

DETERMINAÇÃO DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC) PARA AÇO IF VARIANDO A DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO

Sergio Eglan Silveira Netto

LdTM, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
Caixa Postal 15021, CEP: 91540-000, Av Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre/RS-Brasil.
eglan.silveira@ufrgs.br

Rafael Schilling Crivellaro

Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia – SENAI Cimatec. Av. Orlando Gomes, 1845 – Piatã
– CEP: 41650-010, Salvador, BA. rsc@cimatec.fieb.org.br

Nixon Malveira

LdTM, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
Caixa Postal 15021, CEP: 91540-000, Av Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre/RS-Brasil.
nixon.malveira@ufrgs.br

Lírio Schaeffer

LdTM, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
Caixa Postal 15021, CEP: 91540-000, Av Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre/RS-Brasil.
schaeffer@ufrgs.br

Resumo. *Este trabalho versa sobre a determinação da Curva Limite de Conformação (CLC) de chapas de aço IF, variando a direção de laminação. Para isso foram feitos ensaios segundo o método Nakajima, que consiste em submeter corpos de prova com geometrias variadas estirando-os até a ruptura com a minimização do efeito do atrito entre punção e chapa, simulando desta maneira as deformações que uma chapa é submetida durante um processo real de conformação. Os ensaios realizados simulam essas deformações, gerando dados que alimentam programas de simulação para a conformação de chapas, proporcionando, desta forma, informações fundamentais que servem como limite tecnológico, embasando o projeto de processos de obtenção de superfícies conformadas sem que haja estricção, pré-rupturas ou falhas catastróficas.*

Palavras-chave: *Conformação, Curva Limite, Aço IF, Grandes Deformações.*

1. INTRODUÇÃO

A curva limite de conformação é uma informação fundamental para o projeto de peças estampadas, principalmente como condição de contorno suplementar para programas de simulação numérica. Embora seja conhecida para a maioria dos materiais há a necessidade de determiná-la para chapas produzidas no Brasil.

Componentes estruturais confeccionados com aço “Interstitial Free” IF, segundo Andrade, 2001, correspondem à cerca de 2.86% em peso no veículo modelo classe C, devem ter suas características tecnológicas conhecidas para alimentar com os resultados obtidos experimentalmente programas de simulação numérica dedicados ao desenvolvimento de peças obtidas por processos de simulação. Estas informações reduzem tempo de desenvolvimento de novas famílias de produtos (e do tempo de lançamento em um mercado altamente competitivo), os custos com

ferramental, obtendo-se ganhos de produtividade, devido à eliminação dos métodos de tentativa e erro.

Para realizar qualquer modificação na geometria de uma chapa metálica, é necessário perceber e prever seu comportamento mecânico na conformação, havendo uma sensível redução de custos quando se elimina a técnica tentativa e erro. Para isso, é fundamental conhecer as propriedades mecânicas de uma chapa metálica que, de antemão, já se sabe, variam com composição química do metal base: conhecer os elementos de liga, a qual tratamento térmico e processo mecânico a chapa foi submetida e também conhecer a curva limite de conformação, que é um diagrama onde há a relação entre a deformação principal maior e a deformação principal menor de uma peça, quando submetida a esforços mecânicos.

Ao levantar a curva limite de conformação (CLC), cria-se uma gama de dados ou pares de deformações ϕ_1 (*deformação principal na maior direção*) x ϕ_2 (*deformação principal na menor direção*) que são utilizados como limite em programas de simulação numérica, isto é, mesmo que um programa apresente resultados matemáticos, sabe-se que deformações geradas por esse programa, que excedam as deformações contidas em um gráfico limite de conformação, não apresentam sentido físico algum.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1. Aço IF

Estes materiais são produzidos com baixíssimo teor em carbono e nitrogênio microligados com Titânio, Boro ou Nióbio, usando tecnologia de desgaseificação a vácuo. Neste processo o aço na forma líquida é submetido a níveis muito baixos de pressão, na ordem de um milésimo de pressão atmosférica, permitindo o refinamento com a obtenção de teores de carbono na ordem de 20-30 ppm. Os elementos microligantes (Ti, Bo e Nb) combinam-se com os poucos átomos de Carbono e Nitrogênio existentes nos interstícios da estrutura cristalina do ferro, gerando uma matriz ferrítica extremamente limpa, livre de elementos em solução sólida intersticial.

Como não possuem átomos intersticiais, podem ser tratados termicamente com altas taxas de aquecimento, como aquelas que são usadas nas linhas de laminação a frio seguidas de recozimento contínuo e galvanização por imersão a quente. Seu endurecimento é alcançado por solução sólida dos elementos Manganês e Fósforo (eventualmente Silício) que não influenciam de maneira importante na textura e capacidade de deformação do material. Em geral os aços IF possuem elevada tensão de escoamento e resistência à tração e boa capacidade de deformação com melhores propriedades que os antecessores de aços de baixo carbono acalmados ao alumínio. A Tabela (1) indica as propriedades mecânicas do Aço IF levantados em um ensaio de tração e a Fig. (2) indica a curva de escoamento real do material. São produzidos por laminação a frio e recozimento contínuo ou recozimento em caixa de alta convecção com hidrogênio puro e fornecido com ou sem revestimento de camada de Zinco, via processo de zincagem por imersão a quente.

Tabela 1. Propriedades mecânicas do aço IF.

E	207
C	566
n	0.229
r_{0°	1.79
r_{45°	1.98
r_{90°	2.43

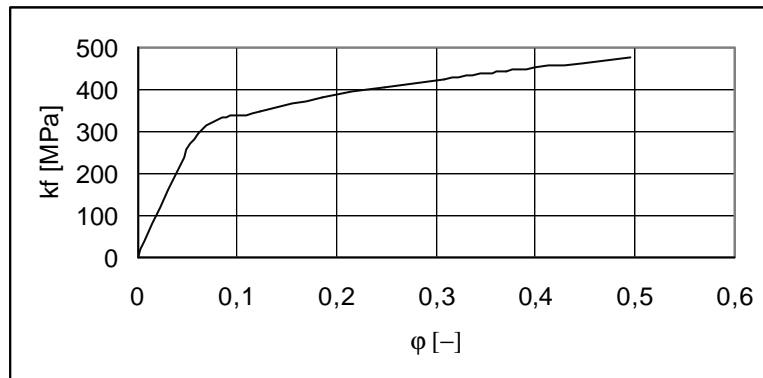


Figura 1. Tensão de escoamento real do aço IF.

No Brasil, os aços livres de Interstício são fornecidos pela Companhia Siderúrgica Nacional com o nome de CSN EEP-PC IF e pela USIMINAS com a denominação USI-ST 05 e atualmente encontra-se em desenvolvimento o USI-ST 06.

Na Indústria Automobilística este material é empregado com ou sem revestimento em peças de carroceria como: painéis internos portas dianteira e traseira; painéis laterais externos; caixa roda interna; reforço painel interno inferior; painel interno tampa traseira; painel assoalho traseiro e extensão painel lateral externo. Na Fig. (2) pode ser visualizado uma micrografia com aumento de 500X de um aço IF.

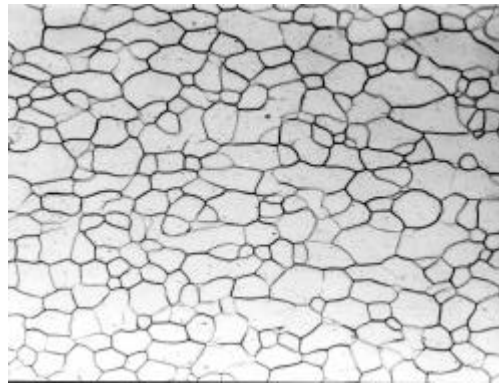


Figura 2. Micrografia de um aço IF com aumento de 500X

2.2. Grandes Deformações

Quando se deseja conformar um material que é sujeito a um estado complexo de tensões, utiliza-se a conhecida equação de Hollomon Ludwick que relaciona tensão real e deformação, a saber:

$$k_f = K \cdot \dot{\mathbf{j}}_1^n \quad (1)$$

Na equação acima, o expoente n é o grau de encruamento que varia entre 0 e 1, e K é constante dependente do material, ϕ_1 é a deformação principal na direção de maior deformação.

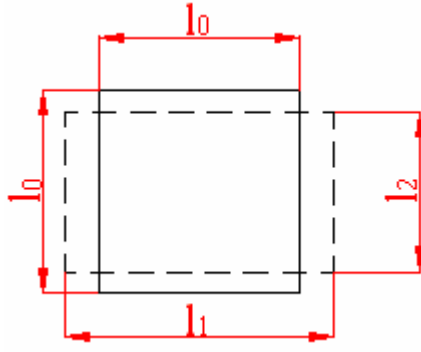


Figura 3. Desenho esquemático para cálculo das deformações principais.

A deformação principal maior ϕ_1 é expressa por:

$$j_1 = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (2)$$

Na Equação (2) l_0 é o comprimento inicial do quadrado da Fig. (3), l_1 é a deformação principal na direção maior de deformação. Se essa mesma fórmula for aplicada na direção perpendicular a l_1 , isto é, na direção principal menor onde o comprimento final é l_2 tem-se a deformação ϕ_2 .

Determina-se a deformação na espessura pela fórmula subsequente, definida como a lei da constância de volume.

$$j_1 + j_2 + j_3 = 0 \quad (3)$$

Para as Eq. (2) e (3), o termo ϕ_1 é a deformação principal maior na direção do comprimento, ϕ_2 é a deformação principal menor na direção da largura e ϕ_3 é a deformação principal na direção da espessura.

2.3 Relação de Deformações

Para determinar a estampabilidade de uma chapa, que é a capacidade de uma chapa metálica sofrer deformação sem que haja falha durante um processo real de conformação, obrigatoriamente se deve atingir a zona plástica de deformações, que tem um nível de tensões que excede a tensão de escoamento.

No processo de conformação, ocorre, tanto simultaneamente como isoladamente, embutimento profundo, tração uniaxial, deformação plana, estiramento e estiramento biaxial. Para cada um dessas situações físicas é mostrada, respectivamente, a relação matemática:

$$j_1 = -j_2 \quad (5)$$

$$j_1 = -2 \cdot j_2 \quad (6)$$

$$j_2 = 0 \quad (7)$$

$$j_1 = 2 \cdot j_2 \quad (8)$$

$$j_1 = j_2 \quad (9)$$

Nas equações anteriores, o termo ϕ_1 é a deformação principal maior na direção do comprimento e ϕ_2 é a deformação principal menor na direção da largura.

2.3. Corpos de Prova

Nakajima (1968) propôs um ensaio onde se empregavam corpos de prova de seção circular com variação da geometria dos corpos de prova para levantar a CLC. A geometria proposta foi modificada por Hasek (1978), empregando uma família composta de 8 corpos de prova circulares com entalhes semicirculares simétricos no blank. A confecção de famílias de corpos de prova com seção retangular, conforme descrito por Hennig (1997), torna-se facilmente obtida por corte na guilhotina, com posterior fresamento em Centro de Usinagem dos raios semicirculares simétricos permitindo a redução de custos na manufatura. A Fig. (4) ilustra tais corpos de prova.

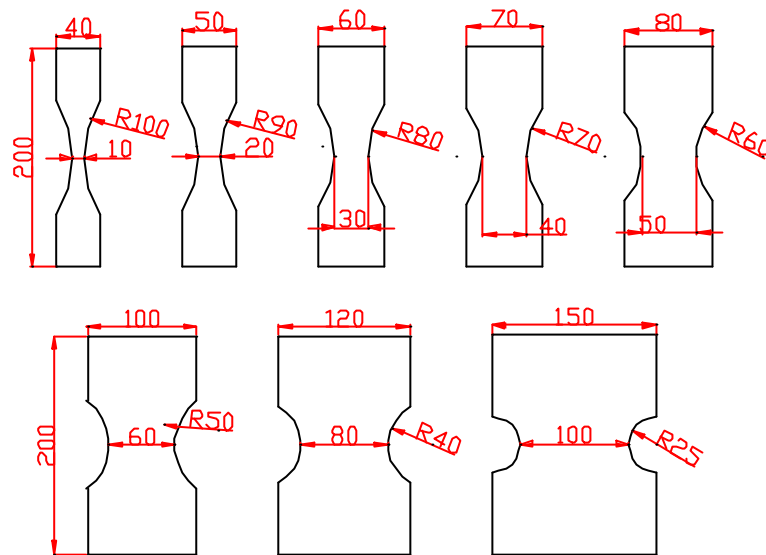


Figura 4. Corpos de prova para determinar a curva limite de conformação pelo método Nakajima modificado. Unidades em mm.

A pressão que o punção exerce sobre os corpos de prova durante o ensaio faz com que ocorram deformações nos mesmos, esse procedimento simula as diferentes deformações de embutimento, tração, deformação plana, estiramento e estiramento biaxial, segundo Nakajima (1968).

2.4. Curva Limite de Conformação

A curva limite de Conformação é um dos critérios de segurança utilizados para identificar problemas existentes ou problemas que possam existir quando uma chapa metálica é submetida a modificações específicas feitas em sua geometria inicial durante o processo de estampagem.

A curva limite de conformação de um material metálico corresponde à máxima capacidade de deformação de uma chapa metálica quando submetida a processos de conformação, para isso são feitos ensaios em laboratório com o objetivo de levantar a CLC, e comparam-se essas deformações com as sofridas pelo material durante a produção industrial. Ao realizar essa análise pode-se determinar qual tipo de combinação de deformação atuou na peça conformada.

CLC pode ser de dois tipos, a fratura obtida por ensaios de conformação e medindo os corpos de prova nas zonas de início de fratura ou a estricção onde são medidos pontos correspondentes ao início de estricção visível ou pontos onde apareça uma maior rugosidade.

Para os ensaios realizados, o método de gravação da malha foi o eletroquímico por ter maior aderência ao corpo de prova e garantia de maior precisão da malha impressa. Para o presente trabalho, adotou-se geratriz com malha quadrada de lado inicial h_0 igual a 2,5mm.

Durante a conformação, esses quadrados se deformam juntamente com o corpo de prova, uma vez que a impressão é feita por um processo eletroquímico, o que causa a deformação da malha

juntamente com a chapa. A malha acompanha a deformação do corpo de prova, deixando de ter a forma quadrática e assumindo diferentes formatos, por exemplo, retangular, ou quadrático com maiores dimensões, dependendo da geometria do corpo de prova.

A medida deve ser tomada na célula por onde passa a fratura, caso se queira levantar a curva à fratura. Após a conformação, o lado maior l_1 corresponde à direção da deformação principal maior, e o menor l_2 , que corresponde à direção da deformação principal menor.

Cria-se uma gama de dados ou pares de deformações $\phi_1 \times \phi_2$ a qual chamamos curva limite de conformação.

3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Para levantar a CLC utilizou-se o seguinte conjunto de equipamentos presentes no Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: uma prensa hidráulica de duplo efeito da marca Dan-Press, com capacidade de força de até 20 toneladas (6 toneladas no punção inferior), um sensor de deslocamento resistivo Gefram modelo PCM 200E para medir profundidade de estampagem, uma célula de carga confeccionada internamente no laboratório acoplada ao punção para medir a força de estampagem durante a conformação, um sensor de pressão de óleo marca Gefram modelo TKG M 1 M 2C para controlar a força do prensa chapas.

Todos esses equipamentos foram conectados a um sistema de aquisição de dados composto por um conjunto de três amplificadores modelo AE 301 da marca HBM, mais uma placa de aquisição de dados DAQcard-516 ligada a um bloco de conexão CB-27 I/O por um cabo tipo PR27-30F. Esse sistema estava ligado a um computador portátil marca HP, modelo Omnibook 2100, sendo feita a coleta dos dados software DIADem 6.0.

Para a obtenção das curvas foi utilizado o método proposto por Nakajima (1968). Usou-se como ferramenta um punção hemisférico com 50mm de diâmetro e matriz de 200mm com quebra rugas, para evitar que o material fluísse para dentro da matriz.

Para diminuir o atrito entre punção e corpo de prova, e melhor distribuir (tornar homogênea) as tensões, foi utilizado uma bolacha de polímero poliuretano PU45 de 50mm de diâmetro com 7mm de espessura.

Ao medir as deformações utilizou-se uma fita flexível graduada (taper plate), conforme sugerido por Klein e Cervelin (1982) e esta fita teve a sua escala calibrada em um projetor de perfis, fornecendo diretamente as deformações principais ϕ_1 e ϕ_2 nas células.

4. RESULTADOS

Para levantar cada curva, perpendicular e paralela, foram feitos duas baterias de ensaios cada uma com oito diferentes corpos de prova, ver Fig. (4).

A força do prensa chapas foi ajustada em torno de 6 toneladas garantindo que o corpo de prova não escoasse.

Mediu-se com auxílio da fita graduada a deformação " ϕ_1 ", perpendicular à ruptura, pois sendo ϕ_1 maior, é essa deformação que provoca a ruptura. Na direção perpendicular a ϕ_1 foi medida a deformação ϕ_2 . Com a utilização da fita, ganhou-se tempo e agilidade no processo de medição, eliminando a medição métrica de cada lado do retângulo final e o cálculo, por meio da Eq. (2), da deformação principal.

Tomou-se o cuidado de medir, após a conformação dos corpos de prova, três células onde havia maiores deformações principais maiores e menores correspondentes à variação do lado do quadrado inicial inserido no gráfico o valor médio, ver Fig. (5).

Nessa figura aparecem duas nuvens de pontos, uma correspondente a corpos de prova cortados perpendicularmente ao sentido de laminação e outra a corpos de prova cortados no sentido de laminação.

A CLC *paral* corresponde à curva posicionada logo a baixo da nuvem de pontos circulares, isto é, correspondente aos corpos de prova cortados paralelos à ruptura, assumindo que qualquer

deformação φ_1 medida em uma peça maior que o valor de φ_1 que caracteriza essa curva tenha atingido a ruptura. Já a curva relativa aos pontos triangulares na Fig. (5) corresponde ao resultado do ensaio feito em corpos de prova cortados perpendiculares a direção de laminação e é chamada *CLC perp*. Esse procedimento de determinar a CLC foi proposto por Hennig (1997).

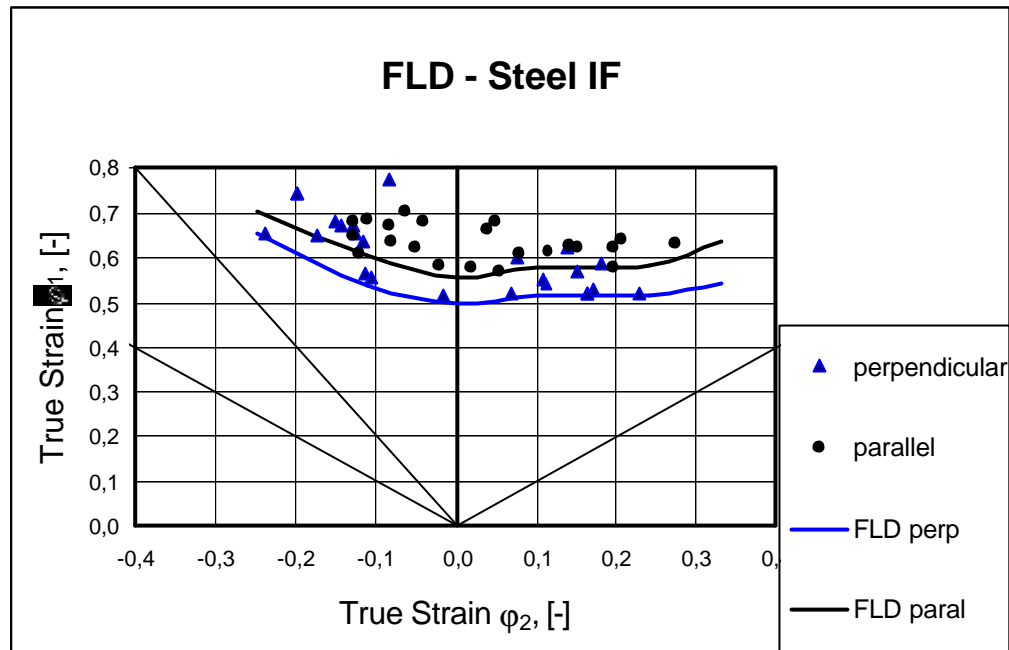


Figura 5 – CLC do Aço IF com espessura de 0.75mm. Ensaio Nakajima, punção R50 e lubrificante PU45.

As equações (10) e (11) descrevem, respectivamente, a relação entre φ_1 e φ_2 que foi utilizada para criar a curva limite à ruptura perpendicular e a paralela da Fig. (5).

$$\varphi_1 = 5.3894 \varphi_2^4 - 3.1675 \varphi_2^3 + 0.9412 \varphi_2^2 - 0.0707 \varphi_2 + 0.5091 \quad (10)$$

$$\varphi_1 = -4.781 \varphi_2^4 + 2.129 \varphi_2^3 + 0.863 \varphi_2^2 - 0.028 \varphi_2 + 0.225 \quad (11)$$

Nas equações (10) e (11), o termo φ_1 é a deformação principal maior na direção do comprimento e φ_2 é a deformação principal menor na direção da largura dos corpos de prova.

Na tabela (2) são mostrados resultados correspondentes a valores de deformações que podem ser colocados num programa de simulação numérica, os quais servem como deformações limites para os resultados nele obtidos, isto é, se for feita uma simulação onde ocorra tração, deformação plana, estiramento ou estiramento biaxial garante-se que os resultados matemáticos obtidos pelo programa estejam dentro da realidade física.

Tabelas 2. Valores referentes de φ_1 e φ_2 para as curvas da figuras 5.

j_2	j_1 paralela	j_1 perpendicular
-0,20	0,703	0,655
-0,10	0,599	0,534
0,00	0,569	0,509
0,10	0,564	0,509
0,20	0,587	0,521
0,30	0,632	0,539

Nota-se na Fig.(5) uma nuvem de pontos correspondentes às medições nos corpos de prova ensaiados. Essas medições relativas à ruptura foram feitas sobre a célula onde ocorreu a ruptura e os valores bons foram medidos em células exatamente ao lado delas.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos são coerentes com os resultados encontrados na literatura, isto é, corpo de prova cortados na direção de laminação tem uma maior capacidade de serem conformados que os cortados na direção perpendicular.

Recomenda-se a extensão deste trabalho para outras espessuras.

Para o caso dessa liga, constatou-se que não há medidas de deformações correspondentes à zona de embutimento profundo, onde a deformação principal maior é igual em módulo à deformação principal menor, sendo recomendável a realização de outro ensaio, como por exemplo Swift, que é um ensaio específico para embutimento profundo, possibilitando assim confirmar se é possível para esta determinar deformações na zona de embutimento profundo, no lado esquerdo da curva.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão das bolsas de estudo, a equipe do LdTM e ao SENAI/CIMATEC pelo esforço e apoio necessário á realização dos experimentos, bem como todos os envolvidos de que alguma forma colaboraram par a realização deste trabalho.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abrantes, J. P.; Batalha, G. F., 2003, “Modelagem da Conformação de Chapas Metálicas por Pressão Hidrostática (Bulge Test)”. VI Conferencia Nacional de Chapas, Vol. 1, Porto Alegre. pp. 13-23.
- Andrade, S. L., Taiss, E., Rosa, L., 2002, “O Aço no Projeto Ulsab-AVC”, Metalúrgica & Materiais, Vol. 58, No. 526, pp. 689-694.
- Nakazima, K., Kikuma, T., Hasuka, K., 1968, “Study of the Formability of Steel Sheets”, Yawata Technical Report, No. 264, pp. 111-124.
- Hasek, V. V., 1978, “Untersuchung und theoretische Beschreibung wichtiger Einflußgrößen auf das Grenzformänderungsschaubild“, Teil 1. Blech Rohre Profile No. 25
- Silveira Netto, S. E.; Malveira, N.; Crivellaro, R. S.; Borsoi, C. A.; Schaeffer, L., 2002, “Desenvolvimento de Componentes de Ligas Leves Empregando Curva Limite de Conformação”, V Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Vol. 1, Porto Alegre, Brasil, pp. 56-66.
- Hennig, R., 1997, “Vergleichende Untersuchungen zur numerischen Simulation des Tiefziehens nichtzylindrischer rotationssynnetrischer und nichtrotationssymmetrischer Teile“, Tese de Doutorado na Universidade de Dresden, Alemanha.

8. DIRETIOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho. Nenhuma parte deste artigo poderá ser reproduzida por qualquer meio sem autorização prévia dos autores por escrito.

Evaluation of Rolling Direction's Influence for IF Steel on Construction of Forming Limit Diagram

Sergio Eglan Silveira Netto

LdTM, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
Caixa Postal 15021, CEP: 91540-000, Av Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre/RS-Brasil.
eglan.silveira@ufrgs.br

Rafael Schilling Crivellaro

Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia – SENAI/CIMATEC. Av. Orlando Gomes, 1845 –
Piatã – CEP: 41650-010, Salvador, BA. rsc@cimatec.fieb.org.br

Nixon Malveira

LdTM, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
Caixa Postal 15021, CEP: 91540-000, Av Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre/RS-Brasil.
nixon.malveira@ufrgs.br

Lírio Schaeffer

LdTM, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
Caixa Postal 15021, CEP: 91540-000, Av Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre/RS-Brasil.
schaeffer@ufrgs.br

Abstract. *This work is about the determination of the Forming Limit Diagram (FLD) of IF steel sheets, varying the rolling direction. In order to do this, tests were made according to the Nakazima method, which consists of submitting specimens with varied geometries stretching them up to the break with the minimization of the friction effect between punch and sheet, simulating the strain that a sheet is submitted during a real process of conformation. The tests were carried out to simulate those strain generating data that feed simulation programs for the conformation of sheets, providing in this way, fundamental information that serve as a technological limit providing a foundation for the project of processes to obtain conformed surfaces without necking, pre-breaks or catastrophic failures.*

Keywords: *forming limit diagram, IF Steel, rolling direction*