

## EFEITO DA ADIÇÃO DE VANÁDIO, NIÓBIO-MOLIBDÊNIO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAL DE AÇOS 0,7% C\*

Solange Tamara da Fonseca<sup>1</sup>  
Felipe Pereira Finamo<sup>2</sup>  
Domingos José Minicucci<sup>3</sup>  
Conrado Ramos Moreira Afonso<sup>4</sup>  
Amilton Sinatorá<sup>5</sup>  
Paulo Roberto Meir<sup>6</sup>

### Resumo

Uma das maneiras de se reduzir os custos no transporte de cargas é aumentando a quantidade de carga transportada por vagão, isto eleva a tensão no eixo do vagão e, conseqüentemente, a roda deve possuir maior dureza sem perda da tenacidade para suportar o desgaste. Para atingir os níveis de dureza necessários estão sendo desenvolvidas rodas ferroviárias com aços microligados ao nióbio (Nb), vanádio (V), molibdênio (Mo) e titânio. A empresa MWL Brasil fabricante de rodas ferroviárias forjadas desenvolveu dois aços microligados: 1º contendo o elemento microligante vanádio (0,13 % em peso) e 2º contendo os microligantes nióbio+molibdênio (0,014 % + 0,12 %, respectivamente), ambos os aços com 0,7 % C. Estes aços foram analisados microestruturalmente e mecanicamente a partir da roda ferroviária pronta. A microestrutura destes aços é composta basicamente por ferrita-perlita. Nas propriedades mecânicas o aço ao V apresentou os melhores resultados em todos os ensaios (tração na temperatura ambiente e 540 °C, energia absorvida no ensaio Charpy e  $K_{IC}$ ) quando comparado ao aço sem microligantes ou com a adição de Nb+Mo. O melhor desempenho do aço ao V foi atribuído ao seu menor tamanho de grão austenítico e espaçamento interlamelar da perlita mais refinado.

**Palavras-chave:** Carbonetos; Nióbio; Molibdênio; Vanádio; Aço carbono.

### EFFECT OF ADDING VANADIUM, NIOBIUM-MOLYBDENUM IN THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURAL OF STEEL 0.7% C

#### Abstract

One of the main strategies to reduce cost in load transportation is through the increase of the load transported a railroad car. This increase of tension in the wagons axes, require wheels with higher hardness but without loss of ductility and toughness. Thus, to achieve the required levels of hardness, the developments are now focusing on railway wheels composed by microalloyed steels with vanadium (V), niobium (Nb), molybdenum (Mo) and titanium. The MWL Brazil began in 2008, together with Unicamp, a research project on the development of railway wheel made of microalloyed steel. The MWL Brazil manufacture of forged railway wheels developed two microalloyed steel: 1º microalloyed vanadium (0.13 wt%) and 2º microalloyed niobium+molybdenum (0.014% + 0.12%, respectively), both with 0.7% C steels. The microstructural analysis of samples taken from the tread of railway wheels, revealed a ferritic-pearlitic structure. The vanadium steel showed the best results in all tests of strength (at room temperature and 540 °C), K<sub>1C</sub> and Charpy test if compared to steels without microalloying or with the addition of Nb+Mo. The superior performance vanadium steel was attributed to the smallest austenite grain size and the finest interlamellar spacing of the pearlite.

**Keywords:** Carbides; Niobium; Molybdenum; Vanadium; Carbon steel.

<sup>1</sup> Eng. de Materiais, Doutora, Aluna pós doc, Metallurgical and Materials Engineering, Colorado School of Mines, Golden, CO e EUA.

<sup>2</sup> Eng. Metalúrgico, Graduado, Mestrando, DEMM-FEM, Univerdade Estadual de Campinas, Campinas, SP e Brasil.

<sup>3</sup> Eng. Mecânico, Mestre, Doutorando, DEMM-FEM, Univerdade Estadual de Campinas, Campinas, SP e Brasil.

<sup>4</sup> Eng. de Materiais, Doutor, Professor adjunto, DEMA, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP e Brasil.

<sup>5</sup> Eng. Metalúrgico, Doutor, Professor titular, EM, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP e Brasil.

<sup>6</sup> Eng. Mecânico, Doutor, Professor titular, DEMM/FEM Univerdade Estadual de Campinas, Campinas, SP e Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre as matrizes de transporte de carga disponíveis no Brasil, o modal ferroviário é o mais adequado em relação custo benefício, além do menor impacto ambiental. A emissão de CO<sub>2</sub> para o ambiente é 6 vezes menor quando comparado ao modal rodoviário, tornando-se assim, um excelente modal para ser explorado e estudado.

Durante décadas houve pouco desenvolvimento de novos aços para aplicação em rodas ferroviárias porém, ultimamente, surgiram pesquisa com aços microligados e bainíticos, visando um aumento de carga transportada por eixo, que reflete na redução de custos no transporte de cargas. Obviamente estas solicitações geram modificações estruturais no eixo do vagão e, conseqüentemente, a roda deve possuir maior dureza para suportar o desgaste, entretanto, sem perda da ductilidade e tenacidade.

As rodas ferroviárias tradicionais são feitas de aços com altos e médios teores de carbono, dependendo do tipo de aplicação. Segundo a norma da AAR (Association of American Railroads), as rodas são divididas de acordo com sua aplicação (Tabela 1). As classes L, A e B são usadas para transporte de passageiros e as classes B, C e D são utilizadas, normalmente, para vagões de carga e locomotivas.

**Tabela 1.** Classes de rodas ferroviárias em função da aplicação [1]

Classe	Carbono (% em massa)	Dureza (Brinell)	Carga
<b>L</b>	0,47 máx	197 – 277	Leve
<b>A</b>	0,47 – 0,57	255 – 321	Moderada
<b>B</b>	0,57 – 0,67	302 – 341	Elevada
<b>C</b>	0,67 – 0,77	321 – 363	Elevada
<b>D</b>	0,67 – 0,77	341 – 415	Elevada

Devido à grande demanda de transporte de produtos básicos (minério de ferro, carvão, grãos etc.), foi criada em 2011 pela AAR a Classe D, destinada ao transporte de cargas pesadas, designada em inglês como classe “Heavy Haul”. Para se atingir os níveis de dureza necessários para a classe D estão sendo desenvolvidos, em todo o mundo, aços microligados.

Os aços microligados podem ser definidos como aços carbono-manganês contendo pequenos teores (menores que 0,5%) de elementos de liga forte formadores de carbonetos como o nióbio, vanádio e titânio. O controle do processo de conformação a quente destes aços permite o controle da precipitação destes carbonetos, os quais ancoram o grão austenítico, reduzindo o crescimento do mesmo e produzindo aços com estrutura bastante refinada depois de resfriados, o que aumenta a resistência mecânica e a tenacidade [2]. Os carbonetos nióbio [3] ou vanádio [4] finamente precipitados provocam o endurecimento tanto da ferrita livre como da ferrita da perlita, elevando a dureza e a resistência mecânica do aço. A fração de nióbio [3] ou vanádio [5; 6] não precipitados, ou seja, dissolvidos na austenita, atrasa a formação de produtos difusionais como a ferrita e a perlita, fazendo com que estas sejam formadas em temperaturas menores, o que provoca o refinamento do espaçamento interlamelar da perlita, elevando a resistência mecânica dos aços.

A MWL do Brasil parceira neste trabalho é uma empresa localizada em Caçapava - SP que fabrica rodas ferroviárias de diferentes classes segundo a norma AAR MSRP. Com a intenção de homologar a nova Classe D desenvolveu rodas com aços microligados, que foram caracterizados estruturalmente e mecanicamente neste trabalho.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada com corpos de prova provenientes de rodas ferroviárias fabricadas pela empresa MWL Brasil.

A produção de rodas ferroviárias realizada pela empresa utiliza sucata metálica fundida em forno elétrico a arco com capacidade de 35 toneladas, após a fusão o metal líquido é transferido para uma panela refratária para acerto de composição química e desgaseificação a vácuo. Em seguida o metal líquido é vazado em lingoteiras cônicas. Ao término da solidificação, os lingotes são cortados em tarugos por uma serra de disco automático e acondicionados em um forno rotativo a 1250 °C para posterior processo de conformação da roda. Para obter o formato de roda ferroviária são necessárias 3 etapas de forjamento. Na primeira etapa uma prensa hidráulica de 6.000 toneladas fornece um esboço de roda; na segunda etapa à laminação por rolos é responsável pela formação da superfície de rolamento e o friso da roda e por fim na última etapa uma prensa CNC de 3.000 toneladas faz o deslocamento do disco da roda e furo central.

Após o forjamento as rodas ferroviárias fabricadas são tratadas termicamente, o que consiste em austenitizar em aproximadamente 830 °C por 4h1/2 horas, seguido de tempêra superficial com spray de água na pista de rolamento (figura 3.5), com posterior revenimento a 500 °C por 3h40 min. Após este tratamento, as rodas são direcionadas ao setor de usinagem.

As análises das composições químicas dos aços foram realizadas pela empresa MWL Brasil, utilizando um espectrômetro de emissão ótica, marca Thermo Scientific, modelo ARL 3460 OES e são apresentadas na Tabela 2. Os aços foram denominados: 7C sem adição de elementos de liga, 7V microligado com vanádio e 7Nb microligado com nióbio e molibdênio.

**Tabela 2.** Composição química dos aços (% em massa)

Aço	C	Si	Mn	P	S	Mo	Nb	V
7C	0,68	0,34	0,83	0,013	0,010	0,015	<0,008	0,0007
7V	0,68	0,55	0,88	0,007	0,011	0,016	<0,012	0,13
7Nb	0,63	0,31	0,82	0,009	0,002	0,12	0,014	0,009

Os CPs foram retirados na região do aro da roda bem próximo da pista de rolamento. As direções de retiradas dos CPs são determinadas pela norma MRSP M-107 da AAR

### 2.1 Análise Microestrutural

Utilizou-se um microscópio ótico marca Olympus, modelo BX51M com câmera para aquisição de imagens PAX-it, disponível no Laboratório de Processamento e Caracterizações de Metais CPM/LNNano-CNPEM/MCTI, um microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Zeiss, modelo EVO MA 15, do Laboratório Multiusuário FEM/Unicamp.

Na análise microestrutural por MO e MEV as amostras foram preparadas metalograficamente até polimento com pasta de diamante de 1µm. Para revelar as microestruturas, as amostras foram atacadas com reagente Nital a 2%. As imagens adquiridas forneceram dados de tamanho de grão austenítico (TGA), espaçamento

interlamelar da perlita ( $S_0$ ) e fração volumétrica de ferrita, que foram essenciais para correlacionar os resultados obtidos nas propriedades mecânicas.

## 2.2 Propriedades Mecânicas

### 2.2.1 Tração

Os ensaios foram realizados no Laboratório Multiusuário da FEM, em um Equipamento MTS System, modelo 810Flex-Test40. Foram ensaiados CPs na temperatura ambiente e na temperatura de 540 °C. Os corpos de prova seguiram as normas ASTM A370-12 para temperatura ambiente e ASTM E21-09 para temperatura elevada. O ensaio de tração a quente é exigido pela norma AAR porque os trens de carga da América do Norte utilizam no sistema de frenagem tambores de freio e, portanto, as rodas em serviço podem ser expostas a temperaturas superiores a 480 °C.

### 2.2.2 Ensaio de impacto Charpy e tenacidade à fratura

O ensaio Charpy foi realizado na MWL Brasil, seguindo a norma ASTM A370-12. O equipamento é do tipo pêndulo de impacto, marca Wekstoffprüfmaschinen, modelo PSW-30 com capacidade máxima para carga de 294 J.

Para o ensaio de tenacidade à fratura foram utilizados corpos de prova do tipo compacto com espessura de 25 mm, conforme norma ASTM E399-12. O ensaio foi realizado utilizando o mesmo equipamento de ensaio de tração, porém adaptado para ensaio de K1C, disponível no Laboratório Multiusuários da FEM.

### 2.2.3 Mapa de dureza

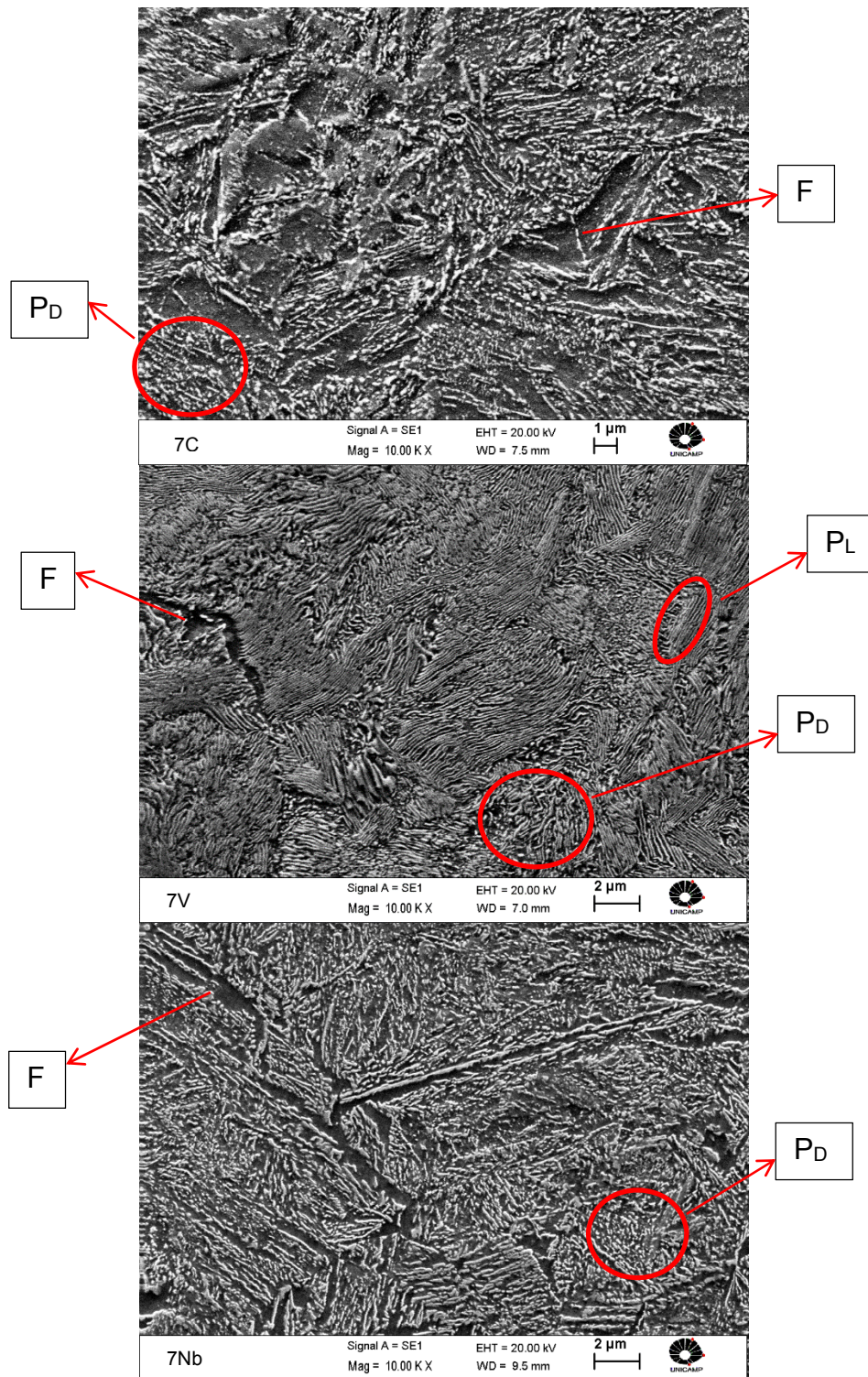
Os aços com e sem microligantes foram mapeados a partir da pista de rolamento com um microdurômetro Vickers, marca LECO, modelo LM100AT disponível no CPM/LNNano. Os parâmetros utilizados no ensaio de microdureza foram carga de 200 g, espaçamento de indentação de 500  $\mu\text{m}$  e tempo de 15 segundos.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Análise Microestrutural

Na Figura 1 observamos a microestrutura dos aços 7C, 7V e 7Nb retirados das rodas produzidas pela MWL. A região analisada corresponde a 3 mm de profundidade a partir da pista de rolamento pronta, ou seja, após passar pelos processos de têmpera, revenimento e usinagem. Em todos os aços observou-se uma estrutura composta de perlita lamelar degenerada com alguns grãos alongados de ferrita livre. A perlita degenerada forma-se de maneira descontínua, intercalando ferrita com cementita.



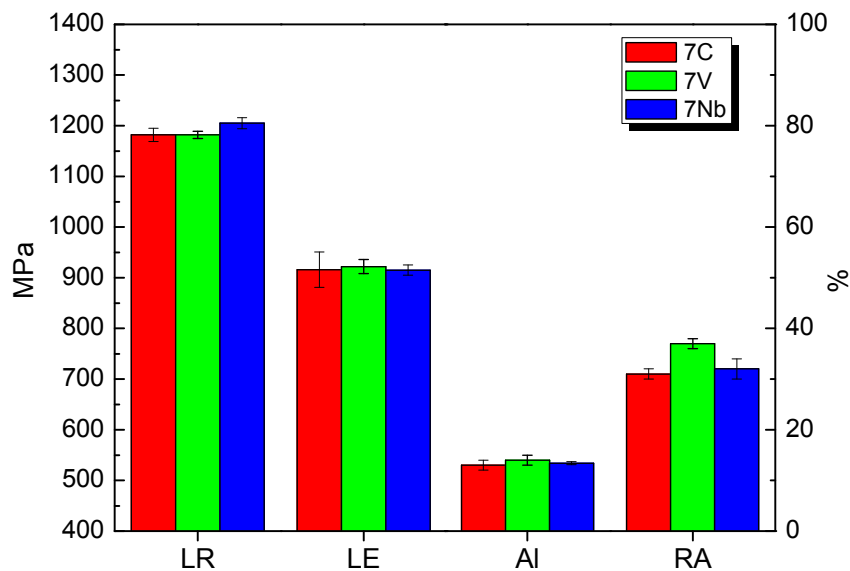


**Figura 1.** Imagens de MEV das microestruturas a partir de 3 mm pista de rolamento da roda ferroviária dos aços 7C, 7V e 7Nb. Nital 2 %. Legenda: F – ferrita, PL – perlita lamelar, Pd - perlita degenerada.

## 3.2 Propriedades Mecânicas

### 3.2.1 Ensaio de tração

No ensaio à temperatura ambiente os valores do limite de resistência à tração dos aços 7C e 7V foram semelhantes, entretanto no aço 7V a redução do tamanho de grão austenítico em relação ao aço 7C (6 e 12  $\mu\text{m}$ , respectivamente) associado com a redução do espaçamento interlamelar da perlita (0,11 e 0,13  $\mu\text{m}$ , respectivamente) favoreceu a um ligeiro ganho no limite de escoamento e ductilidade (alongamento e redução de área). O mesmo ocorreu para o aço 7Nb (TGA = 10  $\mu\text{m}$  e  $S_0 = 0,09 \mu\text{m}$ ) que também apresentou um aumento do limite de resistência à tração em relação ao aço 7C, porém sem alterações nos valores de ductilidade (alongamento e redução de área) (figura 2). Dentre os três aços analisados o que teve melhor desempenho em relação às propriedades obtidas no ensaio de tração à temperatura ambiente foi o aço ao vanádio (7V) que apresentou maiores limite de escoamento, redução de área e alongamento em relação aos aços 7C e 7Nb.



**Figura 2.** Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração na temperatura ambiente dos aços 7C, 7V e 7Nb.

Nos ensaios de tração a 540 °C o melhor desempenho entre os três aços foi novamente o aço 7V que apresentou maiores resistência mecânica e ductilidade. O aço 7Nb apresentou uma maior resistência mecânica que o aço 7C, porém com perda de ductilidade considerável (Figura 3).

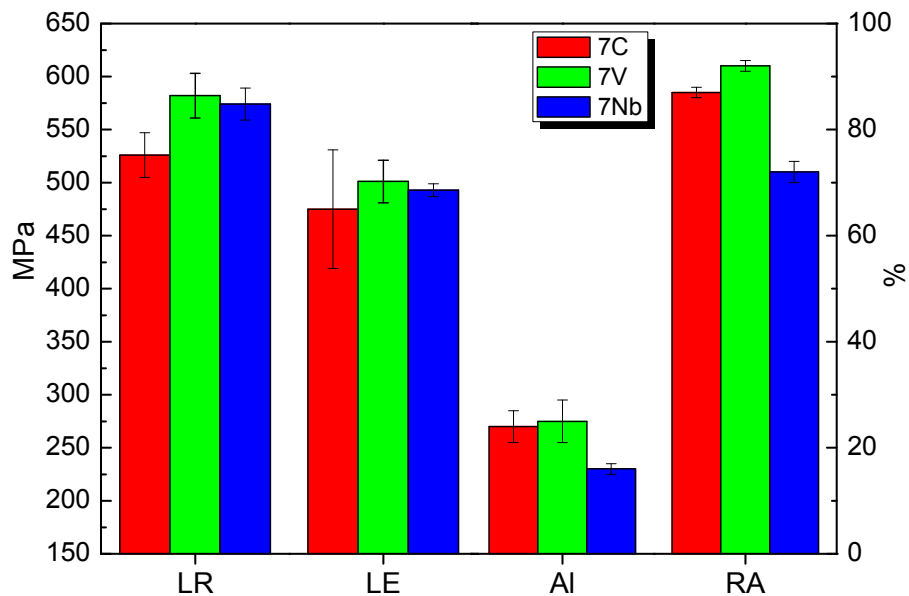


Figura 3. Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração a 540 °C dos aços 7C, 7V e 7Nb.

### 3.2.2 Ensaio de impacto Charpy e tenacidade à fratura

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os resultados da energia absorvida no impacto e tenacidade à fratura dos aços 7C, 7V e 7Nb na temperatura ambiente. O aço 7V apresentou um aumento de mais de 20 % no valor de energia absorvida no impacto quando comparado ao aço 7C. O mesmo ocorreu no resultado de tenacidade à fratura, o qual também apresentou um aumento de 7 %. Este aumento deve estar relacionado com a redução do tamanho de grão austenítico e espaçamento interlamelar da perlita. O aço 7Nb apresentou uma ligeira redução de 6 % no valor de energia absorvida no impacto quando comparado ao aço 7C, entretanto não houve variação significativa em relação a tenacidade à fratura. Todos os aços satisfizeram o valor mínimo especificado pela norma AAR no ensaio de tenacidade à fratura.

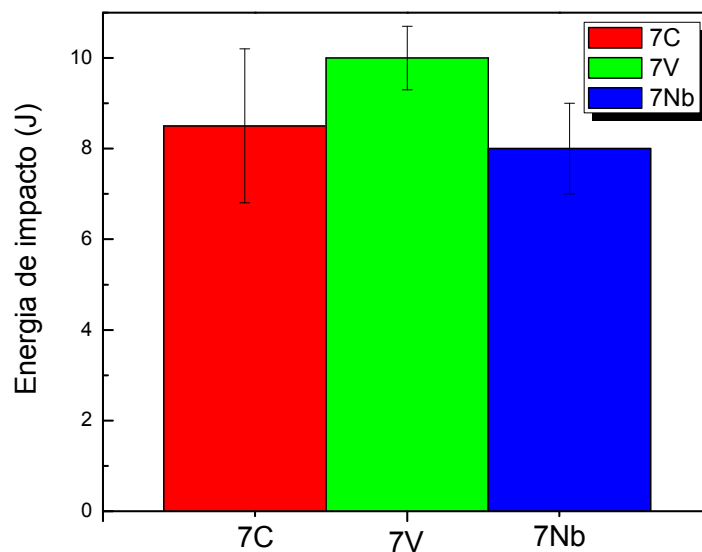


Figura 4. Energia absorvida no impacto Charpy dos aços 7C, 7V e 7Nb na temperatura ambiente.

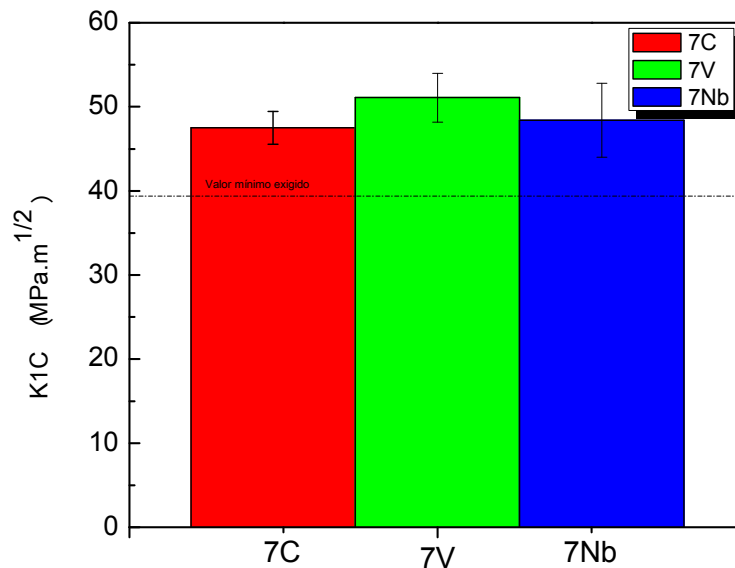


Figura 5. Tenacidade à fratura dos aços 7C, 7V e 7Nb.

### 3.2.3 Perfil de dureza da pista de rolamento

Na Figura 6, é apresentado o perfil de dureza da pista de rolamento das rodas ferroviárias produzidas com os aços 7C, 7V e 7Nb. O aço ao vanádio não apresentou variações significativas de dureza, o que é condizente com a estrutura perlítica lamelar encontrada em toda a extensão da amostra. O aço 7Nb apresentou dureza inicial superior ao aço 7C, também esperado devido sua maior temperabilidade. Ambos os aços 7C e 7Nb apresentaram uma diminuição de dureza na região a 9 mm do início da pista de rolamento o qual está relacionado com a maior fração de ferrita livre encontrada nesta região. Este aspecto será melhor explorado em trabalhos futuro, para tentar entender o aumento de ferrita nesta região.

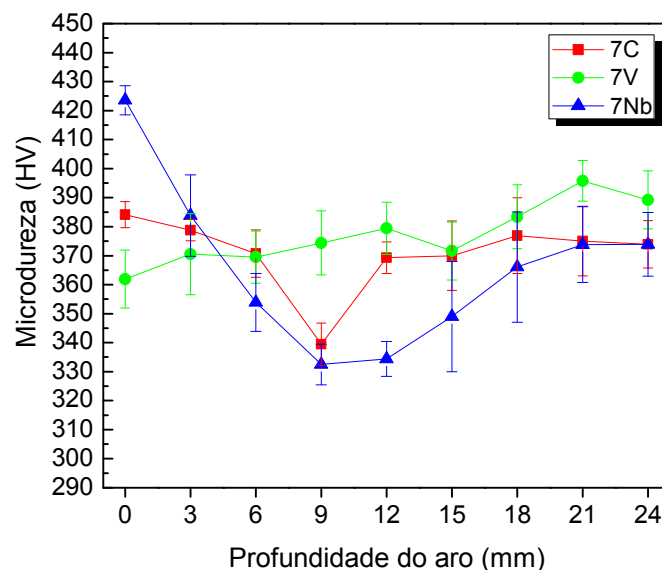


Figura 6. Perfil de dureza da pista de rolamento dos aços 7C, 7V e 7Nb.



## 4 CONCLUSÃO

A análise das propriedades mecânicas e microestruturais de corpos de prova retirados das pistas de rolamento das rodas ferroviárias prontas para uso com estrutura ferrítica-perlítica revelou que:

- Houve um refino do grão austenítico (12; 6 e 10  $\mu\text{m}$ , aproximadamente, para os aços 7C, 7V e 7 Nb, respectivamente), o que pode ser explicado pela presença de precipitados finos, os quais restringem o crescimento dos grãos de austenita. O espaçamento interlamelar da perlita (0,13; 0,11 e 0,09  $\mu\text{m}$ , para os aços 7C, 7V e 7Nb, respectivamente) também apresentou redução. Isto foi atribuído ao atraso na formação dos constituintes difusionais (ferrita e perlita).

- Nos ensaios de tração tanto à temperatura ambiente como a 540 °C o melhor desempenho entre os três aços foi o do aço 7V que apresentou maiores resistência mecânica e ductilidade. Todos os aços apresentaram valores de propriedades mecânicas acima dos exigidos pela norma AAR no ensaio de tração à temperatura ambiente.

- Tanto no ensaio Charpy à temperatura ambiente como no ensaio de  $K_{IC}$  o melhor desempenho foi também o do aço 7V, que apresentou um aumento de mais de 20% no valor de energia absorvida no impacto quando comparado ao aço 7C. Este aumento deve estar relacionado com a redução do tamanho de grão austenítico e espaçamento interlamelar da perlita. Todos os aços satisfizeram o valor mínimo especificado pela norma AAR para  $K_{IC}$ .

## Agradecimentos

As agências de fomento Capes, CNPq (pelo projeto 48.4398-2013-0) e Fapesp (pelo projeto 12/50177-1), pelo apoio e incentivo à pesquisa.

Ao Laboratório de Processamento e Caracterização de Metais (CPM/LNNano/CNPEM) e o Laboratório de Nanotecnologia (LNNano/CNPEM).

## REFERÊNCIAS

- 1 AAR MSRP “Manual of Standards and Recommended Practices Section G” – Wheel and Axles, M-107/M-208. 2011.
- 2 Silva ALVC, Mei PR. Aços e ligas especiais. 3ª Edição. São Paulo: Blucher. 2010.
- 3 Mei PR. 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. 1983.
- 4 Han K, Edmonds DV, Smith GDW. Optimization of mechanical properties of high-carbon pearlitic steels with Si and V additions. Metallurgical and Materials Transactions A. 2001; 32(6): 1313–1324.
- 5 Yu W, Liu L, Xia Y, Xi C. The Effect of Vanadium on the Phase Transformation of the 82B Steel. Journal of Metallurgical Engineering. 2013; 2(4): 140–148.
- 6 Jorge-Badiola D, Iza-Mendia A, López B, Rodriguez-Ibabe JM. Role of Vanadium Microalloying in Austenite Conditioning and Pearlite Microstructure in Thermomechanically Processed Eutectoid Steels. ISIJ International. 2009; 49(10): 1615–1623.