

Escola Politécnica da USP

PMR-Dept. Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

PMR 2202 – Introdução a Manufatura Mecânica

Projeto 2 – Conformação Mecânica – Ensaio de Swift

Texto 3 - Ferramental

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

Outubro - 2003

Ferramental para Conformação de Chapas

Princípio

A conformação de chapas é uma operação que consiste em transformar uma chapa plana em um copo de forma côncava sem mudar a espessura da chapa. Constitui um trabalho de deformação plástica.

Escoamento de material

Na operação de estampagem profunda, 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 1.



Figura 1: Esquema da área submetida à deformação na operação de estampagem profunda.

De acordo com a figura 1, a área correspondente a pequenos triângulos (indicados por ABC) é que sofrem deslocamento da região plana em direção ao topo da peça estampada.

Em um experimento, foram retirados da chapa plana vários setores circulares, representados por $B\hat{A}C$ na ilustração da figura 2(A). Em seguida, com a chapa recortada a operação de estampagem foi realizada, resultando em um copo de altura h como se observa na figura 2(B), onde por causa da ausência de material nas áreas triangulares citadas, ocorre nesta peça apenas dobramento da chapa.

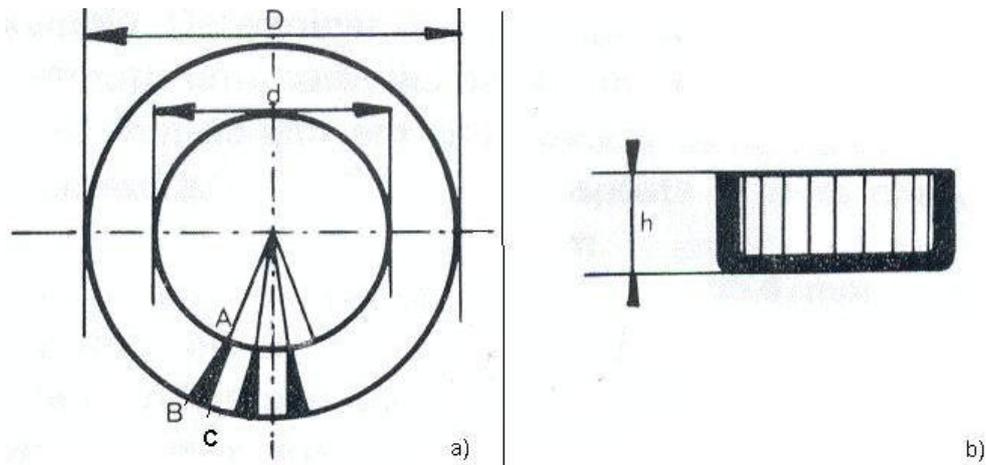


Figura 2: (A) Chapa plana recortada; (B) chapa plana recortada dobrada.

Continuando o experimento, a chapa de área circular sem recortes foi submetida à operação de estampagem profunda, durante a qual, sofre diversas fases de deformação, como se vê na figura 3 (A), e ao final da operação o copo conformado tem altura $h+h'$ devido ao escoamento de material, como está desenhado na figura 3(B).

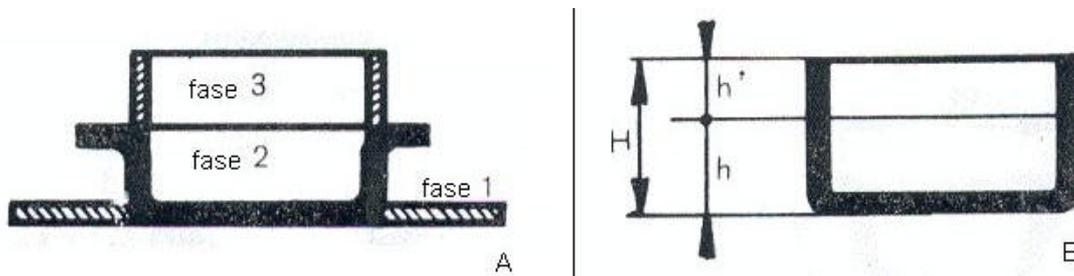


Figura 3: (A) chapa estampada visualizada em várias etapas, (B) Copo final de uma chapa estampada sem recortes.

A chapa é sempre redonda para embutir um copo redondo, mas o contorno da chapa pode variar de acordo com a geometria da peça estampada. É possível calcular a forma das chapas antes de realizar a conformação, mas para isso ensaios práticos são necessários para evitar erros decorrentes da diferença de comportamento de materiais, geometria do punção, e da matriz, bem como da folga entre eles. Um exemplo destes erros é ilustrado na figura 4, onde duas chapas retangulares são estampadas, a primeira (A) por não ter sido convenientemente calculada, apresentou áreas não expandidas de material, e a segunda (B) de geometria adequada ao processo em questão, proporcionou uma peça final melhor.

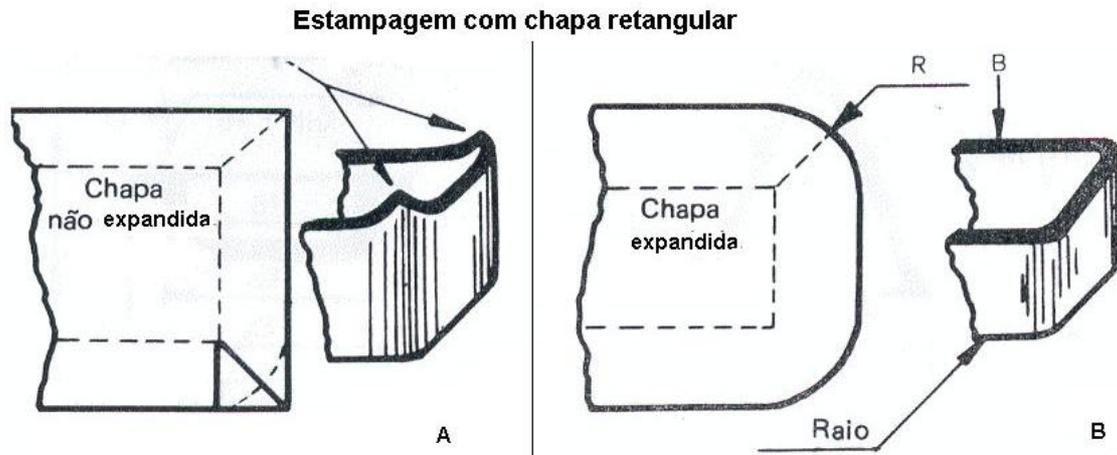


Figura 4: (A) Chapa retangular sem pré-cálculo de geometria, (B) Chapa retangular com pré-cálculo de geometria .

O erro demonstrado na figura 4 ocorre porque somente em chapas de perímetro arredondado é possível obter um copo com arestas perfeitas (onde indica a aresta B, na figura).

Estampagem de peças circulares: Cálculo dos diâmetros das chapas

Regra Geral

Basicamente pode se calcular o diâmetro do blank para a estampagem de qualquer peça de geometria circular baseando-se na lei da conservação da massa, o que implica que o volume de material é constante durante o processo. E uma segunda simplificação pode ser considerada: a operação de estampagem profunda também é feita de modo a manter a espessura da chapa constante.

Sabendo que o volume de uma chapa pode ser calculado multiplicando-se a área (A) da chapa, pela espessura (e) da mesma, tem-se:

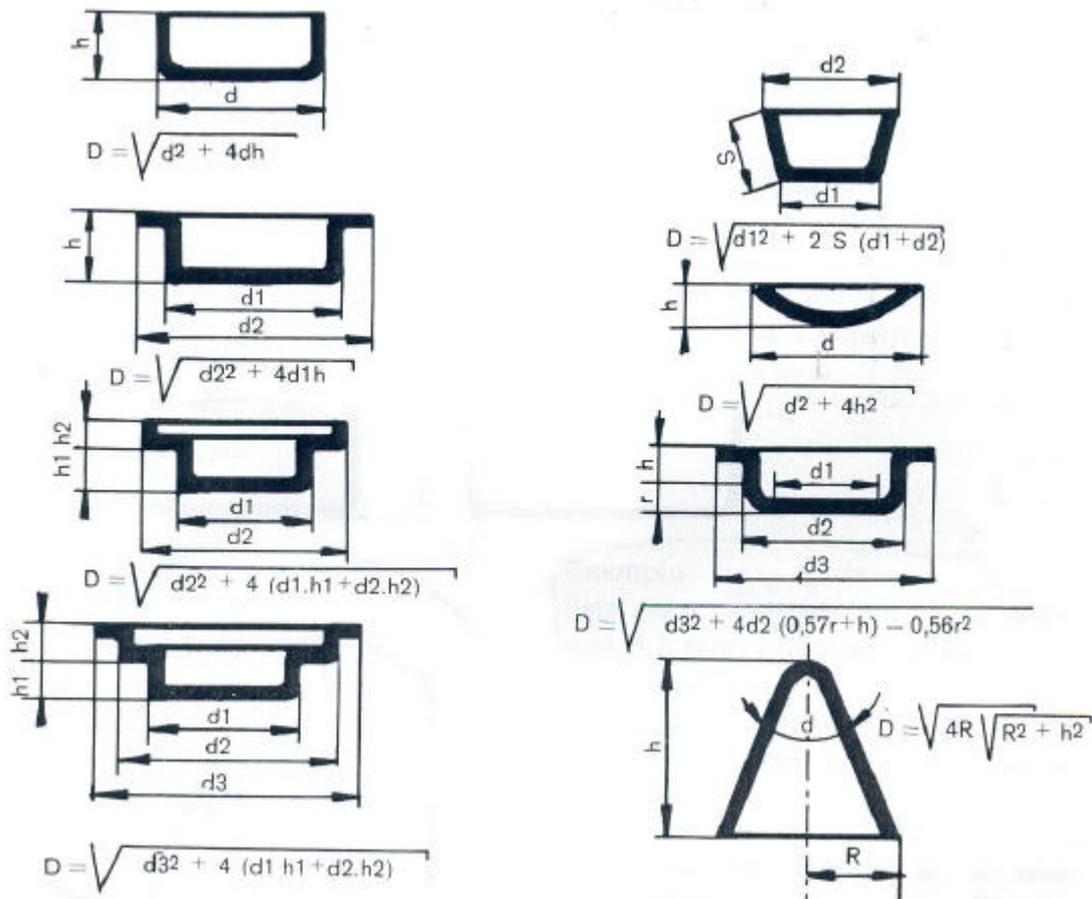
$$A_{\text{blank}} \cdot e_{\text{blank}} = A_{\text{peça}} \cdot e_{\text{peça}}$$

Assim, com espessura constante: $A_{\text{blank}} = A_{\text{peça}}$.

Resumidamente, a área do copo, é a soma das áreas do fundo e das paredes do mesmo. Então, considerando um copo de diâmetro final d , e altura h , pode se obter, a partir da regra acima explicitada a seguinte relação, para um blank de diâmetro D :

$$\frac{pD^2}{4} = \frac{pd^2}{4} + pdh$$

Simplificando esta relação, o diâmetro do Blank pode ser expresso em função do diâmetro e altura do copo. Adiante seguem diversos exemplos de geometrias que podem ser conformadas, e a expressão simplificada do calculo do diâmetro da chapa para cada caso. Entretanto, para metais recozidos, pode haver um ligeiro erro no calculo do diâmetro do blank, pois há uma tendência maior à redução da espessura da chapa durante o processo.



Exercício Exemplo:

Determinar o diâmetro da chapa para embutir um copo de 30 mm de diâmetro, 20 mm de altura, e 1 mm de espessura, em latão.

Estampagem de peças retangulares: determinação do Blank.

A determinação do recorte inicial do blank pode até ser feita através de algumas fórmulas. Contudo, para assegurar que a operação seja válida, ensaios práticos, com protótipos são indispensáveis.

Procedimento experimental: metodologia

Em princípio a idéia que surge, é a de realização primeiramente do corte do blank, depois da estampagem de embutimento do mesmo. Mas na realidade, para o protótipo se faz o contrário. Em uma chapa qualquer, faz-se a operação de embutimento, em seguida, as sobras irregulares da peça são eliminadas na altura da linha indicada na figura 5 (no caso 17 mm), a fim de se obter a geometria da peça final. Então á partir da peça estampada, procura-se a forma adequada ao blank. A figura 6 permite ter uma noção de como isto pode ser realizado.

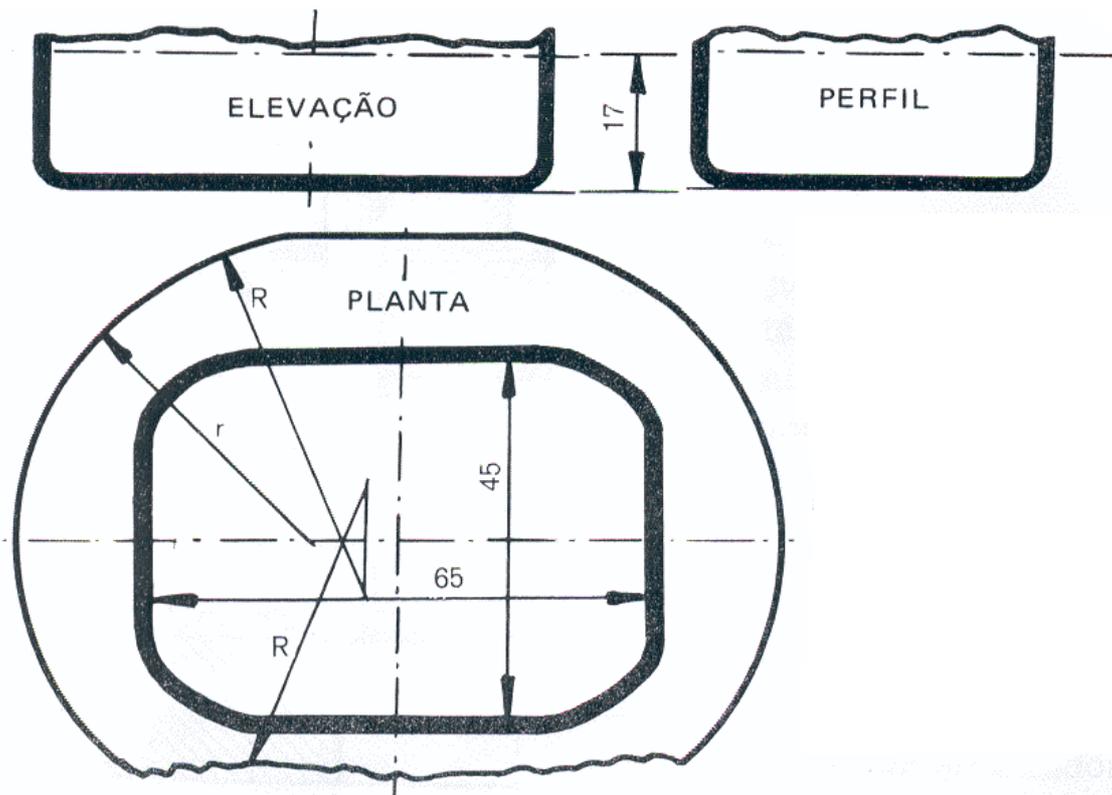


Figura 5: peça embutida sem recorte inicial da chapa.

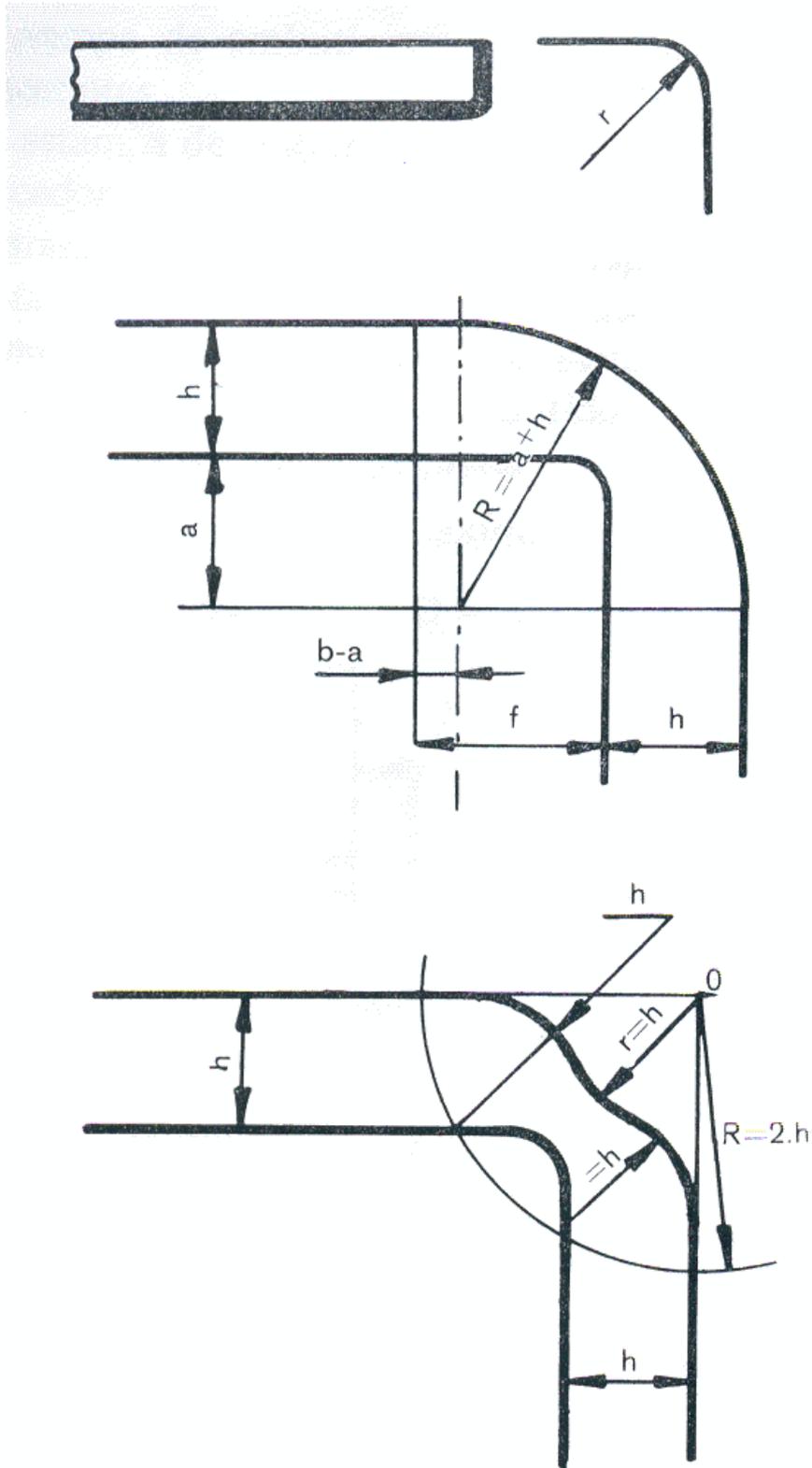


Figura 6: esquema de estudo do recorte inicial de uma peça estampada retangular.

A formação de rugas durante o processo de estampagem profunda pode ser evitada com o emprego de um prensa-chapas.

Exemplo:

- Estampagem profunda sem Prensa-chapas

Usa-se dispensar o prensa-chapas para a estampagem de chapas cujas espessuras 1,2 mm. Nos casos de chapas mais finas, o prensa-chapas não pode ser dispensado, ou então há formação de rugas no embutimento, fatalmente.

Para chapas de espessura acima de 1,2 mm, a estampagem profunda pode ser realizada com o uso de um guia-peças. Na figura 7 dois tipos de esquemas de matriz sem prensa-chapas podem ser observados.

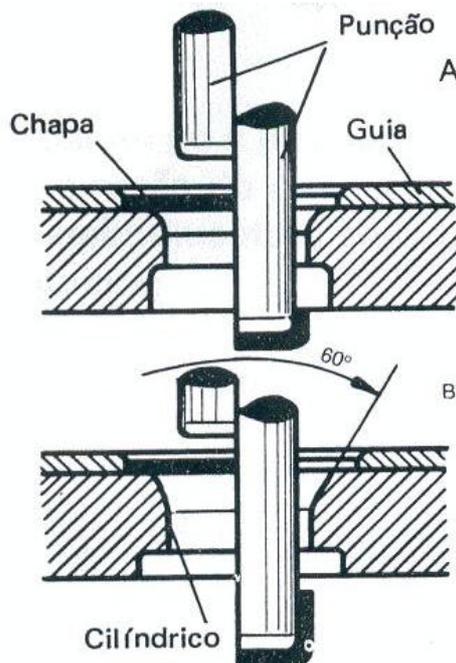


Figura 7: (A) Aresta da matriz arredondada para conduzir a deformação do blank; (B) um cone de ângulo 60° faz o papel de conduzir a deformação do blank.

- Estampagem profunda com Prensa-chapas

O prensa-chapas é um dispositivo ajustado em torno do punção, sendo que seu diâmetro deve corresponder ao da chapa a ser estampada, cuja função é permitir escoamento de material durante o processo de forma mais controlada (como um freio) para não permitir a formação de rugas.

Existem diversos meios de acionamento e montagem de dispositivos prensa=chapas. Entre eles tem-se:

1. Colchão Pneumático (excelente)
2. Arruelas em borracha empilhadas umas sobre as outras (bastante bom)
3. Por um meio puramente cinemático, como nas prensas de dupla ação
4. Simplesmente por molas

O uso de prensa-chapas é obrigatório na conformação de chapas finas ($e < 1,2$ mm).

Vale ressaltar que nos casos de estampagem de chapas finas deve ser respeitada a relação limite de diâmetros entre blank (D), e da peça estampada (d). Esta relação é:

$\frac{d}{D} = 0,95$ para metais em geral, 0,6 para metais de baixa resistência mecânica, ou eventualmente até 0,50.

Alguns exemplos esquemáticos de tipos de prensa-chapas podem ser vistos na figura 8.

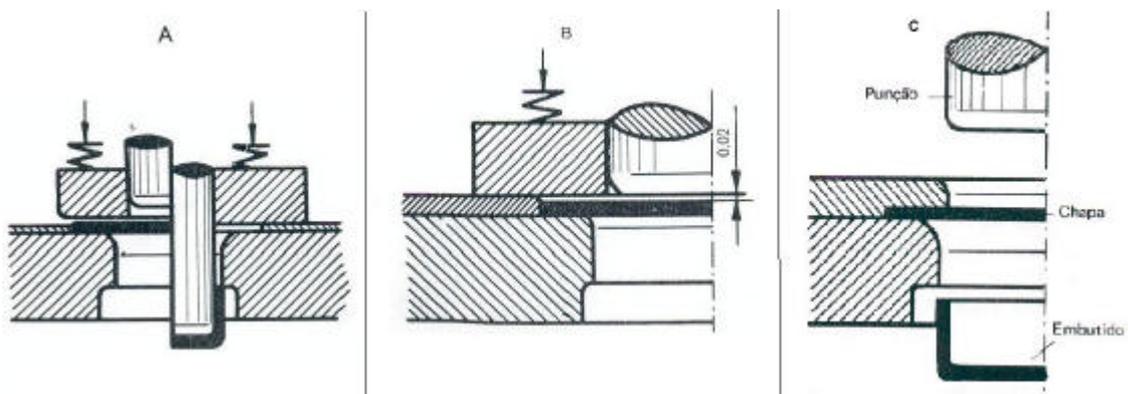


Figura 8: (A) Fixação por colchão pneumático, onde a guia da chapa é centésimos de milímetro mais fina do que a chapa; (B) Fixação por molas, onde o guia-chapas é ligeiramente mais espessa que a chapa (da ordem de 0,01 mm; (C) Prensa chapas fixo, usa-

se fixado diretamente sobre a matriz, e deve haver um folga entre ele e a peça, da ordem de 0,02 mm. É o mais simples dispositivo).

Chapas metálicas para estampagem:

Os metais em chapas mais empregados em embutimento são cobre (Cu) e suas ligas como latão (Cu-Zn), alumínio (Al), Níquel (Ni), aço de baixo carbono, e aço inoxidável (Fe, Cr, Ni).

Limite de embutimento

Dependendo do material, e da espessura da chapa, existe um limite de redução de diâmetros de uma peça. 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 acima mencionadas.

Generalizando, um valor médio deste fator é de 1,75. Assim, a relação se expressa por:

$$f_{PRIM.MATRIZ} = \frac{f_{CHAPA}}{1,75}$$

Toma-se o exemplo, então:

Para uma chapa de 100mm 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: $f_{PRIM.MATRIZ} = \frac{100}{1,75} = 57 \text{ mm}$. O que implica que a peça embutida deve ter no máximo 57 mm de diâmetro.

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 100mm, 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: $48,5 \times 0,85 = 41 \text{ mm}$,

O terceiro diâmetro vem a ser: $41 \times 0,85 = 35 \text{ mm}$,

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 peça.

Um segundo Exemplo é necessário:

Na prática, deve-se fazer um copo em cobre, espessura 1 mm, $\phi 35\text{mm}$, altura 40mm. Para resolver este problema é necessário seguir o procedimento abaixo:

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

Solução do Exemplo:

1. Cálculo do ϕ do Blank.

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

2. Primeira matriz de embutimento

$$f_{\text{PRIM.MATRIZ}} = \frac{82,6}{1,75} = 47,20 \text{ mm}$$

3. Matrizes de estiramento

$$\phi_{M1} = 47,20 \cdot 0,8 = 37,76 \text{ mm}$$

O objetivo final da operação é alcançar um copo de $\phi = 35 \text{ mm}$. 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.

Ferramental de Estampagem de Estiramento

- Sem prensa-chapas

A Ferramenta de estampagem de estiramento 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.

É importante informar 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 9 se observa esquematicamente este tipo de ferramenta.

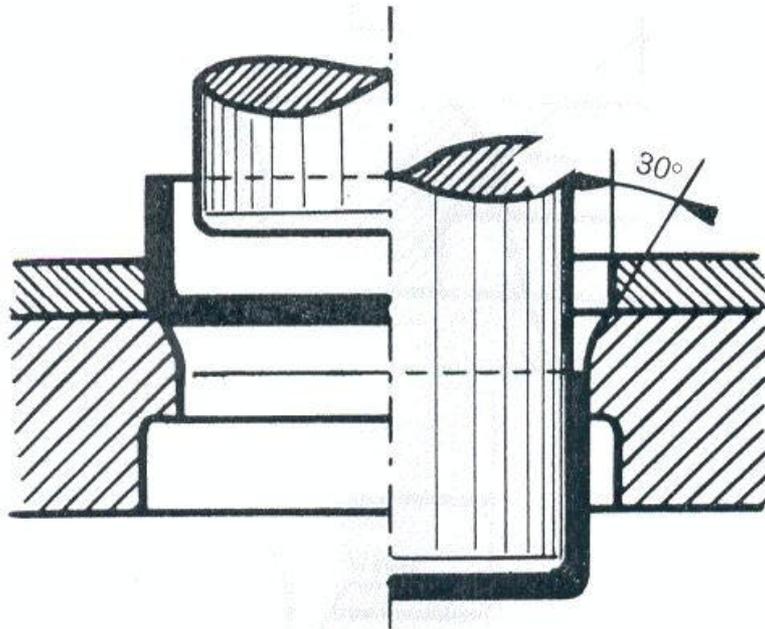


Figura 9: Esquema de Ferramenta de estiramento sem prensa-chapas.

- Com prensa-chapas

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 10 ilustra esquematicamente a ferramenta descrita.

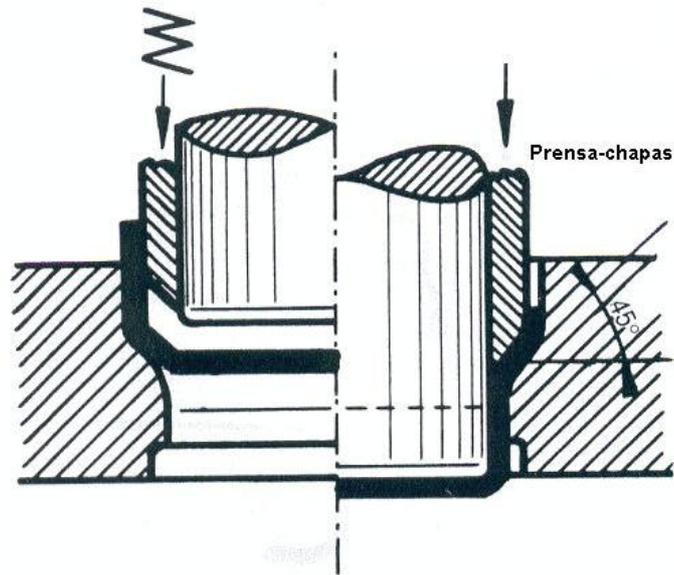


Figura 10: esquema de ferramenta de estiramento com prensa-chapas.

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

Particularidades da Matriz

Tanto nas matrizes de embutimento (figura 11(A)) ou estiramento (Figura 11(B)) o raio de concordância (indicado por r) é de grande importância. Os efeitos dos raios em cada tipo de matriz são variados:

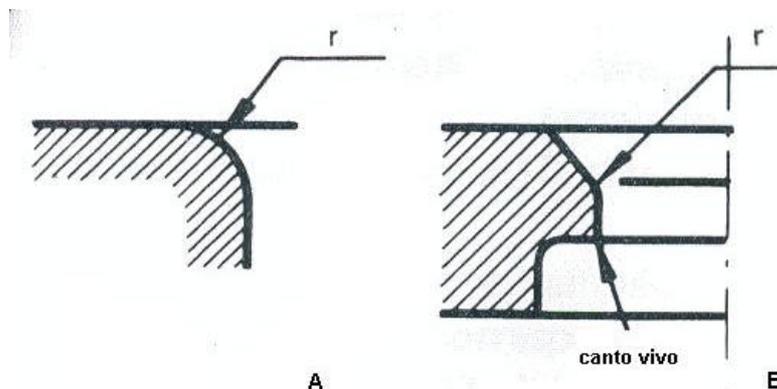


Figura 11: (A) trecho de matriz de embutimento, (B) Trecho de matriz de estiramento.

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 penetra-lo completamente na matriz.

Já na ferramenta de embutimento, o efeito não é tão significativo neste aspecto.

No caso de raio pequeno:

Na ferramenta de embutimento, 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.

Algumas fórmulas para estimar um valor de raio de matriz adequado a qualquer processo de estampagem, embutimento ou estiramento, são expressas por:

$r = 0,8\sqrt{D-d} \cdot e$ onde $D = \phi$ chapa, $d = \phi$ copo, e = espessura da chapa, para o aço.

E $r = 0,9\sqrt{D-d}$ para o alumínio e suas ligas.

Extrator

Para garantir que a peça embutida, ao passar pela matriz, não retorne aderindo-se em torno do punção, é necessário o uso de um extrator.

Assim que a peça passa pela parte cilíndrica da matriz, aumenta ligeiramente seu diâmetro, devido à deformação elástica que a também está presente no processo. Esse pequeno aumento é cerca de 0,01mm, e é suficiente para que um canto vivo inferior a matriz sirva como elemento de retenção do copo (observe esquema da figura 12).

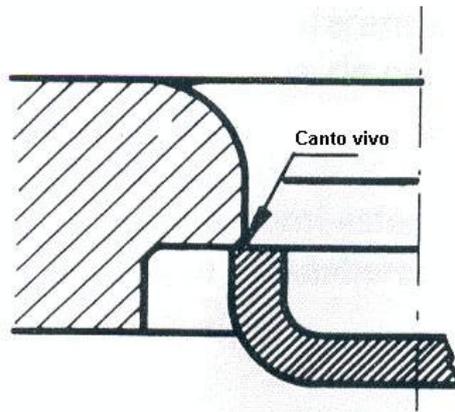


Figura 12: Canto vivo que retém a peça em uma matriz de embutimento.

Um exemplo interessante de extrator pode ser observado na figura 13 e consiste em um anel dividido em 2 ou mais partes, apoiadas na base da matriz, fixadas por uma mola circular. Durante o processo, a própria peça embutida é responsável pelo seu afastamento. Assim que a peça passa pelo anel extrator, a mola o faz contrair-se, impedindo o retrocesso da peça.

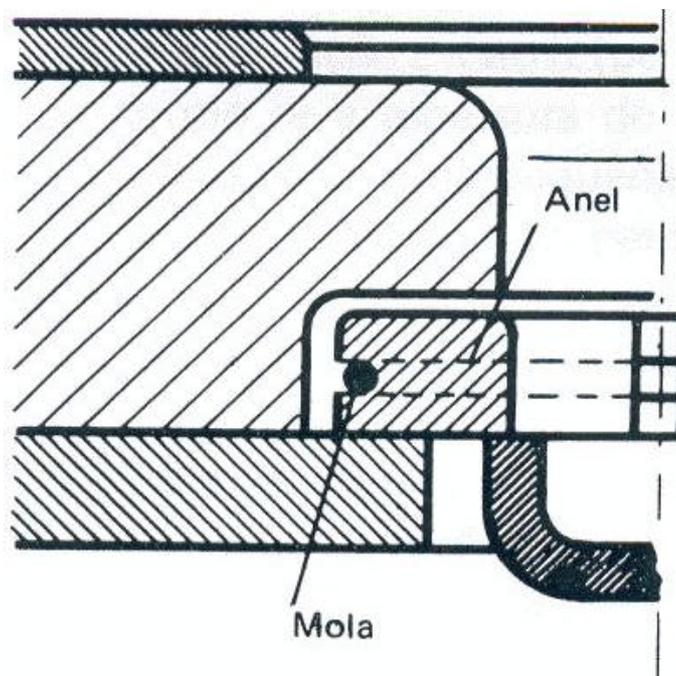


Figura 13: esquema de extrator de anéis em uma matriz de embutimento.

Punção

O punção é o componente responsável pela formação da geometria da peça estampada, por isso sua forma é de grande importância. As formas mais comuns em processos de embutimento estão ilustradas na figura 14, e são:

- Forma “A”: é a forma mais simples que se observa, mas deve-se atentar para que o raio, indicado por r na figura 14, nunca seja inferior ao raio de concordância da matriz (que é de 6 a 10 vezes a espessura das chapas).
- Forma “B”: é também de geometria bem simples. Mas tem 2 particularidades: o diâmetro indicado por ϕd corresponde ao diâmetro da próxima estampagem; e o chanfro de 45° é concordado por maior de 2 raios diferentes com a peça. Observa-se na figura 15 um exemplo de utilização desta a geometria em uma sequência de 5 operações de estampagem.
- Forma “C”: esta geometria já é mais difícil de ser usada, devido a sua complexidade de realização. É mais conhecida como “asa de cesta”.
- Forma “D”: É uma forma semi-esférica, e é de conveniente uso tratando-se de peças cuja geometria final também é semi-esférica.

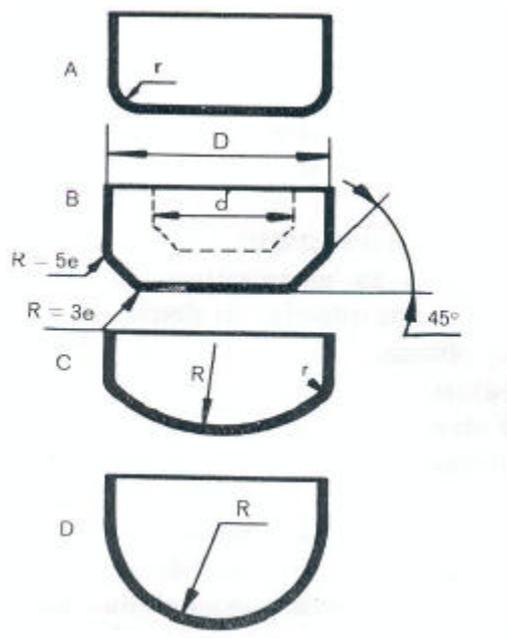


Figura 14: formas mais comuns de punções em processos de embutimento.

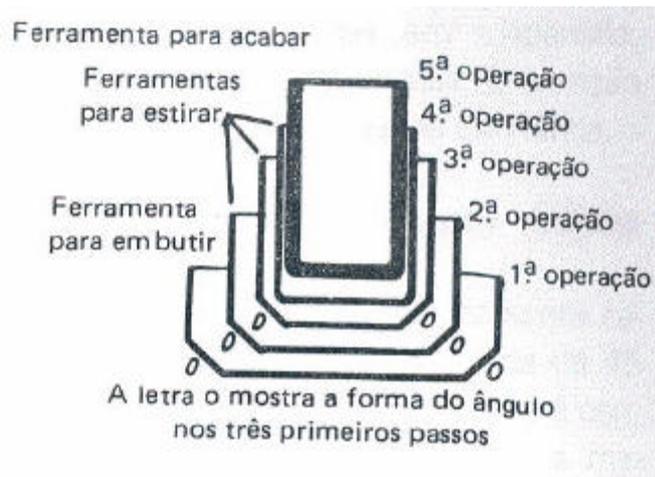


Figura 15: exemplo de uma utilização da forma “B”.

Folga entre Punção e Matriz

A folga entre o punção e a matriz pode ser determinada de acordo com o material e a espessura da chapa estampada.

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 travamento do sistema e até danos a máquina.

Algumas fórmulas para esta determinação são expressas abaixo:

$$E = e + 0,07\sqrt{10 \cdot e} \text{ (para aço)}$$

$$E = e + 0,04\sqrt{10 \cdot e} \text{ (para metais não ferrosos)}$$

$$E = e + 0,02\sqrt{10 \cdot e} \text{ (para alumínio e suas ligas)}$$

onde E é a diferença entre raio do punção e da matriz, e e é a espessura da chapa.

Estudo de caso: Estampagem de um chapa de aço.

Exemplifica-se neste tópico a fabricação de uma peça em aço, com uma chapa de espessura $e=2,5\text{mm}$ e $\phi =76\text{mm}$, em 4 etapas.

Convém observar que para este material de blank, as ferramentas devem ser bastante fortes.

1. Passo 1: Estampagem profunda.

A primeira ferramenta, de embutimento, é simples. A matriz é colocada em uma base e montada com uma guia fixa. A guia é bem posicionada, de modo a passar apenas a espessura e o ϕ da chapa.

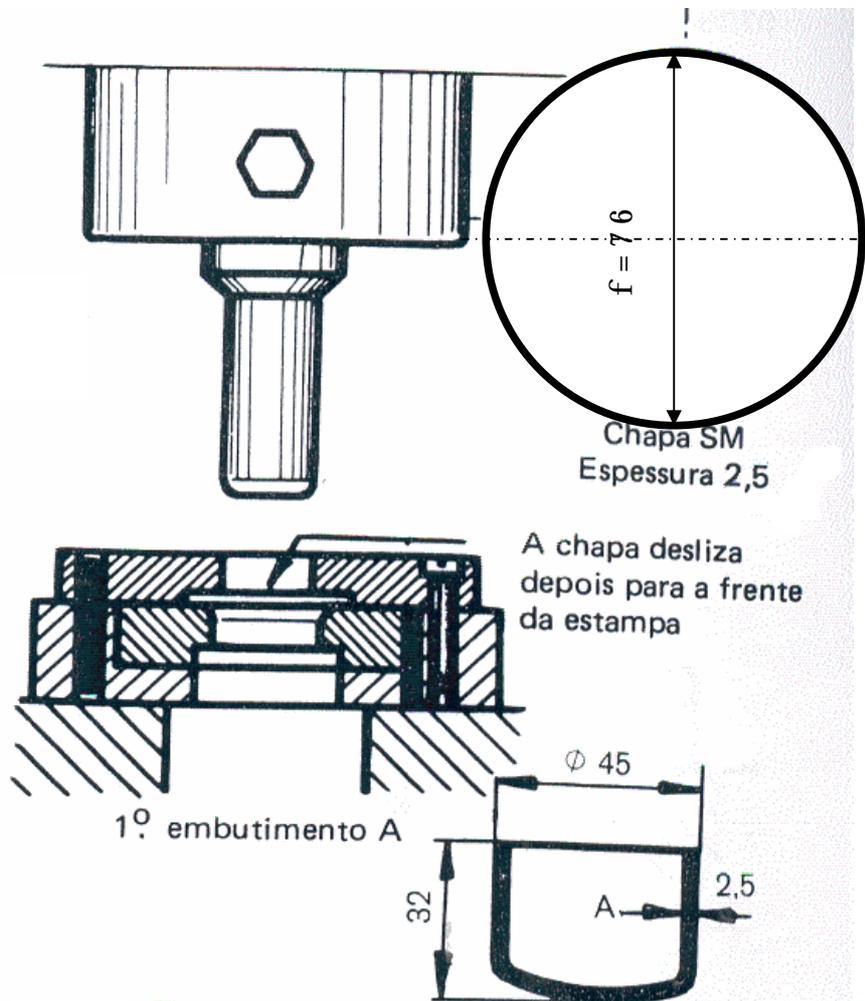


Figura 16 – Primeiro embutimento

2. Passo 2: Ferramenta de estiramento

Esta ferramenta tem o objetivo de reduzir a peça estampada de 45 para 40 mm de ϕ . O copo é centralizado por uma guia fixada sobre a matriz. O punção é montado sem prensa-chapas, pois a redução é pequena, perto da espessura da chapa.

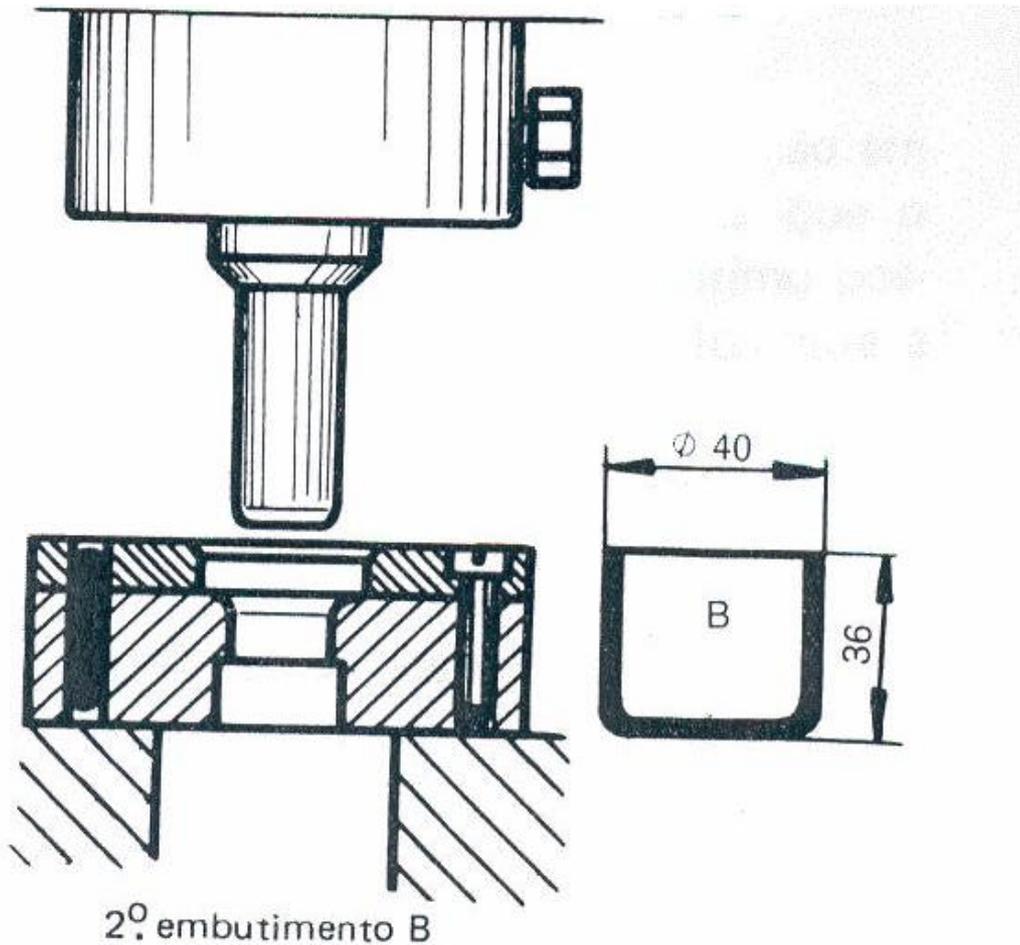
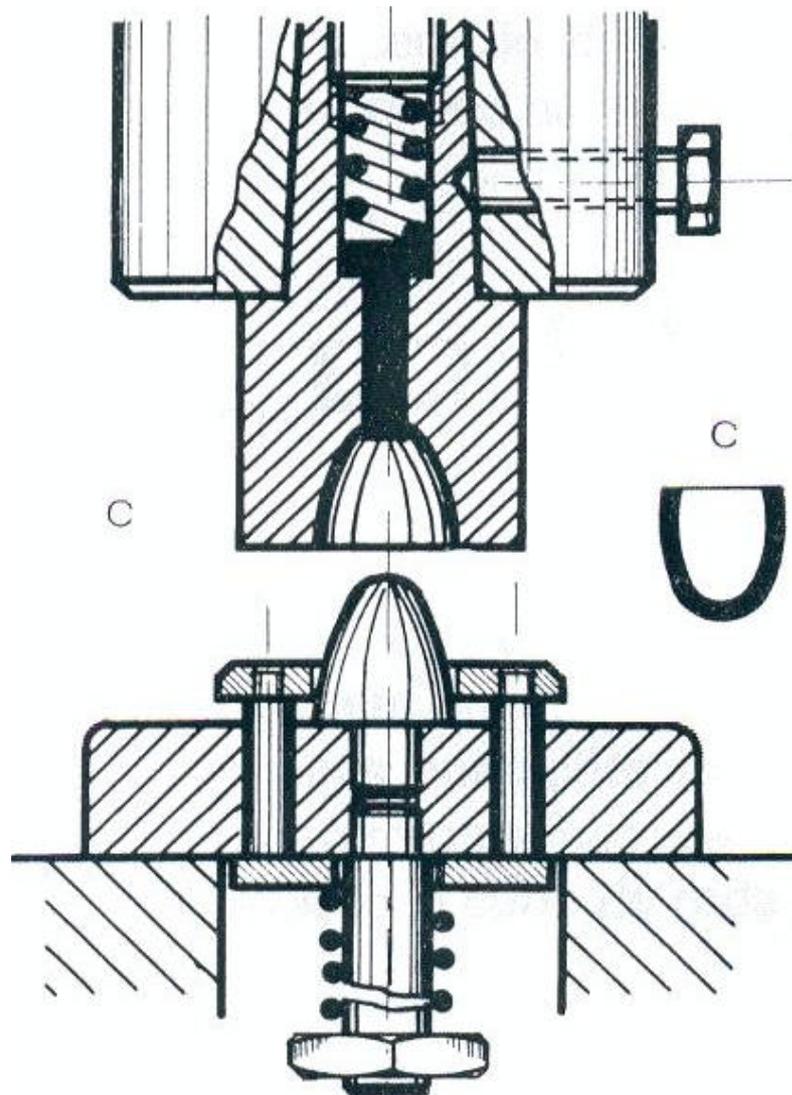


Figura 17 – segundo embutimento

3. Passo 3: Estampagem de forma

Nesta operação, imprime-se uma geometria na peça. Nota-se que o punção está no lado inferior da matriz e possui extrator a fim de evitar que a peça fique aderida ao punção. Na matriz superior também há presença de um extrator cuja função é evitar que a peça permaneça dentro da cavidade.



3ª operação

Figura 18 – terceira operação de embutimento

4. Passo 4: Ferramenta de acabamento

Nesta última etapa, a impressão de uma forma final mais complexa é realizada. As semelhanças desta ferramenta com a anterior dispensam maiores comentários.

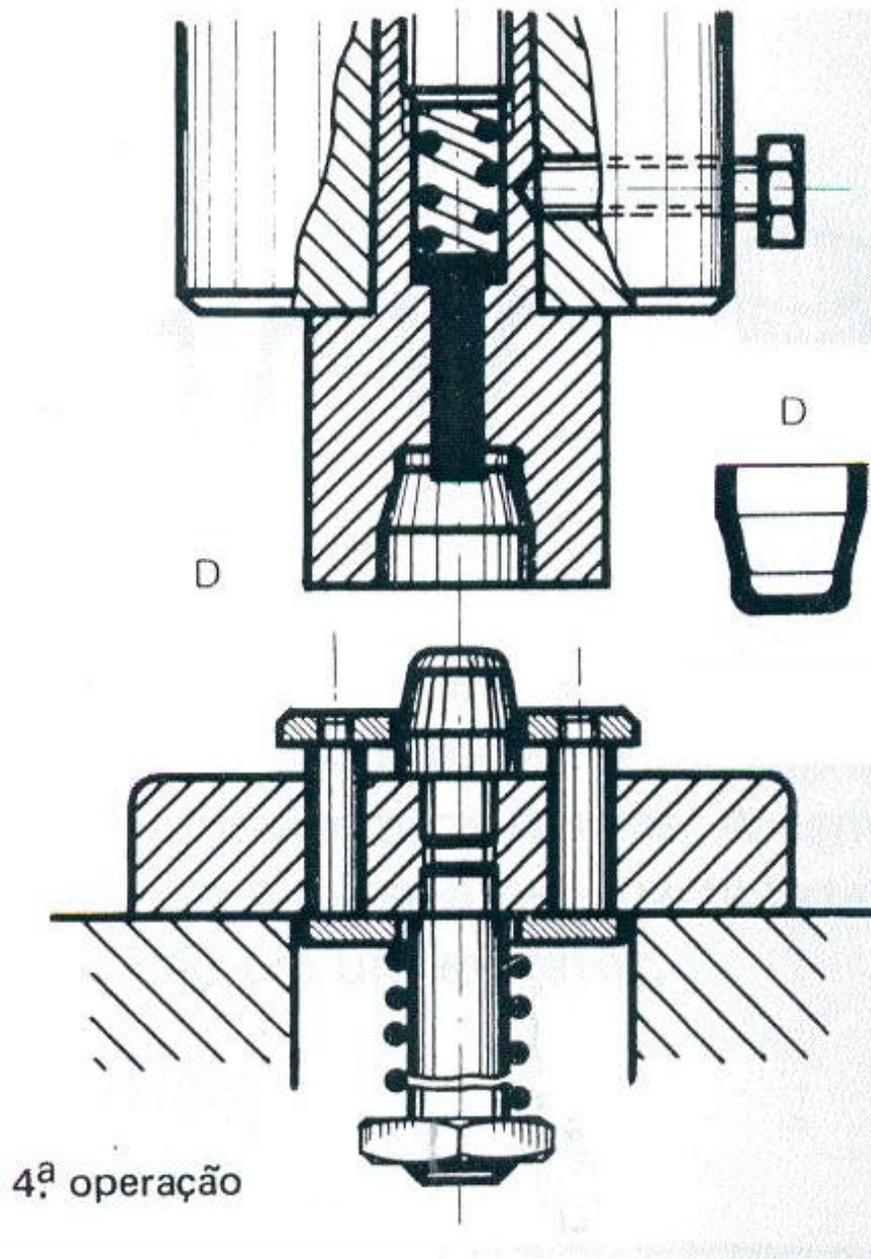


Figura 19 – quarta operação de embutimento

Exemplos de aplicação de estampagem profunda.

1) Lubrificador

Neste exemplo, 6 operações de estampagem com 2 recozimentos entre as operações 2 e 3, depois 4 e 5.



Figura 20 - lubrificador

2) Dedal de costura

A partir do corte da chapa, 7 operações são realizadas. A quinta operação é mais conhecida por cunhagem.



Figura 21 – dedal de costura

3) Cubo de engrenagem

As primeiras 8 operações são realizadas ainda na chapa inteira. O corte do formato final da peça é realizado em seguida.



Figura 22 - Cubo de engrenagem

4) Cartucho (Figura 23).

Para fabricação deste componente, 11 operações contendo embutimentos, estiramentos e reduções são necessárias. As operações de 1 a 5 são de embutimento-estiramentos. As de 6 a 9 procuram formar a base do cartucho. Da décima operação em diante, a redução da frente do cartucho é realizada. Uma observação interessante é que a bala que irá ser montada no cartucho também necessita de 8 operações de estampagem para ser conformada.

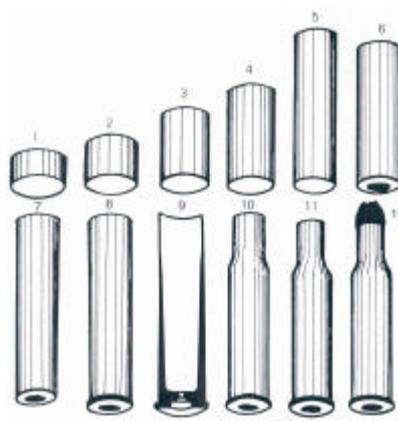


Figura 23 – cartucho

A figura 24 representa uma composição de 2 matrizes em uma ferramenta, para realizar 2 operações ao mesmo tempo. A peça passa da primeira para a segunda matriz e da segunda para o final da ferramenta com um só golpe do punção.

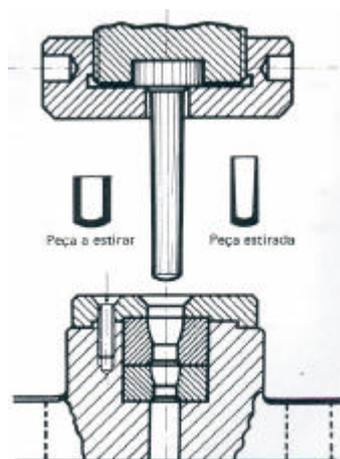


Figura 16: Matriz para realização de duas operações ao mesmo tempo.

Ferramenta de corte e estampagem profunda

Na figura 25 abaixo é ilustrada esquematicamente uma ferramenta que permite em um só golpe de um punção, o corte e o embutimento de uma caixa de forma retangular, a partir de uma tira de metal.

