



ANÁLISE DA FORÇA MÁXIMA DE EMBUTIMENTO DE COPOS CILÍNDRICOS UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Rodrigo Rodrigues Aragão

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila 2160, Campus Santa Mônica, Uberlândia/MG, rragao@mecanica.ufu.br

Sonia Aparecida Goulart Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila 2160, Campus Santa Mônica, Uberlândia/MG, sgoulart@mecanica.ufu.br

Resumo. *No processo de estampagem de chapas metálicas, a força máxima necessária para a realização do processo é fundamentalmente importante na escolha da prensa e no controle da força do prensa-chapas. A formulação explícita do método dos elementos finitos, como a encontrada no pacote Ansys/LS-Dyna, vem sendo bastante utilizada na simulação de problemas dinâmico-transientes, como nos processos de conformação de metais. Neste trabalho dois parâmetros do processo de embutimento de copos cilíndricos são analisados. O primeiro, a razão de embutimento, é analisada a variação da força máxima de embutimento, mantendo-se a profundidade constante. O segundo, o raio do punção, é verificada sua influência na força de embutimento durante o percurso do punção até a profundidade final do processo. Com a finalidade de diminuir a quantidade de experimentos e sistematizá-los, são utilizadas técnicas de similitude. Os resultados são validados de acordo com equação empírica encontrada na literatura.*

Palavras-chave: *força máxima do punção, embutimento, elementos finitos.*

1. INTRODUÇÃO

Vários aspectos do processo de estampagem de chapas metálicas vêm sendo pesquisados nos últimos anos, na indústria e em laboratórios de todo o mundo. Dentre eles, podem ser citados: projeto de ferramentas, diagramas limites de conformação, propriedades e conformabilidade dos materiais, aspectos tribológicos, recuo elástico, etc.

A importância de se estudar a força máxima de estampagem de chapas metálicas deve-se a correta escolha da prensa de acordo com o trabalho a ser realizado. Em prensas excêntricas mecânicas, o trabalho da força máxima de estampagem não pode exceder a energia cinética disponível do volante, caso contrário, sobrecarregará o motor elétrico. No caso de prensas hidráulicas, se esta força ultrapassar a força máxima relativa à máxima pressão de trabalho, o sistema parará e não haverá uma completa formação do produto. Deve-se salientar também que a força máxima de estampagem depende da força do prensa-chapas, importante na prevenção de rugas e no fluxo de metal.

Thirumarudchelvan et al. (1990) estudou um dispositivo de uretano acoplado ao martelo da prensa que, através do atrito gerado, é capaz de aplicar a força do prensa-chapas proporcional à força do punção, evitando que a força do prensa-chapas seja constante, fato que pode ocasionar o afinamento drástico do flange no final do processo. Em vários outros trabalhos (Thirumarudchelvan et al., 1994; 1994a e 1999), esse método foi aplicado em diferentes tipos de embutimento para otimizar o processo.

Tão importante quanto à força de estampagem, o atrito gerado entre as ferramentas e o *blank* tem sua contribuição no valor da força de estampagem, assim como no controle do fluxo de metal dentro da matriz. Lanzon et al. (1998) encontrou vários coeficientes de atrito, variando o tipo de material, o lubrificante, e o acabamento superficial das ferramentas e do *blank*.

A principal vantagem em utilizar um código de elementos finitos com integração explícita está na economia de tempo. Essa economia ocorre devido a ausência de operações como armazenamento e inversão de matrizes de rigidez encontradas nos métodos de integração implícita convencionais.

Mamalis et al. (1997) estudou formas de minimizar o tempo de CPU ao modificar a velocidade do punção e também a densidade do material do *blank* em simulações de embutimento de copos cilíndricos utilizando o método explícito. Em seu trabalho, diagramas *força x curso* do punção foram elaborados a partir de dados numéricos.

Ainda com relação ao método explícito do método dos elementos finitos, Maker (1998) mostra um exemplo de como utilizar esse método seguido do implícito a fim de resolver problemas de recuo elástico, fenômeno melhor estudado utilizando os dois métodos em seqüência.

O primeiro parâmetro a ser analisado é a razão de embutimento ou a relação entre o diâmetro do *blank* e o raio do punção. Para não haver rompimento das paredes do copo, Marciniak et al. (1992) prova que essa relação não pode ultrapassar o valor teórico 2,72. Na prática, devido ao atrito gerado pelo prensa-chapas e aos dobramentos que ocorrem na região do raio da matriz, esse número gira em torno de 2, com pequenas variações decimais, dependendo do tipo de material. O objetivo é verificar a variação da força máxima de embutimento de copos cilíndricos, com diferentes razões de embutimento e mantendo todos os outros parâmetros constantes.

No caso do raio do punção, sua influência no valor da força máxima de embutimento é praticamente nula. O objetivo é validar essa afirmação através do método dos elementos finitos e verificar se há uma outra influência na força de embutimento por parte desse parâmetro.

Para realizar tais verificações, são utilizadas as técnicas de similitude. A teoria de similitude é baseada na análise dimensional, cujo desenvolvimento dá-se através de quantidades adimensionais, nas quais cada uma das quantidades pertinentes envolvidas em um fenômeno são equacionadas. Através da similitude, é possível estabelecer relações entre parâmetros e equacionar todos os parâmetros envolvidos de um determinado fenômeno, realizando no mínimo sete experimentos para cada parâmetro adimensional ou Pi termos, como são chamados na similitude.

2. METODOLOGIA

2.1. Introdução

As propriedades do material utilizadas neste trabalho são do aço EEP ou NBR 5915-84, conhecido como aço para estampagem extra-profunda. A Tabela (1) mostra suas propriedades, coletados do trabalho de Borsoi et al. (2001).

Tabela 1. Propriedades do aço EEP ou NBR 5915-84.

Limite de resistência a tração (MPa)	323
Tensão de escoamento (MPa)	146
Coefficiente de endurecimento (MPa) – K	560
Coefficiente de encruamento – n	0,22

A escolha do aço EEP deve-se a sua alta aplicabilidade na indústria contemporânea para aplicações de embutimento.

De acordo com a Equação (1), a força máxima do punção é escrita como uma função g de suas variáveis ou parâmetros de influência:

$$F_{\max} = g(d_0, d_1, d_2, r_d, r_p, t, h_{\max}, \mu, F_{hold}) \quad (1)$$

Onde cada parâmetro é listado a seguir:

- F_{\max} - força máxima de embutimento;
- d_0 - diâmetro do *blank*;
- d_1 - diâmetro do punção;
- d_2 - diâmetro da matriz;
- r_d - raio de arredondamento da matriz;
- r_p - raio de arredondamento do punção;
- t - espessura do *blank*;
- h_{\max} - profundidade máxima de embutimento (profundidade final do copo);
- μ - coeficiente de atrito entre as ferramentas e o *blank*;
- F_{hold} - força aplicada pelo prensa-chapas.

Através do teorema Pi de Buckingham, as variáveis de influência são substituídas por termos adimensionais. Assim, a função que resulta na Eq. (2) continua sendo equivalente à função da Eq. (1). Porém, ao invés de uma função de nove variáveis, tem-se uma função de apenas seis variáveis.

$$\frac{F_{\max}}{F_{hold}} = g\left(\frac{d_0}{d_1}, \frac{t}{h_{\max}}, \frac{r_d}{t}, \frac{r_p}{r_d}, \frac{f}{t}, \mu\right) \quad (2)$$

O parâmetro f representa a folga entre o punção e a matriz e é dado pela metade da diferença entre os diâmetros dessas duas ferramentas, ou seja, $f = (d_2 - d_1)/2$. Na Equação (3), os parâmetros adimensionais são substituídos pelos Pi termos:

$$\pi_1 = g(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7) \quad (3)$$

Onde π_1 refere-se à razão entre a força máxima de embutimento e a força do prensa-chapas, π_2 refere-se à razão de embutimento e assim sucessivamente. Lembrando que π_2 e π_5 são os Pi termos de estudo deste trabalho. Alguns Pi termos coincidem exatamente com o parâmetro de estudo, como a razão de embutimento, por já se tratarem de grandezas adimensionais. A Tabela (2) mostra o valor dos parâmetros mantidos constantes durante as simulações.

Tabela 2. Valores constantes dos parâmetros do embutimento.

Diâmetro do <i>blank</i>	452,73 mm
Diâmetro do punção	282,96 mm
Diâmetro da matriz	285,46 mm
Espessura do <i>blank</i>	1 mm
Raio da matriz	10 mm
Raio do punção	30 mm
Profundidade de embutimento	100 mm
Coefficiente de atrito	0,1
Pressão do prensa-chapas	1,46 MPa

Calculando a razão de embutimento, relação entre o diâmetro do *blank* e diâmetro do punção, tem-se 1,6. O diâmetro da matriz foi encontrado mantendo-se constante a folga entre o punção e a matriz, em que a folga assume o valor $1,25 \cdot t$. No lugar da força do prensa-chapas ser mantida constante, Marciniak et al. (1992) sugere aplicar a força equivalente a uma pressão de 10 a 20 % da

tensão de escoamento do material do *blank*, para evitar a formação de rugas e permitir o fluxo de material. O mínimo valor foi o assumido neste trabalho.

2.2. Aspectos Relacionados ao Método dos Elementos Finitos

Fazem parte da modelagem do problema o punção, a matriz, o prensa-chapas e o *blank*. Para economizar tempo de processamento, todo o ferramental foi considerado corpo rígido e apenas um quarto do modelo real foi implementado, como pode ser visto na Fig. (1).

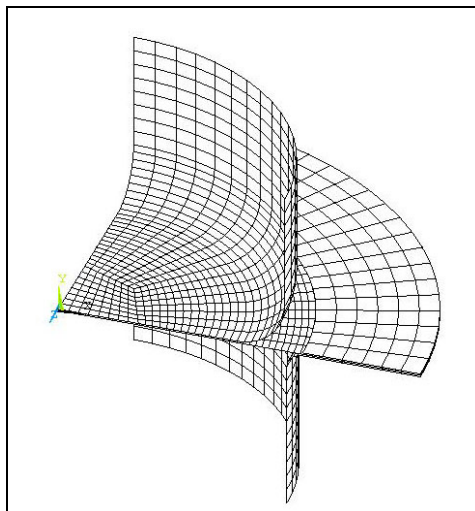


Figura 1. Modelagem de um quarto do punção, matriz, *blank* e prensa-chapas.

O elemento de casca retangular com quatro nós foi o escolhido para a geração das malhas, sendo necessário modelar apenas superfícies. Maiores detalhes da formulação do elemento podem ser encontrados em Belytschko et al. (1984).

A lei de potência mostrada na Eq. (4) foi a escolhida para representar a relação tensão-deformação do material, cujo comportamento é isotrópico. Especificamente nesta lei, as taxas de deformação não são consideradas.

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (4)$$

2.3. Aspectos Relacionados à Força do Punção

O gráfico *Força Numérica (a)* da Figura (2) representa a força do punção para a simulação dos dados apresentados na Tab. (2) a uma velocidade constante do punção de 2 m/s. Segundo Hallquist (1998), as oscilações estão relacionadas às frequências de vibração, em operações de conformação de metais que envolvem impacto.

Essas oscilações não podem ser atribuídas aos efeitos dinâmicos do método de integração explícito. Isso não é possível porque esse tipo de oscilação ocorre quando o passo de tempo utilizado é maior que o passo de tempo crítico. À cada passo de tempo, o programa LS-Dyna calcula um novo passo de tempo, garantindo que esse valor sempre estará abaixo do valor crítico, produzindo uma solução numericamente estável.

Para se obter uma curva totalmente suave a partir das simulações, seriam necessárias uma velocidade real de punção, na ordem de mm/s e uma malha suficientemente densa nas regiões de pequenos raios. Porém, isso acarretaria um acréscimo desnecessário no tempo computacional para os propósitos deste trabalho.

Para tornar o gráfico da força do punção mais suave, foi aplicada uma interpolação *spline* cúbica de suavização nos dados da curva *Força Numérica (a)*, obtendo como resultado o gráfico da *Força Numérica (b)* da Figura (2). O parâmetro p de suavização foi adotado em 0,0001, em que quanto

menor o valor de p , maior o grau de suavização. Maiores detalhes a respeito da *spline* cúbica de suavização podem ser encontrado em Boor (2000). A suavização do gráfico da força do punção é necessária para que o valor máximo seja calculado, sem sofrer influência das oscilações. Logo, a força máxima do punção é dada pelo ponto de máximo do gráfico.

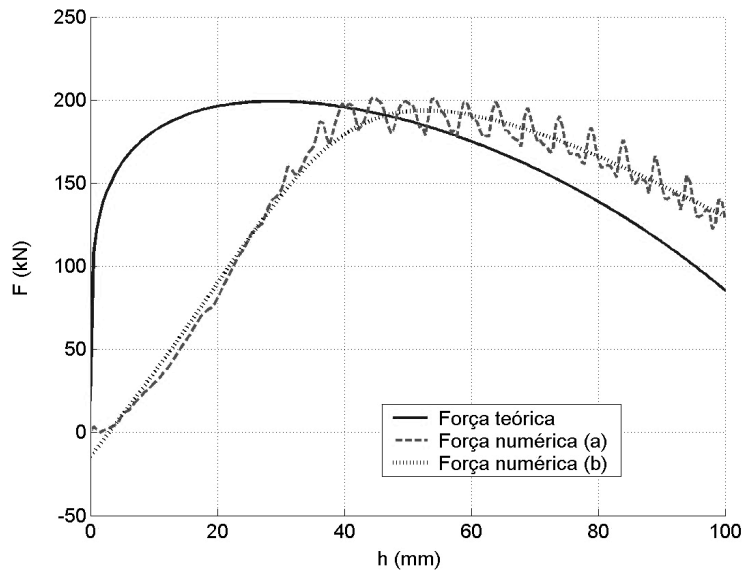


Figura 2. Gráfico *força x curso* do punção. Resultado teórico e numérico.

O gráfico *Força Teórica* da Figura (2) representa a força do punção expressada pela Eq. (5), encontrada em Lange (1985). Como trata-se de uma equação bastante conhecida da literatura, ela será utilizada para validar os resultados deste trabalho.

$$F_{punch} = 2\pi \left(r_1 + \frac{t}{2} \right) t \left\{ \left[1,1\bar{\sigma} \ln \frac{r_0}{r_1 + (t/2)} + \frac{\mu F_{hold}}{\pi r_0 t} \right] e^{\mu\pi/2} + \frac{\sigma_1 t}{2r_d} \right\} \quad (5)$$

Os termos $\bar{\sigma}$ e σ_1 referem-se às tensões equivalentes médias na entrada e na saída do raio da matriz, respectivamente. Os termos r_0 e r_1 referem-se a metade do diâmetro inicial do *blank* e do diâmetro do punção, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Razão de Embutimento

Dando continuidade aos resultados da análise dimensional, deseja-se analisar a força máxima do punção, variando a razão de embutimento, como expressado na Eq (6), onde os termos com barra são os termos mantidos constantes. Os resultados obtidos nas simulações podem ser vistos na Tab. (3). Vale lembrar que a força de embutimento é a soma da força do punção e do prensa-chapas.

$$\pi_1 = f(\pi_2, \bar{\pi}_3, \bar{\pi}_4, \bar{\pi}_5, \bar{\pi}_6, \bar{\pi}_7) \quad (6)$$

Com o aumento da razão de embutimento, a força máxima do punção é uma função decrescente, fato comprovado através dos valores teóricos, juntamente com a força do prensa-chapas, de acordo com a Fig. (3). O decréscimo da força do prensa-chapas é explicado pela diminuição de sua área, à medida em que a razão de embutimento aumenta. Como o decréscimo dos valores da força do prensa-chapas são bem mais acentuados, quando divididos, o valor do Pi termo da força do punção torna-se uma função crescente e, curiosamente, linear, como pode ser comprovado na Fig. (4).

d_0 / d_1	Força máxima teórica (kN)	Força máxima numérica (kN)	Força do prensa-chapas (kN)	Pi-1 teórico	Pi-1 numérico
1,20	313,57	322,38	453,22	0,6919	0,7113
1,33	253,19	252,28	259,48	0,9757	0,9723
1,47	220,13	216,82	171,97	1,2801	1,2608
1,60	199,22	193,64	128,04	1,5560	1,5124
1,74	181,71	181,33	98,57	1,8433	1,8395
1,87	168,23	166,83	80,10	2,1003	2,0828
2,00	156,61	155,53	66,72	2,3474	2,3312

Tabela 3. Resumo dos resultados obtidos das simulações para a razão de embutimento.

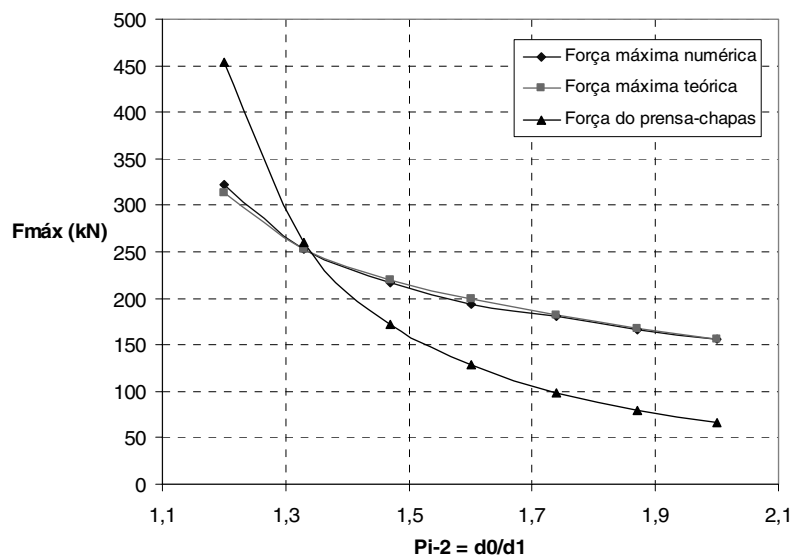


Figura 3. Gráfico da força máxima do punção (numérica e teórica) e força do prensa-chapas em relação a variação da razão de embutimento.

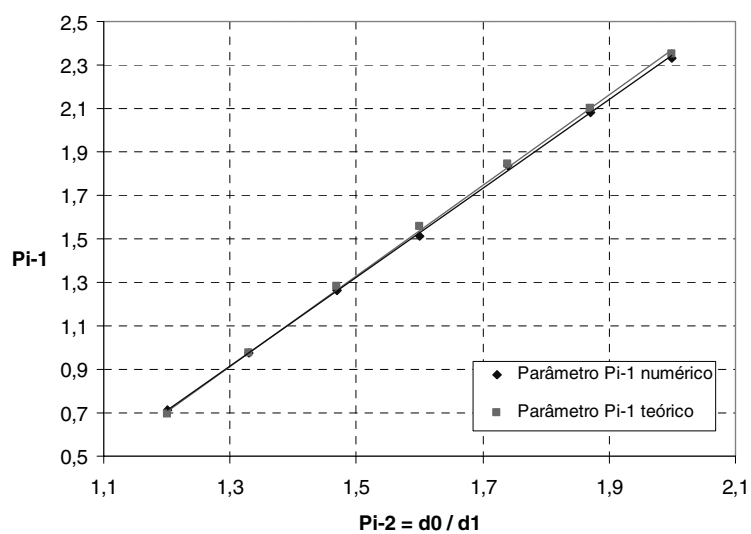


Figura 4. Gráfico do termo $\Pi-1$ numérico e teórico da força máxima do punção variando a razão de embutimento.

As melhores correlações para as regressões da força máxima do punção e da força do prensa-chapas ocorreram através de polinômios de grau 6 e 5, respectivamente. Daí a justificativa para a função Pi-1 ser linear. Com um coeficiente de correlação quadrático R^2 igual a 0,9995, obtem-se a função linear de acordo com a Eq. (7).

$$\pi_1 = 2,04\pi_2 - 1,74 \quad (7)$$

3.2. Raio do Punção

Pela análise dimensional, a análise do Pi termo da força máxima do punção em relação ao Pi termo do raio do punção é dada de acordo com a Eq. (8):

$$\pi_1 = f(\bar{\pi}_2, \bar{\pi}_3, \bar{\pi}_4, \pi_5, \bar{\pi}_6, \bar{\pi}_7) \quad (8)$$

Lange (1985) sugere que o raio do punção seja sempre 3 a 5 vezes maior que o raio da matriz, de modo a evitar o rompimento do fundo copo. Como esse intervalo é pequeno para detectar alguma variação na força máxima do punção, a verificação será feita entre 1,5 e 4,5 vezes o raio da matriz.

r_p / r_d	Força máxima teórica (kN)	Força máxima numérica (kN)	Força de sujeição (kN)	Pi-1 teórico	Pi-1 numérico
1,5	199,22	197,04	128,04	1,5560	1,5390
2,0	199,22	196,40	128,04	1,5560	1,5339
2,5	199,22	195,57	128,04	1,5560	1,5275
3,0	199,22	193,64	128,04	1,5560	1,5124
3,5	199,22	193,79	128,04	1,5560	1,5135
4,0	199,22	192,70	128,04	1,5560	1,5051
4,5	199,22	191,57	128,04	1,5560	1,4962

Tabela 4. Resumo dos resultados obtidos das simulações para o raio do punção.

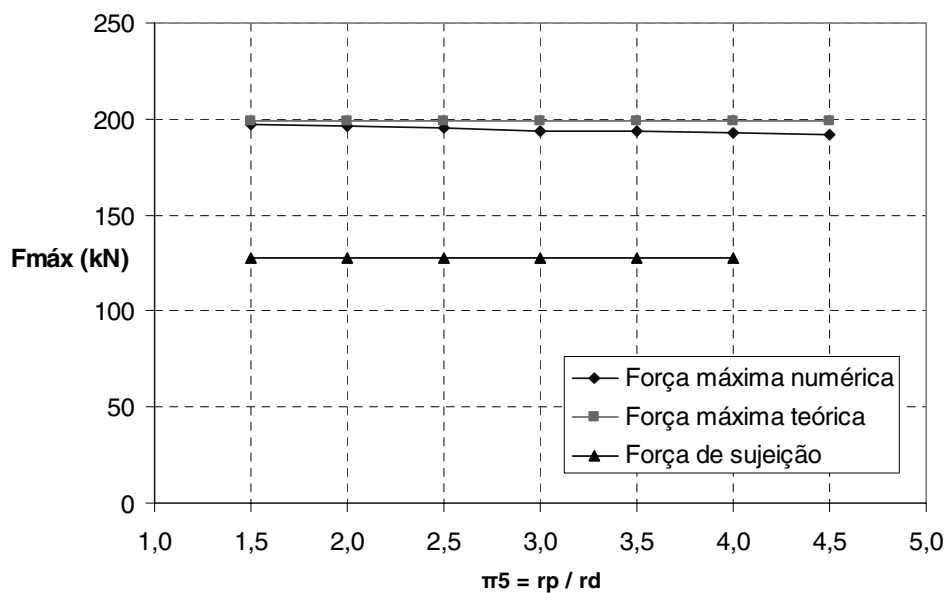


Figura 5. Gráfico da força máxima do punção (numérica e teórica) e força do prensa-chapas em relação a variação do raio do punção.

A Tabela (4) traz todos os resultados das simulações realizadas, variando apenas o raio do punção. Não houve variação na força máxima teórica, porque a fórmula da Eq. (5) não leva em consideração o raio do punção. De fato, a variação da força máxima numérica do punção é bastante pequena, como pode ser vista na terceira e sexta coluna da Tab. (4) e na Fig. (5), mas com uma leve variação decrescente, como esperado.

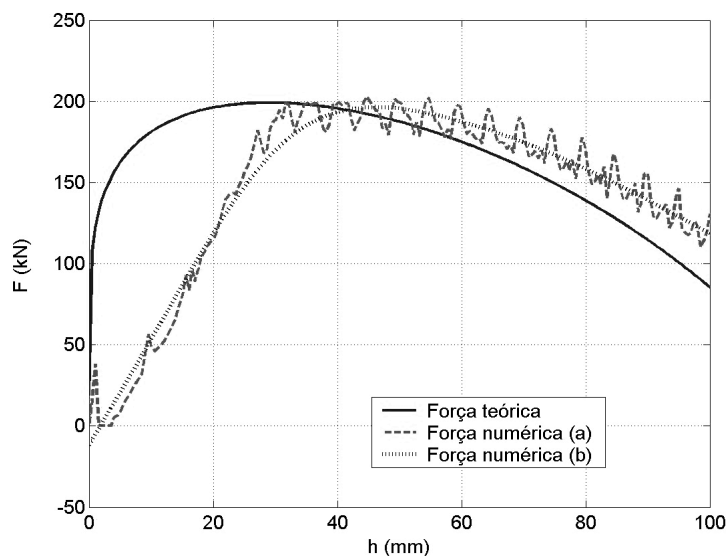


Figura 6. Gráfico *força x curso* do punção para $r_p = 15$ mm.

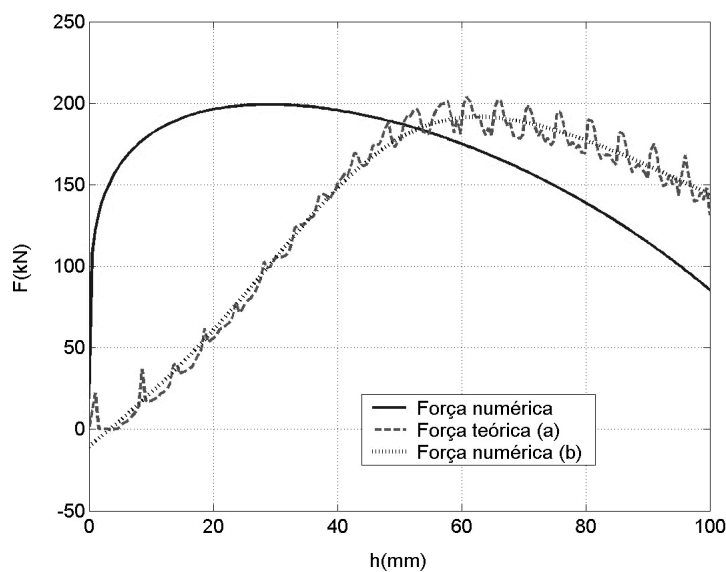


Figura 7. Gráfico *força x curso* do punção para $r_p = 45$ mm.

Apesar do raio do punção pouco influir na força máxima do punção, verificou-se que quanto maior o raio do punção, mais tarde ocorrerá a força máxima do punção, ou seja, ocorrendo mais próxima do fim do processo de embutimento, como pode ser observado em Fig. (6) e Fig. (7). Para entender esse fenômeno, é necessário observar os fatores que levam ao decréscimo da força do punção após uma determinada profundidade de embutimento.

O motivo principal deve-se ao dobramento do material do *blank* no raio da matriz, que permanece constante logo após as paredes do copo tornarem-se verticais, não sendo mais necessário um acréscimo de força para continuar o fluxo de material. Porém o valor da força não permanece

constante devido à diminuição do atrito na região do flange, cujo diâmetro torna-se cada vez menor, diminuindo também a área de contato entre o *blank* e o prensa-chapas.

Com o aumento do raio do punção, as paredes do copo tornam-se menores, fazendo com que a força máxima ocorra mais tarde. Isso deve explicar também porque o gráfico da força teórica é tão acentuado na região correspondente ao início do processo de embutimento, já que a equação não leve em consideração o raio do punção.

4. CONCLUSÕES

Através deste trabalho, mais uma vez foi comprovada a importância de realizar simulações para otimizar o projeto inicial de conformação de metais. Dentre eles, o embutimento, que é bastante empregado na indústria, pode ter vários aspectos previstos e defeitos eliminados com o auxílio do método dos elementos finitos. Em relação a esse método, a formulação explícita comprovou ser bastante eficaz na resolução de problemas dinâmico-transientes, como o estudado neste trabalho.

Com relação à força máxima de embutimento, foi comprovado que, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes e variando a razão de embutimento, essa força decresce. Porém a relação entre a força do punção e a força do prensa-chapas tende a crescer devido a queda da força do prensa-chapas ser bem mais acentuada. A relação entre os dois Pi termos também foi comprovada dar-se de forma linear.

Foi constatado que o raio do punção pouco interfere no valor de sua força máxima, porém grandes variações nesse raio provocam um atraso na ocorrência dessa força, fenômeno que não pôde ser detectado através da equação empírica utilizada para validar os resultados.

A análise dos outros quatro Pi termos de influência da força máxima do punção pode ser prosseguida, a fim de se chegar a uma equação preditiva. Porém, esse não foi o objetivo deste trabalho, que se resumiu em analisar apenas os dois parâmetros citados acima. Essas equações preditivas são importantes porque produzem uma opção a mais para o cálculo da força máxima de embutimento, visto que a fórmula empírica apresentada neste trabalho é bastante complexa e não fornece diretamente a força máxima do punção, requerendo muitos cálculos até chegar ao seu valor.

5. REFERÊNCIAS

- Belytschko, T. and Lin, J. I., 1984, "Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 42, pp. 225-251.
- Boor, C. de, 2000, "Spline Toolbox - User's Guide Version 3", The Mathworks Inc., USA, 164 p.
- Borsoi, C. A., Schaeffer, L., Hennig, G. R. and Crivellaro, R. S., 2001, "Análise da Conformabilidade de Chapas para a Indústria de Estampagem", Proceedings of the 4th National Conference of Sheet Metal Forming", Vol. 1, Gramado, Brazil, pp. 80-90.
- Hallquist, J. O., 1998, "LS-Dyna – Theoretical Manual", Livermore Software Technology Corporation, Livermore, USA.
- Lange, K., 1985, "Handbook of Metal Forming", Ed. Mcgraw-Hill, New York, USA.
- Lanzon, J. M., Cardew-Hall, M. J. and Hodgson, P. D., 1998, "Characterising Frictional Behaviour in Sheet Metal Forming", Journal of Materials Processing Technology, Vols. 80-81, pp. 251-256.
- Maker, B. N., 1998, "Implicit Springback Calculation using LS-DYNA", Proceedings of the 5th International LS-DYNA Users Conference, Vol. 1, Southfield, USA, pp. 1-10.
- Mamalis, A. G., Manolakos, D. E. and Baldoukas, A. K., 1997, "Simulation of Sheet Metal Forming Using Explicit Finite-Element Techniques: Effect of Material and Forming Characteristics - Part1. Deep Drawing of Cylindrical Cups", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 72, pp. 48-60.
- Marciniak. Z. and Duncan, J. L., 1992, "The Mechanics of Sheet Metal Forming", Ed. Edward Arnold, London, Great Britain, 168 p.
- Thiruvarudchelvan, S. and Gan, J., 1994a, "Deep Drawing of Hemispherical Cups with Friction-actuated Blank Holding", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 40, pp. 327-341.

- Thiruvarudchelvan, S. and Lewis, W. G., 1990, "Deep Drawing with Blank Holder Force Approximately Proportional to the Punch Force", Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, pp. 278-285.
- Thiruvarudchelvan, S. and Loh, N. H., 1994, "Deep Drawing of Cylindrical Cups with Friction-actuated Blank Holding", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 40, pp. 343-358.
- Thiruvarudchelvan, S., Travis, F. W. and Poh, T. K., 1999, "On the Deep Drawing of Cups with Punch and Blank-holding Forces Proportional to a Hydraulic Pressure", Journal of Materials Processing Technology, Vols. 92-93, pp. 375-380.

ANALYSIS OF THE MAXIMUM PUNCH FORCE OF THE DEEP-DRAWING OF CYLINDRICAL CUPS USING FINITE ELEMENT METHOD

Rodrigo Rodrigues Aragão

Federal University of Uberlândia, Department of Mechanical Engineering, João Naves de Ávila Avenue 2160, Campus Santa Mônica, Uberlândia/MG, Brazil, rragao@mecanica.ufu.br

Sonia Aparecida Goulart Oliveira

Federal University of Uberlândia, Department of Mechanical Engineering, João Naves de Ávila Avenue 2160, Campus Santa Mônica, Uberlândia/MG, Brazil, sgoulart@mecanica.ufu.br

***Abstract.** In sheet metal forming processes, the maximum force that is needed to carry out the process is very important in the choice of the press and in the control of the blank holder force. The explicit formulation of the finite-element method, as found in the Ansys/LS-Dyna package, has been very useful in the simulation of dynamic-transient problems, as the metal forming processes. In this paper, two parameters of the deep-drawing of cylindrical cups are analysed. The first one, the drawing ratio, it is analysed the maximum deep-drawing force variation, keeping constant the maximum punch stroke. The second one, the die radius, it is verified its influence in the deep-drawing force during the punch course until its maximum stroke. In order to decrease the amount of experiments, similitude techniques are used. The results are validated according to an empirical equation that is found in the literature.*

***Keywords:** maximum punch force, deep-drawing, finite-element method.*