

ESTRIAMENTO (ROPING) EM AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS AISI 430 ESTABILIZADOS AO NIÓBIO

Tarcisio Reis de Oliveira¹
 Marco Antônio da Cunha¹
 Isabel Noemi Gonçalves²

Resumo

Foram realizados estudos visando caracterizar o estriamento do aço inoxidável ferrítico AISI 430 estabilizado ao nióbio produzido pela ArcelorMittal Inox Brasil. Foram feitas análises do produto industrial e simulações em laboratório. Foram utilizadas técnicas de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e EBSD. Foram feitas caracterizações mostrando que a estria típica nos aços 430Nb é principalmente do tipo ondulação (estria larga). As causas deste estriamento são os efeitos combinados dos grãos colunares gerados na solidificação e a ausência da recristalização durante a laminação a quente. A inibição / retardo da recristalização foi ocasionada pela segregação de nióbio e principalmente, pela precipitação de carbonitretos de nióbio nos contornos dos grãos colunares. Teores elevados de nióbio em solução sólida aumentam o estriamento destes aços, pois retardam a recristalização durante a laminação a quente e nos recozimentos das bobinas laminadas a quente e a frio. A redução da faixa de estabilização melhorou o processo de recristalização do material e reduziu o estriamento final.

Palavras-chave: Aço inoxidável ferrítico; Estriamento; Nióbio.

ROPING IN AISI 430 FERRITIC STAINLESS STEEL STABILIZED WITH NIOBIUM

Abstracts

Studies were carried out to characterize the roping phenomenon in AISI 430 ferritic stainless steel stabilized with niobium produced by ArcelorMittal Inox Brasil. Industrial and laboratorial materials were analyzed by optical microscopy, scanning electronic microscopy and EBSD techniques. The typical roping in 430Nb was undulated (large roping). The main cause of this effect is the casting structure that presents precipitation of niobium carbonitrides in the grain boundary of the columnar grains. The carbonitrides precipitation inhibits the structure recrystallization. This can be explained as follow: the boundaries of columnar grains are filled with niobium carbonitrides and niobium in solid solution which disturbs the recrystallization during the hot rolling. High contents of niobium in solid solution increase the roping in these steels. The reduction of stabilization band improved the recrystallization process and lowers roping.

Key words: Ferritic stainless steel; Roping; Niobium.

I INTRODUÇÃO

Em geral, as chapas laminadas a frio dos aços inoxidáveis ferríticos 430 quando submetidas à deformação, como tração ou estampagem, apresentam o defeito denominado estrias (*roping* ou *ridging*), que afeta negativamente o aspecto visual das peças. O nível de estrias é particularmente importante para espessuras finas. Quando este fenômeno aparece, torna-se necessário realizar operações de lixamento e polimento, elevando os custos de produção. A Figura 1 apresenta aspectos macroscópicos deste fenômeno.

Ao longo dos anos, vários pesquisadores⁽¹⁾ têm proposto diferentes mecanismos para tentar explicar este fenômeno, não existindo ainda um consenso definitivo sobre o tema. Um ponto comum a todos é que o estriamento está relacionado com a anisotropia plástica da estrutura cúbica de corpo centrado e da heterogeneidade da textura da chapa de aço. Os estudos mostram a existência de colônias ou bandas de grãos, com comportamentos plásticos diferentes, como forma para explicar as características macroscópicas do

¹Membro da ABM, Doutor, Pesquisador, ArcelorMittal Inox Brasil (ex. Acesita S. A.) - Centro de Pesquisas - Praça 1º de maio, 9 - 35180-000 - Timóteo, MG, Brasil. E-mail tarcisio.oliveira@arcelormittal.com.br

²Membro da ABM, Mestre, Assistente Técnico, ArcelorMittal Inox Brasil (ex. Acesita S. A.) - Planejamento Estratégico - Av. João Pinheiro, 580 - 30130-180 - Belo Horizonte, MG, Brasil.

estriamento. Ou seja, a textura inicial e sua distribuição espacial seriam os fatores determinantes na formação do estriamento nestes materiais. Sinclair⁽¹⁾ e Wu et al.^(2,3) propuseram recentemente um modelo baseado em resultados experimentais e de modelagem onde orientações bandeadas com severos cisalhamentos positivos e negativos são as responsáveis pelo estriamento.

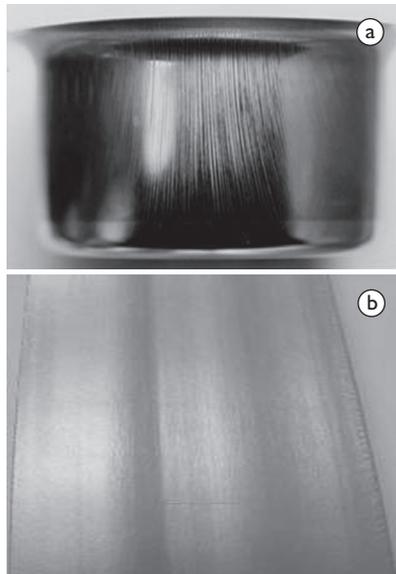


Figura 1. a) Estrias típicas de um aço inox ferrítico 430 na parede lateral de uma cuba retangular; e b) Aparência das estrias largas (ondulação).

Nos anos 90, a ArcelorMittal Inox Brasil desenvolveu um aço inoxidável ferrítico 430 (16% Cr) estabilizado ao nióbio, chamado 430Nb, visando obter melhores propriedades mecânicas (principalmente estampabilidade) e melhor brilho. Este aço é produzido por recozimento contínuo após a laminação a quente. A composição química típica deste aço é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço 430Nb (% em peso)

Cr	Mn	Si	C	N	Nb
16,20	0,20	0,30	0,02	0,02	0,35

Em 2003, o aço 430Nb estava com um elevado nível de estrias após 15% de deformação por tração, apresentando percentuais ao redor de 80% acima do limite considerado adequado para aplicações mais exigentes. Nestas aplicações, como pias e cubas e alguns segmentos de baixelas, fez-se necessário a utilização de recozimento intermediário (dupla laminação) para melhoria do defeito, porém com elevação de custo e maior *lead-time*.

Este trabalho é o resultado de um programa realizado na Arcelor Mittal Inox Brasil que teve por objetivos caracterizar e analisar os possíveis mecanismos de formação de estrias e principalmente, reduzir o nível de estrias nestes aços utilizando o processo de redução direta (laminado a frio em apenas uma etapa de recozimento).

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Tipos de Estrias

Comparando os corpos de prova de diferentes aços inoxidáveis ferríticos 430 após deformações de 15% em tração, foi percebido que não havia apenas um só tipo de estria. Observou-se a ocorrência de estrias finas, espaçadas regularmente de 1 mm a 2 mm entre si, e estrias largas ou ondulações, com distâncias maiores e menos regulares (Figura 1b).

Em geral, os aços de tipo 430 apresentavam o estriamento da seguinte forma:

- aço 430 não estabilizado: ondulações leves e médias e estrias finas contínuas;
- aço 430Nb redução direta: ondulações fortes e estrias finas leves; e
- aço 430Nb recozimento intermediário: ondulações leves e ausência de estrias finas.

Percebeu-se uma nítida diferença entre os materiais, sendo o 430Nb via recozimento intermediário o material mais adequado e o 430Nb via redução direta o material com mais problemas a serem solucionados, com foco principal nas estrias largas. A estria fina típica de aços 430 não estabilizados não foi observada nos aços 430Nb.

2.2 Caracterização das Bobinas a Quente (BQs) e a Frio (BFs)

O aço 430Nb, devido à adição de nióbio e ao baixo teor dos intersticiais carbono e nitrogênio, é 100% ferrítico em todas as temperaturas. Seu processo na laminação a quente é realizado em duas etapas: a primeira permite a recristalização durante a fase de desbaste e a segunda o acúmulo de deformação durante a laminação em um laminador Steckel. Esta deformação acumulada na laminação a quente permite a posterior recristalização do material na etapa de recozimento contínuo da bobina a quente.

Foram realizadas várias caracterizações das bobinas a quente (BQs) e a frio (BFs) por microscopia ótica (Figura 2a) e eletrônica de varredura, principalmente pela técnica de EBSD (Figura 2b). As BQs após a laminação a quente apresentaram uma microestrutura heterogênea ao longo da espessura, com grãos alongados e deformados principalmente no centro da espessura. Após recozimento, ocorreu recristalização da microestrutura, formando grãos equiaxiais ao longo de toda a espessura. O tamanho de grão ASTM na borda foi de 6 a 7 e no centro de 5 a 6.

Percebeu-se a presença de pequenos carbonitretos de nióbio distribuídos na matriz ferrítica, levemente alongados na direção de laminação, que não se modificaram durante o tratamento térmico.

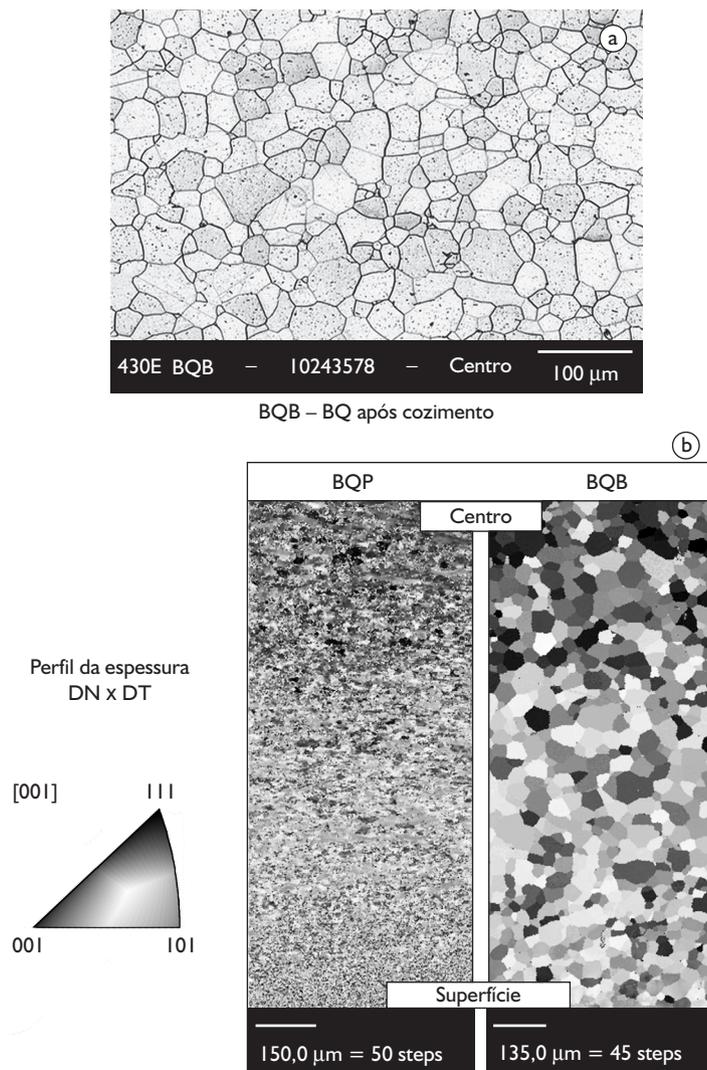


Figura 2. Microestrutura da BQ do aço 430Nb. a) Microscopia ótica, ataque Vilella. Corte Transversal. b) Análise EBSD, corte transversal (BQP – sem recozimento, BQB – após recozimento).

A análise de microestrutura por EBSD revelou um forte gradiente de orientações ao longo da espessura após a laminação a quente. Próximo a superfície se observa a presença de texturas de cisalhamento, principalmente orientação de Goss $\{110\}\langle 001 \rangle$ e Cobre $\{112\}\langle 111 \rangle$. Estas texturas são formadas devido ao cisalhamento provocado pelo atrito do cilindro de trabalho com a superfície da chapa durante a laminação a quente. No centro da espessura a ação do cisalhamento é nula, com o material sofrendo apenas deformação plana. Como consequência, nesta região se desenvolvem texturas típicas de deformação plana de materiais cúbicos de corpo centrado, com forte presença de fibra alfa $\{hkl\}\langle 110 \rangle$ e uma parcela menor de fibra gama $\{111\}\langle uvw \rangle$. Após recozimento verifica-se novamente o gradiente de textura, com maior textura de cisalhamento próximo a superfície. No centro, ainda se observa a presença das fibras alfa e gama, porém com uma maior intensidade de fibra gama.

A análise das bobinas laminadas a frio após o recozimento final mostra normalmente uma microestrutura bem homogênea em relação à espessura, com tamanho de grão ASTM da ordem de 8 a 9. Através da análise por EBSD, observa-se uma textura composta principalmente pela fibra gama, com uma pequena porcentagem das fibras $\{001\}\langle uvw \rangle$ e $\{101\}\langle uvw \rangle$. Esta textura é esperada para aços ferríticos com 17% de Cr, após laminação a frio e recozimento final. O aço 430Nb apresenta uma elevada intensidade de fibra gama, ao redor de 55%, típica de aços estabilizados, o que confere ao material uma alta estampabilidade.

O fenômeno de bandeamento de componentes, normalmente relacionado com a formação do estriamento, não foi muito visível nestes materiais. Como a intensidade da fibra gama é elevada e distribuída aproximadamente homogênea ao longo da região analisada, as bandas são quase imperceptíveis. Isso faz com que o material tenha um comportamento mecânico homogêneo, com estrias finas de baixa amplitude.

Através destas análises, percebeu-se que o baixo estriamento fino dos aços 430Nb foi devido a forte intensidade de fibra gama e ao comportamento mecânico mais homogêneo. Porém, não foi evidenciada nenhuma característica microestrutural que explicasse o estriamento largo. Com este intuito, foram feitas modelagens visando correlacionar a microestrutura com o coeficiente de anisotropia e assim evidenciar ondulações após deformação. Como nenhuma destas simulações obteve sucesso, elas não serão mostradas em detalhes neste artigo. Deve-se ressaltar que a teoria mais aceita atualmente sobre o estriamento considera o cisalhamento transversal como o principal mecanismo para a formação de estrias/ondulações, como previsto por Sinclair⁽¹⁾ e Wu et al.^(2,3) e Porém, ainda não foram utilizados modelos que considerem o cisalhamento com resultados de EBSD e perfilometria.

2.3 Influência de Parâmetros de Laminação a Quente

Foi realizado um estudo visando avaliar a influência da macroestrutura da placa (grãos colunares e equiaxiais) no estriamento do aço 430Nb. Foram utilizadas amostras provenientes diretamente de placas colunar e equiaxial. As amostras foram reaquecidas em duas temperaturas (1.050°C e 1.250°C) e dois tempos de reaquecimento (15 minutos e 60 minutos). Em seguida foram laminadas a 860°C e bobinadas a 700°C.

As amostras provenientes da placa com grãos totalmente equiaxiais apresentaram os menores níveis de estriamento. Essas amostras foram mais influenciadas pelo tempo e temperatura de reaquecimento, sendo que os melhores resultados foram obtidos à 1.250°C com maior tempo de reaquecimento. Não foi observada nenhuma correlação entre a microestrutura das amostras após laminação a frio e o nível de estrias. Todas as amostras apresentaram microestrutura com grãos recristalizados, equiaxiais, embora a microestrutura obtida a partir da amostra constituída inicialmente de grãos colunares tenha se apresentado heterogênea ao longo da espessura.

2.4 Influência da Composição Química

Foram inicialmente analisadas correlações entre o nível de estriamento e alguns elementos de liga, principalmente nióbio, carbono e nitrogênio, porém não se conseguiu identificar nenhuma tendência clara. Análises dos elementos isolados não tinham correlação, mas levantou-se a hipótese que eles poderiam atuar na microestrutura de forma combinada. Este fato tinha sido evidenciado na tese de doutorado de Oliveira,⁽⁴⁾ onde a influência do nióbio em solução sólida, ou seja, não combinado ao carbono ou nitrogênio, exercia forte influência na redução ou bloqueio da recristalização durante a deformação a quente e em processos de recozimento. O nióbio segrega-se fortemente nos contornos de grão, impedindo ou retardando sua migração pelo mecanismo conhecido como retardo por partículas (*Dragg effect*). Os precipitados também têm efeito pronunciado, retardando também os processos de migração dos contornos de grão e recristalização. O ΔNb (fração de nióbio em solução sólida) foi então determinado usando a equação estequiométrica (Equação 1):

$$\Delta Nb = \%Nb - 7.74 \times \%C - 6.64 \times \%N \quad (1)$$

Uma forma mais direta de se avaliar o ΔNb é pelo índice de estabilização (E), que consiste na divisão do teor de nióbio pela soma de carbono mais nitrogênio [$E = \%Nb / (\%C + \%N)$]. Foram feitas então correlações entre a estabilização do ΔNb e o percentual de bobinas com estriamento acima do limite máximo permitido (nível determinado através de avaliação visual de estrias), o que é mostrado na Figura 3a. Percebe-se claramente que o maior estriamento está diretamente relacionado ao maior teor de nióbio em solução sólida/estabilização.

Após a identificação da influência do nióbio em solução sólida, foram feitas novas correlações para materiais com valores de estabilização próximos. Constatou-se então que havia também um menor estriamento para valores mais elevados de carbono e nitrogênio.

Foi então reduzido o limite superior de estabilização do aço, sendo eliminados os casos de alto estriamento, ou seja, alto nióbio em solução sólida (estabilizações elevadas). A faixa de carbono e nitrogênio também foi corrigida de forma a não se ter valores de intersticiais muito baixos, o que normalmente dava maiores valores de estriamento.

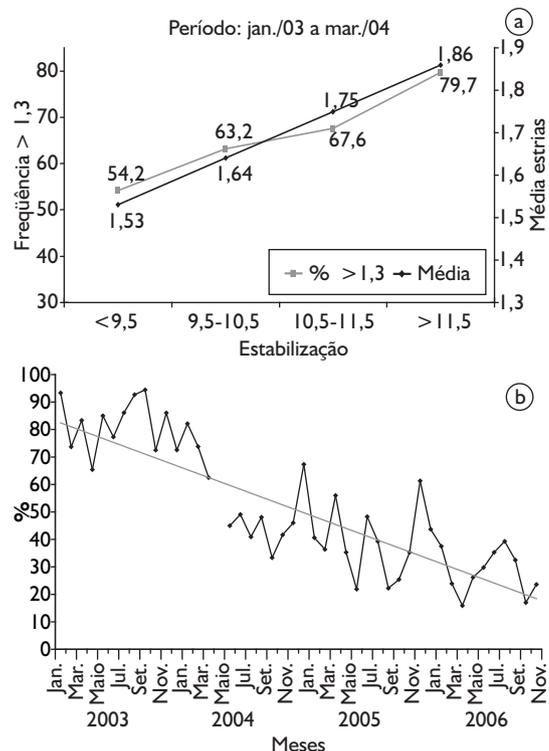


Figura 3. a) Correlação entre o estriamento após 15% de deformação por tração e o índice de estabilização; e b) Evolução do percentual de bobinas com estriamento acima do limite máximo permitido (nível determinado através de avaliação visual de estrias – valor de referência na figura de 1,3) para espessuras finas (período 2003-2006).

A Figura 3b mostra a evolução do estriamento acima do limite de liberação sem restrições para o aço 430Nb nos últimos anos. Houve uma sensível melhora em relação ao nível de 2003. Com estas mudanças, foi gradativamente sendo reduzida a produção de material por recozimento intermediário, sendo este fluxo utilizado apenas para as aplicações que exijam estampabilidade extra-profunda.

2.5 Mecanismo de Formação da Estria Larga

Analisando a metalografia das placas, foi observada a presença de forte precipitação de carbonitretos de nióbio ao longo dos contornos de grão. Esta precipitação ocorre durante o resfriamento da placa após o lingotamento.

A evolução microestrutural ao longo dos passes no laminador Steckel, a partir de esboços, mostrou a presença de grãos colunares na superfície da tira (Figura 4). Com o prosseguimento da deformação, estes grãos tendem a não ser mais observados por microscopia ótica, ficando

a microestrutura homogênea. Ressalta-se o fato de se observar, mesmo partindo de amostra de esboço (após etapa de desbaste), indícios da estrutura colunar da placa na fase de laminação de acabamento.

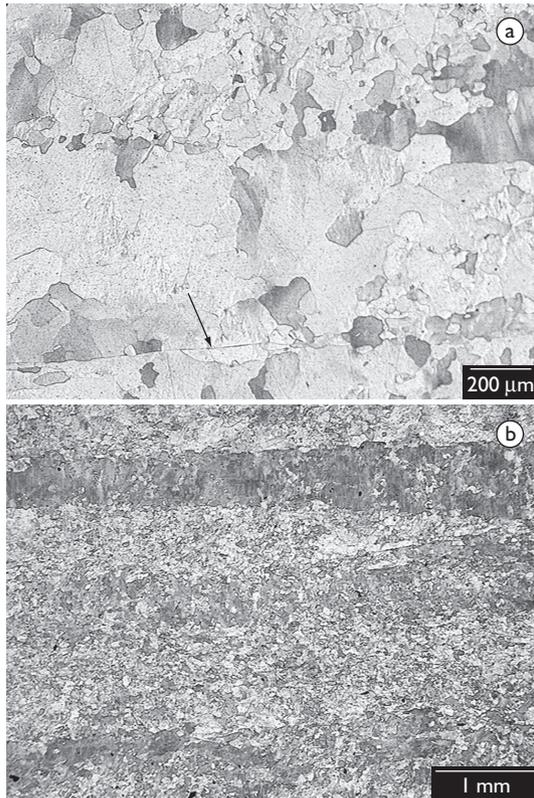


Figura 4. Metalografia da superfície (DLxDT). Ataque Vilella a) na entrada do 2° passe; e b) entrada do 4° passe. DL – direção de laminação, DT – direção transversal.

Em análise mais detalhada destes materiais na região de grãos com aspecto colunar próximo a superfície, observou-se uma forte concentração de precipitados ao longo dos contornos de grão. Estes precipitados bloqueiam a livre migração dos contornos. Embora não evidenciado, supõe-se também que o nióbio em solução sólida estivesse segregado nos contornos de grão, o que contribuiria juntamente com a precipitação para impedir a migração dos contornos, fato evidenciado por Oliveira.⁽⁴⁾

Foi formulada então uma hipótese de formação das estrias largas em função das análises microestruturais e da temperatura de reaquecimento. Após o lingotamento e solidificação da placa, há uma forte presença de precipitação nos contornos dos grãos colunares. Estes precipitados, mesmo após a laminação a quente e a modificação dos grãos originais com a deformação, manteriam na microestrutura traços dos grãos originais. Neste processamento, a recristalização, ocorreria apenas no interior de cada grão original, pois os carbonitretos de nióbio precipitados e provavelmente o nióbio em solução sólida bloqueariam, a recristalização na interface, impedindo a sua propagação para o grão vizinho. Assim, o efeito dos grãos originais é muito maior e a fragmentação da microestrutura e formação de uma textura mais aleatória muito menor, como esquematizado na Figura 5. Como conseqüência final, formam-se colônias de grãos com orientações similares nas BQs, as quais, após laminação a frio e recozimento, vão produzir bandas com comportamentos mecânicos similares e com grandes proporções, gerando as estrias largas.

Um fator muito importante também a ser considerado é a textura dos grãos colunares, normalmente do tipo $\{001\} \langle uvw \rangle$, orientação de maior crescimento na solidificação. Esta orientação apresenta alta capacidade de recuperação e conseqüentemente de difícil recristalização, o que induziria a manutenção desta textura ao longo da laminação a quente.

Há várias evidências que corroboram com esta hipótese. A primeira e principal delas é que este tipo de estria não ocorre ou se apresenta apenas levemente em produtores de inox que utilizam agitador eletromagnético durante o lingotamento. Nesta condição, obtém-se ao redor de 50% de grãos equiaxiais, além de grãos colunares de menor dimensão, o que aumenta de forma significativa a área dos contornos

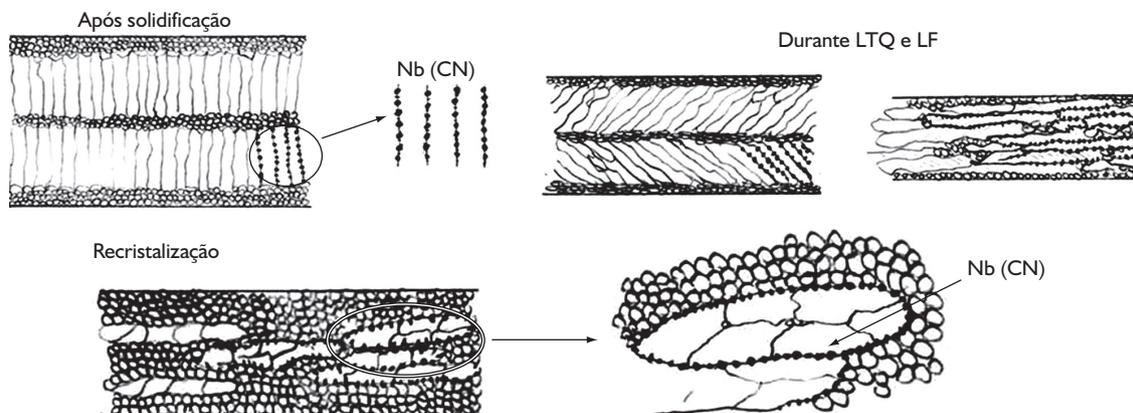


Figura 5. Esquema de evolução microestrutural dos grãos colunares.

de grão, com conseqüente redução da densidade de precipitados nos mesmos. Desta forma, e combinando com a maior acúmulo de deformação para grãos equiaxiais, há uma probabilidade muito maior para a ocorrência de recristalizações mais eficientes durante a laminação a quente, eliminando as bandas de grandes dimensões de orientação similar. Como conseqüência, o estriamento largo é reduzido ou eliminado na BF. A evolução microestrutural nesta condição é mostrada esquematicamente na Figura 6. Para estes aços, a formação de estrias largas seria então decorrente da evolução dos grãos colunares originais e da influência dos precipitados e do nióbio em solução sólida em seus contornos, fato que não tinha sido ainda mencionado na literatura.

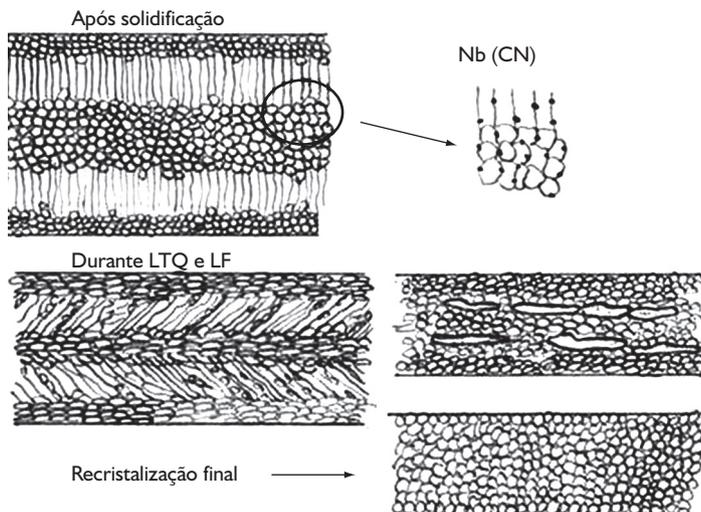


Figura 6. Esquema de evolução microestrutural de placa com 50% de grãos equiaxiais.

A constatação da importância da estrutura da placa no estriamento serviu de subsídio para a decisão de compra do agitador eletromagnético pela ArcelorMittal Inox Brasil, o qual entrou em operação no final de 2007. Análises com a ponta final da última placa do sequencial no lingotamento, com aproximadamente

50% de grãos equiaxiais, evidenciaram que a instalação do agitador eletromagnético deve reduzir o nível de estrias dos aços 430Nb, melhorando ainda mais os índices mostrados na Figura 3b.

3 CONCLUSÕES

Foram feitas caracterizações mostrando que a estria típica nos aços 430Nb é principalmente do tipo ondulação (estria larga). Foram levantadas e confirmadas hipóteses a respeito dos mecanismos geradores deste estriamento e as maneiras de minimizá-lo. As causas deste estriamento são os efeitos combinados dos grãos colunares gerados na solidificação e a ausência da recristalização durante a laminação a quente. A inibição / retardo da recristalização foi ocasionada pela segregação de nióbio e principalmente, pela precipitação de carbonitretos de nióbio nos contornos dos grãos colunares durante a laminação a quente. Produzem-se então bandas de grãos com textura e comportamento mecânico similares, gerando o estriamento.

Foi evidenciada a forte influência do nióbio em solução sólida no estriamento destes aços. Valores de estabilização elevados, com elevado teor de nióbio em solução sólida, prejudicam a recristalização durante a laminação a quente e nos recozimentos das bobinas a quente e a frio. Foi então reduzida a faixa de estabilização, com conseqüente melhora na recristalização do material e menor estriamento final. O percentual de material fino com nível de estrias acima do limite crítico foi reduzido de 80% em 2003 para valores ao redor de 25% atualmente. Este valor tende a ser ainda melhor após instalação de agitador eletromagnético.

REFERÊNCIAS

- 1 SINCLAIR C.W. A re-examination of potential models for roping of ferritic stainless steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 38, n. 10, p. 2435-41, Oct. 2007.
- 2 WU, R.D.; JIN, H.; SHI, Y.; LLOYD, D.J. Analysis of ridging in ferritic stainless steels sheet. **Materials Science and Engineering A**, v 423, n. 1-2, p. 300-5, May 2006.
- 3 WU, R.D.; LLOYD, L.J.; HUANG, Y. Correlation of ridging and texture in ferritic stainless steels sheet. **Materials Science and Engineering A**, v. 427, n. 1-2, p. 241-5, July 2006.
- 4 OLIVEIRA, T.R. **Effet du niobium et du titane sur la déformation à chaud d'aciers inoxydables ferritiques stabilisés**. 2003. 222 p. Tese (Doutorado) - Ecole des Mines de Saint Etienne, França, 2003.

Recebido em: 14/12/2007

Aceito em: 15/12/2008

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM - INTERNACIONAL, 62., 2007, Vitória, ES. São Paulo: ABM, 2007.