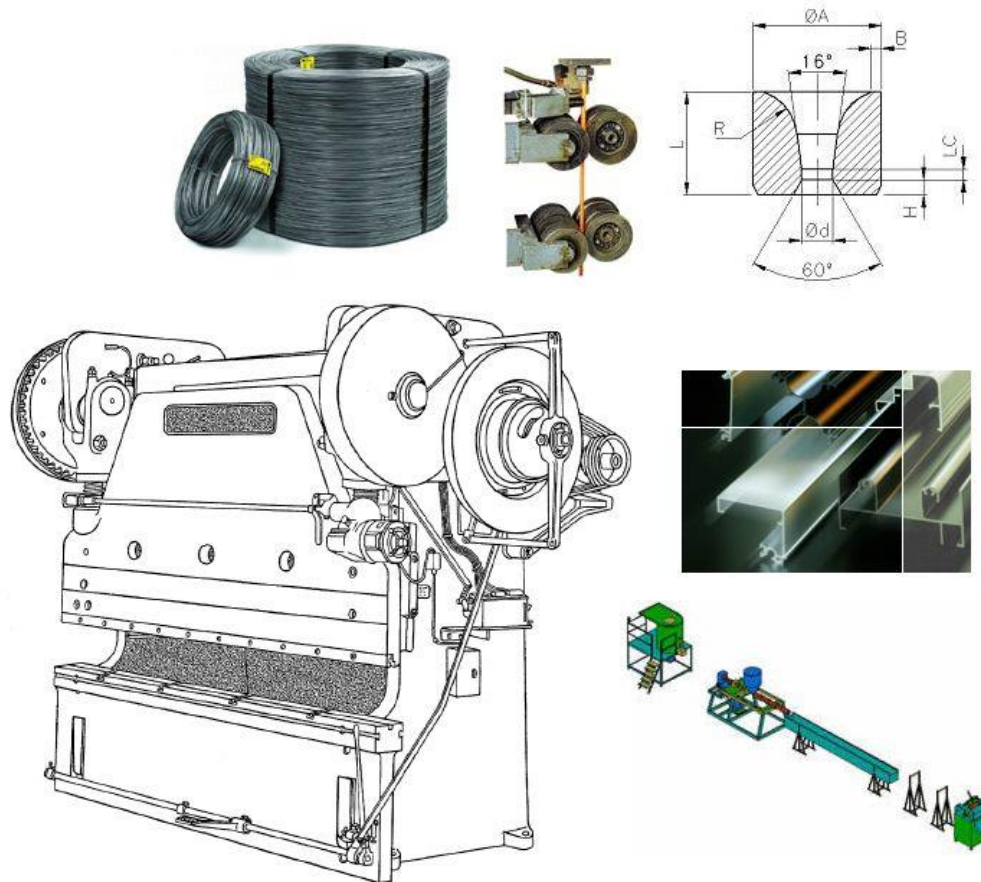




PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

CONFORMAÇÃO MECÂNICA II – Extrusão, Trefilação e Conformação de Chapas

Prof. Eng. Mec. Norberto Moro
Téc. Mec. André Paegle Auras

SUMÁRIO

1. EXTRUSÃO	3
1.1 Tipos de extrusão	4
1.2 Parâmetros de Extrusão	5
1.3 Fluxo de metal	7
1.4 Extrusão a quente.....	8
1.5 Extrusão a frio.....	10
1.6 Defeitos da extrusão	11
1.7 Exercícios	11
2. TREFILAÇÃO	12
2.1 Fieira.....	12
2.2 Equipamentos.....	13
2.3 Trefilação de tubos	14
2.4 Trefilação dos arames de aço.....	15
2.5 Defeitos.....	18
2.6 Exercícios	19
3. CONFORMAÇÃO DE CHAPAS	20
3.1 Corte de chapas	20
3.2 Dobramento	25
3.3 Estampabilidade dos metais	28
3.4 Estampagem profunda (embutimento ou repuxo).....	31
3.5 Exercícios	32
Resposta dos Exercícios	34
Referência Bibliográfica	35

1. EXTRUSÃO

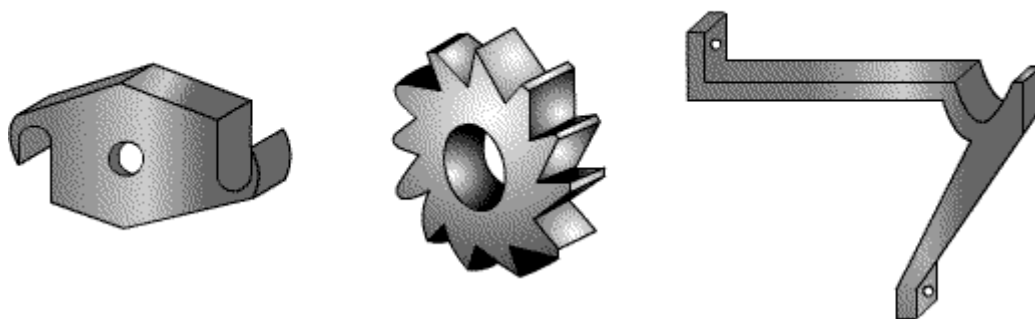
Extrusão é um processo de conformação no qual o material é forçado através de uma matriz, de forma similar ao aperto de um tubo de pasta de dentes. Praticamente qualquer forma de seção transversal vazada ou cheia pode ser produzida por extrusão. Como a geometria da matriz permanece inalterada, os produtos extrudados têm seção transversal constante.

Dependendo da ductilidade do material a extrudar, o processo pode ser feito a frio ou a quente. Cada tarugo¹ é extrudado individualmente, caracterizando a extrusão como um processo semicontínuo. O produto é essencialmente uma peça semi-acabada. A extrusão pode ser combinada com operações de forjamento, sendo neste caso denominada extrusão fria.

Os produtos mais comuns são: quadros de janelas e portas, trilhos para portas deslizantes, tubos de várias seções transversais e formas arquitetônicas. Os 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-se gerar componentes para automóveis, bicicletas, motocicletas, maquinário pesado e equipamento de transporte.

Os materiais mais usados na extrusão são: alumínio, cobre, aço de baixo carbono, magnésio e chumbo.

Exemplos de Produtos obtidos pelo seccionamento do perfil extrudado



O equipamento básico de extrusão é uma prensa hidráulica. Assim, é possível controlar velocidade e curso. A força pode ser mantida constante para um longo curso, tornando possível a extrusão de peças longas, e aumentando a taxa de produção.

¹ Tarugo é um bloco de metal (perfilado) obtido pela laminação de um lingote. O lingote é um bloco de metal produzido por fundição.



Prensas hidráulicas verticais são geralmente usadas para extrusão a frio. Elas têm usualmente menor capacidade daquelas usadas para extrusão a quente, mas ocupam menos espaço horizontal.

Prensas excêntricas são também usadas para extrusão a frio e por impacto, e são indicadas para produção em série de pequenos componentes.

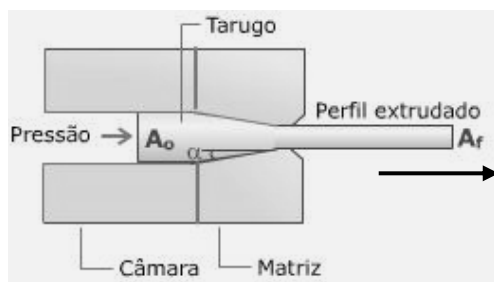
Operações de múltiplos estágios, onde a área da seção transversal é progressivamente reduzida, são efetuadas em prensas especiais.

1.1 Tipos de extrusão

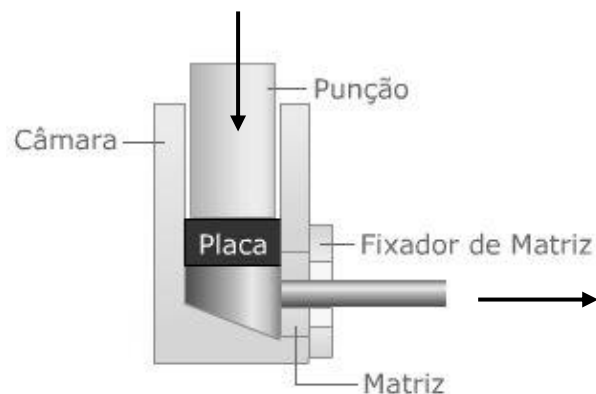
São basicamente dois tipos de extrusão, a direta e a indireta. Mas há ainda duas variações: a lateral e a hidrostática.

Direta: Este é o processo básico, denominado direto. Um tarugo cilíndrico é colocado numa câmara e forçado por um atuador hidráulico através de uma matriz. A abertura da matriz pode ser circular ou de outro formato.

Para proteger o pistão da alta temperatura e abrasão resultantes do processo, emprega-se um bloco de aço chamado falso pistão entre o material e o êmbolo. Utiliza-se ainda um pedaço de grafite entre o falso pistão e o material, para garantir que todo material passe pela matriz, não deixando nenhuma sobra.

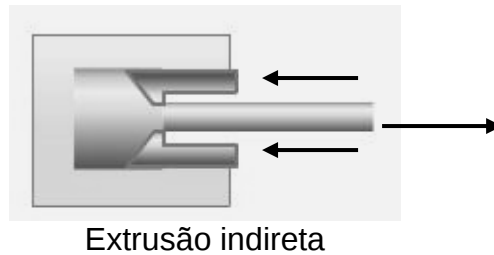


Extrusão direta



Variação: extrusão lateral

Indireta: Também conhecida por reversa ou invertida, a matriz se desloca na direção do tarugo. Como não há movimento relativo entre o tarugo e as paredes da câmara, as forças de atrito e 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.

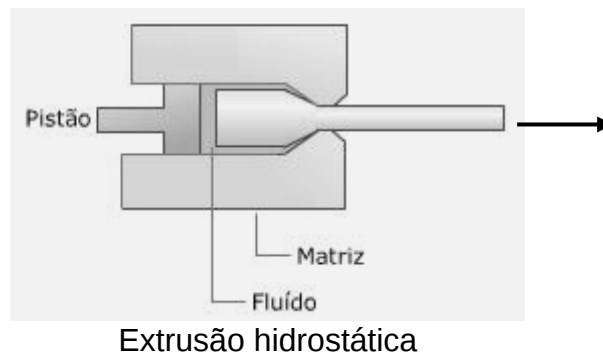


Hidroestática: O diâmetro do tarugo é menor que o diâmetro da câmara, que é preenchida por um fluido hidráulico. A pressão (da ordem de 1400 MPa) é transmitida ao tarugo através de um pistão. Não há fricção nas paredes da câmara. O método foi desenvolvido nos anos 50 e evoluiu para o uso de uma segunda câmara pressurizada mantida a uma pressão mais baixa. É a chamada extrusão fluido a fluido, que reduz os defeitos do produto que acabou de ser extrudado (oxidação, etc).

Essa extrusão 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.

A extrusão hidroestática é realizada usualmente a temperatura ambiente, em geral usando óleo vegetal como meio, 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.

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.



1.2 Parâmetros de Extrusão

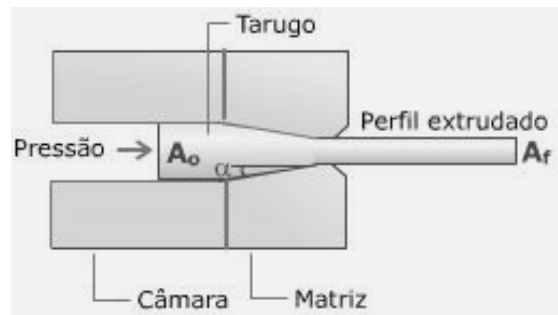
Os parâmetros de extrusão se dividem em geométricos e físicos.

A) Os parâmetros **geométricos** da extrusão são:

*O ângulo da matriz α ;

*A relação de extrusão: é o quociente entre as áreas das seções transversais do tarugo A_o (área inicial) e do produto extrudado A_f (área final);

*O fator de forma: é a relação entre o perímetro da seção do produto extrudado e a área da seção transversal. Quanto maior for o valor, mais complexa será a extrusão.



B) Os parâmetros **físicos** da extrusão são:

*Velocidade de deslocamento do pistão;

*Força de extrusão;

*Temperatura do tarugo;

*Tipo de lubrificante.

As velocidades do pistão podem chegar até 0,5 m/s, e dependem do material e de outras variáveis.

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. Pode ser estimada pela seguinte fórmula:

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

Onde,

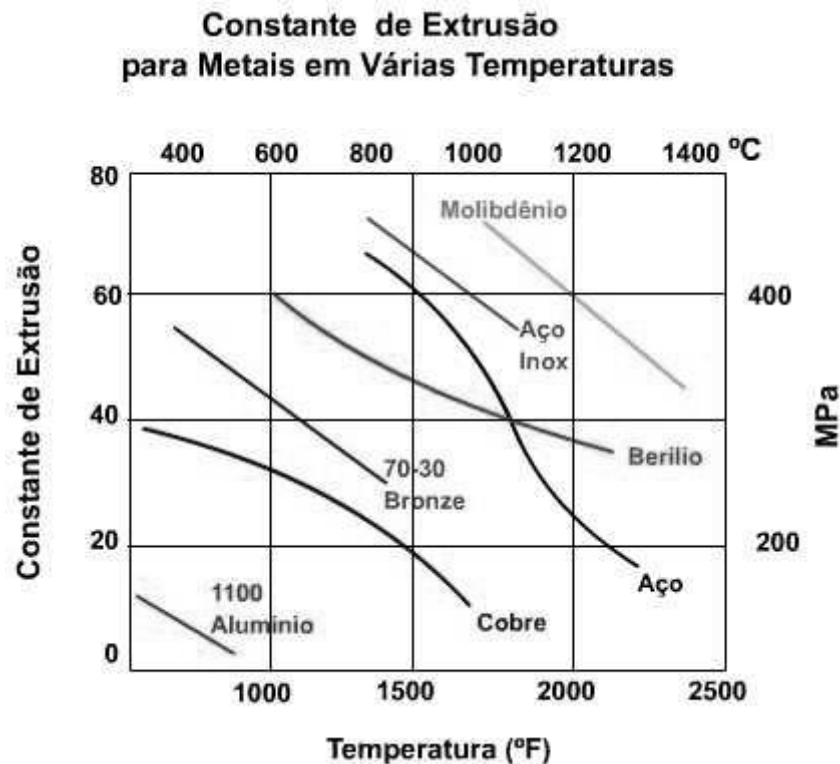
A_0 = Área transversal inicial do tarugo;

k = Constante de extrusão;

$\ln$ = Valor dado por variáveis (velocidade, etc);

A_f = Área transversal final do produto extrudado.

O valor de k (constante de extrusão) é obtido através do gráfico abaixo, dependendo do material e temperatura.

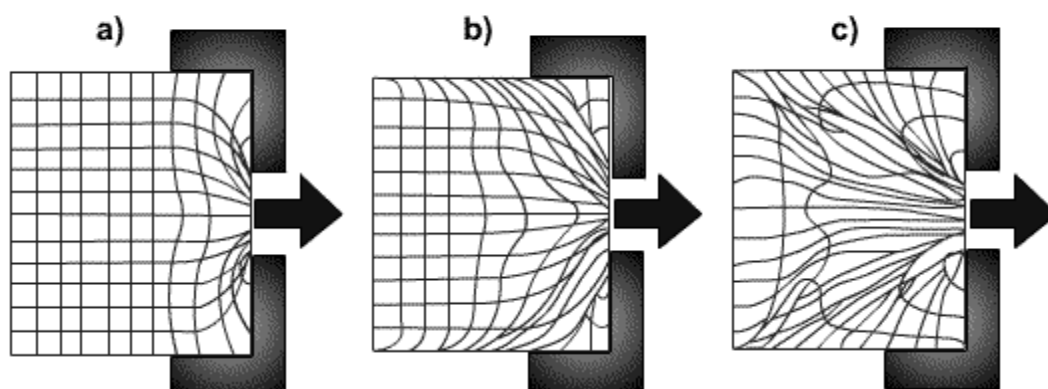


1.3 Fluxo de metal

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 uma situação hipotética de extrusão direta numa matriz quadrada (ângulo da matriz de 90°).

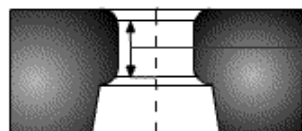


Observe as zonas mortas nas figuras “b” e “c” , onde o metal fica praticamente estacionário nos cantos. A situação é similar ao escoamento de fluido num canal com cantos vivos e curvas.

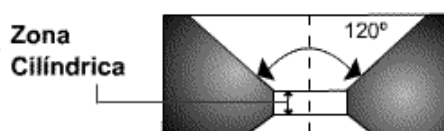
Por isso, o projeto de matrizes requer experiência considerável. Dois exemplos de configurações são mostrados na figura abaixo.

Configurações Típicas de Matrizes

a) Materiais Ferrosos

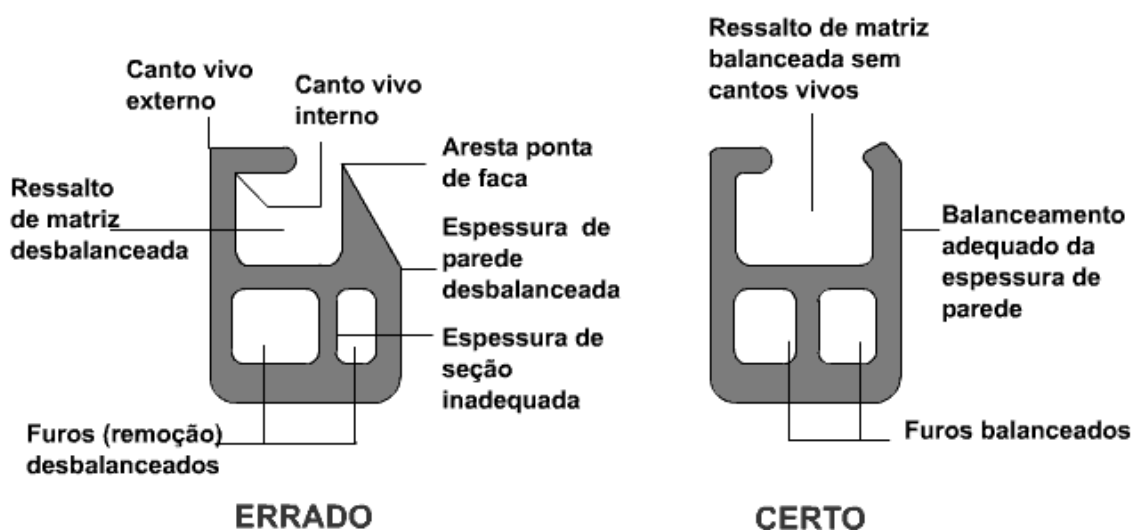


b) Materiais não Ferrosos



Os diferentes tipos de matrizes têm suas características similares, procurando simetria da seção transversal, evitar cantos vivos e mudanças extremas nas dimensões dentro da seção transversal. Abaixo temos figura mostrando o que devemos evitar e o que devemos ter em uma matriz, para que haja um bom fluxo do material.

Seção Transversal para Extrusão - características a observar para um bom projeto



1.4 Extrusão a quente

É feita em temperatura elevada para ligas que não tenham suficiente ductilidade² a temperatura ambiente, de forma a reduzir as forças necessárias. Apresenta alguns problemas, como todo o processo de alta temperatura:

- O desgaste da matriz é excessivo;

² Ductilidade é a propriedade pelo qual o material pode deformar-se sem sofrer ruptura.

- 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. Um exemplo é o pré-aquecimento da matriz, que serve tanto para manter o tarugo aquecido, e assim reduzir o efeito de esfriamento, quanto para prolongar a vida da própria matriz, que não sofrerá choques térmicos.

Veja o campo de temperaturas para extrusão a quente 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

Os materiais para matrizes de extrusão a quente são usualmente aços ferramenta para trabalho a quente. Revestimentos como zircônia podem ser aplicados para prolongar a vida das matrizes, especialmente em matrizes para produção de tubos e barras.

Lubrificação é importante na extrusão a quente. O vidro é excelente lubrificante para aço, aço inox, metais e ligas para altas temperaturas. O processo que utiliza vidro é o *Séjournet*, no qual uma pastilha de vidro é colocada na entrada da matriz. A pastilha atua como um reservatório de vidro fundido, que lubrifica a interface da matriz durante a extrusão. Vidro pulverizado sobre o tarugo reduz a fricção da interface câmara-tarugo.

Para metais com tendência a aderir à parede da matriz, pode-se usar um revestimento fino de metal macio e de baixa resistência, como cobre ou aço doce. O procedimento é denominado “jaquetamento” ou “enlatamento”. Além de formar uma superfície de baixa fricção, o tarugo fica protegido contra contaminação do ambiente, e vice-versa no caso de material tóxico ou radioativo.

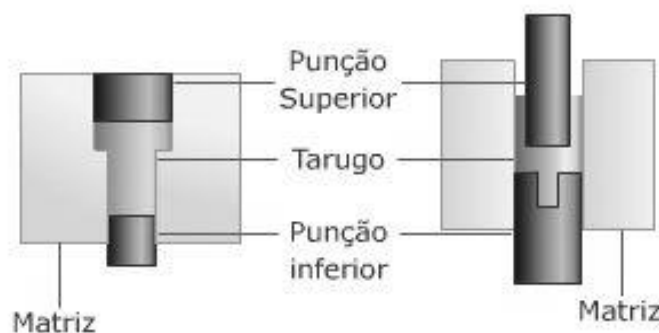
1.5 Extrusão a frio

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

Praticamente todos os materiais usados na extrusão a quente podem ser utilizados na extrusão a frio, mesmo os aços. Entretanto, deve-se considerar que a extrusão de um certo perfil pode ser realizada a quente mas não a frio, tendo que ser alterado os parâmetros de extrusão (velocidade, ângulo da matriz, etc).

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 e desvantagens da extrusão a frio em relação à extrusão a quente

Vantagens	Desvantagens
Melhores propriedades mecânicas resultantes do encruamento, desde que o calor gerado pela deformação não recristalize o metal.	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.
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.	-

1.6 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 quando 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: o tipo de padrão de fluxo mostrado anteriormente na figura “c” (página 7) 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 estricção 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.

1.7 Exercícios

1. Cite uma vantagem e desvantagem da extrusão indireta sobre a direta.
2. Cite duas vantagens da extrusão hidrostática.
3. Qual a importância do ângulo da matriz?
4. Cite uma vantagem e uma desvantagem dos processos de extrusão a quente e a frio.

2. TREFILAÇÃO

A trefilação é uma operação em que a matéria-prima é puxada contra uma matriz (chamada fieira ou trefila) em forma de funil por meio de uma força de tração aplicada do lado de saída da matriz. O escoamento plástico é produzido principalmente pelas forças compressivas provenientes da reação da matriz sobre o material. Normalmente realiza-se a operação a frio.

Produtos mais comuns:

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

Vantagens sobre outros processos:

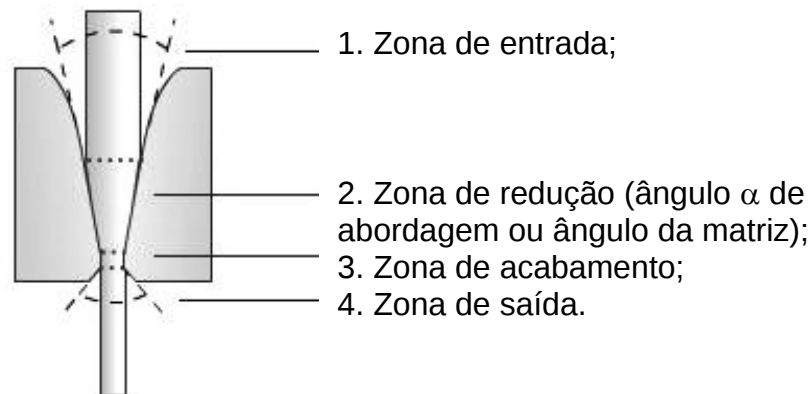
- O material pode ser estirado e reduzido em secção transversal mais do que com qualquer outro processo;
- A precisão dimensional que pode ser obtida é maior do que em qualquer outro processo exceto a laminação a frio, que não é aplicável às bitolas comuns de arames;
- A superfície produzida é uniformemente limpa e polida;
- O processo influi 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.

2.1 Fieira

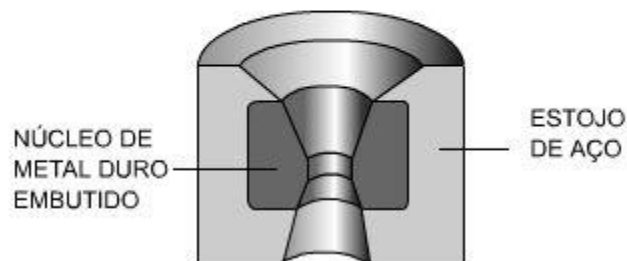
A fieira é o dispositivo básico da trefilação. A geometria da fieira é dividida em quatro zonas (ver figura abaixo): (1) de entrada; (2) de redução ($\alpha =$ ângulo de abordagem); (3) guia de calibração ou zona de acabamento; (4) de saída. Os materiais de construção dependem das exigências do processo (dimensões, esforços) e do material a ser trefilado. Os mais utilizados são:

- Carbonetos sinterizados (sobretudo WC) – widia;
- Metal duro, etc. (ver 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



2.2 Equipamentos

Pode-se classificar os equipamentos para trefilação em dois grupos básicos:

- Trefiladoras de bancada – utilizadas para produção de componentes não bobináveis, como barras e tubos;
- Trefiladoras de tambor – utilizada para produção de componentes bobináveis, ou seja, arames. As trefiladoras de tambor ainda podem ser classificadas em três grandes grupos, a saber: simples (1 só tambor) - para arames grossos; duplas - para arames médios; e múltiplas (contínuas) - para arames médios a finos.

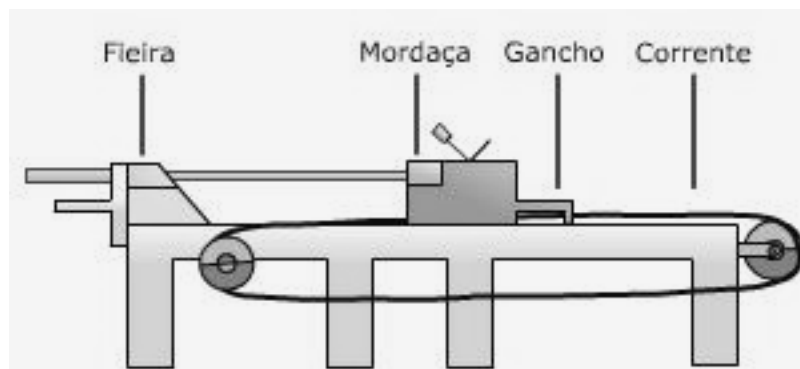


Figura: Trefiladora de bancada

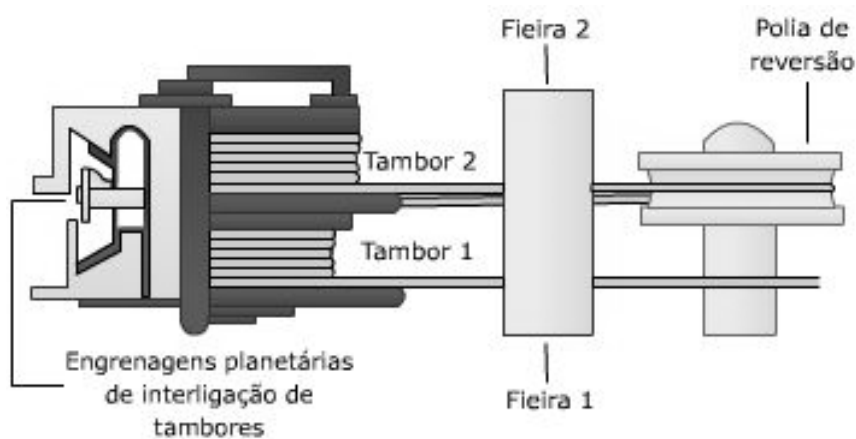


Figura: Trefiladora de tambor

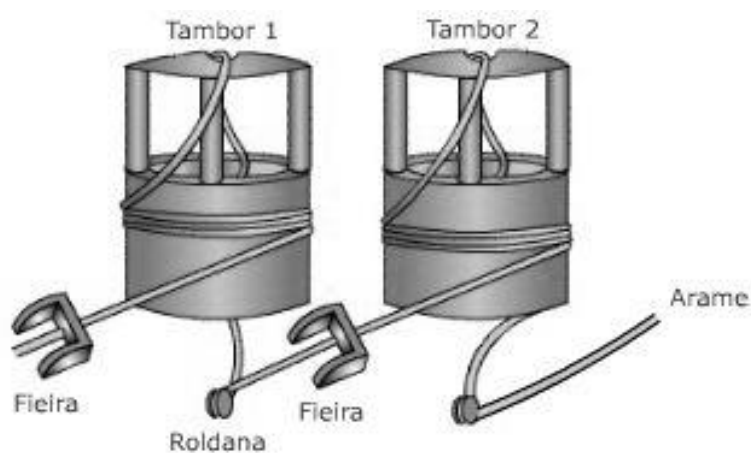
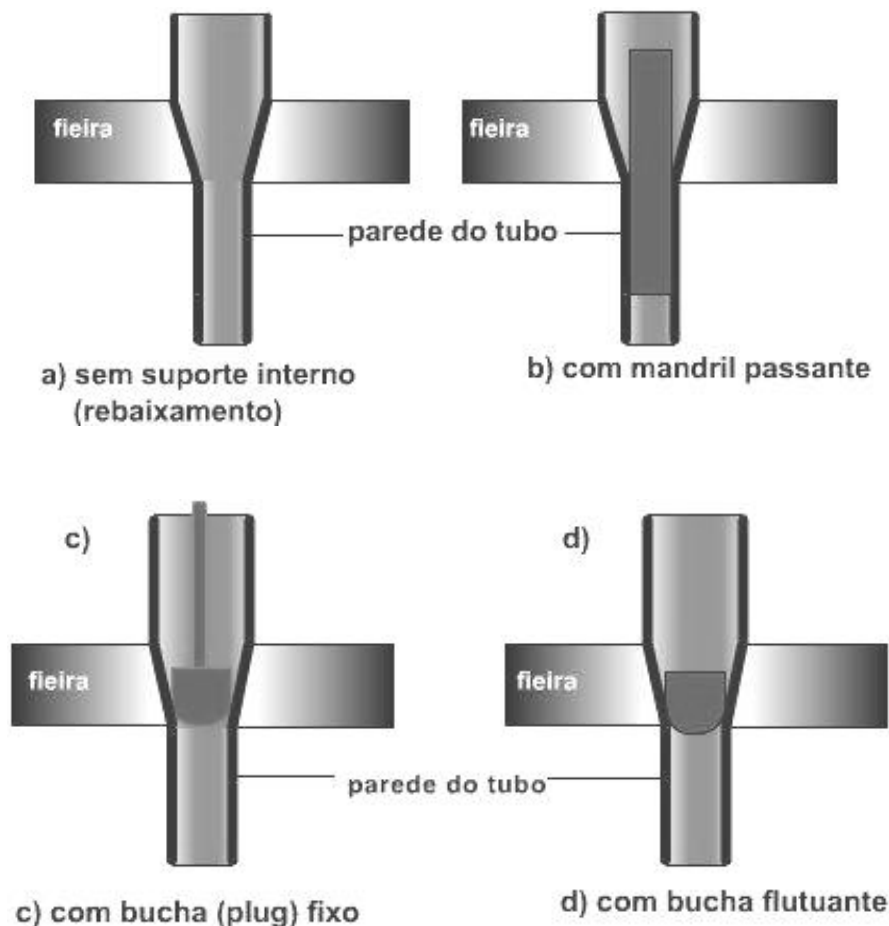


Figura: Trefiladora de tambor

2.3 Trefilação de tubos

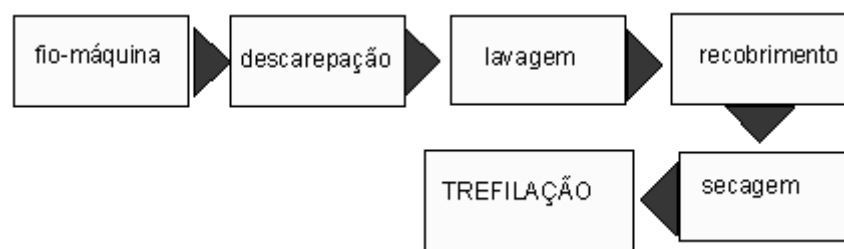
Os tubos podem ser trefilados de quatro modos: sem apoio interno (rebaixamento ou afundamento – figura a); com mandril passante (figura b); com bucha interna (figura c); com bucha flutuante (figura d).



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



- Matéria-prima: fio-máquina (vergalhão laminado a quente);
- Descarepação mecânica (descascamento: dobramento e escovamento) e química (decapagem: com HCl ou H₂SO₄ diluídos);
- Lavagem: em água corrente;

- Recobrimento: comumente por imersão em leite de cal Ca(OH)_2 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), que também remove H_2 dissolvido na superfície do material;
- Trefilação. Os primeiros passes são a seco. Eventualmente há recobrimento com Cu ou Sn. Posteriormente trefilação a úmido (com lubrificante).

Tratamento Térmico dos Arames: Depois da trefilação os arames são submetidos a tratamentos térmicos para alívio de tensões e/ou obtenção de propriedades mecânicas desejadas. Os dois principais tratamentos utilizados são:

Tratamento	Recozimento	Patenteamento
Indicação	Principalmente para arames de baixo Carbono.	Aços de médio a alto carbono ($\text{C} > 0,25\%$).
Tipo	Subcrítico, entre 550° e 650°C .	Aquecimento acima da temperatura crítica (região γ) seguido de resfriamento controlado, ao ar ou em banho de chumbo mantido entre 450 e 550°C .
Objetivo	Remover efeitos do encruamento.	Obter uma melhor combinação de resistência e ductilidade que a estrutura resultante (perlita fina ou bainita) fornece.

Análise da trefilação de arames

A) Carga: Para cada passe de trefilação, a carga necessária pode ser estimada pela seguinte expressão:

$$P_t = \bar{\sigma}_e \cdot \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) \cdot (1 + \mu \cdot \cot g \alpha \cdot \phi \cdot A_1)$$

onde: $\bar{\sigma}_e$ = tensão de escoamento média em tração uniaxial

A_0 = área transversal inicial da peça (aramé)

A_1 = área transversal do arame após a trefilação

μ = coeficiente de atrito médio na zona de redução da fieira.

α = ângulo de abordagem (semi-ângulo da fieira)

ϕ = fator de deformação redundante, dado por:

$$\phi = 0,87 + ((1 - r) / (r)) \cdot \text{sen } \alpha \quad (\text{Rowe})$$

r = redução percentual por passe, dada por :

$$r = (A_0 - A_1) / (A_0)$$

OBSERVAÇÃO: Para cada redução dada existe um valor ótimo do ângulo de abordagem (α), que é aquele que minimiza a carga e conseqüentemente o trabalho total de trefilação, W_t . Quanto maior é α , menor será a área de contato, e conseqüente menor atrito (W_a). Quanto maior é α , maior será a força para a conformação porque maior é a redução (W_r).

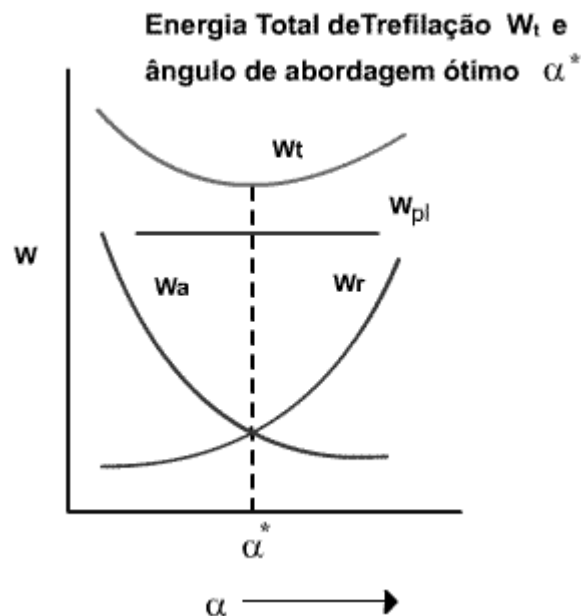
$$W_t = W_{pl} + W_a + W_r$$

W_{pl} = trabalho de deformação plástica homogênea (independente de α)

W_a = trabalho de atrito (diminui se α aumenta)

W_r = trabalho de redução (cresce se α aumenta)

$\alpha^* \Rightarrow W_t$ mínimo



B) Modos especiais de deformação na trefilação:

a - Se o ângulo de abordagem da trefila é superior a um certo valor crítico α_{cr1} ocorre um cisalhamento interno no material, separando-se uma zona que adere a fieira e forma uma falsa matriz (zona morta) através da qual prossegue a trefilação. O valor crítico é dado por:

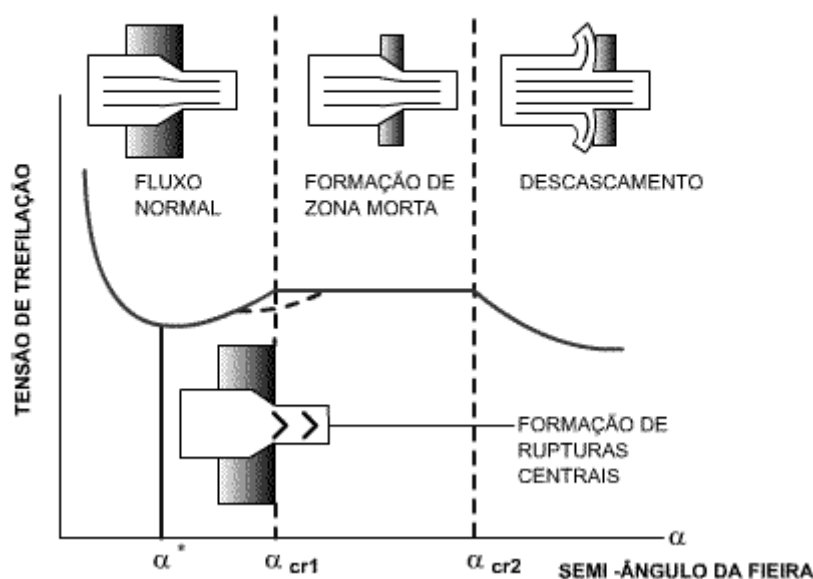
$$\alpha_{cr1} = \text{ângulo crítico} \quad \alpha_{cr1} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \ln \frac{D_0}{D_1}}$$

b - Se o ângulo de abordagem excede um outro valor crítico,

$$\alpha_{cr2} > \alpha_{cr1}$$

a zona morta formada não adere à fieira e sim desliza para trás (descansamento); a camada superficial da peça se destaca e o núcleo da mesma deixa de se deformar, atravessando a trefila com velocidade de saída igual à de entrada. Veja na figura abaixo as condições de fluxo em relação aos ângulos críticos.

Correlação da Geometria de Fluxo com o Semi-Ângulo da Fieira



2.5 Defeitos

Os defeitos mais comuns em trefilação são apresentados abaixo.

- Diâmetro irregular: causado por partículas duras que ficam retidas na fieira e posteriormente se desprendem.
- Fratura irregular formando cones: causada por redução pequena e ângulo de fieira muito grande, com acentuada deformação da parte central.
- Marcas em forma de “v” ou fratura em ângulo: causadas por redução grande e parte cilíndrica pequena, com inclinação do fio na saída; ruptura de parte da fieira com inclusão de partículas no contato fio-fieira; inclusão de partículas duras estranhas.
- Fratura irregular com estrangulamento: causada por esforço excessivo devido à lubrificação deficiente ou redução excessiva.
- Fratura com risco lateral ao redor da marca de inclusão: causada por partícula dura incluída no fio inicial proveniente da laminação ou extrusão.

- Fratura com trinca aberta em duas partes: causada por trincas de laminação.

2.6 Exercícios

1. Porque os materiais usados nas fieiras possuem alta dureza?
2. Diferencie trefiladora de bancada de trefilaora de tambor.
3. Qual a importância das etapas preliminares na trefilação dos arames de aço?
4. Qual a importância de utilizar o ângulo ótimo de abordagem?

3. CONFORMAÇÃO DE CHAPAS

Conformação de chapas é o processo de transformação mecânica que consiste em conformar uma chapa 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. 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. As principais são: corte em prensa, dobramento e estampagem profunda, que também é conhecida por repuxo ou embutimento.

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 realizar o trabalho em uma só operação ou operações progressivas.

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.

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 sub-prensa, 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 a chapa 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 (veja o prensa chapas na figura da página 30).

3.1 Corte de chapas

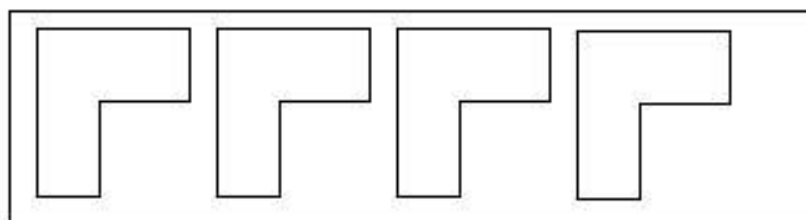
Destina-se à obtenção de formas geométricas, a partir de chapas submetidas à ação de pressão exercida por um punção ou uma lâmina de corte. Quando o punção ou a lâmina inicia a penetração na chapa, o esforço de compressão converte-se em esforço cisalhante (esforço cortante) provocando a separação brusca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

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

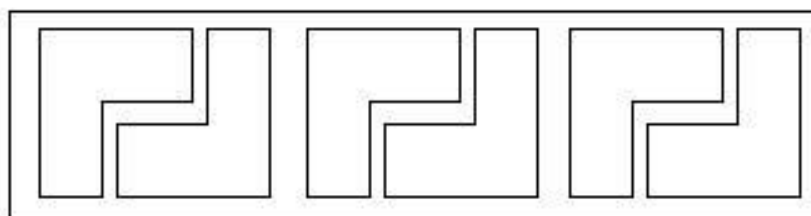
- A operação de corte é usada para preparar o material para posterior estampagem. A parte desejada é cortada (removida) da chapa original.
- A fabricação de furos em prensa (piercing ou punching) caracteriza uma operação de corte em que o metal removido é descartado.
- A fabricação de entalhes (notching) nas bordas de uma chapa pode ser feita em prensa através do puncionamento 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.

Os principais parâmetros a serem considerados nestas operações são: folgas entre punção (macho) e matriz; aproveitamento máximo da chapa (layout); forças envolvidas na operação; dimensionamento da matriz; e escolha de molas para prensa. Destes veremos apenas os três primeiros.

Layout da chapa: O estudo econômico, também chamado de *layout* de tira, é o estudo que proporciona o aproveitamento máximo da chapa ou, em outras palavras, a obtenção da maior quantidade de peças em uma mesma chapa. Este estudo visa encontrar a melhor distribuição das peças na chapa bem como calcular as distâncias ótimas entre as várias peças. No exemplo abaixo, o aproveitamento de chapa do *layout* B é melhor que do *layout* A, o que significa uma produtividade 50% maior.



Layout A



Layout B

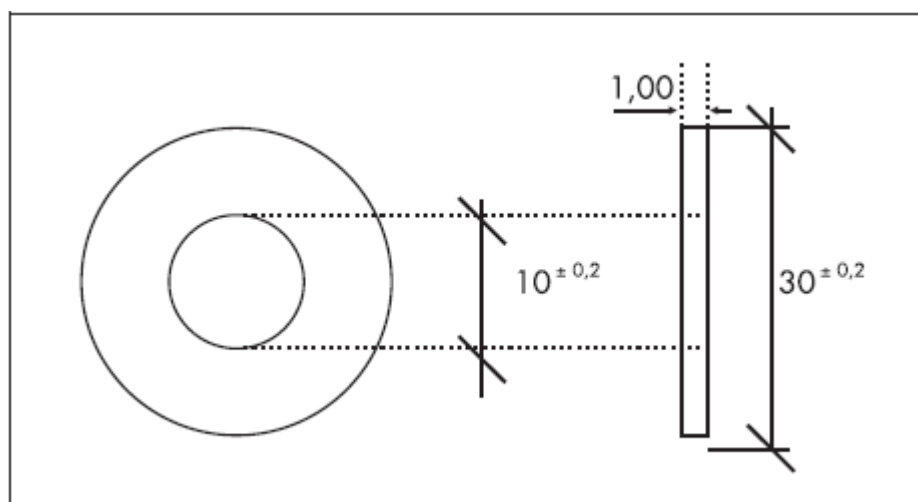
Folga entre punção e matriz: A aresta de corte apresenta em geral três regiões: uma rugosa (correspondente à superfície da trinca da fratura), uma lisa (formada pelo atrito da peça com as paredes da matriz) e uma região

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 da chapa, a folga é selecionada em função da força mínima de corte.

Recomenda-se, para furos, que as folgas totais não superem a 10% da espessura (5% por face) para impedir que um excesso de material resultante da perfuração escoe para dentro da matriz, acompanhando o movimento do punção. Para espessuras inferiores a 1,00 mm, a folga deve estar situada entre 0,03 e 0,04 mm do raio. A folga deve levar em conta ainda as tolerâncias da peça obtida.

Exemplo: Dimensionar o ferramental para a produção de uma arruela de aço inox com diâmetro externo de 30 mm e diâmetro interno de 10 mm, com uma espessura de 1,00 mm.



Considerando-se uma folga de 5% da espessura por face, tem-se:

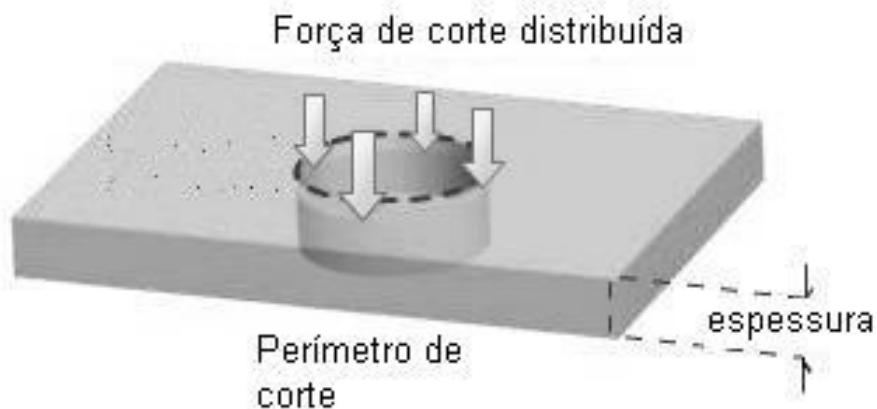
$$\text{folga} = 1,00 \times 0,10 = 0,10 \text{ mm}$$

Para a determinação do diâmetro do macho (punção), deve-se tomar a medida máxima do furo. Para as dimensões externas, parte recortada da peça, a medida da matriz deve estar na faixa mínima da tolerância. Esta precaução se deve ao fato de haver desgaste tanto do macho como da matriz, à medida que se estampam as arruelas.

Existe um processo relativamente recente de corte fino de chapas (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 chapas 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.

Forças de corte: A força de corte depende diretamente do tipo de material, da espessura da chapa e do perímetro de corte. A espessura da chapa e o perímetro de corte são grandezas facilmente conhecidas.



A influência do material na força de corte vem por meio do valor da τ_r (tensão de ruptura), que é uma função da tensão de ruptura (σ_r). Lembrando que a correlação se dá aproximadamente:

Material	Ruptura
Aço < 0,3%C e Alumínio	$\tau_r = 0,6 \sigma_r$
Aço 0,3 a 0,7%C	$\tau_r = 0,75 \sigma_r$
Aço > 0,7%C	$\tau_r = \sigma_r$

Desta forma, o cálculo da força de corte F_c pode ser feito a partir da fórmula abaixo, que é função da espessura da chapa, do perímetro de corte e da tensão de ruptura:

$$F_c = e \cdot p \cdot \tau_r$$

Onde,

F_c = força de corte;
 e = espessura da chapa;
 p = perímetro de corte;
 τ_r = tensão de ruptura.

A prática de se construir as arestas de corte inclinadas, tanto para o punção como para a matriz, diminui a força de corte necessária por possibilitar

um corte progressivo. Quando a parte cortada é a peça final, a inclinação deve ser feita na matriz, e quando a parte cortada é retalho, a inclinação deve ser feita no punção. Veja abaixo comparativo entre forças de corte com ou sem inclinação das arestas.

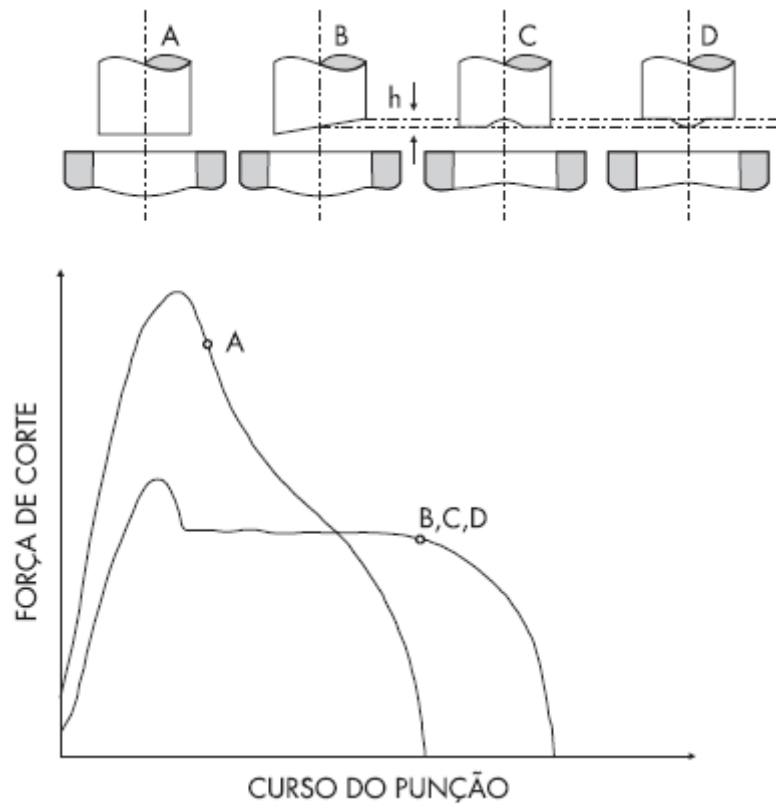
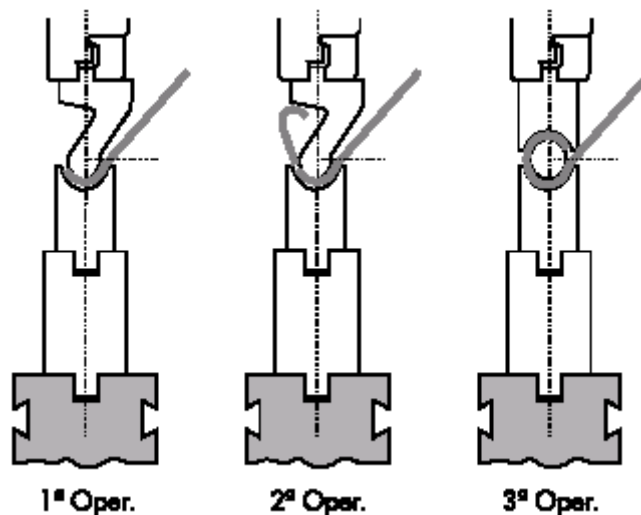


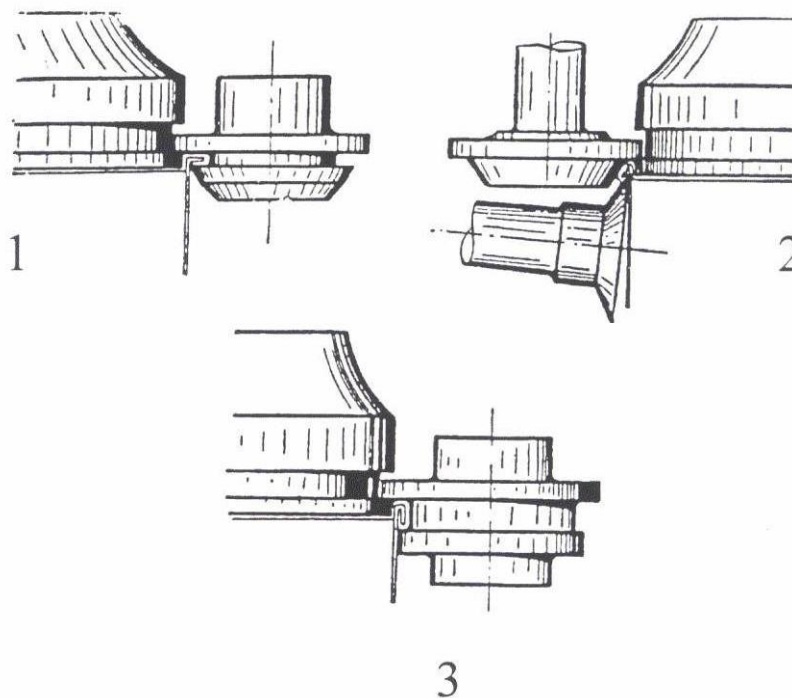
Gráfico de forças de corte envolvidas em função da inclinação das arestas de corte

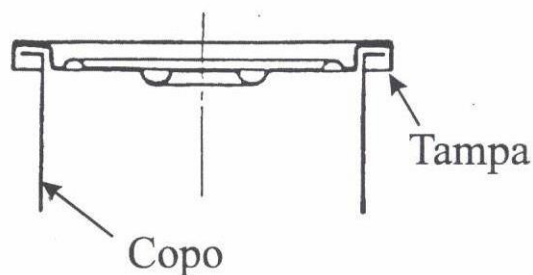
3.2 Dobramento

No dobramento, a chapa sofre uma deformação por flexão em prensas que fornecem a energia e os movimentos necessários para realizar a operação. A forma é conferida mediante o emprego de punção e matriz específicas até atingir a forma desejada. O dobramento pode ser conseguido em uma ou mais operações, com uma ou mais peças por vez, de forma progressiva ou em operações individuais. Dobramento em prensas dobradeiras em várias operações:

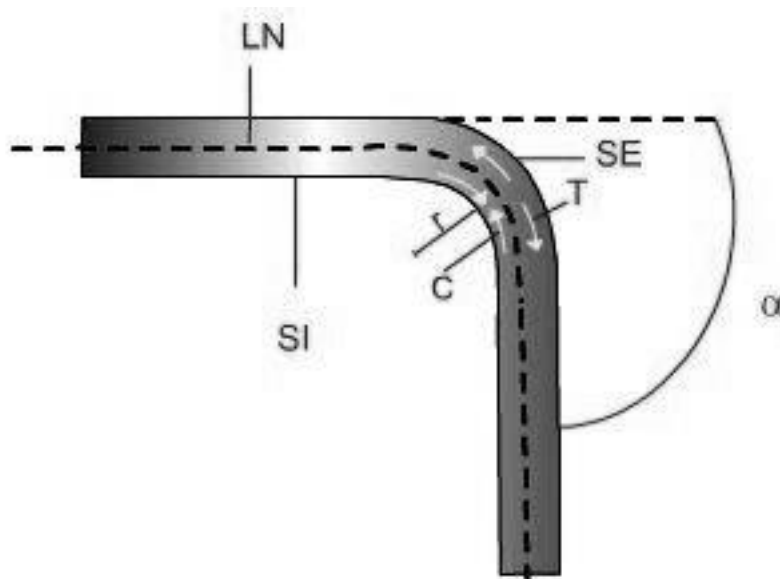


Etapas na fabricação de um recipiente enlatado:





Na operação de dobramento, a chapa 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 abaixo mostra os esforços atuantes e a forma adquirida por uma tira submetida a dobramento.



LN: Linha neutra

r: Raio de concordância

SI :Superfície interna

C : Força de compressão

SE: Superfície externa

T : Força de tração

Raio de dobramento: Quanto menor o raio de dobramento, maior é a tensão desenvolvida na região tracionada. Um excessivo tracionamento provocado por um pequeno raio de dobramento pode vir a romper as fibras externas da chapa dobrada. Define-se o raio interno mínimo de dobra, como o menor valor admissível para o raio para se evitar grande variação na espessura da chapa na região dobrada. Este valor é dado em função do alongamento longitudinal máximo do material³ e da espessura da chapa que está sendo dobrada. Para a determinação do raio de dobramento, utiliza-se a seguinte fórmula:

³ O alongamento longitudinal máximo é obtido a partir de diagramas tensão x deformação. Este valor de deformação será obtido na tensão limite de resistência. A partir desta tensão, o material sofre estricção, que é a variação na espessura (para chapas) ou diâmetros para eixos.

$$R_{\min} = \frac{50e}{Al\%} - \frac{e}{2}$$

onde $R_{\min}$ = raio mínimo

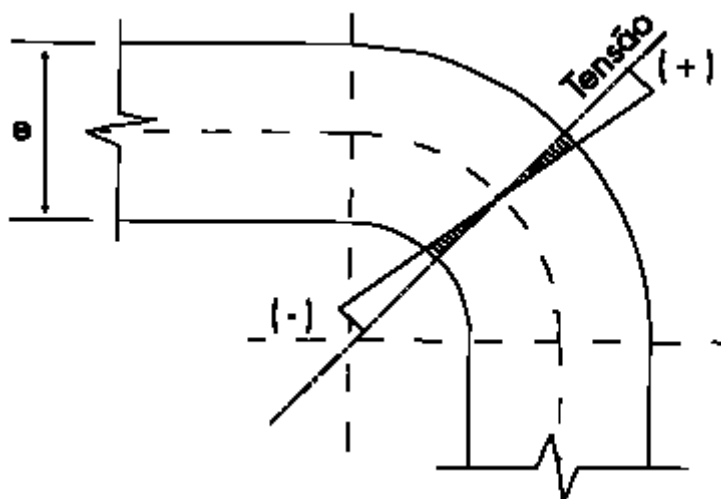
$Al\%$ = alongamento % da chapa

e = espessura da chapa

Por exemplo: o raio de dobramento mínimo para uma chapa de 1,5 mm com alongamento longitudinal máximo de 60% é de:

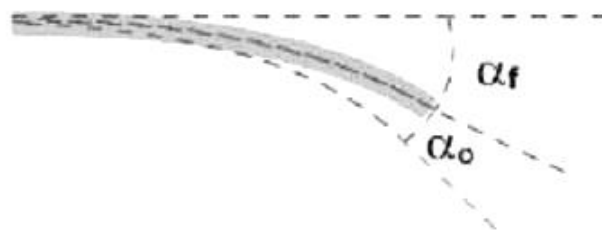
$$R_{\min} = 50 \cdot 1,5 / 60 - 1,5 / 2 = 0,94 \text{ mm}$$

Efeito mola: O dobramento é uma operação onde ocorre uma deformação por flexão. Quando um metal é dobrado, a sua superfície externa fica tracionada e a interna comprimida. Estas tensões aumentam a partir de uma linha interna neutra, chegando a valores máximos nas camadas externa e interna.



Desta forma, uma parte das tensões atuantes na seção dobrada estará abaixo do limite de proporcionalidade (máxima tensão abaixo do qual o material segue a lei de Hooke - região de deformação elástica) e a outra parte supera a este limite, conferindo à peça uma deformação plástica permanente. Uma vez cessado o esforço de dobramento, a parte da seção que ficou submetida a tensões inferiores ao limite de proporcionalidade, por ter permanecido no domínio elástico, tende a retornar à posição inicial anterior ao dobramento. Como resultado, o corpo dobrado apresenta um pequeno “retorno elástico” ou efeito mola (“spring back”) que deve ser compensado durante a operação de dobramento.

α_0 ângulo inicial, antes da liberação de carga
 α_f ângulo final



Portanto, 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.

Em alguns casos, é utilizada a prática de se efetuar uma calibragem em estampo específico, já compensado o retorno elástico, para dar as dimensões finais da peça. Este procedimento é viabilizado em produção seriada onde o custo do estampo calibrador pode ser diluído no preço unitário da peça.

3.3 Estampabilidade dos metais

Estampabilidade é a capacidade que a chapa metálica tem de adquirir a forma de uma matriz, pelo processo de estampagem sem se romper ou apresentar qualquer outro tipo de defeito de superfície ou de forma.

A avaliação da estampabilidade de uma chapa metálica depende de muitos testes, tais como: ensaios simulativos (tipo Erichsen, Olsen, Fukui, etc.), ensaios de tração (obtendo-se o limite de escoamento e de resistência, a razão elástica, o alongamento total até a fratura, o coeficiente de encruamento, os coeficientes de anisotropia normal e planar), ensaios de dureza, medida da rugosidade do material, metalografia, etc.

Ainda assim, a análise é incompleta, pois nas operações reais de estampagem ocorre uma combinação complexa de tipos de conformação. A estampabilidade torna-se função não somente das propriedades do material, mas também das condições de deformação e dos estados de tensão e de deformação presentes.

Anisotropia⁴: Durante os processos de conformação de chapas, grãos cristalinos individuais são alongados na direção da maior deformação de tração. O alongamento é consequência do processo de escorregamento do material durante a deformação. Nos materiais policristalinos os grãos tendem a girar para alguma orientação limite devido a um confinamento mútuo entre grãos. Este mecanismo faz com que os planos atômicos e direções cristalinas dos materiais com orientação aleatória (materiais isotrópicos) adquiram uma textura, uma orientação preferencial (tornando-se anisotrópicos).

⁴ Um material isotrópico possui as mesmas propriedades físicas em todas as direções. Já um material anisotrópico tem comportamento não uniforme nas várias direções do material.

A distribuição de orientações tem, portanto, um ou mais máximos. Se estes máximos são bem definidos são chamados de orientações preferenciais, que irão ocasionar variações das propriedades mecânicas com a direção, ou seja, anisotropia. Um modo de avaliar o grau de anisotropia das chapas quando deformadas plasticamente é através do coeficiente de anisotropia.

Coeficiente de anisotropia: Por definição, o coeficiente de anisotropia ou coeficiente de Lankford (r) é a razão entre a deformação longitudinal verdadeira na largura (ϵ_w) e na espessura (ϵ_t) de um corpo de prova de tração (em chapa), após determinada deformação longitudinal pré-definida

coeficiente de anisotropia
ou de Lankford

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t}$$

por erros na medição de ϵ_t , e como $\Delta V=0$, usa-se :

$$\epsilon_t = -(\epsilon_w + \epsilon_l) \quad r = -\frac{\epsilon_w}{\epsilon_w + \epsilon_l}$$

$$\text{ou} \quad r = \frac{\ln(w_0/w_f)}{\ln(l_f w_f / l_0 w_0)}$$

ϵ_l é a deformação verdadeira ao longo do comprimento

Onde:

ϵ_l - deformação verdadeira ao longo do comprimento;

w_0 e w_f - larguras inicial e final, respectivamente;

l_0 e l_f - comprimentos inicial e final, respectivamente.

Considerando a anisotropia no plano da chapa, geralmente são definidos dois parâmetros:

a) Coeficiente de anisotropia normal ($\bar{r}$):

coeficiente de anisotropia normal

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + 2 \times r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4}$$

onde: r_{0° , r_{45° e r_{90° são os valores de r (coeficiente de anisotropia) medidos a 0° , 45° e 90° com a direção de laminação.

Este parâmetro indica a habilidade de uma certa chapa metálica resistir ao afinamento (redução de espessura), quando submetida a forças de tração e/ou compressão, no plano.

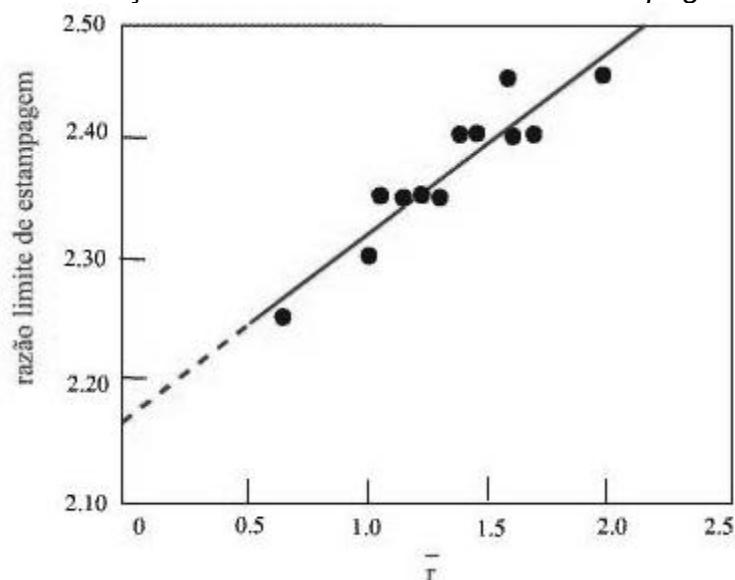
b) Coeficiente de anisotropia planar (Δr):

coeficiente de anisotropia planar
$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2 \times r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2}$

O coeficiente de anisotropia planar indica a diferença de comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa.

Um material isotrópico tem $\bar{r} = 1$ e $\Delta r = 0$. Nos materiais para estampagem profunda um alto valor de $\bar{r}$ é desejado (maior resistência ao afinamento da chapa). A relação entre $\bar{r}$ e a razão limite de estampagem é mostrada na figura. Essa é definida como a máxima razão possível entre o diâmetro da chapa e do copo embutido, sem que ocorra falha.

Gráfico: Relação entre $\bar{r}$ e a razão limite de estampagem



Os valores de $\bar{r}$ em aços efervescentes variam entre 0,8 e 1,2. Em aços acalmados ao alumínio, adequadamente produzidos, $\bar{r}$ pode variar entre 1,5 e 1,8. Em alguns aços IF (Interstitial free) $\bar{r}$ pode ser tão alto quanto 2,2. Na direção oposta, a textura cúbica do cobre ou de aços inoxidáveis austeníticos pode originar $\bar{r}$ tão baixo quanto 0,1.

A tendência à formação de "orelhas" na estampagem é função da anisotropia planar. As "orelhas" se formam em duas condições: a 0° e 90° com a direção de laminação, quando o coeficiente de anisotropia planar (Δr) é maior que zero; e a 45° e 135° com a direção de laminação, quando o coeficiente de anisotropia planar é menor que zero.

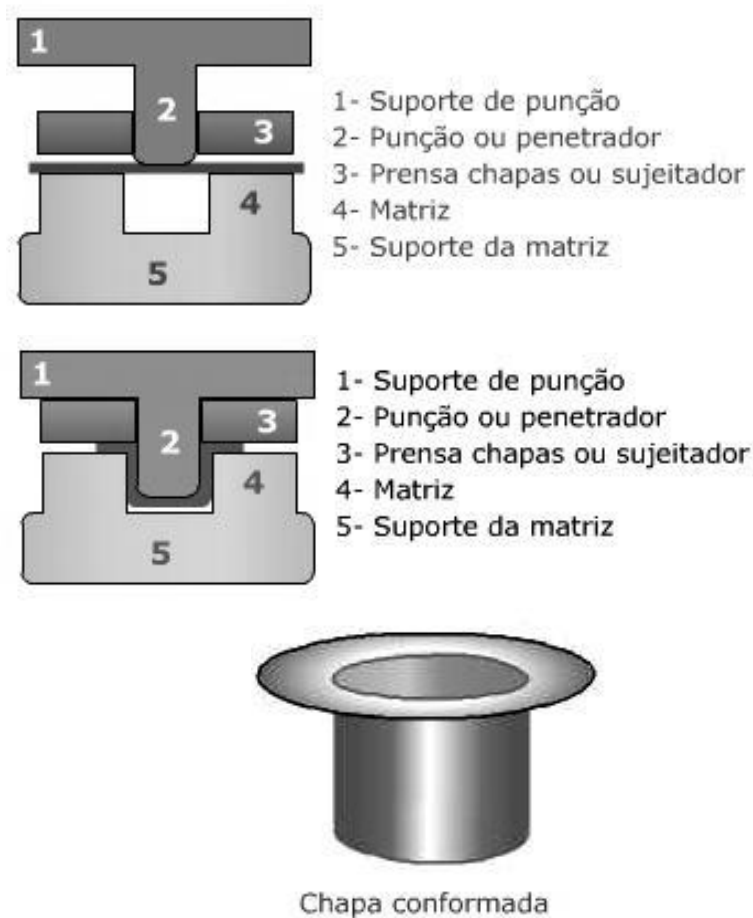
Influência da anisotropia na qualidade e precisão da estampagem profunda: Os valores de coeficientes de anisotropia normal e planar são funções da textura cristalográfica desenvolvida no material após o recozimento da tira. A textura, por sua vez, é função de vários parâmetros do processo: composição química, temperaturas de acabamento e de bobinamento após o

laminador de tiras a quente, quantidade de redução a frio, taxa de aquecimento, tempo e temperatura de encharque no recozimento.

A anisotropia cristalográfica tem menor influência sobre operações de pouca conformação. Inicialmente, esta propriedade foi considerada indesejável em materiais destinados a operações de estampagem, devido à chance de formação de orelhas. Mas é ainda mais importante no que se refere à estampagem profunda, uma vez que nesta operação não se deseja a diminuição significativa da espessura do material.

3.4 Estampagem profunda (embutimento ou repuxo)

O repuxo ou embutimento é uma operação de estampagem onde uma chapa, inicialmente plana, é transformada em um corpo oco sem que haja aparecimento de rugas e trincas. As ferramentas que permitem a obtenção da forma desejada são chamadas de estampos, constituídos por um punção, uma matriz e um sujeitador chamado de prensa-chapa. Durante a operação de repuxo, o punção obriga a chapa penetrar na matriz movido pela ação de uma força. O material da chapa flui para dentro da matriz, configurando gradativamente as paredes laterais da peça. O processo é empregado na fabricação de diversas peças (pára-lamas; portas de carros; painéis; 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.

Capacidade de alongamento: A capacidade de alongamento de um material é importante para operações de estampagem profunda, e depende diretamente do coeficiente de anisotropia normal.

Em materiais com elevado coeficiente de anisotropia normal, a deformação localizada causa um incremento rápido da resistência mecânica e o material se torna capacitado a resistir cada vez mais à deformação. Mas em materiais de pequeno coeficiente, a deformação localizada causa estricção (redução de seção) e uma perda da resistência mecânica.

Lubrificação: 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.).

Freqüentemente, à medida que se aumenta a efetividade de um lubrificante, aumenta também a dificuldade de sua remoção, tanto da matriz quanto do produto. A seleção de um lubrificante é tão crítica que algumas indústrias modificam seus processos de fabricação somente para permitir o uso de lubrificante de mais fácil remoção. Isso porque, em alguns casos, o solvente mais adequado para a remoção do lubrificante não pode ser utilizado por reagir com o material do produto.

Ferramental: 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 da chapa 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 seqüência 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.

3.5 Exercícios

1. Qual a importância de se definir o *layout* de uma chapa na operação de corte?
2. Calcule a força de corte para uma arruela com as dimensões $\varnothing_{ex} = 30$ mm, $\varnothing_{in} = 10$ mm e espessura = 2 mm. Considerar $\sigma_e = 100$ MPa.

3. Calcule o raio de dobramento mínimo para uma chapa com espessura de 2 mm e alongamento longitudinal máximo = 40%.
4. Explique porque ocorre o efeito mola.
5. Explique o que é um material isotrópico e um anisotrópico, e qual a importância de um alto coeficiente de anisotropia planar para a estampagem profunda.
6. Qual a importância da lubrificação para a indústria que usa o processo de estampagem profunda?

Resposta dos Exercícios

Extrusão

1. Vantagem: forças menores para extrusão; Desvantagem: as cargas são limitadas, limitando o processo devido ao furo do êmbolo.
2. Baixíssima fricção e pequenos ângulos de matriz.
3. O fluxo adequado do material depende diretamente do ângulo da matriz. Um fluxo inadequado causa vários defeitos.
4. Quente: vantagem - aumenta ductilidade do material; desvantagem - acabamento superficial ruim devido à oxidação. Frio: vantagem - resultam melhores propriedades mecânicas; desvantagem - forças maiores de extrusão.

Trefilação

1. Para suportar os esforços da trefilação.
2. Trefiladora de bancada produz componentes não bobináveis, como barras e tubos, enquanto a trefiladora de tambor produz apenas arames.
3. A limpeza das impurezas superficiais evita vários defeitos.
4. A energia total utilizada para trefilar é mais baixa, diminuindo custos.

Conformação de Chapas

1. Um *layout* bem feito produz mais a um custo menor.
2. $F_c = 20096 \text{ N}$.
3. $R_{min} = 2,5 \text{ mm}$.
4. Ocorre porque uma parte da seção da chapa permaneceu abaixo da tensão limite de proporcionalidade, fazendo a chapa retornar um pouco quando a força de dobramento acaba.
5. Isotrópico é o material que possui orientação aleatória dos grãos cristalino, enquanto o material anisotrópico possui orientação preferencial. A importância do alto coeficiente de anisotropia planar para a estampagem profunda se dá pela maior resistência ao afinamento da chapa que o material oferece, facilitando o processo.
6. Aumenta a vida útil do ferramental e diminui as forças para conformação, diminuindo os custos do processo.

Referência Bibliográfica

MESQUITA, Eduardo L.A; RUGANI, L.L. **Estampagem dos aços inoxidáveis**. Belo Horizonte: ACESITA, 1997.

CETLIN, P. R.; HELMAN, H. **Fundamentos da Conformação**. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

Conformação das Chapas. Em www.cimm.com.br, acessado em 26/10/2006.

Processos de Fabricação. Volume I. Apostila do Curso Técnico em Mecânica. Telecurso 2000.

SOUZA, André Roberto de. **Estampagem**. Florianópolis: ETFSC, 1996.