

ANÁLISE DO PARÂMETRO DE ESTAMPABILIDADE CLC_0 EM TRAÇÕES UNIAXIAIS E ORTOGONAIS QUASE PLANARES¹

Marcos Domingos Xavier²
 Ronald Lesley Plaut³

Resumo

A presente pesquisa visa determinar a influência da trajetória da deformação plástica sobre o valor CLC_0 , raiz da curva FLC e crítico para a estampagem. O aço utilizado refere-se à qualidade livre de intersticiais (IF). O ensaio intrínseco de tração em estado quase planar de deformações (como apresentado em outro trabalho deste Seminário), foi aplicado em duas trajetórias. A primeira delas foi executada no sentido uniaxial até o início da estrição localizada. A segunda trajetória considerou deformação plástica média de 15 % numa direção inicial (quase planar) seguida de deformação plástica até a ruptura na direção ortogonal. A mudança de posição de CLC_0 nos ensaios em dois estágios, isto é, (quase) ortogonais, foi verificada. As tensões dependem das trajetórias das deformações seqüenciais e ortogonais. O método de simulação por Elementos Finitos (FEM) foi utilizado e gerou resultados de tensão e de deformação, coerentes em deformações uniaxiais planares bem como em deformações ortogonais sequenciais.

Palavras-chave: Deformação planar; Simulação numérica; Estampabilidade de chapas; Deformações sequenciais.

ANALYSIS OF THE FLC₀ STAMPING PARAMETER UNDER UNIAXIAL AND ORTHOGONAL NEAR PLAIN STRAIN CONDITIONS

Abstract

This research aims at the evaluations and influence of the stain path on the FLC₀ value, root of the FLC curve and critical to stampings. IF steel has been used in this investigation. The intrinsic tensile test in near plain strain condition (as presented in another paper in this Seminar), has been applied to two path/trajectories. The first one has been uniaxial up to the necking condition. The second one aimed at a 15% average plastic strain in one direction (near plane strain) followed by a second strain applied in the orthogonal direction. The change in position of the FLC₀ value in the two-stage, near orthogonal subsequent test, has been observed. The stress values are related to these trajectories. FEM simulation has been used and stress and strain results have been consistent for both uniaxial and orthogonal sequences.

Key words: Plain strain; Numerical simulation; Sheet metal stampability; Sequential strains.

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

² Engenheiro Metalurgista, M.Sc ; Prof. do SENAI e da FATEC –SP - mdxavier@fatecsp.br

³ 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

As curvas CLC, relativas às deformações na região de estrição próxima à fratura, podem ser obtidas a partir da gravação de uma rede de círculos na superfície das chapas e das deformações verdadeiras (ou reais) maior e menor das elipses, medidas nesta região.⁽¹⁻³⁾ Estas curvas apresentam três regiões principais: embutimento; deformação planar e estiramento, conforme ilustra a Figura 1.⁽⁴⁻⁷⁾

O estado de deformação planar, correspondente ao ponto denominado CLC_0 que se associa à raiz da curva CLC, é o mais crítico para a estrição, pois a deformação real menor é nula, significando a ocorrência de forte estrição no sentido da espessura do material. As deformações planar e quase planar são aquelas que mais comumente ocorrem na estampagem de chapas⁽²⁾ e isto conduz mais rapidamente à estrição/fratura nas peças estampadas.

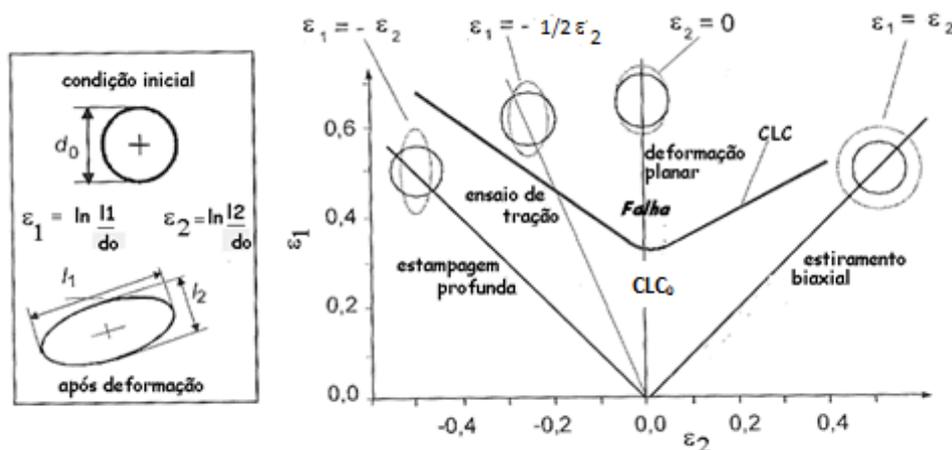


Figura 1 - Tipos de deformações nas peças estampadas em função das deformações ε_1 e ε_2 .^(4,5)

A literatura^(8,9) traz análises e críticas quanto ao uso prático das curvas limite de conformação (CLC)⁽¹⁰⁾ determinadas através de medições pontuais das deformações reais ε_1 e ε_2 ao redor da estrição. Afirma ainda que tais curvas são válidas apenas para condições de carregamentos proporcionais os quais ocorrem, normalmente, nos estágios iniciais do processo de estampagem. Evidencia igualmente a dependência da posição das CLC em função da trajetória da deformação real.^(7,8,11) Assim, pré-deformações uniaxiais ou biaxiais influem no posicionamento destas curvas no espaço $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$. As CLCs se tornam não adequadas na análise de várias (e complexas) trajetórias de deformação que se verificam durante a estampagem.

Por outro lado, salienta que a dependência da trajetória da deformação sobre a posição das curvas limite de conformação quase que desaparece quando são empregadas tensões reais (σ_1 e σ_2).⁽¹²⁾ Salienta ainda que a maioria das curvas $\sigma_1 \times \sigma_2$ concentra-se em bandas estreitas e que a aplicação das curvas limite de tensão (CLT ou *FSLD*) é mais adequada para os casos que envolvem trajetórias de deformação não proporcionais.⁽¹¹⁾

O Método de Elementos Finitos (FEM) vem sendo aplicado cada vez com maior intensidade e confiabilidade em várias operações relacionadas à conformação de chapas, elevando a robustez do processo produtivo.⁽¹³⁾

As simulações (empregando FEM) de processos reais de estampagem envolvem desenvolvimentos em termos de modelos de materiais que necessitam de três informações básicas: a) critério de escoamento (para aços, o critério de Hill'48 ainda

é o mais frequentemente empregado, com expansão isotrópica), b) curva de encruamento (para os aços, as equações de Hollomon ou de Swift ainda são as mais frequentemente empregadas) e c) as CLCs em deformação (como exposto acima).⁽¹³⁾ Visando contornar as limitações das CLCs, como acima mencionado, inicialmente Arrieux⁽¹²⁾ e, subsequentemente, Zhao et al., Stoughton,⁽⁸⁾ Sing e Rao⁽¹⁴⁾ determinaram as CLTs, disponíveis nos modernos softwares de FEM.

O objetivo do presente trabalho é determinar a influência da trajetória da deformação plástica sobre o valor CLC_0 , raiz da curva CLC e crítico para a estampagem assim como sobre as tensões a ele associadas, obtendo as CLTs correspondentes. Resultados analíticos e os obtidos por FEM são comparados.

O efeito destas trajetórias de deformação quanto à evolução da textura cristalográfica será objetivo de publicação futura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa utiliza o aço da qualidade IF, cuja composição química e propriedades mecânicas na condição “como recebido” são resumidas na tabela 1. As propriedades de tração e de anisotropia foram obtidas respectivamente com o uso das normas técnicas ABNT NBR 187 e ASTM E- 517.

Tabela 1- Composição química e propriedades mecânicas do aço IF

Aço IF - espessura: 0,75 mm	
Composição Química (% peso)	Propriedades Mecânicas
C: 0,0015; Mn: 0,1170; P: 0,0100 S: 0,0072; Al: 0,0320; Ti: 0,0530	LE (MPa) :178; K (MPa): 584 LR (MPa): 336 A (%): 42,1 r_0 : 1,73; r_{45} : 1,23; r_{90} : 2,02; r_m 1,6 n: 0,22

A metodologia utilizada para o estudo da influencia da trajetória de deformação plástica sobre os pontos CLC_0 e CLT_0 baseou-se em ensaios de tração em condição de deformação plástica quase planar conforme as seguintes etapas:

1. Pré-gravação via serigrafia⁽¹⁵⁾ de rede de círculos de diâmetro 2mm em corpos de prova dimensionados conforme sugerido na literatura.⁽¹⁶⁾
2. Aplicação de duas trajetórias de deformação, conforme a Figura 2, de modo a permitir uma maior aproximação com as condições da estampagem de chapas em prensas industriais.

A trajetória 1, indicada na Figura 2, caracteriza-se pela execução de deformações plásticas até a ruptura via tração uniaxial em amostras planas grandes.⁽¹⁷⁾ Adicionalmente, estas amostras foram elaboradas com seus eixos maiores paralelos à direção de laminação (DL) da chapa de origem ou transversais (DT) a esta direção de laminação, considerando três amostras para cada uma destas direções. A direção de aplicação da tensão de tração foi coincidente com o eixo maior destas amostras..

A trajetória 2, também indicada na Figura 2, baseia-se inicialmente em deformações plásticas (quase planares) médias de 15% via tração nas direções DL (03 amostras) ou DT (03 amostras) relativas aos eixos maiores das amostras planas grandes.⁽¹⁷⁾ A seguir, três amostras planas pequenas, com dimensões na razão 1:4 em relação às amostras grandes e extraídas com seus eixos maiores perpendiculares à direção da deformação inicial, foram deformadas plasticamente até a ruptura. Em suma, duas deformações

ortogonais foram consideradas nesta trajetória 2 com deformações plásticas sucessivas.

3. As elipses geradas pelas deformações plásticas em ambas as trajetórias de deformação foram medidas ao longo do eixo longitudinal dos corpos de prova para a determinação das deformações reais principais ε_1 e ε_2 . O estudo do deslocamento do ponto CLC_0 foi possibilitado através de medições dos círculos coincidentes com a linha central longitudinal dos corpos de prova e com três linhas paralelas à esquerda e à direita desta linha central. As medições associadas às três linhas laterais à esquerda e à direita da linha longitudinal visaram aumentar a precisão dimensional, eliminando divergências decorrentes de possíveis escorregamentos dos corpos de prova durante os ensaios de tração.

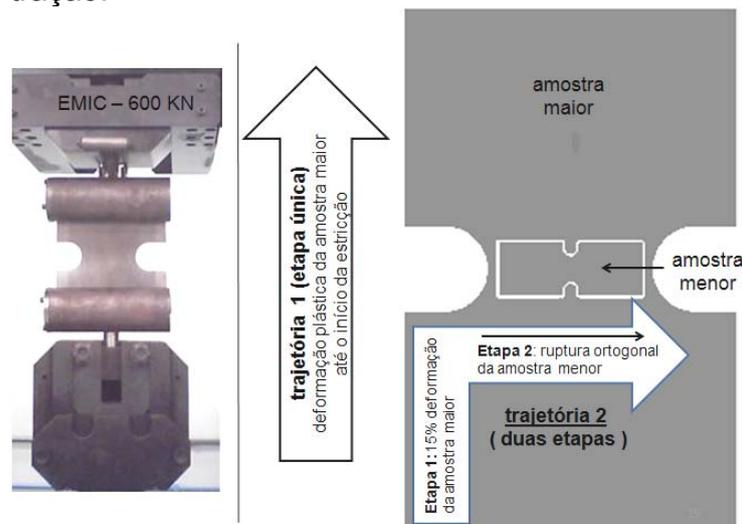


Figura 2 – trajetórias de deformação aplicadas nos estudos de deformação quase planar. O CP menor (etapa 2) está numa escala de 1:4 em relação ao CP maior (ver ref. 17).

As tensões CLT_0 foram calculadas considerando as deformações principais associadas aos pontos quase CLC_0 (ε_2 próximo de zero) das trajetórias 1 e 2 e com o emprego das equações do critério de escoamento de Hill'48, a condição de normalidade, assim como as tensões e deformações equivalentes ou efetivas⁽⁸⁾.

As análises, empregando o FEM, relativas às deformações e tensões foram efetuadas com auxílio do AUTOFORM versão 4.1.

3 RESULTADOS

A Tabela 2 resume as deformações médias e as tensões médias reais intermediárias e dos pontos CLC_0 e CLT_0 para o aço em estudo, submetido às duas trajetórias de deformação mencionadas acima.

Tabela 2 - Influência da trajetória da deformação quase planar sobre CLC_0 e CLT_0 em aço IF sendo DL e DT respectivamente as direções de laminação e transversal

CLC ₀ e CLT ₀ das trajetórias (1) e (2) da presente pesquisa						
Trajetoária	Direção	Símbolo	ϵ_2	ϵ_1	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)
(1)	DL	▽	-0,011	0,370	384	624
(2) parcial	12 % DL	○	-0,004	0,087	279	453
(2)	12 % DL + estricção DT	◇	0,052	0,107	318	517
(1)	DT	D	-0,026	0,410	391	636
(2) parcial	14 % DT	▽	-0,011	0,107	289	471
(2)	14 % DT + estricção DL	⊕	0,084	0,120	338	550

As Figuras 3 e 4 indicam a redução no valor da deformação ϵ_1 relativa à estricção do aço IF na trajetória 2 em comparação com a trajetória 1, considerando as direções iniciais DL e DT, respectivamente.

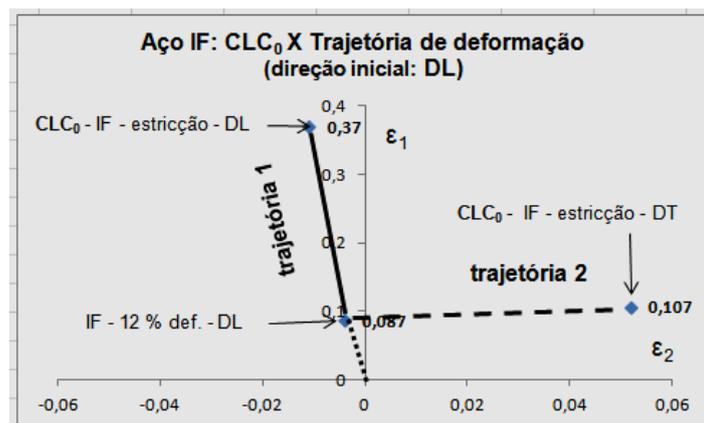


Figura 3 - Ponto CLC_0 relativo estricção no aço IF deformado na direção de laminação (DL) e sua tendência quando a trajetória da deformação plástica é alterada para 12 % na direção DL, seguida de estricção na direção DT. Observar a ordem de grandeza das escalas.

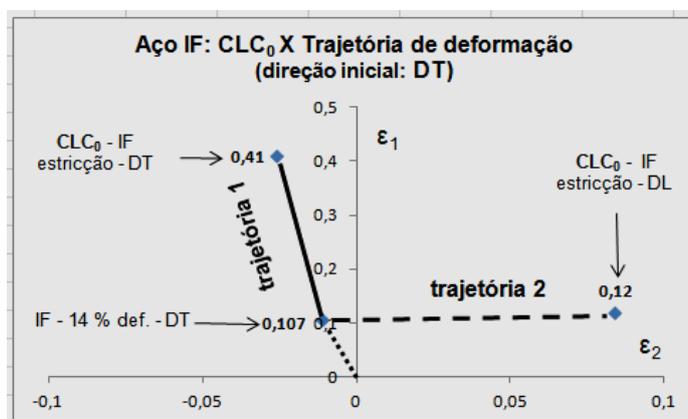


Figura 4 - Ponto CLC_0 relativo estricção do aço IF deformado na direção transversal de laminação transversal (DT) e sua tendência quando a trajetória da deformação plástica é alterada para 14 % na direção DT, seguida de estricção na direção DL. Observar a ordem de grandeza das escalas.

4 DISCUSSÃO

Inicialmente foi utilizado o trabalho do NADDRG (*North American Deep Drawing Research Group*), o qual obteve resultados experimentais⁽⁵⁾ que objetivaram relacionar o valor de CLCo com a espessura (t em mm.) da chapa e com o expoente de encruamento (n) (este último relativo à equação de Hollomon ($\sigma = k \epsilon^n$), resultando na equação $CLC_0 = (23.3 + 14.2 t) \cdot (n/0.21)$, aplicável a aços de baixo carbono. O resultado relativo ao aço IF desta pesquisa encontra-se resumido na Tabela 3. De maneira alternativa, a relação entre as propriedades mecânicas das chapas e o valor de CLC_0 foram estabelecidas em equação proposta pela Tata Steel,⁽¹⁹⁾ visando simplificar o laborioso procedimento da obtenção das CLCs (ISO I2004-2:2008), através das equações (1) e (2). A equação (1) possibilita calcular o valor de CLC_0 em chapas de espessura 1mm utilizando o alongamento enquanto que a equação (2) permite corrigir o valor de CLC_0 para chapas de outras espessuras (t (mm)).

$$CLC_{0(1\text{ mm})} = 0,0084 \cdot A_{80} \dots\dots\dots(1)$$

$$CLC(\text{espessura qualquer}) = CLC_{0(1\text{ mm})} + (0,37 \cdot CLC_{0(1\text{ mm})})^{1,32} \cdot (t - 1) \dots(2)$$

Neste sentido, a chapa de aço IF da presente pesquisa tem um valor de CLC_0 equivalente a 0,34. Este modelo também foi comparado com outras equações de CLC_0 da literatura⁽²⁰⁻²²⁾ obtidos em condições de deformação planar. A concordância de resultados foi considerada satisfatória.

Os estudos relativos às deformações e as tensões associadas ao valor de CLC_0 , foram conduzidos com auxílio da simulação numérica empregando o Método de Elementos Finitos (FEM) e comparados com dados da literatura técnica,⁽²³⁾ objetivando avaliar os resultados obtidos neste trabalho, aplicando a deformação quase planar (Tabela 2).

As Figuras 5 e 6, obtidas com o uso da simulação numérica (FEM), referem-se respectivamente à CLC e à CLT (*Forming Limit Stress Diagrams- FLSD*), do aço IF considerando as trajetórias 1 e 2. Deve-se salientar que o programa computacional utilizado não considera a influência da evolução microestrutural e/ou da textura cristalográfica⁽²⁴⁾ sobre a estampabilidade, em especial quando da trajetória 2. Observe-se que, desta forma, os pontos CLC_0 e de seus correspondentes estados de tensão mostraram-se próximos para ambas as trajetórias, conforme apresentado na Tabela 3.

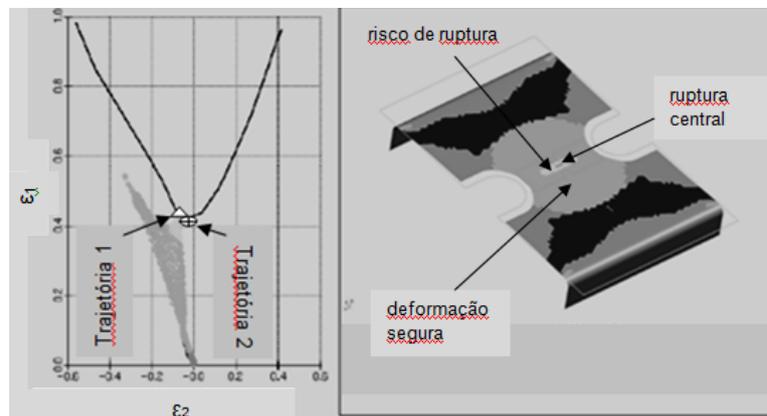


Figura 5 - Curva CLC do aço IF obtida através da análise por elementos finitos (FEM). Considerou-se o corpo de prova maior de aço da qualidade IF. As estirções iniciam-se no centro do corpo de prova e associam-se à deformação quase planar, próximas ao valor de CLC_0 .

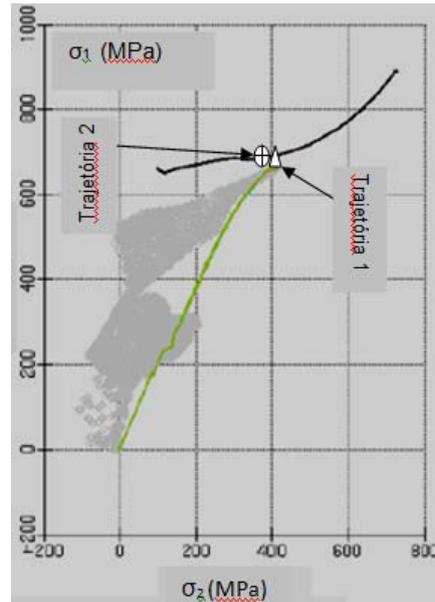


Figura 6 - Curva limite de tensão (CLT), obtida por simulação numérica (FEM) e os respectivos valores de CLT_0 das trajetórias 1 e 2.

A Tabela 3 apresenta as deformações e as tensões verdadeiras/reais dos valores de CLC_0 obtidos via simulação numérica FEM e as de publicações técnicas^(19,25) para o aço IF.

Tabela 3 - Influência da trajetória da deformação sobre o valor CLC_0 em aço IF, considerando análises por simulação numérica e publicações da literatura, sendo DL e DT respectivamente as direções de laminação e transversal

CLC ₀ e CLT ₀ da literatura e da simulação numérica (FEM)							
Fonte	Trajetoória	Direção	Símbolo	ϵ_2	ϵ_1	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)
NADDRG	(1)	DL	⬡	0	0,36	384	624
FEM	(1)	DL ou DT	⬠	-0,073	0,43	405	661
FEM	(2)	15 % DL (DT) + estricção DT (DL)	⊗	-0,021	0,41	360	684
TATA STEEL ⁽²⁷⁾	(1)	DL	★	0	0,34	369	607

A Figura 7 apresenta a curva CLC do aço IF em estudo, considerando o valor de CLC_0 obtido na presente pesquisa com a aplicação da trajetória uniaxial de deformações. Incluem-se as deformações verdadeiras/reais maiores ϵ_1 e menores ϵ_2 , relativas aos pontos CLC_0 obtidos na presente pesquisa com as trajetórias de deformação 1 e 2 (Tabela 2) e também com os da simulação numérica FEM e dados da literatura (Tabela 3), todos inseridos nesta figura, para efeito comparativo. É possível verificar a proximidade dos valores de CLC_0 (obtidos em condições uniaxiais nesta pesquisa), em relação à simulação numérica e os valores extraídos da literatura. Todavia, a deformações plásticas ortogonais (trajetória 2) conduziram a

valores de CLC_0 , aquém em relação àqueles obtidos em condições uniaxiais (trajetória 1). Este aspecto está possivelmente relacionado aos “danos” à microestrutura (pelo colapso e subsequente formação de novas/modificadas paredes de discordâncias), alterações na textura cristalográfica (causadas pela variação da trajetória das deformações), evolução da rugosidade com a deformação, aspectos que vem sendo pesquisados intensamente em publicações recentes.^(7,27-31) Novas metodologias de avaliação das CLCs vêm sendo desenvolvidas por Hora e por Vegter,^(32,33) e poderão conduzir à melhoria na precisão dos resultados, com base em novos modelos de materiais e respectivos critérios de escoamento.

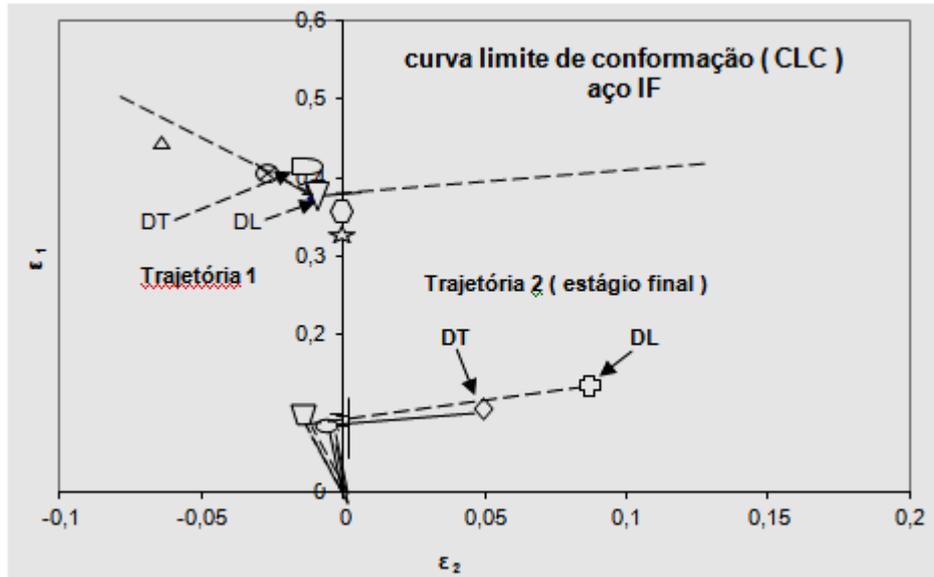


Figura 7: comparação dos valores CLC_0 desta pesquisa e da literatura.

A Figura 8 apresenta a curva CLT, construída com base nos dados de CLT_0 obtidos nesta pesquisa e também com aqueles apresentados na literatura. É possível verificar que há concordância de CLT_0 quando as deformações planares (decorrentes da trajetória 1), foram consideradas. Todavia, é possível observar a dependência do valor CLT_0 em relação à trajetória 2 de deformação, que conduziu a uma evolução das tensões (ligeiramente) inferior àquelas observadas na trajetória 1, possivelmente associado a diferentes aspectos/*danos*, tais como recuperação estática, variações na evolução da textura cristalográfica, alterações na rugosidade e alguma parcela devida ao efeito Bauschinger, além da alteração nos valores de n e R .⁽³⁴⁾

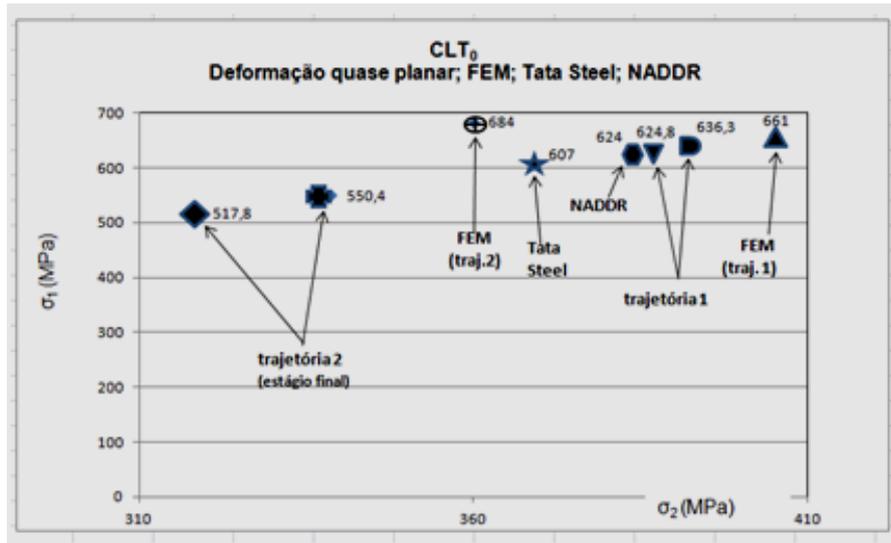


Figura 8: comparação dos valores de CLT_0 desta pesquisa e da literatura.

A curva limite de tensão CLT ($FLSD$) determinada para o aço IF obtida por Kaluza, Kim e Bleck⁽³⁵⁾ é apresentada na Figura 9. Os valores das tensões obtidos na presente pesquisa para o aço IF, denominadas CLT_0 , correspondentes aos pontos CLC_0 nas direções DL e DT, são sobrepostas nesta figura. É possível observar que os pontos CLT_0 (DT) e CLT_0 (DL) são coincidentes⁽³⁵⁾ com a curva $\sigma_1 \times \sigma_2$ e próximos dos resultados de Chen et al.,⁽²⁵⁾ reforçando a confiabilidade dos valores de σ_0 obtidos na presente pesquisa.

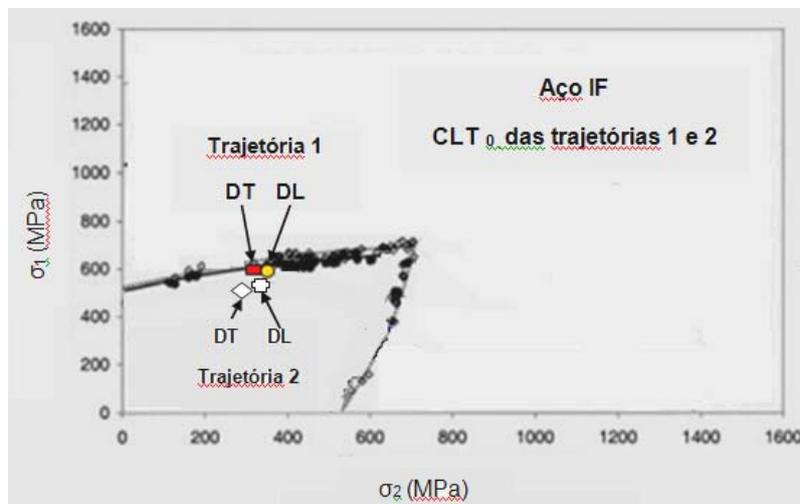


Figura 9 – curvas limite de tensão CLT ($FSLD$) do aço IF usando o modelo de Arrieux. As linhas indicam o ajuste polinomial de segunda ordem para os dados experimentais.⁽³⁵⁾ Os pontos em destaque referem-se aos de σ_0 obtidos em condição de deformação quase plana.

A análise da evolução da textura no aço IF em função da trajetória da deformação plástica encontra-se em andamento e será objetivo de publicação futura.

4 CONCLUSÕES

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

1. A determinação de CLC_0 , via ensaio quase planar em um estágio, mostrou-se funcional e compatível com as informações disponíveis na literatura.
2. O ensaio planar em dois estágios (ortogonais) demonstrou alteração dos valores de CLC_0 , possivelmente associado ao dano microestrutural decorrente da alteração da trajetória das deformações;
3. As tensões finais, no entanto, não dependem significativamente da trajetória das deformações sequenciais e ortogonais planares.
4. A simulação numérica, baseada no Método de Elementos Finitos (FEM) gerou resultados de tensão coerentes no caso de deformações uniaxiais planares, porém, devem ser alterados (de maneira não muito significativa), quando submetidos à deformações ortogonais devido as alterações microestruturais, à evolução da textura e outros danos gerados pela alteração da trajetória da deformação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao SENAI e à Brasmatal Waelzholz pelo apoio a esta pesquisa. Agradecem também aos Professores Enéias N.da Silva, Elias P. dos Santos, Guilherme de Moura, José Roberto da Silva e Gilberto Antônio Varussa, pela colaboração em diversas etapas de seu desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- 1 LAUKONIS, J. V., GHOSH, A. - Effects of strain path changes on the formability of sheet metals - *Met. Trans.*, V. 9A, 1978, pp.1849 - 1856.
- 2 DRY, D., HUGHES, D., OWEN, R. - Methods of assessing influence of weld properties on formability of laser welded tailor blanks- *Ironmak. Steelmak.*, V.28, 2001, pp 89-95.
- 3 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.
- 4 ASM Handbook - vol 14 - *Forming and Forging*, 1988, ISBN -10:0871700204.
- 5 PLAUT, R. L. - Estampabilidade de Chapas. (cap 15)[Ed: A. P. Tschipchin al.] - *Textura e Relações de Orientação*, São Paulo, 2003.
- 6 KEELER, S. - The science of forming; www.metalformingmagazine.com, 2010.
- 7 CHOW, C.L., YANG, X.J.- Prediction of forming limit diagram with mixed anisotropic kinematic-isotropic hardening plastic constitutive model based on stress criteria- *J. Mat. Proc. Tech.*, V.133, 2003, pp 304-310.
- 8 STOUGHTON, T. B.- A general forming limit criterion for sheet metal forming. *International Journal of Mechanical Sciences.*, 2000, V. 42, pp. 1-27.
- 9 BANABIC, D., BUNGE, H.J., POHLANDT, K., TEKKAYA, A.E.- *Formability of Metallic Materials* - Springer - 2000.
- 10 MAJESKE, K.D., HAMMETT, P.C. - Identifying sources of variation in sheet metal stamping - *Int.J.Flex.Manuf.Syst.*, V.15, 2008, pp 5-18.
- 11 STOUGHTON, T., ZHU, X.- Review of theoretical models of the strain-based FLD and their relevance to the stress-based - *Int.J.of Plasticity*, V.20, 2004, pp1463-1486.
- 12 ARRIEUX, R. - *J. Mat.Proc. Tech.*, 1995, Vol. 53, pp. 47- 56.
- 13 MAS, B., TIEU, A.K., LU, C., JIANG, Z. - A finite-element simulation of asperity flattening in metal forming - *J.Mat. Proc. Tech.*- V.130-131, 2002, pp. 450-455.
- 14 SING, W. M., RAO, K.P.- Study of the sheet metal failure mechanisms based on the stress state conditions- *J. Mat. Proc. Tech.*, V. 67, 1997, pp.201- 206.
- 15 XAVIER, M. D. et al. Técnicas de gravação de redes de círculos em amostras metálicas visando estudos de estampabilidade. 43º Sem. Lam. - Proc. Prod.Lam.e Revest. - ABM, 2006.

- 16 WAGONER, R. H. -Measurement and Analysis of Plane Strain Work Hardening. *Met. Trans. A.* 1980, V. 11A, pp. 165 - 175.
- 17 XAVIER, M.D.; PLAUT, R.L. – Ensaio de tração uniaxiais quase planares aplicados na determinação do parâmetro de estampabilidade CLC_0 Seminário de Laminação – ABM – 22 a 25 Out. 2012 – Vila Velha – ES – Brasil.
- 18 WAGONER, R. H. , CHENOT, J. L.- *Fundamentals of Metal Forming*. New York : J.Wiley & Sons, Inc., 1997.
- 19 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
- 20 CAYSSIALS, F.- A new method for predicting FLC; IDDRG 1998;; 17-19 June 1998, pp. 443-454.
- 21 CAYSSIALS, F. , LEMOINE, X. Predictive model of FLC (Arcelor model UHSS) - IDDRG 2005, 2005; pp 20-22.
- 22 GERLACH, J. et al.- Possibilities and influencing parameters for the early detection of sheet metal failure in press shop operations- Numiform 2007, pp 99-104.
- 23 GRAF, A. , HOSFORD, W.F.- Calculations of forming limit diagrams for changing strain path.- *Met.Trans a*, V.24, n.3, 1993, pp 2497-2501.
- 24 NAKAMACHI, E., TAM, N.N., MORIMOTO, H.- Multi-scale finite analyses of sheet metals by using SEM-EBSD measured crystallographic RVE models – *Int. J. Plast.*, V.23, 2007, pp.450-489.
- 25 CHEN, M.H., GAO, L., ZUO, D.W., WANG, M. - Application of the forming limit stress diagram to forming limit prediction for multi-step forming of auto panels – *J. Mat. Proc. Tech.*, V.187, 2007, pp.173-177.
- 26 VOLK, W., HORA, P. – New algorithm for robust user-independent evaluation of beginning instability for experimental FLC determination- *Int.J.Mater.Form.-V.4*, 2011, pp. 339-346.
- 27 DUCHENE, L. , et al. – Texture evolution during deep-drawing processes- *J. Mat. Proc. Tech.*, V. 125-126, 2002, pp. 110-118.
- 28 KURODA, M. , TVERGAARD, V. – Effect of strain path change on limits to ductility of anisotropic metal sheets – *Int. J. Mech. Scie.*, V.52, 2000, pp. 867-887.
- 29 LEMAITRE, J. – Coupled elasto-plasticity and damage constitutive equations- *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, V.51, 1985, pp. 31-49.
- 30 RAO, B.V.N., LAUKONIS, J.V.-Microstructural mechanisms for the anomalous tensile behavior of aluminum-killed steel prestrained in plane strain tension- *Mat.Scie.Eng*, v.60, 1988, pp.125-135.
- 31 NESTROVA, E.N., BACROIX, B. TEODOSIOU, C.- Microstructure and texture evolution under strain-path changes in low-carbon interstitial-free steel - *Met.Mat Trans A*, V.32, 2001, pp.2527-2538
- 32 VEGTER, H. , VAN DEN BOOGAARD, A.H. – A plane stress yield function for anisotropic sheet material by interpolation of biaxial stress states- *Int.J. Plast.*, V. 22, 2006, pp. 557-580.
- 33 VEGTER, H., HORA, C., ABSPOEL, M. - The Corus-Vegter lite material model : simplifying advanced material modelling- *Int. J .Mat. Form.*, V. 2, suppl.1, 2009, pp. 511-514.
- 34 LIEWALD, M., HELD, C., SCHLEICH, R.- Characterization of sheet metal formability- A review and new approaches - steel research, V.80, 2009, n.4, pp.275-280.
- 35 KALUZA, W. et al.- Determination of forming limit stress diagrams for the characterization of material for sheet metal forming. *Adv.Eng.*, 2002, V.4, n. 4, pp. 191-195.