

ANÁLISE DA ESTAMPABILIDADE DE CHAPAS DE AÇO IF APÓS LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO E RECOZIMENTO¹

Tarcísio Carvalho Fonseca²
Aldo Henrique de Almeida Barbosa³
José Maria Ramón Caccioppoli⁴

Resumo

Avaliou-se o efeito da laminação de encruamento e do recozimento na estampabilidade de chapas de aço *interstitial free* (IF) microligado ao titânio. Para isso, laminou-se uma bobina de aço IF no laminador de encruamento e a submeteu a um novo recozimento e a uma nova laminação de encruamento. Após esses processos, avaliaram-se as propriedades mecânicas, a microestrutura, a textura cristalográfica e determinou-se a curva limite de conformação (CLC). Os resultados mostraram que o limite de escoamento aumenta e o coeficiente de encruamento diminui com a laminação de encruamento. A textura, o limite de resistência e a anisotropia normal média e planar não mudaram com esse processo para os graus de redução utilizados na laminação. Após o novo recozimento, as propriedades mecânicas modificadas pela laminação de encruamento foram melhoradas e não houve mudança na textura cristalina e nem formação de grãos anormais. Através das análises destas propriedades mecânicas e das CLCs, concluiu-se que o aço IF da bobina testada, após esses processos, apresenta características semelhantes às originais relacionadas à estampabilidade.

Palavras-chave: aço IF, laminação de encruamento, recozimento.

-
- 1 Contribuição Técnica ao 41º Seminário de Laminação e Produtos Laminados e Revestidos da ABM; Joinville, SC, 26 a 28 de outubro de 2004.
 - 2 Engenheiro Metalurgista, M.Sc.; Departamento de Laminação a Frio da Usiminas; Ipatinga, MG.
 - 3 Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.Sc.; Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.
 - 4 M.Sc., Dr. Ing.; Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG; Belo Horizonte, MG.

1 INTRODUÇÃO

Os aços *interstitial free* (IF) microligados ao titânio são amplamente utilizados em aplicações de estampagem por não serem envelhecíveis, possuírem baixo limite de escoamento, alto alongamento uniforme associado a um coeficiente de encruamento elevado e a uma textura cristalográfica adequada à estampabilidade quando comparado com outros aços baixo carbono¹⁻³.

Os aços IF após processamento completo na linha de laminação a frio podem ser processados novamente no laminador de encruamento, processo chamado de relaminação ou repasse de encruamento, para alterarem a qualidade quanto à forma e às características superficiais. Entretanto, quando se relaminam materiais para estampagem como os aços IF, os mesmos podem encruar de forma a apresentar propriedades mecânicas, entre elas limite de escoamento (LE) e coeficiente de encruamento (N), fora das especificações e se tornarem inadequadas para aplicações que envolvem estampagem⁴.

Uma método para restauração das propriedades mecânicas modificadas pela laminação de encruamento é através de um novo recozimento no material. Entretanto, durante o novo recozimento, é possível ocorrer crescimento de grão e dissolução ou crescimento de precipitados, o que afeta as propriedades mecânicas e, conseqüentemente, a estampabilidade do aço IF⁴. Além disso, o material pode-se tornar macio e susceptível a defeitos de manuseio e apresentar baixa resistência à indentação para certas aplicações.

Assim, o objetivo do trabalho foi verificar o efeito da laminação de encruamento e do novo recozimento na estampabilidade de um aço IF.

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Produziu-se, em escala industrial, uma bobina de aço IF laminada a frio, chamada de Bobina Produto (BP), de 0,73 mm de espessura, utilizando nas últimas etapas do processo de fabricação o recozimento contínuo seguido de laminação de encruamento com 0,5% de redução. Em seguida, a BP foi relaminada com quatro reduções diferentes (0,3%; 0,7%; 1,1% e 1,5%), gerando-se a Bobina Encruada com quatro regiões (BE03, BE07, BE11 e BE15) referentes a essas reduções. Em seguida, a BE, com essas quatro regiões, foi submetida a um recozimento em caixa de forma a obter um Bobina Recozida (BR03, BR07, BR11 e BR15). Esta, nas condições de BR03, BR07 e BR11, apresentou um valor de LE abaixo do valor mínimo para ser comercializado na norma NBR 5915⁵. Devido a isso, processou-se novamente o material BR no laminador de encruamento com 0,5% de redução para aumentar o LE, de forma a produzir a Bobina Teste (BT03, BT07, BT11 e BT15). A Figura 1, mostra o esquema do procedimento experimental com seus principais parâmetros operacionais e os ensaios realizados.

Os ensaios de tração foram realizados conforme a norma NBR 6673⁶ com base de medida de 80 mm. Os valores do LE, limite de resistência (LR) e alongamento total (AL) foram obtidos pela média de seis corpos de prova, amostrados na direção transversal de laminação. Os valores de anisotropia normal (R médio), anisotropia planar (ΔR) e N foram determinados pela média dos resultados de 18 ensaios, seis em cada uma das direções longitudinal, transversal e diagonal ao sentido de laminação

conforme a norma EN 10130⁷. Os ensaios Erichsen (IE) foram realizados através de três embutimentos para todas as condições conforme a norma NBR 5902⁸. Esses ensaios objetivaram comparar a nova laminação de encruamento (BE com BP), o novo recozimento (BR com BE) e o ajuste final das propriedades mecânicas (BT com BR) através da análise de variância, que verificou a igualdade das médias com um nível de significância de 5%.

O tamanho de grão foi determinado segundo a norma ASTM E112⁹ para as condições após o processo normal de produção (BP) e após o novo recozimento (BR03, BR07, BR11 e BR15).

Avaliou-se a textura através de figuras de função de distribuição de orientação para as condições BP e para as condições que provêm do maior grau de deformação na relaminação (BE15, BR15 e BT15)⁴. Além disso, obteve-se a curva limite de conformação (CLC) utilizando o método Nakajima em conjunto com o *Bulge Test* para as condições BP e BT15⁴. Esses dois ensaios foram realizados de forma a analisar todo o processo mostrado na Figura 1.

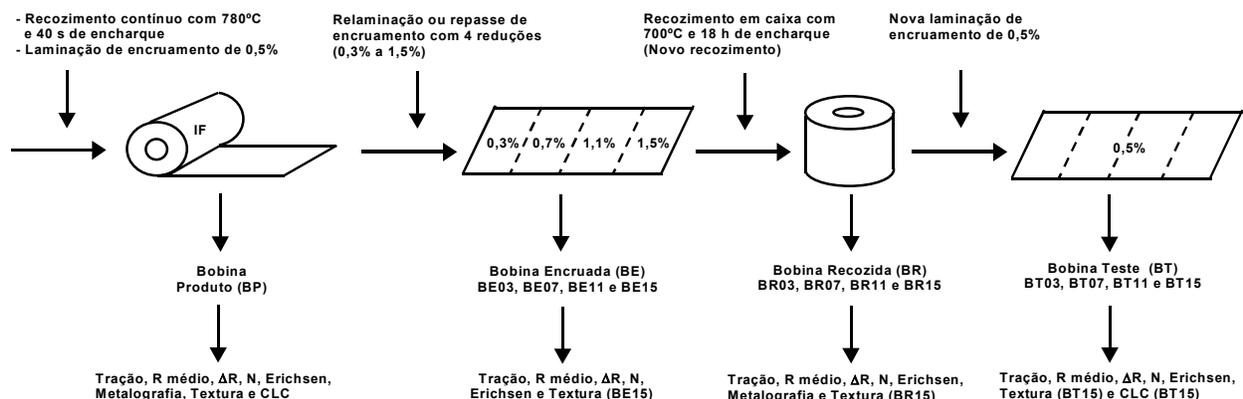


Figura 1 - Esquema do procedimento experimental com os principais parâmetros operacionais usados e os ensaios realizados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 2(a) a 2(g) mostram a influência da relaminação de encruamento, do novo recozimento e da nova laminação de encruamento nas propriedades mecânicas da BP. Nessas figuras, verifica-se que a BP atende a norma NBR 5915 (grau EEP-IF), Tabela 1.

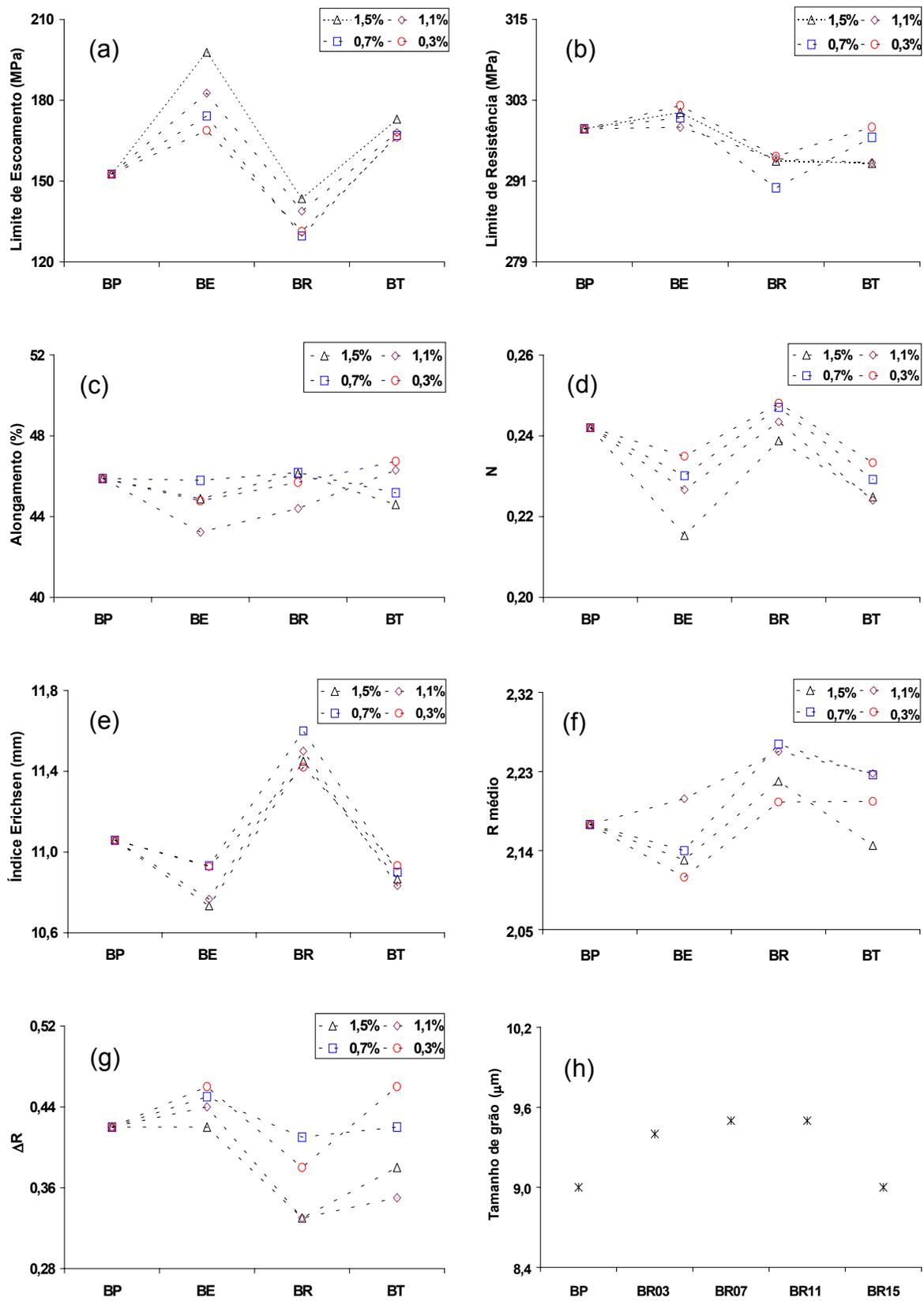


Figura 2 - Resultados dos ensaios mecânicos e da análise metalográfica.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do material BP em relação a norma NBR 5915.

Propriedades	LE (MPa)	LR (MPa)	AL* (%) Mín.	R médio Mín.	N Min.	Embutimento	
						Espessura do material (mm)	IE (mm)
<i>Grau EEP-IF</i>	140 - 180	270 - 350	38	1,80	0,22	0,70	> 10,4
						0,75	> 10,5
<i>BP</i>	153	299	46	2,17	0,24	0,73	11,1

*Base de medida = 80 mm.

Através da análise de variância, verificou-se que as propriedades mecânicas, mostradas nas Figuras 2(a) a 2(g) da BE, tiveram a mesma tendência de variação de outros trabalhos¹⁰⁻¹³ que apresentam situações referentes a uma única laminação de encruamento. Esta variação é explicada pelo aumento da densidade de deslocamentos provocada pela laminação de encruamento, que interagem entre si, provocando o aumento da resistência do material e a diminuição da ductilidade. Nesse raciocínio, o AL deveria diminuir. Entretanto, o fato do AL decrescer muito pouco com pequenas deformações na laminação de encruamento¹⁰ e ao fato do material ser processado em escala industrial torna o decréscimo do alongamento imperceptível pela análise de variância.

Após o novo recozimento, não houve variação do tamanho médio de grão entre as amostras, pois a tendência dos resultados mostrados na Figura 2(h) está dentro da variação do ensaio de medição deste parâmetro. Além disso, as micrografias das amostras após o novo recozimento, Figura 3, mostram que não ocorreram alterações no tamanho do grão ou formação de grãos anormais. Também não houve modificação na textura cristalográfica, Figura 4 (BR15 com BE15). Isso indica que o material após a relaminação não atingiu a deformação crítica para a recristalização e crescimento de grão^{14,15}, ocorrendo somente recuperação de forma a se ter alívio de tensões durante o segundo recozimento. Este foi responsável pela alteração das propriedades mecânicas da BR que se modificaram na Figura 2, sendo que a maior variação ocorreu nas condições de maior grau de deformação na relaminação. Além disso, o alívio de tensões tornou a estampabilidade BR superior a da BP, já que as propriedades mais relacionadas a estampagem, como IE, R médio e ΔR , ficaram melhores que a da BP.

Após a nova laminação de encruamento para ajuste das propriedades mecânicas, especificamente o LE, o material BT em relação ao BR apresentou a mesma tendência que o BE em relação ao BP, sendo que todas essas propriedades ficaram com valores dentro da norma NBR 5915.

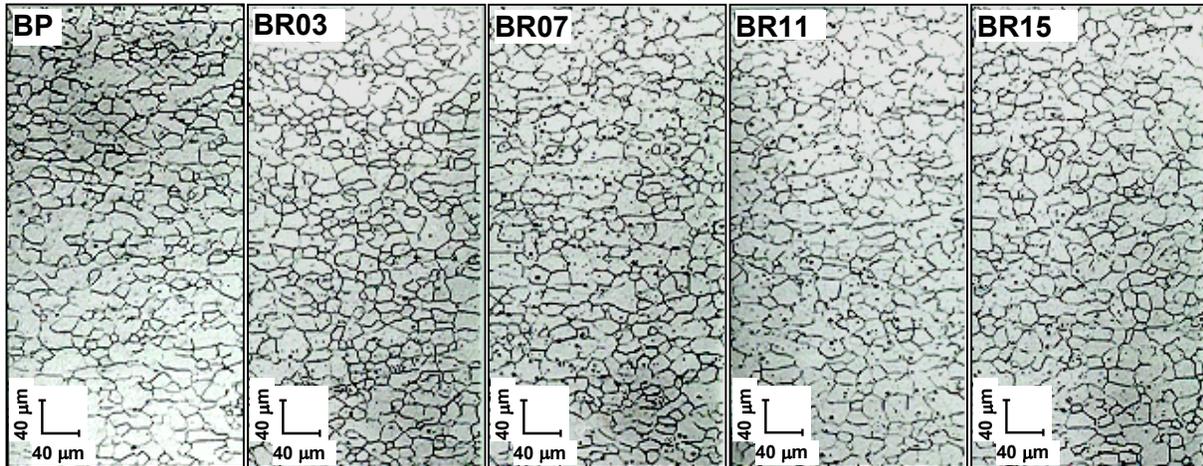


Figura 3 - Microestrutura do aço IF nas condições BP e BR.

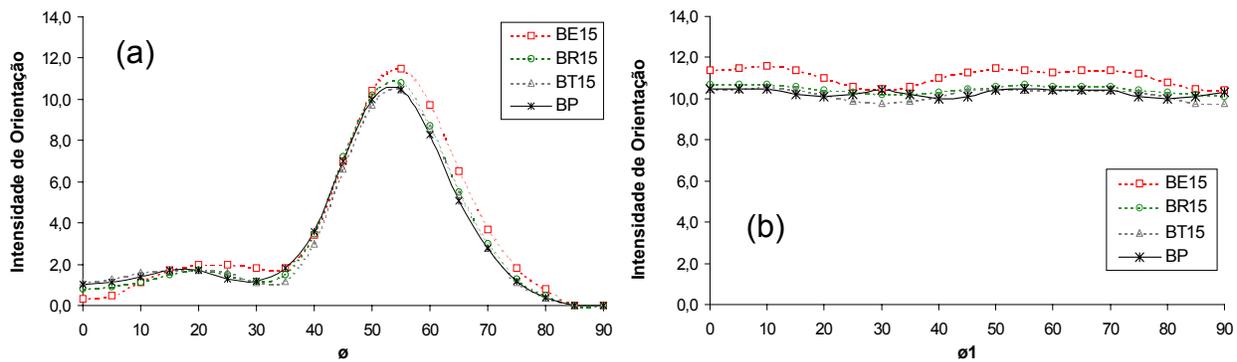


Figura 4 - Representação da distribuição de orientação ao longo da fibra α (a) e fibra γ (b) para o aço IF deformado com 1,5% na relaminação de encruamento nas diferentes etapas deste trabalho.

Na Figura 5, observa-se que os pontos experimentais do material BP e BT15 correspondem a curvas muito próximas, o que indica que o material após relaminação, novo recozimento e nova laminação de encruamento possui um campo de conformabilidade e uma estampabilidade semelhantes à desse mesmo material sem esses processos. Além disso, verifica-se que a textura do aço IF, Figura 4, para as condições que provêm do maior grau de deformação na relaminação, BE15, BR15 e BT15, não se modificou em relação a condição original, BP. Isto reforça o fato desses processos, nas condições utilizadas neste trabalho, não afetarem a textura, que é uma propriedades que afeta a estampabilidade do material¹⁶.

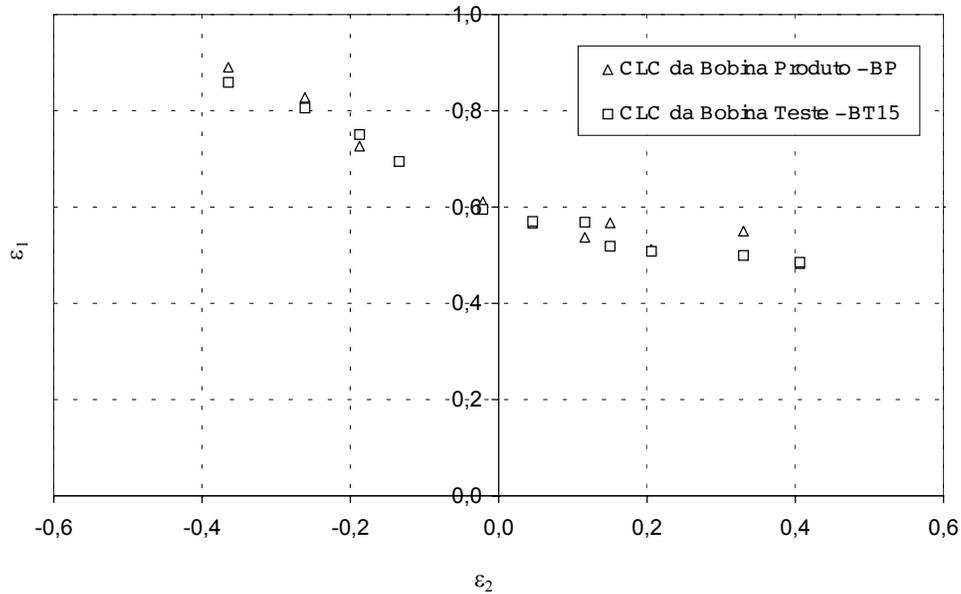


Figura 5 - CLCs da BP e da BT15.

4 CONCLUSÕES

A textura cristalográfica não sofreu variação após a relaminação de encruamento com os graus de deformação utilizados neste trabalho.

Após o novo recozimento, não houve alterações no tamanho de grão e na textura cristalográfica que pudessem afetar a estampabilidade nas condições utilizadas. Também se restauraram as propriedades mecânicas afetadas pela laminação de encruamento ocorridas após o primeiro recozimento e após a etapa de relaminação de forma a aumentar a conformabilidade do material.

Com base na CLC do material IF após a laminação de encruamento, o novo recozimento e a nova laminação de encruamento, verificou-se que o mesmo possui um campo de conformabilidade e uma estampabilidade semelhante à desse material sem esses processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 PINTO, M. C.; KLEIN, L. N. T.; CASTRO, L. C.; ALVES, A. C. Desenvolvimento de aços "Interstitial Free (IF)" pela Usiminas - **Anais do Seminário da Colam**, Belo Horizonte, Nov. 1991.
- 2 HOILE, S. Processing and properties of mild interstitial free steels. **Materials Science and Technology**, v. 16, p. 1079-1093, out. 2000.
- 3 BARBOSA, A. H. A.; PEREIRA, J. F. B.; RIBEIRO, C. F. Influência da condições de encharque no recozimento contínuo nas propriedades mecânicas de aços *interstitial free-IF* microligados com Ti. In: **CONGRESSO ANUAL DA ABM**, 56., Belo Horizonte, 2001.
- 4 FONSECA, T. C. **Estampabilidade de chapas de aços IF após a relaminação de encruamento e recozimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5915**: Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem. Rio de Janeiro, 2002
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6673**: Produtos planos de aço: determinação das propriedades mecânicas a tração. Rio de Janeiro, 1981.
- 7 EUROPEAN STANDARD. **EN 10130**:1991+ A1:1998. Cold-rolled low-carbon steel flat products for cold forming - Technical delivery conditions, 1999.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5902**: Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen modificado. Rio de Janeiro, 1980.
- 9 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM E112**: Standard test methods for determining average grain size. 1996.
- 10 ABE, H.; TSUNOYAMA, K.; UESUGI, N.; SHIBASAKI, O.; SATOH, S.; OBARA, T. Development of extra-deep drawing cold-rolled sheet steels for integrated automotives parts. **Kawasaki Steel Technical Report**, n. 24, p. 84-90, 1991.
- 11 GUY, A. G. **Ciência dos materiais**. Rio de Janeiro: Ed. Universidade de São Paulo, p. 305-313, 1980.
- 12 MUSCHENBORN, W.; SONNE, H. M. Material properties controlling the strain. Conference: Sheet metal forming and formability, proceedings. **10th BIENNIAL CONGRESS**, The International Deep Drawing Research Group, University of Warwick, England, 17-21. Publ., Portcullis Press Ltd, Redhill, Surrey, p. 193-201, 1978.
- 13 KAWASE, H.; HAMANAKA, S.; ISHIMOTO, Y.; MUNESHITA, M. Effect of temper rolling on R-value (plastic strain ratio) of cold rolled steel sheet. (Synopsis). **TRANS. IRON STEEL INST. JPN.** 25, (2), B78, 1985.
- 14 GUPTA, I.; BHATTACHARYA, D. Metallurgy of formable vacuum degassed interstitial-free steels. **Metallurgy of Vacuum Degassed Steels Products**, p. 43-72, 1990.
- 15 ANTONIONE, C.; BATTEZZATI, L.; MARINO, F.; RIONTINO, G.; TABASSO, M. C. Kinetics of abnormal grain growth in pure iron. **Journal of Materials Science** 14, p. 86-90, 1979.
- 16 JONAS, J. J.; RAY, K. R.; HOOK, R. E. Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels. **International Materials Reviews**, v. 39, p. 129-72, 1994.

ANALYSIS OF DEEP DRAWING OF INTERTITIAL FREE SHEETS AFTER SKIN PASS ROLLING AND ANNEALING¹

**Tarcísio Carvalho Fonseca²
Aldo Henrique de Almeida Barbosa³
José Maria Ramón Caccioppoli⁴**

Abstract

The present work evaluated the effect of skin pass rolling and annealing on the relevant properties to sheet metal forming in titanium-stabilized interstitial free (IF). For this, a coil of IF steel was rolled in the skin pass mill, followed by a new annealing and a new skin pass rolling. The material was submitted to mechanical characterization by tensile testing, metallography, texture analysis and forming limit curve (FLC). The results showed that the yield strength increase and the strain-hardening coefficient decrease with the skin pass, while the texture, the tensile strength, the plastic strain ratio and the planar anisotropy did not change for the reductions used in this work. Besides, the new annealing of the material did not affect its crystallographic texture, producing no abnormal grain growth and improve its mechanical properties. Through the analysis of that mechanical property e the FLC determined in the work, it can be concluded that the tested IF steel coil, after and before the second treatment, has a similar stampability behavior.

Keywords: interstitial free, skin pass rolling, annealing.

1 Technical Contribution for 41st Rolling Seminar of Brazilian Society for Metallurgy and Materials (ABM) - Process Rolled and Coated Products: Joinville, SC, October 26 to 28, 2004.

2 Metallurgical Engineer, M.Sc.; Department of Cold Rolling Process, Usiminas; Ipatinga, MG, Brazil.

3 Member of ABM; Metallurgical Engineer, M.Sc; Research and Development Center, Usiminas; Ipatinga, MG, Brazil.

4 M.Sc., Dr. Ing.; Professor, Department of Metallurgical and Materials Engineering of Federal University of Minas Gerais; Belo Horizonte, MG, Brazil.