

DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA PARA USO DE ESCALA GEOMÉTRICA NA SIMULAÇÃO DE ESTAMPAGEM DE CHAPAS METÁLICA

Peterson Silva da Silva, Sala FEMEC-CIMNE, peterson.engenheiro@gmail.com

Sônia Aparecida Goulart de Oliveira, Sala FEMEC-CIMNE, sgoulart@mecanica.ufu.br

Écio Naves Duarte, Sala IFSP- CIMNE, ecionaves@gmail.com

Resumo. Os processos de conformação mecânica são largamente utilizados nas indústrias em geral, junto a isto cresceu a demanda por software, que com base em aproximações numéricas, simulem peças com resultados bons o suficiente para garantir sua fabricação e com agilidade no tempo computacional para solução do problema. O estudo proposto faz uso da teoria de similitude para simular a estampagem de chapa metálica, obtendo resultados próximo do real com tempos de computação menores. Os resultados são obtidos através de simulações realizadas no programa comercial de elementos finitos STAMPACK®. Esse software utiliza o método de integração explícita no tempo, bastante utilizado na resolução de problemas não-lineares envolvendo contato, como é o caso dos processos de conformação de metais. O modelo foi ajustado, validado e simulado com quatro fatores de escala diferentes (duas abaixo e duas acima da escala real). O maior erro encontrado foi para o fator de escala 10^2 , referente ao resultado de deformação ao longo da espessura que foi de aproximadamente 2,5%. Os resultados demonstram que o uso da técnica de escala para simulação de chapas metálicas é válido e que com esta estratégia é possível aumentar o passo de tempo (critical time step) e diminuir o tempo de simulação total. A escolha do fator de escala deve levar em conta todos os parâmetros do problema, para garantir que o ganho no tempo não acarrete a perda de acuracidade dos resultados de simulação.

Palavras chave: conformação mecânica, teoria da similitude, elementos finitos explícito, tempo de simulação.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de conformação mecânica de metais são largamente utilizados nas indústrias automobilísticas, aeroespacial, de artigos domésticos, de embalagens e etc. Este processo de fabricação tem seu embasamento no campo de tensões que é provocado pelo contato das ferramentas com o corpo sólido deformável, onde este contato gera um campo de deformações plásticas, dando origem assim a uma peça final com configuração desejada, que se difere daquele formato inicial.

Segundo Reddy (1993), qualquer fenômeno da natureza, seja biológico, geológico ou mecânico, pode ser descrito com o auxílio das leis da física, em termos de equações algébricas, diferenciais ou integrais as quais relatam variáveis de interesse. O método de elementos finitos (MEF) é uma técnica de análise numérica que considera a região de solução do problema seja regida por equações diferenciais. O problema físico quando é discretizado por este método, apresenta uma região que é formada por pequenos elementos interconectados entre si, ou seja, por um número finito de nós interconectados, que são denominados de elementos finitos. De acordo com Huebner (1982) o método pode ser sumarizado basicamente em três etapas, sendo elas, Pré-Processamento, onde se faz a modelagem do fenômeno; Solução, que visa resolver uma equação diferencial e por fim o Pós-Processamento, que é o conjunto solução da equação diferencial que descreve o fenômeno.

Nos últimos anos os avanços tecnológicos dos computadores em conjunto com o desenvolvimento de softwares de simulação proporcionaram às indústrias que trabalham com simulação de peças uma maior rapidez na execução da análise de seus produtos simulados. Porém quando se necessita de uma simulação de um produto/peça com característica geométrica pequena, isto faz com que a simulação, usando MEF com integração explícito-dinâmica, leve mais tempo para ser realizada. Como neste tipo de simulação o passo de tempo, para a convergência da solução, é altamente dependente das propriedades do material e do tamanho dos elementos da malha.

Para alguns casos, o tempo de simulação da estampagem em elementos finitos (EF) pode ser muito grande, mesmo com computadores de alto desempenho. Isto causa sérios problemas tanto ao computador que terá sobrecarga em sua memória computacional quanto à empresa que terá perda financeira, com um alto custo computacional. Por este motivo o uso da teoria de modelo pode ajudar na obtenção de tempo de simulações menores, ou seja, para um nível de tempo aceitável, mantendo a acuracidade dos resultados. Para se alcançar este objetivo necessita-se de uma redução da quantidade de memória utilizada nas simulações e do tempo de processamento destas simulações.

Assim, é importante conhecer as especificidades da mencionada relação modelo em escala e real, confrontando os resultados e validando ou não o uso da técnica da teoria de modelo/similitude para simulação de estampagem de chapas metálicas. O software STAMPACK® é um programa específico para conformação mecânica de chapas metálicas, que

utiliza o MEF com integração explícito-dinâmica como base/método de solução do problema. Este programa foi desenvolvido no Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia (UPC/Espanha).

Este trabalho tem como motivação a análise dos resultados de simulações feitas para modelos em escala e em tamanho real/físico, avaliando assim a aplicação da teoria de modelo/similitude em simulações de conformação de chapas metálicas, de forma que se obtenha resultados de qualidade com um tempo computacional razoável obtidos via simulações em elementos finitos STAMPACK®.

2. SOLUÇÃO EXPLÍCITA

Na simulação dos processos de conformação de metais, o método de solução por integração explícita no tempo é muito usado para resolução de problemas deste tipo, que se trata de problemas não-lineares. Este método possui como principal vantagem, a ausência de operações do tipo inversão e armazenamento de matrizes de rigidez fazendo assim com que haja uma economia de tempo para resolução/cálculos do problema.

O método de integração explícita é condicionalmente estável, ou seja, na condição de um passo de tempo "*time step* Δt " muito pequeno, isso interfere na resolução do problema, na prática isto significa que a cada passo de tempo, o programa STAMPACK® calcula um novo passo de tempo, garantindo que este seja sempre abaixo do tempo crítico Δt_{cr} de acordo com a Eq. (1). Segundo Duarte (2007) é possível estimar um valor crítico por meio das propriedades elásticas do material e do tamanho do menor elemento existente na malha. É comum utilizar uma margem de incerteza de 25% para o tempo crítico.

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} \quad (1)$$

Sendo o tempo crítico é calculado de acordo com a Eq. (2):

$$\Delta t_{cr} = \frac{L}{c} \quad (2)$$

Onde L é o comprimento característico do menor elemento e c é a velocidade do som se propagando no material que é dada pela Eq. (3):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

A simbologia E indica o módulo de elasticidade e ρ a massa específica do material. Então se tem que, quanto maior a massa específica do material, maior será o passo de tempo crítico e consequentemente menor será o tempo computacional (de CPU) da simulação.

A integração explícita no domínio do tempo se dá pelo método das diferenças finitas, onde o passo seguinte de tempo t_{n+1} é determinado pela iteração anterior t_n mais um fator relativo ao novo instante de tempo Δt_{n+1} , resultando em um novo instante $t_{n+1} = t_n + \Delta t_{n+1}$ (STAMPACK, 2003). Isto garante que o método de integração explícita seja condicionalmente estável, resultando em uma solução numericamente estável.

3. METODOLOGIA

O trabalho consiste em realizar uma série de simulações de estampagem de chapa metálica, onde este modelo é construído, ajustado e validado de acordo com os dados experimentais de Danckert (1995).

O STAMPACK® permite que simplificações sejam feitas para que o esforço computacional seja reduzido, como a geometria do modelo tem simetria em dois eixos, a simulação foi feita com apenas $\frac{1}{4}$ do modelo real. De acordo com Danckert (1995): blank é uma chapa quadrada de 170x170 mm com espessura de 0,78 mm, a força utilizada pelo prensa-chapa foi de 19,3 kN, já o deslocamento do punção foi de 40 mm. A Tabela (1) mostra as propriedades mecânicas do material.

O teste inicial de simulação deste processo foi modelado com os seguintes conjuntos, mostrados na Fig. (1) (a): blank que foi considerado como deformável e o punção, prensa-chapas e matriz que são ferramentas do processo considerados como rígido. Para a criação da malha de elementos finitos foram adotados elementos triangulares do tipo casca denominado *Basic Shell Triangle* (BST) ver Fig. (1) (b), em uma distribuição de malha estruturada e elementos de tamanho 2,5 mm, escolhido de acordo com o teste realizado de sensibilidade de malha.

As simulações foram feitas alterando o fator de escala do modelo, que foram escalados na ordem de grandeza a seguir: 10^{-2} , 10^{-1} , 1 (escala real), 10^1 e 10^2 .

Nestas simulações as propriedades do material, a velocidade de descida do punção 7,5 m/s, a penalidade normal 0,1 e tangencial 0,3 e o coeficiente de atrito 0,144, todos estes parâmetros foram mantidos os mesmo para todos os modelos.

Tabela 1. Propriedade mecânica do blank (Danckert, 1993)

RD	YS (MPa)	TS (MPa)	EI	n (10-20%)	r (20%)	E (GPa)	K (MPa)	ν
0°	167,0	308,5	47,3	0,238	1,79	206	565,32	0,3
45°	176,5	316,0	44,0	0,239	1,51			
90°	172,5	305,0	46,0	0,222	2,27			
Média	173,1	311,4	45,3	0,235	1,77			

RD, direção; YS, limite elástico; TS, limite de resistência a tração; EI, alongamento; n, coeficiente de encruamento; r, coeficiente de lankford; E, módulo de young; K, coeficiente de endurecimento; ν , razão de poisson.

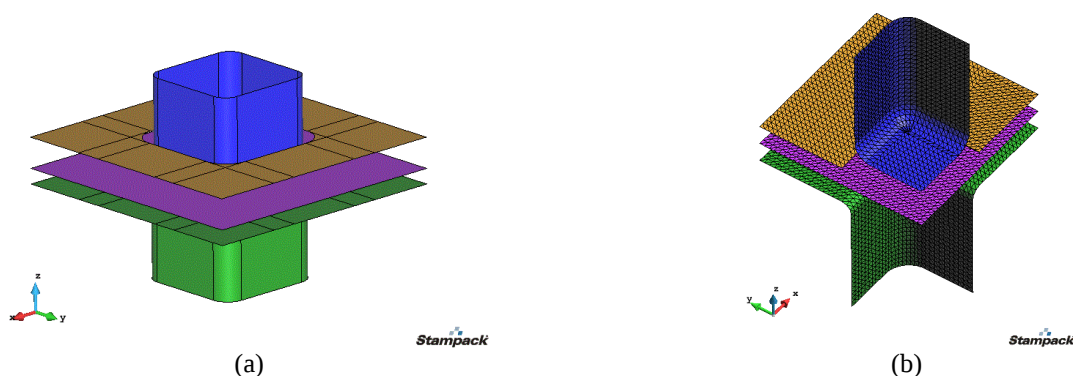


Figura 1. Estampagem profunda copo quadrado (a); Modelo com malha de elementos triangulares finitos (b)

4. RESULTADOS

Após a execução das simulações foi feita a análise dos resultados referentes à validação do modelo para o problema proposto. A Figura. (2) mostra a comparação dos resultados obtidos na escala real com os resultados experimentais de Dankert (1995). Validado o modelo foi analisado quais os parâmetros ver Tab. (2) que são necessários ser alterados para que os modelos escalados obtenham resultados do tipo: deformação ao longo da espessura, deformação plástica equivalente e tensão equivalente, bem próximo do modelo real, já validado.

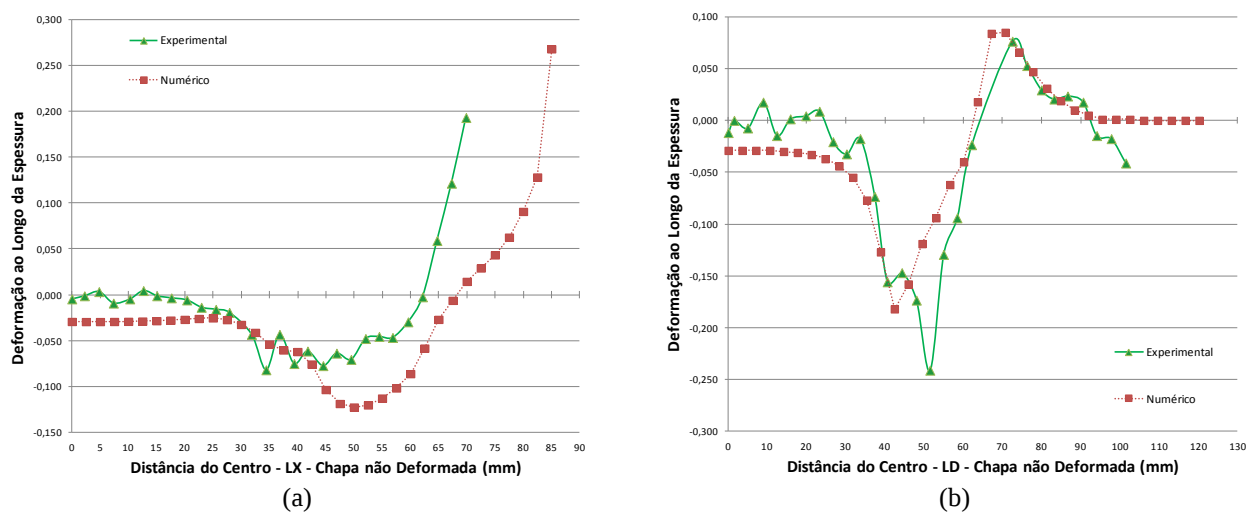


Figura 2. Deformação ao longo da espessura na direção horizontal Exp. x Num. (a); Deformação ao longo da espessura no plano inclinado Exp. x Num. (b)

Tabela 2. Resultados dos parâmetros simulados nos modelos escalonados.

Escala	Amplitude	Tempo	Cut off	Penalidade	T. Crítico	Tempo (CPU)	Prensa-Chapa(Tn)	Cursor do Punção(mm)	Velocidade do Punção(m/s)
10^{-2}	padrão	padrão	padrão	padrão	2,97E-09	00:11:46	4,92E-05	0,4	7,5
10^{-1}	padrão	padrão	padrão	padrão	2,97E-08	00:02:36	4,92E-03	4	7,5
1	padrão	padrão	padrão	padrão	2,97E-07	00:01:45	4,92E-01	40	7,5
10	troca	troca	troca	padrão	2,97E-06	00:01:37	4,92E+01	400	7,5
10^2	troca	troca	troca	padrão	2,94E-05	00:01:33	4,92E+03	4000	7,5

O mapa de deformação plástica equivalente é mostrado para três modelos simulado sendo um em escala real Fig. (3) (a), outro com o menor fator de escala Fig. (3) (b) e por fim o com maior fator de escala Fig. (3) (c). Este mapa mostra a região da peça que mais é submetido à deformação plástica. É possível notar que esta deformação é distribuída corretamente ate o fator de escala 10, pois para o fator de escala 10^2 é notável um erro de 1% para faixa de escala mínima de resultado.

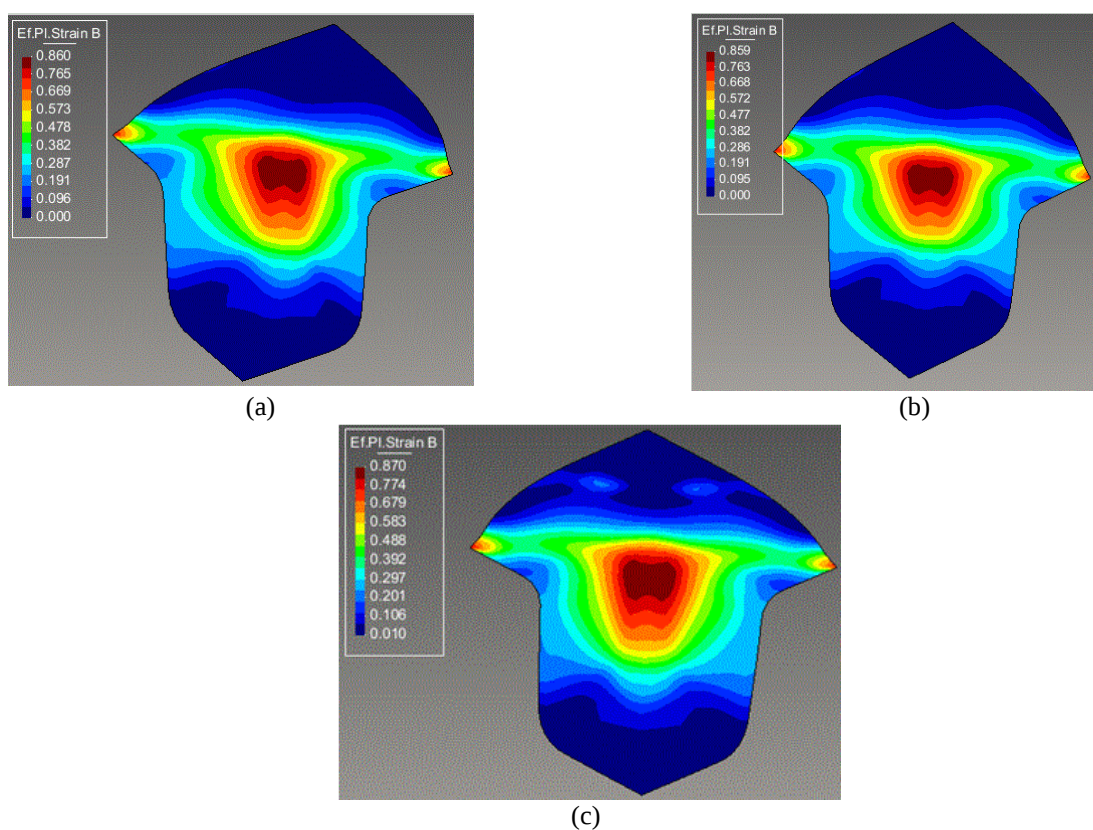


Figura 3. Deformação plástica equivalente modelo real (a); Deformação plástica equivalente modelo com Fator de escala 10^{-2} (b); Deformação plástica equivalente modelo com Fator de escala 10^2 (c)

Fazendo um ajuste de curva nos resultados numéricos da Fig. (4) (a), observou que o tempo de simulação (de CPU) apresenta uma tendência de redução no tempo total de simulação, apresentando um coeficiente de correlação quadrático de $R^2 = 0,9913$. A Figura (4) (b) traz o tempo crítico com relação ao fator de escala, verificou-se que conforme o fator de escala é aumentado, o tempo crítico também aumenta na mesma ordem, apresentando uma linha reta de tendência como ajuste.

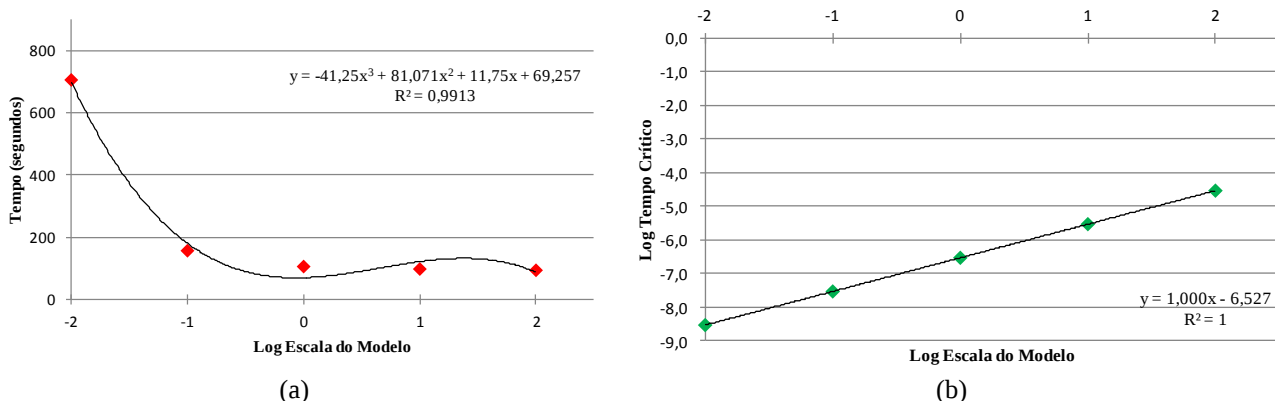


Figura 4. Tempo total de simulação em segundos (a); Tempo crítico de cada modelo em log (b)

5. CONCLUSÃO

No final deste estudo, foi possível verificar que o uso da teoria da similitude para estampagem de chapas metálicas no software de STAMPACK® é viável, desde que seja usado com bom senso o valor do fator de escala, pois foi visto que conforme aumenta o fator de escala mais parâmetros devem ser alterados para se obter bons resultados. Estes resultados, se mostraram promissores, mostrando que é possível, usando escala, diminuir o tempo total de simulação e aumentar o passo de tempo crítico do problema.

6. REFERÊNCIAS

- Danckert, J., 1995 “Experimental investigation of a square-cup deep-drawing process”, *Journal of Materials Processing Tech.*, Vol. 50 (1-4), pp. 375-384.
- Duarte, E. N., 2007, “Estudo Analítico-Numérico de Freios de Estampagem em Chapas Metálicas”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 138 p.
- Huebner, K.H., “The Finite Element Method for Engineers”, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- Reddy, J. N., 1993, “An Introduction to the Finite Element Method”, McGraw Hill, Boston, Mass, Ed. 2nd, 684 p.
- STAMPACK®, 2003, “Basic Concepts Theory Manual Version 5.5”, Quantech ATZ S.A., Barcelona, Spain, 156 p.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer pelo suporte financeiro dado pela CAPES.

8. ABSTRACT

Mechanical forming processes are widely used in industries in general, along with this increased demand for software that based on numerical approximations, simulate parts with good results enough to ensure its manufacture and agility in computational time to solve the problem. The proposed study makes use of the similitude theory to simulate the sheet metal stamping, getting close to the actual results with lower computation times. Results are obtained through simulations in the commercial finite element STAMPACK®. This software uses the explicit integration method in time, widely used to solve nonlinear problems involving contact, such as the metal forming processes. The model was adjusted, validated and simulated with four different scale factors (two below and two above the true scale). The largest error was encountered for the scale factor 10^2 , related to the result of deformation along the thickness (thickness strain) that was approximately 2,5%. The results demonstrate that the use of scaling technique for simulating sheet metal is valid and that this strategy is possible to increase the critical time step and reduce the total simulation time. The choice of scale factor should take into account all the problem parameters to ensure that the gain in time does not entail the loss of accuracy of simulation results.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.