

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO ERICHSEN EM 2D¹

Franco de Castro Bubani²

Paulo Roberto Cetlin³

Rodrigo Freitas Silva⁴

Haroldo Béria Campos⁵

Antonio Eustáquio de Melo Pertence⁵

Maria teresa Paulino Aguilar⁶

Resumo

Um modelo computacional é apresentado para a simulação em duas dimensões do Ensaio Erichsen, através método dos elementos finitos. A modelagem envolveu uma chapa de aço inoxidável 304 de 2mm de espessura, com diferentes valores de atrito entre a chapa e o punção. Os resultados das simulações são apresentados, mostrando que a formulação usada é adequada para a simulação desse ensaio. Os efeitos dos diferentes valores de atrito na curva de carga e no formato final do corpo de prova são analisados. A simulação foi capaz de reproduzir satisfatoriamente os resultados obtidos no teste.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Ensaio Erichsen; Método dos elementos finitos; Simulação.

2D FINITE ELEMENT SIMULATION OF THE ERICHSEN CUPPING TEST

Abstract

A computational model is presented for the 2D FEM (finite Element Method) simulation of the Erichsen cupping test. The method was applied to model the test in a 2mm thick 304 stainless steel sheet, with different values of friction between the sheet and the punch. The results of these simulations show that the formulation used is suitable for the simulation of such test. The effects of different values of punch-sheet friction on the load-displacement curves and on the final shape of the work piece are analyzed. The simulation was able to satisfactorily reproduce the results obtained in the actual test.

Key words: Stainless steel; Erichsen test; Finite element method; Cupping.

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *Bolsista de IC, Engenharia Mecânica da UFMG*

³ *Prof. titular, Dept. de Enga. Metalúrgica e de Materiais da UFMG*

⁴ *Bolsista de IC, Engenharia Metalúrgica da UFMG*

⁵ *Prof. Adjunto, Dept. de Enga. Mecânica da UFMG*

⁶ *Prof. Adjunto, Dept. de Enga. De Materiais e da Construção, UFMG.*

INTRODUÇÃO

De acordo com Dieter,⁽¹⁾ a capacidade de produzir uma variedade de formas a partir de chapas de metal a altas taxas de produção foi um dos grandes avanços tecnológicos do século 20. A transição de processos e conformação manuais para processos de produção em massa foi um fator importante no aumento do padrão de vida observado no período. Esses processos, conhecidos de maneira genérica como processos de estampagem, são um grupo de operações através do qual uma chapa de metal sofre transformações para adquirir uma nova forma geométrica através de deformação plástica. Os processos de estampagem são processos versáteis através dos quais vários tipos de componentes são produzidos, desde artigos de joalheria até peças automotivas. Hoje em dia, processos de estampagem são realizados por prensas, que podem ser basicamente mecânicas ou hidráulicas.

As ferramentas básicas usadas nesses processos são o punção e a matriz. O punção é a ferramenta convexa que encaixa na matriz côncava. Normalmente o punção é a parte móvel. Outra consideração importante em processos de estampagem é a necessidade de restringir ou impedir o escorregamento da abas da chapa, para evitar seu enrugamento devido à flambagem sob tensões compressivas. Dependendo da complexidade da peça e da conformabilidade do material, várias operações podem ser necessárias, com diferentes geometrias de punção e matriz.

Existem vários ensaios para medir a conformabilidade de ligas metálicas usadas na estampagem. O ensaio Erichsen estira a chapa até a fratura, sendo um ensaio muito útil na caracterização de materiais usados em estampagem. Como a relação área / volume é alta, um dos fatores mais importantes que influenciam a operação é a lubrificação entre o ferramental e a chapa, o que vai determinar o atrito no processo. O lubrificante é importante para reduzir o atrito entre as ferramentas e a chapa, aumentando a vida das ferramentas e reduzindo os esforços. Seu efeito varia de acordo com a quantidade de lubrificante aplicada, as condições de aplicação e o modo de deformação. Apesar de sua importância, há muito pouca informação disponível sobre os efeitos do atrito nos resultados dos ensaios de conformabilidade.

É muito difícil medir as condições de atrito em um processo de conformação. Entretanto, sempre existe a possibilidade de observar os efeitos do atrito punção-chapa durante a operação e os resultados finais através de simulações numéricas em computador, onde é possível exercer controle sobre as variáveis envolvidas no processo. O sucesso ou fracasso de uma operação de conformação dependerão tanto das condições do processo quanto do material usado.

Peckner e Bernstein⁽²⁾ explicam que aços inoxidáveis são resistentes à corrosão por causa de um fenômeno conhecido pelo nome de passivação. Os elementos de liga presentes em aços inoxidáveis reagem com o ambiente e um deles em particular, o cromo (Cr), ajuda na formação de uma camada fina que adere à superfície do material e o protege de ataques subseqüentes de corrosão. Outros elementos podem ser adicionados a aços inoxidáveis, como o níquel (Ni), molibdênio (Mb) e titânio (Ti), para melhorar propriedades como soldabilidade e trabalhabilidade.

Aços inoxidáveis podem ser classificados em 4 categorias: austeníticos, ferríticos, martensíticos e ligas endurecíveis por precipitação. Uma liga austenítica comum é o aço 304: 74% Fe, 18% Cr e 8% Ni, também conhecida como aço 18-8. Nessa liga, o cromo protege o material criando uma camada de Cr_2O_3 em todas as superfícies expostas e o níquel ajuda a estabilizar a austenita à temperatura ambiente. A liga é dúctil tanto a

temperaturas altas quanto a temperaturas baixas. Aços inoxidáveis austeníticos não são ferromagnéticos, mas trabalho a frio pode gerar uma estrutura com a presença de martensita. Assim sendo, a liga apresenta comportamento ferromagnético nos locais que sofreram deformação a frio.

Os aços inoxidáveis austeníticos têm um teor de cromo tipicamente entre 16% e 25% e um teor de níquel alto, normalmente acima de 8%. O alto teor de níquel é necessário para estabilizar a austenita à temperatura ambiente. O material usado nas simulações, o aço inoxidável 304, é largamente usado em processos de estampagem por causa de sua alta conformabilidade. A austenita presente à temperatura ambiente é transformada em martensita durante o trabalho a frio, aumentando a taxa de encruamento do material. Esse fenômeno é desejável em operações de conformação mecânica porque retarda o aparecimento de deformações plásticas localizadas (estricção), permitindo maiores deformações antes da fratura. Por outro lado, há um aumento da carga do processo e uma redução da resistência à corrosão do produto acabado.

Takuda e Hatta⁽³⁾ realizaram simulações numéricas de alguns ensaios de estampagem, incluindo o ensaio Erichsen, usando o método dos elementos finitos e um critério de fratura dúctil, em chapas de zircônio comercialmente puro de 2mm de espessura. Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com os experimentais. As propriedades do material foram obtidas por ensaios de tração e de deformação plana. Os autores concluem que a fratura do zircônio pode ser prevista com precisão razoável através de uma combinação da simulação pelo método dos elementos finitos e um critério de fratura dúctil.

No ensaio Erichsen, mostrado na Figura 1, um punção esférico é movimentado contra uma chapa, mantida no lugar pelas matrizes, até a ruptura da chapa. Não pode haver escorregamento das abas das chapas pressionadas entre as bordas das matrizes, pois isso aumentaria significativamente o valor de estampabilidade medida no ensaio. O resultado do teste é a profundidade da penetração do punção, em mm, medida imediatamente após a fratura. A desvantagem de usar esse número é que ele não é uma propriedade do material, pois depende da espessura da chapa.

MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio Erichsen foi realizado em uma chapa de aço inoxidável 304 de 2mm de espessura. O ensaio foi interrompido antes da fratura, quando o deslocamento do punção chegou a 20mm. Após o ensaio, a chapa foi cortada e sua espessura foi medida em 11 pontos ao longo do comprimento do corte. As medições foram feitas da esquerda para a direita, a cada 3mm, medidos em um segmento de reta cujos extremos encontram-se na metade da espessura da chapa, conforme mostrado na Figura 2. Cada ponto foi medido três vezes e a média foi calculada.

Em seguida, um ensaio de tração com uma amostra do mesmo material foi feito. A curva tensão x deformação foi obtida e corrigida para a estricção e redução de área, resultando na curva da Figura 3. Essa curva foi então transferida para o software usado nas simulações. Para simplificar as simulações, um modelo axissimétrico 2D foi usado. Quatro simulações foram feitas, com diferentes valores de atrito (0,001; 0,01; 0,1 e 0,3, atrito Coulombiano). A espessura final da chapa foi comparada à espessura obtida nas simulações. Os efeitos do atrito no formato final da chapa foram analisados.

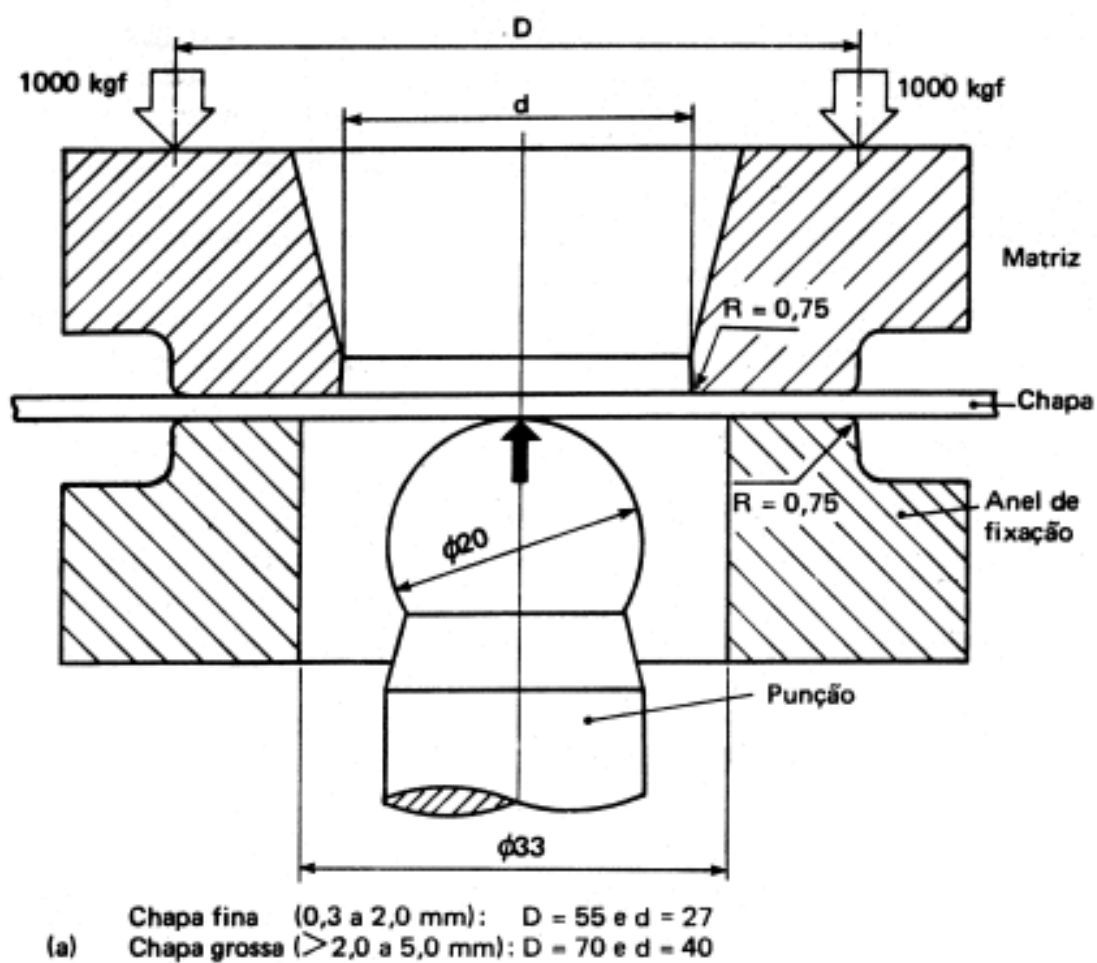


Figura 1. O ensaio Erichsen

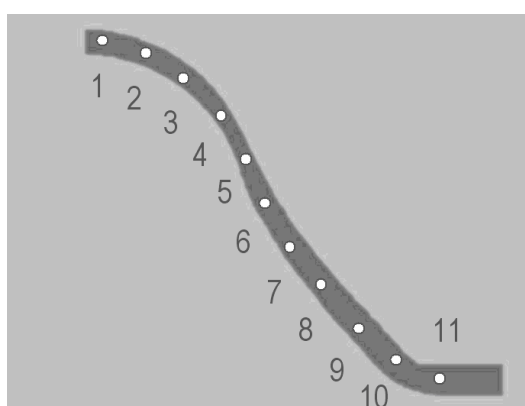


Figura 2. Os pontos de medição de espessura da chapa.

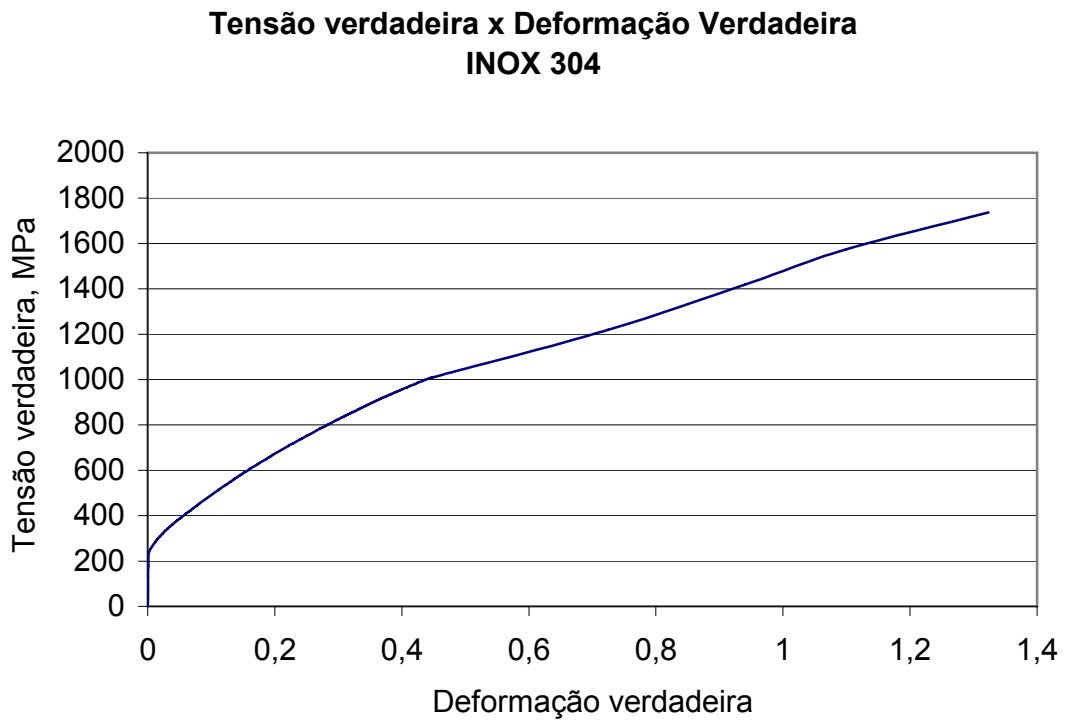


Figura 3. A curva tensão x deformação corrigida

O software usado foi o DEFORM 2D V8.0. Para as análises, a chapa é considerada contínua, isotrópica, homogênea e plástica. Um corpo contínuo não possui espaços vazios. Um material isotrópico não muda suas propriedades com a direção ou orientação. Um material homogêneo tem propriedades idênticas em todos os pontos. No modelo plástico, todas as deformações elásticas são desprezadas. A Figura 4 mostra o modelo.

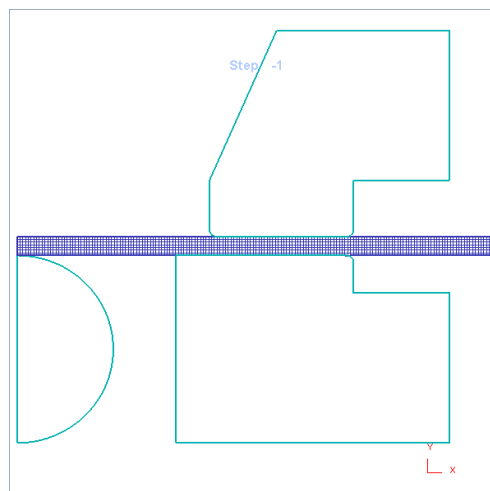


Figura 4. O modelo axissimétrico 2D usado nas simulações

As matrizes e o punção são considerados corpos rígidos perfeitos nas simulações. As matrizes permanecem completamente imóveis e o punção movimenta-se verticalmente a velocidade constante. Outros parâmetros usados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades adicionais usadas nas simulações.

Espessura da chapa	2.0mm
Temperatura	20° C
Malha	1200 elementos
Velocidade do punção	15 mm/min
Tamanho do <i>step</i>	0.25 mm de deslocamento do punção.
Deslocamento total do punção	20mm
Modelo de atrito	Coulomb
Interpolação	Linear

A carga aplicada ao punção foi monitorada durante cada simulação. A espessura das chapas após cada simulação foi medida pela menor distância entre os nós das duas superfícies, conforme mostrado na Figura 5.

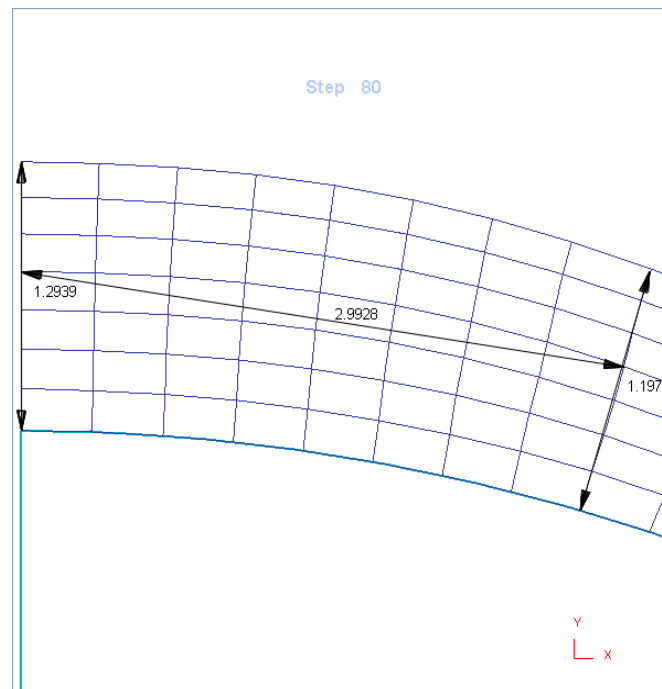


Figura 5. Os 2 primeiros pontos de medição após a simulação

RESULTADOS

A Figura 6 mostra os perfis de espessura obtidos após as simulações.

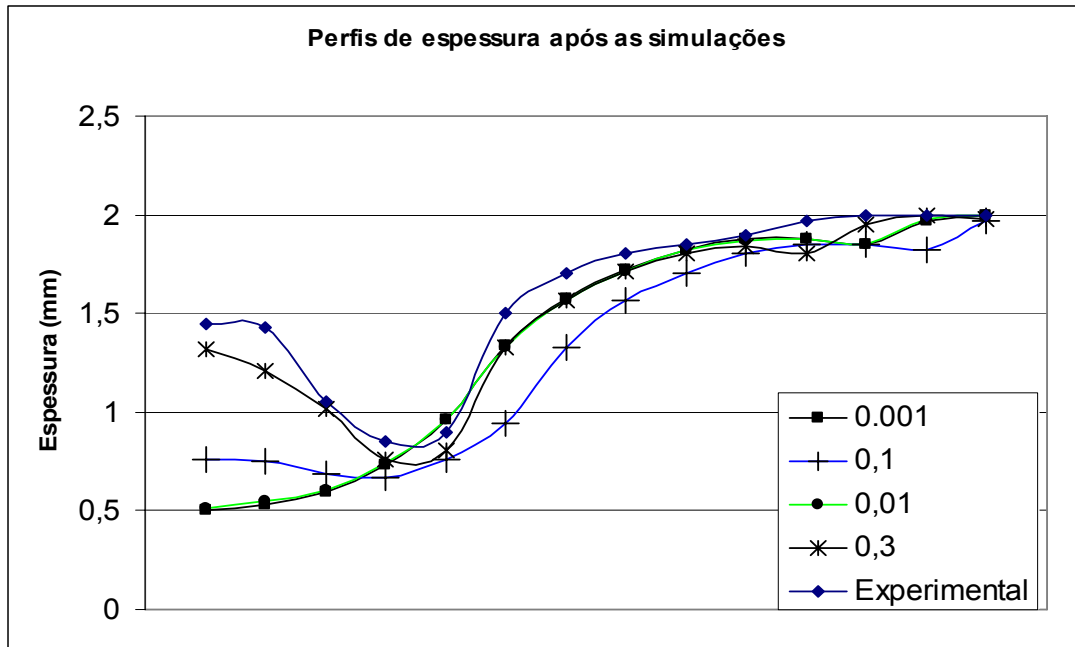


Figura 6. perfis de espessura obtidos após as simulações

A Figura 7 mostra as curvas de carga obtidas nas simulações.

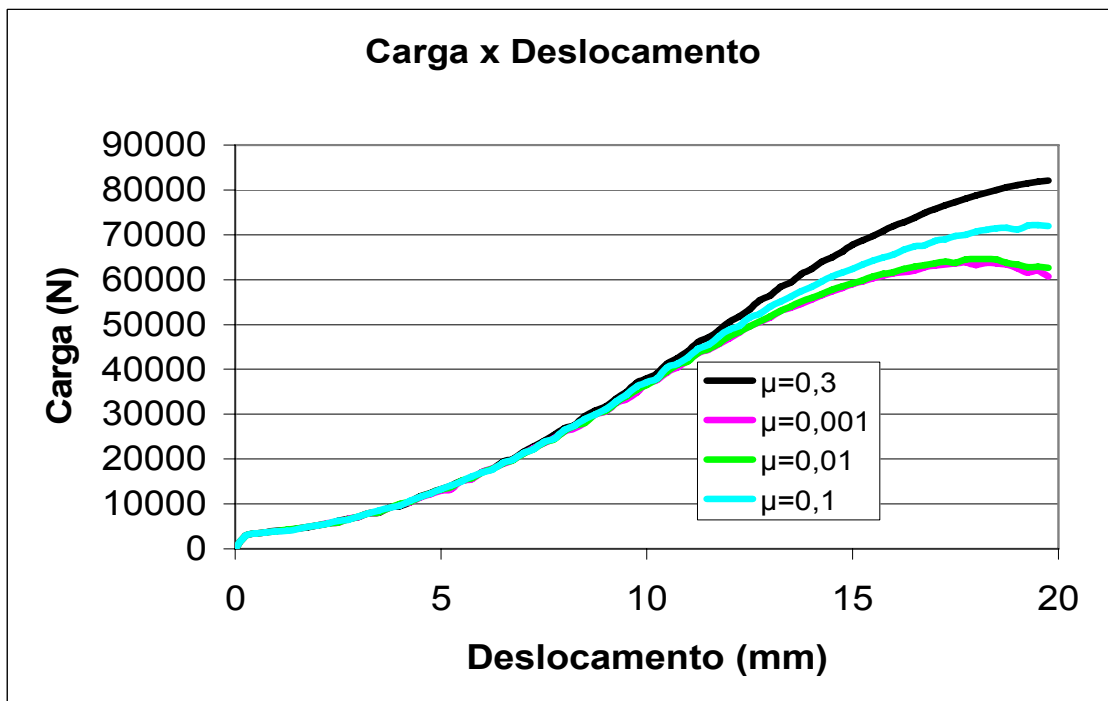


Figura 7. Curvas de carga nas simulações

DISCUSSÃO

Conforme mostrado acima, o atrito é um fator chave no ensaio, com grande influência nas dimensões finais da chapa e também na curva de carga. As curvas carga x deslocamento mostram um aumento na carga com atritos mais altos. Os resultados mostram que o valor de atrito que leva ao resultado mais próximo do observado experimentalmente é $\mu = 0,3$.

O valor do atrito também muda a posição onde a deformação máxima é observada. Essa posição corresponde à menor espessura mostrada na figura 6. Com valores de atrito muito baixos, a deformação máxima é observada no centro da chapa, que corresponde ao ponto localizado na extremidade esquerda em uma simetria axial. Na medida em que o atrito aumenta, o local onde se observa deformação máxima se distancia desse ponto, (movendo-se para a direita na simetria axial), o que sugere que a posição exata da fratura no teste é influenciada pelo atrito punção-chapa.

Vários fatores podem ter contribuído para as pequenas diferenças observadas entre a simulação e o ensaio experimental. As simplificações inerentes ao método dos elementos finitos, as condições de contorno da simulação numérica, incertezas nas medições e nas propriedades do material podem fazer com que os resultados da simulação sejam diferentes dos resultados experimentais.

CONCLUSÕES

Um modelo 2D para a simulação do ensaio Erichsen foi criado. O modelo foi capaz de prever razoavelmente as dimensões finais da chapa após o ensaio. O modelo foi usado para estudar os efeitos do atrito no perfil de espessuras e na curva de carga.

Diferentes valores de atrito levaram a diferentes perfis de espessura. O coeficiente de atrito que levou ao resultado mais próximo do experimental foi 0.3. As curvas de carga obtidas nas simulações também variam para diferentes valores de atrito. Cargas mais altas foram observadas com valores de atrito mais altos.

Acredita-se que as hipóteses simplificadoras, condições de contorno e incertezas de medição são responsáveis pelas diferenças nos perfis de espessura observados na simulação e experimentalmente.

Agradecimentos

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill, Tokyo, 1976. 774p.
- 2 PECKNER, D., BERNSTEIN, I. *Handbook of Stainless Steels*. McGraw Hill, Tokyo, 1977.
- 3 TAKUDA, H., HATTA, N. Numerical Analysis of Formability of a Commercially Pure Zirconium Sheet in Some Sheet Forming Processes, *Materials Science and Engineering*, A242, p.15-21, 1998.
- 4 COMSTOCK, R. J., KAIPING, L., WAGONER, R. H. Simulation of Axisymmetric Sheet Forming Tests, *Journal of Materials Processing Technologies*, p153-168, 2001.