

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NIÓBIO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA BARRA CHATA TEMPERADA E REVENIDA PARA APLICAÇÃO EM FEIXES DE MOLA¹

*Eduardo de Oliveira Diniz²
Rosan Fernandes Lima³
Dagoberto Brandão Santos⁴*

Resumo

Avaliou-se a influência que diferentes percentuais de adições de nióbio provocam nas propriedades mecânicas e na estrutura da barra chata temperada e revenida aplicada em feixes de mola. Através de microscopia ótica, a barra laminada antes do tratamento térmico foi avaliada, sendo realizada a medição do tamanho de grão austenítico, caracterização da estrutura, medição de dureza e limite de resistência à tração. Na barra tratada termicamente foi realizada caracterização da estrutura por microscopia ótica e medição de dureza. Realizou-se também teste de fadiga. Os resultados mostraram que os percentuais de nióbio adicionado não têm grande influência já que as diferenças detectadas nos resultados de dureza e limite de resistência da barra laminada foram pequenas, assim como o refinamento de grão observado. Na barra temperada, a dureza não apresentou importantes mudanças no teste de fadiga foi observado apenas um pequeno aumento no número de ciclos até a fratura, quando se comparam corridas com nióbio e corrida sem nióbio. Os resultados obtidos ocorreram como consequência das condições de laminação, principalmente temperatura de reaquecimento de tarugos, que sendo baixa, da ordem de 1150°C, proporcionou pequena solubilização do nióbio do carbonitreto.

Palavras-chave: Aços microligados; Nióbio; Solubilização.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE NIOBIUM IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE QUENCHED AND TEMPERED FLAT BARS APLIED TO SPRINGS

Abstract

The goal was to evaluate how three different percents of addictions of niobium affect the mechanic properties and structure of quenched and tempered flat bars applied to springs. The samples were extracted from flat bars rolled and after quenched and tempered. The influences of different levels of niobium were evaluated in the rolled bars through measurement of the size of austenite grains, characterization of structure, measurement of hardness and tensile strength. In the quenched and tempered bars, the structure was characterized and the hardness measured. In the springs, fatigue tests were made. The results showed that niobium doesn't have significative effect on mechanical proprieties and microstructure of steel after rolling or after thermal treatment, and the same happened to the results of fatigue tests. This absence or small influence of niobium was attributed to the low temperature in the austenitization before rolling mill and before quench which cause merely a small solubilization of niobium.

Key words: Microalloyed steel; Niobium; Solubilization

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *Mestrando CPGEM-UFMG, Engenheiro Metalurgista, Belgo-Arcelor Brasil*

³ *Técnico Metalógrafo, Belgo-Arcelor Brasil*

⁴ *Professor Adjunto – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais EE UFMG*

INTRODUÇÃO

Com os requisitos cada vez mais elevados de qualidade para os produtos industriais, torna-se necessário estudar as possibilidades de alterações de propriedades que levem à melhoria de desempenho dos produtos em serviço. Estas melhorias são acompanhadas em muitos casos da necessidade de revisão de composição química, além de alterações em processamentos térmicos e mecânicos dos produtos. A alteração de propriedades dos produtos via mudanças na composição química levou ao desenvolvimento de aços microligados, principalmente em aços de baixo e médio teor de carbono, que por ter melhores propriedades em relação aos aços-carbono, têm sido largamente utilizados pela construção civil e indústria mecânica. A indústria utiliza os aços microligados ao nióbio na fabricação de componentes de automóveis, em tubulações de gás sob alta pressão e na construção de torres de transmissão de energia elétrica. A maioria dos aços microligados utilizam como elementos microligantes principalmente o nióbio, vanádio, titânio e alumínio. No caso do nióbio, formam-se partículas de carboneto, devido à grande afinidade deste elemento pelo carbono, ou carbonitretos, quando existe nitrogênio disponível.

O desenvolvimento de aços microligados é baseado basicamente em refinamento de grão para aumento de resistência e tenacidade, melhoria de tenacidade e soldabilidade para aços de baixo teor de carbono, endurecimento por precipitação no resfriamento, após laminação ou ainda em tratamento térmico posterior, endurecimento sub-estrutural devido a transformações de baixa temperatura da austenita para bainita e/ou martensita e endurecimento por solução sólida, apesar de que os elementos causadores deste efeito (C, N, P, Si) são os mais nocivos para a tenacidade. Nos aços baixo carbono o mecanismo básico para melhoria das propriedades através da adição de nióbio é o refinamento do grão ferrítico, enquanto em aços médio teor de carbono a resistência e tenacidade estão relacionados com pelo espaçamento interlamelar da perlita e o tamanho de suas colônias.

A indústria de autopeças utiliza vários aços de alto e médio teor de carbono para produção de molas helicoidais ou feixes de molas (Figura 1), e entre eles é o aço ABNT 5160. A necessidade de melhoria de desempenho do produto em uso final tem gerado demandas de alterações da composição química o que tem refletido na revisão das normas nacionais ou dos clientes, que passam a exigir a utilização de microligantes refinadores de grãos. Um exemplo de composição química revisada solicitada pelo mercado está registrado na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química especificada por um fabricante de feixes de mola.

%C	%Mn	%Si	%P máx	%S máx	%Cr máx	%Al+Nb
0,56-0,64	0,75-1,00	0,15-0,35	0,030	0,035	0,70-0,90	0,015-0,040

O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações nas propriedades da barra nos estados laminado e temperado e revenido considerando a inclusão de diferentes percentuais de nióbio (sem adição, 0,020% e 0,040%) visando atender às novas exigências dos clientes, conforme mostrado na Tabela 1. Para isto foram produzidos e estudados lotes de barras laminadas e tratadas termicamente em processo real dos clientes e verificada as alterações através de ensaios largamente utilizados como ensaios de tração, fadiga, tenacidade, medição de dureza e caracterização microestrutural.



Figura 1. Feixe de molas

MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química dos aços comparados é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Composições químicas obtidas dos aços utilizados no estudo (% em peso).

Corrida	C	Mn	Si	P	S	Nb	Cr
Sem Nb	0,59	0,89	0,22	0,028	0,034	0,00	0,76
Nb = 0,02%	0,59	0,88	0,23	0,032	0,026	0,02	0,82
Nb = 0,04%	0,57	0,83	0,23	0,035	0,027	0,04	0,81

Com o objetivo de analisar apenas a influência que os diferentes percentuais de nióbio causariam no produto, os demais elementos químicos, assim como as condições de processamento em todas as corridas (temperatura e tempo de forno, velocidade de laminação) foram mantidas relativamente constantes.

Após laminação a quente no laminador de barras, retiraram-se amostras e as análises dos materiais foram feitas no laboratório metalográfico da usina e no laboratório de Metalografia e Microscopia Eletrônica da Escola de Engenharia da UFMG. No produto final, após tratamento térmico de têmpera e revenimento, foram retiradas amostras para avaliação da estrutura e medição de dureza. Utilizando o mesmo procedimento adotado para a barra laminada, mediu-se a dureza de amostras temperadas e revenidas.

Para realização da caracterização microestrutural, foram retiradas amostras, no material no estado de laminado a quente, para medição do tamanho de grão austenítico, o que foi feito conforme norma ASTM E-112.

Avaliou-se as características mecânicas através do ensaio de tração (limite de escoamento, resistência e alongamento), e para isto foram retiradas amostras do material laminado a quente para confecção dos corpos de prova, de acordo com a norma ASTM A-370. Mediu-se também a dureza do material no estado laminado utilizando-se um durômetro de bancada.

O material foi submetido após revenimento ao teste de fadiga que foi conduzido conforme norma ASTM. A Figura 2 mostra um conjunto de lâmina sendo submetida ao teste de fadiga.



Figura 2. Feixe de molas montado em máquina para ensaio de fadiga

RESULTADOS

Os resultados obtidos foram divididos em três tópicos: propriedades mecânicas, caracterização microestrutural da barra laminada e temperada e revenida e, finalmente, propriedades na fadiga da barra temperada e revenida.

Propriedades mecânicas no estado laminado

Os resultados de dureza e limite de resistência obtidos nas amostras das corridas nos estados laminado e revenido estão registrados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados de dureza e LR para os estados laminado e revenido

Corrida	Dureza laminado (HB)	Dureza Revenido (HRc)	LR laminado (MPa)
Nb = 0,000%	288	45	1002
Nb = 0,020%	308	45	1013
Nb = 0,040%	300	46	1012

Como será discutido adiante, espera-se, com a adição do nióbio, a redução no tamanho do grão austenítico médio dos aços leva a uma perlita mais fina. Desta forma, esperava-se que a corrida com adição de 0,04% de Nb apresentasse maior dureza do que a corrida com adição de 0,020% de Nb e esta por sua vez maior que a corrida sem adição. Com os resultados apresentados na Tabela 3 pode-se afirmar apenas que há uma pequena diferença entre o aço com e sem adição de nióbio, para as amostras no estado laminado e não foram observadas alterações significativas na dureza das amostras no estado revenido. O desvio padrão foi de 1,1 com 95% de nível de confiança.

Caracterização microestrutural no estado laminado

A Figura 3 apresenta as estruturas constituídas de perlita fina dos aços (a) sem adição de nióbio, (b) com 0,02% de nióbio e (c) com 0,04% de nióbio, na condição de laminado a quente após resfriamento ao ar em leito.

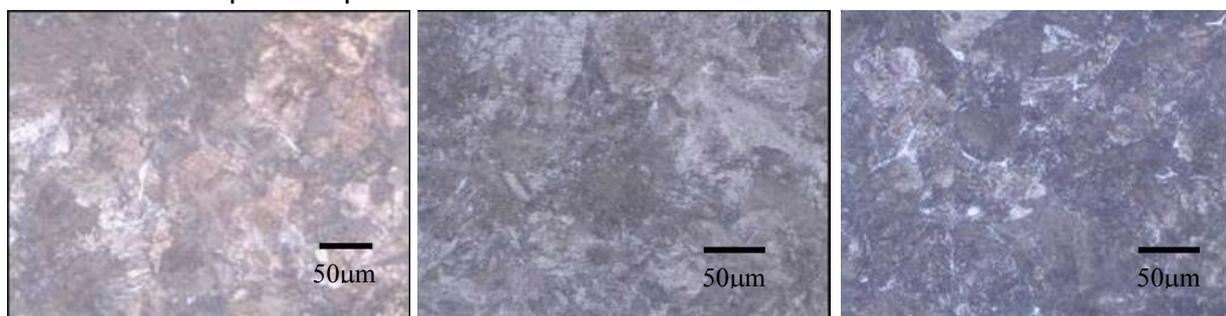


Figura 3. Estruturas dos aços analisados no estado laminado – aumento 500X.

A adição de nióbio nos percentuais indicados não teve influência significativa no resultado de tamanho de grão austenítico no produto laminado, conforme mostram os valores da Tabela 4 e Figura 4.

Tabela 4. Tamanho de grão austenítico no estado laminado.

Corrida	Tamanho de grão austenítico (μm)
Sem adição de Nb	20 +/- 2
Nb = 0,020%	18 +/- 2
Nb = 0,040%	16 +/- 2

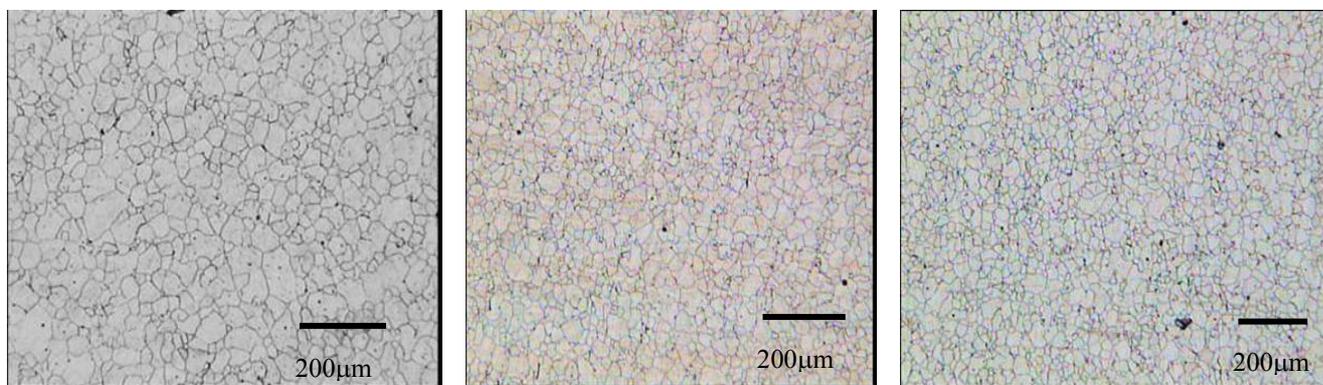


Figura 4. Estruturas dos aços analisados no estado laminado – aumento 100X.

Caracterização microestrutural no estado revenido

As três corridas apresentaram estrutura homogênea e composta de martensita revenida (Figura 5). Existe pequena fração de austenita retida, entretanto sem resolução através da microscopia ótica, que foi utilizada no estudo, mas através da difração de raios-X confirmou-se que a fração de austenita retida na estrutura temperada do aço 5160 é menor que 2%. Também não foi observada a presença de perlita fina ou bainita. A similaridade de estrutura entre as corridas, sem e com adição de nióbio, é consequência dos resultados obtidos na barra ainda no estado de laminada, como por exemplo, as pequenas diferenças entre o tamanho de grão médio, que é um fator influente na temperabilidade do aço.

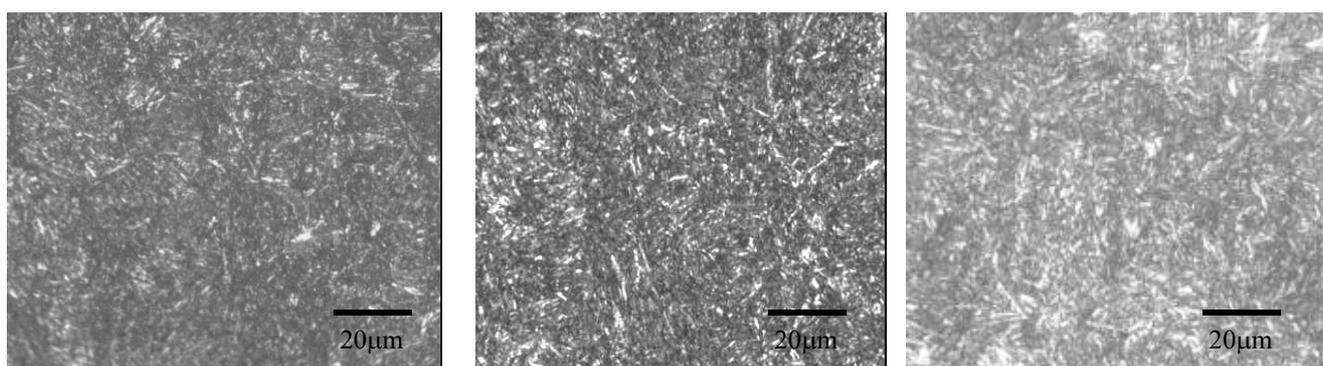


Figura 5. Estruturas dos aços analisados no estado revenido – aumento 1000X.

Descarbonetação no estado laminado

Adicionalmente, para caracterização completa do produto estudado, avaliaram-se os valores de descarbonetação. O resultado encontrado foi 0,15mm, o que atende ao especificado para o produto (<0,30mm).

Medição da vida à fadiga na mola (estado revenido)

Os resultados de número de ciclos até a fratura, obtidos no ensaio de fadiga dos feixes de mola construídos com barras temperadas e revenidas das corridas estudadas, estão apresentados na Tabela 5. Constatou-se, a partir dos resultados obtidos, que a inclusão do nióbio afetou o número de ciclos na fadiga de modo semelhante ao obtido para dureza e limite de resistência no laminado, ou seja, pode-se afirmar apenas que ocorreu um pequeno aumento no número de ciclos até a quebra quando se compara a corrida sem adição com a corrida com adição.

Tabela 5. Número médio de ciclos de fadiga de cada corrida até a fratura

Corrida sem Nb	Corrida com Nb=0,02%	Corrida com Nb=0,04%
9051	14533	10276

DISCUSSÃO

A pequena diferença observada nos resultados de limite de resistência e dureza entre os aços sem e com adição de nióbio ocorreu provavelmente devido à baixa temperatura de austenitização antes da laminação. Isto está de acordo com o fato de que a temperatura de encharque é de aproximadamente 1150°C, o que, avaliado a partir do cálculo teórico da temperatura para solubilização do nióbio em aços com a composição estudada, mostra ser baixa para provocar a solubilização completa do nióbio (Figura 6). A corrida sem adição de nióbio apresentou resultados compatíveis com dados históricos obtidos no processo de laminação utilizado.

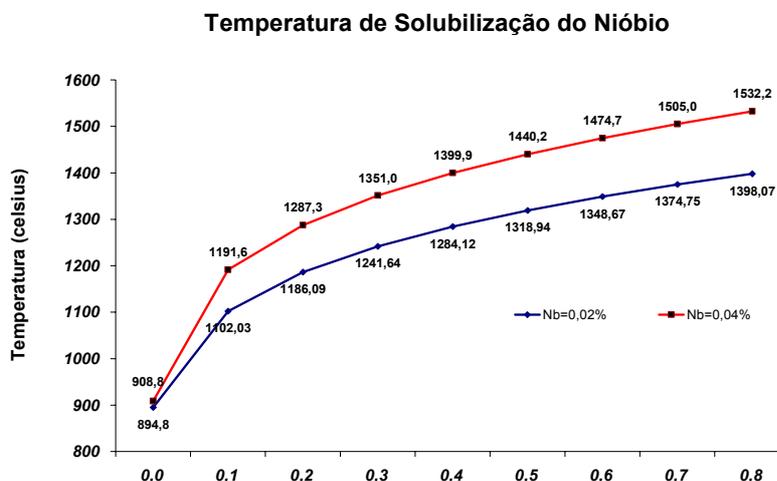


Figura 6. Temperatura para solubilização do Nb do Nb(C,N) em função do % de C.

A elevação da dureza do aço, devido à adição de nióbio como microligante formador de carbonitretos, pode ser justificada por um dos seguintes fatores, ou, o que é mais provável, a combinação deles: endurecimento por precipitação de NbCN na ferrita pró-eutetóide formada no resfriamento, diminuição do tamanho das colônias de perlita e refinamento das lamelas de perlita. Estas possibilidades serão discutidas:

Endurecimento por precipitação de NbCN na ferrita

Esta possibilidade para a elevação da dureza não foi avaliada neste trabalho uma vez que o NbCN precipitado apresenta pequena dimensão incapaz de ser analisado por microscopia. Entretanto Mei,⁽¹⁾ observou, ao pesquisar o efeito da adição de

nióbio na pureza e formação da perlita de um aço similar, a precipitação de finas partículas dispersas de NbC na ferrita pró-eutetóide quando o aço foi resfriado a uma taxa de 10°C/min após austenitização a 1250°C. Os aços em estudo foram austenitizados a uma temperatura próximo a 1200°C e a taxa de resfriamento foi de aproximadamente 15°C/min. Desta forma, acredita-se que há a possibilidade de endurecimento por precipitação da ferrita pró-eutetóide em pequena extensão.

Redução do tamanho médio das colônias de perlita

Outra causa que pode provocar a elevação da dureza média é a redução do tamanho da colônia de perlita. Ocorreu redução de cerca de 11% a cada 0,020% de nióbio adicionado (Tabela 4). Isto ocorre devido à quebra, durante a laminação a quente, dos grãos previamente austenitizados. No forno de reaquecimento ocorre a solubilização parcial do nióbio que reprecipita na forma de carbonitreto no contorno de grão e subgrão da austenita durante a deformação a quente. O precipitado formado impede a recristalização e crescimento de grãos da austenita o que leva então a uma redução do tamanho das colônias de perlita.

O desenvolvimento e estudo de aços de alta resistência e de baixa liga, ARBL, principalmente em aços baixo carbono, tem demonstrado que o nióbio atua como efetivo bloqueio para a recristalização da austenita deformada na laminação. Este efeito também ocorre para aços alto carbono. Duas variáveis devem ser analisadas quando se compara os fenômenos descritos: o teor de carbono e a prática de laminação controlada.

a) Teor de carbono: Através de equações de solubilidade do carbonitreto de nióbio na austenita pode-se verificar que o aumento do teor de carbono do aço eleva a temperatura necessária para solubilização, como mostra a equação 2:⁽²⁾

$$\text{Log (Nb) (C + 12/14N)} = 2,26 - 6770/T \quad (2)$$

Onde (Nb), (C) e (N) são, respectivamente, os percentuais em peso de Nb, C e N no aço e T é a temperatura de encharque em graus K.

A temperatura de austenitização de aproximadamente 1150°C utilizada para reaquecimento de tarugos de aço baixo carbono foi a mesma utilizada para o aço alto carbono estudado, o que levou a uma dissolução apenas parcial do nióbio na austenita e conseqüentemente à menor efetividade do microligante adicionado para impedir a recristalização da austenita.⁽³⁾ Em trabalhos de pesquisas anteriores⁽¹⁾ usando aço alto carbono similar foi necessária a temperatura de 1300°C para solubilizar o nióbio. Através da equação 2 é possível verificar que apenas cerca de 0,006% do nióbio foi solubilizado na temperatura utilizada para austenitização.

Refinamento da perlita

O refinamento da perlita formada após adição de nióbio, verificada através do espaçamento interlamelar, não foi será medido neste trabalho, entretanto é possível observar na Figura 7, que ocorreu o refinamento em algum grau. Acredita-se que, apesar de apenas uma pequena parcela do Nb tenha sido dissolvido, ele pode ter contribuído para o refinamento da perlita, através do retardo que provocou para que ocorresse a transformação austenita → perlita. Mei, P.R, pesquisou a efetividade de Nb e NbC em retardar a reação austenita-perlita comparando aços alto carbono com dissolução de cerca de 2% e 100% do Nb do NbC. No primeiro caso, ou seja, quando praticamente não havia nióbio em solução na austenita, não houve retardo na transformação enquanto que no segundo caso houve aumento de cerca de 10

vezes no aumento do tempo de início da reação austenita-perlita, o que provocou a redução do espaçamento interlamelar⁽¹⁾.

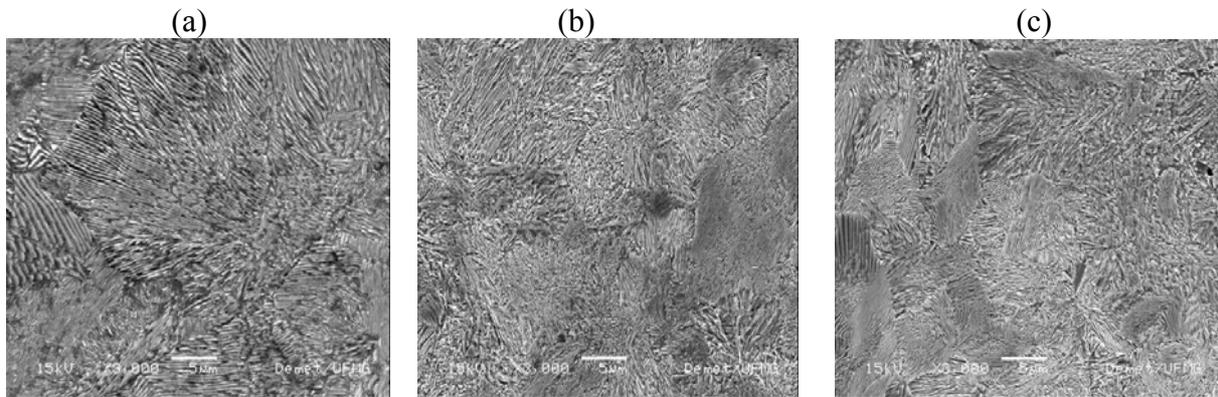


Figura 7. Estrutura perlítica da barra chata laminada (a) sem adição de Nb; (b) com adição de 0,02% de Nb e (c) com adição de 0,04% de Nb – aumento 3000 vezes.

No ensaio de tração observou-se, além dos resultados de limite de resistência, que três aços apresentaram comportamento dúctil sem patamar de escoamento definido. A explicação para a indefinição do patamar de escoamento está no percentual de carbono que à medida que aumenta deixa de ser constante. Além disto ocorreram grande dispersão do valor da carga de escoamento variando entre 192 a 327 MPa. O limite de resistência mostrou pequeno aumento quando é adicionado nióbio, o que ocorreu devido ao refinamento da perlita, que foi discutido anteriormente.

Quanto ao maior número de ciclos na fadiga observado nas corridas em que foi adicionado nióbio, comparando-se a média de número de ciclos até o colapso, estes podem ser explicados com base no tamanho de grão austenítico do aço antes do tratamento térmico. O tamanho de grão da austenita mais fino dificulta a propagação da trinca durante esforços cíclicos. Shin, Lee e Ryu⁽⁴⁾ realizaram experimentos com dois aços médio e alto carbono e dureza similar em ambos, e mostraram que o número de ciclos até a formação da microtrinca praticamente não difere, porém o número de ciclos até a fratura é maior no aço com menor tamanho de grão austenítico, visto que aços de granulação mais fina oferece maior resistência à propagação da trinca e tem maior tenacidade a fratura. Entretanto os resultados mostraram também que a corrida com 0,04% de Nb resultou em menor vida a fadiga do que a corrida com 0,02% de Nb. Isto parece mostrar que há um valor ótimo dentro da faixa especificada nas condições de processo e ensaio aos quais foram submetidas as barras chatas, o que deve ser confirmado através de novos ensaios específicos para este produto. Wise, Spice, Davidson, Heitmann e Krauss⁽⁵⁾ mostraram, em um trabalho que avaliou a influência do tempo de austenitização no comportamento da fratura de um aço similar ao estudado neste caso, que as inclusões de carbonitretos tem diâmetro da ordem de 100 a 200 nm, o que é pequeno para ser considerado importantes na vida à fadiga dos aços estudados.

CONCLUSÕES

1. Os percentuais de nióbio adicionados, 0,02% e 0,04% geraram solubilização de pequena fração do Nb do carbonitreto no reaquecimento de tarugos antes da laminação porque a temperatura necessária para promover uma solubilização considerável é, pelo menos, 1300°C.

2. A adição de nióbio nos percentuais estudados e para as condições de laminação utilizadas, não alteraram significativamente os resultados da barra chata laminada. Observou-se um pequeno aumento de dureza (da ordem de 5%) quando se comparam corridas sem adição e com adição de nióbio. Não ocorreu, entretanto, elevação de dureza quando se aumentou de o percentual de nióbio de 0,02% para 0,04%. Estas alterações também foram observadas para o LR.
3. Com o aumento do percentual de nióbio adicionado, observou-se um refinamento do grão austenítico, que tem o tamanho médio de 20 μm para o aço sem nióbio, 18 μm para 0,02% de Nb e 16 μm para o aço com 0,04% de Nb. Concomitantemente, observou-se o refinamento da perlita, que apresentou regiões sem resolução, para a ampliação utilizada, devido ao refinamento nas corridas com adição de nióbio.
4. As barras temperadas e revenidas com diferentes percentuais de nióbio não apresentaram diferenças em relação à corrida sem adição de nióbio, no que diz respeito aos resultados de dureza. A estrutura observada para todas as corridas era composta de martensita fina revenida com menos de 2% de austenita retida.
5. Na resistência à fadiga, a adição de nióbio mostrou a mesma tendência da dureza e limite de resistência da barra laminada, ou seja, houve um aumento quando se comparam corridas com adição de nióbio, em relação àquela sem adição deste elemento. Entretanto, não se observou um aumento à medida que adiciona mais nióbio na composição química final do aço.
6. Finalmente, de acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que, nas condições de processamento atual na laminação, principalmente temperatura de encharque utilizada para o aço ABNT 5160, a adição de nióbio como elemento microligante nas faixas entre 0,02% e 0,04%, não proporcionou mudanças significativas nas propriedades da barra laminada, temperada e revenida e tão pouco na vida a fadiga.

REFERÊNCIAS

- 1 S Mei, P. R.; Filho, E. B. Efeito de Adições de Nióbio na Pureza e Formação da Perlita. **Revista da ABM**, São Paulo, v.40, n.323, Out.1984.
- 2 DE ARDO, J. **Fundamental Metallurgy of Niobium in Steel**. In: Proceedings of the International Symposium Niobium. Orlando, 2001. p.427–500.
- 3 Kaspar, R.; Peters, A. **A New Concept for High Strength Spring Steels**. In: IPMM'97 Conference. Australia, 1997.5p.
- 4 SHIN, J. C.; LEE, S.; RYU, J. H. Correlation of microstructure and fatigue properties of two high-strength spring steels. **International Journal of Fatigue**, London, p. 571-579, 1999.
- 5 WISE, J. P.; SPICE, J.; DAVIDSON, S. G.; HEITMANN, W. E.; KRAUSS, G. Influence os short austenitizing times on the fracture behavior of a microalloyed automotive spring steel. **Scripta Mater**, p.299-304, 2001.

BIBLIOGRAFIA

- 6 MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; SANTOS, D.B. **Metalurgia da Soldagem – Aspectos Gerais**. Belo Horizonte: EEUFMG, 1999. p.2.16-2.20.
- 7 TITHER, G. **Niobium in Steel Castings and Forgings**. In: Proceedings of the International Symposium Niobium. Orlando, 2001. p. 845–872.
- 8 KRAUSS, George. **STEELS: Heat Treatment and Processing Principles**. Colorado: AMS international, 1989. 497p.