

ANÁLISE DE MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CURVA LIMITE DE ESTAMPAGEM (CLE) DE CHAPAS FINAS DE AÇOS PARA A ESTAMPAGEM¹

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

Resumo

Foram realizados ensaios de estampagem em corpos-de-prova na forma de *blanks* de chapa de aço LI (Livre de Intersticiais) com 1,20 mm de espessura, retirados de bobinas laminadas a frio e recozidas em forno contínuo. Foi utilizado o método da análise de grade de círculos, no qual uma malha de referência foi impressa nos corpos-de-prova e, através de um microscópio ótico, a malha foi medida antes e depois dos respectivos ensaios físicos. Com isso, calcularam-se as deformações de interesse e, através do método nº5 de *Zurich*, fez-se a interpolação de seis dados experimentais, determinando-se assim, para cada corpo-de-prova, o par de deformações ε_1 (deformação maior) e ε_2 (deformação menor) da Curva Limite de Estampagem à Estricção. Com a realização desse estudo em torno do aparecimento de uma estricção localizada, obtêm-se resultados mais precisos frente a outros métodos usados na atualidade, e quanto mais precisa for a curva limite de estampagem, consegue-se estampar peças com formas mais complexas, sem perder em qualidade e confiabilidade.

Palavras-chave: Curva limite de estampagem à estricção; Análise de grade de círculos; Aço LI.

ANALYSIS OF METHODS FOR THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE FORMING LIMIT CURVE (FLC) OF THIN SHEETS OF STEELS FOR STAMPING

Abstract

Stamping tests were conducted on specimens in the form of blanks from sheets of a 1,20 mm thin IF (Interstitial Free) steel taken from cold rolled and continuous annealed coils. The method of the analysis of circle grid was used, in which a reference grid was printed on the test specimens, and through an optical microscope the circles were measured before and after each stamping test. With this method the deformations of the specimens were measured and through the *Zurich* No. 5 Method six experimental data were interpolated for each test specimen, determining the deformation pair of major strain and minor strain of the Forming Limit Curve at Necking. With this study involving the formation of a localized necking more precise results can be obtained compared to other methods applied nowadays, and the more precise is the forming limit curve, more complex parts can be stamped without any loss of quality and reliability.

Key words: Forming limit curve at necking; Circle grid analysis; IF steel

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

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

Atualmente a grande maioria de produtos estampados é produzida de chapas de aço. Exemplos para estes produtos são: autopeças, eletrodomésticos, talheres, embalagens etc. A importância econômica dos processos de estampagem comparada com outros processos de fabricação é visível analisando a produção de chapas (laminados planos) nos últimos cinco anos, onde se observa que 14 a 15 % da produção siderúrgica do país é destinada a serem empregadas nestes processos.⁽¹⁾

Segundo Caddell & Hosford⁽²⁾ a estampagem é o processo no qual *blanks*, cortados a partir de chapas planas de metal, são convertidos em peças de forma desejada. Um desenho esquemático do processo pode ser observado na Figura 1.

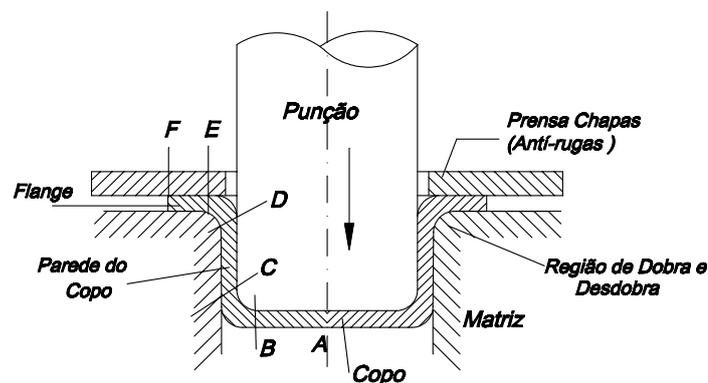


Figura 1. Desenho esquemático do processo de estampagem.

Cada tipo de material pode ser estampado até um certo grau de deformação antes do surgimento de estrição 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). Segundo Butuc et al.,⁽³⁾ a forma mais largamente utilizada para definir o limite de deformação antes da falha é a Curva Limite de Estampagem–CLE.

A noção de CLE foi introduzida por Keeler⁽⁴⁾ e Goodwin⁽⁵⁾ nos anos sessenta para caracterizar a formabilidade das chapas finas, ou seja, sua aptidão para a deformação plástica. Estes autores 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 na fratura (Curva Limite de Estampagem à Fratura-CLEF), mas à estrição é que se obtém resultados mais relevantes, pois a estrição da chapa metálica é que conduz à fratura da mesma.

A determinação experimental da CLE pode ser realizada a partir de vários ensaios de simulação física ou ensaios de formabilidade de forma a cobrir uma vasta gama de trajetórias de deformação. Neste trabalho, apresenta-se o levantamento da curva limite de estampagem à estrição utilizando-se o ensaio *Nakazima* e o *Bulge-Test*, sendo que o primeiro consiste em deformar plasticamente chapas retangulares, por intermédio de um punção hemisférico e uma matriz circular de 150 mm, e o segundo consiste fundamentalmente em submeter pressão hidráulica (óleo) a uma das faces de uma chapa restrita por freios entre a matriz e o prensa-chapas até a fratura, de forma similar à deformação de um diafragma, para esse ensaio utiliza-se uma matriz

circular de 150 mm de diâmetro e duas matrizes elípticas, sendo uma 72 e a outra de 54 mm.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O aço utilizado nesse estudo é um aço Livre de Intersticiais (LI), produzido pela Usiminas S/A, cuja composição química e propriedades mecânicas é mostrada na Tabela 1 e 2, respectivamente. Trata-se de um aço com carbono extra-baixo e adição de Mn como elemento de liga. Os elementos C e N do aço são retirados de solução sólida através da precipitação de carbonitretos de Ti, elemento que possui grande afinidade com aqueles elementos, mesmo quando adicionado em baixos teores. A retirada do C e do N de solução sólida e o processamento adequado na laminação e no recozimento posterior resultam 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.

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

São apresentados na Tabela 2 o limite de escoamento S_0 , o limite de resistência S_u e o alongamento total $A\ell$. 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)	$A\ell$ (%)	\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	-	-

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, destinadas à fabricação de painéis da carroceria de automóveis. Das chapas foram confeccionados corpos-de-prova (CPs) na forma de *blanks*, com comprimento de 180 mm e larguras variadas de 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 e 180 mm, isto para o ensaio *Nakazima*, e três *blanks* com dimensão de 180x180 mm para o ensaio *Bulge-Test*.

Depois que foram cortados os corpos-de-prova, o próximo passo foi imprimir a malha de referência nos *blanks*, sendo que o método utilizado foi por impressão eletroquímica, onde se utilizou uma malha de 3,0 mm de diâmetro com círculos entrelaçados ou secantes, conforme mostra a Figura 2.

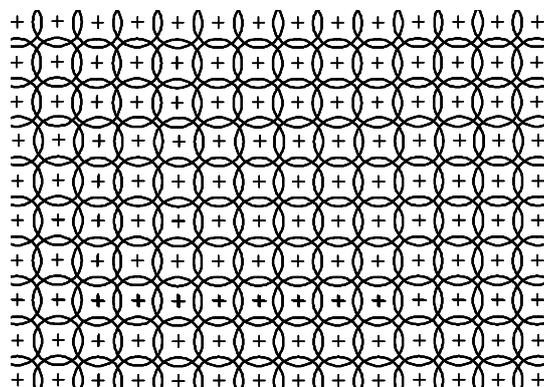


Figura 2. Malhas de círculos entrelaçados.

Para a impressão, foi preparada uma mistura aquosa com 10 ml de solução eletroquímica e 100 ml de água destilada (proporção de 1:10). Os CPs foram colocados um de cada vez sobre uma chapa de cobre ligada por um cabo elétrico (sinal negativo), e outro cabo ligado a um rolo metálico (sinal positivo). Este rolo metálico era passado sobre a malha de referência que ficava em cima do corpo-de-prova, durante 50 s. Nos 10 s iniciais, utilizava-se uma corrente alternada, e nos 40 s restantes, uma corrente contínua para efetuar a impressão. Depois de efetuada a impressão, passava-se um neutralizador de ácido, depois lavava-se o corpo-de-prova em água corrente e por último este era secado, pronto para ser medido.

Para a medição da malha de referência impressa nos CPs, utilizou-se um microscópio ótico de medição modelo MT da Mitutoyo com uma objetiva de 15X de ampliação, sendo que a espessura das linhas é aproximadamente de 0,8 mm. Esse procedimento de se medir a malha antes de ensaiar o corpo-de-prova, se deve principalmente à imprecisão do diâmetro dos círculos da malha, pois apesar deles possuírem 3,0 mm de diâmetro, esse valor pode ser maior ou menor depois de efetuada a impressão, como verificado em alguns círculos medidos no microscópio ótico. Foram encontrados círculos no intervalo de 2,951 até 3,325 mm de diâmetro.

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 *Nakazima* e *Bulge-Test*. A máquina utilizada no ensaio é equipada com uma célula de carga de 50.000 kgf com resolução de 5 kgf, sendo a velocidade de deformação utilizada de 50 mm/min. Na Figura 3 pode-se ver a foto dos *blanks* ensaiados com o ensaio *Nakazima* (*blank* 01 a 08) e *Bulge-Test* (*blank* 09 a 10).



Figura 3. Foto dos blanks para ensaio Nakazima e Bulge-Test, depois de ensaiados.

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) 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. Apenas seis círculos foram medidos dessa vez no microscópio óptico de medição, visto que neste momento já se conhecia o ponto exato da fratura. Três círculos foram medidos antes da fratura, e três depois da fratura do corpo-de-prova, totalizando seis círculos, como mostra a Figura 4. O círculo fraturado foi desprezado na medição, e a marcação foi realizada na direção perpendicular à laminação da chapa.

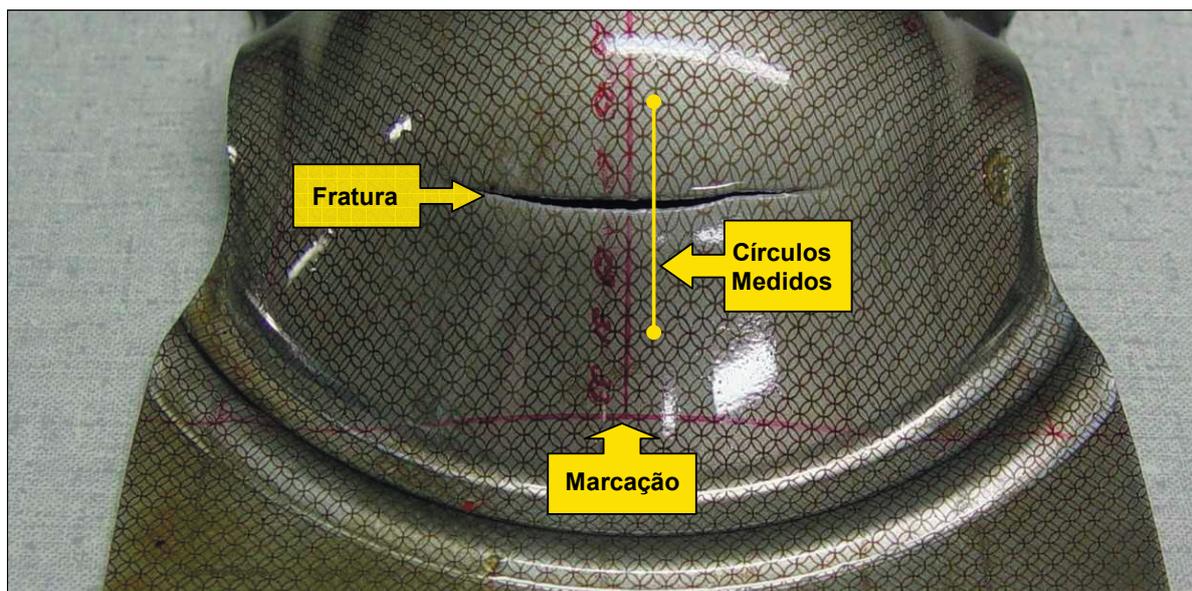


Figura 4. Foto mostrando o ponto de fratura do CP01-180-100, a marcação dos círculos de referência no *blank* para medição dos mesmos depois de ensaiados, e os círculos que foram medidos após o ensaio.

Calculada as deformações ε_1 (deformação maior) e ε_2 (deformação menor) dos círculos medidos, o próximo passo foi aplicar o método nº5 de *Zurich*, com o intuito de se determinar o par de deformações ε_1 e ε_2 da curva limite de estampagem. O método nº5 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 valores dos pares de deformação ε_1 e ε_2 , obtidos através do ensaio *Nakazima* e da aplicação do método nº5 de *Zurich*, são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Pontos obtidos no ensaio *Nakazima* para determinação da CLEE.

Corpo-de-prova	ε_1	ε_2
CP01-180-40	0,5126	-0,2940
CP01-180-60	0,4810	-0,2148
CP01-180-80	0,4460	-0,2066
CP01-180-100	0,3867	-0,1108
CP01-180-120	0,3372	-0,0178
CP01-180-140	0,2816	0,0481
CP01-180-160	0,3390	0,0654
CP01-180-180	0,3141	0,0596

Para levantamento do lado direito da Curva limite de Estampagem à Estricção-CLEE, onde se tem o predomínio do estiramento biaxial, foi realizado o ensaio *Bulge-Test* em *blanks* com dimensões definidas, 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 5.

Tabela 5. Pontos obtidos no ensaio *Bulge-Test* para determinação da CLEE.

Corpo-de-prova	Matriz de ensaio	ε_1	ε_2
CP02-180-180	Circular de 150 mm	0,4227	0,1539
CP03-180-180	Elíptica de 72 mm *	0,4589	0,3046
CP04-180-180	Elíptica de 54 mm *	0,4607	0,4156

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

Como descrito anteriormente, para que o método nº5 de *Zurich* seja aplicável, é recomendado utilizar círculos cujas diferenças de deformação sejam inferiores a 0,05. Essa análise foi realizada na interpolação do valor de ε_1 para cada corpo-de-prova, apenas três corpos-de-prova (CP01-180-120, CP01-180-160 e CP03-180-180) não satisfizeram as condições de interpolação, mas a ausência dos dados desses CPs, não influenciam no levantamento da Curva limite de Estampagem à Estricção-CLEE, conforme mostra a Figura 5 e 6. Observa-se que mesmo assim as curvas seriam aproximadamente coincidentes.

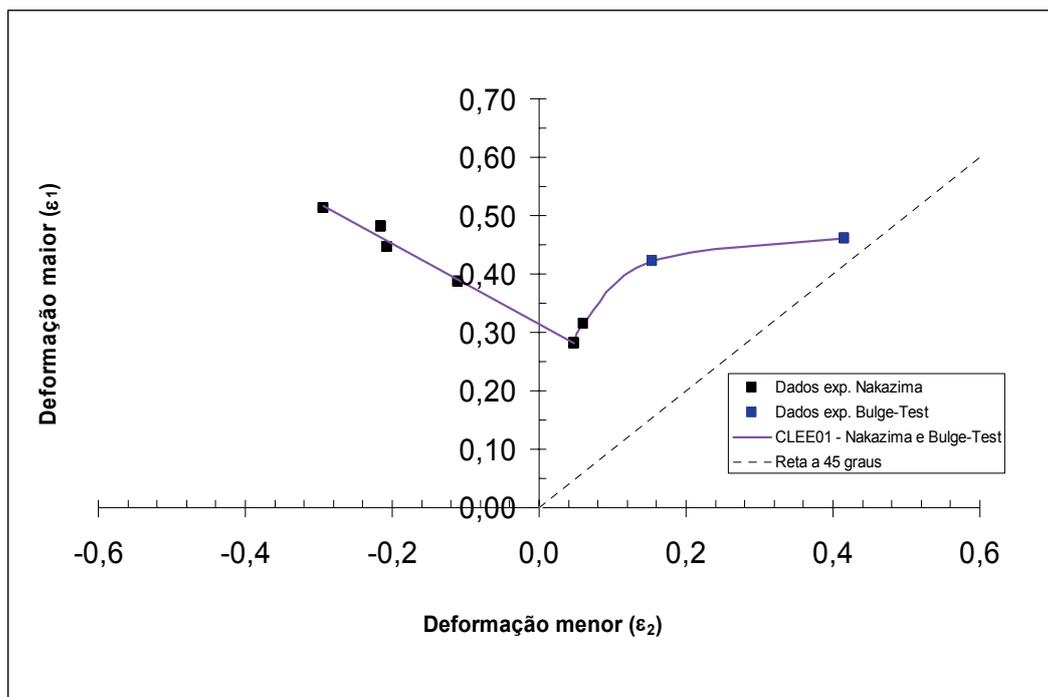


Figura 5. Curva limite de Estampagem à Estricção (CLEE01) do aço LI, determinada utilizando-se os ensaios *Nakazima* e *Bulge-Test* empregando-se o método nº5 de *Zurich* sem três CPs.

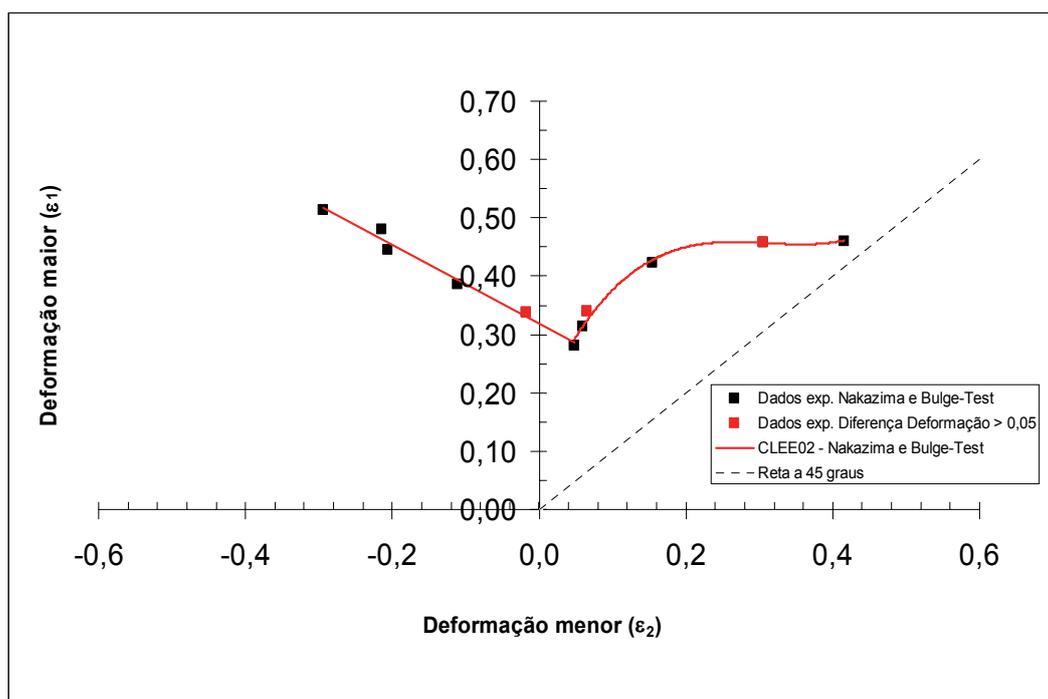


Figura 6. Curva limite de Estampagem à Estricção (CLEE02) do aço LI, determinada utilizando-se os ensaios *Nakazima* e *Bulge-Test* empregando-se o método n^o5 de *Zurich*, com todos os CPs.

Como previsto na literatura,⁽⁷⁾ a curva do lado esquerdo da Figura 5 é uma reta, pois desse lado há o predomínio do estiramento uniaxial, e, conforme previsto, a curva do lado direito não é uma reta. A reta a 45° das Figuras 5 e 6 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 CLEE01 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 observar também na Figura 5 que o ponto de deformação plana obtido para o aço LI usando-se o ensaio *Nakazima*, é aproximadamente 0,3179, ocorrendo também um deslocamento do ponto mínimo ($\epsilon_1 = 0,2816$; $\epsilon_2 = 0,0481$) para fora do eixo de ϵ_1 , onde $\epsilon_2 = 0$ (deformação-plana). Segundo alguns autores, como Dieter⁽⁷⁾ e Barata da Rocha & Duarte,⁽⁶⁾ esse deslocamento das curvas limite de estampagem obtida por meio dos ensaios *Nakazima* e *Bulge-Test* pode ser devido à geometria do corpo-de-prova utilizado nesse ensaio, pois não se consegue com essa geometria retangular determinar um ponto de deformação plana. Segundo Green & Hill,⁽⁸⁾ um problema muito comum na estampagem de uma determinada peça é o atrito, pois, mesmo usando-se um excelente lubrificante, o atrito sempre vai ocorrer. Talvez esse atrito possa ser também um dos fatores que cause esse deslocamento da CLEE01 e CLEE02. Mesmo assim, as curvas obtidas por meio desses ensaios e com a aplicação do método n^o5 de *Zurich*, são mais realísticas quando comparadas com as obtidas por outros métodos.

4 CONCLUSÕES

Para o aço LI e todos os demais aços com baixo teor de carbono, a inclinação da CLE não depende de \bar{R} , mas, quanto maior for esse valor, mais difícil será a ocorrência de afinamento na chapa metálica, pois para metais anisotrópicos com \bar{R} maior que uma unidade, a direção de maior resistência à deformação é a da espessura. No entanto, a condição mais adequada para estampagem profunda é aquela em que os valores de \bar{R} são elevados, de tal forma que se alcancem profundidades elevadas de estampagem sem ocasionar ruptura. Mas ao mesmo tempo devem-se obter valores reduzidos de $\Delta\bar{R}$ a fim de minimizar o efeito de formação de "orelhas". Com essa condição e uma curva limite de estampagem mais "realística", como é o caso da curva das Figuras 5 e 6, consegue-se estampar peças com as mais variadas formas, sem perder em qualidade e confiabilidade.

REFERÊNCIAS

- 1 SHAEFFER, L. Conformação Mecânica. Imprensa Livre Editora, Porto Alegre. 1999.
- 2 CADDELL, R. M. e HOSFORD, W.F., Metal Forming - Mechanics and Metallurgy, Ed. Prentice-Hall, University of Michigan, 1993.
- 3 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, nº125-126, p. 213-218. 2002.
- 4 KEELER, S.P. Sheet Metal Industries, v 42 nº461, p. 683-691. 1965
- 5 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.
- 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 GREEN, A.P. and HILL, R. Calculations on the Influence of Friction and Die Geometry in the Sheet Drawing. Journal of the Mechanical Physics and Solids, v. 1, p. 31-36, october. 1952.

BIBLIOGRAFIA

- 1 BARATA DA ROCHA, A. Análise Experimental de Deformações - Curvas Limite de Embutidura. Jornadas Nacionais das Tecnologias de Conformação dos Metais em Chapa, LNETI, Porto, 11, 12 jun. 1987.