



RECRISTALIZAÇÃO ENTRE PASSES DE LAMINAÇÃO A QUENTE DO AÇO AISI 430 ESTABILIZADO AO NIÓBIO*

Flávia Vieira Braga¹
Thompson Ávila Reis Junior²
Nilton José Lucinda de Oliveira³
Margareth Spangler Andrade⁴

Resumo

Este trabalho teve por objetivo avaliar as melhores condições para promover a recristalização entre passes, durante a laminação a quente em laminador Steckel, de um aço inoxidável ferrítico AISI 430 estabilizado ao Nióbio. A laminação a quente de acabamento foi simulada através de ensaios de torção utilizando um esquema em diferentes temperaturas. A ocorrência de recristalização entre os passes de laminação foi estudada através de interrupções antes de alguns passes. As amostras ensaiadas foram analisadas por microscopia ótica e MEV-EBSD (difração de elétrons retro-espalhados). Os resultados deste trabalho mostraram ser possível promover a recristalização entre passes durante a laminação de acabamento do aço AISI 430 estabilizado ao Nb. Foi, ainda, estabelecida a melhor faixa de temperatura para a promoção de recristalização.

Palavras-chave: Simulação de laminação; Aço inoxidável ferrítico; Recristalização; Nióbio; Estrias.

INTERPASS RECRYSTALLIZATION DURING HOT ROLLING OF AN AISI 430 STEEL STABILIZED WITH NIOBIUM

Abstract

The present work aimed to study the best conditions to improve interpass recrystallization during hot rolling on a Steckel mill of an AISI 430 ferritic stainless steel stabilized with Nb. The finishing hot rolling was simulated by torsion tests using different temperature ranges. The occurrence of interpass recrystallization was studied by interrupting the simulation before some passes. The samples were analyzed by optical (OM) and scanning electron microscopy (SEM) with electron back scattering diffraction (EBSD). It was concluded that it is possible to promote interpass recrystallization on AISI 430 stabilized with Nb. Furthermore, the best temperature range for the processing in order to promote this recrystallization, was established.

Keywords: Rolling simulation; Ferritic stainless steel; Recrystallization; Niobium; Ridging.

¹ Física. Doutoranda da REDEMAT- UFOP. Instituto Senai de Inovação em Metalurgia e Ligas Especiais. Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro da Computação. MSc. Pesquisador em Tecnologia. Instituto Senai de Inovação em Metalurgia e Ligas Especiais. Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Engenheiro metalurgista. MSc. Pesquisador em Tecnologia. Instituto Senai de Inovação em Metalurgia e Ligas Especiais. Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Física. Dr. Pesquisadora em Tecnologia. Instituto Senai de Inovação em Metalurgia e Ligas Especiais. Belo Horizonte, MG, Brasil.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis ferríticos são utilizados em uma grande variedade de aplicações devido a sua resistência à corrosão, boas propriedades mecânicas e menor custo de produção quando comparados aos aços inoxidáveis austeníticos [1]. A baixa adição ou ausência de níquel os tornam uma alternativa atrativa em substituição aos aços inoxidáveis austeníticos. Como consequência, existe um crescente interesse no desenvolvimento e aperfeiçoamento dos aços inoxidáveis ferríticos pela indústria.

No entanto, os aços inoxidáveis ferríticos são conhecidos por desenvolverem pequenos sulcos ou estrias na superfície da chapa, paralelamente à direção de laminação, após a etapa de laminação a frio e/ou estampagem profunda durante o processo de conformação. Tal fenômeno, denominado “estriamento”, é indesejável por prejudicar a aparência externa do produto [2-4]. Além disso, os aços inoxidáveis ferríticos são inferiores aos aços baixo-carbono e aos austeníticos quanto à estampabilidade profunda.

Objetivando solucionar o estriamento e melhorar a estampabilidade destes aços, várias pesquisas têm sido realizadas [5-7]. De acordo com Oliveira *et al.* [8], a recristalização durante a laminação a quente contribui tanto para a melhoria do estriamento quanto da estampabilidade. Além disso, a adição de Nióbio como elemento estabilizador, aliada a processos controlados de laminação a quente e a frio também contribui para a produção de um material com estampabilidade superior, baixo estriamento e alto brilho quando comparados aos ferríticos não estabilizados [8].

No presente trabalho, foi investigada a melhor condição para promoção de amaciamento por recristalização durante o processo de deformação a quente de um aço AISI 430 estabilizado ao Nióbio. Para tanto, foram realizados ensaios de torção visando simular o processo de laminação a quente de acabamento, em laminador steckel, utilizando diferentes esquemas de laminação. Visando investigar a ocorrência de recristalização entre os passes de laminação, alguns esquemas foram interrompidos antes de passes determinados. A microestrutura das amostras ensaiadas foi analisada por microscopia ótica e EBSD.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química do aço inoxidável ferrítico AISI 430 estabilizado ao Nióbio (430Nb) utilizado neste trabalho é mostrada na Tabela 1. O aço foi produzido e fornecido pela Aperam South America

Tabela 1: Composição química em peso percentual do aço inoxidável ferrítico 430Nb sob investigação. * Porcentagem em peso.

Elementos	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Al	Nb	N ₂
430Nb	0,02	0,20	0,48	0,03	0,0005	16,07	0,18	0,0017	0,32	240*

*ppm

Para os ensaios de torção, corpos de prova com 7mm de diâmetro e 15mm de comprimento útil foram usinados a partir de amostras de chapas de 28mm de espessura após a laminação de desbaste de tiras a quente. Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios mecânicos INSTRON 1125, equipada com módulo de torção e célula de torque com capacidade de até 2000kgf.cm. Uma

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



bobina de indução eletromagnética ligada a uma fonte com controlador programável foi posicionada ao redor do corpo de prova de modo que várias taxas de aquecimento e resfriamento pudessem ser aplicadas. Durante os ensaios, atmosfera de argônio foi utilizada para proteger o corpo de prova contra a oxidação excessiva. Os ensaios de torção a quente foram realizados objetivando simular a laminação de acabamento, em laminador Steckel, do aço 430Nb. Diferentes esquemas de laminação foram utilizados a fim de verificar a melhor condição para promoção de amaciamento por recristalização. As deformações equivalentes foram obtidas a partir dos dados industriais do processamento dos respectivos aços. A Tabela 2 mostra os esquemas de deformação e tempo entre passes que foram utilizados na simulação de laminação de acabamento em laminador Steckel. As temperaturas de deformação utilizadas nos ensaios variaram conforme especificado na Tabela 3. Nos ensaios, os corpos de prova de torção foram aquecidos a 2°C/s, até 1150°C. Após 120s, os mesmos foram resfriados a uma taxa de 1°C/s até a temperatura do primeiro passe. Em seguida, foram executadas as deformações de acordo com as temperaturas e tempos entre passes de cada esquema.

Tabela 2: Esquemas de deformação e tempo entre passes para a simulação de laminação de acabamento, do aço 430Nb, através dos ensaios de torção.

Passe	Espessura inicial (mm)	Espessura final (mm)	Deformação equivalente	Tempo entre passes (s)
				Corpo
1	28,4	19,6	0,43	48
2	19,6	11,5	0,62	63
3	11,5	7,1	0,56	72
4	7,1	5,3	0,34	132
5	5,3	4,1	0,30	25

Tabela 3: Temperaturas de deformação utilizadas na simulação de laminação de acabamento em laminador Steckel através dos ensaios de torção.

Passe	Temperatura do passe (°C)					
	Esq 1	Esq 2	Esq 3	Esq 4	Esq5	Esq6
1	1050	1020	990	960	930	900
2	1035	1005	975	945	915	885
3	1020	990	960	930	900	870
4	1005	975	945	915	885	855
5	990	960	930	900	870	840

Com o objetivo de investigar a ocorrência de recristalização entre passes, ensaios de torção a quente foram interrompidos antes do passe seguinte e os corpos de prova analisados por EBSD. A simulação de laminação de acabamento tem o total de 5 passes de deformação, dessa maneira, as interrupções foram realizadas antes do 3º passe, antes do 4º e antes do 5º passe.

Para análise metalográfica, os corpos de prova de torção foram cortados com disco abrasivo e todo o comprimento útil de 15mm embutido, lixados e polidos com pastas de diamante de 9 e 1µm. O polimento final foi realizado em solução de sílica coloidal de granulometria de 0,04µm por 1min. O lixamento e o polimento foram realizados a partir da superfície, em seção longitudinal ao eixo do corpo de prova, até 0,1mm de profundidade, a fim de obter uma largura de seção de aproximadamente 2mm para que a microestrutura fosse analisada próximo a superfície do corpo de prova. Em seguida, foi feita a despassivação das superfícies polidas por 60s em solução de

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



100ml de água destilada, 2 ml de ácido acético e duas gotas de alumina coloidal. Após, as amostras foram atacadas a temperatura de 75°C por 105s utilizando a solução de 110ml de água destilada, 12 ml de H₂SO₄, 4ml de HF e 5 gotas de HNO₃. A preparação das amostras para EBSD foi realizada da mesma maneira que a preparação para a microscopia ótica até a etapa de polimento. Posteriormente, as amostras foram polidas com sílica coloidal por cerca de 40 minutos. Os mapas de EBSD foram obtidos em um microscópio Fei Quanta 650 Feg/ Oxford High Speed detector Nordlys Max 2 instalado no LNNano/LME. A tensão de aceleração utilizada foi de 20kV e distância de trabalho de 18mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de tensão equivalente em função da deformação equivalente para os esquemas de simulação de laminação de acabamento, em laminador Steckel, são apresentadas nas Figuras 1 e 2. De acordo com a forma das curvas para os esquemas 1 e 2 (Figura 1a e 1b), pode-se verificar a ocorrência de amaciamento dinâmico por recuperação nos primeiros passes e amaciamento estático entre passes. O amaciamento estático entre passes é observado uma vez que a tensão de escoamento de um determinado passe é menor que a tensão máxima do passe anterior. Porém, não é possível assegurar o tipo de amaciamento estático ocorrido pela análise das curvas.

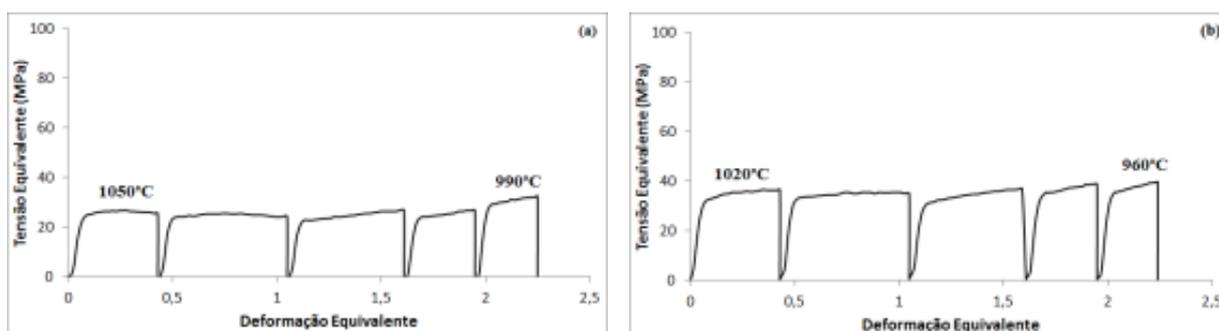


Figura 1: Curvas de tensão equivalente em função da deformação equivalente para os ensaios de simulação de laminação de acabamento: (a) esquema 1 e (b) esquema 2. As temperaturas indicadas nos gráficos se referem às temperaturas de primeiro e último passes.

O formato das curvas, nas Figuras 2a, 2b, 2c e 2d, indica que não houve amaciamento dinâmico durante as deformações, entretanto, pode ser observada a ocorrência de amaciamento estático. A acentuada diferença entre a tensão de escoamento de um passe e a tensão máxima do passe anterior, observado nos quatro esquemas mostrados na Figura 2, indica um indício de amaciamento por recristalização estática. Porém, a confirmação de tal amaciamento pode ser feita apenas pela técnica de EBSD.

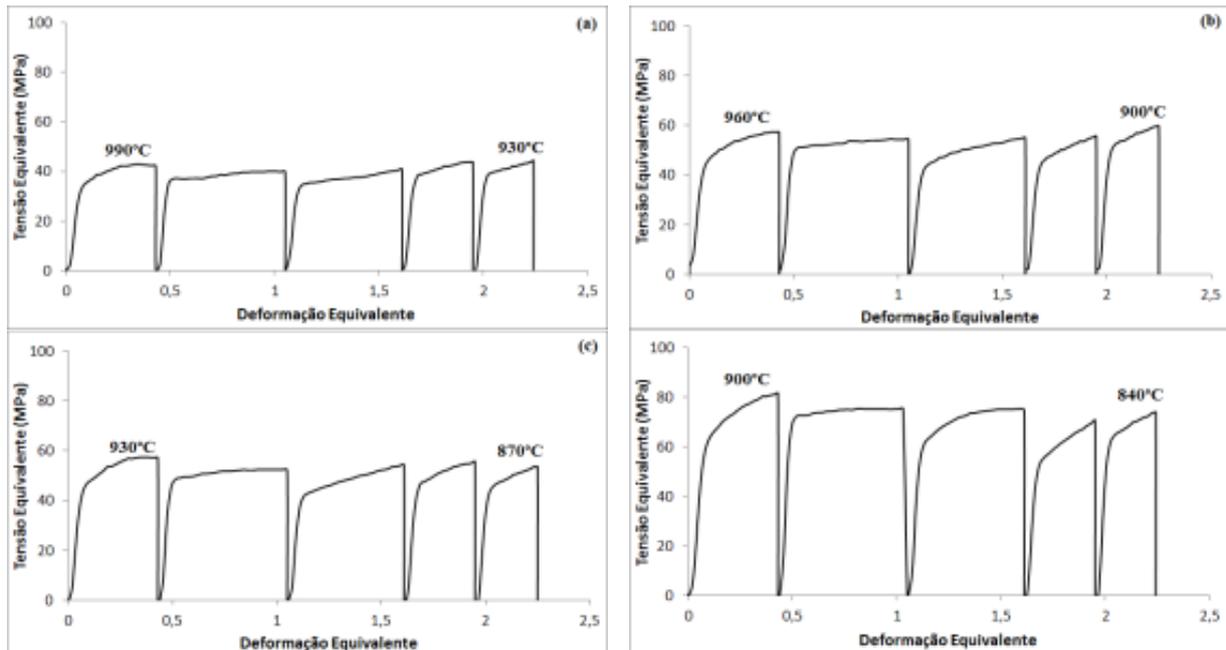


Figura 2: Curvas de tensão equivalente em função da deformação equivalente para os ensaios de simulação de laminação de acabamento: (a) esquema 3, (b) esquema 4, (c) esquema 5 e (d) esquema 6. As temperaturas indicadas nos gráficos se referem às temperaturas de primeiro e último passes.

As micrografias óticas dos corpos de prova são apresentadas nas Figuras 3 e 4. Nas microestruturas das amostras do esquema 1 e do esquema 2 (Figuras 3a e 3b) os grãos são maiores e apresentam forma de deformação acumulada, com presença marcante de subgrãos, o que indica o processo de recuperação.

No entanto, nas micrografias da Figura 4 há evidências de recristalização estática indicada pela presença de grãos menores. Pode-se observar que as microestruturas das amostras dos esquemas 4, 5 e 6 (Figuras 4b, 4c e 4d) respectivamente, se mostram mais fragmentadas, com grãos de tamanho menor do que na micrografia do esquema 3 (Figura 3a). Este fato pode ser um indício de que a fração recristalizada aumentou com a diminuição da temperatura de deformação.

Para que a recristalização estática ocorra é necessário que em determinado passe haja acúmulo de encruamento. Nos esquemas 4, 5 e 6 (Figura 2b, 2c e 2d respectivamente), pode ser verificado que nos passes 3, 4 e 5 ocorreu encruamento, força motriz para que a recristalização estática pudesse ocorrer entre os passes 3 e 4 e entre os passes 4 e 5.

Durante a simulação de laminação de acabamento, em laminador Steckel, foram dados 5 passes de deformação, conseqüentemente, a microestrutura pode ter recristalizado num intervalo entre passes e se deformado num passe posterior. Portanto, os grãos nas amostras com indícios de recristalização não se apresentam equiaxiais e livres de deformação.

É importante salientar que o laminador Steckel é um laminador reversível, logo, os tempos entre passes variam muito dependendo da posição a ser considerada ao longo do comprimento da tira (cabeça, corpo e cauda). No presente trabalho, o tempo entre passes variou entre 25 e 132s, dessa maneira, é possível a formação e crescimento de novos grãos. Em laminadores de trem contínuo (Tandem) o tempo entre passes é mínimo devido à alta velocidade de processo [8].

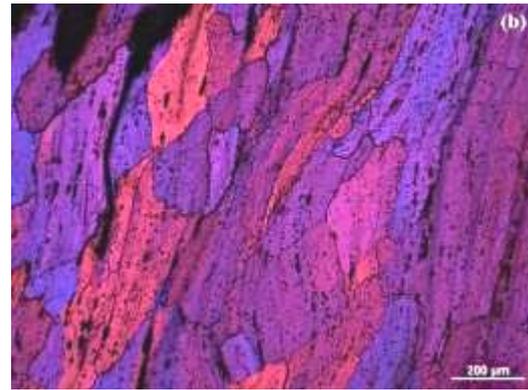
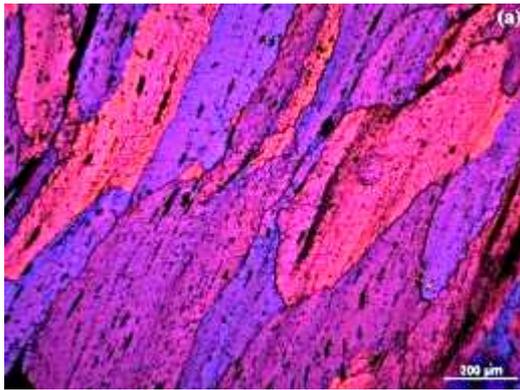


Figura 3: Imagens por microscopia óptica com ataque colorante e luz polarizada das amostras dos ensaios de simulação de laminação de acabamento: (a) esquema 1 e (b) esquema 2.

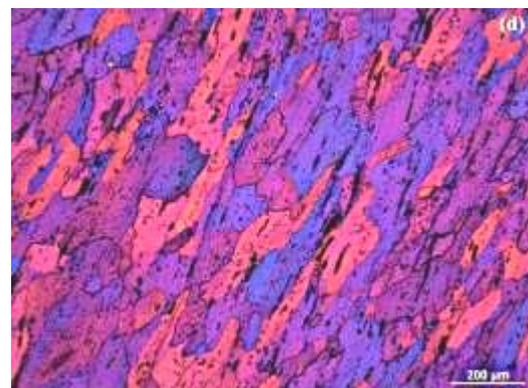
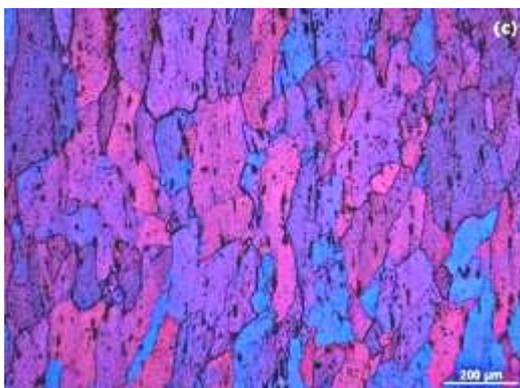
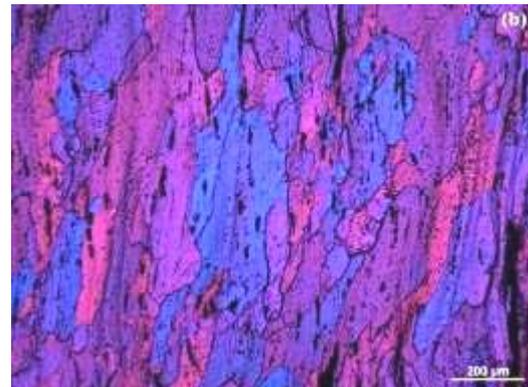
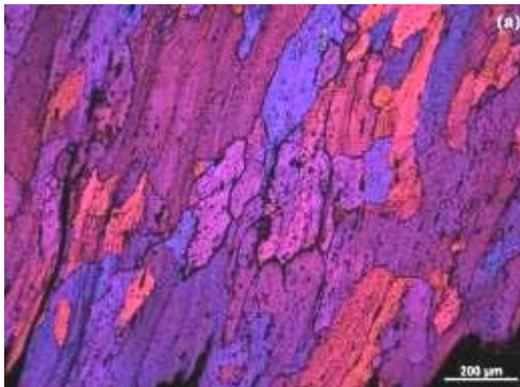


Figura 4: Imagens por microscopia óptica com ataque colorante e luz polarizada das amostras dos ensaios de simulação de laminação de acabamento: (a) esquema 3, (b) esquema 4, (c) esquema 5 e (d) esquema 6.

A partir dos resultados das curvas de tensão x deformação e das micrografias óticas, foram selecionados os esquemas 4, 5 e 6 para investigação da ocorrência de recristalização entre passes. Para tanto, ensaios de torção interrompidos foram realizados e, posteriormente, as amostras foram analisadas por EBSD. Como critério para marcar os contornos de grão foi utilizada a desorientação acima de 10° .

As Figuras 5a, 5b e 5c, mostram os mapas de figura de polo inversa das amostras dos esquemas 4, 5 e 6 interrompidos antes do 3º passe.

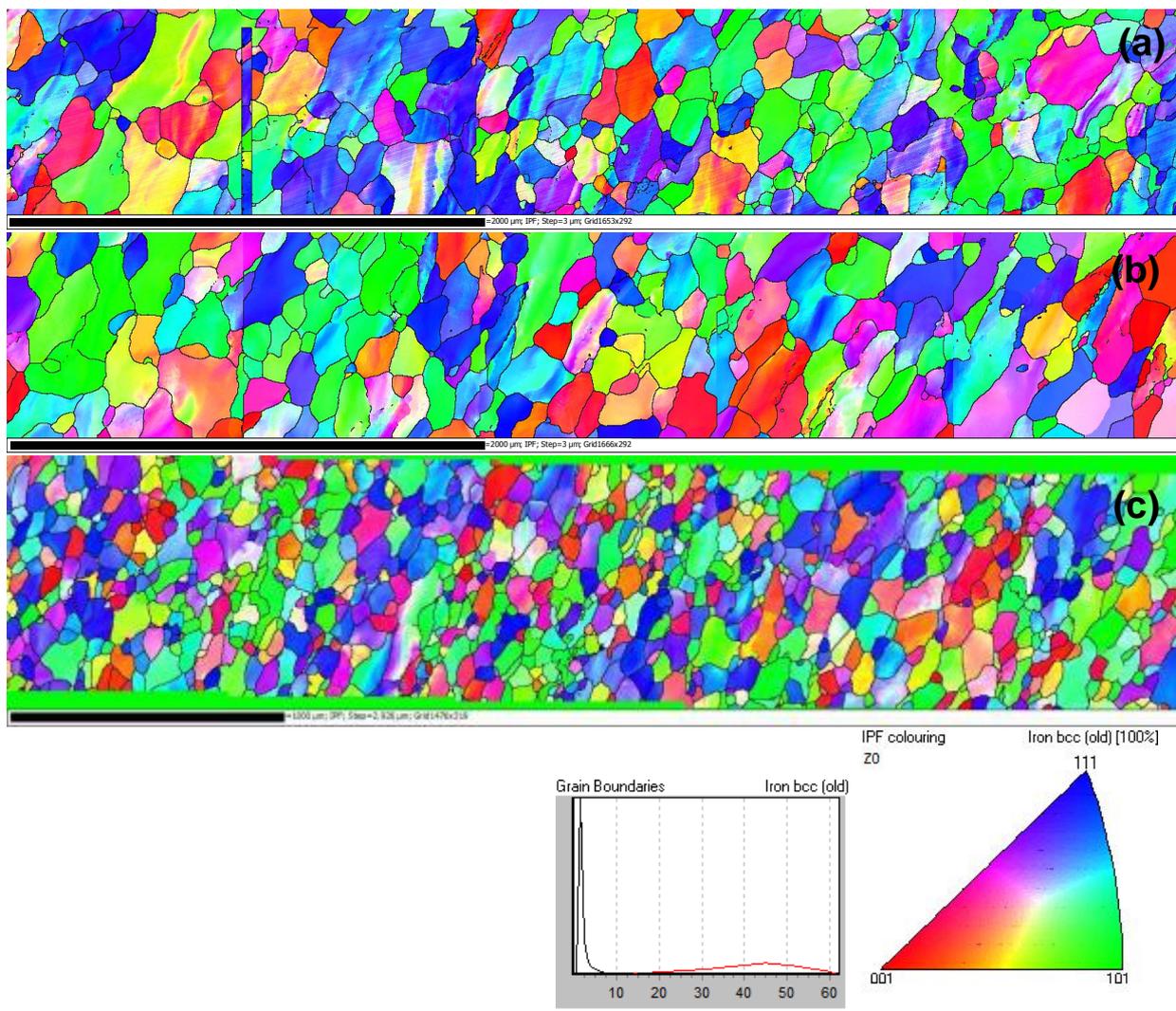


Figura 5: Mapas de figura de polo inversa das amostras dos ensaios interrompidos antes do 3º passe para o (a) esquema 4, (b) esquema 5 e (c) esquema 6.

Durante estes ensaios, os corpos de prova de torção receberam dois passes de deformação e foram resfriados imediatamente antes do 3º passe. Pode-se observar a formação de novos grãos. A microestrutura dos esquemas 4 e 5 (Figuras 5a e 5b) são similares, porém, a microestrutura do esquema 6 (Figuras 5c) se mostra mais fragmentada.

A microestrutura das amostras dos ensaios interrompidos antes do 4º passe (Figura 6) para ambos os esquemas já se mostra mais fragmentada comparada à das amostras dos ensaios interrompidos antes do 3º passe. Além disso, pode ser observada que a recristalização ocorreu de maneira mais efetiva na amostra do esquema 6 (Figura 6c) comparada às amostras dos esquemas 4 e 5 (Figura 6a e 6b respectivamente). Visto que os grãos se apresentam com contorno de alto ângulo comprovando os indícios de amaciamento por recristalização estática.

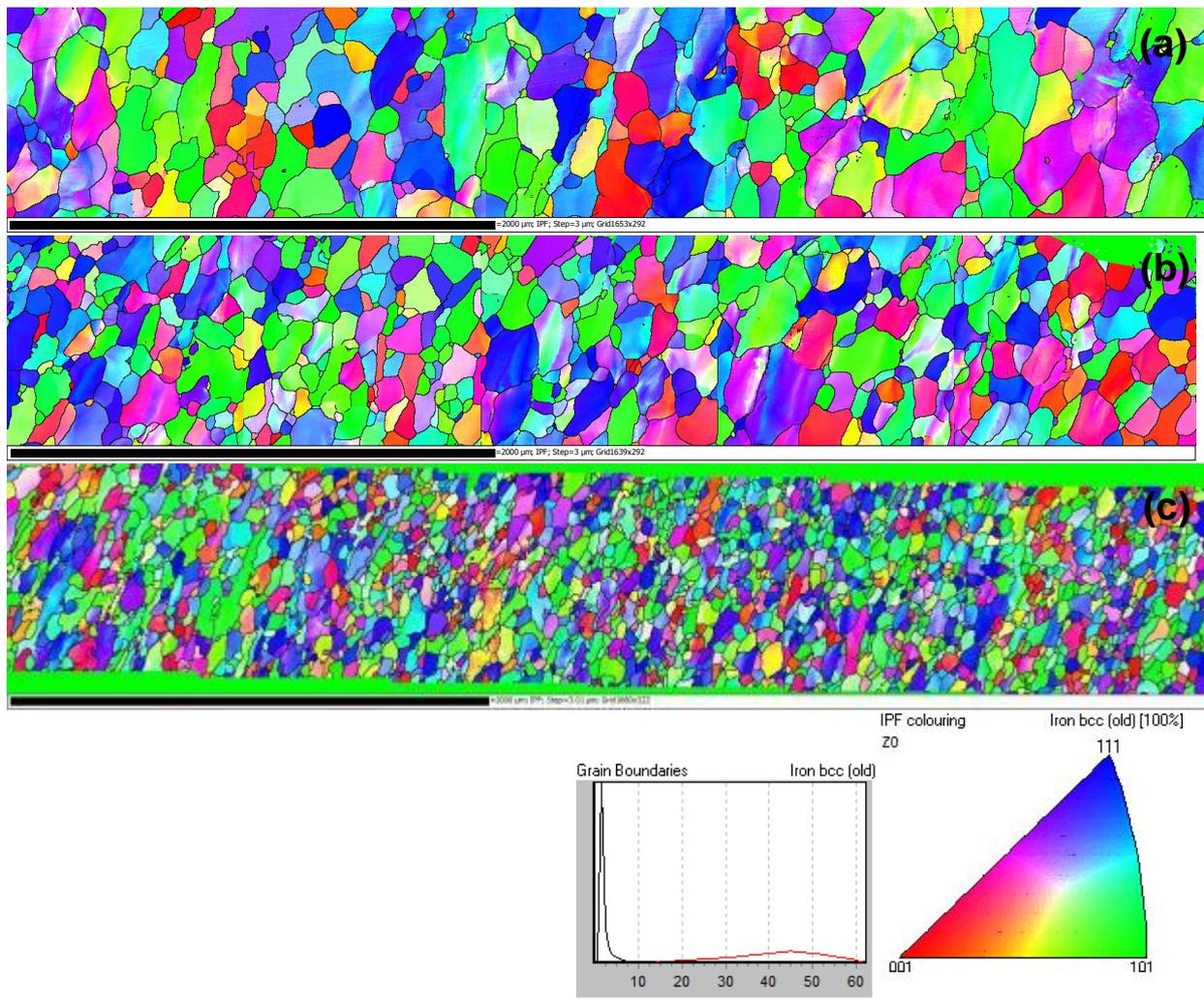


Figura 6: Mapas de figura de polo inversa das amostras dos ensaios interrompidos antes do 4º passe para o (a) esquema 4, (b) esquema 5 e (c) esquema 6.

As Figuras 7a a 7c mostram os mapas de figura de polo inversa das amostras dos ensaios interrompidos antes do 5º passe. Pode-se observar formação de novos grãos e grãos deformados. Neste caso, as amostras acumularam quatro passes de deformação, portanto, grãos recristalizados anteriormente aparecem deformados após o 4º passe de deformação. A microestrutura referente à amostra do esquema 6 (Figura 7c) se mostra mais fragmentada comparada às amostras dos esquemas 4 e 5, como mostrado nas Figuras 7a e 7b respectivamente.

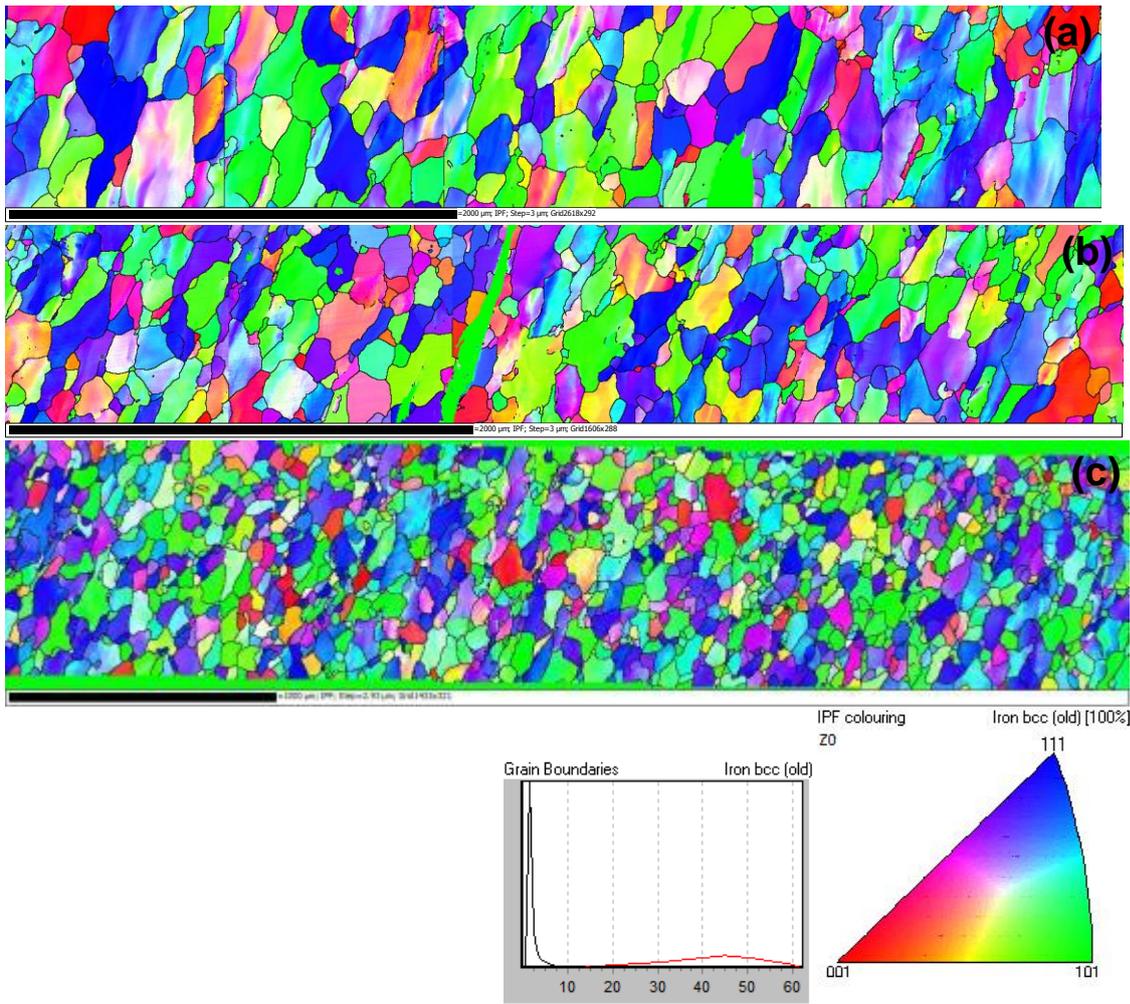


Figura 7: Mapas de figura de polo inversa das amostras dos ensaios interrompidos antes do 5º passe para o (a) esquema 4, (b) esquema 5 e (c) esquema 6.

Os mapas de figura de polo inversa das amostras dos ciclos completos para os esquemas 1 e 6 são apresentados nas Figuras 8a e 8b respectivamente. É importante destacar o refinamento da microestrutura da amostra do esquema 6 quando comparada à da amostra do esquema 1. O refinamento da microestrutura, promovido pela recristalização durante a etapa de laminação a quente, é de grande importância para minimizar o problema de estriamento em aços inoxidáveis ferríticos do tipo AISI 430, conforme já mencionado. Visto que a recristalização, em muitos casos, modifica de forma significativa a textura dentro do material por meio da quebra da textura de solidificação [8].

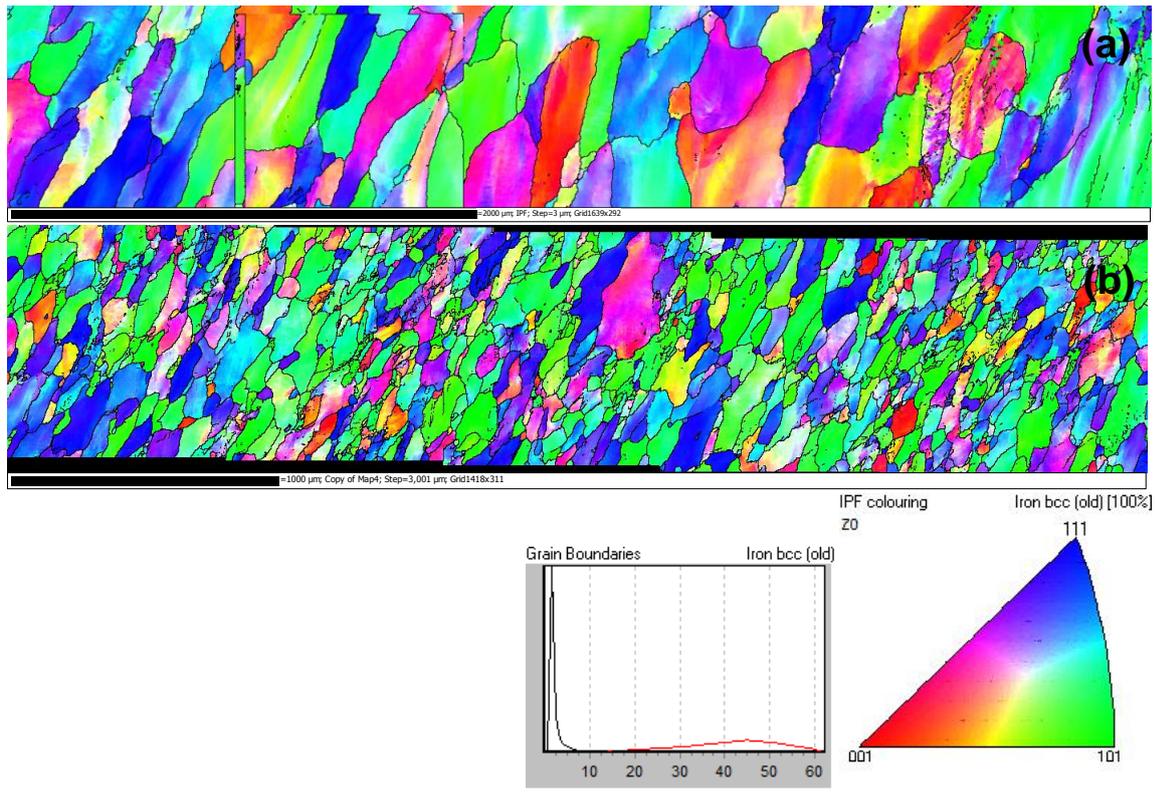


Figura 8: Mapas de figura de polo inversa das amostras dos ciclos completos para o (a) esquema 1 e (b) esquema 6.

4 CONCLUSÃO

Foi confirmado que ocorre recristalização entre passes no aço inoxidável ferrítico estabilizado ao Nióbio na faixa de temperatura entre 960 a 840°C, por meio de ensaios de simulação de laminação de acabamento em laminador Steckel. Os esquemas mais favoráveis para a recristalização foram os que tiveram início da simulação de laminação de acabamento entre 960 a 900°C.

As técnicas de análise por microscopia óptica, após ataque colorante e uso de luz polarizada e por EBSD, combinadas com a análise das curvas de torção foram adequadas para verificar a ocorrência de recristalização estática entre os passes da laminação de acabamento em Steckel.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia-CBMM pelo apoio financeiro e discussões, à Aperam South America pelo apoio técnico e fornecimento de amostras, ao Dr. Marco Antônio da Cunha pelas discussões. MSA e FVB agradecem ao CNPq e à Capes pelas bolsas concedidas. FVB agradece à FAPEMIG pela bolsa de doutorado.



REFERÊNCIAS

- 1 Siqueira RP, Sandim HRZ, Oliveira TR. Texture evolution in Nb-containing ferritic stainless steels during secondary recrystallization. *Materials Science and Engineering A*, 2008; 497; 216-223.
- 2 Brochu M, Yokota T, Satoh S. Analysis of Grain Colonies in Type 430 Ferritic Stainless Steels by Electron Back Scattering Diffraction (EBSD). *ISIJ International*, 1997; 37: 872 – 877.
- 3 Takechi H, Kato H, Sunami T, Nakayama T. The Mechanism of Ridging Formation in 17%-Chromium Stainless Steel Sheets. *Transactions JIM, Japan*, 1967; 8: 233-239.
- 4 Shin H, An K, Park SH, Lee DN. The Effect of Texture on Ridging of Ferritic Stainless Steel. *Acta Materialia*, 2003; 51: 4697-4706.
- 5 Wei D, Lai-Zhu J, Quan-She S, Zhen-Yu L, Xin Z. Microstructure, Texture, and Formability of Nb+Ti Stabilized High Purity Ferritic Stainless Steel. *Journal of Iron And Steel Research*, 2010; 17: 47-52.
- 6 Yan H, Bi H, Li X, Xu Z. Microstructure, texture and grain boundaries character distribution evolution of ferritic stainless steel during rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009; 209: 2627-2631.
- 7 Gao F, Liu Z. Development of very tough ferritic stainless steels by improving the recrystallized microstructure. *Materials Science Forum*, 2013; 753: 526-529.
- 8 Oliveira TR, Silva RCR, Alcântara CM, *et al.* Aço inoxidável ferrítico tipo ASTM 430 para estampagem profunda, com alto brilho e isento de estriamento. 68º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Julho 2013, Belo Horizonte, Brasil.