

AVALIAÇÃO DE DESGASTE A SECO DE RODAS FERROVIÁRIAS COM MICROESTRUTURAS PERLÍTICA E BAINÍTICA

P. F. C. Souza, paula.souza@engenharia.ufjf.br¹

H. A. Vitoi, vitoi.henrique@engenharia.ufjf.br¹

L.H. Alves, luizalves@engenharia.ufjf.br¹

¹Universidade Federal de Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, S/n - Martelos, Juiz de Fora

Resumo: A interface roda-trilho constitui-se em um importante tribossistema, objeto de muitas pesquisas em todo o mundo pelos esforços envolvidos e por ser um dos principais custos na manutenção de uma empresa ferroviária, tanto referente ao material rodante como via permanente. Aproveitando oportunidades neste cenário, este estudo analisa o comportamento em desgaste por meio de ensaios de desgaste rolo-disco de aços de rodas fundidas de mesma composição química e dureza, porém com diferentes microestruturas: perlítica e bainítica. Os resultados têm como objetivo sugerir o tipo de tratamento térmico mais adequado a esta aplicação e orientar empresas operantes em ferrovias sobre qual microestrutura apresenta melhor comportamento em desgaste face as elevadas tensões aplicadas. Desta forma, os resultados buscam orientar empresas no sentido de reduzir seus custos com manutenção corretiva e, por conseguinte, aumentar sua produtividade e competitividade no mercado.

Palavras-chave: tribologia, rodas ferroviárias, austêmpera, perlita, bainita

1. INTRODUÇÃO

A redução de custos em uma empresa é um dos aspectos mais importantes no que tange a manutenção do seu faturamento e ampliação dos negócios. No setor ferroviário, essa minimização dos custos é de suma importância. Segundo Alves (2000), existem três principais formas de realizar essa diminuição dos custos, sendo elas: i. Aumento da carga transportada por eixo; ii. Aumento da carga transportada por trem; e iii. Aumento da velocidade no trajeto. Porém, o aumento da carga e da velocidade do trem implicam em maiores esforços na estrutura mecânica, especialmente no sistema roda-trilho que, conforme Alves (2000), corresponde a praticamente 50% dos custos de manutenção.

Neste cenário, cada vez mais pesquisas são realizadas para que ocorra o aprimoramento do sistema roda-trilho. A interação entre os componentes da via permanente e do vagão é estudado na tribologia. A tribologia é a ciência que estuda a interação entre superfícies com o movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados, incluindo tópicos relativos ao atrito, desgaste e lubrificação (Stoeterau, 2004). Diversas características são relevantes para a roda, dentre elas pode-se destacar a composição, a geometria e os tratamentos térmicos utilizados na sua produção (Alves, 2000).

Para que o trilho e a roda assumam os formatos necessários, são utilizados diferentes tipos de processos. Normalmente os trilhos são fabricados pelo processo de laminação e as rodas são forjadas a partir de lingotes ou fundidas em moldes de grafite pelo processo de baixa pressão (Souza, 2016). Na Europa, as rodas forjadas são mais aplicadas em transportes com menor carga, como carros de passageiros, já nos Estados Unidos, as rodas fundidas são utilizadas em vagões de carga (Souza, 2016). Nesse trabalho serão analisadas rodas do tipo fundida em moldes de grafite pelo processo de baixa pressão.

Outro fator importante é o tratamento térmico do material, que é o processo de aquecimento e resfriamento visando modificar as propriedades do material para que sejam adequadas a diversas aplicações, conseguindo tais efeitos com redução dos gastos financeiros (Souza, 2016; Assunção, 1988). Quando a composição química da região superficial da peça de aço é modificada intencionalmente, o tratamento é denominado termoquímico. Senão, é denominado tratamento termo físico ou tratamento térmico (Assunção, 1988). De acordo com Vale (2011), o tratamento térmico pode ser executado a partir de três fases: aquecimento, manutenção da temperatura e resfriamento.

Existem diversos tratamentos térmicos aplicados aos aços. Os mais importantes são: a. Recozimento; b. Normalização; c. Beneficiamento (Têmpera e Revenimento); d. Cementação (Carbonetação); e. Nitretação; f. Cianetação; g. Carbonitretação (Souza, 2016); e cada um visa atingir uma determinada propriedade do material.

A têmpera e o revenido são utilizados quando se objetiva uma microestrutura martensítica revenida, que apresenta elevada resistência ao desgaste, bem como elevada tenacidade para uma mesma dureza quando comparada a outras microestruturas. Uma outra microestrutura de grande importância para os aços de elevada resistência é a bainita, que normalmente é obtida por meio do tratamento isotérmico conhecido como austêmpera (Totten *et al.*, 1993). Nesse tratamento primeiramente a peça é aquecida acima da zona crítica por um determinado tempo, a seguir, é resfriada bruscamente (fase

de resfriamento rápido) em banho de sais fundidos permanecendo nessa temperatura por um certo tempo, em seguida a peça é resfriada ao ar livre (Souza, 2016). Ao final, é obtida a microestrutura denominada bainita, que tem como característica a associação de elevada dureza com maior tenacidade. Este tipo de microestrutura também será analisado neste artigo através de testes de desgaste em um tribômetro.

Diversos trabalhos estudam o sistema roda-trilho em várias vertentes com o fim de aperfeiçoar esse sistema e reduzir desgastes. Sisdelli (2006) apresenta uma discussão sobre o desgaste da roda e sua consequência sobre o material rodante e a via permanente, focada principalmente na interface roda-trilho e no desenvolvimento de perfis de roda. Macêdo (2009) aborda a conceituação do desgaste dos trilhos, destacando não somente as normas de utilização, mas também suas funções, características técnicas do material, processo de fabricação, os defeitos e os limites de tolerância tradicionalmente aceitos. Souza (2016) apresenta estudos do contato comparativo entre dois materiais de roda ferroviária, avaliando o atrito, desgaste a seco e comportamentos de microestruturas perlítica e bainítica. Barbosa (2000) mostra uma metodologia para medição e tratamento de perfil de superfície que foi aplicada ao caso particular do par de rolamento utilizado na ferrovia (roda e trilho), identificando as propriedades de contato. Em Viana and Schimtzter (2015), o foco é no processo de esmerilhamento dos trilhos, o processo envolve várias etapas, começando pela análise do trilho e coleta de dados, passando pela correta escolha do padrão de esmerilhamento, a seguir é feita a implantação dos padrões e finalmente os testes. Semprebone (2005) analisa a componente da superestrutura ferroviária trilho, especificamente aos defeitos que nele se verificam em consequência de sua utilização como guia para o material rodante e transmissor de esforços decorrentes do movimento do veículo e do desgaste do contato roda-trilho. Em Oliveira (2013), o objetivo é verificar o desempenho de um aço microligado, recentemente desenvolvido no setor ferroviário, bem como estudar a influência dos processos de forjamento e fundição no comportamento mecânico e em fadiga de rodas ferroviárias. Chaves (2017) aborda a influência de diferentes microestruturas (puramente perlíticas e perlíticas-bainíticas), obtidas por meio de tratamento térmico e análise por dilatométrica, nas propriedades de um aço de alto carbono, similar ao utilizado em rodas convencionais classe C AAR, destinadas ao transporte de carga pesada.

O trabalho proposto visa analisar o desgaste de aços de mesma composição química, porém com diferentes microestruturas, através de ensaios de desgaste. Os resultados poderão clarificar a literatura atual e orientar as empresas sobre qual microestrutura apresenta o melhor comportamento para a aplicação proposta. O trabalho foi realizado nos laboratórios da Universidade Federal de Juiz de Fora e descreve, estuda e compara duas microestruturas de aços para rodas aplicadas no heavy haul para transporte de minérios (perlítica e bainítica).

Foram realizados os testes das diferentes microestruturas para roda através da utilização de um tribômetro do tipo rolo contra disco, onde o corpo ou rolo é o material da roda e o contra corpo (ou disco) é o material do trilho. Esta máquina de ensaio de desgaste foi desenvolvida na Universidade Federal de Juiz de Fora e permite avaliar o desempenho e as características da roda, comparando-as a fim de obter a mais adequada, tendo em vista fatores econômicos, sociais, durabilidade, possíveis influências em outros componentes, etc.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Processos de Fabricação, Laboratório de Metalografia e Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora.

2.1 Caracterização das Amostras

As amostras ensaiadas foram retiradas de uma roda CK36, classe C nova. A Figura 1 mostra esquematicamente o local de retirada das amostras. Percebe-se pela Fig. 1 que as mesmas foram retiradas há aproximadamente 10mm da pista de rolamento. Foi retirado um bloco com cerca de 15mm de espessura, 100mm de largura e 140mm de comprimento. Os corpos de prova foram retirados desta posição uma vez que, tipicamente esta região da roda é constituída predominantemente de perlita fina.

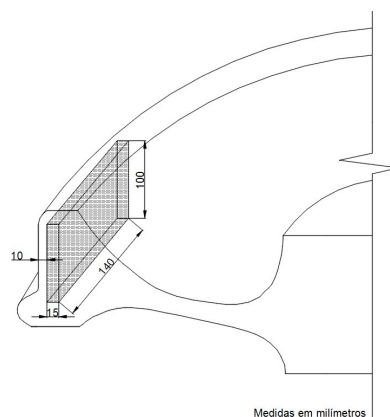


Figura 1: Desenho esquemático de uma seção de roda CK36, destacando as dimensões e o local de retirada das amostras (100 x 140 x 15) mm.

A Tabela 1 mostra a composição química das microestruturas (bainita e perlita) que foram estudadas no presente trabalho.

Tabela 1: Composição química das microestruturas via Espectrômetro de Emissão Óptica Marca ARL, modelo 3460 - ASTM E415.

Elementos	Identificação das Amostras
Carbono (%)	0,760
Manganês (%)	0,846
Silício (%)	0,906
Fósforo(%)	0,014
Enxofre(%)	0,017
Cromo (%)	0,096
Molibdênio (%)	0,032
Níquel (%)	0,022
Alumínio (%)	0,004
Cobre (%)	0,034
Boro (%)	0,000
Vanádio (%)	0,002
Cobalto (%)	0,007

Todos os cortes foram realizados em uma serra de fita com lubrificação, portanto, não ocorreu nenhum aquecimento nos corpos de prova. Em seguida, foram usinados quatro corpos de prova em formato roda, conforme a Fig. 2, para serem testados no tribômetro. Dois destes corpos serão tratados termicamente a fim de se obter a microestrutura bainítica.



Figura 2: Foto do corpo de prova.

Tendo em vista que o objetivo de comparar duas microestruturas (perlita fina e bainita) e sabendo que o tarugo retirado da roda ferroviária era constituído predominantemente de perlita fina, foi necessário realizar um tratamento térmico de austêmpera para transformar a microestrutura perlítica em bainítica. Desta forma, 2 dos 4 corpos de prova foram austemperados. Assim, ao final dos preparativos dos corpos de prova, foram obtidos 4 corpos em forma de roda, 2 com microestrutura perlítica e 2 com microestrutura bainítica.

2.2 Preparação dos Corpos de Prova para Ensaio

Para a realização da austêmpera, empregou-se como refrigerante um banho de chumbo fundido a 380°C. Os corpos de prova foram austenitizados a uma temperatura de 900°C por 15 minutos e em seguida foram submersos no banho de chumbo por 5 minutos, tempo suficiente para que ocorresse a transformação microestrutural (Silva, 1988). Em seguida, os corpos de prova foram resfriados em água à temperatura ambiente. A Figura 3 ilustra esquematicamente o ciclo de tratamento térmico.

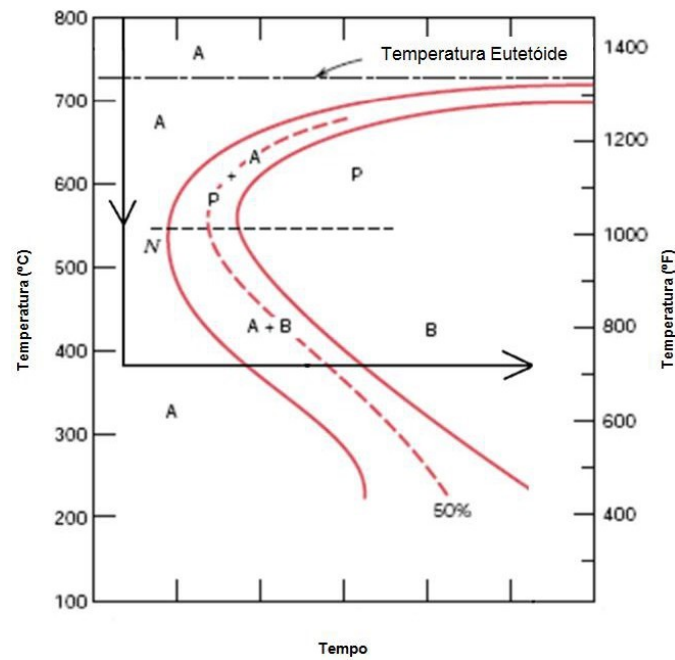


Figura 3: Desenho esquemático do ciclo de tratamento térmico. Fonte: Boyer, 1977 (Adaptado).

À medida que a temperatura de transformação é reduzida após a formação de perlita fina, um novo microconstituente é formado: bainita. Como ocorre na perlita, a microestrutura da bainita consiste nas fases ferrita e cementita, mas os arranjos são diferentes.

Após o polimento dos corpos de prova, foi realizado o ataque sobre a superfície polida com solução nital a 3%, composto de 97% de álcool etílico e 3% de ácido nítrico concentrado, por um período de cinco segundos, com intuito de revelar a microestrutura da superfície da amostra. Os corpos de prova foram então, levados para o microscópio Olympus, modelo BX51M, a fim de analisar suas respectivas microestruturas e confirmar a eficácia do tratamento térmico.

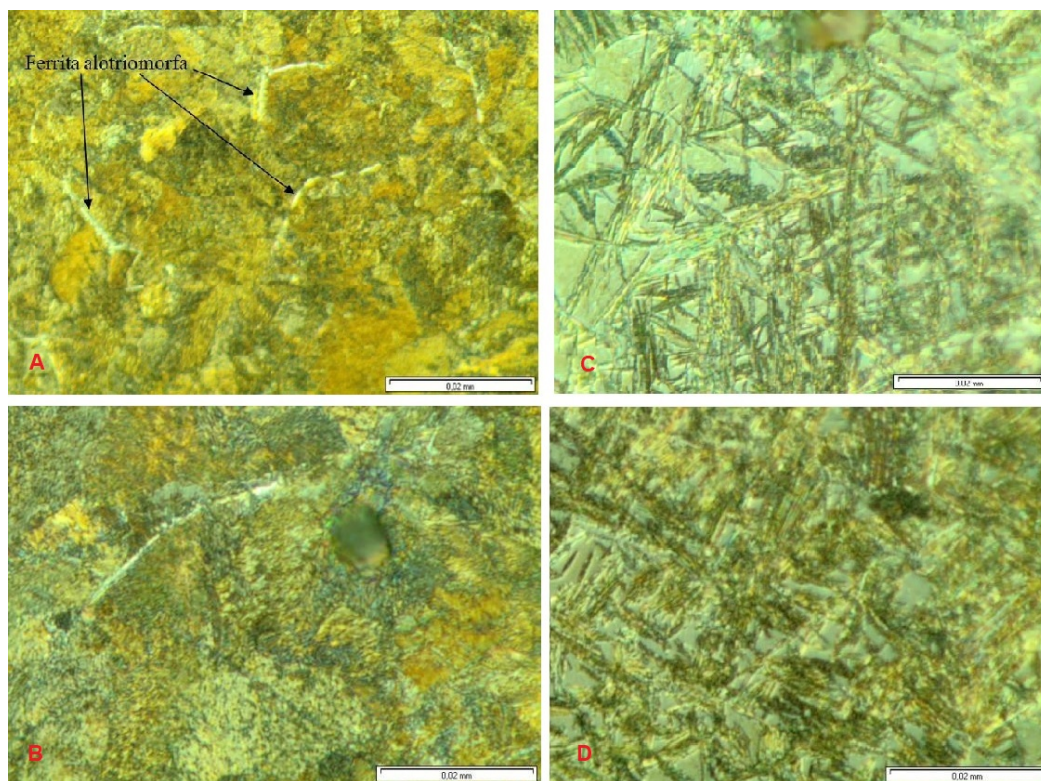


Figura 4: Microscopia dos 4 corpos de prova. As partes (A) e (B) mostram os corpos de prova perlítico. Enquanto as partes (C) e (D) mostram a microestrutura bainítica, com sua típica morfologia acicular (Totten *et al.*, 1993), evidenciando a eficácia da austêmpera.

No processo de austêmpera, a formação da microestrutura bainítica aumenta consideravelmente a dureza do aço. Tendo em vista o objetivo de comparar duas microestruturas distintas (perlita e bainita), é necessária a fixação de uma dureza comum entre as microestruturas para que seja realizado o ensaio de desgaste, pois, conforme Archard (1957) apud Hutchings and Shipway (2017), a taxa de desgaste varia de forma inversamente proporcional à dureza do material. Para isso, realizou-se o tratamento térmico de revenimento nos dois corpos de prova que foram austemperados, que se consiste em reaquecer o corpo de prova a uma temperatura muito inferior à da fase de austenitização.

Nesta etapa, objetivou-se diminuir a dureza dos corpos de prova de bainita de 45 HRC (que havia sido alcançada após a austêmpera) para 39 HRC (dureza original no corpo de prova perlítico), considerando os valores médios. Para isso, foi utilizado um forno elétrico do Laboratório de Processo de Fabricação, configurado para que a temperatura estabilizasse à 480°C. Após atingida a temperatura estabelecida, colocou-se os dois corpos de prova de bainita. Os materiais permaneceram no forno por 15 minutos e, logo em seguida, foram resfriados com água, para evitar a fragilização no revenido (Silva, 1988).

Logo em seguida ao tratamento térmico de revenimento, foi realizado o ensaio de dureza nos 2 corpos de prova de bainita; e também no testemunho de perlita e no contracorpo (correspondente ao material do trilho). Os resultados médio das medições no durômetro estão expressos na Tab. 2. Os dois tipos de microestrutura com a mesma dureza podem agora ser comparados através do ensaio de desgaste.

Tabela 2: Valores médios de dureza obtidos para o contracorpo e os corpos de prova perlítico e bainítico.

Elemento	Dureza (HRC)
Corpos de prova perlíticos	39
Corpos de prova bainíticos	39
Contracorpo (trilho)	42

2.3 Ensaio de Desgaste

O ensaio foi realizado utilizando o tribômetro fabricado na UFJF, possibilitando a simulação do desgaste de uma roda de trem no conjunto rolo contra disco. Nesse tribômetro, a aplicação da carga e fixação dos corpos de prova é realizada por meio de um braço fixado em uma travessa lateral com rosca sem fim. Essa travessa além de apoiar o braço, também permite o seu deslocamento no sentido transversal ao disco de apoio dos corpos de prova, conforme a Fig. 5. Para o carregamento, empregou-se os pesos padrões calibrados de 1, 2 e 5 kg.



Figura 5: Sistema de fixação dos corpos de prova no tribômetro.

O desgaste foi avaliado por perda de massa em função da distância percorrida ou rolada, medida em metros, sendo os corpos de prova pesados em balança com precisão de 0,0001g. As avaliações por perda de massa foram medidas a cada 1h de ensaio e foram realizadas 3 medições por carga nos 4 corpos de prova. As cargas aplicadas foram 5,5N, 11N e 25,4N que correspondiam às cargas obtidas com os pesos padrões disponíveis no Laboratório de Metalografia.

3. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de desgaste realizados são apresentados na Fig. 6, que ilustra comparativamente o comportamento da curva Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) para as duas amostras de cada microestrutura (bainita e perlita). Os valores de perda de massa na Fig. 6 são representados através de suas médias aritméticas das três leituras de perda de massa a cada hora para cada corpo de prova e carga.

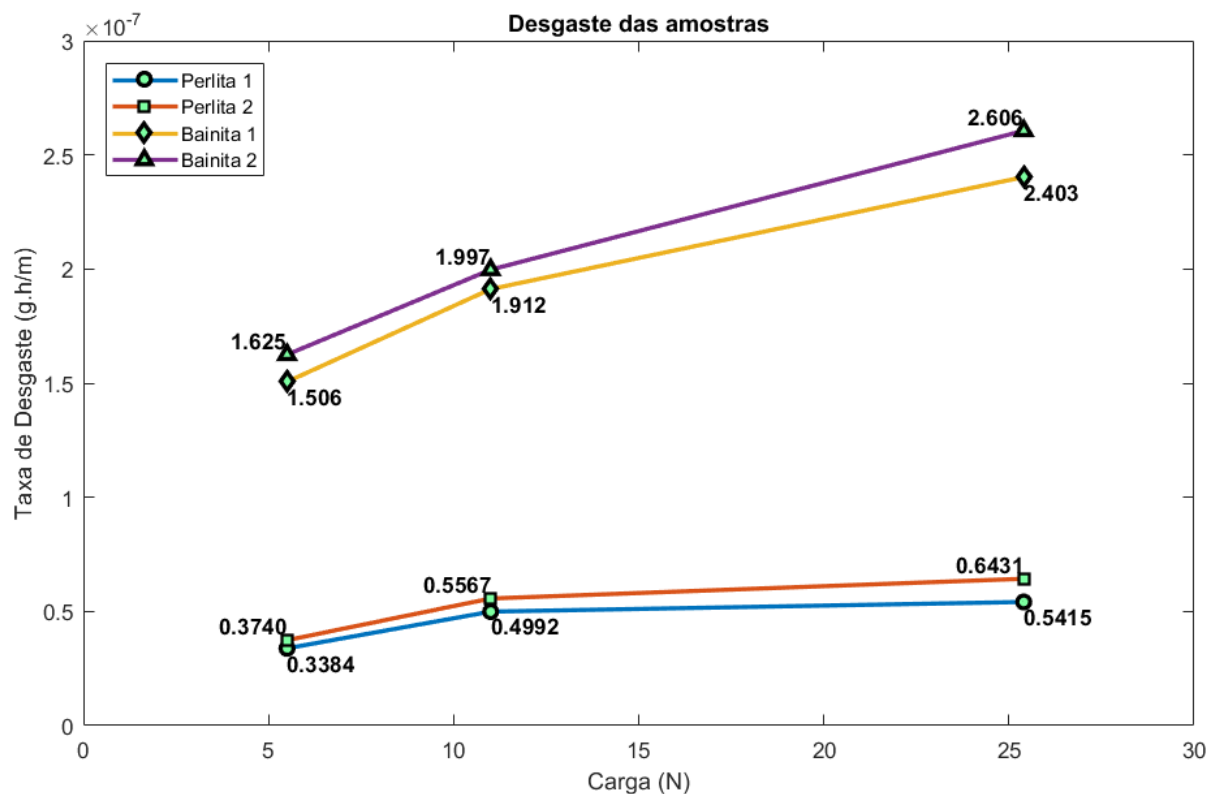


Figura 6: Gráfico Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) das amostras.

Para analisar o comportamento das curvas, considerando as mesmas formadas idealmente por duas retas, foram calculados os seus coeficientes angulares e posteriormente os seus ângulos. As curvas das amostras foram divididas em dois trechos, o primeiro trecho compreendido entre a primeira carga de 5,5N e a segunda carga de 11N; e o segundo trecho compreendido entre a segunda carga de 11N e a terceira carga de 25,4N. A Tabela 3 mostra os ângulos de cada trecho das curvas Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) das amostras.

Tabela 3: Ângulos de cada trecho das curvas Carga (N) versus Taxa de Desgaste (g.h/m) das amostras.

Microestrutura		Ângulos (°)	
		Trecho 1	Trecho 2
Perlita	1	16,30	1,68
	2	18,38	3,43
Bainita	1	36,44	18,82
	2	34,09	22,93

4. CONCLUSÃO

Percebe-se, pela análise da Fig. 6, corroborados pela Tab. 3, que os valores das taxas de desgaste das amostras 1 e 2 de bainita são, em todos os carregamentos, expressivamente maiores do que as taxas de desgaste das amostras 1 e 2 de perlita.

Além disso, a medida que aumenta a carga, aumenta a taxa de desgaste. Maiores cargas correspondem a maiores relações entre o desgaste da bainita e da perlita. Isso sugere que, com maiores carregamentos, o material bainítico apresentará uma performance muito pior que a perlita. Resultados similares foram obtidos por Rigney and Glaeser (1978) em ensaios por abrasão com bolas de moinho, onde os aços perlíticos obtiveram desempenho superior aos martensíticos e bainíticos para uma mesma dureza. Porém, nestes ensaios não foram observados uma diferença de taxa de desgaste tão expressiva, o que sugere que algum outro ruído pode ter influenciado nos valores obtidos nos ensaios realizados no tribômetro da UFJF.

Para os aços de rodas fundidas, pelos resultados observados nos ensaios, percebeu-se um comportamento de desgaste muito melhor dos corpos de prova de microestrutura perlítica para todas as cargas analisadas. Este material, portanto, oferecerá um melhor desempenho em rodas de aço em companhias logísticas operando em ferrovias, reduzindo os custos com manutenção preventiva e corretiva, tornando-as mais competitivas no mercado logístico ferroviário.

Apesar do tribômetro não ser um equipamento padronizado para ensaios de desgaste, os resultados obtidos, tal como o melhor desempenho da perlita se comparado com o da bainita para a mesma dureza, estão de acordo com a literatura. Tal como o modelo de Archard previu, a taxa de desgaste aumentou com a carga (Totten *et al.*, 1993), sendo este fato mais pronunciado na bainita.

Os ensaios foram feitos para rodas fundidas em moldes de grafite pelo processo de baixa pressão, que tem uma aplicação maior nos Estados Unidos, em vagões de carga. Futuros experimentos serão feitos também para as rodas forjadas, que encontram sua maior aplicação na Europa, em carros de passageiros, onde se utilizam menores cargas.

5. REFERÊNCIAS

- Alves, L.H.D., 2000. *Mecanismos de desgaste de rodas ferroviárias*. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, Brasil.
- Assunção, F.C.R., 1988. *Seleção de emprego de aços*. Curso Associação Brasileira de Metais.
- Barbosa, R.S., 2000. "Interação de contato do par roda/trilho". In *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica-CONEM, Natal-RN*.
- Chaves, A.P.G., 2017. *Rodas ferroviárias: análise, microestrutura e propostas de melhoria*. Master's thesis, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Hutchings, I. and Shipway, P., 2017. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Butterworth-Heinemann.
- Macêdo, F.B., 2009. "Estudo Do Desgaste de Trilhos Ferroviários". Monografia, Universidade Federal De Juiz De Fora, Juiz de Fora, Brasil.
- Oliveira, L.G., 2013. "Influência do processo de fabricação no comportamento mecânico de rodas ferroviárias". Tese, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, Brasil.
- Rigney, D.A. and Glaeser, W., 1978. "Metals handbook".
- Semprebone, P., 2005. *Desgastes em trilhos ferroviários – Um estudo teórico*. Master's thesis, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas - São Paulo, Brasil.
- Silva, A.L.V.C., 1988. "Aços e ligas especiais". *Eletrometal*.
- Sisdelli, A., 2006. "Estudo de Desgastes de Rodas e Suas Consequências No Material Rodante E Na Via Permanente". Monografia, Instituto Militar De Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil.
- Souza, P.F.C., 2016. "Avaliação Do Comportamento Em Desgaste A Seco De Aços De Roda Com Microestrutura Perlítica E Bainítica". Monografia, Universidade Federal De Juiz De Fora, Juiz de Fora, Brasil.
- Stoeterau, R.L., 2004. *Apostila de tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina*. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Totten, G.E., Bates, C.E. and Clinton, N., 1993. *Handbook of quenchants and quenching technology*. ASM international.
- Vale, A.R.M., 2011. *Apostila de Tratamento Térmico*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Belém, PA, Brasil.
- Viana, T.G. and Schimtzter, G., 2015. "Estudo de contato roda-trilho para esmerilhamento de trilhos da vli". In *21ª Semana de Tecnologia metroferroviária*.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATION OF DRY WEAR OF RAIL WHEELS WITH PEARLITIC AND BAINITIC MICROSTRUCTURES

P. F. C. Souza, paula.souza@engenharia.ufjf.br¹

H. A. Vitoi, vitoi.henrique@engenharia.ufjf.br¹

L.H. Alves, luizalves@engenharia.ufjf.br¹

¹Federal University of Juiz de Fora, , Rua José Lourenço Kelmer, S/n - Martelos, Juiz de Fora

Abstract: The wheel-rail interface is an important tribosystem, subject matter of many researches around the world, due to the loadings involved and for being one of the main costs in maintenance in a railway company, both with regard to the rolling stock and the permanent way. Taking advantage of opportunities in this scenario, this study analyzes the wear, by means of a wheel-on-disc wear test, of steels with the same chemical composition and hardness, but with different microstructures: pearlitic and bainitic. The results aim to suggest the most appropriate heat treatment for this application and to guide railway companies on which microstructure shows better behavior, considering the high loadings applied. In this way, the results aim to guide companies to reduce their costs with corrective maintenance and, consequently, increase their productivity and competitiveness in the market.

Keywords: tribology, rail wheel, austempering, pearlite, bainite