ANÁLISE DA MICROLIMPEZA EM AÇOS AAR CLASSE C E CLASSE D UTILIZADOS NA EFVM

Mário José-Bueno, Dr., Unicamp, Brasil.

Nathan Fantecelle Strey, Dr., UFES, Brasil.

Paulo Roberto Mei, Dr., Unicamp, IFSP, Brasil

Cherlio Scandian, Ph.D., UFES, Brasil

RESUMO

Inclusões não metálicas (INMs) são partículas precipitadas e retidas no metal sólido durante o processo de fabricação do aço, com o objetivo de regular as concentrações de oxigênio e enxofre no metal líquido. Essas estruturas, consideradas corpos estranhos à matriz metálica, são comumente referidas como "sujidades" no metal, contribuindo para o conceito de "limpeza do aço". Os tipos mais prevalentes de inclusões no aço final são óxidos e sulfetos. As INMs possuem características e propriedades mecânicas distintas da matriz metálica. Geralmente, os sulfetos são menos duros e mais dúcteis, enquanto os óxidos apresentam maior dureza e fragilidade. Essas diferenças fazem das INMs, juntamente com os vazios, locais preferenciais para a nucleação de trincas por fadiga, especialmente sob cargas cíclicas e repetitivas. Em aplicações de Heavy Haul, onde os materiais ferroviários são submetidos a cargas e pressões de contato elevadas, a presença de INMs nos aços das rodas ferroviárias desempenha um papel crítico. Isso pode comprometer significativamente as propriedades mecânicas e a resistência à fadiga de contato por rolamento (FCR) desses materiais. Desta forma, o entendimento das INMs é crucial para o controle da integridade estrutural e da segurança operacional das rodas em aplicações Heavy Haul. A presença dessas inclusões pode acelerar o processo de falha por FCR, aumentando os custos de manutenção e substituição dos componentes. Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivo analisar a microlimpeza de rodas ferroviárias comerciais de classes C e D, seguindo os padrões estabelecidos pela norma AAR M-107/M-208, Sect. G. Observou-se que a maioria das rodas analisadas possuíam um nível de INMs/vazios acima do permitido pela norma, indicado pela fração de área de defeitos superior a 0,1%.

Palavras-chaves: Inclusões não metálicas; Defeitos; Microlimpeza; Rodas ferroviárias; EFVM.

1. INTRODUÇÃO

Inclusões não metálicas (INMs) são partículas precipitadas e retidas no metal sólido, formadas durante o processo de fabricação do aço com o propósito de controlar as concentrações de oxigênio e enxofre no metal líquido. Essas estruturas podem ser definidas como “corpos estranhos” à matriz metálica, sendo comumente tratadas como “sujidades” no metal, dando origem ao conceito de “limpeza do aço” (*steel cleanliness*). Apesar de existirem outros tipos de inclusões, em resumo, óxidos e sulfetos são os tipos mais prevalentes de inclusões encontradas no aço final (DA COSTA E SILVA, 2019).

Partindo do princípio de que as INMs são estruturas distintas da matriz metálica, é plausível sugerir que elas possuam características e propriedades mecânicas diferentes em comparação com o metal sólido. Geralmente, os sulfetos são INMs menos duros e mais dúcteis, sendo altamente deformáveis sob alta tensão. Por outro lado, os óxidos apresentam um comportamento inverso, caracterizados por maior dureza e fragilidade. Essas diferenças tornam as INMs, juntamente com os vazios (microporos), sejam consideradas "defeitos" e locais preferenciais para a nucleação de trincas por fadiga, especialmente sob cargas cíclicas e repetitivas (ZERBST *et al.*, 2019a, b).

Em aplicações de *Heavy Haul*, os materiais ferroviários são submetidos a cargas e pressões de contato elevadas. Rodas ferroviárias, por exemplo, durante sua operação são submetidas a um elevado número de ciclos pontuais de tração e compressão ($>10^7$), suportando cargas superiores a 30 toneladas por eixo em operações de transporte pesado. Nessas condições operacionais críticas, a presença de inclusões não metálicas nos aços empregados na fabricação de rodas pode desempenhar um papel crucial, podendo comprometer consideravelmente as propriedades mecânicas e a resistência à fadiga de contato por rolamento (RCF) desses materiais (MURAKAMI, 2019).

As INMs, como mencionado anteriormente, são estruturas distintas da matriz. A interface inclusão/matriz é uma região de alta energia e preferencial para a nucleação de trincas quando exposta a múltiplos ciclos de carregamento (GALBRAITH *et al.*, 2004). Quando uma trinca é nucleada na interface entre uma inclusão e a matriz ou uma trinca se origina pela quebra da inclusão, então as tensões dentro da inclusão são aliviadas (MURAKAMI, 2019). Em rodas ferroviárias a nucleação de trincas por INMs ocorre tipicamente em regiões próximas à superfície que sustenta a carga aplicada (<1 mm) (GALBRAITH *et al.*, 2004; ZERBST *et al.*, 2019b). Caso o carregamento e o número de ciclos sejam altos o suficiente, as trincas, já existentes, podem continuar a crescer e se propagar até que atinjam um tamanho suficiente para que haja a remoção de material da roda. Quando isso ocorre acontece um fenômeno conhecido como *shelling*.

Robles Hernández et al., 2011, em seu trabalho analisando o efeito das propriedades e da microestrutura em rodas AAR (*Association of American Railroads*) Classe C de alta performance, constataram que defeitos metalúrgicos, como poros e inclusões não metálicas, deterioram a resistência à tração e à fadiga do aço para rodas Classe C AAR, promovendo a substituição prematura das rodas devido ao *shelling* excessivo (ROBLES HERNÁNDEZ *et al.*, 2011). O fenômeno de *shelling* nas rodas, além de reduzir a vida útil das rodas, pode auxiliar no aumento da fratura dos trilhos, alto desgaste de sapata de freio, além de dano nos rolamentos. Similarmente, Strey et al., 2021, avaliando a fadiga de contato por rolamento em duas rodas AAR Classe C, observaram que INMs e vazios foram pontos para a nucleação de trincas após teste de disco-contra-disco. Os autores relatam que as trincas nucleadas nos defeitos (inclusões e vazios) se propagaram paralelamente e próximas à superfície de contato, o que facilitaria a delaminação (*shelling*) da superfície do material(STREY *et al.*, 2021).

Isto posto, o entendimento das INMs é crucial para o controle da integridade estrutural e da segurança operacional de rodas em aplicações *Heavy Haul*. Como mencionado, a presença de INMs pode acelerar o processo de falha por fadiga de contato por rolamento (RCF), comprometendo a vida útil dos componentes e aumentando os custos de manutenção e substituição. Desta forma, torna-se primordial e imprescindível o controle desta estrutura durante o processo de fabricação de rodas ferroviárias.

Desta forma, o presente trabalho visa analisar a microlimpeza de quatro rodas comerciais AAR Classe C e AAR Classe D, utilizadas na EFVM, seguindo os padrões estabelecidos na norma AAR M-107/M-208, Sect. G. Foi observado que a maioria das

rodas analisadas possuíam nível de INMs/vazios acima do permitido pela norma, ou seja, fração de área de defeitos acima de 0,1%.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Materiais

Foram analisadas amostras retiradas de quatro rodas comerciais utilizadas na EFVM. Para se ter uma maior abrangência de materiais, analisou-se duas amostras de rodas AAR Classe C e duas amostras de rodas AAR Classe D, sendo que, para cada classe de rodas, uma amostra foi retirada de uma roda fundida e a outra de uma roda forjada. A relação dos materiais utilizados é observada na Tabela 1.

As amostras foram retiradas de rodas já utilizadas em operação, estando na "primeira vida" de utilização. As dimensões e a posição de retiradas das amostras seguiram as diretivas determinadas na norma AAR M-107/M-208, Sect. G (ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS, 2019).

Tabela 1. Relação dos materiais analisados.

Amostras	Classe	Processo de fabricação
R1	AAR C	Forjada
R3		Fundida
R14	AAA D	Fundida
R15		Forjada

Cada amostra possui 22,22 mm de comprimento na direção circunferencial (direção de laminação), 19,1 mm de largura na direção axial (largura do aro) e 12,7 mm de espessura na direção radial (espessura do aro). Como as rodas já tinham sido utilizadas em serviço, procurou-se padronizar ao máximo a região de retirada das amostras. A norma AAR recomenda a retira das amostras a uma distância de 12,7 mm abaixo da pista de rolamento. Como as rodas fundidas tinham dimensões próximas a uma roda nova, as amostras foram cortadas seguindo as dimensões e distâncias da norma, enquanto que as amostras das rodas forjadas foram extraídas a uma distância de, aproximadamente, 1 mm abaixo da sua pista de rolamento. Essa distância representaria cerca de 14 mm abaixo da pista de rolamento de uma roda nova. A região aproximada de retirada das amostras é visualizada esquematicamente na Figura 1.

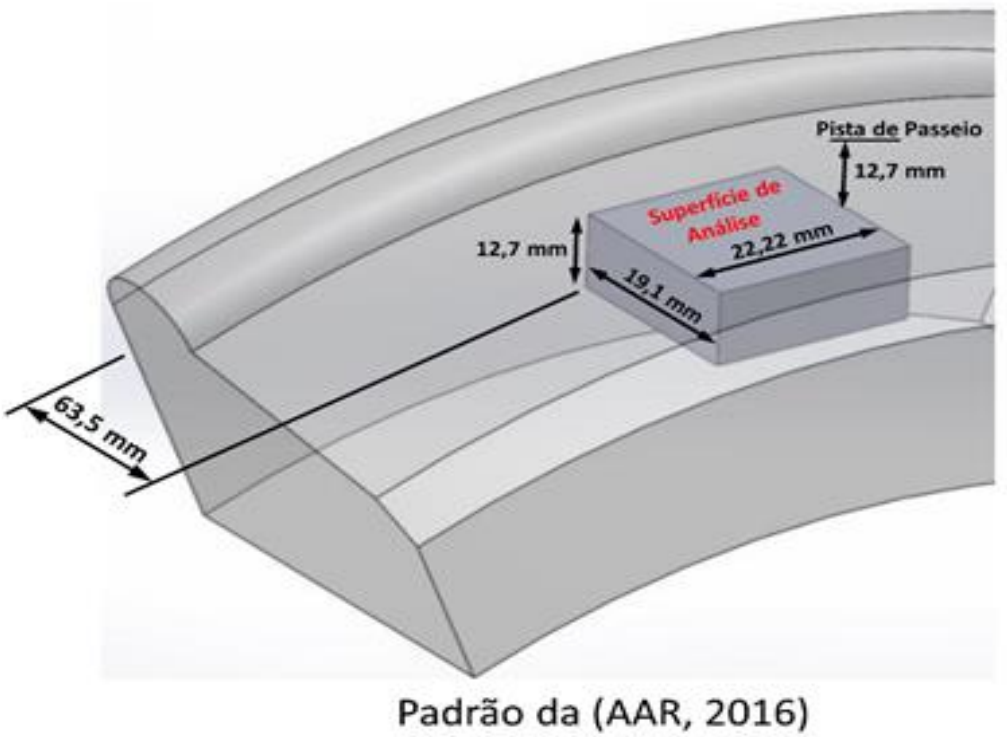


Figura 1 - Posições de retirada de amostra das rodas para análise de INMs, segundo a norma AAR M-107/M-208

2.2. Métodos

Para análise da morfologia e tamanho das inclusões, as amostras foram preparadas e avaliadas de acordo com a norma ASTM E1245 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003), como também recomenda a norma. Primeiramente as amostras foram embutidas em resina baquelite, sendo posteriormente lixadas e polidas até acabamento espelhado. Para garantir uma superfície totalmente livre de riscos, utilizou-se solução de sílica coloidal com granulometria de 50 nm como etapa final de polimento. Após a preparação, as amostras foram levadas ao microscópio óptico para tomada das imagens necessárias para análise dos defeitos. Segundo a norma AAR a superfície analisada em cada amostra não deve ser inferior a 161 mm^2, desta forma, para cada amostras foram tomadas cerca de 160 imagens, utilizando-se uma ampliação de 100X. O número de imagens feitas foi suficiente para cobrir uma área de cerca de 181 mm^2. Uma representação dos campos analisados é apresentada na Figura 2.

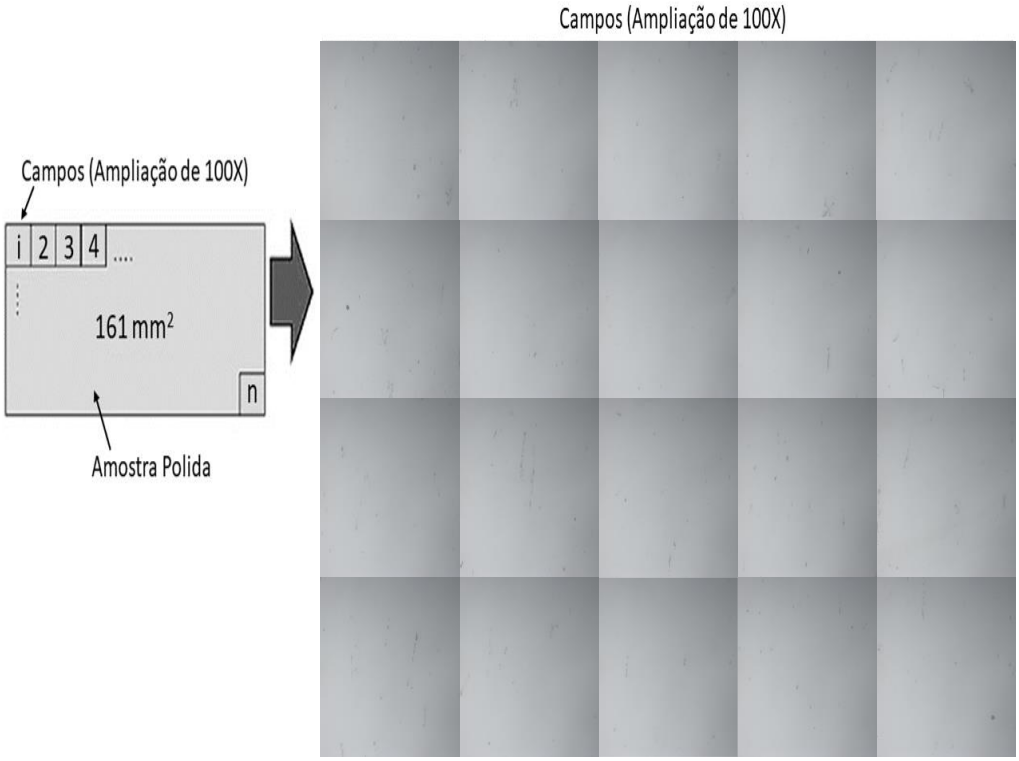


Figura 2 - Metodologia para avaliação da microlimpeza das amostras retiradas das rodas ferroviárias.

Por meio das imagens, foram avaliados parâmetros morfológicos dos defeitos, tais como fração de área dos defeitos, área média, área máxima e área mínima, assim como o número total de defeitos encontrados em cada amostra analisada. Todas as medidas foram feitas utilizando-se o software ImageJ. Para minimizar possíveis erros na contagem dos defeitos foi calculado o limite de resolução (LR) do microscópio utilizado por meio da Equação 1.

$$LR = \frac{K.\lambda}{AN} \qquad \text{(eq. 1)}$$

Onde K é uma constante com valor igual a 0,61, λ é o valor do comprimento de onda da radiação utilizada e AN é o valor da abertura numérica da objetiva utilizada.
No caso como foi utilizada luz branca na tomada das imagens o valor de λ é aproximadamente 0,55 e o valor da abertura numérica a objetiva utilizada é igual a 0,30. Substituindo os valores na equação, o limite de resolução do microscópio é de, aproximadamente, 1,12 µm. Dessa forma, apenas defeitos com dimensões superiores ao limite de resolução do microscópio (1,12 µm) foram analisados/contados.

Complementarmente, analisou-se a composição química das inclusões por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) equipado com um sistema de espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Por fim, as amostras foram analisadas utilizando-se a técnica de fluorescência de raios-X para se obter a composição química aproximada das rodas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Composição química

Na Tabela 2 apresenta-se a composição química das amostras resultantes das análises por meio da fluorescência de raios-X.

Tabela 2 - Composição química das rodas analisadas (% em peso).

Amostra	Classe AAR	*C**	Mn	Si	V	Cr	*S**	Cu	Mo	Fe
R1	C	-	0,957	0,336	-	0,220	***0,054***	0,217	0,023	Bal.
R3		-	0,953	0,705	-	0,181	***0,044***	0,053	0,084	Bal.
R14	D	-	0,929	0,702	-	0,203	***0,030***	0,068	0,078	Bal.
R15		-	0,985	0,922	0,044	0,145	***0,031***	0,063	-	Bal.

* Elementos leves

É importante ressaltar que a técnica utilizada não é recomendada para detecção de elementos leves, tais como carbono e enxofre. Desta forma, o carbono não foi detectado em nenhuma amostra analisada. Em contrapartida, apesar de ter sido detectado não é possível confirmar com precisão os valores encontrados para o elemento enxofre, mesmo estes estando dentro dos limites, a exceção da roda R1, estipulados pela norma AAR M-107/M-208, Sect. G. Com exceção do elemento manganês e do vanádio na roda R15, ambos levemente acima do limite, os demais elementos encontram-se dentro da faixa estipulada para ambas as classes de roda na norma supracitada.

Por meio desta análise é possível sugerir que a roda R1 é, possivelmente, fabricada utilizando-se sucata contendo elevado teor de cobre. Complementarmente é sugerido que a roda R15 seja uma roda microligada ao vanádio, o que está de acordo com a classe AAR em que esta faz parte. A utilização de microligantes, como o vanádio, em rodas ferroviárias Classe D é algo que vem sendo utilizado como um recurso para a melhora das propriedades mecânicas das mesmas (REZENDE *et al.*, 2019, 2020).

3.2. Composição química das inclusões

Na Figura 3 observa-se a superfície analisadas das amostras por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Previamente é possível observar que rodas forjadas R1 e R15 possuem inclusões/defeitos maiores e com formato mais alongado, em relação as rodas fundidas R3 e R14, em ambas as classes de materiais. Inclusões com formato mais alongado são tipicamente sulfetos, frequentemente sulfetos de manganês, possuindo menor dureza e elevada ductilidade, sendo altamente deformáveis quando expostas à uma alta tensão. Já nas rodas fundidas observa-se inclusões de menor tamanho e de formato circular. Estas características são tipicamente de óxidos. Óxidos ao contrário dos sulfetos, óxidos apresentam comportamento oposto, possuindo uma maior dureza e maior fragilidade (DA COSTA E SILVA, 2019; ZERBST *et al.*, 2019b).

Este comportamento é ratificado por meio das Figuras 4 e 5 onde são apresentados os mapas de composição química obtidos por EDS. Em ambas as rodas forjadas (ver Figura 4) visualiza-se que as inclusões, grandes e alongadas, são compostas pelos elementos manganês e enxofre, sendo então sulfetos de manganês (MnS).

Assim como nas rodas forjadas, nas rodas fundidas também se observa a presença de sulfetos de manganês, porém também é possível observar, por meio da Figura 5, a presença de outros elementos químicos, como alumínio e oxigênio.

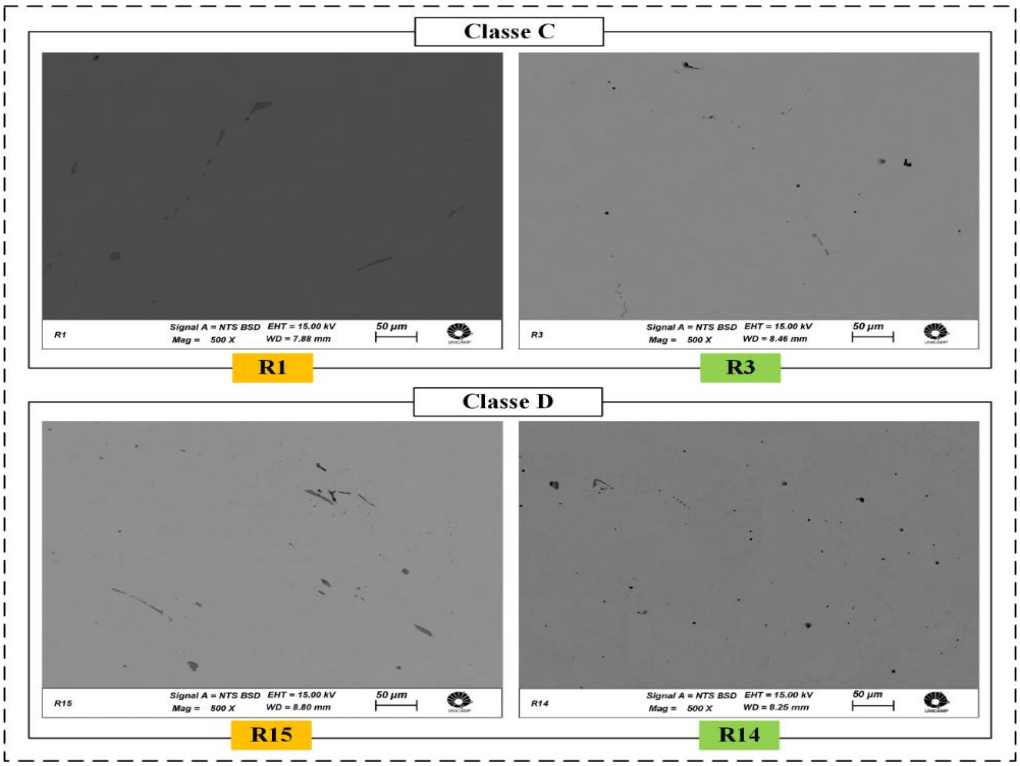


Figura 3 - Morfologia dos defeitos analisados por MEV nas amostras de rodas, onde: cor laranja representando rodas forjadas e cor verde representando rodas fundidas. Ampliação: 500X

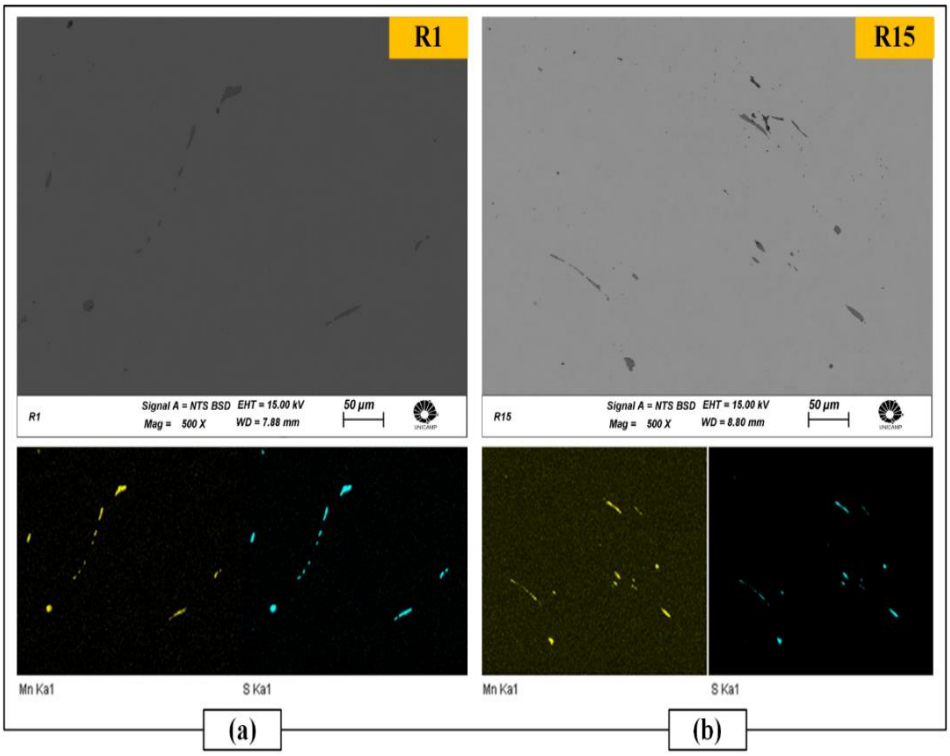


Figura 4 – Composição química das inclusões nas rodas forjadas onde: (a) roda R1 classe C e (b) roda R15 classe D. Ampliação: 500X

Dessa forma é sugerido que além de sulfetos, as rodas fundidas também possuam óxidos como inclusões, tipicamente sendo estes aluminatos (Al_2O_3) e ou silicatos (SiO_2),

podendo ou não serem observados em formas complexas ligando com elementos como magnésio e cálcio (WALKER, 2014).

De fato, ao se analisar em uma maior ampliação observa-se que é típico de se encontrar inclusões em formas complexas.

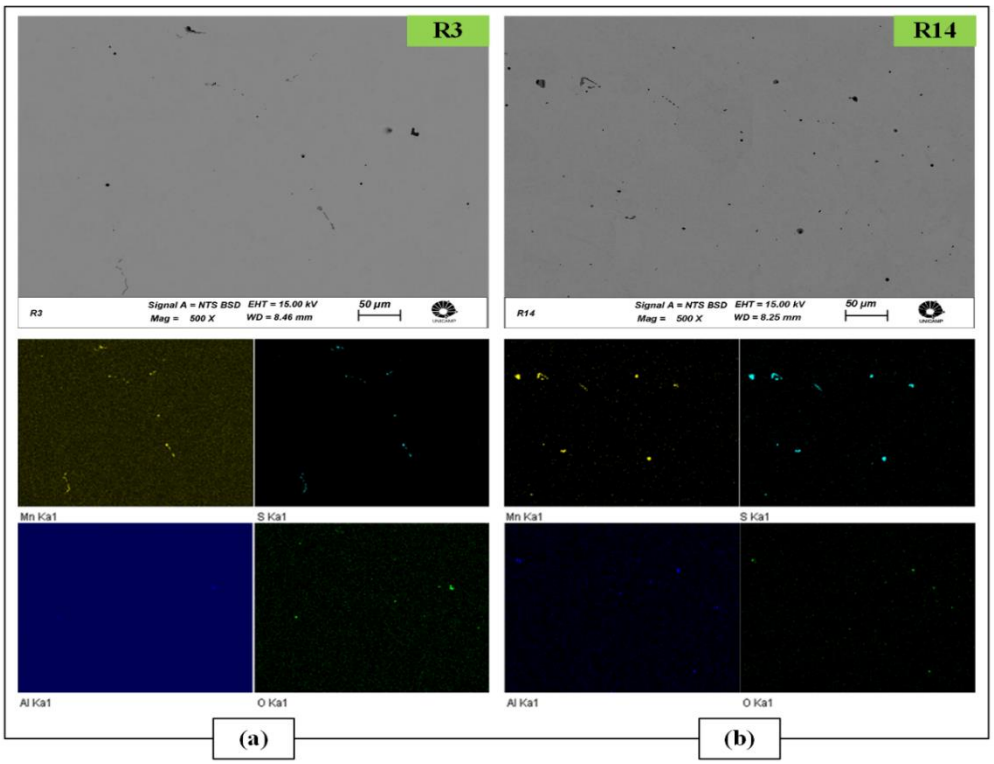


Figura 5 - Composição química das inclusões nas rodas forjadas onde: (a) roda R3 classe C e (b) roda R14 classe D. Ampliação: 500X

Analisando-se as Figura 6 e Figura 7 é observado que, mesmo em sulfetos é possível observar o comportamento supracitado. Sulfetos e óxidos também são comumente encontrados em formas complexas como $MgO.Al_2O_3$, $CaO.Al_2O_3$ e $SiO_2.Al_2O_3$, para óxidos, e MnS.CaS para sulfetos, ou até mesmo uma combinação de ambas as classes, originando uma inclusão mista de oxi-sulfeto (WALKER, 2014). Complementarmente ratifica-se a ideia de que nas amostras forjadas as inclusões são maiores que as inclusões das rodas fundidas. Além do mais, também é possível observar a presença de microporosidades nas rodas fundidas, um comportamento que está ligado diretamente ao processo de fabricação destes materiais.

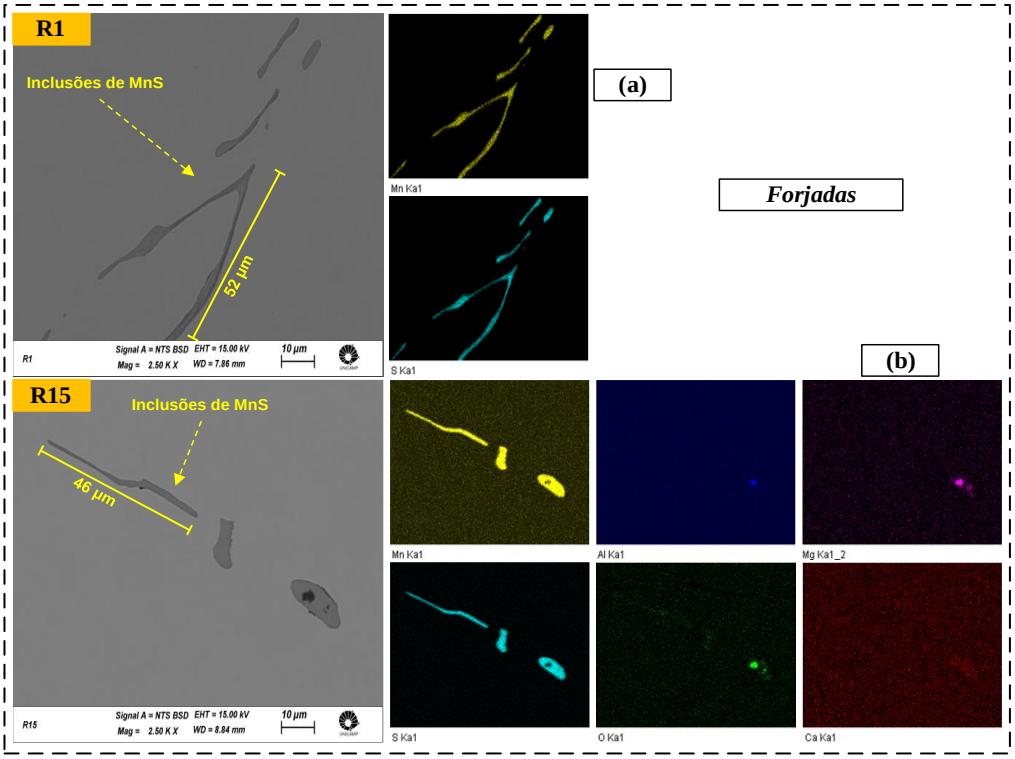


Figura 6 - Composição química das inclusões nas rodas forjadas onde: (a) roda R1 classe C e (b) roda R15 classe D. Ampliação: 2500X

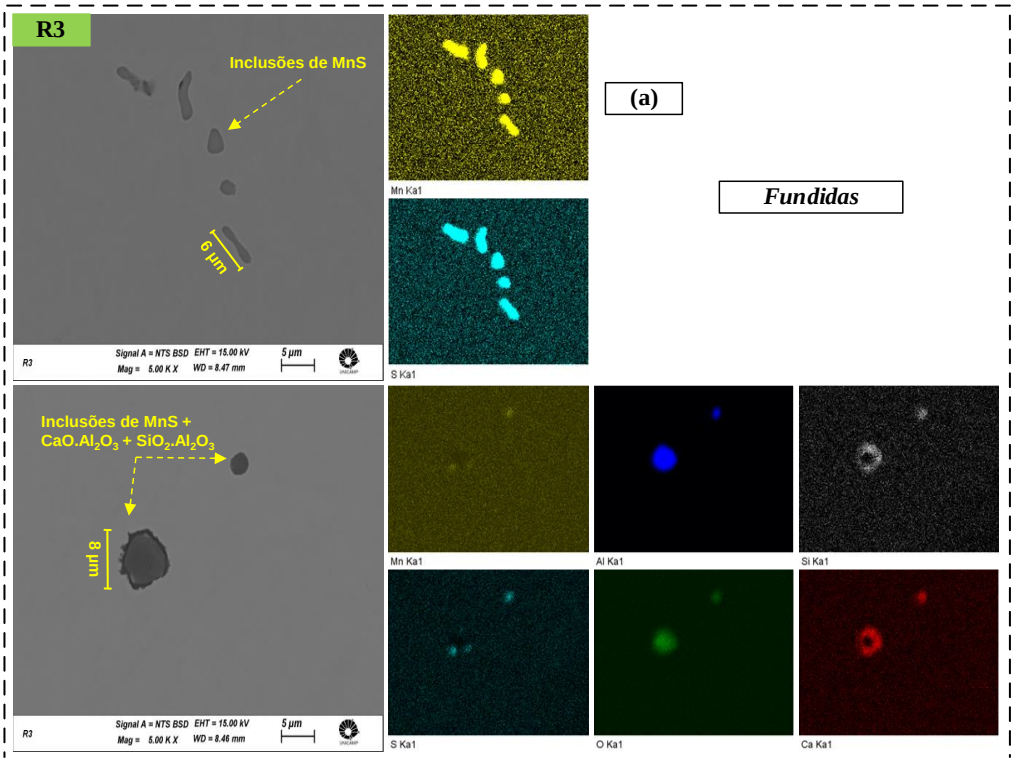


Figura 7 - Composição química das inclusões nas rodas forjadas onde: (a) roda R3 classe C e (b) roda R14 classe D. Ampliação: 5000X. Continua

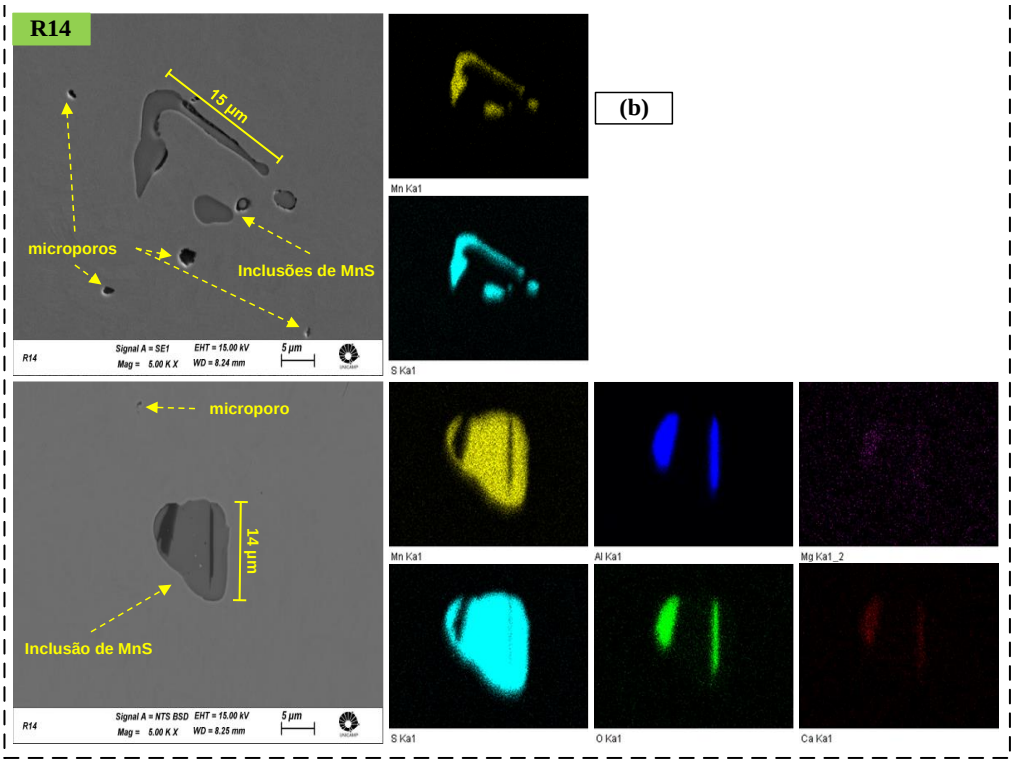


Figura 7 - Composição química das inclusões nas rodas forjadas onde: (a) roda R3 classe C e (b) roda R14 classe D. Ampliação: 5000X. Continuação.

3.2. Morfologia e microlimpeza

Nas Figuras 8 - 11 são apresentadas as frequências das áreas dos defeitos encontrados na matriz das rodas analisadas. A área dos defeitos foi medida pelo software ImageJ e representa a área das inclusões e poros (µm^2) que foi projetada no plano das amostras. Um resumo dos parâmetros avaliados é apresentado na Tabela 3.

Primeiramente e mais importante é necessário destacar que apenas na roda R15, considerando-se a dispersão dos dados, foi observada uma fração de área dos defeitos igual ou inferior ao limite estabelecido pela norma AAR, ou seja, 0,100%. As demais rodas estavam acima desse limite. Como citado anteriormente, a presença de inclusões/defeitos pode agir como um agravante na diminuição a resistência à FCR em rodas ferroviárias. Comparativamente, Stone et. al, 2007, estudaram os efeitos de microvazios, inclusões de óxido e sulfetos na resistência à fadiga de aços para rodas ferroviárias. Os autores demonstraram que a presença destes defeitos metalúrgicos em rodas ferroviárias pode impactar em cerca de 20% a 25% no limite de resistência à fadiga do material (STONE; ROBLES; DAHLMAN, 2009).

De forma geral, a grande parte dos defeitos encontrados em todas as rodas analisadas possuem área inferior a 10 µm^2. Apesar de ser observados inclusões relativamente grandes na amostra da roda R15, esta roda possui a menor fração de área de defeitos (0,14%). Um comportamento antagônico é observado entre as rodas R1 e R3. Apesar de possuir uma área média de defeitos, assim como um tamanho máximo de defeito inferior à roda R3, não é possível visualizar uma diferença estatística na fração de área dos defeitos. Este comportamento possivelmente está ligado à quantidade de defeitos analisados, tendo em vista que na roda R1 o número encontrado destas estruturas foi consideravelmente superior. Por fim, a roda com a maior fração de área de defeitos

encontrada foi a roda R14 (0,34%), sendo consideravelmente superior ao limite estabelecido na norma AAR, mesmo considerando-se a dispersão dos dados.

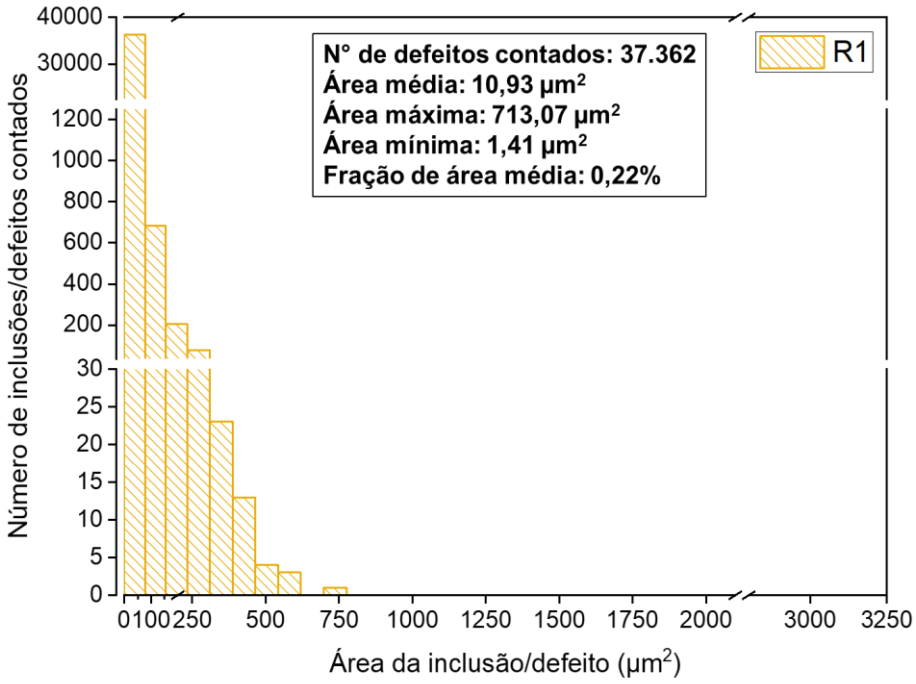


Figura 8 - Distribuição de frequência das áreas dos defeitos (inclusões não metálicas e poros) presentes na matriz metálica do aço da roda R1.

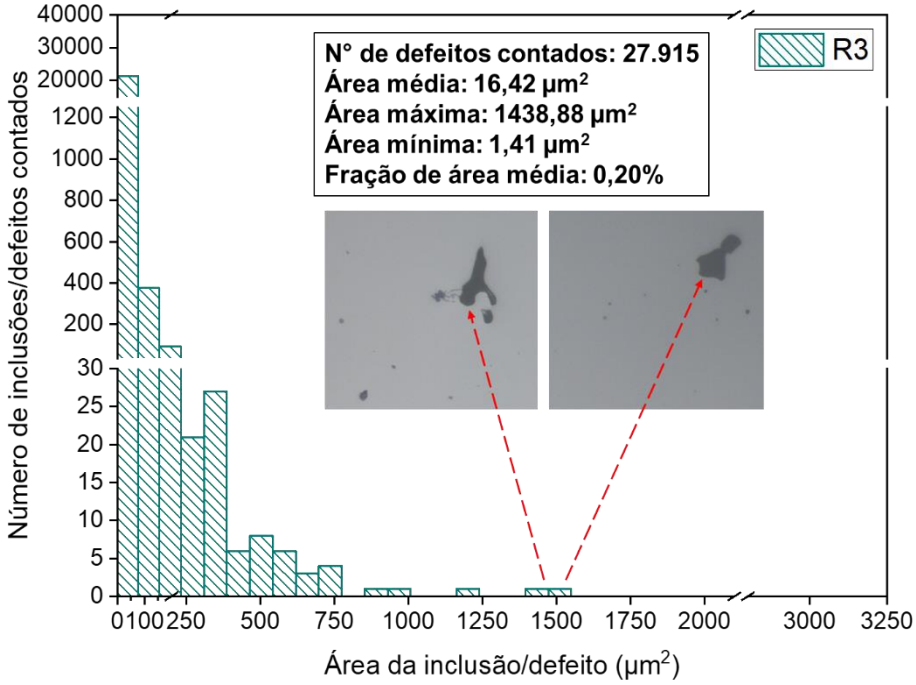


Figura 9 - Distribuição de frequência das áreas dos defeitos (inclusões não metálicas e poros) presentes na matriz metálica do aço da roda R3.

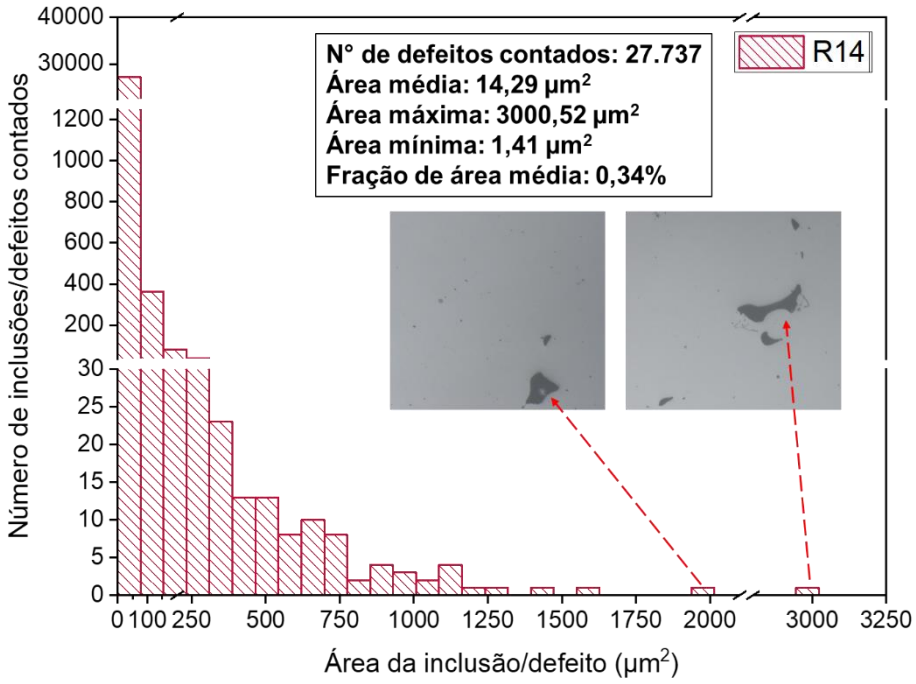


Figura 10 - Distribuição de frequência das áreas dos defeitos (inclusões não metálicas e poros) presentes na matriz metálica do aço da roda R14.

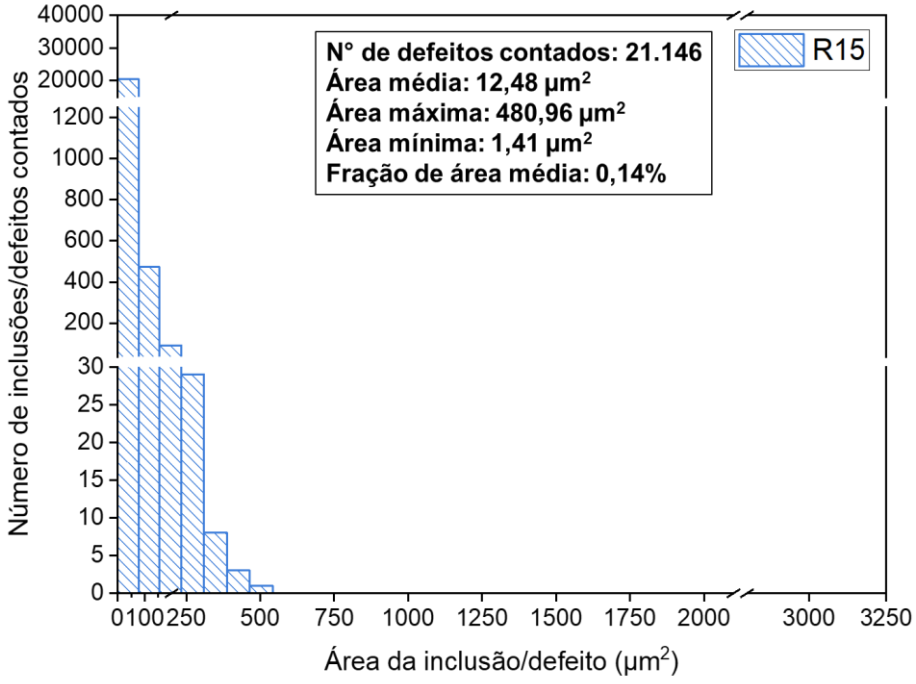


Figura 11 - Distribuição de frequência das áreas dos defeitos (inclusões não metálicas e poros) presentes na matriz metálica do aço da roda R15.

Finalmente, foi constatado que os maiores defeitos encontrados foram nas rodas fundidas, sendo inclusive encontrados microporos com dimensões com até 3000 µm^2 na roda R14 e 1400 µm^2 na roda R3, como verificado por meio das Figuras 10 e 11. Como

consequência disso, as maiores áreas médias de defeitos foram observadas nestas rodas. Assim sendo é possível estabelecer uma relação entre o processo de fabricação e a microlimpeza do aço.

Tabela 3 - Resumo da caracterização quantitativa dos defeitos das rodas.

Amostras	N° de Defeitos (Inclusão/Poro)	Fração em Área (%)	Área Máxima (μm^2)	Área Média (μm^2)	Área Mínima (μm^2)
R1	37.362	0,22 ± 0,09	713,07	10,93	1,41
R3	21.915	0,20 ± 0,06	1438,88	16,42	1,41
R14	27.737	0,34 ± 0,11	3000,52	14,29	1,41
R15	21.146	0,14 ± 0,05	480,96	12,48	1,41

Dada a falta de uniformidade na microlimpeza das rodas atualmente em uso na EFVM, é imperativo realizar uma análise mais abrangente sobre o impacto desse parâmetro nas propriedades mecânicas das rodas, com especial atenção para sua influência na fadiga de contato por rolamento (FCR). Uma abordagem viável para elucidar o efeito desses defeitos seria conduzir testes tribológicos em materiais com diferentes níveis de microlimpeza, utilizando métodos que simulem de maneira mais precisa o contato entre roda e trilho, como o teste disco-contra-disco.

4. CONCLUSÃO

Após as análises efetuadas foi possível concluir que:

Com exceção de uma roda, as demais rodas analisadas encontram-se acima do limite de defeitos metalúrgicos permitidos pela norma AAR, o que, como citado, pode influenciar diretamente nas propriedades mecânicas do material, mais especificamente na resistência das rodas à fadiga (FCR). Em adição este fator tende a comprometer a vida útil destes componentes, aumentando os custos de manutenção e substituição, além de comprometer a segurança da operação.

Há indícios de que o processo metalúrgico utilizado na fabricação das rodas interfere diretamente na microlimpeza das mesmas, de forma que rodas forjadas tendem a ter um maior índice de microlimpeza.

Há a necessidade de se analisar a influência da microlimpeza na resistência a FCR das rodas por meio de testes tribológicos que simulem com maior precisão o contato roda-trilho.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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), Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Desenvolvimento Tecnológico – FNDCT, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001. Os autores ainda agradecem à Unicamp e à UFES.

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E1245: Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis*. . [S.l: s.n.], 2003.

ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. *MANUAL OF STANDARDS AND RECOMMENDED PRACTICES SECTION G: WHEEL AND AXLE MANUAL*. . [S.l: s.n.], 2019.

DA COSTA E SILVA, André Luiz Vasconcellos. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 2, p. 2408–2422, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.009>.

FANTECELLE STREY, Nathan *et al.* Comparison of rolling contact fatigue damage between railway wheels and twin-disc test specimens. *Tribology International*, v. 160, p. 107037, 1 ago. 2021.

GALBRAITH, Jay *et al.* Alternative Microcleanliness Measurement Methods For Wheel Steel. *14th Intl Wheelset Congress*, 2004.

MURAKAMI, Yukitaka. *Metal fatigue: Effects of small defects and nonmetallic inclusions*. [S.l.]: Elsevier, 2019. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780080440644/metal-fatigue>. Acesso em: 17 mar. 2024.

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, 2020.

REZENDE, A. B. *et al.* Effect of vanadium addition on the surface roughness and fatigue crack propagation in a railroad wheel using twin disc wear test. *Defect and Diffusion Forum*, v. 391, p. 66–73, 2019.

ROBLES HERNÁNDEZ, F. C. *et al.* Properties and microstructure of high performance wheels. *Wear*, v. 271, n. 1–2, p. 374–381, 2011.

STONE, Daniel H.; ROBLES, Francisco; DAHLMAN, Geoffery. Effects of Microvoids, Oxide Inclusions, and Sulfide Inclusions of the Fatigue Strength of Wheel Steels. *Proceedings of the ASME/IEEE Joint Rail Conference and the ASME Internal Combustion Engine Division, Spring Technical Conference 2007*, p. 7–11, 5 jun. 2009. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1115/JRC/ICE2007-40011>. Acesso em: 18 mar. 2024.

WALKER, P. F.F. Improving the reliability of highly loaded rolling bearings: The effect of upstream processing on inclusions. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, v. 30, n. 4, p. 385–410, 2014.

ZERBST, U. *et al.* Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. I: Basic aspects. *Engineering Failure Analysis*, v. 97, n. January, p. 777–792, 2019a.

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. January, p. 228–239, 2019b.

MICROCLEANING ANALYSIS OF CLASS C AND CLASS D AAR STEEL USED IN EFVM

Abstract

Non-metallic inclusions (NMIs) are particles precipitated and retained in solid metal during the steel manufacturing process, aiming to regulate the concentrations of oxygen

and sulfur in the liquid metal. These structures, considered foreign bodies to the metallic matrix, are commonly referred to as "impurities" in the metal, contributing to the concept of "steel cleanliness". The most prevalent types of inclusions in the final steel are oxides and sulfides. NMIs have distinct mechanical characteristics and properties from the metallic matrix. Generally, sulfides are less hard and more ductile, while oxides exhibit greater hardness and fragility. These differences make NMIs, along with voids, preferential sites for fatigue crack nucleation, especially under cyclic and repetitive loads. In Heavy Haul applications, where railway materials are subjected to high contact pressures and loads, the presence of NMIs in railway wheel steels plays a critical role. This can significantly compromise the mechanical properties and resistance to rolling contact fatigue (RCF) of these materials. Therefore, understanding NMIs is crucial for controlling the structural integrity and operational safety of wheels in Heavy Haul applications. The presence of these inclusions can accelerate the RCF failure process, increasing maintenance and replacement costs for components. Thus, this study aims to analyze the microcleanliness of commercial railway wheels of classes C and D, following the standards established by the AAR M-107/M-208, Sect. G. It was observed that te majority of the analyzed wheels had a level of NMIs/voids above the standard, indicated by a defect area fraction exceeding 0.1%.
Keywords: Non-metallic inclusions (NMIs); Defects; Microcleanliness; Railway wheels; EFVM.