

EFEITO DA ADIÇÃO DE VANÁDIO NO DESGASTE POR ROLAMENTO COM DESLIZAMENTO EM RODAS FERROVIÁRIAS

COBEF2017-0192

Resumo: As principais causas do elevado custo de manutenção no setor ferroviário são: falhas e perdas de propriedades mecânicas dos componentes que sofrem o desgaste prematuro. Desse modo, uma máquina de desgaste disco-contra-disco foi desenvolvida para quantificar o desgaste em contato de rolamento em aços de rodas ferroviárias. Esta máquina foi idealizada por meio de um convênio entre a Unicamp, a USP, a Fapesp e a MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda. O projeto da máquina foi elaborado pela equipe do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da EPUSP e a construção realizada pela empresa Equitecs Indústria de Equipamentos Laboratórios Ltda em parceria com a empresa Sensoft Indústria e Automação Ltda, a qual desenvolveu a automação do conjunto. O equipamento é composto por dois servomotores independentes que controlam a velocidade de rotação de cada disco simulando o contato roda/trilho, o que possibilitou estabelecer um deslizamento entre eles, em conformidade com a norma M-107/M- 208 da AAR. A carga é aplicada sobre os discos por meio de um servomotor conectado a um fuso e monitorada por uma célula de carga. Medidores de temperatura e velocidade fazem a aquisição dos dados em tempo real, os quais são armazenados em um computador. As medidas de desgaste foram determinadas por perda de massa e variação dimensional dos discos, realizadas ao final de 100.000 ciclos. A rugosidade superficial dos discos foi medida antes e depois dos testes de desgaste. Foram realizados ensaios com um aço 0,7 %C com e sem microadição de vanádio. Constatou-se que a máquina atuou de forma eficiente em sua proposta, visto que todos os parâmetros foram controlados e monitorados no decorrer dos ensaios, proporcionando confiabilidade aos resultados obtidos. O aço microligado com vanádio apresentou maior resistência ao desgaste, pois apresentou menor perda de massa ao longo do ensaio.

Palavras-chave: Aço médio carbono microligado, vanádio, ensaio disco-contra-disco, fadiga de contato por rolamento, desgaste.

1. INTRODUÇÃO

O setor ferroviário mundial está em crescente desenvolvimento e com isto têm buscado um transporte ferroviário mais seguro, eficiente, sustentável e interligado. Devido à demanda por trens com elevada carga transportada ou alta velocidade, em 2011 a AAR (*Association of American Railroads*) normatizou uma nova classe de rodas, denominada Classe D para atender esse novo mercado. Diante desse cenário, o setor brasileiro de rodas ferroviárias concentrou sua pesquisa no aumento de carga transportada por eixo, o que está diretamente ligado ao desenvolvimento de materiais mais resistentes para os componentes rodas e trilhos.

Em 2008, a MWL Brasil, Rodas e Eixos Ltda e a Unicamp iniciaram um convênio de pesquisa para o desenvolvimento e caracterização de rodas fabricadas com aços microligados. Atualmente as rodas são fabricadas para suportar até 30 toneladas por eixo (t/eixo) e, com o desenvolvimento de rodas microligadas busca-se elevar esses valores para 40 t/eixo (Minicucci, 2011). Foram realizadas modificações metalúrgicas no aço produzido pela referida empresa, através da incorporação de microligantes (V, Nb e Mo), os quais proporcionaram um aumento da resistência mecânica e da tenacidade nas rodas ferroviárias. Os resultados encontram-se em duas teses de mestrado (Cunha, 2009 e Villas Bôas, 2010) e duas de doutorado (Cunha, 2013 e Fonseca, 2015).

Porém, para a inserção deste novo produto no mercado internacional é necessária sua homologação junto à *Association of American Railroads* (AAR), a qual solicita que os testes sejam realizados em instituições de ensino. Para realizar os ensaios de desgaste segundo a norma da AAR M-107/208(2011) foi necessário projetar e construir uma máquina para o referido ensaio. Buscou-se então a colaboração do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da

Escola Politécnica da USP (EPUSP), referência na área de tribologia, com a equipe coordenada pelo Prof. Dr. Amilton Sinatora. Desse modo, uma máquina disco-contra-disco foi desenvolvida para simular a fadiga de contato por rolamento com deslizamento em aços de rodas ferroviárias através de um convênio assinado em 2013 entre a Unicamp, a USP, a Fapesp e a MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda. A máquina foi projetada pela equipe do LFS/EPUSP e construída pela empresa Equitecs Indústria de Equipamentos Laboratórios Ltda, em parceria com a empresa Sensoft Indústria e Automação Ltda, a qual desenvolveu a automação do conjunto.

O desgaste de rodas ferroviárias pode ser decorrente de mais de um tipo de mecanismo. Primeiramente temos o Desgaste de Contato por Rolamento (DCR) da roda sobre o trilho (*Rolling Contact Wear* ou RCW). Ele é resultante das tensões de contato quando uma superfície rola sobre a outra. O desgaste ocorre tanto na roda como no trilho. Como o RCW é produzido por tensionamento repetitivo das superfícies em contato, ele é associado ou mesmo referido como Fadiga de Contato por Rolamento (FCR) ou “*Rolling Contact Fatigue*” (RCF). Embora a RCF tenha uma relação muito próxima com o RCW, é importante destacar que na RCF ocorre um acúmulo de dano – a propagação da trinca – que pode continuar por milhares de ciclos sem que apareça uma única partícula de debris. Por outro lado, “locais de danos por RCW podem agir como pontos de nucleação de trincas por fadiga e irradiar o dano sobre a superfície” (Blau, 1992).

Quando há presença de partículas na interface roda/trilho, como areia ou material arrancado da roda ou do trilho, tem-se um mecanismo de abrasão (DIN 50320, 1979), mas dois outros merecem uma atenção especial e constituem parte essencial do presente trabalho. Como em diversas situações de operação de uma composição ferroviária o contato roda/trilho afasta-se da condição de rolamento puro, tem-se um desgaste decorrente do deslizamento de uma superfície em relação à outra. Neste caso temos o Desgaste de Contato por Rolamento e Deslizamento ou *Rolling Sliding Contact Wear* (RSCW) (Liu et al., 2005).

As variáveis que afetam a fadiga de contato de rolamento são as mesmas que afetam a fadiga convencional de componentes mecânicos. Por exemplo, a resistência à fadiga se eleva com o aumento da tensão de escoamento do material fadigado e diminui em situações nas quais a superfície de contato apresenta danos. No sistema roda trilho a literatura mostra que materiais para roda da Classe D da AAR tem maior vida que materiais da Classe C, que tem menores tensões de escoamento que aqueles (Fonseca, 2015). Da mesma forma, a literatura relata que a presença de partículas entre roda e trilho afeta a vida de ambos os componentes (Descartes et al., 2008).

Este trabalho teve como objetivo testar o desempenho do equipamento desenvolvido em aços microligados com vanádio usados em rodas ferroviárias e comparar os resultados de resistência ao desgaste com os aços normalmente utilizados nas rodas ferroviárias da classe C da AAR.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na Tabela (1) é apresentada a composição química dos dois aços utilizados neste trabalho. O aço carbono é denominado de 7C, enquanto que o aço microligado com vanádio é denominado de 7V.

Tabela 1. Composição química dos aços 7V e 7C (% em peso).

Aço	C	Si	Mn	P	S	V
7C	0,68	0,34	0,83	0,013	0,010	<0,001
7V	0,68	0,55	0,88	0,007	0,011	0,130

A análise microestrutural foi realizada em microscópio ótico Leica DM ILM. Utilizou-se também um microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo EVO-MA15. As aquisições das imagens foram obtidas pelo *software Smart-SEM*.

Para a remoção de qualquer resíduo que pudesse interferir nos resultados, antes de se iniciar os ensaios, os discos foram limpos em banho ultrassônico contendo álcool etílico. Em seguida, foram pesados em balança analítica *Shimadzu AUY 220* com precisão de 0,0001 g e a rugosidade medida com o rugosímetro *Mitutoyo*, modelo SJ-210. Medidas de perda de massa e de variação dimensional dos discos foram realizadas ao final de 100.000 ciclos. A dureza foi medida em durômetro *Future Tech*, modelo FV 800, tendo sido realizadas 12 medidas na região da borda e do centro de cada disco com carga de 0,5 kg.

As propriedades mecânicas foram obtidas em trabalho anterior do grupo com os mesmos aços (Fonseca, 2015).

A máquina de desgaste é composta por dois servomotores independentes que controlam a velocidade de rotação de cada disco, simulando o contato roda/trilho e possibilitando estabelecer um deslizamento entre eles, em conformidade com a norma da AAR. Medidores de temperatura e velocidade fazem a aquisição dos dados em tempo real, os quais são armazenados em um computador.

Os parâmetros utilizados no ensaio de desgaste foram: força aplicada de 160 kgf (1570 N), com deslizamento de 0,3% (diferença de velocidade de rotação dos discos) e número de ciclos de 100.000. O eixo A (inferior) operou a 150 rpm e o eixo B (superior) operou a 149,5 rpm. A carga e o deslizamento foram escolhidos baseados em um dos itens da norma AAR M-107/M-208 (2011) que especifica 0,3% de escorregamento e pressão de contato de 159.750 psi (1100 MPa). No aço 7C o ensaio foi realizado sem a presença de debris, enquanto que o aço 7V foi ensaiado com e sem presença de debris. A temperatura média da interface entre os discos foi medida empregando-se um sensor da marca *Micro-Epsilon*,

As constantes agora podem ser utilizadas na Eq. (3) para encontrar o valor da área de contato.

$$a = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{m_1 + m_2}{B} \cdot \frac{F}{L}} \quad (3)$$

$$a = 0,19 \text{ mm}^2$$

Definida a área de contato é possível determinar a força a ser aplicada por meio da Eq. (4).

$$P_{Max} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot a \cdot L} \quad (4)$$

$$F = \frac{P_{Max} \cdot \pi \cdot a \cdot L}{2}$$

$$F = 160 \text{ kgf} (1570 \text{ N})$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avaliação dos parâmetros de controle da máquina de desgaste

As figuras (3) e (4) apresentam, para o aço 7V, os valores de temperatura, carga e velocidade dos eixos ao longo dos ensaios. Nota-se que a temperatura média sofreu pouca variação ao longo do ensaio, permanecendo na faixa de 40 °C para o ensaio com debris e na faixa de 30 °C para o ensaio sem presença de debris. Esta redução na temperatura no ensaio sem debris é devido à presença do jato de ar direcionado para a pista de rolamento dos discos para retirar os debris. No caso dos gráficos referentes à carga aplicada, houve uma variação maior de ajuste de carga ao longo do ensaio na presença de debris, pois o material incrustado na pista de rolamento altera a pressão de contato naquele ponto, fazendo-se necessária a constante correção da carga aplicada. Já no caso do ensaio sem a presença de debris, a correção é realizada em tempo mais longo, pois a quantidade de material incrustado é bem menor. Nos gráficos de velocidades dos eixos, o ensaio sem debris apresentou correções de escorregamento bem menores comparadas às do ensaio com debris, pois o material incrustado também altera o escorregamento entre os discos, sendo necessária maior ajuste da velocidade de rotação ao longo do ensaio. Porém nos dois ensaios, o sistema de controle foi eficiente e manteve o escorregamento em torno de 0,3 %.

Para o aço 7C sem debris os gráficos de controle destes parâmetros foram semelhantes aos do aço 7V sem debris (Fig. 4).

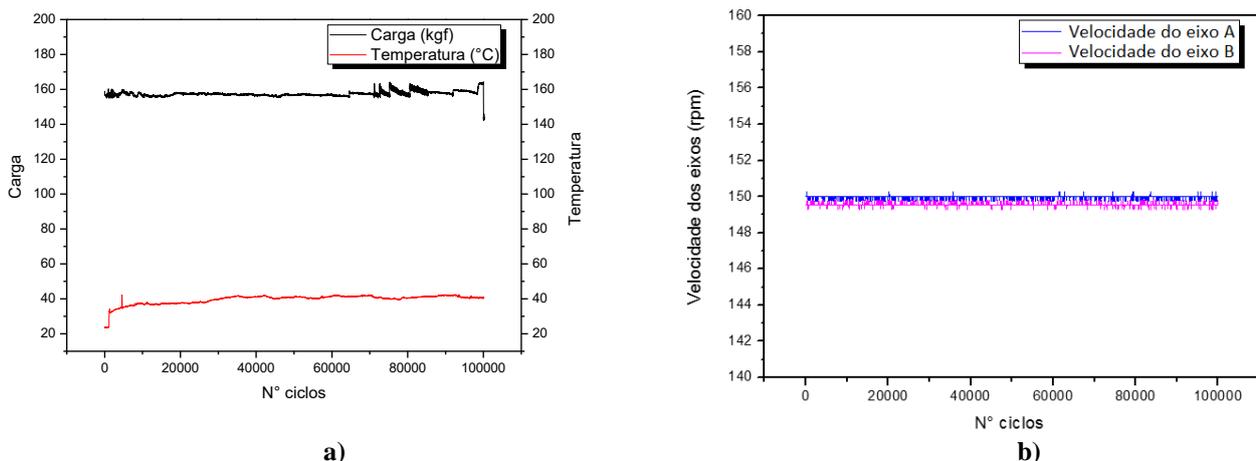


Figura 3. Dados dos parâmetros do ensaio do aço 7V na presença de debris: a) temperatura e carga ao longo do ensaio e b) velocidades dos eixos A e B ao longo do ensaio.

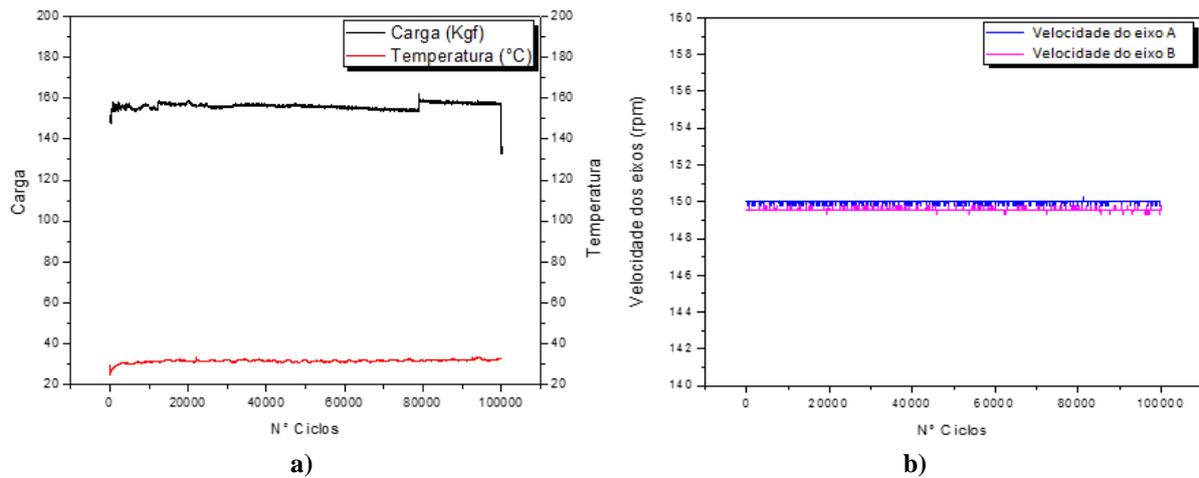


Figura 4. Dados dos parâmetros do ensaio do aço 7V sem presença de debris: a) temperatura e carga ao longo do ensaio e b) velocidades dos eixos A e B ao longo do ensaio.

3.2. Aço 7V com e sem a presença de debris

Na Figura (5) observa-se que os discos no ensaio com debris tiveram uma redução muito mais significativa de sua massa do que os discos no ensaio sem a presença de debris, o que era de se esperar, pois a presença de partículas entre os discos acelera o desgaste. Na Fig. (6) observa-se que a microdureza dos dois discos (A e B) medidas na região do centro e da borda eram bem similares, excluindo-se a possibilidade da microestrutura ter influenciado na diferença de perda de massa entre eles.

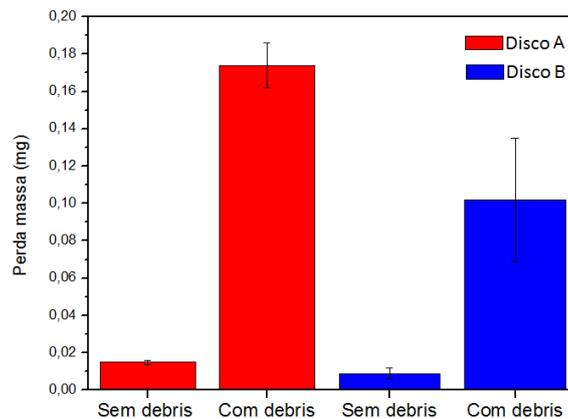


Figura 5. Perda de massa dos discos do aço 7V sem e com debris.

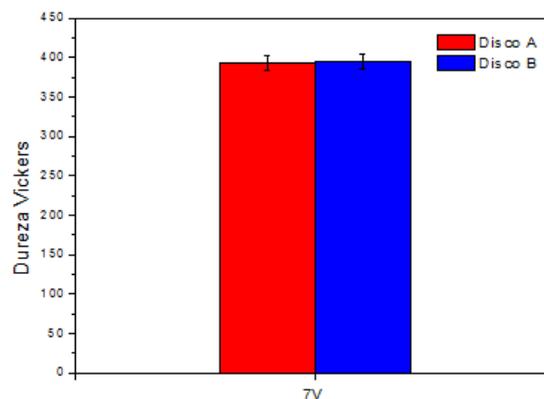


Figura 6. Dureza dos discos A e B do aço 7V.

Nas figuras (7) e (8) observa-se que, na presença de debris, a superfície desgastada é mais irregular, apresentando regiões com acúmulo de material e regiões com vazios. As causas das diferenças de perda de massa entre os discos A e B nos ensaios com e sem debris se devem, provavelmente, ao fato de um disco ser mais espesso que o outro, ocorrendo o efeito de borda do disco menos espesso (disco B), no qual é formada uma borda por meio da deformação plástica da superfície aumentando a área de contato entre os discos. Esse assunto merece uma investigação mais profunda.

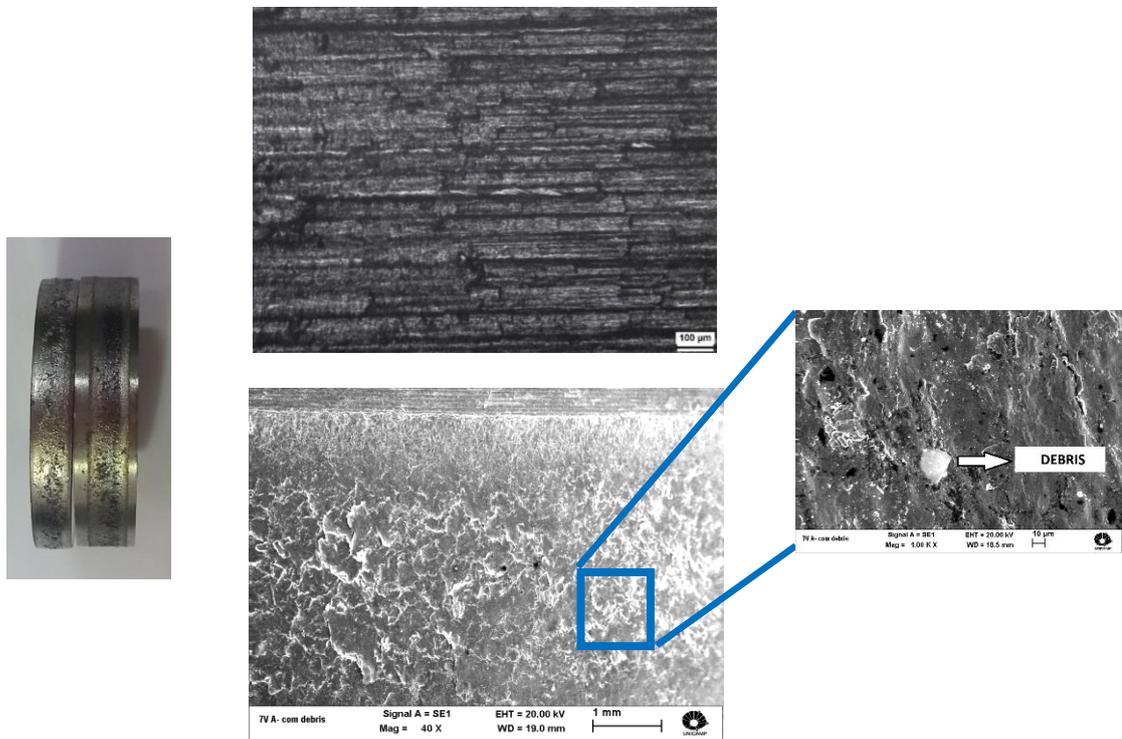


Figura 7. Imagens da região da pista de rolamento do disco A na presença de debris após 100.000 ciclos. Aço 7V

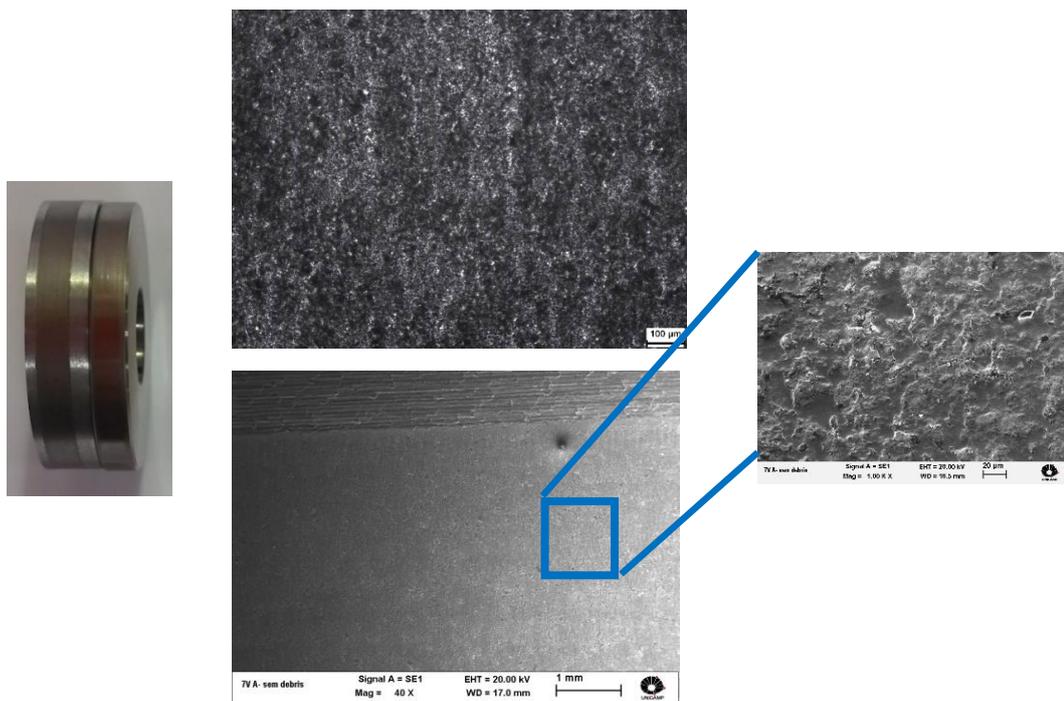


Figura 8. Imagens da região da pista de rolamento do disco A sem a presença de debris após 100.000 ciclos. Aço 7V

3.3. Aço 7C sem presença de debris

As imagens da pista de rolamento formada durante o ensaio do aço 7C são mostradas na Fig. (9). Nota-se que mesmo na presença de um jato de ar direcionado, a remoção dos debris não foi total, pois são observadas partículas aderidas na superfície.

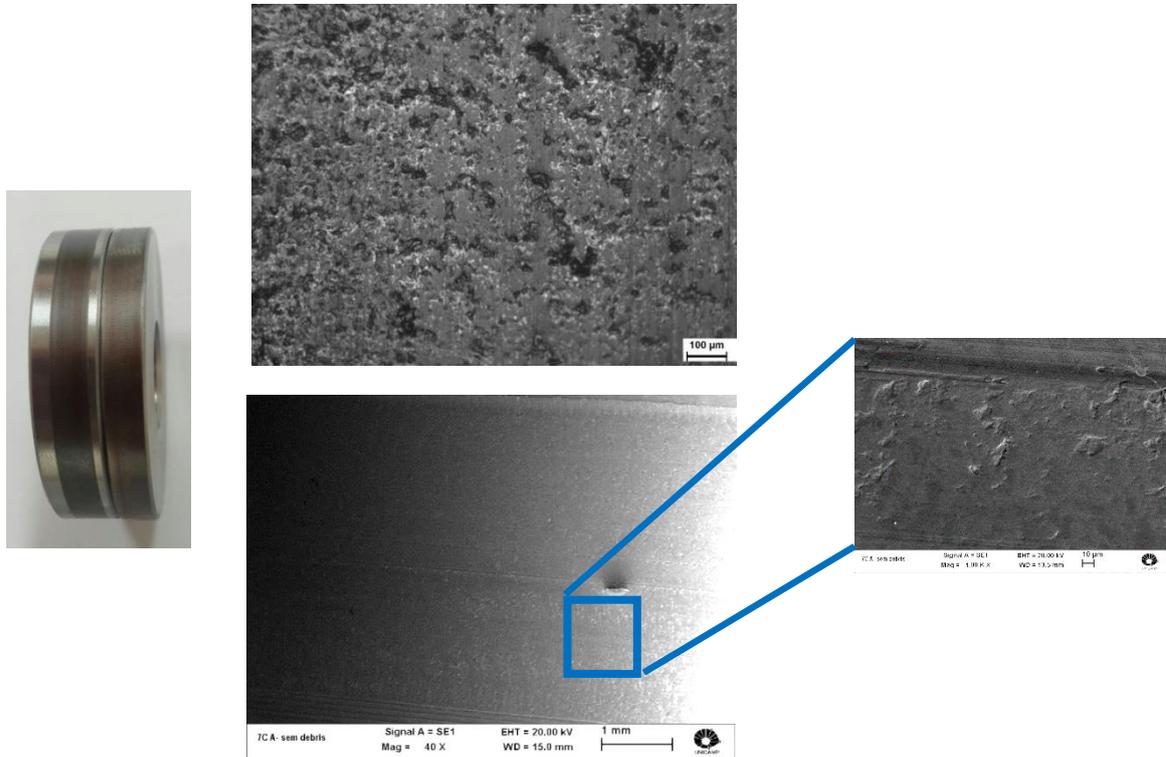


Figura 9. Imagens da região da pista de rolamento do disco A sem a presença de debris após 100.000 ciclos. Aço 7C

3.4. Comparação de perda de massa entre os aços 7C e 7V sem a presença de debris

Na figura (10) observa-se que o aço 7C apresentou uma perda de massa 60% superior ao aço 7V, ambos na condição sem a presença de debris, indicando que a adição de vanádio aumentou resistência ao desgaste do mesmo. Resultados anteriores exibidos na Fig. (11) mostram que o aço 7V possuía a mesma resistência mecânica que o aço 7C, porém com melhor ductilidade (maiores alongamento e redução de área), maior resistência ao impacto (ensaio *Charpy*) e maior tenacidade à fratura (K_{1C}). Isto significa que a adição de vanádio tornou o aço mais dúctil e tenaz, sem perda de resistência mecânica e ainda aumentou a resistência ao desgaste por rolamento com deslizamento. Singh et al (2003) também observou que a microadição conjunta de vanádio, molibdênio e nióbio aumentava resistência ao desgaste de aços com médio teor de carbono Tab. (2).

Tabela 2. Perda de massa em ensaio de desgaste em aços com e sem microadição de elementos de liga (Singh et al., 2003).

Composição química dos aços (% em peso)						Perda de massa (mg/h)
C	Mn	Si	V	Mo	Nb	
0,47	0,66	0,25	0	0	0	510
0,51	0,67	0,35	0,11	0,15	0,057	370
0,49	0,68	0,22	0,13	0,20	0,072	380

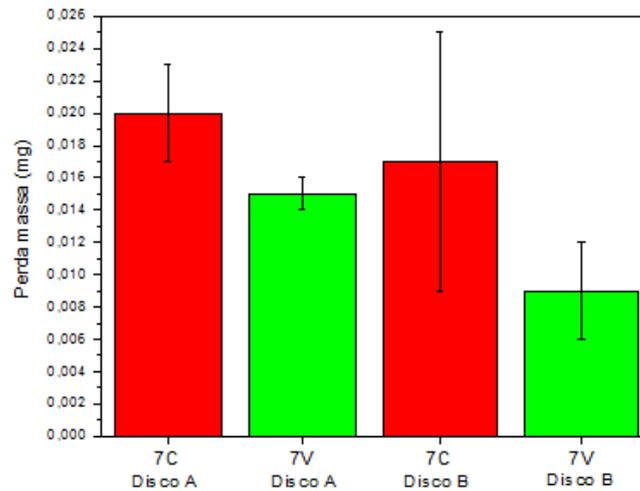


Figura 10. Perda de massa dos corpos de prova de aço 7C e 7V sem debris após 100.000 ciclos.

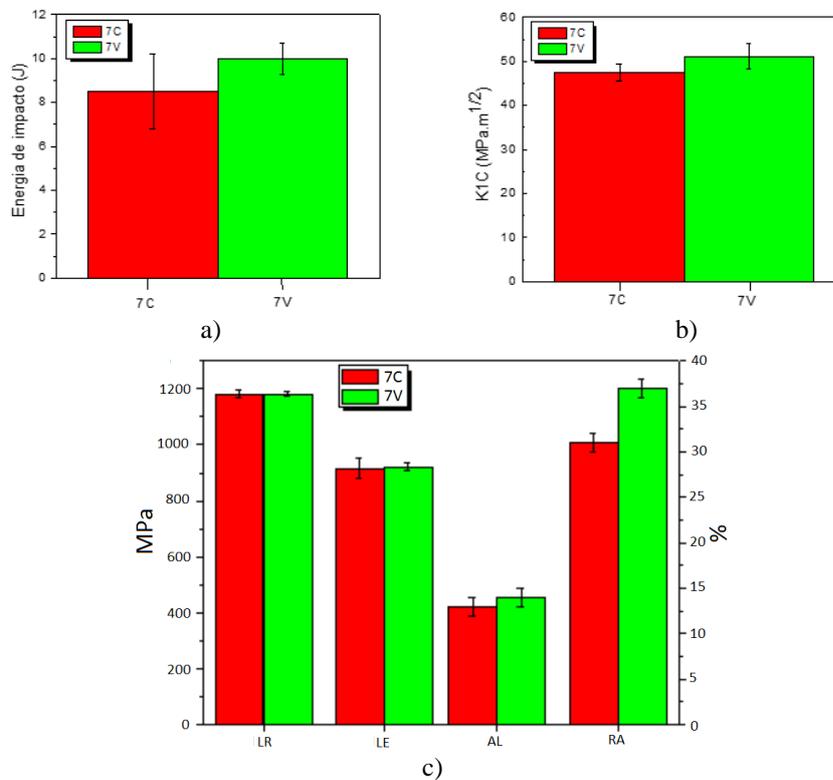


Figura 11. Comparação das propriedades mecânicas entre os aços 7C e 7V. (a) Ensaio Charpy; (b) Ensaio de tenacidade à fratura; (c) Ensaio de tração. (Fonseca, 2015).

A rugosidade foi medida nos discos inferiores, denominados de A, e nota-se que houve uma redução da mesma em ambos os discos ao final dos 100.000 ciclos, Fig. (12). Isto deve-se ao processo de usinagem dos discos que imprime marcas profundas, as quais são minimizadas ou até mesmo eliminadas na etapa de amaciamento (*running in*). A etapa de amaciamento causa mudança na superfície por deformação plástica, tornando-a mais plana (Johnson, 1995). Para confirmar o regime de amaciamento seria necessário levantar a curva de atrito ao longo do ensaio, o que será realizado proximamente. Yuan et al (2008) também relatou o mesmo comportamento de melhoria na rugosidade das duas superfícies durante o estágio de amaciamento.

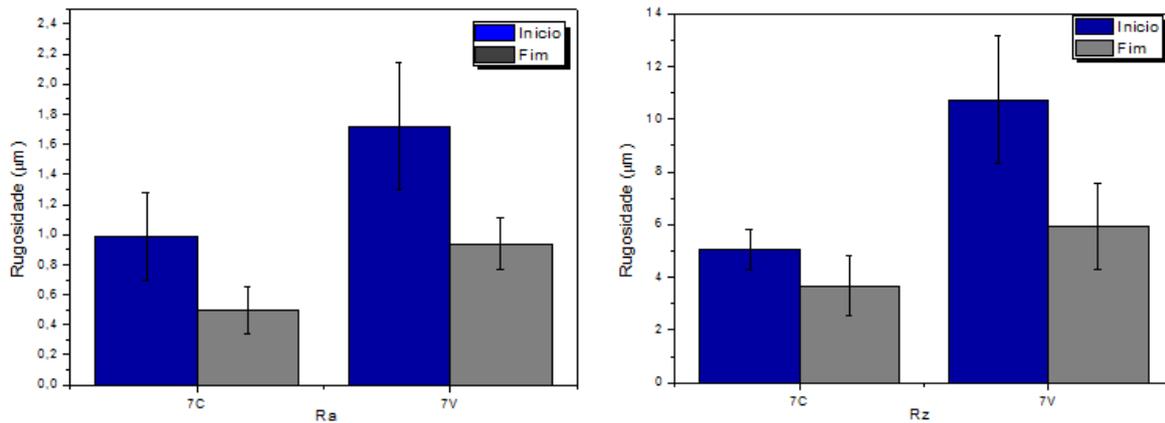


Figura 12. Medidas de rugosidade nos corpos de prova 7C e 7V sem debris após 100.000 ciclos (Disco A)

O disco do aço 7V com debris mostrou um comportamento diferente, no qual houve um aumento da rugosidade após o ensaio (figura 13). Este aumento ocorreu devido à presença do desgaste abrasivo associado ao desgaste de contato por rolamento com deslizamento. Os debris restringem a etapa de amaciamento, causando um maior desgaste nos discos, razão do aumento dos parâmetros de rugosidade (Bhushan, 2002).

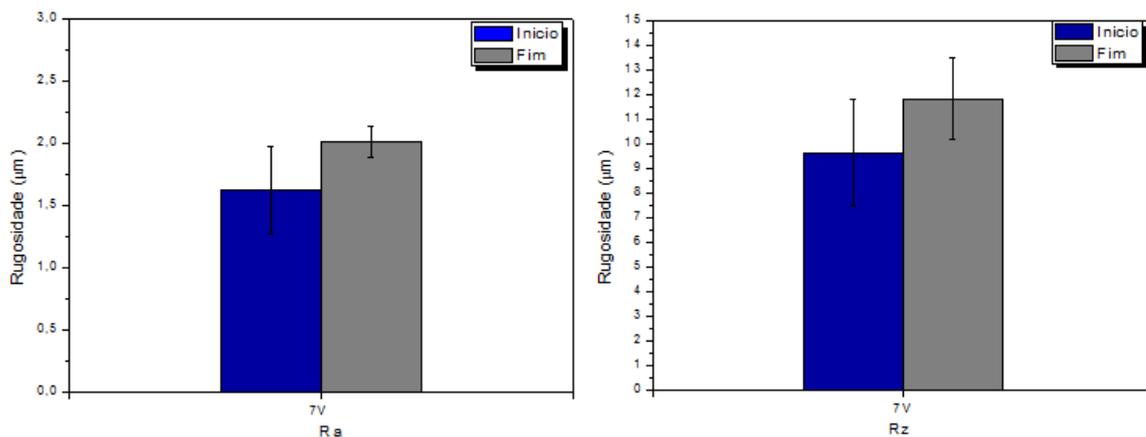


Figura 13. Medida de rugosidade nos discos do aço 7V no ensaio com debris (Disco A).

4. CONCLUSÕES

A máquina de desgaste disco-contra-disco construída apresentou um excelente desempenho, mantendo a carga aplicada e as velocidades dos discos constantes durante os 100.000 ciclos, demonstrando ser adequada para realizar ensaios de desgaste previstos na norma AAR M-107/M- 208.

A adição de vanádio nos aços aumentou a resistência ao desgaste dos mesmos, medida por perda de massa. A presença de debris no aço com vanádio praticamente dobrou a perda de massa após 100.000 ciclos, mostrando a importância de desgaste abrasivo associado ao desgaste de contato por rolamento com deslizamento.

5. AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi desenvolvido através de um convênio PITE assinado entre a Unicamp, a Fapesp e a MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda com a colaboração do IFS da EPUSP (Processo FAPESP 12/50177-1). Também contamos com o auxílio de pesquisa do CNPq (Processo 484398/2013-0) e com uma bolsa de pós-doutorado Júnior do CNPq (Processo 152779/2016-7). Agradecemos a todos pelo apoio.

6. REFERÊNCIAS

- American Association Railroad, 2011, “Manual of Standards and recommended Practices – Wheel and Axles”, M-107/M-208.
- Blau, J. P., 1992, “Friction, Lubrication, and Wear Technology”, Handbook, ASM International., Vol. 18, pp. 257-262.
- ASM Handbook, 1993, “Properties and selection: Irons Steels and High Performance alloys”, ASM International, Vol. 1, 870 p.
- Bhushan, B., 2002, “Introduction to Tribology”, Ed. John Wiley & Sons, 732 p.
- Cunha, A. P. A., 2013, “Caracterização mecânica e microestrutural de aços médio carbono microligados ao nióbio e molibdênio”, Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- 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 (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Descartes, S., Desrayaud, C. and Berthier, Y., 2008, “Experimental identification and characterization of the effects of contaminants in the wheel–rail contact”. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 222, No. 2, pp. 207-216.
- Deutsches Institut Für Normung, DIN 50320, 1979, “Verschleiß - begriffe, analyse von verschleißvorgängen, gliederung des verschleißgebietes”. Beuth Verlag, Berlin.
- Fonseca, S. T., 2015, “Efeito de adições de vanádio, nióbio e molibdênio na estrutura e propriedades mecânicas de aços com 0,7 % C utilizados na fabricação de rodas ferroviárias”, Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Johnson, K. L., 1995, “Contact mechanics and the wear of metals”. Wear, Vol. 190, pp. 162-170.
- Liu, Q.Y., Jin, X.S. and Zhou, Z.R, 2005, “An investigation of friction characteristic of steels under rolling-sliding condition”, Wear, Vol. 259, pp. 439-444.
- Minicucci, D. J., 2011, “Rodas e Eixos Ferroviários: Conceitos Básicos”, Ed. MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda, 143 p.
- Norton, R. L., 2006, “Machine Design: An integrated approach”, 3ª ed., Ed. Pearson, 984 p.
- Singh, U. P., Popll, A. M., Jain, D.K. and Jha, S., 2003, “Influence of microalloying on mechanical and metallurgical properties of wear resistant coach and wagon wheel steel”. Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 12, No. 5, pp. 573-580.
- Villas Bôas, R. L., 2010, “Desenvolvimento de aço microligado para rodas ferroviárias”, Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Yuan, C.Q., Peng, Z., Yan, X.P. and Zhou, X.C., 2008, “Surface roughness evolutions in sliding wear process”, Wear, Vol. 265, No. 3-4, pp. 341-348.

EFFECT OF VANADIUM ADDITION ON THE ROLLING-SLIDING CONTACT WEAR IN RAILWAY WHEELS

COBEF2017-0192

Abstract: *The main causes of high maintenance costs in the rail sector are: failure and loss of mechanical properties of components that suffer premature wear. Thus, a disc-on-disk wear machine has been developed to quantify rolling contact wear in railway wheel steels. This machine was conceived through a deal between Unicamp, USP, Fapesp and MWL Brazil Rodas & Eixos Ltda. The design of the machine was elaborated by the team of the Laboratory of Surface Phenomena (LFS) of EPUSP and the construction carried out by the company Equitecs Industria de Equipamentos Laboratórios Ltda. in partnership with company Sensoft Indústria e Automação Ltda., which developed automation of the whole. The equipment consists of two independent servomotors that control rotation speed of each disc simulating the wheel / rail contact, which makes it possible to establish sliding between them in accordance with AAR standard M-107 / M-208. The load is applied to the disks by means of a servomotor connected to a spindle and monitored by a load cell. Temperature and speed meters make acquisition of the data in real time, which are stored in a computer. Wear measurements were determined by mass loss and dimensional variation of the disks were performed at the end of 100,000 cycles. The surface roughness of the discs was measured before and after wear tests. Tests were carried out with 0.7% C steel with and without vanadium microaddition. It can be concluded that the machine performed/operated efficiently, since all the parameters were controlled and monitored during the tests, providing reliability to the results obtained. The microalloyed steel with vanadium showed higher wear resistance, as it presented lower mass loss throughout the test.*

Keywords: *High carbon microalloyed steel, vanadium, disc-on-disk test, rolling contact fatigue, wear.*