

## ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS LIMITES DE DEFORMAÇÃO DE UM AÇO LIVRE DE INTERSTICIAIS<sup>1</sup>

Renata Garcez<sup>2</sup>  
 Maria Carolina dos Santos Freitas<sup>3</sup>  
 Luciano Pessanha Moreira<sup>4</sup>  
 Marcelo Costa Cardoso<sup>5</sup>  
 Guilherme Almeida Monteiro<sup>6</sup>  
 Alexandre de Melo Pereira<sup>7</sup>

### Resumo

No presente trabalho, a conformabilidade de uma chapa de aço livre de intersticiais com revestimento de zinco foi avaliada por meio de ensaios de tração uniaxial e da Curva Limite de Conformação empregando-se a técnica de Marciniak com punção plano. Os resultados de tração uniaxial apresentaram uma evolução angular típica para as propriedades plásticas, limite de escoamento e coeficiente de Lankford, de um aço livre de intersticiais laminado a frio seguido de um processo de galvanização. As deformações limites obtidas com a técnica de Marciniak demonstraram a boa conformabilidade deste aço nos domínios de estampagem e estiramento biaxial.

**Palavras-chave:** Aço livre de intersticiais; Curva limite de conformação; Conformação de chapas.

### EXPERIMENTAL ANALYSIS OF LIMIT STRAINS OF AN INTERSTITIAL FREE STEEL

#### Abstract

In this work, the formability of an interstitial free steel sheet with zinc coating was evaluated by uniaxial tensile test and Forming Limit Curve using the flat-bottom punch Marciniak's technique. The results showed angular evolutions for the plastic properties, namely, the yield stresses and Lankford values, typical cold rolled interstitial free followed by hot-dip galvanizing process. The limit strains obtained with the Marciniak's technique demonstrated good formability of the zinc coated interstitial free steel sheet in the stamping and biaxial stretching strain-modes.

**Keywords:** Interstitial-free steel; Forming limit curve; Sheet metal forming.

<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 de Desenvolvimento Sr, Companhia Siderúrgica Nacional, Rodovia BR 393 Lucio Meira, Km 5001, Volta Redonda, RJ, Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal

<sup>3</sup> Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Av. Dos Trabalhadores n.º 420, Volta Redonda – RJ

<sup>4</sup> Professor Associado, D. Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Av. Dos Trabalhadores n.º 420, Volta Redonda – RJ

<sup>5</sup> Mestrando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Av. Dos Trabalhadores n.º 420, Volta Redonda – RJ

<sup>6</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Av. Dos Trabalhadores n.º 420, Volta Redonda – RJ

<sup>7</sup> Doutorando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Av. Dos Trabalhadores n.º 420, Volta Redonda – RJ

## 1 INTRODUÇÃO

O conceito de Diagrama Limite de Conformação foi introduzido por Keeler<sup>(1)</sup> com o objetivo de avaliar a conformabilidade de chapas submetidas à tensão biaxial. Este primeiro estudo foi aplicado para pequenos valores positivos da deformação principal no plano da chapa. Em seguida, isto foi estendido por Goodwin<sup>(2)</sup> para a faixa completa entre tensão uniaxial e equibiaxial. O diagrama limite de conformação é definido pelos eixos de menor e maior deformação principal no plano da chapa. A curva obtida plotando as deformações limites obtidas para caminhos de deformação linear é a Curva Limite de Conformação (CLC). O conhecimento da CLC é fundamental para definir os parâmetros de processo de tal modo que a deformação durante a operação não exceda ao percentual seguro. A previsão das deformações limites estabelecidas pela ocorrência da estricção localizada em chapas plasticamente tensionadas tem sido o objeto de um grande número de análises teóricas. A abordagem mais popular é o modelo de Marciniak e Kuczynski.<sup>(3)</sup>

O ensaio de Marciniak com punção plano foi adotado neste estudo para obter a CLC da chapa de aço IF galvanizado por imersão a quente, o que permitiu a avaliação do comportamento plástico de chapas e análise de métodos de depuração. As deformações limites obtidas com esta técnica apresentaram boa conformabilidade deste aço nos domínios de estampagem e estiramento biaxial. Os resultados de tração uniaxial para orientação angular de 0, 45° e 90° em relação à direção de laminação apresentaram uma evolução típica das propriedades plásticas, limite de escoamento e coeficiente de Lankford, de um aço livre de intersticiais.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

Para a realização deste trabalho foi adotado um aço IF estabilizado ao Ti galvanizado pelo processo de imersão a quente com espessura nominal de 0,74 mm fornecido pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). A composição química deste aço está apresentada na Tabela 1. A microestrutura obtida por microscopia óptica é apresentada na Figura 1, sendo composta por grãos ferríticos com tamanho de grão médio de 8,5 ASTM.

**Tabela 1** – Composição química de aço IF - CSN (% peso)

C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	V	Cr	Ni	N	Mo	Ti	Nb	Sn	B
0,0029	0,1	0,01	0,007	0,003	0,06	0,012	0,003	0,01	0,005	0,0039	0,001	0,061	0,004	0,001	0,0003



**Figura 1** – Micrografia do aço IF (200x).

## 2.2 Metodologia

### 2.2.1 Ensaios de tração

Para realização dos ensaios de tração uniaxial foi utilizada uma máquina universal INSTRON modelo 5582 (100 kN). Foram realizados ensaios em três corpos de prova por direção em relação à direção de laminação ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $45^\circ$ ), fazendo assim suas médias para obter as propriedades mecânicas do material. Ainda, os ensaios de tração foram realizados em duas velocidades distintas, a saber, 1 e 10 mm/min, totalizando 18 ensaios.

### 2.2.2 Ensaios Marciniak

A confecção dos corpos de prova e o ensaio Marciniak foram realizados no Centro de Pesquisas da CSN. Para este ensaio foram utilizados corpos de prova com 10 dimensões distintas. Este ensaio possui como vantagem em relação ao ensaio Nakazima não ter atrito entre a chapa e o punção devido à utilização de uma máscara no ferramental do ensaio, localizada entre o corpo de prova e o punção. Com isso, os ensaios de Curva Limite de Conformação ficam isentos de efeitos de flexão e atrito na região de interesse. A geometria dos corpos de prova é baseada em tiras retangulares de diferentes larguras conforme Figura 2.

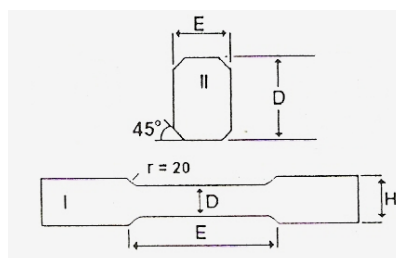


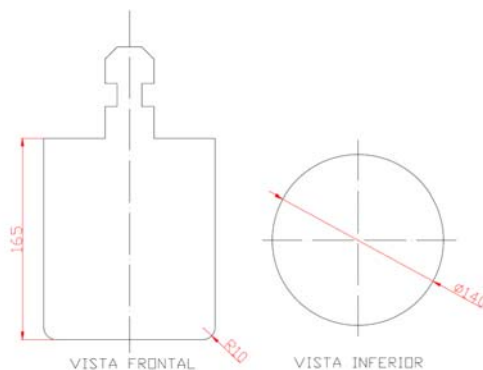
Figura 2 – Geometrias dos corpos de prova do ensaio Marciniak.

Os corpos de prova são cortados de forma que a direção longitudinal deles seja ortogonal ao sentido de laminação da chapa para que as inclusões, que se encontram na direção de laminação da chapa, também estejam a uma direção ortogonal a direção longitudinal do corpo de prova. As medidas dos corpos de prova são encontradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões em mm dos corpos de prova ensaio Marciniak

Tipo	D	E	H
I	80	122	90
	90	114	100
	100	110	110
II	200	120	---
	200	130	---
	200	150	---
	200	160	---
	200	170	---
	200	180	---
	200	200	---

Após a usinagem, os corpos de prova receberam uma grade por gravação eletrolítica, a qual auxilia nas medidas de deformações da chapa. A grade utilizada foi a quadrada com 2,5 mm de lado. O ensaio Marciniak é composto de um punção com fundo plano de aço SAE 4340 temperado e revenido com uma dureza de 53 RC. Suas dimensões podem ser visualizadas na Figura 3.



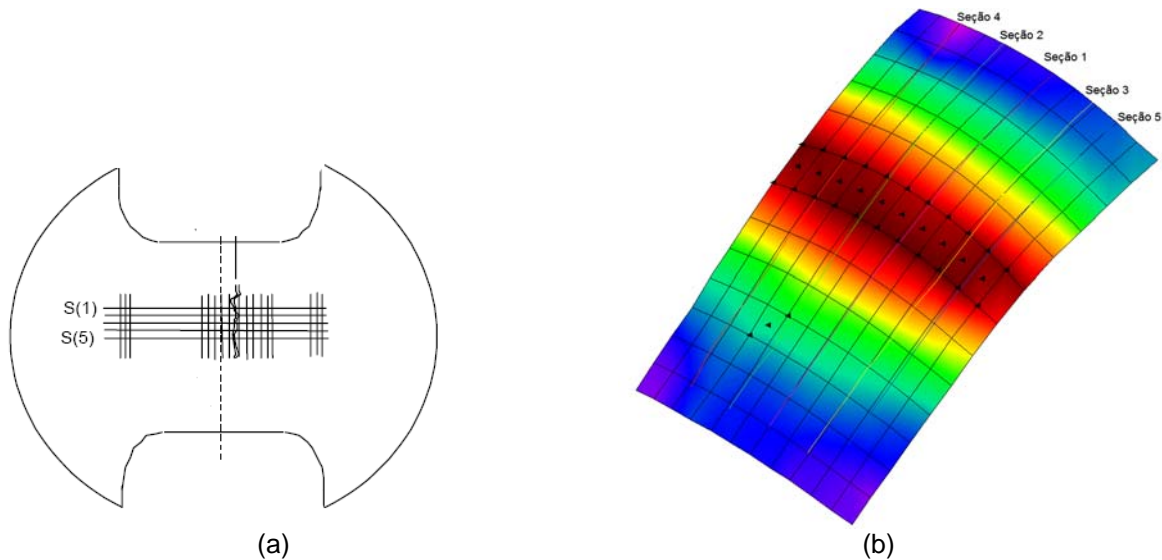
**Figura 3** – Dimensões em mm do punção do ensaio Marciniak.

A lubrificação é um fator de suma importância no levantamento da Curva Limite de Conformação. O lubrificante atua, através da variação do coeficiente de atrito entre punção e a chapa. Neste trabalho, foi utilizado óleo sintético como lubrificante. Para os ensaios localizados no domínio de expansão foi utilizado um filme de PVC como lubrificante. O ensaio Marciniak utiliza adicionalmente uma máscara em seu ferramental. O objetivo desta máscara é reduzir o atrito entre o punção e a chapa. A máscara foi confeccionada do mesmo material da chapa e possui geometrias diferentes para as diferentes dimensões do corpo de prova, conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3** - Dimensões do corpo de prova

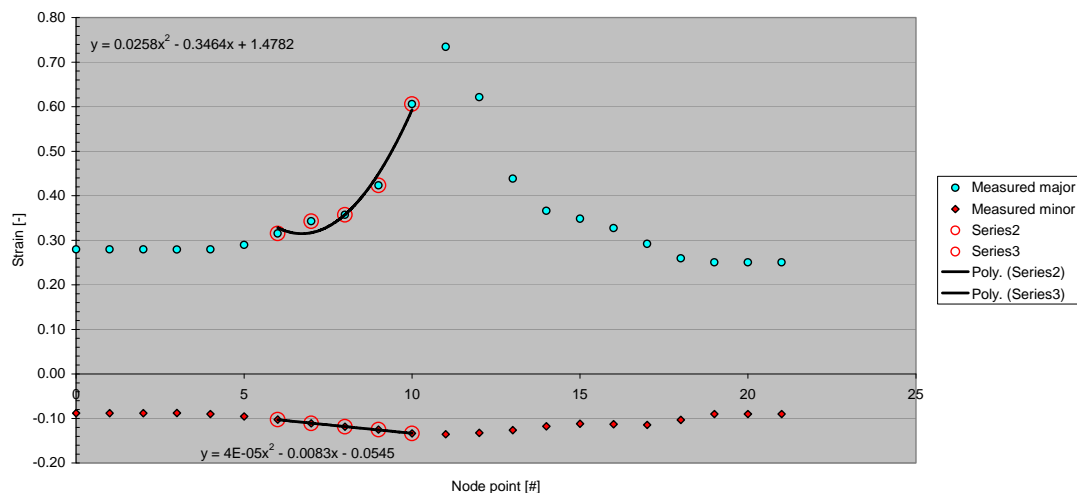
Corpo de prova (mm)	Dimensão da máscara (mm)
80 X 200	80 X 200 partido ao meio
90 X 200	90 X 200 partido ao meio
100 X 200	100 X 200 partido ao meio
110 X 200	110 X 200 partido ao meio
130 X 200	130 X 200 partido ao meio
150 X 200	150 X 200 partido ao meio
160 X 200	200 X 200 com furo central de 60 mm de diâmetro
170 X 200	
180 X 200	
200 X 200	200 X 200 com furo central de 50 mm de diâmetro

A depuração de resultados do ensaio Marciniak foi realizada com o emprego de um sistema automático de aquisição e correlação de imagens digitais (ASAME). A forma de análise e depuração das deformações limites foram realizadas de acordo com a norma ISO 12004-2.<sup>(4)</sup> Esta norma propõe que ao longo da fratura devem ser construídas seções como mostrado na Figura 4a. A construção das seções no programa Asame é mostrada pela Figura 4b.



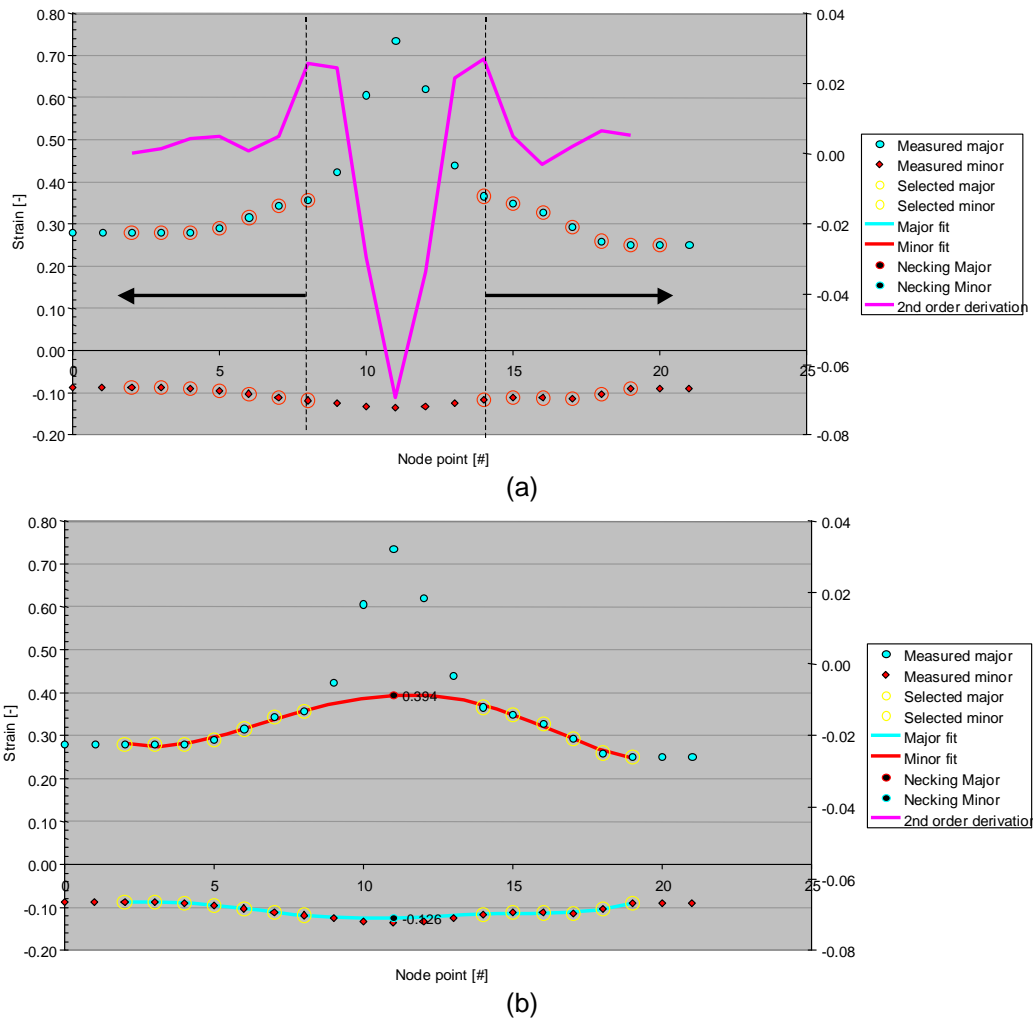
**Figura 4** – Seções de medidas de deformação conforme norma ISO 12004-2.

Para cada uma dessas seções deve ser construída uma curva da maior deformação principal em função do número de pontos e deformação secundária versus número de pontos. O aspecto típico desta curva é mostrado pela Figura 5, onde o pico de deformação corresponde à localização da fratura. Em seguida, são realizados ajustes por meio de polinômios do 2º grau, excluindo-se o ponto de máxima ou mínima deformação na fratura, conforme mostrado na Figura 5.



**Figura 5** - Curva deformação principal x número de pontos (ISO 12004-2).

Uma curva dos valores da segunda derivada de cada polinômio do segundo grau é realizada em função do número de pontos. O comportamento desta curva é analisado e então é verificada a primeira mudança de sinal a partir do valor de deformação corresponde ao pico (fratura) para o lado esquerdo e para o lado direito da curva, mostrado na Figura 6a. Os valores de deformação contidos dentro deste intervalo são descartados e um polinômio de 6º grau é construído com os pontos restantes, como ilustrado pela Figura 6b. O valor da maior deformação principal é estabelecido a partir do máximo valor de deformação encontrado neste polinômio assim como também seu respectivo valor de deformação secundária.



**Figura 6** - Depuração de deformações limites segundo a norma ISO 12004-2: (a) segunda derivada e (b) ajuste por polinômio 6º grau.

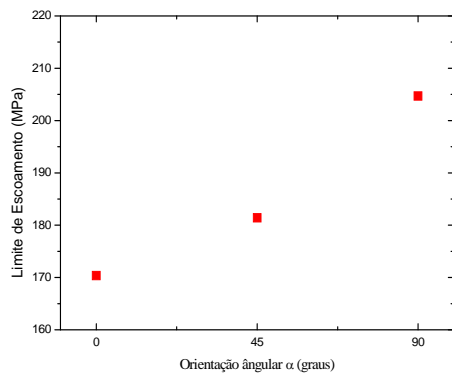
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Ensaios de Tração Uniaxial

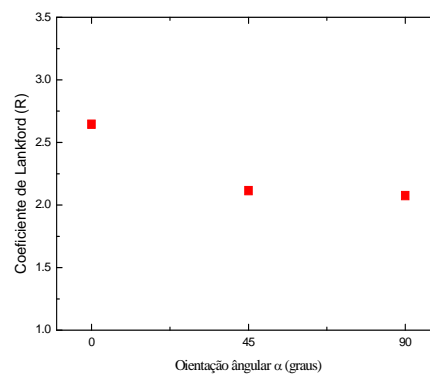
Os ensaios de tração uniaxial foram realizados com duas velocidades distintas, 1 mm/min e 10 mm/min. As médias dos valores de limite de escoamento, limite de resistência, alongamento, expoente de encruamento ( $n$ ) e coeficiente de anisotropia plástica ( $R$ ) determinados com a velocidade de 10 mm/min estão apresentados na Tabela 4 em função da orientação angular. É possível observar que os valores do limite de escoamento tem evolução crescente entre as orientações  $0$  e  $90^0$ , ou seja,  $\sigma_{90} > \sigma_{45} > \sigma_0$ , vide Figura 7a. Esta anisotropia apresentada no limite de escoamento é mantida na evolução dos valores dos limites de resistência listados na Tabela 4 e igualmente confirmada pela variação angular do coeficiente de anisotropia plástica, cuja evolução é decrescente, isto é,  $R_0 > R_{45} > R_{90}$ . O valor médio da anisotropia normal  $\bar{R}$  é igual a 2,24, o que indica elevada aptidão a estampagem do aço livre de intersticiais.

**Tabela 4.** Resultados do ensaio de tração uniaxial (10 mm/min)

Orientação (graus)	Valores	LE (Mpa)	LR (MPa)	Along (%)	n	R
0	Média	170,333	296,667	42,433	0,233	2,646
	Desvio Padrão	7,371	1,155	0,981	0,003	0,165
45	Média	174,667	301,667	42,100	0,231	2,115
	Desvio Padrão	2,309	2,082	1,300	0,001	0,130
90	Média	198,333	303,000	39,933	0,212	2,075
	Desvio Padrão	52,624	7,937	5,142	0,041	0,078



(a)



(b)

**Figura 7** – (a) Evolução angular em tração uniaxial dos limites de escoamento. (b) Evoluções angulares em tração uniaxial do coeficiente de anisotropia.

### 3.2 Ensaio Marciniak

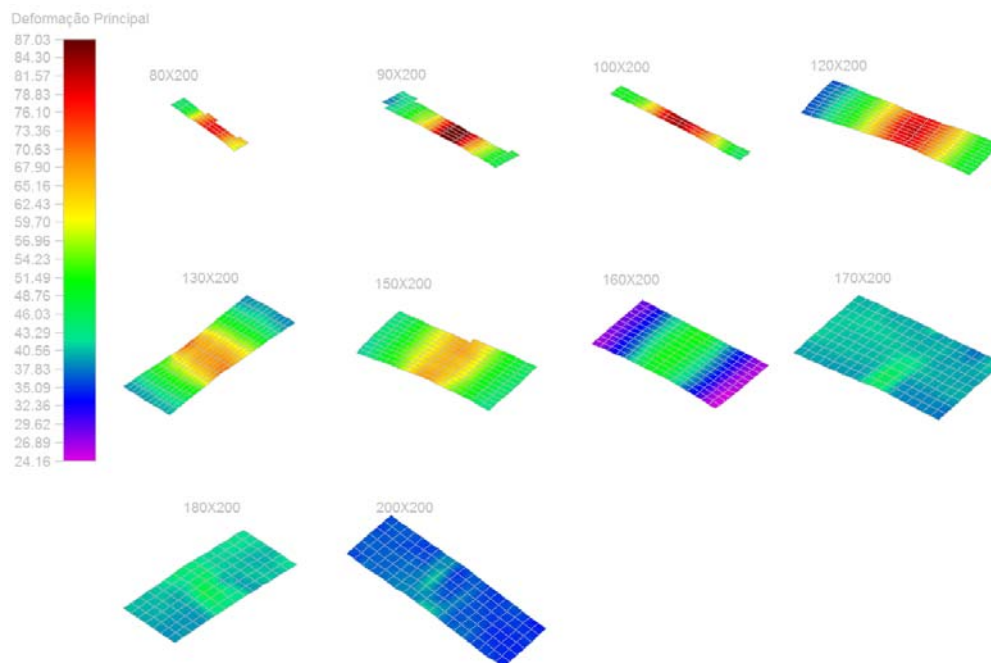
O ensaio Marciniak foi realizado para um aço IF galvanizado com espessura nominal de 0,74 mm. A Figura 8 apresenta os corpos de prova deformados com o punção plano. Em todos os casos a fratura se localiza no centro do corpo de prova.



**Figura 8** – Corpos de prova deformados pelo ensaio Marciniak.

Um esquema dos resultados dos valores de deformação principal em uma escala percentual para todos os corpos de prova é mostrado na Figura 9. É possível observar que os corpos de prova submetidos aos modos de deformação referentes à região de estampagem (80 mm x 200 mm, 90 mm x 200 mm, 100 mm x 200 mm e

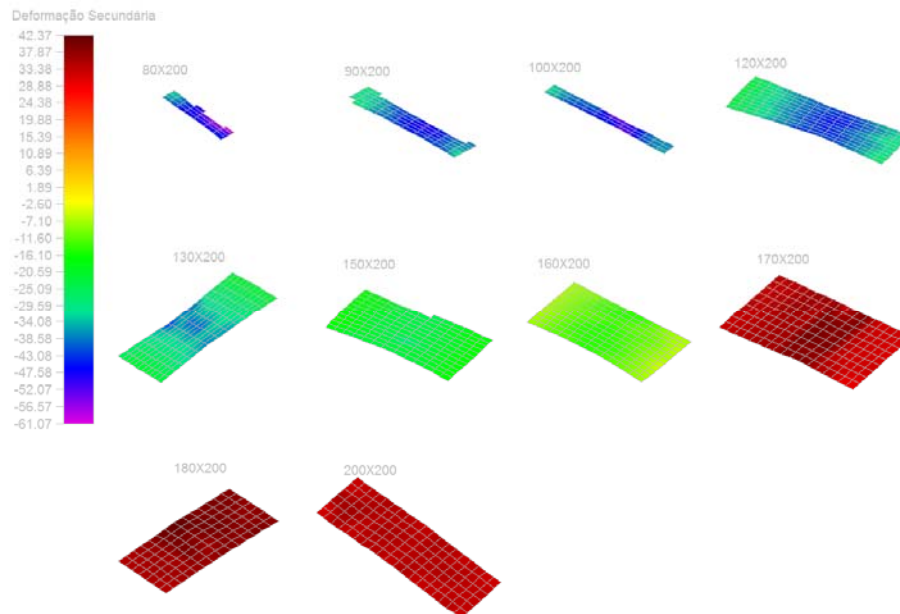
130 mm x 200 mm) alcançaram maiores valores de deformação, chegando a 87,03% de deformação na fratura e 56,96% na estrição. Os maiores valores de deformações principais na região de estiramento biaxial foram obtidos pelos corpos de prova 170 mm x 200 mm e 180 mm x 200 mm e não a partir do corpo de prova de 200 mm x 200 mm como era esperado. Isso pode ser atribuído pelos efeitos de lubrificação inadequada dos corpos de prova na realização do ensaio Marciniak.



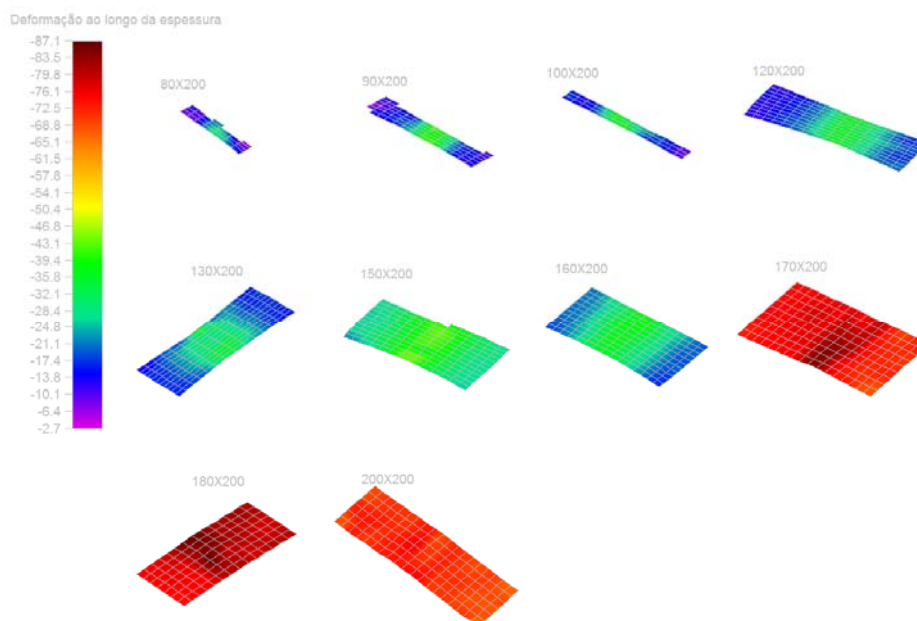
**Figura 9** – Valores da maior deformação principal obtidos com auxílio do sistema ASAME em função da geometria do corpo de prova.

Os valores percentuais da deformação principal secundária estão apresentados na Figura 10. Os maiores valores positivos de deformação principal secundária foram obtidos com os corpos de prova de 170 mm x 200 mm e 180 mm x 200 mm. Os corpos de prova com geometrias 80 mm x 200 mm, 90 mm x 200 mm, 100 mm x 200 mm e 130 mm x 200 mm encontram-se na região de estampagem. Por outro lado, a Figura 11 apresenta a deformação ao longo da espessura calculada por conservação de volume no regime plástico a partir das deformações principais, ou seja,  $\varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ . É possível observar que os maiores valores de redução de espessura são obtidos na região de estampagem, chegando até 87,1% na fratura e 76,1% na estrição. Também é possível observar que nenhum dos corpos de prova se localizou exatamente na região de deformação plana, visto que o menor valor de deformação secundária alcançado na região de estrição foi de aproximadamente -28,4%. Este efeito indesejado pode ser atribuído novamente as condições de lubrificação dos ensaios.





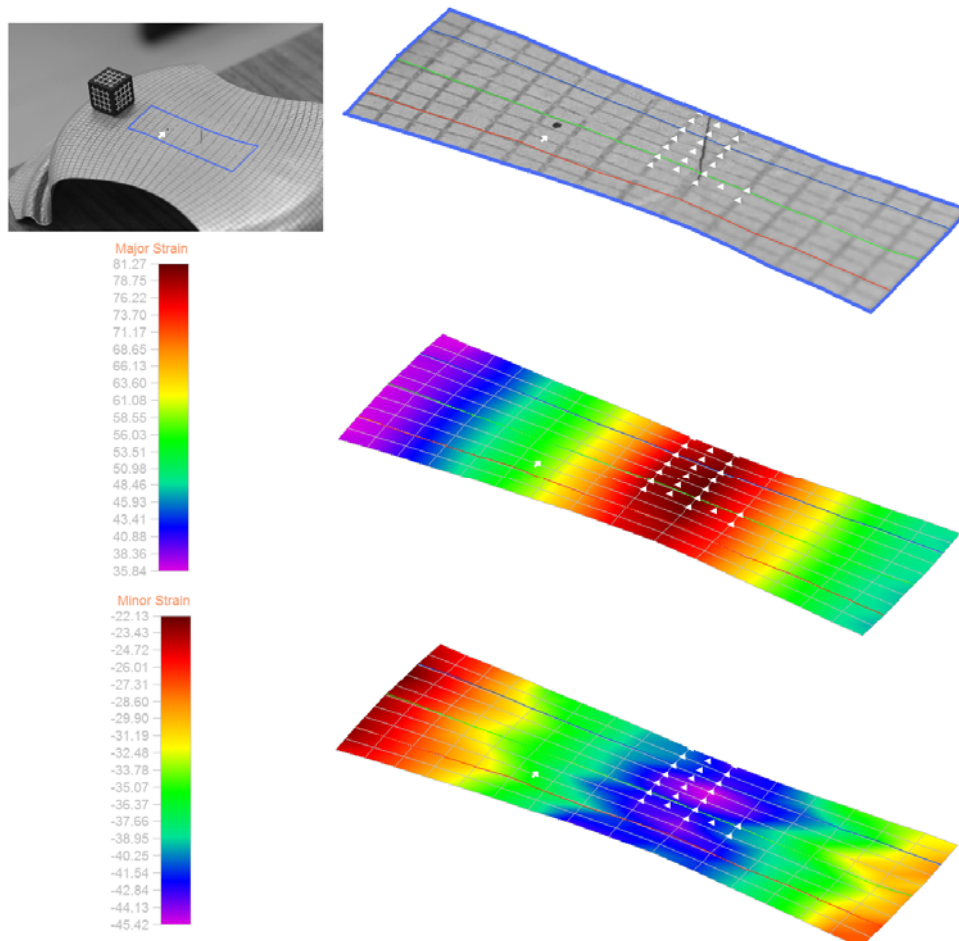
**Figura 10** – Valores da deformação principal secundária obtidos com auxílio do sistema ASAME em função da geometria do corpo de prova.



**Figura 11** – Valores de deformações ao longo da espessura obtidos com auxílio do sistema ASAME em função da geometria do corpo de prova.

Para possibilitar a obtenção de resultados conforme descrito pela norma ISO 12004-20, três seções foram construídas em um sentido perpendicular a fratura conforme mostrado na Figura 12 para o corpo de prova 130x200mm. As três seções possuem um comportamento parecido em nível de valores de deformação ao longo do comprimento da seção. Os resultados de cada seção referentes a valores de deformação foram exportados do programa ASAME na forma de um arquivo texto e importados no programa Excel. O pico de deformação na fratura é então localizado. A partir do pico, nos lados esquerdo e direito a fratura, são ajustados polinômios do segundo grau com 5 pontos adjacentes a ambos os lados da fratura. Em seguida,

são realizadas as verificações de mudanças de sinal das curvas ajustadas com polinômios do 2<sup>o</sup> grau. Este procedimento se repete até que ocorra a inversão do sinal da segunda derivada. Quando isto ocorre, os pontos contidos neste intervalo são descartados e um polinômio de 6<sup>o</sup> grau é ajustado a partir dos pontos remanescentes. Finalmente, o valor de deformação limite é obtido quando a coordenada da localização ao longo do comprimento da seção referente ao pico de deformação é substituída no polinômio de 6<sup>o</sup> grau. O mesmo procedimento é realizado para determinação do valor de deformação secundária.



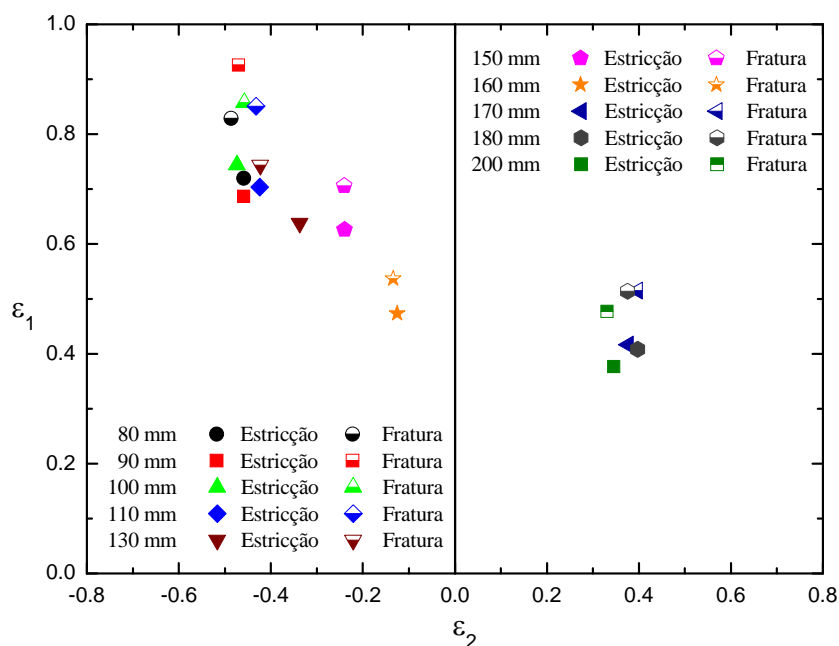
**Figura 12** - Detalhamento das seções perpendiculares a fratura para definição das deformações limites segundo a norma ISO 12004.<sup>(4)</sup>

Cada seção estabelecida ao longo da fratura possui um valor de deformação principal e um valor de deformação secundária. Para determinação da CLC na fratura (CLCF) foi registrado o máximo valor de deformação principal encontrado ao longo da seção, valor este que corresponde ao pico de deformação. Os resultados encontrados para cada seção são apresentados na Tabela 5. As Curvas Limite de Conformação na Estricção e na Fratura foram estabelecidas pelas médias dos resultados das três seções, tanto para valores de deformação principal como também para valores de deformação secundária. Os resultados dos pontos de estricção e fratura estão apresentados na Figura 13.

**Tabela 5 – Resultados das deformações obtidas com método Marciniak**

Corpo de prova		Estricção				Fratura			
		Seção 1	Seção 2	Seção 3	média	Seção 1	Seção 2	Seção 3	média
80 mm X 200 mm	$\varepsilon_1$	0,721	0,714	0,725	<b>0,720</b>	0,778	0,780	0,782	<b>0,780</b>
	$\varepsilon_2$	-0,476	-0,434	-0,431	<b>-0,459</b>	-0,464	-0,463	-0,496	<b>-0,475</b>
90 mm X 200 mm	$\varepsilon_1$	0,716	0,730	0,613	<b>0,687</b>	0,862	0,863	0,863	<b>0,863</b>
	$\varepsilon_2$	-0,449	-0,470	-0,458	<b>-0,424</b>	-0,473	-0,463	-0,487	<b>-0,474</b>
100 mm X 200 mm	$\varepsilon_1$	0,745	0,783	0,704	<b>0,744</b>	0,835	0,831	0,833	<b>0,833</b>
	$\varepsilon_2$	-0,510	-0,475	-0,435	<b>-0,474</b>	-0,462	-0,509	-0,483	<b>-0,485</b>
120 mm X 200 mm	$\varepsilon_1$	0,709	0,692	0,711	<b>0,704</b>	0,807	0,794	0,800	<b>0,801</b>
	$\varepsilon_2$	-0,439	-0,420	-0,414	<b>-0,424</b>	-0,449	-0,434	-0,443	<b>-0,442</b>
130 mm X 200 mm	$\varepsilon_1$	0,619	0,637	0,658	<b>0,638</b>	0,671	0,686	0,686	<b>0,681</b>
	$\varepsilon_2$	-0,338	-0,337	-0,338	<b>-0,338</b>	-0,397	-0,387	-0,356	<b>-0,380</b>
150 mm X 200 mm	$\varepsilon_1$	0,616	0,644	0,618	<b>0,626</b>	0,661	0,659	0,681	<b>0,667</b>
	$\varepsilon_2$	-0,227	-0,250	-0,242	<b>-0,239</b>	-0,235	-0,284	-0,245	<b>-0,255</b>
160 mm X 200 mm	$\varepsilon_1$	0,462	0,484	0,475	<b>0,473</b>	0,508	0,505	0,515	<b>0,509</b>
	$\varepsilon_2$	-0,120	-0,113	-0,142	<b>-0,125</b>	-0,143	-0,127	-0,141	<b>-0,137</b>
170 mm X 200 mm	$\varepsilon_1$	0,419	0,414	0,417	<b>0,417</b>	0,432	0,416	0,444	<b>0,431</b>
	$\varepsilon_2$	0,393	0,342	0,396	<b>0,377</b>	0,389	0,362	0,398	<b>0,383</b>
180 mm X 200 mm	$\varepsilon_1$	0,429	0,438	0,419	<b>0,428</b>	0,446	0,456	0,476	<b>0,459</b>
	$\varepsilon_2$	0,409	0,403	0,389	<b>0,400</b>	0,398	0,385	0,394	<b>0,392</b>
200 mm X 200 mm	$\varepsilon_1$	0,411	0,412	0,391	<b>0,405</b>	0,455	0,460	0,458	<b>0,458</b>
	$\varepsilon_2$	0,351	0,347	0,350	<b>0,349</b>	0,356	0,348	0,335	<b>0,346</b>

Primeiro, é possível observar que em todos os casos o valor de fratura é superior ao valor de estricção obtido para um mesmo corpo de prova. O corpo de prova que alcançou maior valor de deformação principal na região de estampagem foi o de geometria 100 mm X 200 mm ( $\varepsilon_1 = 0,744$  e  $\varepsilon_2 = -0,474$ ). Na região de estiramento, o corpo de prova 180 mm x 200 mm forneceu deformações limites na estricção  $\varepsilon_1 = 0,428$  e  $\varepsilon_2 = 0,400$ , se aproximando na região de deformação biaxial simétrica. O corpo de prova que obteve resultados mais próximos do modo de deformação plana foi o de dimensão 160 mm X 200 mm ( $\varepsilon_1 = 0,473$  e  $\varepsilon_2 = -0,125$ ).


**Figura 13 – Deformações limites do aço livre de intersticiais com revestimento de zinco definidas nas condições de estricção e fratura.**

## 5 CONCLUSÕES

O comportamento plástico de uma chapa de aço livre de intersticiais com revestimento de zinco apresentou evoluções angulares consistentes entre os valores do limite de escoamento em tração uniaxial e do coeficiente de anisotropia plástica. Com relação às deformações limites determinadas por meio de ensaios com punção plano segundo método de Marciniak, foi possível concluir primeiro que a depuração de deformações a partir de imagens digitais permitiu estabelecer maiores zonas de interesse com um ganho de tempo considerável comparado ao método tradicional com emprego de medidor óptico de perfis. Em segundo lugar, foi observado que a chapa de aço livre de intersticiais apresentou bons índices de conformabilidade no domínio de estampagem, em conformidade com os altos valores do coeficiente de anisotropia plástica. Os corpos de prova submetidos a modos de deformação referentes à região de estampagem (80, 90, 100 e 130 mm) forneceram maiores valores de deformação. Os maiores valores de deformação principal na região de estiramento não foram obtidos pelo corpo de prova de 200 mm x200 mm em razão da lubrificação inadequada dos corpos de prova na realização dos ensaios. Por fim, os maiores valores da maior deformação principal foram encontrados sempre em regiões próximas à fratura.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Companhia Siderúrgica Nacional pela doação do material para estudo assim como pelo apoio na confecção de corpos de prova e ensaios de tração uniaxial e Curva Limite de Conformação. AMP, MSF e MCS agradecem a CAPES pelas bolsas de estudos. GAM agradece ao CNPq pela bolsa de iniciação científica no âmbito do programa PIBIC. LPM agradece ao CNPq e a FAPERJ pelo apoio por meio de projetos de fomento a pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- 1 Keeler, S.P., Determination of the forming limits in automotive stamping, Sheet Metal Industries, Vol. 461, 1965, pp. 683-691.
- 2 Goodwin, G.M., Application of the strain analysis to sheet metal forming in the press shop, La Metallurgia Italiana, Vol.8, 1968, pp. 767-772.
- 3 Marciniak, Z. e Kuczynski, K., Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 9, N. 9, 1967, pp. 609-620.
- 4 International Organization for Standardization. ISO 12004-2: Metallic materials-sheet and strip-determination of forming limit curves – part 2: determination of forming limit curves in laboratory. Geneva, 2007