

Capítulo 2

Processos de conformação mecânica

Nas aplicações que exigem altas resistências à tração e ductibilidade, a estrutura de um metal obtido por fundição pode não ser a mais adequada. É o caso de perfis estruturais, eixos, chapas que serão conformadas, fios, cabos etc. Para conseguir características mais compatíveis com esses tipos de aplicação, aplicam-se outros processamentos aos metais, caracterizados pela utilização de pressão.

Esse tipo de técnica tem duas finalidades: obter o metal na forma desejada e melhorar suas propriedades mecânicas. Embora classificados como primários, esses processos podem originar produtos acabados, como trilhos, arames, tubos e outros. Na maioria dos casos, porém, é necessária a utilização de processos secundários para a obtenção da peça pronta.

2.1 Processos primários

Entre os processos chamados primários, os mais comuns são:

- laminação;
- trefilação;
- forjamento;
- extrusão;
- estampagem.

O metal pode ser trabalhado a quente ou a frio.

O trabalho a quente é feito acima da temperatura de recristalização do metal, e o trabalho a frio é realizado abaixo dessa temperatura, na maioria dos casos à temperatura ambiente. A figura 2.1 mostra o processo de laminação.

2.1.1 Características do trabalho a quente

O trabalho a quente apresenta as seguintes características:

- Não altera a dureza e melhora a ductibilidade do metal. Grãos deformados durante o processo logo se transformam em não deformados. Nessa mudança, os grãos podem ser afinados, o que aumenta a ductibilidade do metal;
- Aumenta a resistência do metal à tração em determinada direção, pois as impurezas existentes são segregadas em fibras com orientação definida;

- É mais fácil e rápido, pois sua realização exige máquinas de potência menor;
- O metal pode ser forçado em formas extremas quando quente, já que a reestruturação contínua dos cristais elimina rupturas e trincas;
- A temperatura de trabalho deve estar acima da recristalização, mas não muito elevada, a fim de que não se forme granulometria grosseira;
- As temperaturas altas oxidam e formam carepa na superfície do metal, de tal forma que tolerâncias rigorosas não podem ser mantidas.



Figura 2.1
Processo de laminação.

2.1.2 Características do trabalho a frio

No trabalho a frio, encontram-se as seguintes características:

- Costuma ser precedido pelo trabalho a quente, pela remoção de carepa, pela limpeza da superfície e, possivelmente, pela decapagem;
- Obtêm-se com ele tolerâncias rigorosas, bom acabamento superficial e boas propriedades mecânicas;
- Deve ser efetuado acima do limite de escoamento do material para que a deformação seja permanente. Todavia, a deformação sempre diminui um pouco com a retirada da carga, por causa do componente elástico, como podemos ver no diagrama tensão-deformação mostrado na figura 2.2. Esse fenômeno é chamado de histerese.

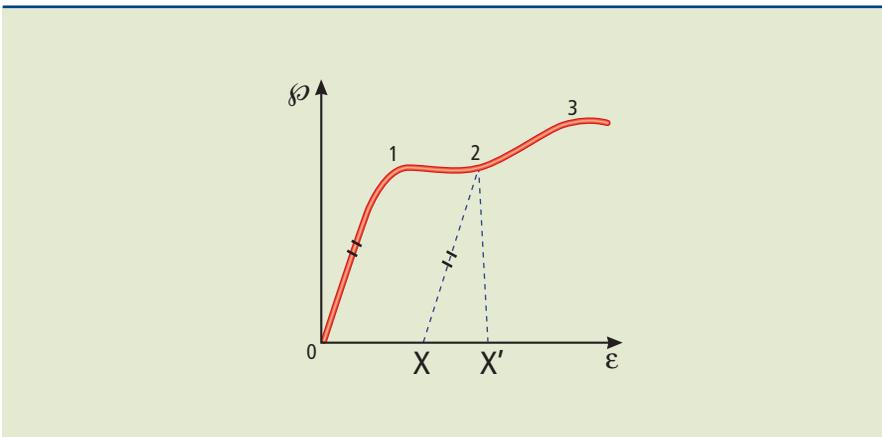


Figura 2.2
Diagrama tensão-deformação de um material dúctil.

Na figura 2.2, podemos observar:

1 = limite de escoamento;

2 = deformação plástica causada pelo trabalho a frio;

3 = limite de ruptura;

0X = deformação sob tensão;

0X' = deformação final.

- Os cristais de um metal trabalhado a frio são internamente deformados, o que provoca aumento de dureza, perda de ductibilidade e tensões residuais;
- As máquinas para execução de trabalhos a frio devem exercer forças muito maiores que aquelas projetadas para o trabalho a quente e, portanto, devem ser mais robustas. A figura 2.3 ilustra um tipo de máquina para trabalho a frio.

Figura 2.3
Máquina para
trabalho a frio.



2.2 Laminação

Panelas, fogões, geladeiras, fornos de micro-ondas, microcomputadores, automóveis, máquinas agrícolas, trens, navios, aviões, naves espaciais, satélites. Desde o mais simples até o mais sofisticado produto desta lista, todos dependem de processos de fabricação mecânica para existir. Eles são muitos e se encadeiam para que o produto seja fabricado.

Por mais simples que a peça seja, é sempre necessário usar máquinas e realizar mais de uma operação para produzi-la. Começando pela fundição, seguindo pelos processos de conformação mecânica como a laminação e a trefilação, passando pelo torneamento e pela usinagem, as peças vão sendo fabricadas e reunidas para formar os conjuntos mecânicos sem os quais a vida moderna seria impensável. E, pensando na fundição como início dessa cadeia, a etapa seguinte é, na maioria dos casos, a laminação, um processo de conformação mecânica.

2.2.1 As propriedades dos materiais

Ao dobrar um pedaço de arame, um fio de cobre ou um pedaço de metal qualquer, ou ao martelar um prego, você aplica esforços sobre o material e, desse esforço, resulta uma mudança de forma.

Em um ambiente industrial, a conformação mecânica é qualquer operação durante a qual se aplicam esforços mecânicos em metais que resultam em uma mudança permanente em suas dimensões.

Para a produção de peças de metal, a conformação mecânica inclui um grande número de processos: laminação, forjamento, trefilação, extrusão, estampagem etc. Esses processos têm em comum o fato de que, para a produção da peça, algum esforço – do tipo compressão, tração ou dobramento – deve ser aplicado sobre o material.

A pergunta que você provavelmente fará é: “Mas como materiais tão rígidos como o aço ou o ferro podem ser comprimidos, puxados e dobrados para adquirirem os formatos de que o produto necessita?”.

Bem, você deve se lembrar de que, quando estudamos as propriedades dos materiais, citamos suas propriedades mecânicas e, dentre elas, falamos da elasticidade e da plasticidade. Dissemos que a elasticidade é a capacidade que o material tem de se deformar, se um esforço é aplicado sobre ele, e de voltar à forma anterior quando o esforço para de existir. A plasticidade, por sua vez, permite que o material se deforme e mantenha essa deformação, se for submetido a um esforço de intensidade maior e mais prolongada. Essas duas propriedades permitem a existência dos processos de conformação mecânica.

Eles também são ajudados pelo reticulado cristalino dos metais, que está associado ao modo como os átomos dos metais estão agrupados.

Materiais que apresentam estrutura cúbica de face centrada (CFC) têm uma forma de agrupamento atômico que permite o deslocamento de camadas de átomos sobre outras camadas.

Por isso, eles se deformam mais facilmente do que os materiais que apresentam os outros tipos de arranjos. Isso acontece porque, nesta estrutura, os planos de escorregamento permitem que camadas de átomos “escorreguem” umas sobre as outras com mais facilidade (figura 2.4).

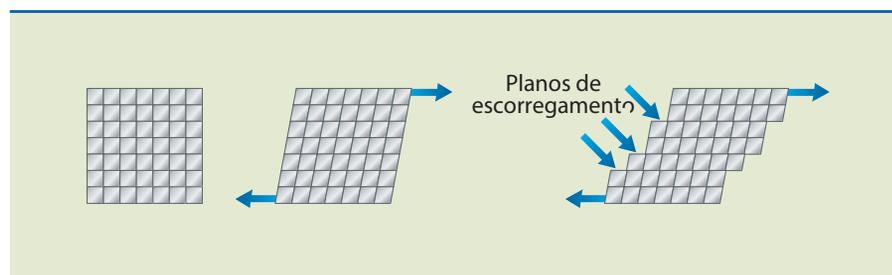


Figura 2.4

Os planos de escorregamento permitem que camadas de átomos “deslizem” umas sobre as outras com mais facilidade.

Como exemplo de metais que apresentam este tipo de estrutura após a solidificação, temos o cobre e o alumínio. Eles são mais fáceis de serem trabalhados por conformação mecânica. Prova disso é que o alumínio pode ser laminado até a espessura de uma folha de papel – como as dos rolos de papel-alumínio que você compra no supermercado.

2.2.2 Conformação por laminação

A laminação é um processo de conformação mecânica pelo qual um lingote de metal é forçado a passar por entre dois cilindros que giram em sentidos opostos e com a mesma velocidade. Assim consegue-se a redução da espessura do metal a cada passe de laminação, que é como se chama a passagem do metal pelos cilindros de laminação.

Ao passar entre os cilindros, o material sofre deformação plástica. Por isso, ele tem sua espessura reduzida e a largura e o comprimento aumentados. Como a largura é limitada pelo tamanho dos cilindros, o aumento do comprimento é sempre maior do que o da largura.

A laminação pode ser feita a quente ou a frio. Ela é feita a quente quando o material a ser conformado é difícil de laminar a frio ou quando necessita de grandes reduções de espessura.

Assim, o aço, quando necessita de grandes reduções, é sempre laminado a quente. Quando aquecida, a estrutura cristalina desse metal apresenta a configuração CFC que, como já vimos, se presta melhor à laminação. Além disso, nesse tipo de estrutura, as forças de coesão são menores, o que também facilita a deformação.

A laminação a frio se aplica a metais de fácil conformação em temperatura ambiente, o que é mais econômico. É o caso do cobre, do alumínio e de algumas de suas ligas.

A laminação a frio também pode ser feita mesmo em metais cuja resistência à deformação é maior.

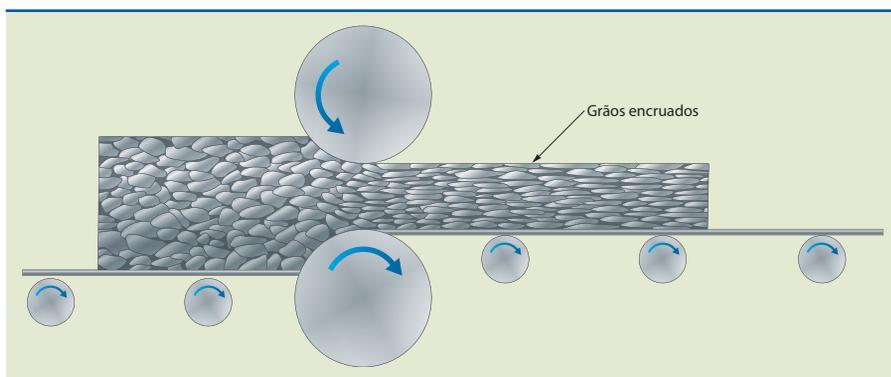
São passes rápidos e brandos cuja finalidade é obter maior precisão nas dimensões das chapas.

Em alguns casos, a dureza e a resistência do material melhoram, já que ele fica “encruado”. Quando se necessita de precisão dimensional e ductilidade, a chapa laminada a frio passa por um tratamento térmico conhecido como recozimento.

Sendo a quente ou a frio, a laminação parte dos lingotes que, passando pelos laminadores, pode se transformar em produtos de uso imediato – como trilhos, vigas e perfis. Também pode se transformar em produtos intermediários, que serão usados em outros processos de conformação mecânica. É o caso de tarugos, que passarão por forjamento, extrusão e trefilação, e das chapas, que serão estampadas para a fabricação de automóveis, ônibus, fogões, geladeiras...

2.2.3 Encruamento

É o resultado de uma mudança na estrutura do metal, associada a uma deformação permanente dos grãos do material, quando este é submetido à deformação a frio (figura 2.5). O encruamento aumenta a dureza e a resistência mecânica.

**Figura 2.5**

O encruamento resulta de uma mudança na estrutura do metal, associada a uma deformação permanente dos grãos do material.

2.2.4 Tipos de laminadores

O laminador é o equipamento que realiza a laminação. Mas nem só de laminadores é composta a laminação. Um setor de laminação é organizado de tal modo que a produção é seriada e os equipamentos são dispostos de acordo com a sequência de operações de produção. Nesta sequência, os lingotes entram e, ao saírem, já estão com o formato final desejado – seja como produto final ou intermediário.

As instalações de uma laminação são compostas por fornos de aquecimento e reaquecimento de lingotes, placas e tarugos, sistemas de roletes (figura 2.6) para deslocar os produtos, mesas de elevação e basculamento, tesouras de corte e, principalmente, o laminador.

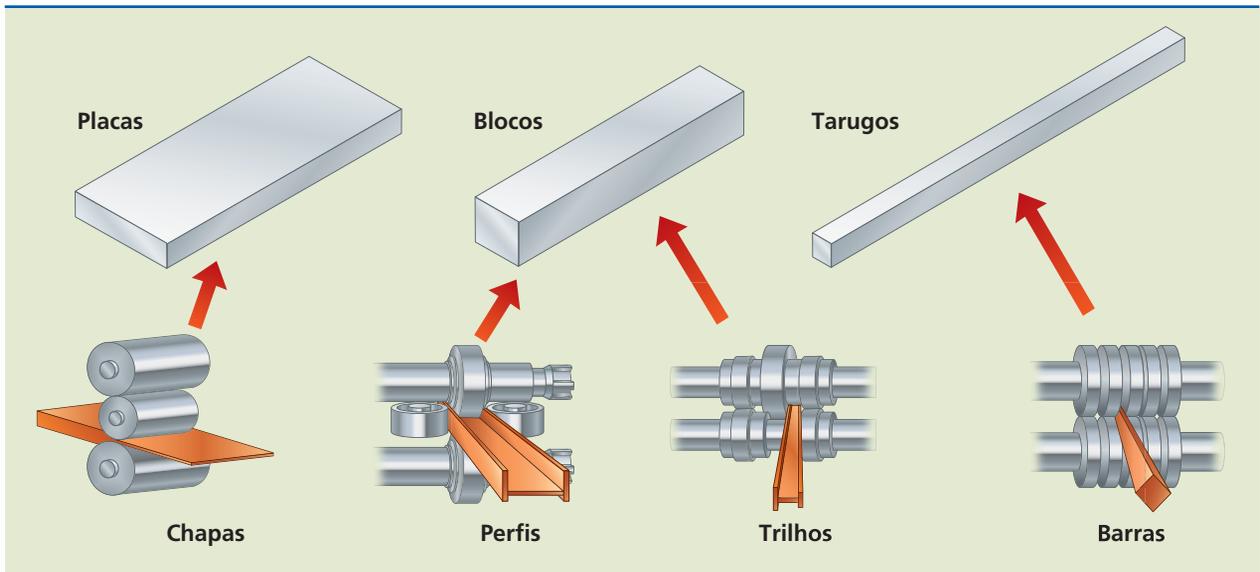
**Figura 2.6**

Sistema de roletes.

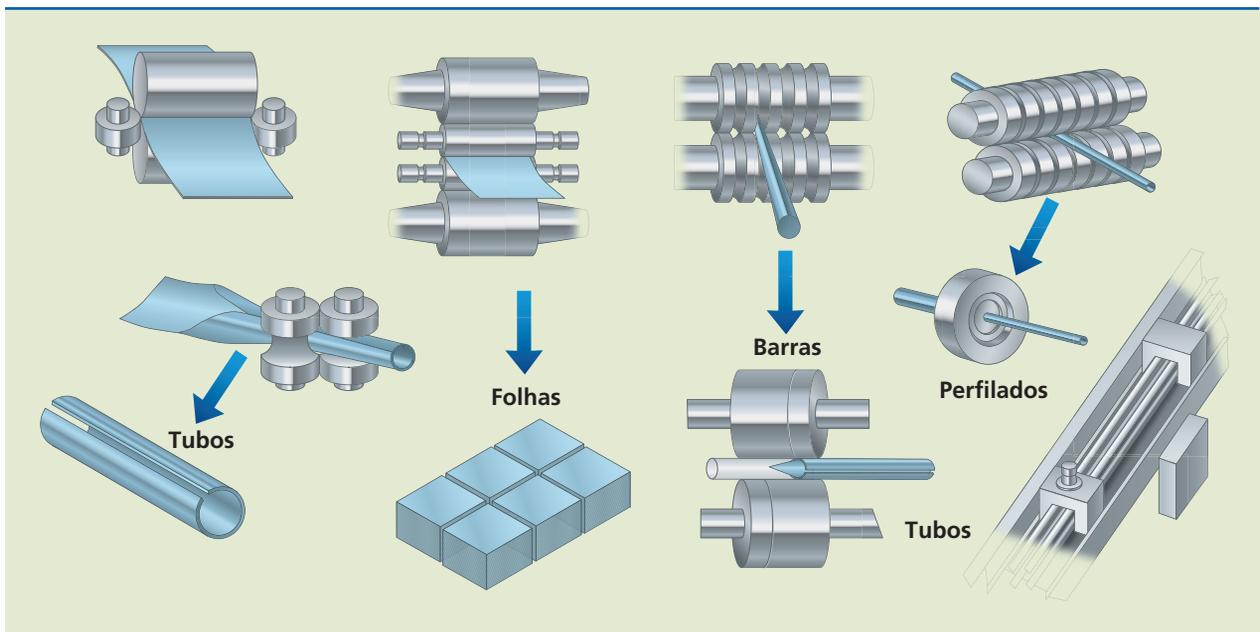
Ele é um conjunto mecânico composto de:

- cadeira – laminador propriamente dito, que contém a gaiola, os cilindros e os acessórios;
- gaiola – estrutura que sustenta os cilindros.

Os cilindros são as peças-chave dos laminadores, pois são eles que aplicam os esforços para deformar o metal. Fundidos ou forjados, eles podem ser fabricados em ferro fundido ou aço especial, dependendo das condições de trabalho a que serão submetidos. Podem ser lisos, para a produção de placas e chapas, ou com canais, para a produção de perfis (figura 2.7).



Laminação a quente



Laminação a frio

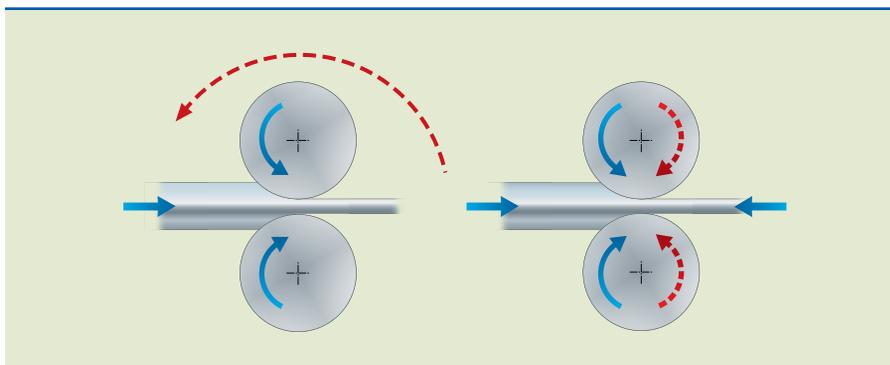
Figura 2.7

Possibilidades de fabricação de cilindros.

Os laminadores podem ser montados isoladamente ou em grupos, formando, neste caso, uma longa sequência em série. Esse conjunto recebe o nome de trem de laminação. Junto a ele trabalham os equipamentos auxiliares: empurradores, mesas transportadoras, tesouras e mesas de elevação, entre outros.

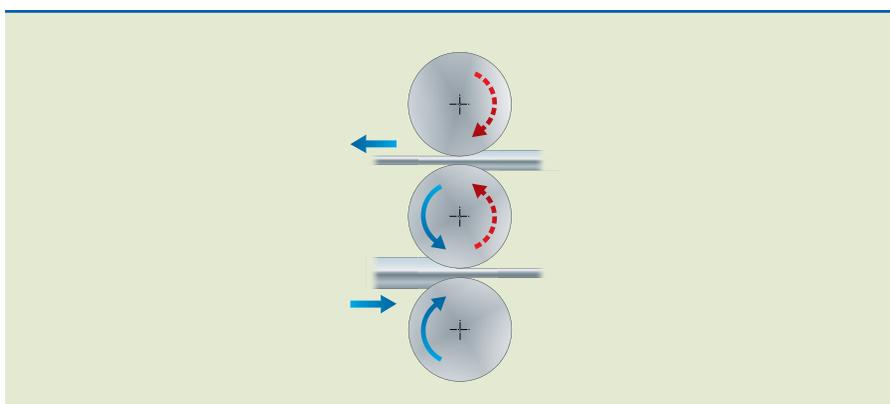
Os laminadores podem ser classificados quanto ao número de cilindros que apresentam. Assim, temos:

- duo – composto por dois cilindros de mesmo diâmetro, que giram em sentidos opostos e na mesma velocidade (figura 2.8);

**Figura 2.8**

Cilindros do duo, que giram em sentidos opostos e na mesma velocidade.

- trio – composto por três cilindros, dispostos na vertical. Em sua primeira entrada, o material passa entre o cilindro inferior e o médio. Ao retornar, ele passa entre os cilindros médio e superior (figura 2.9);

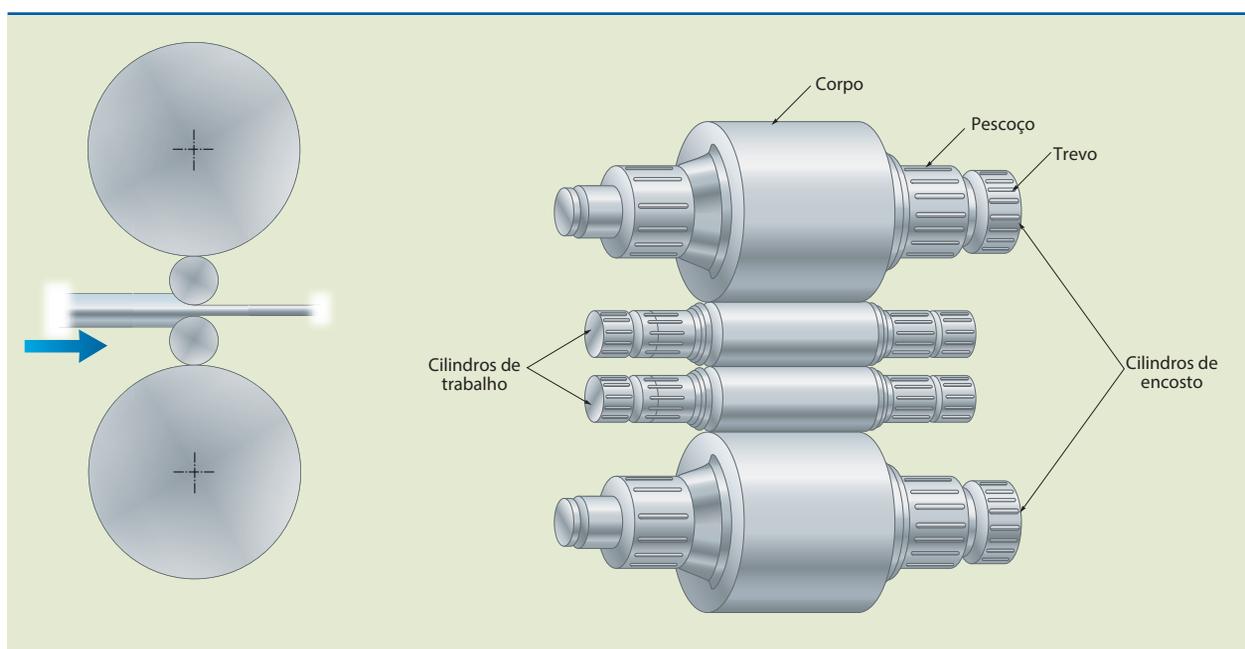
**Figura 2.9**

Os três cilindros do trio, dispostos na vertical.

- quádruo – apresenta quatro cilindros: dois internos, de trabalho, e dois externos, de apoio (figura 2.10);

Figura 2.10

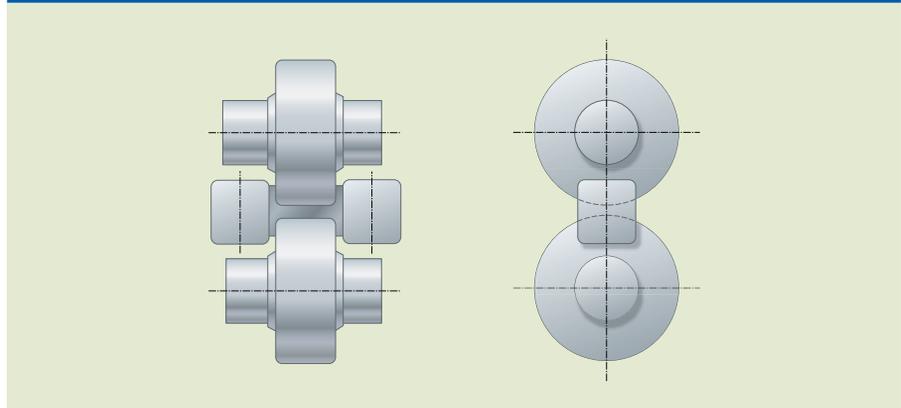
Os cilindros de trabalho e de encosto do quádruo.



- universal – apresenta quatro cilindros combinados: dois horizontais e dois verticais (figura 2.11). É utilizado para a laminação de trilhos;

Figura 2.11

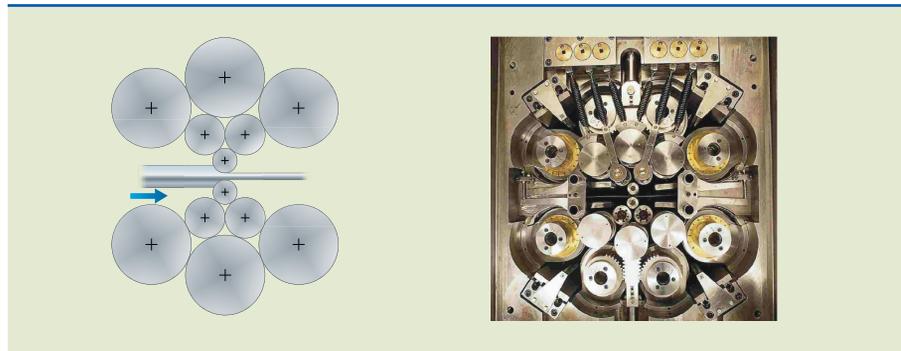
Laminador universal e seus quatro cilindros combinados.



- sendzimir – apresenta seis cilindros, dos quais dois são de trabalho e quatro são de apoio (figura 2.12).

Figura 2.12

Laminador sendzimir e seus cilindros.



A laminação nunca é feita de uma só vez. O metal é passado diversas vezes pelo laminador a fim de que o perfil ou a chapa adquiram ou o formato ou a espessura adequada para o próximo uso.

Nessas passagens, obtém-se inicialmente a laminação de desbaste, cuja função é transformar os lingotes de metal em produtos intermediários ou semiacabados, como blocos, placas e tarugos. Esses produtos passam depois pelos laminadores acabadores, onde são transformados em produtos acabados, como perfilados, trilhos, chapas e tiras.

Como já foi mencionado, um produto tem de passar diversas vezes pelos laminadores até que a laminação esteja completa. Na verdade, esse processo inclui várias etapas: além da passagem pelos cilindros, algumas coisas ocorrem à medida que o produto é laminado. Essas etapas são, em geral, as seguintes:

- o lingote, pré-aquecido em fornos especiais, passa pelo laminador de desbaste e se transforma em placas;
- cada placa é reaquescida e passa então por um laminador, que quebra a camada de óxido formada no aquecimento. Nessa operação usa-se também um jato d'água de alta pressão;

- por meio de transportadores de roletes, cada placa é levada a outro laminador, que diminui a espessura e também aumenta a largura da placa original. Na saída dessa etapa, a placa passa por um dispositivo que achata suas bordas e por uma tesoura de corte a quente;
- finalmente, cada placa é encaminhada para o conjunto de laminadores acabadores, que pode ser formado por seis laminadores quádruplos. Nessa etapa ela sofre reduções sucessivas até atingir a espessura desejada e se transformar finalmente em uma chapa;
- quando sai da última cadeira acabadora, a chapa é enrolada em forma de bobina por meio de bobinadeiras.

Para a obtenção de espessuras ainda menores, a laminação prossegue, porém a frio. Para isso, as bobinas passam por um processo de limpeza da superfície chamado de decapagem.

Após a laminação a frio, que dá à superfície da chapa um acabamento melhor, ela é rebobinada.

A bobina resultante passa por um processo de tratamento térmico que produz a recristalização do material e anula o encruamento ocorrido durante a deformação a frio.

Além da grande variedade de produtos de aço que se pode fabricar por laminação, esse processo de conformação mecânica é aplicável ao cobre e suas ligas, ao alumínio e suas ligas, à borracha e ao papel.

2.2.5 Características e defeitos dos produtos laminados

Cada produto industrial tem características que o diferenciam dos demais. Isso também vale para os laminados.

Por exemplo, as formas desses produtos são muito simples: barras, perfis, chapas. Seu comprimento é sempre muito maior que sua largura e, na maioria dos casos, as espessuras também são reduzidas.

Os produtos laminados são empregados tanto na construção civil (casas, apartamentos, prédios industriais, pontes, viadutos) quanto na indústria mecânica, na usinagem para a produção em série de grandes quantidades de peças como parafusos, brocas, pinos, eixos, barras de seções diversas e chapas trabalhadas (furadas, cortadas, fresadas, retificadas). Em geral, o formato adequado do produto laminado, próximo do produto final usinado, aumenta muito a produtividade dos setores de usinagem.

Além das características, os produtos laminados apresentam defeitos que, geralmente, têm origem nos problemas de fabricação do próprio lingote. Assim, os defeitos mais comuns dos produtos laminados são:

- vazios – podem ter origem nos rechupes ou nos gases retidos durante a solidificação do lingote. Eles causam tanto defeitos de superfície quanto enfraquecimento da resistência mecânica do produto;

- gotas frias – são respingos de metal que se solidificam nas paredes da lingoteira durante o vazamento. Posteriormente, eles se agregam ao lingote e permanecem no material até o produto acabado na forma de defeitos na superfície;
- trincas – aparecem no próprio lingote ou durante as operações de redução que ocorrem em temperaturas inadequadas;
- dobras – são provenientes de reduções em que um excesso de massa metálica ultrapassa os limites do canal e sofre recalque no passe seguinte;
- inclusões – são partículas resultantes da combinação de elementos presentes na composição química do lingote, ou do desgaste de refratários e cuja presença pode tanto fragilizar o material durante a laminação, quanto causar defeitos na superfície;
- segregações – ocorrem em consequência da concentração de alguns elementos nas partes mais quentes do lingote, as últimas a se solidificarem. Elas podem acarretar heterogeneidades nas propriedades, além de fragilização e enfraquecimento de seções dos produtos laminados.

Os produtos também podem ficar empenados, retorcidos ou fora de seção em decorrência de deficiências no equipamento e de temperaturas sem uniformidade ao longo do processo.

2.3 Forjamento

Uma das profissões mais antigas do mundo é a do ferreiro. Quem não se lembra de já ter visto, em filmes históricos ou de faroeste, um homem bem forte, todo suado, retirando com uma tenaz um pedaço de metal incandescente do fogo, colocando-o sobre uma bigorna e martelando-o com força para que o metal adquirisse a forma desejada (figura 2.13)? Podia ser uma espada, a parte de uma armadura ou uma ferradura. Não importa o que fosse produzido, tudo dependia da força e da arte do homem, de seu martelo e sua bigorna. Hoje em dia, o martelo e a bigorna foram substituídos por máquinas e matrizes que permitem a produção constante de milhares de peças. Esse processo de conformação mecânica, tão antigo quanto o uso dos metais, é o forjamento.

Figura 2.13

Martelo, bigorna e metal incandescente fazem parte do modelo antigo de forjamento.



KENIN STILGER 475/HUTTESTOCK

2.3.1 Tipos e equipamentos

Entre os processos de conformação mecânica, já estudamos os processos de laminação, extrusão e trefilação. O que esses três processos têm em comum é o fato de não fornecerem produtos acabados, e sim matérias-primas para a fabricação de outros produtos. Assim, a chapa obtida na laminação será transformada em partes da lataria dos automóveis. Os perfis de alumínio, obtidos pela extrusão, serão matéria-prima para a fabricação das janelas das nossas casas. E os fios trefilados serão usados na produção de condutores elétricos.

O forjamento, um processo de conformação mecânica em que o material é deformado por martelamento ou prensagem, é empregado na fabricação de produtos acabados ou semiacabados de alta resistência mecânica, destinados a sofrer grandes esforços e solicitações em sua utilização.

Embora, hoje em dia, o forjamento seja feito por meio de equipamentos, o princípio do processo continua o mesmo: a aplicação individual e intermitente de pressão – quer dizer, o velho martelamento – ou, então, a prensagem.

O forjamento por martelamento é realizado por meio de golpes rápidos e sucessivos no metal. Desse modo, a pressão máxima se dá quando o martelo toca o metal, decrescendo rapidamente de intensidade à medida que a energia do golpe é absorvida na deformação do material. O resultado é que o martelamento produz deformação principalmente nas camadas superficiais da peça, o que gera irregularidade nas fibras do material. Pontas de eixo, virabrequins e discos de turbinas são exemplos de produtos forjados fabricados por martelamento.

No forjamento por martelamento são usados martelos de forja (figura 2.14) que aplicam golpes rápidos e sucessivos no metal por meio de uma massa de 200 a 3.000 kg que cai livremente ou é impulsionada de certa altura, que varia entre 1 e 3,5 m.

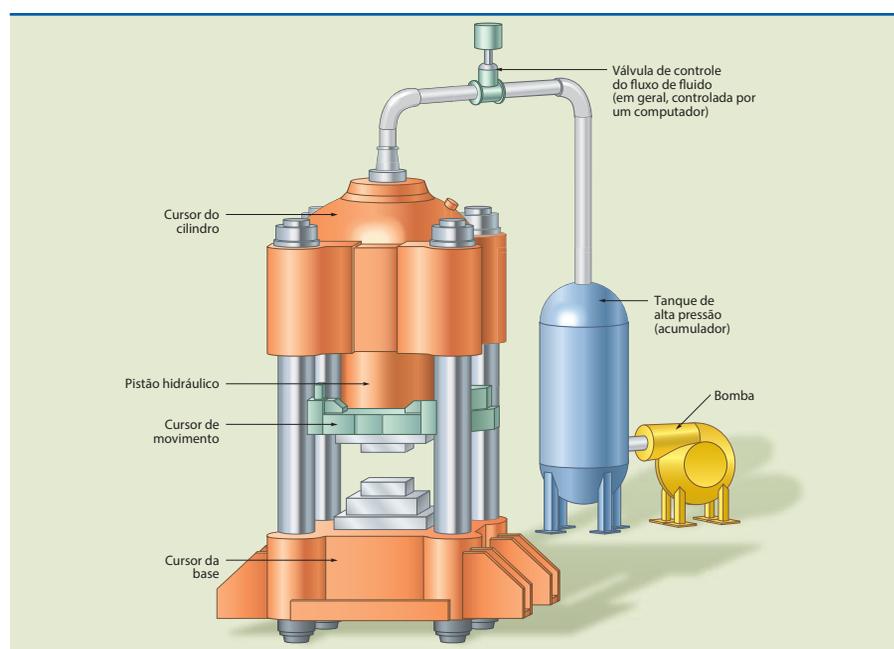


Figura 2.14
Martelo hidráulico de forjamento.

Na prensagem, o metal fica sujeito à ação da força de compressão em baixa velocidade e a pressão atinge seu valor máximo pouco antes de ser retirada, de modo que as camadas mais profundas da estrutura do material são atingidas no processo de conformação. A deformação resultante é, então, mais regular do que aquela produzida pela ação dinâmica do martelamento.

Palhetas de turbinas e forjados de liga leve são produtos fabricados por prensagem.

O forjamento por prensagem é realizado por prensas mecânicas ou hidráulicas. As prensas mecânicas, de curso limitado, são acionadas por eixos excêntricos e podem aplicar cargas que variam entre 100 e 8.000 toneladas. As prensas hidráulicas podem ter um grande curso e são acionadas por pistões hidráulicos. Sua capacidade de aplicação de carga fica entre 300 e 50.000 toneladas. Elas são bem mais caras que as prensas mecânicas.

As operações de forjamento (figura 2.15) são realizadas a quente, em temperaturas superiores àquelas de recristalização do metal. É importante que a peça seja aquecida uniformemente e em temperatura adequada.

Figura 2.15

Operação de forjamento realizada a quente.

© WIKI COMMONS/RAINER HALAMA



Esse aquecimento é feito em fornos de tamanhos e formatos variados, relacionados ao tipo de metal usado e de peças a serem produzidas e vão desde os fornos de câmara simples até os fornos com controle específico de atmosfera e temperatura. Alguns metais não ferrosos podem ser forjados a frio.

2.3.2 Matriz aberta

Toda a operação de forjamento precisa de uma matriz. É ela que ajuda a fornecer o formato final da peça forjada. E ajuda também a classificar os processos de forjamento, que podem ser:

- forjamento em matrizes abertas, ou forjamento livre;
- forjamento em matrizes fechadas.

As matrizes de forjamento são submetidas a altas tensões de compressão, altas solicitações térmicas e, ainda, a choques mecânicos. Devido a tais condições de trabalho, é necessário que essas matrizes apresentem alta dureza, elevada tenacidade, resistência à fadiga, alta resistência mecânica a quente e alta resistência ao desgaste. Por isso elas são feitas, em sua maioria, de blocos de aço-liga forjados e tratadas termicamente. Quando as solicitações são ainda maiores, as matrizes são fabricadas com metal duro.

No forjamento livre, as matrizes têm geometria ou formatos bastante simples (figura 2.16). Esse tipo de forjamento é usado quando o número de peças que se deseja produzir é pequeno e o tamanho delas é grande. É o caso de eixos de navios, turbinas, virabrequins e anéis de grande porte.



© WIKI COMMONS/DAMASZENER STAHL

Figura 2.16

No forjamento livre, as matrizes têm geometria ou formatos bastante simples.

A operação de forjamento livre é realizada em várias etapas. Como exemplo, a figura 2.17 mostra o estiramento de parte de uma barra. Observe a peça inicial (a) e o resultado final (e). A operação tem início com uma matriz de pequena largura. O estiramento acontece por meio de golpes sucessivos e avanços da barra. A barra (b, c, d, e) é girada a 90° e o processo, repetido (f). Para obter o acabamento mostrado em (g), as matrizes são trocadas por outras, mais largas.

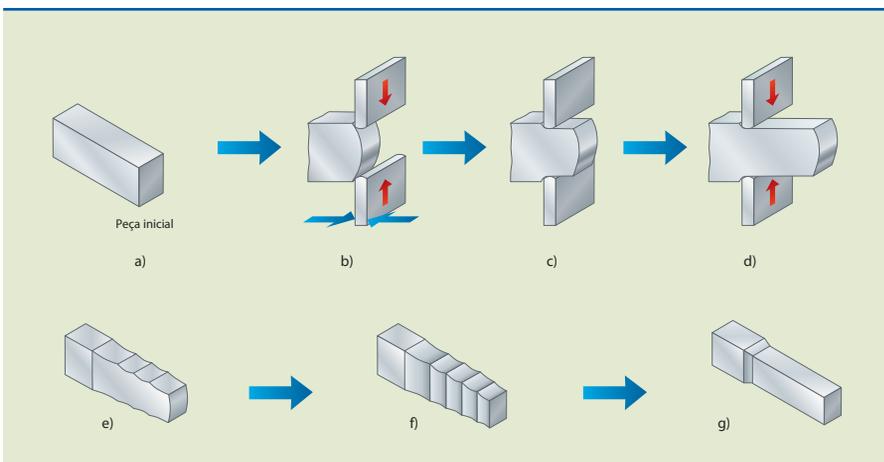


Figura 2.17

Estiramento de parte de uma barra.

2.3.3 Matriz fechada

No forjamento em matrizes fechadas (figura 2.18), o metal adquire o formato da cavidade esculpida na matriz e, por isso, há forte restrição ao escoamento do material para as laterais. Essa matriz é construída em duas metades, sendo que a de baixo fica presa à bigorna e nela é colocado o metal aquecido. A outra metade está presa ao martelo (ou à parte superior da prensa) que cai sobre a metade inferior, fazendo o material escoar e preencher a cavidade da matriz.

Figura 2.18
Forjamento em matrizes fechadas.

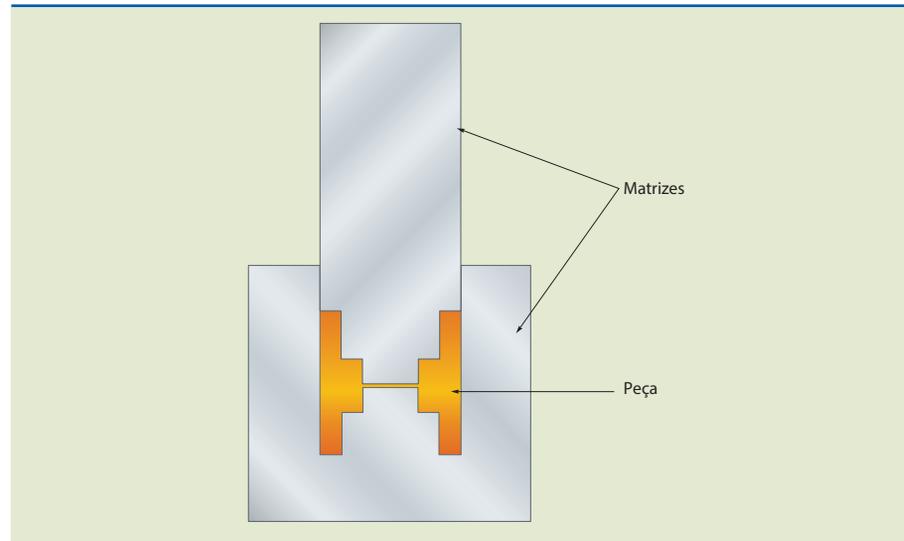
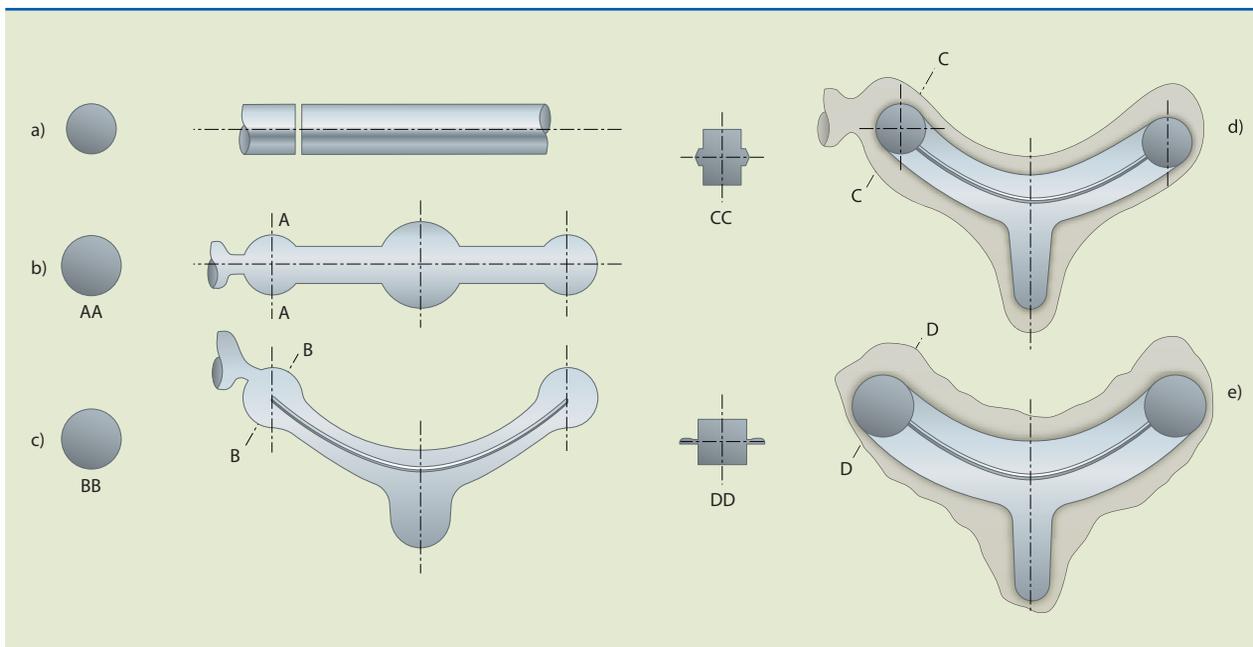


Figura 2.19
Para a confecção de uma única peça são necessárias várias matrizes.

Uma peça forjada acabada geralmente não é conformada em um só golpe, pois tanto a direção quanto a extensão na qual o metal pode escoar são pequenas. Por isso, para a confecção de uma única peça são necessárias várias matrizes (figura 2.19) cujas cavidades correspondem aos formatos intermediários que o produto vai adquirindo durante o processo de fabricação.



A matriz apresenta uma cavidade extra em sua periferia. O objetivo dessa cavidade é conter o excesso de material necessário para garantir o total preenchimento da matriz durante o forjamento. Esse excesso de material chama-se rebarba e deve ser retirado da peça em uma operação posterior de corte (figura 2.20).

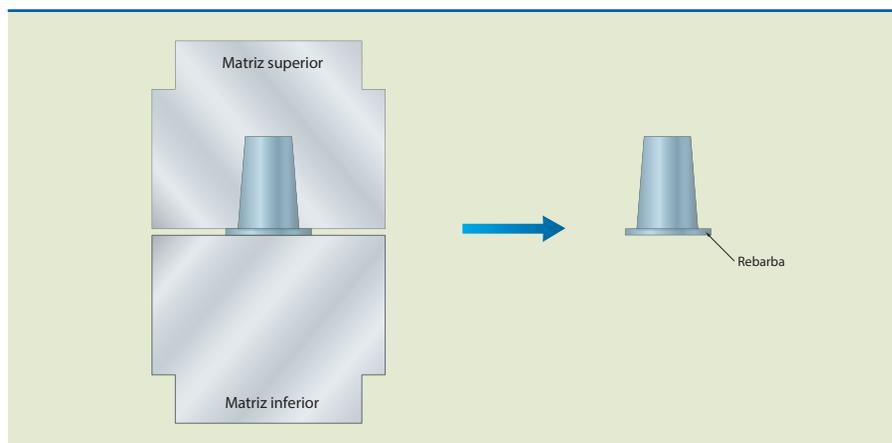


Figura 2.20

Desenho esquemático de formação da rebarba.

A rebarba é um dos problemas do forjamento por matriz fechada.

A fim de minimizá-lo, as matrizes apresentam calhas para evitar que a rebarba seja muito grande.

Para peças não muito complexas, são aplicadas as seguintes etapas no forjamento em matriz fechada:

- corte do blank, ou seja, do pedaço de metal em barra no tamanho necessário;
- aquecimento – realizado em fornos;
- forjamento intermediário, realizado somente quando é difícil a conformação em uma única etapa;
- forjamento final – feito em matriz, já com as dimensões finais da peça;
- tratamento térmico – para a remoção das tensões, homogeneização da estrutura, melhoria da usinabilidade e das propriedades mecânicas.

2.3.4 Defeitos dos produtos forjados

Os produtos forjados também apresentam defeitos típicos. São eles:

- falta de redução – caracteriza-se pela penetração incompleta do metal na cavidade da ferramenta. Isso altera o formato da peça e ocorre quando são usados golpes rápidos e leves do martelo;
- trincas superficiais – causadas por trabalho excessivo na periferia da peça em temperatura baixa ou por alguma fragilidade a quente;
- trincas nas rebarbas – provocadas pela presença de impurezas nos metais ou porque as rebarbas são pequenas. Elas se iniciam nas rebarbas e podem penetrar a peça durante a operação de rebarbação;
- trincas internas – originam-se no interior da peça em consequência de tensões originadas por grandes deformações;
- gotas frias – são descontinuidades originadas pela dobra de superfícies sem a ocorrência de soldagem. Elas são causadas por fluxos anormais de material quente dentro das matrizes, incrustações de rebarbas e colocação inadequada do material na matriz;

- incrustações de óxidos – causadas pela camada de óxidos que se forma durante o aquecimento. Essas incrustações normalmente se desprendem, mas, ocasionalmente, podem ficar presas nas peças;
- descarbonetação – caracteriza-se pela perda de carbono na superfície do aço, causada pelo aquecimento do metal;
- queima – ocorre quando os gases oxidantes penetram os limites dos contornos dos grãos, formando películas de óxidos. A queima é causada pelo aquecimento próximo ao ponto de fusão.

2.4 Estampagem

A produção de elementos de chapas estampada pode ser considerada uma das mais importantes no campo industrial da produção em série. Nos últimos anos, houve um aumento das aplicações do estampado de chapas em todos os setores industriais, o que hoje implica maior produtividade e melhor qualidade. Por força da necessidade, passou-se a adotar também o processo de estampagem em chapa num contexto considerado problemático cuja solução, alguns anos atrás, parecia muito arriscada ou até impossível. Hoje, as peças estampadas em chapa de aço têm diversas aplicações. Por exemplo: no revestimento de carrocerias em chapas, na construção de peças de aeroplanos na construção de bicicletas, eletrodomésticos e máquinas diversas etc.

Em muitos casos, o elemento da chapa estampada substitui a fundição, apresentando vantagens como: menos tempo gasto, resistência mecânica mais adequada, obtenção de um grande número de elementos iguais entre si e perfeitos. O custo elevado da matriz é amplamente compensado.

Em linhas gerais, tem-se comprovado que o elemento estampado, se concebido racionalmente, substitui – ou pelo menos reduz – a soldagem e a funilaria, permitindo a construção de peças integrais. Isso gera mais simplicidade e resistência mecânica.

A fabricação manual de elementos tirados da chapa é totalmente superada. Só em casos excepcionais e para pequenas produções é que se recorre à prensagem manual.

Dadas essas considerações, vislumbra-se o valor e a importância atribuídos ao imenso campo do estampado em chapas e percebe-se como este contribui para o progresso da atividade mecânica sob todos os pontos de vista.

2.4.1 Processos de fabricação

2.4.1.1 Generalidades

Para projetar uma série de matrizes que permitam a fabricação de peças, é indispensável estabelecer previamente o programa de trabalho correspondente. Dada a importância do tema e consideradas as dificuldades que ocorrem ao estudar certos programas e suas implicações na construção das matrizes, tem-se criado, nas fábricas bem organizadas, uma oficina técnica especial.

O estudo do ciclo de trabalho relativo a uma matriz consiste em definir uma série de operações tecnológicas, sequências capazes de mudar uma forma inicial em outra totalmente diversa.

O estudo do ciclo de trabalho é delicado e, às vezes, difícil.

Antes de alcançar um resultado factível, é necessário recorrer a provas de laboratório e de ferramentaria, fazendo frequentes comprovações durante o desenvolvimento de algumas das fases de trabalho. Entre os fatores que dificultam a solução teórica de determinados problemas estão a forma geométrica irregular de algumas peças, o material que constitui a base de embutir e o modo como se pretende construir uma matriz que requer do técnico larga experiência.

As peças que têm forma geométrica regular geralmente não apresentam maior grau de dificuldade.

Com base no que já foi exposto, verifica-se a necessidade de contato constante com os resultados das provas realizadas na ferramentaria porque, do contrário, a atuação seria equivocada. Isto se deve ao fato de que os elementos, por natureza, apresentam-se segundo um número infinito de formas construtivas (das mais fáceis às mais complexas e das menores às maiores). À variedade destes fatores devem-se acrescentar as diferentes aplicações, o que gera novos problemas.

2.4.1.2 Fabricação de peças de chapas

Por estampado entende-se um conjunto de operações por meio das quais, sem produzir cavacos, submete-se uma chapa plana a uma peça com forma geométrica própria, seja esta plana ou curva. Em outros termos, a chapa é submetida a uma conformação plástica. A realização prática destas operações se dá mediante o uso de dispositivos especiais, chamados matrizes ou estampos, aplicados em máquinas denominadas prensas. As peças com forma geométrica complicada e irregular, pelo fato de serem constituídas por um material de espessura quase uniforme, podem realizar as conformações plásticas nas chapas mediante uma sucessão de estampos. As operações de estampos de chapas dividem-se em:

- a) cortar;
- b) dobrar;
- c) embutir.

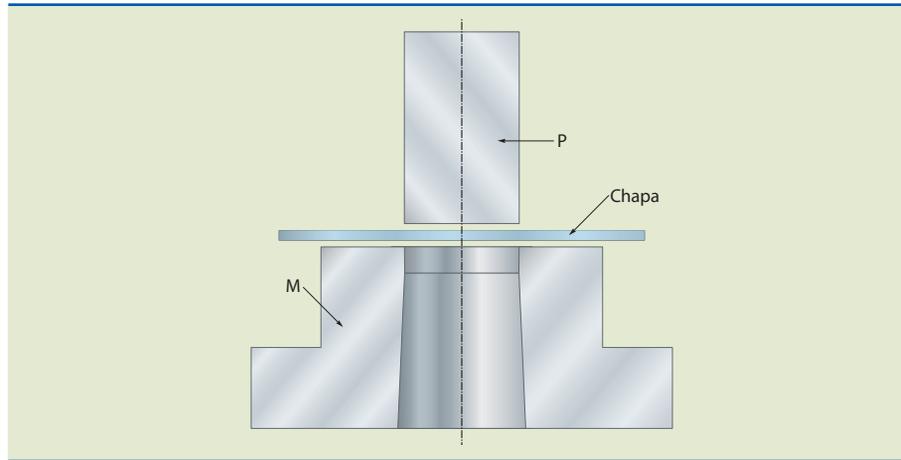
2.4.2 Teoria do corte

2.4.2.1 Conceitos

- Cortar – retirar de uma chapa (ou tira) uma peça plana de formato qualquer. As chapas cortadas podem ser submetidas a outras operações.
- Puncionar – cortar por meio de furos de pequenas dimensões.
- Seccionar – abrir furos de qualquer formato e de grandes dimensões.
- Entalhar – tirar pedaços, cortar um entalhe no contorno de uma peça já formada.
- Corte parcial – um corte incompleto, no qual a parte cortada fica presa à chapa.
- Recortar – cortar os excedentes de material de uma peça à qual foi dada outra forma;
- Repassar – cortar uma peça pela segunda vez, obtendo uma forma exata.

Figura 2.21

Princípio da operação de estampagem.



2.4.2.2 Princípios da operação

A ferramenta é formada por:

- um punção P cuja seção tem a forma da peça a ser obtida;
- uma matriz M provida de um furo que permite a passagem do punção e das peças cortadas, como mostra a figura 2.21.

Ao descer, o punção comprime a chapa de metal contra a matriz e força a passagem da peça cortada através do furo da matriz.

Ocorrem deformações plásticas profundas de um lado ao outro da chapa que está sendo cortada e marcas de ruptura começam a aparecer. Em seguida aparecem duas fendas que, ao se unirem, separam a peça da chapa. A peça, assim, está cortada.

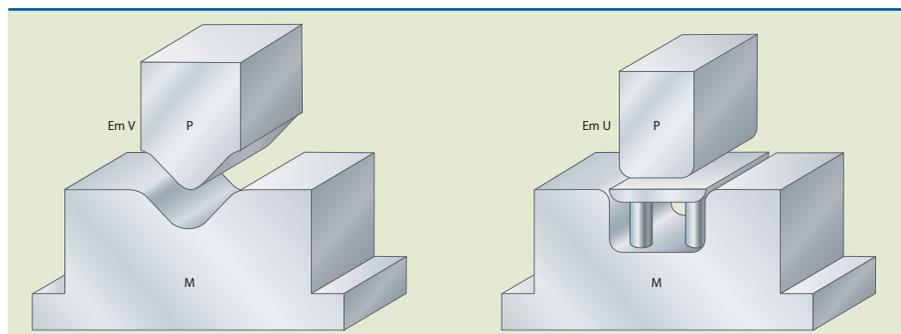
2.4.3 Teoria da conformação

2.4.3.1 Conceitos

- Dobrar – operação de conformação que permite obter uma peça que pode ser desenvolvida a partir de outra peça, plana ou não, denominada recorte. A figura 2.22 mostra uma ferramenta de dobrar.
- Enrolar os extremos – operação que consiste em enrolar extremidades de uma peça.
- Enrolar (total) – operação que consiste em enrolar uma chapa para formar tubos.
- Aplinar – operação que consiste em endireitar as faces de uma peça.
- Estampar – operação que consiste em formar partes salientes e ocas de uma peça.

Figura 2.22

Exemplo de ferramenta de dobrar.



2.4.3.2 Princípio da operação

A ferramenta é constituída por:

- um punção P com a forma da peça a ser confeccionada;
- uma matriz M a qual, no fim do curso, deixa uma folga entre ela e o punção teoricamente igual à espessura do material.

A operação consiste em fazer passar, com ajuda do punção, a peça a ser dobrada dentro da matriz.

2.4.4 Teoria de embutimento

2.4.4.1 Conceitos

O embutimento é a operação que consiste em obter, partindo de uma peça simples denominada chapa, uma peça côncava de superfície não desenvolvível por métodos geométricos e da mesma espessura da peça primitiva.

2.4.4.2 Princípio da operação

O embutimento pode se efetuado de dois modos:

- sem dispositivo para prender a chapa – ou seja, embutimento de simples efeito;
- com dispositivo para prender a chapa – ou seja, embutimento de duplo efeito.

Embutimento de simples efeito

A ferramenta é constituída por:

- um punção de embutimento P, cuja seção tem forma da peça a realizar;
- uma matriz de embutimento M provida de um furo que permite a passagem do punção, deixando ao lado um espaço igual à espessura do material.

A chapa é depositada sobre a matriz quando o punção P tende a penetrar a matriz (figura 2.23).

Para fazer isso, a chapa dobra-se em AB, apoiando-se em C. Um ponto qualquer D da chapa ocupa então uma posição sobre uma circunferência de diâmetro menor.

Para conservar a superfície inicial, a chapa vai formar dobras ou aumentar a espessura.

Teremos:

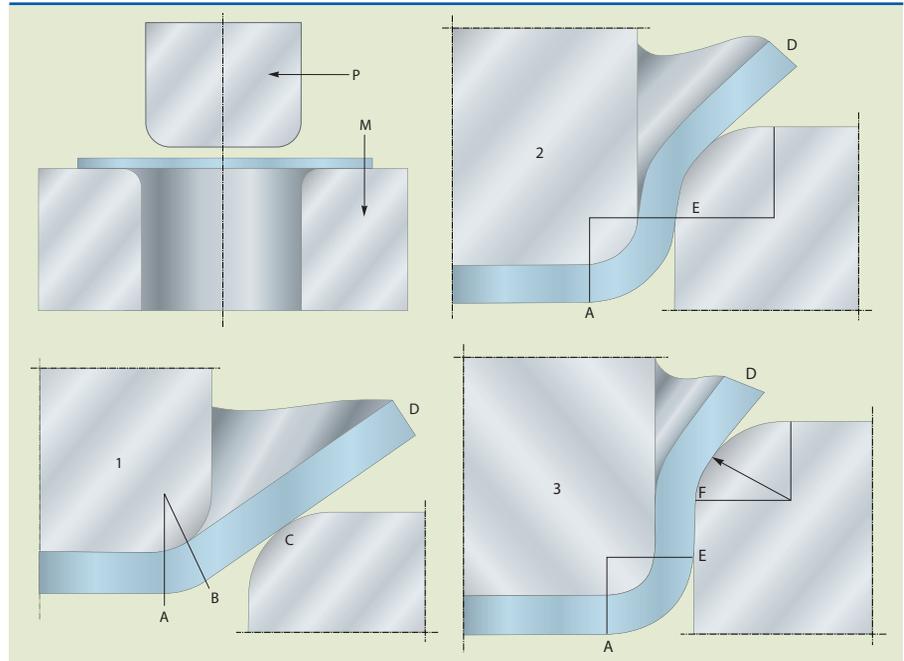
- em AB – um aumento de espessura, pois a chapa está presa e não pode dobrar-se;
- em BD – uma formação de dobras, pois a chapa está livre e pode deformar-se.

Na posição E, onde a chapa é mais grossa, há uma laminação entre o punção e a matriz para reconduzir a chapa à sua espessura primitiva. No exterior, as dobras aumentam.

Em um ponto qualquer do percurso do punção, teremos aumento de espessura desde A até E; parte laminada de espessura constante de E até F; formação de dobras de F até D (estas deverão desaparecer pela laminação efetuada ao passar pela matriz).

O ponto D, vindo sobre as circunferências cada vez menores, terá as dobras aumentadas e acabará por ser recoberto.

Figura 2.23
Embutimento de
simplesefeito.



A laminação, eliminando estas dobras (de três espessuras distintas), levará o material à espessura primitiva e produzirá uma grande rigidez, o que vai tornar as peças defeituosas.

Embutimento de duplo efeito

Na figura 2.24, para evitar a formação de dobras, é colocada sobre a chapa, ao redor do punção, uma peça anular conhecida como prendedor de chapa (SF).

O prendedor é aplicado antes do início da operação e, ao longo dessa operação, é mantido a uma pressão adequada.

Em um momento qualquer do curso descendente do punção, temos:

Entre a matriz M e o prendedor de chapa SF, a chapa desliza, permanecendo plana.

O aumento da espessura ou a formação das dobras é impedido pela pressão do prendedor da chapa.

Produz-se uma compressão lateral das moléculas, pois estas podem movimentar-se somente em sentido radial.

De B a C, a formação das dobras é evitada pela tensão da chapa resultante da pressão do prendedor de chapa SF.

Observação: neste método de embutimento, a parte AB apresenta um adelgaçamento em decorrência da inércia da chapa no momento do avanço do punção.

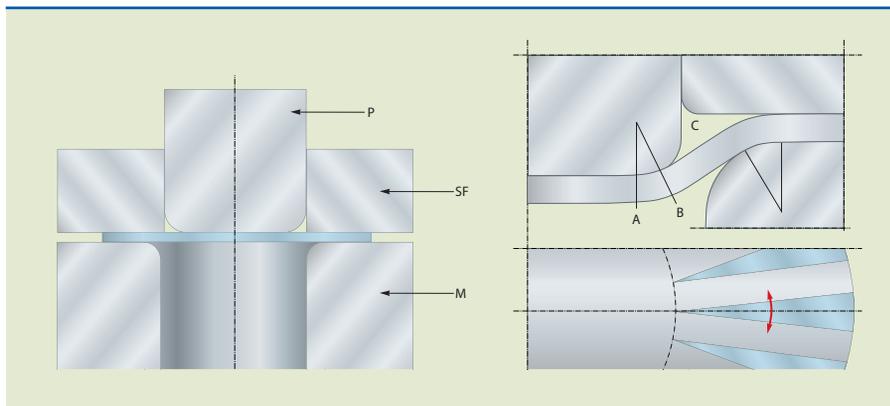


Figura 2.24
Embutimento de duplo efeito.

2.4.4.3 Conclusão sobre os dois tipos de embutimento

Os dois métodos de embutimento são aplicáveis a peças embutidas de alturas diferentes.

- Embutimento de simples efeito – a altura das peças obtidas é limitada pela formação de dobras. A altura máxima realizável é praticamente igual a 15% do diâmetro.
- Embutimento de duplo sentido – todas as alturas são teoricamente realizáveis.

As operações de cortar, dobrar e curvar são feitas geralmente a frio; o embutimento pode ser a frio ou a quente, conforme as necessidades técnicas requeridas.

Estas operações se realizam com matrizes montadas em máquinas dotadas de movimento retilíneo alternativo.

2.4.5 Generalidades sobre o estudo dos ciclos do estampado

A abordagem será sobre as operações mais frequentes: cortar, dobrar, curvar e embutir. Para se obter uma peça acabada de chapa, às vezes basta recorrer a uma só destas operações e, de modo particular, à primeira.

Nem sempre é possível alcançar este objetivo com uma só fase de trabalho. Frequentemente, e conforme o caso, há necessidade de recorrer a pelo menos duas fases, a saber:

- cortar – dobrar e curvar;
- cortar – embutir.

Estes pares de fases podem ser simplesmente nominativos ou aparentes, e qualquer um deles – segundo as necessidades técnicas requeridas – pode suprir uma subdivisão posterior em um determinado número de operações auxiliares e semelhantes para definir a operação. Este caso ocorre frequentemente com as peças curvas obtidas por meio do procedimento de embutir.

O ciclo do estampado, que consiste em uma sucessão ordenada de operações tecnológicas que transformam uma chapa plana em uma peça de forma definida, depende de diversos fatores, como:

- a forma da peça a obter;
- as dimensões dessa peça;
- a qualidade do material que constitui a chapa a ser trabalhada.

Assim, a forma da peça a se obter impõe, de modo fundamental, certo número de operações diretamente proporcional à complexidade desta forma. Em outros termos:

- quanto mais simples é uma peça curva, menor é o número de operações necessárias para obtê-la. Para produzir uma simples calota, por exemplo, podem ser necessárias apenas duas operações: cortar o disco da chapa e embuti-lo;
- as dimensões da peça influenciam igualmente a determinação do número de operações necessárias. Por exemplo, para produzir uma calota muito profunda em relação a seu diâmetro, são necessárias, além da operação de cortar o disco da chapa, duas ou mais operações de embutir;
- a qualidade do material que constitui a chapa a ser trabalhada influi também no número de operações necessárias para obter uma peça.

Com efeito, um disco de chapa bastante plástica permite um embutido profundo; outro disco de chapa de igual diâmetro e de igual espessura, porém menos plástica, admite um embutido menos profundo.

Em outros termos: para se obter uma mesma peça, é necessário certo número de operações, dependendo da menor ou maior plasticidade da chapa empregada.

Para a determinação do ciclo do estampado esses fatores são considerados ao mesmo tempo, mesmo que não exista relação entre eles.

A seleção da máquina para realizar um determinado trabalho é feita de acordo com a forma e as dimensões da peça a produzir. Para grandes dimensões, logicamente corresponderão grandes matrizes. E é evidente que isto implicará enormes gastos. Desta forma, sempre que possível, é conveniente realizar o trabalho na máquina de movimento rotativo contínuo, onde se aplicam simples rolos em lugar de complicadas matrizes nas operações de enrolar os extremos, curvar etc.

Grande parte das operações de cortar, dobrar e embutir é executada por meio de matrizes montadas em máquinas de movimento alternativo (prensas).

Outro detalhe que se deve levar em consideração ao iniciar o estudo do ciclo do estampado é a possibilidade de extrair a peça da matriz.

Uma boa parte dos furos que são feitos na chapa pode servir para desempenhar uma das seguintes funções:

- avanço da chapa;
- guia para o passo de outros elementos.

A função de avanço da chapa será decorrente, na maioria dos casos, de um procedimento de cortar.

A função de guia para o passo de outros elementos dependerá da tolerância da matriz. Isso porque, muitas vezes, não sendo conveniente executar o furo com punção por algum motivo, será necessário furar com broca ou repassar em furos com outras ferramentas ou escariadores; neste último caso, deve-se deixar, nos furos, material suficiente para rebaixar.

No momento de estudar as fases do trabalho, deve-se ter previstas as condições térmicas e decidir se o estampado deve ser executado a frio ou a quente. Em geral, executa-se trabalho a quente no caso em que a peça, ao mudar de forma, sofre uma considerável transformação. Deve-se, então, ter presente a espessura da chapa. Em uma grande transformação plástica de uma chapa, isso vai depender de sua forma e espessura. A chapa grossa (com mais de 7 mm) de aço semiduro requer o estampado a quente.

No estudo do ciclo de trabalho de determinado elemento, é bom prever a possibilidade e o modo de construir as matrizes. Adotando métodos de trabalho simples e eficazes pode-se obter o máximo rendimento com o mínimo de operações.

Muitas vezes, de acordo com a forma e o tipo de objeto a obter, é conveniente realizar operações intermediárias de trabalho.

Para pequenos lotes de chapas que devem ser perfuradas em vários pontos e depois dobradas ou curvadas, será conveniente empregar o ciclo de trabalho combinado. Dessa maneira, formado por vários punções e matrizes, completará o trabalho de modo consecutivo em um só ciclo. Em outros casos se prevê um só estampo que realiza, ao mesmo tempo, a operação de cortar e embutir. De qualquer modo, estudando racionalmente o processo de estampo será possível obter um produto tecnicamente perfeito e em grande escala. Com isso, o preço de cada objeto será notavelmente baixo.

2.4.6 Máquinas utilizadas na fabricação de peças estampadas

No trabalho dos metais em chapas, usam-se as chamadas prensas.

Prensas são máquinas manuais ou automáticas destinadas a comprimir ou achatam materiais por meio da ação de impactos e forças contínuas. Existem dois tipos principais de prensas:

- prensa mecânica (excêntrica) – é aquela que, por meio de mecanismos excêntricos e volantes armazenadores de energia mecânica, produz um golpe vertical contra a base fixa da máquina.
- prensa hidráulica – é uma máquina em que se aproveita a incompressibilidade dos líquidos (óleo) e a transmissão de pressão para exercer grandes forças.

Basicamente, as prensas são utilizadas em operações de estampagem.

Estampagem com matriz

Matrizes são ferramentas especiais para utilização em operações de corte e dobra de chapas. Geralmente são de alta complexibilidade, pois envolvem em sua construção uma série de parâmetros de corte, folga e repuxo de material.

Existem vários tipos de matrizes, cada um adequado à operação a ser executada. Os principais são:

- matriz para embutimento;
- matriz para corte;
- matriz para dobra e repuxo.

Além desses tipos comuns, podemos encontrar outros com uma maior complexidade. É o caso das matrizes conjugadas (que fazem diversas operações com um só golpe de punção) e das matrizes progressivas (que, em vários passos consecutivos, produzem a peça na sua tonalidade).

Ao final das operações de estampado, muitas peças ficam presas na matriz. É preciso removê-las por meio de dispositivos chamados extratores. Esses sistemas são incorporados à própria máquina e seu acionamento é feito por um dispositivo pneumático.

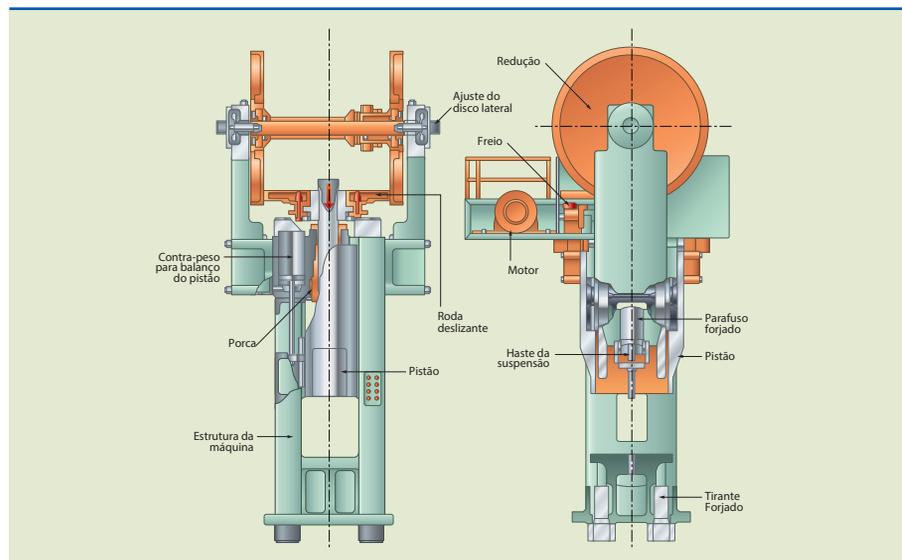
Certas matrizes incluem mecanismos de retenção da cinta metálica nas operações de corte. Elas devem encontrar-se em posição correta para receber o golpe da prensa. A alimentação da cinta deve permitir que ela deslize livremente abaixo do punção.

Para obter esse resultado, é necessário dotar o estampo de um mecanismo que determine o passo regular de avanço para cada golpe do punção. Tais mecanismos têm grande importância porque podem aumentar consideravelmente a produção e a qualidade.

2.4.6.1 Tipos de prensas utilizadas

Prensas de fricção

Figura 2.25
Prensas de fricção.



Características (figura 2.25):

- mesa fixa, com T;
- suporte regulável no próprio corpo da prensa para colocação do motor;
- volante do fuso de acionamento do martelo fundido em aço e recapado com couro de primeira qualidade, para uma perfeita aderência nos discos laterais de acionamento;
- guias prismáticas amplas e com acabamento esmerado para um deslizamento eficiente do martelo;
- acionamento frontal com dispositivo que permite a parada automática do martelo na parte superior;
- para obter mais suavidade e precisão, o fuso de aço trabalha em bucha de bronze de alta liga;
- corpo da prensa fundido numa única peça, bem dimensionada e de altíssima rigidez. Além disso, um potente fuso é colocado a quente em cada uma das colunas, em toda a extensão, garantindo a solidez de toda a estrutura;
- são empregadas esferas de aço nas partes de contato entre o martelo e o fuso, o que garante a enorme sensibilidade de funcionamento.

Prensas excêntricas

Características (figura 2.26):

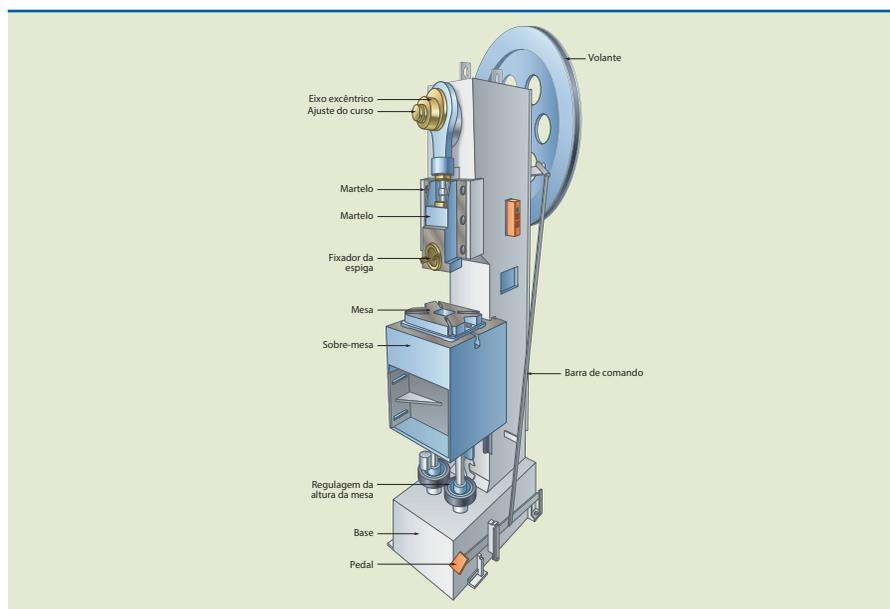


Figura 2.26
Prensas excêntricas.

- mesa regulável com ranhuras T diagonais;
- mesa sobreposta com ranhura T com furo expelidor;
- fusos laterais para regulagem de altura da mesa;
- suporte regulável no corpo da prensa para assentamento do motor.

Escolha da prensa excêntrica

A prensa excêntrica para determinada operação de corte ou repuxo não pode ser escolhida pela “capacidade da placa” fornecida pelos fabricantes, pois esta é a capacidade máxima que a prensa desenvolve quase no final do curso.

A capacidade “nominal” da placa da prensa refere-se ao curso útil de operação de + 1 mm

($\cong 12^\circ 30'$) com a excentricidade ao máximo:

$$\cos = \frac{r-y}{r} \quad r = \text{excentricidade (manivela)}$$

$$r = \frac{y}{1 - \cos x} \quad x = \text{ângulo da manivela no início do curso}$$

$$F = \frac{f \cdot c}{4,4} \quad F = \text{força fornecida pela prensa no início da operação}$$

f = fator de ângulo
c = capacidade nominal da prensa

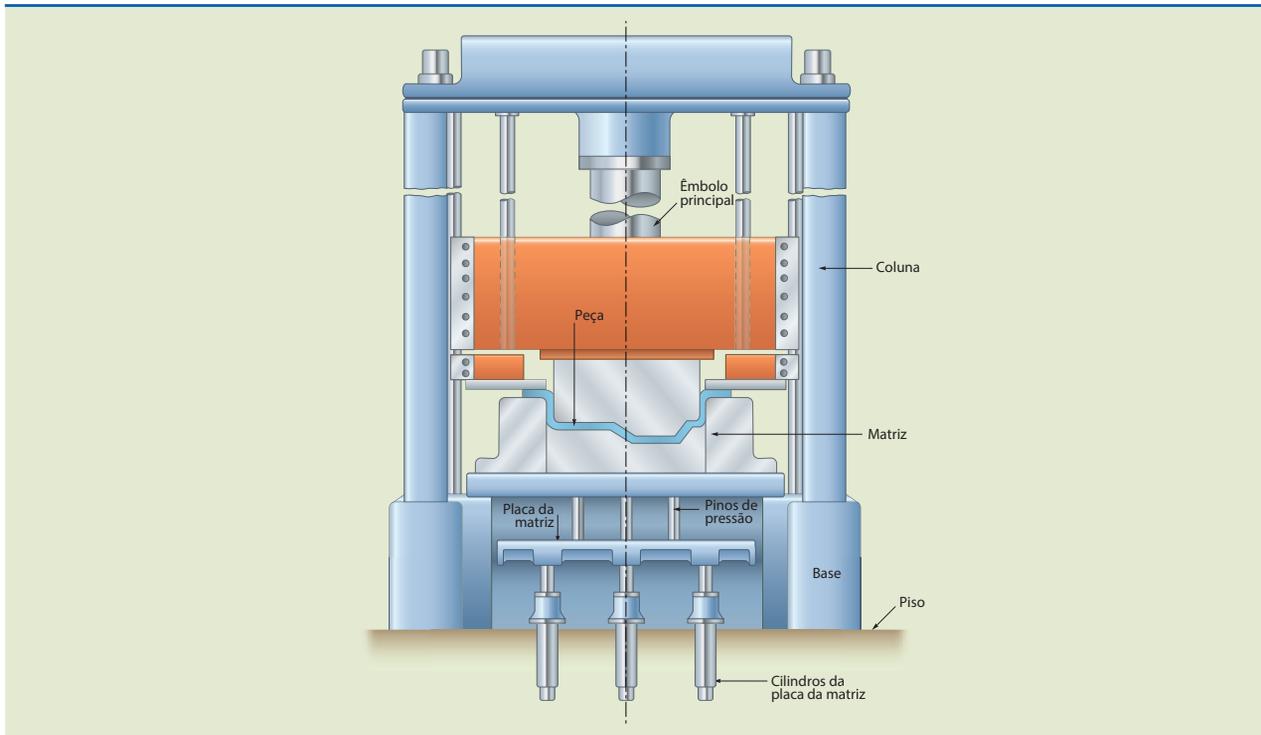
A força da prensa varia com a posição da manivela, isto é, depende do ângulo.

Quando = 90° , a prensa desenvolve a força mínima.

Para a escolha da prensa, é preciso estabelecer o “curso” de que a operação irá necessitar e a “força” no início da operação.

Figura 2.27
Prensas hidráulicas.

Prensas hidráulicas



Estas prensas se diferenciam daquelas citadas anteriormente apenas pelo comando do cabeçote. Elas têm uma ou várias colunas e a armação é de ferro fundido ou de chapas de aço isoladas (figura 2.27).

O cabeçote recebe o movimento de pistão, que se desloca pela ação de um fluido dentro de um cilindro hidráulico.

Os acessórios das prensas hidráulicas são a bomba, as canalizações e as válvulas de comando de óleo. A vantagem destas prensas reside na facilidade existente para regular a pressão do óleo, o que permite utilizar somente a força necessária ao seu controle.

Além da almofada, as prensas hidráulicas de duplo efeito apresentam o martelo com a parte externa acionada por quatro pistões, funcionando como sujeitador, e a parte interna acionada por um pistão independente, funcionando como repuxador.

2.4.6.2 Escolha da prensa adequada

Ao escolher uma prensa para uma determinada operação, devem-se conhecer as características das prensas de que se dispõe. Para realizar um trabalho devem ser determinados:

- a força (em KN) necessária;
- o trabalho (em kg/m) necessário;
- as dimensões da ferramenta;
- o percurso necessário;
- o modo como se deve trabalhar (por golpe ou em continuação).

Estas especificações vão tornar a escolha mais fácil. A primeira permite que se determine a força exigida da prensa. A segunda fixa a escolha entre uma prensa de comando direto ou com aparelhos. A terceira permite assegurar a possibilidade de montagem das ferramentas. Para a escolha de uma prensa, deve-se, evidentemente, ter em conta o tipo de trabalho a ser executado.

Os trabalhos de corte podem ser realizados em todos os tipos de prensas de simples efeito.

As dobras deverão ser efetuadas em prensas excêntricas, prensas de fricção ou em prensas especiais para dobrar.

A escolha é mais delicada para trabalhos de embutimento.

As prensas de duplo efeito com mesa móvel deverão ser utilizadas para trabalhos de embutimento cilíndrico profundo, em chapas finas.

As chapas de duplo efeito, com prendedor de chapa móvel por rótula, deverão ser utilizadas em trabalhos que exigem grandes pressões ao final do percurso.

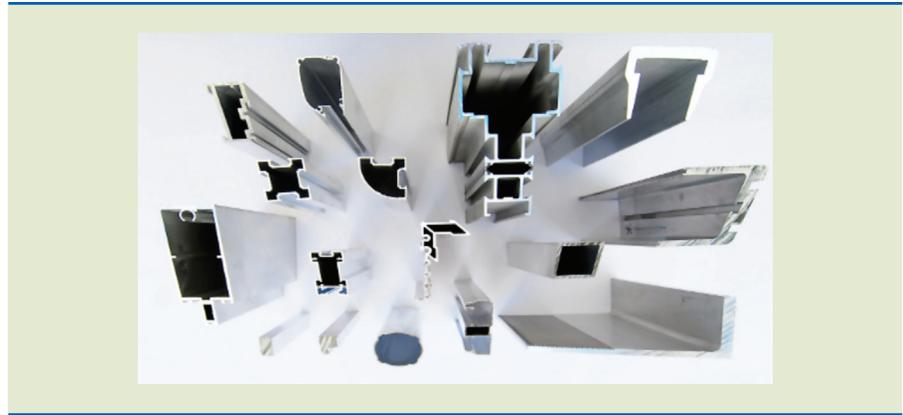
As prensas hidráulicas permitem trabalhar em grandes pressões e grandes profundidades.

As prensas de simples efeito, providas de almofada pneumática, podem ser utilizadas como prensas de embutir. Estas prensas permitem exercer grandes pressões de deformação, além de produzirem mais.

2.5 Extrusão

Figura 2.28

Exemplos de perfis extrudados.



Tubos de metal, portas e janelas para residências e edifícios, arames, cabos de aço e fios elétricos são produtos comuns em nosso dia a dia (figura 2.28).

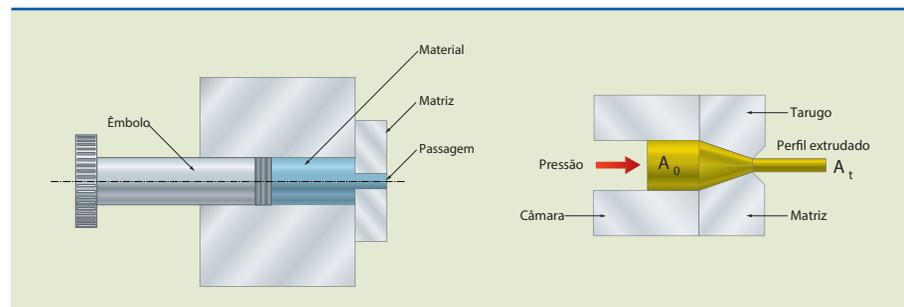
Assim como a laminação, a extrusão é um processo de fabricação de produtos semiacabados – ou seja, produtos que ainda sofrerão outras operações, tais como corte, estampagem, usinagem ou forjamento, antes de seu uso final.

Como resultado disso, obtêm-se duas das importantes características do produto extrudado: seção transversal reduzida e grande comprimento.

O processo de extrusão (figura 2.29) consiste basicamente em forçar a passagem de um bloco de metal através do orifício de uma matriz. Isso é conseguido aplicando-se altas pressões ao material com o auxílio de um êmbolo.

Figura 2.29

Princípio básico da extrusão.



Trata-se de um processo de fabricação relativamente novo, se comparado com a maioria dos processos de conformação mecânica. As primeiras experiências com extrusão foram realizadas com chumbo no final do século XIX. O maior avanço ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, com a produção de grandes quantidades de perfis de alumínio para serem usados na indústria aeronáutica.

Atualmente, não são apenas os metais mais dúcteis (como o alumínio e suas ligas e o cobre e suas ligas) que podem passar pelo processo de extrusão. Também é possível fabricar produtos de aço carbono e aço inoxidável por meio de extrusão. Produtos de plástico, principalmente embalagens, também são produzidos por extrusão.

No que se refere ao uso do alumínio, as variedades de perfis que se pode fabricar é quase ilimitada.

As seções obtidas são mais resistentes porque não apresentam juntas frágeis e há melhor distribuição do metal. O processo fornece, também, boa aparência para as superfícies.

2.5.1 Etapas do processo

De acordo com o tipo de metal, que deve suportar rigorosas condições de atrito e temperatura, e segundo a seção a ser obtida, a extrusão pode ser realizada a quente ou a frio.

Os metais mais duros, como o aço, passam normalmente pelo processo de extrusão a quente. Esse processo envolve as seguintes etapas:

- fabricação de lingote ou tarugo de seção circular;
- aquecimento uniforme do lingote ou tarugo;
- transporte do lingote ou tarugo aquecido para a câmara de extrusão. Essa etapa deve ser executada tão rapidamente quanto possível para diminuir a oxidação na superfície do metal aquecido;
- execução da extrusão: com o tarugo aquecido apoiado diante da câmara de extrusão, o pistão é acionado e o material é empurrado para o interior da câmara;
- fim da extrusão: o pistão recua e a câmara se afasta para a retirada do disco e da parte restante do tarugo;
- remoção dos resíduos de óxido com o auxílio de disco raspador acionado pelo pistão.

Considerando-se que o trabalho a quente traz problemas de oxidação do bloco de metal e das ferramentas de extrusão, a temperatura de trabalho deve ser a mínima necessária para fornecer ao metal o grau de plasticidade adequado.

Devido à intensa deformação produzida durante a extrusão, pode ocorrer um sensível aquecimento do metal. Portanto, a temperatura máxima do processo deve ser seguramente inferior à temperatura de liquefação, ou seja, aquela em que ocorre a fusão do contorno dos grãos.

Se a temperatura de extrusão ficar muito próxima à de liquefação, o aquecimento produzido pelo atrito e pela compressão da matriz poderá atingir a temperatura de fusão e impedir a fabricação do produto por extrusão.

Deve-se lembrar, também, que a temperatura do material na zona de deformação depende da velocidade de deformação e do grau de compressão. Isso significa que a temperatura sobe quando aumentam a velocidade e a deformação por causa do crescimento do atrito. Este, por sua vez, decorre do aumento da velocidade de deformação e do grau de compressão.

Na extrusão a quente, as reduções de área conseguidas são da ordem de 1:20 (um para vinte). Isso significa que, se você tiver uma barra de 100 mm² de área, ela pode ser reduzida para 5 mm².

Os materiais mais dúcteis, como o alumínio, podem passar por extrusão tanto a frio quanto a quente e obter reduções de área da ordem de 1:100 (um para cem).

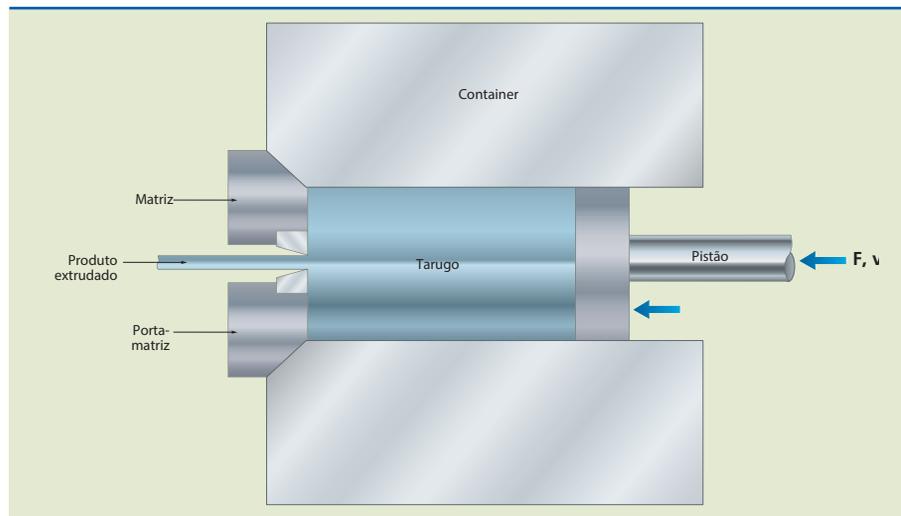
Na extrusão a frio, o material endurece por encruamento durante a deformação porque os grãos do metal se quebram e assim permanecem, aumentando as tensões na estrutura e, conseqüentemente, sua dureza. Na extrusão a quente, os grãos se reconstituem após a extrusão por causa da alta temperatura.

2.5.2 Tipos de processos de extrusão

A extrusão pode ser realizada de duas maneiras básicas: direta ou indiretamente.

Na extrusão direta (figura 2.30), o bloco metálico a ser processado é colocado em uma câmara ou cilindro e empurrado contra uma matriz por meio de um pistão acionado por meios mecânicos ou hidráulicos.

Figura 2.30
Extrusão direta.



Para proteger o pistão da alta temperatura e da abrasão resultantes do processo de extrusão direta, usa-se um bloco de aço, chamado falso pistão, entre o material metálico e o êmbolo. Emprega-se também um pedaço de grafite entre o metal e o pistão a fim de assegurar que todo o material metálico passe pela matriz.

Nesse processo, a deformação ocorre na matriz, enquanto que o resto do material é contido pelas paredes do cilindro. Assim, não se produz nenhuma instabilidade no material. Isso possibilita alcançar elevadas reduções (de até 99%) no material processado.

Na extrusão indireta (figura 2.31), o êmbolo é oco e está ligado à matriz. A extremidade oposta da câmara é fechada com uma placa. O êmbolo oco empurra a matriz de encontro ao metal e este sai da matriz em sentido contrário ao movimento da haste.

Como não há movimento relativo entre o bloco de metal e as paredes da câmara, as forças de atrito, assim como as pressões necessárias, são menores do que na extrusão direta. Por outro lado, como o êmbolo é furado, as cargas a serem utilizadas são limitadas e não é possível obter perfis com formatos complexos. Por isso, o processo de extrusão direta é o mais empregado.

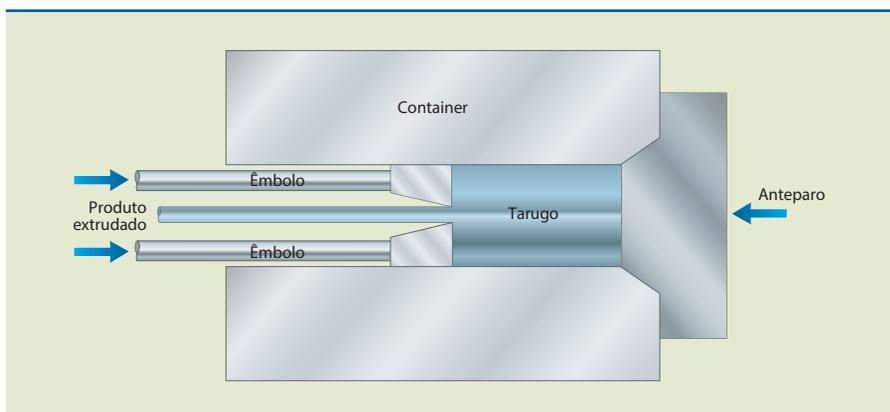


Figura 2.31
Extrusão indireta.

Os equipamentos usados na extrusão consistem em prensas horizontais, mecânicas ou hidráulicas, com capacidades normais entre 1.500 e 5.000 toneladas. Prensas hidráulicas conseguem trabalhar com cargas de até 30.000 toneladas!

Além dessas prensas, são necessários equipamentos auxiliares para a realização do processo. Eles incluem fornos para aquecimento dos tarugos e fornos de tratamento térmico, além de equipamentos para transporte e corte dos perfis.

2.5.3 Defeitos da extrusão

Existem vários defeitos típicos dos processos de extrusão. Por exemplo: no processo de extrusão, a deformação não é uniforme. Por isso, o centro do tarugo move-se mais rapidamente que a periferia.

Levando à formação de uma “zona morta” ao longo da superfície externa do tarugo. Quando a maior parte do bloco de metal já passou pela matriz, a superfície externa move-se para o centro e começa a fluir por essa matriz. Como a superfície externa contém uma película de óxido, aparecem linhas internas de óxido no interior do produto.

Se esse produto for cortado no sentido transversal, o óxido aparecerá na forma de um anel que não permitirá a colagem das partes a ele adjacentes.

Outro defeito que pode aparecer por causa da diferença de velocidade entre o núcleo do tarugo e a periferia é a formação de uma cavidade no centro da superfície do material em contato com o pistão quando o processo de extrusão atingir a etapa final.

Essa cavidade cresce gradualmente em diâmetro e profundidade, transformando a barra em um tubo.

Por isso, essa parte final do produto deverá ser descartada. O aspecto desse defeito é semelhante ao de um rechupe interno.

O arrancamento é o defeito que se forma na superfície do produto e aparece na forma de perda de material da superfície. Ele ocorre quando o produto passa muito rapidamente pela matriz.



Produtos fabricados pelo processo de extrusão podem apresentar, ainda, bolhas na superfície. Elas podem ser causadas pela presença de hidrogênio e materiais provenientes da fundição do lingote ou por ar contido dentro do recipiente da prensa.

Os defeitos que acabamos de descrever podem ser evitados da seguinte forma:

Cavidade no produto – descartar a porção final do produto;

- anel de óxido – não extrudar o tarugo até o fim;
- aquecimento – o recipiente deve ser aquecido a uma temperatura 50°C menor que a temperatura do tarugo;
- dimensões – não deixar que o diâmetro do produto extrudado ultrapasse o valor a partir do qual o anel de óxido começa a aparecer;
- arrancamento – diminuir a velocidade e a temperatura de extrusão;
- bolhas – eliminar gases dissolvidos no metal líquido durante a fundição do lingote.

2.5.4 Extrusão de termoplásticos

Todo material termoplástico, ao ser processado em uma extrusora, sofre certo trabalho mecânico pela ação da rosca transportadora e do cilindro.

Através da compressão da rosca e da ação do calor fornecido pelas resistências, os termoplásticos plastificam-se e homogenizam-se, formando uma massa compacta, apta a ser moldada.

O processo de extrusão é dividido em três etapas, das quais tratam os próximos tópicos.

2.5.4.1 Preparo do material

O material entra na rosca transportadora (que é alimentada pelo funil) e, no percurso da rosca e do cilindro, adquire as características e as propriedades de processo necessárias para ser moldado.

2.5.4.2 Forma do produto

O responsável pela forma do produto é o cabeçote, onde se faz a moldagem do pré-produto, dando a ele a característica visual desejada e os acabamentos necessários ao pré-moldado.

2.5.4.3 Calibração do produto

O produto é calibrado e resfriado desde a entrada na banheira a vácuo até a passagem pelo puxador.

Nesse percurso são definidas as dimensões requeridas ao produto.

Observação: este tipo de calibração é utilizado na produção de tubos rígidos ou flexíveis.



No princípio da descoberta do plástico, as primeiras extrusoras não usavam rosca; eram máquinas de pistão responsável pela liberação contínua do material.

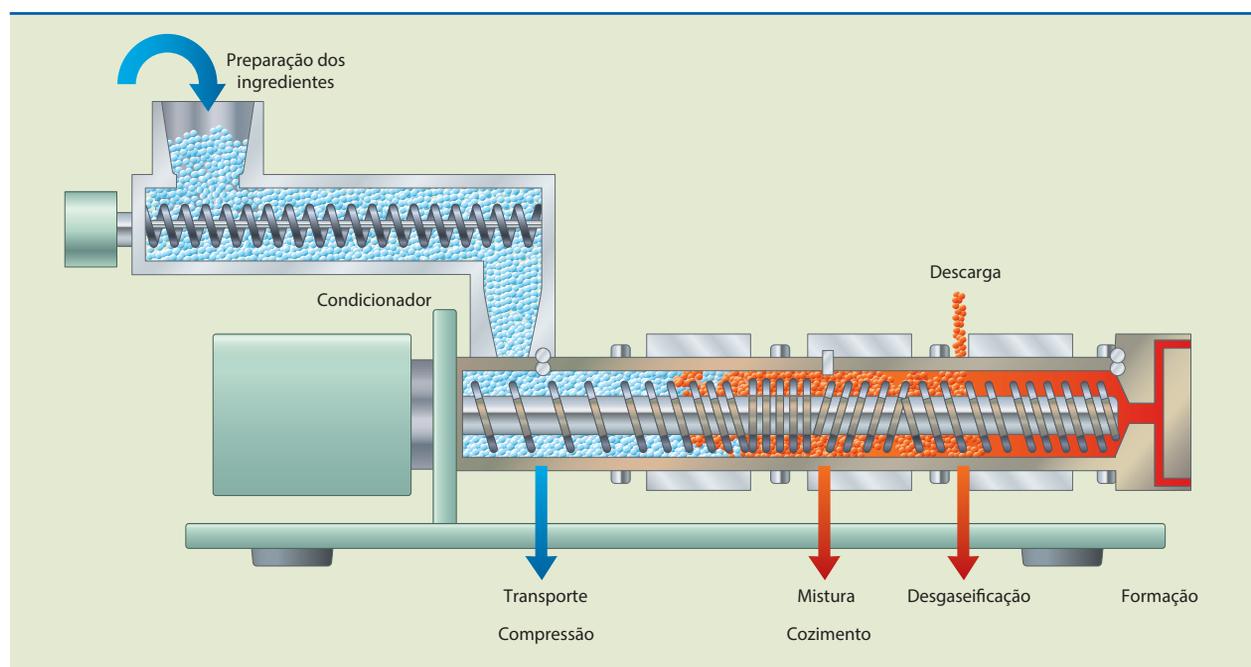
Com a evolução das máquinas, elas passaram a utilizar roscas sem fim, o que ocorre até hoje (figura 2.32).

Pelo processo de extrusão, podemos obter vários produtos, como:

- tubos;
- mangueiras;
- perfis;
- laminados;
- tela, redes para frutas;
- filmes e peças sopradas;
- filamentos, multifilamentos;
- recobrimento de metais.

Figura 2.32

Princípio de extrusão com rosca transportadora.



2.6 Trefilação

No processo de trefilação, a matéria-prima é tracionada e forçada a atravessar uma ferramenta oca denominada feira ou matriz, deformando-se plasticamente e reduzindo a seção transversal. Isso aumenta seu comprimento, pela aplicação de uma força de tração na extremidade que já atravessou a feira.

A finalidade do processo de trefilação é obter fios ou barras de dimensões, acabamento superficial e propriedades mecânicas controladas.

2.6.1 Variáveis do processo

2.6.1.1 Matéria-prima

A matéria-prima para trefilação deve ter alto grau de pureza, pois a presença excessiva de impurezas (inclusões, óxidos) pode provocar fratura dúctil do material.

Tipos de matéria-prima:

- fio máquina (seção redonda) – produz arames.
- barras laminadas para fins mecânicos (seção redonda, quadrada e hexagonal) – produz barras.

As variáveis da matéria-prima são três: a natureza, a forma e as propriedades do material.

- Natureza (composição química, condições de fabricação e estrutura metalográfica).
- Forma (diâmetro de ovalização, rugosidade superficial, defeitos internos e superficiais).
- Propriedades do material (mecânicas, elétricas e de dureza).

2.6.1.2 Materiais auxiliares

- Natureza do lubrificante (tipo).
- Propriedades do lubrificante (viscosidade, temperatura do trabalho, basicidade e conteúdo graxo).

2.6.1.3 Processo

- Redução da seção;
- Desgaste da feira;
- Condição de atrito;
- Sistema de lubrificação;
- Temperatura de trabalho e feira;
- Velocidade de trefilação.

2.6.1.4 Produto final

- Natureza do material (condições de redução, estrutura metalográfica).
- Forma do material (diâmetro, ovalização, rugosidade superficial, defeitos internos e superficiais).
- Propriedades do material (mecânicas).

2.6.2 Preparação da superfície

Em consequência das altas temperaturas de laminação, forma-se carepa (óxido de ferro) na superfície da matéria-prima.

Por causa da alta dureza do óxido, é necessária sua eliminação por intermédio de uma decapagem, pois o óxido aumentaria o desgaste da feira, além de prejudicar a qualidade do material.

Tipos de decapagem

2.6.2.1 Decapagem química

Imersão da matéria-prima em ácido sulfúrico ou clorídrico (cuja concentração varia conforme o estado do material), seguida de lavagem, neutralização e secagem.

Observação: a neutralização pode ser feita com cal, borax ou fosfatização.



2.6.2.2 Decapagem mecânica

É constituída por roldanas em diferentes planos, que dobram o fio máquina, quebrando a camada de óxido.

Observação: a decapagem mecânica é utilizada somente para fio máquina.

2.6.3 Processo de trefilação

Para dar início ao processo de trefilação, é necessário fazer o apontamento do material, reduzindo-se sua seção para permitir que ele passe pela feira a fim de ser agarrado. Começa, assim, a deformação do material.

2.6.3.1 Fieiras

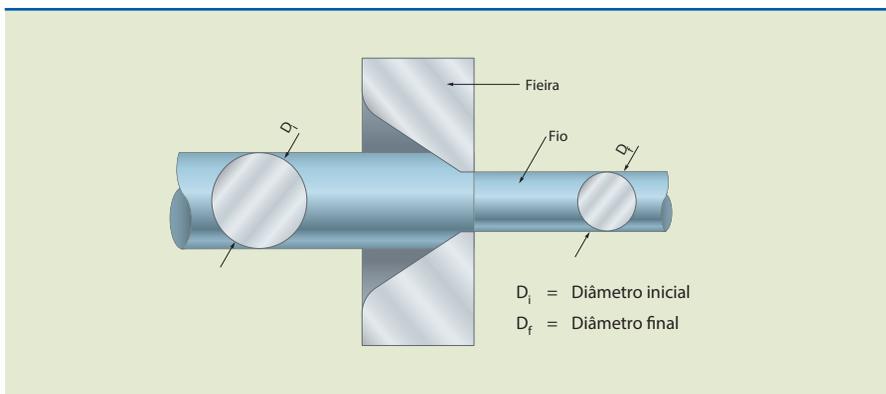


Figura 2.33

Redução da seção do arame.

Fieiras (figura 2.33) são uma parte fundamental do equipamento, constituído de uma seção tronca cônica, formada por um núcleo de carboneto de tungstênio ou diamante fixado em uma carcaça de aço. São feitas de liga para resistir aos elevados esforços radiais.

Propriedades do núcleo: liga de alta dureza, elevada resistência à abrasão e à compressão.

Zonas das fieiras

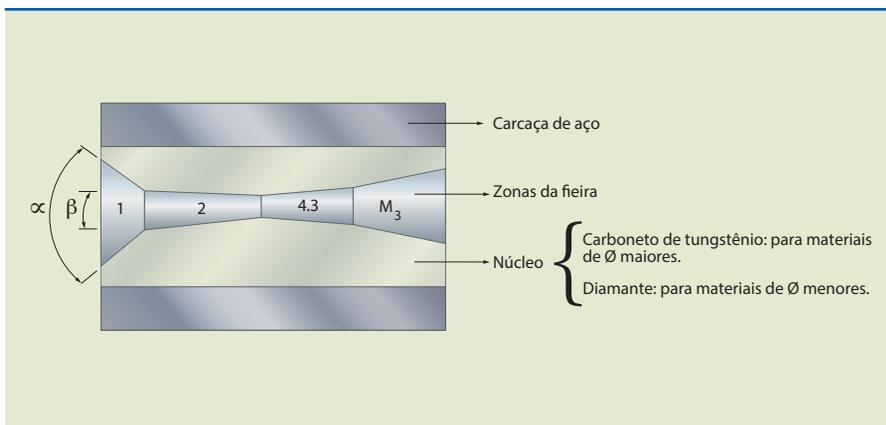


Figura 2.34

Detalhe construtivo de uma feira.

Zona 1 – cone de entrada: sua função é guiar o material e permitir a livre entrada do lubrificante, que é arrastado pelo material.

Zona 2 – cone de trabalho: região onde ocorre redução de seção do material, havendo elevadas tensões radiais na feira.

Zona 3 – cone de saída: região cuja função é evitar concentração de tensões na saída da feira.

Zona 4 – cilindro de calibragem: onde se obtém o material com o diâmetro pretendido.

Estas zonas podem ser observadas nas figuras 2.34 e 2.35.

Figura 2.35

Tipos de formatos geométricos das feiras.



Acabamento das feiras

As feiras têm polimento espelhado na parede interna, sofrem controle dimensional periódico e, depois de desgastadas, são usinadas para a obtenção de bitolas maiores.

2.6.3.2 Lubrificantes

A escolha do processo correto de lubrificação é uma questão que afeta o acabamento superficial do material e também a vida da feira.

Funções dos lubrificantes

Criar uma película de fluido entre as duas superfícies (metal/ ferramenta) com os objetivos de:

- diminuir o desgaste da feira;
- reduzir o atrito durante a trefilação;
- diminuir a força de tração necessária;
- obter um acabamento superficial de melhor qualidade;
- resfriar a feira, permitindo o aumento da velocidade nos processos.

Tipos

- Secos: constituídos de esteorato de sódio ou cálcio (pó/granulado);
- Úmidos: constituídos de óleos ou graxas solúveis (óleo de linhaça, sabão).

2.6.3.3 Esforços de trefilação

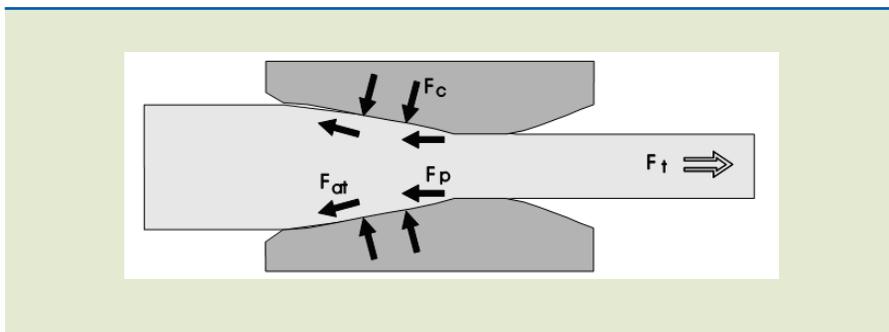


Figura 2.36

Esforços de trefilação.

A força necessária para a trefilação (figura 2.36) é o resultado da somatória de três variáveis:

$F_t = F_c + F_{at} + F_p$, onde:

F_t = força total para trefilação;

F_c = força de compressão para redução do diâmetro;

F_{at} = força de atrito;

F_p = força de cisalhamento.

A força total para trefilação (F_t) depende:

- do ângulo de trabalho da feira;
- da redução de seção pretendida;
- do limite de escoamento do material;
- do atrito (material da feira, afiação, lubrificação).

Para uma mesma redução de seção o aumento do ângulo de trabalho implica maior deformação por cisalhamento, o que resultará em um maior encruamento do material trefilado. Uma diminuição do ângulo, por sua vez implica aumento do atrito.

Portanto, para cada condição existirá um ângulo ideal.

A velocidade de trefilação não afeta diretamente o esforço de trefilação, mas provoca um aumento da temperatura da feira, devido ao atrito, que torna a lubrificação mais difícil, podendo resultar em um aumento da força de atrito e aquecimento exagerado do material e da ferramenta.

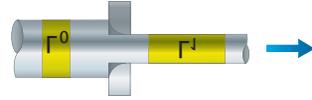
O valor máximo da tensão longitudinal no material que está sendo trefilado ocorre na saída da feira e pode ser designada como sendo a tensão de trefilação.

A tensão de trefilação não pode exceder a tensão de escoamento do material já trefilado, e este é o limite para o máximo esforço de tração que se pode aplicar sobre o material a fim de se obter sua redução.

2.6.3.4 Parâmetros de variação dimensional em trefilação

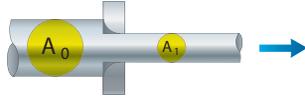
- Alongamento

$$\gamma = \frac{\Gamma^0}{\Gamma^J - \Gamma^0} \times 100$$



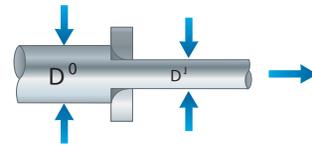
- Redução da área

$$\beta = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$



- Redução de diâmetro

$$\varrho = \frac{D^0}{D^J - D^0} \times 100$$



2.6.3.5 Máquinas de trefilar

2.6.3.5.1 Máquina para trefilar fio máquina

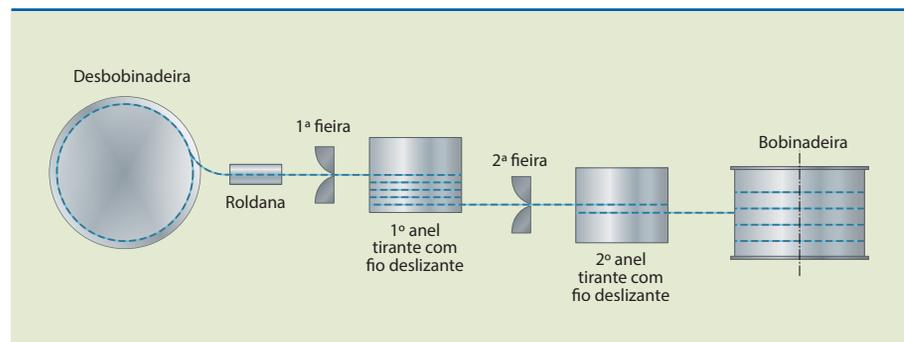
a) Máquina múltipla contínua sem acumulação (figura 2.37)

Características:

- trabalha com velocidades menores (e variáveis a cada passo);
- tem vários passes de trefilação;
- guia melhor o arame na feira;
- não admite acúmulo de material durante o processo;
- nela, o resfriamento do material é prejudicado pela pouca acumulação durante o processo;
- exige observação da constância de volume.

Figura 2.37

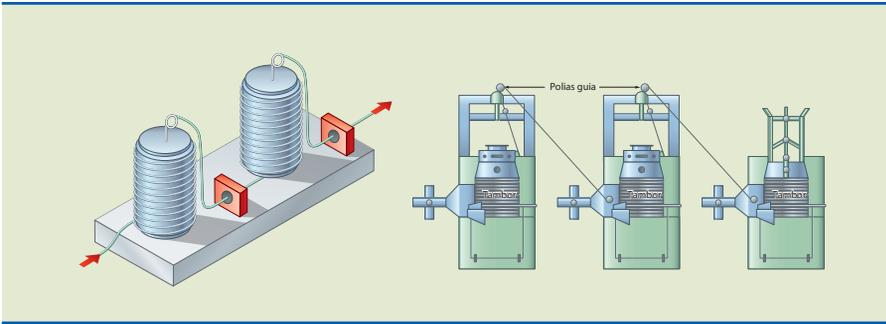
Desenho esquemático de uma máquina múltipla contínua sem acumulação.



b) Máquina múltipla contínua com acumulação (figura 2.38)

Características:

- não exige observação da constância de volume;
- possibilita resfriamento natural;
- tem a inconveniência de induzir torções do material se houver paralisação da bobina anterior.

**Figura 2.38**

Máquina múltipla contínua com acumulação.

c) Máquinas monobloco

Características:

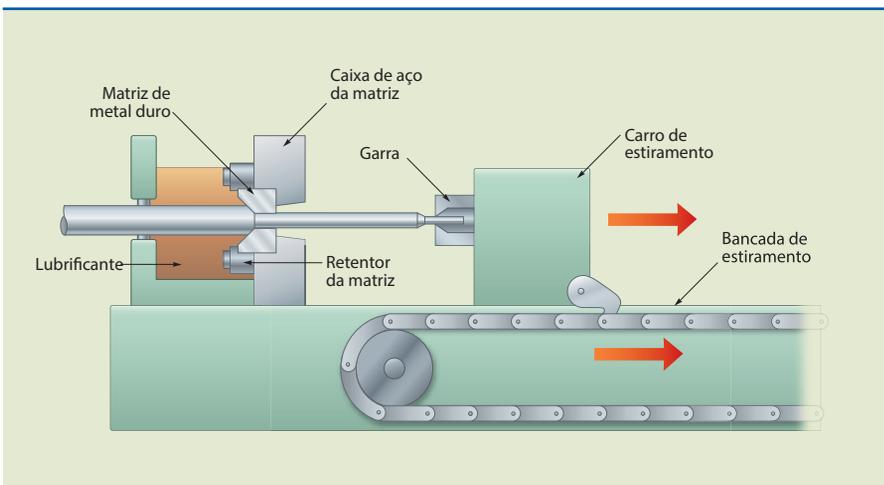
- são dotadas de uma só bobina com acoplamento direto ao conjunto moto redutor;
- a bobina pode ser vertical ou horizontal;
- possuem altas faixas de velocidade e capacidade.

2.6.3.5.2 Barras para fins mecânicos

a) Máquina de carro (figura 2.39)

Características:

- tem um único passe de trefilação;
- a tração se dá por intermédio de correntes acionadas por motor;
- utiliza lubrificantes sólidos ou líquidos;
- trabalha ininterruptamente com um único material.

**Figura 2.39**

Máquina de carro.

2.6.3.6 Equipamentos auxiliares

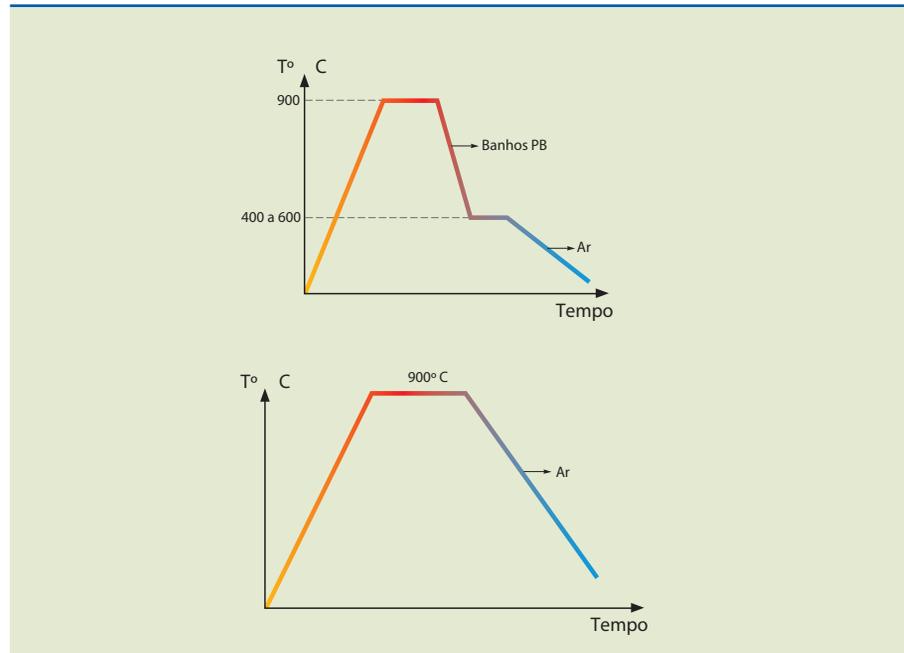
- Apontadores: dispositivos mecânicos que permitem preparar a ponta do material para colocação inicial na feira.

- Desenroladeiras: equipamentos onde se coloca o fio máquina ou arame para serem puxados.
- Máquinas de solda: usadas para dar continuidade na trefilação do fio máquina no final do rolo (solda de topo por caldeamento).
- Bobinadores e enroladores: dispositivos que permitem a retirada de rolos do fio máquina da máquina em paralisação da mesma.

2.6.3.7 Tratamentos térmicos dos materiais

2.6.3.7.1 Patenteamento

Figura 2.40
Patenteamento.



Aplicado aos aços de alto teor de carbono com a finalidade de torná-los suficientemente plásticos, capazes de suportar altas reduções de seção pela trefilação (o patenteamento, figura 2.40, aumenta a tenacidade e resistência mecânica).

Exemplo: patenteamentos realizados em linhas contínuas de múltiplos fios (no início do processo ou ao longo dele).

2.6.3.7.2 Reozimento

Aplicação com a finalidade de:

- homogeneizar a estrutura após a laminação;
- remover o encruamento e fragilidade induzido pela operação de trefilação (recristalização);
- diminuir a dureza ou alterar as propriedades mecânicas para aliviar tensões.

2.6.3.8 Defeitos em trefilação

Como já foi mencionado, os produtos trefilados caracterizam-se por seu grande comprimento e sua pequena seção transversal.

Dependendo de sua utilização, de seu formato e de sua seção transversal, eles recebem uma denominação. Assim, as barras têm diâmetro maior que 5 mm e os arames ou fios têm diâmetro menor. O arame é usado para a construção mecânica e o fio, em aplicações elétricas.

Esses produtos apresentam os defeitos típicos listados a seguir.

2.6.3.8.1 Ruptura do material

Ocorre quando o limite de resistência do material é ultrapassado (figura 2.41).

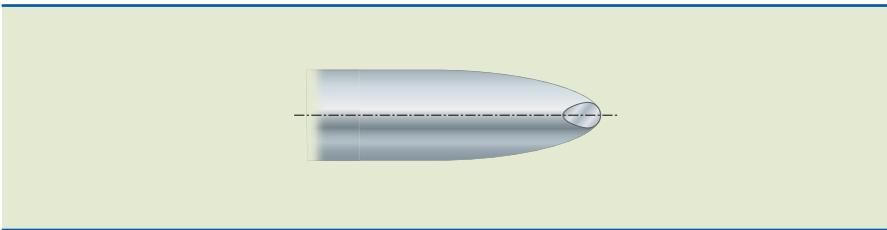


Figura 2.41
Ruptura do material.

Causas: pouca lubrificação, lubrificante sujo, sujeira no material, partículas metálicas alojadas no material laminado, trincas no material (gretas).

2.6.3.8.2 Marcas em forma de V ou fratura em ângulo

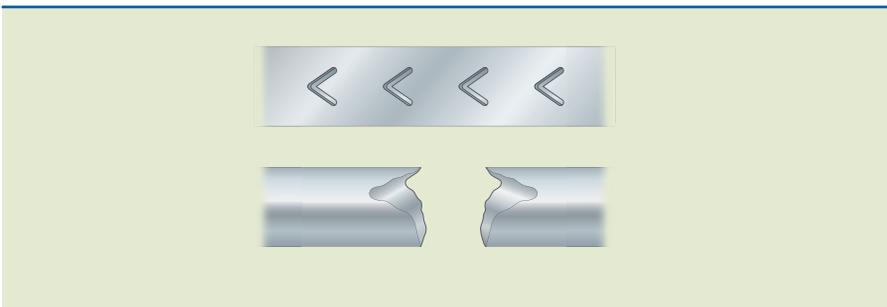


Figura 2.42
Marcas em forma de V.

Causas: ocorrem quando a redução é grande e a parte cilíndrica (da fieira) é curta, e o material entra com um determinado ângulo (figura 2.42). Há presença de inclusões no material (partículas metálicas) ou na fieira.

2.6.3.8.3 Ruptura taça-cone

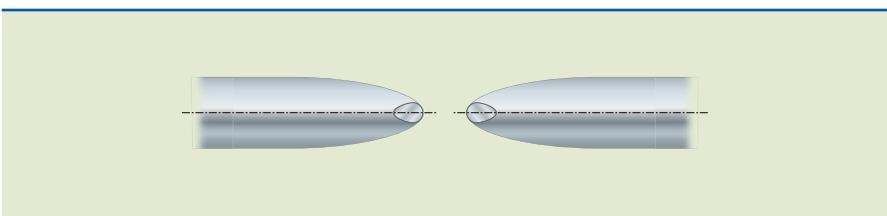
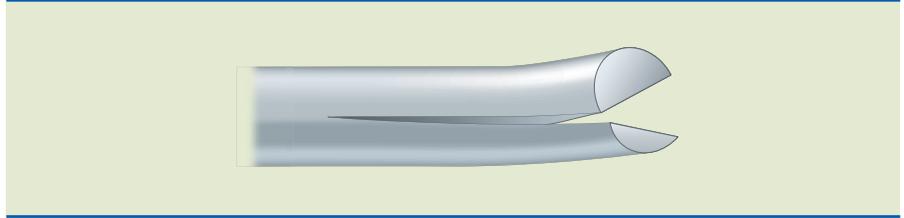


Figura 2.43
Ruptura taça-cone.

É causada por redução pequena e ângulo de feira muito grande, com acentuada deformação da parte central (figura 2.43).

2.6.3.8.4 Fratura com trinca

Figura 2.44
Fratura com trinca.



Aberta em duas partes, causada por trincas de laminação (figura 2.44).