

# EFEITO DO CICLO TÉRMICO SOBRE A TEXTURA E CONFORMABILIDADE DE AÇOS IF ESTABILIZADOS AO Ti E Nb-Ti<sup>1</sup>

Fabio Moreira da Silva Dias<sup>2</sup>  
Fabiano Augusto Vallim Fonseca<sup>3</sup>  
Christien Guisard Hauegen<sup>4</sup>  
Jefferson Fabricio Cardoso Lins<sup>5</sup>  
Marcos Flavio de Campos<sup>5</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise em relação à textura cristalográfica e 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. Foram avaliadas quais características associadas aos materiais interferem de forma mais pronunciada na variação das propriedades mecânicas. Dessa forma, totalizam quatro materiais analisados. A textura cristalográfica das amostras foi determinada por meio da técnica de Difração de Elétrons Retro-espalhados (EBSD), associada ao MEV. A intensidade da orientação  $\langle 111 \rangle // DN$  foi avaliada e comparada entre os aços IF. Foi realizada caracterização metalográfica dos materiais, com medição de tamanho de grão ferrítico, com auxílio de microscopia ótica. O comportamento mecânico dos materiais foi caracterizado através de ensaios mecânicos de tração uniaxial na base 80 mm.

**Palavras-chave:** Aços IF; Ciclo térmico de recozimento; Textura cristalográfica; Comportamento mecânico.

## EFFECT OF THE THERMAL CYCLE ON TEXTURE AND FORMABILITY 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. The 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. Thus, four samples were analyzed. The more relevant characteristics of mechanical properties were evaluated. The crystallographic texture of the samples was determined by electron diffraction technique of back-scattering (SEM-EBSD). The intensity of orientation  $\langle 111 \rangle // ND$  was evaluated and compared. Metallographic characterization was done, and the ferritic grain size was measured with optical microscopy. The mechanical behavior of materials was characterized in the tensile test with 80 mm gauge length.

**Key words:** IF steel; Thermal cycle annealing; Crystallographic texture; Mechanical behaviour.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP.

<sup>2</sup> Mestrando do Curso de Engenharia Metalúrgica da EEIMVR – Universidade Federal Fluminense.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, M.Sc. CSN - Companhia Siderúrgica Nacional.

<sup>4</sup> Graduando do Curso de Engenharia Metalúrgica da EEIMVR – Universidade Federal Fluminense.

<sup>5</sup> Professor Adjunto da EEIMVR – Universidade Federal Fluminense.

## 1 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 ( $\{111\} \langle u \ v \ w \rangle$ ) 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 elementos intersticiais, C e N, estão estabilizados na forma de precipitados, o material não apresenta envelhecimento por deformação (*strain aging*). Isso é devido a adição de elementos estabilizadores, como titânio e nióbio.<sup>(1)</sup>

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 Retro-espalhados (*EBS*D), com auxílio do MEV, caracterização microestrutural, com determinação de tamanho de grão ferrítico, por meio de microscopia ótica e propriedades mecânicas, mediante realização de ensaios de tração uniaxial na base 80 mm.

### 1.1 Aços IF (*Interstitial Free*)

A adição dos elementos estabilizantes necessita ser bem definida, através de cálculos estequiométricos. A condição para uma completa estabilização dos aços IF ao titânio pode ser expressa pela Equação 1.<sup>(2,3)</sup>

$$Ti_{estab} = 4\% C + 3,42\% N + 1,5\% S \quad (1)$$

O aumento na concentração de Ti confere melhorias nas propriedades de conformabilidade dos aços IF. Assim, quando se trabalha com aços IF ao titânio, é usual acrescentar mais Ti que o necessário para promover a completa estabilização dos elementos intersticiais. A Equação 2 apresenta como é calculada a quantidade de Ti em excesso, representada por  $Ti_{exc}$ .<sup>(2,3)</sup>

$$Ti_{exc} = Ti_{total} - Ti_{estab} = Ti_{total} - (4\% C + 3,42\% N + 1,5\% S) \quad (2)$$

O ponto ótimo refere-se a 0,04% de Ti em solução.<sup>(4)</sup> No caso de aços IF Nb-Ti, para a completa estabilização dos elementos intersticiais, a adição de Ti é feita de forma que se combine apenas com N e S, não existindo Ti em excesso no aço. Assim, o elemento Nb estabiliza completamente o C, de acordo com as Equações 3 e 4.<sup>(3)</sup>

$$Ti_{estab} = 3,42N + 1,5S \quad (3)$$

$$Nb_{estab} = 7,75C \quad (4)$$

A importância de uma correta estequiometria para esse tipo de aço IF está no fato de que se houver Ti em excesso, o mesmo irá se combinar com o C presente até que todo o teor de Ti adicionado seja consumido, devido a maior estabilidade apresentada pelo TiC em relação ao NbC. Assim, quando o teor de Ti se esgotar, o restante do processo de fixação do C será realizado pelo Nb. Como nem todo Nb será utilizado para estabilizar o C, restará Nb em solução sólida. A Equação 5 apresenta o cálculo da quantidade de Nb em excesso, representado por  $Nb_{exc}$ .

$$Nb_{exc} = Nb_{total} - 7,75 \left( \%C - \frac{(\%Ti - (3,42\%N + 1,5\%S))}{4} \right) \quad (5)$$

O excesso de Nb em solução sólida acarreta, ao contrário do Ti, em um efeito prejudicial nas propriedades de conformabilidade, pois Nb em excesso aumenta a resistência mecânica do material.

O nióbio apresenta papel de refinador de grão. Os precipitados NbC são mais finos em comparação a todos os outros precipitados encontrados nos aços IF. Dessa forma, a distribuição dessas partículas na matriz microestrutural restringe o crescimento de grão ferrítico, através de uma barreira ao avanço dos contornos dos grãos recristalizados, o que implica em um aumento da resistência mecânica dos aços IF.

## 2 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

Através da combinação de variação de composição química, tipos de aços IF, e diferentes temperaturas de recozimento, totalizam quatro materiais distintos. A Tabela 1 apresenta as composições químicas dos aços utilizados neste trabalho.

**Tabela 1.** Composições químicas dos aços IF utilizados neste trabalho.

Aço	Composição Química (% em Peso)								
	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

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 referem-se a placas provenientes de corridas vazadas em seqüência.

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

A seguir estão expostas 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 criar uma diferença significativa (100°C) que causasse efeitos nas características e propriedades do aços. 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.

As Tabelas 2 e 3 apresentam uma síntese dos parâmetros utilizados.

**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

Pode-se notar que as temperaturas médias obtidas correspondem exatamente àquelas visadas, com desvios padrão mínimos. Apenas na zona de aquecimento, para o teste realizado com temperatura de 760°C, a média ficou um pouco acima do visado, porém da ordem de 6°C e 4°C, respectivamente para os aços Ti 2 e Nb-Ti 2, o que é insignificante em escala industrial.

Conforme apresentado pela Tabela 3, também existe um controle rigoroso dos demais parâmetros de processo da linha de galvanização, onde não há variação na velocidade de processo, indicado pelas médias coincidentes com o valor visado e desvio padrão zero. Para a laminação de encruamento, os valores médios observados também referem-se aos visados, associados a desvios padrão mínimos.

## 2.2.2 Experimentos em escala laboratorial

Com o intuito de realizar uma análise comparativa entre as propriedades apresentadas pelos aços IF, e assim, correlacionar os resultados obtidos para avaliar quais características afetam de forma mais significativa a conformabilidade, foram empregadas as técnicas descritas a seguir.

### 2.2.2.1 Caracterização microestrutural

Foram realizadas análises metalográficas através de microscopia ótica, com objetivo de avaliar a microestrutura dos aços e determinar os tamanhos de grão ferrítico apresentados por estes. Para isso, foram empregados os procedimentos usuais de preparação metalográfica, sendo estes lixamento, polimento e imersão no reagente adequado para observação da microestrutura. Foram utilizados os reagentes Nital 3% e Klemm's de forma combinada, sendo que inicialmente as amostras foram imersas na solução de Nital 3% de 40 s a 50 s. Depois, polidas em alumina 0,5  $\mu\text{m}$  e por fim, imersas seguidamente em Nital 3% e Klemm's, também nos tempos de 40 s

a 50 s. O reagente Klemm's é mais indicado para aços ULC, pois interage com o interior dos grãos, já que os contornos apresentam baixa concentração de átomos.

### 2.2.2.2 Avaliação da textura cristalográfica

Para determinação da textura cristalográfica foi utilizada a técnica EBSD, com auxílio do MEV. O objetivo é avaliar se há variação significativa na intensidade da orientação  $\langle 111 \rangle // \text{DN}$  quando comparado tipo de aço e ciclo térmico. A preparação metalográfica prévia para EBSD consiste no procedimento de polimento adequado, a fim de evitar deformações e formação de filmes na superfície da amostras. Portanto, 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 destilada, 500 ml de detergente neutro e 50 ml de sílica coloidal OPU. A cada intervalo de 15 min, o polimento era interrompido para imersão das amostras em solução de Nital 3%, para remoção das possíveis camadas de sílica aderidas na superfície das amostras. O tempo de imersão variou de acordo com o ciclo de polimento, onde tem-se: 1º ciclo – 40 s; 2º ciclo – 30 s; 3º ciclo – 20 s; e 4º ciclo – de 10 s a 15 s. Os números de ciclos de polimentos e/ou tempos de imersão das amostras para alguns casos foram ajustados conforme necessário para obtenção de uma condição superficial mais adequada. A Tabela 4 mostra os parâmetros empregados para o polimento automático.

**Tabela 4.** Parâmetros adotados no polimento automático das amostras

Parâmetros de Polimento	
Carga Aplicada nas Amostras	30 N
Distribuição de Cargas	Em cada Amostra
Velocidade do Prato de Polimento	300 rpm
Velocidade do Porta Amostras	60 rpm
Sentido de Rotação	Contrário

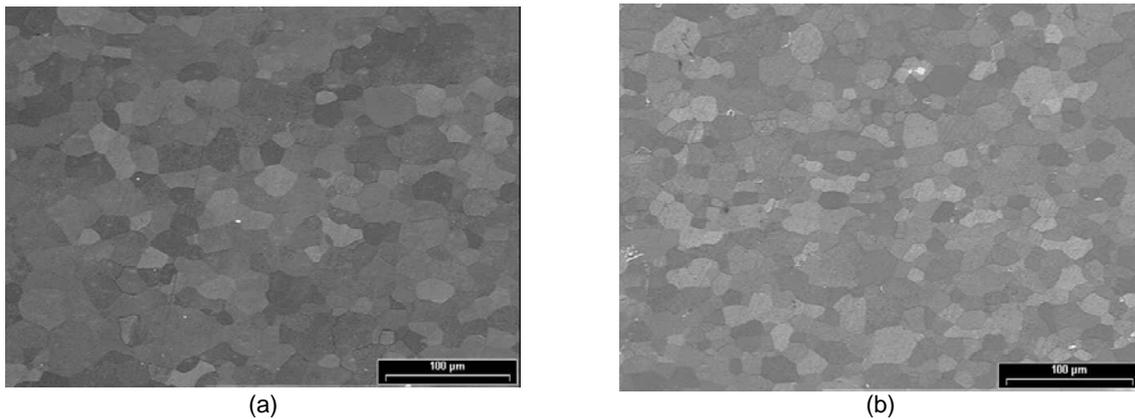
### 2.2.2.3 Ensaios mecânicos

Foram realizados ensaios de tração uniaxial na base 80 mm para determinação das propriedades mecânicas. Também foram obtidos os coeficientes de anisotropia normal e planar e o coeficiente de encruamento. Para cada direção de ensaio, foram confeccionados 3 corpos de prova para obtenção de maior representatividade dos resultados. Também foram utilizados 3 corpos de prova para os ensaios de tração simples. Com isso, foram realizados ao todo 48 ensaios de tração.

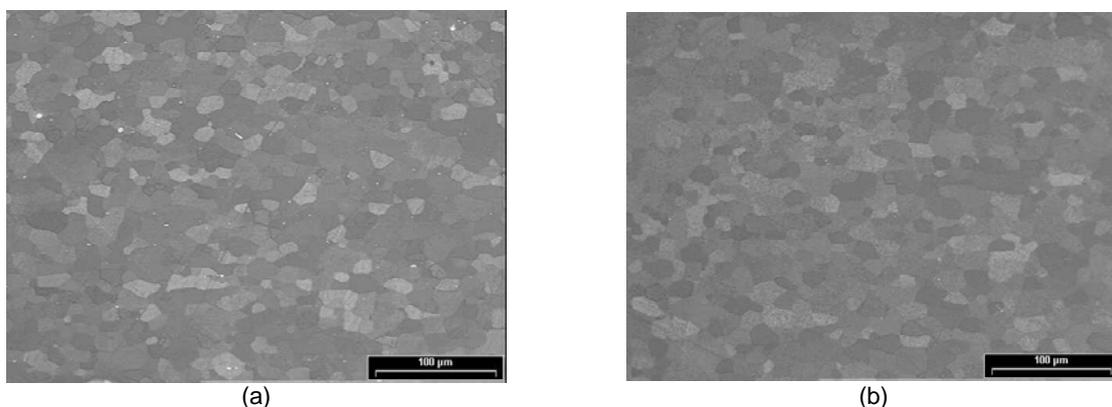
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Caracterização Microestrutural

As Figuras 1 e 2 apresentam as microestruturas dos aços IF após recozimento contínuo.

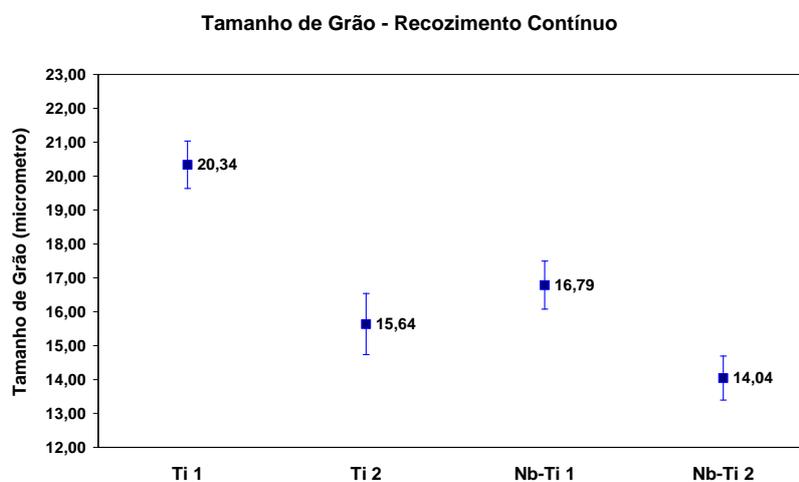


**Figura 1.** Aspecto microestrutural dos aços IF Ti, após recozimento contínuo, obtido por meio de microscopia ótica. Em (a) Ti 1, com temperatura de 860°C; e (b) Ti 2, com temperatura de 760°C. Aumento de 200x.



**Figura 2.** Aspecto microestrutural dos aços IF Nb-Ti, após recozimento contínuo, obtido por meio de microscopia ótica. Em (a) Nb-Ti 1, com temperatura de 860°C; e (b) Nb-Ti 2, com temperatura de 760°C. Aumento de 200x.

Nota-se para todos os aços uma matriz ferrítica composta por grãos com certa equiaxidade e com dimensões relativamente uniformes, para a maior parte dos grãos. A Figura 3 e a Tabela 5 apresentam os resultados de tamanho de grão, com suas respectivas amplitudes de dispersão (erro da média).



**Figura 3.** Tamanhos de grão ferrítico médios para os aços IF após recozimento contínuo nas respectivas temperaturas. A dispersão dos valores médios pode ser observada pelo desvio padrão da média.

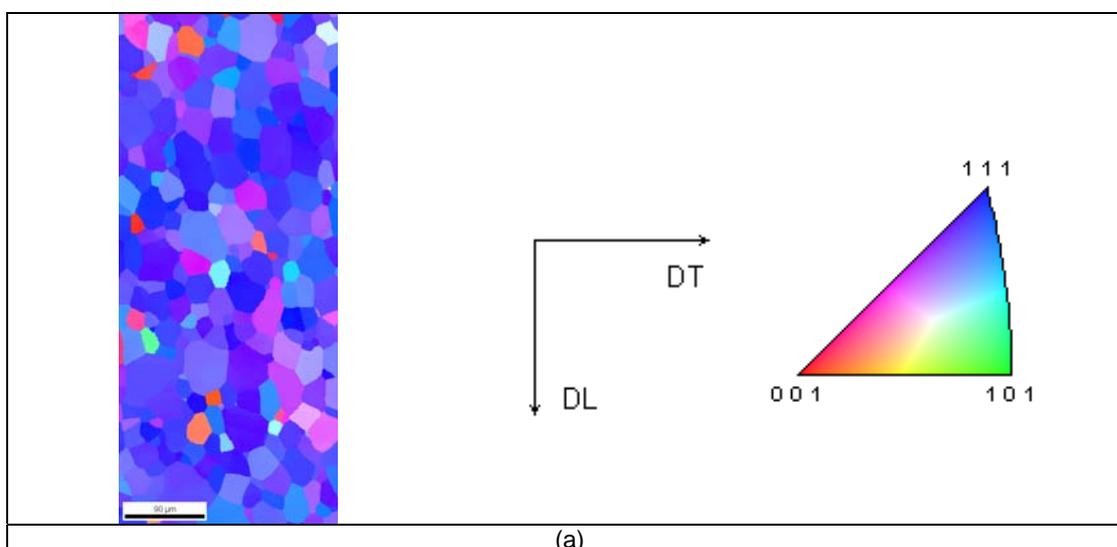
**Tabela 5.** Resultados de tamanho de grão para os aços IF, acompanhados dos respectivos números ASTM

Aço	Tamanho de Grão		
	d (µm)	Desvio Padrão da Média	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

Os resultados estão condizentes. Para ambos os aços IF Ti e Nb-Ti, o ciclo térmico representado pela maior temperatura de recozimento, sendo esta 860°C, proporcionou maior tamanho de grão. Para o aço IF Ti, a diferença foi mais acentuada, em torno de 5 µm. Para uma mesma temperatura, tanto 860°C quanto 760°C, o aço IF Ti exibiu maior tamanho de grão. 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<sub>4</sub>C<sub>2</sub>S<sub>2</sub>, ambos mais grosseiros que o precipitado NbC. Tais partículas mais refinadas e distribuídas ao longo da matriz microestrutural do material funcionam como barreiras a 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, sendo a seguinte: 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.

### 3.2 Textura Cristalográfica

A textura cristalográfica dos aços IF foi determinada pela técnica EBSD, sendo assim, foram obtidos os mapas de orientação, os quais representam uma reconstrução gráfica da microestrutura referente à região analisada, por meio da diferença de orientação entre os grãos adjacentes. A textura cristalográfica está representada por ODF (*Orientation Distribution Function*) (Figuras 4 a 7).



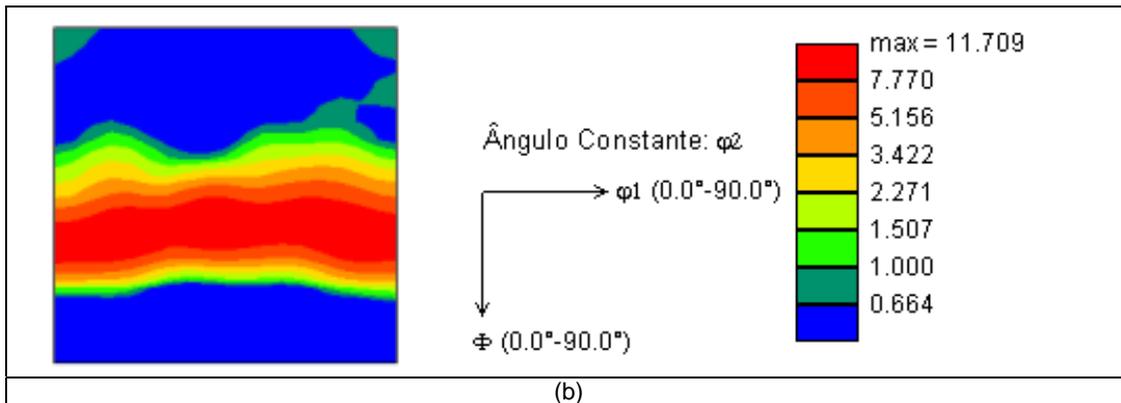


Figura 4. Textura cristalográfica do aço Ti 1, com temperatura de recozimento de 860°C. Em (a) mapa de orientação; e (b) ODF, segundo notação de Bunge com  $\varphi_2 = 45^\circ$ .

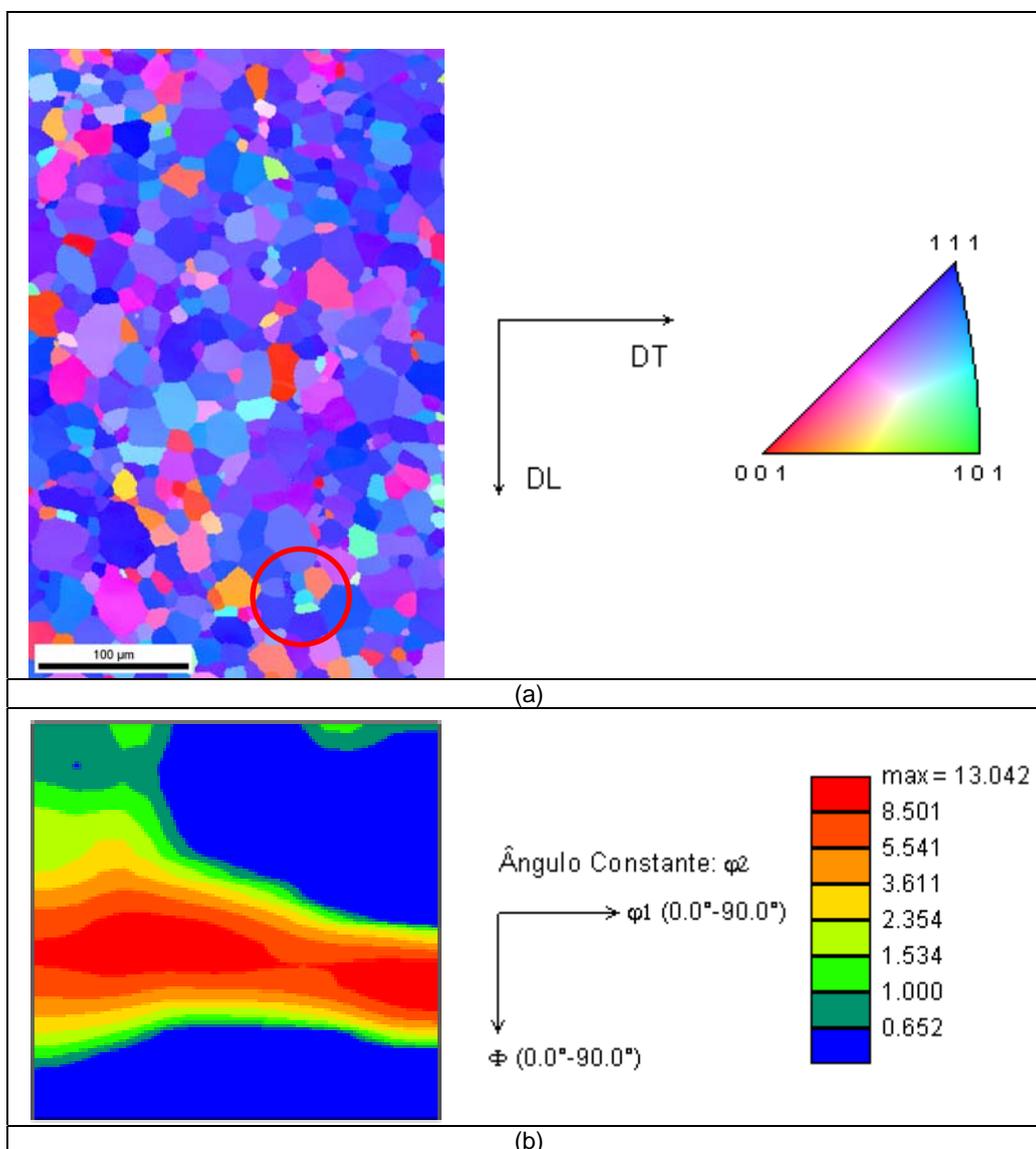


Figura 5. Textura cristalográfica do aço Ti 2, com temperatura de recozimento de 760°C. Em (a) mapa de orientação; e (b) ODF, segundo notação de Bunge com  $\varphi_2 = 45^\circ$ . Detalhe para a marcação assinalada na Figura 5a, onde verifica-se um grão com forma poligonal bem definida, na geometria de um pentágono.

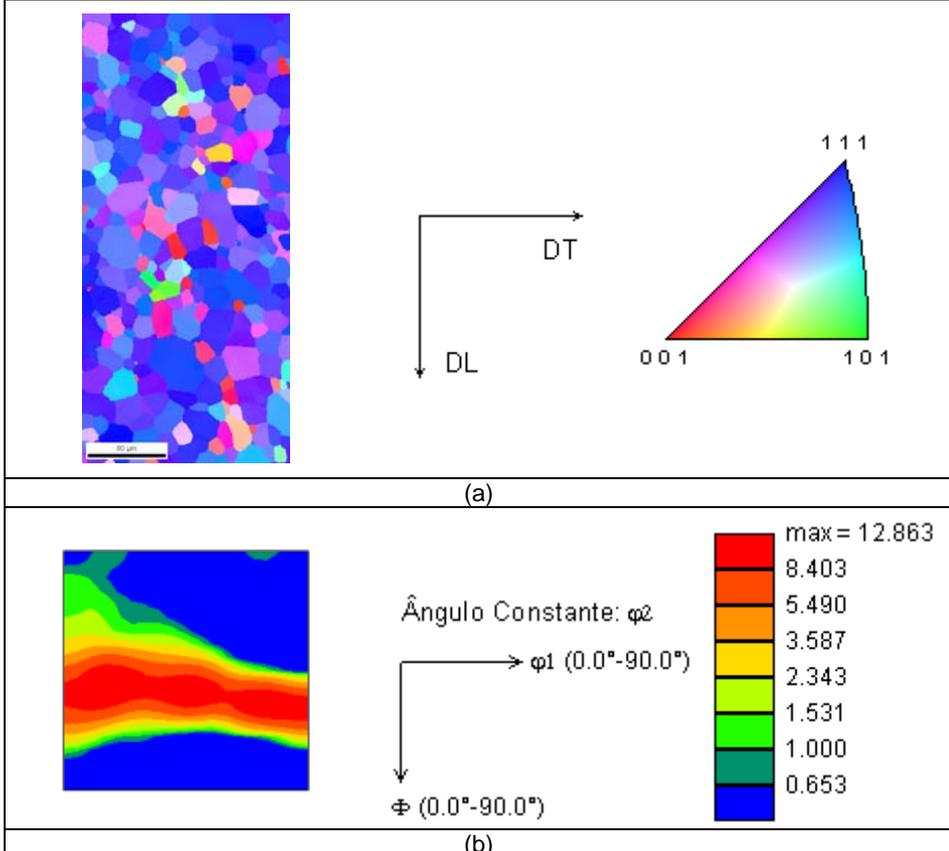


Figura 6. Textura cristalográfica do aço Nb-Ti 1, com temperatura de recozimento de 860°C. Em (a) mapa de orientação; e (b) ODF, segundo notação de Bunge com  $\varphi_2 = 45^\circ$

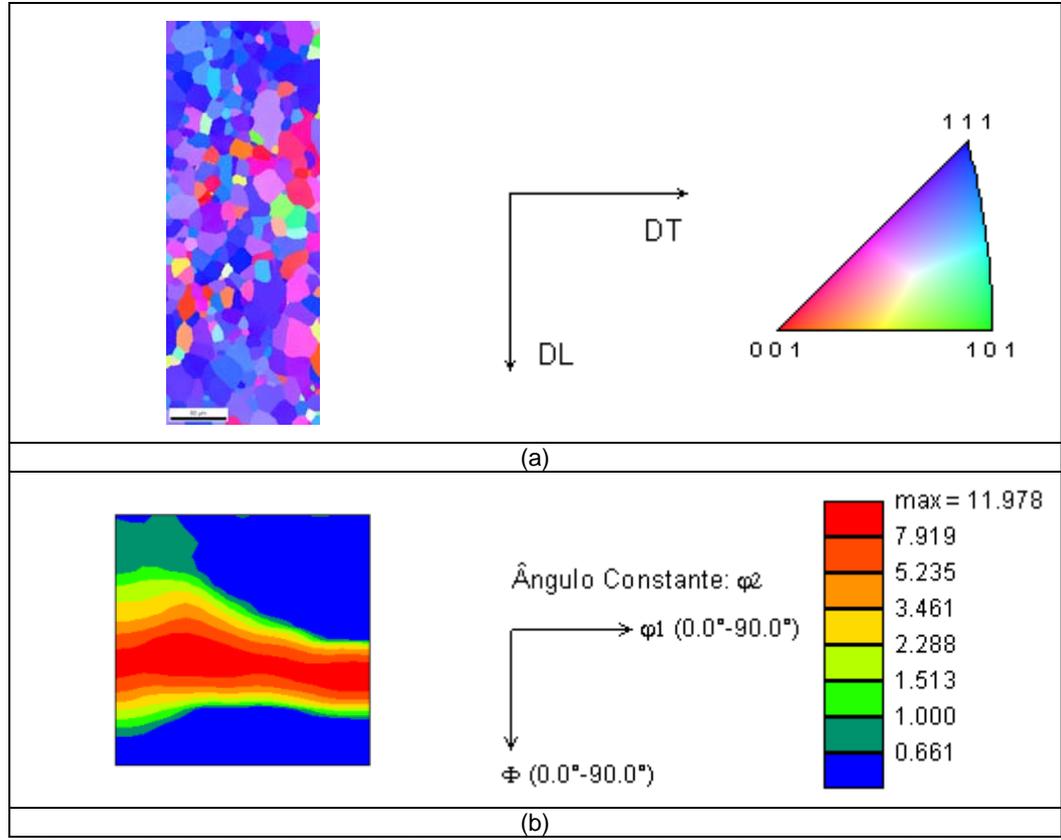


Figura 7. Textura cristalográfica do aço Nb-Ti 2, com temperatura de recozimento de 760°C. Em (a) mapa de orientação; e (b) ODF, segundo notação de Bunge com  $\varphi_2 = 45^\circ$ .

Os materiais apresentam textura cristalográfica  $\langle 111 \rangle // \text{DN}$ , denominada fibra DN, com grande intensidade, conforme esperado, pois tratam-se de chapas de aço deformadas a frio com alto grau de redução (77%). Os aços, de maneira geral, após laminação a quente, apresentam grãos com intensa aleatoriedade, podendo haver componentes leves de textura, oriundas da deformação ou recristalização da austenita. Quando laminados a frio, a textura é representada pelas fibras DL e DN,  $\{h\ k\ l\} \langle 110 \rangle$  e  $\{111\} \langle u\ v\ w \rangle$  respectivamente. Durante o recozimento, ocorre a intensificação da fibra DN em relação à fibra DL e demais orientações existentes, uma vez que durante a deformação a frio os grãos referentes à fibra DN acumulam maior nível de energia, o que reduz sua temperatura de recristalização. Por recristalizarem primeiro que o restante (grãos com as outras orientações apresentam maiores temperaturas de recristalização), seus tamanhos são maiores e, portanto, intensificam-se durante a etapa de crescimento de grão.

A curva de isodensidade de maior frequência sobrepõe-se aos planos com orientações  $\{111\}$ , segundo o ábaco referente à notação de Bunge para  $\varphi_2 = 45^\circ$ , e estende-se por  $\varphi_1$  de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , ou seja, exibe os referidos planos  $\{111\}$  dispostos aleatoriamente em relação à direção de laminação.

Para o aço IF Ti, processado no recozimento contínuo a  $860^\circ\text{C}$  (Ti 1) (Figura 4), as demais componentes de textura com menor frequência referem-se aos planos existentes para  $\Phi$  aproximadamente de  $35^\circ$  a  $70^\circ$ , por exemplo,  $\{\bar{1}\ 12\}$ ,  $\{\bar{2}23\}$ ,  $\{\bar{3}32\}$  e  $\{\bar{2}21\}$ , orientados aleatoriamente em relação a direção de laminação, pois a faixa de  $\varphi_1$  estende-se de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Grãos representativos da fibra DL são observados no intervalo de  $\Phi$  citado anteriormente, para  $\varphi_1 = 0^\circ$ , com frequências variáveis, sendo que a maior intensidade corresponde aos grãos com orientação  $\{111\} \langle 110 \rangle$ , que podem ser classificados tanto como fibra DN e DL. Também a orientação denominada cubo na face é verificada, associada à fibra DL, sendo  $\{001\} \langle 110 \rangle$ , porém em quantidade muito reduzida, conforme escala de frequência. Pode-se notar também pela análise da ODF um efeito simétrico das curvas de isodensidade em termos de planos, ao redor dos planos  $\{111\}$ , onde verifica-se um gradiente de intensidade. Para cada família de planos existentes, conforme já citados, todas as direções associadas aos mesmos apresentam mesma frequência, o que gera o efeito de faixas observado.

Para o aço Ti 2, evidencia-se o efeito da redução do ciclo de recozimento em  $100^\circ\text{C}$  (temperatura de  $760^\circ\text{C}$ ), onde, pela análise da respectiva ODF (Figura 5), existe uma abertura das faixas de isodensidade a partir de  $\varphi_1$  igual a  $45^\circ$  até  $0^\circ$ . Assim, orientações antes não observadas para o material referente ao ciclo de  $860^\circ\text{C}$  agora são evidenciadas. A fibra DL ocorre em maior escala, extendendo-se por quase toda a amplitude de  $\Phi$ , portanto, com maior diversidade de planos associados. Os grãos pertencentes à fibra DL com maior frequência apresentam orientação  $\{111\} \langle 110 \rangle$ . A maior diversidade de orientações e o aumento da intensidade da fibra DL estão relacionados à redução da temperatura de recozimento, em virtude da menor energia térmica fornecida, desfavorecendo a cinética de crescimento dos grãos recristalizados. Para a temperatura de  $760^\circ\text{C}$ , seria necessário maior tempo para obtenção de grãos mais grosseiros, conforme as leis da recristalização. Uma vez que o experimento em escala industrial corresponde a um tratamento térmico isócrono (mesmas velocidades de processo), obtém-se menor tamanho de grão ferrítico, conforme observado anteriormente, aliado a maior diversidade de

orientações cristalográficas, pois não houve tempo para uma maior intensificação dos grãos com orientação  $\langle 111 \rangle // DN$ . Esse efeito pode ser observado, qualitativamente, por comparação dos respectivos mapas de orientação (Figuras 4a e 5a). A orientação cubo na face também é observada, porém, com maior intensidade, para  $\Phi = 0^\circ$  estendendo-se ao longo dos intervalos  $0^\circ \leq \varphi_1 \leq 30^\circ$  e  $60^\circ \leq \varphi_1 \leq 90^\circ$ . Destaque para as orientações  $\{100\} \langle \bar{1} \bar{2} 0 \rangle$ ,  $\{100\} \langle \bar{1} \bar{3} 0 \rangle$ ,  $\{100\} \langle \bar{1} \bar{2} 0 \rangle$  e  $\{100\} \langle \bar{1} \bar{3} 0 \rangle$ .

A textura para o aço Nb-Ti 1, recozido a  $860^\circ\text{C}$ , é muito similar aquela observada para o aço Ti 2, recozido a  $760^\circ\text{C}$ . Esse efeito talvez pode ser explicado por uma possível equivalência de efeitos: aço IF Ti com baixa temperatura de recozimento e aço IF Nb-Ti com alta temperatura de recozimento. O aço IF Ti com recozimento em maiores temperaturas permite que os grãos com orientação  $\{111\} \langle u v w \rangle$  intensifiquem-se em relação aos outros, incluindo a fibra DL, em decorrência de uma maior cinética de recristalização e crescimento. Para menores temperaturas, esse efeito é reduzido. Para o aço IF Nb-Ti recozido em  $860^\circ\text{C}$ , o efeito da maior energia térmica fornecida pode ter sido suprimido pela existência dos carbonetos NbC, mais finos que dificultam a migração dos contornos de alto ângulo. Assim, cria-se um efeito de equivalência. Isso corrobora com os resultados de tamanho de grão expostos anteriormente. Observa-se uma menor ocorrência de grãos com textura cubo na face.

O aço Nb-Ti 2, onde foi utilizada temperatura de recozimento de  $760^\circ\text{C}$ , da mesma forma que os aços Ti 2 e Nb-Ti 1, apresenta textura  $\langle 111 \rangle // DN$ , com retenção de orientações referentes a fibra DL. A orientação cubo na face ocorre em menor escala, quando comparado com os outros três aços analisados.

Os mapas de orientação evidenciam os resultados das representações por ODF, onde grãos com diferentes colorações são observados, representativos das orientações observadas, mas em menor escala em comparação com grãos de tonalidade referente à fibra DN, conforme já discutido.

Na Figura 5, um fato interessante está assinalado, sendo 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  $\{210\}$ , conforme triângulo estereográfico apresentado nas respectivas figuras.

Os mapas de orientação também mostram certo grau de alongamento de alguns grãos na direção de laminação. Isso é devido à redução de 1% na laminação de encruamento desses aços. Pelo fato da análise de textura ser realizada na superfície da chapa (ortogonalmente em relação ao plano da chapa), os grãos superficiais foram analisados, e assim, o efeito evidenciado.

### 3.3 Propriedades Mecânicas

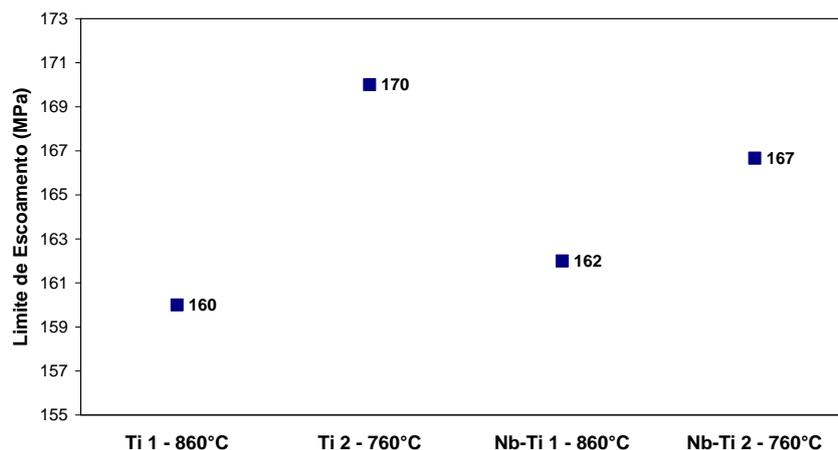
A Tabela 6 e a Figura 8 apresentam as propriedades mecânicas referentes aos aços IF, conforme tipo e temperatura de recozimento.

**Tabela 6.** 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 (%)
Ti 1	160	282	49
Ti 2	170	298	45
Nb-Ti 1	162	285	48
Nb-Ti 2	167	289	49

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

**Efeito do Tipo de Aço e Ciclo de Recozimento**



**Figura 8.** Valores médios para o limite de escoamento dos aços IF.

A análise da Tabela 6 e da Figura 8 permite verificar que o aço Ti 1 apresenta menor resistência mecânica, conforme esperado. Com a redução da temperatura em 100°C, houve um aumento de 10 MPa no limite de escoamento para o aço IF Ti. Para os aços Nb-Ti, a diferença foi de 5 MPa com a variação de temperatura. 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 classificados como resistências similares, em função do nível da diferença para as propriedades mecânicas (Tabela 6). 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 comparado 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 a maior variação no tamanho de grão ferrítico e na intensidade dos grãos com orientação <110>//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, tais como: 4 ppm para C, 10 ppm para Mn, 10 ppm para Si, 30 ppm para P, 26 ppm para S e 190 ppm para Al. Elementos como P, Si e Mn promovem grandes incrementos na resistência mecânica dos aços mesmo para pequenos aumentos nos seus teores em solução sólida. Também o fato de maiores teores dos elementos C e S acarreta em maior fração volumétrica de precipitados, tais como carbonetos, carbossulfetos e sulfetos, dependendo do tipo de aço e estequiometria do mesmo.

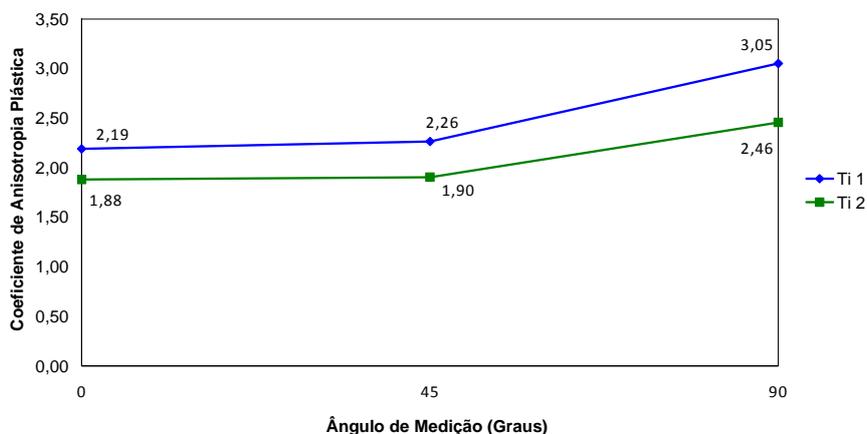
A Tabela 7 apresenta os resultados das propriedades mecânicas indicativas da conformabilidade dos aços.

**Tabela 7.** Resultados para os coeficientes de anisotropia plástica e de encruamento

Aço	Propriedades Mecânicas								
	$R_{0^\circ}$	$R_{45^\circ}$	$R_{90^\circ}$	$\bar{R}$	$\Delta R$	$n_{0^\circ}$	$n_{45^\circ}$	$n_{90^\circ}$	$\bar{n}$
Ti 1	2,19	2,26	3,05	2,44	0,36	0,234	0,229	0,234	0,232
Ti 2	1,88	1,90	2,46	2,04	0,26	0,236	0,231	0,233	0,233
Nb-Ti 1	2,19	2,13	3,04	2,37	0,48	0,233	0,226	0,230	0,229
Nb-Ti 2	2,05	1,86	2,63	2,10	0,48	0,234	0,229	0,233	0,231

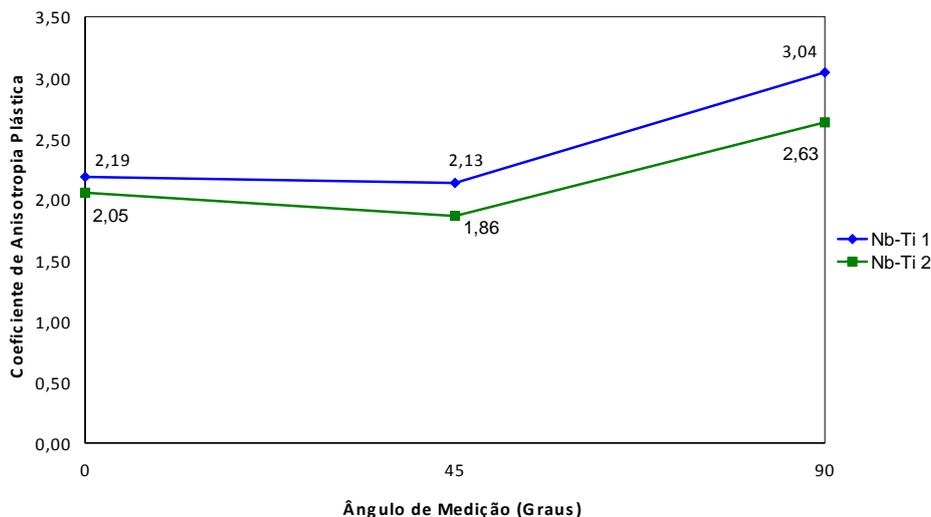
Todos os aços IF apresentam excelente conformabilidade, indicado pelos altos valores verificados para os coeficientes de anisotropia normal e de encruamento normal. Os valores de anisotropia plástica normal acima de 2,0 chegando até quase 2,5 são indicativos de ótimo desempenho em processos de estampagem profunda,<sup>(5)</sup> 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 <111>//DN verificada anteriormente para os aços. Apresentam grande capacidade de deformação uniforme (capacidade de encruamento) expressa pelos valores dos coeficientes de encruamento. As Figuras 9 e 10 mostram o comportamento da anisotropia plástica, em função do ângulo de medição, combinado com o efeito de variação do ciclo térmico de recozimento.

**Efeito da Temperatura - Aços IF Ti**



**Figura 9.** Efeito da variação de temperatura para os aços IF Ti na anisotropia plástica.

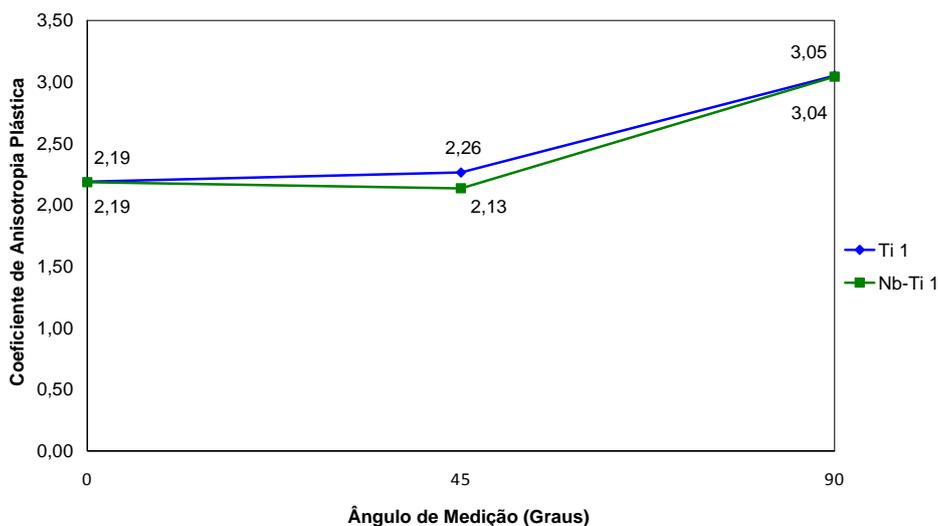
**Efeito da Temperatura - Aços IF Nb-Ti**



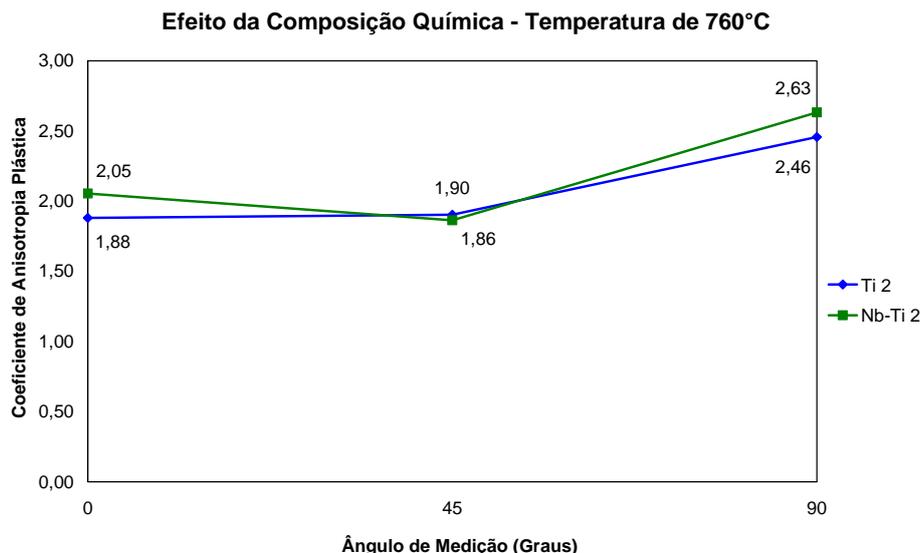
**Figura 10.** Efeito da variação de temperatura para os aços IF Nb-Ti na anisotropia plástica.

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. No caso do atendimento às especificações de clientes, tal diferença não é relevante, pois os valores requeridos em norma são os coeficientes de anisotropia normais ou então para a direção de 90°, onde os valores inferiores, correspondentes à temperatura de 760°C, estão acima de 2,0. As Figuras 11 e 12 apresentam o efeito da composição química, tipo de aço IF, na anisotropia planar.

**Efeito da Composição Química - Temperatura de 860°C**



**Figura 11.** Efeito da composição química, tipos de aço IF, na anisotropia plástica para temperatura de 860°C.



**Figura 12.** Efeito da composição química, tipos de aço IF, na anisotropia plástica para temperatura de 760°C.

Verifica-se que não há diferença relevante entre os aços IF Ti e Nb-Ti para mesmas temperaturas de recozimento. Um fato interessante é que para a temperatura de 860°C só existe variação no valor de  $R$  para a direção de 45°, sendo esta de 0,16. Já para a temperatura de 760°C, a situação é inversa, onde não há diferença para a direção de 45°, e sim para as direções 0 e 90°, sendo esta de 0,17, equivalente a diferença do outro caso.

#### 4 CONCLUSÕES

Em termos microestruturais, a maior temperatura de recozimento proporcionou maior tamanho de grão ferrítico, para ambos os aços IF, sendo que para o aço IF Ti a diferença foi maior. Para uma mesma temperatura, o aço IF Ti apresentou maior tamanho de grão, também conforme esperado. A variação de tamanho de grão não foi significativa, onde para numeração ASTM, a diferença entre o maior e o menor valor, considerando os quatro aços analisados, foi 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. Orientações cubo na face também são observadas para os quatro aços, em diferentes proporções conforme tipo de aço e temperatura de recozimento. A textura  $\langle 111 \rangle // DN$  apresenta direções aleatórias associadas, uma vez que as faixas estendem-se de 0° a 90° para o ângulo  $\varphi_1$ .

Os diferentes ciclos térmicos promoveram variação na resistência mecânica dos aços. Para um mesmo tipo de aço IF, a menor temperatura de recozimento aumentou a resistência mecânica, em comparação aos aços processados com temperatura de 860°C. O efeito da composição química foi conforme esperado para a temperatura de 860°C, onde o aço IF Ti apresenta menor resistência, porém, para 760°C, o aço Nb-Ti apresentou 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 promoveu 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 houve 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 reflete-se numa variação pequena de propriedades mecânicas, onde as propriedades mecânicas indicativas da conformabilidade são excelentes mesmo para os aços processados com a menor temperatura. Isso mostra que há uma janela operacional ótima que pode ser ajustada na linha de galvanização contínua por imersão a quente, com redução dos ciclos térmicos desses aços, os quais são destinados para aplicações de alta conformabilidade, principalmente para o segmento automotivo. Para essa redução de ciclos térmicos, as classes de especificações, em termos de resistência mecânica, dimensões (espessura e largura) e requisitos de qualidade superficial (peça exposta e interna, onde o percentual de laminação de encruamento é um parâmetro importante) são fundamentais na avaliação de materiais, representados pelos aços IF Ti e Nb-Ti analisados neste trabalho, que apresentam potencial para redução nos respectivos ciclos térmicos, até o limite de 760°C. A redução nos ciclos térmicos dos materiais gera efeitos benéficos, de natureza econômica, ciclos térmicos mais baixos estão associados a maiores produtividades (t/h), o que disponibiliza espaço para aumento na produção; de natureza operacional, onde ciclos menores promovem redução no desgaste de componentes do forno de recozimento contínuo, por exemplo, tubos radiantes (também está associado à natureza econômica) e de natureza ambiental, pois há um menor consumo de gases no interior dos tubos radiantes, reduzindo o efeito da poluição.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a infraestrutura e o grupo técnico dos laboratórios do Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, relacionados às análises realizadas e ao Laboratório de Matereografia e Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda – Universidade Federal Fluminense. MF de Campos e JFC Lins agradecem o apoio do CNPq e FAPERJ.

## REFERÊNCIAS

- 1 DIAS, F. M. S. ; COSTA E SILVA, A. ; FONSECA, F. A. V. ; DE CAMPOS, M. F. . *Contribuição ao Desenvolvimento do Aço IF Galvanizado, da Classe EDDQ, com Teor de Carbono Super Ultra Baixo e Estabilizado ao Titânio*. In: 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Anais do 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Sao Paulo: ABM Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2010. p. 3731-3741.

- 2 FOLEY, Robert; MATLOCK, David; KRAUSS, George. *Metallurgical Review of Process for Obtaining Strength and r-value in Galvannealed Sheet Steels*. 42º MWSP Conf. Proc., v. 38, 2000, p. 455-468.
- 3 TITHER, Geoffrey; STUART, Harry. *Automotive Steels-Recent Developments in Steels Used in the Manufacture of Automobiles and Trucks*. Niobium Products Company, Inc.
- 4 PRADHAN, R. *Cold-rolled interstitial-free steels: a discussion of some metallurgical topics*. Proceedings of international forum for physical metallurgy of if steels, Toquio, ISIJ INTERNATINAL, 1996, p.165-177.
- 5 HOSFORD, H.F; CADDEL, R.M. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University Press; 3 Edition, 2007.