

# CONFORMAÇÃO MECÂNICA

## CONCEITOS GERAIS

### CARACTERÍSTICAS

Os processos de conformação mecânica alteram a geometria do material através de forças aplicadas por ferramentas adequadas que podem variar desde pequenas matrizes até grandes cilindros, como os empregados na laminação.

Em função da temperatura e do material utilizado a conformação mecânica pode ser classificada como trabalho a frio, a morno e a quente. Cada um destes trabalhos fornecerá características especiais ao material e à peça obtida. Estas características serão função da matéria prima utilizada como composição química e estrutura metalúrgica (natureza, tamanho, forma e distribuição das fases presentes) e das condições impostas pelo processo tais como o tipo e o grau de deformação, a velocidade de deformação e a temperatura em que o material é deformado.

## PRINCIPAIS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

O número dos diferentes processos unitários de conformação mecânica, desenvolvidos para aplicações específicas, atinge atualmente algumas centenas. Não obstante, é possível classificá-los num pequeno número de categorias, com base em critérios tais como: o tipo de esforço que provoca a deformação do material, a variação relativa da espessura da peça, o regime da operação de conformação, o propósito da deformação.

Basicamente, os processos de conformação mecânica podem ser classificados em:

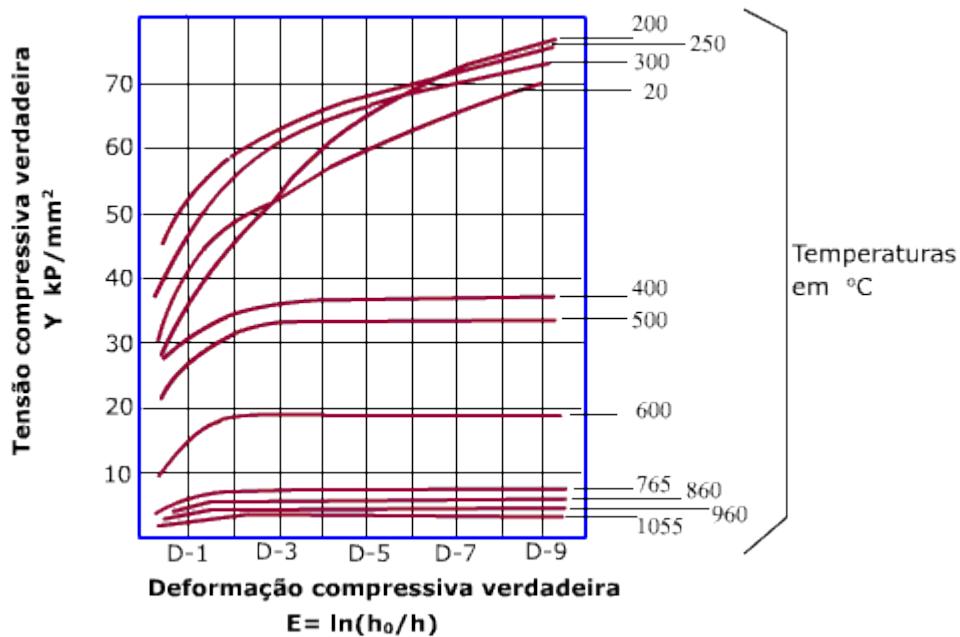
- **FORJAMENTO:** conformação por esforços compressivos tendendo a fazer o material assumir o contorno da ferramenta conformadora, chamada matriz ou estampo.
- **LAMINAÇÃO:** conjunto de processos em que se faz o material passar através da abertura entre cilindros que giram, modificando-lhe (em geral reduzindo) a seção transversal; os produtos podem ser placas, chapas, barras de diferentes seções, trilhos, perfis diversos, anéis e tubos.
- **TREFILAÇÃO:** redução da seção transversal de uma barra, fio ou tubo, “puxando-se” a peça através de uma ferramenta (fieira, ou trefila) com forma de canal convergente.
- **EXTRUSÃO:** processo em que a peça é “empurrada” contra a matriz conformadora, com redução da sua seção transversal. A parte ainda não extrudada fica contida num recipiente ou cilindro (container); o produto pode ser uma barra, perfil ou tubo.
- **CONFORMAÇÃO DE CHAPAS:** Compreende as operações de:
  - Embutimento;
  - Estiramento;
  - Corte;
  - Dobramento.

## ASPECTOS DE TEMPERATURA NA CONFORMAÇÃO

### Temperatura na Conformação

Os processos de conformação são comumente classificados em operações de trabalho a quente, a morno e a frio. O trabalho a quente é definido como a deformação sob condições de temperatura e taxa de deformação tais que processos de recuperação e **recristalização** ocorrem simultaneamente com a deformação. De outra forma, o trabalho a frio é a deformação realizada sob condições em que os processos de recuperação e **recristalização** não são efetivos. No trabalho a morno ocorre recuperação, mas não se formam novos grãos (não há **recristalização**).

No trabalho a quente, devido à intensa vibração térmica -que facilita muito a difusão de átomos e a mobilidade e aniquilamento das discordâncias - o **encruamento** e a estrutura distorcida dos grãos produzida pela deformação, são rapidamente eliminados pela formação de novos grãos livres de deformação, como resultado da **recristalização**. É possível conseguir grandes níveis de deformação, uma vez que os processos de recuperação e **recristalização** acompanham a deformação. Ela ocorre a uma tensão constante. E como a tensão de **escoamento** plástico decresce com o aumento da temperatura, ver figura, a energia necessária para a deformação é geralmente muito menor para o trabalho a quente do que para o trabalho a frio ou a morno.

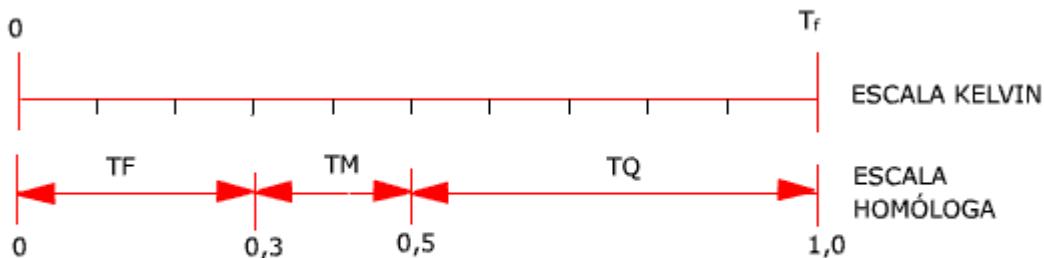


VARIAÇÃO DA TENSÃO DE COMPRESSÃO COM A DEFORMAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA UM AÇO DE BAIXO CARBONO

No trabalho a frio, como o **encruamento** não é aliviado, a tensão aumenta com a deformação. Assim a deformação total que é possível de se obter sem causar fratura é menor no trabalho a frio do que no trabalho a quente e a morno. Excepto quando se realizam tratamentos térmicos de **recozimento** para aliviar os efeitos do **encruamento**.

No trabalho a morno ocorre uma recuperação parcial da **ductilidade** do material e a tensão de conformação situa-se numa faixa intermediária entre o trabalho a frio e a quente.

Costuma-se definir, para fins práticos, as faixas de temperaturas do trabalho a quente, a morno e a frio baseadas na temperatura homóloga, que permite a normalização do comportamento do metal, ver figura. Em um metal puro, que não sofre transformação de fase no estado sólido, os pontos de referência em termos de temperatura são: o zero absoluto e o ponto de fusão. Estes pontos, traduzidos em graus Kelvin, estabelecem os extremos da escala homóloga de temperaturas.



REPRESENTAÇÃO DA TEMPERATURA HOMÓLOGA E DAS FAIXAS DE TEMPERATURA : trabalho a frio (TF), a morno (TM) e a quente (TQ).

Em termos de conformação mecânica, chama-se de trabalho a quente (**TQ**) aquele que é executado em temperaturas acima de  $0,5T_f$ , trabalho a morno (**TM**), executado na faixa compreendida (grosseiramente) entre  $0,3$  e  $0,5T_f$  e trabalho a frio (**TF**) aquele que é executado entre  $0$  e  $0,3T_f$ .

É importante compreender que a distinção básica entre TQ e TF é portanto, função da temperatura em que se dá a **recristalização** efetiva do material. Assim, embora para muitas ligas comerciais a temperatura do TQ seja realmente elevada em relação à ambiente, para metais como Pb e Sn, que se **recristalizam** rapidamente à temperatura ambiente após grandes deformações, a conformação à temperatura ambiente é TQ. Por outro lado, a conformação a  $1100^{\circ}C$  é TF para o tungstênio, cuja temperatura de **recristalização** é superior a esta, embora seja TQ para o aço.

## Geração de Calor na Conformação Mecânica

Nos processos de conformação, tanto a deformação plástica quanto o atrito contribuem para a geração de calor. Da energia empregada na deformação plástica de um metal, apenas 5 a 10% ficam acumulados na rede cristalina, sob a forma de energia interna, sendo os restantes 90 a 95% convertidos em calor. Em algumas operações de conformação contínua, como **extrusão** e **trefilação**, efetuadas em altas velocidades, a temperatura pode aumentar de centenas de graus. Uma parte do calor gerado é dissipada (transmitido às ferramentas ou perdido para a atmosfera), mas o restante permanece na peça, elevando-lhe a temperatura. Em condições idealmente adiabáticas e sem atrito, o máximo acréscimo teórico de temperatura devido à deformação plástica é dado pela expressão:

$$\Delta T_{\max} = (W_p) / (\rho \cdot c \cdot J)$$

onde:

$W_p$  = trabalho de deformação plástica por un. de volume

$\rho$  = densidade do material

$c$  = calor específico do material

$J$  = equivalente mecânico do calor (4,19 Joule/cal)

Para uma deformação  $e = 1,0$  tem -se  $DT_{\max}$  igual a 740°C para alumínio, 2770°C para ferro e 5710°C para o titânio.

Se a velocidade de um dado processo é alta, a perda de calor gerado será pequena e o aumento efetivo da temperatura será próximo do valor teórico.

## Faixas de Temperaturas Permissíveis no Trabalho a Quente

O limite inferior de temperatura para o trabalho a quente de um metal é a menor temperatura para a qual a taxa de **recristalização** é rápida o bastante para eliminar o **encruamento** quando o metal está submetido àquela temperatura. Para um dado metal ou liga metálica a menor temperatura de trabalho a quente dependerá de fatores tais como a quantidade de deformação e o tempo em que o material estará submetido a temperatura em questão. Uma vez que quanto maior o nível de deformação menor é a temperatura de recristalização, o limite inferior de temperatura para o trabalho a quente diminuirá para grandes deformações. Um metal trabalhado com elevada velocidade de deformação e resfriado rapidamente irá requerer uma temperatura de trabalho a quente maior do que se este for deformado e resfriado vagarosamente, para a obtenção de um mesmo nível final de deformação.

O limite superior de trabalho a quente é determinado pela temperatura em que ocorre o início de fusão ou o excesso de oxidação. Geralmente, a temperatura mais elevada de trabalho a quente é limitada bem abaixo do ponto de fusão devido a possibilidade de **fragilização** à quente (existência de compostos com menor ponto de fusão). Basta uma pequena quantidade de um filme de constituinte com baixo ponto de fusão nos contornos de grão para fazer um material desagregar-se quando deformado (**fragilidade** a quente). Geralmente emprega-se  $T_{\max} \gg T_f - 550^{\circ}\text{C}$  (ou  $T_f - 1000^{\circ}\text{F}$ ) para evitar esta possibilidade.

Para uma dada condição de pressão e temperatura de trabalho haverá uma quantidade máxima de deformação que pode ser fornecida à peça (limitação esta baseada na resistência ao **escoamento**, e não na **ductilidade**), como mostrado na figura.

Se a temperatura de pré - aquecimento do tarugo inicial aumenta, a resistência diminui e a deformação aumenta para uma dada pressão aplicada; assim, as curvas "isobáricas" aumentam com a temperatura, que obviamente será sempre inferior à linha solidus.

A **fragilização** a quente limita a temperatura de trabalho a valores inferiores à temperatura solidus.

E visto que com taxas de deformação altas ficará retido mais calor na peça. A temperatura da peça deverá ser menor para evitar que ela atinja a faixa de fragilidade a quente.

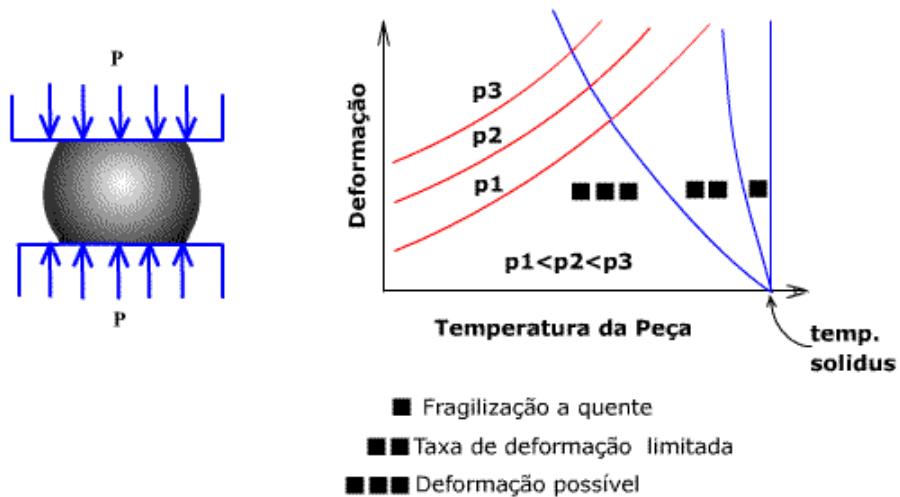
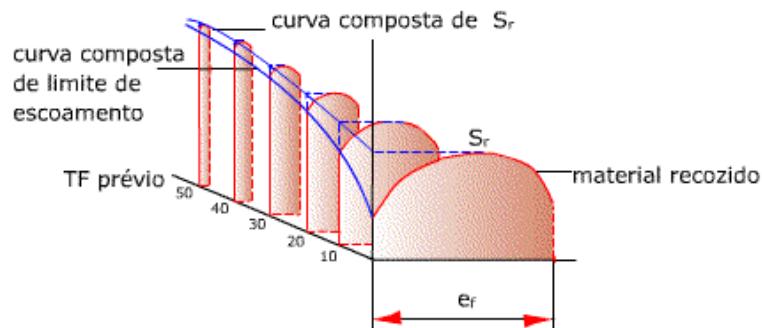


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS EFEITOS DE TEMPERATURA, PRESSÃO E TAXA DE DEFORMAÇÃO SOBRE A FAIXA DE TRABALHO PERMISSÍVEL NA CONFORMAÇÃO A QUENTE

## TRABALHO A FRIO

O trabalho a frio é acompanhado do **encruamento** (inglês "strain hardening") do metal, que é ocasionado pela interação das discordâncias entre si e com outras barreiras – tais como contornos de grão – que impedem o seu movimento através da **rede cristalina**. A deformação plástica produz também um aumento no número de discordâncias, as quais, em virtude de sua interação, resultam num elevado estado de tensão interna na rede cristalina. Um metal cristalino contém em média 106 a 108 cm de discordâncias por cm<sup>3</sup>, enquanto que um metal severamente encruado apresenta cerca de 1012 cm de discordâncias por cm<sup>3</sup>. A estrutura característica do estado **encruado** examinada ao microscópio eletrônico, apresenta dentro de cada grão, regiões pobres em discordâncias, cercadas por um emaranhado altamente denso de discordâncias nos planos de deslizamento.

Tudo isto resulta macroscopicamente num aumento de resistência e dureza e num decréscimo da **ductilidade** do material (ver figura). Num ensaio de tração, isso se traduz no aumento da tensão de **escoamento**,  $\sigma_y$ , e do limite de **resistência**,  $\sigma_r$ , bem como no decréscimo do alongamento total (alongamento na fratura),  $e_f$ .



AUMENTO DO LIMITE DE ESCOAMENTO E DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E DIMINUIÇÃO DO ALONGAMENTO (e redução de área na fratura) COM O ENCRUAMENTO DEVIDOS AO TRABALHO A FRIO

A figura mostra que o limite de escoamento,  $Y$ , cresce mais rapidamente e se aproxima do limite de resistência,  $S_r$ , enquanto que a ductilidade – expressa aqui como  $\epsilon_f$  – cai de modo bastante brusco após uma limitada quantidade de trabalho a frio. A microestrutura também muda, com os grãos se alongando na direção de maior deformação, podendo o material como um todo desenvolver propriedades direcionais (anisotropia).

## Laminação

**O que é laminação** - é o processo de conformação mecânica que consiste em modificar a seção transversal de um metal na forma de barra, lingote, placa, fio, ou tira, etc., pela passagem entre dois cilindros com geratriz retilínea (laminação de produtos planos) ou contendo canais entalhados de forma mais ou menos complexa (laminação de produtos não planos), sendo que a distância entre os dois cilindros deve ser menor que a espessura inicial da peça metálica.

**Uso - vantagens** É o processo de transformação mecânica de metais mais utilizado pois, apresenta alta produtividade e um controle dimensional do produto acabado que pode ser bastante preciso.

**Esforços envolvidos** - na laminação o material é submetido a tensões compressivas elevadas, resultantes da ação de prensagem dos rolos e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito entre os rolos e o material.

As forças de atrito são também responsáveis pelo ato de "puxar" o metal para dentro dos cilindros.

**Etapas** - A redução ou desbaste inicial dos lingotes em blocos, tarugos ou placas é realizada normalmente por laminação a quente.

Depois dessa fase segue-se uma nova etapa de laminação a quente para transformar o produto em chapas grossas, tiras a quente, vergalhões, barras, tubos, trilhos ou perfis estruturais.

A laminação a frio que ocorre após a laminação de tiras a quente produz tiras a frio de excelente acabamento superficial, com boas propriedades mecânicas e controle dimensional do produto final bastante rigoroso.

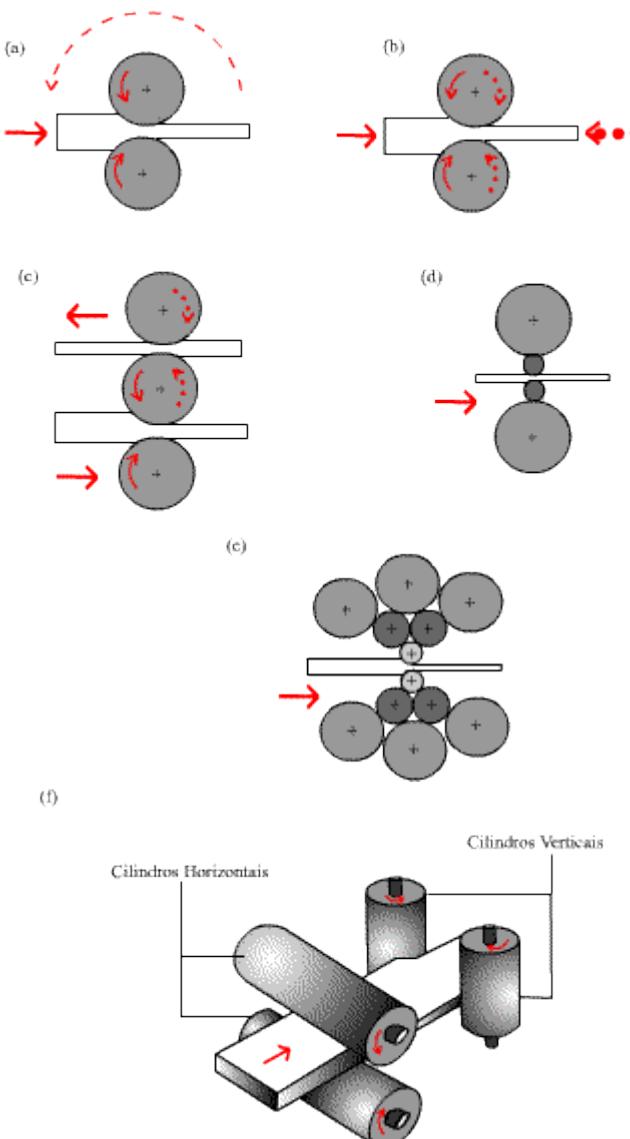
## Laminadores

Um laminador consiste basicamente de cilindros (ou rolos), mancais, uma carcaça chamada de gaiola ou quadro para fixar estas partes e um motor para fornecer potência aos cilindros e controlar a velocidade de rotação. As forças envolvidas na laminação podem facilmente atingir milhares de toneladas, portanto é necessária uma construção bastante rígida, além de motores muito potentes para fornecer a potência necessária. O custo, portanto de uma moderna instalação de laminação é da ordem de milhões de dólares e consome-se muitas horas de projetos uma vez que esses requisitos são multiplicados para as sucessivas cadeiras de laminação contínua ("tandem mill").

Utilizam-se variadas disposições de cilindros na laminação, o mais simples é constituído por dois cilindros de eixo horizontal, colocados verticalmente um sobre o outro. Este equipamento é chamado de laminador duo e pode ser reversível ou não. Nos duos não reversíveis, figura a), o sentido do giro dos cilindros não pode ser invertido e o material só pode ser laminado em um sentido. Nos reversíveis, figura b), a inversão da rotação dos cilindros permite que a laminação ocorra nos dois sentidos de passagem entre os rolos. No laminador trio, figura c), os cilindros sempre giram no mesmo sentido. Porém, o material pode ser laminado nos dois sentidos, passando-o alternadamente entre o cilindro superior e o intermediário e entre o intermediário e o inferior.

A medida que se laminam materiais cada vez mais finos, há interesse em utilizar cilindros de trabalho de pequeno diâmetro. Estes cilindros podem fletir, e devem ser apoiados por cilindros de encosto, figura d). Este tipo de laminador denomina-se quádruo, podendo ser reversível ou não. Quando os cilindros de trabalho são muito finos, podem fletir tanto na direção vertical quanto na horizontal e devem ser apoiados em ambas as direções; um laminador que permite estes apoios é o Sendzimir, figura e).

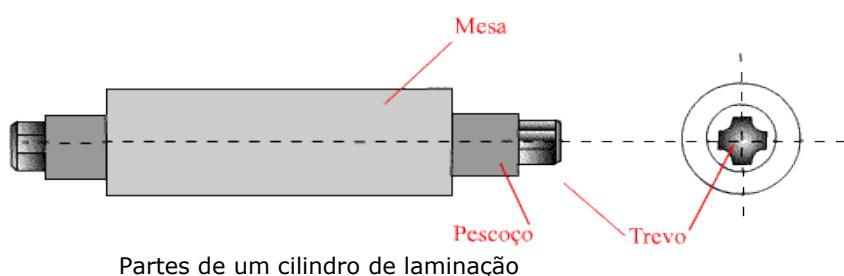
Um outro laminador muito utilizado é o universal, que dispõe de dois pares de cilindros de trabalho, com eixos verticais e horizontais, figura f). Existem outros tipos de laminadores mais especializados, como o planetário, "passo peregrino", Mannesmann, de bolas, etc.



ARRANJOS TÍPICOS DE CILINDROS: (a) - laminador duo; (b) - laminador duo reversível; (c) - laminador trio; (d) - laminador quádruo, (e) - laminador Sendzimir e (f) - laminador universal.

Os cilindros de laminação são de aço fundido ou forjado, ou de ferro fundido, coquinhados ou não; compõem-se de três partes, figura abaixo: a mesa, onde se realiza a laminação, e pode ser lisa ou com canais; os pescoços, onde se encaixam os mancais; os trevos ou garfos de acionamento. Os cilindros são aquecidos pelo material laminado a quente e é de grande importância um resfriamento adequado deles, usualmente através de jatos de água.

Os mancais dos cilindros servem de apoio a estes cilindros; eventuais deformações destas peças provocariam variações dimensionais nos produtos, o que é altamente indesejável. Três tipos de mancais são usados em laminadores: mancais de fricção, onde o pESCOÇO gira sobre casquilhos de bronze, madeira, etc., devidamente lubrificados; mancais de rolamento; mancais a filme de óleo sob pressão (tipo “Morgoil”).



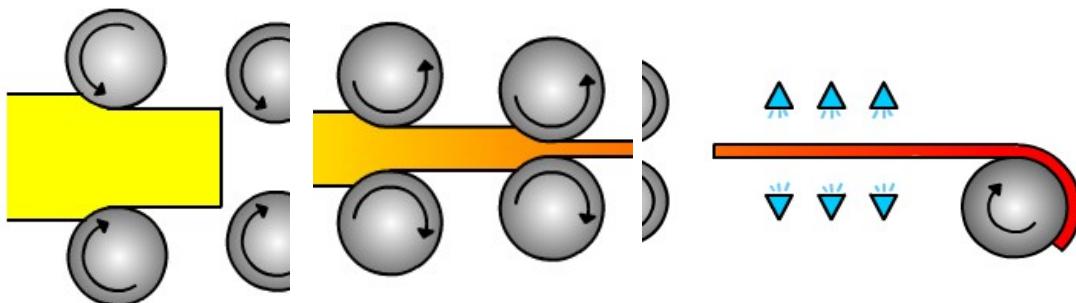
## Laminação a Quente

Quando o aço é lingotado convencionalmente, a primeira operação de laminação ocorre em um laminador desbastador (“blooming”, “slabbing mill”), que é usualmente um duo reversível cuja distância entre os rolos pode ser variada durante a operação. Na operação de desbaste utiliza-se também laminadores universais, o que permite um melhor esquadronhamento do produto. Os produtos desta etapa são blocos (“blooms”, seção quadrada) ou placas (“slab”, seção retangular).

As placas são laminadas até chapas grossas (material mais espesso) ou tiras a quente. Na laminação de chapas grossas utilizam-se laminadores duos ou quádruos reversíveis, sendo este último o mais utilizado. Na laminação de tiras, comumente utilizam laminadores duos ou quádruos reversíveis numa etapa preparadora e um trem contínuo de laminadores quádruos. A figura abaixo mostra esquematicamente um trem contínuo de laminação. O material, após a laminação é então, bobinado a quente, decapado e oleado indo a seguir para o mercado ou para a laminação a frio.

Deve-se observar que, com o lingotamento contínuo, produzem-se placas e tarugos diretamente da máquina de lingotar, evitando-se uma série de operações de laminação, em especial a laminação desbastadora.

As indústrias de transformação de não ferrosos operam com uma diversidade muito grande de produtos, portanto os equipamentos utilizados na laminação a quente desses materiais são muito menos especializados do que os empregados na laminação a quente de aços. Os lingotes de materiais não ferrosos são menores e as tensões de escoamento são normalmente mais baixas do que as dos materiais ferrosos, o que permite o uso de laminadores de pequeno porte. Laminadores duos ou trios são normalmente usados para a maioria dos metais não ferrosos na laminação a quente, entretanto, laminadores quádruos contínuos são usados para as ligas de alumínio.



## Laminação a Frio

A laminação a frio é empregada para produzir folhas e tiras com acabamento superficial e com tolerâncias dimensionais superiores quando comparadas com as tiras produzidas por laminação a quente. Além disso, o encruamento resultante da redução a frio pode ser aproveitado para dar maior resistência ao produto final. Os materiais de partida para a produção de tiras de aço laminadas a frio são as bobinas a quente decapadas. A laminação a frio de metais não ferrosos pode ser realizada a partir de tiras a quente ou, como no caso de certas ligas de cobre, diretamente de peças fundidas.

Trens de laminadores quádruos de alta velocidade com três a cinco cadeiras são utilizados para a laminação a frio do aço, alumínio e ligas de cobre. Normalmente esses trens de laminação são concebidos para terem tração avante e a ré. A laminação contínua tem alta capacidade de produção, o que resulta num custo de produção baixo.

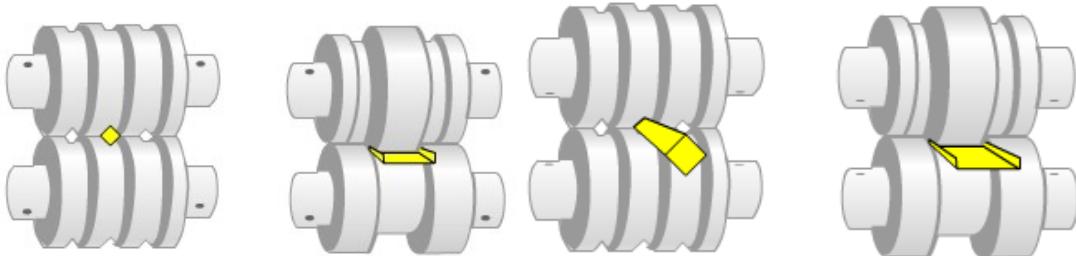
A redução total atingida por laminação a frio geralmente varia de 50 a 90%. Quando se estabelece o grau de redução em cada passe ou em cada cadeira de laminação, deseja-se uma distribuição tão uniforme quanto possível nos diversos passes sem haver uma queda acentuada em relação à redução máxima em cada passe. Normalmente, a porcentagem de redução menor é feita no último passe para permitir um melhor controle do aplainamento, bitola e acabamento superficial.

A eliminação do limite de escoamento descontínuo nas tiras de aço recozido é um problema prático muito importante, pois a ocorrência deste fenômeno provoca uma deformação heterogênea em posterior processamento (linhas de Lüders). Isto é devido ao alongamento descontínuo do limite de escoamento. A prática normal é dar uma pequena redução final a frio no aço recozido, chamada de passe de encruamento superficial, que elimina o alongamento descontínuo do limite de escoamento. Esse passe de acabamento também resulta numa melhora da qualidade superficial e controle dimensional. Outros métodos podem

ser utilizados na melhoria do controle dimensional das tiras ou folhas laminadas, entre estes estão o aplaínamento por rolos e o desempeno por tração.

## Laminação de Barras e Perfis

Barras de seção circular e hexagonal e perfis estruturais como: vigas em I, calhas e trilhos são produzidos em grande quantidade por laminação a quente com cilindros ranhurados, conforme mostrado abaixo.



A laminação de barras e perfis difere da laminação de planos, pois a seção transversal do metal é reduzida em duas direções. Entretanto, em cada passe o metal é normalmente comprimido somente em uma direção. No passe subsequente o material é girado de 90º. Uma vez que o metal se expande muito mais na laminação a quente de barras do que na laminação a frio de folhas, o cálculo da tolerância necessária para a expansão é um problema importante no planejamento dos passes para barras e perfis. Um método típico para reduzir um tarugo quadrado numa barra é alternando-se passes através de ranhuras ovais e quadradas. O planejamento dos passes para perfis estruturais é muito mais complexo e requer bastante experiência.

A maioria dos laminadores de barras é equipada com guias para conduzir o tarugo para as ranhuras e repetidores para inverter a direção da barra e conduzi-la para o próximo passe. Os laminadores desse tipo podem ser normalmente duos ou trios. A instalação comum para a produção de barras consiste em uma cadeira de desbaste, uma cadeira formadora e uma cadeira de acabamento.

## Processamento Termomecânico

Na indústria de fabricação do aço as dimensões externas de muitos produtos comerciais são resultado da deformação a quente, como na laminação, enquanto que, as propriedades mecânicas são obtidas pela adição de elementos de ligas e por tratamento térmico após laminação a quente. Melhoria nas propriedades mecânicas acima das obtidas pelo efeito dos elementos de liga são frequentemente obtidas por tratamento térmico.

No processamento do aço, por exemplo, por laminação, algumas vezes são obtidas melhorias de propriedades mecânicas do material quando comparadas com materiais mecanicamente processados e normalizados. Além desse fato, as propriedades mecânicas obtidas por têmpera imediatamente após “laminação” e **revenido** são algumas vezes melhores do que as do material “laminado”, resfriado ao ar e então temperado e **revenido**. Nestes casos, a deformação a quente torna-se um constituinte necessário do tratamento térmico e mudanças metalúrgicas ocasionadas pela deformação a quente resultam em um efeito benéfico adicional às propriedades mecânicas dos aços após resfriamento ou após tratamento térmico.

O processamento termomecânico é a técnica desenvolvida para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais através do controle do processo de deformação à quente. Laminação controlada, resfriamento acelerado e têmpera direta, são exemplos típicos de processamentos termomecânicos. Estes processos economizam energia na produção do aço pela minimização ou até mesmo eliminação do tratamento térmico após deformação à quente, portanto, aumentam a produtividade na fabricação de aços de maior resistência. Os tratamentos termomecânicos geralmente ocasionam uma mudança no projeto de composição química do aço e redução na produtividade do processo de deformação à quente, mas, tornam possíveis reduções na quantidade total de elementos de liga, melhoram a soldabilidade, aumentam a tenacidade e algumas vezes produzem novas e benéficas características no aço.

## Forjamento

**O que é:** Forjamento é o nome genérico de 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.

**Ferramentas:** Na maioria das operações de forjamento emprega-se um ferramental constituído por um par de ferramentas de superfície plana ou côncava, denominadas matrizes ou estampos.

**Usos:** A maioria das operações de forjamento é executada a quente; contudo, uma grande variedade de peças pequenas, tais como parafusos, pinos, porcas, engrenagens, pinhões, etc., são produzidas por forjamento a frio.

**Histórico:** O forjamento é o mais antigo processo de conformar metais, tendo suas origens no trabalho dos ferreiros de muitos séculos antes de Cristo. A substituição do braço do ferreiro ocorreu nas primeiras etapas da Revolução Industrial. Atualmente existe um variado maquinário de forjamento, capaz de produzir peças das mais variadas formas e tamanhos, desde alfinetes, pregos, parafusos e porcas até rotores de turbinas e asas de avião.

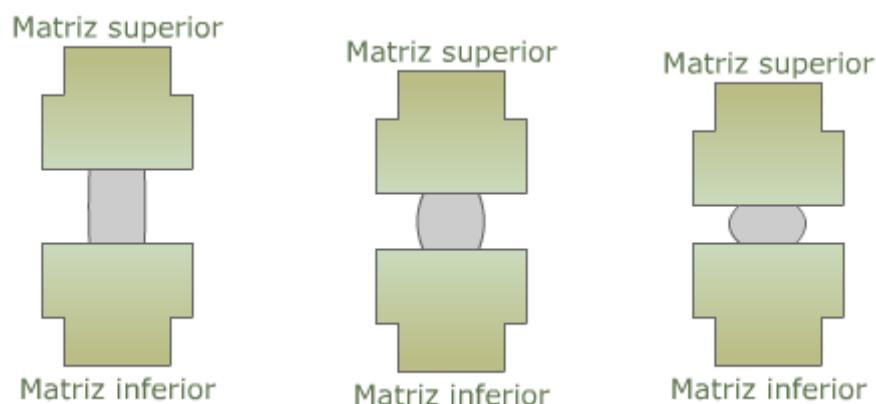
### Classificação dos processos:

O forjamento pode ser dividido em dois grandes grupos de operações: Forjamento em matriz aberta ou Forjamento livre e Forjamento em matriz fechada

## Tipos de Forjamento e Ferramentas

### Forjamento em Matriz Aberta

O material é conformado entre matrizes planas ou de formato simples, que normalmente não se tocam (ver figura).

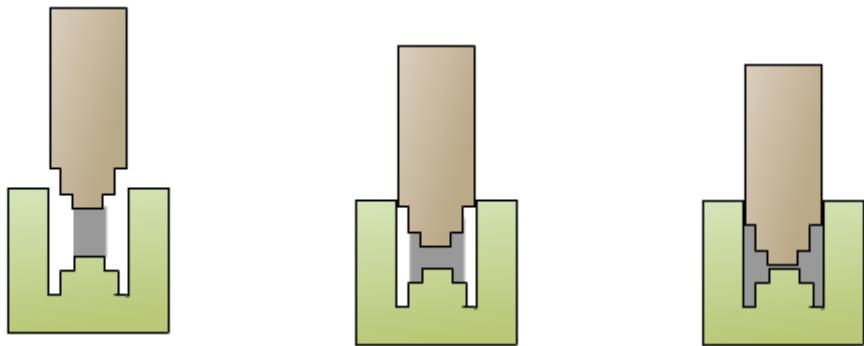


É usado geralmente para fabricar peças grandes, com forma relativamente simples (p. ex., eixos de navios e de turbinas, ganchos, correntes, âncoras, alavancas, excêntricos, ferramentas agrícolas, etc.) e em pequeno número; e também para pré-conformar peças que serão submetidas posteriormente a operações de forjamento mais complexas.

### Forjamento em Matriz Fechada

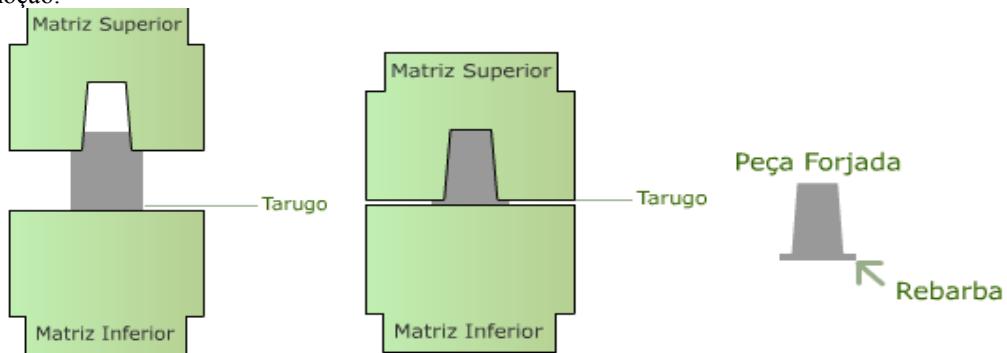
O material é conformado entre duas metades de matriz que possuem, gravadas em baixo-relevo, impressões com o formato que se deseja fornecer à peça (ver figura).

A deformação ocorre sob alta pressão em uma cavidade fechada ou semifechada, permitindo assim obter-se peças com tolerâncias dimensionais menores do que no forjamento livre.



Nos casos em que a deformação ocorre dentro de uma cavidade totalmente fechada, sem zona de escape, é fundamental a precisão na quantidade fornecida de material: uma quantidade insuficiente implica falta de enchimento da cavidade e falha no volume da peça; um excesso de material causa sobrecarga no ferramental, com probabilidade de danos ao mesmo e ao maquinário.

Dada a dificuldade de dimensionar a quantidade exata fornecida de material, é mais comum empregar um pequeno excesso. As matrizes são providas de uma zona oca especial para recolher o material excedente ao término do preenchimento da cavidade principal. O material excedente forma uma faixa estreita (rebarba) em torno da peça forjada. A rebarba exige uma operação posterior de corte (rebarbação) para remoção.



## Equipamentos e Métodos

Os equipamentos comumente empregados incluem duas classes principais:

- (a) Martelos de forja, que deformam o metal através de rápidos golpes de impacto na superfície do mesmo; e
- (b) Prensas, que deformam o metal submetendo-o a uma compressão contínua com velocidade relativamente baixa.

Os processos convencionais de forjamento são executados tipicamente em diversas etapas, começando com o corte do material, aquecimento, pré-conformação mediante operações de forjamento livre, forjamento em matriz (em uma ou mais etapas) e rebarbação.

## Aplicações

De um modo geral, todos os materiais conformáveis podem ser forjados. Os mais utilizados para a produção de peças forjadas são os aços (comuns e ligados, aços estruturais, aços para cementação e para beneficiamento, aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, aços ferramenta), ligas de alumínio, de cobre (especialmente os latões), de magnésio, de níquel (inclusive as chamadas superligas, como Waspaloy, Astraloy, Inconel, Udimet 700, etc., empregadas principalmente na indústria aeroespacial) e de titânio.

O material de partida é geralmente fundido ou, mais comumente, laminado - condição esta que é preferível, por apresentar uma microestrutura mais homogênea. Peças forjadas em matriz, com peso não superior a 2 ou 3 kg, são normalmente produzidas a partir de barras laminadas; as de maior peso são forjadas a partir de tarugos ou palanquilhas, quase sempre também laminados, e cortados previamente no tamanho adequado. Peças delgadas, como chaves de boca, alicates, tesouras, tenazes, facas, instrumentos cirúrgicos, etc., podem ser forjadas a partir de recortes de chapas laminadas.

## Forjamento Livre

### Operações Unitárias

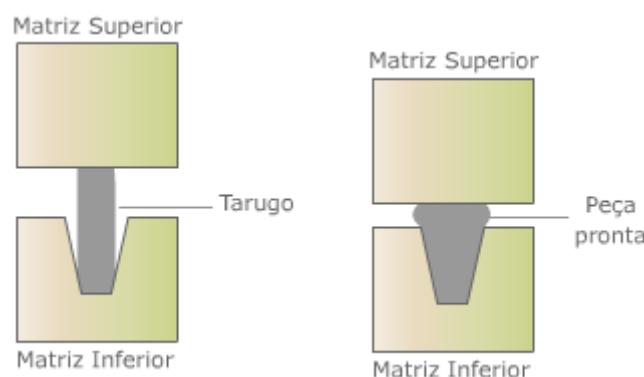
O que são: São operações relativamente simples de conformação por forjamento, empregando matrizes abertas ou ferramentas especiais, podendo ter as finalidades de:

- produzir peças acabadas de feitio simples
- redistribuir a massa de uma peça bruta para facilitar a obtenção de uma peça de geometria complexa por posterior forjamento em matriz.

### Operações unitárias mais comuns

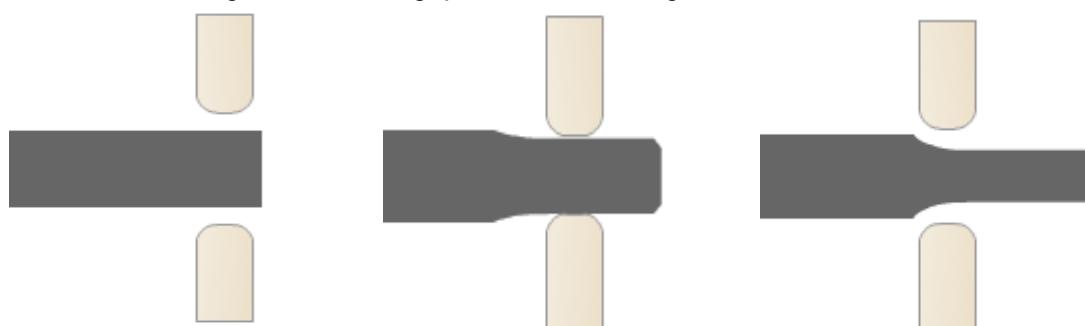
#### Recalque ou recalcamento

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.



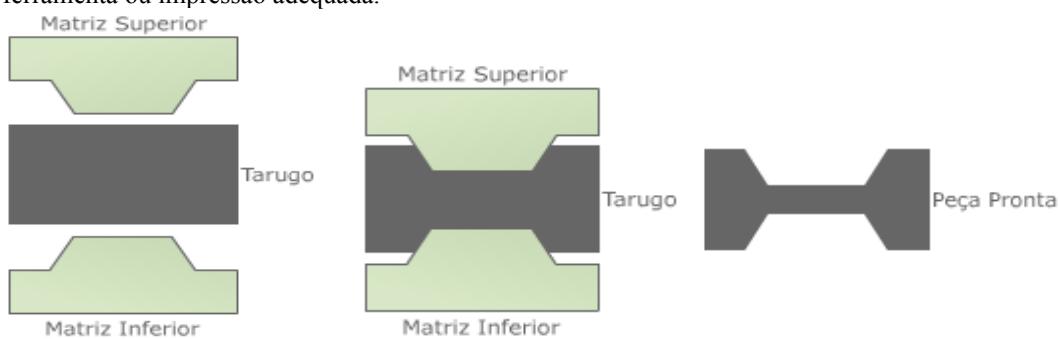
#### Estiramento

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



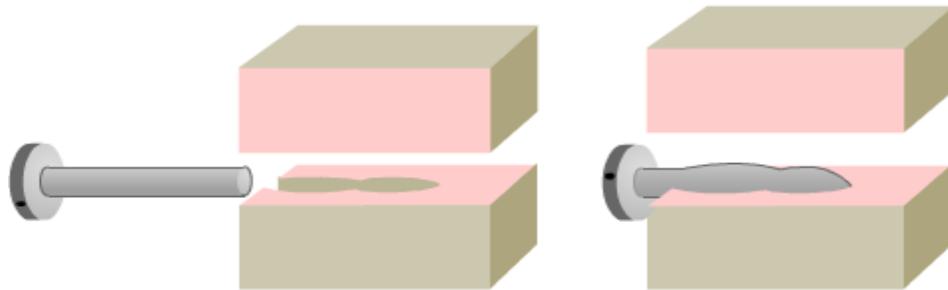
#### Encalcamento (ingl. fullering)

Variedade de estiramento em que se reduz a secção de uma porção intermediária da peça, por meio de uma ferramenta ou impressão adequada.



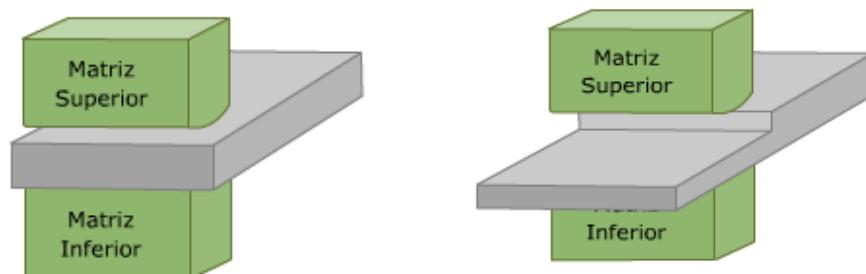
## Rolamento

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.



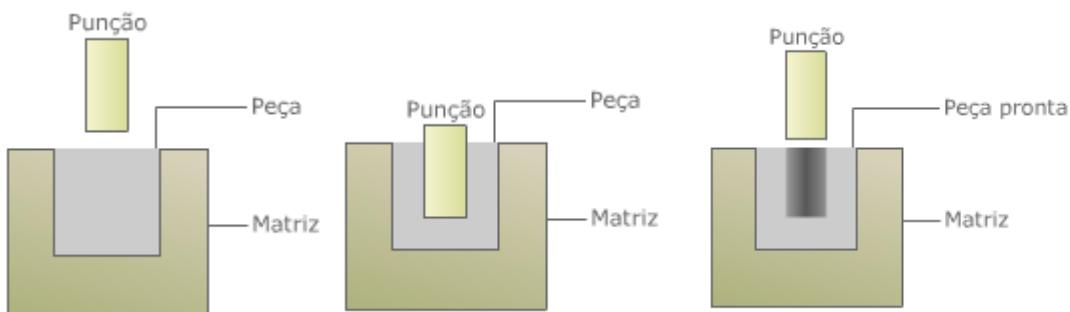
## Alargamento

aumenta a largura de uma peça reduzindo sua espessura.



## Furação

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



## Forjamento em Matriz

### Generalidades

Peças de formas complexas ou de precisão não podem ser obtidas por técnicas de forjamento livre, exigindo matrizes especialmente preparadas que contenham o negativo (ou contorno) da peça a ser produzida. Tais matrizes são caras, exigindo na maioria das vezes, alta produção para justificar seu custo.

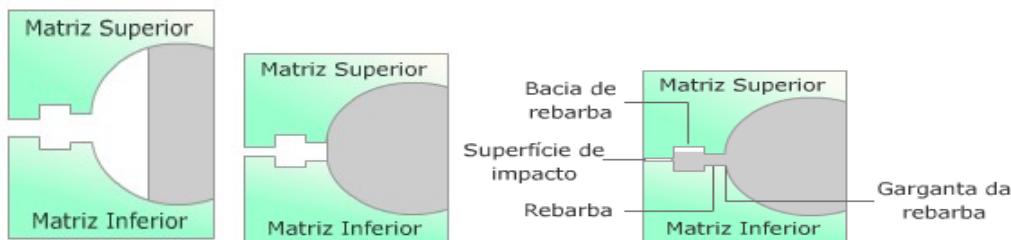
A obtenção de um formato complexo normalmente não é possível com uma única etapa de trabalho, exigindo uma ou mais etapas de pré-forjamento. As etapas de pré-forjamento podem ser efetuadas com o auxílio de superfícies especialmente usinadas no próprio bloco das matrizes, ou em equipamento separado, ou mesmo por meio de outros processos como a laminação.

O objetivo do pré-forjamento redistribuir o metal para posições mais adequadas ao forjamento subsequente. A pré-forma assim obtida pode ser conformada para uma configuração mais próxima da final em uma matriz de esboço ("blocker die"), que assegura uma distribuição adequada de metal, mas ainda não na forma final.

Diante da dificuldade para se distribuir precisamente o material nas etapas de operações unitárias, utiliza-se na maioria dos casos um certo excesso de material, que já na etapa de esboçamento se permite escapar por entre as duas matrizes, formando uma rebarba que por vezes é removida (cortada) antes do forjamento final nas matrizes de acabamento ("finishing dies").

Na etapa de acabamento o excesso de material também forma rebarba, que tem de ser fina para assegurar o preenchimento total da matriz e tolerâncias rigorosas. Isto porque uma rebarba fina, em presença de atrito, gera alta pressão de conformação. Veja o caso de distribuição de pressão nas cavidades das matrizes, no caso de forjamento de uma pá de turbina

Para evitar um aumento excessivo desta pressão as matrizes são usualmente projetadas de tal modo que a rebarba fica reduzida à sua espessura mínima somente em uma largura pequena (garganta ou costura - "flash land") sendo permitido ao restante escoar livremente dentro da calha ou bacia ("flash gutter"). Ver figura abaixo.



A decomposição da conformação de uma peça complexa entre diversas etapas de trabalho e ferramentas permite em muitos casos economizar energia e material, reduzir o desgaste das ferramentas e aumentar a precisão do forjado.

## Métodos do Forjamento em Matriz

As operações de obtenção das formas intermediárias de uma peça constituem a conformação intermediária, que se compõe normalmente de três etapas:

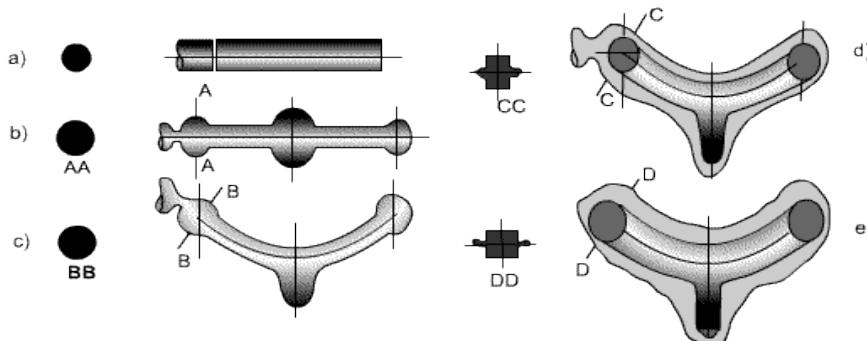
- (i) distribuição de massas;
- (ii) dobramento (se for o caso);
- (iii) formação da seção transversal.

Na etapa de distribuição de massas se procede à retirada de material das porções nas quais a seção transversal devia ser reduzida, e o acúmulo do material nas posições onde a seção devia ser aumentada (fase (b) da figura abaixo).

As operações mais empregadas para esta etapa são: o estiramento, o encalcamento, o alargamento, a lamination, a extrusão e o rolamento, sendo o recalque usado para aumentar a seção transversal.

O dobramento (segunda etapa), pode ser executado durante o forjamento, sem um estágio especial, quando for paralelo ao movimento da ferramenta. Em caso contrário, é efetuado numa etapa específica durante (fase (c) da figura abaixo) ou mesmo após o forjamento da peça. Pode envolver ou não uma redução da seção transversal da peça e uma defasagem do eixo da mesma como o caso do forjamento de virabrequins (ver Dobramentos Intermediários abaixo).

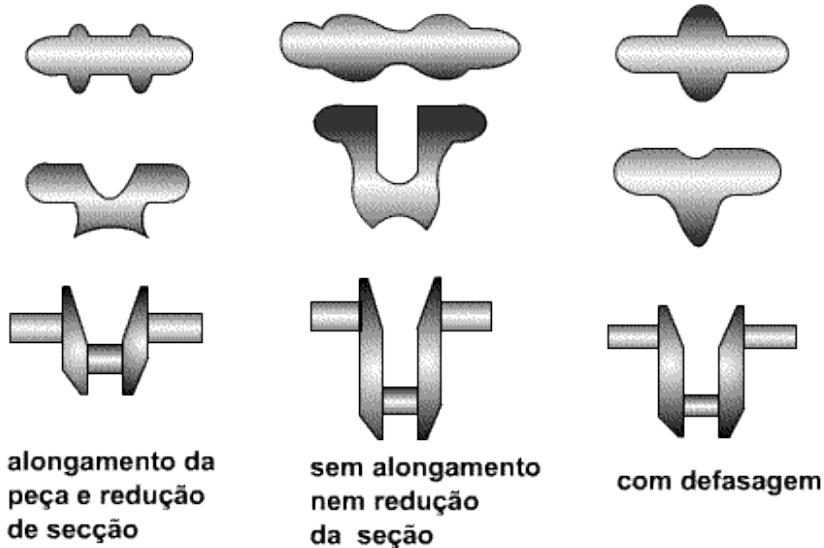
### Etapas do Forjamento de uma Peça em Matriz



A formação da seção transversal, ou esboçamento é a última etapa da conformação intermediária, na qual as seções transversais são aproximadas das seções definitivas da peça, de modo que as ferramentas acabadoras imprimam a forma e dimensões exatas da peça, com um consumo mínimo de energia. Esta etapa envolve uma distribuição de massa perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça (ver fase (d) da figura acima).

Observação: Por vezes é necessário mais de um estágio de esboço, quando uma única ferramenta não é capaz de estabelecer o fluxo adequado de metal ou exige um consumo de energia além da capacidade do equipamento disponível.

### Dobramentos intermediários - forjamento de Virabrequins



### Formação da Rebarba- Funções

Na etapa de conformação final, ao iniciar-se a formação da rebarba, em virtude da presença do estrangulamento ou garganta da rebarba entre as duas matrizes, as tensões compressivas na cavidade das matrizes elevam-se consideravelmente e causam o preenchimento de todos os recessos dessa cavidade.

As funções da rebarba, portanto, são duas:

Atuar como "válvula de segurança" para o excesso de metal na cavidade das matrizes; e

Regular o escapamento do metal, aumentando a resistência ao escoamento do sistema de modo que a pressão cresça até valores elevados, assegurando que o metal preencherá todos os recessos da cavidade. A figura abaixo é uma curva típica da variação da pressão ou carga de forjamento em função do avanço das matrizes.

### Trefilação

O que é: a trefilação é uma 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.

**Uso** - produtos mais comuns:

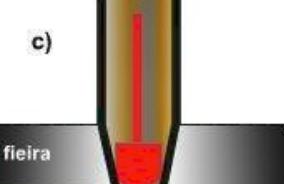
<b>Baras</b>	$\phi > 25 \text{ mm}$	
<b>Aramas</b>	<b>comuns</b>	<b>grossos</b> $25 > \phi > 5 \text{ mm}$
		<b>médios</b> $5 > \phi > 1,6 \text{ mm}$
		<b>finos</b> $1,6 > \phi > 0,7 \text{ mm}$
	<b>especiais</b>	$0,02\text{mm} > \phi$
<b>Tubos</b>	<b>trefilados de diferentes formas</b>	

Os Tubos podem ser trefilados dos seguintes modos:  
 sem apoio interno (REBAIXAMENTO ou AFUNDAMENTO)(fig.a)  
 com mandril passante (fig.b)  
 com plug (bucha) interno (fig. c)  
 com bucha flutuante (fig.d)

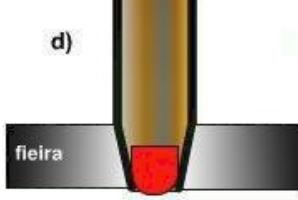


a) sem suporte interno  
(rebaixamento)

b) com mandril passante



c) com bucha (plug) fixo



d) com bucha flutuante

### Vantagens:

- O material pode ser estirado e reduzido em secção transversal mais do que com qualquer outro processo;
- A precisão dimensional obtinível é maior do que em qualquer outro processo exceto a laminação a frio, que não é aplicável às bitolas comuns de arames;
- A superfície produzida é uniformemente limpa e polida;
- O processo influí nas propriedades mecânicas do material, permitindo, em combinação com um tratamento térmico adequado, a obtenção de uma gama variada de propriedades com a mesma composição química

## Dispositivo Básico : a Fieira

A fieira é o dispositivo básico da trefilação e compõe todos os equipamentos trefiladores

Geometria da fieira: é dividida em quatro zonas (ver figura abaixo)

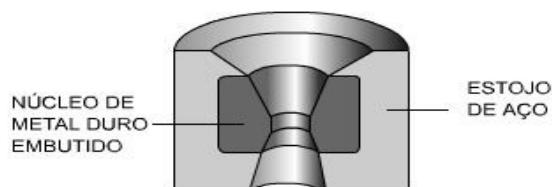
- (1) de entrada
- (2) de redução ( $\alpha$  = ângulo de abordagem)
- (3) (guia) de calibração-zona cilíndrica (acabamento é crítico)
- (4) de saída



**Material:** os materiais dependem das exigências do processo (dimensões, esforços) e do material a ser trefilado. Os mais utilizados são:

- Carbonetos sinterizados (sobretudo WC) – widia,
- Metal duro,etc. (figura abaixo)
- Aços de alto C revestidos de Cr (cromagem dura)
- Aços especiais (Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-W, etc.)
- Ferro fundido branco
- Cerâmicos (pós de óxidos metálicos sinterizados)
- Diamante (p/ fios finos ou de ligas duras)

### Detalhe construtivo de uma fieira com núcleo de metal duro

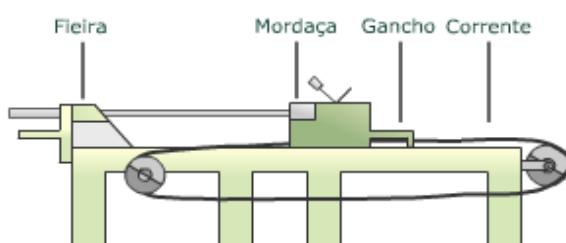


## Equipamentos

Pode-se classificar os equipamentos para trefilação em dois grupos básicos:  
bancadas de trefilação – utilizadas para produção de componentes não bobináveis como barras e tubos  
trefiladoras de tambor – utilizada para produção de componentes bobináveis, ou seja, arames

### Bancadas de Trefilação

Na figura abaixo pode-se observar o aspecto esquemático de uma bancada de trefilação, com os respectivos componentes.

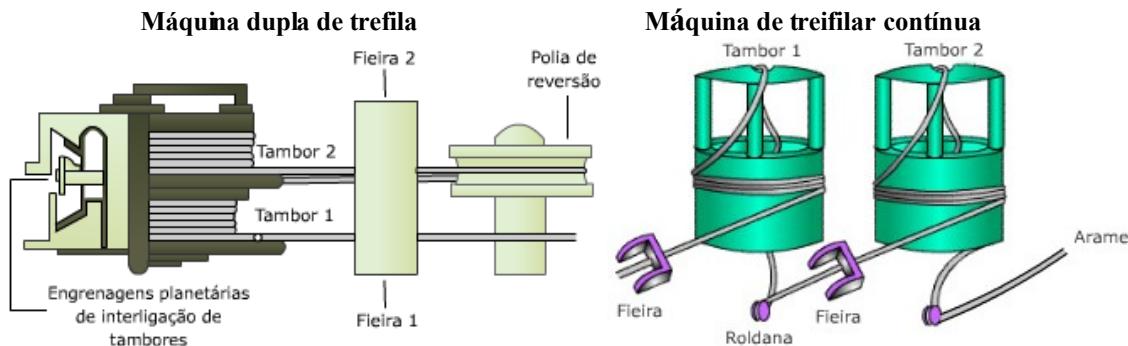


## Trefiladoras de Tambor

As trefiladoras de tambor podem ser classificadas em três grandes grupos, a saber:

- Simples (1 só tambor)- para arames grossos
- Duplas para arames médios
- Múltiplas (contínuas) para arames médios a finos.

Veja abaixo exemplos destes modelos de máquina.



Os elementos das máquinas de trefilação dependem das características de cada máquina. Existem entretanto componentes básicos que usualmente sempre estão presentes nas trefiladoras. Eles são:

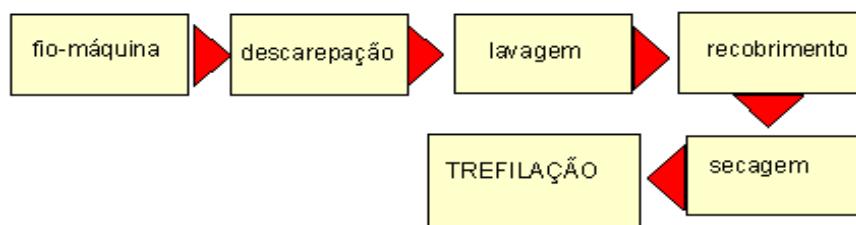
- Carrelé alimentador
- Porta-fleira
- Garra ou mordaça para puxar a primeira porção do arame
- Tambor para enrolar o arame trefilado
- Sistema de acionamento do tambor

## Trefilação dos arames de aço

Um dos usos mais comuns da trefilação é a produção de arames de aço. Por esta razão especificam-se abaixo algumas das principais características deste processo.

### Etapas do processo

Os passos a percorrer são discriminados no esquema abaixo. Observe que a trefilação propriamente dita é precedida por várias etapas preparatórias que eliminam todas as impurezas superficiais, por meios físicos e químicos.



- Matéria-prima: fio-máquina (vergalhão laminado a quente)
- Descarepação: - Mecânica (descascamento): dobramento e escovamento. Química (decapagem): com HCl ou H<sub>2</sub>S0<sub>4</sub> diluídos.
- Lavagem: em água corrente
- Recobrimento: comumente por imersão em leite de cal Ca(OH)<sub>2</sub> a 100°C a fim de neutralizar resíduos de ácido, proteger a superfície do arame, e servir de suporte para o lubrificante de trefilação.
- Secagem (em estufa) - Também remove H<sub>2</sub> dissolvido na superfície do material.
- Trefilação - Primeiros passes a seco. Eventualmente: recobrimento com Cu ou Sn e trefilação a úmido.

## Tratamentos térmicos dos arames

Depois da trefilação os arames são submetidos a tratamentos térmicos para alívio de tensões e/ou obtenção de propriedades mecânicas desejadas. Abaixo, os principais tratamentos utilizados

### Recozimento:

Indicação: principalmente para arames de baixo carbono

Tipo: subcritico, entre 550 a 650°C

Objetivo: remover efeitos do encruamento.

### Patenteamento:

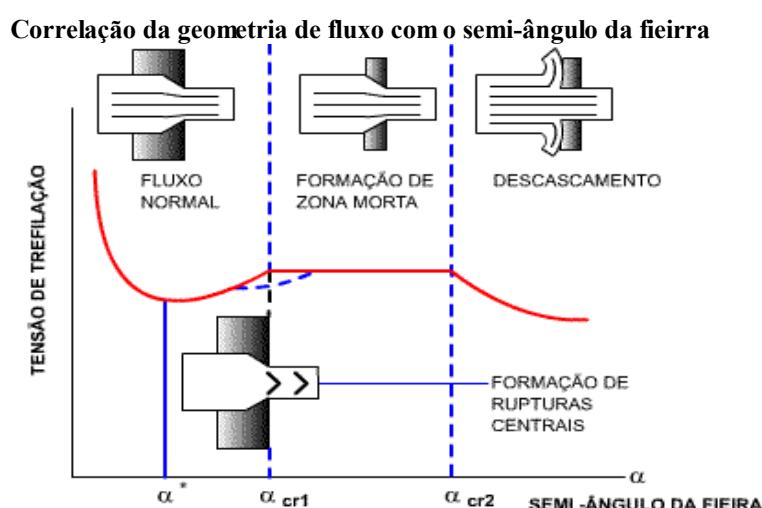
Indicação: aços de médio a alto carbono ( $C > 0,25\%$ )

Tipo: aquecimento acima da temperatura crítica (região g) seguido de resfriamento controlado, ao ar ou em banho de chumbo mantido entre 450 e 550°C.

Objetivo: obter uma melhor combinação de resistência e ductilidade que a estrutura resultante (perlita fina ou bainita) fornece.

### Observação

Para cada redução dada existe um valor ótimo do ângulo de trefilação,  $\alpha^*$ , que é aquele que minimiza a carga e consequentemente o trabalho total de trefilação



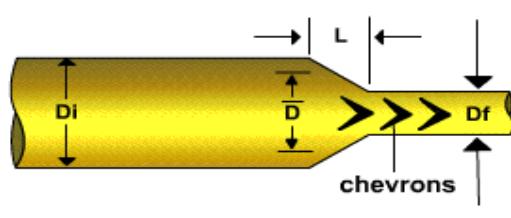
### Defeitos em Trefilados

#### Podem resultar:

- de defeitos na matéria-prima (fissuras, lascas, vazios, inclusões);
- do processo de deformação.

Exemplo de defeito: Trincas internas em ponta de flecha ("chevrons") - veja figura abaixo

#### Esquema de Formação de Trincas Centrais



$$\bar{D} = \frac{D_i + D_f}{2}$$

Quando a redução é pequena e o ângulo de trefilação é relativamente grande (tipicamente, quando  $D/L > 2$ ) a ação compressiva da fieira não penetra até o centro da peça.

Durante a trefilação as camadas mais internas da peça não recebem compressão radial, mas são arrastadas e forçadas a se estirar pelo material vizinho das camadas superficiais, que sofrem a ação direta da fieira.

Tal situação (deformação heterogênea) gera tensões secundárias trativas no núcleo da peça, que pode vir a sofrer um trincamento característico, em ponta de flecha.

A melhor solução é diminuir a relação  $D/L$ , o que pode ser feito empregando-se uma fieira de menor ângulo ( $\alpha$ ), ou então aumentando-se a redução no passe (em outra fieira com saída mais estreita).

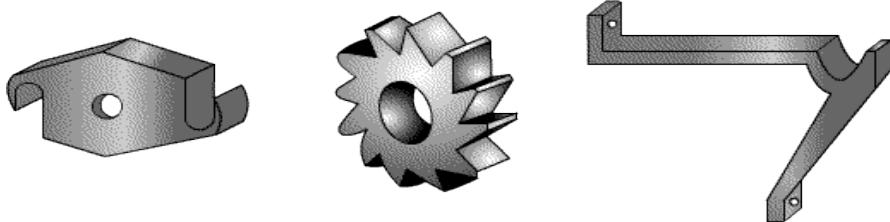
## Extrusão

**O que é :** na extrusão o material é forçado através de uma matriz, de forma similar ao aperto de um tubo de pasta de dentes.

**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 tem seção transversal constante.

**Características:** dependendo da ductilidade do material a extrudar o processo pode ser feito a frio ou a quente, em altas temperaturas. Cada tarugo é extrudado individualmente, caracterizando a extrusão como um processo semi-contínuo. O produto é essencialmente uma peça semi-acabada. A extrusão pode ser combinada com operações de forjamento, sendo neste caso denominada extrusão fria.

**Exemplos de Produtos obtidos pelo seccionamento do perfil extrudado**

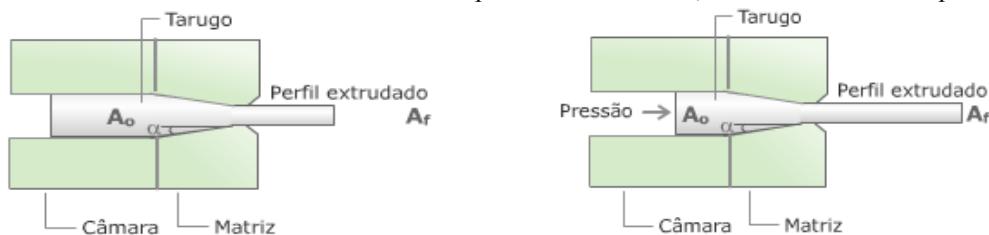


**Uso - produtos mais comuns:** quadros de janelas e portas, trilhos para portas deslizantes, tubos de várias seções transversais e formas arquitetônicas. Produtos extrudados podem ser cortados nos tamanhos desejados para gerarem peças, como maçanetas, trancas e engrenagens, como mostrado na figura abaixo. Em operação combinada com forjamento pode gerar componentes para automóveis, bicicletas, motocicletas, maquinário pesado e equipamento de transporte.

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

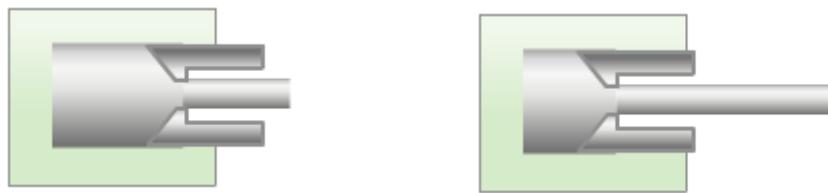
## Tipos de Extrusão

No processo básico, denominado direto um tarugo cilíndrico é colocado numa câmara e forçado através de uma abertura de matriz através de um pistão hidráulico. A abertura da matriz pode ser circular ou de outro formato. A extrusão também pode ser indireta, hidrostática ou por impacto.



Destacam-se os métodos mais usuais:

**Extrusão Indireta (reversa, invertida)**: a matriz se desloca na direção do tarugo



**Extrusão Hidrostática**: o diâmetro do tarugo é menor que o diâmetro da câmara, que é preenchida por um fluido . A pressão é transmitida ao tarugo através de um pistão. Não há fricção nas paredes da câmara.

**Extrusão Lateral** : o material do tarugo é forçado através de abertura lateral da câmara.Os eixos do punção e da peça tem diferentes direções ( ângulo reto).



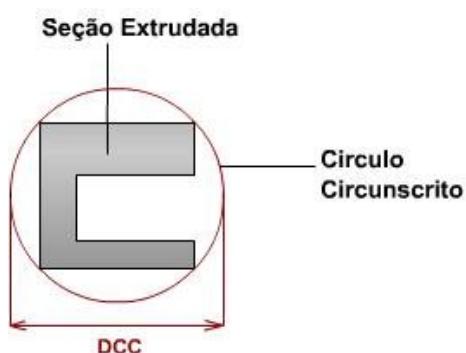
### Parâmetros da Extrusão

#### Parâmetros Geométricos

Os parâmetros geométricos da extrusão são:

- O ângulo da matriz a  $\alpha$
- relação de extrusão que é o quociente entre a áreas das seções transversais do tarugo  $A_0$  e do produto extrudado  $A_f$
- O diâmetro do círculo circunscrito DCC que é o diâmetro do menor círculo no qual se inscreve a seção transversal.

A complexidade da extrusão é medida pela relação entre o perímetro da seção do produto extrudado e a área da seção transversal. Esta relação é demominada fator de forma



## Parâmetros Físicos

### Força de extrusão

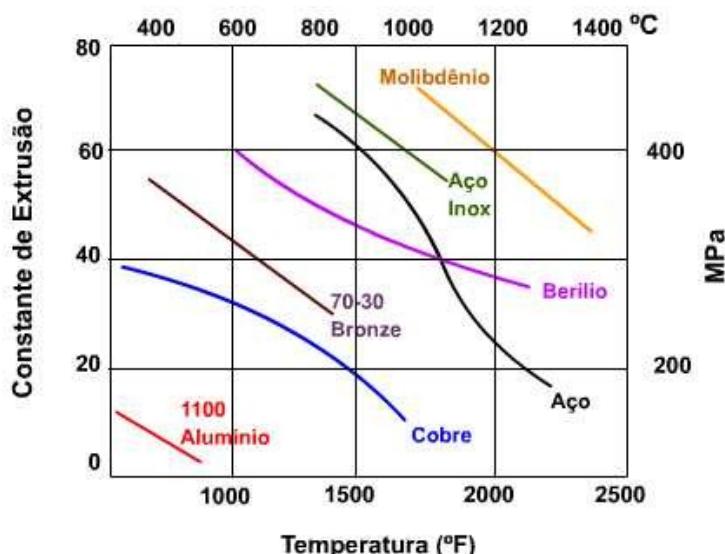
A força requerida para o processo depende da resistência do material, da relação de extrusão, da fricção na câmara e na matriz, e outras variáveis como a temperatura e a velocidade de extrusão.

A força pode ser estimada pela fórmula:

$$F = A_0 k \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$$

Os valores de k são dados na figura abaixo, para o campo usual de temperaturas.

**Constante de Extrusão  
para Metais em Várias Temperaturas**



### Outras Variáveis do Processo

Tem papel de influência no processo outras variáveis, entre as quais citamos: a temperatura do tarugo, a velocidade de deslocamento do pistão e o tipo de lubrificante.

### Fluxo do metal

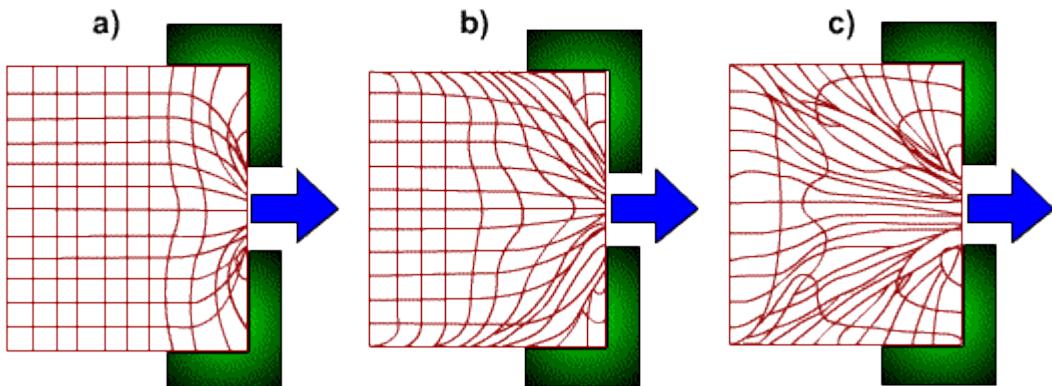
**O fluxo do metal determina a qualidade e as propriedades mecânicas do produto final.**

O fluxo do metal é comparável ao escoamento de um fluido num canal. Os grãos tendem a alongar-se formando uma estrutura com orientação preferencial. O fluxo inadequado pode causar inúmeros defeitos.

A técnica de observação do fluxo consiste em seccionar o tarugo ao longo de seu comprimento e marcar uma das faces com um quadriculado. As duas metades são então colocadas juntas na câmara e extrudadas. Após a extrusão as partes são novamente separadas para exame.

Na figura abaixo pode ser observado o resultado desta técnica, para três situações típicas da extrusão direta para matriz quadrada ( ângulo da matriz de 90º ).

## Tipos de Fluxo do Metal na Extrusão com Matrizes Quadradas



Observe as zonas mortas nas figuras b) e c) , onde o metal fica praticamente estacionário nos cantos. A situação é similar ao escoamento de fluido num canal com cantos vivos e curvas.

### Velocidades

As velocidades do pistão podem chegar até 0,5m/s . Geralmente , velocidades menores são recomendadas para o alumínio, magnésio e cobre, e velocidades mais altas para aços, titânio e ligas refratárias.

### Tolerâncias

As tolerâncias na extrusão estão na faixa de 0,25 - 2,5 mm e aumentam com as dimensões da seção transversal.

## Extrusão a Quente

É feita em temperatura elevada para ligas que não tenham suficiente ductilidade a temperatura ambiente, de forma a reduzir as forças necessárias.

### Características

- A extrusão a quente apresenta alguns problemas como todo o processo de alta temperatura:
- O degaste da matriz é excessivo.
- O esfriamento do tarugo na câmara pode gerar deformações não-uniformes.
- O tarugo aquecido é coberto por filme de óxido ( exceto quando aquecido em atmosfera inerte) que afeta o comportamento do fluxo do metal por suas características de fricção e pode gerar um produto de pobre acabamento superficial.

Algumas medidas preventivas podem sanar ou minorar o efeito dos problemas mencionados acima:

- Para reduzir o efeito de esfriamento e prolongar a vida da ferramenta, a matriz pode ser pré-aquecida.
- Para melhorar o acabamento superficial, a camada de óxido é removida através do uso de uma placa, com diâmetro inferior ao da câmara, posicionada sobre o pistão. Ao extrudar o tarugo, uma casca cilíndrica contendo a camada de óxido permanece " colada " à parede da câmara. Com isto elimina-se a presença de óxidos no produto. A casca é posteriormente removida da câmara.

Veja o campo de temperaturas para extrusão de vários metais:

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

## Extrusão a Frio

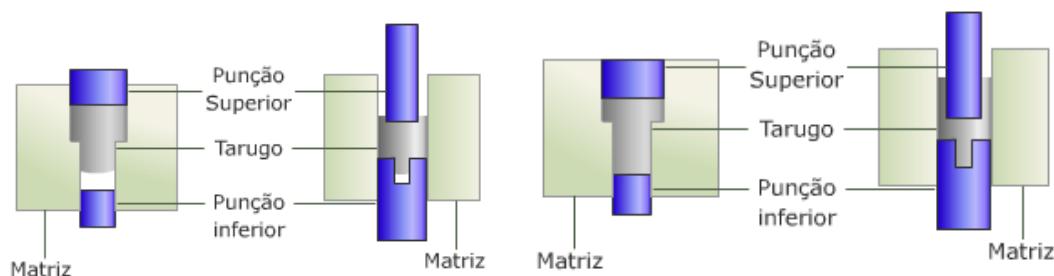
Desenvolvida nos anos 40 é o processo que combina operações de extrusão direta, indireta e forjamento. O processo foi aceito na indústria particularmente para ferramentas e componentes de automóveis , motocicletas, bicicletas, acessórios e equipamento agrícola.

O processo usa tarugos cortados de barras laminadas, fios ou chapas.

Os tarugos menores que 40mm de diâmetro são cisalhados e tem suas bordas ajustadas por retificação. Diâmetros maiores são usinados a partir de barras, com comprimentos específicos.

Embora componentes extrudados a frio sejam em geral mais leves, fabricam-se componentes de até 45 kg e com comprimentos de até 2m.

Metais obtidos por metalurgia do pó são também extrudados a frio.



## Vantagens em relação a extrusão a quente

- melhores propriedades mecânicas resultantes do encruamento, desde que o calor gerado pela deformação não recristalize o metal
- controle das tolerâncias, requerendo pouca ou nenhuma operação posterior de acabamento
- melhor acabamento superficial, devido em parte pela não existência de camada de óxido, desde que a lubrificação seja eficiente
- eliminação do pré-aquecimento do tarugo
- Taxas de produção e custos competitivos com outros métodos. Algumas máquinas são capazes de produzir mais de 2000 partes por hora.

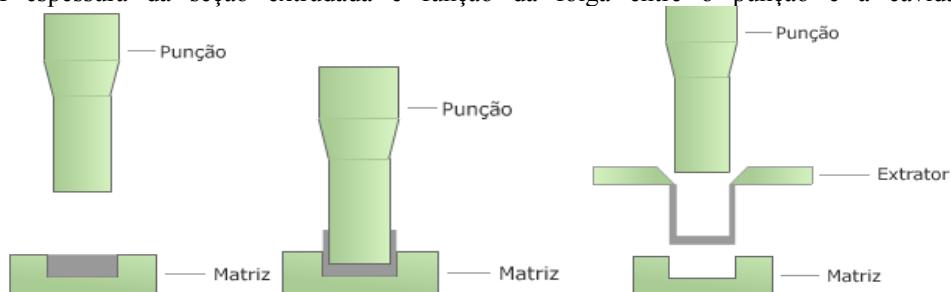
## Desvantagens

A magnitude da tensão no ferramental de extrusão é muito alta, especialmente para trabalhar peças de aço. A dureza do punção varia de 60 a 65 HRc e a da matriz de 58 a 62 HRc.

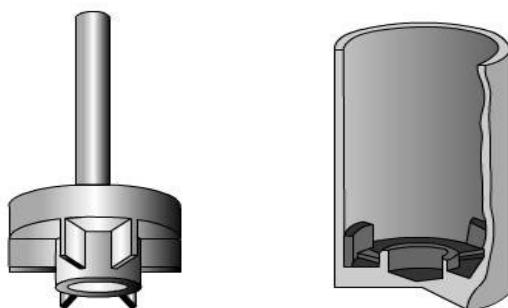
## Extrusão por Impacto

É similar a extrusão indireta e freqüentemente incluída na categoria da extrusão a frio. O punção desce rapidamente sobre o tarugo que é extrudado para trás.

A espessura da seção extrudada é função da folga entre o punção e a cavidade da matriz.



### Exemplos de peças fabricadas por Extrusão de Impacto

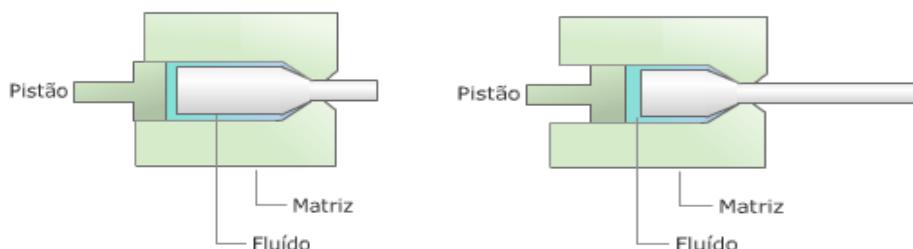


Incluem os tubos de pastas e assemelhados que são peças descartáveis. Podem-se obter diâmetros de até 150mm . A maioria dos metais não ferrosos podem ser extuidados por impacto , usando-se prensas verticais e taxas de produção de até duas peças por segundo.

O processo permite produzir seções tubulares de paredes muito finas ( relações de diâmetro/ espessura da ordem de 0,005) Por esta razão a simetria da peça e concentricidade do punção são fatores importantes.

## Extrusão Hidrostática

A pressão para a operação de extrusão é proveniente de um meio fluido que envolve o tarugo. Não existe fricção entre parede e tarugo.



As pressões usadas são da ordem de 1400 Mpa.

O método foi desenvolvido nos anos 50 e evoluiu para o uso de uma segunda câmara pressurizada mantida a uma pressão mais baixa. É a chamada extrusão fluido a fluido, que reduz os defeitos do produto extrudado.

A extrusão por pressão aumenta a ductilidade do material , portanto materiais frágeis podem se beneficiar desta forma de extrusão.

Entretanto as vantagens essenciais do método são:

- baixa fricção
- pequenos ângulos de matriz
- altas relações de extrusão

Podem ser extrudados por este método uma grande variedade de metais e polímeros, formas sólidas, tubos e outras formas vazadas como favo de abelha e perfis.

A extrusão hidrostática é realizada usualmente a temperatura ambiente , em geral usando óleo vegetal como meio fluido, combinando as qualidades de viscosidade e lubrificação. Pode-se também trabalhar em alta temperatura. Neste caso ceras , polímeros ou vidro são usados como fluido, que também tem a função de manter o isolamento térmico do tarugo durante o procedimento de extrusão.

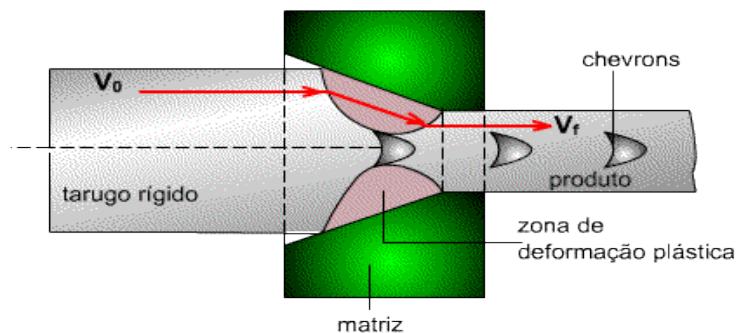
### Defeitos da Extrusão

Dependendo das condições e do material extrudado podem ocorrer vários tipos de defeitos, que afetam a resistência e qualidade do produto final.

Os principais defeitos são:

- **trinca superficial** : ocorre quanto a temperatura ou a velocidade é muito alta. Estas causam um aumento significativo da temperatura da superfície, causando trincas e rasgos. Os defeitos são intergranulares. Ocorrem especialmente em ligas de alumínio, magnésio e zinco, embora possam ocorrer em ligas de alta temperatura. Estes defeitos podem ser evitados reduzindo-se a velocidade de extrusão e diminuindo a temperatura do tarugo.
- **cachimbo**: padrão de fluxo que tende a arrastar óxidos e impurezas superficiais para o centro do tarugo, como num funil. Este defeito é conhecido como defeito cachimbo ( ou rabo de peixe) . O defeito pode se estender até um terço do comprimento da parte extrudada e deve ser eliminado por corte. O defeito pode ser minimizado alterando-se o padrão de fluxo para um comportamento mais uniforme., controlando a fricção e minimizando os gradientes de temperatura. Alternativamente o tarugo pode ser usinado ou tratado quimicamente antes da extrusão, removendo-se as impurezas superficiais.
- **trinca interna**: o centro do tarugo pode desenvolver fissuras que são conhecidas como trincas centrais, fratura tipo ponta de flecha ou chevron. O defeito é atribuído à tensão hidrostática de tração na linha central , similar à situação da região de estrição em um corpo em ensaio de tração. A tendência à formação de fissuras centrais aumenta com o crescimento da fricção e da relação de extrusão . Este tipo de defeito também aparece na extrusão de tubos.

### Fraturas Centrais - Chevrons



## Conformação de chapas

**O que é :** Conformação de chapas é o processo de transformação mecânica que 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 uma nova forma geométrica.

**Classificação dos Processos:** A conformação de chapas metálicas finas pode ser classificada através do tipo de operação empregada . Assim pode-se ter : estampagem profunda, corte em prensa, estiramento, etc.

### Métodos de Conformação- Máquinas e Ferramentas

#### Máquinas utilizadas

A maior parte da produção seriada de partes conformadas a partir de chapas finas é realizada em prensas mecânicas ou hidráulicas.

Nas prensas mecânicas a energia é geralmente, armazenada num volante e transferida para o cursor móvel no êmbolo da prensa. As prensas mecânicas são quase sempre de ação rápida e aplicam golpes de curta duração, enquanto que as prensas hidráulicas são de ação mais lenta, mas podem aplicar golpes mais longos. As prensas podem ser de efeito simples ou de duplo efeito.

Algumas vezes pode ser utilizado o martelo de queda na conformação de chapas finas. O martelo não permite que a força seja tão bem controlada como nas prensas , por isso não é adequado para operações mais severas de conformação.

OBS: As máquinas de conformar serão tratadas mais detalhadamente em seção específica.

#### Ferramental Acessório

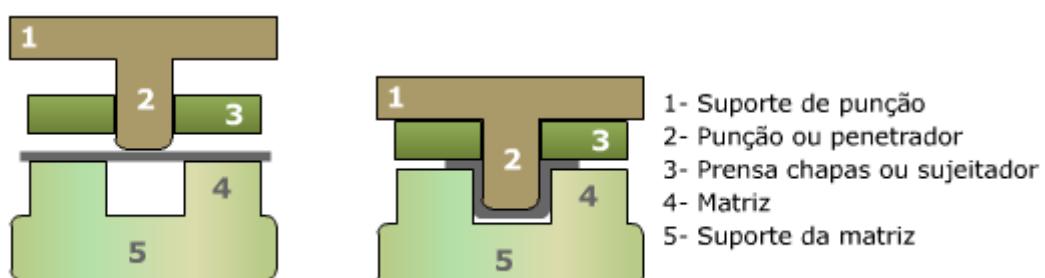
As ferramentas básicas utilizadas em uma prensa de conformação de peças metálicas são o punção e a matriz.

O punção, normalmente o elemento móvel, é a ferramenta convexa que se acopla com a matriz côncava. Como é necessário um alinhamento acurado entre a matriz e o punção, é comum mantê-los permanentemente montados em uma subpresa, ou porta matriz, que pode ser rapidamente inserida na prensa.

Geralmente, para evitar a formação de rugas na chapa a conformar usam-se elementos de fixação ou a ação de grampos para comprimir o "blank" contra a matriz. A fixação é conseguida por meio de um dispositivo denominado anti-rugas ou prensa-chapas, ou ainda, em prensas de duplo efeito por um anel de fixação.

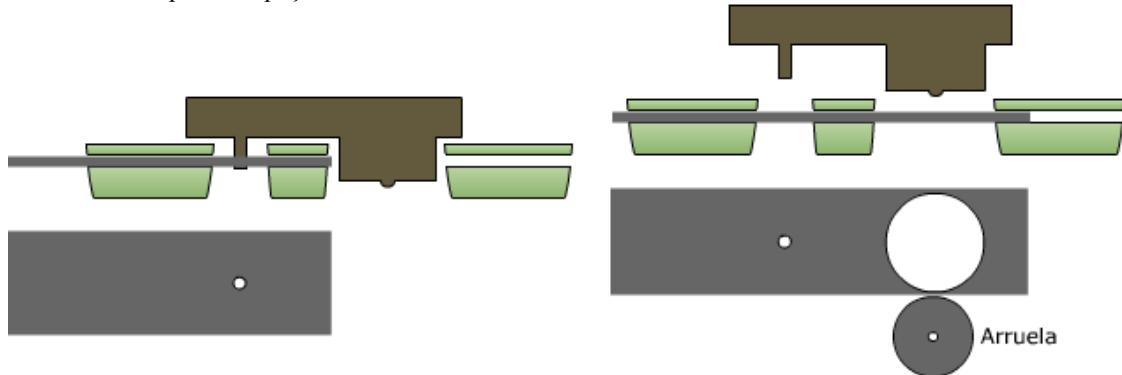
A seguir especificam-se alguns dos conjuntos típicos do ferramental usado em processos específicos, a saber: **estampagem profunda**, **conformação progressiva** (corte/perfuração), processo **Guerin** e **repuxamento**.

A figura abaixo mostra esquematicamente uma prensa e o ferramental de estampagem profunda.

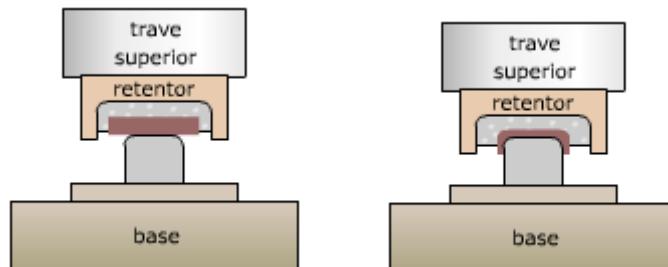


Freqüentemente, matrizes e punções são projetados para permitir que os estágios sucessivos de conformação de uma peça sejam efetuados na mesma matriz, a cada golpe da prensa. Este procedimento é conhecido como **conformação progressiva**.

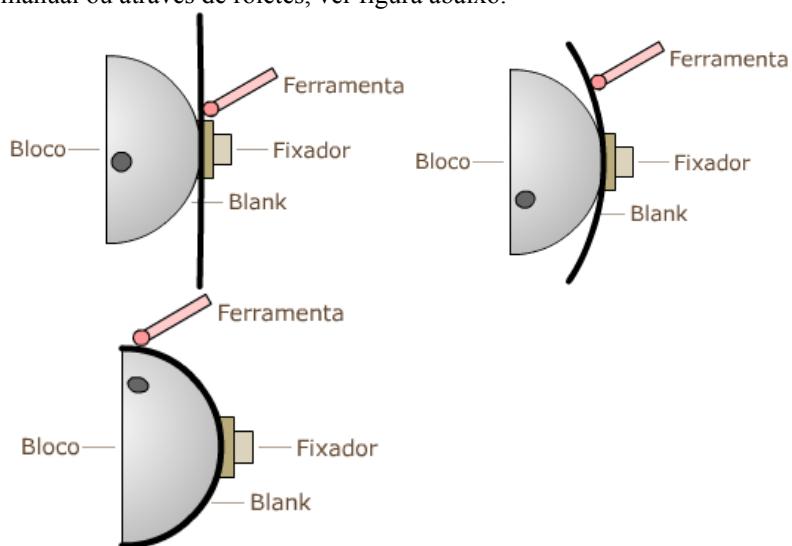
Um exemplo é a matriz para recorte e perfuração de arruelas planas, figura abaixo. A tira metálica é alimentada, deslizando até a primeira posição de corte. O furo da arruela é punctionado. Segue-se um segundo deslizamento, após o que a arruela é recortada. Durante o corte da arruela o punção executa o furo central da próxima peça.



O processo **Guerin** é uma variação do processo convencional de matriz e punção. Neste processo, ver figura, uma "almofada" de borracha serve como matriz. O punção é fixado à base de uma prensa hidráulica de efeito simples a camada de borracha fica numa caixa retentora, na trave superior da prensa. O disco (ou blank) é colocado sobre o bloco de modelar (punção), e pressionado contra a borracha. Uma pressão aproximadamente uniforme é conseguida entre a borracha e o disco (blank). Este processo permite a fácil produção de peças rasas flangeadas, com flanges estirados.



O **repuxamento** é um método empregado para a fabricação de fundos para tanques de aço e outras peças profundas de simetria circular. O "blank" é fixado contra um bloco de modelagem que gira em alta velocidade. O "blank" é conformado progressivamente contra o bloco por intermédio de uma ferramenta manual ou através de roletes, ver figura abaixo.



## Corte de Chapas

### Características

Destina-se à obtenção de formas geométricas, a partir de chapas submetidas à ação de pressão exercida por um punção ou uma lâmina de corte. Quando o punção ou a lâmina inicia a penetração na chapa, o esforço de compressão converte-se em esforço cisalhante (esforço cortante) provocando a separação brusca de uma porção da chapa. No processo, a chapa é deformada plasticamente e levada até a ruptura nas superfícies em contato com as lâminas.

A aresta de corte apresenta em geral três regiões: uma rugosa (correspondente à superfície da trinca da fratura), uma lisa (formada pelo atrito da peça com as paredes da matriz) e uma região arredondada (formada pela deformação plástica inicial). A qualidade das arestas cortadas não é a mesma das usinadas, entretanto quando as lâminas são mantidas afiadas e ajustadas é possível obter arestas aceitáveis para uma grande faixa de aplicações.

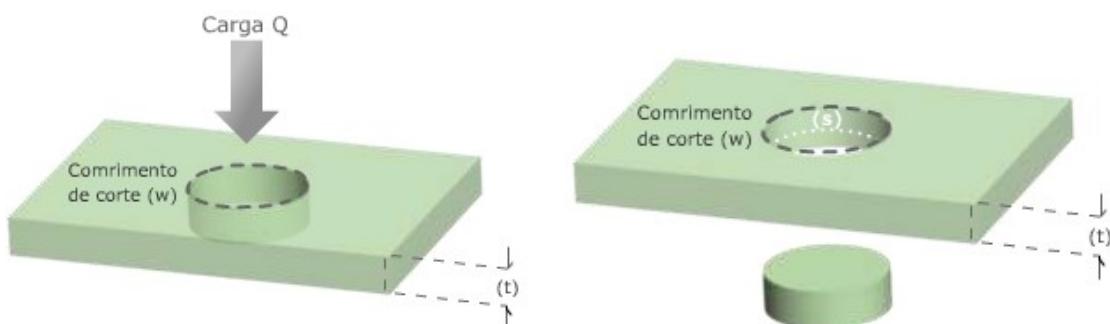
A qualidade das bordas cortadas geralmente melhora com a redução da espessura da chapa.

No corte por matriz e punção (“piercing” ou “blanking”) não existe uma regra geral para selecionar o valor da folga, pois são vários os parâmetros de influência. A folga pode ser estabelecida com base em atributos, como: aspecto superficial do corte, imprecisões, operações posteriores e aspectos funcionais. Se não houver nenhum atributo específico desejado para superfície do “blank”, a folga é selecionada em função da força mínima de corte.

### Força e Potência de Corte

Na figura abaixo podem ser identificados os parâmetros envolvidos no corte. Admite-se o cálculo simples da força pelo produto da área pela tensão de ruptura em cisalhamento. Observe que a profundidade ( $s$ ) adotada para este cálculo representa a penetração do punção na chapa no momento da ruptura.

A potência necessária para o corte é calculada pelo produto entre a força do punção e a velocidade da lâmina.



**OBS:** A força necessária para o corte pode ser bastante reduzida construindo-se as bordas da ferramenta em plano inclinado em relação ao plano da chapa, de maneira que apenas uma pequena fração do comprimento total do corte seja feita de uma só vez.

### Tipos de Corte

Dependendo do tipo de corte, são definidos diversos grupos de operações da prensa, conforme listagem abaixo:

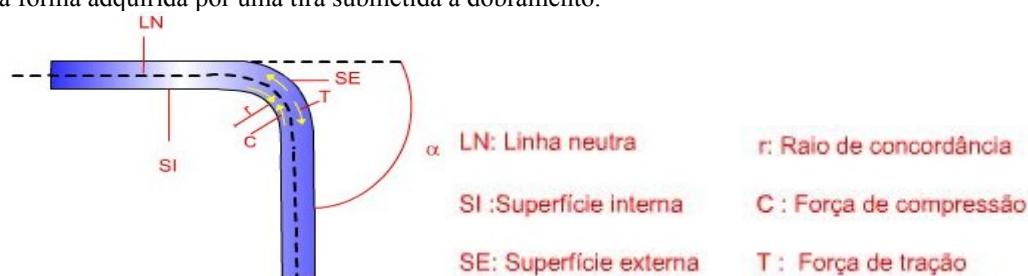
- A operação de corte é usada para preparar o material para posterior estampagem ("blank"). A parte desejada é cortada (removida) da chapa original.
- A fabricação de furos em prensa (piercing ou punching) caracteriza uma operação de corte em que o metal removido é descartado.
- A fabricação de entalhes (notching) nas bordas de uma chapa pode ser feita em prensa através do punctionamento destas regiões.
- O corte por guilhotina é uma operação que não retira material da chapa metálica.

- A rebarbação (trimming) é uma operação que consiste em aparar o material em excesso (rebarbas) da borda de uma peça conformada. A remoção de rebarbas de forjamento em matriz fechada é uma operação deste tipo.
- Existe um processo relativamente recente de corte fino de "blanks" (fine blanking), que se caracteriza pelo emprego de folgas muito pequenas (0,0002 pol.), com prensas e jogo de matrizes muito rígidos (para evitar dobramento da chapa). Com este equipamento é possível produzir "blanks" com superfícies de corte quase isentas de defeitos. As peças produzidas podem ser empregadas como engrenagens, cames, etc., sem que seja necessária a usinagem das bordas cortadas.

## Dobramento

### Características

Nesta operação, a tira metálica é submetida a esforços aplicados em duas direções opostas para provocar a flexão e a deformação plástica, mudando a forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes, em ângulo, com raio de concordância em sua junção. A figura mostra os esforços atuantes e a forma adquirida por uma tira submetida a dobramento.



### Raio de Dobramento

Para a operação de dobramento existe um raio de dobramento abaixo do qual o metal trinca na superfície externa. É o raio mínimo de dobramento, expresso geralmente em múltiplos da espessura da chapa.

Um raio de dobramento de 3t indica que o metal pode ser dobrado formando um raio de três vezes a espessura da chapa sem que haja o aparecimento de trincas. O raio mínimo de dobramento é portanto um limite de conformação, que varia muito para os diversos metais e sempre aumenta com a prévia deformação a frio do metal.

Alguns metais muito dúcteis apresentam raio mínimo de dobramento igual a zero. Isto significa que as peças podem ser achatadas sobre si mesmas, mas geralmente não se utiliza este procedimento para evitar danos no punção ou na matriz.

### Efeito mola

A operação de dobramento exige que se considere a recuperação elástica do material (efeito mola), para que se tenham as dimensões exatas na peça dobrada. A recuperação elástica da peça será tanto maior quanto maior for o limite de escoamento, menor o módulo de elasticidade e maior a deformação plástica. Estabelecidos estes parâmetros, a deformação aumenta com a razão entre as dimensões laterais da chapa e sua espessura.

O efeito mola ocorre em todos os processos de conformação, mas no dobramento é mais facilmente detectado e estudado. O raio de curvatura antes da liberação da carga ( $R_o$ ) é menor do que após a liberação ( $R_f$ ). O efeito mola (ver figura abaixo) é representado pelo símbolo K.

$\alpha_o$  ângulo inicial, antes da liberação de carga

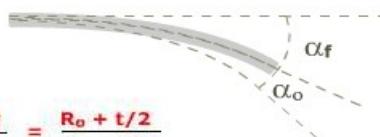
$\alpha_f$  ângulo final

$\alpha_o$  ângulo inicial, antes da liberação de carga

$\alpha_f$  ângulo final

$$K = \frac{\alpha_f}{\alpha_o} = \frac{R_o + t/2}{R_f + t/2}$$

$$K = \frac{\alpha_f}{\alpha_o} = \frac{R_o + t/2}{R_f + t/2}$$



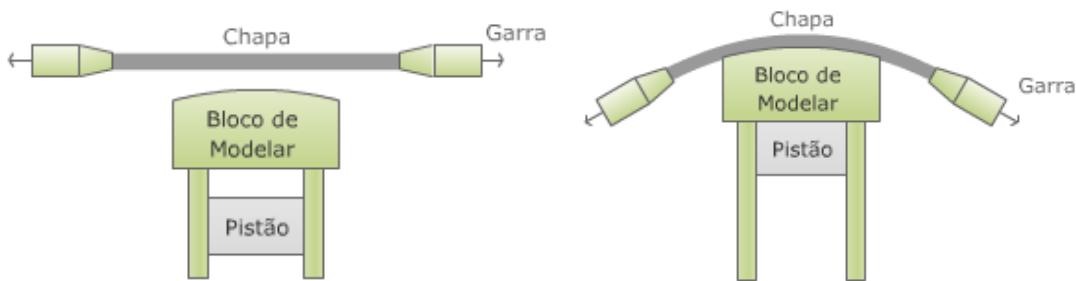
## Estiramento

### Características

É a operação que consiste na aplicação de forças de tração, de modo a esticar o material sobre uma ferramenta ou bloco (matriz). Neste processo, o gradiente de tensões é pequeno, o que garante a quase total eliminação do efeito mola.

Como predominam tensões trativas, grandes deformações de estiramento podem ser aplicadas apenas para materiais muito dúcteis. Para estes materiais, almeja-se altos valores de coeficiente de encruamento.

**Ferramental:** O equipamento de estiramento consiste basicamente de um pistão hidráulico (usualmente vertical), que movimenta o punção. Duas garras prendem as extremidades da chapa. Na operação, não existe uma matriz fêmea. As garras podem ser móveis permitindo que a força de tração esteja sempre em linha com as bordas da chapa (figura). Garras fixas devem ser usadas somente para conformação de peças com grandes raios de curvatura, evitando-se com isto o risco de ruptura da chapa na região das garras.



O estiramento é uma das etapas de operações complexas de estampagem de chapas finas. Na conformação de peças como partes de automóveis ou de eletrodomésticos, é comum haver componentes de estiramento.

### A Estricção no Estiramento

O limite de conformação no estiramento pode ser estabelecido pelo fenômeno da estricção. A estricção é a redução das dimensões da seção transversal, provocada pelas cargas de tração do processo. No estiramento deve ser evitada estricção localizada, comumente conhecida por **empescoçamento**.

### Base Teórica

Em um ensaio de tração uniaxial, a estricção localizada acontece quando  $(d\sigma/\sigma) = dz$ , o que significa que assumindo uma lei potencial entre tensão e deformação (Equação de Hollomon, a maior deformação verdadeira iguala-se ao coeficiente de encruamento ( $n$ )).

Nas operações de estiramento uniaxial e biaxial, a estricção localizada acontece para as condições especificadas abaixo:

Relação Tensão -deformação	condições para ocorrência de estricção localizada	
equação de Holomon $\sigma = k \cdot \epsilon^n$ $n$ - coeficiente de encruamento	tração uniaxial $\frac{d\sigma}{\sigma} = \epsilon$	tração biaxial $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{\sigma}{2}$

Assim, o empescoçamento só acontecerá quando  $Zu=2n$ . Ou seja, estricção é muito mais difusa, implicando em um "amolecimento" geométrico, com a diminuição de espessura ao longo de toda a peça. Isto não constitui limitação para a operação. Contudo, assim que ocorre a estricção localizada, facilmente detectada nas superfícies expostas, segue-se a fratura. Logo, a estricção localizada é um limite de conformação.

É comum haver gradientes de deformação em operações de estiramento. A região que deforma mais se torna mais encruada e a deformação é transferida para o elemento de volume vizinho. Se o coeficiente de encruamento for suficientemente grande, haverá a redistribuição das deformações ao longo de toda a peça e esta suportará mais deformações, antes que a estricção localizada se inicie. Então, para operações que exigem altos graus de estiramento, exigem-se materiais com altos valores de  $n$ .

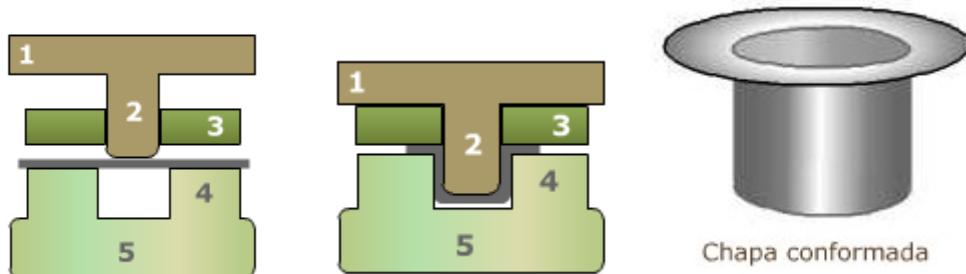
## Operações de Estampagem Profunda ou Embutimento

### Características

É o processo utilizado para fazer com que uma chapa plana ("blank") adquira a forma de uma matriz (fêmea), imposta pela ação de um punção (macho). O processo é empregado na fabricação de peças de uso diário (pára-lamas, portas de carros; banheiras, rodas, etc.).

A distinção entre estampagem rasa (shallow) e profunda é arbitrária. A estampagem rasa geralmente se refere à conformação de um copo com profundidade menor do que a metade do seu diâmetro com pequena redução de parede. Na estampagem profunda o copo é mais profundo do que a metade do seu diâmetro.

Para melhorar o rendimento do processo, é importante que se tenha boa lubrificação. Com isto reduzem-se os esforços de conformação e o desgaste do ferramental. Os óleos indicados normalmente são para extrema pressão, devendo garantir boa proteção contra a corrosão da chapa, ser de fácil desengraxe e não levar à oxidação do material (devido às reações de subprodutos dos gases formados no aquecimento do metal). Geralmente, são óleos minerais com uma série de aditivos (Cl, Pb, P, gorduras orgânicas, etc.).



### Outros Aspectos

Deve-se ainda estudar a **pressão** a ser aplicada no prensa-chapas: se esta for muito pequena, surgem rugas nas laterais da peça; se, por outro lado, for muito elevada, pode ocorrer a ruptura da peça na prensa.

Cuidado deve se ter com o ferramental, para que haja **folga** suficiente entre a matriz e o punção que permita o escoamento do material para o interior da matriz, sem que surjam tensões cisalhantes ocasionadas pelo atrito e que levem à ruptura do metal em prensa.

Às vezes, o diâmetro do "blank" é muito superior ao diâmetro da peça a estampar, sendo que esta deve atingir uma **profundidade de copo muito elevada**. A fabricação poderá exigir uma sequência de operações de estampagem, utilizando uma série de ferramentas, com diâmetros decrescentes (da matriz e do punção). O número de operações depende do material da chapa e das relações entre o disco inicial e os diâmetros das peças estampadas.