

ANÁLISE DA ESTAMPAGEM DE CHAPAS METÁLICAS UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS

Fernando de Azevedo Silva

UNESP – Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – CEP 12.516-410 – Guaratinguetá, SP, Brasil
e-mail: fazevedo@feg.unesp.br

Ailton Rodrigues da Costa

UNESP – Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – CEP 12.516-410 – Guaratinguetá, SP, Brasil
e-mail: ailtoncosta@feg.unesp.br

Resumo. *A estampagem é um importante processo de conformação, pois é um meio rápido e econômico de produzir artigos resistentes, complexos, precisos e em larga escala. A necessidade de se desenvolver ferramentas específicas para cada produto com qualidade a custos e prazos reduzidos, fazem com que a aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) seja de vital importância. Através da utilização do MEF a estampagem de uma caixa quadrada confeccionada em aço ABNT 1006 EEP é analisada, avaliando-se a capacidade e a precisão da predição da força de estampagem e as deformações no produto. O conhecimento da força é fundamental para se determinar à prensa adequada e a força aplicada no prensa-chapa. A estampagem de uma simples caixa apresenta diversas características que desafiam a capacidade de predição do programa de simulação, visto que deve incorporar análise de grandes deformações em 3D associada à condição de contato superfície/superfície. Os estudos foram desenvolvidos utilizando o método estático implícito, aplicando elementos viscoplástico com modelagem de contato rígido/flexível em diferentes condições de atrito e carga no prensa-chapa. O modelo de 1/8 do protótipo foi gerado aproveitando as características de simetria do produto. As simulações efetuadas com o ANSYS 6.0 são comparadas com experimentos avaliando a força de estampagem e as deformações na espessura do material da chapa.*

Palavras-chave: *conformação, estampagem, chapas, elementos finitos, simulação.*

1. INTRODUÇÃO

A estampagem é uma conformação sob condições de compressão e tração, onde uma chapa (*blank*) é forçada a escoar para dentro de uma cavidade na matriz, da qual assume a forma com um golpe da prensa. Sua aplicação é vantajosa pela alta produtividade, complexidade e qualidade das peças obtidas que podem apresentar grande resistência. Em geral a estampagem é feita a frio.⁽¹⁾

Durante a estampagem podem ocorrer operações de dobramento, estiramento e embutimento que interagem influenciando a geometria final do produto. As propriedades do material empregado e seu comportamento às deformações impostas, o atrito nas faces em contato, a geometria e características mecânicas do ferramental, também influenciam. A interação destes fatores torna difícil a determinação analítica do processo.

Esta dificuldade leva o desenvolvimento de novas ferramentas a se basear na experiência do projetista, adquirida em projetos e peças similares e no tipo de material utilizado.⁽²⁾

A aplicação de programas desenvolvidos para simular a conformação de chapas metálicas, pode diminuir o número de ciclos no desenvolvimento de ferramentas ou mesmo eliminá-los, garantindo a eficiência do processo, de modo a obter produtos de qualidade ao menor custo e prazo.⁽³⁾

Estes procuram modelar o comportamento plástico dos metais e sua interação com o ferramental durante a estampagem, buscando a predição da força de estampagem, a formação de rugas, a deflexão superficial, a condição limite de rasgamento, a geometria do *blank*, o retorno elástico, avaliação da espessura da chapa, etc. A obtenção destes dados auxilia a tomada de decisões e possibilita a redução do tempo de desenvolvimento do ferramental, através da diminuição das etapas de embutimento e aumento da complexidade das peças. São dados fundamentais na escolha adequada das prensas, no aumento da confiabilidade e na melhoria da qualidade do produto.⁽⁴⁾

O objetivo deste trabalho é a determinação da força de estampagem necessária à fabricação de uma caixa quadrada e a variação da espessura da chapa resultante da deformação imposta, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o programa comercial ANSYS, versão 6.0.

O conhecimento da força é fundamental para se determinar a capacidade da prensa adequada ao processo, as características de acionamento do prensa-chapa e fixação da ferramenta.

A espessura final do material pós-deformação influencia a escolha do número de passos do estampo, o ajuste de sua geometria e parâmetros do processo como velocidade de aplicação do carregamento, lubrificação e pressão do prensa-chapa.

2. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA

A simulação da estampagem usando o MEF através do ANSYS é executada em três etapas:

- Pré-processamento, na qual o modelo do *blank* e ferramental utilizado são construídos. O modelo deve ser planejado de modo a tirar proveito dos planos de simetria, o que possibilita construir apenas uma fração representativa do mesmo, isto proporciona uma redução do número de elementos e do esforço computacional;
- Solução, na qual são estabelecidas as condições de contorno, gerados os deslocamentos, aplicados os carregamentos e estabelecidas as condições de processamento;
- Pós-processamento, na qual os resultados numéricos e gráficos obtidos na simulação são disponibilizados pelo programa, gerando inclusive a animação do processo.

Dado que a geometria é simétrica nos planos transversais e diagonais, isto possibilita que apenas um oitavo da caixa e ferramenta possa ser modelado. O modelo contempla a geometria exata da ferramenta projetada, porém se restringindo as suas partes principais, ou seja, a cabeça do punção, a matriz e o prensa-chapa, conforme mostra a Figura 1.

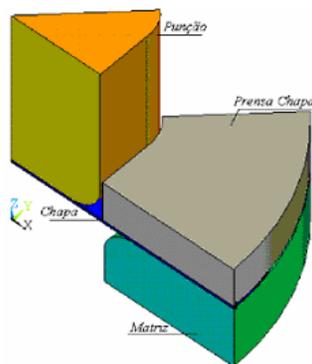


Figura 1. Modelo geométrico em 1/8 da chapa e ferramentas (volumes)

Na escolha do elemento da chapa as características do processo são determinantes, ou seja, o escolhido deve suportar grandes deformações, preservando o seu volume e que seja aplicável à análise não-linear em 3D. Para a chapa o elemento adotado foi o VISCO107.⁽⁵⁾ Como este se comporta como material isotrópico e o material da chapa é anisotrópico, esta diferença de comportamento influencia a margem de erro dos resultados.

Dado que as falhas tendem a ocorrer preferencialmente na chapa, a ferramenta é considerada de corpo rígido, recebendo apenas uma malha superficial para geração de contato. Cada componente é controlado por um nó piloto, no qual todos os esforços e condições de contorno são aplicados (Figura 2). As reações são monitoradas durante o deslocamento do punção.

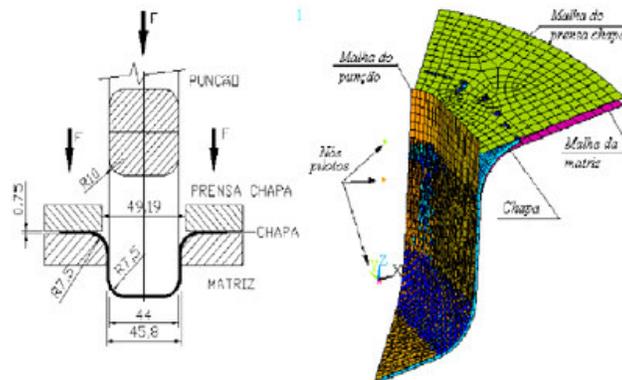


Figura 2. Representação esquemática da estampagem da caixa e modelo discreto final

Na matriz são impedidos os deslocamentos e rotações em todas as direções, para efeito de análise foi considerada como um corpo rígido e as restrições aplicadas no nó piloto.

A força exercida pelo prensa-chapa foi adotada como constante. O modelo de fricção utilizado é o de *Coulomb*, para o qual foram adotados os coeficientes de atrito: 0,0, 0,075 e 0,150.

O deslocamento total do punção é dividido em intervalos de tempo. Estes são aplicados gradativamente até atingir o deslocamento desejado, sendo que no intervalo inicial avança 0,05 mm.

Os resultados obtidos consistem de deslocamentos nodais, deformações, tensões e reações que são monitoradas durante todo o processo. Através da distância nodal resultante nos planos de simetria da chapa, as deformações na espessura da chapa podem ser analisadas. A estampagem da caixa foi simulada em um computador com processador Intel Pentium 4 – 2,4 GHz e 512 Mbytes de memória RAM, nas seguintes condições (Tabela 1):

Nº	Dimensões do <i>blank</i> (mm)	Força no prensa-chapa (kN)	Coefficiente de atrito (μ)	Profundidade máxima (mm)	Tempo de processamento (horas)	Força no punção (kN)
1	102 x 110	785,0	0,000	37,5	5,00	31,94
2	102 x 110	785,0	0,075	37,5	5,50	35,84
3	102 x 110	785,0	0,150	37,5	5,50	39,80

A Figura 3 apresenta a deformação da malha da chapa, após o avanço do punção até a profundidade máxima de 37,5 mm, onde se observa a formação de rugas na flange. Estas são visualizadas maiores do que realmente são devido a um fator de escala utilizado no programa.

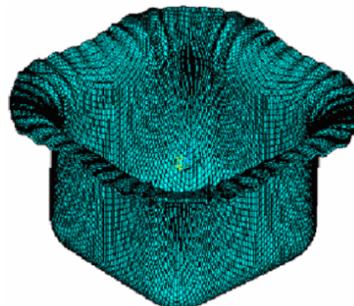


Figura 3. Malha deformada após a estampagem da caixa (modelo expandido)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE ESTAMPAGEM PROFUNDA

Os experimentos foram realizados numa máquina de ensaios com capacidade de carga de 10.000 kgf. A chapa utilizada é de aço *ABNT 1006* classe EEP com espessura de 0,75 mm. Foi obtida a curva $\sigma \times \varepsilon$ real que fornece as propriedades do material na fase plástica.⁽⁶⁾

ASM⁽¹⁾ recomenda uma pressão no prensa-chapa de 0,98 MPa a 1,96 MPa. Assim, a força aplicada foi calculada tomando a média destes valores e a área da chapa sob o prensa-chapa.

Foram feitos testes buscando determinar a altura máxima da caixa, a melhor forma do *blank* e a força aplicada no prensa-chapa para o ferramental construído. A altura atingida foi de 39,5 mm e estabelecido um formato otimizado para o *blank*. Para a carga aplicada no prensa-chapa o melhor valor obtido foi de 6,86 kN. A Figura 4-(a) mostra o ferramental utilizado.

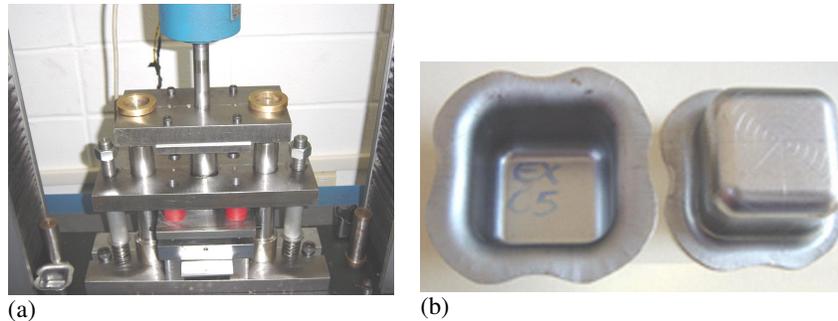


Figura 4. (a) Foto das ferramentas confeccionadas; (b) Foto das caixas estampadas

A partir destes resultados, novos *blanks* foram estampados obtendo-se os dados da força de estampagem, geometria final e espessura das paredes da caixa. Dois tipos de lubrificantes foram empregados, ou seja, graxa grafitada que apresentou uma menor força e graxa a base de sabão de lítio. Por segurança, a altura média foi de 37,5 mm e a largura da flange de 2,50 mm.

Para orientar a medição das deformações da espessura e deslocamento radial nos *blanks* foram traçados círculos concêntricos igualmente espaçados, conforme mostra a Figura 4-(b).

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As simulações foram executadas sob as condições determinadas nos experimentos. Nas simulações as reações ao deslocamento aplicado no nó piloto do punção foram monitoradas a cada interação, os resultados são da força necessária à estampagem de um oitavo da caixa. Obteve-se a curva força x deslocamento nas três condições de atrito (Figura 5). Observa-se que os valores máximos aumentam de acordo ao atrito adotado: 31,94 kN para o coeficiente de atrito igual a zero; 35,84 kN para o coeficiente igual a 0,075 e 39,86 kN para o coeficiente igual a 0,150. A força máxima que mais se aproximou do valor experimental foi obtida com coeficiente igual a 0,150.

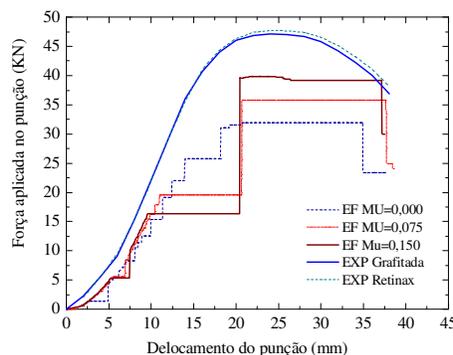


Figura 5. Força x deslocamento do punção

As tensões e deformações equivalentes de *Von Mises* são apresentadas na Figura 6, onde se pode observar que a região que apresenta uma maior concentração de tensões fica localizada no raio da flange, o que pode proporcionar a formação de rugas nesta região.

Na Figura 6-(b) a distribuição das deformações pode ser avaliada. Nota-se que as regiões que apresentam a maior intensidade se situa na região do raio do canto e a região na cor azul marca a diminuição de espessura no fundo subindo em direção ao centro das paredes.

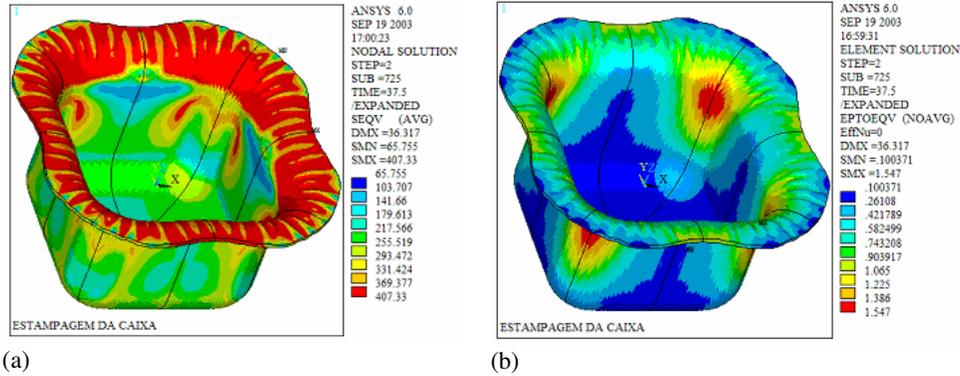


Figura 6. (a) Tensões e (b) deformações de *Von Mises* nas paredes da caixa

Na Figura 7-(a) observa-se que a espessura obtida na simulação com atrito igual a 0,15 é menor que a experimental no fundo e nas paredes da caixa e maior na flange. Este maior estiramento do fundo e laterais e aumento na flange se deram em função das condições de atrito utilizadas.

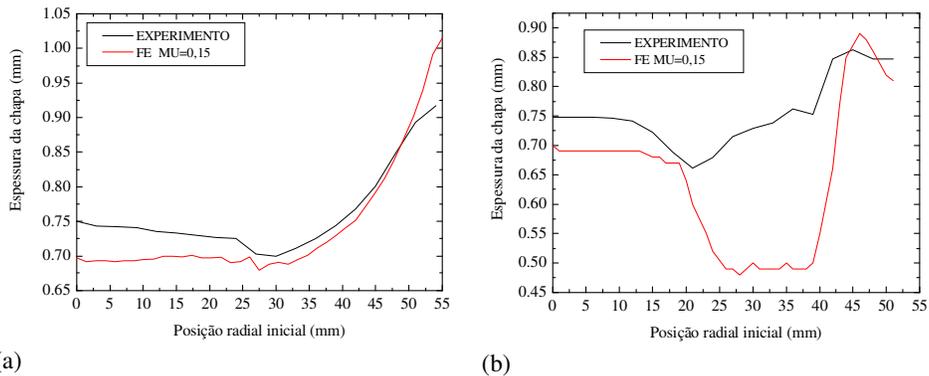


Figura 7. (a) Deformação na espessura no plano 0°; (b) Espessuras no plano a 45°

Na Figura 7-(b) observa-se que na simulação a espessura é menor que a experimental na região do fundo da caixa, entre 0 e 20,0 mm de maneira similar à observada no plano a 0°, embora o experimento tenha apresentado uma redução da espessura do material na região do raio do fundo e paredes laterais. A redução apresentada na simulação foi severa, quase 50% da espessura.

O aumento da espessura, a partir da região do raio da flange, devido a compressão do material na entrada na matriz, pode ser observado nas duas curvas, porém a curva da simulação apresenta um máximo de espessura superior ao experimental e uma espessura na borda da flange menor.

5. CONCLUSÕES

Foi alcançado o objetivo de determinar a força de estampagem através do MEF utilizando o ANSYS. As diferenças entre os valores experimentais de 49,30 kN, obtidos na estampagem com graxa grafitada e os das simulações, em que a força máxima obtida foi de 39,86 kN com atrito igual a 0,15, se devem ao elemento escolhido que difere em parte do comportamento real do material.

A chapa apresenta anisotropia que aumenta a resistência do material devido ao encruamento. Esta influencia a forma final do flange, como pode ser observado na Figura 4-(b). Na simulação este aspecto não é levado em consideração e o flange se apresenta de forma simétrica.

A determinação da espessura foi alcançada com valores próximos aos experimentais, sendo que no plano a 0° variou de - 0,05 mm na região do fundo e paredes a + 0,10 mm na região do flange. As diferenças apontadas na predição das deformações no canto da caixa, no plano a 45° que variou entre - 0,05 a - 0,01 mm na região do fundo, de até - 0,25 mm nas paredes e a $\pm 0,05$ mm na região da flange merecem uma nova avaliação, mas de maneira geral se pode afirmar que é possível a determinação aproximada da força de estampagem e das deformações da espessura decorrentes.

A adoção da modelagem rígido/flexível em que apenas o material da chapa é representado por elementos viscoplásticos e a ferramenta considerada um corpo rígido, no qual somente as faces de contato são levadas em consideração para aplicação da malha de contato, se mostrou eficiente.

6. REFERÊNCIAS

1. ASM – METALS HANDBOOK. In: *Forming*, Metal Park Ohio, 1969. v. 8.
2. MAKINOCHI, A. Sheet Metal Forming Simulation in Industry. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 60, p. 19-26, 1996.
3. TEKKAYA, A. E. State-of-the-art of Simulation of Sheet Metal Forming. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 103, p. 14-22, 2000.
4. HONGZHI, D., ZHONGQI, L. Investigation of Sheet Metal Forming By Numerical Simulation and Experiment. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 103, p. 404-410, 2000.
5. ANSYS. **User's Manual – Elements**. Swanson Analysis Systems, Inc., 2000.
6. SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metalúrgicos – Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5. ed. Editora Edgard Blucher Ltda., 1982.

ANALYSIS OF THE STAMPING OF METALLIC SHEET USING FINITE ELEMENTS

Fernando de Azevedo Silva

UNESP – Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – CEP 12.516-410 – Guaratinguetá, SP, Brasil
e-mail: fazevedo@feg.unesp.br

Ailton Rodrigues da Costa

UNESP – Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – CEP 12.516-410 – Guaratinguetá, SP, Brasil
e-mail: ailtoncosta@feg.unesp.br

Abstract. *The stamping processes in metallic foils stand out among the processes of forming metals for they make possible the obtaining of pieces with several shapes and good mechanical properties. The simulation of production processes is now a reality to permit a better understanding of the behavior of the metals and of processes as well as the progresses in the computational area that allows to develop and to improve the simulation programs. In this work the simulation of the process of deep-drawing of a square box is presented using the commercial program of finite elements ANSYS, where the conditions and real properties were introduced as much the process of the studied material. In the numeric simulations it is presented two parameters of the deep-drawing process. The first, the variation of the maximum force deep-drawing is analyzed, until the depth stamping limit. The second, the deformations in the thickness of the material, the variation of the thickness of the foil is verified due to the stamping process. The numeric results are compared to the experimental results with the objective of validating the simulations.*

Keywords. *Finite elements, simulation, stamping, deep-drawing, force of stamping.*