

DETERMINAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DE AÇOS POR PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM

Maurício Centeno Lobão¹
Jean Bolsi²
Eduardo Alberto Fancello³
Carlos Augusto Silva de Oliveira³

Resumo

Neste trabalho estudou-se a estampabilidade de um aço baixo carbono através da Curva Limite de Conformação (CLC) e foi realizada a simulação numérica do processo de estampagem. Na determinação da CLC utilizou-se o ensaio Nakazima. Este procedimento permitiu analisar as deformações ao longo da direção de laminação na chapa e a variação da força em função do deslocamento do punção, para posterior comparação com a simulação numérica. Na simulação numérica do processo de estampagem foi utilizado o Método dos Elementos Finitos (FEA) através do código comercial *MSC Marc*. Foram analisados aspectos relacionados à capacidade de reprodução qualitativa e quantitativa da deformação ao longo da direção de laminação da chapa. Foi estudado também o efeito do coeficiente de atrito na estampabilidade. O aumento do coeficiente de atrito torna a estrição mais localizada e afasta a região de maior deformação do centro do punção devido ao contato entre ferramenta e chapa restringir o escoamento. Nas regiões próximas a falha, os resultados da simulação numérica apresentaram diferença em comparação aos experimentais, porém nas regiões mais afastadas da falha, os resultados são comparáveis qualitativamente e quantitativamente. A incorporação de modelos que considerem o dano sofrido pelo material e permitem um refinamento automático da malha a partir de determinado nível de deformação nas regiões de falha podem ser uma alternativa para diminuir esta diferença.

Palavras chave: Curva CLC; estampagem; método dos elementos finitos

41º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos - 26 a 28 de outubro de 2004 - Joinville - SC - Brasil

(1) – Mestre em Engenharia Mecânica

(2) – Aluno de Iniciação Científica, EMC, UFSC

(3) – Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina

INTRODUÇÃO

A estampagem de chapas de aço é um processo largamente aplicado nas indústrias automobilística, de eletrodomésticos e aeronáutica, dentre outras. Sua utilização se deve em geral às boas propriedades mecânicas, custos relativamente baixos, ser reciclável e principalmente pela capacidade de adquirir formas complexas.

O sucesso do processo de conformação é função da estampabilidade das chapas, do projeto da peça a ser fabricada, do estampo, das condições da superfície da chapa, da seleção e aplicação de lubrificantes e velocidade de processo e das inter-relações entre estas variáveis [Newby, 1988].

O estudo da estampabilidade dos aços pode ser realizado por diversos métodos e ensaios. Um destes, é a Curva Limite de Conformação (CLC). Através do seu emprego é possível analisar as deformações nas chapas metálicas, o que auxilia nas investigações e melhorias dos processos de estampagem.

Existem diversos ensaios para determinação da CLC. No presente trabalho foi adotado o ensaio de Nakazima, dado que este utiliza um único ferramental e sua metodologia permite a medição da distribuição de deformações ao longo dos corpos de prova. Esta característica o torna particularmente atrativo, pois permite a comparação destes valores com os correspondentes obtidos por simulação numérica, isto é, permite estudar diferentes modelos matemáticos / numéricos em relação à capacidade de simular o processo e verificar a sensibilidade de diferentes parâmetros como propriedades do material, condições de contorno e atrito, dentre outros.

A simulação numérica dos processos de conformação de chapas metálicas permite o aumento da velocidade e da qualidade do projeto do processo assim como diminuir seus custos. Portanto, a utilização de procedimentos experimentais associados à simulação numérica possibilita um melhor entendimento e compreensão dos diversos fatores que afetam o processo de conformação.

Devido aos fatores descritos acima, o objetivo deste trabalho foi o de estudar a estampabilidade do aço BC G2 RL através da CLC e realizar a simulação numérica do processo de estampagem. Na simulação numérica foi utilizado o Método dos Elementos Finitos através do código comercial *MSC Marc*. Foram analisados aspectos relacionados à capacidade de reprodução qualitativa e quantitativa da deformação ao longo da direção de laminação da chapa e o efeito do atrito.

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

A composição química do aço BC G2 RL (Norma ABNT – NBR 5007) é mostrada na tabela 1. Este foi fornecido na espessura de 0,81mm e com características de estampagem média.

Aço	C %	Mn %	P %	S %	Si %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	N %
BCG2RL	0,045	0,25	0,015	0,012	0,02	0,078	0,007	0,007	0,005	0,0035

Tabela 1- Composição química da chapa metálica.

Determinação das curvas CLC's

Para determinação da CLC foi utilizado o ensaio Nakazima [Nakazima et al., 1968] aplicado a 9 CP's com comprimento de 215 mm e larguras que variaram de 215 até 55mm em intervalos de 20 mm. O procedimento é descrito abaixo:

Inicialmente, foi marcada uma grade na chapa através de processo eletroquímico. A solução eletrolítica utilizada era composta por: 4,5 litros de água deionizada, 100 ml de ácido clorídrico, 100 ml de ácido nítrico, 90 g de cloreto de sódio e 80 g de cloreto de potássio. Após a eletrólise as chapas foram colocadas na solução inibidora (bicarbonato de sódio 20%) para cessar o processo de corrosão.

A conformação das chapas foi realizada utilizando uma máquina universal de ensaios (ZDM U 30T) adaptada. Nesta, um punção esférico é fixado na parte superior e a chapa metálica é presa entre a matriz e o prensa-chapa por um anel de fixação, na mesa inferior. O deslocamento desta em direção ao punção provoca a sua deformação. O início da estricção é indicativo do fim do processo. A estricção foi utilizada como critério de falha.

Após a estampagem das chapas foram realizadas as medições dos quadrados próximos a região de falha. Para tal, foram utilizados pedaços de papel milimetrado colados com “*contact*” junto às regiões, para servir como escala. Em seguida, foram retiradas fotografias destas regiões. A medição das deformações principais foi realizada em quatro quadrados, sendo que dois apresentavam estricção e dois próximos a estes, sem falhas. Devido as deformação dos quadrados com estricção serem substancialmente diferentes dos outros, optou-se por traçar a CLC a partir dos pontos medidos na região sem falha. Em cada um destes quadrados foram calculados os pares de deformação principal (ϵ_1 , ϵ_2).

Para traçar a curvas, optou-se por separar os pontos em dois grupos:

Grupo 1 – formado pelas chapas com larguras entre 215 e 155 mm;

Grupo 2 – formado pelas chapas com larguras entre 135 e 55 mm.

Esta separação foi realizada com o objetivo de melhor representar a parte direita da curva (grupo 1) e parte esquerda da curva (grupo 2). A CLC foi traçada usando duas linhas retas cada uma calculada por mínimos quadrados.

Simulação numérica

Na simulação foi utilizada a formulação implícita baseada numa descrição Lagrangeana atualizada. Usaram-se modelos de elementos finitos sólido, sólido de revolução e cascas. A anisotropia plástica planar foi considerada mediante o critério de plasticidade associativa de Hill e formulação hipoeelástica-plástica (para as simulações considerando isotropia, foi usada a formulação hiperelástica-plástica). A anisotropia planar foi introduzida somente na parcela plástica da deformação, por considerar a parcela elástica suficientemente pequena em relação a primeira.

As propriedades do material foram obtidas por ensaios de tração e anisotropia.

Para simular contato o código utiliza um esquema de ativação direta das restrições ao deslocamento normal em função da localização das superfícies em contato e o atrito é modelado a partir de uma regularização do modelo de Coulomb. Estas condições de interface foram impostas entre os corpos rígidos (matriz, prensa-chapa, punção) e os corpos deformáveis (chapa metálica).

No caso dos elementos sólidos, o código MARC permite o uso de modos especiais de deformação para evitar travamento devido as grandes deformações plásticas e funções de forma especiais para capturar adequadamente o modo de flexão. O punção, matriz e prensa-chapas foram considerados sólidos rígidos definidos geometricamente por superfícies analíticas de tipo NURB. Os intervalos de tempo para aproximar os corpos rígidos do corpo deformável, deslocar o punção em direção a chapa e recuar o mesmo, foram definidos de forma a reproduzir o efeito mola (“*springback*”) presente no processo.

As condições de contorno aplicadas nos modelos foram de simetria e engaste, mostrado na Figura 1. Nesta última, o fixador (“drawbead”) cumpre a função de engaste da chapa, impossibilitando o deslocamento da mesma. Isto permite que a chapa inicialmente quadrada (107,5 mm de lado) assuma o formato de um quarto de circunferência com raio de 82,5 mm, Figura 2. Com esta condição se perde a possibilidade da chapa deslizar através do fixador.

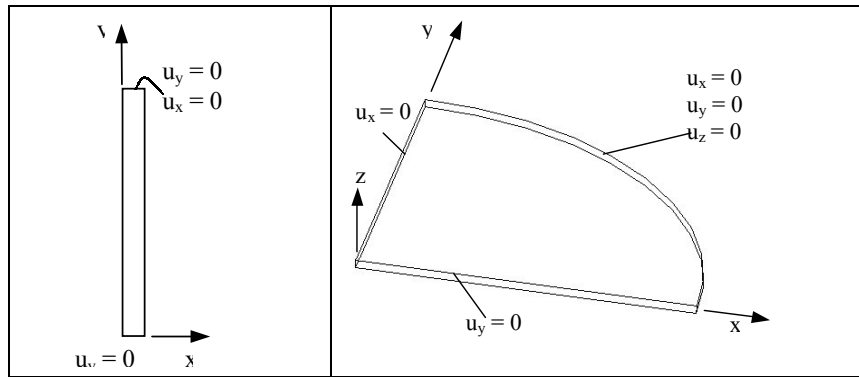


Figura 1 Condições de contorno aplicadas ao modelo.

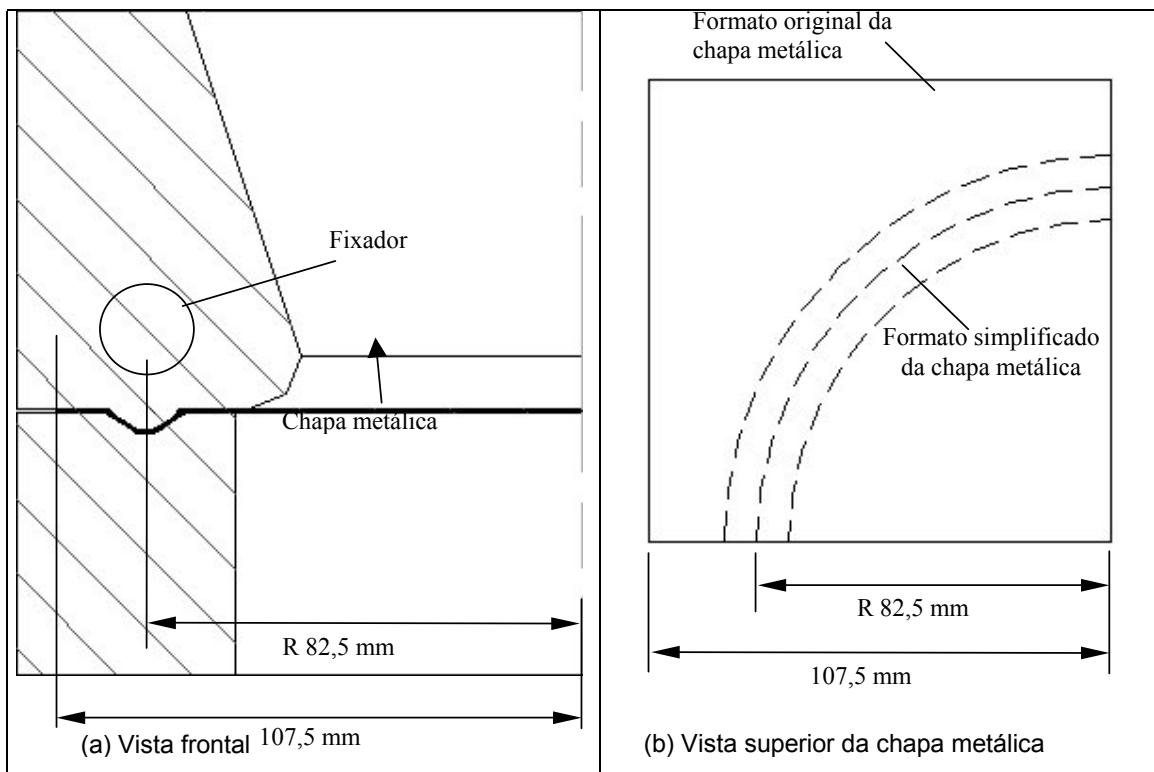


Figura 2 Formato original da chapa e o utilizado na simulação devido à substituição do fixador (“drawbead”) por uma condição de contorno.

São apresentados 3 casos de simulação numérica, como mostrados a seguir:

1. Simulação da conformação de uma chapa isotrópica sendo comparadas as deformações totais principais ao longo da chapa na direção de laminação obtidas com elementos do tipo sólido de revolução, casca e sólido de revolução, casca e sólido 3D sem atrito.

2. Simulação do efeito do atrito nas deformações ao longo de uma chapa isotrópica. Foi estudado o coeficiente de atrito de 0 a 0,4 com variação de 0,1.

3. Simulação numérica com valores experimentais das deformações principais reais, máximas ε_1 , ao longo de uma linha, e a variação da força em função do deslocamento exercido pelo punção. Foram utilizados elementos do tipo sólido 3D, pois é possível considerar a anisotropia do material.

Nestes 3 casos foram utilizadas as propriedades plásticas, Tabela 2, e a curva de encruamento obtidas em ensaio de tração (Lobão, 2003). Nos casos 1 e 2 o deslocamento total do punção foi de 35 mm. Nos modelos de casca o valor da espessura definida foi de 0,81 mm, enquanto que nos modelos de sólido de revolução e sólido 3D, a espessura foi definida através da malha.

Propriedades	Ortotrópico		Propriedades	Isotrópico
E_0° (MPa)	200231		E (MPa)	202803
E_{45° (MPa)	200231		ν	0,3
E_{90° (MPa)	200231		Pe	175
ν_{12}	0,3			
ν_{13}	0,3			
ν_{23}	0,3			
G_{12} (MPa)	77012			
G_{13} (MPa)	77012			
G_{23} (MPa)	77012			
Pe_0° (MPa)	179			
Pe_{90° (MPa)	175			
r_0°	2,18			
r_{45°	1,204			
r_{90°	2,248			

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço BC G2 RL.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ensaio Nakazima permitiu obter a CLC através da utilização de chapas com diferentes larguras e um único ferramental. As chapas com larguras maiores permitem obter pontos que formam o lado direito da curva (ε_1 , ε_2 positivos). Nas larguras menores, ocorrem deformações ε_1 negativas (lado esquerdo da curva).

Para avaliar a repetibilidade do ensaio, as CLC's obtidas nos pontos sem falhas em três ensaios diferentes são mostradas na Figura 3.

Existem diversos fatores que podem estar associados a estas variações, como: dificuldade de controlar as deformações finais da chapa, centralizar a chapa de forma idêntica ao ensaio anterior, alterações no ferramental devido ao desgaste, escolha dos quadrados a serem medidos, entre outros.

A dispersão entre os resultados dos ensaios com relação à altura das CLC's no eixo das deformações máximas é devida principalmente à dificuldade de se

controlar a deformação final das chapas durante o processo de estampagem. Isto é, quando a chapa começa a sofrer estricção, o intervalo de tempo entre o operador observar a diminuição da força de estampagem e parar o processo, ocasiona uma maior ou menor deformação final da chapa. Porém, as formas das curvas não sofreram grandes variações, garantindo uma boa confiabilidade do processo de determinação das CLC's. Outros autores também observaram este comportamento [Goodwin, 1968], [Keeler, 1971], [Renó, 1985], [Newby, 1988].

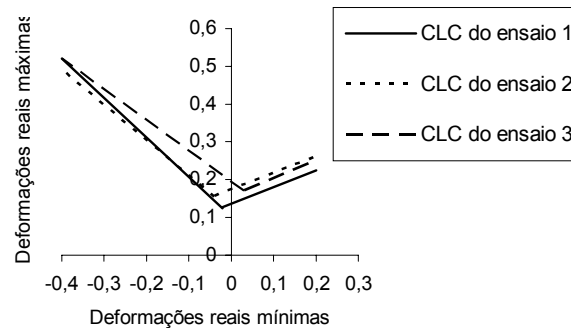


Figura 3 Comparação entre as CLC's obtidas em 3 ensaios.

A curva CLC do aço BC G2 RL pode ser observada na Figura 4.

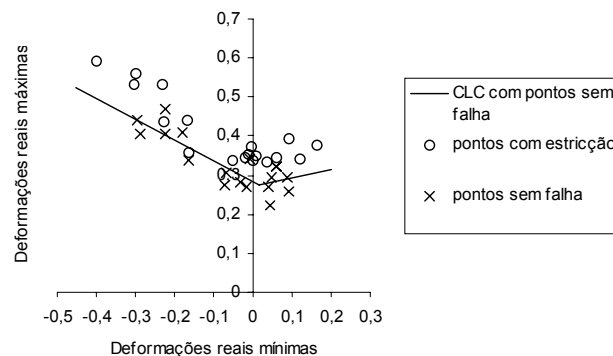


Figura 4 Curva de estampabilidade do aço BC G2 RL com fixador e sem adição de lubrificante.

Simulação numérica do processo de estampagem

Os modelamentos numéricos realizados são descritos a seguir:

Caso 1: Comparação das deformações totais principais ao longo de chapa isotrópica na direção de laminação obtidas com elementos do tipo sólido de revolução, casca e sólido 3D sem atrito. Os resultados são mostrados na Figura 5 e Tabela 3.

A partir desta Figura, verifica-se que as deformações principais máximas na chapa alcançam o maior valor nas regiões próximas ao centro do punção para os três casos, devido a ocorrer uma maior deformação do material nesta região (maior profundidade de estampagem). Na "boca" da matriz há uma diminuição das deformações máximas, uma vez que, o volume de material escoado para dentro da matriz aumenta proporcionalmente com a profundidade de estampagem.

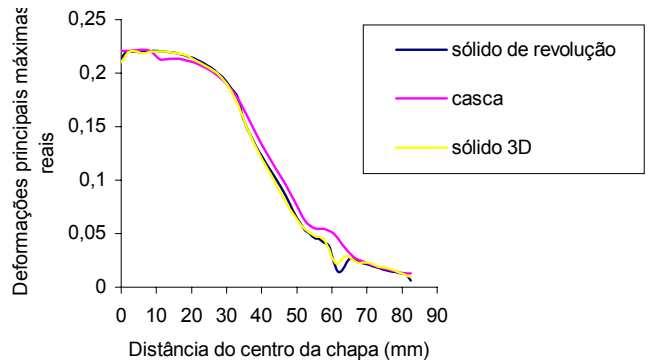


Figura 5 Deformações totais principais ao longo da chapa na direção de laminação obtidas com elementos do tipo sólido de revolução, casca e sólido 3D. Sem atrito.

Tipo de elemento	Sólido de revolução	Casca	Sólido 3D
Tempo (s)	52	1509	28311

Tabela 3: Tempo de processamento requerido. Sem atrito.

Os modelos utilizando elementos do tipo sólido de revolução e sólido 3D apresentaram resultados próximos. Porém, observou-se uma diferença nos valores das deformações próximas ao engaste, devido a um maior refinamento do primeiro nesta região, tornando a análise mais precisa. Tentou-se um refinamento do sólido 3D, porém não foi possível obter a convergência devido a problemas de contato.

No modelo utilizando elementos de casca, nas regiões próximas ao centro da chapa, ocorreram perturbações numéricas ocasionadas por uma razão de aspecto ruim dos elementos, isto é, o quociente entre a maior e menor dimensão do elemento é muito elevado. Isto provoca problemas no cálculo do determinante do Jacobiano durante o mapeamento do elemento para o domínio padrão. Além disso, apresentou valores maiores na “boca” da matriz o que não era esperado.

Caso 2: O resultado acima, mostra que os elementos utilizados nos modelos estão dentro de uma faixa admissível de variação, isto é, não afetam significativamente os resultados. Assim, com o objetivo de analisar a influência do atrito nas deformações ao longo de uma chapa isotrópica, foi escolhido o modelo de revolução em função do seu custo computacional menor. Foram estudados coeficientes de atrito de 0 a 0,4 com variação de 0,1. Os resultados são mostrados na Figura 6.

O crescimento dos valores dos coeficientes de atrito ocasionaram um deslocamento para regiões acima do centro do punção e um acréscimo nos maiores valores de ϵ_1 . Isto é devido ao atrito dificultar o escoamento do material para partes adjacentes. Ou seja, as partes da chapa que estão em contato com o punção ou matriz ou prensa-chapa tem dificuldade de escoar para as regiões que não estão em contato, tornando as deformações mais heterogêneas e aumentando as deformações próximas à região de separação entre punção e chapa.

Caso 3: Comparação entre os resultados da simulação numérica e experimentais das deformações principais reais máximas ϵ_1 ao longo de uma linha e a variação da força em função do deslocamento do punção. Adicionalmente, considerou-se que o deslocamento total do punção foi de 42mm e o coeficiente de atrito 0,2. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 7 e 8.

Nas análises das deformações principais máximas reais, os valores obtidos através do procedimento experimental apresentam diferenças em comparação

àqueles obtidos numericamente, principalmente nas regiões de falha (fratura ou estrição). Nestas regiões existe localização das deformações junto à ocorrência de dano no material (Figura 7). Porém, longe da região de estrição, os valores de deformação numérica e experimental são comparáveis.

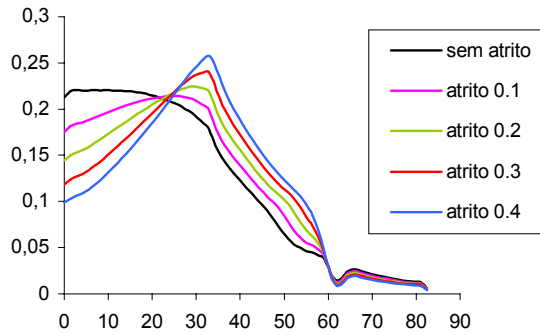


Figura 6: Comparação entre as deformações totais principais ao longo da chapa na direção de laminação com diferentes coeficientes de atrito.

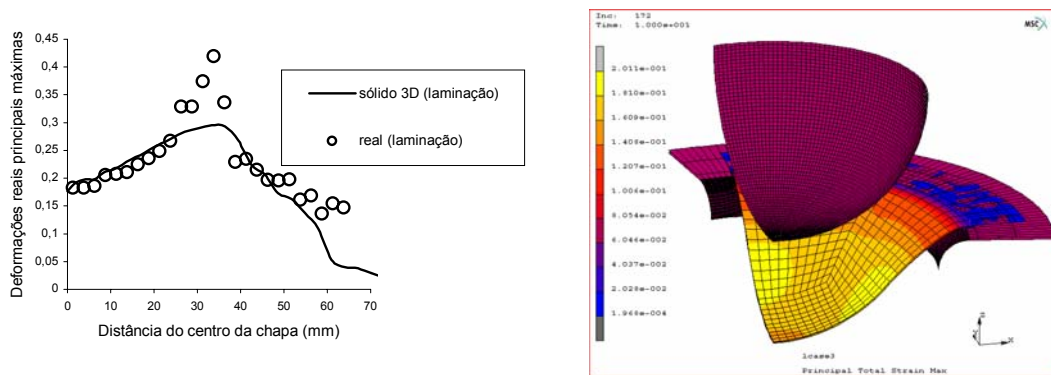


Figura 7 Comparação das deformações principais máximas reais na chapa (ϵ_1) obtidas através de modelamento numérico e procedimento experimental.

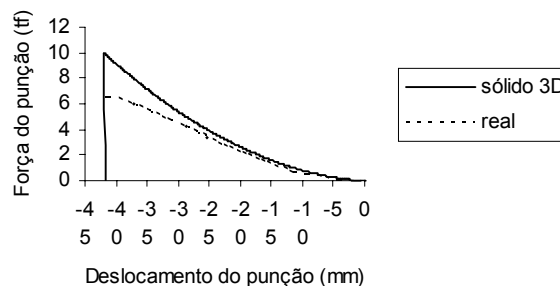


Figura 8 Comparação da força x deslocamento do punção obtido através de modelamento numérico e procedimento experimental.

Na análise da curva força *versus* deslocamento do punção observa-se que a diferença entre os resultados experimentais e numéricos aumenta à medida que a profundidade de estampagem e a força aumentam. Isto é interpretado como sendo uma consequência das micro trincas que surgem no material durante o processo

real, as quais diminuem a taxa de crescimento da força de estampagem, Figura 8. Por isto, a utilização de modelos mais complexos, capazes de admitir o dano do material e capturar localizações de deformação tornam-se atrativos.

CONCLUSÕES

✓ O ferramental projetado para realização do ensaio Nakazima permitiu a determinação da CLC do aço BC G2 RL.

✓ Na análise de uma chapa com características isotrópicas o modelo utilizando elementos do tipo sólido de revolução mostra-se particularmente interessante devido a um menor custo computacional e uma boa precisão dos resultados quando comparados aos demais elementos.

✓ A análise numérica da influência do atrito mostra que o acréscimo deste altera a distribuição das deformações principais máximas reais na chapa. O valor máximo destas deformações aumenta e passa a concentrar-se na região onde não existe contato entre chapa e ferramenta (matriz, prensa-chapa e punção). Pois, o atrito existente entre ferramenta e peça restringe o escoamento do material.

✓ A comparação entre os resultados experimentais e numéricos apresenta uma certa dispersão nas regiões de estrição da chapa, visto que, os modelos utilizados nas simulações não incorporam o dano sofrido pelo material e não permitem o refinamento da malha a partir de determinado nível de deformação, dificultando uma melhor precisão nos resultados. Contudo, em regiões menos críticas, os resultados mostram-se comparáveis quantitativamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao professor Lírio Schaefer pela impressão das grades nas chapas, a empresa Brasmetal Waelzholz S.A pelo fornecimento do material para estudo e a Capes/ CNPq pelo fornecimento das bolsas de estudo dos alunos Mauricio C. Lobão e Jean Bolsi

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GOODWIN, G. M.; Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop; La metallurgia italiana 8; p. 767-774; 1968.
- KEELER, S. P.; Properties related to forming; Sheet metal industries; Understanding sheet metal formability III; p. 511-517; 1971.
- KEELER, S. P.; Predicting forming limits; Sheet metal industries; Understanding sheet metal formability IV; p. 589-618; 1971.
- KEELER, S. P.; Die design and lubrication; Sheet metal industries; Understanding sheet metal formability V; p. 687-699; 1971.
- LOBÃO, M. C.; Determinação de Curvas Limite de Conformação por Procedimentos Experimentais e Simulação Numérica do Processo de Estampagem; Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica; Universidade Federal de Santa Catarina; Março 2003;
- MSC Marc Volume A. Theory and user information. Version 2001.
- NAKAZIMA, K.; KIKUMA, T.; HASUKA, K.; Study on the formability of steel sheets; Yawata Technical Report; p. 111-141; Setembro 1968.
- NEWBY, J. R.; Formability of Steel Sheet; Metals Handbook; Forming and forging; 9ª edição; vol. 14; p. 545-560; 1988;
- RENÓ, R. T.; Conformabilidade e textura de chapas finas a frio de aço acalmado ao alumínio; São Paulo. Dissertação de Mestrado; EPUSP; p. 206; 1985.

STEEL FORMABILITY DETERMINATION BY EXPERIMENTAL PROCESS AND NUMERICAL SIMULATION OF THE FORMING PROCESS

Maurício Centeno Lobão
Jean Bolsi
Eduardo Alberto Fancello
Carlos Augusto Silva de Oliveira

Abstract

This work is concerned with the experimental determination of the Forming Limit Diagram (FLD) and the numerical simulation of the forming process. The forming limits diagram is determined by Nakazima's test, which makes it possible to obtain the different strain fields present in the forming process using only one tool rack. It can be used to determine the distribution of the strains in the laminated direction of the sheet and the variation of force as a function of the punch displacement. Finally, the FLD's are compared with the numerical simulation results. The steel used in the experimental process is BC G2 RL. The numerical simulation of the forming process using the Finite Element Method (FEM) is performed using *MSC Marc*'s software. It can be used qualitatively and quantitatively reproduce the strains on steel sheet and the influence of the friction coefficient. The analysis performed using shell elements shows some differences compared with axisymmetric and 3-D solid elements. The differences are mainly, near the area of punch center this is because, the elements near this area have bad aspect ratios. Increasing the friction coefficient makes the necking more localized and it moves the area of higher strains away from the punch center. This is because of the contact between the sheet and the tool, which restricts the yield of material in these areas. Comparing the numerical simulation to the experimental results shows that there is a difference in the failure region. However, moving away from the failure region the results are qualitatively and quantitatively similar. The incorporation of models that account for materials damage and permit an automatic refinement of the failure areas tends to decrease this difference.

Keywords: forming limits diagram, numerical simulation of the forming process, finite element method.