



SIMULAÇÃO DA LAMINAÇÃO A QUENTE DE UM AÇO MICROLIGADO AO NIÓBIO UTILIZANDO ENSAIOS DE TORÇÃO*

Nilo Nogueira da Silva¹
 Nilton José Lucinda de Oliveira²
 Thompson Júnior Ávila Reis³
 Margareth Spangler Andrade⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho foi investigar alterações microestruturais em um aço microligado ao Nióbio simulando sua laminação através de ensaios de torção a quente. Ensaios de torção com deformações em resfriamento contínuo foram realizados para determinar as temperaturas críticas do material, que também foram calculadas empregando equações disponíveis na literatura. Um esquema de laminação a quente semelhante ao utilizado em laminadores reversíveis foi simulado variando-se as temperaturas dos passes de acabamento. Análise metalográfica foi conduzida por microscopia óptica com objetivo de obter o tamanho de grão ferrítico dos corpos de prova após simulações. Medições de dureza também foram realizadas. Foi constatado que o refino do grão ferrítico e consequente aumento da dureza são proporcionais à queda de temperatura do último passe da simulação.

Palavras-chave: Aço Microligado; Ensaios de Torção; Simulação de Laminação a Quente; Nióbio.

SIMULATION OF THE HOT ROLLING OF A NIOBIUM MICROALLOYED STEEL BY TORSION TESTS

Abstract

The aim of this work was to investigate the microstructural changes in a niobium microalloyed steel by hot rolling simulation using torsion tests. Torsion tests with deformations during continuous cooling were carried out in order to obtain the critical temperatures of the material, which were also calculated by employing equations available in the literature. A scheme of hot rolling, similar to those used in reversible rolling mills, was simulated by temperature variation of the finishing passes. Metallographic analyses were carried out by optical microscopy in order to obtain the ferritic grain size of the specimens after simulations. Hardness measurements were also performed on the samples. It was observed that the refining of the ferritic grain and consequent increase of the hardness are proportional to the decrease in temperature of the last pass of the simulation.

Keywords: Microalloyed Steel; Torsion Tests; Hot Rolling Simulation; Niobium.

¹ Físico. MSc. Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT) – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico. MSc. Pesquisador em Tecnologia. Instituto Senai de Inovação em Metalurgia e Ligas Especiais – Centro de Inovação e Tecnologia Senai-Fieng – Campus Cetec. Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Engenheiro da Computação. MSc. Pesquisador em Tecnologia. Instituto Senai de Inovação em Metalurgia e Ligas Especiais – Centro de Inovação e Tecnologia Senai-Fieng – Campus Cetec. Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Física. Dr. Pesquisadora em Tecnologia. Instituto Senai de Inovação em Metalurgia e Ligas Especiais – Centro de Inovação e Tecnologia Senai-Fieng – Campus Cetec. 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 de alta resistência e baixa liga (ARBL) são conhecidos por terem sua resistência aumentada pela combinação de refinamento de grão, endurecimento por solução sólida e por precipitação. São amplamente utilizados em vários setores industriais como o automobilístico, de petróleo e gás e estrutural. Sua ampla aplicabilidade incentiva estudos direcionados à melhoria de suas propriedades mecânicas. As principais pesquisas se concentram em elucidar os efeitos de adições de elementos microligantes, combinado com o controle dos parâmetros do processamento termomecânico, objetivando principalmente o refino de grão [1].

Elementos microligantes promovem diferentes efeitos na microestrutura destes aços. O Nióbio tem sido o mais efetivo para obter as propriedades desejadas, quando combinado com tratamento termomecânico adequado [2]. Este elemento apresenta solubilidade intermediária e forte influência sobre a cinética de recristalização da austenita durante a laminação a quente, que resulta no refino de grão ferrítico após a transformação austenita-ferrita [3, 4].

Um dos métodos de laminação destes aços emprega um laminador acabador reversível do tipo Steckel. O processo de laminação de acabamento neste laminador apresenta uma cinética diferente dos laminadores convencionais que utilizam várias cadeiras de acabamento montadas em sequência [5].

Os parâmetros de laminação destes aços são controlados de maneira que um tratamento termomecânico seja realizado e as melhores propriedades quanto ao comportamento mecânico do produto final sejam obtidas. No início da laminação, em temperaturas mais elevadas, a austenita que está sendo deformada recristaliza. As temperaturas e deformações nesta etapa são controladas para promover refinamento dos seus grãos. Em seguida, em temperaturas intermediárias, a deformação da austenita é realizada sem que ocorra recristalização. Deste modo, a austenita fica encruada e seus grãos se tornam achatados. Com isso, o número de sítios disponíveis para posterior nucleação da ferrita é multiplicado e o seu crescimento restringido. Finalmente, em temperaturas onde as fases austenita e ferrita coexistem, a deformação do aço ocorre de maneira tal que a ferrita sofre encruamento, aumentando a resistência do material. A austenita também encrua e aumenta o número de sítios disponíveis para nucleação da ferrita, fazendo com que a ferrita transformada neste estágio possua grãos ainda mais finos que os produzidos na etapa anterior.

A temperatura de não recristalização (T_{nr}), abaixo da qual a austenita não recristaliza, separa a etapa inicial da intermediária e a temperatura de início de transformação austenita-ferrita (Ar_3) separa a etapa intermediária da final.

T_{nr} e Ar_3 podem ser calculadas a partir da composição química dos aços, conforme Equações 1 [6] e 2 [7] que foram estabelecidas a partir de correlações múltiplas de resultados experimentais.

$$T_{nr} = 887 + 464C + (6445Nb - 644\sqrt{Nb}) + (732V - 230\sqrt{V}) + 890Ti + 363Al - 357Si \quad (1)$$

$$Ar_3 = 910 - 310C - 80Mn - 20Cu - 15Cr - 55Ni - 80Mo + 0.35(t-8) \quad (2)$$

Onde t , na Equação 2, é a espessura da placa laminada e é considerada entre 8 e 30mm.

Deve-se destacar a importância de estudar os fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante o processo de laminação a quente destes aços, pois acontecem alterações

* 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.



relevantes na microestrutura além das transformações de fases. Com o conhecimento das temperaturas críticas e seus efeitos, é possível ajustar os parâmetros de processamento como: temperatura, taxa de deformação, deformação, taxa de resfriamento e tempo entre passes, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do aço.

Uma técnica bastante utilizada para simular processos de conformação a quente de ligas metálicas são os ensaios de torção, que permitem obter amostras com microestrutura similar às produzidas em processos de laminação industrial [8-10]. Neste tipo de ensaio, é possível simular todo o processo de laminação desde o aquecimento inicial da placa até o bobinamento final da tira [11]. A aplicação de resfriamento rápido da amostra em qualquer estágio da deformação é possível, possibilitando o acompanhamento das mudanças microestruturais que ocorrem ao longo das etapas de deformação [10].

Nos ensaios de torção com múltiplas deformações em resfriamento contínuo é possível estimar as temperaturas críticas de processamento [12, 13].

Neste trabalho foi realizada simulação da laminação a quente de um aço microligado ao Nióbio em laminador reversível, empregando a técnica de ensaios de torção. Os objetivos principais foram determinar a melhor faixa de temperatura para realização da etapa de acabamento e avaliar o efeito da taxa de resfriamento empregada após o último passe de laminação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizadas amostras de um aço microligado ao Nióbio, para aplicações estruturais, retiradas do esboço de laminação de perfil, fornecido pela Gerdau Ouro Branco. Sua composição química em percentual em peso está indicada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço microligado ao Nióbio (% em peso)

C	Mn	Si	P	S	Ti	Nb	V	Al	N*
0,15	1,10	0,2	0,02	0,025	0,001	0,022	0,004	0,002	53

(*) em ppm.

Para os ensaios de torção a quente, corpos de provas com 7 mm de diâmetro e 15 mm de comprimento útil foram usinados no sentido longitudinal à direção de laminação. Estes ensaios foram realizados, em duas condições, utilizando uma máquina de ensaios universal Instron modelo 1125 com módulo de torção, sistema de aquecimento por indução e com atmosfera inerte para proteção contra oxidação. Primeiramente, foi realizado um ensaio com múltiplas deformações em resfriamento contínuo para determinação das temperaturas críticas do material (T_{nr} , Ar3 e Ar1), conforme metodologia descrita na literatura [11]. Neste ensaio o corpo de prova foi aquecido até a temperatura de 1200°C a uma taxa de 2°C/s, mantido nesta temperatura por 2 minutos e, em seguida, resfriado a uma taxa de 1°C/s. Durante o resfriamento, deformações equivalentes de 0,2 foram aplicadas em intervalos de 30°C, a partir da temperatura de 1170°C até a ruptura do corpo de prova. Também foram realizados os cálculos de T_{nr} e Ar3 utilizando as Equações 1 e 2, respectivamente, para comparação com os valores obtidos no ensaio de torção a quente.

Em seguida, ensaios de torção foram realizados para simular a laminação industrial em um laminador reversível do tipo Steckel. Nesta simulação utilizou-se um esquema similar ao empregado na indústria e foram mantidas fixas as etapas 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.



reaquecimento, as temperaturas e deformações dos passes equivalentes à etapa de desbaste e as deformações dos passes equivalentes à etapa de acabamento; variando-se somente as temperaturas dos passes de acabamento e a taxa de resfriamento após a última deformação. Nas Tabelas 2 e 3 estão detalhados os parâmetros de laminação que foram simulados. Os tempos entre passes foram calculados considerando o meio do comprimento de uma tira sendo laminada.

Tabela 2. Esquemas de passes para a simulação do aço no laminador reversível do tipo Steckel equivalente à etapa de desbaste

Passo	Deformação equivalente	Tempo entre passes (s)	Temperatura °C
R1	0,16		1200
R2	0,24	5	1160
R3	0,30	6	1130
R4	0,37	6	1100
R5	0,42	8	1070
R6	0,44	10	1030
R7	0,45	13	1000

Tabela 3. Esquemas de passes para a simulação do aço no laminador reversível do tipo Steckel equivalente à etapa de acabamento

Passo	Deform. Equiv.	Tempo entre passes (s)	Temperatura °C						
			Esq.1	Esq.2	Esq.3	Esq.4	Esq.5	Esq.6	Esq.7
F1	0,44	*	960	930	900	870	840	810	780
F2	0,41	11	960	930	900	870	840	810	780
F3	0,38	10	960	930	900	870	840	810	780
F4	0,33	14	950	920	890	860	830	800	770
F5	0,28	20	940	910	880	850	820	790	760
F6	0,21	30	930	900	870	840	810	780	750

(*) O tempo entre passes da deformação de acabamento F1 variou de acordo com a temperatura de realização dos ensaios.

Nas simulações, todos os corpos de prova foram aquecidos até a temperatura de 1.230°C a uma taxa de 2°C/s e mantidos nesta temperatura por 2 minutos. Em seguida foram resfriados a uma taxa compatível com o tempo entre passes e aplicadas sete deformações equivalentes à etapa de desbaste no laminador, conforme Tabela 2. Posteriormente, aplicaram-se as deformações equivalentes à etapa de acabamento. Cada ensaio teve esta etapa realizada a partir de uma temperatura específica, conforme discriminado na Tabela 3. No final da última deformação os corpos de prova foram resfriados até a temperatura de 550°C para simular o resfriamento entre o laminador e a bobinadeira, sendo utilizadas duas taxas de resfriamento, 5 e 15°C/s. Em todos os ensaios de torção a quente foi adotado uma taxa de deformação de 0,3 s⁻¹.

Para a análise microestrutural, os corpos de prova de torção foram cortados e todo o comprimento útil embutido. O lixamento e o polimento foram realizados a partir da superfície do corpo de prova, em seção longitudinal ao seu eixo. Após ataque com nital 5%, análises por microscopia óptica foram conduzidas para determinar o tamanho de grão ferrítico e observar a morfologia destes em relação às temperaturas dos ensaios de torção e taxas de resfriamento empregadas. Para a determinação do tamanho de grão ferrítico foi utilizado o software Image-Pro, sendo o valor calculado pela média de no mínimo dez medidas, conforme norma ASTM E112.

* 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.



Os ensaios de dureza foram realizados em um microdurômetro de marca Future Tech, modelo FM-700, no padrão Vickers com carga de 300g (HV₃₀₀) nas seções preparadas para análise metalográfica. Os valores de dureza foram relacionados com as temperaturas de último passe das simulações da laminação de acabamento, com as taxas de resfriamento empregadas e com os tamanhos de grão ferrítico obtidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de Torção com Múltiplas Deformações em Resfriamento Contínuo

A Figura 1(a) ilustra as curvas de tensão equivalente em função da deformação equivalente obtidos no ensaio de torção em resfriamento contínuo e a Figura 1(b) a tensão equivalente média em função do inverso da temperatura absoluta.

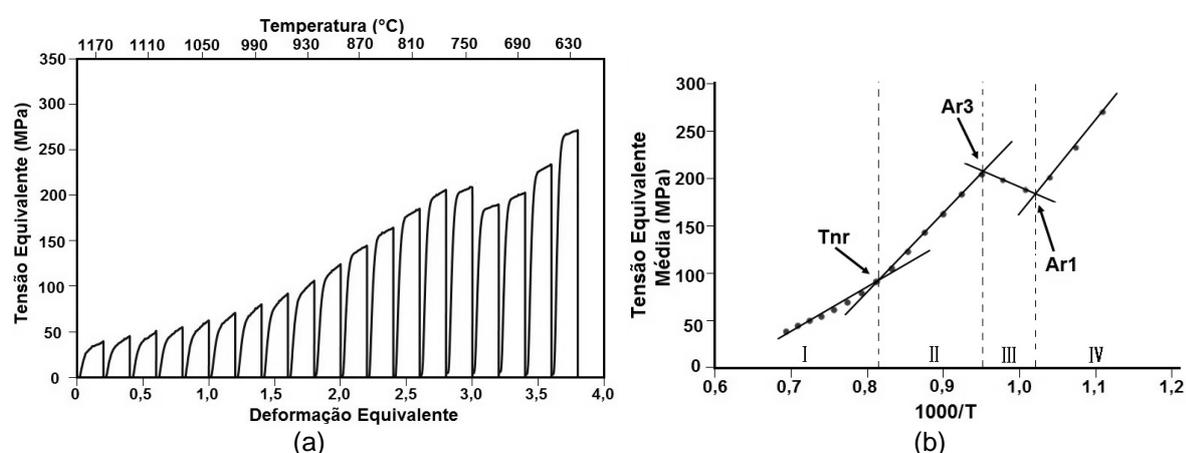


Figura 1. (a) Curva de tensão versus deformação obtida através do ensaio de torção com múltiplas deformações em resfriamento contínuo. (b) Curva das tensões médias equivalentes versus $1000 \times 1/T$, mostrando T_{nr} , Ar_3 e Ar_1 para o aço.

Por meio da Figura 1(a) observou-se que a tensão aumenta na medida em que a temperatura diminuiu, e que ocorreu amaciamento entre passes (recristalização estática da austenita) acima de 960°C . Já em temperaturas menores do que 960°C ocorreu aumento acentuado da tensão, com acúmulo de encruamento na austenita. Este fato é decorrente da mudança da região de recristalização para a região de encruamento. Seguindo a diminuição de temperatura, observou-se a queda de tensão, evidenciando o início de transformação austenita-ferrita. Finalmente, o aumento da tensão com a diminuição da temperatura evidencia o final da transformação austenítica.

Na Figura 1(b) está representado o gráfico de tensão média equivalente pelo inverso da temperatura absoluta vezes mil ($1.000 \times 1/T$). A partir deste gráfico determina-se com precisão os valores de T_{nr} , Ar_3 e Ar_1 . A temperatura de transição entre as regiões I e II na Figura 1(b) equivale a temperatura T_{nr} que foi igual a 950°C . A temperatura de transição entre as regiões II e III, ou seja, Ar_3 foi igual a 780°C . Os valores obtidos nos cálculos empregando as Equações 1 e 2 citadas acima para T_{nr} e Ar_3 foram 925 e 775°C , respectivamente. Observou-se boa relação entre os valores de T_{nr} e Ar_3 obtidos no ensaio de torção e calculados. Resultados similares foram encontrados na literatura para um aço de composição química similar [14].

* 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.



3.2 Simulação da Laminação Industrial

As curvas de tensão versus deformação obtidas nos ensaios para simulação de laminação estão apresentadas no gráfico da Figura 2.

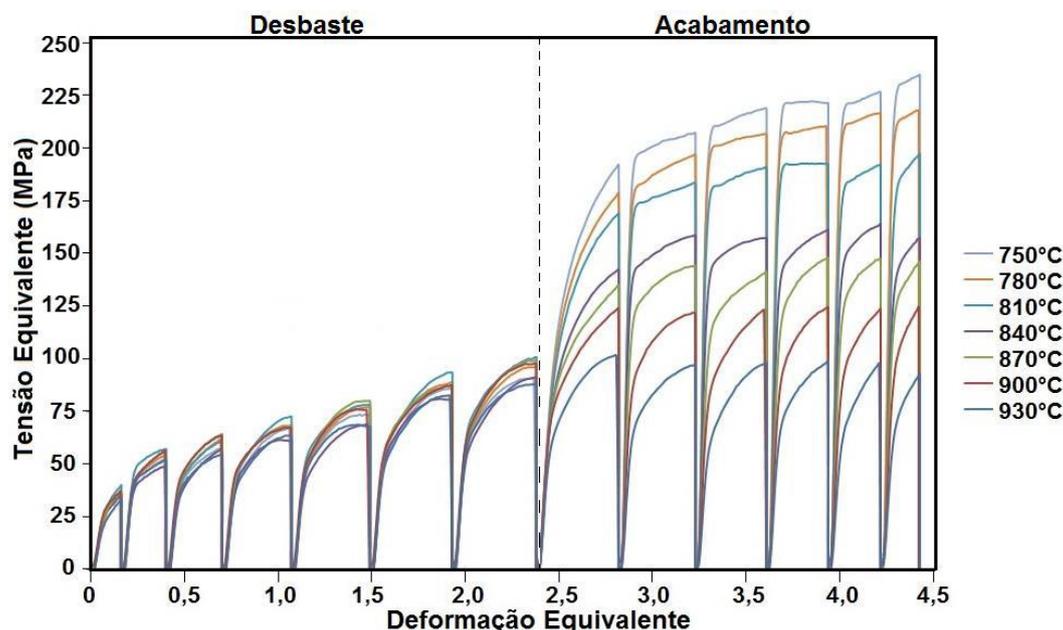


Figura 2. Curvas tensão versus deformação da simulação do esquema de laminação por torção. Os sete primeiros passes representam a etapa de desbaste e as demais a etapa de acabamento. Temperaturas de último passe variando entre 930°C e 750°C.

As temperaturas do último passe de acabamento das simulações são mostradas na legenda do gráfico da Figura 2. Esta figura permite observar que, na região correspondente à laminação de desbaste, não foi observado amaciamento dinâmico em nenhuma das deformações, ocorrendo recristalização estática entre passes, evidenciada pelo fato da tensão de escoamento em cada passe ser menor que a tensão máxima do passe anterior. Portanto, toda a laminação de desbaste ocorre na região de recristalização.

O mesmo comportamento, recristalização entre passes, foi observado para a laminação de acabamento nos ensaios com temperatura de última deformação de 900 e 930°C, apesar de serem temperaturas abaixo de T_{nr} . A recristalização em temperaturas abaixo da T_{nr} pode ter ocorrido devido às maiores deformações em cada passe e diferentes tempos entre passes se comparado aos realizados nos ensaios com múltiplas deformações em resfriamento contínuo.

Um comportamento transitório é observado nos ensaios com temperatura de 840 e 870°C. Nestes, verifica-se pouca ou nenhuma recuperação entre os dois primeiros passes de acabamento. Entre os demais passes observou-se amaciamento estático mais acentuado.

Na região de laminação de acabamento, nos ensaios com temperatura de último passe abaixo de 840°C, foi constatado o acúmulo de encruamento entre passes.

3.3 Análise Metalográfica

As imagens de microscopia ótica das amostras extraídas dos corpos de prova nas simulações de laminação com taxa de resfriamento após última deformação de 5 e 15°C/s estão ilustradas nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

* 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.

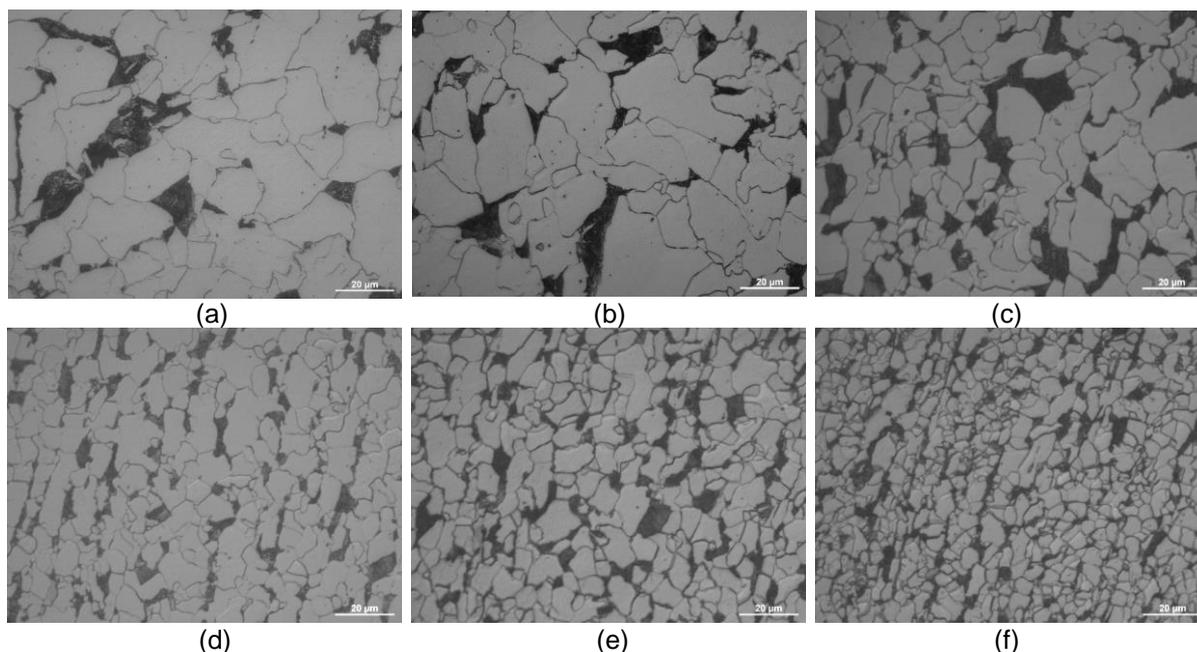


Figura 3. Imagens de microscopia óptica nas regiões deformadas dos corpos de prova de torção para as temperaturas de último passe de (a) 930°C, (b) 870°C, (c) 840°C, (d) 810°C, (e) 780°C e (f) 750°C. Simulações com taxa de resfriamento após a última deformação de 5°C/s. Ataque químico nital.

Análises de microscopia óptica das amostras extraídas dos corpos de prova da simulação de laminação com resfriamento após última deformação de 5°C/s permitiram observar que a microestrutura final era constituída de grãos aproximadamente equiaxiais de ferrita e de perlita. Não se observou acentuada variação no tamanho de grão ferrítico nas simulações com temperatura de último passe variando entre 870 e 930°C. No entanto, para as temperaturas abaixo de 870°C as imagens de microscopia óptica permitiram observar contínuo refinamento dos grãos de ferrita com a diminuição da temperatura de ensaio, conforme ilustrado na Figura 3. Estes resultados apresentam boa relação com os resultados apresentados na Figura 2, que indicam ter ocorrido encruamento da austenita a partir das simulações com temperatura final de 840°C e abaixo.

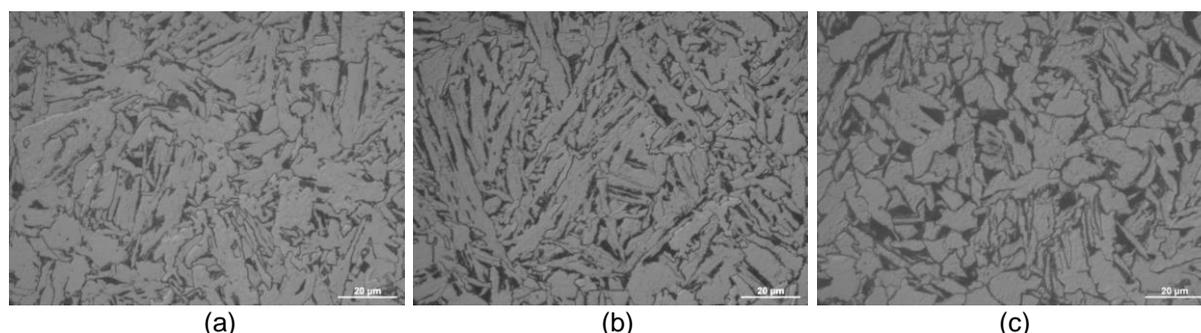


Figura 4. Imagens de microscopia óptica nas regiões deformadas dos corpos de prova de torção para as temperaturas de último passe de (a) 930°C, (b) 900°C e (c) 870°C. Simulações com taxa de resfriamento após a última deformação de 15°C/s. Ataque químico nital.

As simulações de laminação com resfriamento de 15°C/s após última deformação produziram microestrutura final constituída de grãos aciculares de ferrita nas temperaturas de último passe variando entre 870 e 930°C, conforme está ilustrado na Figura 4. Provavelmente, a combinação de fatores como tamanho de grão da austenita relativamente grande com maior taxa de resfriamento pode ter promovido

* 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.



diminuição da temperatura de transformação austenita-ferrita. Isto porque a austenita é mais estável quando o tamanho de grão é maior. Para as temperaturas de último passe abaixo de 870°C a microestrutura observada foi similar àquelas observadas com taxa de resfriamento de 5°C/s, ou seja, grãos equiaxiais de ferrita e perlita. Neste caso, a austenita com tamanho de grão reduzido e, portanto, menos estável, favoreceu a transformação para ferrita em uma faixa de temperatura mais elevada, promovendo a formação de uma microestrutura equiaxial.

As simulações de laminação utilizando o esquema proposto mostraram que as temperaturas de último passe, nas quais foi possível obter refinamento mais acentuado dos grãos ferríticos a partir de austenita não recristalizada (750 a 840°C), são baixas quando comparadas com as temperaturas usuais de laminação. Sabe-se, no entanto, que o aumento no teor de Nb possibilita o aumento da temperatura de não recristalização, permitindo que sejam empregadas temperaturas mais elevadas de último passe, compatíveis com cargas adequadas ao laminador [15].

A Figura 5(a) ilustra o tamanho de grão médio da ferrita em μm e a Figura 5(b) ilustra o tamanho de grão ASTM médio ambos em função da temperatura de última deformação, para as duas taxas de resfriamento empregadas após a última deformação.

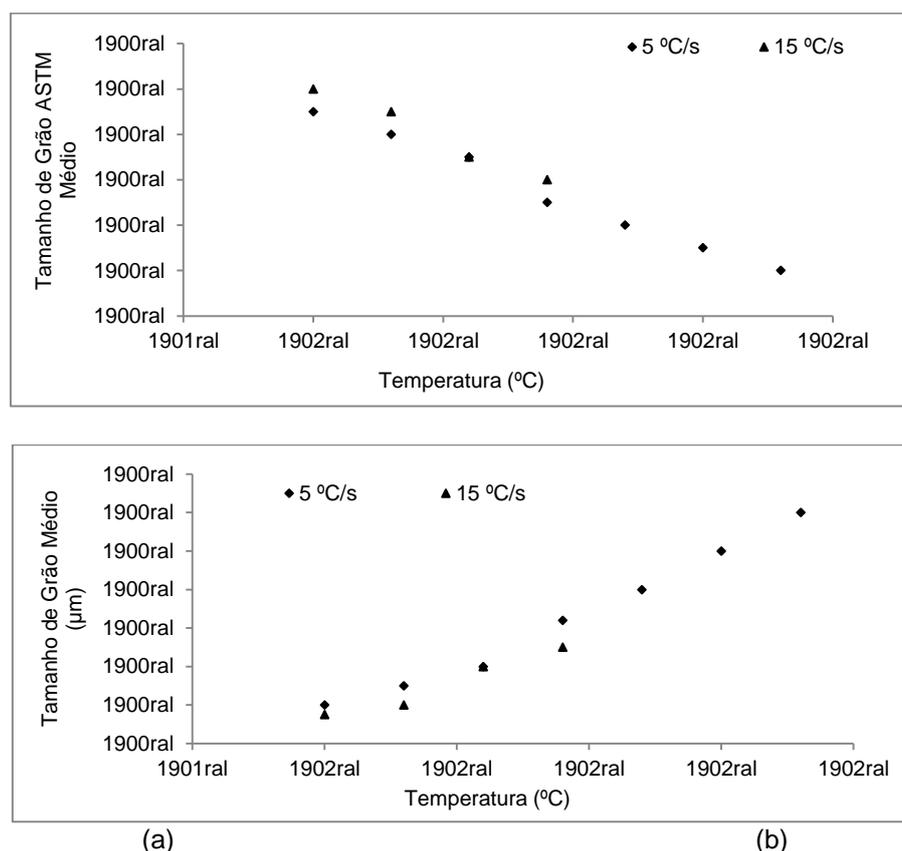


Figura 5. Efeito da temperatura de último passe no tamanho médio de grão ferrítico (a) em μm e (b) ASTM.

Conforme pode ser observado tanto na Figura 5(a) quanto na Figura 5(b), o tamanho de grão ferrítico diminuiu com a diminuição da temperatura de último passe. A partir das Figuras 5 (a, b) observou-se também que o refinamento do grão ferrítico foi similar para ambas às taxas de resfriamento. Na Figura 5(a) ainda foi possível identificar que o refino do grão ferrítico é mais acentuado a partir de temperaturas de último passe igual ou inferior a 840°C.

* 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.



A Figura 6(a) ilustra a relação entre dureza Vickers em função da temperatura de último passe para as simulações com taxas de resfriamento final de 5 e 15°C/s. Para a taxa de resfriamento de 5°C/s observou-se um aumento contínuo da dureza em função da diminuição da temperatura de último passe. Este fato pode ser explicado com ajuda das imagens de microscopia óptica ilustradas na Figura 3 que revelam ter ocorrido formação de microestrutura similar exceto o tamanho de grão. Sendo assim, o único fator metalúrgico que influenciou a dureza do aço foi o tamanho de grão e, na medida em que este diminuiu, a dureza aumentou. Já as amostras das simulações com taxa de resfriamento de 15°C/s apresentaram microestrutura diferenciada em função da faixa de temperatura em que se iniciou o resfriamento. Com o acréscimo do fator metalúrgico referente à morfologia dos grãos de ferrita, observou-se uma mudança no comportamento mecânico com aumento da dureza nas amostras cuja microestrutura era acicular, ou seja, aquelas em que a temperatura de último passe na simulação foi maior ou igual a 870°C. É importante mencionar que o aumento da dureza observado nestas amostras não necessariamente representa um benefício uma vez que a formação desta microestrutura pode ser indesejada por provavelmente implicar em perdas em propriedades como ductilidade e tenacidade. Quando a microestrutura das simulações com taxa de resfriamento de 15°C/s apresentou granulométrica equiaxial similar aos observados nas amostras das simulações com taxa de resfriamento de 5°C/s, a dureza também foi similar. Este fato foi observado para as simulações com temperatura de último passe menor ou igual a 840°C.

A Figura 6(b) destaca que a diferença nas taxas de resfriamento não influenciou significativamente na dureza do aço.

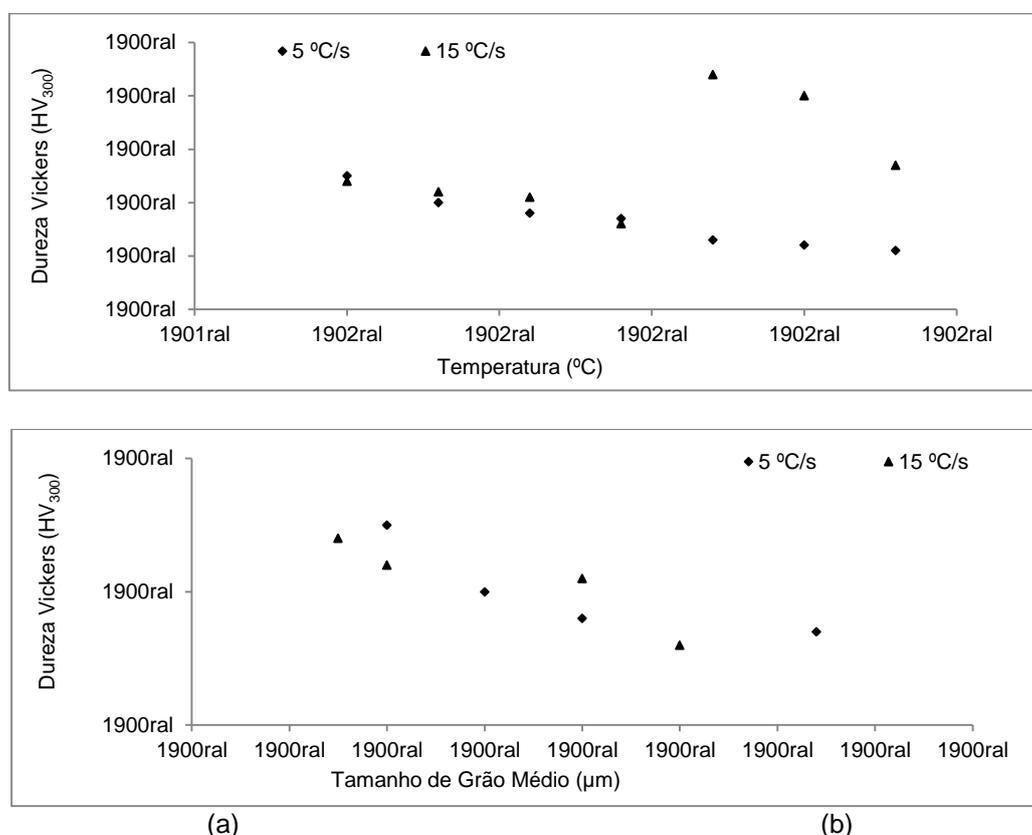


Figura 6. Dureza Vickers em função (a) da temperatura de último passe e (b) do tamanho de grão médio em μm .



4 CONCLUSÃO

As temperaturas críticas determinadas por ensaios de torção a quente para o aço microligado ao Nióbio estudado foram de 950°C para T_{nr} e 780°C para Ar₃. Estes valores estão em acordo com aqueles obtidos utilizando-se equações disponíveis na literatura.

O emprego de uma taxa de resfriamento maior (15°C/s) após a última deformação promoveu a formação de uma microestrutura constituída de grãos aciculares nas simulações em que a temperatura de último passe foi igual o maior a 870°C.

Nas simulações com taxa de resfriamento de 5°C/s após a última deformação, o tamanho de grão ferrítico foi refinado de 14 µm, na região de recristalização, para até 4 µm na região de não recristalização, como consequência da laminação controlada e a utilização do Nb como microligante.

Em todas as simulações cuja microestrutura final era constituída de grãos equiaxiais de ferrita e perlita observou-se o aumento da dureza em função da diminuição do tamanho de grão ferrítico.

As temperaturas de último passe nas quais foi possível obter refinamento de grãos ferríticos a partir de austenita não recristalizada são baixas, na faixa 750 a 840°C, quando comparadas com as temperaturas usuais de laminação a quente. A elevação do teor de Nb do aço permitiria o aumento da temperatura de não recristalização, possibilitando o emprego de temperaturas mais elevadas de último passe, compatíveis com cargas adequadas ao laminador.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia-CBMM pelo apoio financeiro e discussões e à Gerdau Ouro Branco pelo apoio técnico e fornecimento de amostras. NNS e MSA agradecem ao CNPq pelas bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS

- 1 Park D-B, Huh MY, Shim J-H, Suh J-Y, Lee K-H, Jung W-S. Strengthening Mechanism of Hot Rolled Ti and Nb Microalloyed HSLA Steels Containing Mo and W with Various Coiling Temperature. *Materials Science & Engineering A*, 2012: 528 - 534.
- 2 Silva MC. Determinação Experimental da Tenacidade à Fratura da Zona Termicamente Afetada de Junta Soldada de Aço API 5L X80. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2009.
- 3 Gorni AA. Análise de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA. In: Congresso de Corte e Conformação de Metais. Aranda Eventos, São Paulo; 2009.
- 4 Turazi A. Estudo de Diferentes Rotas de Processamento para Refino de Grão e Seu Efeito na Estampabilidade de Aços ARBL. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2008.
- 5 Shuwarten WJr. Caracterização e Modelagem Matemática da Fração Recristalizada de Ferrita no Aço Inoxidável Ferrítico AISI 430 Durante o Processo de Deformação a Quente em Laminador Steckel. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2007.
- 6 Borato F, Barbosa R, Yue S, Jonas JJ. Effect of Chemical Composition on the Critical Temperature of Microalloyed Steels, 1988; 1: 383-390. ISIJ International.

* 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.



- 7 Ouchi C, Sampei T, Kozasu I. The Effect of Hot Rolling Condition and Chemical Composition on the Onset Temperature of γ - α Transformation After Hot Rolling. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1982; 22: 214-222.
- 8 Souza SA. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos—Fundamentos Teóricos e Práticos. São Paulo: Edgard Blucher; 1982.
- 9 Souza RA, Marques A, Tasca MRB, Nogueira L, Machado MLP. Avaliação da Recristalização Dinâmica do Aço Estrutural SAE 4140 Através de Ensaios de Torção a Quente. 2012. II Workshop de Ciência e Tecnologia em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do PROPEMM-IFES. Vitória.
- 10 Rosa LB. Estudo do Comportamento Termomecânico do Aço API 5L Microligado ao Nb-V-Ti por Ensaios de Torção a Quente. Vitória: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo. 2011.
- 11 Boratto F, Yue S.; Jonas, J.J.; Lawrence, T. Projeto de Esquemas de Laminação Controlada Através de Ensaio de Torção Computadorizado. In: COLAM-ABM, 1987, São Paulo, Brasil.
- 12 Padilha AF, Siciliano Jr F. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. São Paulo: ABM, 2005.
- 13 Barbosa RANM, Boratto FJM, Santos DB. Fundamentos da laminação controlada. Belo Horizonte: UFMG, 1989.
- 14 Barcelos VM, Vieira EA, Oliveira NJL, Machado MLP. Análise do Comportamento Mecânico de um Aço Estrutural Através de Ensaios de Torção. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 66(3), 317-322, 2013.
- 15 Calvo J, Collins L, Yue S. Design of Microalloyed Steel Hot Rolling Schedules by Torsion Testing: Average Schedule VS. Real Schedule, 2010: 1193-1199. ISIJ International.

* 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.