

CURVA LIMITE DE ESTAMPAGEM À FRATURA (CLEF) VERSUS CURVA LIMITE DE ESTAMPAGEM À ESTRICÇÃO (CLEE)¹

Valmir Dias Luiz²
Haroldo Béria Campos³
Túlio Magno Füzessy de Melo⁴
Juan Carlos Campos Rubio⁵

Resumo

A metodologia empregada para determinação da Curva limite de estampagem à fratura do aço LI (Livre de Intertisticiais) foi o emprego de um software para análise de imagem, o ASAME 4.1, enquanto que a metodologia empregada para determinação da Curva limite de estampagem à estrição foi a utilização do método nº5 de *Zurich*, método este discutido em outros estudos, cujos resultados são utilizados e confrontados com o do presente estudo. A determinação da Curva limite de estampagem em torno do aparecimento de uma estrição localizada obtêm-se resultados mais precisos, mas, a metodologia empregada na determinação desta curva é o que a torna às vezes difícil, o que não ocorre na curva obtida à fratura, onde se utiliza um software para análise de imagem, e com um tempo bem menor consegue-se determinar esta curva.

Palavras-chave: Curva limite de estampagem à fratura; Curva limite de estampagem à estrição; Aço LI.

FORMING LIMIT CURVE AT FAILURE (FLCF) VERSUS FORMING LIMIT CURVE AT NECKING (FLCN)

Abstract

The forming limit curve at failure IF (Interstitial Free) steel was determined using an image analysis software (ASAME 4.1) while the forming limit curve at necking was evaluated using the Zurich number 5 method discussed in other studies, whose results are compared to the ones here obtained. More accurate results are obtained by the forming limit curve around a localized necking, though the methodology used in its determination makes the process more difficult. This is not the case of the curve determined at fracture which can be quickly and easily obtained by using an image analysis software.

Key words: Forming limit curve at failure; Forming limit curve at necking; IF steel.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc., DCX, Professor da Área de Ciências Exatas do UnilesteMG, Coronel Fabriciano, MG.*

³ *Membro da ABM; Físico, Dr.-Eng, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da EEUFMG, Belo Horizonte, MG.*

⁴ *Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, Dr.-Ing., Gerência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

⁵ *Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Dr.-Eng, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da EEUFMG, Belo Horizonte, MG.*

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias de conformação de chapas metálicas tiveram um desenvolvimento apreciável nos últimos anos, com a utilização de novos modelos teóricos e meios experimentais de análise dos processos por deformação plástica. Estes processos que permitem a obtenção de peças mecânicas estampadas com produção elevada e a utilização praticamente integral da matéria ocupam, devido à quantidade de matéria prima tratada, um lugar de relevo no âmbito das indústrias de conformação. Nestas últimas décadas, sistemas de Concepção Assistida por Computador (CAD/CAE/CAM)^(1,2) estão sendo amplamente aplicados a processos de conformação de chapas finas. Além de equipamentos computacionais, são também necessários os seguintes recursos:

- Software de CAD;
- Software de Simulação (FEM);
- Software de Cálculo de Instabilidade Plástica (por exemplo, método M-K);
- Dados Relativos dos Materiais (\bar{R} , n , m , CLE, curva de escoamento, etc.);
- Sistema Iterativo de Correção de Geometrias e Propriedades.

No estudo da estampagem, a "*formabilidade*" das chapas finas pode apresentar-se de duas formas distintas segundo o ponto de vista em que a se coloca. Para o fabricante de chapas, o objetivo é determinar quais os parâmetros característicos da chapa que estão relacionados com a sua aptidão a ser embutida. Para o embutidor, o problema consiste em determinar o valor dos parâmetros que permitirão o sucesso de uma peça particular de formas e dimensões bem determinadas.

No primeiro caso, é necessário conhecer os fatores essenciais da formabilidade das chapas finas, ou seja, o coeficiente de encruamento n , o coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação m , e o coeficiente de anisotropia, \bar{R} . Cada um destes parâmetros pode ser determinado através de um teste de tração. A influência de cada um deles no processo de estampagem é hoje bem conhecida, a sua análise pode rapidamente fornecer indicações preciosas acerca da aptidão de uma determinada chapa para a fabricação de uma determinada peça.

No segundo caso, isto é, para o embutidor o problema consiste em selecionar os diferentes parâmetros de uma operação de estampagem de forma a garantir o seu sucesso. No entanto, como referido anteriormente, estes parâmetros são numerosos e complexos (atrito, folga punção-matriz, lubrificantes, configuração das ferramentas, pressão do prensa-chapas, velocidade do punção etc). Diversos destes parâmetros como a lubrificação e o atrito têm sido os mais estudados por diferentes grupos de pesquisadores.⁽³⁻⁵⁾ Este fato explica, por si, o sucesso da noção da Curva Limite de Estampagem-CLE (*Forming Limit Curve-FLC*), que foi introduzida por Keeler⁽⁶⁾ e Goodwin⁽⁷⁾ nos anos sessenta para caracterizar a "*formabilidade*" das chapas finas. Keeler⁽⁶⁾ e Goodwin⁽⁷⁾ constataram que era possível definir no plano das deformações principais ε_1 e ε_2 , uma curva separando o domínio das deformações admissíveis do domínio das deformações de fratura. Essa curva pode ser determinada à estrição (Curva Limite de Estampagem à Estrição-CLEE) ou à fratura (Curva Limite de Estampagem à Fratura-CLEF), e o que se pretende no presente estudo é justamente confrontar as duas curvas para uma análise.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O aço utilizado nesse estudo é um aço Livre de Intersticiais (LI), retiradas de bobinas laminadas a frio e recozidas em forno contínuo e produzido pela Usiminas S/A, cuja composição química e propriedades mecânicas é mostrada na Tabela 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Composição química do aço LI (% em massa).

C	Mn	P	S	Al	Ti	N
0,0027	0,10	0,010	0,006	0,045	0,066	0,0028

Fonte: Luiz et al, 2006-1.

São apresentados na Tabela 2 o limite de escoamento S_0 , o limite de resistência S_u e o alongamento total Al . Também são mostrados o valor médio do coeficiente de anisotropia \bar{R} (coeficiente de anisotropia normal), o valor $\overline{\Delta R}$ (coeficiente de anisotropia planar), o valor de n (coeficiente de encruamento) e o valor de K (coeficiente de resistência do material).

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço LI, determinadas em ensaio de tração.

Direção	S_0 (MPa)	S_u (MPa)	Al (%)	\bar{R}	$\overline{\Delta R}$	n	K (MPa)
0°	158	301	50,8	1,99	-	0,255	551
45°	166	304	49,1	1,82	-	0,244	547
90°	165	298	50,4	2,30	-	0,246	537
Média	-	-	-	1,98	0,33	-	-

Fonte: Luiz et al, 2006-1.⁽⁸⁾

A microestrutura resultante da composição química do aço LI e das condições usadas na sua fabricação é formada de grãos recristalizados de ferrita, com pequenos precipitados, basicamente carbonitreto de Titânio. O aspecto típico dessa microestrutura, após preparação metalográfica convencional e ataque químico de uma seção realizada ao longo da espessura da chapa utilizada, a 90° com a direção de laminação, é apresentado na Figura 1 (a). Os baixos teores de impurezas presentes no material resultam em uma quantidade muito pequena de inclusões, basicamente sulfetos e óxidos, com o aspecto mostrado na Figura 1 (b).

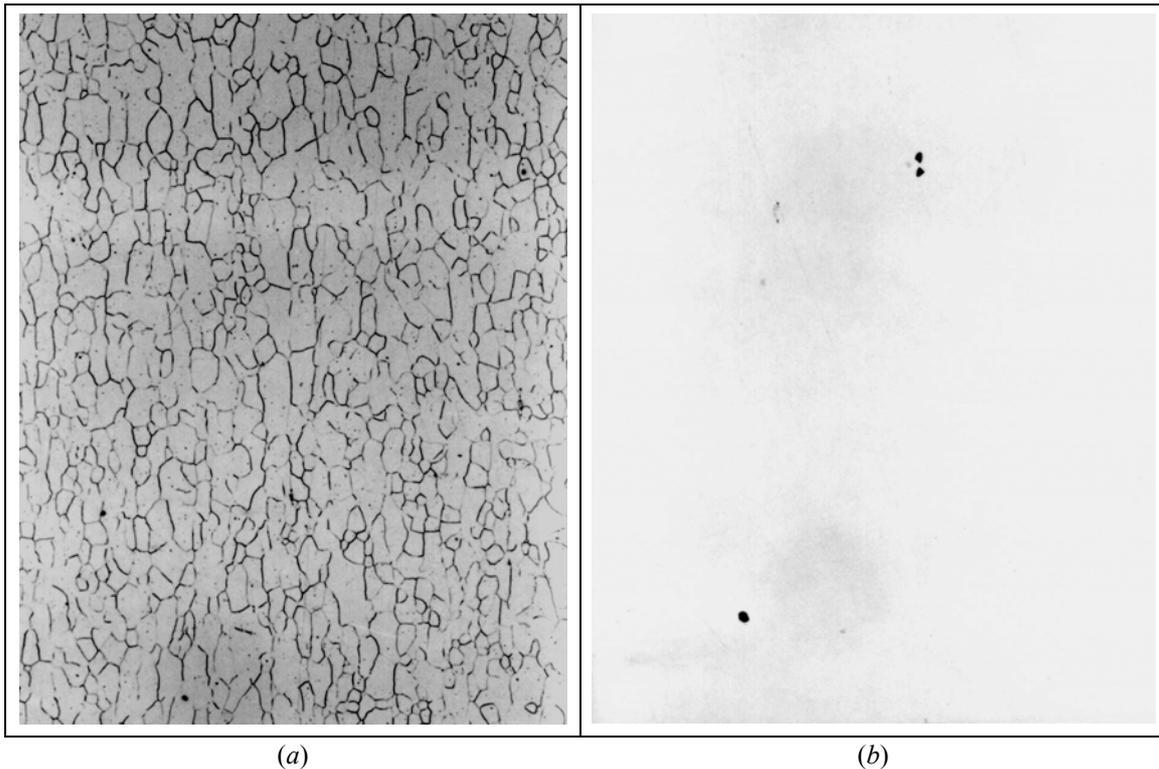


Figura 1. Aspectos típicos: (a) da microestrutura (ataque com Nital 4%) e (b) das inclusões (sem ataque) do material utilizado neste estudo. Ampliação: 200X

Atualmente, várias empresas, como por exemplo, a Usiminas S/A utiliza um software para análise de imagem, o ASAME 4.1, na determinação da curva limite de estampagem, e essa curva não é determinada à estrição, mas sim à fratura. A malha de referência utilizada nos *blanks* é de geometria quadrada com 2,0 mm de dimensão, e por impressão eletroquímica ela é impressa nos Corpos-de-Prova (CP's) para se fazer os ensaios *Nakazima* e *Bulge-Test*.

Por esse método, não se mede a malha antes de ensaiar todos os CP's, como realizado em estudos anteriores.^(8,9) Assim que a malha é impressa nos CP's, eles são imediatamente ensaiados pelos ensaios *Nakazima* e *Bulge-Test*, e logo depois se tira uma foto do local onde ocorreu a fratura. Com a imagem real do local fraturado, desenha-se em cima da própria imagem a geometria da região fraturada, como mostra a Figura 2.

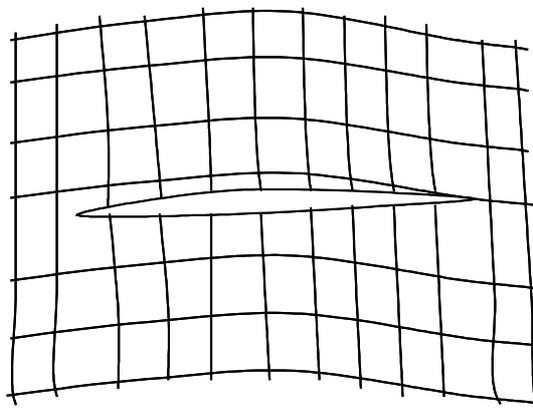


Figura 2. Esquema de medição da malha de referência quadrada, utilizando o software ASAME 4.1.

Em seguida, é feita uma referência com um cubo de dimensões conhecidas (2,0 mm), e o *software* mede todos os quadrados (nodos) deformados em volta do desenho da fratura. Logo após, o *software* faz o cálculo das deformações de interesse segundo a Equação 1 e a Equação 2, que posteriormente, serão utilizadas para determinação da CLEF.

Depois de ensaiados todos os corpos-de-prova, foram calculadas todas as deformações de interesse; para isso, foi utilizada a Equação 1 para o cálculo de ε_1 (deformação maior), e a Equação 2 para o cálculo de ε_2 (deformação menor).

$$\varepsilon_1 = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \int_{l_1}^{l_2} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_2}{l_1} \quad (2)$$

Onde nas Equações 1 e 2, ε_1 é a deformação maior, ε_2 a deformação menor, l_0 é o diâmetro inicial da malha de referência antes dos ensaios físicos, l_1 e l_2 o diâmetro da malha deformada após os ensaios físicos, na direção perpendicular e paralela à laminação, respectivamente. Para determinação da CLEE utilizou-se a metodologia da análise de uma grade de círculos secantes de 3,0 mm de diâmetro, onde aplicou-se o método n^o5 de *Zurich* para determinação das deformações ε_1 e ε_2 .^(8,9)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ASAME 4.1 utiliza mais de 300 nodos de uma vez para efetuar o cálculo das deformações, entre fraturados e não fraturados, e emite uma planilha no Excel com todos esses valores, e com apenas 21 pontos experimentais, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Pontos obtidos pelo *software* ASAME 4.1 para determinar a CLEF.

Pontos	ε_1	ε_2	Pontos	ε_1	ε_2
0	0,855685	-0,42715	11	0,518401	0,005940
1	0,862803	-0,38973	12	0,493579	0,048247
2	0,856500	-0,37266	13	0,456257	0,133657
3	0,842112	-0,33126	14	0,442412	0,199175
4	0,777906	-0,26733	15	0,445017	0,245454
5	0,737185	-0,22929	16	0,460840	0,275161
6	0,687373	-0,18680	17	0,480693	0,308142
7	0,627825	-0,13256	18	0,536231	0,377050
8	0,568208	-0,06601	19	0,559726	0,437006
9	0,552382	-0,04585	20	0,555261	0,484325
10	0,530120	-0,02352	-	-	-

Com esses pontos experimentais o *software* então determina a Curva Limite de Estampagem à Fratura-CLEF, conforme mostra a Figura 3.

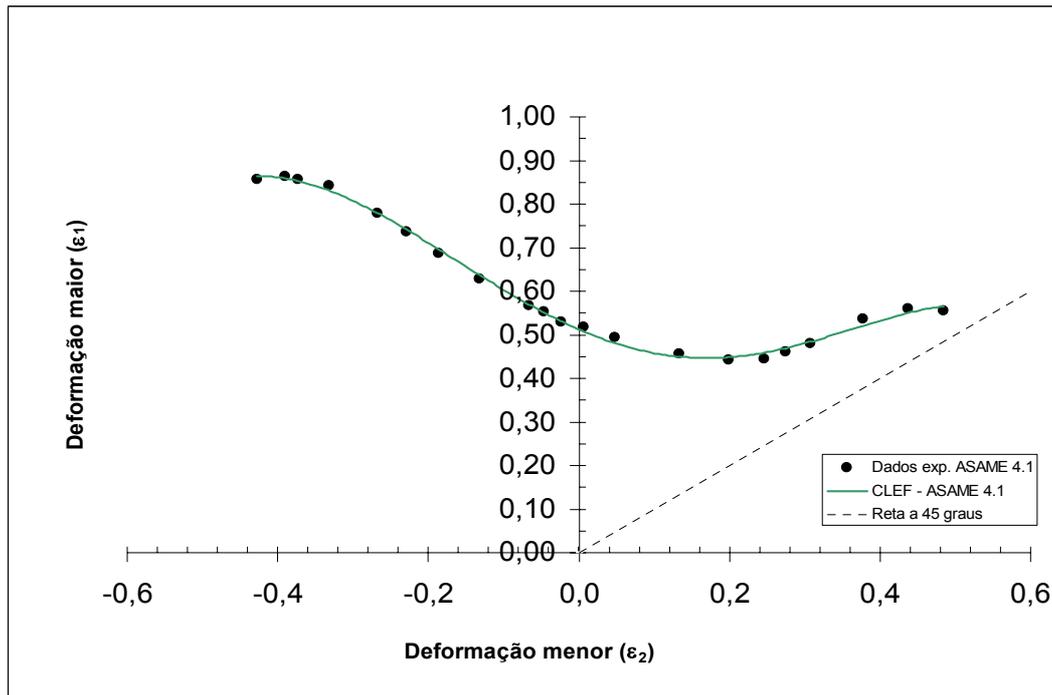


Figura 3. Curva limite de Estampagem à Fratura (CLEF) do aço LI, determinada utilizando-se o *software* ASAME 4.1.

Analisando-se a Figura 3, pode-se ver que o aspecto da CLEF é bem diferente das CLEE's (Figura 4), e o principal motivo dessa diferença é a precisão na determinação das deformações das duas curvas, pois nas CLEE's a precisão no cálculo das deformações é maior do que na CLEF. Isso ocorre devido principalmente ao fato de se medir a malha de referência antes e depois dos ensaios físicos, e não somente depois, como no caso da CLEF, pois há uma imprecisão na dimensão dessas malhas. Essa diferença de resultados aumenta ainda mais quando se aplica o método nº5 de *Zurich*, pois com esse método os resultados melhoram ainda mais. A reta a 45° das Figuras 3 e 4 representa a situação em que se tem uma trajetória de estiramento biaxial balanceado, em que $\epsilon_1 = \epsilon_2$ e $\alpha = \rho = 1$. Como era esperado, a CLEF e as CLEE's não toca a reta, pois o material utilizado no presente estudo é um material anisotrópico, um aço Livre de Interciais (LI). Nesse material, os valores do coeficiente de anisotropia nas três direções (0, 45 e 90°) são maiores que uma unidade ($R_0 = 1,99$, $R_{45} = 1,82$ e $R_{90} = 2,30$), conforme mostra a Tabela 2.

Pode-se ver na Figura 4 três curvas sobrepostas: a CLEE04, obtida com apenas quatro corpos-de-prova (dois de tração e dois de *Bulge-test*); a CLEE02, obtida utilizando-se os ensaios *Nakazima*, *Bulge-Test* e tração; e a CLEF, obtida utilizando-se o *software* ASAME.

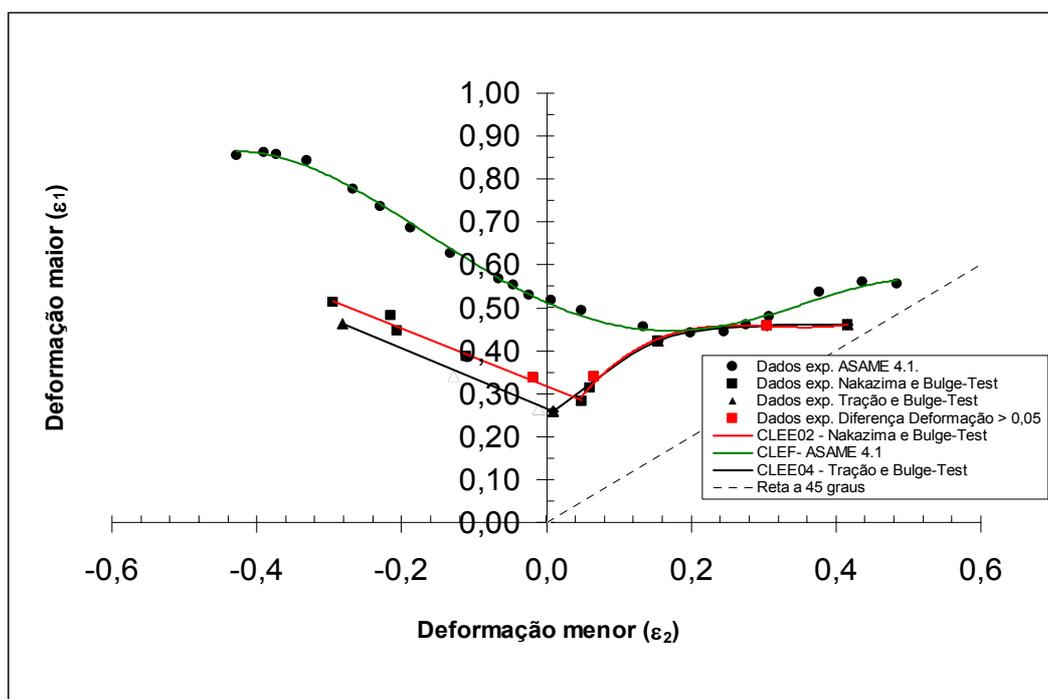


Figura 4. Comparação entre a CLEF e as CLEE's.

Observa-se na Figura 4, que no lado direito, a CLEE04 obtida com apenas quatro CP's é aproximadamente coincidente com a CLEE02 obtida com todos os CP's dos ensaios *Nakazima* e *Bulge-Test*. Já pelo lado esquerdo as CLEE's não são coincidentes, mas são aproximadamente paralelas.

Como previsto na literatura⁽¹⁰⁾ a curva do lado esquerdo das CLEE's é uma reta, pois desse lado há o predomínio do estiramento uniaxial o que não acontece com a CLEF, pois ela é obviamente obtida à fratura, por isso, as CLEE's tanto pelo lado direito quanto pelo esquerdo não coincidem com a CLEF.

4 CONCLUSÕES

A análise da conformação das chapas metálicas pode, no entanto, ser levada mais longe, graças ao conceito de CLE. Com efeito, se através de um método numérico (método de elementos finitos, por exemplo), ou analítico, forem determinadas as deformações em cada ponto da peça estampada e as respectivas "histórias" de deformação, é possível não só saber se a peça pode ser estampada, como também quantificar a fiabilidade da operação através da posição dos pontos de coordenadas ϵ_1 , ϵ_2 , relativamente à CLE, e quanto mais precisa for esta curva, mais sucesso pode-se ter numa operação de estampagem. Entretanto, segundo os resultados obtidos no presente estudo e os de estudos anteriores, a CLEE apresentou-se mais "conservadora", ou seja, mais "realística" do que a CLEF obtida por meio do *software* ASAME 4.1., isso já era esperado já que uma é obtida à estirção e outra à fratura, mas, é à fratura que as empresas determinam com maior frequência, principalmente pelo fato de sua determinação ser mais rápida e menos dispendiosa do que a CLEE.

REFERÊNCIAS

- 1 LEE, D. Computer-Aided Control of Sheet Metal Forming Processes. **Journal of Metals**, p. 20, nov. 1982.
- 2 FROMENTIN, S.; MARTINY, M.; FERRON, G.; TOURKI, Z.; MOREIRA, L.P. and FERRAN, G. Finite Element Simulations of Sheet-Metal Forming Process for Planar-Anisotropic Materials. **International Journal Mechanical Sciences**, vol. 43, p. 1833-1852. 2001.
- 3 MURAKI, M. e NAKAMURA, T. Frictional Behavior of Lubricants During Deep Drawing and Ironing Process for Zinc-coated Steel Sheets. **Journal of Engineering Tribology**, 210(1996)189-197.
- 4 WANG, Z.; KONDO, K. e MORI, T. Surface Smoothing Mechanism by replication in Ironing Process. **Journal of Engineering for Industry**, 117(1995-1)259-265.
- 5 WANG, Z.; KONDO, K. e MORI, T. A Consideration Of Optimum Conditions For Surface Smoothing Based on Lubricating Mechanisms in Ironing process. **Journal of Engineering for Industry**, 117(1995-2)351-356.
- 6 KEELER, S.P. **Sheet Metal Industries**, v 42 n°461, p. 683-691. 1965
- 7 GOODWIN, G. M. Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop. **La Metallurgia Italiana**, v 60, p. 767-774. 1968.
- 8 LUIZ, V.D.; CAMPOS, H.B.; MELO, T.M.F. e RUBIO, R.C.C. Análise de Métodos para a Determinação Experimental da Curva Limite de Estampagem (CLE) de Chapas Finas de Aços para a Estampagem. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: ABM, 2006-1. 1 CD.
- 9 LUIZ, V.D.; CAMPOS, H.B.; MELO, T.M.F. e RUBIO, R.C.C. Determinação Experimental da Curva Limite de Estampagem à Estricção (CLEE) Utilizando os Ensaio de Tração e Bulge-Test. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 43., 2006, Curitiba. **Anais...** São Paulo: ABM, 2006-2. 1 CD.
- 10 DIETER, G.E. **Overview of Workability**. In: Workability Testing Techniques, DIETER, G. E. (editor) Metals Park, American Society for Metal, p. 1-19. 1984.