



EFEITO DO MOLIBDÊNIO NO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE RODAS FERROVIÁRIAS FORJADAS EM CONTATO DE ROLAMENTO COM ALTO DESLIZAMENTO

Rodrigo da S. Miranda^{1,2}; Felipe V. de Medeiros¹; Andrei B. Rezende³; Denilson S. Monteiro¹; Ana Cecília de Carvalho¹; Mario José B. de S. Freitas¹; Paulo R. Mei¹

¹Universidade Estadual de Campinas — Brasil

²Instituto Tecnológico Vale — Brasil

³Universidade Federal do Maranhão — Brasil

RESUMO

Atualmente, as operadoras ferroviárias brasileiras têm buscado aumentar a produtividade e eficiência por meio do aumento da vida útil dos materiais rodantes e da via permanente, com especial atenção aos aços utilizados na fabricação de rodas e trilhos. Contudo, o aumento da carga por eixo e da velocidade das locomotivas, aliado às limitações na otimização das propriedades mecânicas dos aços ferroviários convencionais em escala industrial, tem levado ao sucateamento prematuro desses materiais. Esse sucateamento está associado, principalmente, ao aumento das taxas de desgaste e à propagação de trincas por fadiga de contato de rolamento (FCR). Assim, torna-se necessário investigar abordagens metalúrgicas alternativas capazes de melhorar o desempenho em desgaste e FCR de aços ferroviários. A adição de elementos microligantes, como o molibdênio, tem se mostrado uma estratégia promissora para o aumento das propriedades mecânicas de tração, dureza e tenacidade, em aços de microestrutura perlítica. No entanto, ainda são escassos os estudos que avaliam o comportamento tribológico desses materiais sob condições severas de contato de rolamento com alta taxa de deslizamento. Portanto, este trabalho investiga o desempenho tribológico de aços de rodas ferroviárias forjadas, com e sem a adição de 0,12% em massa de molibdênio, por meio de ensaios de desgaste em tribômetro disco-contra-disco. A caracterização microestrutural e mecânica foi realizada por microscopia óptica e ensaios de dureza. Os mecanismos de desgaste foram analisados com base na perda de massa, dureza subsuperficial e microscopia estereoscópica. Além disso, as características das trincas superficiais e subsuperficiais foram avaliadas por microscopia óptica.

Palavras-chave: Roda Ferroviária Microligada, Molibdênio, Desgaste, Contato de Rolamento com Alto Deslizamento, Fadiga de Contato.

1. INTRODUÇÃO

O par tribológico roda-trilho está submetido a condições severas de carregamento, caracterizadas por elevadas pressões de contato e significativas taxas de deslizamento concentradas em áreas reduzidas da interface, em decorrência das interações combinadas de rolamento-deslizamento. Essas condições incluem situações em que as ferrovias estão inseridas em terrenos montanhosos ou irregulares, onde o traçado da via exige declives e curvas acentuadas (condições de frenagem/tração).

Adicionalmente, o aumento da carga por eixo dos vagões, da densidade de tráfego e das velocidades operacionais tem intensificado a severidade dessas solicitações, resultando em maiores taxas de desgaste, bem como na nucleação e crescimento de trincas superficiais e subsuperficiais. Nesse contexto, os principais mecanismos de dano dos materiais ferroviários são o desgaste e FCR, cuja interação competitiva desempenha papel



determinante na vida útil dos aços de roda e trilho. (MAGEL et al., 2014), (CANTINI; CERVELLO, 2016).

Para condições de contato de rolamento com alta taxa de deslizamento, são formados nas superfícies de contato danos por delaminação (AKAMA, 2025), desgaste por fadiga (DING et al., 2016), abrasão (VIANA et al., 2020), adesão (VICENTE; GUILLAMÓN, 2019), desgaste por oxidação (GERMINARI et al., 2025) e formação de camadas tribologicamente transformadas (PEREIRA et al., 2021), que afetam significativamente a integridade superficial dos aços de roda e trilho. Nesse sentido, os ensaios laboratoriais em tribômetros do tipo disco-contra-disco (twin-disc) têm sido amplamente utilizados para reproduzir essas condições e investigar o comportamento tribológico de materiais ferroviários sob diferentes percentuais de deslizamento (ROCHA et al., 2025), (SHU et al., 2022), (NUNHEZ; GAY NETO, 2021), (HU et al., 2020), (SANTA et al., 2019), (MAKINO et al., 2012). Tais estudos têm demonstrado que o aumento do percentual de deslizamento promove elevação significativa das taxas de desgaste e intensifica os danos por FCR. Em regimes de maior deslizamento, observa-se a transição de desgaste moderado para severo, frequentemente associado a mecanismos de delaminação, spalling e formação de debris oxidados (HU et al., 2020). Além disso, o aumento do deslizamento influencia diretamente o coeficiente de atrito, a deformação plástica subsuperficial e os campos de tensões residuais, afetando significativamente a vida útil dos materiais roda-trilho (ROCHA et al., 2025), (HUA et al., 2023).

Vale ressaltar, que os aços perlíticos são amplamente empregados na fabricação de rodas ferroviárias devido à sua boa combinação de resistência mecânica e custo relativamente baixo. No entanto, seu desempenho tribológico é fortemente dependente de características microestruturais, como espaçamento interlamelar da perlita (ZENG et al., 2016b), fração de ferrita proeutetóide (LIU et al., 2020a) e presença de inclusões (ZERBST et al., 2019), (FEGREDO et al., 1988).

Nesse contexto, estratégias metalúrgicas baseadas na adição de pequenas quantidades de elementos microligantes em aços ferroviários, como molibdênio, nióbio e vanádio, têm sido investigadas com o objetivo de otimizar essas características e melhorar a resistência ao desgaste e à FCR (ZENG et al., 2024), (SOLANO-ALVAREZ et al., 2019). Elementos como nióbio e molibdênio têm demonstrado potencial para refinar a microestrutura perlítica e aumentar a resistência mecânica, influenciando diretamente o comportamento tribológico dos materiais (REZENDE et al., 2023), (REZENDE et al., 2021), (WANG et al., 2020), (ZENG et al., 2016a).

Além disso, sabe-se que a adição de molibdênio em aços ferroviários perlíticos de alto carbono promove a redução do teor de ferrita proeutetóide e refinamento do espaçamento interlamelar da perlita, aumentando o limite de escoamento e a resistência à tração devido à maior resistência ao movimento de discordâncias (WANG et al., 2020), (EKBERG; SOTKOVSKY, 2001). Do ponto de vista tribológico, esses efeitos resultam em menor deformação plástica acumulada e maior resistência à nucleação e propagação de trincas (WANG et al., 2020). Entretanto, ainda há várias lacunas na literatura quanto ao desempenho de aços de roda forjada microligadas, especialmente com molibdênio, sob condições severas de contato de rolamento com altas taxas de deslizamento.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento tribológico de aços de rodas ferroviárias forjadas, com e sem a adição de 0,12% em massa de molibdênio, por meio de ensaios de desgaste em tribômetro disco-contra-disco, sob condições severas de rolamento com alta taxa de deslizamento. A análise dos materiais integra caracterização microestrutural por microscopia óptica (MO), propriedades mecânicas por meio de ensaios de dureza. O desempenho tribológico foi analisado com base na perda de massa, dureza subsuperficial e microscopia estereoscópica (ME),



visando compreender o papel do molibdênio na resistência ao desgaste. A evolução das trincas de FCR foi verificada através da formação das trincas superficiais e subsuperficiais da zona tribologicamente transformada.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Aços Utilizados

Para realização desta pesquisa, foram utilizados os aços de duas rodas ferroviárias AAR forjadas de alto teor de carbono, sendo que uma delas foi microligada com molibdênio (Roda 7Mb - Classe D) e a outra foi isenta de elementos microligantes (7C - classe C). Para realização dos ensaios de desgaste disco-contra-disco, os materiais das rodas foram testados contra um mesmo material (aço 7NbMo) que foi tratado termicamente, para obtenção de microestrutura e dureza similares a de um trilho utilizado em ferrovias de carga (heavy-haul). A análise da composição química foi realizada utilizando um espectrômetro de emissão óptica, marca Thermo Scientific, modelo ARL 3460 OES, e a quantificação dos elementos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química dos aços utilizados (% massa).

Aço	C	Si	Mn	P	S	Mo	Nb	V
Roda 7C	0,68	0,34	0,83	0,013	0,01	0,015	<0.008	0,0007
Roda 7Mo	0,63	0,31	0,82	0,009	0,002	0,12	0,014	0,009
Trilho (7NbMo)	0,71	0,43	0,84	0,017	0,008	0,223	-	-

A rota de tratamento térmico dos discos que farão o papel de trilho no tribômetro consistiu em austenitização em 900 °C por 20 minutos em forno mufla, seguido de banho isotérmico em forno com estanho líquido a 550 °C durante 40 minutos. Após o tratamento no forno de banho isotérmico, os discos foram retirados e resfriados em temperatura ambiente, até atingir o equilíbrio térmico.

2.2. Análise Metalográfica e Dureza

Para a realização da análise microestrutural dos materiais das diferentes rodas (7C e 7Mo) e do aço tratado termicamente para a função de trilho (contracorpo), foram empregadas técnicas convencionais de preparação metalográfica dos materiais ferrosos. Todos os procedimentos foram executados em amostras extraídas dos próprios corpos de prova utilizados nos ensaios de desgaste disco-contra-disco.

O procedimento consistiu: I) embutimento dos materiais com resina baquelite de fibra de vidro/mineral para retenção de borda (Levofast Struers); II) realização de lixamento das amostras em lixas abrasivas de SiC de granulometria variada (#80 até #1200); III) polimento em suspensão de diamante nas granulometrias de 6, 3 e 1 µm até a obtenção do acabamento especular do metal; IV) ataque químico com uma solução de Nital 2% para exposição da microestrutura. Após a finalização do preparo das amostras, foi realizada a aquisição de imagens em MO (Leica DMi8 M/C/A) em diferentes magnificações, para revelação da microestrutura dos aços.

A dureza das amostras foi medida com um microdurômetro (HMV 2T Shimadzu). A determinação da dureza foi realizada aplicando uma força de 19,62 N por 15 s (HV2), em dez pontos aleatórios.

2.3. Ensaios de Desgaste Disco-Contra-Disco

Para comparação do desempenho dos aços das rodas em condições tribológicas semelhantes à de trechos curvos de ferrovias usadas para o transporte de carga (30 – 40 tons/eixo (MINICUCCI et al., 2019)), foram realizados ensaios de desgaste disco-contra-disco (WANG et al., 2023), (SEO et al., 2016), (ZENG et al., 2024). Os discos das rodas foram extraídos próximos da pista de passeio, numa profundidade de cerca de 10 mm abaixo da superfície de rolamento (Figura 1a). Os corpos de prova das rodas possuíam o formato de discos com o diâmetro $\phi = 39$ mm e espessura $L = 8$ mm (Figura 1b). Ambos os materiais foram testados com discos contracorpos que atuaram como trilho no tribômetro ($\phi = 39$ mm, $L = 5$ mm). Informações adicionais sobre o funcionamento do tribômetro podem ser encontradas em (REZENDE et al., 2020b).

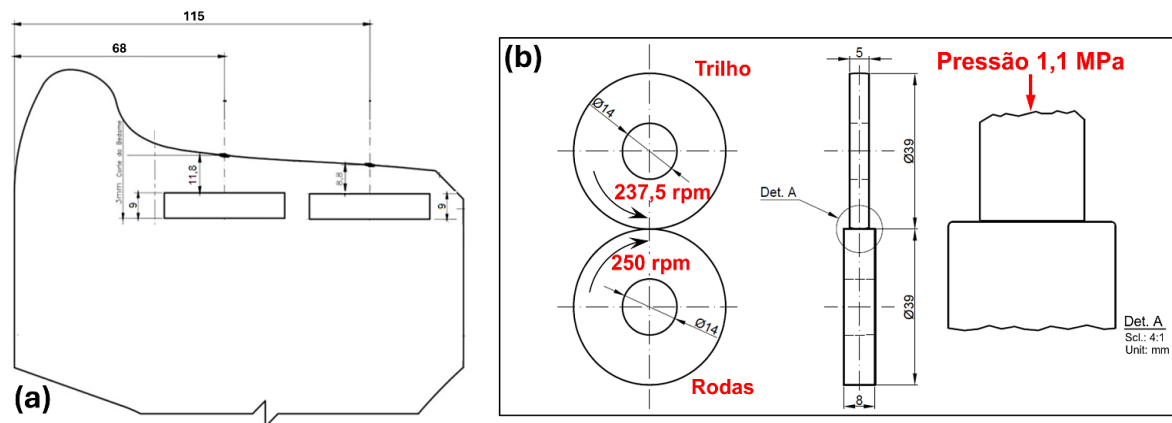


Figura 1. Ilustração do arranjo experimental para execução do ensaio disco-contra-disco: (a) Desenho esquemático da região de retirada dos corpos de prova das diferentes rodas; (b) Dimensões dos discos e configuração do teste de desgaste. Dimensões em mm.

Para realização dos testes foi adotada a pressão de contato hertziana de 1.100 MPa (REZENDE et al., 2021), (AAR, 2016), (HUA et al., 2023), que foi estabelecida no contato mediante a aplicação constante da carga normal de 1.324 N e a geometria de contato conforme (HERTZ, 1881) (Figura 1b). Para simular os altos valores de atrito que ocorrem nos trechos curvos de uma ferrovia, ou seja, especificamente as interações entre o friso de roda contra o canto de boleto do trilho, foi selecionada uma taxa de deslizamento de -5%. O valor do deslizamento foi obtido levando em conta as dimensões dos discos e a diferença de suas velocidades de rotação, utilizando a Equação 1 (TYFOUR et al., 1995):

$$\text{Deslizamento (\%)} = \frac{2(R_{\text{Trilho}}N_{\text{Trilho}} - R_{\text{Roda}}N_{\text{Roda}})}{R_{\text{Trilho}}N_{\text{Trilho}} + R_{\text{Roda}}N_{\text{Roda}}} \times 100\% \quad (1)$$

onde R_{Roda} e R_{Trilho} são os raios de curvatura (mm) dos discos da roda e trilho, e N_{Roda} e N_{Trilho} são suas respectivas velocidades de rotação (rpm).

Dependendo das condições geográficas do terreno em que uma ferrovia está inserida, os trens podem atingir uma velocidade de cerca 71 km/h. No entanto, as locomotivas reduzem a velocidade ao entrarem em curvas, com o intuito de garantir a segurança operacional e evitar descarrilamento. Em ferrovias de carga pesada, como no caso de transporte de minério pela VALE, a velocidade média em curvas varia entre 15–45 km/h dependendo do raio e das condições da via, sendo menor em curvas mais fechadas. Assim, para um trem que circunscreve uma curva na velocidade de deslocamento de 39 km/h, com uma roda ferroviária AAR Classe D (33”), desenvolve uma velocidade de rotação de 250 rpm. Portanto, com o objetivo de manter a equivalência na velocidade de rotação para os testes laboratoriais e a ferrovia, foi adotada a velocidade de 250 rpm para os discos das rodas testadas.

Os experimentos tiveram uma duração 50.000 ciclos de rolamento-deslizamento. Os ensaios foram interrompidos em 2.000, 6.000 e 10.000 ciclos e, posteriormente, a cada 10.000 ciclos, a fim de determinar a perda de massa ao longo do experimento. Todos os testes foram executados em condições de contato seco, temperatura ambiente (25 – 30 °C) e umidade relativa entre 45-55%. A superfície de contato de todos os discos foi lixada com lixas de SiC, para obtenção da rugosidade $R_a \leq 0,1 \mu\text{m}$. Três testes foram conduzidos para cada tipo de roda para obtenção a média e desvio padrão.

2.4. Caracterização Tribológica

Após os ensaios de desgaste, os discos foram removidos do tribômetro, para medições e análises de massa e estereoscopia. As medidas de perda de massa foram realizadas utilizando uma balança analítica com precisão de 0,1 mg (Shimadzu AUY 220). Para identificação dos mecanismos de desgaste atuantes na superfície de contato dos discos (Figura 2a) foi utilizado o microscópio estereoscópico (ME) Olympus SZ40 com câmera de aquisição de imagens SZ-CTV.

Para avaliação da formação de defeitos subsuperficiais provocados pelas cargas de contato e desgaste e determinação do perfil de dureza subsuperficial (gradiente de dureza), foi realizada a preparação metalográfica das seções radiais e circunferenciais dos discos desgastados (Figura 2c,d). A preparação das amostras desgastadas foi realizada utilizando métodos convencionais. O procedimento consistiu de embutimento em baquelite, para proteção da superfície, e lixamento com lixas de SiC (#80 a #1200). Posteriormente, as amostras foram polidas em suspensão de diamante (6, 3 e 1 μm) e fotografadas antes e após o ataque com Nital 2%.

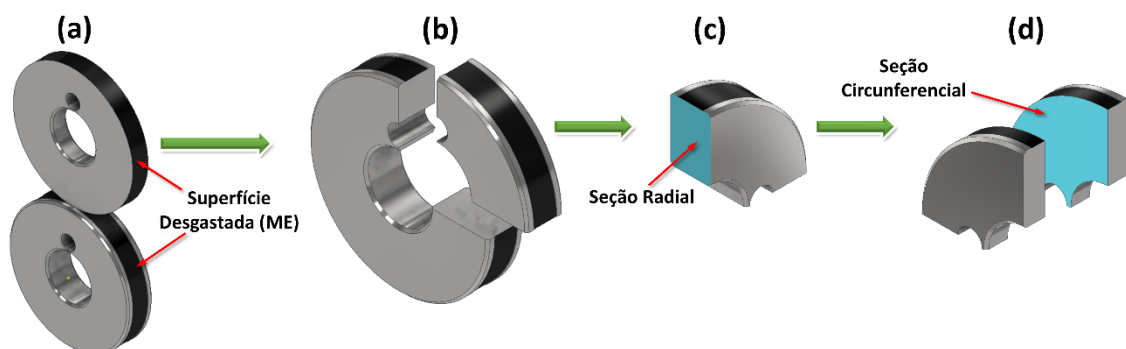


Figura 2. Superfícies do disco avaliadas após ensaio de desgaste: (a) características topográficas das superfícies de contato através de ME; (b) corte para metalografia; (c) seção radial: gradiente de dureza da camada susuperficial e MO; (d) seção circunferencial para MO.

Os defeitos superficiais e subsuperficiais presentes nos planos radiais e circunferenciais dos discos (Figura 2c,d), foram fotografados utilizando o microscópio óptico Olympus 41GX com câmera de aquisição de imagens U-TV0.5XC-3. Foram utilizadas amostras de seção radial (Figura 2c) para determinação do perfil de dureza subsuperficial, com a realização de cinco medidas para cada profundidade da amostra, até a dureza atingir o valor da matriz livre de deformações. As medidas foram realizadas com o durômetro Future Tech FV800, pela aplicação da carga de 0,3 kgf durante 15 s. A determinação da profundidade da camada deformada foi realizada através de medições em imagens de MO da seção circunferencial (Figura 2d) dos discos. Para quantificação de todas as medidas geométricas deste trabalho foi usado o software de análise de imagens ImageJ (SCHNEIDER et al., 2012).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise Microestrutural e Dureza

As micrografias obtidas por MO dos aços das rodas forjadas 7C, 7Mo e trilho são apresentadas na Figura 3. Vale ressaltar, que no caso das rodas as imagens foram obtidas dos discos que foram fabricados de suas superfícies de contato (material como recebido). Por outro lado, as micrografias do trilho são referentes ao aço 7NbMo que foi tratado termicamente.

Ao verificar as imagens da Figura 3, foi possível observar que todos os materiais exibiram uma microestrutura predominantemente perlítica. Observando minuciosamente as micrografias de maior ampliação, foi possível constatar qualitativamente que os afloramentos (tamanho de nódulos/colônias) da perlita da Roda 7C (Figura 3b) foram maiores que o da Roda 7Mo (Figura 3d). Contudo, foram as micrografias do material do trilho que exibiram os menores afloramentos de perlita (Figura 3f).

É importante esclarecer que Fonseca et al. (2015) e Rezende et al. (2020a) já conduziram pesquisas focadas na caracterização metalúrgica desses mesmos materiais. De acordo com esses autores, o tamanho médio do diâmetro do antigo grão austenítico, determinado pelo método de têmpera parcial (SILVA; MEI, 2021), é de $12 \pm 1 \mu\text{m}$ para a Roda 7C, $10 \pm 0,7 \mu\text{m}$ para a Roda 7Mo e $8 \pm 1 \mu\text{m}$ para o trilho (7NbMo). Com isso, os achados dos estudos prévios desses autores dão respaldo as características morfológicas apontadas na Figura 3.

Do ponto de vista da composição química (Tabela 1), a Roda 7C foi fabricada sem adição de elementos microligantes, enquanto a Roda 7Mo obteve a adição de 0,12Mo. Do mesmo modo, o trilho (7NbMo) obteve a adição de 0,223Nb+Mo. Nesse sentido, a adição de elementos microligantes nos aços provoca o refino do grão austenítico, devido a ocorrência do fenômeno da precipitação de carbonetos, durante a conformação termomecânica do material (forjamento) (ZHAO; JIANG, 2018). Com isso, a precipitação da rede de carbonetos formados com esses elementos restringe o crescimento dos grãos e, conseqüentemente, reduzem o tamanho do nódulo/colônia perlítica, assim como, o espaçamento interlamelar da perlita (REZENDE et al., 2020a), (LIU et al., 2020b), (TAMARA et al., 2020).

Portanto, se levada em conta a adição total de Nb+Mo nos aços ferroviários do presente estudo, a hierarquia crescente do teor de microligantes adicionados nos aços é: Roda 7C < Roda 7Mb < Trilho. Com isso, fica explicitado o motivo da Roda 7Mo ter apresentado uma microestrutura mais refinada que a do aço 7C. Adicionalmente, o motivo

da microestrutura do trilho ter sido a mais refinada dentre todos os materiais pode estar atrelado ao tratamento térmico na qual foi submetido e ao seu maior teor de Nb + Mo.

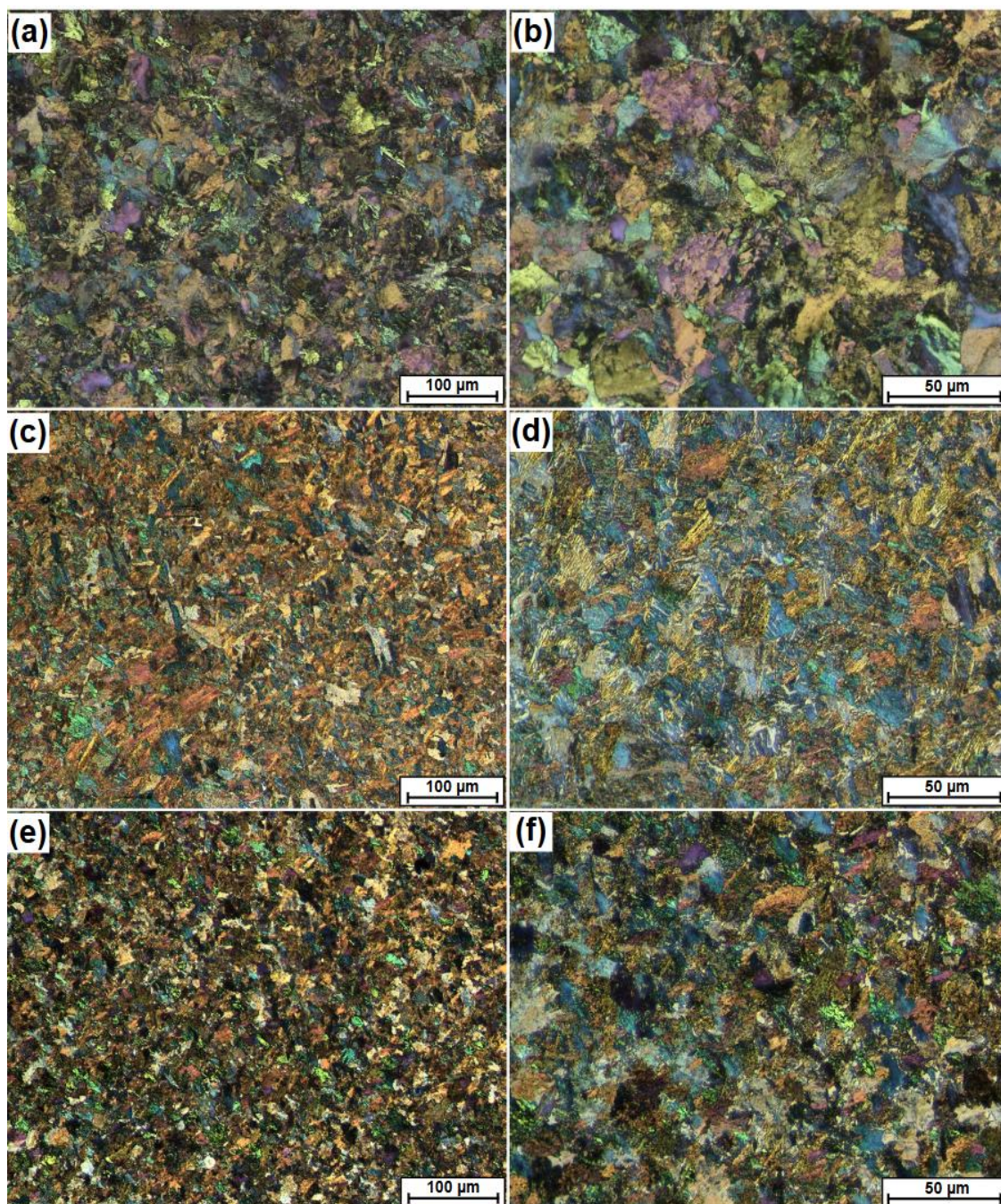


Figura 3. Micrografias de MO dos discos fabricados dos aços ferroviários nas magnificações de 200X e 500X: (a) e (b) Roda 7C; (c) e (d) Roda 7Mo; (e) e (f) Trilho. Ataque Nital 2%.

Além disso, para a posição onde os discos de desgaste foram fabricados das rodas, tanto a Roda 7C ($369 \pm 11 \text{ HV}_{0,3}$), como a Roda 7Mo ($363 \pm 13 \text{ HV}_{0,3}$) apresentaram valores de dureza estatisticamente iguais. Apesar da Roda 7Mo ser microligada, a adição de 0,12Mo não foi significativa para provocar uma elevação na dureza do material, em relação a Roda 7C, para a posição de retirada dos discos de desgaste. Entretanto, Fonseca et al. (2015) verificaram que essa adição de microligantes foi suficiente para que o aço

7Mo apresentasse uma dureza superficial (pista de passeio da roda) superior ao aço 7C, também esperado devido a sua maior temperabilidade. Adicionalmente, os autores constataram que as propriedades mecânicas de tensão de escoamento, tenacidade à fratura K_{IC} e impacto Charpy da roda 7Mo foram maiores que o da Roda 7C, devidos aos mecanismos de aumento de resistência por refino de grão, precipitação e solução sólida.

Por sua vez, o trilho apresentou uma dureza de $407 \pm 13 \text{ HV}_{0,3}$, valor mais alto do que a dureza das rodas. Este resultado pode ser explicado pela maior presença de microligantes no material (0,223Nb+Mo) e pelo tratamento térmico isotérmico para obtenção da perlita. Com isso, após os tratamentos térmicos, os discos de trilho apresentaram microestrutura e dureza de trilhos convencionais usados em ferrovias de carga pesada, sendo similares aos trilhos comerciais DHH400S da Nippon, PG4 da Pangang e HHC da Voestalpine. Com isso, os pares de discos roda-trilho apresentaram uma razão de dureza de $H_{\text{Trilho/roda}}=1,12$.

3.1. Desempenho Tribológico

A Figura 4 mostra o desenvolvimento da perda de massa dos materiais das rodas 7C e 7Mo contra o trilho nos ensaios de desgaste disco-contra-disco, ao longo dos 50.000 ciclos de rolamento-deslizamento, juntamente com a variação do coeficiente de atrito dos pares tribológicos. Ao analisar os resultados das rodas, a Figura 4a demonstra que a Roda 7Mo apresentou maior perda de massa acumulada em comparação à roda 7C, ao longo dos 50.000 ciclos. Desse modo, a perda de massa acumulada após os 50.000 ciclos de rolamento-deslizamento da Roda 7C foi 30% menor que a da Roda 7Mo.

No outro lado do contato (Figura 4b), observa-se que o Trilho vs Roda 7C apresentou maior perda de massa acumulada quando comparado com o Trilho vs Roda 7Mo. Este resultado revela que o menor desgaste da Roda 7C não proporcionou também a menor contribuição de partículas abrasivas na interface (debris), para minimizar o desgaste do trilho. Assim, a perda de massa acumulada total do Trilho vs Roda 7C foi 43% maior que a do Trilho vs Roda 7Mo.

Vale ressaltar, que ao estabelecer uma comparação dos resultados da perda de massa dos trilhos com as rodas, nota-se que o desgaste das rodas (disco de acionamento: 250 rpm) foi maior que o de seus respectivos trilhos (disco acionado: 237,5 rpm). Tal comportamento pode estar relacionado com: I) a maior dureza do material do trilho em relação ao das diferentes rodas; II) estado de tensão subsuperficial do trilho favorecer o fechamento das trincas de FCR (NUNHEZ; GAY NETO, 2021).

Já na Figura 4c, a perda de massa acumulada do par (roda + trilho) é praticamente equivalente para ambos os casos (7C vs Trilho e 7Mo vs Trilho), indicando que, embora a roda 7Mo não tenha se beneficiado pelo menor desgaste individualmente, os sistemas roda-trilho dissipam a energia tribológica do contato de formas similares ao longo dos 50.000 ciclos. Esse comportamento pode ser associado à redistribuição de esforços (campo de tensão subsuperficial) e ao ajuste do contato durante os testes de desgaste.

De um modo geral, a Figura 4d mostra que o coeficiente de atrito (COF) para os pares (Roda 7Mo vs Trilho) e (Roda 7C vs Trilho) foram estatisticamente iguais durante todo o experimento. Além disso, o COF apresentou uma leve tendência de redução com o aumento do número de ciclos. Nos primeiros 2.000 ciclos, o valor médio do COT dos pares de discos foi de 0,75 e, após 50.000 ciclos, o valor reduziu para 0,64. Esses valores de COF indicam que os experimentos foram eficazes na simulação do atrito que é estabelecido na ferrovia (Figura 5), pois o atrito de contato seco entre o friso da roda e o canto de bitola do trilho varia em torno de 0,5 – 0,8 (STOCK et al., 2016).

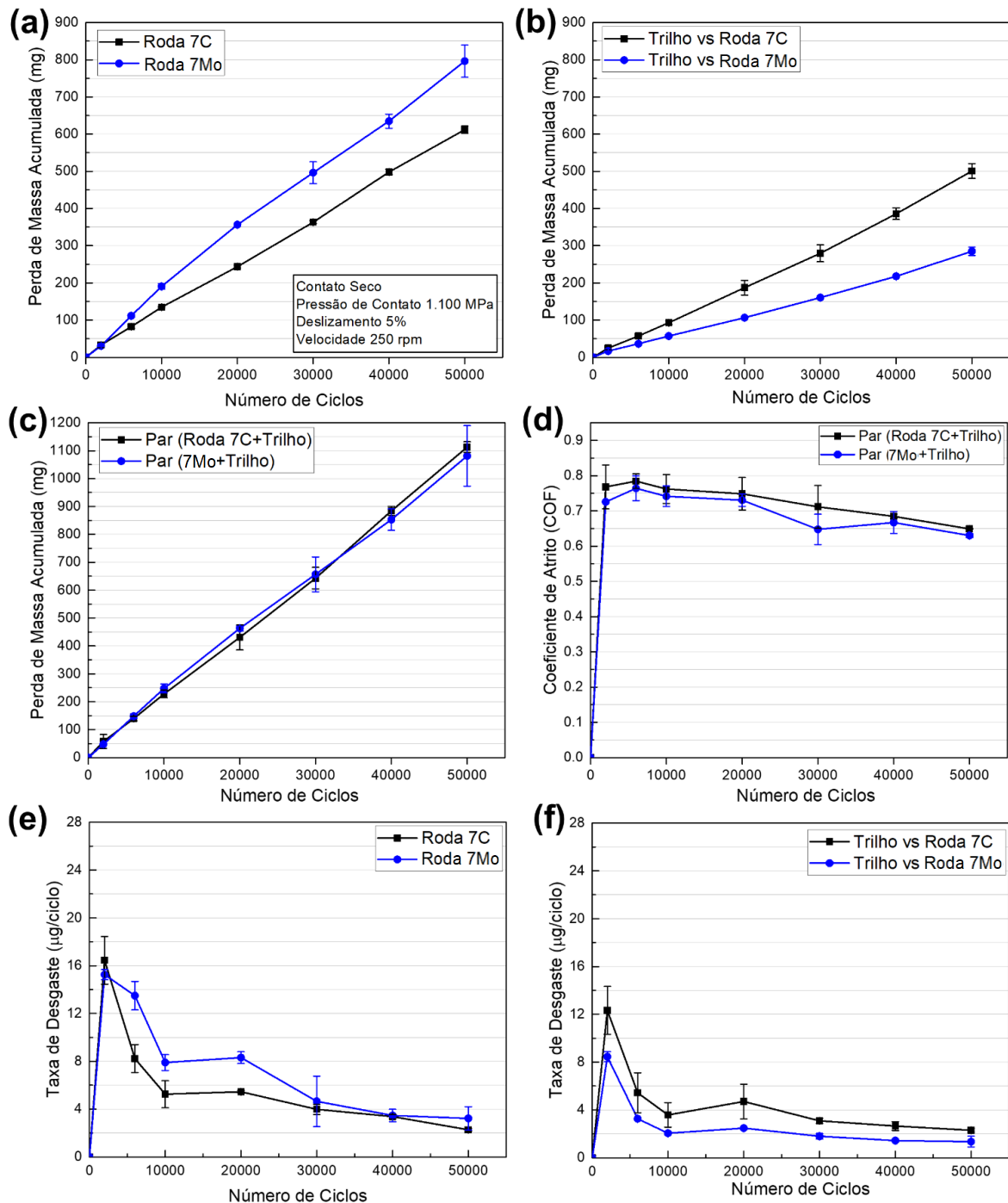


Figura 4. Resultados dos ensaios de desgaste dos aços ferroviários: (a) Perda de massa acumulada das rodas; (b) perda de massa acumulada do trilho; (c) perda de massa acumulada do par roda-trilho; (d) coeficiente de atrito (COF); (e) taxa de desgaste das rodas e (f) taxa de desgaste do trilho ao longo do número de ciclos.

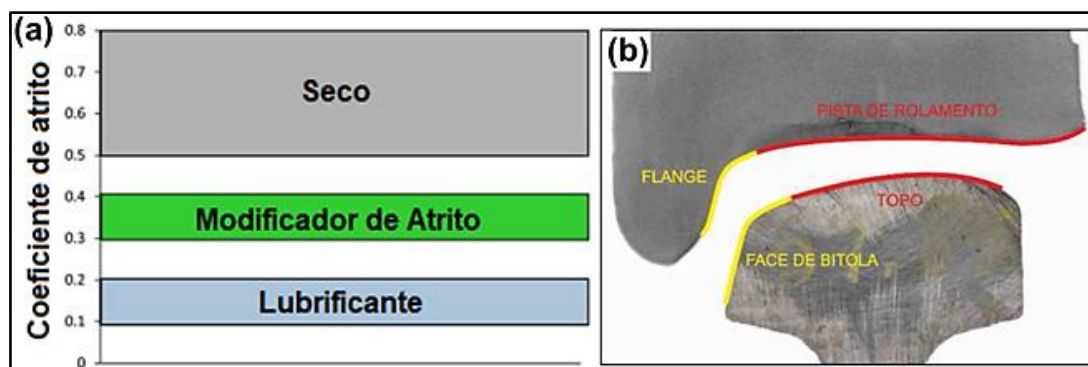


Figura 5. Coeficientes de atrito típicos do contato roda-trilho, para condições secas, com modificador de atrito e com lubrificantes (Adaptado de Stock et al. (2016)).

A Figura 4e,f exibe a taxa de desgaste ($\mu\text{g}/\text{ciclo}$) das rodas e do trilho ao longo dos ciclos. Observa-se uma taxa de desgaste elevada nos primeiros 10.000 ciclos, seguida de queda significativa, caracterizando a fase inicial de acomodação das superfícies (running-in), que é substituída por taxas de desgaste menores nos ciclos subsequentes. É possível que a altas taxa de desgaste no início dos experimentos esteja associada a: I) forte atuação do mecanismo de desgaste por adesão, já que os discos foram ensaiados com uma rugosidade inicial baixa ($R_a < 0,1$); II) acomodação das superfícies de contato dos pares de discos devido a deformação/encruamento superficial dos materiais provocados pelas cargas normais e cisalhantes aplicadas pelo tribômetro disco-contra-disco. Nos primeiros 20.000 ciclos, a Roda 7Mo apresentou taxas de desgaste superiores a Roda 7C (Figura 4e). Porém, com o prosseguimento dos experimentos, as taxas de desgaste de ambas as rodas se igualaram e, ao final dos 50.000 ciclos, foram estatisticamente iguais. Portanto, esses resultados revelam que, apesar da Roda 7Mo desenvolver uma perda de massa superior à da Roda 7C nos primeiros 20.000 ciclos, após 30.000 ciclos as taxas de desgaste dos materiais das rodas se tornaram similares.

Portanto, apesar da Roda 7Mo apresentar um desempenho inferior em desgaste em relação à Roda 7C no início do experimento, esse efeito é transitório e, ao longo dos testes, ambos os materiais convergem para uma mesma resistência ao desgaste. Vale ressaltar que, se esses resultados fossem extrapolados para uma roda ferroviária real, os 20.000 ciclos de rotação corresponderiam a apenas 57 km de distância. Com isso, do ponto de vista tribológico, a adição de molibdênio não contribuiu para uma maior resistência ao desgaste do material da roda. Isso significa que o refino de grão e possível precipitação de carbonetos no material da Roda 7Mo promovido pelo Mo não foi eficiente para promover o retardo dos micromecanismos típicos de desgaste (adesão, abrasão, FCR e oxidação) no disco.

Do outro lado do contato (Figura 4f), as taxas de desgaste do Trilho vs Roda 7C foram sempre superiores ao do Trilho vs Roda 7Mo. Ao final dos 50.000 ciclos, a taxa de desgaste do Trilho vs Roda 7Mo foi 71% menor que a do Trilho vs Roda 7C. Segundo Germinari et al, para determinar com precisão qual tipo de aço ferroviário pode oferecer a melhor relação custo-benefício, numa aplicação do contato roda-trilho, é necessária a realização de ensaios laboratoriais de desgaste (disco-contra-disco) e de campo, assim como, a execução de testes de tenacidade à fratura e de fadiga clássica, a fim de avaliar seu impacto nas práticas de manutenção. Portanto, isso significa que apesar da adição de molibdênio na Roda 7Mo não ter promovido o aumento da resistência ao desgaste do material, o microligante foram capazes de otimizar as propriedades mecânicas da roda e reduzir em 71% o desgaste do seu trilho.

3.2. Mecanismos de Desgaste e Encruamento Subsuperficial

A Figura 6 apresenta imagens de estereoscopia da superfície de contato desgastada dos discos das Rodas 7C e 7Mo e seus respectivos trilhos, após os ensaios de desgaste disco-contra-disco. Vale esclarecer, que em ambas as rodas, observou-se a ocorrência predominante de delaminação, abrasão e oxidação (Figura 6 a,c). Além disso, foram identificadas trincas de delaminação e marcas de abrasão paralelas à direção de deslizamento, indicando a atuação de abrasão pela interação do contato de rolamento-deslizamento entre as asperezas das superfícies encruadas. Além disso, as pequenas marcas de indentação impressas nas superfícies de rolamento dos discos das rodas indicam a ação das partículas de 3º corpo que são destacadas dos materiais devido ao desgaste (debris) e são comprimidas e cisalhadas no contato. Vale esclarecer, que a presença de áreas de oxidação localizadas ao longo das superfícies sugere a formação de óxidos durante os ciclos de contato, que possivelmente também atuaram como partículas abrasivas, contribuindo para o desgaste superficial.

A observação de formações de fluxo plástico (escoamento de material) mais acentuados nas regiões da borda do contato da Roda 7C em relação a Roda 7Mo, indicam que apesar do material da Roda 7C ter apresentado uma perda de massa inferior ao da Roda 7Mo, no início do experimento, porções significativas de material foram arrastados para borda do contato (perda de geometria). Tanto a perda de geometria do material pelo desprendimento de partículas (desgaste) quanto a deformação plástica são maneiras que promovem a falha mecânica dos componentes de engenharia.

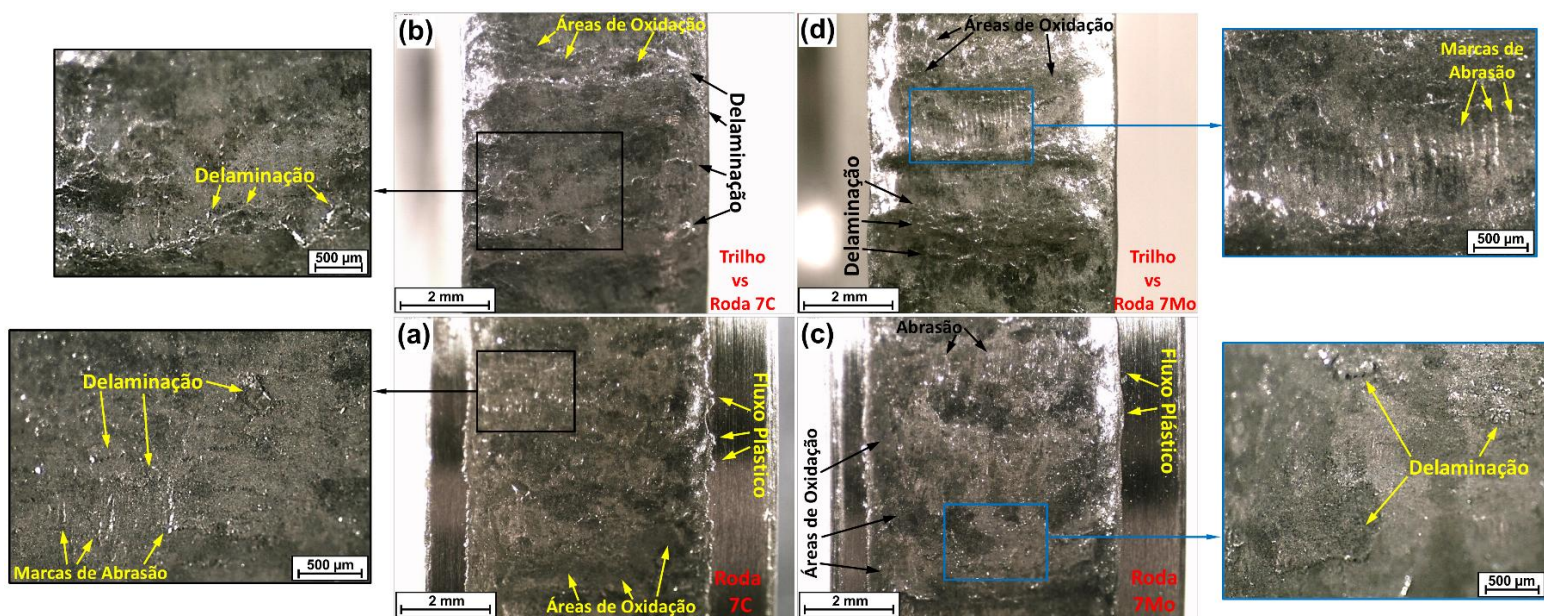


Figura 6. Imagens de estereoscopia das superfícies desgastadas das rodas ferroviárias 7C e 7Mo, bem como de seus trilhos, após ensaios no tribômetro disco-contra-disco evidenciando os mecanismos de desgaste atuantes durante os testes: (a) e (b) Roda 7C e trilho, respectivamente; (c) e (d) Roda 7Mo e trilho, respectivamente.

Na **Figura 7** apresenta os resultados dos perfiz de dureza subsuperficial dos discos, desde a borda do contato até a profundidade do material livre de deformações. Analisando a distribuição de dureza é possível verificar um endurecimento superficial expressivo em todas as amostras, com um gradiente de dureza decrescente com a profundidade. Os discos de trilho apresentaram os maiores valores médios de dureza na borda do contato (próx. de 650 HV_{0,3}), em relação aos discos das rodas (próx. de 512



HV_{0,3}). Tal fenômeno está relacionado com o maior valor de dureza inicial dos trilhos em relação ao das rodas, antes dos ensaios de desgaste. Além disso, os resultados de dureza dos trilhos indicam que mesmo sendo mais duros inicialmente, também apresentam aumento expressivo de dureza superficial devido ao acúmulo de deformações plásticas severas durante os ensaios, reforçando a importância da avaliação do endurecimento no contato roda-trilho em trechos curvos sob alta severidade de carga/deslizamento e sua suscetibilidade a nucleação de trincas.

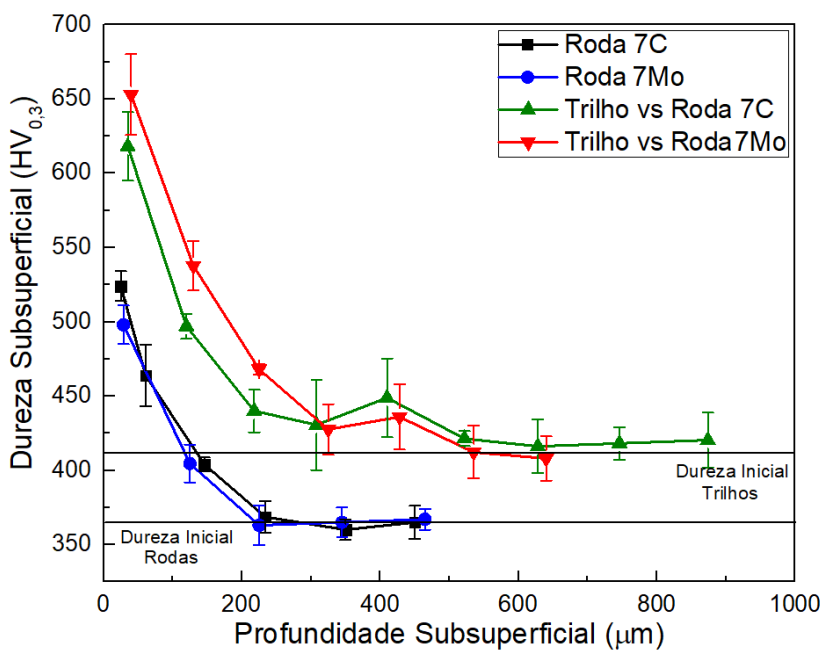


Figura 7. Distribuição de dureza na seção circunferencial dos pares de discos (Roda 7Mo vs Trilho) e (Roda 7C vs Trilho).

3.3. Formação de Trincas de FCR

A morfologia das trincas superficiais dos discos das rodas e trilhos nos seus planos circunferenciais e radiais são apresentadas nas Figuras 8 e 9. É possível notar pelas figuras que as micrografias evidenciam de forma clara os mecanismos de formação e propagação de trincas associados ao contato severo de rolamento com alta taxa de deslizamento, promovida pelos ensaios twin-disc.

É importante esclarecer que para o conjunto de variáveis tribológicas em que os aços ferroviários foram ensaiados, os micromecanismos de desgaste atuantes foram fadiga de contato, delaminação, abrasão e oxidação. De acordo com Magel et al. (2014), a taxa mágica de desgaste é a taxa de desgaste na qual quaisquer trincas de fadiga de contato, em estágios iniciais de desenvolvimento, são removidas pelo desgaste natural. Nesse sentido, quando há pouco ou nenhum desgaste, o aço ferroviário geralmente falha devido à fadiga, mas quando há desgaste excessivo, a vida útil é diminuída drasticamente.

Nos planos circunferenciais, a Roda 7C (Figura 8a) apresentou uma quantidade bastante reduzida de trincas de fadiga iniciadas na superfície e associadas ao mecanismo de peeling. Tais trincas crescem e resultam na remoção de pequenas placas de delaminação superficial, devido alto valor de atrito e desgaste gerado pelas interações do contato metal-metal. Por outro lado, não foi possível observar na Roda 7Mo (Figura 8b) o crescimento significativo de trincas de fadiga. Contudo, foram verificadas partículas sendo destacadas da superfície de contato, que deixavam defeitos e múltiplas nucleações

de trincas próximas à superfície, também associadas ao peeling. Portanto, no caso das rodas, as tensões normais e cisalhantes estabelecida no contato entre os discos fizeram com que os mecanismos de desgaste prevalecessem, indicando o sucesso dos ensaios laboratoriais disco-contra-disco, na simulação das condições de desgaste que ocorrem em ferrovias com curvas de raio apertado.

Nos planos radiais (Figura 8c,d), verifica-se delaminação de trincas em ambas as rodas, sendo a espessura máxima da camada delaminada de 21 μm na Roda 7C e 15 μm na Roda 7Mo. A menor espessura da camada delaminada na roda 7Mo está correlacionada com a maior tenacidade e resistência à tração do material (FONSECA et al., 2015), que dificulta o crescimento das trincas de delaminação.

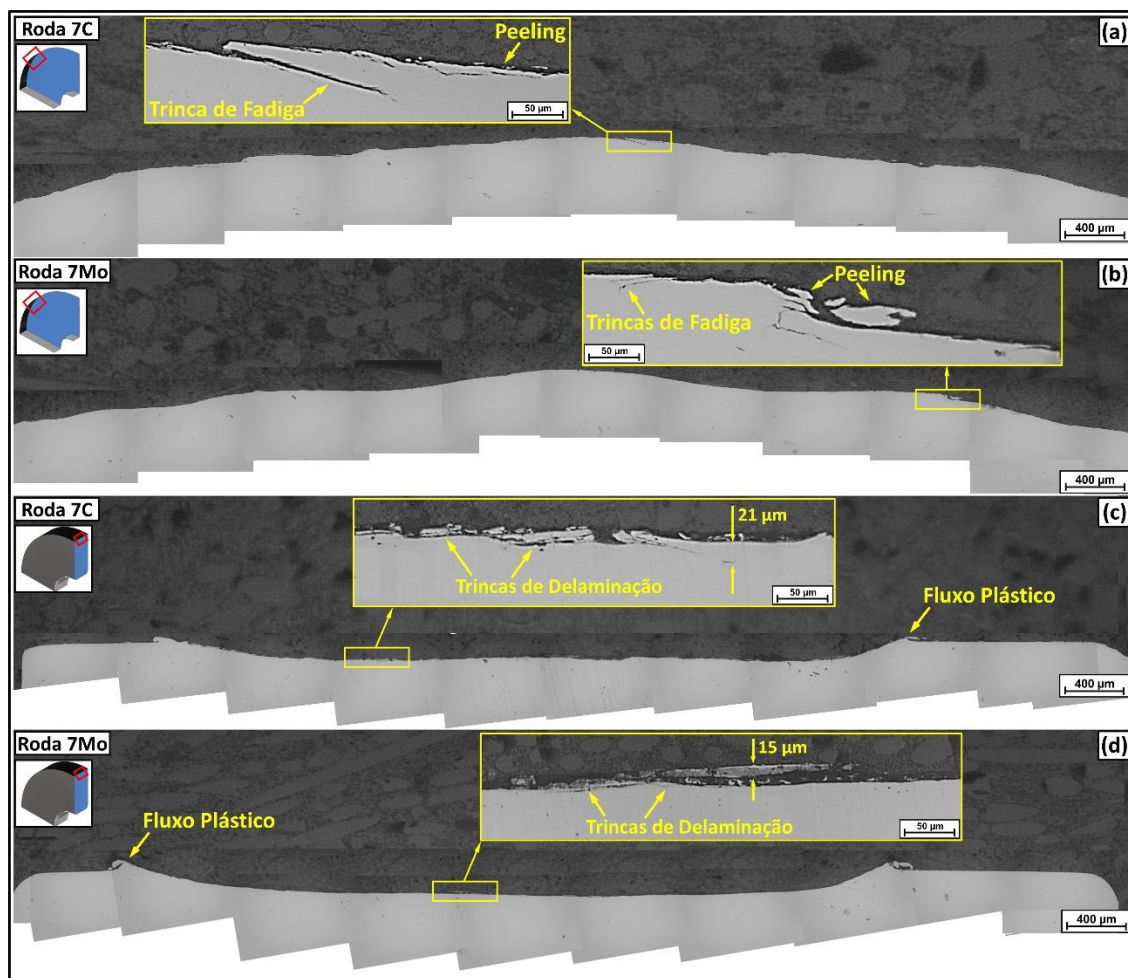


Figura 8: Micrografias de MO das trincas dos discos das Rodas 7C e 7Mo: a) e b) seção circunferencial; c) e d) seção radial.

Para os trilhos, nos planos circunferenciais (Figura 9a,b), também se observou a presença de trincas de fadiga e peeling. Já nos planos radiais (Figura 9c,d), ambos os casos apresentaram delaminação de trincas, com espessuras de camada delaminada de 23 μm (Trilho vs Roda 7C) e 39 μm (Trilho vs Roda 7Mo). Enquanto o campo de tensões subsuperficiais do material do (Trilho vs Roda 7C) desprende partículas menores, porém numa maior taxa de destacamento, o campo de tensões do material do (Trilho vs Roda 7Mo) faz com que as trincas iniciem o seu processo de delaminação em maiores profundidades, mas numa baixa taxa de destacamento. Portanto, tais achados são insights relevantes para a compreensão dos mecanismos de desgaste, fadiga de contato e

planejamento de estratégias de manutenção, para aplicação de novos aços ferroviários microligados com molibdênio no contato roda-trilho.

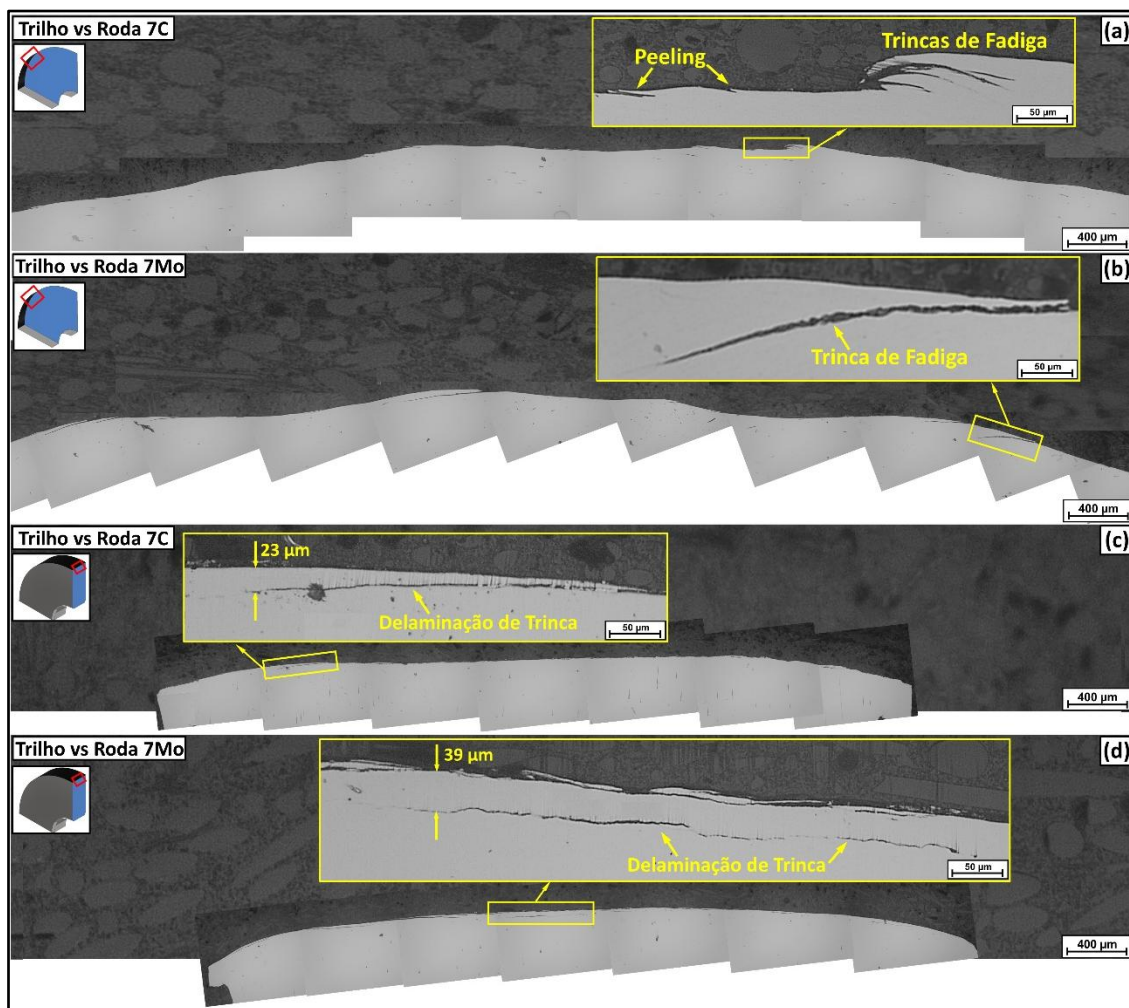


Figura 9: Micrografias de MO das trincas dos discos dos trilhos das Rodas 7C e 7Mo: a) e b) seção circunferencial; c) e d) seção radial.

4. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, foram realizados ensaios de desgaste em condições de contato de rolamento com alto deslizamento no tribômetro disco-contra-disco, para estudar o desempenho tribológico dos materiais de rodas ferroviárias forjadas com e sem a adição de 0,12 Mo (% em massa). Ambas as rodas possuíam microestrutura perlítica e foram testadas contra um aço alto carbono perlítico com dureza similar a de um trilho convencional. Após os materiais serem submetidos aos testes sob pressão normal de 1,1 GPa, taxa de deslizamento de 5%, velocidade de rotação de 250 rpm e 50.000 ciclos, as principais conclusões foram:

- O coeficiente de atrito dos pares (Roda 7C vs Trilho) e (Roda 7C vs Trilho) foram estatisticamente iguais durante todo o experimento. Além disso, o COF apresentou uma leve tendência de redução com o aumento do número de ciclos. Nos primeiros 2.000 ciclos, o valor médio do COT dos pares de discos foi de 0,75 e, após 50.000 ciclos, o valor reduziu para 0,64.



- Os altos valores de COF medidos indicam que os experimentos foram eficazes na simulação do atrito que é estabelecido nas ferrovias, pois o atrito de contato seco entre o friso da roda e o canto de bitola do trilho varia em torno de 0,5 – 0,8.
- Nos primeiros 20.000 ciclos, a Roda 7Mo apresentou taxas de desgaste superiores a Roda 7C. Porém, com o prosseguimento dos experimentos, as taxas de desgaste de ambas as rodas se igualaram e, ao final dos 50.000 ciclos, foram estatisticamente iguais. Portanto, esses resultados revelam que, apesar da Roda 7Mo desenvolver uma perda de massa superior à da Roda 7C nos primeiros 20.000 ciclos, após 30.000 ciclos as taxas de desgaste dos materiais das rodas se tornaram similares.
- Essa diferença indica que, do ponto de vista tribológico, a adição dos elementos microligantes não contribuiu para uma maior resistência ao desgaste do material da roda. Porém, o aumento de resistência por refino de grão e precipitação de carbonetos contribuem para a melhoria das propriedades mecânicas do material (propriedades de tração e tenacidade).
- O Trilho vs Roda 7C apresentou maior perda de massa quando comparado com o Trilho vs Roda 7Mo. Este resultado revela que o menor desgaste da Roda 7C não proporcionou também a menor contribuição de partículas abrasivas na interface (debris), para minimizar o desgaste do trilho. Assim, a perda de massa acumulada total do Trilho vs Roda 7C foi 43% maior que a do Trilho vs Roda 7Mo.
- Ambas as rodas apresentaram a ocorrência predominante dos mecanismos de desgaste por delaminação, abrasão e oxidação. A observação de formações de fluxo plástico (escoamento de material) mais acentuados nas regiões da borda do contato da Roda 7C em relação a Roda 7Mo, indicam que apesar do material da Roda 7C ter apresentado uma perda de massa acumulada inferior ao da Roda 7Mo, no início do experimento, porções significativas de material foram arrastados para borda do contato (perda de geometria).

5. AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são opcionais para os demais casos. Os autores gostariam de agradecer à VALE S.A., por meio do Coordenador do Projeto Roda/Trilho – Engenheiro Edilson Jun Kina, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processo 407462/2022-8), ao Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT, ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Brasil) – Código de Financiamento 001.

6. REFERÊNCIAS

AKAMA, M. Rolling Contact Fatigue and Wear of Rails and Wheels : A Comprehensive Review. p. 1–35, 2025.

American Association of Railroads (AAR). **M107/208 Section G**, 2016.

CANTINI, S.; CERVELLO, S. The competitive role of wear and RCF : Full scale experimental assessment of artificial and natural defects in railway wheel treads. **Wear**, v. 366–367, p. 325–337, 2016.

DING, H. H. et al. Wear mapping and transitions in wheel and rail materials under different contact pressure and sliding velocity conditions. v. 353, p. 1–8, 2016.

EKBERG, A.; SOTKOVSKI, P. Anisotropy and rolling contact fatigue of railway wheels. v. 23, p. 29–43, 2001.

FEGREDO, D. M. et al. The effect of sulphide and oxide inclusions on the wear



rates of a standard C-Mn and a Cr-Mo alloy rail steel. **Wear**, v. 126, n. 3, p. 285–306, set. 1988.

FONSECA, S. T. DA et al. Efeito da adição de vanádio, nióbio-molibdênio nas propriedades mecânicas e microestrutural de aços 0,7% C. **ABM Proceedings**, n. October, p. 1738–1746, out. 2015.

GERMINARI, V. G. et al. Analysis of Wear in the Contact Between the Wheel Tread and the Rail Head: Influence of the Manufacturing Process of Cast and Forged Railway Wheels. **Materials Research**, v. 28, p. 54–56, 2025.

HERTZ, H. Über die Berührung fester elastischer Körper. **Journal für die reine und angewandte Mathematik**, p. 156–171, 1881.

HU, Y. et al. Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions. **Tribology International**, v. 143, n. August 2019, p. 106091, mar. 2020.

HUA, J. et al. Microstructure evolution and properties of wheel steel under different pearlite content and slip ratio conditions. **Wear**, v. 512–513, n. March 2022, p. 204526, jan. 2023.

LIU, C. et al. An EBSD Investigation on the Evolution of the Surface Microstructure of D2 Wheel Steel During Rolling Contact Fatigue. **Tribology Letters**, v. 68, n. 1, p. 47, 4 mar. 2020a.

LIU, P. C. et al. The significance of Nb interface segregation in governing pearlitic refinement in high carbon steels. **Materials Letters**, v. 279, p. 128520, 2020b.

MAGEL, E.; KALOUSEK, J.; SROBA, P. **Chasing the Magic Wear Rate**. Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. **Anais...**2014. Disponível em: <<http://www.ctresources.info/ccp/paper.html?id=7766>>

MAKINO, T.; KATO, T.; HIRAKAWA, K. The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel. **International Journal of Fatigue**, v. 36, n. 1, p. 68–79, 2012.

MINICUCCI, D. J. et al. Development of Niobium Microalloyed Steel for Railway Wheel with Pearlitic Bainitic Microstructure. **Materials Research**, v. 22, n. 6, 2019.

NUNHEZ, R. DA S.; GAY NETO, A. Numerical investigation for creep curve evaluation on a twin-disc test scenario using finite elements. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 43, n. 7, p. 1–19, 2021.

PEREIRA, J. I. et al. Analysis of subsurface layer formation on a pearlitic rail under heavy haul conditions: Spalling characterization. **Engineering Failure Analysis**, v. 130, n. June, p. 105549, dez. 2021.

REZENDE, A. B. et al. Effect of Alloy Elements in Time Temperature Transformation Diagrams of Railway Wheels. **Defect and Diffusion Forum**, v. 400, p. 11–20, 31 mar. 2020a.

REZENDE, A. B. et al. Wear behavior of bainitic and pearlitic microstructures from microalloyed railway wheel steel. **Wear**, v. 456–457, n. June, p. 203377, set. 2020b.

REZENDE, A. B. et al. Effect of niobium and molybdenum addition on the wear resistance and the rolling contact fatigue of railway wheels. **Wear**, v. 466–467, n. November 2020, p. 203571, fev. 2021.

REZENDE, A. B. et al. Characterization of a New Steel for Class D Forged Railway Wheel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 2023.

ROCHA, R. C. et al. Effect of slip on the residual stress and tribological behavior of a class C wheel steel after twin-disc tests. **Wear**, v. 564–565, n. December 2024, p. 205711, mar. 2025.



- SANTA, J. F. et al. Twin disc assessment of wear regime transitions and rolling contact fatigue in R400HT – E8 pairs. **Wear**, v. 432–433, n. May, p. 102916, 2019.
- SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 671–675, jul. 2012.
- SEO, J.-W. et al. Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling–sliding contact. **International Journal of Fatigue**, v. 83, p. 184–194, fev. 2016.
- SHU, K. et al. Effect of dynamic windblown sand environments on the wear and damage of wheel-rail under different slip ratios. **Wear**, v. 500–501, n. April, p. 204349, jul. 2022.
- SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 4º ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2021.
- SOLANO-ALVAREZ, W.; FERNANDEZ GONZALEZ, L.; BHADSHIA, H. K. D. H. The effect of vanadium alloying on the wear resistance of pearlitic rails. **Wear**, v. 436–437, n. May, p. 203004, out. 2019.
- STOCK, R. et al. Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application. **Wear**, v. 366–367, p. 225–232, 2016.
- TAMARA, S.; REZENDE, A. B.; OLIVEIRA, C. R. DE. Physical Simulation as a Tool to Evaluate the complex Microstructure of Microalloyed Railroad Wheels. p. 20–35, 2020.
- TYFOUR, W. R.; BEYNON, J. H.; KAPOOR, A. The steady state wear behaviour of pearlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions. **Wear**, v. 180, n. 1–2, p. 79–89, jan. 1995.
- VIANA, T. G.; TRESSIA, G.; SINATORA, A. Sliding Wear of Rail and Wheel Steels: Effect of Hardness Ratio, Normal Load and Lubrication. **Tribology in Industry**, v. 42, n. 3, p. 428–442, 15 set. 2020.
- VICENTE, F. S.; GUILLAMÓN, M. P. Use of the fatigue index to study rolling contact wear. **Wear**, v. 436–437, n. August, p. 203036, 2019.
- WANG, H. H. et al. Wear and rolling contact fatigue competition mechanism of different types of rail steels under various slip ratios. **Wear**, v. 522, n. November 2022, p. 204721, jun. 2023.
- WANG, Y. et al. Effects of Molybdenum Addition on Rolling Contact Fatigue of Locomotive Wheels under Rolling-Sliding Condition. **Materials**, 2020.
- ZENG, D. et al. Optimization of strength and toughness of railway wheel steel by alloy design. **Materials and Design**, v. 92, p. 998–1006, 2016a.
- ZENG, D. et al. Effect of different strengthening methods on rolling/sliding wear of ferrite–pearlite steel. **Wear**, v. 358–359, p. 62–71, jul. 2016b.
- ZENG, D. et al. Rolling contact fatigue and wear behavior of a vanadium microalloyed railway wheel steel under dry rolling/sliding condition. **International Journal of Fatigue**, v. 182, n. February, p. 108207, 2024.
- ZERBST, U. et al. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. II: Non-metallic inclusions. **Engineering Failure Analysis**, v. 98, n. June 2018, p. 228–239, abr. 2019.
- ZHAO, J.; JIANG, Z. Thermomechanical processing of advanced high strength steels. **Progress in Materials Science**, v. 94, p. 174–242, 2018.



EFFECT OF MOLYBDENUM ON THE TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF FORGED RAILWAY WHEELS UNDER HIGH SLIP ROLLING CONTACT

ABSTRACT

Brazilian railway operators have increasingly sought to enhance productivity and efficiency by extending the service life of rolling stock and track components, with particular emphasis on the steels used for wheels and rails. However, increased axle loads and locomotive speeds, combined with limitations in optimizing the mechanical properties of conventional railway steels at the industrial scale, have led to the premature scrapping of these materials. This degradation is primarily associated with elevated wear rates and the propagation of rolling contact fatigue (RCF) cracks. Accordingly, alternative metallurgical approaches are required to improve the wear and RCF performance of railway steels. The addition of microalloying elements, such as molybdenum, has emerged as a promising strategy to enhance tensile strength, hardness, and toughness in pearlitic steels. Nevertheless, studies addressing the tribological behavior of these materials under severe rolling contact conditions with high slip are still limited. Therefore, this study investigates the tribological performance of forged railway wheel steels, with and without the addition of 0.12 wt.% molybdenum, through wear tests conducted using a twin-disc tribometer. Microstructural and mechanical characterization were performed by optical microscopy and hardness testing. Wear mechanisms were analyzed based on mass loss, subsurface hardness, and stereoscopic microscopy. In addition, surface and subsurface crack features were evaluated by optical microscopy.

Keywords: *Microalloyed Railway Wheel; Molybdenum; Wear; High-Slip Rolling Contact; Rolling Contact Fatigue.*