

TEXTURA E COMPORTAMENTO MECÂNICO DE AÇOS IF ESTABILIZADOS AO Ti E Nb-Ti

Fabio Moreira da Silva Dias ¹
Fabiano Augusto Vallim Fonseca ²
Christien Guisard Haegen ³
Jefferson Fabricio Cardoso Lins ⁴
Marcos Flavio de Campos ⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise em relação à textura cristalográfica e ao comportamento mecânico apresentados por dois tipos de aços IF, ao Ti e ao Nb-Ti, submetidos a diferentes ciclos térmicos de recozimento, numa linha de galvanização contínua por imersão a quente, sendo utilizadas as temperaturas de 860°C e 760°C. São avaliadas quais características associadas aos materiais interferem de forma mais pronunciada na variação das propriedades mecânicas. Foram realizadas análises de textura cristalográfica por Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD), com utilização da técnica por MEV, onde a intensidade da orientação $\langle 111 \rangle // \text{ND}$ é avaliada e comparada entre os aços IF; caracterização metalográfica, com medição de tamanho de grão ferrítico com auxílio de microscopia óptica; e comportamento mecânico por meio de ensaios mecânicos de tração uniaxial na base 80 mm.

Palavras-chave: Aços IF; Textura cristalográfica; Comportamento mecânico.

TEXTURE AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF Ti AND Nb-Ti STABILIZED IF STEELS

Abstract

An analysis of the crystallographic texture and mechanical behavior of two types of IF steels is presented. Two steels, Ti and Nb-Ti, were submitted to different thermal annealing cycles in a continuous hot-dip galvanizing line, heat treated at temperatures of 860°C and 760°C. The more relevant characteristics of mechanical properties are evaluated. The crystallographic texture of the samples is determined by electron diffraction technique of back-scattering (SEM-EBSD). The intensity of orientation $\langle 111 \rangle // \text{ND}$ is evaluated and compared. Metallographic characterization is done, and the ferritic grain size is measured with optical microscopy. The mechanical behavior of materials is characterized in the tensile test with 80 mm gauge length.

Key words: IF steel; Crystallographic texture; Mechanical behaviour.

¹Engenheiro Metalúrgico, M.Sc, Engenheiro de Desenvolvimento Senior, Gerência de Desenvolvimento de Produtos Galvanizados e Pré-pintados, Companhia Siderúrgica Nacional, Rua General Barcelos, 280, apto. 101, Saudade, Cep 27313-120, Barra Mansa, RR, Brasil.

E-mail: fabiodiasms@uol.com.br

²Engenheiro Metalúrgico, M.Sc, Engenheiro de Desenvolvimento, Planejamento e Qualidade, Gerência de Desenvolvimento, Planejamento e Qualidade, Companhia Siderúrgica Nacional, Rua Onze, 75, Jardim Belvedere, Cep 27258-220, Volta Redonda, RJ, Brasil.

E-mail: Fabiano.vallim@csn.com.br

³Mestrando, Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense – UFF, Rua Doutor Nelson Rocha, 264, Verbo Divino, Cep 27345-080, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: uff.cgh@gmail.com

⁴Professor Adjunto da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense – UFF, Av. dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, Cep 27255-125, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: jfclins@metal.eeimvr.uff.br

⁵Professor Adjunto, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense – UFF, Av. dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, Cep 27255-125, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: mcampos@metal.eeimvr.uff.br

I INTRODUÇÃO

Os aços livres de intersticiais, LI, ou também chamados *Interstitial Free*, IF, são utilizados em uma gama de aplicações onde, principalmente, é requerida uma excelente conformabilidade, aliada, também, à propriedade de não envelhecimento.

A alta conformabilidade dos aços IF está associada à textura $\{111\}\langle uvw\rangle$ e, também, à baixa resistência mecânica apresentada por esses tipos de aços. Isso implica em menores valores para limites de escoamento e resistência (LE e LR, respectivamente) e, conseqüentemente, elevados valores de alongamento total e coeficientes de anisotropia normal e de encruamento (AL , \bar{R} e n , respectivamente). Se os intersticiais carbono e nitrogênio estão estabilizados na forma de precipitados, o material não apresenta envelhecimento por deformação (*strain aging*). Isso é devido à adição de elementos estabilizadores, como titânio e nióbio.⁽¹⁻⁵⁾

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o efeito do ciclo térmico de recozimento, onde foram utilizadas as temperaturas de 860°C e 760°C, na textura cristalográfica e comportamento mecânico de aços IF ao Ti e Nb-Ti. Para isso, foram realizadas análises de textura por Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD), com auxílio da técnica de MEV; caracterização microestrutural, com determinação de tamanho de grão ferrítico, por meio de microscopia óptica; e propriedades mecânicas, mediante a realização de ensaios de tração uniaxial na base 80 mm.

2 MATERIAL E METODOLOGIA

2.1 Material

A Tabela I apresenta as composições químicas dos aços utilizados neste trabalho.

Foi necessário trabalhar com bobinas diferentes para cada aço, por questões operacionais. Porém, as variações de composição química entre as bobinas do mesmo tipo de aço IF são mínimas, já que as mesmas se referem a placas provenientes de corridas vazadas em sequência.

As bobinas representativas dos aços com a identificação 1 foram processadas com temperatura de recozimento de 860°C e as outras, com a identificação 2, na temperatura de 760°C.

2.2 Metodologia

Este item apresenta as descrições das principais características e parâmetros de recozimento utilizados no experimento em escala industrial e dos procedimentos experimentais empregados para análise dos resultados.

2.2.1 Experimento em escala industrial

Para as bobinas referentes aos aços IF Ti 1 e Nb-Ti 1, foi utilizada a temperatura de 860°C no forno de recozimento. Já para as bobinas representativas dos aços IF Ti 2 e Nb-Ti 2, o recozimento foi realizado com temperatura de 760°C, para se obter uma diferença significativa (100°C) que causasse efeitos nas características e propriedades do aço. Para a realização do experimento, as temperaturas das zonas de aquecimento e encharque foram ajustadas para o mesmo valor, conforme as temperaturas de teste. Os demais parâmetros que envolvem todo o processo de galvanização, como velocidade de processo e percentual de redução na laminação de encruamento, foram mantidos constantes. Nas Tabelas 2 e 3 são apresentadas sínteses dos parâmetros utilizados.

2.2.2 Caracterização microestrutural

Foram empregados os procedimentos usuais de preparação metalográfica: lixamento, polimento e imersão no reagente adequado para observação da microestrutura. Foram utilizados os reagentes Nital a 3% e Klemm de forma combinada. Inicialmente as amostras foram imersas na solução de Nital a 3% de 40 a 50 segundos; depois, polidas em alumina 0,5 μm e, por fim, imersas seguidamente em Nital 3% e Klemm, também nos tempos de 40 a 50 segundos. O reagente Klemm é mais indicado para aços ULC (*Ultra Low Carbon*), pois interage com o interior dos grãos, já que os contornos apresentam baixa concentração de átomos.

2.2.3 Avaliação da textura cristalográfica

Para determinação da textura cristalográfica foi utilizada a técnica EBSD, com auxílio de microscopia eletrônica de varredura. Na preparação metalográfica para EBSD foi utilizado polimento automático, onde as amostras foram polidas por uma hora com utilização de solução a base de sílica coloidal, composta por 4 l de água

Tabela I. Composições químicas dos aços IF utilizados neste trabalho

Aço	Composição química (%p)								
	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Nb	N
Ti 1	0,0029	0,098	0,007	0,008	0,0074	0,055	0,0537	0,005	0,0019
Ti 2	0,0031	0,090	0,006	0,008	0,0108	0,047	0,0571	0,005	0,0022
Nb-Ti 1	0,0028	0,108	0,001	0,007	0,0096	0,034	0,0202	0,022	0,0023
Nb-Ti 2	0,0027	0,089	0,005	0,005	0,0082	0,028	0,0193	0,022	0,0035

destilada, 500 mL de detergente neutro e 50 mL de sílica coloidal OP-U (Struers). A cada intervalo de 15 minutos, o polimento era interrompido para imersão das amostras em solução de Nital a 3%.

2.2.4 Ensaios mecânicos

Foram realizados 48 ensaios de tração uniaxial na base 80 mm para determinação das propriedades mecânicas. Foram obtidos os coeficientes de anisotropia normal e planar e o coeficiente de encruamento. Para cada direção de ensaio, foram confeccionados três corpos de prova para obtenção de maior representatividade dos resultados. Também foram utilizados três corpos de prova para os ensaios de tração simples.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Microestrutural

As Figuras 1 e 2 apresentam as microestruturas dos aços IF após recozimento contínuo. A Tabela 4 apresenta os resultados de medidas de tamanho de grão.

Para ambos os aços IF Ti e Nb-Ti, o ciclo térmico representado pela maior temperatura de recozimento (860°C), proporciona maior tamanho de grão. Para o aço IF Ti, a diferença é mais acentuada, em torno de 5 µm. Para uma mesma temperatura, tanto 860°C quanto 760°C, o aço IF Ti exibe maior tamanho de grão quando comparado ao aço IF Nb-Ti. Isto está relacionado principalmente ao fato de que os carbonetos nos aços IF Nb-Ti – NbC – apresentam-se mais refinados, quando comparados com os aços IF Ti, onde o carbono pode ser estabilizado pela formação de carbonetos TiC e/ou de carbossulfetos $Ti_4C_2S_2$, ambos mais grosseiros que o precipitado NbC. Tais partículas mais refinadas e distribuídas ao longo da matriz microestrutural do material funcionam como barreiras à migração dos contornos de alto ângulo durante as etapas de recristalização e crescimento de grão durante o recozimento. Assim, para composições químicas similares, os aços IF Ti tendem a exibir grãos mais grosseiros que os aços IF Nb-Ti, para mesmos ciclos térmicos de recozimento. A sequência de aumento de tamanho de grão observada está adequada ao esperado: Nb-Ti 2, Ti 2, Nb-Ti 1 e Ti 1. Os tamanhos de grão resultantes para os aços Ti 2 e Nb-Ti 1, ou seja, diferentes aços e temperaturas praticadas, são equivalentes em termos de numeração ASTM.

Tabela 2. Temperaturas de aquecimento e encharque do forno de recozimento contínuo empregadas no experimento para os aços IF

Aços	Temperaturas (°C)					
	Aquecimento			Encharque		
	Visado	Média	Desvio padrão	Visado	Média	Desvio padrão
Ti 1	860	860,5	1,20	860	860,7	2,34
Ti 2	760	760,0	1,60	760	766,1	2,90
Nb-Ti 1	860	859,7	1,31	860	860,1	2,31
Nb-Ti 2	760	759,9	0,84	760	763,6	1,23

Tabela 3. Velocidade de processo e percentual de redução na laminação de encruamento utilizados no experimento para os aços IF

Aços	Recozimento e galvanização					
	Velocidade (m/min)			Laminação de encruamento (%)		
	Visado	Média	Desvio padrão	Visado	Média	Desvio padrão
Ti 1	80	80	0,0	1,0	1,00	0,02
Ti 2	80	80	0,0	1,0	1,00	0,01
Nb-Ti 1	80	80	0,0	1,0	1,00	0,01
Nb-Ti 2	80	80	0,0	1,0	0,99	0,12

Tabela 4. Resultados das medidas de tamanho de grão para os aços IF, acompanhados dos respectivos números ASTM

Aço	Tamanho de grão		
	Média (µm)	Desvio padrão da média (µm)	Número ASTM
Ti 1-860°C	20,34	0,70	8,0
Ti 2-760°C	15,64	0,90	8,5
Nb-Ti 1-860°C	16,79	0,71	8,5
Nb-Ti 2-760°C	14,04	0,65	9,0

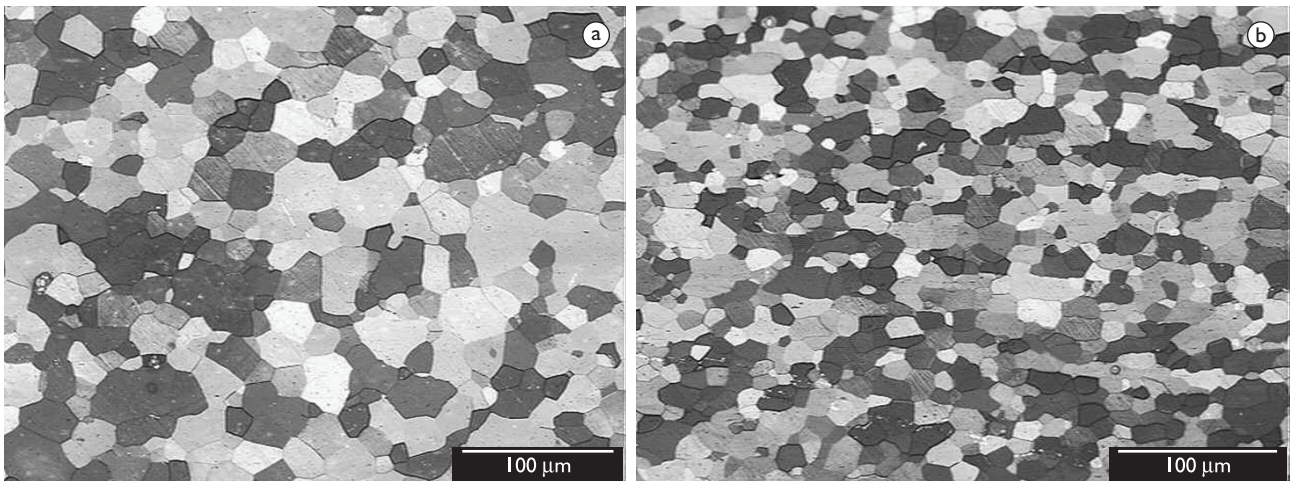


Figura 1. Aspectos microestruturais dos aços IF Ti, após recozimento contínuo, obtido por meio de microscopia óptica. Em (a) Ti 1, com temperatura de 860°C; e (b) Ti 2, com temperatura de 760°C. Aumento de 200×.

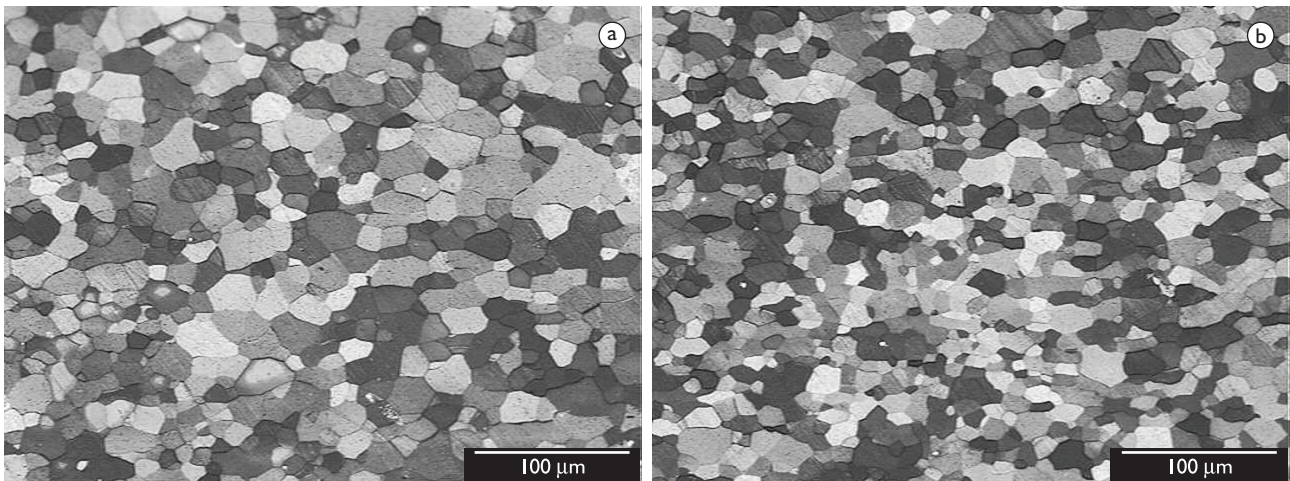


Figura 2. Aspectos microestruturais dos aços IF Nb-Ti, após recozimento contínuo, obtido por meio de microscopia óptica. Em (a) Nb-Ti 1, com temperatura de 860°C; e (b) Nb-Ti 2, com temperatura de 760°C. Aumento de 200×.

3.2 Textura Cristalográfica

A textura cristalográfica dos aços IF foi determinada pela técnica EBSD e está representada por ODF (*Orientation Distribution Function*), conforme apresentado nas Figuras 3-6, onde DL e DT representam, respectivamente, as direções longitudinal e transversal à direção de laminação.

Os materiais apresentam textura cristalográfica $\langle 111 \rangle // DN$, onde DN representa a direção normal à direção de laminação (ver Figuras 3-6), denominada fibra DN, com grande intensidade, o que é típico de alto grau de redução a frio (77%). A intensidade da fibra $\langle 111 \rangle // DN$ é maior para o aço Ti 1. Além disso, os outros aços (Ti 2, Nb-Ti 1 e Nb-Ti 2) apresentam o componente $\langle 110 \rangle // DL$ em maior proporção, devido aos efeitos de variação de composição química e ciclos térmicos de recozimento.

Também é verificada a orientação denominada cubo, $\{001\} \langle uvw \rangle$, porém em quantidade muito reduzida, conforme o aço (Figuras 3-6).

Na Figura 4 está assinalado um fato interessante: a existência de um grão poligonal com forma geométrica bem definida, referente a um pentágono. Outro fato é que, para os quatro aços, considerando também todos os mapas de orientação obtidos nas varreduras das amostras, há grãos com coloração amarela bem nítida, representativos da família de planos $\{210\}$.

3.3 Propriedades Mecânicas

A Tabela 5 apresenta as propriedades mecânicas referentes aos aços IF, conforme o tipo e a temperatura de recozimento.

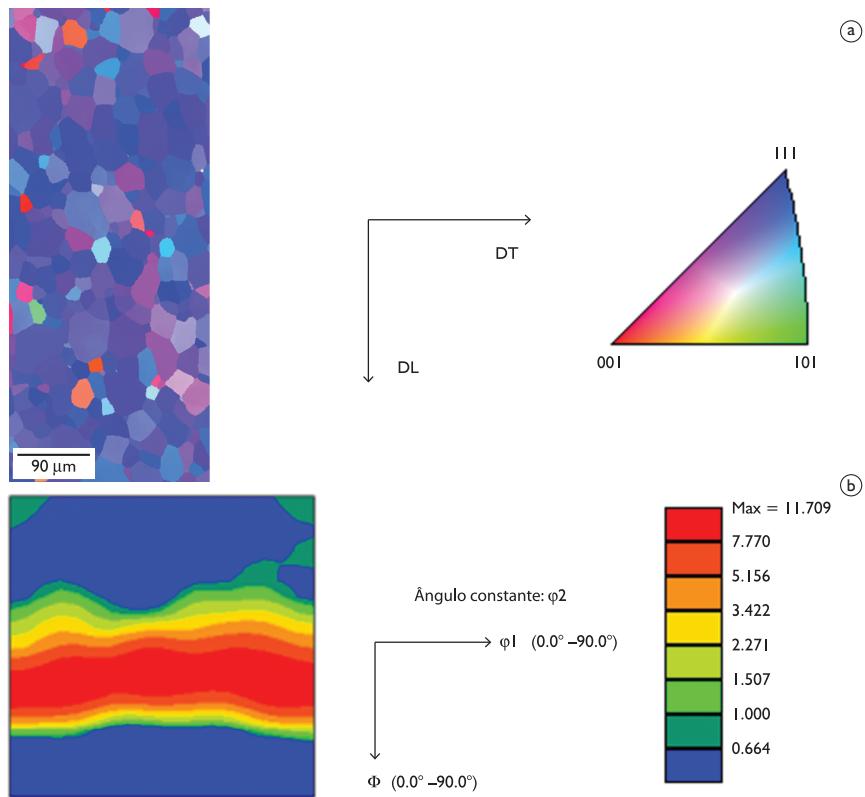


Figura 3. Textura cristalográfica do aço Ti 1, com temperatura de recozimento de 860°C. Em (a) mapa de orientação; e (b) ODF, segundo notação de Bunge com $\varphi_2 = 45^\circ$.

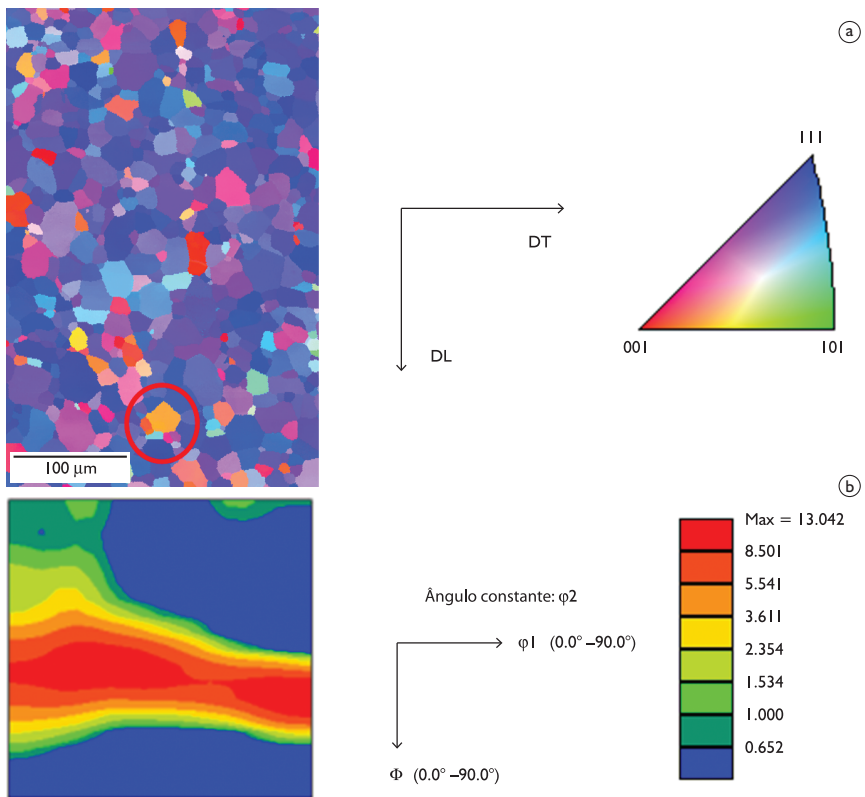


Figura 4. Textura cristalográfica do aço Ti 2, com temperatura de recozimento de 760°C. Em (a) mapa de orientação; e (b) ODF, segundo notação de Bunge com $\varphi_2 = 45^\circ$. Detalhe para a marcação assinalada na Figura 4a, onde se destaca um grão com forma poligonal bem definida, na geometria de um pentágono.

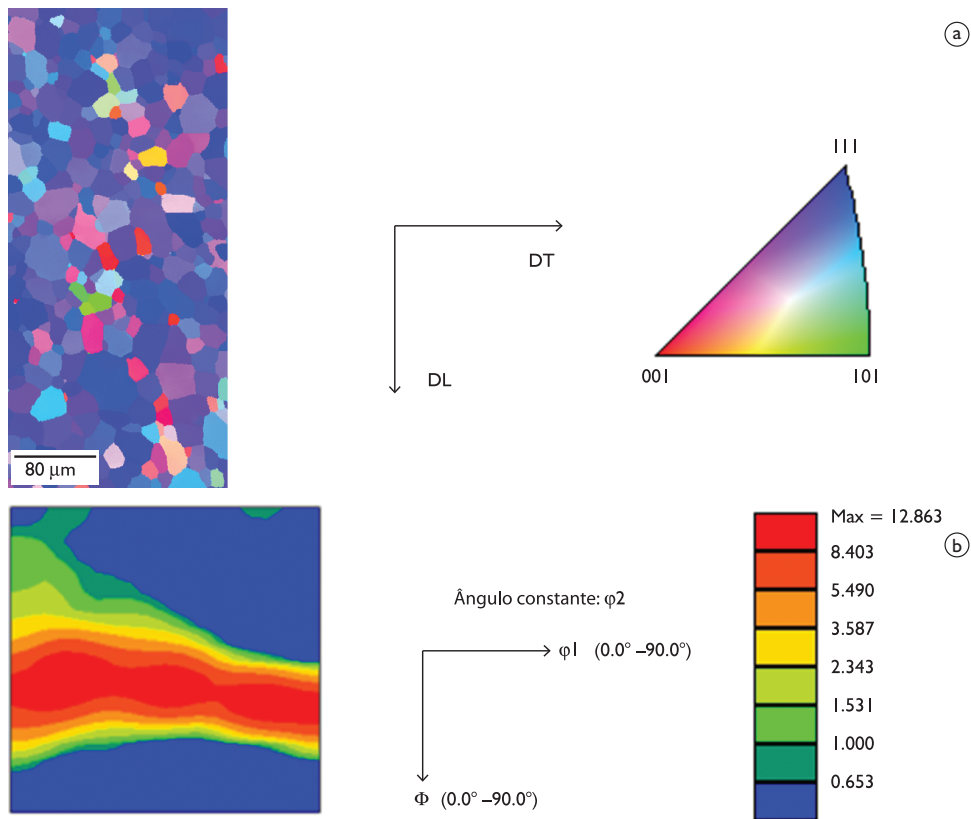


Figura 5. Textura cristalográfica do aço Nb-Ti 1, com temperatura de recozimento de 860°C. Em (a) mapa de orientação; e (b) ODF, segundo notação de Bunge com $\varphi_2 = 45^\circ$.

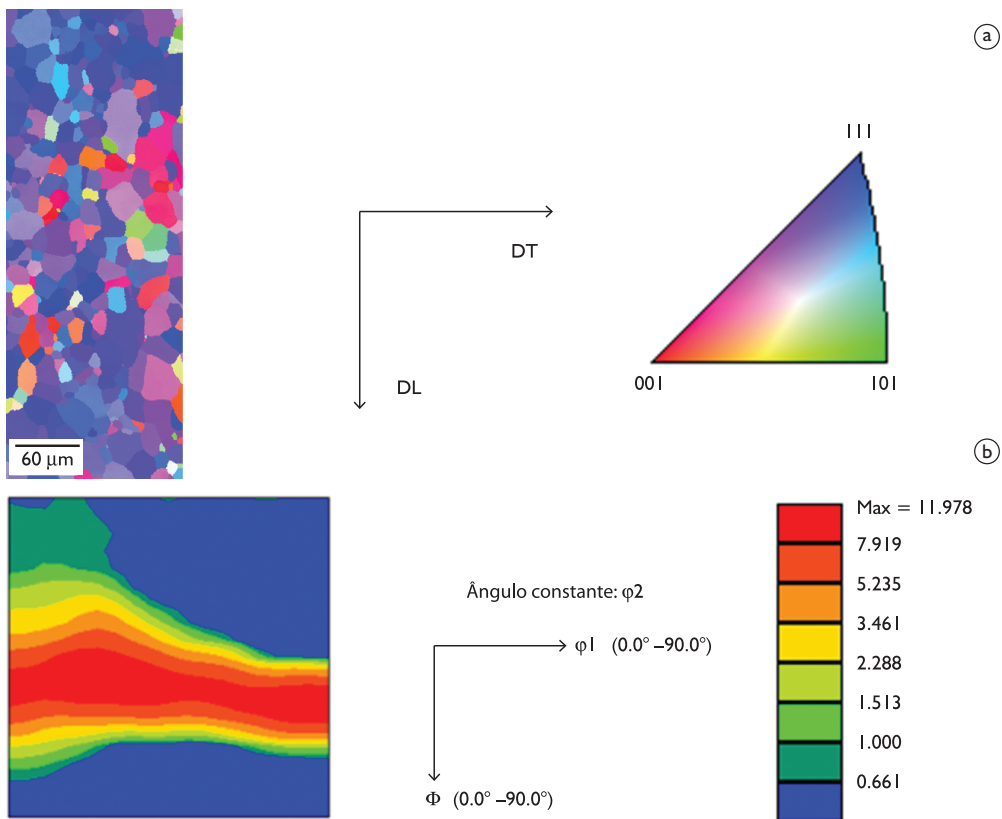


Figura 6. Textura cristalográfica do aço Nb-Ti 2, com temperatura de recozimento de 760°C. Em (a) mapa de orientação; e (b) ODF, segundo notação de Bunge com $\varphi_2 = 45^\circ$.

Tabela 5. Propriedades mecânicas obtidas por meio de ensaio de tração uniaxial em corpos de prova extraídos na direção transversal ao sentido de laminação

Aço	Propriedades mecânicas					
	LE (MPa)		LR (MPa)		AL (%)	
	Média	Desvio padrão da média	Média	Desvio padrão da média	Média	Desvio padrão da média
Ti 1	160	0,6	282	0,4	49	1,4
Ti 2	170	0,6	298	0,7	45	0,4
Nb-Ti 1	162	0,6	285	0,4	48	0,6
Nb-Ti 2	167	0,9	289	0,9	49	0,9

LE: Limite de escoamento; LR: Limite de resistência; AL: Alongamento total.

Tabela 6. Resultados para os coeficientes de anisotropia plástica e de encruamento

Aço	Propriedades mecânicas								
	R_{0°	R_{45°	R_{90°	\bar{R}	ΔR	n_{0°	n_{45°	n_{90°	\bar{n}
Ti 1-860°C	2,19	2,26	3,05	2,44	0,36	0,234	0,229	0,234	0,232
Ti 2-760°C	1,88	1,90	2,46	2,04	0,26	0,236	0,231	0,233	0,233
Nb-Ti 1-860°C	2,19	2,13	3,04	2,37	0,48	0,233	0,226	0,230	0,229
Nb-Ti 2-760°C	2,05	1,86	2,63	2,10	0,48	0,234	0,229	0,233	0,231

O aço Ti 1 apresenta menor resistência mecânica, conforme esperado.⁽⁴⁾ Com a redução da temperatura em 100°C, há um aumento de 10 MPa no limite de escoamento em relação aos aços IF Ti. Para os aços Nb-Ti, a diferença é de 5 MPa. Para a mesma temperatura de recozimento de 860°C, o aço Ti 1 apresenta resistência mecânica ligeiramente menor que aço Nb-Ti 1, podendo ser classificadas como resistências similares. Já para a temperatura de 760°C, a situação é inversa, onde o aço Nb-Ti 2 apresenta menor resistência. A diferença neste caso é maior, quando comparada com a temperatura de 860°C.

Para os aços IF Ti, a maior diferença entre as propriedades mecânicas, quando comparados com os aços Nb-Ti, está associada à maior variação no tamanho de grão ferrítico e na intensidade dos grãos com orientação $\langle 110 \rangle // DL$ e ainda outras orientações existentes.

O comportamento inverso para a temperatura de 760°C talvez pode ser justificado pelos teores mais elevados de alguns elementos para ao aço Ti 2: 4 ppm para carbono, 10 ppm para manganês, 10 ppm para silício, 30 ppm para fósforo, 26 ppm para enxofre e 190 ppm para alumínio.

A Tabela 6 apresenta os resultados das propriedades mecânicas indicativas da conformabilidade dos aços.

Todos os aços IF apresentam excelente conformabilidade, indicado pelos altos valores verificados para os coeficientes de anisotropia normal e de encruamento normal. Os valores de anisotropia plástica normal acima de 2,0 chegando até quase 2,5 são indicativos de ótimo desempenho em processos de estampagem profunda,⁽⁵⁾ onde é requerida resistência à deformação normal ao plano da chapa, com aplicação típica no segmento automotivo.

A anisotropia planar observada é baixa. Tais características são oriundas da textura cristalográfica $\langle 111 \rangle // DN$ verificada anteriormente para os aços. Apresentam grande capacidade de deformação uniforme (capacidade de encruamento) expressa pelos valores dos coeficientes de encruamento.

Pode-se notar que há um efeito da variação de 100°C na temperatura de recozimento na anisotropia plástica, para ambos os tipos de aços IF. A maior temperatura de 860°C promove incrementos nos valores de anisotropia plástica, o que gera ganhos de conformabilidade, em termos de estampagem profunda. Os incrementos observados são maiores para o aço IF Ti. Para os dois tipos de aços IF, existe um efeito de aumento nos referidos incrementos de R conforme aumenta o ângulo de medição. Verifica-se que não há diferença relevante entre os aços IF Ti e Nb-Ti para mesmas temperaturas de recozimento.

4 CONCLUSÕES

Em termos microestruturais, a maior temperatura de recozimento proporciona maior tamanho de grão ferrítico, para ambos os aços IF, sendo que, para o aço IF Ti, a diferença é maior. Para uma mesma temperatura, o aço IF Ti apresenta maior tamanho de grão, também conforme esperado. A variação de tamanho de grão não é significativa: para a numeração ASTM, a diferença entre o maior e o menor valores, considerando os quatro aços analisados, é de uma unidade.

A textura cristalográfica dos aços é representada pela fibra DN, onde os grãos apresentam a orientação $\langle 111 \rangle // DN$. O aço IF Ti com temperatura de recozimento de 860°C apresenta maior quantidade de grãos com orientações concentradas em torno da fibra DN. Já o aço IF Ti recozido a 760°C e os aços IF Nb-Ti, processados com as duas temperaturas, exibem comportamento similar, onde é observada certa retenção da fibra DL, porém com curvas de isodensidade com baixa intensidade. Também são observadas orientações cubo na face para os quatro aços, em diferentes proporções, conforme tipo de aço e temperatura de recozimento.

Os diferentes ciclos térmicos promovem variação na resistência mecânica dos aços. Para um mesmo tipo de aço IF, a menor temperatura de recozimento aumenta a resistência mecânica, em comparação aos aços processados com temperatura de 860°C. O efeito da composição química age conforme esperado para a temperatura de 860°C, onde o aço IF Ti apresenta menor resistência; porém, para 760°C, o aço Nb-Ti apresenta menores valores de limite de escoamento e limite de resistência, acompanhado de maior alongamento total. Isso pode estar relacionado com os maiores teores de elementos endurecedores por solução sólida verificados para o aço Ti 2, comparado com o aço Nb-Ti 2. Todos os aços apresentam excelentes valores para os coeficientes de anisotropia

plástica, normal e planar, e ainda para o coeficiente de encruamento, o que indica alto grau de conformabilidade. O maior ciclo térmico promove aumento nos valores de R, para as três direções de medição utilizadas, em ambos os aços IF Ti e Nb-Ti. Para uma mesma temperatura, tanto 860°C quanto 760°C, não há efeito significativo na anisotropia plástica quando comparados os tipos de aços IF.

Assim, os resultados mostram de forma geral que não há diferença significativa nas características dos aços IF Ti e Nb-Ti quanto à variação de 100°C no ciclo de recozimento, de 860°C para 760°C. Isso se reflete numa variação pequena de propriedades mecânicas e os coeficientes de anisotropia plástica e de encruamento, indicativos da conformabilidade do aço, são excelentes mesmo para os aços processados com a menor temperatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao grupo técnico dos laboratórios do Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, relacionados às análises realizadas e à disponibilização de sua infraestrutura. M. F. de Campos e J. F. C. Lins agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ.

REFERÊNCIAS

- DIAS, F. M. S. et al. Contribuição ao desenvolvimento do aço IF galvanizado, da classe EDDQ, com teor de carbono super ultra baixo e estabilizado ao titânio. In: CONGRESSO ABM INTERNACIONAL, 65., 2010, Rio de Janeiro. *Proceedings...* São Paulo: ABM, 2010. p. 3731-41.
- FOLEY, R.; MATLOCK, D.; KRAUSS, G. Metallurgical review of process for obtaining strength and r-value in galvanized sheet steels. In: MWSP CONFERENCE, 42. *Proceedings...* Warrendale: Iron and Steel Society, 2000. v. 38, p. 455-68.
- TITHER, G.; STUART, H. Automotive steels-recent developments in steels used in the manufacture of automobiles and trucks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HSLA STEELS, 3., 1995, Beijing, China. *Proceedings...* Beijing: China Science and Technology Press, 1995. p. 22-35.
- PRADHAN, R. Cold-rolled interstitial-free steels: a discussion of some metallurgical topics. In: INTERNATIONAL FORUM FOR PHYSICAL METALLURGY OF IF STEELS, 1994, Toquio. *Proceedings...* [S.n.t.] p.165-78.
- HOSFORD, H. F.; CADDEL, R. M. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511811111>

Recebido em: 01/04/2012

Aceito em: 18/10/2012