



ESTUDO DE CASOS DE ESTAMPAGEM DE CHAPAS METÁLICAS ATRAVÉS DE MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E DIAGRAMAS DE LIMITE DE CONFORMAÇÃO

Sérgio Henrique Evangelista

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, 13560-250, São Carlos, SP, Brasil.
e-mail: toddy@sc.usp.br

João Lirani

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, 13560-250, São Carlos, SP, Brasil.
e-mail: lirani@sc.usp.br

Resumo

Os processos de estampagem em chapas metálicas destacam-se entre os processos de fabricação mecânica atuais por possibilitarem a obtenção de peças com formatos diversos e boas propriedades mecânicas. Este aspecto deve-se à disponibilidade de recursos tais como análise numérica por elementos finitos, entre outros, os quais contribuem para uma boa predição do comportamento mecânico. Somam-se a isto análises baseadas nos limites de conformabilidade, tais como a comparação em relação aos diagramas de limite de conformação para uma verificação prévia ainda na etapa de projeto. Neste trabalho apresentam-se estudos por elementos finitos de dois casos de estampagens realizadas em um único estágio. Os casos são verificados através de um diagrama de limite de conformação conforme o critério de estrição na chapa para o material escolhido, com discussão posterior de alguns aspectos relacionados.

Palavras-chave : Diagramas de limite de conformação; Elementos Finitos; Conformação de chapas metálicas; Estrição.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de estampagem em chapas metálicas são aplicados amplamente nas indústrias aeronáutica e automobilística, entre outras. Com o termo estampagem de chapas sendo tratado aqui de forma geral, apresenta-se neste trabalho uma metodologia de análise destes processos para as etapas prévias à fabricação do ferramental. Tal método faz uso de conceitos como elementos finitos e diagramas de limite de conformação e pode-se utilizá-lo em outros tipos de processos de conformação de chapas. A premissa básica é de que a construção e *try-outs* dos ferramentais implicam em tempos e custos de fabricação elevados, desvantagens relevantes nos mercados competitivos atuais. Assim, o objetivo desta metodologia é de fornecer informações úteis, através de avaliação e/ou otimização de aspectos do processo de conformação ainda na fase de projeto que poderão contribuir para a redução dos custos finais de execução. Uma aplicação é feita para dois casos de estampagem : copo redondo e copo quadrado.

2. METODOLOGIA PROPOSTA

Estabeleceu-se uma metodologia de trabalho, adaptada a partir de Bathe (1996), com procedimentos para as etapas de projeto e/ou reforma da matriz de estampagem. Embora a aplicação foi feita para estampagem de chapas, pode-se utilizar esta metodologia para outros processos de conformação de chapas, como por exemplo o estiramento. Sua descrição é dada a seguir, com esquematização na Fig.(1). Na etapa inicial de projeto de ferramental é necessário abstrair o problema de conformação como um todo, com a definição de seus interesses e de sua estratégia de solução. São requisitos aqui a reunião das informações da geometria, as quais serão úteis na etapa de modelamento *CAD* (*Computer Aided Design*). Soma-se a isto a reunião de dados sobre as propriedades dos materiais dos componentes e dados sobre as forças, velocidades e atrito relacionados aos aspectos físicos do problema. Nas etapas de aplicação de elementos finitos trabalham-se as variáveis do problema, modeladas segundo leis já definidas e associadas à malha discretizada da geometria. A ponderação destes aspectos contribuirá para a finalização do modelamento matemático geral, cujo refinamento dependerá das exigências de tempos de execução e custos de processamento das análises. Avalia-se também a acuracidade da solução, convenientemente estabelecida e obtida a partir de refinamentos nas etapas anteriores.

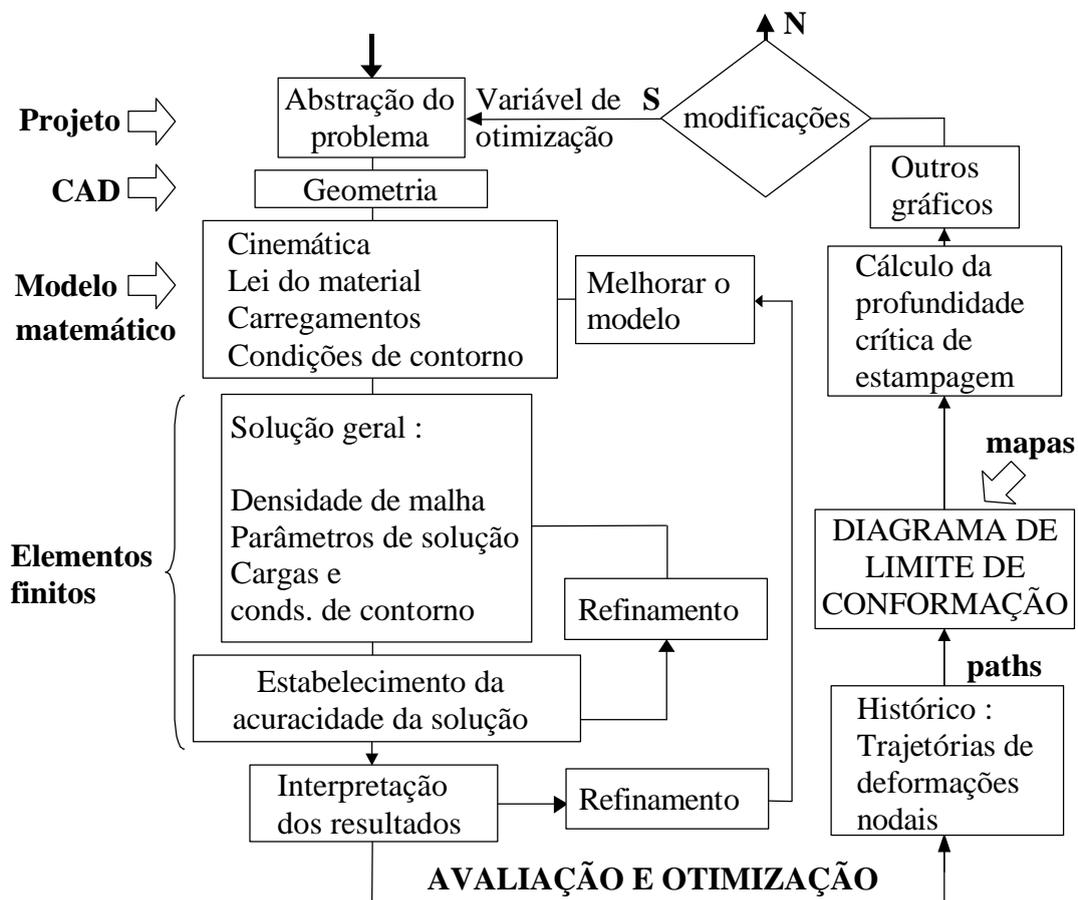


Figura 1. Metodologia proposta .

Segue-se a etapa de avaliação e otimização do ferramental e do processo em si, a qual é realizada com o uso dos diagramas de limite de conformação. Estes podem ser obtidos experimentalmente através de ensaios padronizados como o ensaio plano biaxial (Fernandez & Al-Qureshi, 1999), dentre outros. Na literatura encontram-se estudos sobre a sua determinação segundo modelos matemáticos, dos quais destaca-se o modelo *MK* (Marciniak & Duncan, 1992). Em Evangelista (2000-b) estudou-se este modelo segundo a estricção (*necking*), sendo obtida uma curva limite a ser utilizada neste trabalho. Assim, com as análises por elementos finitos executadas,

dispõe-se do histórico das tensões e deformações do nós ao longo do processo. Para um determinado nó tem-se seu histórico particular de deformações, que representado sobre o diagrama de limite de conformação escolhido, definirá uma trajetória de pontos (e_1, e_2). As trajetórias para diversos nós analisados determinarão o limite do processo quando ao critério das curvas. Este limite relaciona-se por exemplo com a profundidade crítica de estampagem. Assim, pode-se retroagir com as etapas anteriores descritas pelas diversas variáveis do processo, com a possibilidade de modificações no projeto de ferramental. Com a obtenção de novo histórico de tensões e deformações, reavaliam-se as trajetórias nodais até que o comportamento do processo analisado esteja conforme as expectativas previstas.

3. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE PROBLEMAS DE ESTAMPAGEM

A análise foi realizada para dois casos : caso 1 para punção redondo e caso 2 para punção quadrado. Conforme a metodologia apresentada na Fig.(1), seguiram-se as etapas iniciais de estabelecimento da geometria e modelamento matemático com máxima similaridade entre os casos. Para o caso 1 tem-se diâmetro do punção de 50 mm e raio na base de 4 mm. Para o caso 2 tem-se largura do punção de 50 mm com raios de canto e de base de 4 mm. Para ambos os casos o raio na entrada da matriz foi de 10 mm. A dimensão externa da chapa respeitou a regra $LDR=2$ (*limiting drawing ratio*), (Taylor, 1988). Os materiais do punção, da matriz e do prensa-chapas foram definidos como perfeitamente rígidos. Para a chapa, trabalhou-se com as propriedades do aço ABNT 1008/1010, com formulação de material isotrópico, segundo a Eq. (1) :

$$\bar{s} = K \cdot \dot{\bar{\epsilon}}^m \cdot \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

| | |
|------------------------------------|--|
| $K = 660E6 \text{ N} / \text{m}^2$ | Constante para a resistência do material |
| $\dot{\bar{\epsilon}} = 30.0$ | Taxa média de deformação (Makinouchi, 1996). |
| $m = 0.012$ | Expoente de sensibilidade à taxa de deformação |
| $n = 0.19$ | Expoente de encruamento |

Para a criação da malha, a utilização de apenas $\frac{1}{4}$ do modelo contribuiu para poupar-se esforço computacional, uma vez consideradas as condições de contorno para a simetria do problema. Para a chapa utilizou-se elementos casca (736 elementos para o caso 1 e 531 elementos para o caso 2). As configurações de malha são mostradas na Fig. (2) .

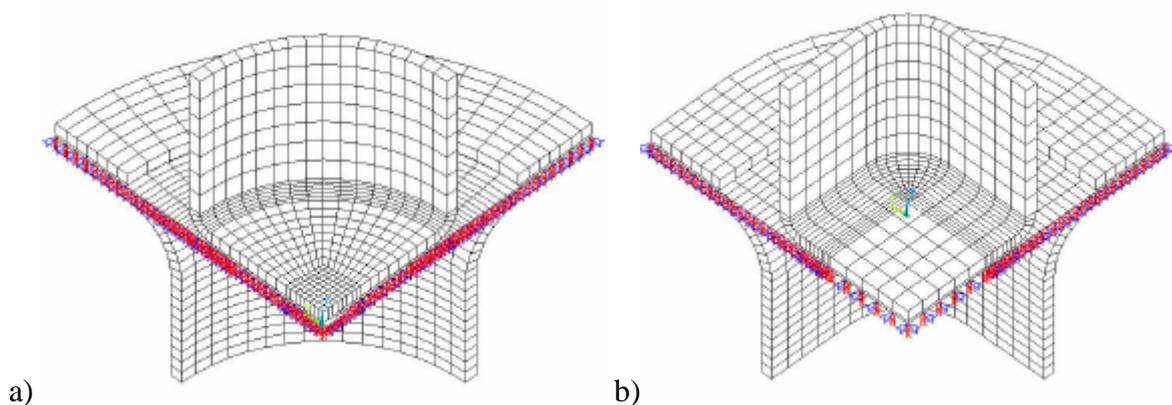


Figura 2. a) Malha do caso 1: copo redondo - 1664 elementos; b) Malha do caso 2: copo quadrado - 1512 elementos.

Nas interfaces punção/chapa, prensa-chapas/chapa e chapa/matriz, foi assumido um valor constante de atrito de Coulomb , sendo o atrito estático $\mu_e=0,1$ e atrito dinâmico $\mu_d=0,04$. Como

condição inicial foi aplicada uma velocidade inicial ao punção conforme feito por Mamalis et al. (1996), com a velocidade do punção constante com valor de 1.7 m/s. No intuito de poupar-se esforço computacional, é comum neste tipo de análise utilizarem-se de velocidades até cem vezes maiores que a velocidade real (Makinouchi, 1996). A força no prensa-chapas foi considerada constante ao longo do processo, calculada conforme (Marciniak & Duncan, 1992). Os dados numéricos dos casos analisados foram armazenados para a verificação junto aos diagramas de limite de conformação. Para cada caso foram salvos 99 passos (*substeps*) de solução, de modo a permitir o monitoramento do histórico do processo como um todo. No último passo analisado foi obtida uma profundidade máxima de copo de 21,30 mm para ambos os casos.

4. AVALIAÇÃO DOS CASOS DE ESTAMPAGEM CONFORME A METODOLOGIA APRESENTADA

Utilizar-se-á nestas avaliações uma mesma curva de limite de conformação para ambos os casos, determinada em Evangelista (2000-b), para a análise dos casos de estampagem.

4.1. Caso 1

Para a análise, foram escolhidos alguns nós da malha aplicada à chapa, conforme a numeração na Fig. (3). Nesta figura determinou-se uma linha com direção radial denominada “RAIO”, junto à qual estão os nós escolhidos, com exceção do nó 434. Para todos os nós desta linha foram obtidos os conjuntos de valores (ϵ_1 , ϵ_2) no último passo da solução. Na Fig. (4) tem-se o diagrama de limite de conformação determinado e comparado a estes valores, especificados como “pontos finais” na legenda. Para os nós escolhidos na Fig. (3) foram desenhados no mesmo diagrama da Fig. (4) os conjuntos de valores (ϵ_1 , ϵ_2) para estes nós e em todos os passos de solução. As linhas obtidas, definidas como *trajetórias* de deformações (*paths*), representam o andamento do processo no plano das deformações principais 1 e 2. Para o início de estricção, limitam-se os *paths* na região de segurança abaixo da curva limite. Assim, observou-se que o nó 637 apresentou valores mais críticos do ponto (ϵ_1 , ϵ_2) e após uma verificação nos valores da trajetória de deformações deste nó em todos os passos, obteve-se que o *substep* crítico foi o de número 76. Com este dado, limitaram-se os *paths* dos demais nós escolhidos nesse passo e foram obtidos novos valores (ϵ_1 , ϵ_2) para a linha de nós “RAIO” especificada na Fig. (3). Os novos resultados são esquematizados no mapa da Fig. (5):

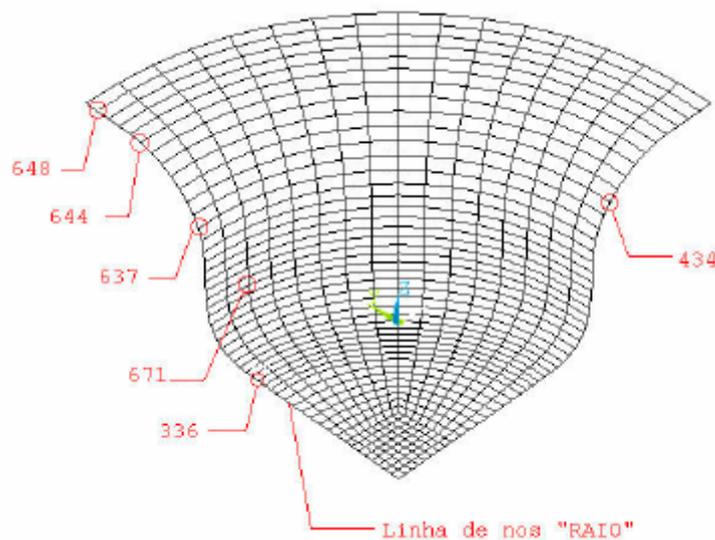


Figura 3. Numeração de nós para análise do caso 1.

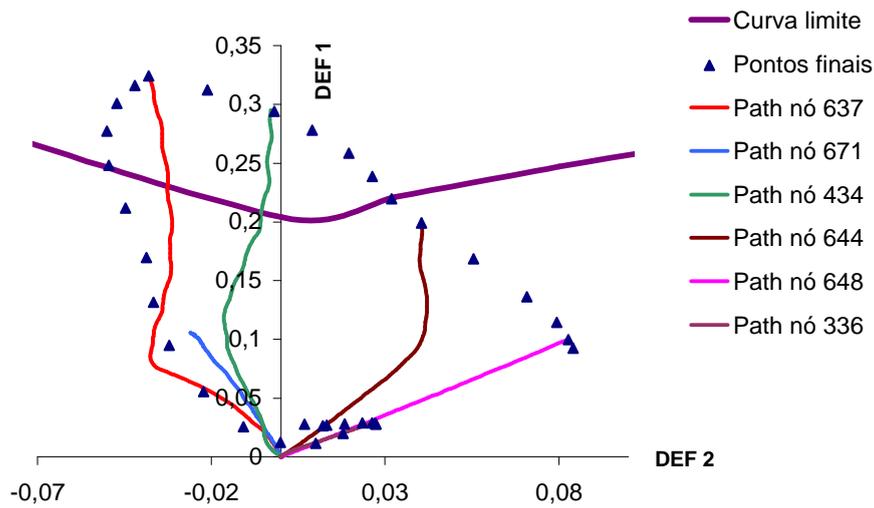


Figura 4. Mapa de deformações para o caso 1, passo 99, profundidade = 21,30 mm

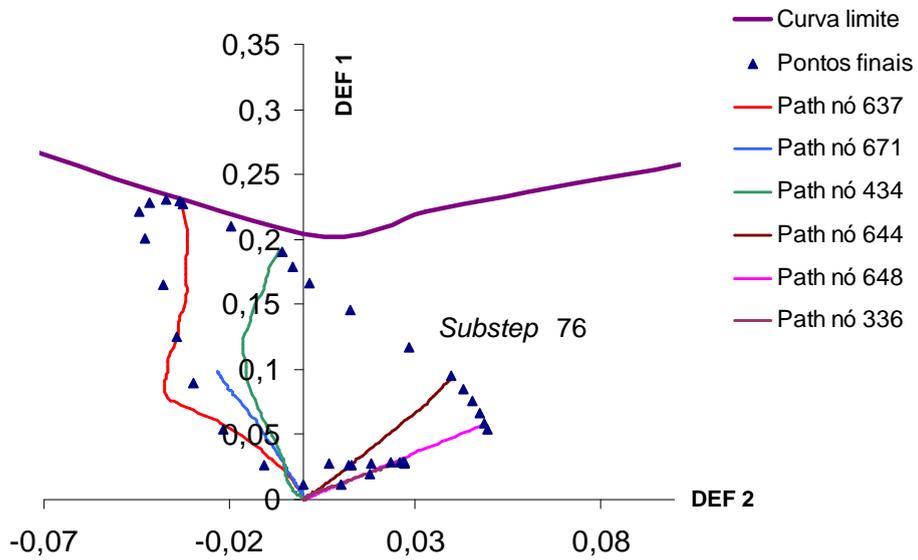


Figura 5. Mapa de deformações para o caso 1, passo 76, profundidade = 16,30 mm

Na Fig. (6) têm-se as representações para as deformações no passo 76 :

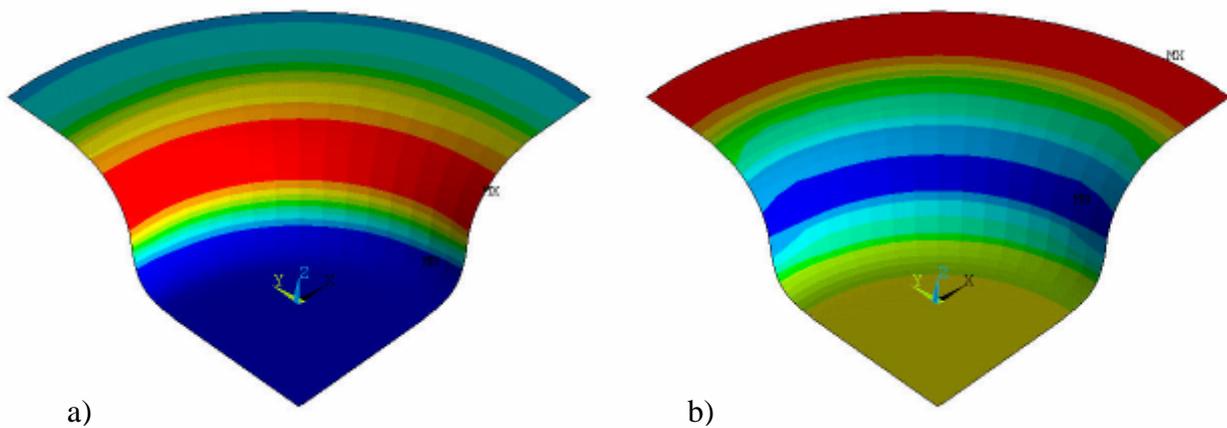


Figura 6. a) Deformações totais na direção principal 1 ; b) Idem para direção principal 2 .

4.2. Caso 2

Para a análise deste caso, escolheram-se os nós de análise da malha conforme a Fig. (7). Neste caso há duas linhas de nós a serem consideradas : uma linha definida como “LADO”, composta de nós direcionados ao lado reto da chapa e a outra definida como “RAIO”, direcionada do centro até a borda arredondada da chapa. Em cada uma foram determinados alguns nós para a análise detalhada, sendo que os demais nós pertencentes a uma linha foram representados pelos seus pontos finais (ϵ_1 , ϵ_2) nos mapas de deformações, em analogia ao caso 1.

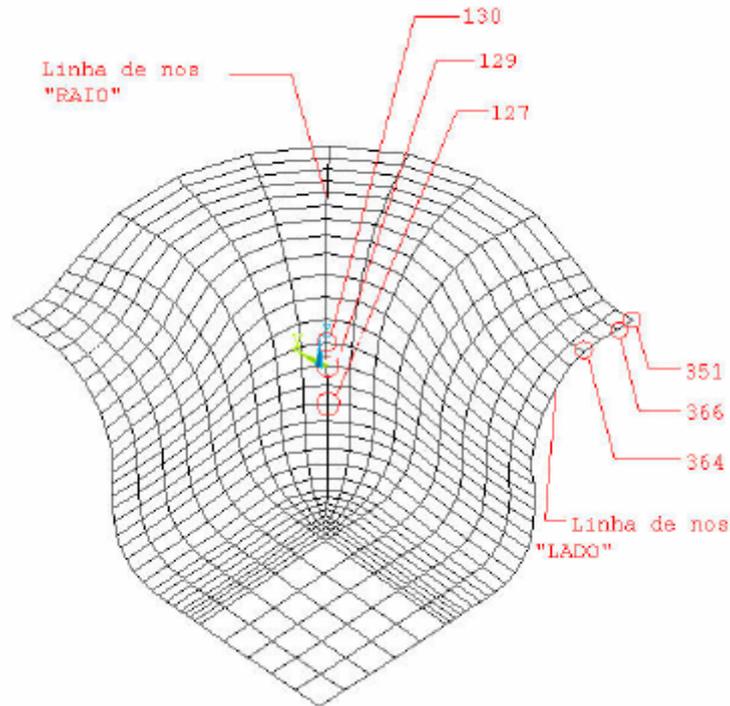


Figura 7. Numeração de nós para análise do caso 2 .

Na Fig. (8) tem-se o mapa de deformações do histórico do caso 2, analogamente ao caso 1. Assim, observou-se que o nó 129 apresentou valores mais críticos do par (ϵ_1 , ϵ_2) e após uma verificação nos valores de seu *path* de deformações, obteve-se que o *substep* crítico foi o 58.

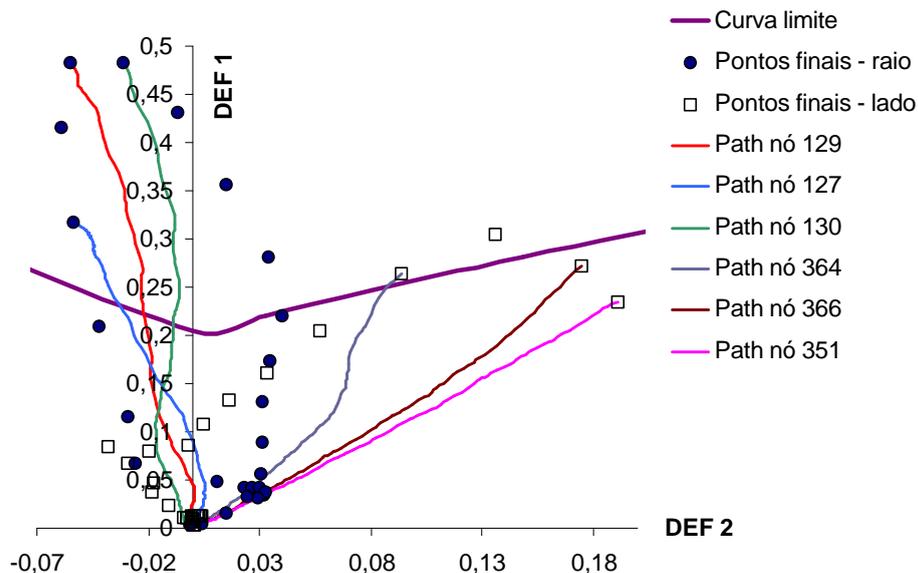


Figura 8. Mapa de deformações para o caso 2, passo 99, profundidade = 21,30 mm.

Com este dado, limitaram-se os *paths* dos demais nós escolhidos e foram obtidos novos valores (ϵ_1 , ϵ_2) para a linha de nós “RAIO” e para linha de nós “LADO” especificada na Fig. (8). Os novos resultados são esquematizados no mapa da Fig. (9). Desta forma, obtém-se que o passo 58 da solução atinge o critério e têm-se as novas representações para as deformações na Fig. (9).

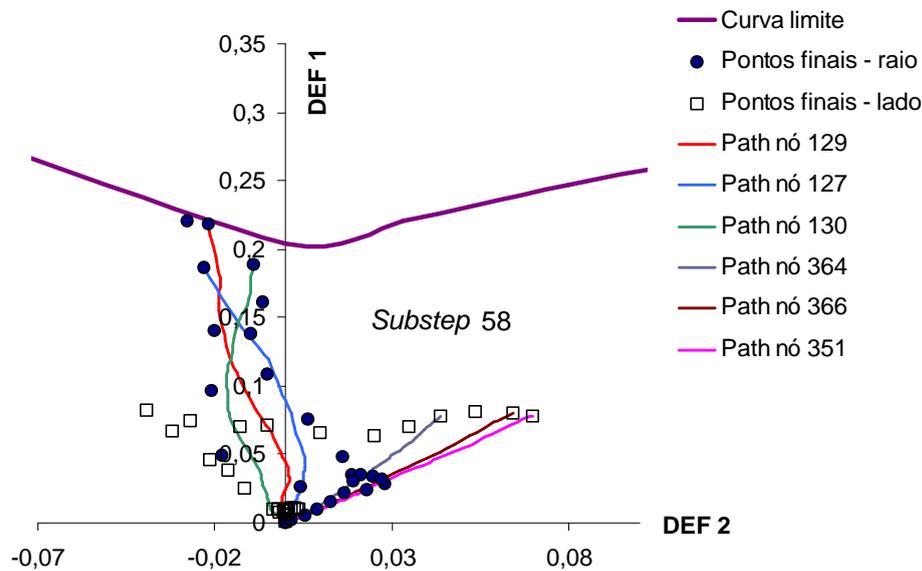


Figura 9. Mapa de deformações para o caso 2, passo 58, profundidade = 12,50 mm.

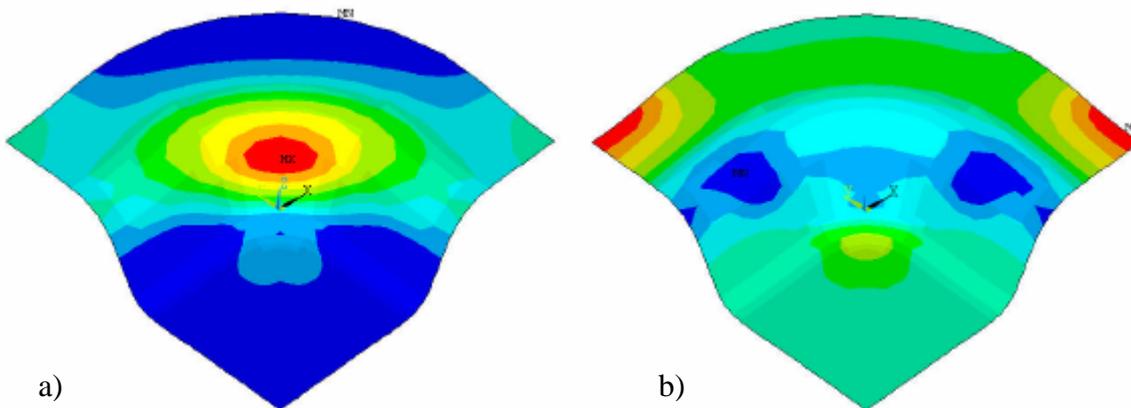


Figura 10. a) Deformações totais na direção principal 1 ; b) Idem para direção principal 2 .

4.3. Comparações entre os casos 1 e 2

Um aspecto importante é a variação das deformações de espessura ao longo da chapa estampada. Com a utilização das mesmas linhas de nós apresentadas anteriormente, têm-se nas Figs. (11) e (12), para os dois casos, o comportamento da deformação de espessura, no último passo e no início da estricção. Nesta figura foram definidas 3 regiões : região I, abrangida pelo contato do punção no centro da chapa; região II, definida pela porção de transição entre os raios do punção e da matriz; região III, região do prensa-chapas. Tem-se que em ambos os casos, na situação anterior à estricção, o maior afinamento ocorre na região II e no trecho próximo ao prensa-chapas. Pode-se considerar que a localização da região de maior afinamento relaciona-se, dentre outros aspectos, com o carregamento dado ao prensa-chapas.

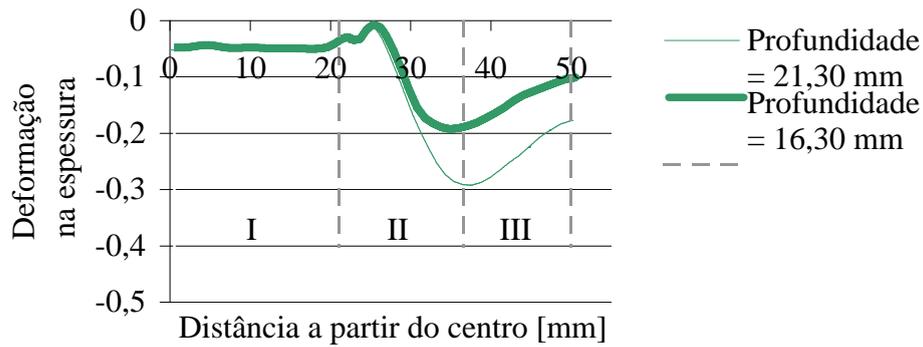


Figura 11. Caso 1 - Deformação de espessura segundo a direção radial.

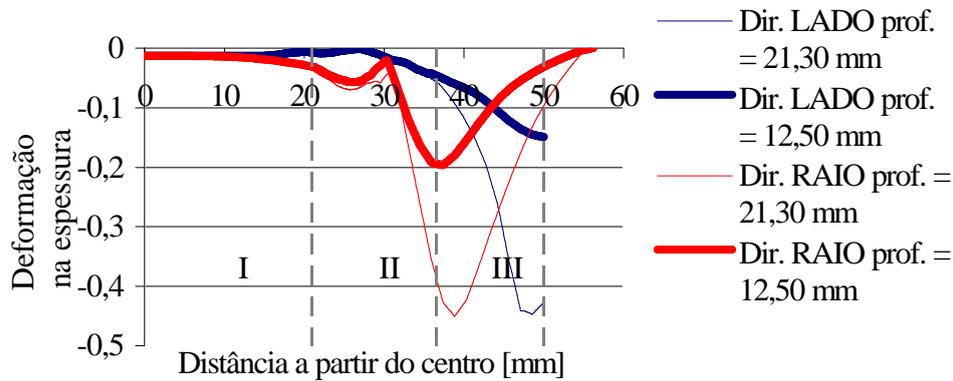


Figura 12. Caso 2 - Deformação de espessura segundo linhas em direção ao lado reto (LADO) e ao canto arredondado (RAIO).

Pelas informações das Figs. (5) e (9), têm-se que as profundidades para o início da estrição na chapa são 16,30 mm para o caso 1 e 12,50 mm para o caso 2. No caso 1, com a redução da profundidade de estampagem em 5,00 mm (de 21,30 para 16,30 mm ou -23,47 %) possibilitou-se uma redução de 33,3% no módulo das deformações máximas de espessura.. No caso 2, a redução na profundidade de estampagem foi de 8,80 mm (de 21,30 para 12,50 mm ou -41,31 %) com redução de 55,5% no módulo das deformações máximas de espessura para a linha de nós direcionada para o canto arredondado. Para a linha cujo final é a borda da peça com lado reto, a redução no módulo das deformações máximas de espessura foi de 66,7%. Isto é coerente com o fato de, no caso 2, ter-se uma geometria mais complexa, o que implicou em maior concentração de deformações em um trecho da chapa devido à maior dificuldade de fluxo plástico do material. Tal comparação foi facilitada pelo uso de condições gerais de geometria, carregamentos e condições de contorno muito similares entre os dois casos.

Na profundidade de copo na estrição, os dois casos obtiveram uma variação máxima prevista na espessura da chapa de 0,20 mm (mínimo de 0,8 mm a 1,00 mm, com espessura inicial de 1,00 mm). Isto deveu-se ao fato que, para os nós críticos, seus históricos de deformações interceptaram a mesma curva limite em regiões idênticas. Apesar disto, a espessura da chapa contra a posição radial apresenta comportamentos diferentes em ambos os casos, dada a geometria diferente, conforme a Fig. (13).

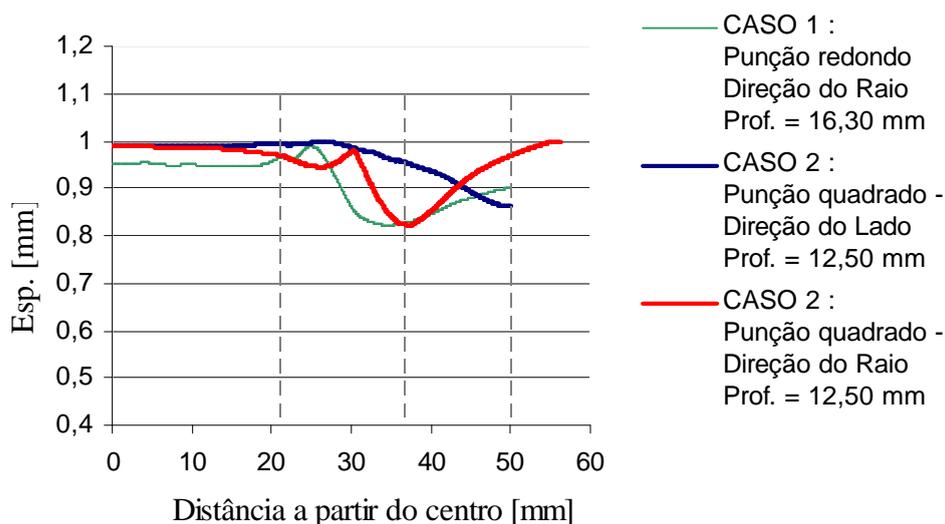


Figura 13. Comparação da variação da espessura da chapa, casos 1 e 2.

5. CONCLUSÕES

Apresentou-se uma metodologia para o projeto e reforma de estampos, para uso junto a um software comercial de elementos finitos, exemplificada através da determinação da profundidade máxima de processo pelo critério da estricção na chapa. Isto é aplicável também ao estudo de outras variáveis do projeto ou processo, entre elas as *variáveis geométricas* (raios do punção, raios da matriz, dimensões exteriores do *blank*, dimensões lineares, espessura da chapa, etc.), as *variáveis de processo* (velocidade do punção, atrito e controle do prensa-chapas, *drawbeads*, etc.) e *outras variáveis* (parâmetros de anisotropia, espessura da chapa, expoente de encruamento e de sensibilidade à taxa de deformação, etc.). Com isto, seguem-se procedimentos análogos aos descritos neste trabalho para a otimização de uma variável relevante, mantendo-se constantes os demais fatores influentes.

Tem-se que esta metodologia pode ser aplicada à análise de outros processos de conformação de chapas. Por ser um recurso de predição do comportamento dos processos de conformação de chapas, apresenta-se como uma solução para redução de tempos gastos em *try-outs* de ferramental, o que implica em redução de custos de projeto, testes e de reforma dos ferramentais.

6. REFERÊNCIAS

- Arrieux, R., Brunet, M., Vacher, P., Nhat, T.N., 1996, "A method to predict the onset of necking in numerical simulation of deep drawing operations", *Ann. CIRP*, V. 45, pp. 255-258.
- Bathe, K. J., 1996, "Finite element procedures", New Jersey, Prentice Hall, pp.485-641.
- Evangelista, S.H., 2000-a, "Uma Revisão de Conceitos sobre Diagramas de Limite de Conformação", Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, UFRN, Natal, Brasil.
- Evangelista, S.H., 2000-b, "Diagramas de Limite de Conformação aplicados à Análise por Elementos Finitos de um Processo de Estampagem em Chapas Metálicas", Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo., São Carlos, Brasil, 135p, <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-17092001-133126/>.
- Fernandez, F.F., Al-Qureshi, H.A., 1999, "Desenvolvimento de novo teste para ensaio de estiramento in-plane de chapas metálicas", *Anais da II Conferência Nacional de Chapas*, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, pp. 97-106.
- Hill, R., 1950, "The mathematical theory of plasticity", London, Oxford University Press.
- Huebner, K.H., Thornton, E.A., 1982, "The Finite Element Method for Engineers", 2. ed. John Wiley & Sons.

- Kobayashi, S., Oh, S.I., Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite-Element Method", Oxford University Press.
- Lange, K., 1997, "Modern metal forming technology for industrial production", Journal of Materials Processing Technology, V. 71, pp. 2-13.
- Makinouchi, A., 1996, "Sheet metal forming simulation in industry", Journal of Materials Processing Technology, V.60, pp.19-26.
- Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Baldoukas, A.K., 1996, "Simulation of sheet metal forming using explicit finite element techniques: effect of material and forming characteristics Part 1. Deep-drawing of cylindrical cups", Journal of Materials Processing Technology, V. 58, pp.48-60.
- Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Baldoukas, A.K., 1996, "Simulation of sheet metal forming using explicit finite element techniques: effect of material and forming characteristics Part 2. Deep-drawing of square cups", Journal of Materials Processing Technology, V. 58, pp.110-116.
- Marciniak, Z., Duncan, J.L., 1992, "The Mechanics of Sheet Metal Forming", Edward Arnold.
- Moreno, M.E., Carvalho, J., Lirani, J., 1999, "Desenvolvimento de uma Metodologia de Otimização do Perfil do *Blank* em Processos de Conformação de Chapas Metálicas", Anais da II Conferência Nacional De Chapas, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, pp. 7-16.
- Moreno, M.E., 2000, "Desenvolvimento e implementação de metodologia de otimização da geometria do *blank* em processos de conformação de chapas metálicas", Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo., São Carlos, Brasil, 88p.
- Stoughton, T.B., 2000, "A general forming limit criterion for sheet metal forming", International Journal of Mechanical Sciences, V. 42, pp.1-27.
- Taylor, B.,1988, "Formability testing of sheet metals", American Society For Metals, Metals handbook : forming and forging. 9.ed., Metals Park, Ohio, V.14, pp. 877-899.

STUDY OF DEEP DRAWING CASES OF SHEET METAL FORMING BY USING THE FINITE ELEMENTS METHOD AND FORMING LIMIT DIAGRAMS

Sérgio Henrique Evangelista

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, 13560-250, São Carlos, SP, Brasil.
e-mail: todody@sc.usp.br

João Lirani

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, 13560-250, São Carlos, SP, Brasil.
e-mail: lirani@sc.usp.br

Abstract

Deep drawing processes applied to metal sheets have been emphasized between the mechanical manufacturing processes due to their capability of forming of complicated shapes associated to high quality mechanical properties. By this way, available numerical tools such as the finite element method can predict reasonably the behaviour of these processes. This possibility is quite useful, and gets better application when applied along with forming limits diagrams during the design stage. Thus, two cases of finite elements analysis of deep drawing processes are presented : round and square cups. The forming limit diagrams are obtained and an analysis of the strain paths is made. A discussion of relevant variables of the processes is also presented.

Keywords : Forming Limit Diagrams ; Finite Element; Sheet Metal Forming, Necking .