

UM MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA A CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE CHAPAS FINAS SUJEITAS A ALTAS TAXAS DE DEFORMAÇÃO USANDO MODELOS CONSTITUTIVOS ELASTO-VISCOPLÁSTICOS

Bernardo Affonso Squeff
Orientador: Rodrigo Rossi

Introdução

Graças aos avanços nas áreas de engenharia, o meio industrial dispõe atualmente de processos de fabricação realizados a altas velocidades. Em tais processos os materiais trabalhados, principalmente metais e suas ligas, são submetidos a elevadas taxas de deformação.

Este trabalho trata do estudo da modelagem do processo de conformação eletromagnética, um processo de fabricação a altas velocidades e a altas taxas de deformação, que por meio de um pulso eletromagnético confere a forma desejada (molde) por deformação plástica (viscoplástica) do componente. Um esquema da máquina de conformação eletromagnética é apresentada na Figura 1. Apesar das questões que envolvem a determinação do pulso eletromagnético (problema eletromagnético), o problema foi analisado apenas do ponto de vista mecânico isto é, são de interesse deste trabalho o movimento, forças, deformações e tensões no componente quando submetido a um pulso característico. A análise foi realizada através da simulação computacional pelo software *Abaqus/Explicit*, o qual usa o método de elementos finitos. A descrição do pulso eletromagnético, causador da conformação, é introduzida no software através de uma sub-rotina de usuário, *VDLOAD*. Ao modelo de elementos finitos são propostas simplificações na geometria da placa bem como nas condições de contorno, de modo a poder representar o complexo processo de conformação eletromagnética em molde que o componente está submetido. O estudo até agora feito é apenas representativo de maneira qualitativa.

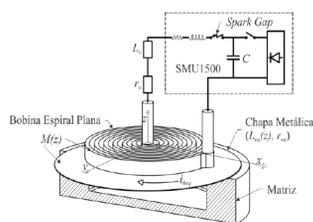


Figura 1 - Representação esquemática do circuito elétrico, da máquina SMU1500 e da matriz de conformação eletromagnética (PAESE et al., 2014).

Modelo

É proposto que o modelo seja construído usando condições de simetria o qual leva a proposição de "12 fatias", veja Figura 7 para uma ideia da peça conformada. Sob os eixos radiais de cada fatia são introduzidas condições de contorno adequadas de modo a representar o problema real. Esta simplificação reduz o tempo de processamento e permite um melhor controle da geração de malha.

No modelo proposto neste trabalho, a chapa metálica foi discretizada de duas maneiras distintas, como um elemento 3D de casca deformável e como um elemento 3D de sólido deformável, enquanto que a matriz e o sujeitador foram modelados utilizando elementos rígidos, ver Figura 2 e 6. A pressão de origem eletromagnética atua sobre a superfície da chapa metálica na direção do eixo z, causando deformação, ao mesmo tempo em que a força do sujeitador tem a função de segurar a chapa metálica.

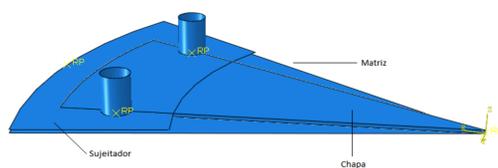


Figura 2 - Modelo como elemento sólido construído no Abaqus

O comportamento constitutivo para a maioria dos metais muda quando submetidos a altas taxas de deformação. É proposta a utilização do modelo de *Johnson-Cook*. O *Abaqus*, levando em consideração os efeitos estáticos e da taxa de deformação, para a regra de *Johnson-Cook*, apresenta este modelo da seguinte forma:

$$\bar{\sigma} = \frac{[A + B(\epsilon^{pl})^n](1 - \hat{\theta}^m)}{\sigma^0(\epsilon^{pl}, \theta)} \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \quad (1)$$

O primeiro termo, $\sigma^0(\epsilon^{pl}, \theta)$, desta equação representa a parte desta que não é dependente da taxa, apresenta a tensão dependendo da temperatura e deformação plástica acumulada. Já o segundo termo, $R(\dot{\epsilon}^{pl})$, tem a função de acrescentar a informação de taxa ao modelo.

A Figura 3 mostra a superfície do ajuste das constantes do modelo de *Johnson-Cook* isotérmico para o comportamento mecânico do alumínio A1050. Este foi obtido no software *Matlab* através da ferramenta *fittool*, usando dados obtidos por ensaio de um estudo anterior, primeiramente um ensaio quasi-estático e na sequência ensaios em quatro diferentes taxas de deformação. Os parâmetros do modelo são apresentados na Tabela 1.

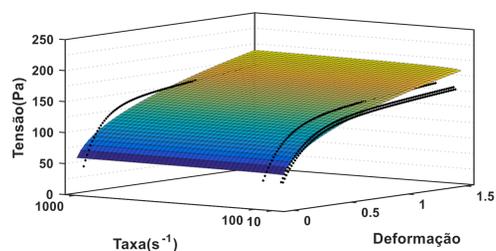


Figura 3 - Ajuste para o comportamento mecânico do alumínio A1050 usando o modelo de *Johnson-Cook*.

Tabela 1 – Parâmetros do modelo de *Johnson-Cook*

A (MPa)	B (MPa)	n	C	$\dot{\epsilon}_0$
28	115.5	0.4529	0.009934	0.01

Para a representação do pulso foram utilizadas séries de senos, com 6 e com 8 termos. Com coeficientes ajustados, também, através da ferramenta *fittool* do *Matlab*, com base em dados de pressões magnéticas retirados de um estudo anterior. O algoritmo utilizado foi *Levenberg-Marquardt*. A seguir estão representadas a superfície do pulso, Figura 4, gerada através da interpolação dos valores de pressão, em função do tempo e raio, e ao lado desta Figura 5, uma das curvas da série de senos com 6 termos para observação da proximidade desta com os pontos da pressão do pulso.

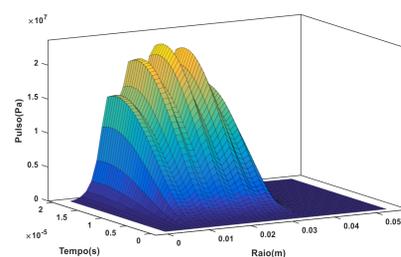


Figura 4 - Interpolação dos valores de pressão

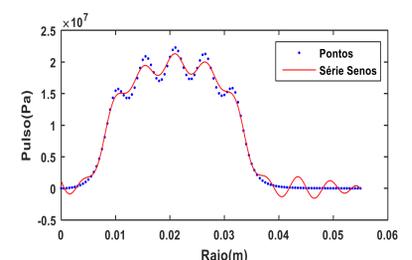


Figura 5 - Curva da série de senos

Resultados

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos ao final da simulação mostrando a deformada. Até então a análise feita é apenas de caráter qualitativo. Assim, ao observar a evolução temporal do comportamento, qualitativo, do modelo em comparação ao experimental, concluiu-se que a simulação apresentou bons resultados para os diferentes tipos de definição de elementos, no entanto, a malha do elemento sólido exigiu um maior refino em sua espessura para que encontrasse um resultado próximo ao do elemento de casca.

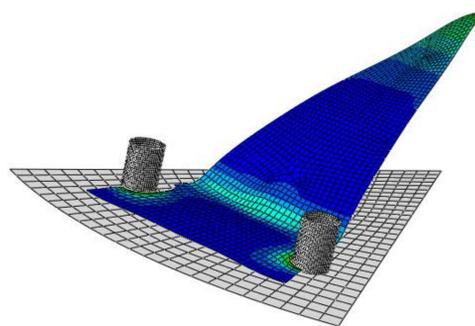


Figura 6 - Resultados ao final da simulação



Figura 7 - Resultados ao final do ensaio

No processo de conformação da chapa em questão o pico de pressão ocorre em 17 μ s e a conformação da chapa, Figura 6 e 7 está finalizada em torno de 100 μ s.

Próximos Passos

O objetivo da continuação da modelagem é tornar o modelo o mais representativo possível do ponto de vista quantitativo. Espera-se então através da obtenção de mais dados experimentais verificar e validar o modelo com estes novos objetivos. Assim, pode-se aprimorar o modelo, o ajustando e refinando se for necessário.

Bibliografia

- PAESE, E. et al. An Analysis of Electromagnetic Sheet Metal Forming Process. *Applied Mechanics and Materials*, Switzerland, v. 526, p. 9–14, 2014.
- PAESE, E. et al. A coupled electric-magnetic numerical procedure for determining the electromagnetic force from the interaction of thin metal sheets and spiral coils in the electromagnetic forming process. *Applied Mathematical Modelling*, p. 1–26, 2014.
- SIDDIQUI, M. A. Numerical Modeling and Simulation of Electromagnetic Forming Process. 2009. 213 p. Dissertation in Engineering – Université de Strasbourg, Strasbourg, 2009.
- Abaqus online documentation, version 6.14, 2014.