

AVALIAÇÃO DA ANISOTROPIA PLÁSTICA DE CHAPAS FINAS ATRAVÉS DE ENSAIOS AUTOMÁTICOS DE TRAÇÃO UNIAXIAL¹

Luciano Pessanha Moreira²
Ecy Cardoso Romão³
Carlos Sérgio da Costa Viana⁴
Luiz Carlos de Andrade Vieira⁵
Alexandre Pimentel Sampaio⁶

Resumo

Nos ensaios de tração uniaxial realizados em chapas finas com o auxílio de sistemas de aquisição de dados, as propriedades plásticas são usualmente definidas a partir de métodos automáticos. No caso particular coeficiente de anisotropia plástica R ou coeficiente de Lankford, é prática comum em adotar-se deformações totais no lugar de deformações plásticas. No presente trabalho, a anisotropia plástica de uma chapa de aço livre de intersticiais “LI” foi avaliada através de ensaios automáticos de tração uniaxial realizados em orientações angulares $\alpha = 0, 15, 30, 45, 60, 75$ e 90 graus em relação a direção de laminação. Em todos os casos, os valores de R foram calculados por um método proposto para compensação de deformações elásticas. Os resultados mostram que os coeficientes de anisotropia plástica determinados a partir das deformações plásticas são maiores que os valores de R definidos em função das deformações totais.

Palavras-chave: Anisotropia plástica; Ensaios de tração uniaxial; Chapas finas.

¹ Trabalho a ser apresentado no 42^o Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 25 a 28 de outubro, 2005 – Santos – SP – Brasil.

² Engenheiro Mecânico, D.Sc., Professor Adjunto, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br

³ Engenheiro Civil, Mestrando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, ecy@metal.eeimvr.uff.br

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Ph.D., Professor Visitante, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, viana@metal.eeimvr.uff.br

⁵ Técnico de Laboratório, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, luiz@metal.eeimvr.uff.br

⁶ Engenheiro Metalúrgico, MSc., Centro de Pesquisas, Companhia Siderúrgica Nacional, pimentel.sampaio@csn.com.br

1 INTRODUÇÃO

A anisotropia plástica de chapas metálicas é normalmente avaliada através de ensaios de tração uniaxial realizados em um corpo de prova retirado no plano da chapa segundo uma orientação angular $\alpha \equiv (x,1) \equiv (y,2)$, conforme esquema na Figura 1, onde os eixos x, y e z indicam as direções de simetria ortotrópica correspondendo as direções paralela (x), transversal (y) e normal (z) em relação ao sentido de laminação da chapa respectivamente. Neste caso, a anisotropia plástica de chapas metálicas é caracterizada pela razão entre as deformações plásticas verdadeiras nas direções da largura e espessura do corpo de prova :

$$R_{\alpha}^P = \frac{\varepsilon_{22}^p}{\varepsilon_{33}^p} \quad (1)$$

cujo valor é conhecido como coeficiente de anisotropia plástica ou ainda de Lankford. Em chapas finas, é preferível adotar-se a hipótese de incompressibilidade no regime plástico em razão de imprecisões inerentes à realização de medidas de espessuras. Portanto, o coeficiente de anisotropia plástica pode ser redefinido como :

$$R_{\alpha}^P = - \frac{\varepsilon_{22}^p}{\varepsilon_{11}^p + \varepsilon_{22}^p} \quad (2)$$

ou

$$R_{\alpha}^P = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(l_0 w_0 / l w)} \quad (3)$$

onde l_0 e w_0 são as bases iniciais de medidas de variações do comprimento e largura do corpo de prova respectivamente ao passo que l e w designam as dimensões correspondentes após uma dada deformação.

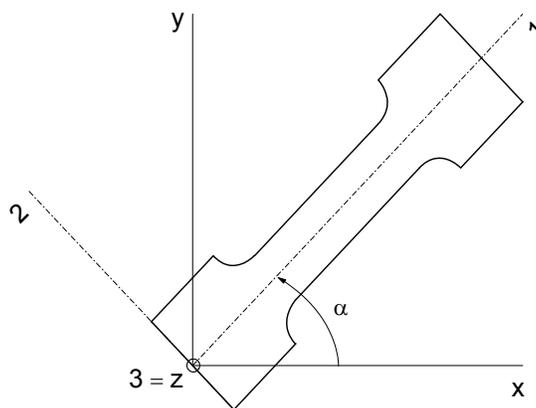


Figura 1. Esquema de um ensaio tração uniaxial realizado fora dos eixos de simetria ortotrópica.

É importante notar que as medidas iniciais e finais das bases de medidas são realizadas após a retirada do corpo de prova das garras da máquina de ensaios, isto é, após o descarregamento elástico em conformidade com a norma ASTM 517-92^a.⁽¹⁾

Entretanto, é prática comum adotar-se as deformações totais na determinação do coeficiente de anisotropia plástica quando os ensaios de tração uniaxial são realizados, a título de exemplo, com o auxílio de máquinas e extensômetros automatizados, i.e., na condição em que o corpo de prova está sob carregamento. Danckert e Nielsen⁽²⁾ estabeleceram um método de compensação de deformações elásticas aplicado a determinação automática do coeficiente de anisotropia plástica. As correções propostas por Danckert e Nielsen⁽²⁾ para as bases de medidas deformadas segundo as direções longitudinal e transversal são definidas por :

$$\frac{l}{l_0} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 (S/E) (I^*/l_0)}}{2 (S/E)} \quad (4)$$

$$\frac{w}{w_0} = \frac{w^*}{w_0} \frac{1}{(1 - \nu (l/l_0) (S/E))} \quad (5)$$

onde I^* e w^* são as bases de medidas antes do descarregamento obtidas, por exemplo, a partir de leituras dos extensômetros ou por análise de imagens, enquanto que S , E e ν correspondem a tensão nominal ou de engenharia aplicada, o módulo de elasticidade longitudinal e o coeficiente de Poisson respectivamente. Os resultados do coeficiente de anisotropia plástica de um aço inoxidável AISI 304 obtidos a partir das Equações (3-5) são praticamente idênticos aos valores determinados a partir de medidas realizadas após o descarregamento elástico dos corpos de prova.⁽²⁾ Recentemente, Chamanfar e Mahmudi⁽³⁾ propuseram um método de compensação de deformações elásticas introduzindo a definição de deformação volumétrica devido a recuperação elástica. As respectivas correções são definidas por :

$$\frac{l}{l_0} = \frac{I^*}{l_0} \left(1 - \frac{1}{1 - 2\nu + EI_0/SI^*} \right) \quad (6)$$

$$\frac{w}{w_0} = \frac{w^*}{w_0} \left(1 + \frac{\nu}{1 - 2\nu + EI_0/SI^*} \right) \quad (7)$$

Chamanfar e Mahmudi⁽³⁾ observaram que as deformações elásticas devem ser compensadas sobretudo em materiais que apresentam altos limites de escoamento, isto é, em materiais com alta resiliência como no caso do titânio puro.

Recentemente, Lopes et al.⁽⁴⁾ realizaram um vasto estudo experimental de fontes de incertezas que afetam a determinação do coeficiente de anisotropia plástica como, por exemplo, acabamento de bordas e paralelismo na largura do corpo de prova. Estes autores empregaram medidas de extensômetros automatizados sem, no entanto, indicar se os valores de R foram determinados após o descarregamento ou ainda após a compensação de deformações elásticas.

No presente trabalho, o encruamento e a anisotropia plástica de uma chapa de aço livre de intersticiais LI são avaliados por ensaios automáticos de tração uniaxial. O procedimento experimental é inicialmente apresentado, no qual foram realizados ensaios para cada orientação angular $\alpha = 0, 15, 30, 45, 60, 75$ e 90^0 em relação a direção de laminação da chapa. Em seguida, o método proposto para a compensação de deformações elásticas é detalhado e aplicado a determinação dos coeficientes de anisotropia plástica do aço LI.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material adotado foi processado na Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e corresponde a um aço livre de átomos intersticiais, doravante LI-CSN, com espessura nominal igual a 0,70 mm cuja composição química está apresentada na Tabela 1. O processamento deste material se deu por redução a frio a partir de uma tira laminada a quente com 3,9 mm de espessura seguido de um recozimento contínuo à uma temperatura de encharque de aproximadamente 700 °C.

Tabela 1. Composição química do aço LI-CSN (% peso).

Elemento	C	Mn	P	S	Al	Ti	N
Teor	0,002	0,106	0,011	0,009	0,025	0,057	0,0023

De maneira a avaliar variações no plano da chapa de propriedades plásticas relacionadas com o encruamento e a anisotropia, a saber, a tensão de escoamento e o coeficiente de Lankford, foram realizados ensaios de tração uniaxial em orientações angulares $\alpha = 0, 15, 30, 45, 60, 75$ e 90° em relação a direção de laminação da chapa. Os ensaios foram realizados em uma máquina Instron 5582 (100 kN) disponível na empresa GalvaSud (CSN). A velocidade de ensaio foi mantida em 3 mm/min (10^{-3} s^{-1}) até 3 % de deformação total para fins de determinação da tensão de escoamento e, em seguida, aumentada e mantida em 10 mm/min. Para cada orientação angular α , foram confeccionados 6 corpos de prova em conformidade com a norma NBR 6373.

As deformações totais foram obtidas a partir de leituras de extensômetros posicionados no sentido longitudinal e transversal do corpo de prova com bases iniciais de medidas l_0 e w_0 iguais a 50 e 12,5 mm respectivamente. Em todos os ensaios, o limite de escoamento σ_α^c foi definido para um nível de 0,2 % de deformação plástica. Ademais, os valores experimentais de tensão-deformação verdadeiros ($\sigma \times \varepsilon$) foram ajustados a lei exponencial de encruamento de Swift :

$$\sigma = K (\varepsilon_0 + \varepsilon^p)^n \quad (8)$$

onde K , ε_0 e n são o coeficiente de resistência, a pré-deformação e o expoente de encruamento respectivamente. A Figura 2 mostra as curvas de tensões nominais em função das deformações totais de engenharia obtidas para $\alpha = 0, 45$ e 90 graus a partir das leituras dos extensômetros longitudinal e transversal respectivamente.

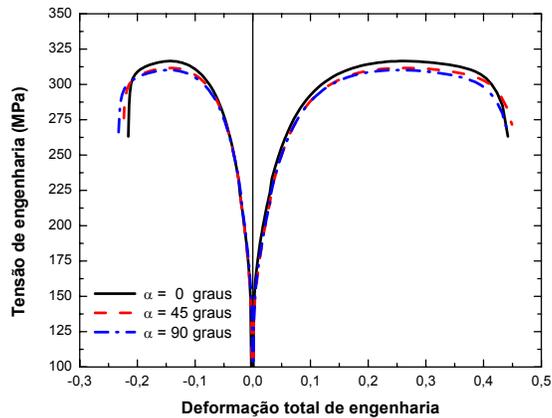


Figura 2. Curvas nominais de tensão-deformação total de engenharia determinadas para o aço LI-CSN.

A Figura 1 apresenta a evolução angular dos valores médios obtidos para os limites convencionais de escoamento em tração uniaxial. É possível aproximar esta evolução angular como monotônica decrescente no sentido 0 a 90 graus, isto é, $\sigma_0^e > \sigma_{45}^e > \sigma_{90}^e$.

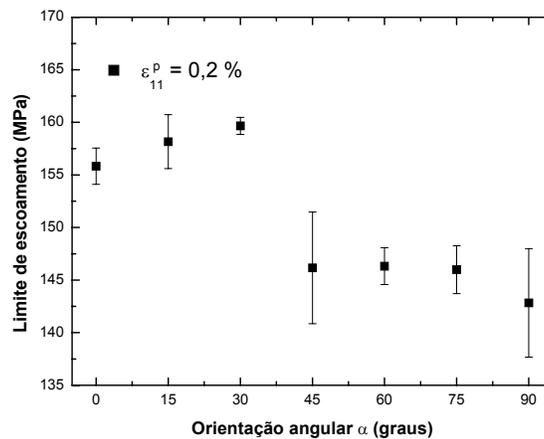


Figura 3. Evolução angular do limite de escoamento convencional determinado em tração uniaxial.

3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ANISOTROPIA PLÁSTICA R

Adotando-se a hipótese de pequenas deformações, o tensor de deformação total $\boldsymbol{\varepsilon}$ pode ser decomposto de maneira aditiva em duas partes, a saber, uma elástica $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ e uma plástica $\boldsymbol{\varepsilon}^p$:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^e + \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p \quad (9)$$

Em seguida, assume-se que o comportamento do material durante o descarregamento seja descrito pela lei de elasticidade linear isotrópica de Hooke e que tanto o módulo de

elasticidade longitudinal E como o coeficiente de Poisson ν permaneçam constantes. Neste caso, a deformação longitudinal devido a recuperação elástica no processo de descarregamento é definida por :

$$\varepsilon_{11}^e = \frac{\sigma_{11}}{E} \quad (10)$$

A tensão verdadeira na direção longitudinal σ_{11} é determinada por :

$$\sigma_{11} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} (1 + e_{11}) \quad (11)$$

onde F , A e A_0 são a leitura de força da célula de carga, a área atual e inicial da seção transversal do corpo de prova respectivamente. A deformação total de engenharia e_{11} é definida a partir da variação da base de medida do extensômetro longitudinal :

$$e_{11} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (12)$$

É importante mencionar que nos métodos propostos por Danckert e Nielsen⁽²⁾ e Chamanfar e Mahmudi⁽³⁾ a deformação empregada na Equação (11) é a medida de deformação elástica longitudinal definida por $e_{11}^e = (l^* - l) / l$, vide Equações (4-5) e (6-7).

A deformação elástica na direção transversal, por sua vez, pode ser obtida por :

$$\varepsilon_{22}^e = -\nu \varepsilon_{11}^e \quad (13)$$

Deste modo, as respectivas deformações plásticas são obtidas a partir da Eq. (5), *i.e.* :

$$\varepsilon_{11}^p(i) = \varepsilon_{11}(i) - \frac{1}{E} \sigma_{11}(i) \quad (14)$$

$$\varepsilon_{22}^p(i) = \varepsilon_{22}(i) + \frac{\nu}{E} \sigma_{11}(i) \quad (15)$$

onde o índice “i” designa o par de dados correspondente as medidas verdadeiras tensão-deformação total. A título de comparação, o coeficiente de anisotropia plástica foi calculado a partir das deformações totais, ou seja :

$$R_{\alpha}^T = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}} \quad (16)$$

A Figura 4 compara as evoluções com a deformação plástica na direção longitudinal dos valores do coeficiente de anisotropia plástica determinados a partir das definições baseadas nas deformações verdadeiras totais e plásticas. Os valores abaixo de 3% de deformação plástica foram excluídos em razão de singularidades. Nota-se, por um lado, que os valores de R determinados em função das deformações plásticas são maiores que os valores obtidos pelas deformações totais. O aumento nos valores de R ocorre em decorrência da recuperação elástica que provoca uma contração e expansão no comprimento e largura úteis das bases de medidas do corpo de prova. Por outro lado, a diferença entre os valores diminui na medida em que o nível de deformações plásticas se aproxima da deformação máxima uniforme.

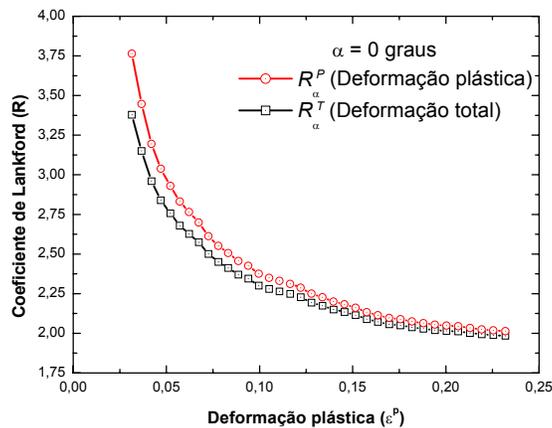


Figura 4. Evolução dos valores do coeficiente de anisotropia plástica obtidos para o aço LI-CSN em função da deformação plástica verdadeira na direção longitudinal do corpo de prova de tração uniaxial.

A Figura 5 apresenta a evolução angular dos valores médios do coeficiente de anisotropia plástica obtidos para um nível de 10 % de deformação plástica longitudinal e após a compensação de deformações elásticas. É possível observar que anisotropia plástica em tração uniaxial possui uma evolução monotônica crescente, $R_0^P > R_{45}^P > R_{90}^P$, tendência inversa em comparação aquela apresentada para o limite de escoamento convencional e em conformidade com observações experimentais em aços carbono.

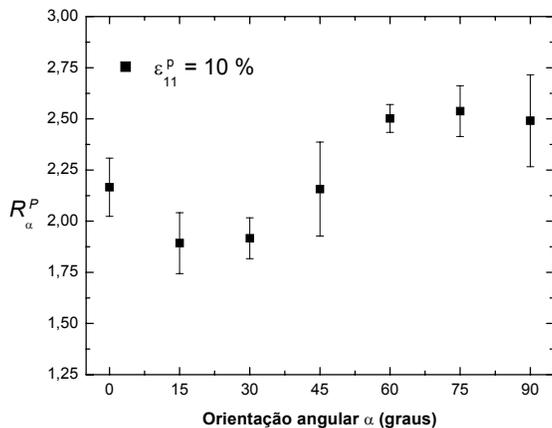


Figura 5. Evolução dos valores do coeficiente de Lankford obtidos para o aço LI-CSN em função da deformação plástica verdadeira na direção longitudinal do corpo de prova de tração uniaxial.

A Tabela 2 resume os resultados experimentais obtidos nos ensaios de tração uniaxial para o aço LI-CSN onde ϵ_u e σ_r são a deformação plástica verdadeira e a tensão verdadeira correspondentes a máxima deformação uniforme respectivamente. Nesta tabela, os caracteres em fonte normal representam os valores médios ao passo que os em itálico os valores do desvio padrão determinados a partir de 6 ensaios realizados para cada orientação angular α . Os coeficientes de anisotropia plástica definidos pelas deformações totais e plásticas foram obtidos a 10 % de deformação, isto é, para um valor intermediário representativo da região de deformações uniformes.

Os valores R_{α}^A , acrescentados para fins de comparação com os métodos adotados, representam os coeficientes determinados pelo método automático do programa Merlin™ da máquina de ensaios Instron 5582. Neste programa, é realizado um ajuste pelo método dos mínimos quadrados a partir da Equação (3) empregando-se as leituras dos extensômetros longitudinal e transversal entre 0,2 % até o ponto de carga máxima. Em outros termos, no método automático Instron os coeficientes de anisotropia plástica são determinados na região de deformações uniformes a partir das deformações totais.

Tabela 2. Propriedades plásticas determinadas para o aço LI-CSN.

α (graus)	σ_e (MPa)	R_{α}^A	R_{α}^T	R_{α}^P	ε_U (%)	σ_r (MPa)	K (MPa)	ε_0 (%)	n
0	155,833	1,980	2,108	2,166	23,205	398,408	544,958	0,4852	0,235
	1,722	0,091	0,138	0,142	0,315	1,214	3,745	0,0313	0,00338
15	158,167	1,800	1,847	1,893	23,047	398,459	545,548	0,4986	0,233
	2,563	0,092	0,145	0,149	0,264	1,217	3,187	0,0444	0,00296
30	159,667	1,821	1,872	1,917	23,289	396,899	545,987	0,5514	0,236
	0,816	0,058	0,095	0,100	0,159	1,449	2,632	0,0085	0,00160
45	146,167	2,045	2,099	2,157	23,152	395,936	539,447	0,3712	0,233
	5,307	0,165	0,221	0,230	0,483	4,246	4,965	0,0338	0,00458
60	146,333	2,380	2,424	2,502	22,806	393,235	533,902	0,3570	0,230
	1,751	0,029	0,068	0,068	0,206	3,297	5,952	0,0171	0,0021
75	146,000	2,433	2,461	2,538	22,575	390,935	528,533	0,3496	0,227
	2,280	0,060	0,121	0,124	0,327	1,176	4,472	0,0413	0,00365
90	142,833	2,398	2,426	2,491	22,575	389,395	524,181	0,324	0,227
	5,155	0,123	0,210	0,225	0,075	1,159	1,519	0,0532	0,00093

4 CONCLUSÕES

A caracterização experimental de uma chapa de aço LI por meio de ensaios automáticos de tração uniaxial possibilitou estabelecer as seguintes observações conclusivas :

1. A definição do coeficiente de anisotropia plástica a partir de ensaios de tração uniaxial realizados com o auxílio de um sistema automático de aquisição de dados, isto é, na condição em que o corpo de prova está sob carregamento e, portanto, em função das deformações totais, fornece menores valores quando comparados aos obtidos pelas deformações plásticas e para um mesmo nível de deformação plástica longitudinal;
2. As variações angulares determinadas para o coeficiente de anisotropia plástica, R_{α}^P , e para o limite de escoamento convencional em tração uniaxial, σ_{α}^e , apresentam evoluções monotônicas crescentes e decrescentes respectivamente entre as orientações correspondentes aos eixos de simetria ortotrópica, *i.e.*, para $\alpha = 0$ e 90° ;
3. A compensação de deformações elásticas pode ser facilmente implementada ora através de uma planilha ora através de um programa de depuração de dados e, deve, portanto, ser empregada haja visto a tendência crescente pelo uso de ensaios automáticos;
4. A validação do método de compensação de deformação elásticas adotado neste trabalho e ou comparação com métodos de correção propostos na literatura (2,3), deve ainda ser realizada em processos de carregamentos e descarregamentos. Do mesmo modo, é preciso verificar a validade destes métodos em materiais que apresentem tanto grandes variações de propriedades elásticas como plásticas.

Agradecimentos

Este trabalho teve o suporte de auxílios à pesquisa obtidos junto ao CNPq (LPM, 476057/2003-5) e a FAPERJ, (LPM, E 26/170.566/2004). Os autores gostariam de agradecer a C. A. D. Machado, P. M. Ladeira e R. da Mota Leite, Laboratório de Ensaio da GALVASUD (CSN), pela atenção dispensada na realização dos ensaios de tração uniaxial.

REFERÊNCIAS

- 1 ASTM Standard E 517-92a, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1992, Vol. 3, pp. 481-486.
- 2 Danckert, J. e Nielsen, K. B., Determination of the plastic anisotropy r in sheet metal using automatic tensile test equipment. **Journal of Materials Processing Technology**, 1998, Vol. 73, pp. 276-280.
- 3 Chamanfar, A. e Mahmudi, R., Compensation of elastic strains in the determination of plastic strain ratio (R) in sheet metals. **Materials Science and Engineering A 397**, 2005, Vol. 397, N. 1-2, pp. 153-156.
- 4 Lopes, A. S., Lucas, M. F. e Nascimento, E. N., Avaliação de parâmetros que influenciam na determinação da anisotropia de um aço plano através do ensaio de tração. In : 41º Seminário de Laminação : Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 2004, ABM, Joinville, SC, p. 515-524.

EVALUATION OF THIN SHEET PLASTIC ANISOTROPY USING AUTOMATIC TENSILE TESTING ¹

Luciano Pessanha Moreira²
Ecy Cardoso Romão³
Carlos Sérgio da Costa Viana⁴
Luiz Carlos de Andrade Vieira⁵
Alexandre Pimentel Sampaio⁶

Abstract

In the uniaxial tensile tests performed in thin metallic sheets with the help of data acquisition systems, the plastic properties are usually defined with automatic methods. In the particular case of the plastic anisotropy strain-ratio R or the Lankford coefficient, it is common practice to make use of the total strains in preference to the plastic strains. In the present work, the plastic anisotropy of an interstitial free “IF” steel sheet is evaluated through automatic uniaxial tensile testing carried out at angular orientations $\alpha = 0, 15, 30, 45, 60, 75$ and 90 degrees with respect to the sheet rolling direction. In all cases, the R -values were obtained from a proposed compensation method for the elastic strains. The results show that the plastic anisotropy strain-ratios determined from the plastic-strains are greater than the R -values defined as a function of the total strains.

Key words: Plastic anisotropy; Uniaxial tensile testing; Thin sheets.

¹ Paper to be presented at the 42nd Rolling Seminar, Processes, Rolled and Coated Products, October 25 to 28, 2005 – Santos – SP – Brazil.

² Mechanical Engineer, D.Sc., Adjoint Professor, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br

³ Civil Engineer, MSc. Student, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, ecy@metal.eeimvr.uff.br

⁴ Metallurgical Engineer, Ph.D., Invited Professor, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, viana@metal.eeimvr.uff.br

⁵ Technical Lab Assistant, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, luiz@metal.eeimvr.uff.br

⁶ Metallurgical Engineer, MSc., Centro de Pesquisas, Companhia Siderúrgica Nacional, pimentel.sampaio@csn.com.br