

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CURVA LIMITE DE ESTAMPAGEM À ESTRICÇÃO (CLEE) UTILIZANDO OS ENSAIOS DE TRAÇÃO E BULGE-TEST¹

Valmir Dias Luiz²

Haroldo Béria Campos³

Túlio Magno Füzessy de Melo⁴

Juan Carlos Campos Rubio⁵

Resumo

Foram realizados ensaios de tração e ensaios *Bulge-Test* em corpos-de-prova cortados numa chapa de aço LI (Livre de Intersticiais) com 1,20 mm de espessura, retiradas de bobinas laminadas a frio e recozidas em forno contínuo. Previamente, uma malha de referência com 3,0 mm de diâmetro foi impressa nos respectivos corpos-de-prova e através de um microscópio óptico realizaram-se as medidas dessa malha antes e depois dos ensaios. As deformações de interesse foram calculadas em cada corpo-de-prova, e através do método nº5 de *Zurich*, fez-se a interpolação de seis dados experimentais, determinando assim por interpolação, para cada corpo-de-prova, o par de deformação ε_1 (deformação maior) e ε_2 (deformação menor) da Curva Limite de Estampagem à Estricção-CLEE. Como o lado esquerdo da CLEE é uma reta, através desse estudo prova-se que é possível levantar uma CLEE utilizando apenas quatro dados experimentais, mesmo assim a curva seria ainda bem precisa, quando comparada com outras obtidas com outros ensaios e com mais dados experimentais.

Palavras-chave: Curva limite de estampagem à estricção, Análise da grade de círculos; Aço LI; Ensaio de tração; Ensaio Bulge-Test

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE NECKING FORMING LIMIT CURVE (NFLC) USING TENSION AND BULGE TESTS

Abstract

Tensile and Bulge tests were conducted on specimens in the form of blanks from sheets 1.20 mm thin taken from cold rolled and continuous annealed coils of a IF (Interstitial Free) steel. The circle grid analysis method was used, in which a reference grid was printed on the surface of the test specimens, and before and after each test the circles were measured with the aid of an optical microscope. Using the *Zurich* No. 5 Method, six experimental data were interpolated for each test specimen, determining the deformation pair of major and minor strains of the Forming Limit Curve at Necking. With this study, involving the measurement of the deformation at a localized necking, more precise results can be obtained compared to other methods applied nowadays, which can be result in more precise Forming Limit Curves, allowing the production of more complex without any loss in quality and reliability.

Key words: Forming limit curve at necking; Circle grid analysis; IF steel; Tensile; Bulge test.

¹ Contribuição Técnica ao 43º Seminário de Laminação – Curitiba, PR, Brasil, 17 a 20 de outubro de 2006.

² 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

A noção de CLE foi introduzida por Keeler⁽¹⁾ e Goodwin,⁽²⁾ nos anos sessenta para caracterizar a "formabilidade" das chapas finas, ou seja, sua aptidão para a deformação plástica.

A "*Curva Limite de Estampagem à Estricção-CLEE*" reveste-se de uma enorme importância no estudo de todo o processo de estampagem e representa hoje em dia uma ferramenta preciosa ao dispor dos fabricantes de peças estampadas. A medida experimental da deformação numa peça estampada (através da disposição prévia de uma malha de referência na chapa), e sua posterior comparação com a CLEE, permite conhecer de forma quantitativa:

- a margem de segurança da peça estampada;
- o local crítico onde se produzirá preferencialmente a estricção ou fratura;
- a seleção das condições de trabalho ideais (força do prensa-chapas, lubrificação, velocidade de deformação, etc.);
- a qualidade da chapa necessária para garantir o sucesso da operação;
- a influência das propriedades da chapa sobre a margem de segurança da peça estampada e fornecer indicações úteis acerca da escolha do material tendo em vista a otimização do processo;
- a dificuldade na obtenção da peça estampada.

Jogando com a geometria da ferramenta, a força do prensa-chapas, o material, entre outros, o estampador pode então se afastar quantitativamente da CLE e, assim, do risco de estricção ou fratura.⁽³⁾

Cada tipo de material pode ser trabalhado até um certo grau de deformação antes do surgimento de estricção localizada ou fratura. Esse estado de deformação é normalmente expresso pela combinação das deformações principais na forma de uma deformação maior (ϵ_1) e uma deformação menor (ϵ_2). A forma mais largamente utilizada para definir o limite de deformação antes da falha é a "*Curva Limite de Estampagem-CLE*".⁽⁴⁾

As Curvas Limites de Estampagem (CLEs) representam os limites aceitáveis de deformação nas duas superfícies principais e suas combinações de deformação, onde ocorre o afinamento. As deformações são medidas nas regiões de afinamento e de ruptura da chapa. Exemplo típico de uma CLE é mostrado na figura 1. Os pontos acima da curva expressam estados de deformação que levam à falha do material (fratura), enquanto os que estão abaixo expressam estados de deformação sem falha, considerados seguros.

A CLEE é totalmente dependente da história do caminho de deformação, pois a estricção e as eventuais falhas na chapa metálica vão ocorrer onde os limites de deformação considerados críticos são excedidos ou ultrapassados (Domkin, 2000).

Mas, alguns fatores devem ser levados em conta ao levantar esta curva, sendo que o primeiro é o diâmetro dos círculos da malha de referência utilizada na análise experimental das deformações. É fácil de notar que as deformações medidas através da malha de referência correspondem a um valor médio da deformação ao longo do valor médio da elipse.

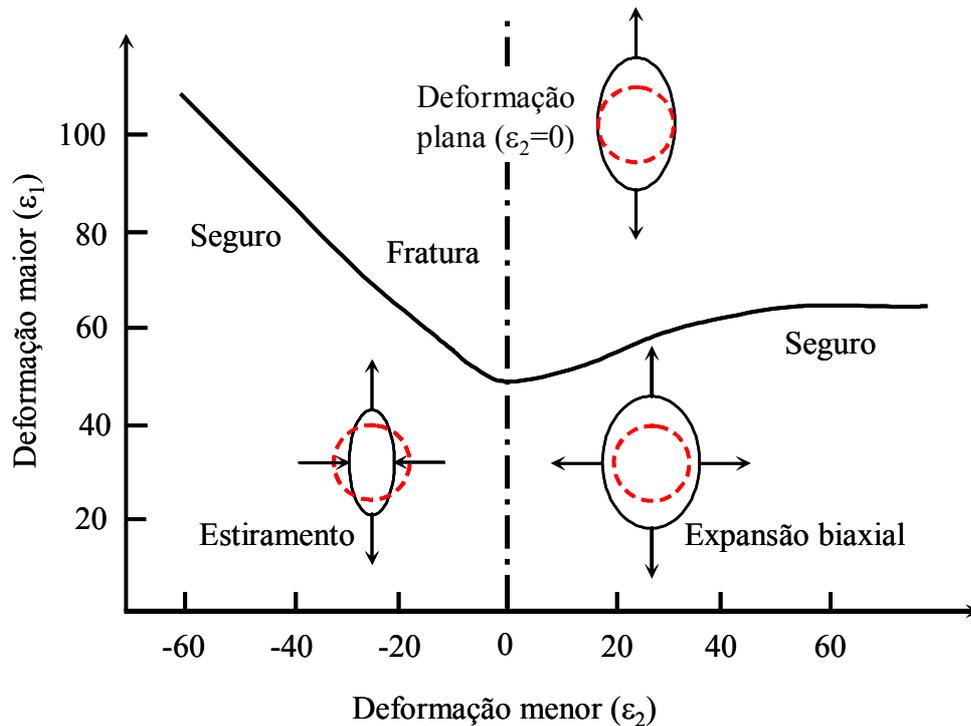


Figura 1. Curva limite de estampagem genérica.⁽⁵⁾

Martin, citado por Barata da Rocha e Duarte,⁽⁶⁾ diz que nos diagramas dos estados de tensão e de deformação distinguem-se dois domínios correspondentes a modos de sollicitação distintos;

- domínio de estiramento uniaxial: este domínio está compreendido entre as trajetórias de deformação correspondentes ao cisalhamento puro e à deformação plana ($\varepsilon_2 < 0$);
- domínio de estiramento biaxial : este domínio está compreendido entre as trajetórias de deformação correspondentes à deformação plana e ao estiramento biaxial simétrico ($\varepsilon_2 > 0$).

Entretanto, atualmente existem vários ensaios de simulação física ou ensaios de "formabilidade" para se determinar experimentalmente a CLE, tal como o ensaio de Tração uniaxial e *Bulge-Test* (caracterizado pela ausência de atrito devido à utilização de uma pressão hidráulica).

O ensaio de tração é o mais difundido e conhecido, encontrando-se normalizado praticamente em todos os países. Além da determinação dos coeficientes de encruamento, anisotropia e estrição, este ensaio permite simular as trajetórias de deformação no domínio do estiramento uniaxial das CLEs. Neste ensaio o corpo-de-prova é submetido a uma força trativa uniaxial continuamente crescente enquanto são feitas observações simultâneas do alongamento do corpo-de-prova.⁽⁷⁾ Com apenas dois pontos experimentais obtidos com esse tipo de ensaio é possível determinar o lado esquerdo da CLEE, pois, trata-se de uma reta.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O aço utilizado nesse estudo é um aço Livre de Intersticiais (LI), produzido pela Usiminas S/A. O material utilizado encontrava-se na forma de chapas com 1,20 mm de espessura, retiradas de bobinas laminadas a frio e recozidas em forno contínuo, resultando em um aço com baixo limite de escoamento, alto alongamento total e

excelentes propriedades de estampagem. Essa combinação de propriedades torna o aço LI ideal para aplicação em painéis de automóveis com geometria complexa e elevadas deformações durante a conformação.

Da chapa de 1,20 mm de espessura, retiradas de bobinas laminadas a destinadas à fabricação de painéis da carroceria de automóveis, foram confeccionados cinco diferentes tipos corpos-de-prova (CPs) de tração, conforme Grumbach & Sanz, citado por Barata da Rocha & Duarte,⁽⁶⁾ pois, distintas trajetórias de deformação são obtidas através da variação da geometria dos corpos-de-prova. Os CPs de tração confeccionados são mostradas na Figura 2.

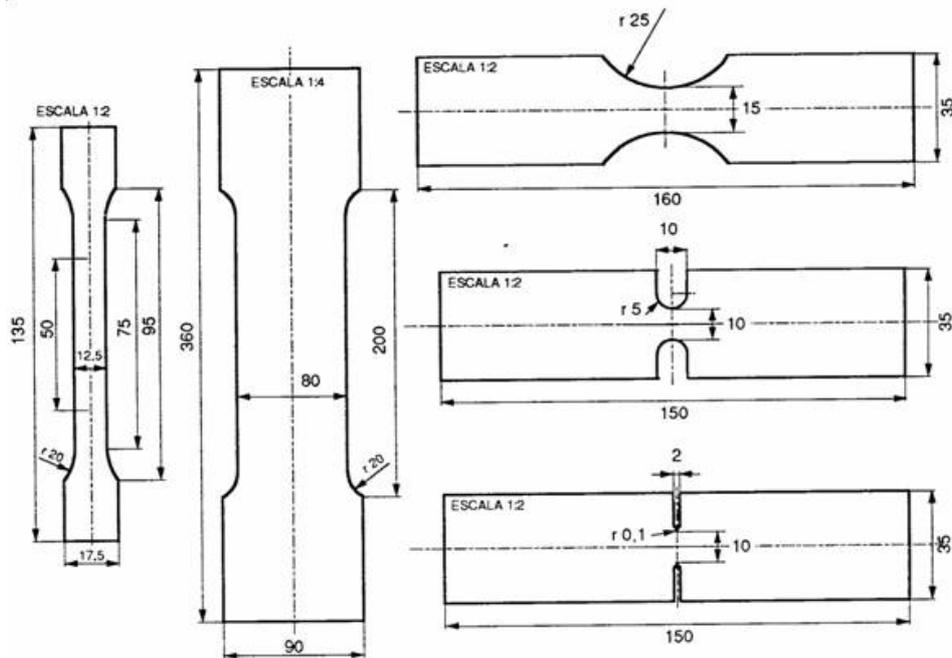


Figura 2. Corpos-de-prova de tração.

Três *blanks* com dimensão de 180x180 mm foram cortados para o ensaio *Bulge-Test*. Depois, por impressão eletroquímica, imprimiu-se uma malha de 3,0 mm de diâmetro com círculos entrelaçados ou secantes, conforme mostra a Figura 3.



Figura 3. Foto mostrando a impressão da malha circular de 3,0 mm nos CP's confeccionados.

Somente nos CPs de tração "não entalhados" e "entalhado 1" (entalhe de 25 mm) e para o ensaio *Bulge-Test*, pôde ser impressa a malha de referência circular. Entretanto, nos corpos-de-prova com entalhe agudo, como é o caso dos corpos-de-

prova entalhado 2 (entalhe de 10 mm) e entalhado 3 (entalhe de 2 mm) de tração, não foi possível ser impressa a malha de referência, pois o entalhe é muito estreito para que se consiga uma quantidade maior de círculos para efetuar a medição, já que a malha utilizada é de 3,0 mm. O procedimento adotado para marcar uma malha nesses dois CPs foi a utilização de um riscador com ponta de diamante para se desenhar uma malha quadrada bem fina no entalhe desses CPs. No corpo-de-prova entalhado 2, foi desenhada uma malha quadrada com dimensões de 1x1 mm,. No corpo-de-prova entalhado 3, onde o entalhe é menor, foi necessário desenhar uma malha retangular com 1x0,4 mm de dimensão.

Depois que todos os CP's foram marcados e tiveram as suas respectivas malhas de referência medidas, o próximo passo foi a realização dos ensaios dos CPs de tração e dos *blanks* para o ensaio *Bulge-Test* (Figura 4).



Figura 4. Foto dos *blanks* para ensaio *Bulge-Test*, depois de ensaiados.

Ensaiaados todos os corpos-de-prova, foram então calculas 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) l_0 é o diâmetro inicial dos círculos da malha de referência antes dos ensaios físicos, l_1 e l_2 o diâmetro dos círculos deformados após os ensaios físicos, na direção perpendicular e paralela à laminação, respectivamente.

Calculada as deformações ε_1 (deformação maior) e ε_2 (deformação menor) dos círculos medidos, o próximo passo foi aplicar o método n°5 de *Zurich*, com o intuito de se determinar o par de deformações ε_1 e ε_2 da curva limite de estampagem. O método n°5 de *Zurich* é uma variante do método de Bragard, é aplicável às medidas realizadas numa malha de círculos secantes ou entrelaçados. Para a interpolação, é recomendado utilizar apenas círculos cujas diferenças de deformação (círculos adjacentes) sejam inferiores a 5%. As diversas recomendações são dadas na obra Barata da Rocha & Duarte.⁽⁶⁾

3 RESULTADOS E ANÁLISE

Os ensaios de tração foram realizados para o levantamento do lado esquerdo da CLEE01. Após os corpos-de-prova de tração terem sido ensaiados, e os pares de deformação ε_1 e ε_2 determinados, conforme mostra a tabela 1, determinou-se o lado esquerdo da CLEE01.

Tabela 1. Pontos obtidos no teste de tração para determinação do lado esquerdo da CLEE.

Corpo-de-prova	ε_1	ε_2
CP01-135-17,5	0,4635	-0,2818
CP01-160-25	0,3401	-0,1280
CP01-150-10	0,3013	-0,0458
CP01-150-2	0,2632	-0,0109
CP01-360-90	0,2597	0,0091

Para levantamento do lado direito da CLEE, onde se tem o predomínio do estiramento biaxial, foi realizado o ensaio *Bulge-Test* em *blank's* com dimensões definidas, como mostra a Figura 4, pois só com esse tipo de ensaio é possível simular o estiramento biaxial. Os pares de deformação ε_1 e ε_2 , obtidos com a aplicação do método nº5 de *Zurich*, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Pontos obtidos no ensaio *Bulge-Test* para determinação da CLEE.

Corpo-de-prova	Matriz de ensaio	ε_1	ε_2
CP04-180-180	Circular de 150 mm	0,4227	0,1539
CP02-180-180	Elíptica de 72 mm *	0,4589	0,3046
CP01-180-180	Elíptica de 54 mm *	0,4607	0,4156

* valor referente à diagonal menor da matriz elíptica; diagonal maior é 150 mm

Adicionando-se os valores já obtidos no ensaio de tração e *Bulge-Test*, foi determinada a CLEE, como mostra a Figura 5.

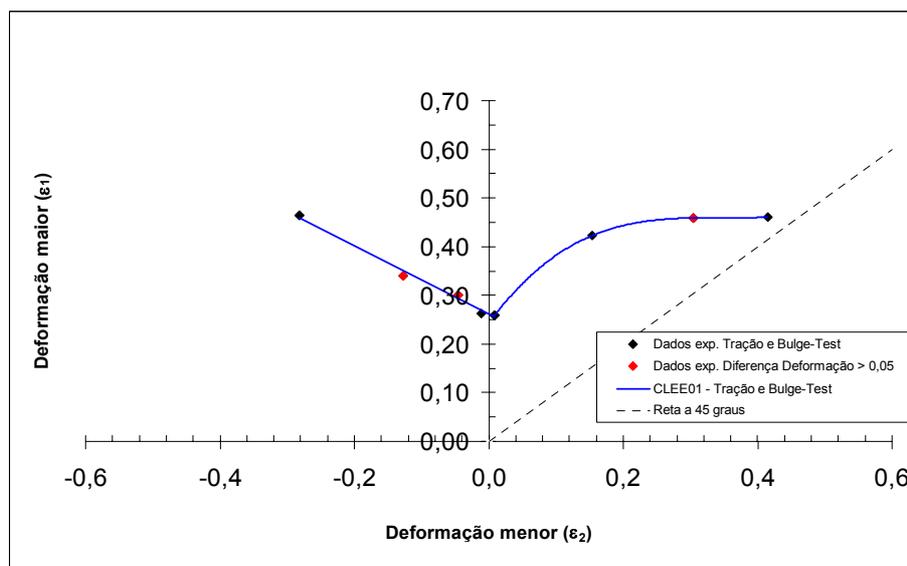


Figura 5. Curva Limite de Estampagem à Estrição (CLEE01) do aço LI, determinada segundo o método nº5 de *Zurich*, utilizando-se os ensaios de tração uniaxial e *Bulge-Test*.

Os valores dos pares de deformação (ε_1 e ε_2) encontrados para o CP01-360-90 da tabela 1 foram muito bons, como previsto na literatura,⁽⁷⁾ pois o valor de ε_2 foi quase nulo (0,0091), caracterizando assim a ocorrência de deformação plana nesse tipo de CP. Os valores dos pares de deformação (ε_1 e ε_2) encontrados para o CP01-150-2 também foram bons, muito próximos dos valores encontrado para o CP01-360-90, porém, a dificuldade encontra-se na sua usinagem, que é bastante difícil devido ao seu entalhe de 2,0 mm.

Outro fator relevante é fato de o lado esquerdo da CLEE ser uma reta, pois com apenas dois pontos experimentais (ε_1 e ε_2 do CP01-135-17,5 e CP01-360-90) consegue-se determinar com boa precisão essa reta. O fato de se utilizar o CP01-360-90 para a determinação do lado esquerdo da CLEE01, diminui sensivelmente o trabalho do experimentador e os custos de material, ferramental e equipamentos, pois, a usinagem do CP01-150-2 é difícil, como comentado anteriormente, sendo necessária a montagem de um suporte para a sua confecção, devido principalmente à presença de um entalhe de 2,0 mm na sua geometria. Mesmo com apenas dois pontos experimentais, o lado esquerdo da CLEE não perde em precisão, como pode ser observado na Figura 6. Para se determinar uma CLEE, não é necessário utilizar muitos CPs, bastariam apenas quatro CPs, dois de tração (CP01-135-17,5 e CP01-360-90) e dois de *Bulge-Test* (matrizes circulares de 150 mm, e elíptica com diagonal menor de 54 mm). Mesmo assim a CLEE seria bem "conservadora" (ou talvez "realística") ainda.

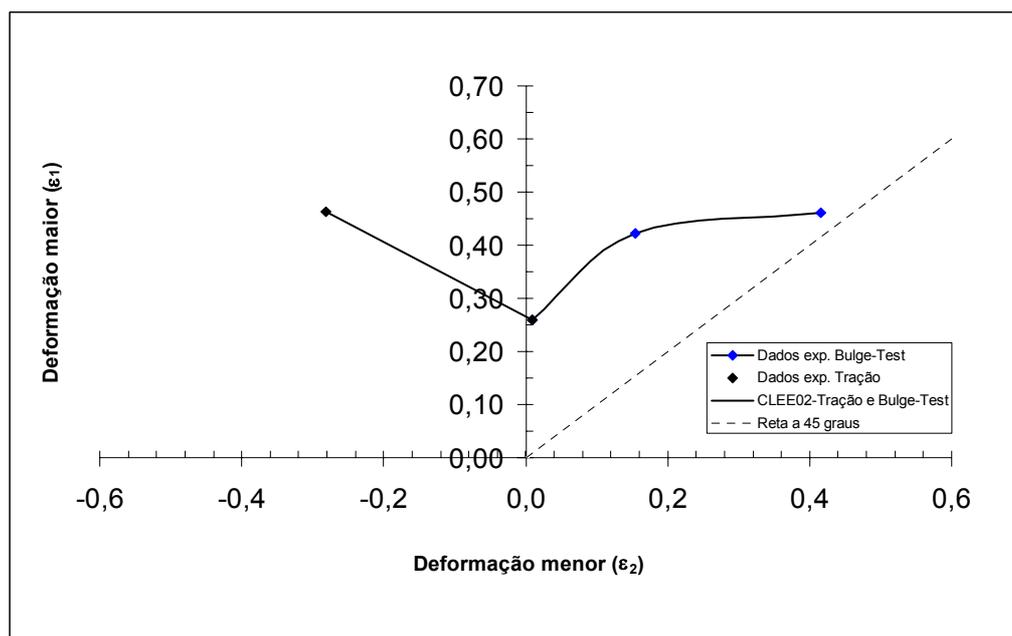


Figura 6. Curva limite de Estampagem na Estricção (CLEE02), determinada com apenas quatro corpos-de-prova (dois de tração e dois de *Bulge-Test*).

4 CONCLUSÕES

A dimensão da malha não influenciou significativamente nas CLEEs determinada por meio dos ensaios de tração e *Bulge-Test*, pois as diferenças entre as deformações calculadas para utilização do método n^o5 de *Zurich*, foram quase todas inferiores a 0,05, ou seja, a malha foi adequada ao ensaio de tração. Além disso, prova-se que é

possível levantar uma CLEE utilizando-se apenas quatro dados experimentais, conforme mostra a figura 6, e mesmo assim a CLEE seria ainda bem precisa, quando comparada com outras curvas obtidas com outros ensaios e com um número maior de dados experimentais. Com isso, verifica-se também que é bastante viável se determinar uma CLEE por meio dos ensaios de tração e *Bulge-test*, pois, além dos resultados ser muito bom, o trabalho experimental diminui sensivelmente, o que é em muitos casos bastante exaustivo e dispendioso para o experimentador.

REFERÊNCIAS

- 1 KEELER, S.P. Sheet Metal Industries, v 42 n°461, p. 683-691. 1965
- 2 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.
- 3 STOUGHTON, T.B. A General Forming Limit Criterion for Sheet Metal Forming. International Journal of Mechanical Sciences, vol. 4, p. 1-27, jan. 2000.
- 4 BUTUC, M.C.; BARATA DA ROCHA, A.; GRACIO, J.J. and Duarte, J.M.F. A more General Model for Forming Limit Diagrams Prediction. Journal of Materials Processing Technology, n°125-126, p. 213-218. 2002.
- 5 ROSA, R.H.L. Modelagem e Simulação de Ensaios de Estampagem. 2003. 41 f. Dissertação (Mestrado em Processos de Fabricação) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- 6 BARATA DA Rocha, A. e Duarte, J.M.F. Tecnologia da Embutidura. ed. APTCP- Associação Portuguesa das Tecnologias de Conformação Plástica. Porto. 1992.
- 7 DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. 2ª edição, Rio de Janeiro. Guanabara Koogan S.A. 1981.
- 8 GRUMBACH, H. and SANZ, G. Revue de Metallurgie. p. 273-290. 1972. Apud BARATA DA ROCHA & DUARTE, 1992.