

ESTUDO EXPERIMENTAL, NUMÉRICO E ANALÍTICO DAS EVOLUÇÕES DA FORÇA E DA ESPESSURA EM CHAPAS DE AÇO LI DURANTE PROCESSAMENTO POR EMBUTIMENTO¹

Frederico de Castro Magalhães²

Renato Otto Diniz³

Rogério Helvídio Lopes Rosa⁴

Paulo Roberto Cetlin⁵

Haroldo Béria Campos⁶

Resumo

O embutimento profundo é um dos mais importantes processos de conformação de chapa. Neste presente trabalho foi utilizado diferentes métodos de estudo: analítico, numérico e experimental, para estimar e verificar a evolução da força em função do deslocamento do punção e a variação da espessura do copo embutido. Além disso, pode-se determinar a força máxima de embutimento. Para a parte experimental, foi construído um conjunto de ferramental, para realizar o embutimento de um copo utilizando um blanque de 100 mm, de aço LI (Livre de Intersticiais), com espessura de 1,78 mm. A parte analítica foi conduzida a partir das diferentes relações analíticas sugeridas por diferentes autores e utilizadas para calcular a força máxima de embutimento. A parte numérica foi conduzida utilizando o método de elementos finitos através do aplicativo numérico-computacional LS-DYNA. Os resultados obtidos através desses diferentes métodos, analítico e numérico, foram comparados com os resultados obtidos experimentalmente, a fim de verificar a coerência e a aplicabilidade dos mesmos.

Palavras-chave: Embutimento; Método de elementos finitos; Aço LI; Força máxima de embutimento.

EXPERIMENTAL, NUMERICAL AND ANALYTICAL ANALYSIS OF THE EVOLUTIONS OF THE FORCE AND THE THICKNESS DURING IF STEEL CUP DEEP DRAWING

Abstract

The deep drawing is one of the most important sheet metal forming processes. In this present work, different methods of analysis, such as, analytical, numerical and experimental have been used to evaluate and to verify the evolution of force related to the punch displacement and variation of the thickness of the cup deep drawing. Moreover, the maximum deep drawing force can be determined. For the experimental stage, a set of tool rack was constructed, to carry through the cup deep drawing using a 100 mm and 1.78 mm thick IF steel blank. The analytical stage was lead from the different analytical relations suggested by different authors and used to calculate the deep drawing force. The numerical stage was lead using the finite elements method of LS-DYNA commercial software. The results of these different methods, analytical and numerical, have been compared to the experimental results, in order to verify the coherence and applicability of the same ones.

Key words: Deep drawing; Finite element method; IF steel; Maximum deep drawing force.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *M.Sc. Engenheiro Mecânico, Aluno de Doutorado do Curso de Pós Graduação em Eng. Mecânica da EEUFMG.*

³ *M.Sc. Engenheiro Mecânico, Embraer.*

⁴ *M.Sc. Físico, Aluno de Doutorado do Curso de Pós Graduação em Eng. Mecânica da EEUFMG.*

⁵ *Engenheiro Mecânico, Dr. Prof. Titular do Depto. De Eng. Metalúrgica da EEUFMG.*

⁶ *Físico, Dr., Prof. Adjunto do Depto. de Eng. Mecânica da EEUFMG.*

1 INTRODUÇÃO

O emprego do prensa-chapa móvel no processo de embutimento tem como finalidade, exercer uma pressão específica sobre a chapa, para evitar a formação de rugas nas abas da peça, obtendo-se assim, uma peça embutida de paredes lisas. Para isso, são utilizadas prensas de duplo e de simples efeito.

Ao contrário das prensas de duplo efeito onde os movimentos do prensa-chapa e do punção são independentes, adota-se o uso de molas nos ferramentais destinados para as prensas de simples efeito, que promovem o escalonamento do movimento do prensa-chapa em relação ao punção. Esta adoção, além de exigir um maior controle na manutenção nos ferramentais, limita a profundidade do embutimento da peça.

Apesar do processamento por estampagem ser extensivamente usado na indústria, os processos de produção e o ferramental estão ainda fortemente baseados em resultados empíricos. O desenvolvimento da simulação numérica capacitou avaliar objetivamente a formabilidade e a distribuição de tensão e deformação em diferentes estágios do embutido, permitindo a otimização das etapas de fabricação de protótipos e de afinamento do ferramental.⁽¹⁻³⁾

A análise teórica do processo de embutimento profundo de copo está definida na literatura em vários trabalhos. Durante o embutimento de um copo ocorrem variações na espessura das paredes previstas teoricamente e verificadas experimentalmente. Os trabalhos teóricos de Hosford e Caddell⁽⁴⁾ prevêem as variações de espessura com afinamento das regiões do copo próximas ao raio de curvatura do punção e espessamento nas regiões próximas do topo do copo (aba). A Figura 1a representa esquematicamente a variação de espessura na parede de um copo embutido.

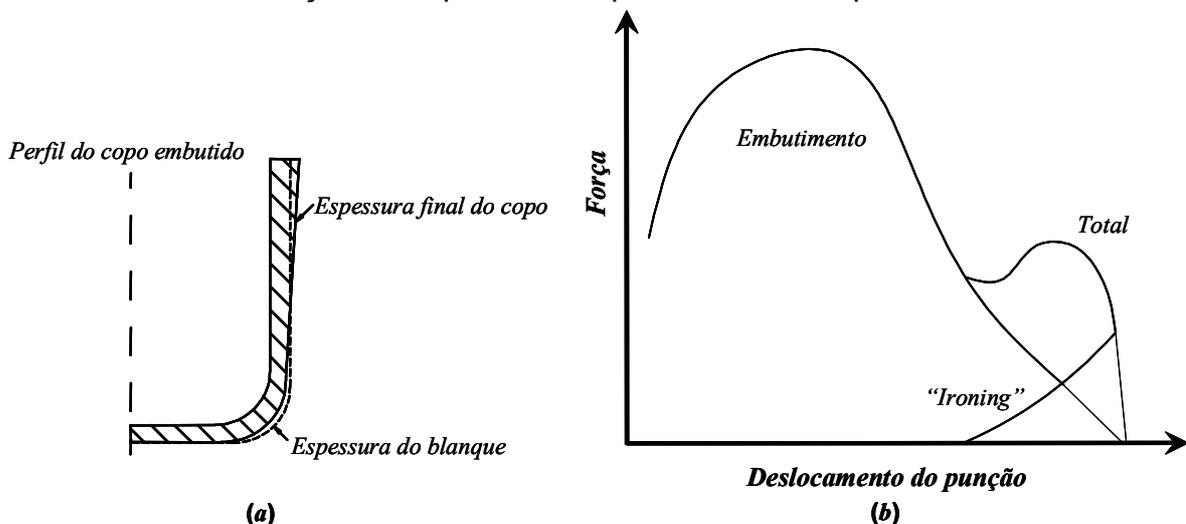


Figura 1: (a) Desenho esquemático da variação da espessura na parede de um copo embutido. (b) Variações da força de embutimento em função do deslocamento do punção.

Este espessamento da parede do copo pode levar a uma condição de *ironing* ao final do processo de embutimento do copo, desde que a folga entre o punção e a matriz não seja suficiente. Esta condição é semelhante à condição do processo de trefilação. A força de embutimento do copo durante o deslocamento do punção será influenciada por este espessamento da parede do copo na etapa final do embutimento. A Figura 1b representa a variação da força total de embutimento do copo tanto para a condição inicial de embutimento sem espessamento quanto para a condição final de *ironing* com espessamento, indicando a ocorrência de duas variações bruscas da força total relativos a cada condição.⁽⁴⁾

Portanto, este trabalho tem como objetivo, viabilizar economicamente o embutimento, cada vez mais em prensas de simples efeito, no qual, foi concebido, projetado e

construído um ferramental, em que, o prensa-chapa é fixado a uma distância da matriz, eliminando o efeito das molas. Para isso, será avaliada a força total de embutimento durante deslocamento do punção e a evolução da espessura ao longo do copo embutido. Esta avaliação é realizada experimentalmente através do ferramental construído e teoricamente através de modelagem e simulação numérico-computacional através do aplicativo computacional licenciado LS-DYNA. Além disso, é avaliada a força máxima de embutimento através de métodos analíticos propostos na literatura e descritos neste texto.⁽⁴⁻⁶⁾ Os resultados numérico-computacionais são comparados com resultados experimentais e com aqueles obtidos através de métodos analíticos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Construiu-se um ferramental para a execução de embutimento e *ironing* em laboratório para ser montado tanto em prensas hidráulicas quanto em máquinas universais de ensaios mecânicos. Esse ferramental pode ser visualizado no desenho esquemático da Figura 2. O ferramental é constituído de duas bases, para possibilitar a montagem em prensas com mesas furadas ou máquinas de ensaios mecânicos, que no geral, possuem mesa sem furo; uma matriz com diâmetro de 52.50mm e raio de quina de 6.3mm, na qual se pode fazer o embutimento e encaixar anéis de *ironing* (quando se desejar trefilar a parede do copo); um prensa-chapa fixado à matriz por quatro parafusos Allen M20; três pinos de centralização do *blanque*, que também distanciam o prensa-chapa fixo da matriz; discos de centralização do punção e um punção com 48.30mm de diâmetro, 150 mm de comprimento e 10.0 mm de raio de quina.

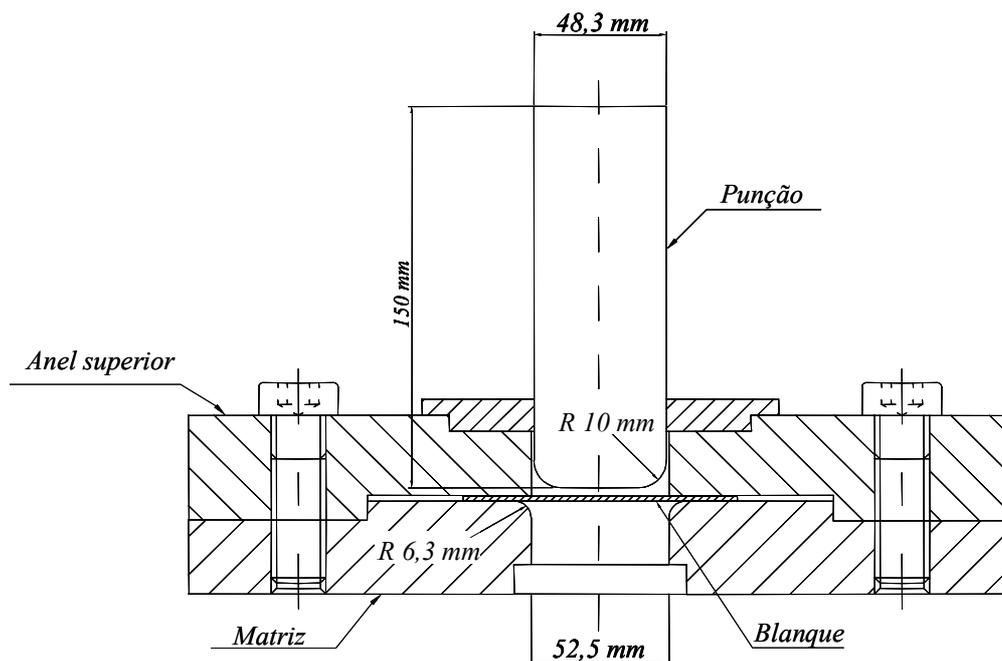


Figura 2: Desenho da ferramenta de ensaios montada.

Os ensaios de embutimento foram realizados montando-se a ferramenta descrita anteriormente, utilizando três pinos que forneceram uma distância entre o prensa-chapa fixo e a matriz de 2.00 mm, numa máquina universal de ensaios mecânicos marca Kratos, com capacidade de 490.5 kN, no módulo de compressão. A máquina em questão é equipada com um sistema de aquisição de dados por computador que possui como transdutores, uma célula de carga de 245.25 kN com resolução de 49.5 N e um LVDT de 500 mm com resolução de 0.1mm.

O material usado no trabalho foi o aço livre de elementos intersticiais, com uma espessura de 1.78 mm, galvanizado em uma das faces. Na chapa foram cortados 5

blanques de 100 mm de diâmetro para o processamento. Esses *blanques* foram embutidos com velocidade de deslocamento do punção de 0.8 mm/s, utilizando como lubrificante graxa a base de bissulfeto de molibdênio entre a chapa e a matriz. Não foi feita lubrificação entre a chapa e o prensa chapa. Foram usinados também 15 corpos de prova para levantamento das curvas de fluxo e dos coeficientes de anisotropia a 0°, 45° e 90°.

2.1 Relações Analíticas

Existem diversas técnicas aplicadas ao processo de embutimento. Contudo quatro relações importantes para predição da força máxima de embutimento serão descritas neste texto. Em um método analítico é essencial adotar hipóteses simplificadoras. Na teoria descrita por Hosford e Caddell,⁽⁴⁾ as seguintes hipóteses simplificadoras foram adotadas.

- Toda a energia gasta no processo é usada para deformar o material na aba. O trabalho devido às forças de atrito e ao trabalho para dobrar e desdobrar a chapa é inicialmente desconsiderados, e estes serão considerados na etapa final do processo com a introdução de um fator η ;
- O material é considerado perfeitamente plástico ($n=0$),
- A espessura da chapa permanece constante durante o processamento;
- O material da chapa possui isotropia planar e anisotropia normal;
- Posteriormente será assumido, que variações angulares podem ser manipuladas usando o coeficiente de anisotropia normal médio;
- O escoamento é descrito por Hill 48.

$$\bar{R} = (R_0 + 2R_{45} + R_{90})/4 \quad (1)$$

Considerando a deformação da aba, Figura 3, e assumindo a condição de deformação plana $d\varepsilon_z = 0$, a constância de volume da chapa implica na seguinte relação:

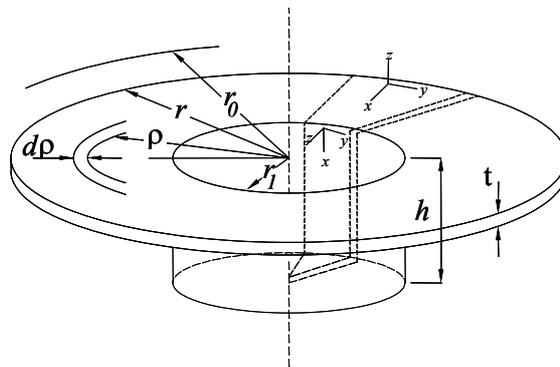


Figura 3: Ilustração esquemática de um copo parcialmente embutido mostrando o sistema de coordenadas.⁽⁴⁾

$$\pi\rho^2 + 2\pi r_1 h = \pi\rho_0^2 = \text{constante} \quad (2)$$

Em que ρ_0 , ρ , r e h estão definidos na Figura 3. Derivando a Eq. 2 e considerando $d\varepsilon_y = d\rho/\rho$ obtém-se:

$$d\varepsilon_x = -d\varepsilon_y = -\frac{d\rho}{\rho} = \frac{r_1 dh}{\rho^2} \quad (3)$$

Em que r_1 é o raio do punção e dh é a distância incremental movida pelo punção. Baseado nessas condições, o trabalho incremental, dW , feito em um elemento da chapa será:^(4,5)

$$dW = \frac{2\pi r_1 \rho d\rho (\sigma_x - \sigma_y) r_1 dh}{\rho^2} \quad (4)$$

Assim a força de embutimento, F_d , que deve ser igual ao trabalho total pelo deslocamento incremental do punção deve ser:

$$F_d = \frac{dW}{dh} = \int_{r_1}^r \frac{2\pi r_1 t \sigma_f d\rho}{\rho} = 2\pi r_1 t \sigma_f \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \quad (5)$$

A força de embutimento é máxima quando $r = r_0$. Portanto essa força máxima é dada pela expressão:

$$F_{d(\max)} = 2\pi r_1 t \sigma_f \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right) = 2\pi r_1 t \sigma_f \ln\left(\frac{d_0}{d_1}\right) \quad (6)$$

Em que d_0 é o diâmetro do *blanque*, d_1 é o diâmetro do punção e σ_f é a tensão de fluxo do material da chapa. A equação acima é válida para $\eta = 1$ e $\bar{R} = 1$. No entanto, se for considerado o trabalho de atrito, a anisotropia normal e o trabalho para dobrar e desdobrar a chapa através de um fator de eficiência, η , essa equação pode ser escrita como:⁽⁴⁾

$$F_{d(\max)} = \frac{2\pi r_1 t \sigma_f}{\eta} \ln\left(\frac{d_0}{d_1}\right) \quad (7)$$

Siebel⁽⁶⁾ utilizando a teoria da plasticidade propôs a seguinte expressão para a força de embutimento máxima:

$$F_{d(\max)} = \pi d_m t_0 \left(\underbrace{1.1 \sigma_{f1} \ln \frac{d_{Fd(\max)}}{d_m}}_A \right) \left(\underbrace{e^{\frac{\mu\pi}{2}}}_B \right) + \underbrace{\frac{2\mu F_N}{\pi d_{Fd(\max)} t_0}}_C + \underbrace{\sigma_{f2} \frac{t_0}{2r_D}}_D \quad (8)$$

Nesta equação, o termo A corresponde ao trabalho requerido para deformação homogênea, o termo B é o gasto de energia com o atrito no raio de quina da matriz. O termo C é devido ao trabalho necessário para superar o atrito entre a chapa e a matriz e entre a chapa e o prensa chapa e o termo D está relacionado ao gasto de energia necessário para dobrar e desdobrar a chapa no raio de quina da matriz. Além disso, d_m é o diâmetro médio e é igual a $d_1 - t_0$, $d_{Fd(\max)}$ é o diâmetro da aba quando a força de embutimento torna-se máxima. É mostrado que $d_{Fd(\max)}$ é aproximadamente igual a $0,77d_0$, em que d_0 é o diâmetro do *blanque*.⁽⁵⁾ t_0 , μ , F_N e r_D são a espessura do *blanque*, o coeficiente de atrito, a força normal exercida pelo prensa chapa e o raio de quina da matriz, respectivamente. σ_{f1} é a tensão de fluxo média na aba e σ_{f2} é a tensão de fluxo média no raio de quina da matriz. σ_{f1} é aproximadamente igual a $1,35 S_u$, em

que s_u é o limite de resistência do material da chapa. σ_{f2} pode também ser determinado utilizando a equação:⁽⁵⁾

$$\sigma_{f2} = K_f \left(\ln \sqrt{1 + \frac{t_0}{r_1}} \right)^n \quad (9)$$

Em que K é o coeficiente de resistência, n o expoente de encruamento e r_p é o raio do punção. Para simplificar o cálculo da força máxima, Siebel e Beisswanger⁽⁵⁾ propuseram a seguinte fórmula :

$$F_{d(\max)} = \pi d_m t_0 \left(\frac{1.1 \sigma_{f1}}{\eta} \right) \left(\ln \frac{d_0}{d_1} - 0,25 \right) \quad (10)$$

Oehler e Kaiser⁽⁶⁾ propuseram a seguinte expressão para o cálculo da força de embutimento máxima para peças cilíndricas:

$$F_{d(\max)} = 5(d_1 - t_0) t_0 \sigma_f \ln \frac{d_0}{d_1} \quad (11)$$

Uma representação empírica para a força máxima do punção foi proposta por Mielnik⁽⁷⁾ como sendo:

$$F_{d(\max)} = \frac{t_0 \pi \sigma_f d}{2\eta} \ln \left(\frac{d_0}{d_1} \right) \quad (12)$$

2.2 Método de Elementos Finitos

No aplicativo LS-DYNA, de abordagem explícita dinâmica, a chapa será modelada como material plástico anisotrópica, considerando os três índices de anisotropia R_0 , R_{45} e R_{90} , e o critério de escoamento proposto por Barlat.⁽⁸⁾ Neste tipo de abordagem, as equações de equilíbrio dinâmico são a base da formulação. Tem-se a grande vantagem de não necessária a montagem e solução da matriz rigidez, obtendo-se a solução para um *time step* mais rapidamente que uma abordagem estática. Na equação (13) está o conjunto de equações diferenciais não lineares a ser resolvido para estimar os deslocamentos nodais.⁽⁹⁾ A equação (13) pode ser solucionada pelo método das diferenças centrais e considerando o amortecimento C desprezível.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K(u(t))]\{u(t)\} = \{F(t)\} \quad (13)$$

Em que M é a matriz de massa, u o vetor desconhecido de deslocamentos nodais, C a matriz de amortecimento, K a matriz de rigidez e $F(t)$ a matriz das forças externas dependente do tempo.

Para a discretização da chapa foram utilizados 2.500 elementos numéricos de casca quadrados, do tipo Belytschko-Tsay, com cinco pontos de integração através da espessura. Este tipo de elemento numérico apresenta bons resultados relativos à distribuição das tensões e deformações, requerendo um menor tempo computacional.⁽¹⁰⁾

A modelagem e a simulação numérica foram realizadas, considerando-se o punção, o prensa chapa e a matriz como corpos rígidos. A velocidade do punção foi de 0.8 mm/s ao longo do curso de 60 mm. Foram adotados coeficientes de atrito entre: punção/chapa de 0.30, matriz/chapa de 0.12 e prensa chapa/chapa de 0.06. Foi utilizado módulo de elasticidade igual a 210 GPa e coeficiente de Poisson igual a 0.3.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A chapa de aço IF em estudo foi caracterizada pelos valores dos coeficientes de anisotropia $R_0=1.48$, $R_{45}=1.61$ e $R_{90}=2.02$, limite de escoamento $S_0=160\text{MPa}$ e pela equação de Hollomon $\sigma=508.7\varepsilon^{0.242}$ obtida para amostras tracionadas segundo um eixo fazendo 45° com a direção de laminação.

A Figura 4 mostra um comparativo da evolução das espessuras obtidas numericamente e experimentalmente nas direções de laminação. Durante o embutimento de um copo, ocorrem variações na espessura das paredes, previstas teoricamente e verificadas experimentalmente e numericamente. Os resultados teóricos de Hosford e Caddell⁽⁴⁾ prevêem as variações de espessura com afinamento das regiões do copo próximas ao raio de curvatura do punção e espessamento nas regiões próximas do topo do copo (aba). Este espessamento da parede do copo pode levar a uma condição de *ironing* ao final do processo de embutimento, desde que a folga entre o punção e a matriz não seja suficiente. Para acompanhar a variação da espessura ao longo do copo, determinaram-se intervalos de 2 em 2 mm a partir do topo do copo até o raio de concordância, identificando as espessuras dos elementos em cada intervalo, ao longo de cada direção de laminação. Apesar das espessuras simuladas, ao longo do copo, acompanharem os perfis das espessuras experimentais, em algumas regiões, apresentou espessuras divergentes, que pode ser atribuída às condições de não linearidade do atrito, da geometria e do comportamento mecânico no transcórreo do processo de embutimento, não sendo perceptível ao aplicativo. Foi verificado também que as espessuras medidas na direção de 45° foram a que mais aproximaram dos valores experimentais, o que era esperado, uma vez que para descrever o comportamento mecânico da chapa, foi adotada a curva de escoamento nesta direção, justificando a dispersão das espessuras nas outras direções de laminação.

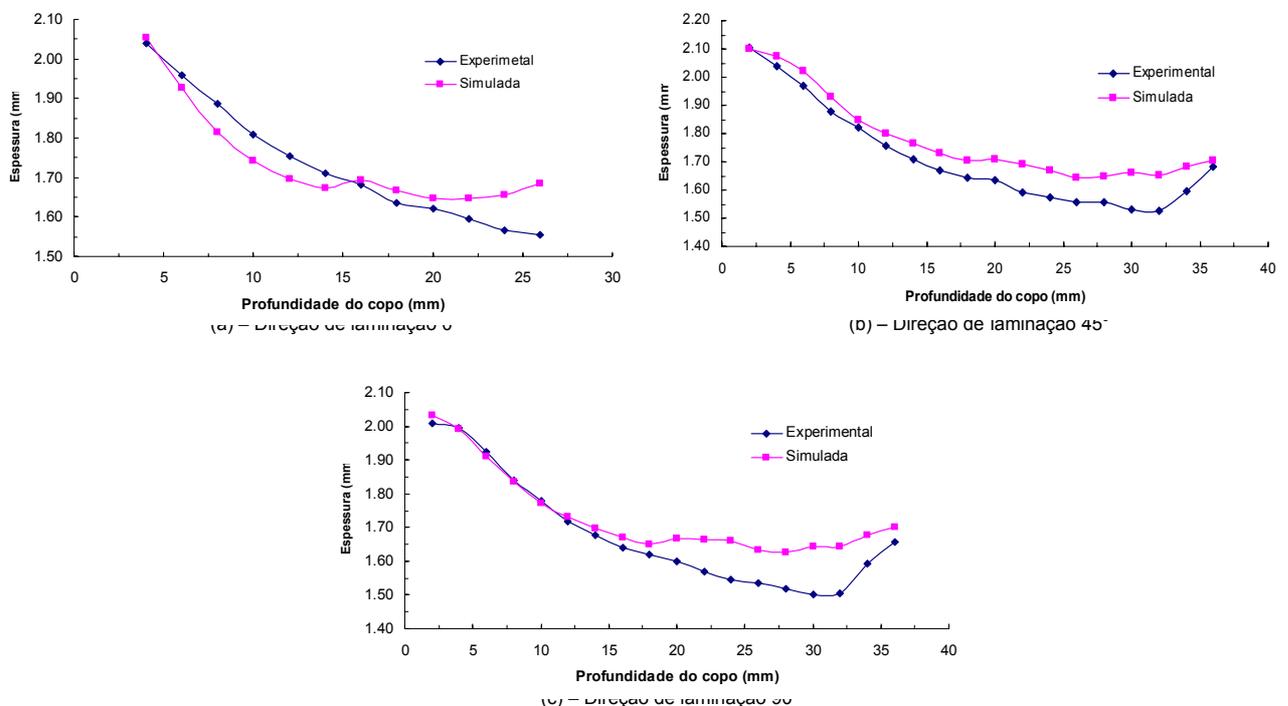


Figura 4 - Valores simulado e experimental da espessura (a) na direção de laminação 0° , (b) na direção de laminação 45° , (c) na direção de laminação 90° , em função da profundidade do copo.

A Figura 5 mostra os perfis simulado e experimental da força, durante o deslocamento do punção. O que se destaca nestes comparativos de forças é o deslocamento da curva experimental para a direita em relação à simulada, e a formação de dois picos de força retratados na curva simulada. Esta dispersão dos pontos em torno dos valores de deslocamento do punção pode ser explicada pela dificuldade experimental de zerar os dados. Ou seja, para que o deslocamento registrado antes do início do carregamento fosse realmente zero, o punção deveria estar encostado no cabeçote superior da máquina de ensaios e todas as folgas do sistema deveriam estar eliminadas.

O perfil simulado da força durante o deslocamento do punção, apresentou dois picos de força. O primeiro pico de força ocorreu devido ao fato da chapa alcançar a um espessamento igual à folga existente entre o prensa chapa e a matriz de 2 mm, e o segundo pico ocorreu devido à redução da espessura da chapa em virtude da folga existente entre o punção e a matriz, o que é comprovado observando, na Figura 5b, a constância da espessura nesse intervalo, do elemento 6509, situado na aba do copo embutido. Apesar dessas diferenças observadas, o valor da força máxima de embutimento simulada foi bastante coerente com o experimental.

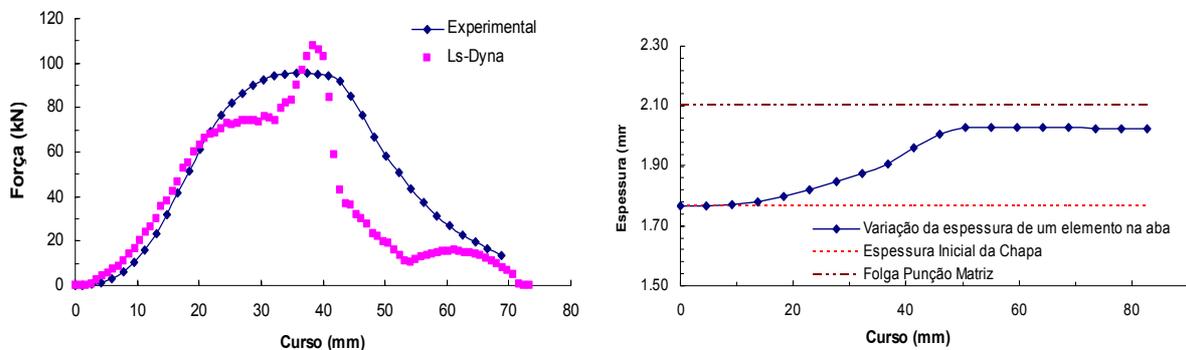


Figura 5: Valores simulados da força (a) e da variação da espessura de um elemento situado no perímetro do *blanque* (b), em função do deslocamento do punção.

Na Tabela 1 são mostrados os valores obtidos de força máxima através de métodos analíticos, numéricos e experimentais. Os valores analíticos estão associados à faixa de valores do coeficiente de eficiência de deformação, η , definidos pelos diferentes pesquisadores.

Tabela 1: Força máxima de embutimento obtida a partir de distintos tipos de análise.

Tipo de análise	Força máxima, ($F_{d\max}$), [kN]	Eficiência de deformação
Experimental	95,40	-----
Numérico	107,59	-----
Hosford e Caddell, Eq. (7)	$93,57 < F_{d\max} < 99,89$	$0,74 < \eta < 0,79$
Siebel e Beisswanger, Eq. (10)	$79,85 < F_{d\max} < 111,78$	$0,50 < \eta < 0,70$
Oehler e Kaiser, Eq. (11)	121,95	-----
Mielnik, Eq. (12)	$122,77 < F_{d\max} < 139,93$	$0,74 < \eta < 0,79$

Através da Tabela 1 verifica-se que o valor experimental está contido na faixa prevista por Hosford e Caddell⁽⁴⁾ e por Siebel e Beisswanger.⁽⁵⁾ O valor numérico simulado através do LS-DYNA está contido na faixa prevista por Siebel e Beisswanger.⁽⁵⁾ Os valores experimental e numérico estão significativamente próximos.

5 CONCLUSÕES

Cada método de análise apresenta suas próprias vantagens e desvantagens. Algumas das relações analíticas e os resultados simulados por elementos finitos apresentadas neste trabalho são muito próximos dos resultados experimentais. As relações analíticas são obtidas a baixo custo ao passo que as simulações numéricas necessitam de grandes gastos com software, mas podem fornecer uma grande riqueza de detalhes do processo. Apesar dos custos associados à pesquisa experimental serem os mais elevados, os resultados experimentais são imprescindíveis em uma estratégia de pesquisa mais ampla em conformação mecânica.

Os resultados analíticos para a previsão da força máxima através da formulação proposta Hosford e Caddell ⁽⁴⁾ foram significativamente relevantes por sua simplicidade e concordância com os resultados experimentais em um intervalo estreito de valores para o processo considerado neste trabalho.

O aplicativo numérico LS-DYNA, mostrou-se promitente para o embutimento profundo de um copo cilíndrico, tanto na evolução da força como na variação da espessura ao longo do copo, adotando o critério de escoamento proposto por Barlat e Lian.⁽⁸⁾

A concepção e o projeto do aparato experimental com prensa-chapa fixo mostraram-se consistentes e adequados à realização de operações de estampagem em prensas de simples efeito. Com este aparato experimental com prensa-chapa fixo foram obtidos resultados experimentais que permitiram a avaliação das previsões simuladas e analíticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Brasição pela colaboração e auxílio na construção do aparato experimental utilizado neste trabalho e aos órgãos de fomento CNPq, CAPES e FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- 1 S. Natarajna, S. Venkataswamy, P. Bagavathiperumal, A Note on Deep Drawing Process: Numerical Simulation and Experimental Validation. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, pp. 64-67, 2002.
- 2 L-P. Lei, S-M. Hwang, B-S. Kang, Finite Element Analysis and Design in Stainless Steel Sheet Forming and its Experimental Comparison. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 110, pp. 70-77, 2001.
- 3 H. Palaniswamy, G. Ngaile, T. Altan, Finite Element Simulation of Magnesium Alloy Sheet Forming at Elevated Temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.146, pp. 52-60, 2004.
- 4 W.F. Hosford and R.M. Caddell, *Metal Forming-Mechanics and Metallurgy*, 2^a Edition, PTR Prentice-Hall, New Jersey, 1993.
- 5 F. Fereshteh-Saniee and M.H. Montazeran, A Comparative Estimation of the Forming Load in the Deep Drawing Process. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 555-77, 2003.
- 6 A. Barata da Rocha e J. F. Duarte, *Tecnologia da Embutidura*, ed. APTCP-Associação Portuguesa das Tecnologias de Conformação Plástica, Porto, 1992.
- 7 M. Colgan and J. Monaghan, Deep Drawing Process: Analysis and Experiment. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, pp. 35-41, 2003.
- 8 Barlat and Lian, J. Plastic Behavior and Stretchability of Sheet Metals, Part 1: A Yield Function for Orthotropic Sheets Under Plane Stress Conditions. *International Journal of Plasticity*, v. 5, pp. 51-66, 1989.
- 9 Y.M. Huang and J.W. Chen, Influence of Tool Clearance in the Cylindrical Cup Drawing Process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.57, pp. 4-13, 1996.
- 10 D.R.J. Owen and E. Hinton, *Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice*, Pineridge Press, Swansea, 1986.