

PARÂMETRO GLOBAL DE CORRELAÇÃO ENTRE \bar{r} E EMBUTIBILIDADE

Igor Cuzzuol dos Santos ¹
Guilherme Nagatoshi Asakawa ¹
Luiz Paulo Mendonça Brandão ¹

Resumo

Coefficiente de anisotropia normal (\bar{r}), é uma média dos coeficientes de anisotropia plástica (r), obtidos por ensaio de tração e apresenta a diferença de anisotropia em determinado material, em relação às direções macroscópicas de sua chapa. O valor de \bar{r} é referência para qualificar a embutibilidade de uma chapa metálica, ou seja, dizer se o material tem maior ou menor facilidade de sofrer escoamento plástico em sua superfície. O desenvolvimento de orientações preferenciais de planos $\{111\}$ paralelos à superfície da chapa e o decréscimo de planos $\{100\}$ contribuem para o aumento do valor de \bar{r} e, conseqüentemente, aumentam a embutibilidade do material. Atualmente, o coeficiente de anisotropia normal é obtido a partir dos convencionais ensaios de tração. O presente trabalho teve por objetivo a criação de um novo parâmetro global, assim denominado Parâmetro B, com o objetivo de prever sua relação com os valores de \bar{r} , calculados convencionalmente em um aço livre de intersticiais (IF). Pôde-se aferir que o novo Parâmetro B pode ser usado satisfatoriamente para prever a qualidade de embutimento em aços IF, apenas utilizando-se como dados de entrada resultados das análises de textura realizadas por difração de raios-x.

Palavras-chave: Anisotropia; Embutibilidade; Parâmetro B; Textura.

CORRELATION GLOBAL PARAMETER BETWEEN \bar{r} AND FORMABILITY

Abstract

Normal anisotropy coefficient (\bar{r}), is an average of the plastic anisotropy (r), obtained by tensile test that presents the properties differences in a given material, in relation to the plate macroscopic directions. The \bar{r} value is used to measure the formability of some material, i.e., stating if the material has greater or lesser chance to suffer plastic flow on its surface. Higher proportion of oriented grains with their $\{111\}$ plans parallel to the sheet plane and lower rate of $\{100\}$ plans, contributes to a better \bar{r} value and, consequently, better the formability. Currently, the normal anisotropy coefficient is obtained from the conventional tensile tests. This work aimed the creation of a new global parameter, named B Parameter, in order to provide its relationship with the \bar{r} values, calculated by tensile tests. It could be proved that B parameter, proposed on this study, can be used successfully to predict the formability using a low-carbon steel, only taking as an input data the results of crystallographic texture obtained by x-ray diffraction.

Keywords: Anisotropy; Formability; B Parameter; Texture.

1 INTRODUÇÃO

Os aços livres de intersticiais, comumente conhecidos como aços IF, do Inglês, *interstitial free*, são exemplos de aços baixo carbono usados em operações de estampagem. Suas principais aplicações concentram-se nas indústrias automobilísticas e na chamada “indústria de linha branca”, responsável pela fabricação de eletrodomésticos, como geladeiras, fogões e máquinas de lavar [1-3].

A estampabilidade de determinado aço é sua capacidade de alcançar um alto grau de escoamento plástico no plano

da chapa, enquanto oferece uma resistência ao escoamento na direção da espessura da mesma [4]. Essa propriedade é conhecida como anisotropia normal (\bar{r} ou r_m). Em aços baixo carbono essas orientações estão localizadas principalmente em duas fibras: fibra- α ($\langle 110 \rangle$ //Direção de Laminação - DL) e fibra- γ ($\langle 111 \rangle$ //Direção Normal - DN) [5]. A alta estampabilidade está diretamente relacionada com a intensidade da fibra- γ em detrimento da fibra- α e pode ser estimada por \bar{r} a partir da Equação 1 [6,7], sendo

¹Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: igorcuzzuol@gmail.com



r_0 , r_{45} e r_{90} os índices de anisotropia para corpos de prova retirados a 0, 45 e 90° da DL.

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (1)$$

Devido à natureza de sua composição química e de tratamentos termomecânicos específicos que são realizados nesses aços, consegue-se obter valores ótimos de \bar{r} (acima de 2,0) [8], impulsionando a aplicação dos aços IF em linhas industriais que demandam grande capacidade de conformação.

Devido à imensa utilização desse tipo de material no cenário econômico nacional, buscou-se desenvolver um método de análise para prever a qualidade do embutimento de uma forma mais rápida e economicamente viável, utilizando difração de raios-x. Desenvolveu-se assim um parâmetro, denominado parâmetro B, capaz de caracterizar e relacionar as variáveis dependentes (propriedades magnéticas) e independentes (textura cristalográfica).

2 PARÂMETRO B

A fim de quantificar a qualidade de estampabilidade de um aço qualquer não texturado, deve ser definido um parâmetro global (obtido a partir de uma ODF), conhecido como Parâmetro B.

Realizando um paralelo com a definição do parâmetro A, proposto por Kestens and Jacobs [9], buscou-se apresentar uma definição semelhante para o novo parâmetro global, com o auxílio da Figura 1.

Analogamente, pode-se deduzir que, para cada orientação g , o ângulo $B_\gamma(g)$ é o ângulo mínimo entre a direção normal da chapa (DN) e a direção $\langle 111 \rangle$ do cristal mais próxima.

O parâmetro de textura B_γ é definido como o valor de orientação médio de $B(g)$, considerando a fração de volume de cada componente da textura, em relação aos componentes $\{111\}\langle uvw \rangle$, ou seja, componentes

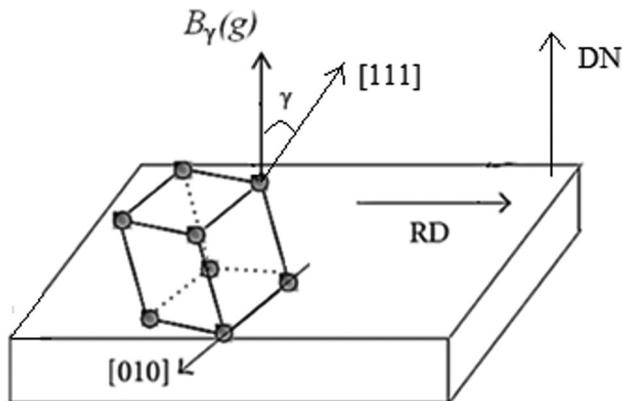


Figura 1. Definição do parâmetro B_γ : ângulo mínimo entre o vetor da direção normal (DN) e a direção $\langle 111 \rangle$ do cristal mais próxima.

pertencentes à fibra γ . Essa orientação média ponderada do valor pode ser expressa pela integral de convolução de $B_\gamma(g)$ e a ODF, $f(g)$ (Equação 2):

$$B_\gamma = \int f(g) B_\gamma(g) dg \quad (2)$$

A partir dessa definição, conclui-se que os valores de B_γ devem estar compreendidos entre 0 e 54,7°. $B_\gamma = 0^\circ$ indica que os componentes $\{111\}\langle uvw \rangle$, do resultado de textura analisado, encontram-se alinhados com DN, enquanto para $B_\gamma = 54,7^\circ$, os componentes $\{hkl\}\langle 100 \rangle$ é que estarão alinhados com DN.

Considerando que o escoamento ocorra preferencialmente no plano da superfície da chapa, a expressão acima pode ser, então, simplificada, de acordo com a Equação 3:

$$B = \frac{B_0 + 2B_{45} + B_{90}}{4} \quad (3)$$

Nesse caso, B_0 , B_{45} e B_{90} representam os valores de B considerando que o escoamento ocorra a 0, 45 e 90 graus, respectivamente, com a direção normal.

A partir dessas análises, conclui-se que baixos valores do ângulo $B_\alpha(g)$, correspondem a uma melhor estampabilidade, visto que mais cristais estão orientados com a direção $\langle 111 \rangle$.

Utilizando como base o programa que calcula a função energia de anisotropia e Parâmetro A, implementado por Felix et al. [10], modificaram-se as variáveis da programação de linguagem para que o programa fosse capaz de relacionar as direções do cristal com a direção normal (plano da chapa), ao invés das direções de fácil magnetização.

Dessa maneira, estabeleceu-se o Parâmetro B.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a verificação do desempenho do programa, fez-se necessário relacionar os valores obtidos pelo novo parâmetro criado com os valores de \bar{r} calculados pelos tradicionais ensaios de tração. Para tal, foram utilizados noventa (90) amostras de um aço IF Ti-Nb fornecidas pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) na forma de tira resultante da laminação a quente, com 3,80 mm de espessura média inicial. A temperatura média de acabamento e bobinamento foram de 933 e 630 °C, respectivamente. A composição química do aço é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço em estudo

Composição Química (% em peso)									
C	Mn	P	S	Si	Al	N	Ti	Nb	
0,003	0,125	0,011	0,006	0,067	0,033	0,003	0,042	0,034	

As amostras foram trabalhadas termomecanicamente por meio da laminação a frio e recozimento. As laminações foram executadas com o auxílio do Laminador FENN MFG. Co., modelo D 51710, com cilindros de trabalho de 133,70 mm de diâmetro. Para um conjunto total de 30 amostras, foram realizadas laminações convencionais com reduções de 50, 70 e 85%, seguidas de recozimento a 900 °C durante 150 s. O recozimento foi efetuado em um forno tipo mufla microprocessado, modelo Quimis Q318M. De cada lote de trinta (30) amostras termomecanicamente tratados, foram retirados dez (10) corpos de prova (CP) em três diferentes direções, com relação a direção de laminação da chapa: Direção de Laminação (DL), Direção Transversal (DT) e a 45° da Direção de Laminação (DL₄₅). Para os ensaios de obtenção do coeficiente de anisotropia normal, bem como a confecção dos CP, utilizou-se a Norma ASTM E517. A máquina utilizada foi uma máquina universal de ensaios, eletromecânica e microprocessada, modelo EMIC DL 60000.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes de anisotropia normal (r_m) foram obtidos em 3 direções: Direção de Laminação (DL), Direção Transversal (DT) e a 45° da Direção de Laminação (DL₄₅). Os valores de \bar{r} ou r_m para as três condições de laminação são exibidos na Tabela 2. Para o cálculo do intervalo de confiança das amostras utilizadas na obtenção do coeficiente de anisotropia normal, utilizou-se a função de distribuição t de student, com nível de confiança de 95%.

A partir dos dados da Tabela 2, pode-se concluir que os valores do coeficiente de anisotropia normal aumentam com o aumento do grau de deformação, pois sabe-se que, quanto maiores as intensidades de planos $\{111\}$ //DN, maiores deverão ser os valores de \bar{r} . A Figura 2 confirma esta relação.

Os valores do Parâmetro B, obtidos por meio do novo programa computacional, estão relacionados de acordo com a Tabela 3. Esse novo parâmetro se propõe a descrever, especificamente, a embutibilidade dos aços a partir de sua textura cristalográfica.

A correlação do Parâmetro B criado com \bar{r} é apresentada pela curva da Figura 3. Nela observa-se, que a anisotropia normal do aço IF estudado aumenta com o decréscimo de B. Esta relação é linear e apresentou coeficiente de correção de 0,84, considerado satisfatório, principalmente em virtude da dispersão dos valores obtidos para os coeficientes de anisotropia medidos por tração uniaxial.

Da definição, o ângulo B_α (g) é o ângulo mínimo entre a direção normal da chapa e as direções $\langle 111 \rangle$ dos cristais mais próximas a esta. Isso significa que baixos valores do ângulo B_α (g) correspondem a uma melhor estampabilidade, visto que mais cristais estão orientados com direções $\langle 111 \rangle$ próximas a DN. Pelo fato do material estudado ter

Tabela 2. Valores do coeficiente de anisotropia plástica normal (r_m) e anisotropia planar (Δr) para as amostras laminadas a 50, 70 e 85% a frio e recozidas a 900 °C

Grau de redução (%)	r_m
50	1,43 ± 0,17
70	2,11 ± 0,28
85	2,92 ± 0,84

Tabela 3. Valores do Parâmetro B obtidos por meio dos dados de textura

Grau de redução (%)	50	70	85
Parâmetro B	13,541	12,21	11,91
r_m	1,43	2,11	2,92

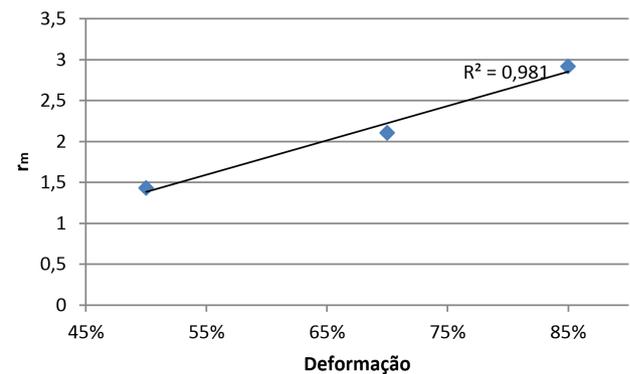


Figura 2. Relação entre r_m e o aumento do grau de deformação a frio.

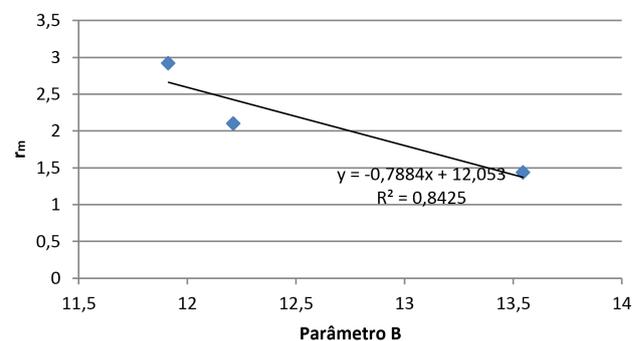


Figura 3. Relação entre o parâmetro global Parâmetro B e \bar{r} .

grandes intensidades dos planos $\{111\}$ paralelos a superfície da chapa, é de se esperar que mais direções $\langle 111 \rangle$ do material estejam próximas a DN. Da Figura 3, conclui-se que ambos, material e Parâmetro B, se comportaram da maneira esperada.

Pode-se aferir, portanto, que o novo parâmetro global criado neste estudo pode ser usado satisfatoriamente para prever a qualidade de embutimento em aços IF, utilizando-se apenas como dados de entrada os resultados das análises de textura realizadas por difração de raios-x, visto que se obteve uma boa linearidade ($r^2 > 0,84$) entre os valores de \bar{r}

calculados pelo ensaio de tração uniaxial e pelo programa computacional (Parâmetro B).

computacional desenvolvido os resultados das análises de textura realizadas por difração de raios-x.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados e discutidos, pode-se concluir que o novo Parâmetro B proposto por este estudo pode ser usado para prever a qualidade de embutimento em aços IF, através da correlação com \bar{r} , apenas utilizando-se como dados de entrada do programa

Agradecimentos

Os autores agradecem a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) pelo fornecimento do material, a Tork pela confecção dos corpos de prova, ao CNPQ e a CAPES pelo apoio financeiro, e ao IME e IFES pela colaboração e disponibilidade de equipamentos.

REFERÊNCIAS

- 1 Baker LJ, Daniel SR, Parker JD. Metallurgy and processing of ultralow carbon bake hardening steels. *Materials Science and Technology*. 2002;18(4):355-368. <http://dx.doi.org/10.1179/026708302225002452>.
- 2 Humane MM, Minz RK, Paretkar RK, Peshwe DR. Effect of cold rolling and mode of annealing on textures, mechanical properties and formability limit diagrams in interstitial free steel sheets. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2010;63(6):867-880. <http://dx.doi.org/10.1007/s12666-010-0133-7>.
- 3 Banerjee K. Physical metallurgy and drawability of extra deep drawing and interstitial free steels. In: Sztwiertnia K. Recrystallization. Croatia: InTech; 2012 [acesso em 9 set. 2015]. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/recrystallization/physical-metallurgy-and-drawability-of-extra-deep-drawing-and-interstitial-free-steels>.
- 4 Ray RK, Jonas JJ, Hook RE. Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels. *International Materials Reviews*. 1994;39(4):129-172. <http://dx.doi.org/10.1179/imr.1994.39.4.129>.
- 5 Bunge H. *Mathematische methoden der texturanalyse*. Berlin: Akademie Verlag; 1969.
- 6 Padilha AF, Ferreira A Fo, Lima LMG, Lima NB. Controle da microestrutura e da textura de chapas de aço baixo carbono para estampagem. *Workshop sobre textura e relações de orientação: deformação plástica, recristalização, crescimento de grão*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2001. 14 p.
- 7 Ray RK, Ghosh P. Texture in the design of advanced steels. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2013;66(5-6):641-653. <http://dx.doi.org/10.1007/s12666-013-0299-x>.
- 8 Hoile S. Processing and properties of mild interstitial free steels. *Materials Science and Technology*. 2000;16(10):1079-1093. <http://dx.doi.org/10.1179/026708300101506902>.
- 9 Kestens L, Jacobs S. Texture control during the manufacturing of nonoriented electrical steels. *Texture, Stress, and Microstructure*. 2008;2008:1-9. <http://dx.doi.org/10.1155/2008/173083>.
- 10 Felix RAC, Brandão L, Cunha MA, Paiva CHP, Amaro JRL, Teles LS, et al. Evaluation of the relationship between crystallographic texture and magnetic properties through the magnetocrystalline anisotropy coefficient. In: *Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*; 2012; Joinville, SC.

Recebido em: 9 Set. 2015

Aceito em: 7 Dez. 2015