

LIRIO SCHAEFFER

Fundamentos do projeto de ferramentas para o processo de estampagem

A estampagem, apesar de ser um processo de fabricação bastante antigo, requer a observação cuidadosa de parâmetros técnicos para a obtenção de peças de boa qualidade.

O processo de estampagem, também denominado de embutimento profundo ou repuxo, apresentado a seguir, considera uma chapa metálica trabalhada por ferramentas rígidas que, através de ações de esforços de compressão e tração, transformam uma geratriz plana (*blank*) em um corpo cilíndrico ou cônico, (em forma de copo), com ou sem flange (Figura 1).

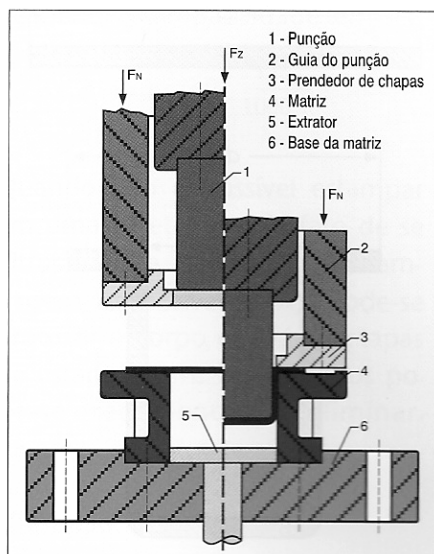


Figura 1 - Estampagem profunda de um componente cilíndrico empregando um prendedor de chapas em um primeiro estágio

Empregando-se um modelo simples como a fabricação de um componente em forma de copo, pode-se observar o principal fenômeno que ocorre no processo de estampagem profunda (Figura 2). São triângulos e retângulos existentes na geratriz que passam a ter a forma retangular no copo após a conformação. O excesso de material (triângulos) é passado para o corpo do produto estampado graças à função do prendedor de chapas (Figura 1), que evita a formação de rugas na região do flange.

A estampagem, ou embutimento é um processo de conformação que envolve uma contínua intervenção entre ferramenta, lubrificante, material de conformação e equipamento. A Figura 3 mostra esquematicamente uma série de parâmetros que interferem e que devem ser controlados nos processos de estampagem.

A grande vantagem da fabricação de componentes a partir de chapas metálicas é o baixo custo originado pela minimização do uso

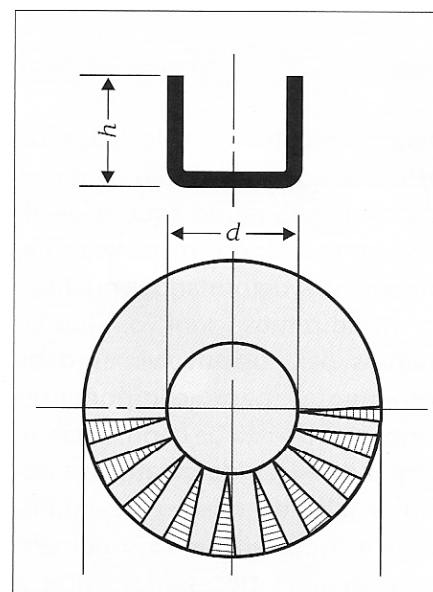


Figura 2 - Transformações ocorrentes na estampagem profunda de um corpo vistas: a) em corte; b) de topo

de matéria prima aliado à baixa necessidade de usinagem. Com o aumento da automação os processos de estampagem vêm se tornando cada vez mais importantes e significativos. O controle dos vários parâmetros, indicados na Figura 3, é fundamental para a otimização do processo, principalmente no momento atual em que se deve consi-

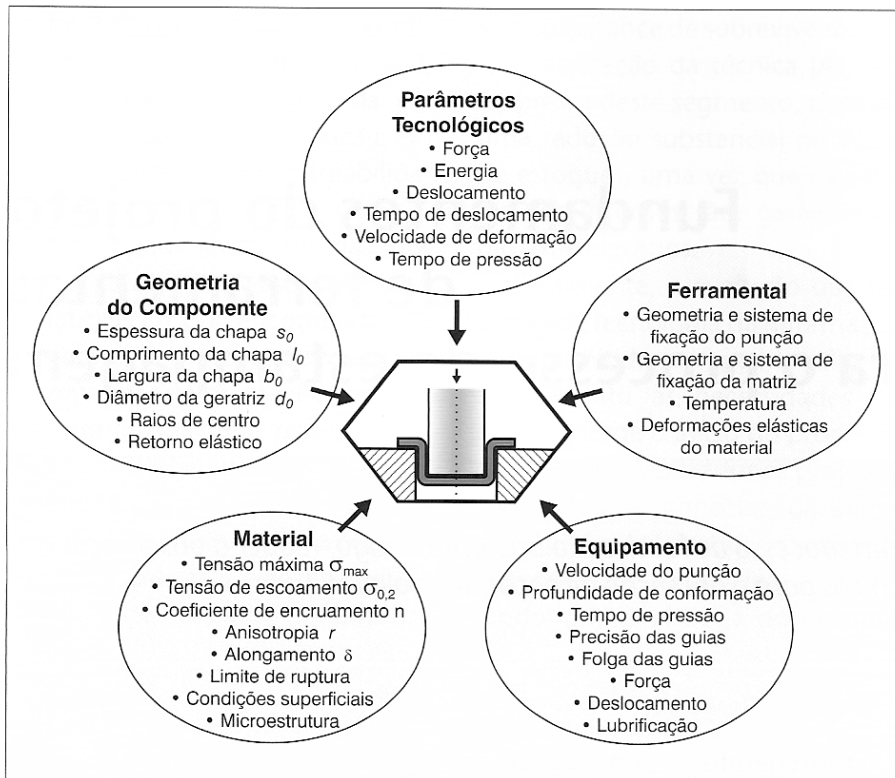


Figura 3 - Parâmetros do processo de estampagem

A superfície externa desse corpo pode ser calculada por:

$$\frac{\pi d^2}{4} h$$

onde (d) é o diâmetro do copo e (h) a altura do mesmo.

Como estas áreas devem ser iguais à seção da geratriz que possui um diâmetro (D) tem-se:

$$\frac{\pi d^2}{4} h = \frac{\pi D^2}{4} h$$

Desta forma o diâmetro da geratriz (D) pode ser calculado por:

$$D = \sqrt{d^2 + 4dh}$$

Se o corpo possuir um flange (Figura 5) o cálculo da geratriz é feito por:

$$\frac{\pi d_1^2}{4} + d_1 h = \left(\frac{\pi d_1'^2}{4} + \frac{\pi d_1^2}{4} \right) \frac{D^2}{4}$$

ou seja:

$$D = \sqrt{d_1'^2 + 4d_1 h}$$

derar aumentos de velocidade de deformação e introdução de novos materiais, sobretudo aqueles de altíssima resistência mecânica que precisam ser deformados a quente.

Introduzimos aqui os fundamentos para desenvolvimento de ferramental para componentes simples em forma de copo. Inicia-se com a definição da geratriz e a determinação da relação de estampagem (que caracteriza o número de operações necessárias entre a geratriz e a peça final). O cálculo da força permite determinar a capacidade do equipamento, bem como analisar o efeito de alguns parâmetros na otimização do processo. Finalmente são apresentadas expressões para o cálculo do raio da matriz, raio do punção e a folga entre punção e matriz.

CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

O projeto de uma peça estam-

pada inicia com o conhecimento do componente que se deseja produzir. Para a obtenção de um componente estampado deve-se partir de uma geratriz recortada da chapa de onde será originado este componente. O perfeito dimensionamento e forma da geratriz são importantes para evitar defeitos e perdas excessivas do material.

A forma mais simples para determinação da geratriz (*blank*) pode ser analisada na estampagem de um corpo sem flange (Figura 4).

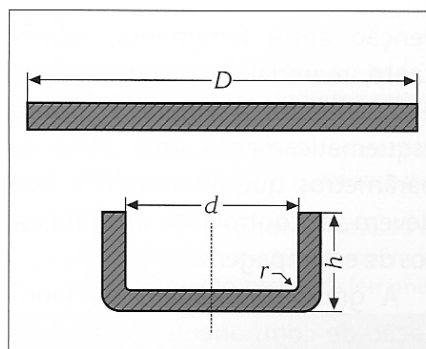


Figura 4 - a) geratriz; b) corpo com um raio de base de pequeno valor

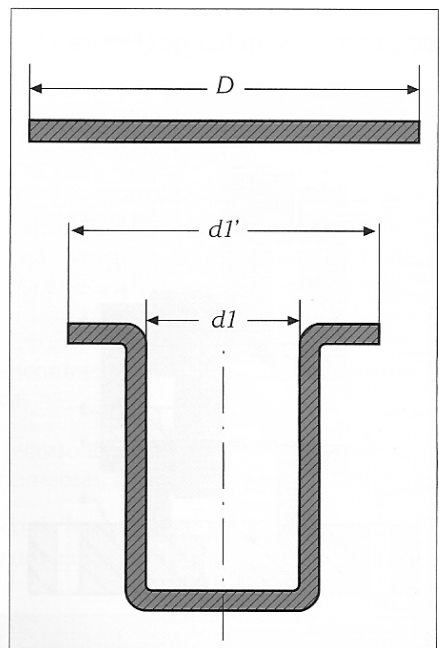


Figura 5 - a) geratriz; b) corpo estampado com flange

Outras formas mais complexas podem ser deduzidas ou encontradas tabeladas em outras literaturas [1].

RELAÇÃO DE ESTAMPAGEM

A passagem de uma geratriz com diâmetro (D) para um corpo estampado com diâmetro (d) como, por exemplo, o copo da Figura 4, somente pode ser realizada dentro de certos limites. Esta análise é procedida a partir do cálculo da Relação de Estampagem (β) definido pelo quociente do diâmetro da geratriz (D) pelo diâmetro do copo ou do punção (d):

$$\beta = \frac{D}{d}$$

Para uma primeira aproximação, a Relação de Estampagem Admissível (β_{adm}) para materiais de alta estampabilidade pode ser calculada pela expressão:

$$\beta_{adm} = 2,15 \frac{d}{1000 \cdot s}$$

sendo (d) o diâmetro do punção e (s) a espessura da chapa. Para aços de menor estampabilidade tem-se:

$$\beta_{adm} = 2,0 \frac{1,1d}{1000 \cdot s}$$

Quando não é possível estampar em uma só etapa, pelo fato de se ultrapassar a Relação de Estampagem Admissível (β_{adm}), pode-se produzir o corpo em várias etapas de estampagem. Nestes casos pode-se recomendar preliminarmente:

2º estágio:

$$\beta = 1,3$$

3º estágio:

$$\beta = 1,2$$

Se ocorrer um tratamento térmico intermediário pode-se empregar:

$$\beta = 1,6$$

A Figura 6 ilustra uma situação de três estágios.

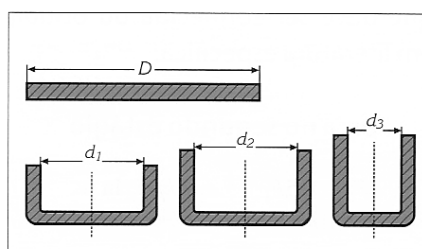


Figura 6 - Produto estampado com 3 estágios de conformação

A demonstração esquemática do sistema operacional para executar as operações subsequentes (estágios posteriores) pode ser vista na Figura 7. O copo à esquerda dessa Figura foi obtido em um ferramental semelhante ao da Figura 1.

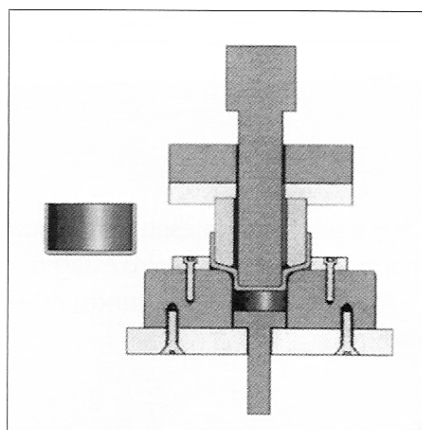


Figura 7 - Demonstração esquemática das operações após primeiro estágio de estampagem

A Relação de Estampagem Total (β_{total}) quando ocorrem três estágios é dada por:

$$\beta_{tot} = \beta_0 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 = \frac{D}{d_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{d_2}{d_3} = \frac{D}{d_3}$$

O número de estágios (n) pode ser calculado por:

$$n = \frac{h_n}{d_n} \cdot \frac{D^2}{4d_n^2}$$

onde (d_n) é o diâmetro do estágio (n).

A literatura técnica apresenta sugestões de valores da Relação de Estampagem (β) para diversos materiais e para diferentes estágios, por exemplo, Oehler [1]. Entretanto pouco existe registrado para os materiais nacionais. No projeto de ferramentas o conhecimento preliminar da Relação de Estampagem (β) de cada material é de fundamental importância. Uma forma de se determinar este parâmetro é através de um conjunto de punções que representam todas as características de embutimento profundo e de estiramento que normalmente ocorrem nos processos de estampagem [2].

As formas geométricas destes punções variam desde uma forma cilíndrica simples (que caracteriza o processo de estampagem profunda) até uma forma elíptica (que mostra o efeito do estiramento).

CÁLCULO SIMPLIFICADO DA FORÇA DE ESTAMPAGEM

• Força no primeiro estágio

A força de estampagem no primeiro estágio pode ser calculada por:

$$F_1 = 5 \cdot d_0 \cdot s \cdot k_{fm1} \cdot \ln \beta_1$$

sendo:

- F_1 - Força de estampagem no primeiro estágio
- d_0 - Diâmetro do punção
- s - Espessura da chapa
- k_{fm1} - Tensão de escoamento média no primeiro estágio
- β_1 - Relação de estampagem no primeiro estágio

As deformações no primeiro estágio podem ser definidas por:

$$\beta_1 = \ln \beta_1 \ln \frac{D_0}{d_0}$$

Desta forma pode ser calculada a tensão de escoamento por:

$$k_{f2} = C \cdot \frac{n}{2}$$

onde (c) e (n) são características da curva de escoamento do material que deve ser conhecida ou obtida em literatura específica.

• Força no segundo estágio

$$F_2 = 0,5 F_1 + 5 \cdot d_1 \cdot s \cdot k_{fm2} \ln \beta_2$$

sendo:

- F_2 - Força de estampagem no segundo estágio
- F_1 - Força de estampagem no primeiro estágio
- d_1 - Diâmetro do punção no segundo estágio
- s - Espessura da chapa
- k_{fm2} - Tensão de escoamento

$$k_{fm2} = \frac{k_{f1} + k_{f2}}{2}$$

onde:

$$k_{f2} = f(\beta_2)$$

e (k_f) é a tensão de escoamento da chapa no final do primeiro estágio.

A deformação no segundo estágio é:

$$\beta_2 = \ln \beta_2 \ln \frac{d_0}{d_1}$$

• Força do prensa - chapas (p_{pc})

Este cálculo pode ser realizado pela equação:

$$p_{pc} = 0,0025 \cdot$$

$$\beta_0 = 1 + 0,5 \cdot \frac{d_0}{100 \cdot s_0} \cdot R_m$$

onde (R_m) é a tensão máxima admissível para o material em conformação.

Neste caso a relação de estampagem (β) deve ser considerada para o estágio em questão.

O diâmetro do punção (d) também deve ser considerado para o punção correspondente.

EXEMPLO DE CÁLCULO PARA UM CASO DE DOIS ESTÁGIOS

A seguir um exemplo de cálculo da força de estampagem com expressão simplificada para um caso de dois estágios sem tratamento térmico intermediário (Figura 8).

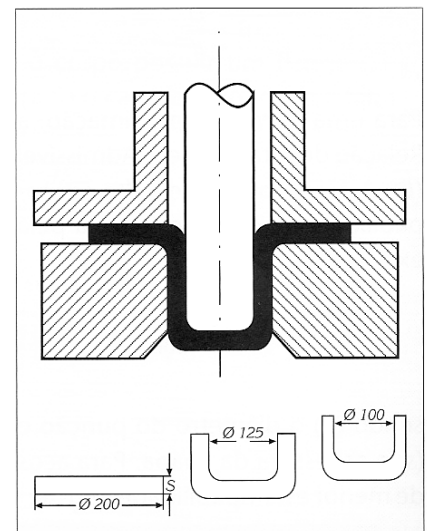


Figura 8 - Esquema de configuração das fases de estampagem do exemplo

São dados:

- $D_0 = 200$ mm (diâmetro da geratriz)
- $d_0 = 125$ mm (diâmetro do primeiro estágio)
- $d_1 = 100$ mm (diâmetro no segundo estágio)
- $s = 1$ mm (espessura da chapa)
- $k_f = 740$ (tensão de escoamento do material)
- $k_{f0} = 260$ N/mm² (tensão de escoamento inicial)
- $R_m = 740$ N/mm² (tensão máxima)

• Solução

Relação de embutimento:

$$\beta_1 = \frac{D_0}{d_0} = \frac{200}{125} = 1,6$$

$$\beta_2 = \frac{d_0}{d_1} = \frac{125}{100} = 1,25$$

Deformação:

$$_1 \ln \beta_1 = 0,47$$

$$_2 \ln \beta_2 = 0,223$$

Tensão de escoamento após primeiro estágio:

$$k_{f_1} = 740 \cdot 0,216 = 629 \text{ N/mm}^2$$

Tensão de escoamento após segundo estágio:

$$k_{f_2} = 740 \cdot 0,216 = 684 \text{ N/mm}^2$$

Força do punção no primeiro estágio:

$$F_1 = 5 \cdot d_0 \cdot s \cdot k_{f_{m1}} \cdot \ln \beta_1$$

$$F_1 = 5 \cdot 125 \cdot 1 \cdot \frac{260 + 629}{2} \cdot 0,47 = 130 \text{ kN (13 ton)}$$

Força do punção no segundo estágio:

$$F = 0,5 \cdot F_1 + 5 \cdot d_2 \cdot s \cdot k_{f_{m2}} \cdot \ln \beta_2$$

$$F_2 = 0,5 \cdot 130000 + 5 \cdot 100 \cdot 1 \cdot \frac{629 + 684}{2} \cdot 0,223$$

$$138 \text{ kN (14 ton)}$$

ELEMENTOS TÉCNICOS DO PROCESSO

• Raio da matriz (r_m)

O raio da matriz (r_m) pode ser dimensionado para uma primeira operação de estampagem, (Figura 9) por:

$$r_{m1} = 0,6 \sqrt{(D_0 - d_1) \cdot s}$$

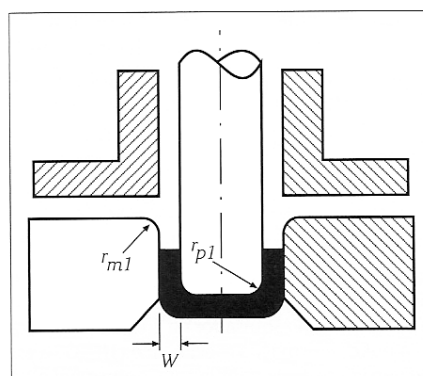


Figura 9 - Primeira operação

Para as operações subseqüentes, (Figura 10) pode-se empregar:

$$r_{m2} = 0,8 \sqrt{(d_1 - d_2) \cdot s}$$

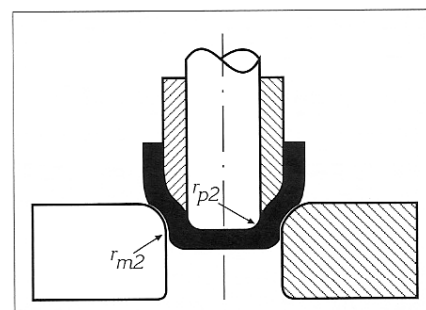


Figura 10 - Operação subseqüente

sendo:

d_1 = Diâmetro do punção no primeiro estágio e;

d_2 = Diâmetro do punção no segundo estágio

• Raio do punção

Para a primeira operação (Figura 9) tem-se:

$$r_{p1} = (5 \text{ a } 6) \cdot s$$

sendo (s) a espessura da chapa. O raio do punção nunca deve ser

inferior ao raio da matriz, sob pena de haver um encravamento do punção na chapas [1]. Nas operações seguintes pode ser considerado o mesmo valor da primeira operação.

• Folga entre punção e matriz

Apesar da necessidade de se analisar o processo quanto às deformações na direção da espessura ao longo do componente estampado, [3] pode-se tomar com referência o dimensionamento (Figura 9), pela seguinte expressão:

$$w = s \sqrt{\frac{D}{d}}$$

sendo:

- w - Folga entre punção e matriz (mm)
- D - Diâmetro da geratriz (mm)
- d - Diâmetro do punção (mm)
- s - Espessura da chapa (mm)

Fadanelli [4] indica que a folga deve ser de pelo menos 10% da espessura de chapas de aço e alumínio, e de 30% para chapas de aço inoxidável.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um projeto de ferramenta somente pode ser otimizado com o conhecimento da influência dos diferentes parâmetros no processo bem como das características principais dos materiais. As características de estampabilidade envolvem o conhecimento da curva de escoamento, da relação de estampagem, do coeficiente de anisotropia e das curvas limite de conformação, largamente discutido [2].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Oehler, G. e H. Kaiser; *Schmitt Stanz-und Ziehwerkzeuge*; 7ª edição, Springer Verlag 1993
- [2] Schaeffer, L.; *Conformação de Chapas Metálicas*; Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 2004
- [3] Tschätsch, H.; *Praxiswissen Umformtechnik*; Verlag Vieweg, 1977
- [4] Fadanelli, R.; *O Embutimento Circular*; Anais da IV Conferência Nacional de Conformação de chapas, UFRGS/ LdTM, Porto Alegre (2001), pág. 12-28

Lírio Schaeffer - Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Engenheiro Mecânico pela UFRGS, com Doutorado na área de Conformação pela Universidade Técnica de Aachen/Alemanha (RWTH - Aachen). Pesquisador na área de Mecânica, Metalurgia e Materiais do CNPq, professor das disciplinas relacionadas aos processos de fabricação por conformação mecânica da UFRGS e está vinculado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Energia desta Universidade. Autor dos livros *Conformação Mecânica*, *Conformação dos Metais: Metalurgia e Mecânica*, *Problemas Práticos de Conformação Mecânica*, *Forjamento: Introdução ao Processo e Conformação de Chapas Metálicas*.