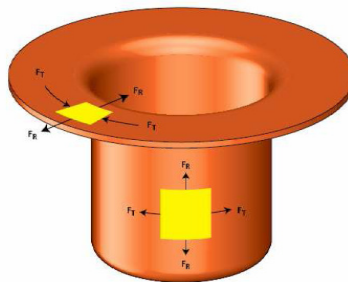


CURSO: GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DISCIPLINA: Conformação Mecânica (GEM-34)

Prof. Volodymyr Ponomarov (ponomarev@mecanica.ufu.br)

Conformação de chapas

corte, dobramento, embutimento, estiramento



Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



1/102

Topicos

Conformação de chapas (Estampagem)

- ✓ Corte
- ✓ Dobramento
- ✓ Estampabilidade dos metais
- ✓ Estampagem profunda (embutimento ou repuxo)
- ✓ Estiramento



Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



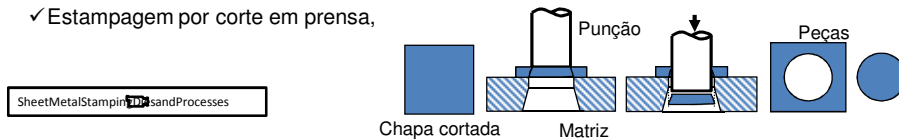
2/102

Conformação de chapas (Estampagem). Introdução

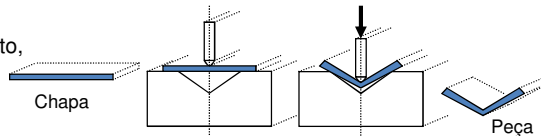
Conformação de chapas: é um conjunto dos processos de fabricação de peças, através do corte ou deformação de chapas geralmente a frio. Emprega-se a conformação de chapas para se fabricar peças com paredes finas feitas de chapa ou fita de diversos metais e ligas.

Classificação dos Processos: A conformação de chapas metálicas finas (ou estampagem) pode ser classificada através do tipo de operação empregada. As principais são:

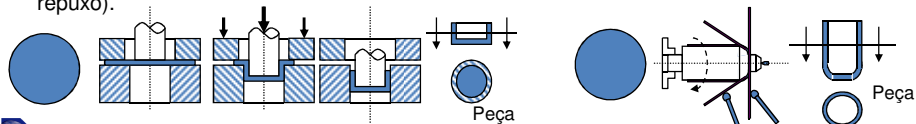
- ✓ Estampagem por corte em prensa,



- ✓ dobramento e encurvamento,



- ✓ estampagem profunda (que também é conhecida pelos processos do embutimento ou repuxo).



Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



3/102

Conformação de chapas (Estampagem). Introdução

Enquanto o corte e o dobramento são realizadas a frio, a estampagem profunda pode eventualmente ser a quente, dependendo da necessidade.

A conformação da chapa pode ser simples, quando se executa uma só operação, ou combinada. Com a ajuda da conformação de chapas, fabricam-se peças de aço baixo carbono, aços inoxidáveis, alumínio, cobre e de diferentes ligas não ferrosas. Devido às suas características este processo de fabricação é apropriado, preferencialmente, para as grandes séries de peças, obtendo-se grandes vantagens, tais como: produção em série, custo baixo das peças, bom acabamento sem necessidade de posterior processo de usinagem, peças com grande resistência e o custo baixo do controle de qualidade devido à uniformidade da produção e a facilidade para a detecção de desvios.

Como principal desvantagem deste processo, podemos destacar o alto custo do ferramental, que só pode ser amortizado se a quantidade de peças a produzir for elevada.



Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



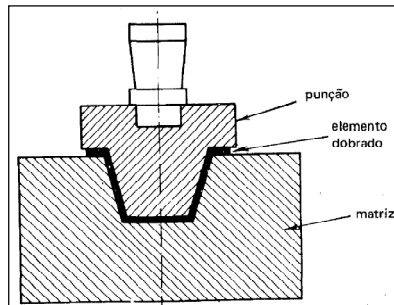
4/102

Ferramental

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.



Ferramental. Prensa-chapas

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 sujeitador, ou ainda, em prensas de duplo efeito por um anel de



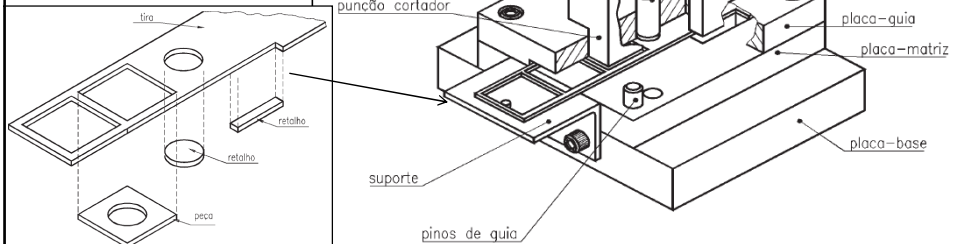
Prensa-chapas
(anti-rugas)

Sheet Metal Shearing and Bending (até 1 mm/50 s)



Ferramental. Estampos

Os estampos compõem-se de um conjunto de peças ou placas que, associado a prensas ou balancins, executa operações de corte (ou/e de dobra) para produção de peças em série. A imagem à direita é de um estampo de corte.



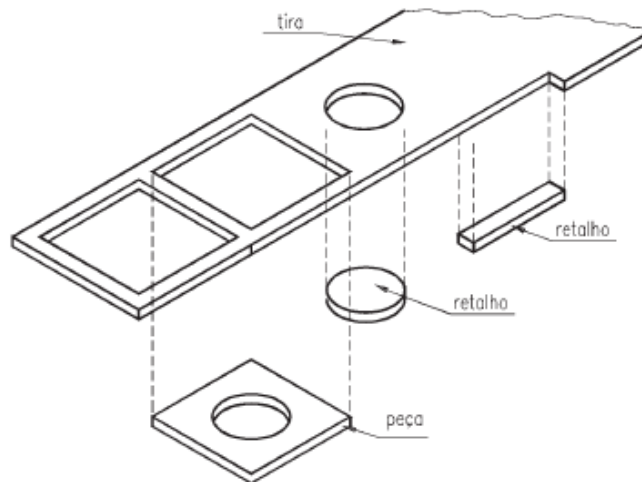
Veja o slide seguinte
Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



7/102

Estampos

Durante o processo, o material é cortado de acordo com as medidas das peças a serem estampadas. Quando cortamos numa tira de material as formas de que necessitamos, a parte útil obtida recebe o nome de **peça**. O restante de material que sobra chama-se **retalho** (ou **fefugo**), como na figura a baixo.



Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



8/102

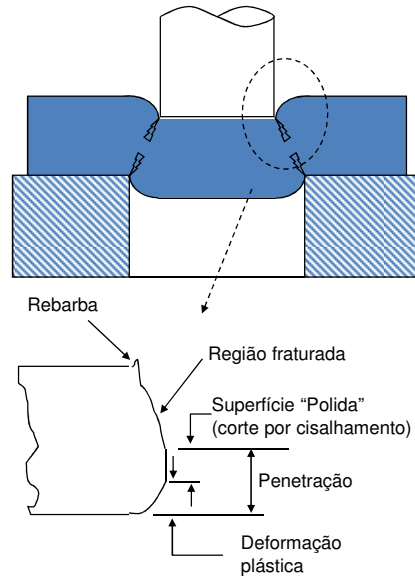
Estampagem por corte

Estampagem por corte: é o processo de separação por fratura controlada.

O corte (e a furação) normalmente é a operação de preparação, para receber o "blank". O "blank" é um disco plano de dimensões conhecidas onde será estampada a peça.

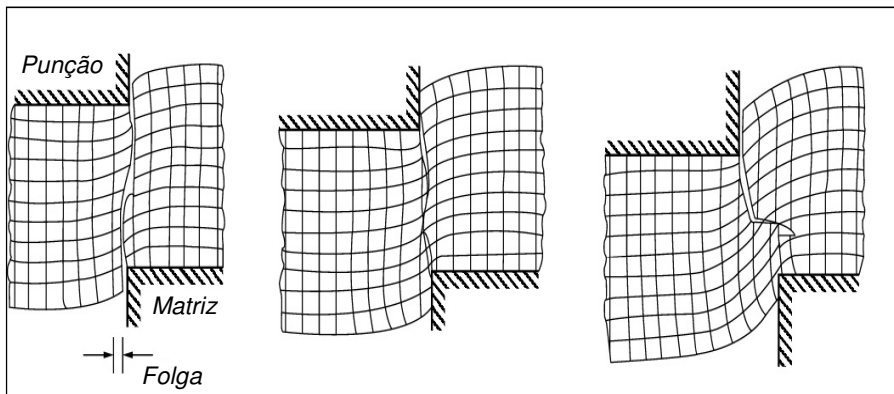
A aresta de corte apresenta, em geral, três regiões: uma rugosa (correspondente à superfície da trinca da fratura), uma lisa (formada pelo atrito da peça com as paredes da matriz) e uma região arredondada (formada pela deformação plástica inicial).

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.



Estampagem por corte. Cisalhamento

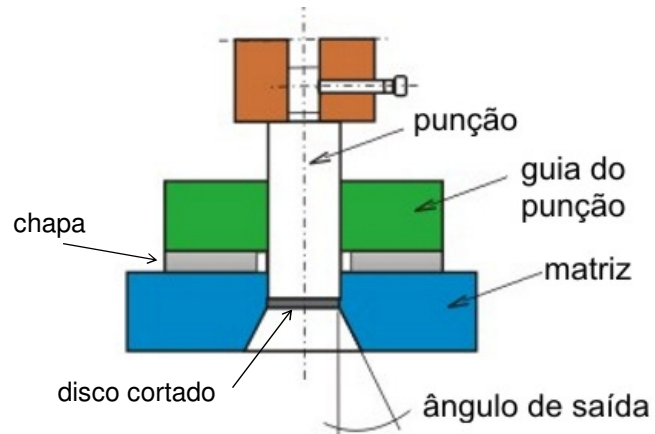
O corte de chapas sempre ocorre por cisalhamento, e a qualidade da aresta cortada é função do processo escolhido. Nos processos que usam prensas simples, em geral o corte (penetração) acontece no máximo em 1/3 da espessura da chapa, sendo o restante "quebrado" por efeito de tensões de tração (vulgarmente chamado "estouro"). Nos processos "corte fino", o "estouro" é limitado a no máximo 10% da espessura da chapa, gerando peças com qualidade de aresta muito superior ao convencional.



Estampagem por corte. Punção e matriz

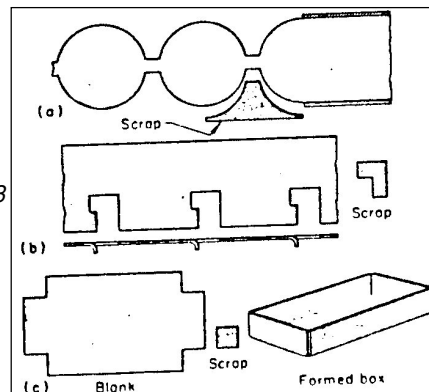
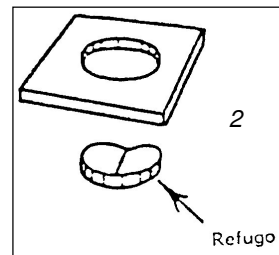
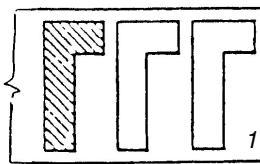
O processo de **estampagem por corte** é usado na obtenção de formas geométricas em chapas por meio de uma ferramenta de corte, ou *punção de corte*, por intermédio de uma prensa exercendo pressão na chapa apoiada numa matriz.

A figura abaixo mostra os componentes principais de uma matriz. O punção deve ter a secção conforme o contorno da peça desejada, do mesmo modo, a cavidade da matriz.



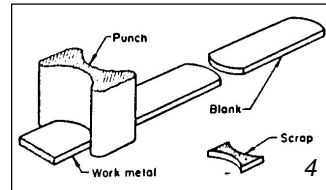
Operações de corte

1. **Recorte** (peça desejada é retirada da chapa)
2. **Puncionamento ou perfuração**
3. **Entalhamento**
4. Seccionamento
5. Cisalhamento
6. Aparamento
7. Refilamento
8. Recorte progressivo
9. Recorte fino

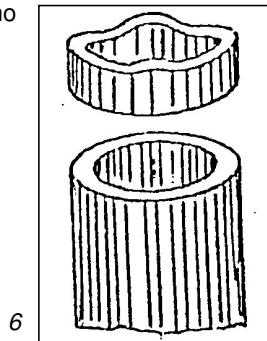


Operações de corte

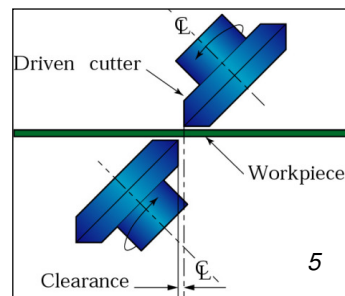
1. Recorte (peça desejada é retirada da chapa)
2. Puncionamento ou perfuração
3. Entalhamento
4. Seccionamento
5. Cisalhamento
6. Aparamento
7. Refilamento
8. Recorte progressivo
9. Recorte fino



Seccionamento: separa uma peça da chapa segundo duas linhas abertas, balanceando as forças e deixando refugo

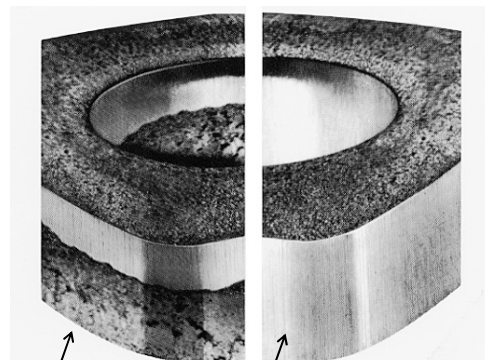
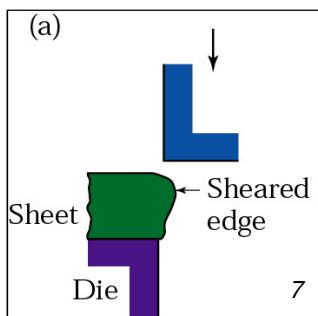
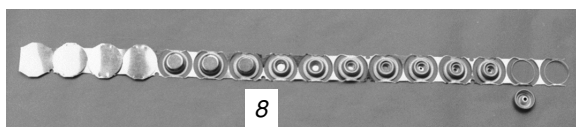


Aparamento: remoção material em excesso, incluindo rebarbas.



Operações de corte

1. Recorte
2. Puncionamento ou perfuração
3. Entalhamento
4. Seccionamento
5. Cisalhamento
6. Aparamento
7. Refilamento
8. Recorte progressivo
9. (Re)corte fino



9 – Corte convencional x Recorte fino (corte utilizando folgas muito pequenas - $\sim 5 \mu\text{m}$ - e montagens muito rígidas de ferramentas)

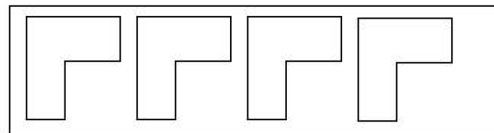


Estampagem por corte. Aproveitamento da chapa

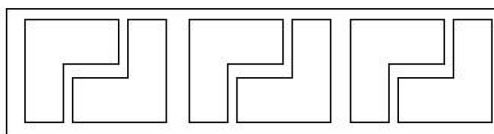
Os principais parâmetros a serem considerados na operação do estampagem por corte são: aproveitamento máximo da chapa; folgas entre punção (macho) e matriz; forças envolvidas na operação; dimensionamento da matriz; e escolha de molas para prensa. **Destes veremos apenas os três primeiros.**

Aproveitamento da chapa: O estudo econômico, também chamado de aproveitamento da tira, é o estudo que proporciona o aproveitamento máximo de 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 "B" da chapa é melhor que o do "A", o que significa uma produtividade 50% maior.



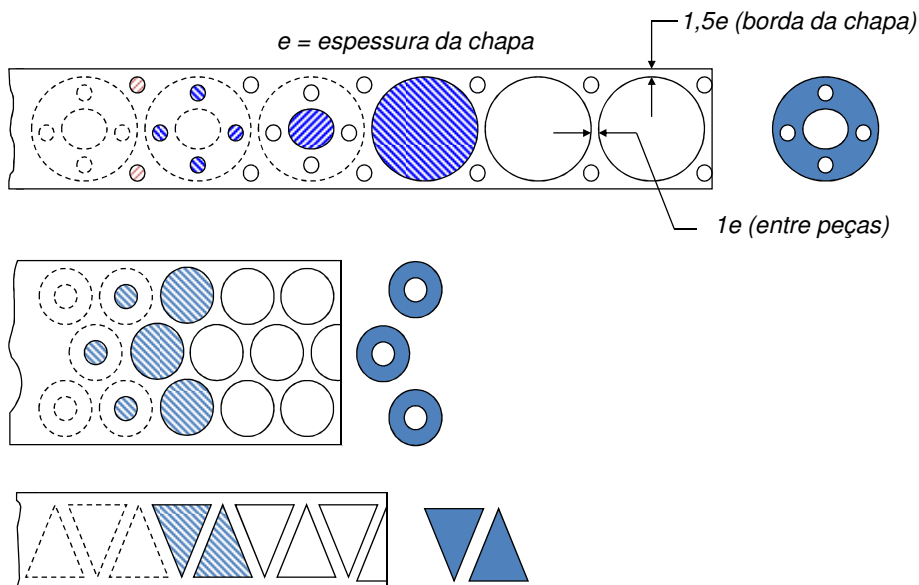
Aproveitamento A



Aproveitamento B



Estampagem por corte. Aproveitamento da chapa

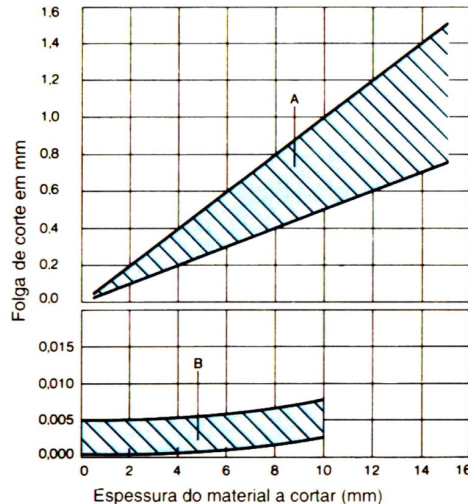


Estampagem por corte. Folga de corte

Uma variável fundamental nos processos de corte é a chamada “luz de corte”, termo utilizado para designar a diferença dimensional entre o punção e a matriz (ou folga de corte).

A folga proporciona a propagação das trincas que se iniciam na borda das lâminas e vão através do metal até próximo da região central da espessura ocasionando um corte muito mais eficiente e sem deformações não prevista.

O valor da folga é função da espessura de chapa, do processo de corte e da qualidade da chapa. A folga em excesso leva à aumento do recalque, havendo risco de quebra da ferramenta devido ao aumento da força necessária para o corte; folgas muito pequenas aumentam o atrito substancialmente acarretando aumento da força e degeneração da aresta gerada na peça, implicando perda de qualidade.



A folga de corte recomendada para processo normal (A) e Corte Fino (B) (THYSEN)



Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



17/102

Estampagem por corte. Folga de corte

No corte por matriz e punção 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: espessura da chapa (e) aspecto superficial do corte, imprecisões, operações posteriores e aspectos funcionais.

Recomenda-se, para furos, que as folgas totais não superem a 10% da espessura (5% por face ou $e/20$) 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.

Folga entre punção e matriz (f):

$$f = \frac{\varphi_m - \varphi_p}{2}$$

φ_m = diâmetro da matriz

φ_p = diâmetro do punção

e = espessura da chapa

$$\text{Aço doce, latão} \rightarrow f = \frac{e}{20}$$

$$\text{Aço meio duro} \rightarrow f = \frac{e}{16}$$

$$\text{Aço duro} \rightarrow f = \frac{e}{14}$$



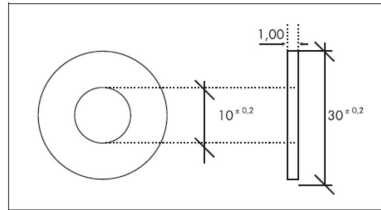
Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



18/102

Estampagem por corte. Folga de corte

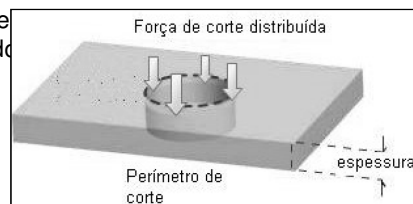
Exemplo: Dimensionar o ferramental para a produção de uma arruela de aço inox com diâmetro externo de 30 mm e diâmetro interno de 10 mm, com uma espessura de 1,00 mm. Considerando-se uma folga de 5% da espessura por face, tem-se: folga = $1,00 \times 0,10 = 0,10$ mm.



Estampagem por corte. Forças de corte

Forças de corte: A força de corte (o esforço de corte, ou cisalhamento) 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 (resistência ao cisalhamento do material), que é uma função da resistência a tração do material (σ). Lembrando que a correlação se dá aproximadamente (veja tabela):



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:

$$F_c = e \cdot p \cdot \tau$$

Onde,

F_c = força de corte;

e = espessura da chapa;

p = perímetro de corte;

τ = resistência ao cisalhamento do material.

Trabalho de Corte: $W_c = k_c \cdot P_c \cdot h$

Onde: k_c = fator dependente do material
($0,4 < k_c < 0,7$)



Estampagem por corte. Forças de corte

Usando a equação $F_c = e \times p \times \pi$ podemos descobrir o esforço de corte.

Ex.: Qual o esforço de cisalhamento num aço de 2 mm de espessura, a fim de se ter uma figura com 4 cm do perímetro e com resistência a tensão de 60 kg/mm²?

$$F_c = e \times p \times 0,75 \times \pi$$

$$F_c = 2 \times 4 \times 0,75 \times 60 = 360 \text{ kg ou } 0,36 \text{ t.}$$

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 a direita comparativo entre forças de corte com ou sem inclinação das arestas.

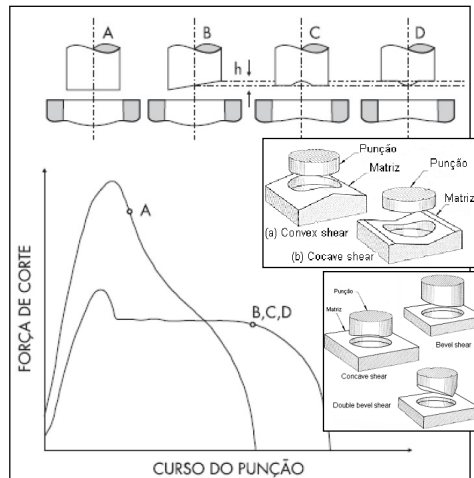
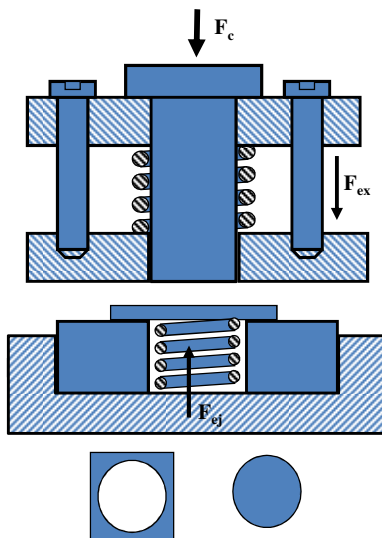


Gráfico de forças de corte envolvidas em função da inclinação das arestas de corte



Estampagem por corte. Forças no processo de corte



F_{ex} = força de extração

$F_{ex} = 7\% F_c$ corte em "plena chapa"

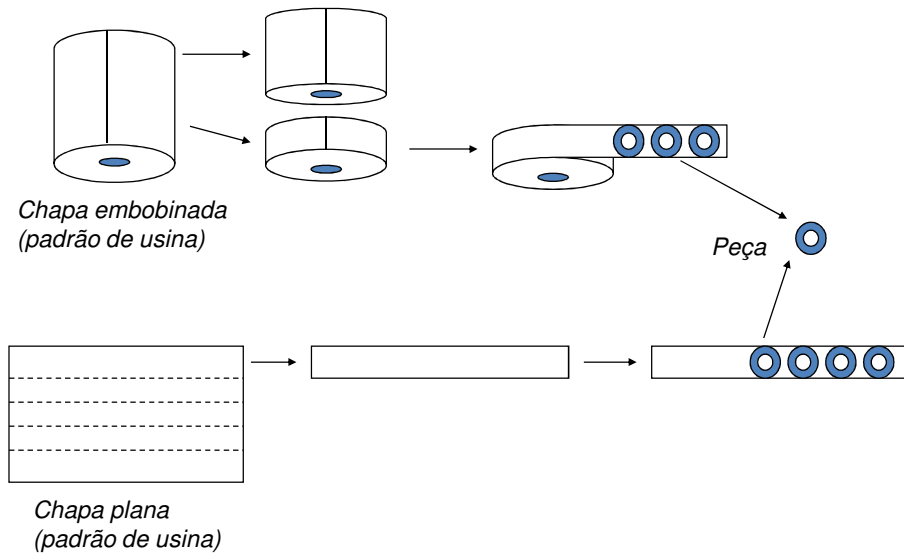
$F_{ex} = (2 \text{ a } 7)\% F_c$ sobras maiores que 3e

$F_{ex} = 2\% F_c$ sobras normais

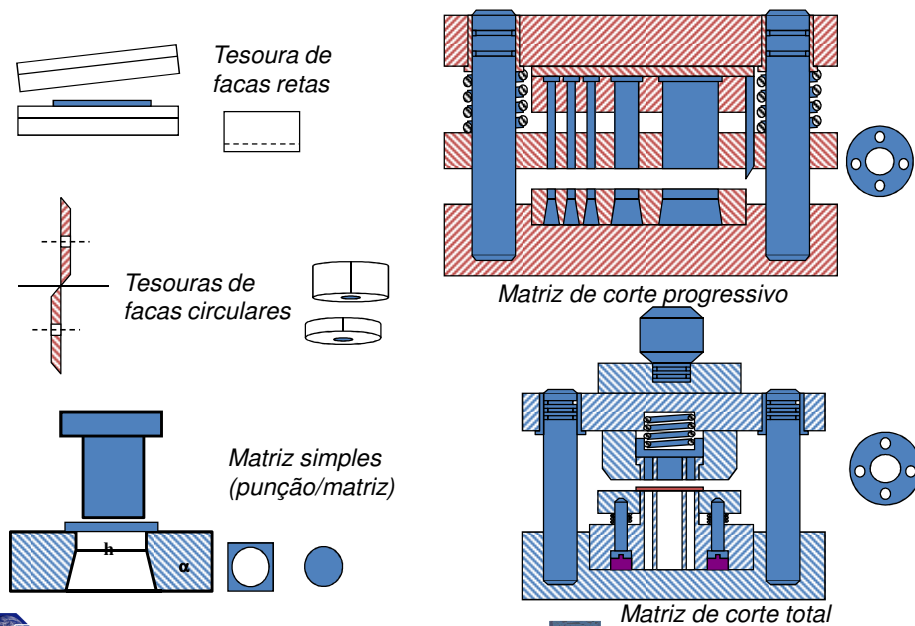
$F_{ej} = 1,5\% F_c$ força de ejeção



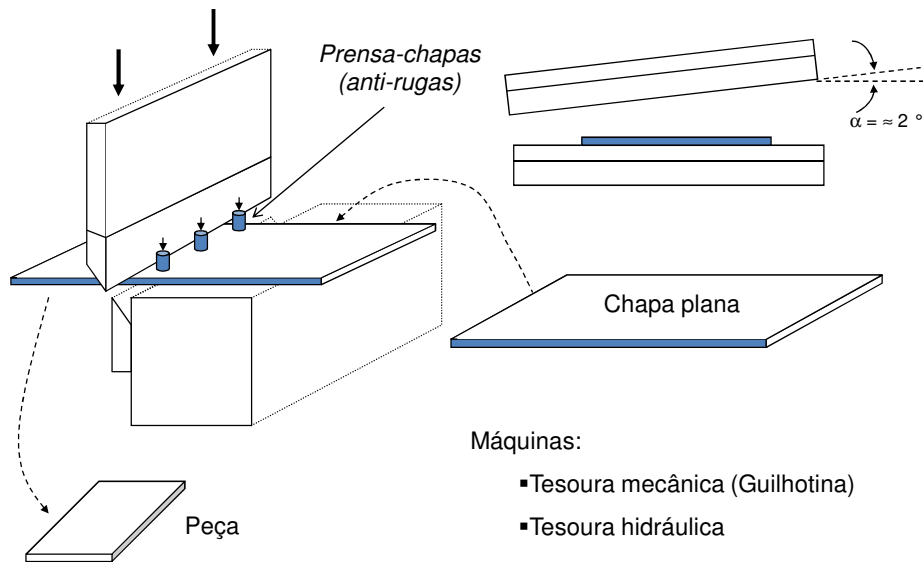
Estampagem por corte. Sucessão da fabricação das peças



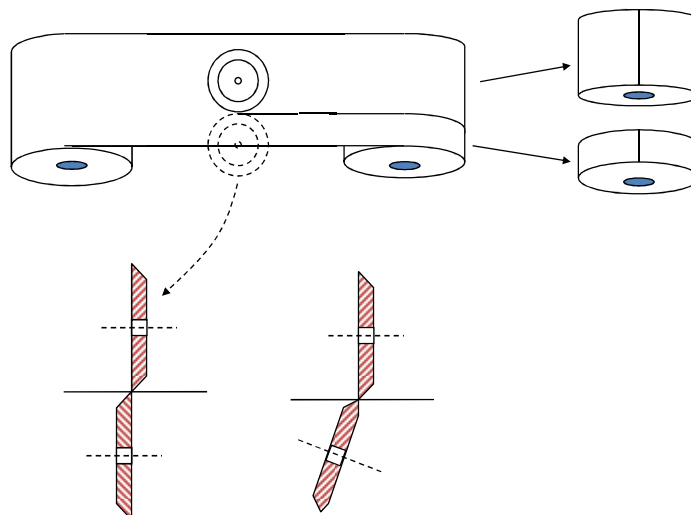
Estampagem por corte. Ferramentas de corte



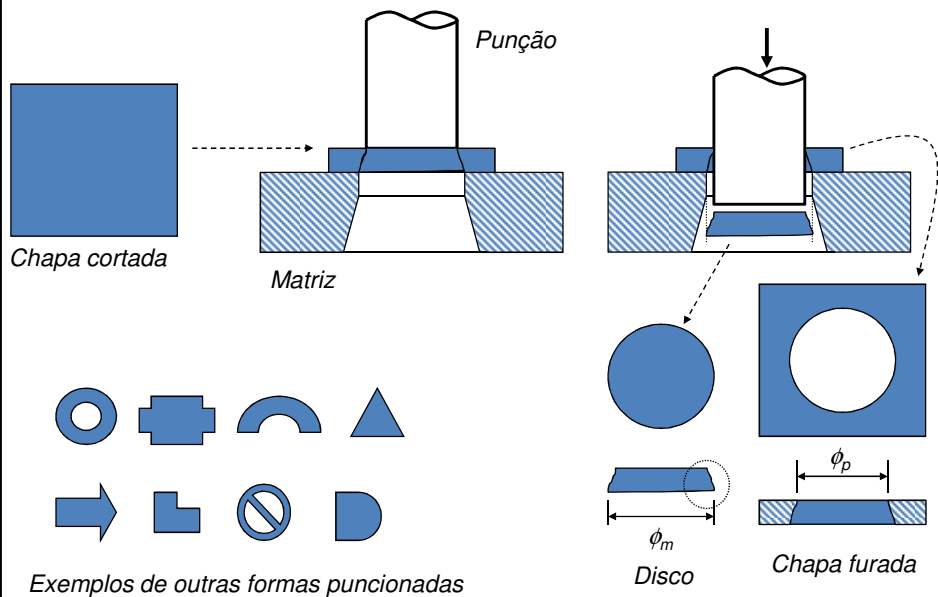
Corte de chapa plana com tesoura de facas retas



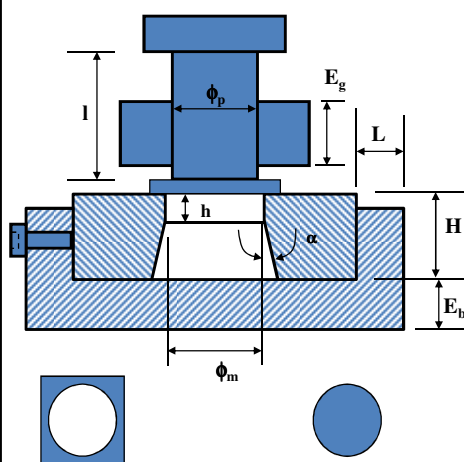
Corte de chapa embobinada com tesouras rotativas



Estampagem por corte. Puncionamento. Matriz simples



Estampagem por corte. Puncionamento. Matriz simples



L (com parafuso)	23	30	36	44	54	74	84
L (sem parafuso)	20	26	30	35	45	60	70

Dimensões do punção :

l_0 = comprimento de flambagem

l = comprimento do punção

$$l_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 EJ_{\min}}{F}} \quad \text{Para } \lambda = \frac{l_0}{\rho_{\min}} \geq 100$$

λ = índice de esbeltez

ρ = raio de giração

$l_0 = 2l$ para punção não guiado

$l_0 = 0,75l$ para punção guiado

considerar sempre $d \geq e$ e = esp. da chapa

Dimensões da matriz

$$H = 10\sqrt{F - 3} \quad \text{fórmula empírica}$$

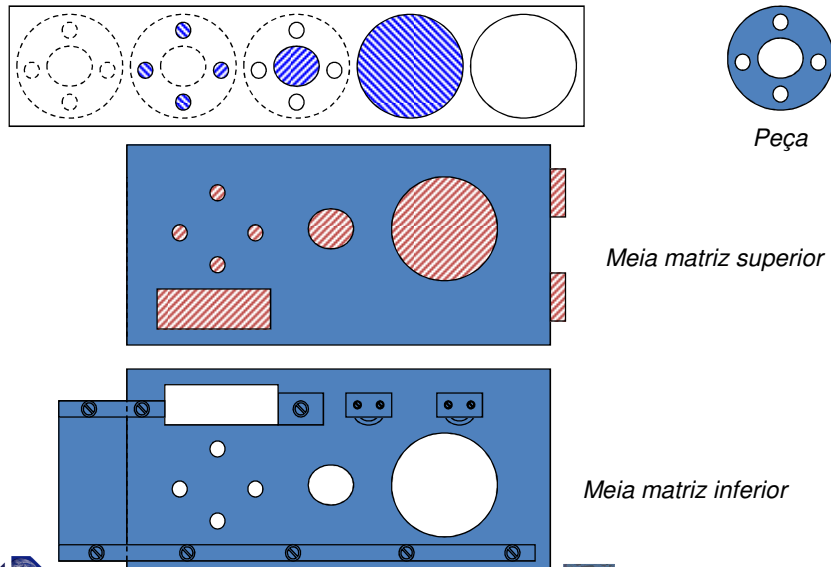
$$h = (3 \text{ a } 4)e \rightarrow e \leq 2\text{mm}$$

$$h = (1,5 \text{ a } 2)e \rightarrow e > 2\text{mm}$$

$$\alpha = (2 \text{ a } 5)^0 \quad E_g = f(\Phi d)$$



Estampagem por corte. Puncionamento. Matriz de corte progressivo

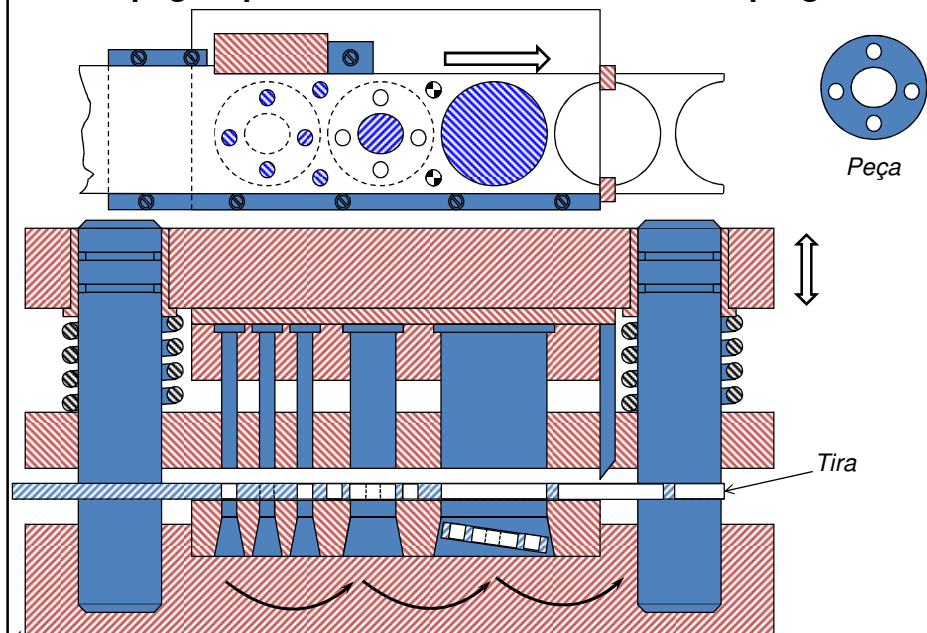


Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



29/102

Estampagem por corte. Puncionamento. Corte progressiva

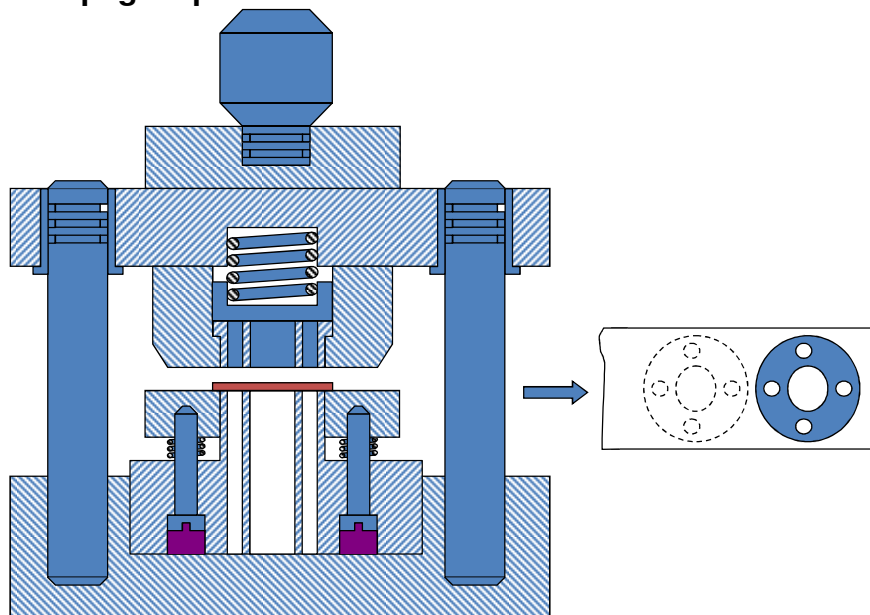


Engenharia Mecânica - V. Ponomarov

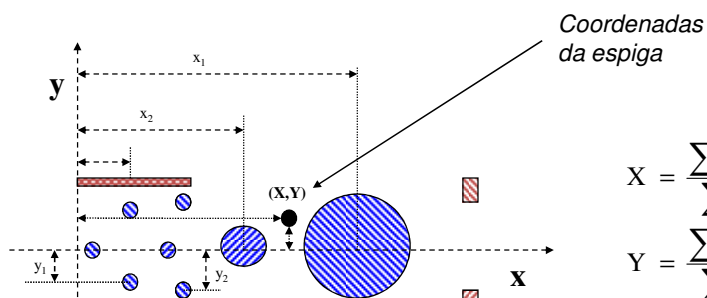
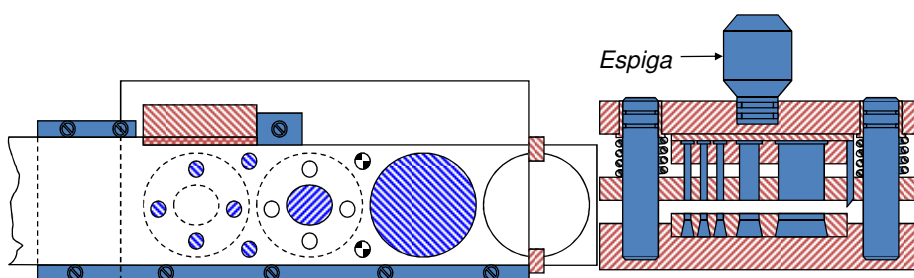


30/102

Estampagem por corte. Puncionamento. Matriz de corte total



Estampagem por corte. Posicionamento da “Espiga”

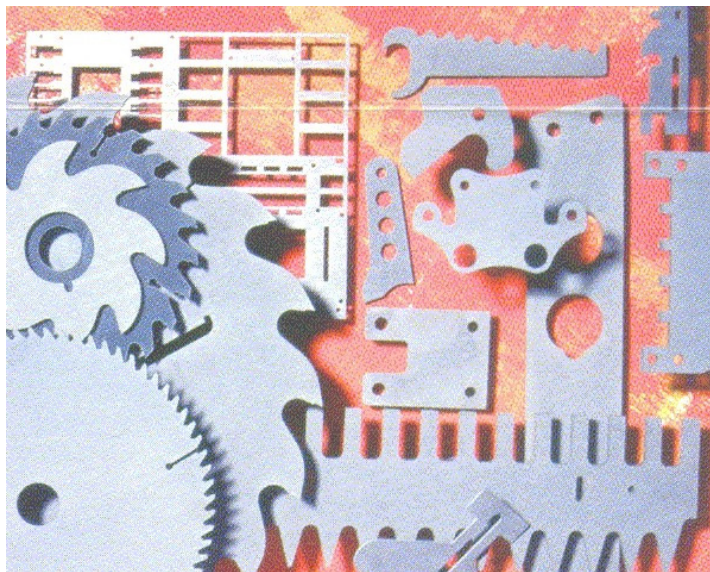


$$X = \frac{\sum x_i F_i}{\sum F_i}$$

$$Y = \frac{\sum y_i F_i}{\sum F_i}$$

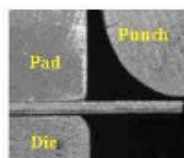


Estampagem por corte. Exemplos



Dobramento

O dobramento: é a deformação plástica de metais sobre um eixo linear com pouca ou nenhuma mudança na área superficial. O dobramento é a operação onde ocorre uma deformação por flexão.



Início



Durante



Término



Efeito mola

Peças obtidas por dobramento:

Gabinetes de CPU, estojos, painel de fotos, gabinete de máquinas de café, ...

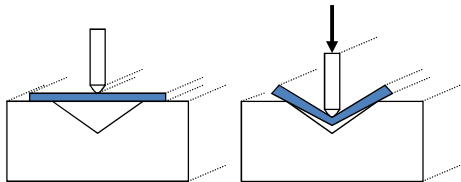
dobramento



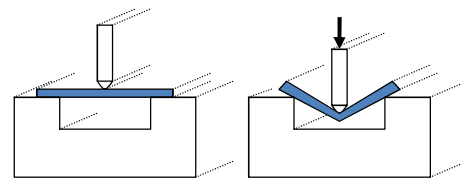
Processos de dobramento

O dobramento pode acontecer com a chapa em repouso ou com a chapa em movimento.

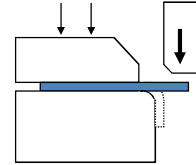
Dobramento com a chapa em repouso



Dobramento em matriz em "V"



Dobramento em matriz em "U"



Dobramento em matriz em "L"



Uma dobra



Duas dobras



Três dobras



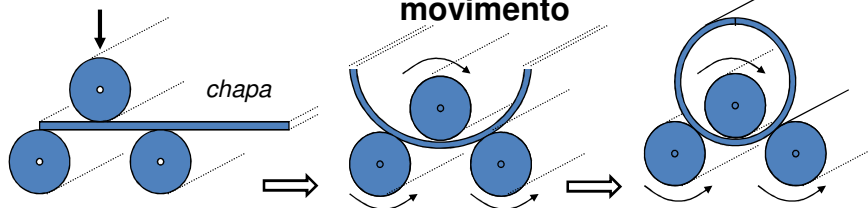
Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



Sheet Metal Bending and Bending (após 1 min 50 s)
Sheet Metal Bending

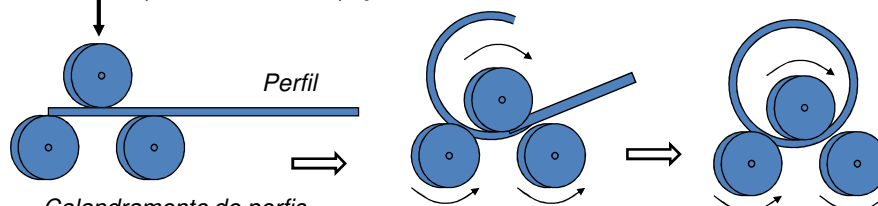
35/102

Processos de dobramento. Dobramento com a chapa em movimento



Calandramento de chapas

A calandra é uma das máquinas de conformação mais usadas na caldeiraria. Calandrar significa curvar o aço, ou seja, de uma chapa plana cria-se um tubo por exemplo. Como funciona? Parece uma engenhoca de três rolos. A calandra de passo (mais conhecida como calandra inicial): a folga entre os rolos pode ser ajustada para os diversos espessuras e diâmetros resultantes. A calandra piramidal: o rolo superior pode ser ajustado para exercer menor ou maior pressão obtendo as peças de diferentes diâmetros.



Calandramento de perfis

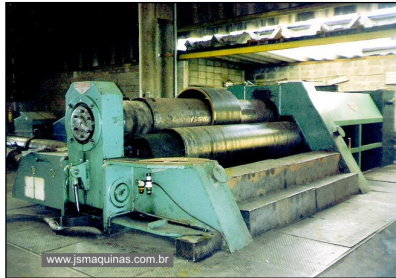


Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



36/102

Processos de dobramento. Dobramento com a chapa em movimento. Tipos de calandras



CALANDRAS DE TUBOS / PERFIS

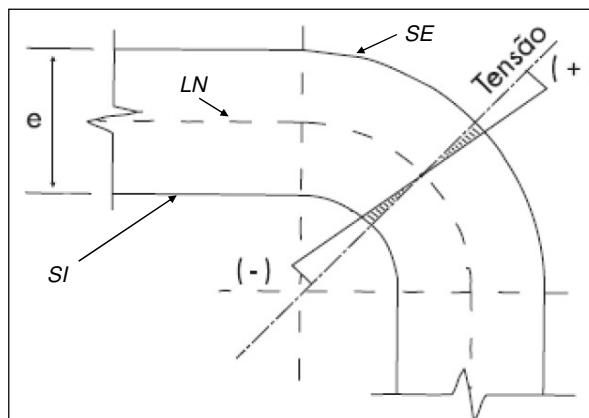


Dobramento

Comportamento do material na zona de deformação

No 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 (superfície externa - SE, que fica tracionada e a interna - SI, que é comprimida), em ângulo, com raio de concordância em sua junção. Estas tensões (*de compressão e de tração*) aumentam a partir de uma linha interna neutra - LN, chegando a valores máximos nas camadas externa e interna.

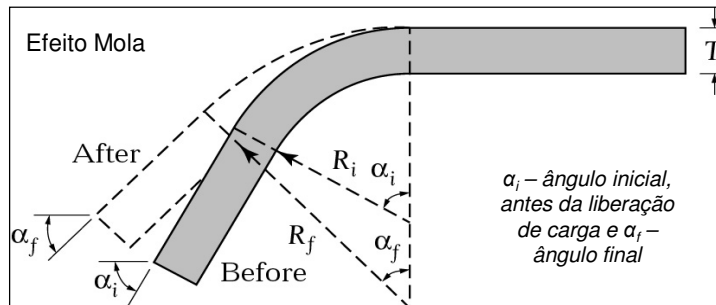
Quando se inicia o dobramento, a linha neutra está localizada no centro da espessura da tira e , conforme a operação vai sendo executada, sua tendência é deslocar-se em direção ao lado interno da curvatura (lado de compressão).



Dobramento. Efeito mola

No dobramento, 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 peça que foi dobrada tende a voltar à sua forma inicial, devido à recuperação elástica (que acontece nas ambas zonas, tanto na zona de deformação elástica, como na zona de deformação plástica ou de deformação permanente). Por isso, é preciso, ao dobrar, calcular um ângulo menor do que o desejado para que depois da recuperação elástica a forma fique com as dimensões previstas.

A recuperação elástica da peça será tanto maior quanto maior for o limite de escoamento.

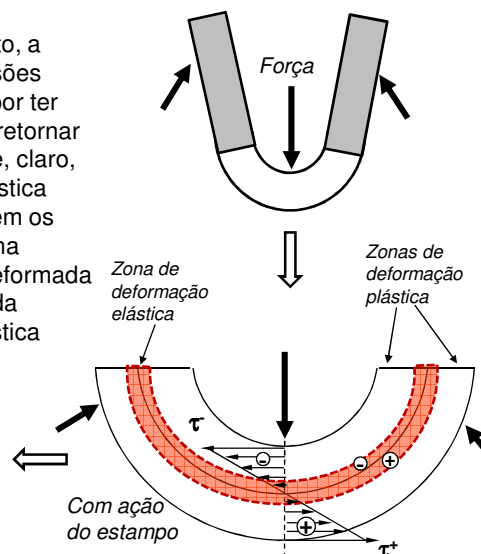
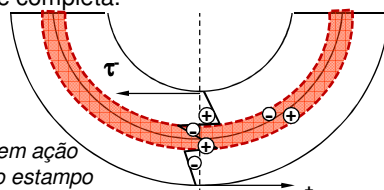


Dobramento e encurvamento.

Comportamento do material na zona de deformação

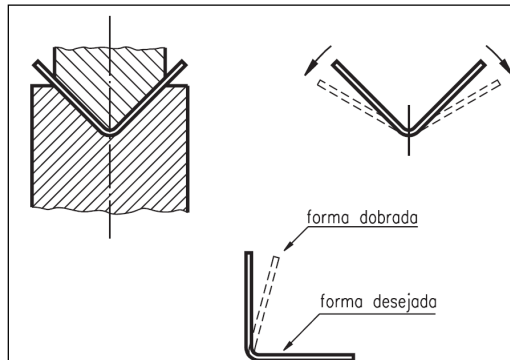
Tensões (de compressão e de tração) na etapa de ação de estampo e após ação de estampo.

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 (e, claro, que não consegue, pois a deformação plástica permanente das zonas adjacentes impedem os deslocamentos). Como resultado, esta zona exerce uma pressão na zona adjacente deformada plasticamente. Reparem: a zona deformada plasticamente sofre uma recuperação elástica quase completa.



Dobramento. Efeito mola

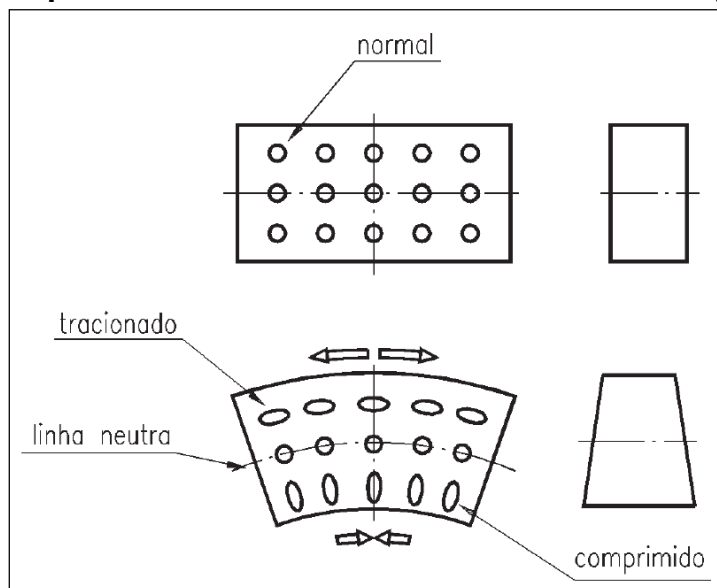
A operação de dobramento exige que se considere a recuperação elástica do material (efeito mola), para que se tenham as dimensões exatas na peça dobrada. É comum depois do dobramento, devido à elasticidade do material, que as chapas tendem a voltar a sua forma primitiva, sendo recomendado construir as matrizes com os ângulos mais acentuados e realizar a operação várias vezes em uma ou mais matrizes.



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.



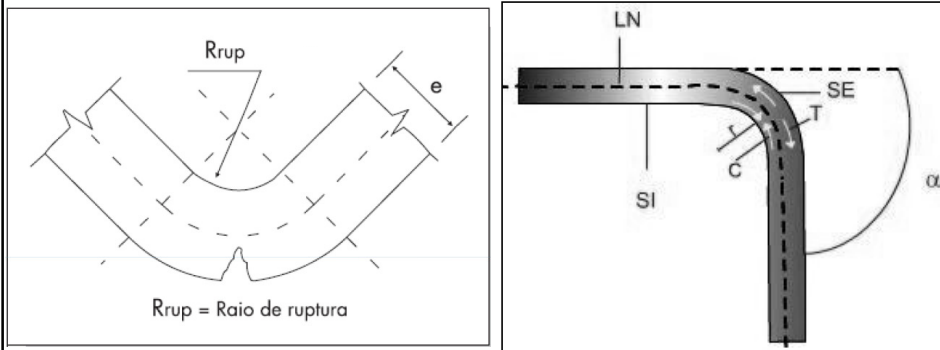
Dobramento Comportamento do material na zona de deformação



Dobramento. Raio de dobramento

No dobramento, os raios de curvatura e a elasticidade do material são os fatores mais importantes. 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.

Então se deve sempre evitar cantos vivos e fixar os raios de curvatura em 1 a 2 vezes a espessura em chapas moles, e de 3 a 4 vezes em chapas duras.



r: raio de concordância; C: força de compressão; T: força de tração



Dobramento. Raio interno mínimo de dobra

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 material e da espessura da chapa que está sendo dobrada. 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. Para a determinação do raio de dobramento, utiliza-se a seguinte fórmula:

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

Onde:

R_{\min} = raio mínimo (mm),

$Al\%$ = alongamento em % da chapa,

e = espessura da chapa (mm).

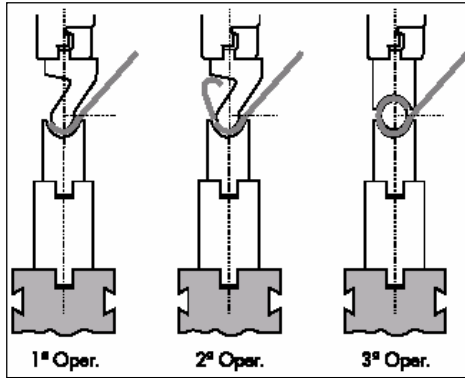
Por exemplo: o raio de dobramento mínimo para uma chapa de 1,5 mm com alongamento longitudinal máximo de 60% é de:

$$R_{\min} = 50 \times 1,5 / 60 - 1,5 / 2 = 0,5 \text{ (mm)}$$

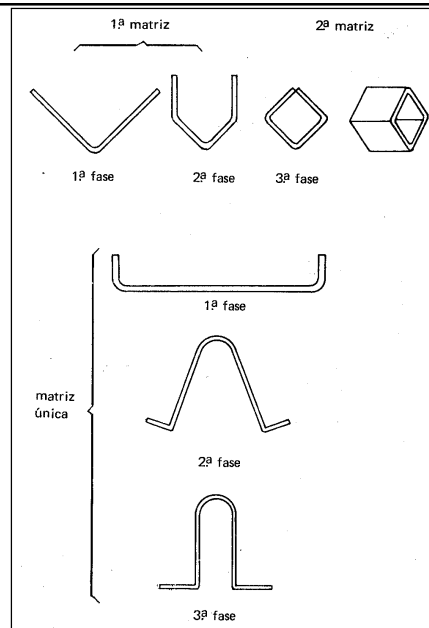


Dobramento. Etapas

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

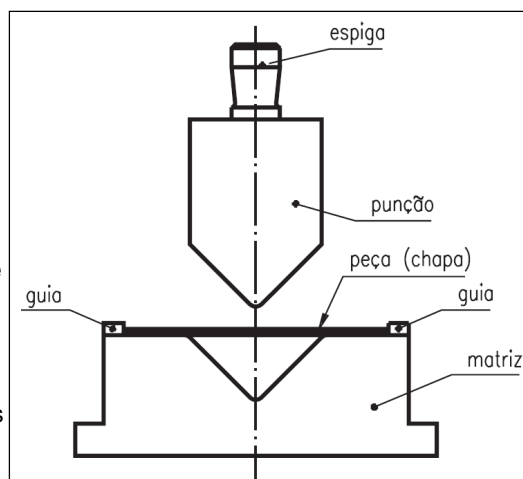


Fases de operações simples de dobramento



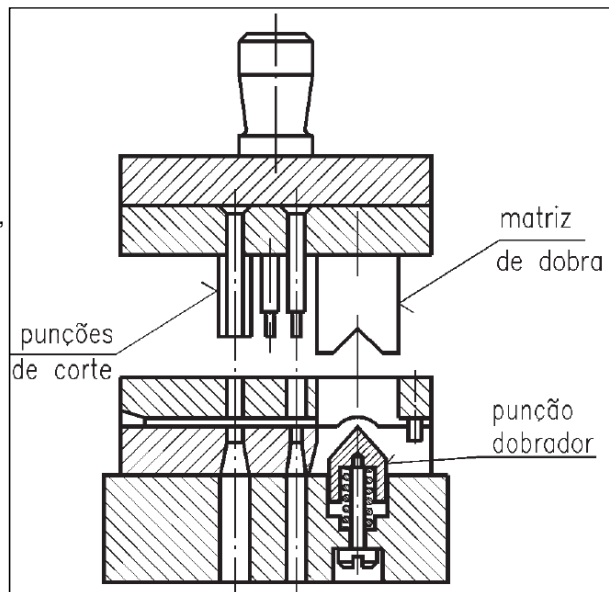
Dobramento. O dobrador

O estampo de dobra é também conhecido como dobrador. É formado de punção e matriz e, geralmente, guiado pelo cabeçote da prensa ou placa-guia. O punção é uma peça de aço, temperada e revenida, cuja parte inferior tem um perfil que corresponde à superfície interna da peça. Pode ser fixado diretamente no cabeçote da prensa ou por meio da espiga. A matriz é de aço e sua parte superior tem a forma da parte exterior da peça. Pode ser fixada diretamente sobre a mesa da prensa. Geralmente, é sobre a matriz que se fixam as guias do material da peça, que são elementos adaptados ao estampo para dar uma posição adequada de trabalho.



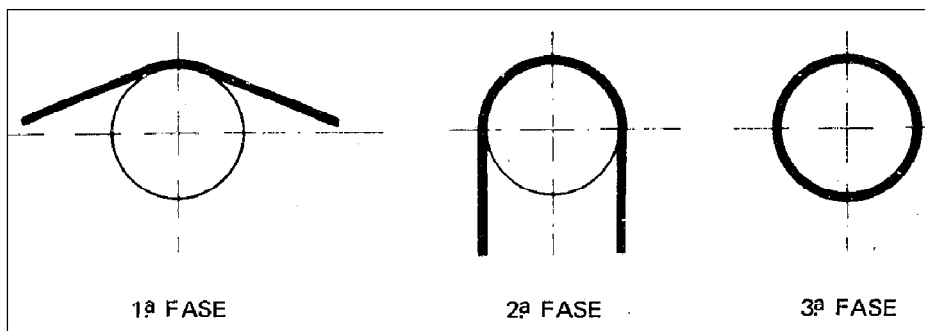
Dobramento. O dobrador

Existem estampos mistos cujas estruturas são o resultado da união dos estampos de corte e de dobra. Os estampos mistos realizam as duas operações, tanto de corte como de dobra.

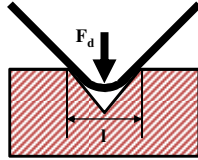


Encurvamento

O encurvamento segue os mesmos princípios e conceitos do dobramento, porém podendo haver várias fases como na figura abaixo.



Forças de dobramento (dobramento em matriz em “V”)



Valores recomendados para “l”
(Dobramento à 90°)

Espessura da chapa (s_0)(mm)	Abertura da matriz (l)(mm)
$s_0 \leq 0,05$	$l = 20 s_0$
$0,5 \leq s_0 \leq 1$	$l = 16 s_0$
$1 < s_0 \leq 3$	$l = 12 s_0$
$3 < s_0 \leq 5$	$l = 10 s_0$
$s_0 > 5$	$l = 8 s_0$

$$M_r = \frac{F_d l}{4} = \pi \cdot w \quad w = \text{momento resistente}$$

$$w = \frac{s^2 b}{6} \quad (\text{para uma seção retangular})$$

$$\therefore F_d = \frac{2 \cdot s_0^2 \cdot b}{3l} \pi \approx 0,7 \frac{s_0^2 b \cdot \pi}{l} \quad (\text{para dobramento livre})$$

(não conduz resultados coerentes na prática)

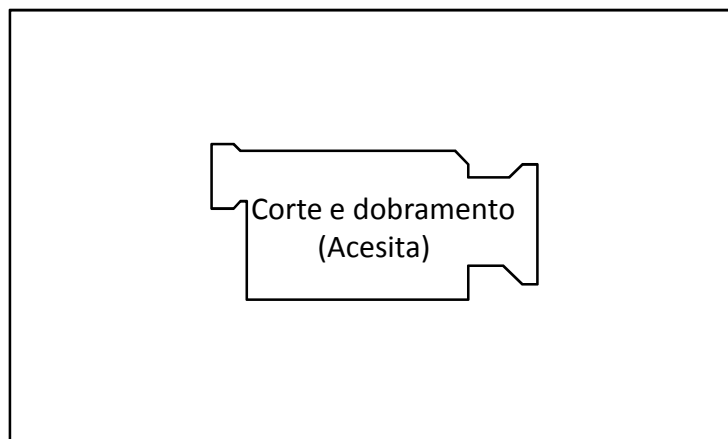
$$F_d = \frac{2,2 \cdot s_0^2 \cdot b \cdot \pi}{\sqrt{l} \cdot l} \quad (\text{para chapas até 3mm})$$

$$F_d = \frac{3 \cdot s_0^2 \cdot b \cdot \pi}{4 \cdot l} \quad (\text{para chapas maiores que 3mm})$$

$$F_d = \frac{s_0^2 \cdot b \cdot \pi}{l} \left(1 + \frac{4 \cdot s_0}{l} \right) \quad (\text{dobramento a fundo de matriz})$$



Corte e dobramento



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.

Anisotropia. 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).



Estampabilidade dos metais. Anisotropia

Lembre-se que 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.

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

Como a medição da espessura apresenta dificuldades de precisão e como $\Delta V = 0$, usa-se:

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

pois: $\epsilon_l = (\epsilon_w + \epsilon_t)$, então $\epsilon_t = (\epsilon_l - \epsilon_w)$

$$R = \frac{\epsilon_{\text{Real-largura}}}{\epsilon_{\text{Real-espessura}}} = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{L_0 \cdot w_0}{L \cdot w}}$$



Estampabilidade dos metais. Anisotropia

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

a) Coeficiente de anisotropia normal (\bar{r}):
$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4}$$

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):
$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2}$$

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 no próximo slide. Essa é definida como a máxima razão possível entre o diâmetro da chapa e do copo embutido, sem que ocorra falha.



Estampabilidade dos metais. Anisotropia

$r_{0^\circ} = r_{45^\circ} = r_{90^\circ} = 1,0$ - isotropia completa ou total;

$r_{0^\circ} = r_{45^\circ} = r_{90^\circ} \neq 1,0$ - anisotropia normal pura e isotropia planar;

$r_{0^\circ} \neq r_{45^\circ} \neq r_{90^\circ} \neq 1,0$ - o material apresenta anisotropia normal e planar.

Coeficiente (n) - $\sigma = K \cdot \epsilon^n$

O parâmetro n é conhecido como coeficiente de encruamento e é calculado a partir de dois pontos (1 e 2) da curva tensão deformação, na região plástica, segundo a equação:

$$n = \frac{\log \sigma_1 - \log \sigma_2}{\log \epsilon_1 - \log \epsilon_2}$$

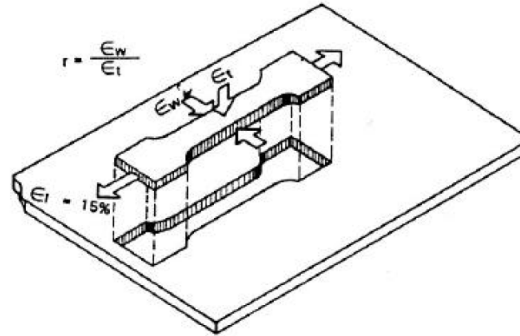
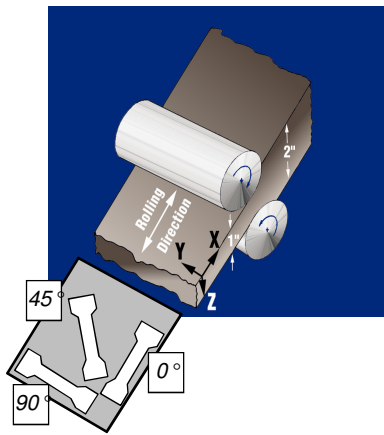
K – constante plástica do material.

O coeficiente de encruamento (n) é um importante parâmetro para se definir a capacidade de deformação plástica do material, já que este valor é igual à deformação real no ponto de início da estricção. **Quanto maior o coeficiente de encruamento, maior a deformação real que o material pode suportar antes da estricção e consequentemente maior a sua capacidade de deformação plástica sem ocorrer estricção ou mesmo a fratura.**



Estampabilidade dos metais. Anisotropia

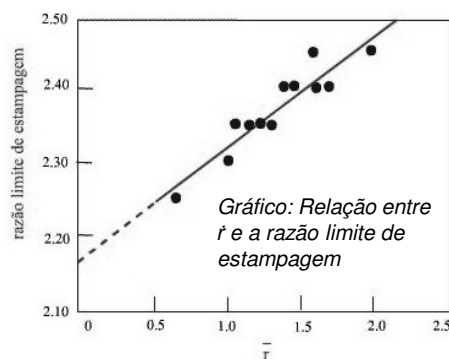
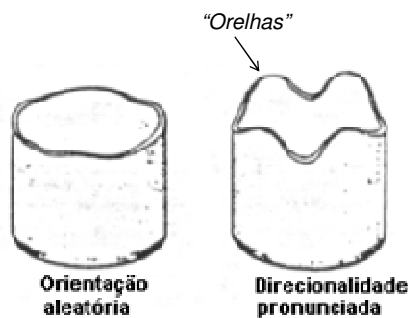
Definição de um corpo de prova para medição do índice de anisotropia “R” (ASTM E8 M)



Estampabilidade dos metais. Anisotropia

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



Estampabilidade dos metais. Anisotropia. Capacidade de alongamento

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.

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.



Curva-limite de conformação (CLC)

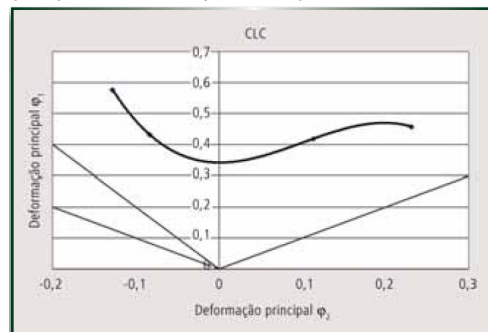
Para determinar se uma peça pode ser estampada sem falhas é utilizada a curva-limite de conformação (CLC), que indica a fronteira entre as deformações permissíveis e catastróficas a que o material estará sujeito durante a estampagem.

Trata-se do diagrama em que as deformações são distribuídas em um gráfico no qual o eixo das ordenadas corresponde às deformações principais ϕ_1 (no sentido do comprimento) e o eixo das abscissas corresponde a ϕ_2 (no sentido da largura). O diagrama está dividido em dois quadrantes pelo eixo das ordenadas ($\phi_2 = 0$):

- 1º quadrante: onde as deformações principais ϕ_1 e ϕ_2 são trativas;
- 2º quadrante: onde a deformação principal ϕ_1 é trativa e ϕ_2 é compressiva.

A curva-limite de conformação descreve o caminho das deformações sofridas pelo material durante a estampagem, ou seja, é uma função que representa como a deformação principal ϕ_1 varia com a deformação ϕ_2 .

A curva-limite de conformação pode ser obtida através de ensaios.



Curva-limite de conformação (CLC)

O comportamento das deformações de um componente estampado é comparado com a CLC do material em questão; qualquer combinação situada abaixo da curva significa deformações que o material pode suportar e, conseqüentemente, as localizadas acima serão referentes a deformações que o material não suportará.

Fatores como espessura, direção de laminação, atrito, entre outros, influenciam o posicionamento da CLC, podendo deslocar a curva mais para cima ou mais para baixo, isto é, aumentando ou diminuindo a estampabilidade do material.

Espessura: maiores espessuras geram maiores deformações, isto é, há um deslocamento da curva para cima;

- Atrito: quanto menor o coeficiente de atrito, maiores serão as deformações e, conseqüentemente, mais acima estarão as curvas;
- Direção de laminação: corpos-de-prova cortados na direção de laminação apresentam maiores deformações e, quando cortados de forma perpendicular à direção de laminação, têm menores deformações;
- Anisotropia: quando $r_{90} > r_0 > r_{45}$ o material tem sua capacidade de deformação aumentada no 2º quadrante e reduzida no 1º quadrante, isto é, sofre uma rotação no sentido horário;



Curva-limite de conformação (CLC)

- Pré-deformação: corpos-de-prova que tenham sofrido pré-deformações tratativas tendem a gerar uma CLC posicionada mais abaixo e, quando submetidos a pré-deformações compressivas, tendem a elevar a curva-limite;
- Tamanho de grão: quanto menor o tamanho de grão, mais acima é posicionada a curva, isto é, quanto menor o tamanho de grão, maior a estampabilidade do material;
- Grau de encruamento: quanto maior o grau de encruamento, mais para cima é posicionada a CLC;
- Velocidade do punção: quanto menor a velocidade, maior será capacidade de o material ser deformado, isto é, a CLC é posicionada mais para cima.

Material	Velocidades típicas de embutimento
Alumínio	30 m/min
Latão	45 m/min
Aço inox	12 m/min
Aço	18 m/min
zinco	22 m/min

*Velocidades típicas
de embutimento*



Estampagem profunda (embutimento e repuxamento)

O **estampagem** é um conjunto das operações de conformação a frio. As principais operações que compõem no processo de estampagem são o corte, o dobramento, a furação e o repuxo.

O **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 e, geralmente, sem variar a espessura. A operação pode ser feita em uma ou mais fases. Na estampagem profunda os elementos estarão recebendo forças radiais de tração e forças tangenciais de compressão.

Uma outra definição: Processo no qual um disco de chapa plana é forçado a entrar em uma cavidade (matriz) por meio de um punção, formando uma peça com forma côncava ou de copo.

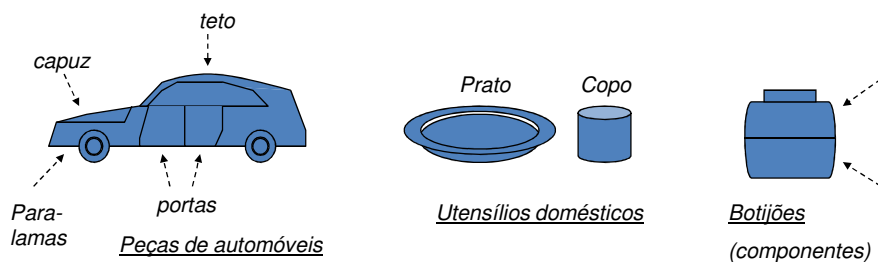
Uma terceira definição: Processo de conformação mecânica, sem separação de massa, onde uma chapa plana é forçada a tomar a forma de peças no formato de “conchas”, com o uso de prensas e matrizes apropriadas.

A distinção entre estampagem rasa 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. A estampagem profunda requer que o material seja bastante dúctil.



Estampagem profunda (embutimento e repuxamento)

O processo é empregado na fabricação de diversas peças (para-lamas; portas de carros; painéis; etc.).



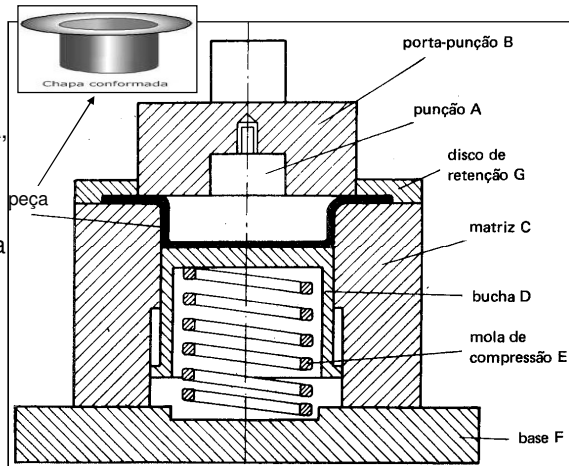
Alguns exemplos de peças produzidas pelos processos de estampagem profunda



Estampagem profunda. Ferramental

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.

Na figura a direita, um esquema de matriz para embutimento. O disco de embutir foi introduzido sobre peça de retenção ou fixação G. Durante a deformação, o punção A, ao penetrar na matriz C, molda o objeto. Durante a penetração o mancal D é comprimido e comprime ao mesmo tempo a mola E. O mancal D impede a deformação irregular da chapa e o disco de retenção G garante um embutimento sem rugosidade. No fim, o punção A retrocede e o mancal D sobe, sob ação da mola E, e expulsa o objeto conformado.



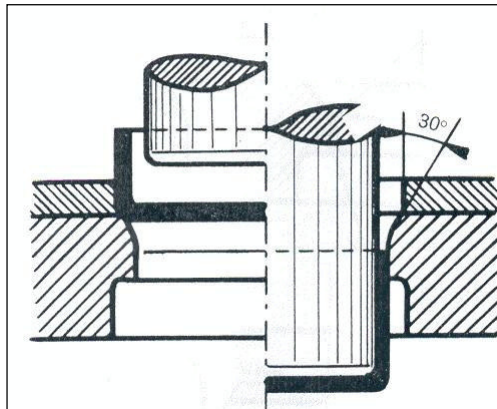
Estampagem profunda. Ferramental

Deve-se ainda estudar a pressão a ser aplicada nas prensa-chapas durante o embutimento: 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.

A ferramenta de **estampagem de estiramento** (vede os slides 69 e 71) é composta por uma matriz de geometria cônica, seguida de geometria cilíndrica, ambas concordando-se por um raio, que varia entre 6 e 10 vezes a espessura do blank.

Para que o blank esteja centrado corretamente, é necessário aparafusar sobre a matriz uma guia.

A operação de estiramento pode ser feita sem ou com um prensa-chapas. No primeiro caso, é importante que a região do raio de concordância deve ser polida, e não apresentar nenhum risco. Ela é responsável pela operação poder se realizar sem o uso de um prensa-chapas. Na figura à direita se observa esquematicamente este tipo de ferramenta.



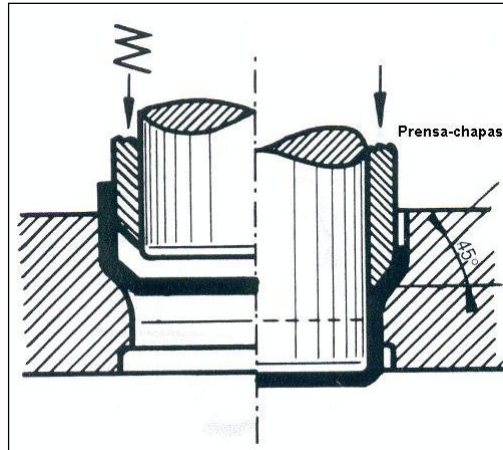
Estampagem profunda. Ferramental

Caso do uso de um prensa-chapas na operação de estiramento.

O prensa-chapas de uma ferramenta de estiramento é um dispositivo um pouco diferente do prensa-chapas no embutimento, embora sua função seja a mesma: controlar o fluxo de material de modo a evitar rugas.

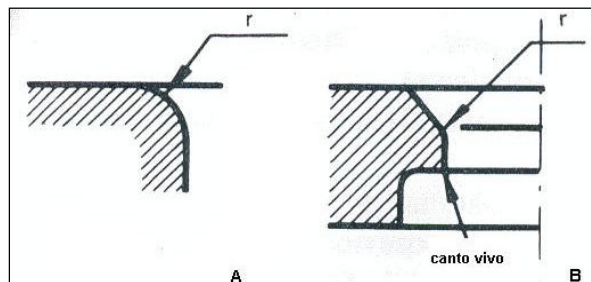
Ao contrário do prensa-chapas em uma matriz de embutimento, sua atuação não é perpendicular ao eixo central do copo, mas sim axial, e possui extremidade cônica, de ângulo 45° ou outro adequado à geometria da matriz. A figura à direita ilustra esquematicamente a ferramenta descrita (vede também o slide 69).

A peça é centrada automaticamente quando posicionada sobre a matriz neste caso, sem precisar utilizar o guia peças, devido à geometria da matriz.



Estampagem profunda. Ferramental

Tanto nas matrizes de embutimento (figura "A", abaixo) ou estiramento ("B") o raio de concordância (indicado por "r") é de grande importância. Os efeitos dos raios em cada tipo de matriz são variados:



No caso de raio grande: Na ferramenta de estiramento um raio muito grande impede um funcionamento eficaz do prensa-chapas, arriscando dobrar o **blank** antes de penetrá-lo completamente na matriz. Já na ferramenta de embutimento, o efeito não é tão significativo neste aspecto.

No caso de raio pequeno: Um raio muito pequeno aumenta o esforço de embutimento, e com ele a tendência de engripar (travar) o punção, e/ou destacar o fundo do copo. Já na ferramenta de estiramento raios pequenos não provocam tanta diferença de comportamento como na outra.



Estampagem profunda. Ferramental

Cuidado deve se ter com o ferramental, para que haja folga suficiente entre a matriz e o punção. **Primeiramente, é essa folga que irá definir a espessura da peça e posteriormente, um aumento da folga faz-se necessário para que a peça não trave dentro da matriz (alívio).**

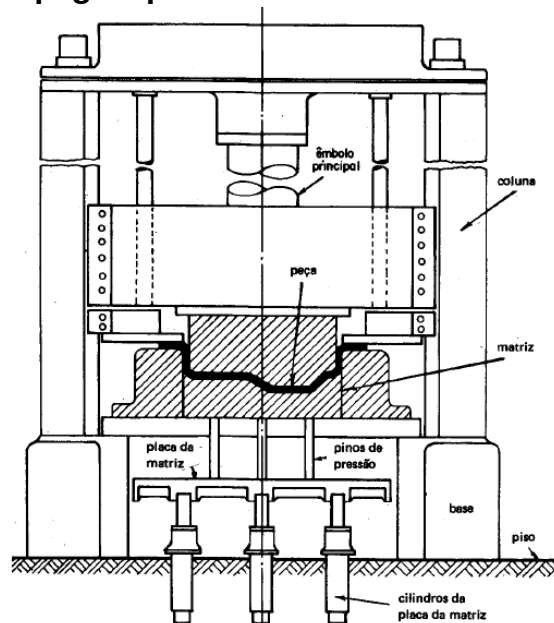
Este detalhe da ferramenta é fundamental para o processo, pois folgas grandes demais provocam enrugamento da peça, problemas de rebarbas entre outros; e folgas pequenas demais podem causar surgimento das tensões cisalhantes ocasionadas pelo atrito e que levem à ruptura do metal em prensa. As folgas pequenas podem também causar travamento do sistema e até danos a máquina. A folga entre o punção e a matriz pode ser determinada de acordo com o material e a espessura da chapa estampada.

As prensas de estampagem podem ser mecânicas ou hidráulicas (próximo slide). Nas prensas mecânicas, a fonte de energia é um volante, sendo a energia aplicada por meios de manivelas, engrenagens e excêntricos durante a aplicação do esforço. Nas hidráulicas, a energia para o esforço é aplicada por meio de pressão hidrostática, fornecida por um pistão ou mais.



Estampagem profunda. Ferramental

Prensa hidráulica



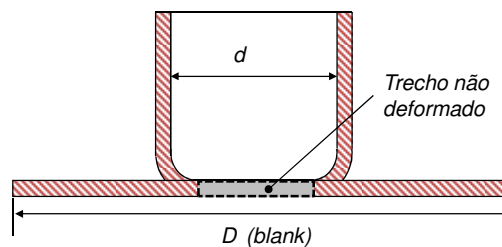
Estampagem profunda. Ferramental

Prensa mecânica e hidráulica



Embutimento. Princípio

Na operação de embutimento, sofre deformação plástica somente o trecho da chapa plana que ocupa a área compreendida entre o diâmetro final do copo " d ", e o inicial da chapa " D ", conforme se observa na figura abaixo.

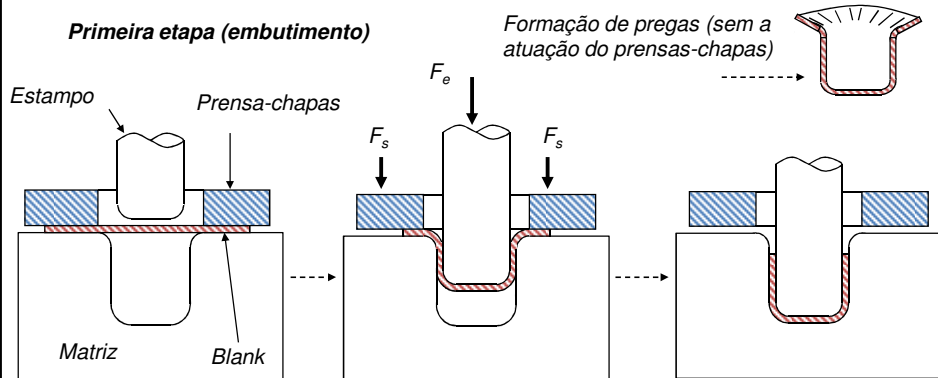


Às vezes, o diâmetro do "blank" é muito superior ao diâmetro da peça a estampar, sendo que esta deve atingir uma profundidade de copo muito elevada. A fabricação poderá exigir uma sequência de operações de estampagem, utilizando uma série de ferramentas, com diâmetros decrescentes (da matriz e do punção).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

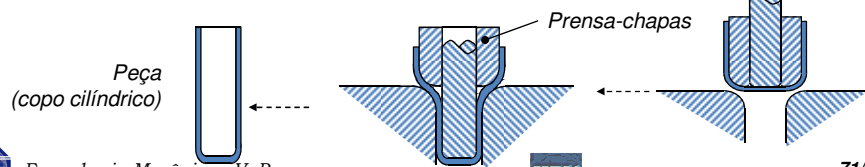


Estampagem profunda. Etapas

Primeira etapa (embutimento)



Segunda etapa (estiramento)

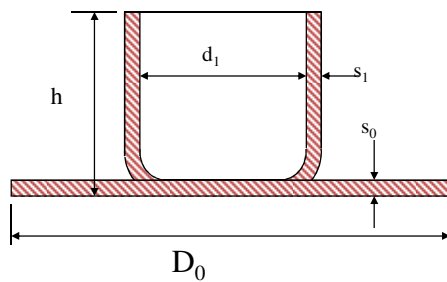


Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



71/102

Embutimento. Dimensionamento do recorte (blank)



$$V_0 = \frac{\pi}{4} D_0^2 \cdot s_0 \quad \text{Volume do disco}$$

$$V_1 = \frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot s_0 + \pi (d_1 + s_1) \cdot s_1 \cdot h$$

$$V_1 = V_0$$

$$\frac{\pi}{4} D_0^2 \cdot s_0 = \frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot s_0 + \pi (d_1 + s_1) \cdot s_1 \cdot h$$

$$D_0 = \sqrt{\frac{s_1}{s_0} [d_1^2 + 4 \cdot h \cdot (d_1 + s_1)]}$$

$$\text{tomando } s_0 = s = s_1$$

$$D_0 = \sqrt{d_1^2 + 4 \cdot h \cdot (d_1 + s)}$$

Exemplo ($d = 35 \text{ mm}$ e $h = 40 \text{ mm}$ desprezando s):

$$D = \sqrt{d^2 + 4dh} = \sqrt{35^2 + 4 \cdot 35 \cdot 40} = 82.60 \text{ mm}$$



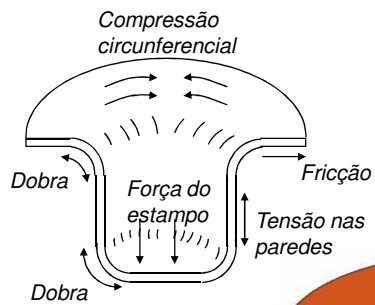
Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



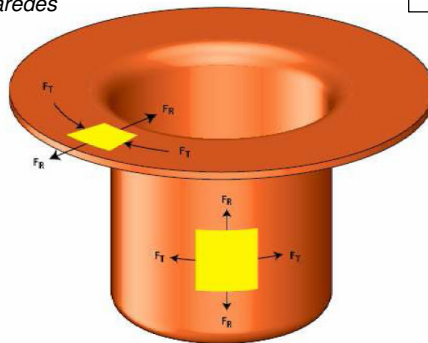
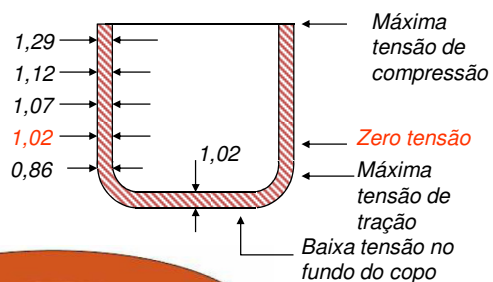
72/102

Embutimento. Tensões e deformações

Forças durante o embutimento



Espessura inicial da chapa 1,02



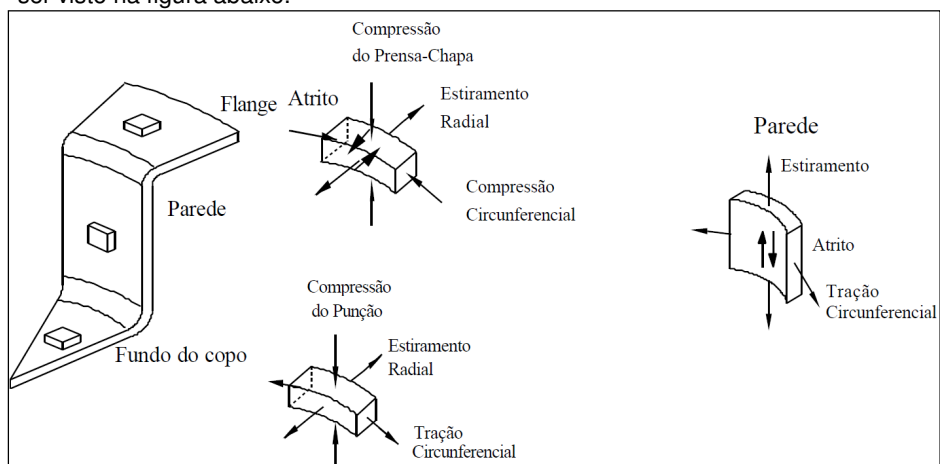
Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



73/102

Estampagem profunda. Tensões e deformações

O processo de estampagem profunda submete a chapa plana a um estado complexo de tensões e deformações que alteram sua espessura durante o processo. O estado típico de tensão varia conforme a posição da retirada do elemento de análise na peça que está sendo conformada. Para peças cilíndricas existem três diferentes estados de tensão: um na flange, um na lateral e um no fundo do copo, como pode ser visto na figura abaixo.



Engenharia Mecânica - V. Ponomarov



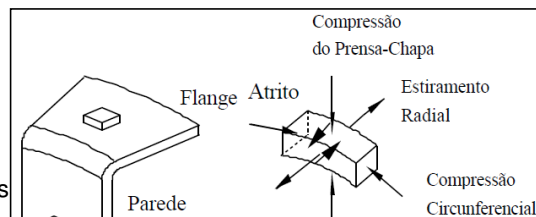
74/102

Estampagem profunda. Tensões e deformações

Borda da peça (flange): Na região da borda há tensões de compressão circunferencial ($\sigma_c < 0$) e tensões de estiramento radial ($\sigma_r > 0$), sendo que as tensões compressivas são maiores, pois o punção força o metal das bordas na direção do centro. Com isso, há deformações trativas na direção do comprimento ($\phi_1 > 0$) e compressivas na direção da largura ($\phi_2 < 0$). Pela lei da constância do volume, sabendo que $\phi_1 < \phi_2$, as deformações na direção da espessura são compressivas ($\phi_3 < 0$), isto é, há um aumento da espessura do material.

À medida que o punção avança, intensificam-se as forças compressivas, podendo ocorrer um aumento excessivo da espessura que irá, conseqüentemente, enrugur no material. Para evitar o enrugamento usa-se o prensa-chapas, que aplica uma tensão compressiva na direção da espessura, impedindo o aumento em excesso da espessura, mas sem evitar o movimento do material para o interior da matriz. Assim, se a pressão for insuficiente ocorrerão rugas, e se for excessiva o material poderá se romper.

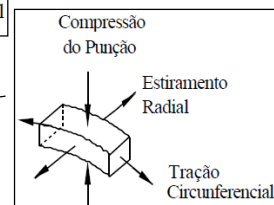
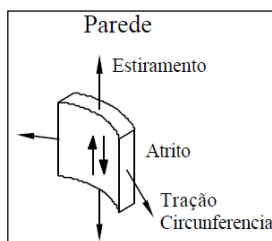
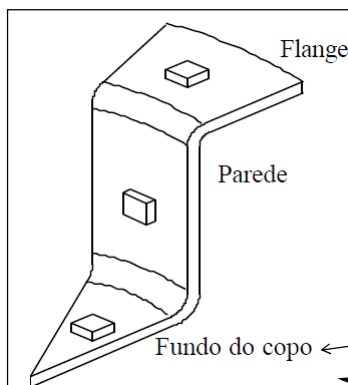
Dobramento superior da peça: O metal em contato com o raio da matriz sofre tensões compressivas no sentido da parte superior da espessura da chapa e trativas no sentido radial, havendo deformações de embutimento profundo.



Estampagem profunda. Tensões e deformações

À Lateral da peça: Na região lateral da peça ocorre deformação plana e estiramento uniforme, onde atuam tensões trativas no sentido radial ($\sigma_r > 0$) e no sentido circunferencial ($\sigma_c > 0$).

Fundo da peça: O fundo da peça sofre tensões trativas nos sentidos circunferencial ($\sigma_c > 0$) e radial ($\sigma_r > 0$), caracterizando uma zona de estiramento biaxial.

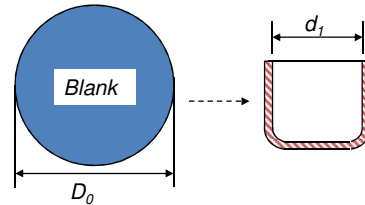


Estampagem profunda. Escalonamento das etapas

Coefficiente de embutimento (β) é a razão entre o diâmetro do blank e o diâmetro da primeira matriz. Ele é função da forma da peça a embutir (cilíndrica, cônica, outras), propriedade do material e espessura da chapa, tolerâncias, qualidade da superfície da peça e da ferramenta, características geométricas da peça (raios), folga entre estampo e matriz, pressão de sujeição, velocidade de embutimento e temperatura de trabalho, lubrificação).

$$\beta_1 = \frac{D_0}{d_1} \quad \beta_2 = \frac{d_1}{d_2} \quad \beta_n = \frac{d_{n-1}}{d_n}$$

Embutimento total (final): $\beta_t = \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_n$



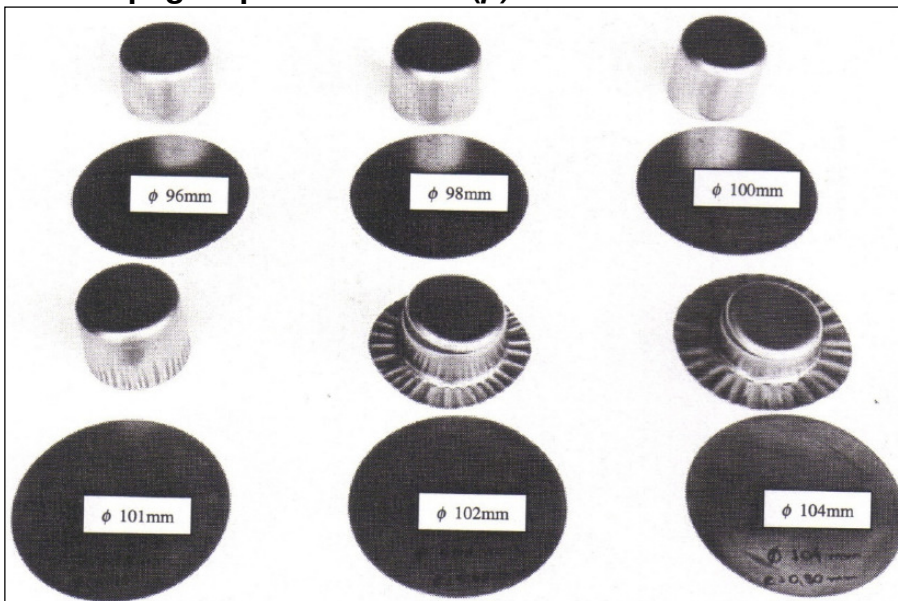
β_{100} é o coeficiente de embutimento para embutir um "copo" cilíndrico de diâmetro interno igual a 100 mm, utilizando uma chapa de espessura 1 mm.

$$\text{Redução} = \frac{D_0 - d_1}{D_0} \times 100\%$$

Estampagem escalonada: reduções – 1ª operação = 35%; 2ª = 30%; 3ª = 20% e 4ª = 10%. (para o aço inox austenítico. 1ª operação = maior deformação, pois o material não é ainda encruado).



Estampagem profunda. LDR (β) – Limite de Embutimento



$$\text{LDR} (\beta) = D/d; \text{LDR} = 101/52,5 = 1,92.$$



Limite de embutimento

Dependendo do material, e da espessura da chapa, existe um limite de redução de diâmetros de uma peça (**limite de embutimento**). Por isso, muitas vezes é necessário realizar várias operações de estampagem profunda seguidas em uma série a fim de obter uma redução maior de diâmetro.

A primeira matriz de embutimento pode ser determinada a partir de uma relação entre os diâmetros da chapa e da matriz, considerando um fator, que tem seu valor variável de acordo com as características do material acima mencionadas. Generalizando, um valor médio deste fator é de 1,75. Assim, a relação se expressa por:

$$D_{\text{primeira matriz}} = (D_{\text{chapa}})/1,75.$$

Toma-se o exemplo, então:

Para uma chapa de 100 mm de diâmetro, qual será o diâmetro da primeira matriz de embutimento? (Deve-se considerar adequado o fator convencionado, pois o material em questão não está sendo mencionado). Então:

$$D_{\text{primeira matriz}} = (100 \text{ mm})/1,75 = 57 \text{ mm}.$$

O que implica que a peça embutida deve ter no máximo 57 mm de diâmetro.



Estampagem profunda. Etapas de estiramento

Para que o copo embutido tenha uma parede mais alta, ou seja mais fundo, ele precisa passar por várias operações conhecidas como estiramento. Ao projetar uma peça que necessite destas operações, deve-se procurar reduzir ao mínimo número de operações intermediárias, visto que muitas operações intermediárias aumentam o tempo de processamento, e o custo ferramental, que precisará de muitas ferramentas intermediárias.

O número de operações de estiramento, varia de acordo com alguns fatores, dentre eles o uso do prensa-chapas, ou não, espessura do material e a ductilidade do mesmo. As reduções de diâmetro das operações de estiramento, dependentes então dos fatores agora citados, variam de 10 a 20%, para a maioria dos materiais. Assim, usam-se coeficientes baseados nesta percentagem de redução para chegar ao número final de operações.

Um exemplo interessante seria estudar o caso de uma chapa circular de diâmetro de 100 mm, que resultou em um copo embutido de 57 mm de diâmetro. Supondo que o diâmetro final desejado de se alcançar seja de 30 mm, com uma redução média de 15% (isso significa: usar coeficiente de 0,85 (1 - 0,15)). Assim, o diâmetro da primeira matriz de estiramento é calculado: $57 \text{ mm} \times 0,85 = 48,5 \text{ mm}$. Sucessivamente, o segundo será: $48,5 \times 0,85 = 41 \text{ mm}$ e o terceiro: $41 \times 0,85 = 35 \text{ mm}$. E o quarto diâmetro pode ser: $35 \times 0,85 = 29,7 \text{ mm}$, mas como 30 mm é a medida desejada, usa-se 30 mm de diâmetro final, após 4 operações. Isso implica que são necessárias quatro matrizes de estiramento e uma matriz de embutimento para conformar esta



Estampagem profunda. Etapas de estiramento

Um exemplo: Na prática, deve-se fazer um copo em cobre, espessura 1 mm, diâmetro 35 mm, altura 40 mm. Para resolver este problema é necessário seguir o procedimento abaixo:

1. Calcular o diâmetro do blank;
2. Calcular o diâmetro do primeiro embutimento (com o coeficiente de 1,75);
3. Calcular o ou os diâmetros das matrizes de estiramento (com coeficiente 0,8);

Solução do Exemplo:

1. Cálculo do diâmetro do blank (vede o slide anterior): 82,6 mm (desprezando a espessura).
2. Primeira matriz de embutimento: $D_{\text{prim. matriz}} = (D_{\text{chapa}}) / 1,75 = 82,6 / 1,75 = 47,2 \text{ mm}$.
3. Matrizes de estiramento: $D_{\text{matriz de estiramento}} = 47,2 \times 0,8 = 37,76 \text{ mm}$.

O objetivo final da operação é alcançar um copo de diâmetro = 35 mm. No caso desta pequena diferença qual a decisão mais favorável a ser tomada? Duas soluções se apresentam:

- Diminuir levemente os diâmetros das matrizes a fim de conseguir em duas operações apenas o produto final. É possível pensar nesta solução, pois os coeficientes usados nos cálculos anteriores sempre levam em consideração uma margem de segurança.
- Manter o diâmetro da matriz de embutimento, e usar duas matrizes de estiramento, mesmo que apresentem coeficiente maior. Esta solução é um pouco mais cara, mas está a favor da segurança da operação.



Estampagem profunda. Escalonamento das etapas

$$\beta' = (\beta_{100} + e) - \frac{e \cdot d_1}{100 \cdot s_0} \quad \text{para } \frac{d_1}{s_0} \leq 300$$

O parâmetro “e” é a função da potencial de conformabilidade, qualidade da superfície, lubrificação:

e = 0,05 (boa conformabilidade; atrito reduzido);

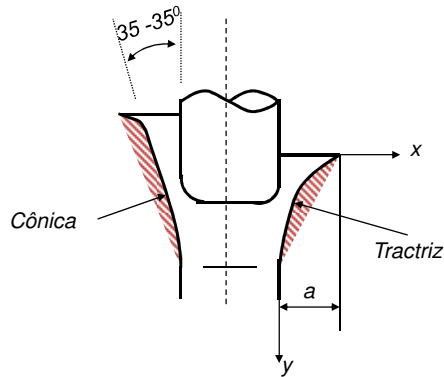
e = 0,05 (má conformabilidade; chapas rugosas).

β_{100} é o coeficiente de embutimento para embutir um “copo” cilíndrico de diâmetro interno igual a 100 mm, utilizando uma chapa de espessura 1 mm.

Material	Coeficiente de embutimento β_{100} para		
	1ª etapa	2ª etapa (sem recozimento)	2ª etapa (com recozimento)
Aços ferríticos	1,7	1,2	1,6
Aços austeníticos	2,0	1,2	1,8
Cobre	2,1	1,3	1,9
Latão Ms 63	2,1	1,4	2,0
Alumínio 99,5	2,1	1,6	2,0
Níquel	2,3	1,7	-



Formas de matriz para aumentar o coeficiente de embutimento (até $\beta = 2,25$)



$$y = a \cdot \ln \sqrt{\frac{a + a^2 - x^2}{x}} - \sqrt{a^2 - x^2}$$

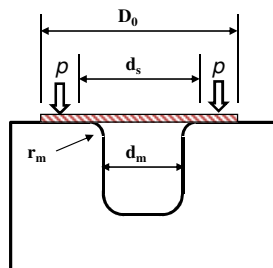
equação da curva tractriz



Embutimento. Pressões e forças

Pressão de sujeição e força de sujeição

Deve-se 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.



Pressão de sujeição (p) e força de sujeição (F_s)

$$p = \left[(\beta_1 - 1)^2 + \frac{d_2}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{\tau_t}{400}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - d_s^2) \quad d_s = d_m + 2r_m$$

$$F_s = A \cdot p$$

$$F_s = \left(\left[(\beta_1 - 1)^2 + \frac{d_2}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{\tau_t}{400} \right) \left(\frac{\pi}{4} (D_0^2 - d_s^2) \right)$$

A força de sujeição é menor de que a força exercida pelo punção (ou força de embutimento)



Força de Embutimento de Copo Cilíndrico

$$P_e = p \cdot s \cdot \sigma_r \cdot \beta_e$$

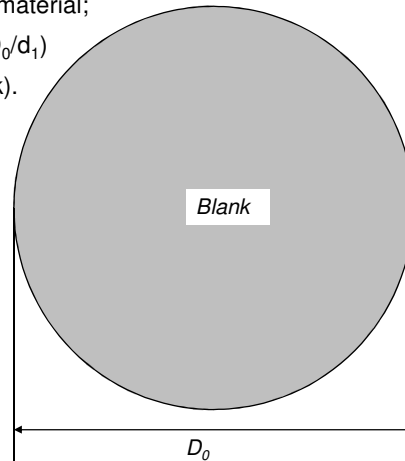
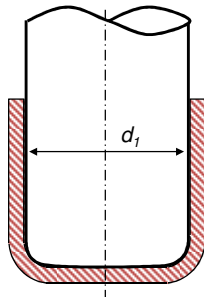
Onde: p = perímetro;

s = espessura da chapa;

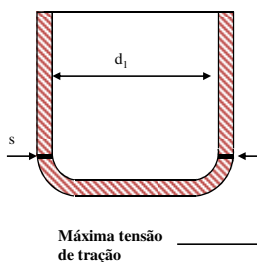
σ_r = Limite de resistência à tração do material;

β_e = coeficiente de embutimento = $f(D_0/d_1)$

D_0 = Diâmetro do recorte inicial (blank).



Estampagem profunda. Pressões e forças



F_e = f (atrito peça/ferramenta na borda da matriz, atrito peça/sujeitador e matriz, força de descurvamento)

$$F_e = F_{id} + F_{as} + F_{am} + F_d$$

F_e = força de embutimento

F_{id} = força pura de conformação

F_{as} = força de atrito entre matriz e sujeitador

F_{am} = força de atrito na borda da matriz

$$F_d = \text{força de descurvamento} \quad F_e = \frac{F_{id}}{\eta_c}$$

$$F_{id} = \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot k_{lm} (\ln \beta_1 - c) \quad \text{Siebel} \quad \eta_c = 0,628 \quad c \cong 0,25 \quad F_e = 5 \cdot d_1 \cdot s \cdot k_{lm} \cdot \ln \beta_1$$

Primeiro embutimento para corpos cilíndricos simples

Para peças não redondas tomar no lugar de $5 \cdot d_1$ colocar o eventual perímetro da peça.

$$F_{e2} = 0,5 \cdot F_{e1} + 5 \cdot d_2 \cdot s \cdot k_{lm2} \cdot \ln \beta_1 \quad 2^a \text{ etapa para embutimento com inversão}$$

$$F_{e3} = 0,5 \cdot F_{e2} + 5 \cdot d_3 \cdot s \cdot k_{lm3} \cdot \ln \beta_1 \quad 3^a \text{ etapa para embutimento com inversão}$$

$F_e < F_r$ F_r = força de rompimento do fundo da peça

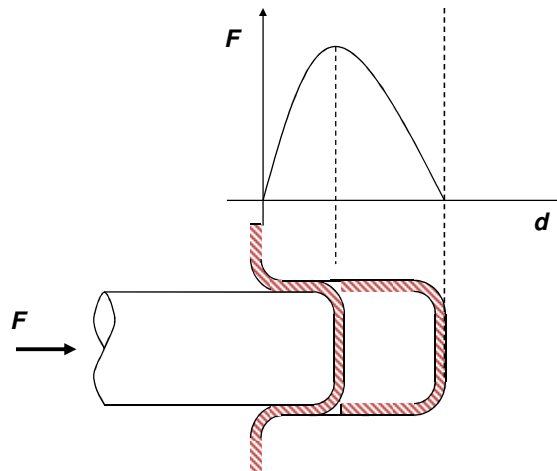
$$A = \pi (d_1 + s) \cdot s \quad A = \text{área da seção transversal da peça}$$

$$F_r = \pi (d_1 + s) \cdot s \cdot \tau_t \quad \tau_t = \text{tensão de tração do material da peça}$$



Estampagem profunda. Pressões e forças

Diagrama força deslocamento na operação de embutimento



Projeto de uma matriz de embutimento

s = espessura da chapa

$$r_e = (4 \text{ a } 5) \cdot s$$

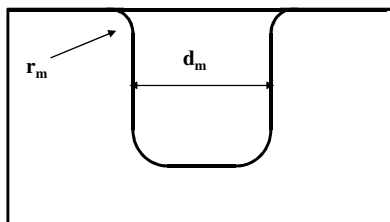
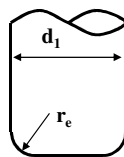
$$r_m = (5 \text{ a } 8) \cdot s$$

$$\text{ou } r_m = 0,8 \sqrt{(D_0 - d_{1m}) \cdot s} \quad \text{para o primeiro embutimento}$$

$$f = 1,2 \cdot s \quad (\text{folga}) \text{ para o primeiro embutimento}$$

$$f = (1,3 \text{ a } 1,5) \cdot s \quad (\text{folga}) \text{ para o segundo embutimento (metal já está encruado)}$$

$$d_m = d_1 + 2f$$



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.



Estampagem profunda. Lubrificação

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.

Objetivos:

- Reduzir o atrito peça – ferramenta (*lubrificar o lado do blank, que entra em contato com a matriz e não aquele do lado do punção*)
- Reduzir o desgaste da ferramenta
- Evitar a soldagem a frio (por fricção) peça - ferramenta
- Resfriar ferramenta e peça

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.



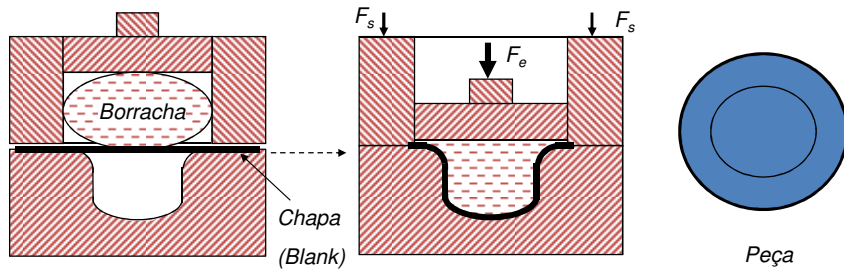
Estampagem profunda. Lubrificação

Lubrificantes: 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 com os gases formados no aquecimento do metal). Geralmente, são óleos minerais com uma série de aditivos (Cl, Pb, P, gorduras orgânicas, etc.).

- Óleos viscosos: favoreçam o escorregamento (óleo de linhaça e alvaiade, gesso moído, talco, grafite, enxofre e bissulfeto de molibidênio). Para passes leves a massa lubrificante pode ser diluída com petróleo para melhor manuseio.
- Os óleos minerais são engrossados convenientemente com óleo pesado e estereatos
- Ceras parafínicas, gorduras animais (sebo)
- Cobreamentos de superfícies
- Cobreamento fosco para absorção de lubrificantes



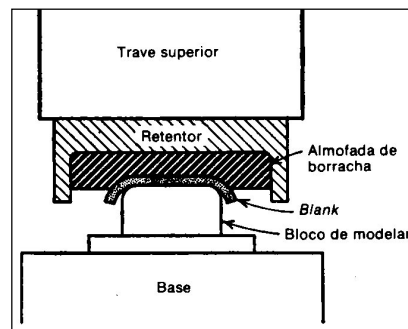
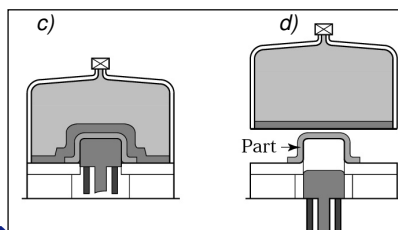
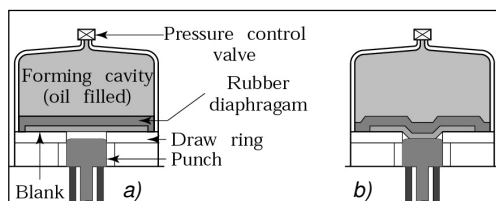
Embutimento com matriz de borracha



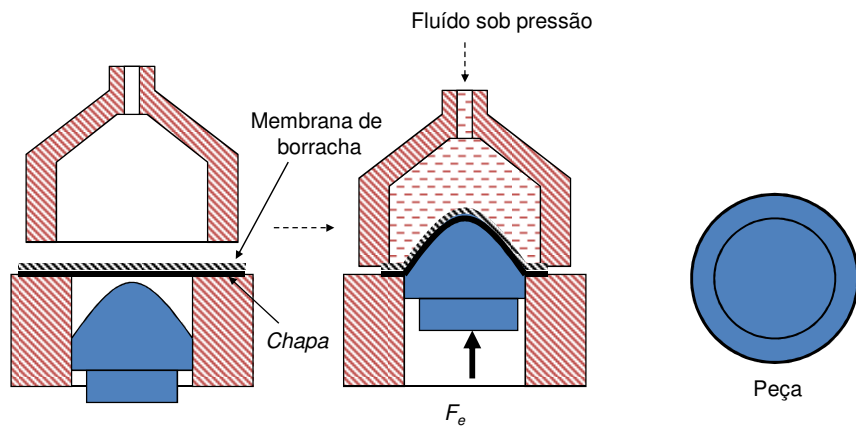
Embutimento com matriz de borracha

Processo de Conformação Hydroform
(Processo Marform)

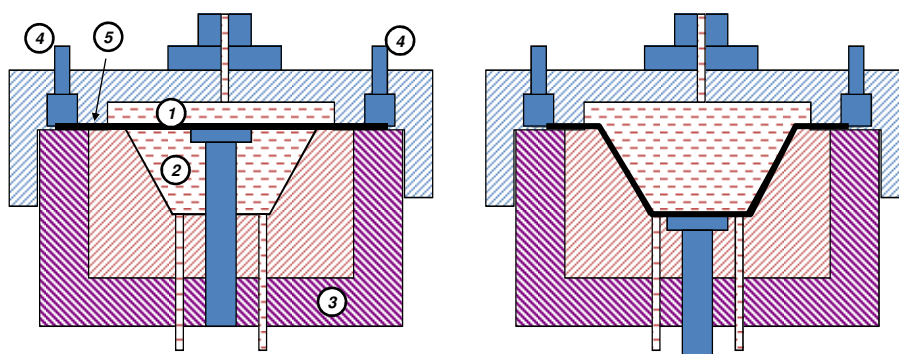
Conformação com borracha
(Processo Guerin)



Embutimento. Processo Hydroform



Embutimento. Processo Kronenberg

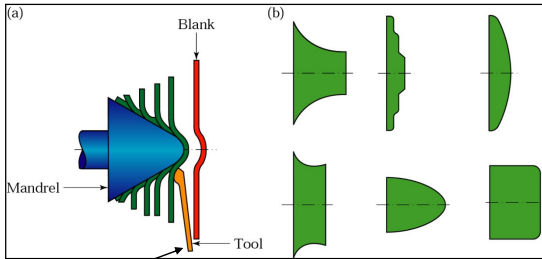


- | | |
|--------------------------|-------------------|
| 1 e 2 – Água sob pressão | 4 – Sujeitador |
| 3 – Matriz | 5 – Chapa (Blank) |



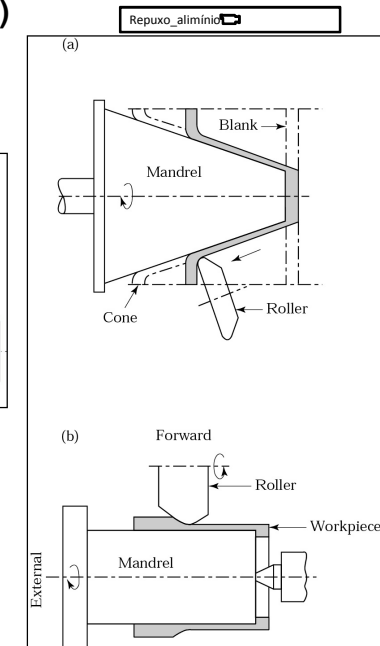
Repuxamento (Giro do metal)

Processo que envolve a conformação de partes axis-simétricas sobre um mandril utilizando-se várias ferramentas e roletes.



Ferramenta
"bastão"

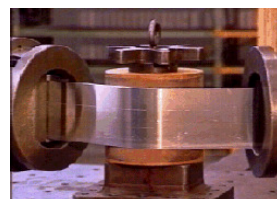
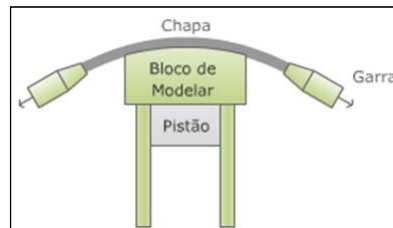
Peças obtidas por repuxamento: Copos, panelas de pressão, frigideiras, lixeiras, caixas de relógio, instrumentos musicais, tanques de radiadores, cartuchos, forma para bolo e componentes de carburador.



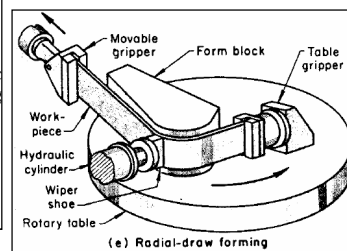
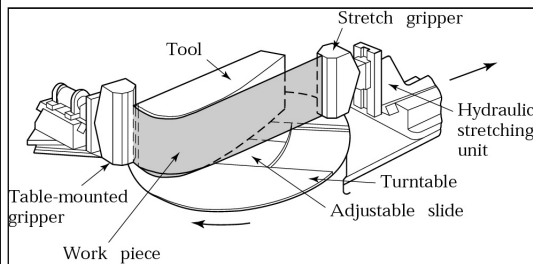
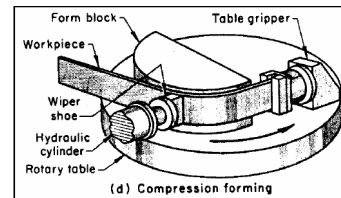
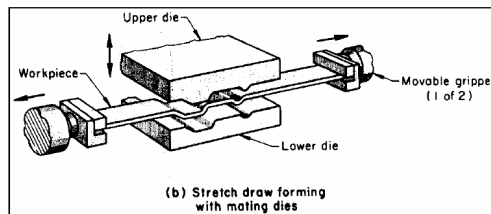
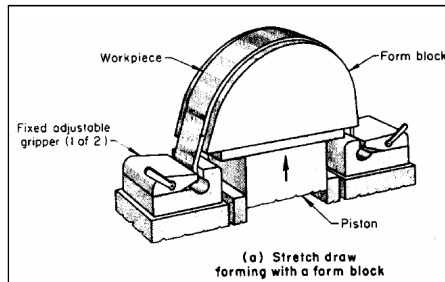
Processo de Estiramento

É a operação que consiste na aplicação de forças de tração, de modo a esticar o material sobre uma ferramenta ou bloco (matriz). Neste processo, a chapa é fixada nas suas extremidades e tracionada sobre uma matriz, que se move numa direção particular (dependendo da máquina). Como predominam tensões trativas, grandes deformações de estiramento podem ser aplicadas apenas para materiais muito dúcteis. Para estes materiais, almeja-se altos valores de coeficiente de encruamento.

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



Processo de Estiramento



Engenharia Mecânica - V. Ponomarov

FEMEC

97/102

O limite de conformação no Processo de Estiramento

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

Assim que ocorre a estricção localizada, facilmente detectada nas superfícies expostas, segue-se a fratura. Logo, **a estricção localizada é um limite de conformação.**

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

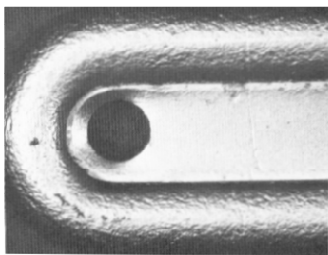


Engenharia Mecânica - V. Ponomarov

FEMEC

98/102

Defeitos de conformação das chapas

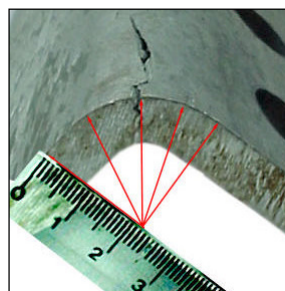


Casca de laranja

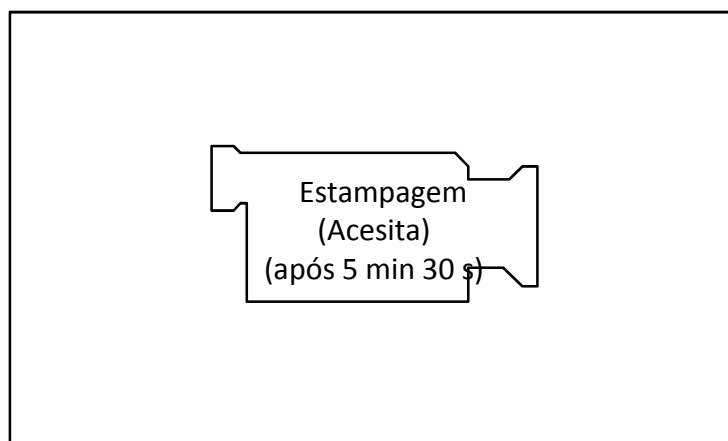


Linhas de Luders (de distensão)

Trincas



Estampagem



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 $\varnothing_{ex} = 30 \text{ mm}$, $\varnothing_{in} = 10 \text{ mm}$ e espessura = 2 mm. Considerar $\tau = 100 \text{ Mpa}$ (o slide no. 20).
3. Calcule o raio de dobramento mínimo para uma chapa com espessura de 2 mm e alongamento longitudinal máximo = 40% (o slide no. 44).
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?
7. Cite as principais operações da conformação de chapas e dê uma breve descrição de cada uma delas.
8. O que é um "blank" e qual a sua finalidade?
9. Qual a importância da folga entre facas numa matriz de corte?
10. Qual a importância da folga entre punção e matriz numa matriz de estampagem?
11. Qual é a função e como funciona o prensa-chapa.
12. O que é dobramento; qual é a principal variável do processo de dobramento e qual é a importância dela?
13. Qual a diferença de comportamento de materiais frágeis e dúcteis quando da estampagem?



Exercícios

14. Quais são os objetivos de usar lubrificação na estampagem profunda?
15. Quais são as consequências do encruamento do material nas operações de dobramento e embutimento (estampagem profunda)?
16. Qual é a finalidade das arestas de corte inclinadas? Porque num caso é o punção que tem a aresta inclinada e no outro é a matriz?

