

PREVISÃO DA CURVA LIMITE DA ESTRICÇÃO LOCAL NA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS

JOSÉ DIVO BRESSAN, dem2jdb@joinville.udesc.br¹

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

Resumo: O presente trabalho trata do modelamento matemático dos processos industriais de estiramento biaxial de chapas metálicas tais como o embutimento profundo, repuxamento e estampagem, a fim de se obter a curva teórica limite de deformação ou limite da estrição local no produto final a partir das propriedades de plasticidade do material. Historicamente, a conformabilidade de chapas metálicas tem sido avaliada por meio de ensaios simples como o ensaio de Erichsen. Posteriormente, o conceito de Curva Limite de Conformação, CLC, experimental foi desenvolvido para avaliar a conformabilidade. O Diagrama Limite de Conformação apresenta a CLC que são as deformações principais na superfície da chapa, ϵ_1 e ϵ_2 , existentes em pontos críticos da chapa após os métodos de ensaios de laboratório de conformabilidade ou no processo produtivo. Dois tipos de curvas podem ser apresentadas graficamente: curva limite da estrição local CLC-E e curva limite de fratura CLC-F. Porém, a conformabilidade é um atributo complexo que envolve diferentes variáveis como os parâmetros do processo e as propriedades do material. Além disso, defeitos ou heterogeneidades do material da chapa como variações na espessura, rugosidade, porosidades e variações locais nas propriedades de plasticidade influenciam nas deformações limites da chapa. As teorias de Marciniak-Kuczinski e de Bressan para previsão da curva limite de conformação devido ao surgimento da estrição local, CLC-E, em chapas metálicas são utilizadas para analisar a influência da espessura e das propriedades mecânicas de plasticidade como a anisotropia plástica, o encruamento inicial, o coeficiente de encruamento, o coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação, na conformabilidade de aços. O modelo de M-K utiliza o conceito da evolução do defeito inicial f na espessura da chapa, enquanto que o modelo de Bressan usa o conceito da evolução do gradiente de deformação local λ a partir do gradiente inicial de espessura μ , ou seja, das ondulações iniciais na espessura da chapa. Alguns resultados experimentais da literatura dos limites de conformação de aços são comparados com os valores teóricos previstos. Apresenta-se um novo modelo da previsão curva limite de conformação, baseando-se nos modelos de M-K e do modelo de Bressan do desenvolvimento dos defeitos geométricos iniciais e das propriedades do material que gera um gradiente de deformação que culmina na estrição local e ruptura da chapa. Os limites de conformação são obtidos com o auxílio de um software próprio desenvolvido.

Palavras-chave: Curva limite de conformação, modelo matemático, plasticidade, M-K, gradiente de deformação.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de corte e conformação de chapas metálicas são um dos principais processos de fabricação nas indústrias automotiva, aeroespacial, de eletrodomésticos, de artefatos de cozinha, de embalagens e outros. As principais ligas metálicas utilizadas são o aço, alumínio, latão e titânio. A garantia do sucesso desses processos provem de vários fatores que o tornam atraente e competitivo, como por exemplo: bom acabamento superficial, baixo peso, grande possibilidade de mudanças de matrizes, produção de formas complexas, processo de conformação na forma final (near net shape), e as vezes é de baixo custo pela elevada produção em massa. Entretanto, o custo das matrizes e prensas de estampagem da indústria automobilística é da ordem de milhões de dólares. Um conjunto de matrizes de estampagem para a fabricação de um automóvel custa em torno de 200 a 300 milhões de dólares e as respectivas prensas para produção de 1000 carros por dia custa aproximadamente 500 milhões de dólares (Siegert et al., 1997).

Os novos desenvolvimentos e pesquisas buscam aperfeiçoar estes processos de corte, estampagem e as prensas a fim de se aumentar a sua produtividade, qualidade e baixar seus custos por meio de formas do produto acabado com menor número de operações, mais simples e sem defeitos, de prensas mais rápidas e matrizes resistentes ao desgaste e a fadiga. A globalização da economia aumentou a competição industrial, forçando uma reengenharia de todas as atividades e processos nas fábricas a fim de se diminuir os custos de produção. Na atual prática da engenharia na indústria há a formação de equipes de trabalho para o estudo e aperfeiçoamento dos processos tecnológicos com a

finalidade de melhorar a qualidade do produto e equipamento, como também reduzir os custos de produção e de manutenção.

Recentemente, uma nova área de pesquisa foi estabelecida na conformação de chapas metálicas: o processo de conformação incremental de chapas metálicas (CICM) (Jesweitz et al., 2005; Park et al., 2003). É um processo flexível de conformação de chapas sob a ação de um punção rígido e móvel de tal modo que qualquer formato tridimensional de peça pode ser feito sem a necessidade de utilização de uma matriz de estampagem. Portanto, o processo também é chamado de “conformação de chapas sem matriz” (dieless sheet metal forming) e tem recebido a atenção de vários grupos de pesquisa na Europa. A operação consiste num punção pequeno que deforma plasticamente a chapa metálica seguindo uma trajetória de contorno ou uma espiral, enquanto que a chapa é presa somente nas suas extremidades. Entretanto, muitos aspectos relacionados com a mecânica do processo, a conformabilidade do material da chapa e os parâmetros do material que influenciam o processo ainda não estão suficientemente esclarecidos.

Este processo de fabricação é reconhecido como uma nova tecnologia sustentável devido a seu potencial de permitir um processo tecnológico de produção de pequenos lotes de peças individuais feitas sob medida a partir de uma chapa, como também refazer um produto danificado ou obsoleto. As aplicações potenciais do CICM são: fabricação de protótipos de chapa conformada, fabricar ou reparar uma peça automotiva ou de aeronave (p.ex. o bico), peças médicas ortopédicas, componentes de eletrodomésticos, artigos de cozinha, carcaça para componentes elétricos e outros.

A conformação convencional por prensagem de chapas finas implica na utilização de uma matriz, um prensa-chapa que prende a chapa e um punção que obriga a chapa penetrar na matriz e dar-lhe a forma adequada da peça final. É um método de conformação utilizado para fabricar peças de formas complexas e assimétricas. Conseqüentemente, as deformações e tensões que ocorrem durante o processo são igualmente complexas e de difícil avaliação.

2. CONFORMABILIDADE OU ESTAMPABILIDADE DE CHAPAS METÁLICAS

Historicamente, a conformabilidade de chapas metálicas foi avaliada por meio de ensaios simples de embutimento como o ensaio de Erichsen. Entretanto, a conformabilidade ou estampabilidade é um atributo complexo das chapas metálicas que envolve muitas variáveis como os parâmetros do processo e as propriedades do material. Adicionalmente, os defeitos ou heterogeneidades da chapa metálica como variações na espessura, porosidade, rugosidade e variações nas propriedades plásticas que também influenciam as deformações limites na conformação de chapas metálicas.

Os ensaios atuais de laboratório efetuados para verificação das características de conformabilidade ou estampabilidade da chapa metálica mostram as propriedades mecânicas referentes a um tipo particular ou simples da trajetória da deformação, em geral linear. No entanto, a conformação industrial é complexa e com a trajetória da deformação não linear e, portanto, a avaliação em geral deve envolver mais de um ensaio. Além disto, a caracterização do material por meio de ensaios de laboratório ou a simulação numérica, não dispensam a realização de testes em escala industrial ou “try out”, uma vez que as condições de conformação prática só poderão ser avaliadas corretamente através de experiências reais na prensa, cujos resultados deverão ser comparados com os de laboratório e da simulação numérica para uma avaliação mais exata da estampabilidade. Isto pode ser realizado com o auxílio das “curvas limite de conformação”, CLC, que serão descritas posteriormente. As curvas CLC são obtidas com a impressão de círculos na superfície da chapa e medidas da evolução dos diâmetros maiores e menores do círculo ou elipse após a conformação plástica, ver Fig. 1.

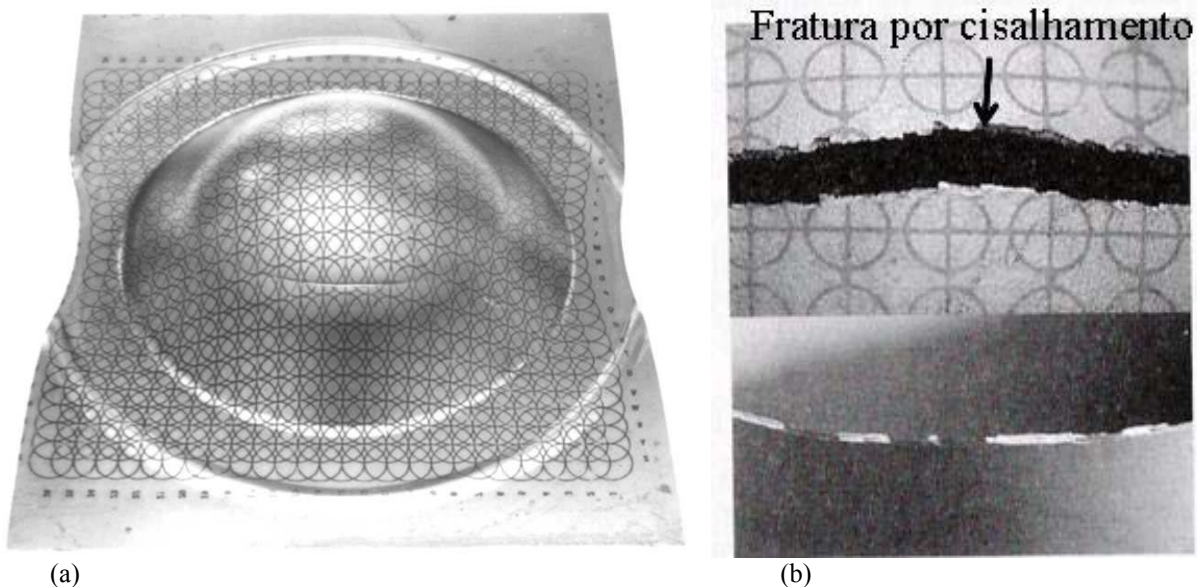


Figura 1. Chapa de aço estampada com marcas de círculos na determinação da Curva Limite de Conformação – CLC. a) presença de estrição no local de contato do punção. b) fratura por cisalhamento (Koronen et al., 2006).

O conceito de “conformabilidade” ou “estampabilidade” está baseado em primeiro lugar na *ruptura* ou na *estricção local da chapa*. Isto quer dizer que um material com boas características de conformabilidade não deve romper ou apresentar estricção local visível durante a operação de conformação. Mas não são apenas estes os únicos fatores. Em segundo lugar vem o conceito de rigidez de forma (ocorrências do efeito mola ou da recuperação elástica ou “spring back”, rigidez do produto acabado “oil canning”, “drumming” e “looseness”), a rugosidade superficial ou textura e também a ocorrência de rugas ou enrugamento da chapa. Portanto, a avaliação da conformação da chapa metálica na prensa deve ser realizada levando em conta não somente as propriedades mecânicas, forma, rugosidade, etc., do material, mas também as condições ou parâmetros operacionais do processo de conformação e as condições do ferramental na escala industrial.

As principais características importantes dos processos de conformação de chapas metálicas identificadas na experiência prática são as seguintes :

- a estampagem é uma combinação de estiramento e embutimento profundo,
- a quantidade de deslocamento e rotação do material é grande,
- o deslocamento da chapa entre os prensa chapa inferior e superior deve ser controlado pela sua pressão, coeficiente de atrito e por meio de um perfil geométrico apropriado do prensa chapas de modo a evitar-se enrugamentos ou ruptura na chapa,
 - deformações pequenas ocorrem somente em menor proporção da área conformada, menos que 10%. Portanto, a maioria da área da chapa sofre grandes deformações,
 - recuperação elástica da chapa após a retirada do punção ou pressão,
 - no embutimento profundo, as grandes deformações ocorrem na região de espessura aproximadamente constante, i. é, na parede lateral, mas dependem do material e do atrito,
 - as deformações limites nas peças estampadas na fábrica, em geral coincidem com a curva experimental do limite de conformação obtida no laboratório, apesar da trajetória não linear das deformações nas peças nos processos do chão de fábrica (Keeler, 1965).
- a trajetória das deformações plásticas na chapa conformada é não linear.

Além disso, em geral a ruptura ocorre próximo das arestas do punção. Portanto, o processo industrial de conformação de chapas consiste na mudança da forma plana simples para uma forma complexa sem que ocorram fratura, estricção localizada, enrugamento ou aparência superficial rugosa. Esta constatação prática leva a conclusão de que é essencial poder descrever as deformações na superfície e a evolução da rugosidade superficial durante a conformação da chapa.

Os fatores que ajudam na distribuição uniforme de espessura na peça conformada, evitando a formação de estricção por meio do aumento na resistência ao afinamento da espessura da chapa, são:

- espessura grossa,
- elevado coeficiente de encruamento **n**,
- alto coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação **M**,
- alto coeficiente de anisotropia normal **R**,
- alta temperatura (conformação superplástica),
- baixíssimo defeito geométrico inicial de espessura da chapa **f₀**, baixíssimo tamanho de grão, baixíssimo tamanho de defeito microestrutural (porosidade, micro-trincas) e
- baixo coeficiente de atrito.

O enrugamento da chapa é controlado pela pressão e perfil geométrico apropriado no prensa chapa, baixo coeficiente de atrito, e baixo coeficiente de anisotropia planar. A rugosidade superficial da chapa é controlada pelo tamanho de grão, aparecimento de bandas de cisalhamento local (início do escoamento plástico ou surgimento da estricção local) e atrito com a matriz e punção.

3. CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO: CLC-E e CLC-F

Como visto acima, a avaliação da conformabilidade foi inicialmente realizada por meio dos ensaios simples de embutimento tipo Erichsen. Entretanto, posteriormente desenvolveu-se o conceito de Diagrama Limite de Conformação, DLC, ou Diagrama das Deformações Principais, DDP, para avaliar a conformabilidade de chapas metálicas (Keeler, 1965). O DLC ou DDP apresenta as deformações principais no plano da chapa, ϵ_1 e ϵ_2 , atingidas nos pontos críticos na superfície da chapa nos ensaios de conformabilidade ou nos processos de fabricação, ou seja, mostra as curvas limites de deformação plástica, CLC. Dois tipos de curvas podem ser traçadas: curva da estricção local, CLC-E, e curva da deformação limite de fratura, CLC-F, que podem ser vistas na Fig. 2. Curvas experimentais e previsões teóricas da estricção local e da deformação limite de fratura tem sido intensamente investigadas tanto por pesquisadores acadêmicos como pesquisadores da indústria.

Vários modelos matemáticos tem sido propostos para prever as curvas limites de deformações de chapas metálicas nos processos de estampagem, embutimento profundo, estiramento e operações com trajetória da deformação constante ou trajetória variável (Hill, 1952; Marciniak at al., 1967; Rice at al., 1975; Needleman at al., 1978; Bressan at al., 1983).

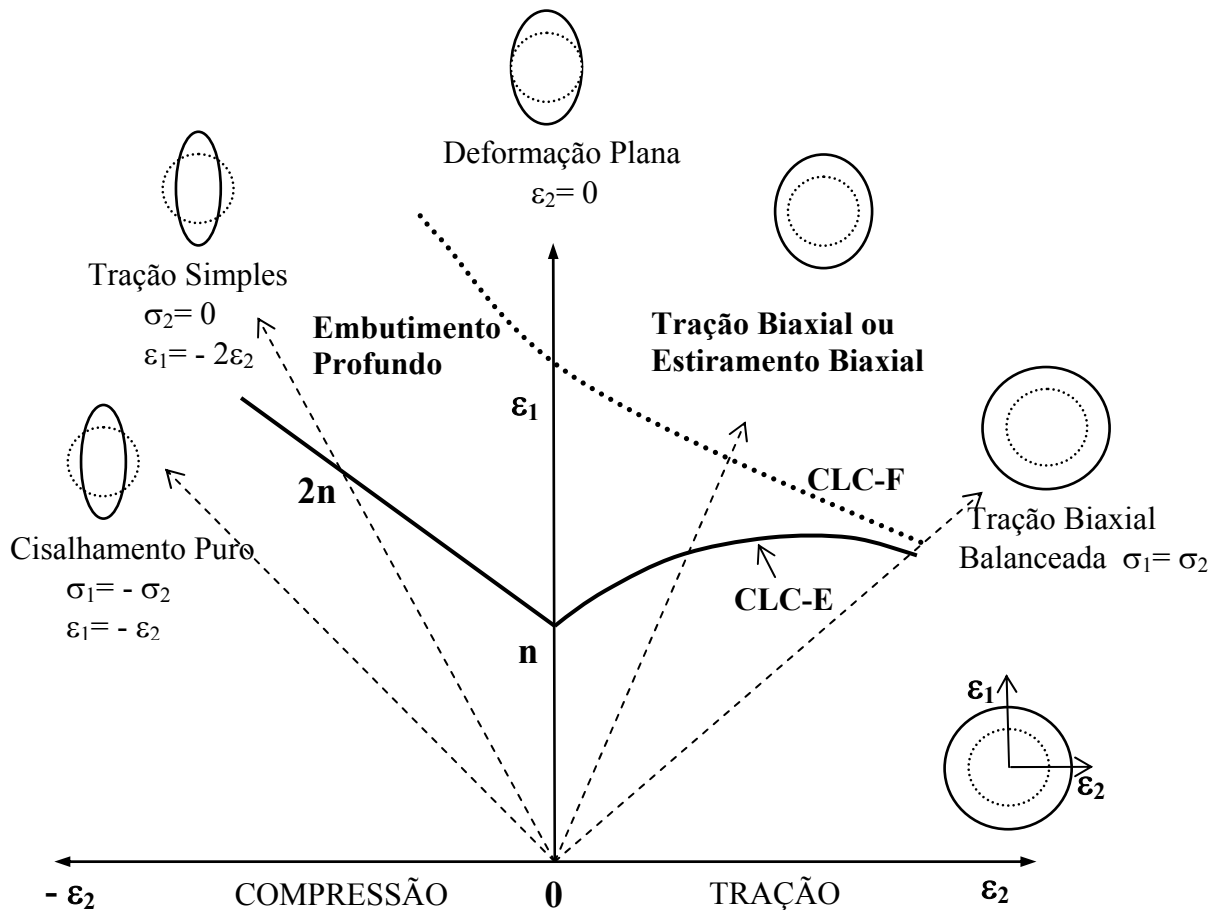


Figura 2. DLC ou Diagrama das Deformações Principais no plano da chapa, $\epsilon_1 \times \epsilon_2$, apresentando as Curva Limite de Estricção Local, CLC-E, e Curva Limite de Fratura, CLC-F, de chapas metálicas.

Um dos primeiros trabalhos publicados a tratar teoricamente a ocorrência da estricção local na conformação de chapas foi o artigo de Hill em 1952. Hill limitou-se a analisar o quadrante negativo do diagrama de deformações principais no plano da chapa, DDP, ou quadrante do embutimento profundo, ver Fig.2, afirmando que o quadrante positivo ou do estiramento biaxial não apresentava as condições matemáticas da teoria da plasticidade para o surgimento da estricção local no plano da chapa: direção de alongamento zero. Este impasse teórico só foi resolvido bem mais tarde em 1967 com o modelo teórico proposto por Marciniack e Kuczynski (1967). Estes autores propuseram que o surgimento da estricção local nas condições de estado de deformação biaxial de tração, no quadrante positivo do DDP, era devido a existência de um defeito geométrico inicial $f_0 = h/h_0$ na espessura h da chapa que evoluía para o estado plano de deformações e então a estricção era matematicamente possível de ocorrer. Portanto, o limite das deformações na chapa era atingido somente quando o estado de deformação dentro do defeito inicial atingisse o estado plano de deformações, ou seja, $d\epsilon_2 = 0$.

Enquanto isto não ocorresse, a chapa continuaria se deformando sem a presença da estricção local. Apesar do tratamento matemático rigoroso do modelo de M-K., os resultados teóricos da curva limite de deformação são muito sensíveis ao tamanho do defeito inicial f_0 e apresentaram discrepâncias com os resultados experimentais considerados não desprezíveis na interpretação da mecânica da deformação de chapas metálicas. Outra desvantagem deste modelo é o parâmetro de defeito f_0 ser unidimensional ou de espessura, sem considerar a largura ou o comprimento do defeito inicial. Entretanto, este modelo deu um novo impulso nas pesquisas teóricas dos limites de conformação, principalmente na mecânica da conformação e na influência da microestrutura, que continuam até hoje. Atualmente, é sem dúvida o modelo mais utilizado nas investigações teóricas sobre a curva limite de conformação de chapas metálicas.

Outro modelo foi proposto em 1975 por Støren e Rice (1975) para explicar o surgimento da estricção local no quadrante positivo de estiramento biaxial. Os autores, baseados na teoria da bifurcação das deformações, consideraram a possibilidade de aparecer as condições de estado plano de deformações devido ao surgimento de um vértice na curva posterior do escoamento plástico durante sua expansão com a deformação continuada da chapa metálica. Este vértice permitiria a mudança da trajetória da deformação local e estaria associado a natureza discreta e cristalográfica de um material policristalino com vários sistemas de deslizamento, surgindo durante a expansão da curva de escoamento plástico sem a necessidade da existência de defeitos geométricos iniciais. Porém, os resultados teóricos só foram razoáveis no quadrante positivo do DDP e ruins no quadrante negativo, pois apresentaram grande discrepâncias com relação ao modelo de Hill e aos valores experimentais de diversas ligas metálicas.

Por outro lado, vários outros pesquisadores (Ghosh, 1976; Needleman et al., 1978) propuseram critérios de limite de ruptura em chapas metálicas, baseando-se na evolução da microestrutura como a nucleação, crescimento e coalescência de microporosidades dentro da estricção local. Portanto, estas análises trataram da curva limite superior da deformação ou curva limite de fratura CLC-F no Diagrama das Deformações Principais, DDP, que se situa após a curva limite da estricção local CLC-E como apresentado na Fig.2. A CLC-F é obtida com os valores da deformação crítica ou de ruptura na espessura da chapa.

Em 1982, Bressan et al. (1982) propuseram um modelo fenomenológico baseado no mecanismo de ruptura por cisalhamento na espessura da chapa, pois na experiência prática observou-se que a ruptura da chapa pode ocorrer tanto antes como após a formação da estricção local. As deformações limites são obtidas a partir de um critério de cisalhamento: a estricção local ou ruptura acontece quando a tensão de cisalhamento puro atinge um valor crítico que é uma propriedade do material. Este valor de tensão de cisalhamento crítico pode ser obtido a partir das propriedades plásticas do material da chapa por meio do ensaio de tração simples. Os resultados teóricos da curva limite de deformação deste modelo é bastante coincidente com os resultados do modelo de Rice visto acima. Em geral, a curva teórica fica abaixo dos pontos experimentais, sendo a maior discrepância entre pontos previstos e pontos experimentais para aço acalmado com alumínio. Sua maior vantagem é a simplicidade da equação que descreve a curva CLC-E e a possibilidade de traçar uma faixa para valores mínimos e máximos da curva.

Em 1985 um outro modelo da deformação limite foi apresentado por Bressan et al. (1985), usando um novo enfoque da mecânica das deformações plásticas não lineares: crescimento contínuo do gradiente de deformações plásticas localizadas que culminam na estricção local e fratura da chapa metálica.

4. ANÁLISES TEÓRICAS DA DEFORMAÇÃO LIMITE NA ESTRICÇÃO LOCAL: CLC-E

Como visto anteriormente, as operações de estiramento biaxial, estampagem e embutimento profundo são consideradas falhas quando a peça conformada apresenta ruptura por cisalhamento ou estricção local visível. Dentro da região de estiramento biaxial do diagrama DLC, as pesquisas experimentais têm mostrado que a ruptura é geralmente precedida por estricção local ou por cisalhamento local (Bressan et al., 1983; Koronen et al., 2006).

A seguir, apresentam-se os modelos matemáticos de M-K e D-Bressan da previsão da formação da estricção local em chapas metálicas nas operações de estiramento biaxial.

4.1 Modelo Matemático D-Bressan

O processo de formação, desenvolvimento e localização da estricção em chapas metálicas tem sido investigado pelo presente autor, usando o conceito de desenvolvimento de gradiente de deformação localizada (Bressan et al., 1985).

A estricção local visível surge do desenvolvimento 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 $\lambda = \partial\varepsilon/\partial x$, onde ε é a deformação equivalente.

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 X. Portanto,

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

onde $\operatorname{tg} \theta =$ inclinação do perfil da ondulação da rugosidade superficial da chapa, ver Fig.3, X é o eixo de coordenada perpendicular a estricção local.

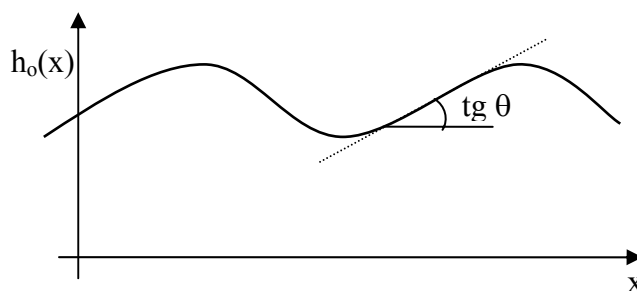


Figura 3. Perfil inicial das ondulações das rugosidades e espessura $h_0(x)$ da chapa metálica no modelo D-Bressan.

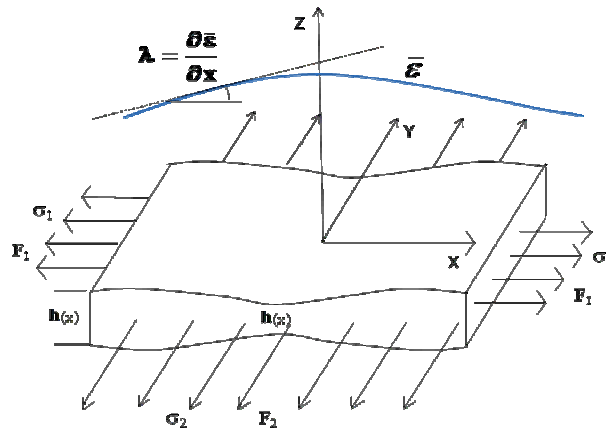


Figura 4. Elemento da chapa sob estiramento biaxial, mostrando a estrição local e a definição do gradiente de deformação local λ .

A estrição localizada visível na chapa surge quando o gradiente λ atinge um valor crítico que se assume valer 20 com base em resultados experimentais de ensaios de embutimento de diversas ligas metálicas. As curvas teóricas de limites de deformação previstos estão em boa concordância com resultados experimentais da CLC-E obtidos em ensaio de laboratório. A análise identifica um ponto crítico na CLC-E, ponto de menor valor limite de deformação, que corresponde ao estado plano de deformação como é o caso do processo de dobramento da chapa nas arestas do punção ou matriz. Portanto, este é o local mais provável de ocorrer a estrição local ou ruptura da chapa. Esta análise foi recentemente ampliada (Bressan, 1997) a fim de considerar a existência de defeitos iniciais de espessura μ e das heterogeneidades nas propriedades mecânicas do material da chapa como coeficiente de encruamento n , coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação M , coeficiente de resistência k e encruamento inicial ε_0 que são parâmetros da equação constitutiva do comportamento plástico do material da chapa apresentada a seguir.

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 de escoamento plástico usada é,

$$\bar{\sigma} = k (\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \dot{\bar{\varepsilon}}^M \quad (2)$$

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

O critério de escoamento plástico proposto por Hill (1979) que acomoda valores do coeficiente da anisotropia normal da chapa R menores que 1 é utilizado no desenvolvimento da presente análise,

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

onde m = parâmetro da anisotropia normal = $1,14 + 0,86 R$ (Bressan, 1983), σ_1 e σ_2 são as tensões principais no plano da chapa como mostrado na Fig.4. A equação que governa a formação e crescimento da estrição local a partir da imperfeição inicial na espessura μ nos processos de conformação de chapas metálicas é dado por (Bressan et al., 1983),

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \bar{\varepsilon}} = \frac{\mu}{M} + \frac{1}{M} \left\{ \frac{\alpha}{(1+\alpha)z} - \frac{n}{(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})} \right\} \lambda \quad (4)$$

onde $\lambda = \partial \bar{\varepsilon} / \partial x$ = gradiente de deformação na estrição local, $\alpha = \partial \varepsilon_1 / \partial \varepsilon_2$ = trajetória da deformação e z é,

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

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 quando o gradiente λ

atinge um valor crítico $\lambda_{crit} = 20$ ou quando $\lambda/\mu = (\lambda/\mu)^* = \text{constante}$.

4.2 Modelo Matemático Marciniack-Kuczynski: modelo M-K

Marciniack e Kuczynski desenvolveram uma teoria para o surgimento da estricção local na conformação de chapas metálicas baseada na hipótese de que a estricção local se desenvolve a partir de um defeito inicial local ou heterogeneidade na espessura da chapa. Esta imperfeição inicial é assumida ser uma faixa estreita na chapa com espessura reduzida e caracterizado pelo parâmetro f_0 , $f_0 = \frac{h_{ob}}{h_{oa}}$, onde h_{ob} é a espessura inicial dentro da região de defeito e h_{oa} é a espessura inicial homogênea fora da região do defeito.

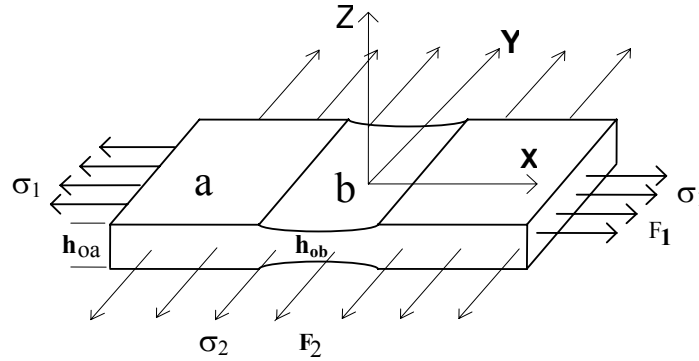


Figura 5. Elemento da chapa sob estiramento biaxial, mostrando o defeito inicial local no modelo M-K.

Considerando o equilíbrio instantâneo de forças entre as regiões a e b no elemento da chapa visto na Fig.5, para um dado instante durante a deformação da chapa, $F_{1a} = F_{1b}$, tem-se,

$$\sigma_{1a} \cdot h_a = \sigma_{1b} h_b \quad (6)$$

Definindo-se a razão de tensão $\beta = \sigma_2/\sigma_1$, as tensões equivalentes nas regiões a e b do elemento da chapa, material isotrópico será dada por,

$$\bar{\sigma}_a = \sqrt{1-\beta_a + \beta_a^2} \sigma_{1a} \quad e \quad \bar{\sigma}_b = \sqrt{1-\beta_b + \beta_b^2} \sigma_{1b} \quad (7)$$

Adicionalmente, considerando incrementos iguais $d\varepsilon_{2a} = d\varepsilon_{2b}$, definindo-se o defeito corrente como $f = h_b/h_a$, a trajetória da deformação na região a $\alpha = d\varepsilon_1 / d\varepsilon_2$, a deformação verdadeira na espessura $\varepsilon_3 = \ln(h/h_0)$ e considerando-se material isotrópico cuja equação constitutiva do encruamento é dado pela Eq. (2), a equação que governa a evolução da estricção local do modelo M-K, a partir da Eq. (6), é dado pelo seguinte conjunto de equações,

$$\frac{\sqrt{1-A} \left(\frac{d\bar{\varepsilon}_a}{d\bar{\varepsilon}_b} \right)^M}{\sqrt{1-A} \left(\frac{d\bar{\varepsilon}_a}{d\bar{\varepsilon}_b} \right)^2} = f \frac{(\varepsilon_o + \bar{\varepsilon}_b)^n}{(\varepsilon_o + \bar{\varepsilon}_a)^n} \quad (8)$$

$$f = f_0 \exp\left(\frac{\bar{\varepsilon}_a}{Z} - \varepsilon_{3b}\right) \quad ; \quad \varepsilon_{3b} = \int_0^{\bar{\varepsilon}_b} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{1-A} \left(\frac{d\bar{\varepsilon}_a}{d\bar{\varepsilon}_b} \right)^2 + B \frac{d\bar{\varepsilon}_a}{d\bar{\varepsilon}_b} \right] d\bar{\varepsilon}_b \quad (9)$$

Onde o incremento de deformação plástica equivalente $d\bar{\varepsilon} = \sqrt{2/3} \sqrt{d\varepsilon_1^2 + d\varepsilon_2^2 + d\varepsilon_3^2}$ e os coeficientes são,

$$A = \frac{3}{4(1+\alpha+\alpha^2)} \quad B = \frac{\sqrt{3}}{4} \frac{1}{\sqrt{1+\alpha+\alpha^2}} \quad Z = \frac{2\sqrt{1+\alpha+\alpha^2}}{\sqrt{3}(1+\alpha)} \quad (10)$$

As equações Eq. (8) e (9) devem ser resolvidas por método iterativo para cada incremento de deformação $d\bar{\epsilon}_b$ dentro da estrição local ou região b . A deformação máxima limite fora da estrição ϵ_{1a}^* é atingida quando a deformação dentro da estrição ϵ_{1b} ou $\bar{\epsilon}_b$ tende a um valor muito grande enquanto que a deformação ϵ_{1a} na região a permanece constante.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando-se que a inclinação máxima das ondulações de rugosidade na chapa metálica são inferiores a $\theta = 10^\circ$, o gradiente de deformação crítico normalizado $(\lambda/\mu)^*$ na estrição local para chapas metálicas de espessura 1 mm é,

$$(\lambda/\mu)^* = \frac{h_0}{\text{tg } \theta} \lambda_{\text{crit}} = 113,4 \tag{11}$$

A equação (11) mostra que a curva limite da estrição local depende da espessura inicial e do perfil da ondulação das rugosidades da chapa metálica.

Figura 6 apresenta os resultados teóricos da previsão teórica da Curva Limite da Estrição Local, CLC-E, conforme o presente modelo D-Bressan da evolução do gradiente da deformação local $\lambda = \partial\bar{\epsilon} / \partial x$. Mostra a influência dos parâmetros ϵ_0 e M na deformação limite ϵ_1^* de material cuja equação do encruamento é $\bar{\sigma} = k (\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^{0,22} \bar{\epsilon}^{0,012}$. O aumento do encruamento inicial da chapa de $\epsilon_0 = 0,05$ a $\epsilon_0 = 0,20$ produz uma diminuição da deformação limite ϵ_1^* de 0,31 para 0,21, ou seja, redução de 50%. Portanto, a eliminação do encruamento inicial por processo de recozimento pleno pode aumentar em até 50% a conformabilidade de chapas finas de aço. Em geral, a espessura final da chapa de aço na fabricação por laminação é realizada com redução de espessura por passes de laminação a frio que produz o aumento do encruamento inicial do material e conseqüentemente, a diminuição da CLC-E. Nota-se também que o aumento de M de 0,012 a 0,018 produz uma elevação de 10% na CLC-E. A Fig. 7 mostra a previsão teórica da Curva Limite da Estrição Local conforme o presente modelo para dois valores de coeficiente de encruamento, $n = 0,22$ e 0,30, e dois valores de encruamento inicial, $\epsilon_0 = 0,05$ e 0,15. Ou seja, o gráfico mostra a influência do coeficiente de encruamento n e do encruamento inicial na deformação limite ϵ_1^* . Embora o aumento no encruamento inicial foi de 3 vezes, 200%, o aumento de 36% no coeficiente de encruamento compensou o abaixamento da curva e produziu um aumento nos limites de deformação ϵ_1^* de aproximadamente 0,30 a 0,38, ou seja, aumento de 26% na curva limite.

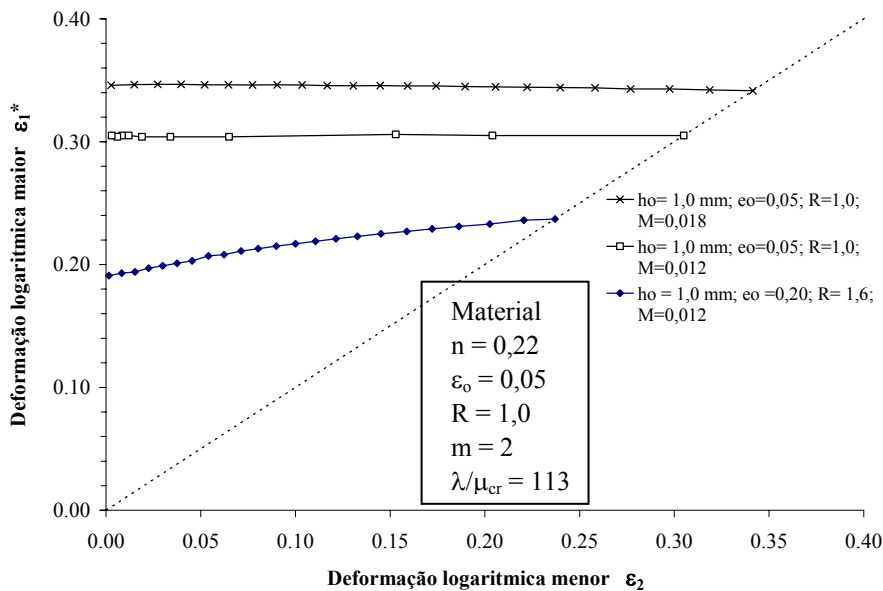


Figura 6. Previsão teórica da Curva Limite da Estrição Local, CLC-E, conforme o presente modelo da evolução do gradiente da deformação local $\lambda = \partial\bar{\epsilon} / \partial x$. Influência dos parâmetros ϵ_0 e M na deformação limite ϵ_1^* .

A Figura 8 apresenta a previsão teórica da CLC-E para vários valores do defeito inicial f_0 de acordo com o modelo de M-K (Matiasson et al., 2006). Observa-se que a curva limite de deformação é muito sensível a pequenas variações no valor do parâmetro f_0 . Portanto, esta é a principal desvantagem do modelo M-K, pois isto não corresponde a realidade experimental verificada em estudos de conformação de chapas de laboratório, embora seja o modelo mais utilizado na investigação da conformabilidade de chapas metálicas no estiramento biaxial.

Na Fig. 9, apresenta-se uma comparação entre a CLC-E experimental e a previsão teórica do presente modelo para chapas de aço de 1, 2 e 3 mm (Muschenborn et al., 1977). O aumento da espessura da chapa produz um aumento na deformação limite ϵ_1^* que é previsto pelo presente modelo: a previsão teórica está em boa concordância com os resultados experimentais. A maior diferença está na região de deformação plana, onde possivelmente os parâmetros assumidos para o aço sejam diferentes, principalmente o coeficiente de encruamento deve ser inferior que na tração biaxial balanceada.

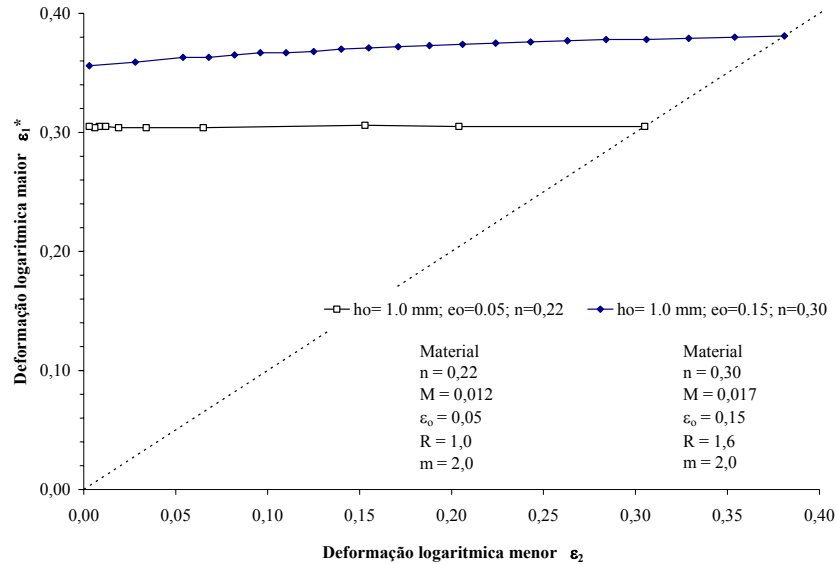


Figura 7. Previsão teórica da Curva Limite da Estricção Local conforme o presente modelo da evolução do gradiente da deformação local. Influência do coeficiente de encruamento n na deformação limite ϵ_1^* .

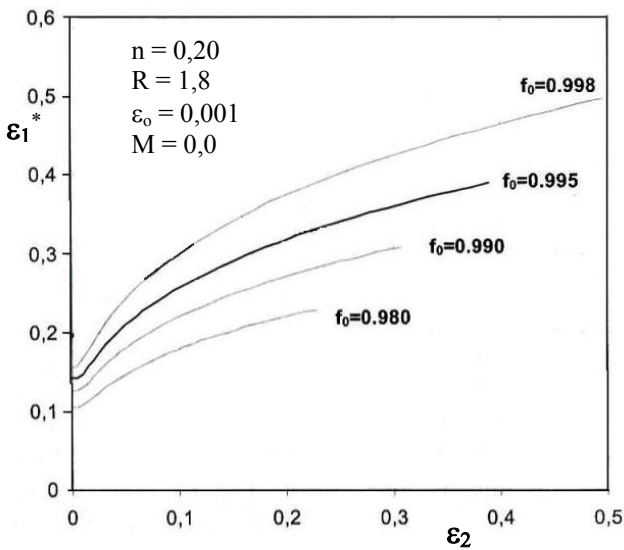


Figura 8. Previsão da CLC-E para vários valores do defeito f_0 de acordo com a Teoria M-K (Matiasson et al., 2006).

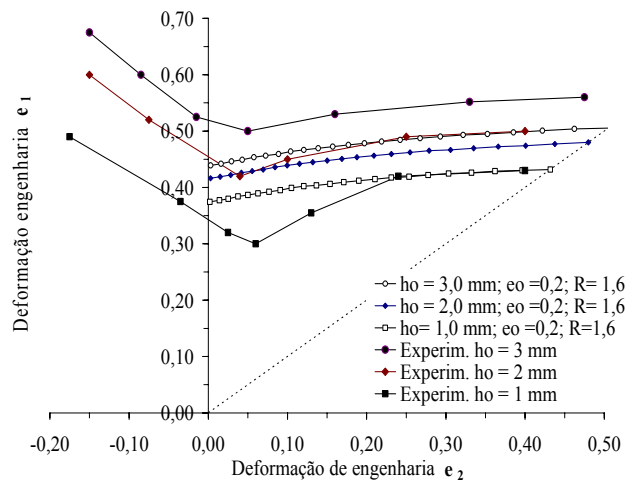


Figura 9. Comparação entre a CLC-E experimental e previsão teórica do presente modelo para chapa de aço de 1, 2 e 3 mm. (Muschenborn et al., 1977).

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais e nas previsões teóricas da Curva Limite de Conformação para a estricção local, CLC-E, de chapas metálicas as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- a- O presente modelo da previsão teórica da CLC-E está em razoável concordância com os valores experimentais,
- b- Os dois principais parâmetros do material que influenciam a CLC-E no presente modelo são o coeficiente de encruamento n e o coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação M,
- c- Os defeitos iniciais das chapas metálicas são devidos as variações na espessura da chapa ou das ondulações das rugosidades na superfície da chapa metálica. A estricção local ocorre quando o gradiente de deformação local atingir,

$$(\lambda/\mu)^* = \frac{h_0}{\text{tg } \theta} \lambda_{\text{crit}} = h_0 \cdot 113,4 \text{ , onde } (\lambda/\mu)^* \text{ é o gradiente de deformação normalizado e } \theta \text{ é o ângulo da ondulação.}$$

7. AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer o suporte financeiro recebido do CNPq na forma de auxílio de bolsas de pesquisa, e da Universidade do Estado de Santa Catarina-UDESC.

8. REFERÊNCIAS

- Siegert, K.; Altan, T. e Nakagawa, T., 1997, "Development and Manufacture of Dies for Car Body Production", Anais do CIRP, vol.2, pp. 535-543.
- Jesweit, J.; Micari, F.; Hirt, G.; Bramley, A.; Duflou, J e Allwood, J., 2005, "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal", Ann. CIRP 54 (2).
- Park, J.J. e Kim, Y.H. , 2003, "Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique", J. Mater. Process. Technol. vol. 140, pp. 447-453.
- Keeler, S.P., 1965, "Determination of Forming Limits in Automotive Stampings". Sheet Metal Industries, pp. 683-691.
- 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.
- 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.
- Stören, S. e Rice, J.R., 1975, "Localized Necking in Thin Sheets", J. Mech. Phys. Solids, vol. 23, pp. 421-441.
- 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, pp. 155.
- 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.
- Bressan, J. D., 1997, "The Influence of Material Defects on the Forming Ability of Sheet Metals". J. Mater. Process. Technol., Amsterdam / Holanda, vol. 72, pp. 11-14.
- Ghosh, A.K., 1976, "A criterion for ductile fracture in sheets under biaxial loading". Metall. Trans. A, v.7A, pp.523-541
- 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.
- Koronen, A.S.; Manninen, T. e Kanervo, K., 2006, "On Necking, Fracture and Localization of Plastic Flow in Austenitic Stainless Steel Sheets". In: ESAFORM 2006, Glasgow/UK, pp. 93-98.
- Muschenborn, W. e Sonne, H.M., 1977, Communication to the IDDRG, Warsaw, Poland, Oct. 1977.
- Mattiasson, K. e Sigvant, M., 2006, "On necking prediction in ductile metal sheets". In: ESAFORM 2006, pp. 335-338.

9. DIREITOS AUTORAIS

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

PREDICTION OF LOCAL NECKING LIMIT CURVE IN SHEET METAL FORMING

JOSÉ DIVO BRESSAN, dem2jdb@joinville.udesc.br¹

Abstract: *The present work examines the mathematical model of the industrial processes of biaxial stretching such as deep drawing and stamping, aiming at obtaining the theoretical limit strain curve or local necking limit in the final product from the material plastic properties. Historically, sheet metal formability has been assessed by simple testing such as the Erichsen test. Lately, the concept of experimental Forming Limit Curve, FLC, was developed to evaluate formability. The Forming Limit Diagram shows the FLC which are the principal strains in the sheet metal surface, ϵ_1 and ϵ_2 , occurring at critical points in the laboratory formability tests or in the fabrication process. Two types of curves can be plotted: the local necking limit curve CLC-E and the fracture limit curve CLC-F. However, formability is a complex attribute that involves different variables such as the process parameters and the material plastic properties. In addition, material defects or heterogeneities such as thickness variations, roughness, porosities and local variations in the plastic properties affects the limit strains of sheet metals. The approaches of Marciniak-Kuczynski and Bressan for the theoretical prediction of forming limit curve owing to the onset of local necking, CLC-E, in sheet metal forming are utilized to investigate the influence of thickness and the mechanical plastic properties such as the plastic anisotropy, pre-strain, work hardening coefficient, strain rate sensitivity coefficient in the steel formability. The M-K model utilizes the concept of evolution of the initial defect in the sheet thickness f , while the Bressan's model uses the concept of local strain gradient evolution λ from the initial thickness gradient μ , i.e., the initial waviness in the sheet thickness. Some experimental results of forming limit curve obtained from literature for steel sheets are compared with the theoretical predicted curve. A new model for the theoretical prediction of the forming limit curve, based on the M-K model and D-Bressan model for the development of the initial geometric defects and the material properties which generates a strain gradient and ends in the local necking and sheet metal rupture. The limit strains are obtained from a software developed by the author.*

Key-words: *Forming limit curve, mathematical model, plasticity, M-K model, strain gradient model.*