

# INFLUÊNCIA DA ESPESSURA E PROPRIEDADES DE PLASTICIDADE NA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS <sup>1</sup>

José Divo Bressan <sup>2</sup>

## Resumo

Um novo enfoque sobre a influência da espessura da chapa e das propriedades do material nas deformações limites na conformação de chapas metálicas finas é apresentado, utilizando o modelo da evolução do gradiente de deformações no plano da chapa que prevê o surgimento da estricção local a partir das imperfeições iniciais na sua espessura. Como resultado da análise, apresenta-se a definição de um novo parâmetro: a razão entre a inclinação da ondulação inicial das rugosidades e a espessura da chapa. Também, o gradiente crítico de deformação normalizado no instante da formação da estricção local pode ser calculado a partir do perfil da ondulação da rugosidade inicial. Uma breve revisão dos processos de estiramento biaxial de chapas metálicas, o diagrama e a curva limite de conformação para a estricção local, FLC, e as teorias do modelamento da deformação limite são apresentados. As principais características dos processos de conformação de chapas metálicas também são identificadas e estão baseadas na experiência prática. As deformações limites de conformação são calculadas para diferentes valores de espessura e propriedades da chapa, utilizando-se o presente modelo e um código computacional desenvolvido pelo autor. O presente modelo teórico mostra previsões razoáveis da influência da espessura na FLC. Chapa metálica grossa tem limite de deformação maior que a chapa fina.

**Palavras-chave:** Estiramento biaxial; Embutimento profundo; Curva limite; Espessura.

## INFLUENCE OF THICKNESS SIZE IN SHEET METAL FORMING

### Abstract

A new approach on the influence of sheet thickness and material plastic properties on the limit strains in thin sheet metal forming is developed, using the strain gradient model that predict the local necking onset from initial thickness imperfections. As a result of the analysis, the definition of a roughness concept parameter is presented: the initial waviness profile inclination to thickness ratio parameter. Also, the critical normalized strain gradient at the onset of local necking can be calculated from the initial assumed waviness of roughness profile. A brief review of stretch forming of sheet metal, the diagrams and the limiting strain curves for local necking, FLC, and the limit strain theories are presented. The main characteristics of the sheet metal forming processes are also identified and are based in the press shop practice. The limit strains for different thickness sizes are obtained using the present model and a numerical code developed by the author. Present theoretical model produced reasonable predictions about the influence of thickness size on the FLC. Thicker sheet metal has higher limit strain than thin sheet.

**Key words:** Biaxial stretching; Deep drawing; Forming limit curve; Thickness.

<sup>1</sup> 45º Seminário de Laminação: Processos e Produtos Laminados e Revestidos – 21 a 24 de outubro/2008 - Porto de Galinhas – PE – Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Mecânica. Centro de Ciências Tecnológicas - Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC Joinville - Campus Universitário - 89223-100 Joinville, Brazil. e-mail: dem2jdb@joinville.udesc.br

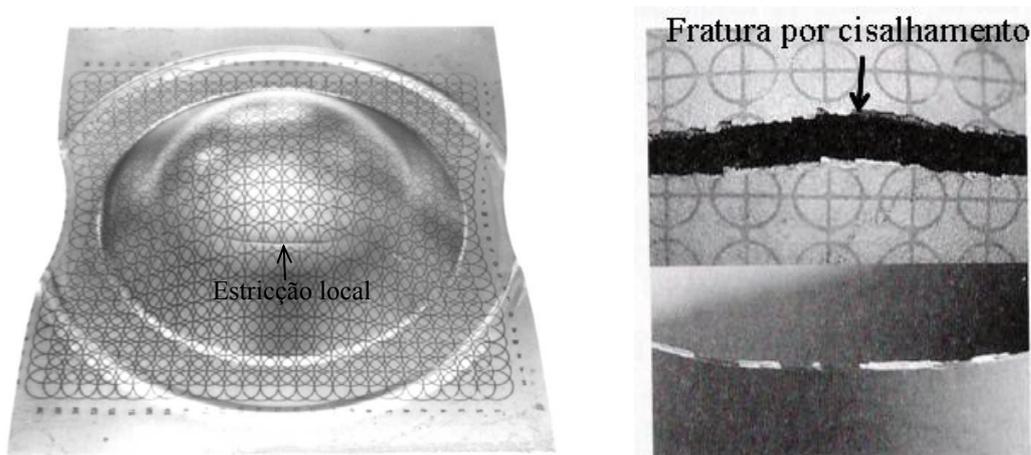
## 1 INTRODUÇÃO

As tecnologias de conformação de chapas metálicas como o estiramento biaxial, o embutimento profundo e a recente conformação incremental de chapas metálicas são processos de fabricação complexos e importantes nas indústrias automotiva, aeronáutica e de utensílios domésticos. Os principais metais usados nessas indústrias são o aço e as ligas de alumínio e de titânio. A conformabilidade de chapas metálicas é um tema relevante, complexo e está relacionado com a otimização e controle de qualidade do produto final.

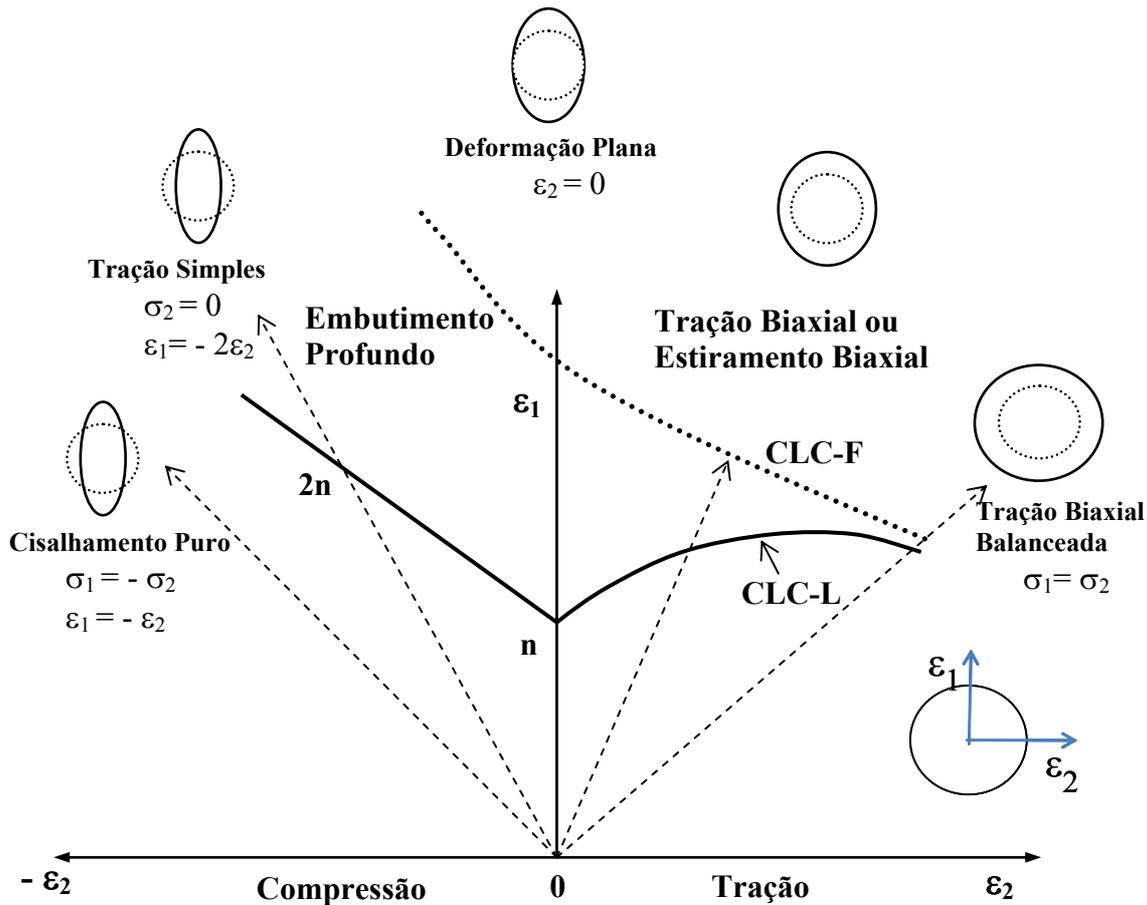
Historicamente, a conformabilidade tem sido avaliada por ensaios simples como o ensaio de embutimento Erichsen. Entretanto, a conformabilidade é um atributo complexo que envolve diferentes variáveis como os parâmetros do processo de fabricação e as propriedades de plasticidade do material da chapa. Além disso, defeitos iniciais ou heterogeneidades na chapa como variações na espessura, porosidade, rugosidades e variações locais nas propriedades de plasticidade afetam as deformações limites máximas na conformação de chapas metálicas.

Posteriormente, o conceito de Curva Limite de Conformação – CLC foi desenvolvido para avaliar a conformabilidade.<sup>(1)</sup> Dois tipos de curvas podem ser traçadas no gráfico: curva da estricção local CLC-L e a curva de fratura por cisalhamento CLC-F, (Figura 1). O Diagrama Limite de Conformação – DLC de chapas metálicas mostra as deformações logarítmicas principais no plano da chapa,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , atingidos em pontos críticos nos ensaios de laboratório ou no processo de produção, ou seja, mostra a CLC, conforme mostra Figura 2.

A curva CLC experimental e a previsões teóricas da estricção local e da deformação limite de fratura tem sido intensivamente investigada por pesquisadores acadêmicos e profissionais da indústria. Vários modelamentos matemáticos foram propostos para prever a curva limite de conformação de chapas metálicas nos processos de embutimento profundo, estiramento biaxial e outros processos com trajetória da deformação constante ou variável.<sup>(2-6)</sup> Estes modelos teóricos consideraram somente as imperfeições na espessura e nas propriedades plásticas do material na previsão das deformações limites, mas não levaram em conta o valor absoluto da espessura.



**Figura 1.** Marcação de círculos, estricção local visível e fratura por cisalhamento em chapas de aço.<sup>(7)</sup>



**Figura 2.** Diagrama Limite de Conformação de chapas metálicas, mostrando as curvas limites da estricção local CLC-L e curva limite de fratura por cisalhamento CLC-F.

## 2 MODELAMENTO DA FORMAÇÃO DA ESTRICÇÃO LOCAL

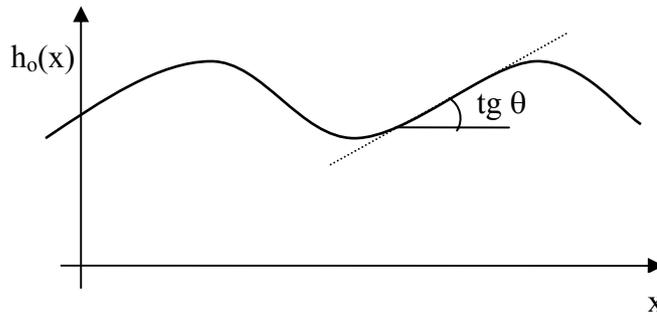
A fabricação de peças por estiramento biaxial ou por embutimento profundo de chapas metálicas são rejeitadas quando surge na peça uma fratura por cisalhamento ou uma estricção local. Dentro da região de tração biaxial no gráfico DLC, pesquisas experimentais tem mostrado que a ruptura da chapa é geralmente precedida por estricção local ou por fratura por cisalhamento instantâneo.<sup>(5,6)</sup> O processo de localização da deformação na conformação de chapas metálicas tem sido examinado pelo presente autor,<sup>(6)</sup> utilizando o conceito da evolução do gradiente local da deformação. O modelo matemático desenvolvido assume que o processo de iniciação e crescimento da estricção local é um processo contínuo de deformação localizada que surge devido a variações da espessura e rugosidade da chapa metálica. Essa imperfeição inicial na espessura da chapa é medida e caracterizada por um parâmetro  $\mu$  que é o defeito inicial na área transversal da chapa ou defeito inicial na espessura que evolui com a deformação. A estricção local visível ou deformação limite ocorre quando o gradiente de deformação local  $\lambda$  atinge um valor crítico  $\lambda_{crit} = 20$ .

No presente enfoque, a influência da espessura  $h_0$  na curva CLC-L é analisada por meio do parâmetro do defeito inicial na espessura  $\mu$  e o perfil assumido da ondulação inicial da rugosidade da chapa como mostrado na Figura 3. Portanto, num elemento inicial da chapa, as imperfeições locais na espessura  $h_0(x)$  podem ser relacionadas ao perfil das ondulações da rugosidade de modo a permitir a definição

do defeito inicial na espessura por,

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

onde  $A_0$  = área transversal inicial,  $h_0 = h_0(x)$  = espessura inicial variável ao longo de  $x$ ,  $\operatorname{tg} \theta$  = inclinação do perfil da ondulação da rugosidade,  $x$  = eixo de coordenada perpendicular à estrição local.

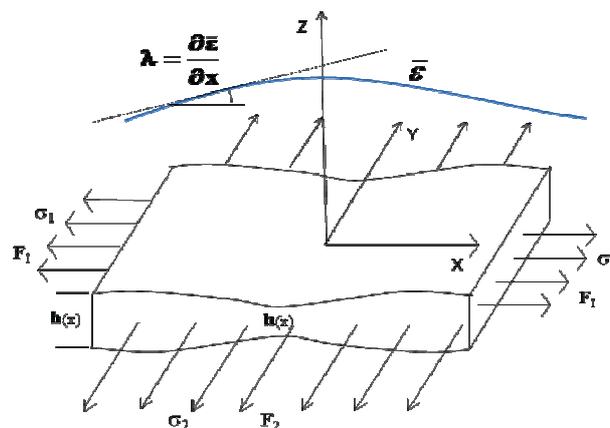


**Figura 3.** Perfil inicial da espessura variável da chapa e modelo de ondulação da rugosidade relacionado à equação (1) e definição da inclinação do perfil da ondulação,  $\operatorname{tg} \theta$ .

O presente modelamento matemático analisa uma chapa metálica fina cujo material apresenta tanto o encruamento por deformação plástica como por aumento na taxa de deformação, ou seja, a equação constitutiva da tensão de escoamento plástico equivalente corrente é,

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

onde  $k$  = coeficiente de resistência,  $\bar{\varepsilon}$  = deformação real equivalente ou logarítmica,  $\varepsilon_0$  = deformação do encruamento inicial,  $n$  = expoente de encruamento,  $\dot{\bar{\varepsilon}}$  = taxa de deformação equivalente,  $M$  = coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação.



**Figura 4.** Elemento da chapa metálica sob tração biaxial, mostrando uma estrição local e a definição do gradiente de deformação local  $\lambda$ .

Também, utiliza-se o critério de escoamento plástico de material anisotrópico proposto por Hill,<sup>(8)</sup> em 1979 que acomoda valores da anisotropia normal R menor que 1,

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

onde R = anisotropia normal, m = parâmetro de anisotropia (m = 1,14 + 0,86 R),<sup>(5)</sup>  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões principais no plano da chapa, ver Figura 4.

A equação que governa a formação e evolução da estricção local a partir da imperfeição inicial na espessura  $\mu$  nos processos de conformação de chapas metálicas é dada por Bressan e Williams,<sup>(6)</sup>

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

onde  $\lambda = \partial \bar{\varepsilon} / \partial x =$  gradiente de deformação dentro da estricção local,  $\alpha = \partial \varepsilon_1 / \partial \varepsilon_2 =$  trajetória da deformação durante a conformação e z = subtangente que é definida por,

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

A equação (4) pode ser resolvida analiticamente ou numericamente para descrever a evolução do gradiente de deformação local durante os processos de deformação de chapas. Variando-se a trajetória da deformação  $\alpha$ , a curva limite de deformação ou CLC-L pode ser calculada para estricção visível, assumindo-se que o gradiente de deformação local  $\lambda$  atinge um valor crítico  $\lambda_{crit} = 20$  ou quando  $\lambda/\mu = (\lambda/\mu)^* =$  constante crítica. Introduzindo-se a equação (1) em  $(\lambda/\mu)^*$ ,

$$(\lambda/\mu)^* = \frac{h_0}{\text{tg } \theta} \lambda_{crit} \quad (6)$$

onde  $\lambda/\mu$  é o gradiente de deformação local normalizado. O  $(\lambda/\mu)^*$  depende da espessura média inicial  $h_0$ , da inclinação inicial da ondulação da rugosidade  $\text{tg } \theta$  e do valor crítico  $\lambda_{crit}$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A inclinação do perfil da ondulação da rugosidade inicial,  $\text{tg } \theta$ , pode ser avaliado por meio de medidas do perfil das ondulações longas da rugosidade. Com base nos valores experimentais em chapas de aço, este parâmetro é menor que  $\text{tg } 10^\circ = 0,176$ , portanto, o gradiente de deformação local crítico normalizado previsto para uma estricção visível é,

$$(\lambda/\mu)^* \cong 113,4 h_0 \quad (7)$$

Portanto, o gradiente de deformação crítico normalizado no instante do surgimento de uma estrição local visível  $(\lambda/\mu)^*$  aumenta linearmente com a espessura da chapa  $h_0$ . Consequentemente, a curva CLC-L sobe no gráfico do diagrama limite de conformação para um chapa grossa. Ou seja, chapas metálicas mais grossa deve apresentar limites de deformação superiores que chapas finas, entretanto, a correlação entre a espessura da chapa e o limite de deformação não é linear. Para um metal exibindo as propriedades de plasticidade  $M = 0$  e  $\varepsilon_0 = 0$ , introduzindo-as na equação (4), o gradiente de deformação local crítico normalizado previsto é,

$$(\lambda/\mu)^* = \frac{(1 + \alpha)z/\alpha}{\frac{n}{\varepsilon_1^*} - 1} \quad (8)$$

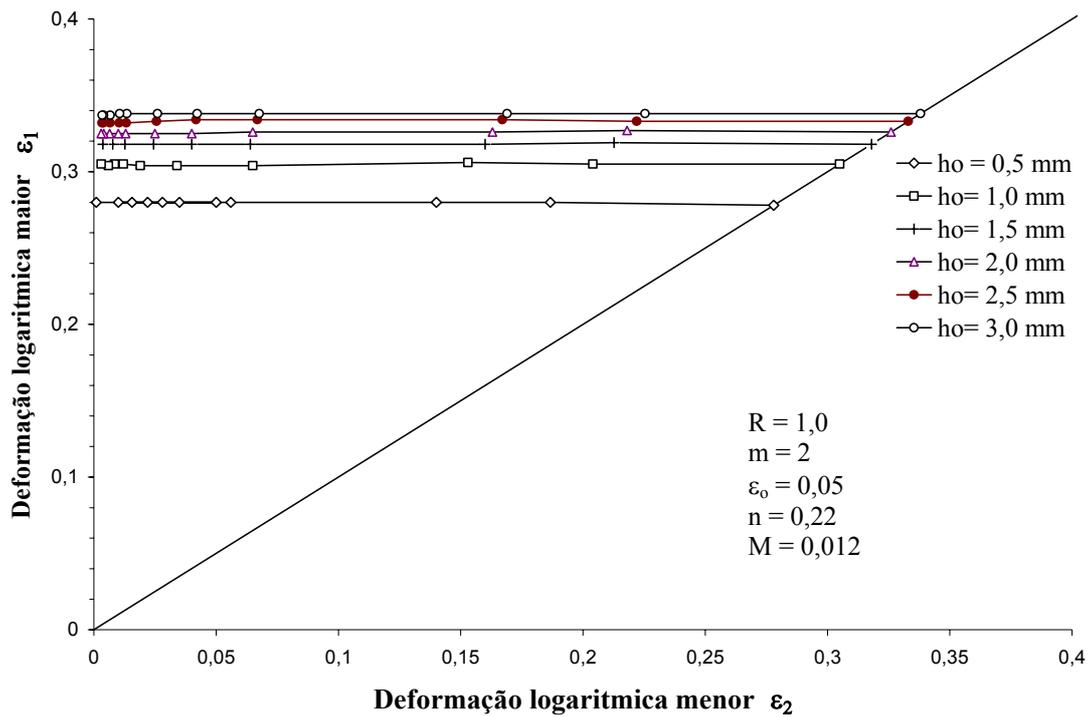
onde  $\varepsilon_1^*$  é a deformação limite da estrição local na direção principal 1. Substituindo a equação (7) na equação (8), a deformação real limite  $\varepsilon_1^*$  ou curva CLC-L pode ser calculada por,

$$\varepsilon_1^* = \frac{n}{1 + \frac{(1 + \alpha)z/\alpha}{113.4 h_0}} \approx n \quad (9)$$

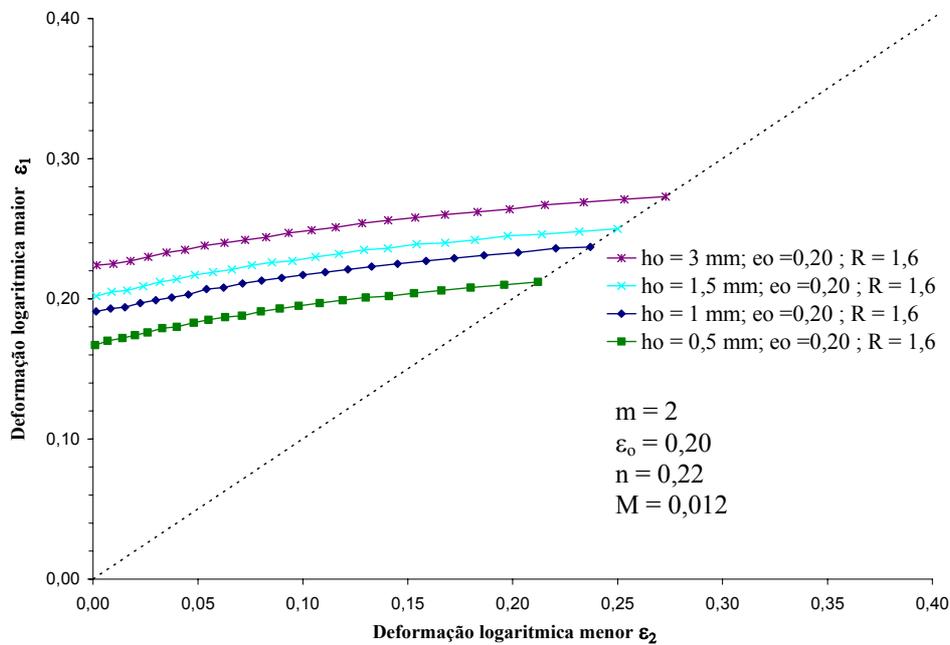
Portanto, a espessura da chapa tem efeito desprezível para ligas metálicas que não apresentam sensibilidade a taxa de deformação, ou seja  $M = 0$ , mas o valor de  $n$  pode variar levemente com a espessura da chapa, principalmente com a redução a frio da espessura da chapa.

Por outro lado, para ligas metálicas exibindo sensibilidade a taxa de deformação,  $M > 0$ , o valor da espessura tem um efeito importante nas deformações limites de conformação ou na curva CLC-L.

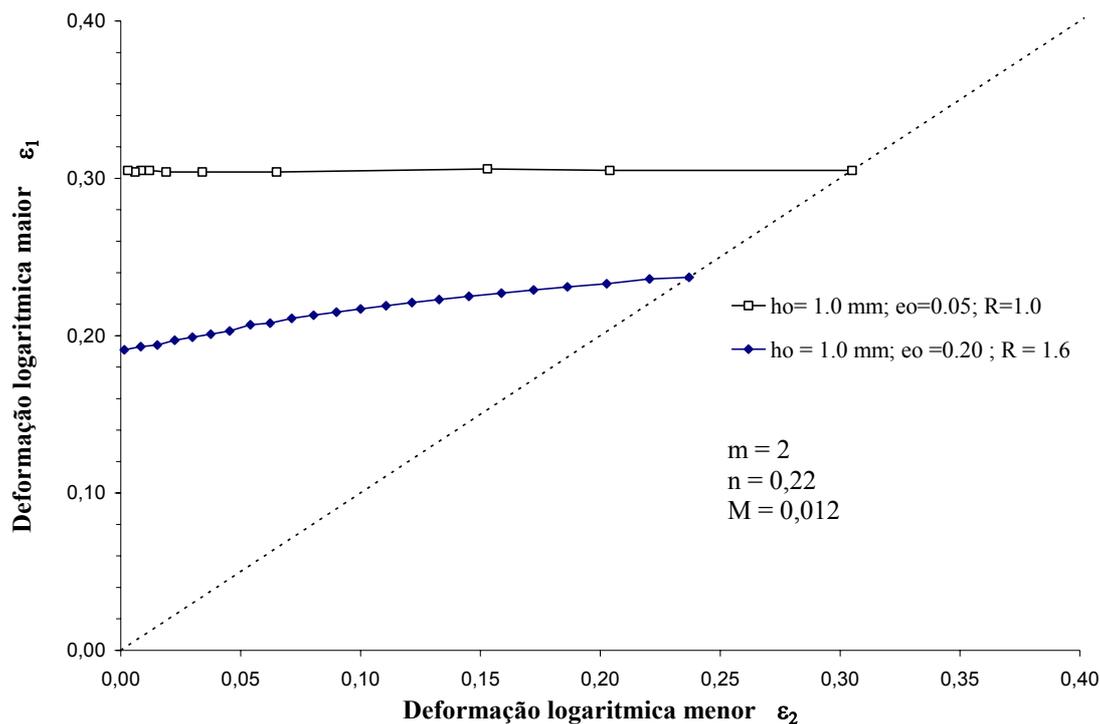
A previsão teórica do efeito da espessura  $h_0$  na curva limite de deformação de chapas de aço de 0,5 ; 1,0 ; 1,5 ; 2,0 ; 2,5 e 3,0 mm pode ser apreciado na Figura 5. A curva CLC-L está traçada somente na região positiva ou região de estiramento biaxial do DLC. A chapa de aço foi assumida isotrópica,  $R = 1$  e  $m = 2$ , apresentando a tensão equivalente do escoamento plástico como  $\bar{\sigma} = k(0,05 + \bar{\varepsilon})^{0,22} \bar{\varepsilon}^{0,012}$  MPa, ou seja,  $n = 0,22$  e  $M = 0,012$ . De acordo com a equação (1), o parâmetro do defeito inicial de espessura  $\mu$  diminui do valor 0,352 para 0,059 a medida que a espessura aumenta de 0,5 mm para 3,0 mm. Portanto, a deformação limite aumenta em aproximadamente 20%. Ou seja, chapas metálicas finas terão curvas limites de deformação situadas em níveis inferiores e menor resistência ao surgimento da estrição local. Entretanto, chapas metálicas grossas tendem a apresentar um limite máximo teórico na deformação principal maior de aproximadamente 0,34 para este material. Embora o parâmetro  $M$  é muito pequeno, é suficiente para retardar o surgimento da estrição local visível, aumentando da deformação limite  $\varepsilon_1^*$  de 0,22 para 0,31 para chapa de aço de 1 mm.



**Figura 5.** Previsão da influência da espessura da chapa  $h_0$  na deformação limite ou CLC-L para uma chapa de aço isotrópica cuja equação constitutiva é  $\bar{\sigma} = k(0,05 + \bar{\epsilon})^{0,22} \bar{\epsilon}^{0,012}$ , de acordo com o presente modelo.



**Figura 6.** Previsão da influência da espessura  $h_0$  para chapa metálica com elevado encruamento inicial de  $\epsilon_0 = 0,20$  na deformação limite ou CLC-L.



**Figura 7.** Previsão da influência do encruamento inicial da chapa de  $\epsilon_0 = 0,05$  e  $\epsilon_0 = 0,20$  na deformação limite ou CLC-L.

Na Figura 6, a previsão teórica da influência da espessura  $h_0$  de uma chapa metálica com elevado encruamento inicial de  $\epsilon_0 = 0,20$  na deformação limite pode ser observado. O encruamento da chapa tem o efeito de diminuir os limites de deformação, principalmente para o estado plano de deformações, como apresentado na Figura 7 que compara uma chapa de 1 mm com encruamento inicial de  $\epsilon_0 = 0,05$  e  $\epsilon_0 = 0,20$ .

#### 4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais e previsões teóricas das curvas limites de deformação de chapas metálicas sob estiramento biaxial, região positiva do gráfico DLC, para chapas metálicas finas com espessura variando entre 0,5 mm a 3,0 mm, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- o presente modelo teórico da evolução do gradiente de deformação local a partir de imperfeições iniciais na espessura da chapa metálica produziu previsões razoáveis da influência da espessura na curva limite de deformação ou da estricção local visível,
- o gradiente de deformação local crítico normalizado previsto teoricamente para uma estricção local visível é  $(\lambda/\mu)^* \cong 113.4h_0$
- chapas de aço grossa tem curvas limites de deformação mais elevadas que chapa fina em até 20% , portanto, chapa grossa tem maior resistência a formação da estricção local,
- chapa de aço com tensão equivalente de  $\bar{\sigma} = k(0,05 + \bar{\epsilon})^{0,22} \bar{\epsilon}^{0,012}$  apresentam uma deformação limite principal maior de 0,34 na região positiva do gráfico DLC.

- o encruamento inicial da chapa metálica tem grande efeito na deformação limite, abaixando a curva limite com o aumento do encruamento inicial. Portanto, chapas finas encruadas na laminação final tem deformação limite inferiores que chapas grossa.

### **Agradecimentos**

O autor gostaria de agradecer o suporte financeiro recebido do CNPq e da Universidade do Estado de Santa Catarina.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 KEELER, S.P., Determination of Forming Limits in Automotive Stampings. Sheet Metal Industries, pp. 683, 1965.
- 2 HILL, R., On Discontinuous Plastic States, with Special Reference to Localised Necking in thin Sheets. J. Mech. Phys. Solids, vol.1, pp.19-30, 1952.
- 3 MARCINIAK, Zdzislaw e Kuczynski, Kazimierz, Limit Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metals. Int. J. Mech. Sci., vol 9, pp. 609-620, 1967.
- 4 STOREN, S. e Rice, J.R., Localized Necking in Thin Sheet. J. Mech. Phys. Solids, v.23 , pp. 421-441, 1975.
- 5 BRESSAN, J. D. e Williams, J. A., The Use of Shear Instability Criterion to Predict Local Necking in Sheet Metal Deformation. Int. J. Mech. Sci., vol. 25, n. 3, pp. 155-168, 1983.
- 6 BRESSAN, J.D. e Williams, J.A., Limit Strains in the Sheet Forming of Strain and Strain-Rate Sensitive Materials, J. Mech. Working Tech., vol.11, pp.291-317, 1985.
- 7 KORONEN, A.S.; Manninen, T. e Kanervo, K., On Necking, Fracture and Localization of Plastic Flow in Austenitic Stainless Steel Sheets. In: ESAFORM 2006, Glasgow/UK, pp. 93-98, 2006.
- 8 HILL, R., Theoretical Plasticity of Textured Aggregates. Math. Proc. Cam. Phil. Soc., v. 85, pp. 179-191, 1979.