

Estudo do Processo de Embutimento Profundo de Copo Pelo Método dos Elementos Finitos

Finite Element Analysis of Cups Deep Drawing Process

Sérgio Tonini Button
Roberto Bortolussi
Depto. de Eng. de Materiais
Fac. de Eng. Mecânica
UNICAMP
13083-970 Campinas, SP Brazil
sergio1@fem.unicamp.br

Resumo

A estampagem profunda desempenha um papel importante na indústria mundial, principalmente na indústria automobilística. A competitividade existente atualmente dentro da indústria faz com que novos métodos de trabalho no desenvolvimento das ferramentas de estampagem sejam adotados. O Método dos Elementos Finitos (MEF) vem auxiliando os projetistas a reduzir os erros que acontecem no desenvolvimento dos ferramentais. Neste trabalho utilizando-se elementos de formulação elasto-plástica foi simulado o processo de estampagem profunda de copo cilíndrico de aço ABNT 1006 classe EEP. Com esta simulação foi possível a determinação da força necessária para o embutimento e as regiões da peça onde a deformação foi mais intensa que em muitos casos são responsáveis pela falha no processo.

Abstract

Deep drawing processes have an important role to manufacturing, mainly in automotive industries. The increase of competition makes that design and manufacture of dies must be fast and

without errors. New forms to development of the dies have been used. The finite element method has helped engineers to reduce errors during the dies development. In this paper was used an elasto-plastic element to simulate the cylindrical deep drawing of ABNT 1006 steel. With this simulation was possible to determine forces, thickness and circumferential strains during deep drawing, that were compared to experimental results.

Introdução

A estampagem profunda tem por finalidade a fabricação de peças a partir de chapas planas. Este processo tem como um dos seus maiores usuários a indústria automobilística em que a competitividade existente tem provocado grandes transformações na forma de execução dos projetos dos ferramentais para a redução de tempo e custo deste desenvolvimento.

A complexidade da transformação da forma durante o processo, o grande número de variáveis envolvidas, como velocidade do equipamento, rigidez das matrizes e o atrito durante o processo, limitam a aplicação de métodos analíticos, pois a capacidade de relacionar muitas variáveis é limitada nesses métodos (Bathe, 1982; Cook et al., 1989).

Com o aumento na velocidade de processamento e na capacidade dos computadores, a possibilidade de relacionar um grande número de variáveis vem ampliando o campo de utilização de métodos numéricos, principalmente o Método dos Elementos Finitos (MEF), para a simulação de processos de conformação (Rowe et al., 1991), incluindo os de estampagem profunda (Chou e Pan, 1994; Gontier, 1994; Keck et al., 1990 e Lee et al, 1989).

Neste trabalho foi realizada a simulação, empregando-se o programa comercial ANSYS 5.0A (Ansys, 1993), do processo de embutimento de copo cilíndrico de aço ABNT 1006 classe EEP, com o objetivo de prever as deformações atuantes na conformação antes da construção das

ferramentas. Esta simulação utilizou elementos de formulação elasto-plástica axissimétrica para a discretização da chapa que será embutida, e para o contato entre a chapa e a ferramenta, utilizou-se elementos que simulam o atrito segundo a lei de Coulomb e com os quais foi possível verificar a influência do coeficiente de atrito sobre as deformações.

Utilizou-se o modelo de material denominado multilinear isotrópico, desprezando-se o efeito da anisotropia sobre as propriedades de estampagem (Borst e Feenstra, 1990, Oñate e Zienkiewicz, 1983 e Darendeliler e Altan, 1996).

Para a solução do sistema de equações foi empregado o método iterativo de Newton-Raphson, um dos mais utilizados para a solução de problemas que apresentam não-linearidade (Bathe, 1982).

A validação da simulação foi feita pela comparação de seus resultados com os de ensaios experimentais nos quais efetuou-se o embutimento de copos, medindo-se a força de embutimento, a deformação da espessura e a deformação circunferencial.

Processo de Estampagem Profunda de Peças Cilíndricas

O processo de estampagem profunda submete a chapa plana a um estado complexo de tensões e deformações que alteram sua espessura durante o processo. O estado típico de tensão varia conforme a posição da retirada do elemento de análise na peça que está sendo conformada. Para peças cilíndricas existem três diferentes estados de tensão: um na flange, um na lateral e um no fundo do copo, como pode ser visto na figura 1.

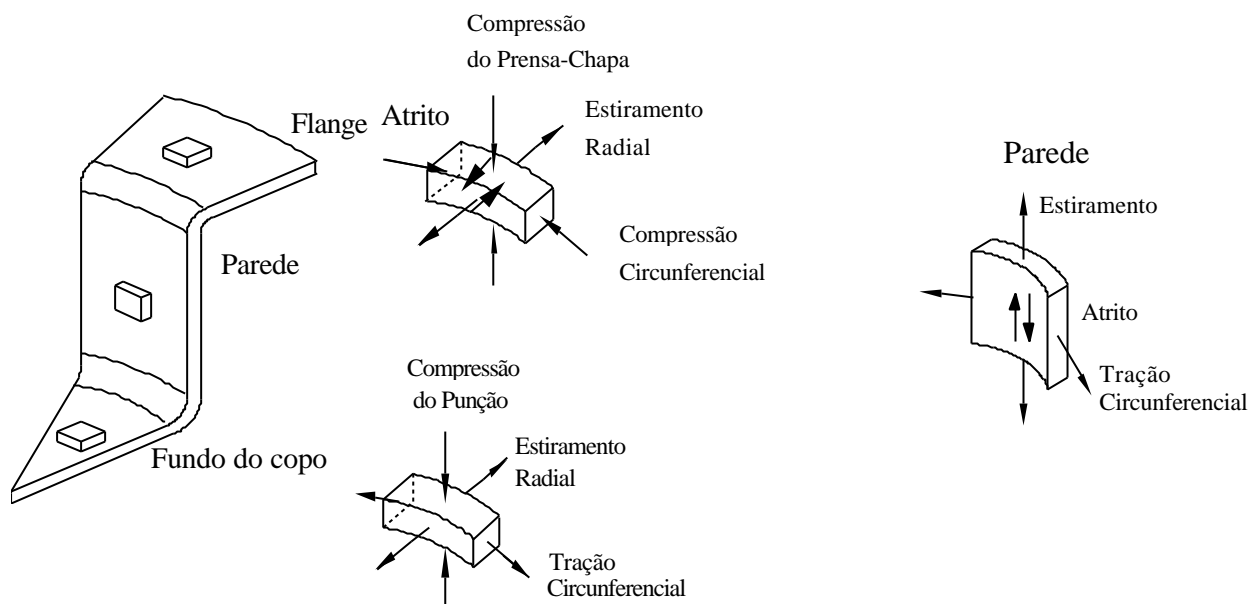


Fig. 1- Estado de deformações atuantes no copo durante o embutimento profundo (Bresciani et al., 1997).

As variações de espessura devida a esses estados de tensão fazem com que a parede do copo fique com o aspecto mostrado na figura 2.

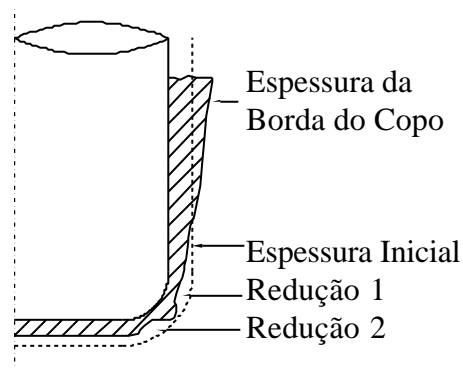


Fig. 2- Variação da espessura ao longo do copo embutido (Slater, 1977).

Quando as variações de espessura na redução 1 são muito intensas ocorre a ruptura do fundo do copo, que é a principal causa de falha de processo no embutimento cilíndrico.

O grande número de variáveis existentes no processo inviabiliza que um modelo analítico tenha condições de determinar precisamente as variações de espessura e sua distribuição,

principalmente as duas reduções de espessura na região de curvatura do fundo do copo (Mahdavian e He, 1995).

Método dos Elementos Finitos.

ELEMENTO PARA GRANDES DEFORMAÇÕES

Em processos de conformação plástica, o material que está sendo conformado passa por grandes deformações. Isto faz com que os elementos que são utilizados para modelar estes problemas, tenham a capacidade de suportar grandes deformações.

Para a modelagem da chapa a ser embutida será utilizado o elemento VISCO106. Este elemento possui a formulação para trabalhar com grandes deformações, apresenta volume constante durante o processamento e pode ser viscoplástico (os esforços dependem da taxa de deformação) ou então elasto-plástico (os esforços não dependem da taxa de deformação), este elemento apresenta 4 nós e 3 graus de liberdade por nó (deslocamentos nas direções X, Y, Z).

O conceito teórico básico deste tipo de elemento é Lagrangeano, as deformações são logarítmicas (ou de Hencky) e as tensões são as verdadeiras (ou de Cauchy).

O material utilizado nas modelagens com este tipo de elemento deve ser isotrópico e as deformações elásticas devem ser desprezíveis em comparação às deformações plásticas.

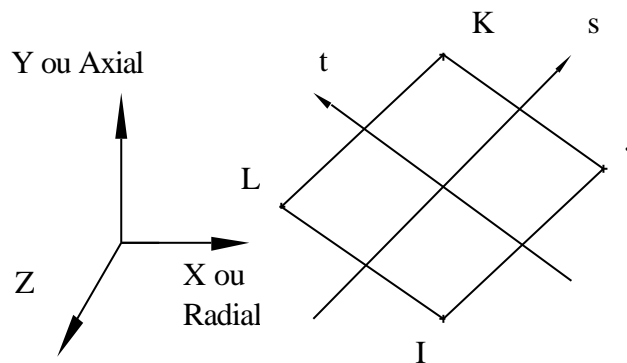


Fig. 3 - Elemento VISCO106

Por suas características, este elemento possui formulação altamente não-linear, o que torna necessário trabalhar com o Método de Newton-Raphson.

Elementos de Contato

Os elementos de contato descrevem basicamente duas condições:

- Aberto, ou seja, não ocorre o contato ou
- Fechado, ocorre o contato.

Para a modelagem será utilizado o elemento de contato com 3 nós chamado CONTAC48. Nesse elemento, para que seja estabelecido o contato, o nó que está na superfície de saída (nó K) deve penetrar na linha definida pelos nós na superfície “alvo” (nós I e J), como mostrado na figura 4.

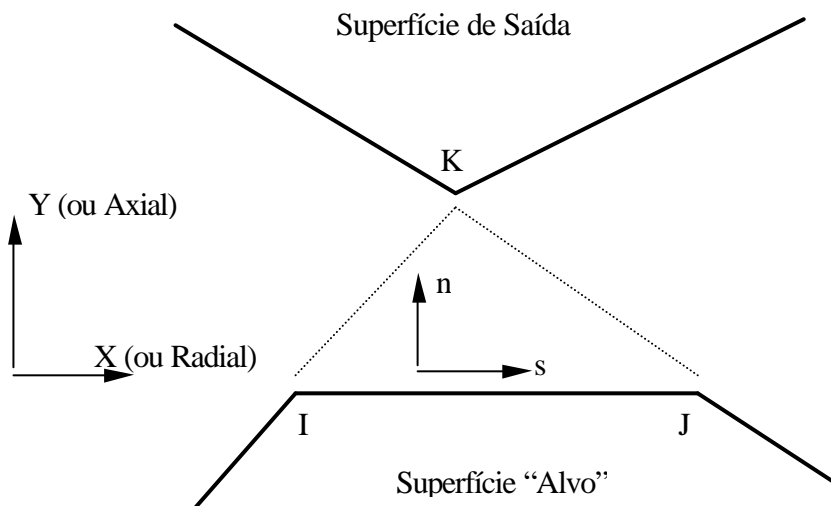


Fig.4 - Elemento de contato - CONTAC48

Esse tipo de definição de contato é denominado algoritmo ‘Pinball’.

Após assumir o contato, começa a ocorrer a transmissão da força entre as duas superfícies. Este elemento utiliza o modelo de atrito de Coulomb.

Modelo de Elementos Finitos

Para a modelagem do embutimento profundo será discretizado o ferramental mostrado na figura 5 com um ‘blank’ de diâmetro igual a 101,28 mm e espessura igual a 1,0 mm. Esse é o ferramental utilizado para o ensaio de Swift, que determina o máximo diâmetro de disco que pode ser embutido em relação ao diâmetro do punção (Dieter, 1984).

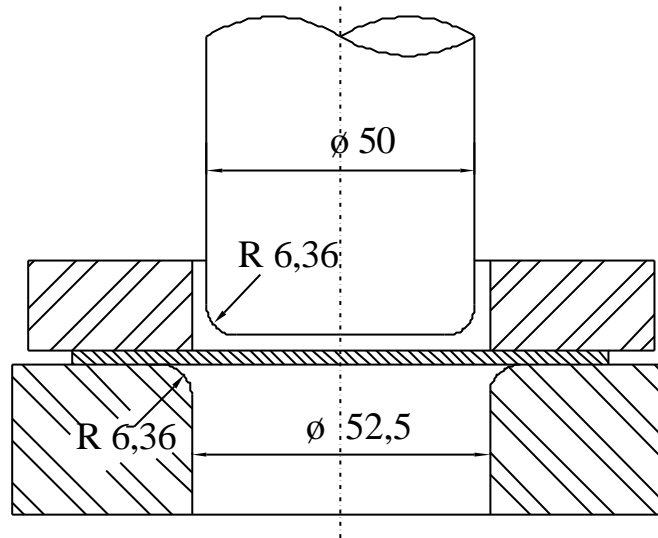


Fig. 5 - Ferramental utilizado na simulação.

Para a modelagem do ferramental utilizou-se o elemento chamado PLANE 42, este elemento possui dois graus de liberdade por nó e características axissimétricas e para modelagem da chapa o elemento VISCO106 (Ansys, 1993)

Material ABNT 1006 - EEP utilizado nos experimentos

A composição química e as características mecânicas do aço utilizado na parte experimental e na simulação estão relacionadas abaixo:

Composição química da chapa de aço utilizada nos experimentos:

Elemento Químico	Porcentagem
Carbono	0,051
Silício	0,001
Enxofre	0,024
Manganês	0,320

Fósforo	0,014
Alumínio	0,062

Tabela 1- Composição química do aço ABNT 1006 EEP utilizado

Propriedades Mecânicas:

Corpo de Prova	σ_0 [MPa]	Desvio Padrão	σ_t [MPa]	Desvio Padrão	Alongamento Uniforme (%)	Desvio Padrão	Alongamento Total (%)	Desvio Padrão
0 ⁰	153,00	16,81	300,00	29,19	24,60	1,35	42,00	1,15
90 ⁰	150,00	16,32	289,00	38,92	23,40	2,17	42,00	1,34

Tabela 2 - Resultados obtidos no ensaio de tração.

Partindo-se dos resultados obtidos no ensaio de tração, foi levantada a curva tensão verdadeira por deformação verdadeira, através do Método dos Mínimos Quadrados.

Corpo de Prova	K [MPa]	Coefficiente de Encruamento (n)
0 ⁰	510,10	0,22
90 ⁰	472,08	0,21

Tabela 3 - Índices para a curva real ($s = K.e^n$)

Índice de Anisotropia

Os índices de anisotropia planar e normal foram determinados utilizando-se corpos de prova retirados a 0⁰, 45⁰ e 90⁰ em relação ao sentido de laminação.

Corpo de Prova	R	Desvio Padrão
----------------	---	---------------

0 ^o	2,15	0,07
45 ^o	1,54	0,10
90 ^o	2,47	0,07

Tabela 4 -Valores encontrados de razão de deformação plástica.

Com os dados acima encontram-se os índices de anisotropia normal e o índice de anisotropia planar:

$$\bar{R} = 1,93$$

$$\Delta R = 0,77$$

Os valores encontrados de índices de anisotropia são típicos de aços aplicados a estampagem profunda., garantindo bons limites de embutimento.

O tipo de elemento utilizado na simulação da chapa, como dito anteriormente, admite somente a modelagem de material isotrópico, dessa forma utilizou-se os valores da curva de escoamento obtida na direção paralela à direção de laminação para construção do modelo multilinear (tabela 5). O ponto inicial da curva corresponde a deformação e tensão igual a zero.

PONTO	DEFORMAÇÃO	TENSÃO [MPa]
1	3,96x10 ⁻⁴	82,00
2	2,00x10 ⁻³	127,03
3	1,00x10 ⁻²	181,08
4	2,00x10 ⁻²	212,61
5	4,00x10 ⁻²	248,27
6	7,00x10 ⁻²	281,38
7	12,00x10 ⁻²	317,44
8	18,00x10 ⁻²	347,58
9	27,70x10 ⁻²	382,96

Tabela 5 - Relação de pontos para a montagem da curva tensão x deformação Multilinear.

Carregamento e Condições de Contorno

Foram adotados dois carregamentos diferentes para a simulação do processo:

1 - Deslocamento de 26 mm do punção, para a geração do copo, 1 mm de deslocamento de aproximação e 25 mm de contato efetivo.

2 - Pressão do prensa-chapa de 2,07 MPa, constante durante durante a descida do punção.

Como condições de contorno foram impedidos os deslocamentos nodais do punção e do prensa-chapa na direção do eixo X e da matriz na direção do eixo X e do eixo Y.

Condições de atrito

Foram realizadas simulações com quatro coeficientes diferentes de atrito (0; 0,05; 0,10 e 0,15) a fim de verificar sua influência sobre os esforços, as deformações e a variação da espessura (Schey, 1983).

Apresentação e Análise dos Resultados da Simulação e Experimentais

Na figura 6 apresenta-se o modelo de elementos finitos, após a conformação, com deslocamento de 26 mm.

Como apresentado na figura 2, a partir dos resultados da simulação observou-se que a espessura apresentava as duas reduções ao longo do raio provocadas pela mudança no sentido das tensões, como observado por Guo et al. (1990).

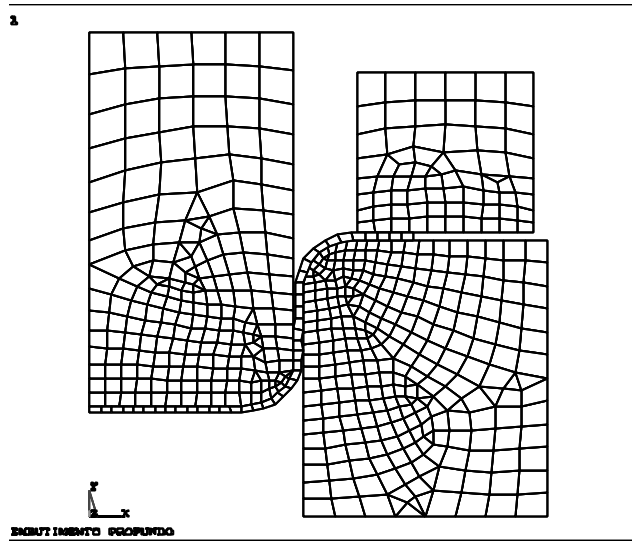
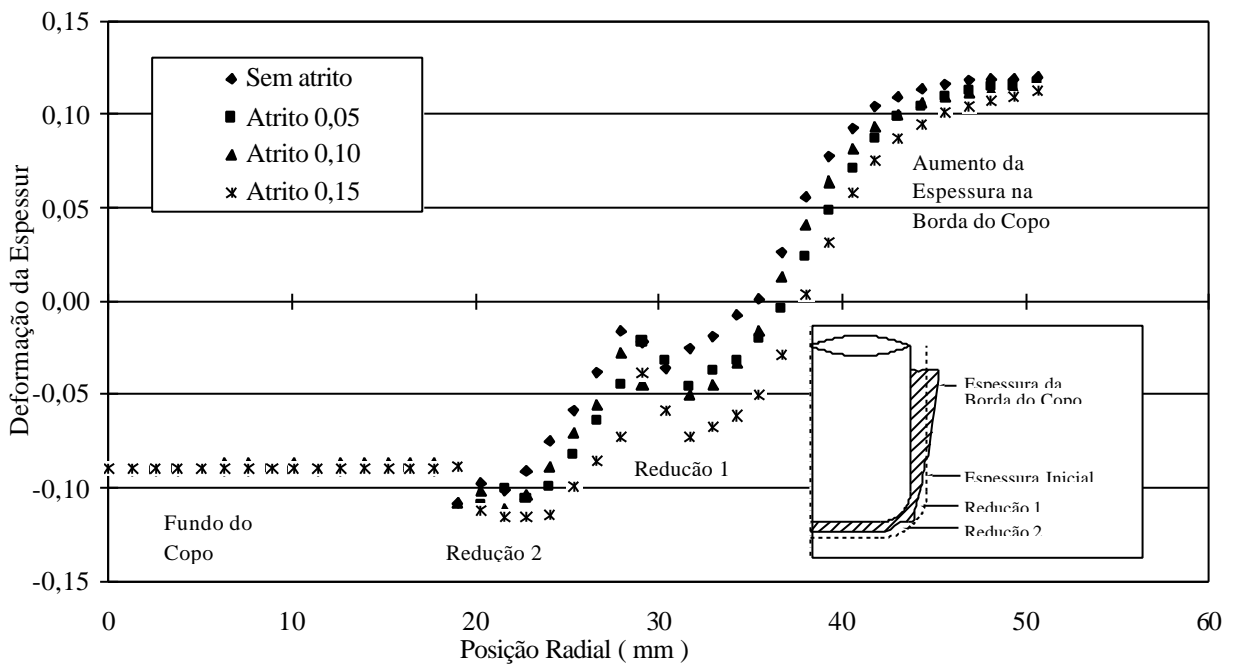


Fig. 6 - Modelo de Elementos Finitos deformado

Como pode ser observado na figura 7, a simulação do processo comprovou o



comportamento da espessura do copo embutido. O fundo do copo apresenta deformação constante, a redução 2 apresenta uma deformação acentuada seguida de um aumento de espessura, a redução 1 onde ocorre a ruptura quando os limites de embutimento são ultrapassados e o aumento contínuo da espessura até a borda do copo. Também se observa que a deformação da espessura cresce com o aumento do coeficiente de atrito.

Fig. 7 - Resultados obtidos na simulação para a deformação na espessura para o “blank” de diâmetro 101,28 mm, em função da posição radial em mm.

A figura 8 apresenta as deformações circunferenciais encontradas para os vários coeficientes de atrito utilizados na simulação.

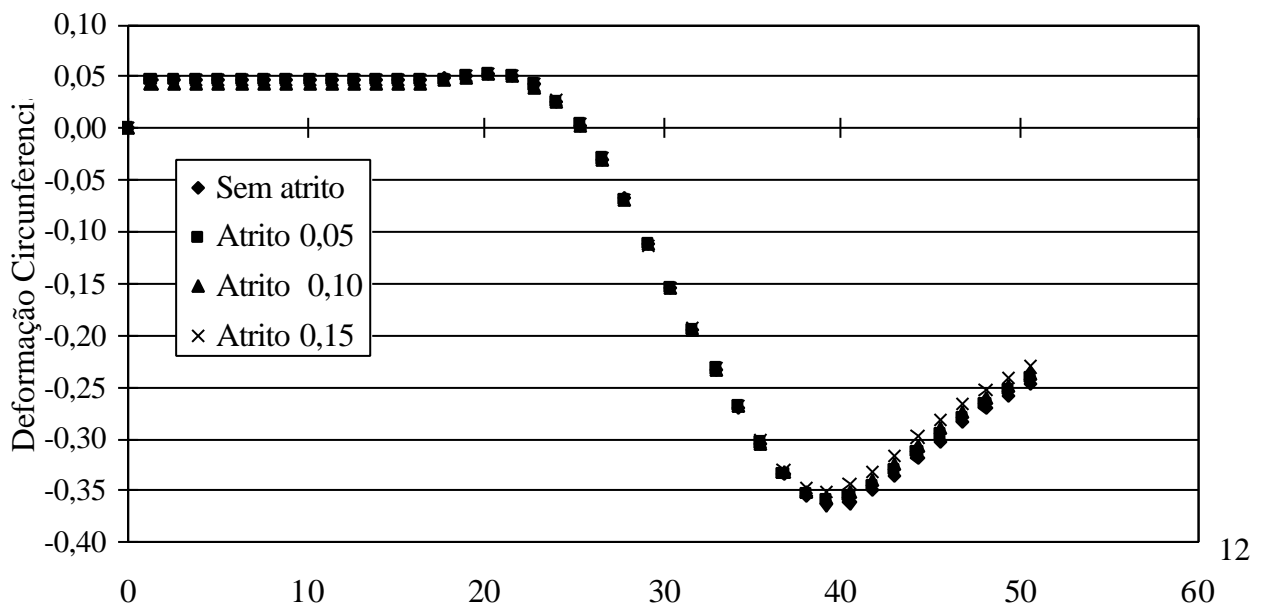
Com o aumento do atrito ocorre uma pequena redução na deformação circunferencial provocada no final da chapa pelo aumento da deformação da espessura.

Procedimento Experimental

Para validação da simulação foram realizados ensaios de embutimento com o material modelado em uma máquina de ensaio ROEL & KORTHAUS KG - Mod. BP 612, com o ferramental mostrado na figura 5 (Bortolussi, 1996). Foram realizados três embutimentos de discos com diâmetro de 101,28 utilizando como lubrificante uma pasta de bissulfeto de molibdênio sobre a superfície destes discos.

A deformação na espessura foi obtida medindo-se oito pontos diferentes ao longo de um “grid” de circunferências concêntricas que variavam em 5 mm no diâmetro de uma para outra em três copos embutidos, tendo-se assim 24 pontos em cada diâmetro de circunferência do “grid”.

Fig. 8 - Resultados obtidos na simulação para a deformação circunferencial para o “blank” de



diâmetro 101,28 mm, em função da posição radial em mm

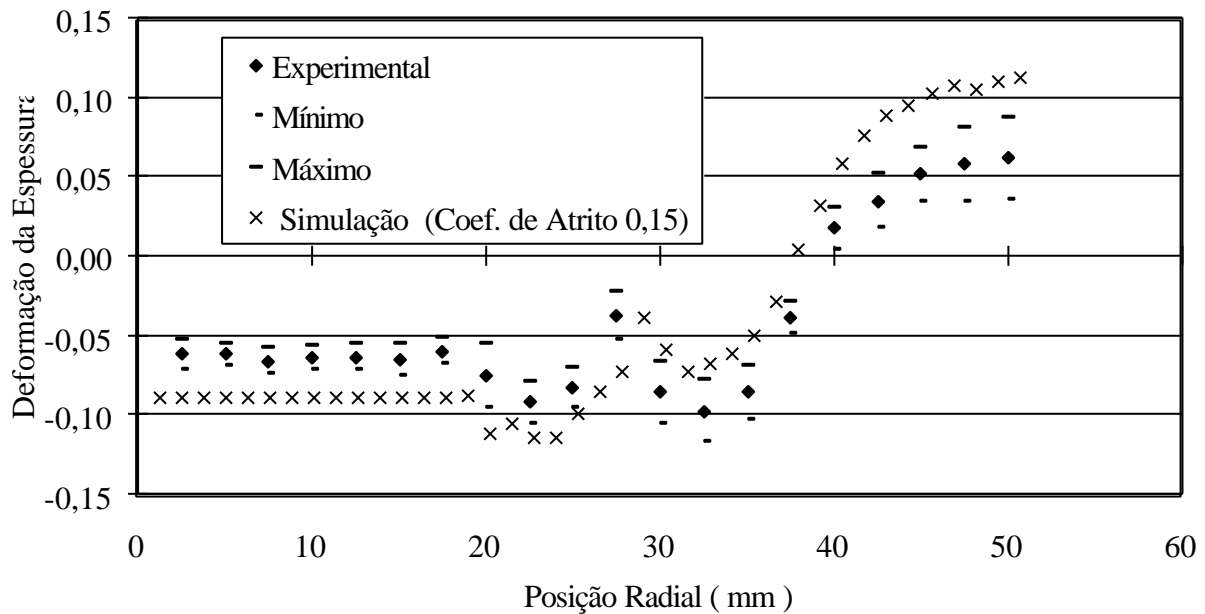


Fig. 9 - Resultados experimentais e de simulação com coeficiente de atrito igual a 0,15 para a deformação da espessura do disco de diâmetro 101,28 mm, em função da posição radial em mm.

A figura 9 apresenta os resultados experimentais para a deformação da espessura juntamente com os resultados do modelo matemático obtidos com coeficiente de atrito igual a 0,15.

Observa-se que para a redução 1, onde ocorre a fratura por excesso de deformação, os valores obtidos no modelo foram menores que nos experimentos e o contrário é observado na redução 2. Já o aumento da espessura na borda do copo para o modelo foi maior que o obtido nos experimentos. Essas diferenças podem ser explicadas pela influência da anisotropia do material, observada nos experimentos pela formação de orelhas. Outro fator é a variação das condições de lubrificação ao longo do processo, variando o coeficiente de atrito nas diferentes regiões da ferramenta, principalmente nos raios, condição que não é considerada no modelo, pois adotou-se um coeficiente de atrito constante.

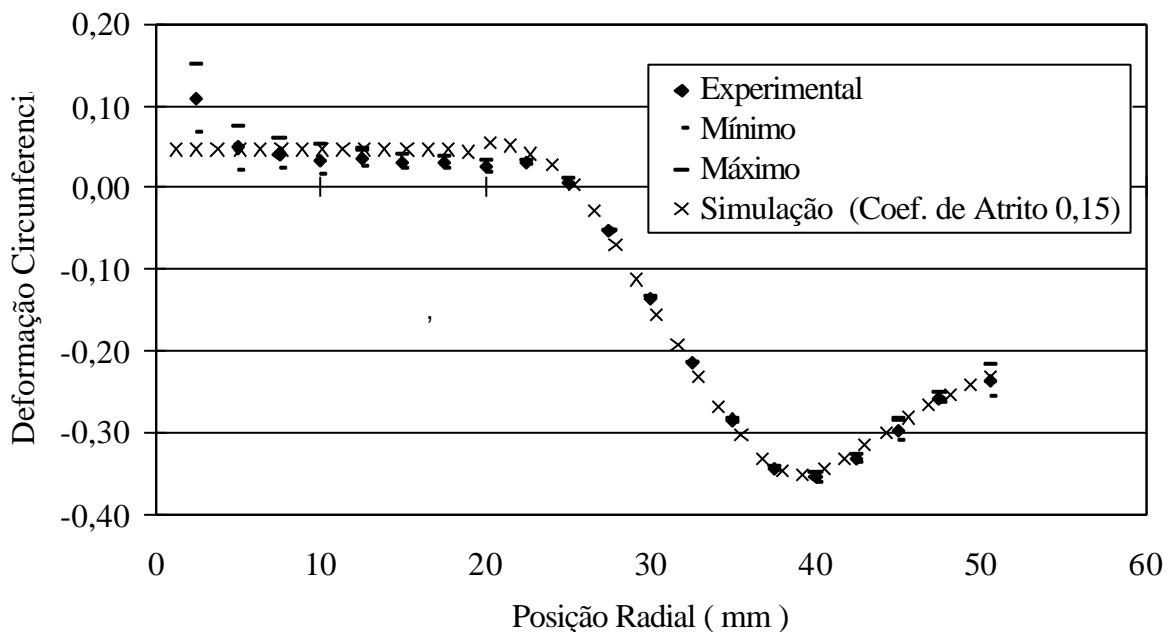
A utilização de um alto valor de rigidez, para a modelagem do contato, em sistema inicialmente com baixa rigidez e a condição de deslocamento imposto em todos os nós do punção, deixando totalmente rígido também contribuíram para as diferenças observadas.

Na figura 10 apresenta-se os resultados experimentais e do modelo matemático para a deformação circunferencial, utilizando-se coeficiente de atrito igual a 0,15.

Observa-se que a deformação circunferencial é pouco influenciada pelas condições de atrito e pela resistência mecânica da chapa.

Essa deformação é importante para a verificação geométrica do copo embutido, pois variações nos diâmetros das circunferências do “grid” na região da parede do copo, independentemente do diâmetro inicial do disco, indicam que estão ocorrendo deformações excessivas na ferramenta ou que o valor da folga entre a matriz e o punção está inadequado.

A utilização de modelo axissimétrico e o emprego de um modelo de material isotrópico eliminou a possibilidade de verificação da formação das orelhas que ocorre durante a estampagem devido a anisotropia planar da chapa metálica, observadas nos ensaios pela alteração da geometria



das circunferências do “grid”, causando um aumento do desvio padrão na região da flange e conseqüentemente, a diferença observada em relação aos resultados da simulação.

Fig. 10 - Resultados experimentais e de simulação com coeficiente de atrito igual a 0,15 para a deformação circunferencial do disco de diâmetro 101,28 mm, em função da posição radial em mm.

A força de embutimento encontrada no modelo de simulação empregando-se um coeficiente de atrito de 0,15 foi de 44753 N, sendo que experimentalmente foi encontrada uma força média igual a 50333 N com um desvio padrão de 1154 N. Utilizou-se uma célula de carga com capacidade nominal de 120000 N. A diferença média de 10% encontrada entre os resultados do modelo e os experimentais pode ser considerado satisfatório considerando as diversas hipóteses simplificadoras assumidas na simulação.

Conclusões

A aplicação do Método dos Elementos Finitos para análise do processo de estampagem apresentou-se viável para a determinação das deformações na chapa embutida pois permitiu verificar-se o comportamento das deformações com o aumento do atrito e determinar os valores atingidos nas reduções 1 e 2 próximas do fundo do copo.

As variações de resultados observadas entre o modelo matemático e os experimentos devem-se principalmente aos seguintes fatores:

- a aplicação de um material isotrópico no modelo, que despreza o aumento da resistência ao estiramento que ocorre devido a anisotropia da chapa;
- as variações que ocorrem durante o processamento no coeficiente de atrito devido a alterações na camada de lubrificante, onde pode apresentar desde a lubrificação hidrodinâmica em algumas

condições, a atrito seco em outras posições da ferramenta, principalmente no raio da matriz. No modelo essas variações não são consideradas;

- o uso de um modelo axissimétrico reduz consideravelmente o tempo de processamento mas dificulta a interpretação dos resultados e limita o tipo de produto embutido que pode ser modelado;
- a dificuldade de definir-se valores adequados para o número de elementos de contato, para a rigidez imposta a esses elementos e finalmente, para o próprio coeficiente de atrito.

BIBLIOGRAFIA

Ansys, 1993, ANSYS User's Manuals, Vols. 1 (Procedures), 2 (Commands), 3 (Elements) and 4 (Theory), Swanson Analysis Systems Inc.

Bathe, K. J., 1982, "Finite Elements Procedure in Engineering Analysis", Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

Borst, R. and Feenstra, P.H., 1990, "Studies in Anisotropic Plasticity With Reference to the Hill Criterion", International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 29, pp. 315-336.

Bortolussi, R., 1.996, "Simulação do Processo de Estampagem Profunda de Corpos Cilíndricos Através do Método dos Elementos Finitos", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, cap. 5, pp. 81-88.

Bresciani, Fo., E., Button, S.T., Gomes, E., Nery, F.A.C., Zavaglia, C.A.C., 1.996, "Conformação Plástica dos Metais", Ed. UNICAMP, p. 127.

Chou, C.H. and Pan, J. , 1990, “Analysis of Sheet Metal Forming Operations by a Stress Resultant Constitutive Law” , International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 29, pp. 315-336.

Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., 1989, ‘Concepts and Applications of Finite Element Analysis’, John Willey & Sons, 3^a Edição.

Darendeliler, H., Altan, T., 1996, “Analysis of axisymmetric cup drawing in relation to friction “, Journal of Materials Processing Technology, Vol 58, pp 293-301.

Dieter, G. E, 1984, “Workability Testing Techniques”, ASM International.

Gontier, C. , 1994, “About The Numerical Simulation of the Sheet Metal Stamping Process”, International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 37, pp. 669-692.

Guo, Y.Q., Batoz, J. L., Detraux, J. M., Duroux, P., 1990, ‘Finite Elements Procedures for Strain Estimations of Sheet Metal Forming Parts’, International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 30, pp. 1385-1401.

Mahdavian, S. M., He, D., 1995, ‘Product Thickness Analysis in Pure Cup Drawing’, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 51, pp. 387-406.

Keck, P., Wilhelm, M., Lange, K., 1990, “Application of the Finite Element Method to the Simulation of Sheet Forming Processes: Comparison of Calculations and Experiments”, International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 30, pp. 1415-1430.

Lee, D., Majlessi, S. A., Vogel, J. H., 1989, 'Process Modeling and Simulation for Sheet Metal', Metals Handbook, Vol. 14, 9th Edition, pp. 911-927, ASM International.

Oñate, E. and Zienkiewicz, O. C., 1983, "A Viscous Shell Formulation for The Analysis of Thin Sheet Metal Forming", International Journal of Mechanical Science, Vol. 25, nº 5, pp. 305-335.

Rowe, G. W., Strugess, C. E. N., Hartley, P., Pillinger, I., 1991, 'Finite Element Plasticity and Metal Forming Analysis', Cambridge University Press, 1ª Edição.

Schey, J. A., 1983, "Tribology in Metalworking", ASM International.

Slater, R. A. C. , 1977, "Engineering Plasticity", The Macmillian Press.