

PREVISÃO TEÓRICA DA CURVA CLC E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE CHAPAS DO AÇO DC 06 OBTIDOS COM ENSAIOS DE NAKAZIMA E MARCINIAK

José Divo Bressan¹, dem2jdb@joinville.udesc.br

Luiz M. V. Tigrinho², tigrinho@ensitec.com.br

Ricardo Adriano dos Santos²,

Paulo Marcondes², marcondes@ufpr.br

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Tecnológicas - UDESC - Campus Universitário, 89.223-100 – Joinville/SC – Brasil.

² Departamento de Engenharia Mecânica - Centro Politécnico – Universidade Federal do Paraná - Caixa Postal 19011, 81531-990 – Curitiba – Paraná – Brasil.

Resumo: O presente trabalho examina a previsão teórica da Curva Limite de Conformação de chapas devido a estricção local, CLC-E, do modelo D-Bressan em comparação com curvas experimentais de chapas de aço DC 06 DIN10152. Os ensaios experimentais para obtenção das curvas limites de deformação foram realizados com dois métodos: Nakazima e Marciniak. Historicamente, a conformabilidade de chapas metálicas foi avaliada por meio de ensaio simples de copo como o ensaio de Swift, Erichsen ou Fukui. Posteriormente, o conceito de Curva Limite de Conformação, CLC, foi desenvolvido experimentalmente para avaliar a conformabilidade de chapas metálicas. O “Mapa das Deformações Limites de Conformação, MDLC” ou “Diagrama Limite de Conformação” apresenta as deformações verdadeiras principais na superfície da chapa, ε_1 e ε_2 , existentes em pontos críticos da chapa durante os métodos de ensaios de laboratório ou no processo produtivo, ou seja, mostram a CLC. Dois tipos de curvas limites de ruptura podem ser traçadas graficamente no mapa MDLC: curva limite da estricção local CLC-E e a curva limite de fratura CLC-F. Vários resultados experimentais do ensaio de tração simples e das curvas limite de conformação do aço DC 06 serão apresentados e comparados com os valores teóricos previstos. O aço DC 06 apresentou o coeficiente de encruamento médio resultante dos ensaios de tração simples de aproximadamente $n=0,235$ para as três direções 0°, 45° e 90° em que o material foi ensaiado. O coeficiente de anisotropia normal, parâmetro médio R, obtido foi de 2,098. A teoria D-Bressan para previsão da curva limite de conformação devido ao surgimento da estricção local, CLC-E, em chapas metálicas foi utilizada para analisar a influência das propriedades mecânicas de plasticidade como o coeficiente de encruamento, o coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação, a anisotropia plástica e o encruamento inicial na conformabilidade de aços. O modelo D-Bressan utiliza o conceito da evolução do gradiente de deformação local λ a partir do defeito na espessura μ , ou seja, das ondulações na espessura da chapa, no instante de carga máxima. A curva limite de conformação foi obtida com o auxílio de um software próprio desenvolvido e tração simples. As curvas experimentais CLC-E do aço DC 06 estão em boa concordância com os valores teóricos previstos.

Palavras-chave: Curva limite de conformação, Mapa Limite de Conformação, modelo matemático, chapa aço DC 06, gradiente de deformação local.

1. INTRODUÇÃO

A conformação de chapas metálicas envolve processos de corte e deformação em que uma chapa fina plana ou “blank” é cortada e conformada por meio de ferramental ou matrizes e punções, sob a ação de operações de estiramento biaxial, embutimento e dobramento para fabricar a peça final sem a ocorrência de rupturas ou defeitos superficiais visíveis. Na grande maioria dos casos da indústria metal-mecânica o processo é realizado a frio, porém, alguns tipos de processos especiais são realizados também a quente como a conformação superplástica. As principais variáveis que afetam o processo de conformação de chapas são: o comportamento elástico e plástico da região deformada, a trajetória da deformação plástica, as propriedades do material antes da conformação, a interação entre a ferramenta e a peça, a geometria do ferramental, as propriedades do produto final, o equipamento de conformação e o tipo de processo de produção (Mellor, 1981; ASM Handbook, 1988). Portanto, a capacidade de produzir uma peça com sucesso ou a conformabilidade da chapa é um assunto importante e complexo, incluindo parâmetros do material e do processo.

Atualmente, a pesquisa em conformabilidade de chapas metálicas é um tema que está relacionado com a otimização do processo, do produto final e com o controle de qualidade da peça conformada final. A conformabilidade de chapas

tem sido avaliada experimentalmente por meio do ensaio Nakazima de laboratório que determina e traça a curva limite de conformação, CLC, a qual é considerada um parâmetro essencial do material e um dado de entrada necessário nas simulações numéricas com softwares de elementos finitos.

O “Mapa das Deformações Limites de Conformação, MDLC” ou Diagrama Limite de Conformação apresenta a curva CLC que é a curva traçada obtida das deformações plásticas principais na superfície da chapa, ϵ_1 e ϵ_2 , que estão situadas em pontos críticos próximos dos locais de ruptura da chapa, tanto para os ensaios de conformação de laboratório como para obtidos em processos de fabricação na prensa. O mapa de conformação MDLC é geralmente dividido em duas regiões principais: o quadrante positivo e o quadrante negativo das deformações plásticas principais. Na região de deformações positivas, o processo de deformação da chapa é por estiramento biaxial ou de trajetória positiva da deformação α ($= d\epsilon_2/d\epsilon_1$) que corresponde a estado de tração biaxial. Na região positiva, a trajetória da deformação plástica α situa-se na faixa entre a deformação biaxial igual, $\alpha = 1$, e o estado de deformação plana, $\alpha = 0$.

Dois tipos de mecanismos de ruptura podem ocorrer nas peças conformadas: estricção localizada visível na superfície e ruptura por cisalhamento. Portanto, dois tipos de curvas CLC podem ser traçadas no mapa MDLC: curva limite da estricção local visível, CLC-E, e curva limite de fratura por cisalhamento, CLC-F.

No projeto e desenvolvimento de uma nova peça por conformação de chapas, as curvas CLC-E e CLC-F são informações importantes do material e são necessárias para a fabricação com sucesso da peça tanto na fase da simulação numérica com software comercial como na fase da operação de try-out na prensa. Portanto, a curva CLC-E é um parâmetro essencial do material da chapa e dado de entrada nas simulações com software de elementos finitos, mas requerem um tempo experimental de laboratório grande, equipamento especializado e vários corpos de prova.

O objetivo do presente trabalho é apresentar e comparar a previsão teórica da Curva Limite de Conformação de chapas devido a estricção local, CLC-E, do modelo D-Bressan, a partir das propriedades da tração simples, com as curvas experimentais de chapas de aço DC 06 obtidas por meio dos ensaios de laboratório de Nakazima e Marciniak.

2. MODELAMENTO MATEMÁTICO DA CURVA CLC-E

Vários modelamentos matemáticos para a previsão da curva limite de estricção local visível, CLC-E, e o limite de ruptura por cisalhamento na conformação de chapas metálicas, a partir de parâmetros do material e do processo facilmente medidos em laboratório, tem sido apresentado na literatura científica. Um dos primeiro modelo analítico para previsão da estricção local foi o modelo proposto por Hill (1952) em 1952. O autor investigou somente o quadrante negativo do mapa MDLC, afirmando que o quadrante positivo não apresentava as condições matemáticas necessárias, do ponto de vista da teoria da plasticidade, para o surgimento da estricção local visível na superfície da chapa: direção de alongamento zero ou direção de deformação plástica normal nula. Esta é a condição para a ocorrência de descontinuidade na velocidade de cisalhamento na conformação de chapas.

Embora as observações experimentais de Keeler (1965) em laboratório nos ensaios de estiramento biaxial de chapas metálicas mostraram a real ocorrência da estricção local ou uma mini-canaleta visível na chapa antes da ruptura final, a restrição matemática para o quadrante positivo do mapa MDLC somente foi resolvida mais tarde em 1967 com a proposta de modelamento teórico apresentado por Marciniak e Kuczynski (1967), modelo M-K. Estes autores propuseram que o surgimento da estricção local na superfície da chapa sob condições de estiramento biaxial no quadrante positivo era devido a um defeito geométrico inicial f na espessura da chapa, na forma de uma mini-canaleta, que força a trajetória da deformação plástica a evoluir gradualmente para a condição de estado plano de deformação, e portanto, a estricção local torna-se matematicamente admissível ocorrer. Enquanto o estado plano de deformação dentro do defeito ou depressão na espessura não ocorrer, a chapa continuaria a deformar plasticamente sem ocorrer a estricção local. Embora o modelo M-K tem um enfoque matemático rigoroso e de acordo com a teoria da plasticidade, os resultados teóricos para curva CLC-E é muito sensível ao tamanho do defeito na espessura f e tem mostrado discrepâncias consideráveis em relação aos resultados experimentais. Porém, este modelo tem proporcionado um avanço e um impulso substancial nas investigações teóricas dos limites de deformação na conformação de chapas, principalmente na mecânica da conformação e na influência da microestrutura do material e teoria da plasticidade. Hutchinson e Neale (1977) estenderam este modelo para cobrir todo o mapa MDLC, quadrantes positivo e negativo, considerando todas as possíveis orientações do defeito inicial ou da mini-canaleta inicial.

Vários outros autores propuseram modelamentos baseados na teoria da bifurcação das deformações (Storen e Rice, 1975) e em critérios de ruptura definido em função da evolução da microestrutura do material: nucleação, crescimento e coalescência dos microporos existentes dentro da estricção local (Ghosh, 1976; Needleman e Triantafyllidis, 1978). Portanto, este ultimo modelo analisou teoricamente a curva superior do limite de deformação ou a curva CLC-F que geralmente esta situada acima da curva da estricção local no mapa MDLC. O presente autor (Bressan, 1982; Bressan e Barlat, 2010) tem proposto um modelo fenomenológico baseado no mecanismo de ruptura por cisalhamento na direção da espessura da chapa, conforme observado experimentalmente. A estricção local ou a ruptura por cisalhamento é antecipado ocorrer na direção da espessura e direção de cisalhamento puro quando a tensão de cisalhamento atinge um valor critico que é uma propriedade do material.

2.1 Modelo Matemático D-Bressan da CLC-E

O processo da formação inicial e desenvolvimento da estricção local em chapas metálicas, a partir de um defeito

inicial na espessura tem sido investigado pelo presente autor, usando o conceito de desenvolvimento de gradiente de deformação localizada (Bressan e Williams, 1985). A estricção local visível surge da evolução de um defeito inicial na espessura da chapa que é considerada ter variações levemente ondular das rugosidades da chapa: ondulações das rugosidades. Este defeito inicial é definido como sendo uma variação na espessura da chapa e é caracterizado pelo parâmetro normalizado do gradiente inicial da área transversal $\mu = (1/A_0)(dA_0/dx)$, onde A_0 é a área inicial da secção transversal na espessura e x é o eixo de coordenada na direção perpendicular à estricção no plano da chapa. Define-se também o gradiente de deformação local na chapa como sendo $\lambda = \partial \bar{\epsilon} / \partial x$, onde $\bar{\epsilon}$ é a deformação equivalente.

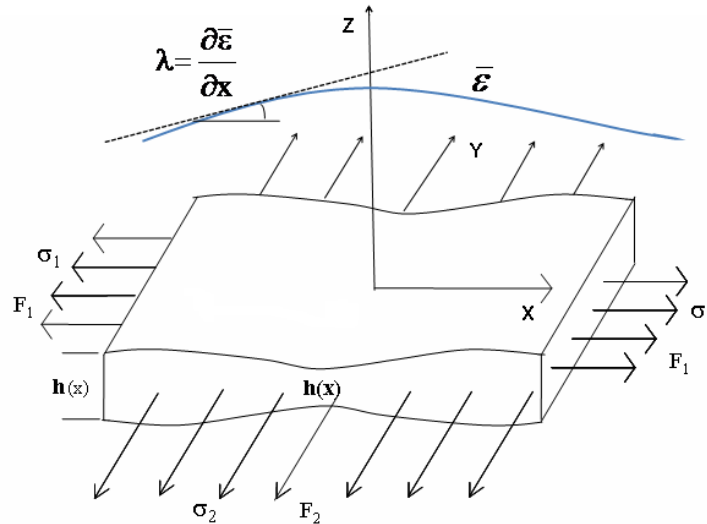


Figura 1. Modelo D-Bressan: elemento da chapa com estricção local e definição do gradiente λ .

Na presente análise, assume-se que espessura da chapa varia de acordo com o perfil das ondulações das rugosidades superficiais, ou seja, $h_0 = h_0(x)$ é o perfil da espessura na direção do eixo coordenada x . Portanto (Bressan, 2010),

$$\mu = \frac{1}{A_0} \frac{dA_0}{dx} = \frac{1}{h_0} \frac{dh_0}{dx} = \frac{1}{h_0} \tan \theta \quad (1)$$

onde $\tan \theta$ é a inclinação do perfil da ondulação da rugosidade superficial da chapa, x é o eixo de coordenada perpendicular a estricção local.

A presente análise considera a deformação de uma chapa metálica fina cujo material exibe comportamento plástico com encruamento devido a deformação plástica e a taxa de deformação. Portanto, a equação constitutiva da tensão equivalente do escoamento plástico corrente é,

$$\bar{\sigma} = k(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \dot{\bar{\epsilon}}^M \quad (2)$$

onde k é o coeficiente de resistência, ϵ_0 é o encruamento inicial, $\bar{\epsilon}$ é a deformação equivalente, n é o coeficiente de encruamento, $\dot{\bar{\epsilon}}$ é a taxa de deformação, M é o coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação.

No desenvolvimento da presente análise, utilizou-se o critério de escoamento plástico proposto por Hill (1979) que considera o material da chapa exibindo coeficiente da anisotropia normal média R ,

$$\bar{\sigma}^m = \frac{1}{2(1+R)} [(1+2R)|\sigma_1 - \sigma_2|^m + |\sigma_1 + \sigma_2|^m] \quad (3)$$

onde m também é um parâmetro da anisotropia normal, $m = 1,14 + 0,86 R$ (Bressan, 1983), $m=2$ para $R>1$, σ_1 e σ_2 são as tensões principais no plano da chapa como mostrado na Fig.1.

A equação que governa a formação inicial e crescimento da estricção local a partir da imperfeição inicial na espessura μ nos processos de conformação de chapas metálicas no quadrante positivo é dado por (Bressan et al., 1983),

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \bar{\epsilon}} = \frac{\mu}{M} + \frac{1}{M} \left\{ \frac{1}{(1+\alpha)z} - \frac{n}{(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})} \right\} \lambda \quad (4)$$

onde $\lambda = \partial \bar{\epsilon} / \partial x$ é o gradiente de deformação na estrição local, $\alpha = \partial \epsilon_2 / \partial \epsilon_1$ é a trajetória da deformação e z é a subtangente crítica da estrição local,

$$z = \frac{[2(1+R)]^{1/m}}{2(1+\alpha)} \left\{ \frac{|1-\alpha|^{m/(m-1)}}{(1+2R)^{1/(m-1)}} + |1+\alpha|^{m/(m-1)} \right\}^{\frac{m-1}{m}} \quad (5)$$

A Eq. (4) pode ser resolvida analiticamente ou numericamente para obter-se a descrição detalhada da evolução do gradiente de deformação durante os processos de conformação de chapas metálicas. Variando-se a trajetória da deformação α , a curva limite de deformação da estrição local ou CLC-E pode ser calculada, assumindo que o gradiente λ atinge um valor crítico $\lambda_{crit} = 20$ ou quando $\lambda/\mu = (\lambda/\mu)^* = \text{constante} \cong 50$.

Para o quadrante negativo do mapa de conformação MDLC, região de embutimento profundo, a equação que governa o surgimento da estrição local é dada por (Bressan e Williams, 1985),

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \bar{\epsilon}} = \frac{\mu}{M} + \frac{1}{M} \left\{ \frac{1}{z} - \frac{n}{(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})} \right\} \lambda \quad (6)$$

Recentemente, o presente autor (Bressan, 2009) reformulou o enfoque teórico visto acima com base na análise teórica da estabilidade da deformação da Eq.(4) e (6) e em resultados experimentais, afirmando que o modelo da evolução do gradiente local de deformação se aplica somente a partir do ponto do surgimento da instabilidade plástica na chapa ou início da estrição difusa durante o processo de deformação plástica. Supõem-se que antes da ocorrência da estrição difusa ou da instabilidade plástica, o processo de deformação na chapa é homogêneo em toda a sua extensão e nenhum gradiente local severo de deformação ou processo incipiente de estrição localizada visível é permitido devido ao encruamento do material dentro da incipiente estrição, ou seja, $\lambda = 0$ até o ponto de instabilidade plástica, similar ao que ocorre no processo de deformação na tração simples até o ponto de carga máxima.

As deformações na superfície da chapa no início da estrição difusa podem ser calculadas assumindo-se que as tensões biaxiais principais no plano da chapa são devido as forças principais F_1 e F_2 . A condição necessária para atingir a instabilidade da deformação plástica da chapa sob estado plano biaxial de tensões é que a maior força F_1 atinja um máximo (Negróni et al., 1968), também conhecido como critério da carga máxima. Portanto, a maior deformação plástica verdadeira no instante do surgimento da estrição difusa ou instabilidade em chapas metálicas é calculada por,

$$\epsilon_{1d} = n - \frac{\epsilon_0}{z_d} \quad (7)$$

onde $z_d (= (1+\alpha)z)$ é a subtangente crítica para a estrição difusa (Bressan e Williams, 1985). Após este estágio na trajetória da deformação na conformação da chapa metálica, o modelo da evolução do gradiente local de deformação que culmina na estrição local visível pode ser utilizado. As deformações limites de estrição local na chapa ϵ_1^* podem ser calculadas por meio do somatório das deformações até a estrição difusa ϵ_{1d} acrescida das deformações do estágio subsequente de deformações não uniformes na chapa até a estrição local visível ϵ_{1nu} , isto é,

$$\epsilon_1^* = \epsilon_{1d} + \epsilon_{1nu} \quad (8)$$

onde a deformação não uniforme ϵ_{1nu} é calculada utilizando-se a Eq. (4) e (6) a partir do ponto da estrição difusa na chapa, ou seja, assumindo-se no modelo que a pré-deformação na chapa é igual ao valor teórico da previsão da deformação de estrição difusa pelo critério de carga máxima, isto é, $\epsilon_0 = \epsilon_{1d}$ e $\mu = \mu_{in}$ na Eq. (4) e (6).

3. MATERIAL E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material da chapa usada no presente trabalho foi chapa de aço DC 06 DIN10152, classificado como aço de alta estampabilidade, de espessura 0,71 mm e na condição de laminado a frio (Santos et al., 2007).

Os ensaios de tração simples foram realizados de acordo com as normas ABNT NBR 6673 e ABNT NBR 8164, ASTM E517, usando uma velocidade da garra de aproximadamente 10mm/min. As propriedades mecânicas do material obtidas experimentalmente estão resumidas nas Tabela 1. Os ensaios de tração simples, realizados com os corpos de prova retirados formando ângulos de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação da chapa, forneceram informações relativas às propriedades mecânicas do material, como o limite de resistência (LR), tensão limite de escoamento (LE) e

alongamento (A). Estas propriedades mecânicas caracterizam o material da chapa quanto aos seus valores limites em termos de comportamento plástico na tração simples e são utilizados no controle de qualidade. Também foram obtidos dos ensaios de tração simples o coeficiente de anisotropia plástica r (coeficiente de Lankford) e coeficiente de encruamento n do material. O coeficiente de anisotropia normal média R foi calculado a partir dos valores de r_0 , r_{45} e r_{90} . Do ponto de vista prático, estes dois parâmetros são importantes para caracterizar o material quanto a sua estampabilidade: o coeficiente de encruamento n está diretamente associado à conformabilidade por estiramento biaxial e o coeficiente de anisotropia normal R influência no desempenho da chapa na conformação por embutimento profundo.

Tabela 1: Propriedades mecânicas das amostras de chapa de aço DC 06 obtidas do ensaio de tração simples.

Direção do corpo de prova	LE (MPa)	LR (MPa)	A (%)	n	ϵ_0 (pre-deformação)	r	K (MPa)
0°	163,6	298,0	49,67	0,239	0,0070	2,0483	534
45°	174,0	306,7	48,33	0,235	0,0076	1,8659	548
90°	172,0	296,8	50,80	0,232	0,0077	2,5988	532
Valor médio	169,9	300,5	49,60	0,235	0,0074	$R = 2,095^*$	538

*Obs.: coeficiente de anisotropia normal $R = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4$

Os parâmetros que caracteriza a pré-deformação do material ϵ_0 e o coeficiente de resistência K foram avaliados por meio da equação do encruamento de Swift,

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (8)$$

O valor do coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação M foi estimado em 0,017, semelhante ao aço IF, devido o aço DC 06 apresentar um grande alongamento após a deformação homogênea ou após atingir a carga máxima até a ruptura.

3.1. Ensaios de Nakazima e de Marciniak

A obtenção da curva CLC experimental do aço DC 06 foi feita por meio dos ensaios de Nakazima e de Marciniak, ambos com punção de 100 mm de diâmetro (Santos et al., 2007). O punção Nakazima tinha a cabeça esférica de raio 50 mm e o punção de Marciniak tinha a cabeça plana com arredondamento de canto de raio 10 mm. No caso do ensaio de Marciniak, foi empregado uma chapa auxiliar, “driving blank”, com furo central e sem lubrificação entre as chapas para garantir atrito zero e estado plano de tensões na região central deformada da chapa de aço DC 06. Porém, aplicou-se lubrificante entre a chapa auxiliar e o punção. O ensaio foi realizado até a ruptura da chapa superior de aço DC 06.

As medidas das deformações na superfície da chapa foram realizadas por meio da marcação de uma malha de círculos de 4,1 mm de diâmetro (Santos et al., 2007).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2, as curvas de estricção local CLC-E experimentais do aço DC 06 obtidas dos ensaios de Nakazima e Marciniak são mostradas e comparadas com a previsão do Presente Modelo no quadrante positivo e negativo do MDLC. O valor do gradiente de deformação normalizado crítico adotado foi de $\lambda/\mu_{in}^* = 20$. Os valores da previsão teórica estão em muito boa concordância com os resultados experimentais do ensaio de Marciniak que tem punção com cabeça plana e zero atrito na chapa de aço DC 06 na região da estricção local. Esta condição do elemento da chapa com estricção local garante estado plano de tensões conforme o presente modelo visto na Fig. 1. Os resultados das deformações na superfície da chapa do ensaio Nakazima diferem um pouco do ensaio de Marciniak no quadrante positivo devido ao dobramento da chapa na região de contato com o punção com cabeça esférica durante a deformação, ou seja, estiramento biaxial com dobramento. A maior diferença das deformações medidas está na região de estado de plano de deformação, $\epsilon_2=0$: a diferença entre a deformação limite do ensaio de Nakazima e de Marciniak é de 15,6%. Portanto, o efeito do dobramento da chapa reduziu a deformação limite no ensaio de estado plano de deformação.

Observa-se também na Fig.2, que a curva da estricção local situa-se bem após a previsão da curva da estricção difusa ou instantânea de carga máxima no plano da chapa: a deformação limite de estricção local é aproximadamente 60% superior a estricção difusa, $\epsilon_{1d} \cong n = 0,23$. Este efeito do retardamento do surgimento do início da estricção local após o início da estricção difusa é devido ao coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação, valor M . Do ponto de vista teórico, se M fosse zero, a curva CLC-E coincidiria com a curva limite da estricção difusa, $\epsilon_1^* = \epsilon_{1d} \cong n = 0,23$. Portanto, apesar do parâmetro M ser relativamente pequeno, $M=0,017$, sua importância na curva limite de estricção local é muito significativa.

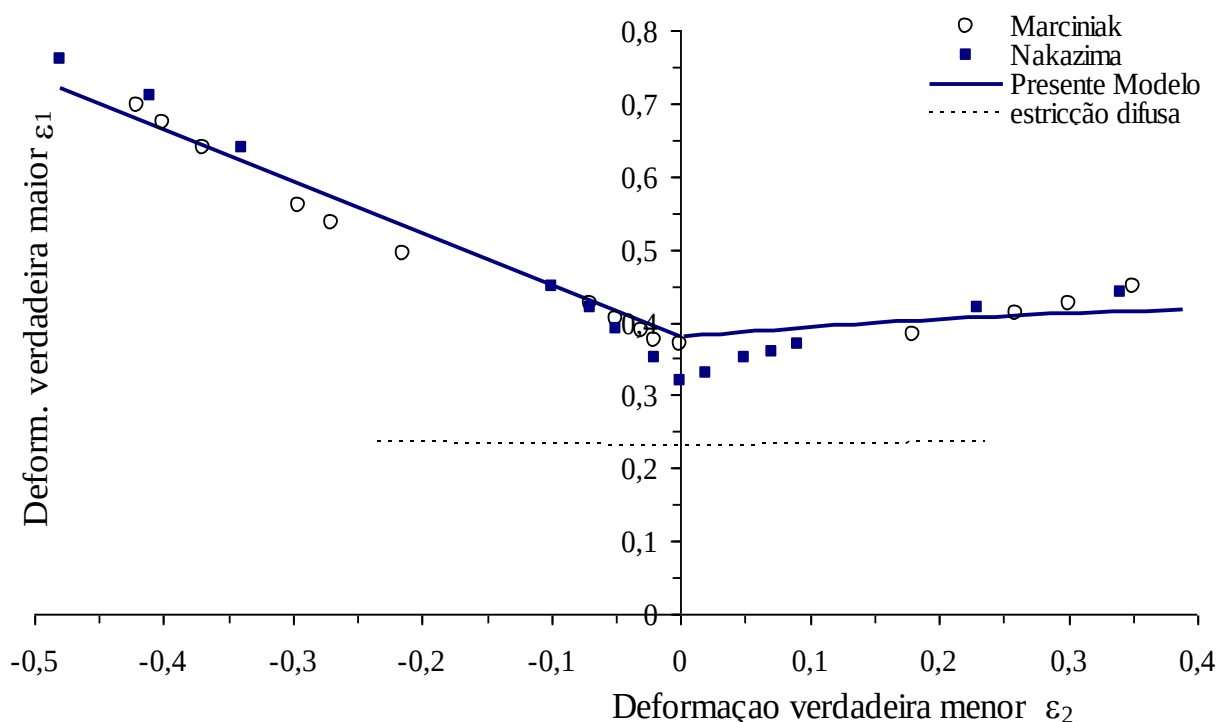


Figura 2. Curvas CLC-E experimentais e previsão teórica do Presente Modelo do aço DC 06 com $\lambda/\mu_{in}^* = 20$.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais dos ensaios de Nakazima e de Marciniak da curva limite de conformação de chapas de aço DC 06 e na previsão teórica da curva de estricção local do modelo D-Bressan, as seguintes conclusões podem ser ditas,

- A previsão teórica da curva da estricção local do modelo D-Bressan modificado, equação matemática do gradiente de deformação aplicada a partir da estricção difusa, está em muito boa concordância com os resultados experimentais obtidos do ensaio de Marciniak com punção de cabeça plana e chapa auxiliar com furo central. O ensaio de Marciniak garante as condições de zero atrito e estado plano de tensões assumidas no modelamento do desenvolvimento do gradiente local de deformação, modelo D-Bressan.
- O ensaio de conformabilidade de chapas metálicas de Nakazima apresentou um valor inferior da deformação limite para o estado plano de deformação: deformação limite 15,6% inferior ao valor obtido com o ensaio de Marciniak. Esta diferença é devido ao dobramento acrescido ao estiramento biaxial do ensaio de Nakazima. Portanto, o efeito do dobramento é reduzir a deformação limite.
- A curva da estricção local situa-se bem após a previsão da curva da estricção difusa ou instante de carga máxima no plano da chapa: aproximadamente 60% superior no quadrante positivo. Este efeito do retardamento do surgimento do início da estricção local após o início da estricção difusa é devido ao coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação, valor M . Portanto, apesar do parâmetro M ser relativamente pequeno, $M=0,017$, sua importância na curva limite de estricção local é muito significativa.
- A previsão da curva limite de estricção local, CLC-E, depende principalmente do coeficiente de encruamento n , do coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação M do material da chapa metálica e do parâmetro λ/μ_{in} .

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro recebido do CNPq na forma de auxílio de bolsas de pesquisa, a Universidade do Estado de Santa Catarina-UDESC e a Universidade Federal do Paraná - UFPR.

7. REFERÊNCIAS

- ASM Handbook, 1988, Forming and Forging. ASM International, Vol. 14, pp. 483.
- Bressan, J.D., 2010, "Prediction of Local Necking Limit Curve in Sheet Metal Forming", Journal of Machine and Forming Technologies, Vol.3, pp.1-16.
- Bressan, J.D. e Barlat, F., 2010, "A Shear Fracture Criterion to Predict Limit Strains in Sheet Metal Forming", Int. J. Mater. Forming, Vol. 3, pp.235-238.
- Bressan, J.D., 2009, "Formability Curves of AZ31 Alloy Sheet at High Temperatures", Int. J. Mater. Forming, Vol. 2,

pp.279-282.

- Bressan, J.D. e Williams, J.A., 1983, "The Use of a Shear Instability Criterion to Predict Local Necking in Sheet Metal Deformation", Int. J. Mech. Sci., Vol.25, n.3, pp. 155-168.
- Bressan, J.D. e Williams, J.A., 1985, "Limit Strains in the Sheet Forming of Strain and Strain-Rate Sensitive Materials", J. Mech. Working Tech., Vol. 11, pp. 291-317.
- Ghosh, A.K., 1976, "A criterion for ductile fracture in sheets under biaxial loading". Metall. Trans. A, v.7A, pp.523-541.
- Hill, R., 1952, "On Discontinuous Plastic States with Special Reference to Localised Necking in thin Sheets", J. Mech. Phys. Solids, Vol.1, pp. 19-30.
- Hill, R., 1979, "Theoretical Plasticity of Textured Aggregates". Math. Proc. Cam. Phil. Soc., v. 85, pp. 179-191.
- Hutchinson, J.W. e Neale, K.W., 1977, Sheet necking II: time-independent behaviour. In: Mechanics of Sheet Metal Forming: Material Behavior and Deformation Analysis. D.P. Koistinen and N.-M Wang., (Eds.) GMR Symposium. Plenum Press, pp. 127-153.
- Keeler, S.P., 1965, "Determination of Forming Limits in Automotive Stampings". Sheet Metal Industries, pp. 683-691.
- Mellor, P. B., 1981, "Sheet-metal forming". International Metals Reviews, n.1, pp.1-20.
- Marciniak, Z. e Kuczynski, K., 1967, "Limit Strains in the Process of Stretch-Forming Sheet Metal", Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, pp. 609-620.
- Needleman, A. e Triantafyllidis, N., 1978, "Void Growth and Local Necking in Biaxially Stretched Sheets. Journal of Eng. Materials and Tech., Trans. ASME, Vol. 100, pp.164-169.
- Negroni, F. ; Kobayashi, S. e Thomsen, E. G., J. Eng. Ind., 1968, Vol. B90, pp. 387.
- Santos, R. A.; Tigrinho, L. M. V.; C. Filho, R. A.; Marcondes, P. V. P., 2007, "Avaliação da Curva Limite de Conformação Usando o Teste de Marciniak Comparando com Teste de Nakazima para Avaliação de Chapa de Aço de Alta Estampabilidade". In: 4 Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Águas de São Pedro, SP, 4COBEF, ABCM, 2007. v.1. p.1 – 10.
- Stören, S. e Rice, J.R., 1975, "Localized Necking in Thin Sheets", J. Mech. Phys. Solids, Vol. 23, pp. 421-441.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

THEORETICAL PREDICTION OF FLC CURVE AND COMPARISON WITH EXPERIMENTAL RESULTS OF DC 06 STEEL SHEET OBTAINED BY NAKAZIMA AND MARCINIAK TESTING

José Divo Bressan¹

Luiz M. V. Tigrinho²

Ricardo Adriano dos Santos²

Paulo Marcondes²

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Tecnológicas - UDESC - Campus Universitário, 89.223-100 – Joinville/SC – Brasil.

² Departamento de Engenharia Mecânica - Centro Politécnico – Universidade Federal do Paraná - Caixa Postal 19011, 81531-990 – Curitiba – Paraná – Brasil.

Abstract: Present work examines the theoretical prediction of the forming limit curve of sheet metals due to the onset of local necking, FLC-N, by D-Bressan model and compared with the experimental curves of DC 06 DIN10152 steel sheet. The experimental testing to obtain the forming limit curves were performed by two methods: Nakazima and Marciniak test. Historically, formability of sheet metals was assessed by simple cup tests such as Swift, Erichsen or Fukui. Lately, the concept of Forming Limit Curve, FLC, was developed experimentally to evaluate sheet metal formability. The Forming Map of Principal Strains, FMPS or Forming Limit Diagram shows the true principal strains on the sheet surface, ϵ_1 and ϵ_2 , at critical points during the laboratory testing methods or in the sheet forming production process, i.e., presents the FLC. Two types of failure limit curves can be plotted in the map FMPS: local necking limit curve FLC-N and fracture by shear limit curve FLC-S. Various experimental results from the tensile test and the forming limit curves of DC 06 steel are presented and compared with the theoretical predictions. DC 06 steel sheet showed the average strain hardening coefficient $n=0,235$ from tensile testing at 0° , 45° and 90° to the rolling direction. The average coefficient of normal anisotropy R -value obtained was 2,098. The D-Bressan model to predict the forming limit curve due to the inception of local necking, FLC-N, in sheet metals was employed to analyze the influence of plastic mechanical properties such as the strain hardening coefficient, the strain rate sensitivity coefficient, normal anisotropy and pre-strain on the formability of steels. The D-Bressan approach utilizes the concept of local strain gradient evolution λ from the thickness defect μ , i.e, from the waviness of sheet thickness at the instant of maximum load. The forming limit curve was obtained by a software developed by the author and from the tensile test properties. The experimental FLC-N of DC 06 steel is in good agreement with the predicted theoretical results.

Key-words: Forming limit curve, Forming Limit Map, Mathematical model, DC 06 steel sheet, local strain gradient.