700 - 950 |
| Ligas de níquel | 1000 - 1200 |

Forjamento a morno

Utiliza uma gama de temperaturas que permite combinar as vantagens do forjamento a frio com as do forjamento a quente.

No caso do forjamento a morno dos aços as temperaturas recomendadas variam entre os 450-850 °C sendo os limites inferior e superior condicionados pelo aumento excessivo da força (temperaturas mais baixas) e pela oxidação (temperaturas mais elevadas).

Merece igualmente destaque o fato do forjamento a morno dos aços não exigir operações de 'fosfatação e ensaboamento' e poder, em alguns casos, eliminar a necessidade de realização de tratamentos térmicos a montante e a jusante da operação.

| Peso (Kg) | Frio (Produção anual) | Morno (Produção anual) |
|-----------|--------------------------|---------------------------|
| 0.10-0.25 | > 300.000 | > 200.000 |
| 0.25-0.75 | > 200.000 | > 150.000 |
| 0.75-2.5 | > 100.000 | > 25.000 |

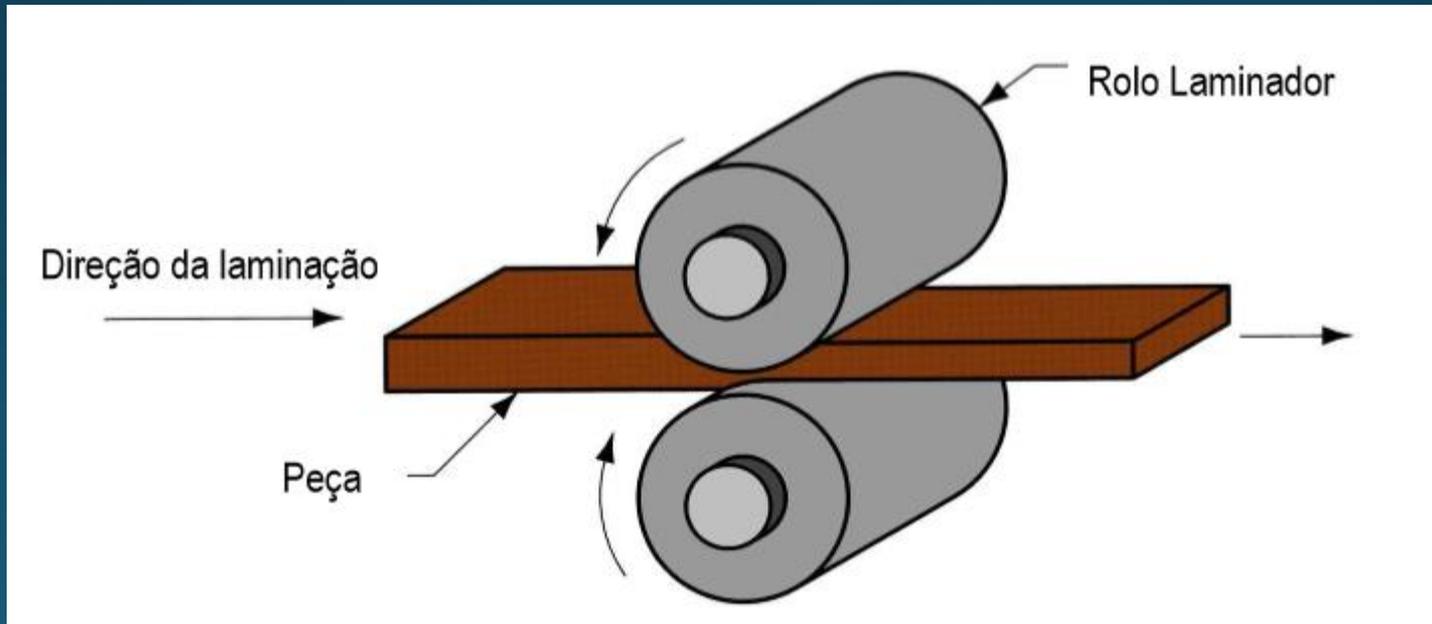
| | Quente | Morno | Frio |
|---------------------------------------|-------------|----------|--------------|
| Peso dos componentes (kg) | 0.05-1500 | 0.001-50 | 0.001-30 |
| Precisão dimensional | IT 13-16 | IT 11-14 | IT 8-11 |
| Rugosidade (R) | > 50-100 µm | >30 µm | >10 µm |
| Tensão efectiva (em termos relativos) | 20 a 30% | 30 a 50% | 100% |
| Extensão efectiva máxima admissível | < 6 | < 4 | < 1.6 |
| Custo (em termos relativos) | 113% | 100% | 147% |
| Operações de maquinagem subsequentes | Elevadas | Baixas | Muito baixas |



Laminação

Processo de Deformação no qual a espessura da peça é reduzida pela ação de forças compressivas exercidas por dois laminadores opostos

→ *diminuição da seção* → *aumento do comprimento*



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
 - produtos acabados

Configurações de laminadores

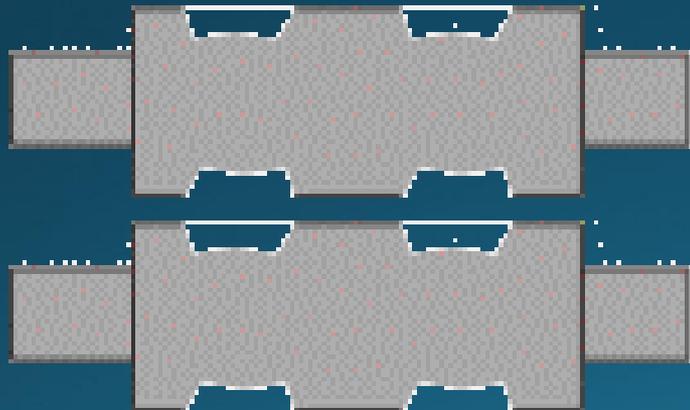
- **Duo** – dois laminadores opostos
- **Trio** – peça passa através dos laminadores passes em ambos os lados
- **Quádruo** – Laminadores maiores apoiam os laminadores menores por entre os quais a peça passa
- **Laminador com cilindros agrupados** (Sendzimir) – múltiplos laminadores de apoio sobre laminadores menores
- **Trem de Laminadores** (Tandem) ou em sequência – sequência de laminadores Duo (em torno de 8 ou dez pares de Laminadores em sequencia)

Laminação



Laminação

RANHURADOS



LISOS



Laminação

Cilindro liso



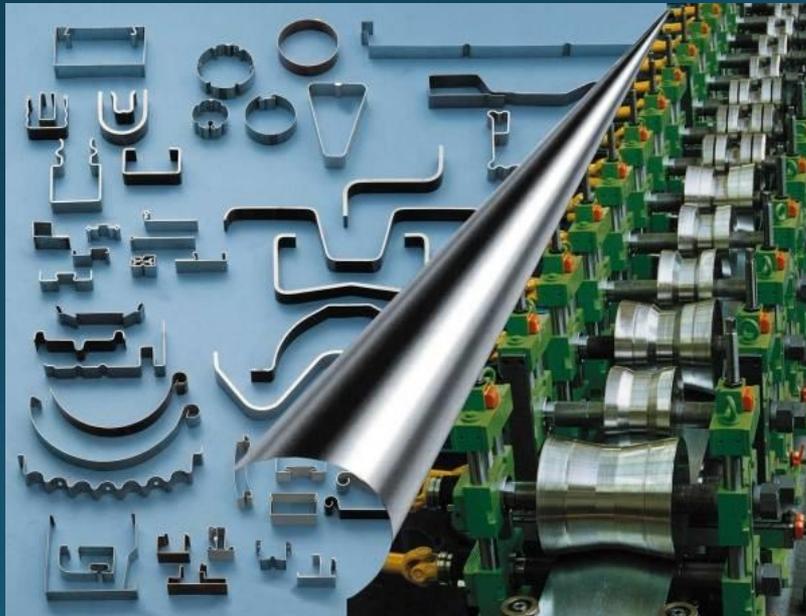
Laminação

Cilindro ranhurado



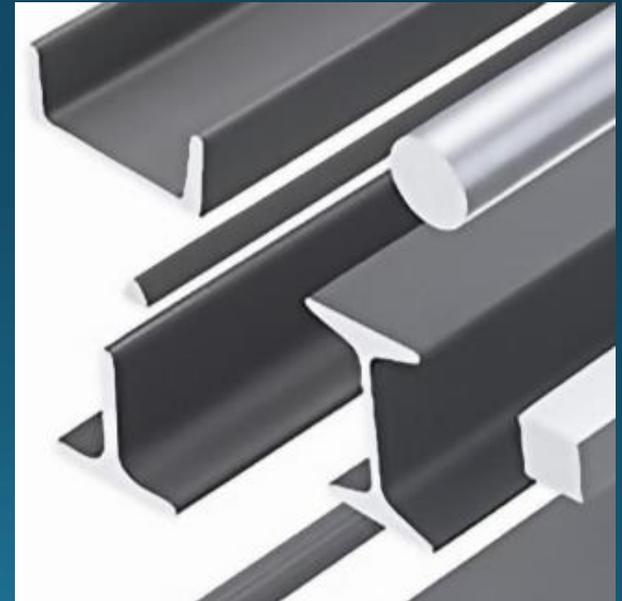
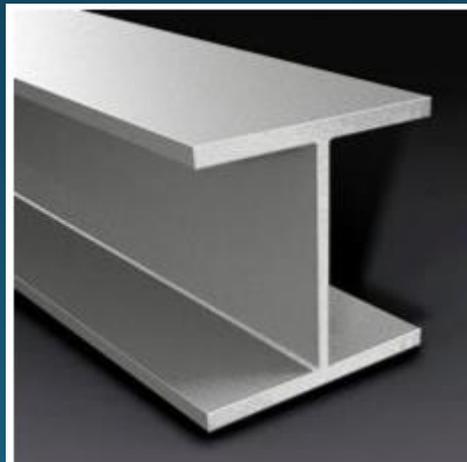
Caneluras ou passes

Laminação



Produtos laminados

- Perfis para construção civil tais como perfil I, L, T e canais em U
- Trilhos para estradas de ferro
- Barras e tarugos com seção circular ou quadrada



Vantagens em relação ao corte de rosca por usinagem:

- Taxas de produção mais altas
- Melhor aproveitamento da matéria prima
- Roscas mais resistentes e com melhor resistência a fadiga devido ao encruamento

Laminação

- Chapas finas a quente – de 1,2 a 6 mm
- Chapas finas a frio – de 0,3 a 2 mm
- Chapas galvanizadas – laminadas com revestimento protetor de zinco (por imersão em zinco fundido).
- Aços finos de seção quadrada, redonda, chata.
- Tarugos de seção quadrada, redonda, sextavada.
- Diversos tipos de perfis: T Y V L duplo T.

Laminação

Espessuras mínimas que podem ser laminadas a partir de uma chapa de aço inox 18-8 de 3,15 mm de espessura.

| Diâmetro do cilindro (mm) | Espessura mínima laminada (mm) |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| 400 | 0,90 |
| 300 | 0,66 |
| 250 | 0,58 |
| 200 | 0,45 |
| 130 | 0,30 |

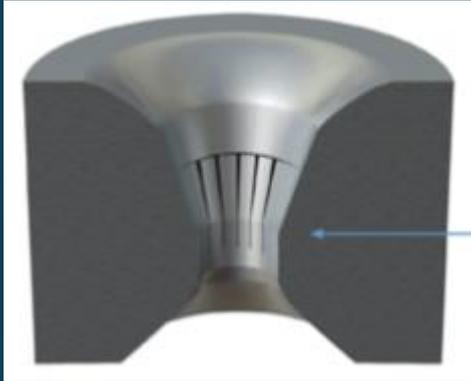
Trefilação

Operação em que a matéria-prima é estirada através de uma matriz em forma de canal convergente (FIEIRA ou TREFILA) por meio de uma força trativa aplicada do lado de saída da matriz. O escoamento plástico é produzido principalmente pelas forças compressivas provenientes da reação da matriz sobre o material.

Forma resultante: simetria circular é muito comum em peças trefiladas, mas não obrigatória.

Condições térmicas: normalmente a frio.

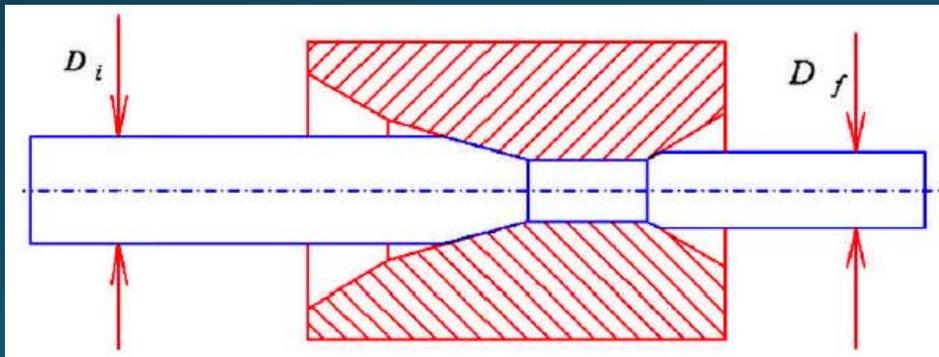
Matriz de trefilação



Trefilação

Geometria da fieira: é dividida em quatro zonas

- (1) de entrada
- (2) de redução (α = ângulo de abordagem)
- (3) (guia) de calibração-zona cilíndrica (acabamento é crítico)
- (4) de saída



Trefilação

Produtos mais comuns:

| | | |
|---------------|---------------------------------|--|
| Barras | $\phi > 25 \text{ mm}$ | |
| Arames | comuns | grossos $25 > \phi > 5 \text{ mm}$ |
| | | médios $5 > \phi > 1,6 \text{ mm}$ |
| | | finos $1,6 > \phi > 0,7 \text{ mm}$ |
| | especiais | $0,02\text{mm} > \phi$ |
| Tubos | trefilados de diferentes formas | |

Bancadas de trefilação – arames

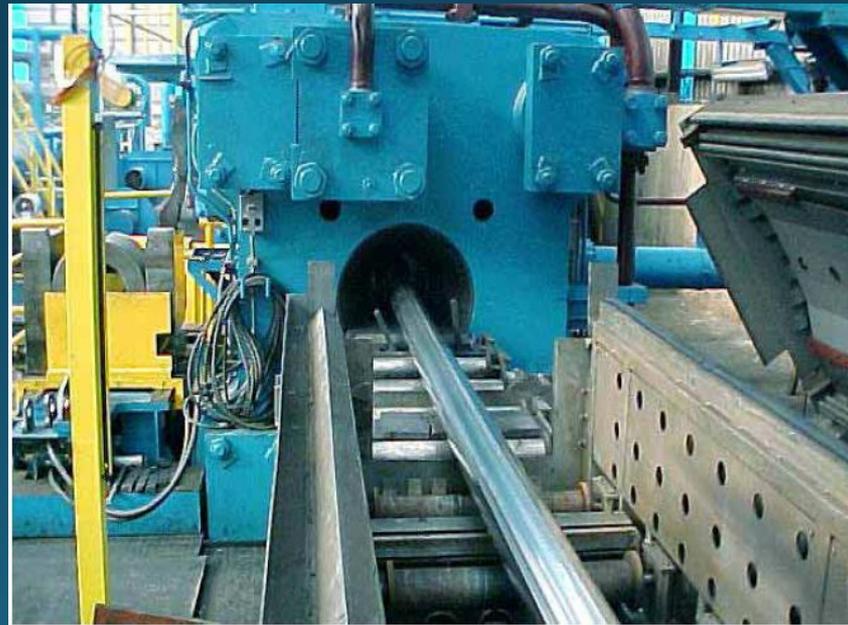


Produtos de trefilação



Extrusão

Consiste em fazer passar um tarugo ou lingote, colocado dentro de um recipiente, pela abertura existente no meio de uma ferramenta colocada na extremidade do recipiente, por meio da ação de compressão de um pistão acionado pneumática ou hidraulicamente.



Extrusão

Formas resultantes: Praticamente qualquer forma de seção transversal vazada ou cheia pode ser produzida por extrusão. Como a geometria da matriz permanece inalterada, os produtos extrudados têm seção transversal constante .



Extrusão

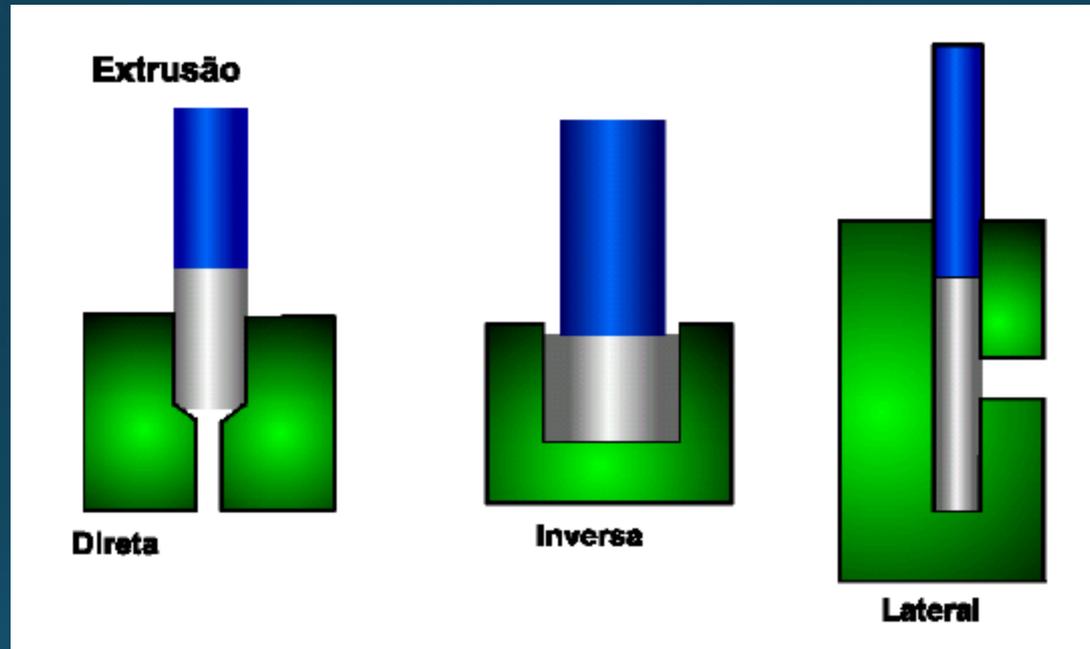


Extrusão

Produtos mais comuns: quadros de janelas e portas, trilhos para portas deslizantes, tubos de várias seções transversais e formas arquitetônicas.

Materiais: Alumínio, cobre, aço, magnésio e chumbo são os materiais mais comumente extrudados.

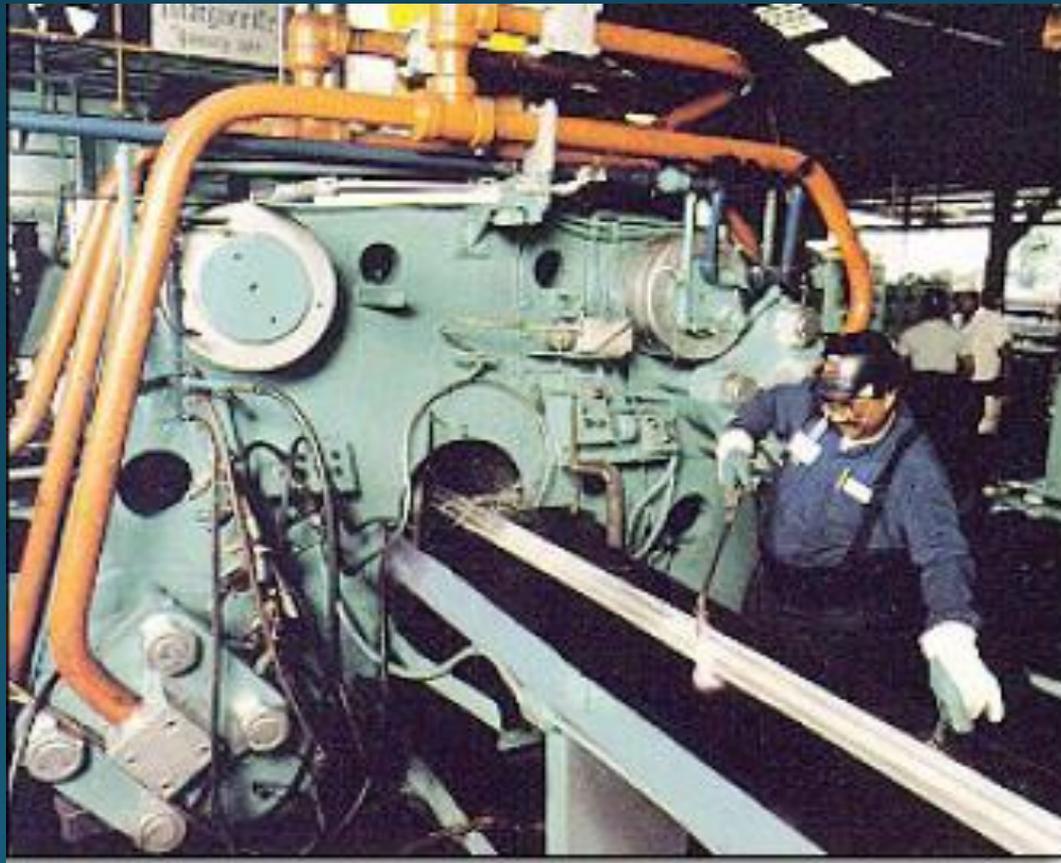
Extrusão



Extrusão



Extrusão



Extrusão

Matrizes de extrusão



Extrusão

Matrizes de extrusão



Faixas de temperatura para extrusão

| Faixas de Temperatura de Extrusão para Vários Metais | |
|---|-----------------------|
| METAL | TEMPERATURA °C |
| Chumbo | 200 - 250 |
| Alumínio e suas Ligas | 375 - 475 |
| Cobre e suas Ligas | 650 - 950 |
| Aços | 875 - 1300 |
| Ligas Refratárias | 975 - 2200 |

Conformação de chapas

- Consiste em conformar um disco plano ("blank") à forma de uma matriz, pela aplicação de esforços transmitidos através de um punção. Na operação ocorrem : alongamento e contração das dimensões de todos os elementos de volume, em três dimensões. A chapa , originalmente plana, adquire nova forma geométrica.
- **Classificação dos Processos:** estampagem profunda, corte em prensa, estiramento, etc.

Conformação de chapas

-Normalmente realizado a frio

-Espessura da chapa de metal = 0,4 mm (1/64 pol.) a 6 mm (1/4 pol.)

Aplicações:

Fuselagens de
aviões

Utensílios de
cozinha

Eletrodomésticos



Conformação chapas

Peças cilíndricas



Peças retangulares



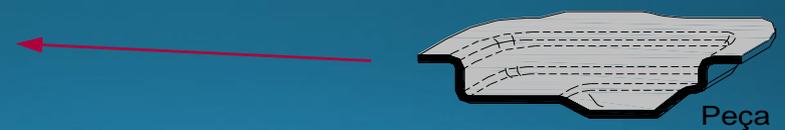
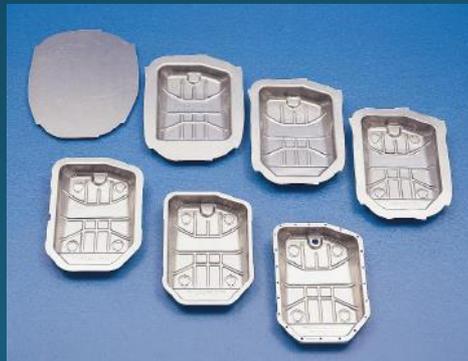
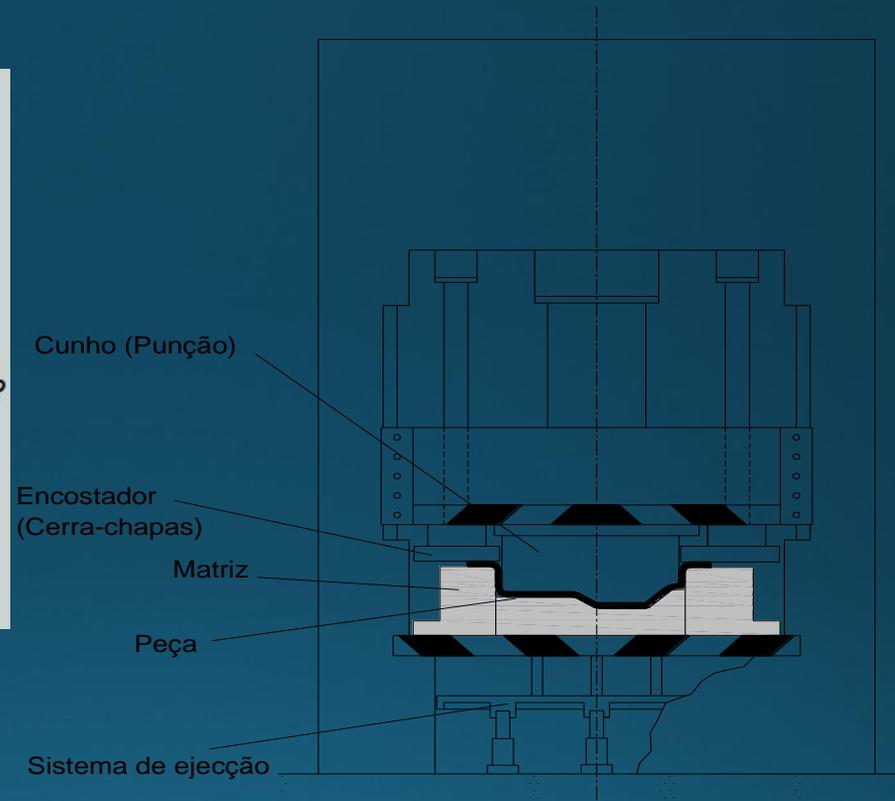
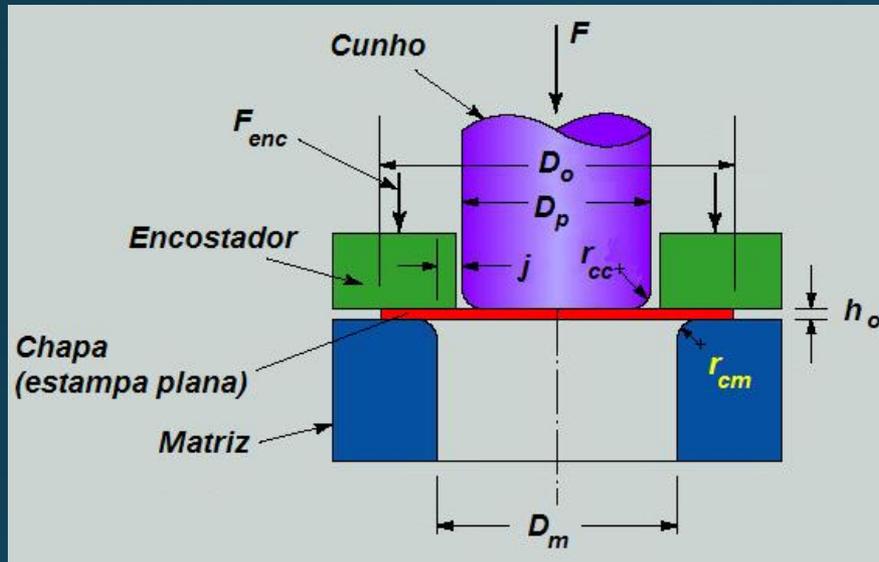
Peças complexas



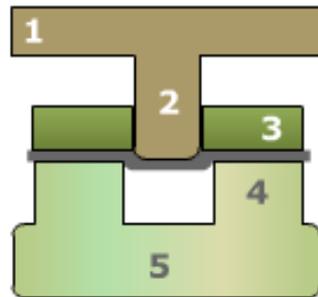
Vantagem conformação chapas

- Alta resistência
- Boa exatidão dimensional
- Bom Acabamento
- Custo relativamente baixo
- Produção em massa considerada econômica em larga escala

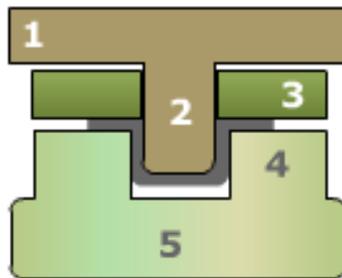
Terminologia



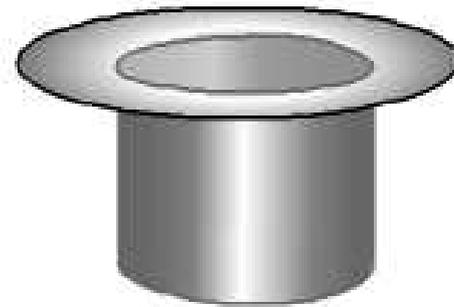
Estampagem profunda



- 1- Suporte de punção
- 2- Punção ou penetrador
- 3- Prensa chapas ou sujeitador
- 4- Matriz
- 5- Suporte da matriz



- 1- Suporte de punção
- 2- Punção ou penetrador
- 3- Prensa chapas ou sujeitador
- 4- Matriz
- 5- Suporte da matriz



Chapa conformada

Estampagem profunda



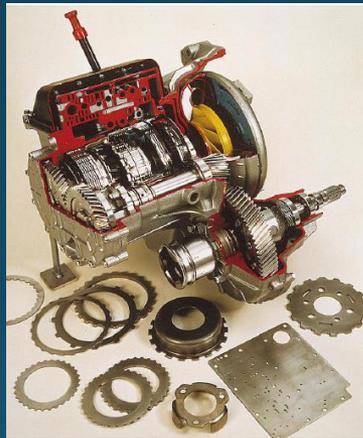
Produto conformação chapas

- O Nissan March tem no teto uma solução interessante: dois vincos, em forma de “bumerangue”, que exercem função dupla. A principal é aumentar a rigidez da chapa de aço e a segunda, reduzir ruídos



Corte de chapas

O corte - habitualmente realizado a frio, recorrendo-se ao corte a morno somente quando a espessura for elevada ou quando o comportamento mecânico do material é frágil. É um processo tecnológico que possibilita obter elevadas taxas de produção e que permite fabricar peças com uma boa precisão dimensional e um bom acabamento a um custo relativamente baixo.



Campo de aplicação: se destacam a dos transportes (automóvel aeroespacial e aeronáutica) a do mobiliário metálico, a dos eletrodomésticos e utensílios de cozinha e a da cunhagem de moeda ou medalhas (fabrico dos discos).

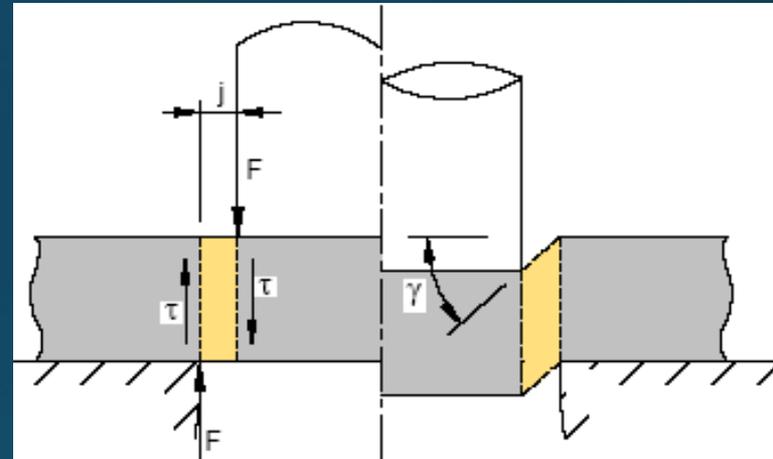


Corte de chapas

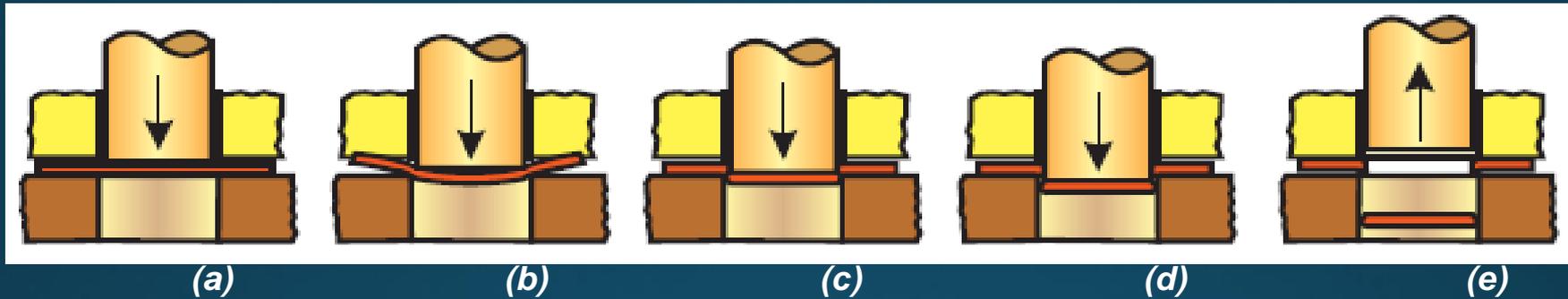
Punção e matriz definem os contornos interior do furo efetuados na chapa e exterior da peça.

Folga entre o punção e a matriz de 5 a 10% da espessura da chapa.

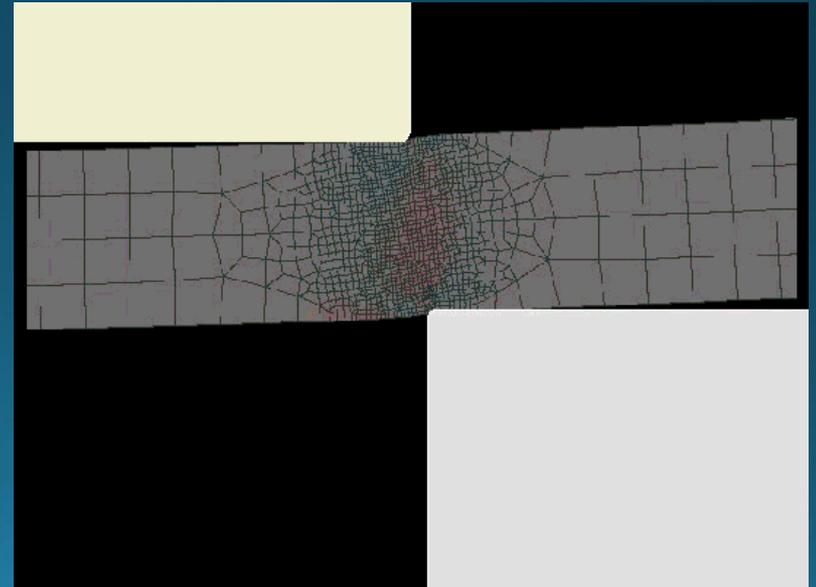
Processo de deformação plástica seguido de ruptura .



Mecanismo corte

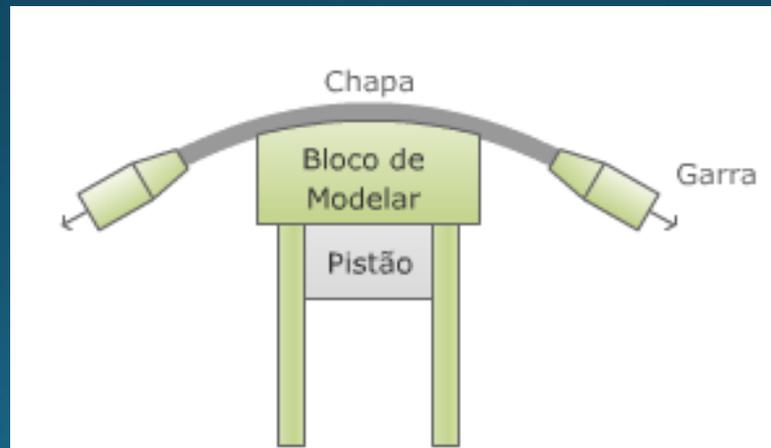
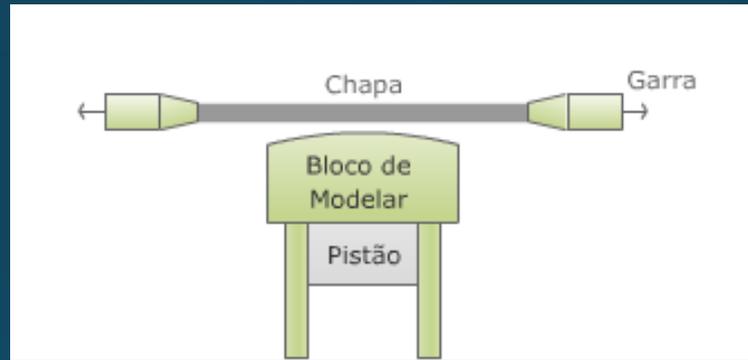


- a) *Contato entre o punção e a chapa*
- b) *Ligeira flexão no início da deformação*
- c) *Deformação plástica e abertura de fendas*
- d) *Separação completa da peça*
- e) *Extração da peça e inversão do movimento do punção*

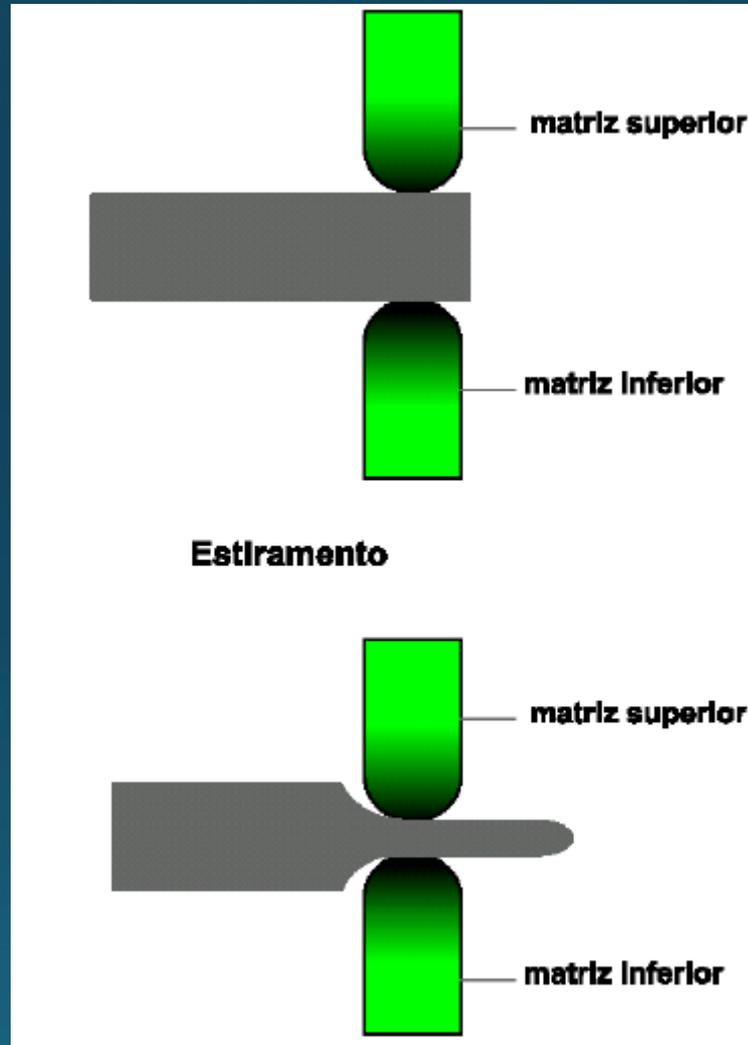


Estiramento

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



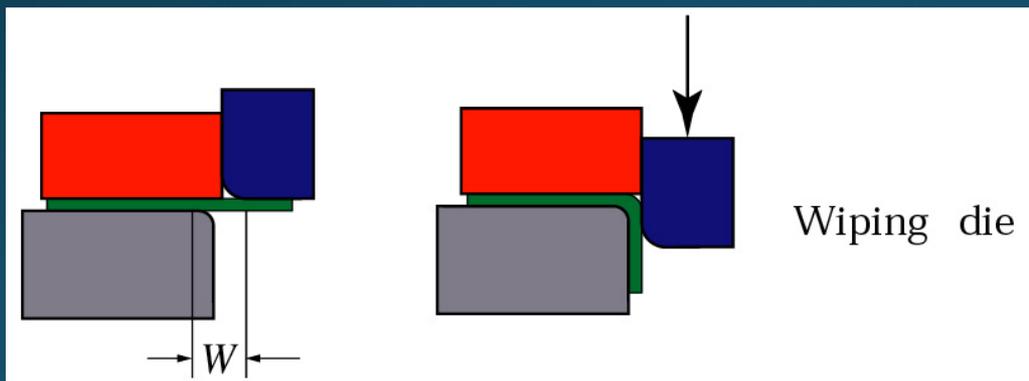
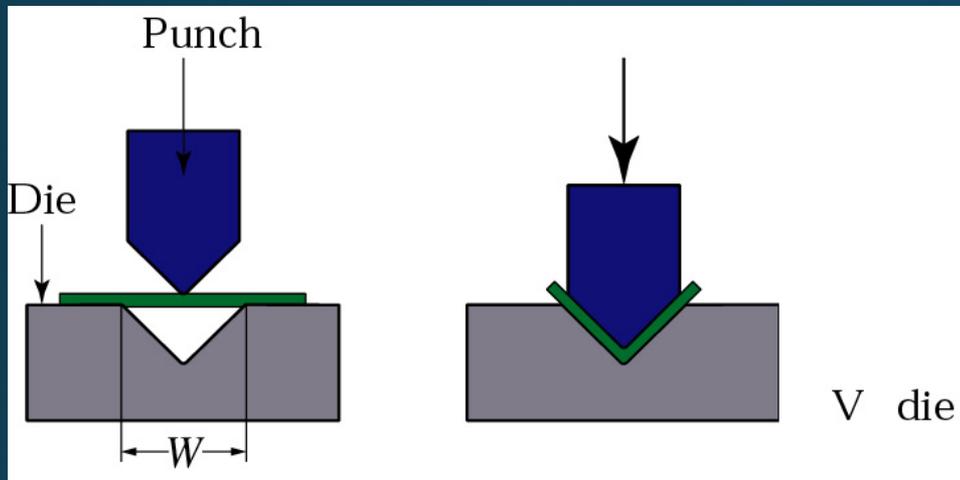
Estiramento



Dobramento

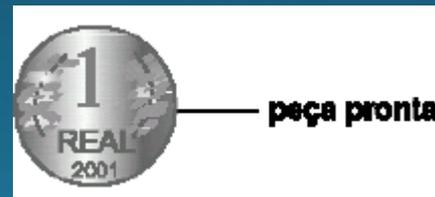
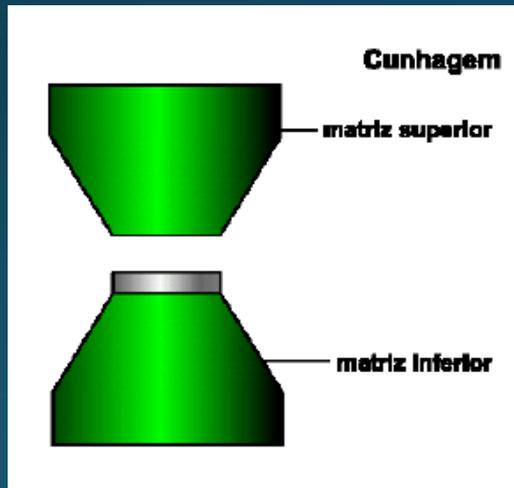
- Conformar o objeto sem alterar a espessura da chapa, evitando alongamento e escoamento – necessidade de controle rigoroso das ferramentas e regulagem exata do curso da prensa.
- Evitar cantos vivos – imprudente executar raios de curvatura internos inferiores à espessura da chapa; as fibras externas seriam muito tracionadas e o material acabaria rasgando.

Dobramento



Cunhagem

- 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.



Calandragem

