

EFEITOS DA ADIÇÃO DE Mo E Nb NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS COM 0,50 A 0,70 %C

Renato Lyra Villas Boas, renatolyra@mwlbrasil.com.br¹
Adilto Pereira Andrade Cunha, adilto@fem.unicamp.br²
Danilo José de Rezende Pivotto, danilo_pivotto@yahoo.com.br²
Adilson Antoninho Guimarães, ad.ag@terra.com.br³
Paulo Roberto Mei, pmei@fem.unicamp.br²

¹MWL Brasil - Rodas e Eixos Ltda, Rodovia Vito Ardito, s/n, Km 1, Bairro Campo Grande, Caçapava – SP

²Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, Rua Mendeleiev, s/n, Barão Geraldo - Campinas - SP

³Improve Consultoria – Campinas, SP

Resumo: O objetivo deste trabalho é estudar a influência da microadição de molibdênio e nióbio na microestrutura e propriedades mecânicas de aços com carbono variando de 0,50 a 0,70%, utilizados na fabricação de rodas ferroviárias. A deformação foi aplicada através da laminação, em escala de laboratório (laminador FENN de 50 toneladas), simulando o forjamento no processo real de fabricação. As amostras foram aquecidas a 1250 °C para solubilização completa do nióbio, sendo então laminadas em 4 passes, a partir de 1200 °C, sofrendo uma deformação total (redução em altura) de 67%, seguida de resfriamento ao ar. Foram analisadas amostras dos aços antes e após a laminação por microscopia óptica e eletrônica de varredura e também foram realizados ensaios de tração nas duas condições. Observou-se que, tanto nas amostras laminadas como não laminadas, a adição conjunta de nióbio e molibdênio elevou os limites de resistência e escoamento dos aços, mas houve um decréscimo da ductilidade. As alterações na microestrutura também são discutidas para as duas condições das amostras: deformadas e não deformadas.

Palavras-chave: Aços microligados, aços para rodas ferroviárias, nióbio, molibdênio

1. INTRODUÇÃO

Durante anos, houve poucas mudanças no desenvolvimento de novos tipos de aços para aplicação em rodas ferroviárias, porém, ultimamente, muito se têm evoluído em relação aos aços microligados (AAR, 2004).

Os aços microligados possuem pequenas adições de elementos de liga (origem do termo “micro”) que melhoram muito as propriedades mecânicas e resistência ao desgaste do material. Os elementos de liga mais comuns nos aços microligados são, dentre outros: vanádio, cromo, nióbio e titânio. Estes elementos de liga, além de melhorarem a temperabilidade do material, diminuem a temperatura necessária para início de formação da martensita, Ms, fazendo com que a zona termicamente afetada diminua e a martensita ocorra somente em condições mais severas (AAR, 2004). Vale ressaltar que o limite de escoamento para estes aços microligados está situado entre 210 e 550 MPa. Os requisitos fundamentais para os aços microligados são: ductilidade, homogeneidade, valor elevado da relação entre limite de resistência e limite de escoamento, soldabilidade, possibilidade de corte por chama sem endurecimento e resistência razoável à corrosão.

Mei (Mei, 1989) mostrou que para um processo de laminação em aços de médio carbono (0,4%C), a adição de nióbio reduziu o tamanho de grão austenítico e elevou os limites de resistência e de escoamento, sem alterar a ductilidade. Já em aços de alto carbono (0,8%C), a elevação da temperatura de laminação proporcionou um aumento expressivo no tamanho de grão austenítico, para aços com e sem nióbio e, conseqüentemente, uma elevação expressiva dos limites de resistência e de escoamento, com redução também significativa da ductilidade. O aumento do grão austenítico dificulta a nucleação da perlita, devido à diminuição das áreas de contorno, por isso a perlita forma-se em temperaturas menores no resfriamento contínuo, reduzindo o espaçamento interlamelar e, como conseqüência, aumentando a resistência mecânica.

Trabalhos publicados (Andrés, 2001; Madariaga, 1999) mostram que aços de médio carbono microligados com molibdênio após forjamento e subsequente resfriamento contínuo e isotérmico, apresentam em sua microestrutura a ferrita acicular. O molibdênio não somente afeta a cinética da transformação, mas também modifica a morfologia da ferrita acicular.

As rodas ferroviárias tradicionais são feitas de aço com altos e médios teores de carbono, dependendo do tipo de aplicação. A Norma AAR (Association of American Railroads) divide as rodas em 4 classes de aplicação (Tabela 1).

Tabela 1 – Classes de rodas ferroviárias (AAR, 2004).

CLASSE	CARBONO (% em peso)	DUREZA (BHN)	APLICAÇÃO
L	0,47 Máx.	197 – 277	Altas velocidades e condições severas de frenagem.
A	0,47 – 0,57	255 – 321	Altas velocidades com condições severas de frenagem com cargas moderadas.
B	0,57 – 0,67	302 – 341	Altas velocidades com condições severas de frenagem e altas cargas.
C	0,67 – 0,77	321 – 363	Baixas velocidades, condições leves de frenagem e altas cargas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Seis diferentes aços produzidos pela empresa Villares Metals foram estudados. Foram realizadas observações de microestrutura por microscopia ótica, ensaios de tração nos aços no estado como recebido e após laminação a quente, simulando o processo de forjamento a quente usado para a fabricação de rodas ferroviárias.

As composições dos aços são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Composições químicas dos aços utilizados (% em peso).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo+Nb	Al
C5	0,5	0,3	0,66	0,019	0,014	0,12	0,05	0,021
C5Nb	0,47	0,3	0,68	0,019	0,011	0,21	0,20	0,021
C6	0,64	0,42	0,77	0,018	0,016	0,22	0,05	0,026
C6Nb	0,62	0,41	0,84	0,02	0,012	0,21	0,20	0,027
C7	0,75	0,3	0,79	0,018	0,016	0,23	0,05	0,025
C7Nb	0,74	0,3	0,83	0,016	0,01	0,22	0,20	0,027

A deformação foi aplicada através da laminação, em escala de laboratório (laminador duo-reversível marca FENN-051 de 50 toneladas de carga máxima, 25 HP, diâmetro dos rolos de 133 mm e velocidade máxima de 100 RPM), simulando o forjamento no processo real de fabricação. Foram laminados corpos de prova de mesmo teor de carbono aos pares e simultaneamente: um do aço não microligado e outro do aço microligado (C5 e C5Nb, C6 e C6Nb, C7 e C7Nb, respectivamente). Os dois corpos de prova foram acoplados por um pino de diâmetro 3/8" (Figs. 1 e 2). Isso foi feito para garantir nos dois corpos de prova uma idêntica seqüência de laminação, ou seja, a única variável seria a composição química dos aços. Foram utilizados 2 termopares do tipo K, sendo um para cada corpo de prova. Os corpos de prova foram aquecidos a 1250 °C para solubilização completa do nióbio, sendo então laminados em 4 passes, a partir de 1200 °C, sofrendo uma deformação total (redução em altura) de 67%, seguida de resfriamento ao ar. Na Tabela 3 observa-se a escala de passes da laminação.

Depois da laminação as amostras para a metalografia foram retiradas no sentido transversal. A metalografia foi realizada no Laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da Unicamp. As amostras foram lixadas de acordo com os procedimentos usuais, variando de 100 a 1200, em seguida, polidas com pasta de diamante de 1 µm e atacadas com solução de Nital 2% por 15 segundos.

Os corpos de provas utilizados no ensaio de tração foram usinados na MWL Brasil - Rodas e Eixos Ltda. O ensaio foi feito no Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEMA/Unicamp em uma máquina MTS e seguiu a norma

ASTM-370 (ASTM, 1995). Para o ensaio de tração, os corpos de prova foram retirados no sentido longitudinal. Houve dois ensaios de tração para cada tipo de aço antes e após a laminação.

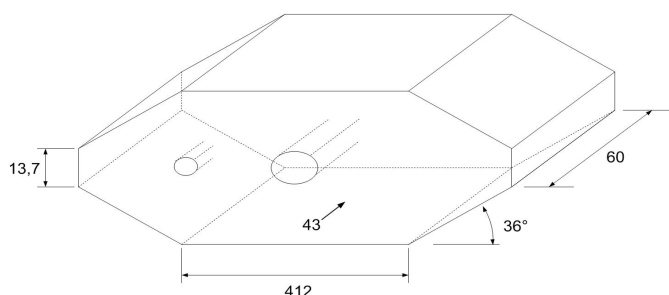


Figura 1 – Dimensionamento do corpo de prova

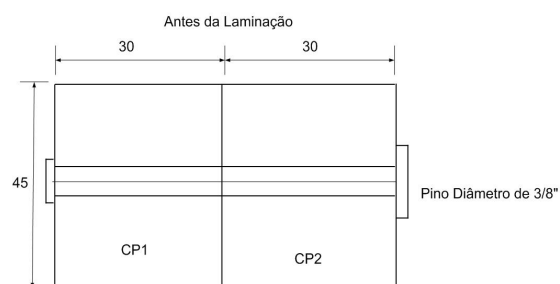


Figura 2 – Dimensionamento do corpo de prova (Visão Frontal)

Tabela 3 – Seqüência do tratamento termomecânico.

<i>N° do passe</i>	<i>Espessura inicial (mm)</i>	<i>Espessura final (mm)</i>	<i>Redução no passe (%)</i>	<i>Redução no passe (mm)</i>	<i>Temperatura no passe (°C)</i>
1	40	31,53	21,17%	8,47	1200
2	31,53	23,06	21,17%	8,47	1179
3	23,06	16,71	15,87%	6,35	1152
4	16,71	13	9,27%	3,71	1126

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados obtidos no ensaio de tração antes e após a laminação.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de tração antes da laminação

<i>Corpo de Prova</i>	<i>LE 0.2% (MPa)</i>	<i>LR (MPa)</i>	<i>Alongamento (%)</i>	<i>Redução de área (%)</i>
C5	365	735	16	36
C5Nb	405	719	21	44
C6	403	808	16	27
C6Nb	488	818	20	41
C7	411	826	13	20
C7Nb	465	851	14	33

Tabela 5 – Média dos 2 ensaios de tração após a laminação.

<i>Corpo de Prova</i>	<i>LE 0.2% (MPa)</i>	<i>LR (MPa)</i>	<i>Alongamento (%)</i>	<i>Redução de área (%)</i>
C5L	445	812	23	36
C5NbL	616	873	20	37
C6L	567	966	20	36
C6NbL	712	1025	12	29
C7L	622	1060	19	30
C7NbL	888	1263	14	26

As micrografias obtidas antes e após a laminação são apresentadas nas figuras 3 a 9, onde observa-se que a estrutura era predominantemente perlítica e após a laminação houve a acicularização da ferrita nos aços microligados.

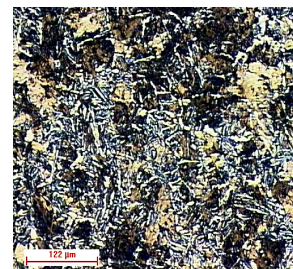
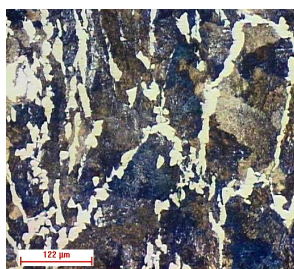
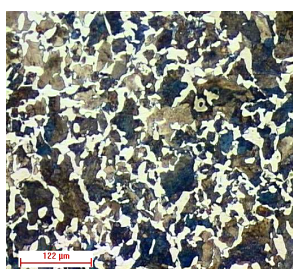


Figura 3 – Aços C5 (esquerda) e C5Nb (direita), antes da laminação. Nital 2%, 100 X.

Figura 4 – Aços C5 (esquerda) e C5Nb (direita), após a laminação. Nital 2%, 100 X.

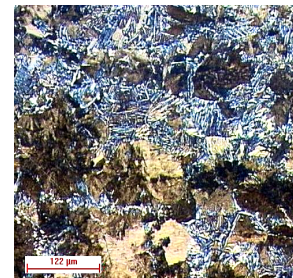
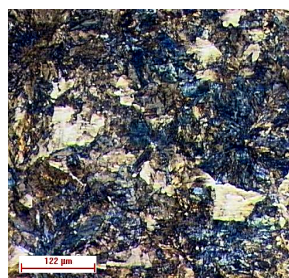
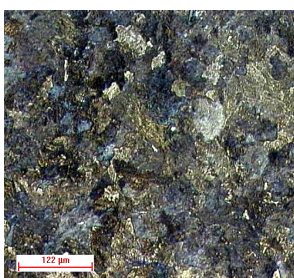


Figura 5 – Aços C6 (esquerda) e C6Nb (direita), antes da laminação. Nital 2%, 100 X.

Figura 6 – Aços C6 (esquerda) e C6Nb (direita), após a laminação. Nital 2%, 100 X.

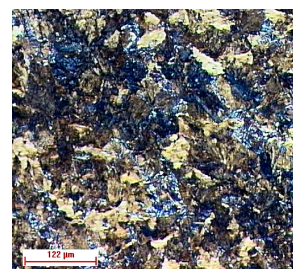
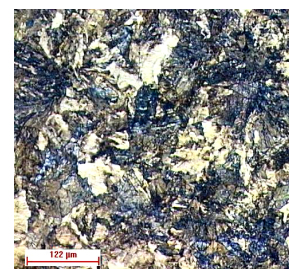
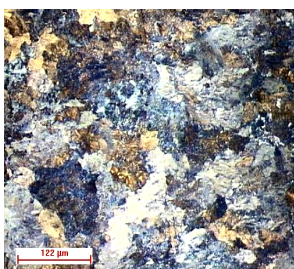


Figura 7 – Aços C7 (esquerda) e C7Nb (direita), antes da laminação. Nital 2%, 100 X.

Figura 8 – Aços C7 (esquerda) e C7Nb (direita), após a laminação. Nital 2%, 100 X.

A figura 9 apresenta as microestruturas obtidas no MEV (microscópio eletrônico de varredura), onde pode-se observar melhor a acicularização da ferrita após a laminação nos aços microligados.

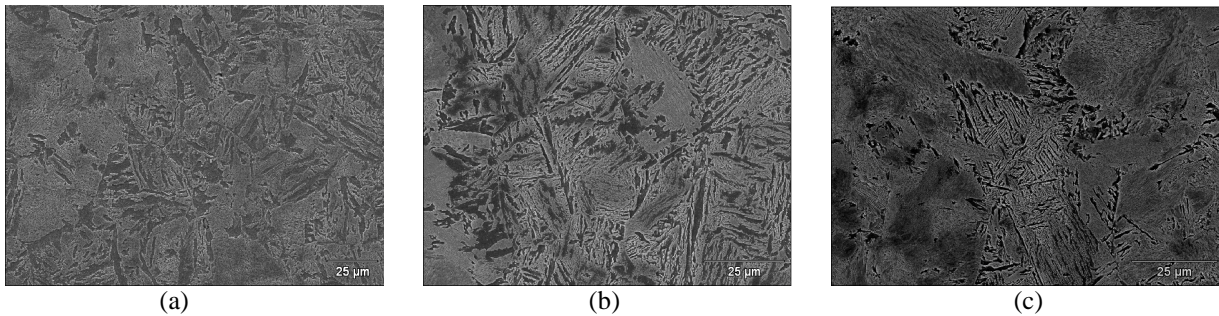
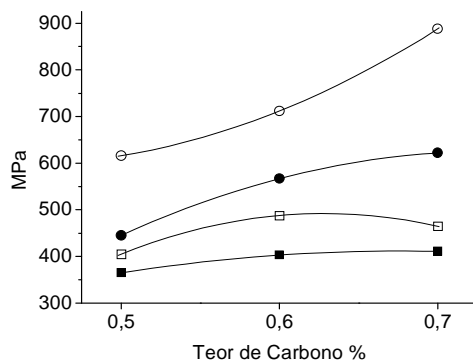


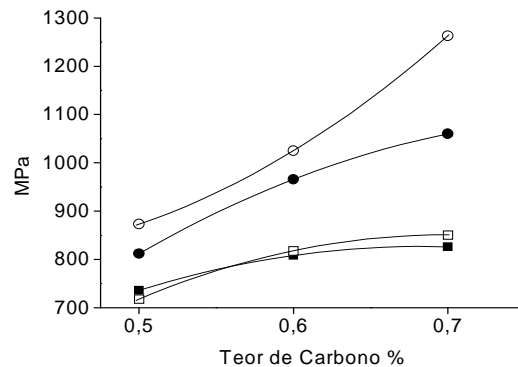
Figura 9 – (a) C5Nb, (b) C6Nb, (c) C7Nb. Nital 2%, 600 X.

Pela análise da figura 10, observa-se que:

- o aumento do teor de carbono elevou o LR (limite de resistência) e o LE (limite de escoamento) dos aços com e sem adição de nióbio e molibdênio, e este efeito foi mais intenso nos aços laminados;
- antes da laminação os aços com e sem adição de nióbio e molibdênio apresentavam valores próximos de LE e LR, porém após a laminação, os aços microligados apresentaram valores de LE e LR maiores do que os aços de igual teor de carbono, mas sem a adição destes elementos;
- o aumento do teor de carbono reduziu o AL (alongamento) e a RA (redução de área) dos aços com e sem adição de nióbio e molibdênio, tanto antes com após a laminação;
- antes da laminação os aços com adição de nióbio e molibdênio apresentavam valores maiores de AL e RA do que os aços sem a adição destes elementos;
- a laminação elevou os valores de AL e RA dos aços não microligados, mas reduziu os valores destas propriedades nos aços microligados, ficando estes aços com valores menores destas propriedades que nos aços não microligados.



LIMITE DE ESCOAMENTO



LIMITE DE RESISTÊNCIA

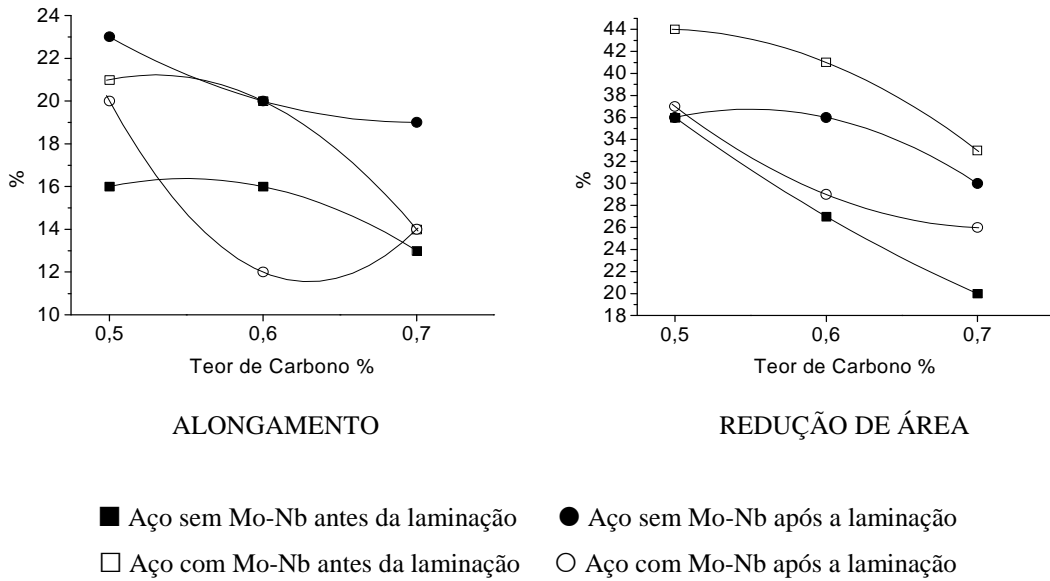


Figura 10 – Ensaio de tração para amostras antes e após a laminação.

A adição de nióbio e molibdênio reduziu a temperatura de início de formação da perlita após a laminação dos aços (Fig.11), o que deve ter reduzido seu espaçamento lamelar, com conseqüente aumento da resistência mecânica.

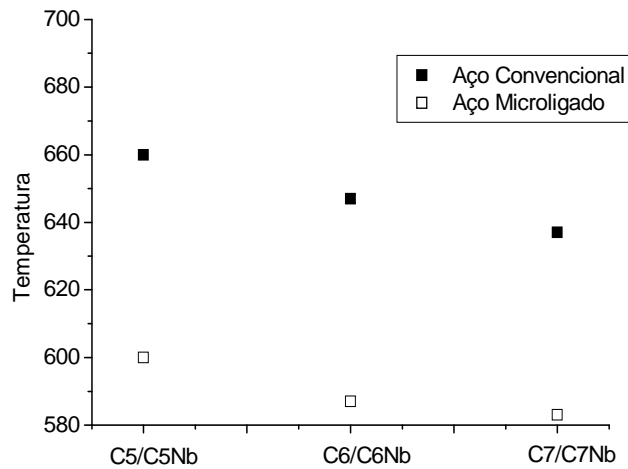


Figura 11 – Temperatura de início de formação da perlita em aços com e sem a microadição de nióbio e molibdênio

4. CONCLUSÕES

A adição conjunta de nióbio e molibdênio elevou o limite de escoamento (entre 40 e 85 MPa), o alongamento (entre 1 e 5 %) e a redução de área (entre 8 e 14 %), sem alteração o limite de resistência nos aços não laminados.

A laminação elevou o limite de escoamento (entre 211 e 423 MPa), o limite de resistência (entre 155 e 412 MPa), mas reduziu o alongamento (entre 0 e 8 %) e a redução de área (entre 7 e 12 %) dos aços com adição conjunta de nióbio e molibdênio em relação aos que não sofreram esta adição.

A laminação elevou a resistência mecânica de todos os aços (com e sem adição de Nb + Mo), porem seu efeito na ductilidade foi distinta: para os aços sem adição de Nb + Mo, ela aumentou a ductilidade (alongamento e redução de área); para os aços com adição de Nb + Mo, ela reduziu a ductilidade.

Observou-se, também, a acicularização da ferrita nos aços microligados laminados.

A adição de nióbio e molibdênio foi responsável pelo atraso no início da decomposição da austenita.

AGRADECIMENTOS

À empresa MWL Brasil – Rodas e Eixos Ltda. pelo apoio financeiro ao projeto.

À Capes pela bolsa de mestrado concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAR, 2004, “Manual of Standards and Recommended Practices” – Wheel and Axles, M-107/M-208.

ASTM Standard A 370 – 07a, 1995, “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”. American Society for Testing and Materials.

Garcia de Andrés, C., Capdevila, C., Madariaga, I. & Gutiérrez, I., 2001, “Role of Molybdenum in Acicular Ferrite Formation under Continuous Cooling in a Medium Carbon Microalloyed Steel”, Scripta Materialia, Vol. 45, pp. 709 - 716.

Madariaga, I., Gutiérrez, I., Garcia de Andrés, C. and Capdevila, C., 1999, “Acicular Formation in a Medium Carbon Steel with a two Stage Continuous Cooling”, Scripta Materialia, Vol. 41, pp. 229 - 335.

Mei, P. R., 1989, “Efeitos do tratamento termomecânico na estrutura e propriedades dos aços com médio e alto teor de carbono microligados com nióbio”, Tese (Livre-docência), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

EFFECTS OF Mo AND Nb ADDITION ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 0.50 to 0.70%C STEELS

Renato Lyra Villas Boas, renatolyra@mwlbrasil.com.br¹

Adilto Pereira Andrade Cunha, adilto@fem.unicamp.br²

Danilo José de Rezende Pivotto, danilo_pivotto@yahoo.com.br²

Adilson Antoninho Guimarães, ad.ag@terra.com.br³

Paulo Roberto Mei, pmei@fem.unicamp.br²

¹MWL Brasil – Wheels and Axles Ltda, Rodovia Vito Ardito s/n – Km 1, Bairro Campo Grande, Caçapava – SP

²Mechanical Engineering Faculty - UNICAMP, Rua Mendeleiev, s/n, Barão Geraldo - Campinas - SP

³Improve Consulting – Campinas, SP

Abstract : The influence of molybdenum and niobium addition on the structure and mechanical properties of 0.50 to 0.70%C carbon steels, used in railway wheels, was studied. The deformation was applied by rolling, in a thermomechanical processing laboratory (50 ton rolling mill FENN), simulating the forging in the real process of manufacture. The samples were heated at 1250 °C to complete solubilization of niobium, and then rolled in 4 passes, from 1200 °C, suffering a total deformation (reduction in height) of 67%, followed by air cooling. Steel samples, before and after rolling, were analyzed by optical microscopy, Also the tensile testing was performed on the two conditions. It was observed in both samples (rolled as not rolled) that the combined addition of molybdenum and niobium increased the tensile and yield strength but decrease the ductility. The changes on the microstructure are also discussed for the two samples conditions: deformed and not deformed.

Keywords : Microalloyed steels, railway wheels steels, niobium, molybdenum.

