

# ENSAIOS DE TRAÇÃO UNIAXIAIS QUASE PLANARES APLICADOS NA DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO DE ESTAMPABILIDADE $CLC_0$ <sup>1</sup>

Marcos Domingos Xavier<sup>2</sup>  
 Ronald Lesley Plaut<sup>3</sup>

## Resumo

A presente pesquisa baseia-se no emprego do aço da qualidade livre de intersticiais (IF) e do aço SAE 1050 coalescido. Objetiva-se determinar  $CLC_0$ , raiz das curvas CLC e crítico para a estampagem, de modo mais rápido do que aquele obtido através dos ensaios simulativos de Nakazima. O ensaio intrínseco de tração, em estado quase planar de deformação, foi aplicado utilizando quantidade menor de amostras, com dimensões sugeridas pela literatura. O ensaio de Nakazima foi executado de modo a permitir comparações dos valores de  $CLC_0$ . O ensaio de deformação planar mostrou-se adequado à determinação do valor de  $CLC_0$ , pois não é afetado pelos aspectos geométricos e do atrito, característicos do ensaio de Nakazima. A confiabilidade dos valores de  $CLC_0$ , obtidos por deformação quase planar, foi corroborada através da comparação com dados da literatura.

**Palavras-chave:** Ensaio de tração; Deformação plana; Ensaio Nakazima; Estampabilidade de chapas de aço.

## UNIAXIAL NEAR PLAIN STRAIN TENSILE TESTS APPLIED IN THE DETERMINATION OF THE $CLC_0$ STAMPING PARAMETER

## Abstract

The present research uses IF and SAE 1050(spheroidized) steels. The main goal is the evaluation of the forming limit curve minimum (FLCo), critical to stamping operations, in a faster way if compared to the Nakazima simulative tests. The intrinsic tensile test, in near plain strain condition, has been used employing a smaller number of samples, with dimensions given by literature. Nakazima test has been performed in order to compare the FLCo values. The plain strain test has shown to be adequate for the evaluation of FLCo because it is not affected by geometrical and friction aspects, typical of the Nakazima test. The reliability of the FLCo values obtained for the plain strain test has been compared with data from the literature.

**Key words:** Tensile test; Plain strain; Nakazima test; Steel sheet stampability.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, M.Sc ; Professor do SENAI e da FATEC-SP - mdxavier@fatecsp.br

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Ph.D. ; Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- São Paulo, S.P. rplaut@usp.br

## 1 INTRODUÇÃO

Na última década tem se notado o crescente interesse no entendimento da metalurgia física relacionada com a evolução (durante a deformação), tanto da microestrutura (acumulo de danos/ evolução dos microvazios), assim como da textura cristalográfica, na localização da estrição e eventual fratura dúctil de chapas estampadas.<sup>(1,2)</sup> Conta, para isso, com o apoio das curvas tensão-deformação real, diferentes critérios de escoamento (quadrático e não-quadrático) e das CLCs, características do material a ser estampado.

As curvas limite de conformação (CLCs), introduzidas por Langford (1947), Keeler e Backhohen,<sup>(3)</sup> Goodwin,<sup>(4)</sup> permitem representar de maneira abrangente a estampabilidade das chapas e tem sido empregadas largamente como critério na otimização do processo de estampagem e no auxílio de projeto de matrizes.<sup>(2,5-7)</sup>

No caso da determinação das CLCs, tem sido comumente aplicado o ensaio simulativo de Nakazima (1968) - (fora do plano da chapa) o qual é sensível com relação à espessura das chapas, condições superficiais, lubrificantes, tipo e geometria do ferramental,<sup>(2,5)</sup> além de serem observadas influências inerentes ao próprio ensaio.<sup>(8)</sup> Acrescente-se que o levantamento das curvas CLC via Nakazima é demorado e dispendioso, pois exige o preparo de diversos corpos de prova de diferentes geometrias e dimensões. Da prática industrial,<sup>(9)</sup> a quantidade mínima recomendada<sup>(10)</sup> é de 30 corpos de prova sendo três de cada das seguintes dimensões na ordem DL- (direção de laminação-mm) x DT-(direção transversal-mm): 50 x 220; 80 x 220; 100 x 220; 110 x 220; 120 x 220; 130 x 220; 140 x 220; 160 x 220; 175 x 220; 220 x 220.

A metodologia empregada na determinação das curvas CLC em todos os tipos de ensaios para tal finalidade, sejam simulativos ou intrínsecos (independentes do atrito), consiste no cálculo das deformações verdadeiras (ou reais) maiores  $\epsilon_1$  e menores  $\epsilon_2$  considerando medições dos eixos das elipses próximos a região da fratura.<sup>(2,5,10-15)</sup> Estas curvas permitem definir o limite de conformação de uma chapa (ASTM 2218, ISO 12004-2:2008), que é o estado em que se inicia o afinamento localizado (estrição) e que culmina com a fratura (gerando as curvas limite na fratura (CLFs)).

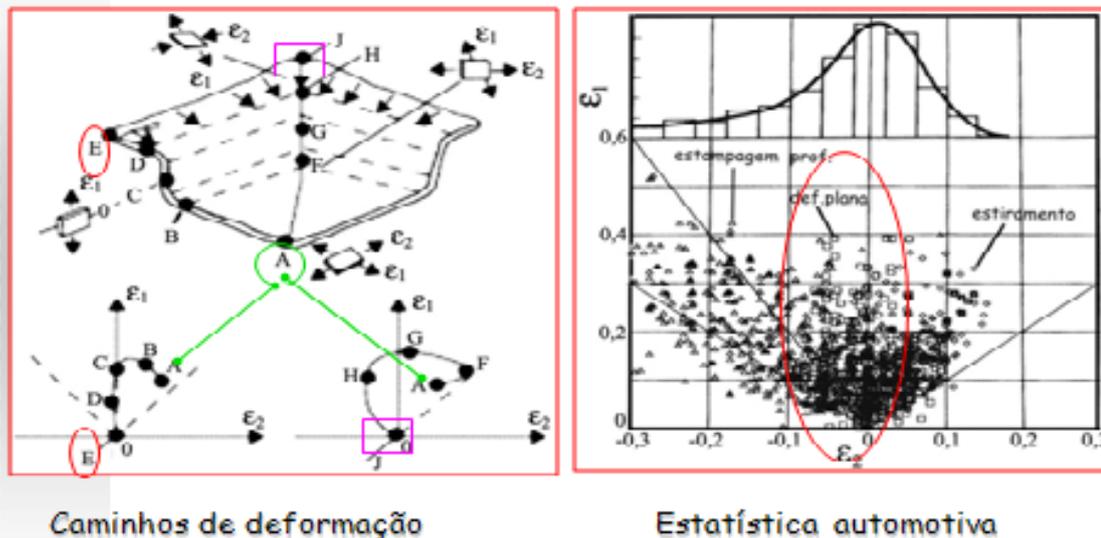
A trajetória da deformação (nem sempre retilínea) em peças estampadas influencia a posição da CLC<sup>(5,16,17)</sup> e pode ser descrita através da relação  $\beta = \epsilon_2 / \epsilon_1$ . A tração biaxial (estiramento) ocorre para  $\beta = 1$ . A deformação planar associa-se a  $\epsilon_2 = 0$  (ou  $\beta = 0$ ). A estampagem profunda refere-se a valores de  $-1 < \beta < -0,5$ .<sup>(7)</sup>

Estudos efetuados em vários tipos de peças automobilísticas,<sup>(5,17,18)</sup> conforme ilustra a figura 1, evidenciam que mais de 80 % das peças estampadas costumam falhar em condições próximas da deformação planar ( $\beta = 0$ ).

Por outro lado, a busca de soluções às desvantagens do ensaio Nakazima<sup>(19)</sup> trouxe à tona o ensaio intrínseco de tração em condição de deformação plástica quase planar, cuja importância é fundamentada na Figura 1. O ponto CLC<sub>0</sub>, correspondente à raiz da curva CLC e refere-se à condição de deformação planar, onde há o início da estrição com o menor valor de deformação  $\epsilon_2 = 0$ .

O objetivo desta pesquisa é avaliar a possibilidade da substituição dos ensaios Nakazima através da determinação rápida e segura do valor de CLC<sub>0</sub> através de ensaios de tração que conduzam à deformação plástica quase planar, utilizando quantidade menor de amostras.

## caminho de deformação (trajetória)



**Figura 1** - Distribuição pontual da trajetória da deformação com base em pesquisa estatística realizada pela indústria automotiva. A análise estatística indica a presença acentuada de uma deformação planar e quase planar.<sup>(5,17,18)</sup>

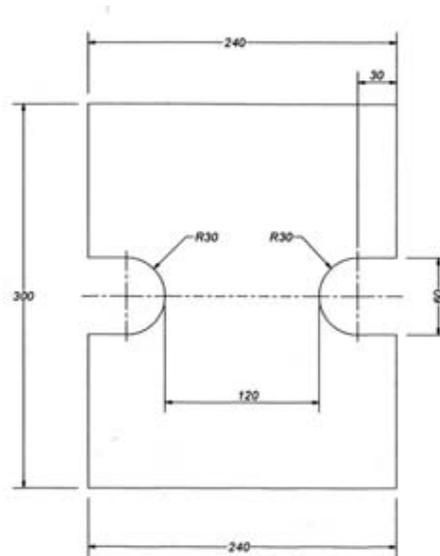
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os aços aqui utilizados são da qualidade IF e SAE 1050 coalescido, cujas composições químicas e propriedades mecânicas (ABNT NBR 187; ASTM E 517) são apresentadas na Tabela 1. O primeiro deles é dúctil e amplamente usado nas estamparias, especialmente montadoras de automóveis e indústrias de eletrodomésticos, enquanto que o segundo apresenta restrições neste setor produtivo devido à resistência mecânica mais elevada embora a matriz ferrítica contendo cementita esferoidizada amenize este inconveniente em aplicações tais como biqueiras de botas de segurança.<sup>(20)</sup>

**Tabela 1**- Composição química e propriedades mecânicas dos aços IF e SAE 1050.

| <b>Composição Química ( % peso )</b>                                   | <b>Propriedades Mecânicas</b>  |
|--|--|
| <b>Aço IF recozido - espessura: 0,75 mm</b>                            |  |
| C: 0,0015; Mn: 0,1170; P: 0,0100;<br>S: 0,0072; Al: 0,0320; Ti: 0,0530 | LE ( MPa ) : 178; K ( MPa ) : 584; LR ( MPa ) : 336; A <sub>80</sub> ( % ) : 42,1<br>r <sub>M</sub> : 1,6; r <sub>0</sub> : 1,73; r <sub>45</sub> : 1,23; r <sub>90</sub> : 2,02;<br>n: 0,22 |
| <b>Aço SAE 1050 esferoidizado - espessura: 1,48 mm</b>                 |  |
| C: 0,498; Mn: 0,640; P: 0,0190;<br>S: 0,0020; Al: 0,0102; Si: 0,170    | LE ( MPa ) : 333,44; K ( MPa ) : 803<br>LR ( MPa ) : 490; A ( % ) : 24,41<br>r <sub>M</sub> : 0,83; r <sub>0</sub> : 1,01 ; r <sub>45</sub> : 0,71; r <sub>90</sub> : 0,87;<br>n: 0,184      |

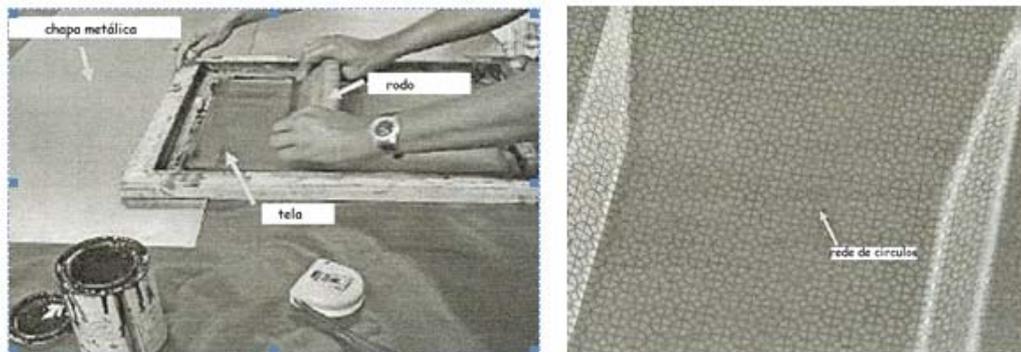
As geometrias dos corpos de prova utilizados especificamente para o estudo da deformação planar (em tração) são mostradas na figura 2. As dimensões foram definidas com base nos estudos prévios de Wagoner.<sup>(21)</sup>



**Figura 2:** Corpos de prova aplicados nas deformações quase planares (ensaio de tração).<sup>(21)</sup>

A técnica denominada serigrafia<sup>(22)</sup> foi utilizada para a gravação da rede de círculos nas amostras metálicas. É um processo de aplicação simples e que permite boa nitidez para a medição dos círculos. Baseia-se na transferência de desenhos efetuados em diapositivos para tecidos serigráficos e destes para as superfícies através de depósitos de tinta, conforme a Figura 3.

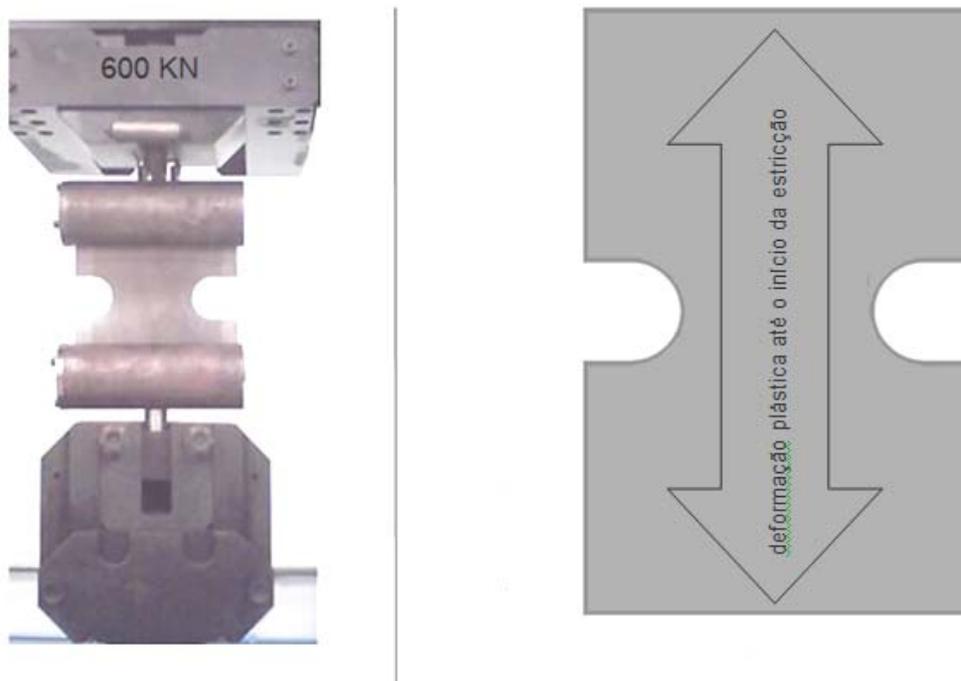
As etapas sequenciais da serigrafia<sup>(22)</sup> resumem-se na confecção do diapositivo; definição do tecido serigráfico; preparação dos quadros (desengraxe; secagem; emulsão; secagem; emulsão adicional; secagem; exposição a raios ultravioleta; revelação; secagem ) e aplicação de tinta sobre a superfície.



**Figura 3 -** Processo Serigrafico: (a) aplicação da tinta; (b) chapa gravada.<sup>(22)</sup>

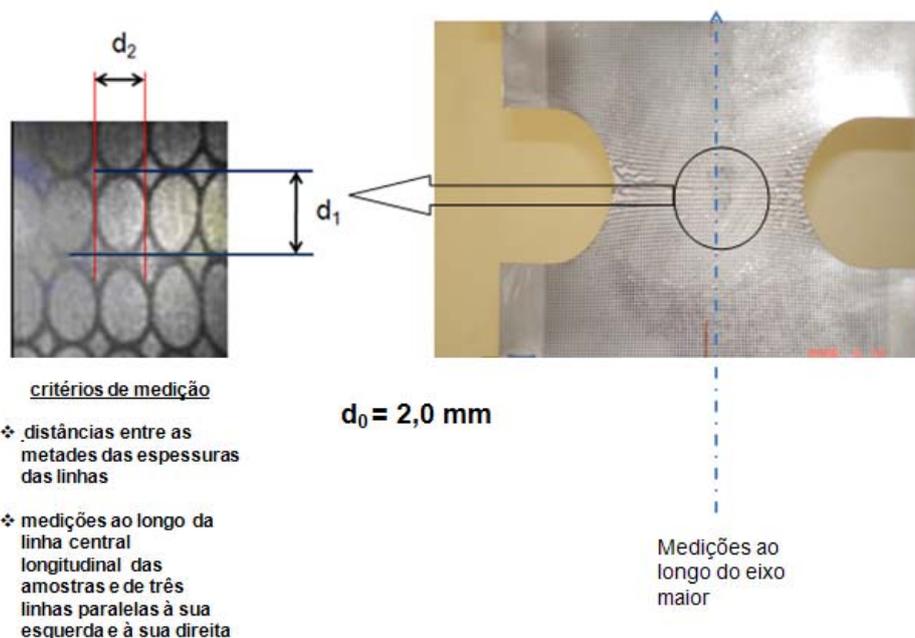
A metodologia utilizada para os estudos dos objetivos acima mencionados, utilizando ensaios de tração em condição de deformação plástica quase planar, considerou as seguintes etapas:

1. pré-gravação de rede de círculos de diâmetro  $d_0=2$  mm em corpos de prova dimensionados conforme a Figura 2.
2. execução de deformações plásticas em amostras planas, conduzindo-as até a ruptura via tração uniaxial, conforme a figura 4. Foram utilizadas três amostras com o eixo maior paralelo à direção de laminação (DL) da chapa de origem e três amostras com o eixo maior transversal (DT) à direção de laminação. A tensão trativa foi aplicada na direção coincidente com o eixo maior das amostras



**Figura 4** – Caminho de deformação aplicado nos estudos de deformação quase planar.

3. medição das elipses ao longo do eixo longitudinal dos corpos de prova deformados plasticamente, conforme a Figura 5, para a determinação das deformações reais principais  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  e conseqüentemente, de  $CLC_0$ . Observe-se que  $\epsilon_1 = \ln ( d_1/ d_0)$  e  $\epsilon_2 = \ln ( d_2/ d_0)$ . .....( eq. 1)



**Figura 5** - metodologia de medição da rede de círculos.

A avaliação dos valores de  $CLC_0$  oriundos das deformações plásticas unidirecionais (quase planares), efetua-se através da comparação com resultados do mesmo parâmetro advindos da aplicação de técnicas alternativas. Assim, ensaios

não planares, tipo Nakazima, também foram executados nos aços IF e SAE 1050 coalescido.

Os equipamentos utilizados para a determinação dos valores  $CLC_0$  nas deformações quase planares (via tração), são mostrados na figura 6 e resumidamente descritos abaixo:

- Projetor de perfil vertical: possui lentes objetivas de 10, 20, 50 e 100x e leitor digital com processador geométrico.<sup>(23)</sup>
- Máquina universal de ensaios: acionamento eletromecânico, com capacidade de 600 kN e faixa de velocidades: 0,01 a 300 mm/minuto.<sup>(24)</sup>
- Máquina de eletro-erosão a fio: possibilita obter rugosidade baixa na superfície do corte, evitando a nucleação de trincas durante a tração das amostras.<sup>(25)</sup>



**Figura 6** – (a) Projetor de perfil marca Pantec, modelo: CPJ – 3015;<sup>(23)</sup> (b) Máquina universal de ensaios EMIC<sup>(24)</sup>; (c) Máquina de eletro-erosão a fio Fanuc Robotcut.<sup>(25)</sup>

O ensaio simulativo Nakazima<sup>(26)</sup> efetuado nos aços em estudo utilizou a prensa Erichsen,<sup>(27)</sup> ilustrada nas Figuras 7(a) e 7(b), com punção de diâmetro 100 mm. As amostras submetidas a este ensaio estão dispostas na Figura 7(c) enquanto que a região de medição dos círculos críticos é destacada na Figura 7(d).



**Figura 7** – (a) prensa Erichsen; (b) câmara de ensaio; (c) amostras tipo Nakazima; (d) região de medição das elipses.<sup>(26,27)</sup>

As deformações reais  $\varepsilon_1$   $\varepsilon_2$ , necessárias para o levantamento das curvas CLC foram determinadas com o uso de equipamento marca CAMSYS, ilustrado na Figura 8. A central eletrônica (conforme a Figura 8(a)), utiliza os valores dos eixos maiores e menores das elipses situadas ao redor da estrição originada pelo ensaio Nakazima para calcular as deformações reais maiores e menores empregando a eq.1. As referidas medições foram efetuadas através de leituras ópticas conforme ilustra a Figura 8(b).



Figura 8 – Equipamento CAMSYS(a)<sup>(28)</sup> e seu acessório de leitura óptica das elipses (b).<sup>(28)</sup>

### 3 RESULTADOS

As Figuras 9 e 10 apresentam as comparações dos pontos  $CLC_0$  médios obtidos pelas duas técnicas de análise da estampabilidade em estudo, ou seja, deformação quase planar (ensaios de tração) e os ensaios de Nakazima.

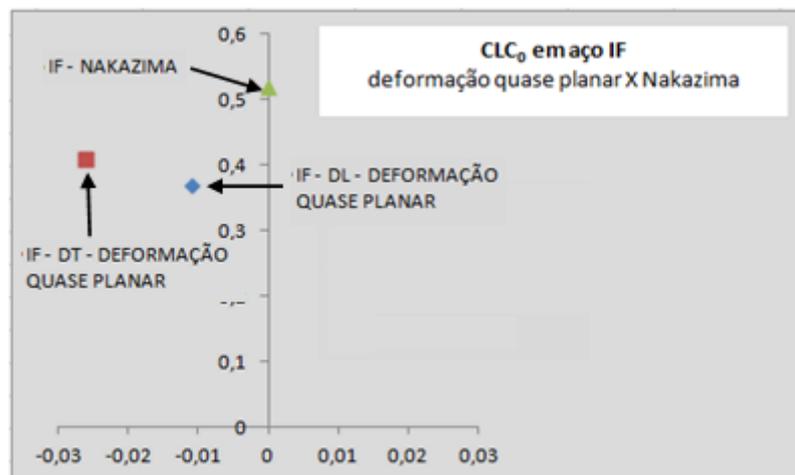
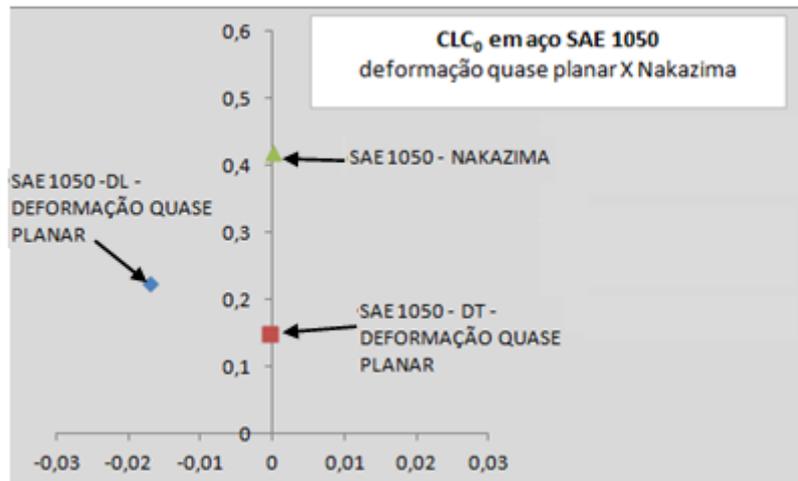


Figura 9 - Comparações dos pontos  $CLC_0$  obtidos em ensaios de tração quase planar e nos ensaios Nakazima, considerando o aço da qualidade IF. As escalas nos eixos das abscissas e das ordenadas são diferentes.

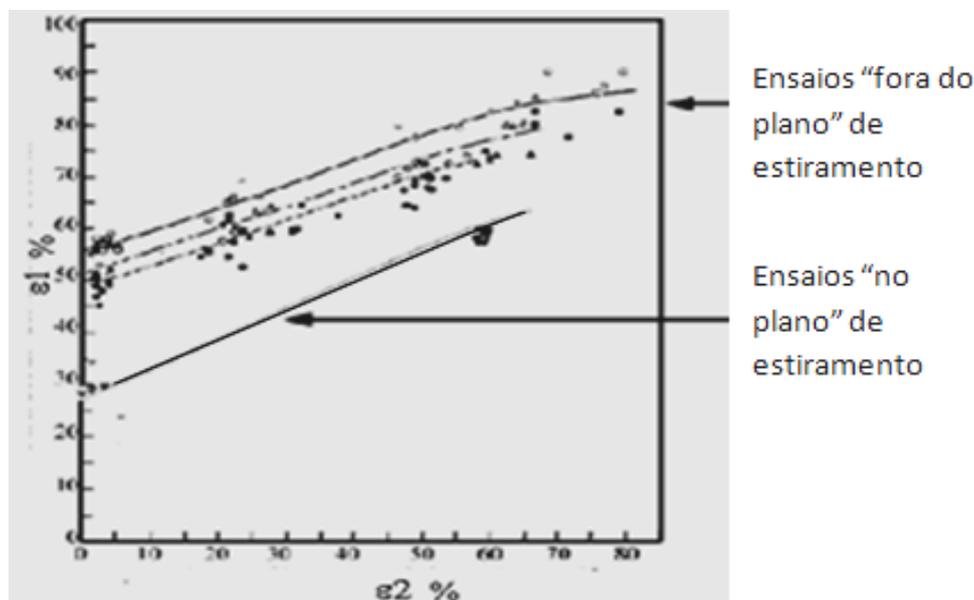


**Figura 10** - Comparações dos pontos CLC<sub>0</sub> obtidos em ensaios de tração quase planar e em ensaios Nakazima, considerando o aço SAE 1050. As escalas nos eixos das abscissas e das ordenadas são diferentes.

Pode-se observar nas Figuras 9 e 10 que os resultados de CLC<sub>0</sub> relacionados à deformação quase planar na direção de laminação (DL) e na direção transversal são inferiores àqueles obtidos nos ensaios Nakazima.

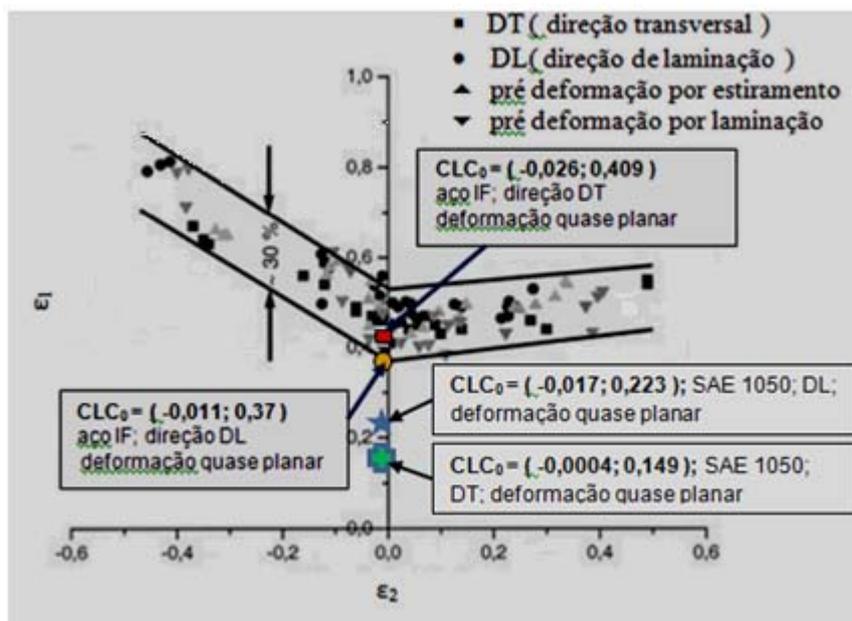
## 4 DISCUSSÃO

Charpentier,<sup>(29)</sup> entre outros,<sup>(19)</sup> demonstrou que o ensaio Nakazima, realizado fora do plano, sofre influências do atrito e de fatores geométricos associados ao punção conforme ilustra a Figura 11.



**Figura 11** - As CLC obtidas com ensaios de deformação biaxial "fora do plano" (ensaio com punção rígido ou de borracha) apresentam valores de deformações-limite mais elevados do que os obtidos por ensaios no plano de deformação, em idênticas condições de biaxialidade.<sup>(29)</sup>

A comparação dos valores de CLC<sub>0</sub>, nas direções DL e DT, e de suas deformações correspondentes, determinados na presente pesquisa em condições de deformação quase planar são, a seguir, comparados com os dados para os aços da qualidade IF obtidos por Kaluza, Kim e Bleck<sup>(30)</sup> e apresentados na Figura 12.



**Figura 12** – Curva limite de conformação para aço da qualidade IF, extraída da literatura<sup>(29)</sup>. Os pontos em destaque referem-se aos valores de  $CLC_0$  obtidos na presente pesquisa (incluindo os dados relativos ao aço SAE 1050 esferoidizado para efeito de comparação).

Observa-se a localização dos pontos de  $CLC_0$  no interior da faixa de valores da literatura,<sup>(30)</sup> indicando a validade/confiabilidade dos valores de  $CLC_0$  obtidos na presente pesquisa. Não obstante, modernos processos de medição empregando recursos ópticos,<sup>(31)</sup> possibilitam a melhoria substancial da precisão dos resultados aqui obtidos.

Por outro lado, a literatura<sup>(15)</sup> indica também que há elevação do parâmetro crítico  $CLC_0$  com o aumento da espessura da chapa. Assim, em princípio, a estampabilidade do aço médio carbono esferoidizado SAE 1050 poderia ser equiparada àquela de um aço IF. No presente caso, tomando-se por base que a espessura de chapa utilizada nesta pesquisa para os aços IF e SAE 1050 esferoidizado foram respectivamente 0,75 mm e 1,48 mm, pode-se estimar (em princípio) que, para que houvesse equivalência destes materiais durante a estampagem, haveria a necessidade da espessura das chapas do aço de médio carbono esferoidizado ser superior ao dobro da espessura das chapas de aço qualidade IF.

Em artigo em separado deste Seminário,<sup>(20)</sup> apresenta-se a análise do parâmetro  $CLC_0$  em trações uniaxiais e ortogonais quase planares, analisando a influência da trajetória e sobre as tensões associadas.

## 4 CONCLUSÕES

Embora baseado no número limitado de ensaios efetuados, as conclusões que podem ser efetuadas são:

1. O ensaio de deformação planar mostrou-se adequado à determinação do valor de  $CLC_0$  e é realizado com uma quantidade de amostras inferior aquela empregada pelo método de Nakazima, ou seja, são necessárias seis amostras (três amostras para a direção DL e três amostras para a direção DT) no ensaio de deformação planar e 30 amostras no ensaio Nakazima.

2. O ensaio Nakazima que é realizado fora do plano, sofre influências do atrito e de fatores geométricos associados ao punção. Assim, os valores de CLCo associados a este ensaio são mais elevados que aqueles fornecidos pelo ensaio em deformação planar (tração).
3. A localização dos pontos de CLC<sub>0</sub> no interior da faixa de valores de curva CLC da literatura indica a confiabilidade dos valores de CLC<sub>0</sub> obtidos na presente pesquisa.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Brasmetal Waelzholz S/A pelo fornecimento dos aços estudados; ao SENAI pela gravação das redes de círculos, usinagem das amostras, uso da máquina de tração e do projetor de perfil e à siderúrgica Usiminas- unidade Cubatão pela execução dos ensaios Nakazima.

## REFERÊNCIAS

- 1 TASAN, C.C.et al. – Strain path dependent ductile damage mechanics on forming limits- <http://ebookbrowse.com/strain-path-dependent-ductile-damage-pdf-d146331313>
- 2 2-ASM HANDBOOK - vol 14- “Forming and Forging”,1988, ISBN -10:0871700204
- 3 KEELER, S. P. , BACKHOFEN ,W.A.- Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches- ASM Trans Quart.- V.56, 1964, pp.25-48
- 4 GOODWIN, G. M. - Application of strain analysis to sheet metal forming in the press shop- SAE paper # 680093.
- 5 PLAUT, R. L. Estampabilidade de Chapas. [capitulo 15] in Textura e Relações de Orientação. São Paulo : TWA Stúdio Gráfico, 2003.
- 6 BANABIC,D., BUNGE, H.J., POHLANDT,K., TEKKAYA, A.E. - Formability of Metallic Materials – Springer – 2000.
- 7 WAGONER, R.H., CHENOT, J-L – Fundamentals of Metal Forming – J.Wiley- 1997
- 8 ABSPOEL, M. et al. Inherent influence of strain path in Nakazima FLC testing- Tata Steel Research, Development & Technology, IJTC [http://www.tatasteelautomotive.com/file\\_source/StaticFiles/Automotive/Inherent%20influence%20of%20strain%20path%20in%20Nakazima%20FLC.pdf](http://www.tatasteelautomotive.com/file_source/StaticFiles/Automotive/Inherent%20influence%20of%20strain%20path%20in%20Nakazima%20FLC.pdf)
- 9 HUANG et al. - Digital Image Correlation Technique and its application in forming limit curve determination - Proc. IDDRG 2008- Int. Conf. Sweden, pp 152-162.
- 10 CHIVITES, B. D. – comunicação pessoal - Centro de Testes – Usiminas – SP, maio de 2012.
- 11 LAUKONIS, J. V., GHOSH, A. Effects fo strain path changes on the formability of sheet metals - Met. Trans., V. 9A, 1978, pp.1849 - 1856.
- 12 GHOSH, A.K., HECKER, S.S. – Stretching limits in sheet metals in plane versus out of plane defromation—Met, Trans., V.5, 1974, pp.2161-2164.
- 13 NANDEDKAR, V.M., NARASIMHAN,K. 1999, Measurement of strain history during the stretching of forming-grade sheets - J. Mat.Proc. Tech, V.89-90, pp.24-29.
- 14 VEERMAN, C.C., et al.- Sheet. Metal. Ind., set., 1971, pp 678-693.
- 15 KEELER,S.P., BRAZIER,W.G., - Microalloyng 75 Proceedings, Union Carbide Corporation, 1977, pp. 517-530.
- 16 SCHACHER, H.D. Handbuch der Fertigungstechnik. V. 2/3, chap. 4. Ed. G. Spur.
- 17 FLOSSDORF, F.J., FREIER,K. , DREWES,E.J. – Anwendugsorientierte Werkstoffentwicklung fuer Karosseriebleche- Stahl & Eisen, v.115, n.4, pp 85-93.
- 18 HOSFORD, J. L., DUNCAN,J.L. – Sheet metal forming – A review- JOM, n10,1999, pp. 39-44.
- 19 OZTURK, F., LEE, D. - Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability tests - J. Mat. Proc. Tech., V. 170, pp. 247-253.

- 20 PLAUT, R. L., PADILHA, A. F., LIMA, N.B., HERRERA, C., FERREIRA FILHO, A.  
Carbon Steel Deep Drawing: A study on the evolution of mechanical properties, texture and simulations from cold rolling to the end product. *Materials Science*, V. 499, 2009, pp 337 - 341
- 21 WAGONER, R. H. Measurement and Analysis of Plane Strain Work Hardening. *Metallurgical Transactions A*. 1980, Vol. 11 A, pp. 165 - 175.
- 22 MOURA, G. Serigrafia e Tampografia. S. Paulo : SENA I- T. De Nigris, 2005. pp. 1 - 120.
- 23 MANUAL TÉCNICO PANTEC CPJ 3015. [www.panambra.com](http://www.panambra.com),2008.
- 24 EMIC - EQUIPAMENTOS E SISTEMAS DE ENSAIO. [www.emic.com.br](http://www.emic.com.br).
- 25 FANUC LTD. WWW.- [Fanuc.co.jp](http://Fanuc.co.jp).
- 26 HOSFORD, W. F., CADDELL, R. M., Metal forming: Mechanics and Metallurgy, chap. 14, Prentice Hall, USA, 1983, p. 276.
- 27 MÁQUINA DE EMBUTIMENTO MODELO 145 – MANUAL TÉCNICO.  
[www.arotec.com.br](http://www.arotec.com.br).
- 28 CAMSYS EQUIPMENT - [www.asametechnology.com](http://www.asametechnology.com).
- 29 CHAPENTIER, P. L. *Metallurgical Transactions*. 1975, Vol. v. 6A, pp. 1665 - 1669.
- 30 KALUZA, W., KIM, I., BLECK, W., Determination of forming limit stress diagrams for the characterization of material for sheet metal forming – *Adv.Eng.Mat.*, 2002 ,v. 4., No 4- pp.191-195.
- 31 HARIHARAN, K. , SURESC, S. – Comparision of optical strain analysis and circular grid analysis in sheet metal forming- SAE Tech. Papers- # 2007-01-4282.
- 32 XAVIER, M. D. , PLAUT, R. L.- Análise do parâmetro de estampabilidade  $CLC_0$  em trações uniaxiais e ortogonais quase planares. 49 Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos – ABM - 22 a 25 out. 2012 - Vila Velha – ES – Brasil