

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

Augusta Cerceau Isaac Neta

Divisão de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica,
Pç. Marechal Eduardo Gomes, 50 – 12228-900 - São José dos Campos – SP – Brasil
augusta@mec.ita.br

Lindolfo Araújo Moreira Filho

Divisão de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica,
Pç. Marechal Eduardo Gomes, 50– 12228-900 - São José dos Campos – SP – Brasil
lindolfo@mec.cta.ita.br

Jánes Landre Júnior

Mestrado em Engenharia Mecânica e Departamento de Engenharia Mecatrônica, PUC Minas,
Av. D. José Gaspar, 500 – 30535-610 - Belo Horizonte – MG – Brasil
janer@pucminas.br

Resumo. *Com o advento dos métodos numéricos destinados à avaliação dos processos de conformação, especificamente os baseados no método dos elementos finitos para grandes deformações, tem sido possível a análise com relativo sucesso do comportamento do material durante a conformação. Entretanto, alguns pontos impossibilitam a total substituição dos ensaios experimentais pela modelagem. Com a necessidade de maiores estudos teóricos nesta área, optou-se por realizar uma avaliação de um software comercial. Neste trabalho são apresentados os resultados numéricos e comparados aos experimentais do forjamento a frio, por meio do ensaio de compressão simples de corpos de prova anelares.*

Palavras-chave: *conformação mecânica, elementos finitos.*

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos que possam oferecer baixo custo com elevada qualidade tem exigido da indústria uma produção cada vez mais criteriosa. Diante desta realidade, os processos de conformação, principalmente os realizados a frio como o forjamento, têm se caracterizado como um processo que concilia as exigências listadas acima e ainda proporciona baixíssima perda de material, aliada a uma boa qualidade do produto, traduzidas pelo aumento da resistência do material devido ao encruamento proveniente da deformação plástica (Altan, 1997; Dieter, 1984).

Uma das formas que a indústria mecânica vem encontrando para reduzir o tempo de desenvolvimento, reduzir o preço final e ainda manter ou mesmo aumentar a qualidade final de seus produtos foi a introdução da modelagem numérica como ferramenta da fase de projeto, já que torna possível os testes do futuro equipamento ainda na fase de concepção, além de proporcionar significativa redução do tempo total de *try-out* e, conseqüentemente, diminuição do chamado *time-to-market*.

O advento dos modelos numéricos destinados a avaliação dos processos de conformação, mais especificamente os baseados no método dos elementos finitos, possibilitou a análise com relativo sucesso do forjamento ou outro processo que tenha como característica principal a deformação plástica. Entretanto, as técnicas numéricas existentes ainda possuem algumas limitações que impossibilitam a total substituição dos ensaios experimentais pela modelagem.

O objetivo deste trabalho foi avaliar qualitativamente um programa de elementos finitos comercial - destinado ao estudo de processos de conformação volumétricos - na modelagem do ensaio de compressão de corpos de prova anelares.

2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA GRANDES DEFORMAÇÕES

Nos últimos vinte anos, o método dos elementos finitos tem sido amplamente empregado nas simulações de processos de conformação. Dentre as formulações usadas, vale destacar a Lagrangiana e a Euleriana.

No método Lagrangiano, a malha de elementos finitos é fixa ao material e se movem juntamente no espaço; enquanto que o método Euleriano consiste no escoamento de um material através de uma malha fixa no espaço.

Segundo Williams et al. (2002), os métodos Lagrangianos são mais apropriados para a solução de problemas não-lineares, onde prevalecem pequenas deformações, as condições de contorno são constantes ao longo do processo, e a distorção da malha não é um fator crítico. Condições, essas, intrínsecas aos processos de conformação.

Quanto aos métodos Eulerianos, por considerarem a malha fixa no espaço, não são muito adequados para situações onde as superfícies ou interfaces se movem substancialmente. Entretanto, esse inconveniente pode ser amenizado com o uso de formulações atualizadas, onde o estado de tensão e deformação do material é redefinido no início de cada incremento de tempo.

Porém, devido as grandes deformações impostas por esses processos, a malha pode ainda assim exibir distorções severas e, conseqüentemente, a solução não convergir. Para superar essa dificuldade, algumas técnicas de remalhamento automático têm sido desenvolvidas para análise de processos de conformação. Em geral, essas técnicas ainda não são suficientemente capazes de contornar problemas concernentes à distorção da malha (Gadala et al., 1983).

2.1 Formulação Euleriana

Os conceitos básicos do método dos elementos finitos, baseado em uma descrição euleriana, envolvem princípios variacionais e discretização do sistema em estudo (Kobayashi et al., 1989).

A formulação variacional exige que um campo de velocidades admissíveis satisfaça as condições de compatibilidade e incompressibilidade, bem como as condições de contorno; e a solução confira ao funcional um valor estacionário. O funcional é definido por:

$$\pi = \int_V \overline{\sigma} \dot{\varepsilon} dV - \int_{S_F} F_i u_i dS, \text{ para materiais rígido-plásticos} \quad (1)$$

$$\pi = \int_V E \left(\dot{\varepsilon}_{ij} \right) dV - \int_{S_F} F_i u_i dS, \text{ para materiais rígido-viscoplásticos} \quad (2)$$

onde $\bar{\sigma}$ é a tensão efetiva, $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação efetiva, F_i representa as tensões superficiais, e $E(\dot{\varepsilon}_{ij})$ é função do trabalho.

Para satisfazer a condição estacionária, a equação acima fica:

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\varepsilon} dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (3)$$

onde $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\dot{\varepsilon})$ e $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\dot{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}_v)$ para materiais rígido-plásticos e rígido-viscoplásticos, respectivamente.

A restrição de incompressibilidade no campo de velocidades admissíveis pode ser removida pela introdução do multiplicador de Lagrange λ e pela modificação do funcional com a adição do termo $\int \lambda \dot{\varepsilon}_v dV$, onde $\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_{ii}$ é a taxa de deformação volumétrica. Assim,

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\varepsilon} dV + \int_V \lambda \delta \dot{\varepsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (5)$$

Um método alternativo para satisfazer a condição acima é o uso da forma penalizada da incompressibilidade:

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\varepsilon} dV + K \int_V \dot{\varepsilon}_v \delta \dot{\varepsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (6)$$

onde K, a constante de penalidade, é um valor positivo muito grande.

As equações 5 ou 6 são básicas para a formulação em elementos finitos. A solução que satisfaz essas equações é obtida através da discretização do sistema em elementos, os quais são interligados por funções de forma de um campo de velocidades contínuo definido em termos das velocidades nodais.

3. DESENVOLVIMENTO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL

Este trabalho é composto por simulações numéricas de processos físicos e ensaios experimentais. Para tanto, foi usado um programa comercial de elementos finitos, dedicado à área de processos de conformação volumétricos; enquanto que na parte experimental, foram realizados ensaios de compressão simples de corpos de prova axissimétricos.

3.1 Etapa Experimental

Para avaliação da modelagem numérica, foi escolhido o aço ABNT 1045, laminado a quente, cuja composição química - fornecida pelo fabricante - está listada na Tab. 1.

Tabela 1. Composição química do aço ABNT 1045

	C(%)	Mn(%)	Si(%)	S(%)	P(%)
1045	0,490	0,660	0,200	0,011	0,013

Em seguida, foram realizados ensaios de tração uniaxial nos corpos de prova, segundo as normas da ABNT, para obtenção da equação da tensão de fluxo, apresentada a seguir:

$$\bar{\sigma} = 1117 \bar{\varepsilon}^{0,263} \text{ MPa} \quad (7)$$

Para a execução dos ensaios de compressão, foram confeccionados corpos de prova anelares variando o valor do diâmetro interno, com uma razão entre a altura e o diâmetro igual a dois. A Fig. 1 mostra a geometria do corpo-de-prova e apresenta as variáveis que definem suas dimensões.

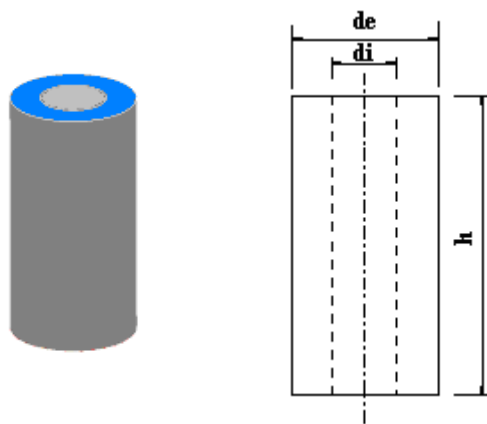


Figura 1 – Corpo de prova anelar

Com relação às dimensões, os valores das variáveis dos corpos de prova anelares estão dispostos na Tab. 2.

Tabela 2 - Dimensões dos corpos de prova, em mm.

Corpos de prova	h	d_e	d_i
Modelo 1	24,00	12,00	6,30
Modelo 2	24,00	12,00	3,50

3.2 Etapa Numérica

Para a simulação numérica dos processos físicos, foi usada a formulação rígido-plástica e modelos de deformação axissimétricos. Soluções das equações de rigidez foram obtidas pelo método direto. Com relação à formulação das condições de atrito interfacial, foi empregada a lei de Coulomb; e para contornar problemas de distorção da malha, foi aplicado o remalhamento automático do programa.

Na Fig. 2 estão mostradas as malhas iniciais dos modelos, bem como as matrizes e o eixo de simetria. Devido à axissimetria seção transversal dos corpos-de-prova, foram confeccionadas apenas a ½ das geometrias originais.

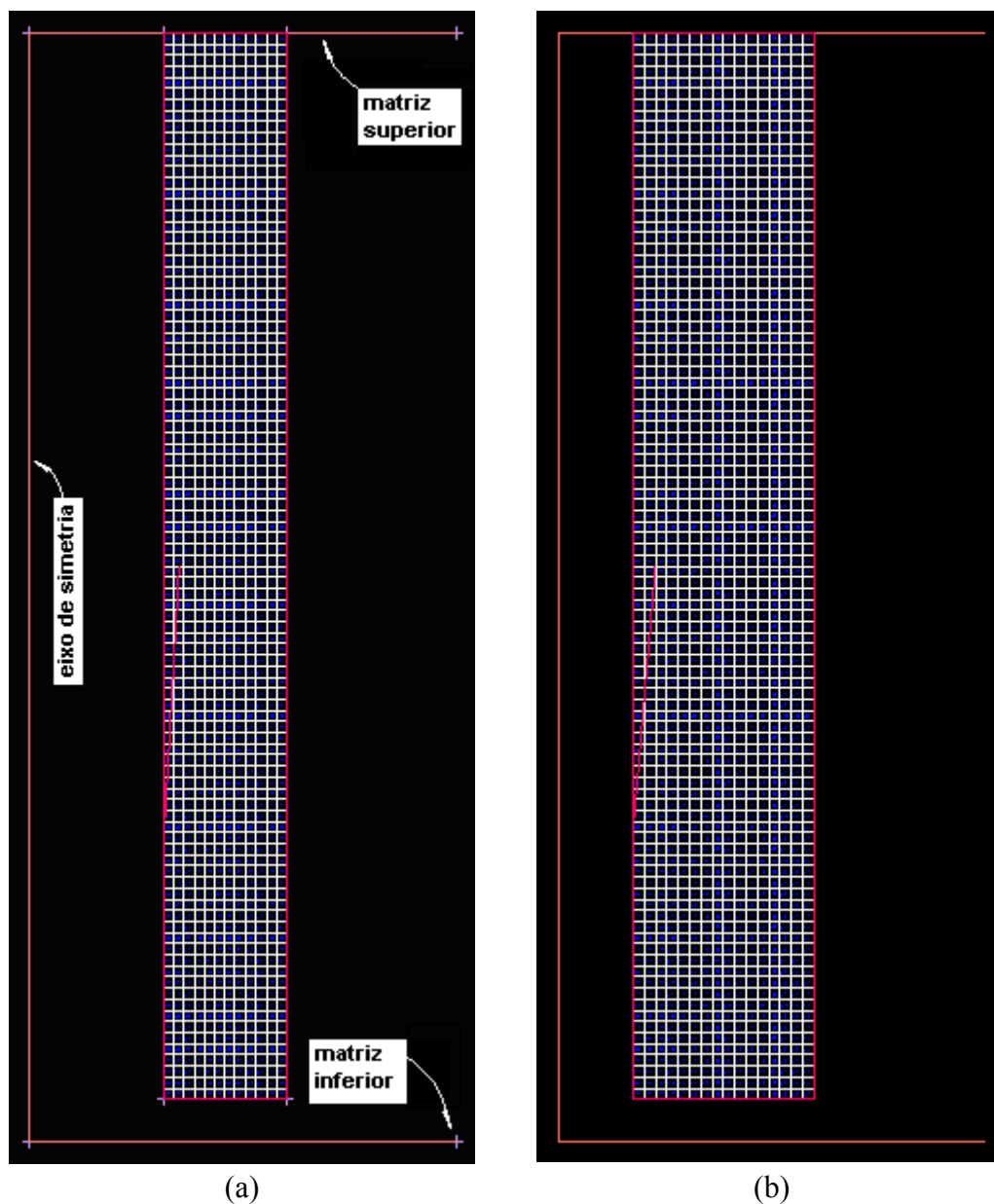


Figura 2 - Malhas iniciais do Modelo 1 (a) e Modelo 2 (b), matrizes e eixo de simetria.

Diante desta condição, a malha do Modelo 1 consiste de 1152 elementos isoparamétricos quadriláteros de quatro nós, interconectados por 1261 nós; enquanto que o Modelo 2 possui 1536 elementos e 1646 nós.

As matrizes, superior e inferior, são planas e com características próprias para não sofrerem deformações. Para atender a esta exigência, o modelo numérico contemplou as matrizes rígidas, ou seja, cujos graus de liberdade possuem total restrição à deformação.

Vale ressaltar que o coeficiente de atrito usado nas simulações foi de 0,20, uma vez que a literatura revela ser o valor normalmente encontrado para as condições presentes neste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A complexidade dos mecanismos de deformação heterogênea – intrínsecos ao ensaio de compressão de corpos-de-prova anelares – pode ser representada pelo barrilamento da superfície livre (Kobayashi, 1989). Assim, a capacidade da modelagem numérica em prever este fenômeno foi examinada, bem como outras características geométricas.

Para que fosse possível a avaliação qualitativa dos resultados apresentados pelo programa com os obtidos experimentalmente, tomou-se o cuidado para que todos os corpos de prova fossem confeccionados com um único acabamento superficial e limpos com um desengraxante, assim como as matrizes planas, para que o coeficiente de atrito permanecesse inalterado para cada um dos ensaios. Os corpos de prova foram posicionados verticalmente e centrados entre as matrizes para proporcionar uma distribuição uniforme dos esforços. Este procedimento possibilitou que a modelagem numérica pudesse se aproximar do ensaio experimental.

Como o objetivo é avaliar o comportamento do programa, verificando sua capacidade em reproduzir a geometria deformada, os resultados apresentados levam em consideração apenas uma redução máxima de 50% da altura inicial do Modelo 1 e 65% do Modelo 2.

Para a execução dos ensaios físicos foi usada uma máquina de tração – compressão com capacidade de 40 KN. Os corpos-de-prova deformados, cortados ao meio ao longo da seção longitudinal, estão apresentados nas Fig. 3.

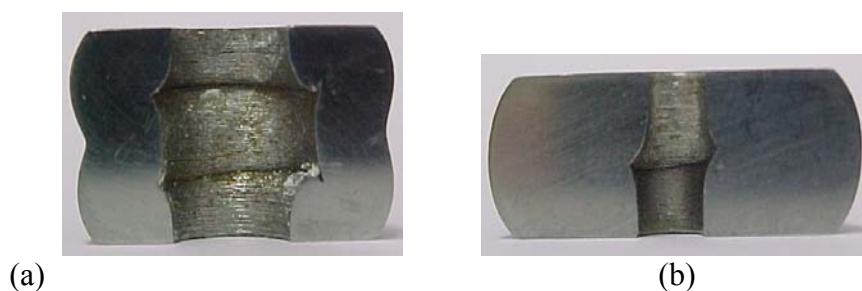


Figura 3. Resultados experimentais do ensaio de compressão para o Modelo 1(a) e Modelo 2 (b).

No Modelo 1 foi observado um duplo bojo ao longo da superfície livre externa, bem como duas dobras na superfície do furo. Já para o Modelo 2, os mecanismos envolvidos foram diferentes e o barrilamento resultou em um único bojo na superfície externa, onde o maior diâmetro se localiza na superfície equatorial, e uma dobra no furo.

Na Fig. 4 estão apresentadas as geometrias finais obtidas pela simulação numérica para o Modelo 1 e Modelo 2 para uma redução de 50% e 65%, respectivamente.

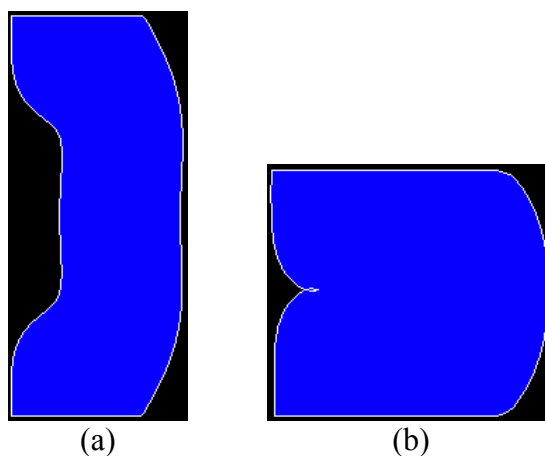


Figura 4. Resultados numéricos do ensaio de compressão para o Modelo 1(a) e Modelo 2 (b).

Para o Modelo 1, foi observado um duplo bojo ao longo da superfície livre externa, mas não foram obtidas as duas dobras na superfície do furo. Já para o Modelo 2, a geometria final coincidiu com a observada experimentalmente.

5. CONCLUSÕES

Avaliando os resultados obtidos, foi possível constatar que os mecanismos de deformação são altamente influenciados pela geometria dos corpos de prova. E, através de comparações entre as previsões obtidas e observações experimentais, conclui-se que o programa possui dificuldades em reproduzir processos que envolvem *strain-paths* mais complexos, demonstrado pela determinação incorreta da geometria final de um dos casos estudados.

6. REFERÊNCIAS

- Altan, T., 1997, “As Aplicações Industriais dos Processos de Fabricação de Peças já na Forma Final”, Máquinas e Metais, Vol. 379, pp. 38-53.
- Dieter, G.E., 1984, “Workability Testing Techniques”, Ohio: American Society for Metals.
- Gadala, M.S., Oravas, G.A’E., Dokainish, M.A., 1983, “A consistent eulerian formulation of large deformation problems in statics and dynamics”, International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 18, pp. 21-35.
- Kobayashi, S., Oh, S.-K., Altan, T., 1989, “Metal Forming and The Finite Element Method”, Oxford University Press, New York.
- Williams, A.J., Croft, T.N., Cross, M., 2002, “Computational modelling of metal extrusion and forging processes”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125-126, pp. 573-582.

Numerical Simulation of Metal Forming Processes

Augusta Cerceau Isaac Neta

Division of Aeronautics and Mechanics Engineering, ITA,
Marechal Eduardo Gomes Sq., 50 – 12228-900 – São José dos Campos – SP – Brazil
augusta@mec.ita.br

Lindolfo Araújo Moreira Filho

Division of Aeronautics and Mechanics Engineering, ITA,
Marechal Eduardo Gomes Sq., 50 – 12228-900 – São José dos Campos – SP – Brazil
lindolfo@mec.ita.br

Jánes Landre Júnior

Master's degree in Mechanical Engineering and Department of Mecatronics Engineering, PUC Minas,
D. José Gaspar Av., 500 – 30535-610 – Belo Horizonte – MG – Brazil
janes@pucminas.br

Abstract. *With the advent of numerical methods dedicated to the evaluation of metal forming processes, particularly which based on the method of finite elements for large deformations, the analysis of material behavior during deformation has been possible. However, some points don't make possible the total substitution of experimental tests by modeling. Due to the lack of theoretical studies in this area, the option to perform an evaluation of commercial software was made. In this paper, the numerical results are showed and compared with experimental ones of cold forging, through simple compression test using annular specimens.*

Keywords: *metal forming processes, finite elements method.*