

EFEITOS DA ADIÇÃO DE NÍOBIO E MOLIBDÊNIO EM AÇO 0,7% C PARA FABRICAÇÃO DE RODAS FERROVIÁRIAS

Renato L. Villas Bôas, renatolyra@mwlbrasil.com.br¹

Adilto P. A. Cunha, adilto@fem.unicamp.br²

Solange T. Fonseca, tamara@fem.unicamp.br²

Mariana H. Silva, marihiromi@hotmail.com²

Paulo R. Mei, pmei@fem.unicamp.br²

¹ MWL Brasil Rodas e Eixos Ltda., Caçapava, SP

² Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, Campinas, SP.

Resumo: Estudou-se o efeito da adição de nióbio e molibdênio nas propriedades mecânicas de um aço 0,7% C usado na fabricação de rodas ferroviárias, cuja composição química atende a norma AAR (Association of American Railroads). Os aços foram austenitizados a 1250^o C para solubilização do nióbio na austenita e forjados a partir de 1200^o C pelo processo de fabricação usado pela MWL Brasil. Após o tratamento térmico, foram realizados ensaios de dureza da perlita, tração, impacto, tenacidade à fratura, além de microscopia ótica e medida do tamanho de grão austenítico. Observaram-se aumentos no limite de escoamento ductilidade e tenacidade pela microadição de nióbio e molibdênio, mostrando que esses elementos podem melhorar o desempenho das rodas ferroviárias.

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

1. INTRODUÇÃO

Assim como em outros setores da economia, o setor de transporte ferroviário, principalmente voltado ao transporte de minério de ferro, tem buscado uma maior competitividade de seus produtos e serviços. Desta forma, a redução de custo é imperativa. Uma das maneiras de reduzir custos é através do aumento da carga transportada por eixo, do tamanho do trem ou da velocidade no trajeto. O que normalmente se verifica é o aumento de todas estas possibilidades simultaneamente. Se, por um lado, tem-se uma redução de custo uma vez que a mesma composição transporta mais carga e em menor tempo, por outro lado aumenta o custo de manutenção corretiva, uma vez que se aceleram as falhas nos componentes dos vagões e na via permanente. Tal como os outros componentes, o sistema roda-trilho ou roda-trilho-sapata de freio é sensivelmente afetado por esses aumentos de esforços. Assim, como os trilhos na via permanente, as rodas representam destacadamente o maior custo na manutenção do material rodante e a principal causa da retenção de vagões para manutenção corretiva (Alves, 2000).

As rodas ferroviárias tradicionais são feitas de aço com altos e médios teores de carbono, dependendo do tipo de aplicação. A Norma AAR M-107, divide as rodas em 4 classes de aplicação conforme Tabela 1.

Tabela 1: Aplicação de rodas ferroviárias para cada tipo de material (AAR M-107).

| Classe | Carbono (%) | 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. |

Os aços microligados possuem pequenas adições (menores que 0,1% em massa) 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 (Minicucci, 2003). Estes elementos de liga, além de melhorarem a temperabilidade do material, aumentam a temperatura de início de formação da austenita e diminuem a temperatura de início da martensita fazendo com que a zona termicamente afetada diminua e a martensita ocorra somente em condições mais severas (Lonsdale, 2005).

A Tabela 2 compara as principais propriedades mecânicas dos aços microligados e dos aços convencionais previstos na norma AAR M-107.

Tabela 2: Comparação entre propriedades mecânicas de aços fabricados conforme a norma AAR e aços microligados (Constable, 2004).

| Aço (classe) | C | Dureza (BHN) | | LE (MPa) | Impacto (J) | K _{Ic} (MPa.m ^{1/2}) | Alongamento (%) |
|--------------|------|--------------|-----|----------|-------------|---|-----------------|
| | | S | 60 | | | | |
| B | 0,62 | 316 | 260 | 650 | 10,5 | 42,0 | 14,2 |
| MB | 0,62 | 330 | 300 | 790 | 12,4 | 54,4 | 14,6 |
| C | 0,72 | 330 | 290 | 710 | 7,1 | 32,0 | 12,5 |
| MC | 0,72 | 350 | 325 | 800 | 9,4 | 41,2 | 13,0 |

B e C – Aços fabricados conforme a norma AAR nas classes B e C.

MB e MC – Aços fabricados conforme a norma AAR nas classes B e C, porém microligados.

S- Dureza na superfície de rolamento da roda.

60- Dureza a 60 mm de profundidade da pista de rolamento.

LE- Tensão de escoamento no aro da roda.

K_{Ic}- Resultado de ensaio de tenacidade à fratura no aro da roda.

O objetivo deste trabalho é mostrar o efeito da adição de nióbio e molibdênio em um aço cuja composição química atende à classe C da norma AAR-M-107. Foram forjadas e tratadas termicamente rodas ferroviárias seguindo o processo de fabricação da MWL Brasil, empresa que atua na fabricação de rodas e eixos ferroviários forjados. As rodas fabricadas com o aço em questão foram submetidas a ensaios mecânicos e metalográficos e os resultados foram comparados com valores históricos de materiais classe C da norma AAR-M-107 fabricados pela MWL Brasil.

Com o desenvolvimento deste material pretende-se obter um aço para fabricação de rodas ferroviárias com propriedades mecânicas superiores e maior resistência ao desgaste e trincas térmicas durante o uso e, conseqüentemente, uma maior vida para a roda. Garantindo o proposto, também será garantida uma maior segurança no transporte ferroviário, menor retenção de vagões para manutenção corretiva e menor custo operacional.

2. REVISÃO DA LITERATURA

As rodas ferroviárias são dimensionadas para serem substituídas por desgaste e nunca por de algum tipo de defeito, porém, devido às diferentes condições de serviço e ocorrências ligadas ao seu processo de fabricação, alguns defeitos acontecem durante o seu uso, tendo como conseqüência a necessidade de reperfilamento ou sucateamento da roda.

As rodas apresentam defeitos com maior freqüência na pista de rolamento, normalmente oriundos do processo de fadiga que, no caso da roda ferroviária, é crítico. A fadiga pode ser térmica (devido à frenagem), mecânica (devido à carga) ou devido a ambas (Minicucci, 2003).

Dependendo da profundidade com que o processo de fadiga se desenvolve é possível determinar o tipo de defeito. Os defeitos que se iniciam em profundidades maiores geralmente estão relacionados com inclusões, porosidades ou vazios internos no aço. Neste trabalho, o interesse é combater os defeitos superficiais na pista de rolamento e friso (figura 1 indica as partes da roda) que obrigam a retirada da roda do uso para reusinagem a fim de eliminá-los.

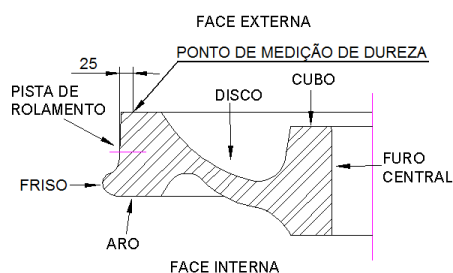


Figura 1: Indicação das partes de uma roda ferroviária (Villas Bôas, 2009).

O desgaste nas rodas pode ser minimizado pelo correto alinhamento das mesmas, lubrificação do friso, material da roda e trilho similares e equipamento em boas condições mecânicas. Todo esforço é feito para evitar perda excessiva de material na pista de rolamento causada por trincas térmicas e “shelling” (escamação) (Clarke, 2008).

A frenagem da maioria dos vagões de carga é feita pelo contato direto da sapata de freio na pista de rolamento da roda causando aquecimento. Os defeitos na pista de rolamento ocorrem devido a vários mecanismos, incluindo frenagem severa em altas velocidades ou escorregamento devido ao travamento da roda no momento da frenagem combinado com condições de baixo atrito entre a roda e o trilho. O efeito na pista de rolamento é a produção de uma camada de martensita criada devido ao aquecimento e o rápido resfriamento após o final da frenagem (figura 2 A). Esta camada martensítica tem, aproximadamente, 20 a 30 mm de largura e 1 mm de profundidade. Como a estrutura típica do material da roda é perlítica, esta estrutura martensítica, tendo um volume maior, fica levemente tensionada. Com o rolamento contínuo da roda sobre o trilho, inicia-se trincas na camada martensítica progredindo para um processo de lascamento que pode se propagar até a perlita (Clarke, 2008).

O escorregamento entre a roda e o trilho em baixa velocidade pode induzir a um aquecimento local abaixo da temperatura de transformação perlita-austenita e em uma maior profundidade. Este aquecimento, apesar de abaixo da temperatura de transformação perlita-austenita, é alto para causar uma sobrecarga na roda devido à redução da resistência pela temperatura e acarretar em um dano mecânico na pista de rolamento na forma de uma superfície plana chamada de “flat” (chato) (Clarke, 2008).

A fadiga de contato de rolamento é uma falha na pista da roda devido à fadiga cíclica de contato entre a roda e o trilho levando à formação de cavidades chamadas de “shelling” (escamação) (figura 2 B).



Figura 2: Defeitos em rodas ferroviárias, A - superfície martensítica causada por escorregamento, B – “shelling” (escamação) (Clarke, 2008).

Um dos objetivos da produção de aço microligado para rodas ferroviárias é reduzir o “shelling” (escamação) termomecânico em serviço, aumentar a resistência para a redução do “flat” (chato) e aumentar a temperatura de austenitização do aço para reduzir a formação de estrutura martensítica quando da ocorrência de frenagens em altas velocidades.

Lonsdale et al (2005) relatam que rodas fabricadas com material microligado visando à redução de defeitos, quando ensaiadas em temperaturas elevadas (430 e 540 °C), apresentaram aumento na dureza, no limite de escoamento, no limite de resistência, no alongamento e na redução de área, em relação ao material convencional da norma AAR (classe C). Esse aumento resulta em redução no “shelling” (escamação) termomecânico. No ensaio de tenacidade à fratura, o aço microligado apresentou um aumento de, aproximadamente, 23% em relação a uma roda fabricada com material convencional da norma AAR. Os autores afirmam que este resultado melhora a resistência à propagação da trinca em serviço e consequentemente aumenta segurança no transporte.

Constable et al (2004) afirmam que dureza e resistência (limite de escoamento e limite de resistência) são consideradas “chaves indicadoras” do desempenho da roda em serviço. A resistência ao desgaste é, frequentemente, associada ao aumento de dureza do material, porém a tensão de escoamento tem maior influência na resposta ao dano causado pela fadiga de contato de rolamento.

Kristan e Stone, (2004) e Lonsdale et al (2005) estudaram aços microligados com o objetivo de aumentar a temperatura de austenitização como forma de diminuir a formação de estrutura martensítica quando da ocorrência de frenagens em altas velocidades.

Cummings (2009), em pesquisa na TTCI (Transportation Technology Center, Inc., subsidiária da AAR), afirma que para melhorar a performance das rodas ferroviárias e aumentar a sua vida, um dos fatores mais importantes é a melhoria das propriedades mecânicas.

Este trabalho é parte de uma pesquisa para desenvolvimento de um aço microligados com melhores propriedades mecânicas e tenacidade à fratura para fabricação de rodas ferroviárias.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em duas etapas distintas. A primeira etapa foi estudar o efeito da adição de nióbio e molibdênio em aços com 0,7% de carbono antes e após a deformação por laminação, simulando o forjamento real das rodas ferroviárias produzidas na MWL Brasil. Com os dados disponíveis (Cunha et al, 2009) passou-se à segunda etapa da pesquisa que foi fabricar e ensaiar rodas ferroviárias na MWL Brasil usando aços com composições químicas semelhantes às utilizadas na primeira etapa para observar o efeito do nióbio e molibdênio nas mesmas.

Neste trabalho serão apresentados os resultados obtidos nesta segunda etapa.

A corrida de teste fabricada pela MWL Brasil foi identificada como C7Nb-M2. A composição química no momento do lingotamento foi analisada em espectrômetro de emissão óptica e os resultados estão indicados na Tabela 3. Também

nesta tabela, está indicada a composição química do material identificado como C7-M que é a faixa de composição química do aço classe C da norma AAR M-107.

Tabela 3: Composição química nos lingotes (% em massa).

| Aço | C | Si | Mn | P | S | Cr+Nb+Mo |
|---------|-----------|----------|-----------|------------|-------------|----------|
| C7Nb-M2 | 0,741 | 0,325 | 0,795 | 0,011 | 0,017 | 0,412 |
| C7-M | 0,67/0,77 | 0,15/1,0 | 0,60/0,90 | 0,030 máx. | 0,005/0,040 | - |

Para o forjamento de rodas de teste, optou-se por forjar 1 lingote que corresponde a 4 rodas de diâmetro de 36 polegadas, que é uma roda média muito usada no mercado nacional. Essa roda é padrão na norma AAR M-107, conhecida como K-36, conforme ilustra a Figura 3.

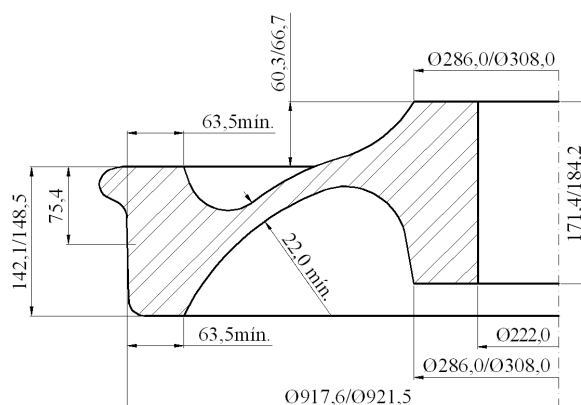


Figura 3: Roda padrão da norma AAR, tipo K-36.

O forjamento das rodas de teste foi feito nas mesmas condições usuais de fabricação da roda K-36. Os 4 blocos de teste foram colocados em um intervalo entre 2 corridas normais de produção.

As análises metalográficas foram feitas na Unicamp. As amostras foram lixadas, polidas e atacadas com Nital 3% por 10 segundos. As fotos das microestruturas foram feitas no Laboratório da Engenharia de Materiais da FEM-Unicamp.

Para verificação do tamanho de grão austenítico foi feita a têmpera parcial nos aços de teste. Os corpos de prova, com termopares tipo K inseridos no núcleo dos mesmos, foram aquecidos até a temperatura de 790 °C. Esta temperatura foi escolhida baseada na inflexão da curva de aquecimento para a laminação (Fig. 4) que indica a temperatura de transformação da estrutura perlítica para a austenítica.

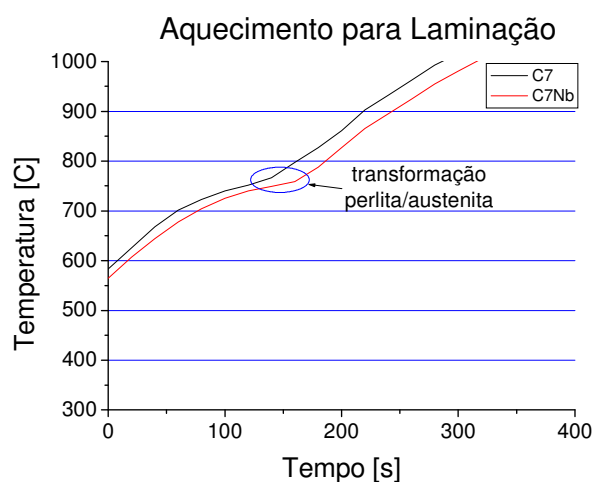


Figura 4: Curva de aquecimento para laminação do aço C7 e C7Nb (Villas Bôas, 2009).

O ataque para revelar o tamanho de grão austenítico foi feito com 6 gramas de ácido pícrico, 300 ml de água e 15 ml de sulfonato de sódio.

As medidas do tamanho de grão foram obtidas através do método de interceptos lineares em 10 diferentes regiões, utilizando a Eq. (1), (Cunha, 2009).

$$D_{\gamma} = \frac{L_T}{I.A} \quad (1)$$

D_{γ} = diâmetro do grão austenítico

L_T = comprimento da linha teste (60 mm)

I = n° de intersecções entra a linha teste e os contornos de grão

A = ampliação no microscópio

Os ensaios mecânicos de dureza e tração foram realizados seguindo a norma ASTM A-370, o ensaio de impacto tipo Charpy com entalhe em “U” seguiu a norma ASTM E-23 e o ensaio de tenacidade à fratura seguiu a norma ASTM E-399.

Os ensaios mecânicos foram feitos considerando uma roda totalmente usinada, ou seja, o sobremetal que deveria ser retirado durante a usinagem foi descontado para a retirada dos corpos de prova.

Foi usado o posicionamento para retirada dos corpos de prova conforme indicado na norma EN 13262 (Railway applications – Wheelsets and bogies – Wheels – Product requirements), pois a norma AAR M-107 prevê apenas ensaio de dureza nas rodas.

A dureza foi medida em escala Brinell com esfera de 10 mm e carga de 3.000 kgf. Para tal medição, foi cortado e preparado um perfil do aro da roda e feita a medição em vários pontos conforme indica a Figura 5. A primeira linha de medição está a 5 mm da pista de rolamento acabada seguida das outras três linhas a 15, 25 e 35 mm da pista de rolamento.

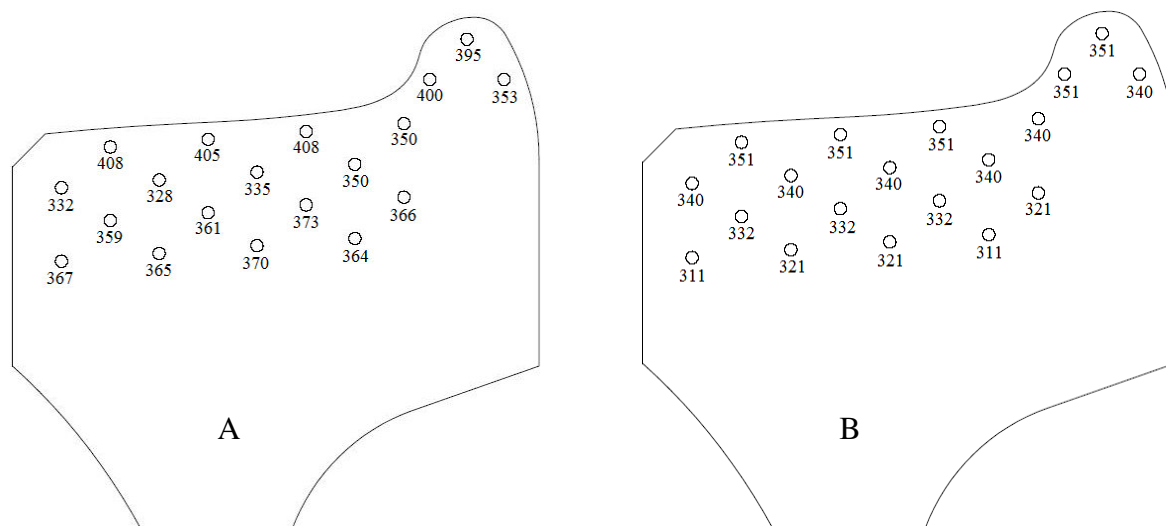


Figura 5: Mapa de dureza do aço C7Nb-M2 (A) e do aço C7-M (B).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise Metalográfica

Os aços C7Nb-M2 e C7-M, por terem teor de carbono próximo do eutetóide, apresentaram uma estrutura predominantemente perlítica e baixa quantidade de ferrita (Fig. 6). O aço C7Nb-M2 apresentou um aumento na fração volumétrica da ferrita devido à adição de molibdênio, que favorece a formação de ferrita (ASM – Vol. 20, 1997) e também a acicularização da mesma (IMOA, 2010).

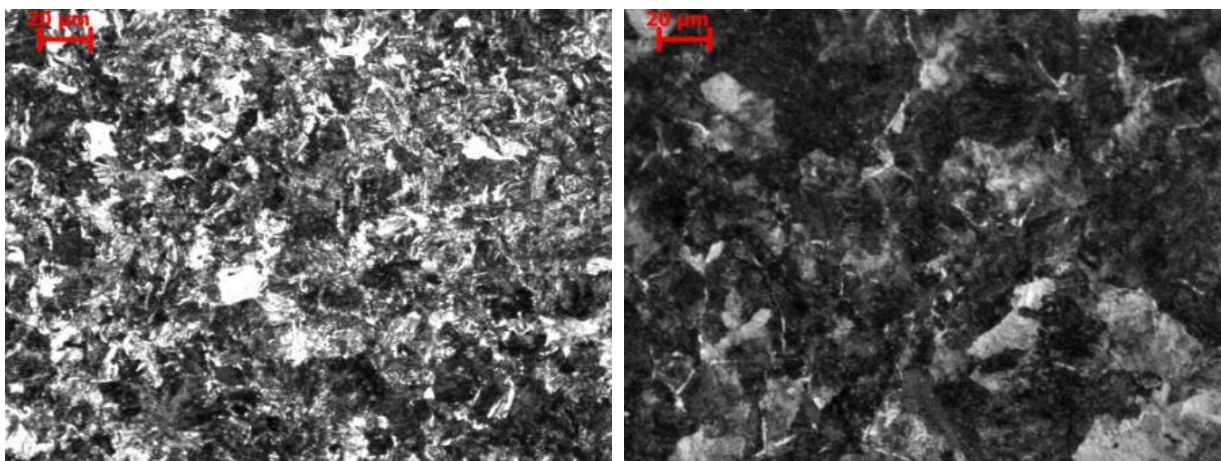


Figura 6: Microscopia ótica dos aços C7Nb-M2 (esquerda) e C7-M (direita). Ataque com nital 3% por 10 segundos.

A Figura 7 mostra o antigo contorno do grão austenítico dos aços estudados. O refino do grão do aço C7Nb-M2 é provocado pelo efeito do nióbio em retardar a recristalização da austenita após a deformação a quente que pode se dar pela diluição do nióbio em solução na austenita ou na forma de precipitado (DOI, 1991). Segundo Mei (1989), o nióbio tem uma forte tendência à formação de carbonetos que restringem o crescimento do grão austenítico. A Tabela 4 mostra o tamanho de grão austenítico dos materiais de teste.

Tabela 4: Tamanho de grão austenítico para os aços C7Nb-M2 e C7-M.

| TG [μm] | |
|----------------------|------------|
| C7Nb-M2 | C7-M |
| 13 ± 2 | 20 ± 3 |

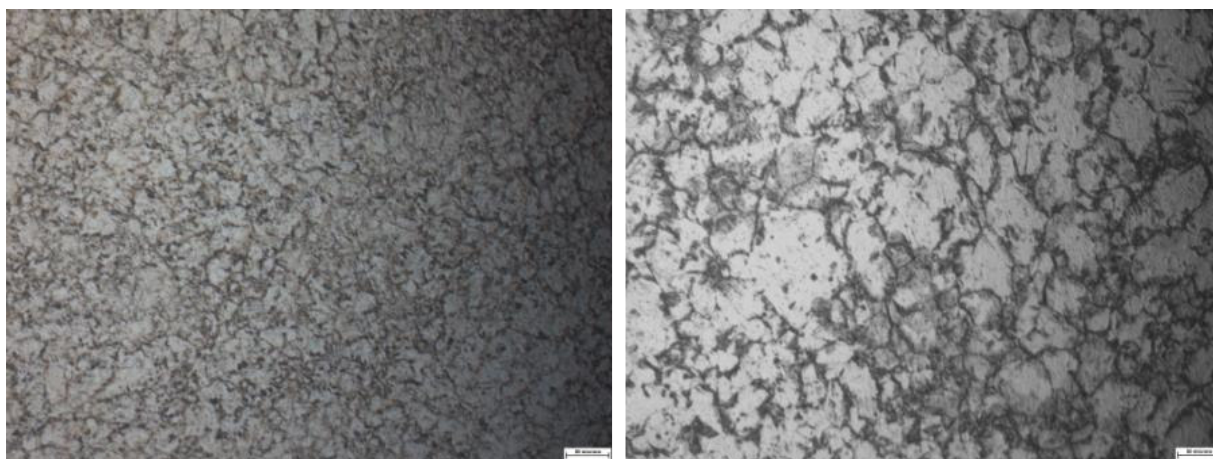


Figura 7: Tamanho de grão austenítico dos aços C7Nb-M2 (esquerda) e C7-M (direita). Ataque com ácido pícrico por 5 minutos.

4.2. Ensaio de Dureza

Observou-se uma maior dureza no aço microligado em relação ao não microligado (Figura 8), o que agora está sendo investigado por microscopia ótica e eletrônica. Nota-se também que, apesar de na segunda linha de medição a dureza o aço C7Nb-M2 ter uma dureza próxima ao C7-M, nas demais linhas o aumento da dureza do aço microligado foi maior que 10 % em relação ao aço não microligado: 11,5; 10,9 e 16%, respectivamente, para as linhas 1, 3 e 4.

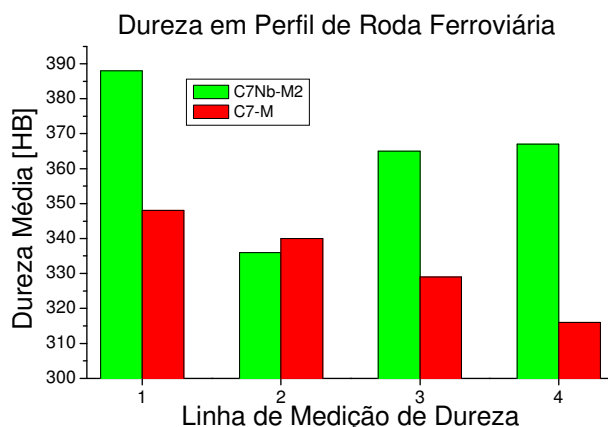


Figura 8: Dureza média em cada linha de medição do perfil da roda ferroviária.

4.3. Ensaio de Tração

Os resultados dos ensaios de tração feitos na roda de teste bem como a média dos resultados de ensaios feitos na MWL Brasil estão indicados na Tabela 5 e Figura 9. O aço C7Nb-M2 apresentou um aumento de 60 MPa (8,5%) no limite de escoamento (LE) em relação ao C7-M com ganho de 15% de ductilidade, expressa pela redução de área e alongamento e uma diminuição no limite de resistência (LR) de apenas 4%.

Tabela 5: Ensaio de tração para os aços C7Nb-M2 e C7-M.

| Material | N° CP | LE [MPa] | LR [MPa] | A [%] | RA [%] |
|----------|-------|----------|-----------|--------|--------|
| C7-M | Média | 747 ± 53 | 1192 ± 46 | 13 ± 1 | 33 ± 5 |
| C7Nb-M2 | 1 | 807 | 1134 | 14 | 39 |
| | 2 | 815 | 1157 | 16 | 37 |
| | Média | 811 ± 3 | 1146 ± 16 | 15 ± 1 | 38 ± 1 |

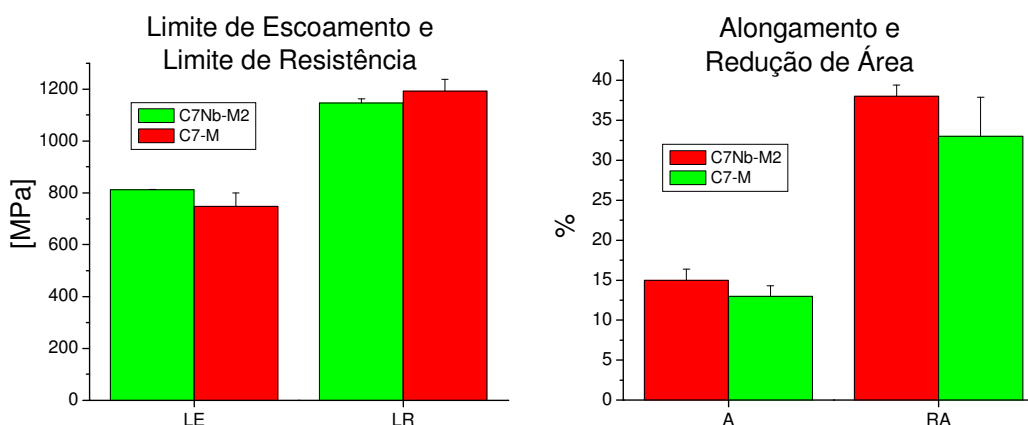


Figura 9: Limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), alongamento (A) e redução de área (RA) para os aços C7Nb-M2 e C7-M.

4.4. Ensaio de Impacto

Os resultados do ensaio de impacto tipo Charpy estão indicados na Tabela 6 e Figura 10, onde é possível notar um aumento de 29% na energia de impacto para o aço C7Nb-M2 em relação ao não microligado, o que indica um ganho de tenacidade para este material.

Tabela 6: Ensaio de impacto para os materiais da corrida C7Nb-M2 e C7-M.

| Energia de impacto [J] | | |
|------------------------|--------|---------|
| Nº CP | C7-M | C7Nb-M2 |
| 1 | 13,0 | 18 |
| 2 | 14,0 | 18 |
| 3 | 14,0 | 17 |
| Média | 14 ± 1 | 18 ± 1 |

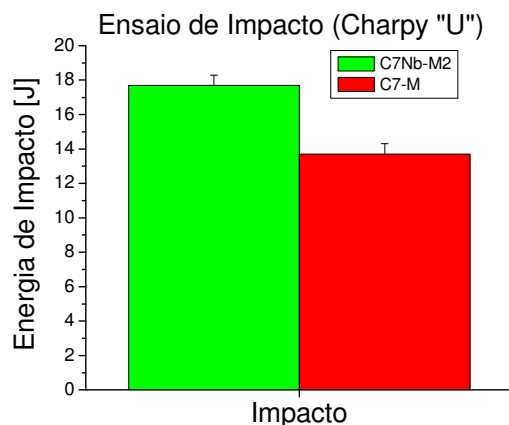


Figura 10: Ensaio de impacto Charpy "U" para os aços C7Nb-M2 e C7-M.

4.5. Ensaio de Tenacidade à Fratura

Os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura (K_{Ic}) encontram-se na Tabela 7 e figura 11. O valor para o aço C7-M corresponde a uma roda ensaiada com a composição química dentro da faixa indicada na Tabela 3. Pode-se notar que o aço C7Nb-M2 apresentou um aumento da tenacidade à fratura de, aproximadamente, 30% em relação ao aço não microligado. A elevação do valor da tenacidade à fratura indica uma maior resistência à propagação de trincas da roda em serviço, aumentando a vida da mesma e a segurança no transporte ferroviário.

Tabela 7: Ensaio de tenacidade à fratura para os aços C7Nb-M2 e C7-M.

| Aço | A [MPa.m ^{1/2}] | B [MPa.m ^{1/2}] | C [MPa.m ^{1/2}] | Média [MPa.m ^{1/2}] |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| C7-M | 49,1 | 48,3 | 45,0 | 48 ± 2 |
| C7Nb-M2 | 57,4 | 64,4 | 62,0 | 62 ± 4 |

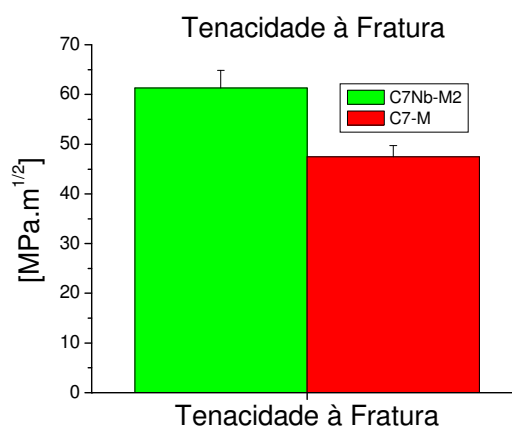


Figura 11: Ensaio de tenacidade à fratura para os aços C7Nb-M2 e C7-M.

5. CONCLUSÕES

Comparando-se os aços com e sem adição de nióbio e molibdênio, observou-se que o aço microligado apresentou aumento da resistência mecânica, ductilidade e tenacidade. Foi possível notar a redução do tamanho do grão austenítico, o que colabora para o aumento da resistência mecânica. O aumento da tenacidade à fratura sugere que, quando surgirem trincas nas rodas, estas deverão se propagar mais lentamente, aumentando a probabilidade de sua detecção antes do rompimento total e da ocorrência de um acidente.

A próxima etapa deste trabalho será o estudo, por microscopia ótica e eletrônica, da microestrutura dos aços para se entender os mecanismos de atuação do nióbio e molibdênio na melhoria observada das propriedades mecânicas.

6. AGRADECIMENTOS

À empresa MWL Brasil Rodas e Eixos Ltda. pelo apoio financeiro e ao tecnólogo Emílio Cardoso do Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP pelo apoio técnico e ensaios realizados.

7. REFERÊNCIAS

- AAR M-107, 2009, "Association of American Railroad", Manual of Standards and Recommended Practices, Section G.
- ALVES, L. H. D., 2000, "Mecanismo de desgaste de rodas ferroviárias", Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- ASM HandBook, 1997, "Materials Selection and Design", Volume 20, p. 856.
- ASTM STANDARD A 370 – 2009, "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products". American Society for Testing and Materials.
- ASTM STANDARD E 23 – 2007a, "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials". American Society for Testing and Materials.
- ASTM STANDARD E 399 – 2009, "Standard Test Methods for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials". American Society for Testing and Materials.
- CONSTABLE, T.; BOELEN, R.; PERELOMA, E. V., 2004, "The quest for improved wheel steels enters the martensitic phase", 14th International Wheelset Congress, Orlando, EUA.
- CLARKE, M., 2008, "Wheel rolling contact fatigue (RCF) and rim defects investigation to further knowledge of the causes of RCF and to determine control measures", (p. 6-10), RSSB Wheel Steel Guide.
- CUMMINGS, S.; KALAY, S., 2009, "Rolling beyond class C", Wheel Steels, Railway Age Magazine, September 2009, página 54.
- CUNHA, A. P. A., 2009, "Efeitos da adição de molibdênio e nióbio na microestrutura e propriedades mecânicas de aço 0,5% C laminado a quente", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 88 p.
- DOI, S. N., 1991, "Efeito do nióbio sobre o processamento austenítico e a transformação para perlita em aços eutetóides", Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- EUROPEAN STANDARD EN 13262, 2004, "Railway Applications – Wheelsets and Bogies – Wheels – Product Requirement".
- IMOA - International Molybdenum Association, "High Strength Low Alloy (HSLA) Steels", 28/02/2010 http://www.imoa.info/moly_uses/moly_grade_alloy_steels_irons/molybdenum_grade_alloys_steel_irons.html.
- KRISTAN, J. V.; STONE, D. H., 2004, "Railroad wheel alloy developed to inhibit spall formation as a result of wheel slide", 14th International Wheelset Congress, Orlando, EUA.
- LONSDALE, C., DEDMON, S., PILCH, J., 2005, "Recent developments in forged railroad wheels for improved performance", Joint Rail Conference, Colorado, EUA.
- MEI, P. R., 1983, "Efeito da adição de nióbio na estrutura e propriedades dos aços com médio e alto teor de carbono", Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MINICUCCI, D. J., 2003, "Principais Defeitos em Rodas Ferroviárias", (p. 38-43), Manual de Treinamento da MWL Brasil.
- VILLAS BÔAS, R. L., 2009, "Relatório Técnico do Projeto MWL-Unicamp", 22 p.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EFFECTS OF NIOBIUM AND MOLYBDENUM ADDITION ON 0.7% C STEEL FOR RAILWAY WHEELS

Renato L. Villas Bôas, renatolyra@mwlbrasil.com.br¹

Adilto P. A. Cunha, adilto@fem.unicamp.br²

Solange T. Fonseca, tamara@fem.unicamp.br²

Mariana H. Silva, marihiromi@hotmail.com²

Paulo R. Mei, pmei@fem.unicamp.br²

¹ MWL Brasil Rodas e Eixos Ltda., Caçapava, SP

² College of Mechanical Engineering, UNICAMP, Campinas, SP.

Summary: It was studied the effect of the niobium and molybdenum addition on the microstructure and mechanical properties of a 0.7 %C steel used in the production of railway wheels, whose chemical composition assists the AAR (Association of American Railroads) Standard. The steels were austenitized at 1250 °C and forged from 1200 °C, following the MWL Brasil standard production process. Hardness, tensile, Charpy and fracture toughness tests, besides optical microscopy and austenitic grain size measurements were performed after the heat treatment. Increase on the yield strength, ductility and toughness were with niobium and molybdenum addition, showing that those elements can improve the performance of the railway wheels.

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