



## Manufatura de chapas metálicas - dobramento

A conformação de metais por dobramento tem substituído com vantagem alguns processos mecânicos como a utilização de chapas dobradas ao invés de perfis laminados. São diversas as variações do processo, utilizado tanto para produzir geometrias funcionais como para aumento de rigidez de peças.

O dobramento (*bending*) é usualmente definido como a deformação plástica de uma chapa metálica ao longo de uma linha reta. Na maioria dos casos tem-se uma deformação plana localizada no canto da dobra. A operação de dobramento pode ser considerada como um sistema com sete componentes: produto, peça/material, equipamento, punção/matriz, zona de deformação, interface e ambiente. O objetivo desse artigo é definir os tipos básicos de dobramento e ilustrar o mecanismo de retorno elástico (*springback*).

O tipo clássico de conformação por dobramento é a operação para obter curvatura cilíndrica ou cônica em rolos (calandras). Outras variedades de dobramento são o enrolamento (*curling*), o recravamento e agrafamento (*hemming*) e o repuxamento (*spinning*). Tem-se, ainda, o dobramento por giro, caso do dobramento contínuo em rolos de vários estágios (*roll forming*) para produzir, calhas, tubos e perfis.

O dobramento não é somente usado para produzir geometrias funcionais tais como bordas, flanges, curvas, emendas e corrugação, mas também para aumentar a rigidez das peças aumentando o momento seccional transversal de inércia.

Atualmente, os perfis laminados estão sendo substituídos, quando necessário e possível, por elementos de chapa dobrados. A execução destes perfis em geral é feita nas dobradeiras, porém, quando os elementos são relativamente curtos ou com conformação especial, podem ser executados vantajosamente por meio de matrizes e prensas, como demonstrado na figura 1.

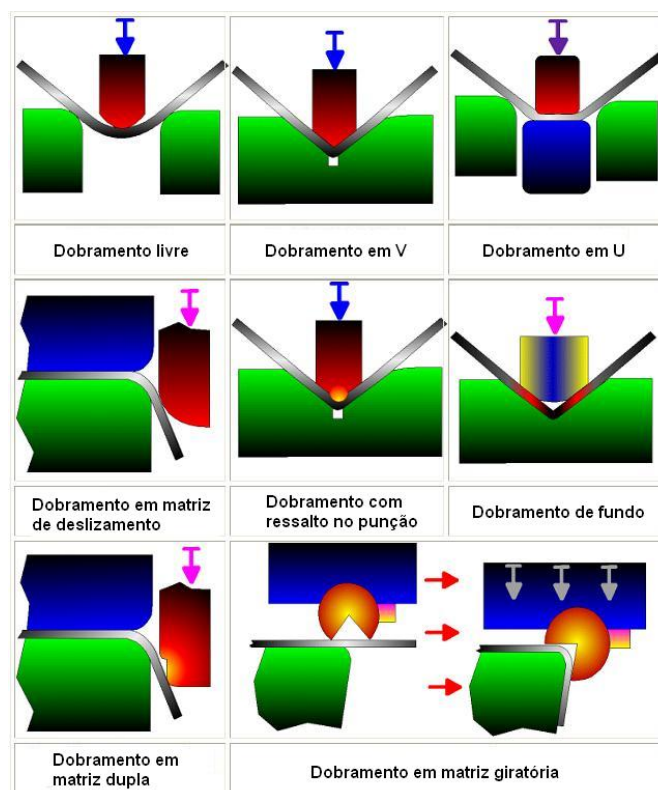


Figura 1 - Tipos de dobramentos em matrizes (Adaptado de [1])

No dobramento livre (*air bending*), não há necessidade de mudar nenhum equipamento ou ferramenta para obter ângulos de dobra diferentes porque os ângulos de curvatura são determinados pelo curso do punção. As forças requeridas para dar forma às peças são relativamente pequenas, mas o controle exato do curso do punção é exigido para obter o ângulo desejado da curvatura.

No dobramento em V (*V-bending*), a folga entre o punção e a matriz é constante (igual à espessura da

chapa). A espessura da chapa varia de aproximadamente 0,5 a 25 milímetros.

O dobramento em matriz tipo U (*U-die bending*) é feito em dois eixos paralelos de dobramento na mesma operação. Uma almofada é usada para forçar o contato da chapa com o fundo do punção. Para a almofada pressionar a chapa se requer aproximadamente 30% da força de dobra.

O dobramento em matriz de deslizamento (*wiping die bending*) é conhecido também como flangeamento (*flanging*). Uma borda da chapa é dobrada a 90° enquanto a outra extremidade é contida pelo próprio material e pela força do prensa chapas/almofada (*blankholder/pad*). O comprimento do flange pode facilmente ser mudado e o ângulo da curvatura pode ser controlado pela posição do curso do punção.

No dobramento com ressalto na ponta do punção para deformação plástica (*coining*), a tensão compressiva é aplicada à região de dobra para aumentar a quantidade de deformação plástica. Isto reduz a quantidade de retorno elástico / efeito mola / molejo de retorno (*springback*).

No dobramento de fundo (*bottom bending*), o retorno elástico é reduzido ajustando a posição final do punção tal que a folga entre o punção e a superfície da matriz é menor do que a espessura da chapa. Em consequência, o escoamento do material é ligeiramente menor e se reduz o retorno elástico. Na dobra de fundo se requer consideravelmente uma maior força (aproximadamente 50 ~ 60% a mais) do que no dobramento livre.

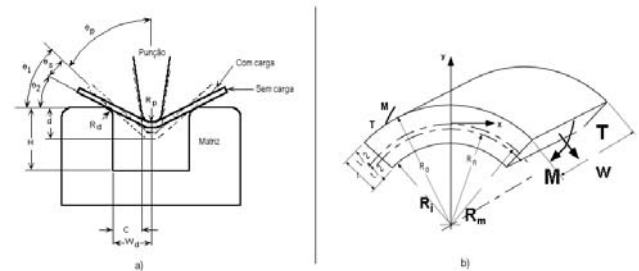
A dobra em matriz dupla (*double die bending*) pode ser vista como duas operações de deslizamento (*wiping operation*) que agem na chapa uma após a outra. Esse processo pode aumentar o endurecimento por deformação reduzindo o retorno elástico.

Tem-se, ainda, o dobramento giratório (*rotary bending*).

Nas aplicações industriais algumas predições são cruciais durante o projeto, como: o controle da forma e da qualidade da parte curvada – retorno elástico, as tensões residuais (*residual stresses*), o enrugamento (*wrinkling*) e/ou separação (*splitting*), a avaliação da capacidade de dobramento que determina o raio mínimo de curvatura sem fratura (*bendability*) e a predição de forças de dobra.

De uma forma geral, nos casos de dobramento reto a deformação é confinada na região de dobramento. Pode-se subdividir o dobramento plano no processo de dobramento em matriz de deslizamento (*flanging*), freqüentemente usado em conjunto com a estampagem (comum na indústria automotiva), onde a beirada da chapa é presa e dobrada para cima e no processo de dobramento em prensa e matriz tipo V (*V-bending*), onde a chapa desliza na matriz, como visto na figura 2a. Neste último caso o atrito pode influenciar de forma significativa o processo. No dobramento curvo, com exceção de casos especiais, a deformação se estende

além da linha de dobramento, como demonstra a figura 2b. Durante o encolhimento do flange a superfície pode se curvar e no estiramento do flange a superfície pode se separar. No dobramento em canal (*channel bending*) a deformação ocorrem nas flanges e a superfície pode rachar ou ondular.



**Figura 2** - Símbolos e terminologia do dobramento (alongamento trativo – estiramento - na superfície externa, compressão paralela na superfície interna e somente se tem o comprimento original na linha neutra) (Adaptado de [1])

onde:

- $R_i$  - raio interno de dobramento
- $R_o$  - raio externo de dobramento
- $R_m$  - raio de meia superfície
- $R_p$  - raio de punção
- $R_d$  - raio de matriz
- $C$  - folga
- $W_d$  - abertura meia matriz
- $R_n$  - raio neutro de dobramento circular
- $T$  - espessura da chapa
- $q$  - ângulo de dobramento
- $Dq$  - ângulo de *springback*
- $H$  - altura da matriz

Nas operações de dobra deverão ser evitados os cantos vivos, pois é imprudente executar raios de curvatura internos inferiores à espessura da chapa. Neste caso, as fibras externas seriam tracionadas e o material acabaria rasgando. Surge assim a importância da definição do raio mínimo de dobramento.

$$R_{\min} = t \times \left( \frac{50}{r} - 1 \right)$$

onde:

- $R_{\min}$  - raio mínimo de dobramento
- $t$  - espessura da chapa
- $r$  - redução em área para um dado material em teste de tração

Essa capacidade de dobramento (*bendability*), isto é, o menor raio de curvatura alcançado sem falha do material, pode ser melhorada aquecendo-se a chapa ou por aplicação de pressão hidrostática. As rachaduras podem também ser eliminadas induzindo uma tensão de compressão no sentido da dobra. A capacidade de dobramento em chapas finas é mais elevada do que em

chapas grossas. As chapas finas estão sujeitas a rachar geralmente nas bordas, enquanto que as chapas grossas tendem a rachar no centro. A força de dobramento é dependente da espessura da chapa e uma boa aproximação da força requerida é:

$$F = \frac{LT^2(UTS)}{W}$$

onde:

F - força requerida para o dobramento

L - comprimento da chapa

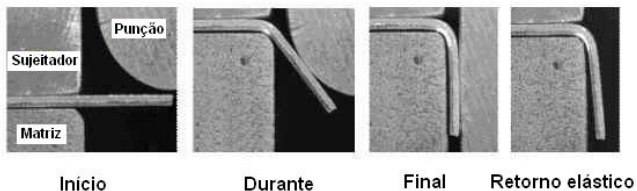
T - espessura da chapa

UTS - limite de resistência do material

W - folga de abertura da matriz

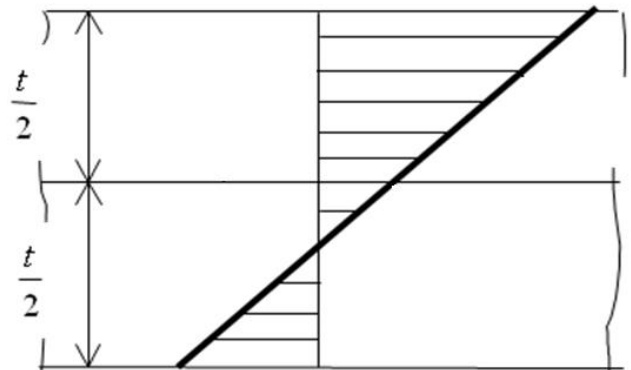
A força de dobra é uma função da resistência do material, do comprimento da chapa dobrada, da espessura da chapa e da largura da abertura da matriz. Geralmente, a tensão na peça é assumida ter uma distribuição linear e a tensão na superfície neutra é zero.

O deslocamento da superfície neutra deve ser considerado quando o raio de canto dobrado é relativamente pequeno com relação à espessura da chapa. Devido aos materiais apresentarem um módulo de elasticidade finito a deformação plástica é seguida pela recuperação elástica após a remoção da carga. O retorno elástico é definido como a recuperação elástica do material após descarregar as ferramentas. O *springback* resulta em uma mudança dimensional na peça curvada, como pode ser visto na figura 3.



**Figura 3** - Retorno elástico após a remoção da ferramenta de dobramento (Adaptado de [1])

É importante, ainda, o efeito da tensão no momento e no retorno elástico. A distribuição da tensão de forma heterogênea poderá gerar tensões residuais na chapa metálica (figura 4).



**Figura 4** - Distribuição heterogênea da tensão ao longo da espessura no dobramento (Adaptado de [1])

onde:

t – espessura da chapa

No dobramento é importante prevenir a deterioração do alongamento do material pelo envelhecimento de chapas e também o controle do ponto de escoamento definido. A presença do ponto de escoamento superior e do alongamento no ponto de escoamento podem ser controlados pela laminação de encruamento<sup>1</sup>, pela aplicação de tensão para endireitamento e pelo endireitamento em rolos.

Uma leve laminação a frio pode causar cerca de 1% de deformação plástica e, ainda, modificar a rugosidade da superfície. Desta forma o envelhecimento natural ficará dificultado.

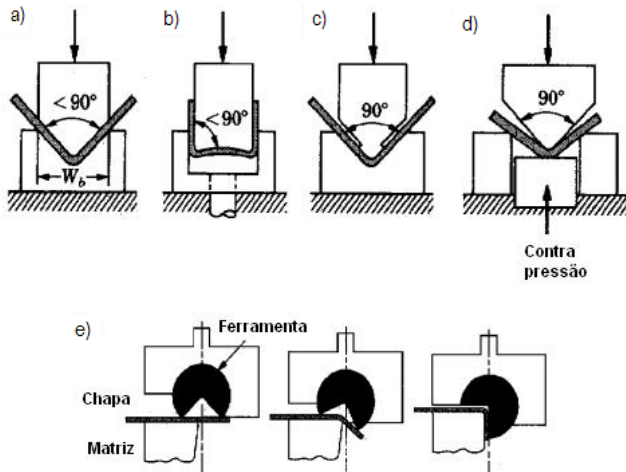
A tensão aplicada para o endireitamento cria uma estrutura heterogênea de células no material deformado e não deformado, e da mesma forma torna o material resistente ao envelhecimento natural. Neste caso a superfície tende a se tornar mais rugosa.

O endireitamento em rolos causa deformações por dobramento cíclicas na chapa criando uma distribuição mais uniforme das discordâncias não barradas e algum encruamento na chapa. A rugosidade da superfície é levemente alterada e o endireitamento da chapa é melhorado. O material pode re-envelhecer com o tempo e esse processo é frequentemente combinado com lubrificação. Esses processos normalmente tendem diminuir a tensão de escoamento.

Em geral, os fabricantes estão interessados nas dimensões finais dos produtos e conseqüentemente, os

<sup>1</sup> Encruamento: é um fenômeno modificativo da estrutura dos metais, em que a deformação plástica realizada abaixo da temperatura de recristalização causará o endurecimento e aumento de resiliência (capacidade de um material voltar ao seu estado normal depois de ter sofrido tensão) do metal. Pode ser definido como o endurecimento do metal por deformação plástica [2].

ângulos da peça após o descarregamento é o parâmetro principal a controlar no dobramento. Os principais métodos para reduzir o *springback* ou controlar o ângulo descarregado da curvatura são mostrados na figura 5.



**Figura 5** - a, b, e) Sobredobramento para compensação (*over bending*); c) Ressalto na ponta do punção para deformação plástica (*coining after bending*) e; d) dobramento de fundo (*bottoming*) (Adaptado de [1])

Assim, após o dobramento teremos um retorno elástico em algum grau que dependerá das propriedades do material e da geometria das ferramentas. O *springback* pode ser determinado depois do dobramento pela equação:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4\left(\frac{R_i S_y}{ET}\right)^3 - 3\left(\frac{R_i S_y}{ET}\right) + 1$$

onde:

$R_f$  - raio de dobramento após o *springback*  
 $R_i$  - raio de dobramento antes do *springback*  
 $S_y$  - tensão de escoamento do material  
 $E$  - módulo de elasticidade do material  
 $T$  - espessura do material

Algumas das operações de dobramento e flangeamento são conduzidas em prensa mecânica ou hidráulica. Quando se usa matrizes progressivas, em operações de estampagem, a ação de dobra é integrada no trabalho feito com as ferramentas que atuam pela ação do pistão da prensa.

Entretanto, em geral, o dobramento livre é feito em uma prensa especial, chamada de prensa de dobramento (*press brake*). Normalmente três tipos de equipamentos são usados no dobramento: prensa mecânica (*mechanical press brake*), prensa hidráulica (*hydraulic press brake*) ou prensa hidráulico-mecânica (*hydro-mechanical press brake*). Cada tipo tem suas

próprias características e aplicação e as capacidades das prensas são estabelecidas pela tonelagem requerida para dobramento.

Uma prensa mecânica usa motor, volante e excêntrico para converter o movimento giratório do motor e do volante em movimento vertical para o punção/cilindro da prensa. A alta velocidade de rotação do volante permite um grande número de ciclos por minuto. Quando o volante se aproxima do fim de curso, freqüentemente, tem força suficiente para deslocar as ferramentas com a força além da capacidade especificada da prensa. Ainda, no ponto morto inferior, a potência da prensa alcança grande capacidade e é limitada somente pela capacidade da estrutura do equipamento. Operações de dobramento com deformação plástica (*coining*), com alta tonelagem, podem causar danos na ferramenta e/ou travar a prensa no ponto morto inferior.

A prensa hidráulica utiliza motor e bomba para deslocar o óleo hidráulico para o alto do cilindro, exercer a pressão e mover o punção/cilindro da prensa. A tonelagem da prensa hidráulica é diretamente proporcional à pressão de óleo e à área do pistão. Nesses equipamentos a velocidade do punção pode ser facilmente controlada ajustando o fluxo do óleo. Comparado com a prensa mecânica oferece poucos ciclos por minuto e nenhuma potencialidade de tonelagem adicional.

Na prensa hidráulico-mecânica um único cilindro hidráulico aciona o sistema mecânico para realizar o dobramento. Este projeto fornece a tonelagem total em qualquer ponto da mesa e assegura o movimento paralelo do cilindro, com excelente repetibilidade, não obstante um carregamento descentralizado.

Na prática ângulos de dobramento entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  podem ser facilmente obtidos. Para ângulos de dobramentos maiores eventualmente são necessárias ferramentas adicionais incluindo mecanismos de cames mecânicos.

No dobramento de chapas metálicas o atrito não tem muito efeito no processo. Geralmente, o coeficiente de atrito está entre 0,06 a 0,1. Têm-se quatro tipos de condições de lubrificação, isto é, filme fluido, camada limite, filme sólido e atrito seco. Idealmente, os lubrificantes usados para dar forma à chapa de metal devem ser recicláveis e/ou orgânicos e o processo não deve causar ruído prejudicial aos ouvidos do ser humano.

Existem algumas regras gerais de projeto de peças dobradas ou enroladas: o raio de dobramento ou de enrolamento deve ser apropriado, os lados da parte a dobrar devem ser normais à linha de dobramento, a altura mínima dos rebordos não deve ser inferior a duas vezes a espessura da chapa ( $h$ ) mais o raio de dobramento ( $r$ ), ( $\geq 2h+r$ ), os furos e entalhes no recorte devem manter uma distância apropriada da linha de dobramento ( $\geq 2h+r$ ), no enrolamento exige-se que a rebarba fique para o lado interno e que a peça se

prolongue tangencialmente ao olhal e sempre que possível deve-se aumentar a rigidez de chapas finas através de nervuramento.

Importante também é a determinação da posição da linha neutra em peças dobradas. No desenvolvimento das peças dobradas o comprimento da tira é a soma de todos os segmentos e arcos medidos ao longo da linha neutra.

Finalmente, nos sistemas tradicionais, o conjunto de punção e matriz de aço é pesado e caro. Com a utilização de matrizes de borrachas poliuretânicas (que são resistentes a abrasão, a ruptura por compressão, aos óleos e aos ácidos) o conjunto de ferramental pode ser reduzido em peso. Nesses processos, ao fim da operação, após a retirada da carga, a borracha volta ao seu estado normal e pode-se extrair a peça dobrada com facilidade independente da geometria das mesmas.

#### FONTES CONSULTADAS

- Altan, T.; OSU/IWSE 894A, Class lecture, 1999.
- Benson, S.; Press Brake Technology, SME, 1997.
- Bhupatiraju, M. K.; Shivpuri, R.; Altan, T.; *An Investigation of Bending Angle and Springback Control in Straight Line Bending* ERC/NSM, Report No: ERC/NSM-S-94-13, 1994.
- Costa, H. B.; Mira, F. M.; *Processos de Conformação: Conformação Mecânica dos Metais*, Apostila, Florianópolis/SC, 1987.

- Duncan, J. L.; Marciniak Z.; *The Mechanics of Sheet Metal Forming*, Edward Arnold, 1991.
- Kalpakjian, S.; *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Wesley, 1997.
- Lange, K.; *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, 1986.
- Schuler GmbH; *Metal Forming Handbook*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.
- Society of Manufacturing Engineers; *Die Design Handbook*, SME - Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- Tufekci, S. S.; Wang, C. T.; Kinzel, G. L.; Altan, T.; *Experimental Determination of Strains and Forces in Stretch and Shrink Flanging Operations*, ERC/NSM, Report No: ERC/NSM-S-94-07, 1994.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Altan, T.; *Conformação de Metais: Fundamentos e Aplicações*, Publicação EESC-USP, São Carlos, SP, 1999.
- [2] Wikipédia, [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

**Paulo Victor Prestes Marcondes** – Possui pós-doutorado pela Universidade de Deakin, em Geelong, na Austrália (2007) e Universidades da Califórnia em San Diego (1996) e Pennsylvania (1996) nos EUA. Obteve o doutoramento em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina e Universidade de Birmingham na Inglaterra (1995). Mestrado em Engenharia Mecânica (1991) e graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1989). Atualmente é professor associado I da Universidade Federal do Paraná atuando na graduação e pós-graduação (mestrado e doutorado) do Departamento de Engenharia Mecânica. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Conformação Mecânica, atuando principalmente nas áreas de conformação de chapas, ferramentas de conformação (matrizes e moldes) e simulação computacional.

