



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

Bernardo Affonso Squeff  
Orientador: Rodrigo Rossi

## Introdução

Grças 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 com dano associado, 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 e corte 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. Ao modelo de elementos finitos são propostas simplificações na geometria do tubo 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.

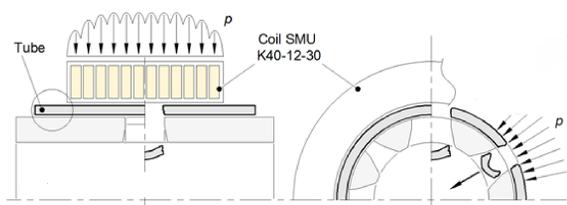


Figura 2 – Matriz e tubo após ensaio

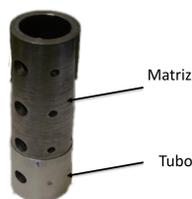


Figura 1 - Representação esquemática do circuito elétrico, do tubo e da matriz de conformação eletromagnética.

## Modelo

É proposto que o modelo seja construído usando condições de simetria o qual leva a proposição de "fatias", veja Figura 3 e Figura 4a para uma ideia das simplificações aplicadas. 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, o tubo metálico foi discretizado com elemento 3D de sólido deformável, enquanto que a matriz foi modelada de duas formas, sólido 3D deformável e elementos rígidos. No entanto no decorrer do estudo conclui-se que não havia necessidade da utilização de elementos deformáveis na matriz, se mostrou irrelevante a diferença e por economia de tempo computacional utilizou-se elementos rígidos. A pressão de origem eletromagnética atua sobre o corpo da chapa metálica na direção do radial, causando deformação.

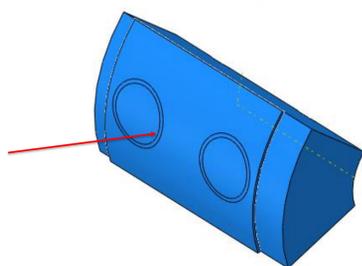


Figura 3 - Modelo como elemento sólido construído no Abaqus

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, da taxa de deformação e com dano associado, para a regra de *Johnson-Cook*, apresenta este modelo da seguinte forma:

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

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

E o modelo de falha de *Johnson-Cook* é apresentado na forma:

$$D = \sum \frac{\nu \epsilon^{pl}}{\epsilon_f}$$

Onde,

$$\epsilon_f = \left[ D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_e}) \right] \left[ 1 + D_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] [1 + D_5 T^*]$$

Baseado no efeito triaxial da tensão, taxa de deformação e temperatura.

Os parâmetros do modelo a serem definidos foram utilizados primeiramente da bibliografia, MABROUKI, T et al., 2008, para avaliar o modelo de tubo construído e posteriormente parâmetros obtidos de ensaios.

Contudo, a aplicação do modelo de dano foi realizada apenas na região do "anel", sinalizado na Figura 3 pela seta vermelha. Isto é uma prática útil para se trabalhar com fratura e buscar resultados próximos aos reais, é necessário "dizer" onde a fratura irá acontecer.

Os dados do pulso eletromagnético não foram inseridos até o momento no intuito de gradativamente tornar o modelo mais complexo, logo a força que perturba o modelo foi inserida como uma pressão imposta na superfície externa do tubo com equivalente características e intensidade do pulso eletromagnético. A pressão que deforma a peça encerra sua ação antes mesmo deste encontrar a matriz, logo sua deformação se dá pela inércia adquirida.

## Resultados

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos ao final da simulação mostrando a deformada. Até então a análise feita é apenas de carácter qualitativo. Assim, ao observar a evolução temporal do comportamento, qualitativo, do modelo em comparação ao experimental, concluiu-se que a simulação apresentou bons resultados, no entanto, a malha do elemento sólido exigiu a criação de uma zona de maior refino em para que o rompimento pudesse ser bem representado e encontrasse um resultado próximo ao da realidade.

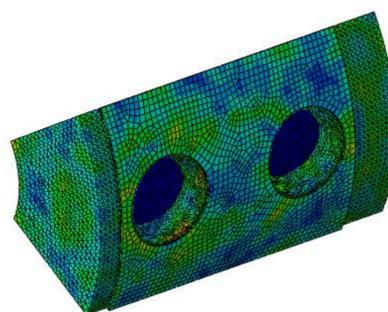


Figura 4a - Resultados ao final da simulação

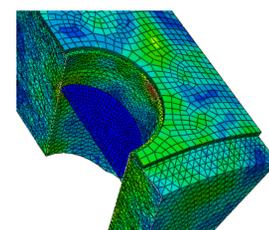


Figura 4b - Resultados ao final da simulação

## Próximos Passos

Alguns passos ainda faltam ser dados neste estudo, adicionar a rotina do pulso eletromagnético, já feita, também planeja-se implementar via rotina o modelo viscoplástico de um colega.

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

MABROUKI, T. et al. Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48, Issue 11, 2008, p. 1187-1197.

Johnson, R. et al. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 21, Issue 1, 1985, p. 31-48.

*Abaqus* online documentation, version 6.14, 2014.