CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DO AÇO MICROLIGADO CR-MO-V DE USO NA MANUFATURA DE RODAS FERROVIÁRIAS

Patrícia Mijone[1]; Roger Nascimento[1]; Rafael Soares Moraes[1]; Luiz Gustavo Alves de Souza[1]; Luiz Henrique Dias Alves[2]
[1]AmstedMaxion — Brasil
[2] Universidade Federal de Juiz de Fora — Brasil

RESUMO

A pesquisa relativa ao transporte ferroviário no Brasil ocorre principalmente referente a melhoria no desempenho do par roda-trilho. Por meio do tratamento térmico do aço das rodas ferroviárias microligadas é possível pesquisar por macroestruturas e principalmente microestruturas eficientes para resistência ao desgaste sem que ocorra detrimento em outras propriedades da roda. Como resposta a esse desafio, observa-se uma crescente evolução nas técnicas de tratamento térmico. Este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos do tratamento térmico para a obtenção das macroestruturas e microestruturas de rodas ferroviárias microligadas. A morfologia dos microconstituintes foi caracterizada com técnicas de microscopia eletrônica de varredura e exame de macrografia. A macrografia mostrou uma seção com coloração cinza mais escura logo abaixo da pista de rolamento e em seguida uma estrutura de coloração cinza mais clara no interior da bandagem da roda a partir da superfície que tomou o jato de água. A variação de coloração se deve a microestruturas distintas. A microestrutura predominante próxima a superfície que sofreu o impacto do jato de água, necessário para obtenção de rodas com qualidade e tensão residual compressiva conforme preconiza a AAR M-107/M-208, foi uma mescla de bainita superior e inferior com alguma presença de perlita extremamente fina. Em camadas mais interna, da ordem de 15 a 20 mm a perlita fina foi a microestrutura predominante;

Palavras-chave: *Roda Ferroviária, microestrutura, macroestrutura, aço microligado.*

1. INTRODUÇÃO

A interface roda-trilho-sapata de freio se constitui num tribossistema de grande interesse para a engenharia, uma vez que além de envolver itens de segurança e de elevados custos para as operadoras ferroviárias, apresenta variados mecanismos de desgaste que muitas vezes estão relacionados a importantes transformações metalúrgicas na roda, resultado de cargas térmicas e mecânicas aplicadas ao tribossistema e inerentes a operação ferroviária (FONSECA, 2015). Estes mecanismos de desgaste podem levar a um desgaste acelerado ou mesmo a formação de defeitos na pista de rolamento da roda que serão posteriormente responsáveis pelo sucateamento ou retrabalho através de processo de usinagem, refazendo desta forma o perfil da sua pista de rolamento.

A Figura 1 mostra esquematicamente essa interface e consequentemente o tribossistema constituído. Percebe-se pela Figura 1 que nesse tribossistema estão envolvidos os materiais da roda, do trilho e da sapata, os esforços inerentes à operação

como carga mecânica elevadas e cíclicas, cargas térmicas e cargas de impacto devido a defeitos nos trilhos, junções, além das condições ambientais (FONSECA, 2015).

As tensões de contato decorrentes dos esforços mecânicos da roda contra o trilho provocam o encruamento do metal na superfície da roda, o que pode ser definido como sendo o seu endurecimento por deformação plástica. Isso ocorre basicamente porque os metais se deformam plasticamente por movimentação de discordâncias, as quais interagem diretamente (entre si ou com outras imperfeições) ou indiretamente, com o campo de tensões internas de várias imperfeições e obstáculos. Essas interações levam a uma redução na mobilidade das discordâncias, e à necessidade de uma tensão maior para provocar maior deformação plástica. (CALLISTER; RETHWISCH, 2002).

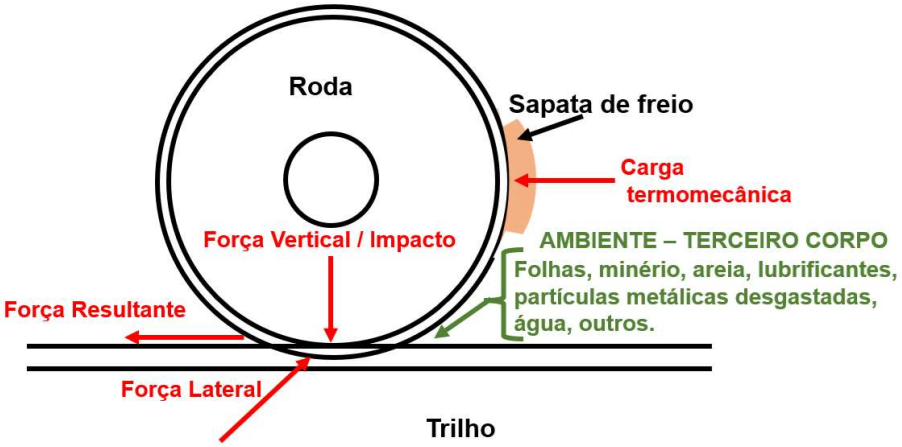


Figura 1. Ilustração esquemática do tribossistema Roda-Trilho_Sapata de freio.

Kalousec, Fegredo e Laufer (1985) apud Alves e Sinatora (2000) mostraram que um dos principais mecanismos de desgaste de rodas ferroviárias é por deformação plástica. Nesse contexto o tratamento térmico de rodas ferroviárias é fator determinante para a formação da microestrutura da roda.

Tratamentos térmicos são os processos de tratamento que ocorrem em metais e ligas, através da ação do calor, com o objetivo de modificar suas estruturas e propriedades em determinada direção. (NOVIKOV, 1994). É um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas. As propriedades dos aços dependem, em princípio, da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam a estrutura dos aços, resultando, em consequência, na alteração de suas propriedades. Cada uma das estruturas obtidas apresenta suas características próprias conforme a estrutura ou combinação de estruturas presentes no aço (CHIAVERINI, 1988).

O tratamento térmico de rodas ferroviárias independente do processo de fabricação, fundidos sob pressão em moldes de grafite ou forjado e laminado, consiste em austenitização em temperatura adequada ao material, (COPAERT, 2008), seguido do resfriamento brusco, com água, somente na pista de rolamento objetivando ajustar sua dureza a criar estado de tensões compressivas na peça. Imediatamente após o resfriamento, as rodas são revenidas para alívio de tensões. Como esse processo de resfriamento é um processo contínuo, ou seja, não se trata de uma transformação

isotérmica, e, normalmente, de acordo com Alves, 2000, os aços empregados em rodas tem composições químicas próximas do eutetóide, é de se esperar que ocorra uma mescla de microestruturas a partir da pista que recebe o jato de água para o interior das rodas.

Inicialmente forma-se uma camada de bainita (superior e inferior) e, à medida que o resfriamento segue em direção ao interior do material, a perlita fina começa a predominar até o ponto em que se tem perlita predominante. A Figura 2 obtida por microscipia eletrônica de varredura mostra a fotomicrografia de uma região próximo à pista de rolamento (região que sofreu resfriamento com água) de uma roda AAR M-107/M-208 Classe D. Percebe-se pela Figura 2 uma mescla de microestruturas constituída de bainita inferior, superior e perlita fina, todas revenidas. Observa-se ainda na figura 2 que a perlita fina apresenta um espaçamento interlamelar menor que 100 nm ao passo que a bainita revenida esse espaçamento é da ordem de 600 nm.

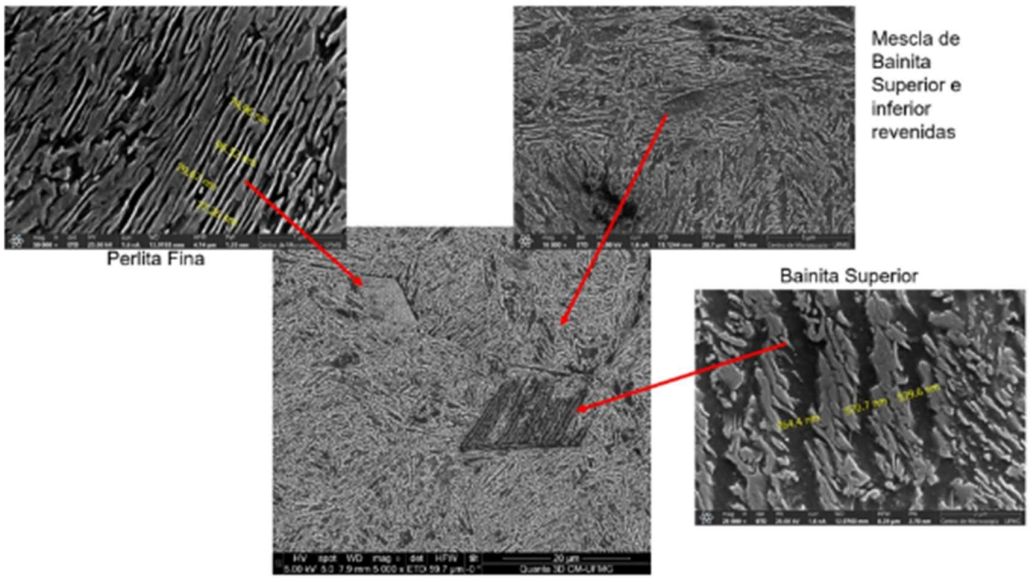


Figura 2. Microestrutura da região próximo a pista de rolamento de uma roda AAR M208 classe D micro ligada.

Aproveitando oportunidades nesse cenário, esse trabalho apresenta toda a metodologia e os resultados preliminares sobre a influência da composição química e dos parâmetros de tratamento térmico na homogeneidade microestrutural e macroestrutural de aços microligado Cr-Mo-V de rodas ferroviárias. Os resultados apresentados referem-se às análises macroestrutural (ASTM E381) e microestrural via MEV do aço microligado objeto do estudo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Método de Manufatura da roda ferroviária

A tecnologia de fabricação de rodas ferroviárias da AmstedMaxion é a mesma empregada pelo fabricante norte-americano de rodas ferroviárias, a Griffin Wheel Company, parte do grupo Amsted Rail. A matéria-prima para a fabricação de rodas ferroviárias é sucata metálica, que é fundida através de um forno elétricos a arco. As rodas são fabricadas conforme AAR M 107, com disco parabólico, vazadas em moldes de

grafite por um processo de fundição sob pressão controlada conforme processo Griffin (West e Grubach, p.610, ASM). O modelo de roda escolhido para os experimentos foi a roda CK36, que é uma roda de múltipla vida seguindo rigorosamente as diretrizes, padrões e práticas recomendadas para a fabricação de rodas ferroviárias na norma AAR M-107/M-208.

As rodas ferroviárias passam por processo de tratamento térmico com o objetivo de produzir superfícies de pista de rolamento resistentes ao desgaste (FONSECA, 2015). O tratamento térmico consiste em austenitização, realizada em fornos contínuos com aquecimento a gás natural liquefeito (GNL). Após a austenitização, ocorre a têmpera controlada na superfície da pista de rolamento, com resfriamento por jatos de água e em seguida o revenimento. O revenimento foi realizado em forno contínuo aquecido com resistências elétricas e sistema de homogeneização de temperatura via convecção forçada. Os fornos de tratamento térmico são automatizados e possuem diversos controles para garantir a eficácia do processo. Após as etapas de tratamento térmico, as rodas ferroviárias seguem o fluxo do processo, nas áreas de acabamento superficial, shot peening, inspeção por ensaios não destrutivos, medição de dureza, usinagem, inspeção dimensional, embalagem e expedição.

2.2. Procedimentos Experimentais

As rodas fundidas microligadas CK36, objeto do estudo, foram utilizadas para obtenção de corpos de prova para análise macro e microestrutural. Essas rodas CK36 foram cortadas em duas partes, posicionados à 180°, com 200 mm de largura na bandagem. Essas duas partes foram divididas em outras duas partes e foram realizados incialmente ensaios macrográficos a quente, de acordo com a ASTM 381, (temperatura de 85°C por 15 minutos em solução de HCl -38%; H_2SO_4;12%; H_2O destilada - 50%) e ensaios metalográficos via microscopia eletrônica de varredura-MEV.

A Figura 3 mostra esquematicamente os locais da pista onde foram realizadas as análises metalúrgicas.

As técnicas metalográficas micrográficas e macrográficas aplicam-se à caracterização da estrutura dos aços. A combinação entre estrutura e composição química e tratamento térmico definem as propriedades mecânicas de um aço. A avaliação metalográfica é importante para o controle da qualidade metalúrgica, (COPAERT, 2008). Após o corte, o procedimento de macrografia foi conforme ASTM E381 e envolveu a preparação mecânica, polimento, ataque químico e a inspeção macroestrutural que consiste no exame visual do aspecto da seção metálica de roda

A preparação metalográfica via Microscopia Eletrônica de Varredura seguiu os processos normatizados da ASTM E3. As amostras foram atacadas com o reagente Nital 2%.

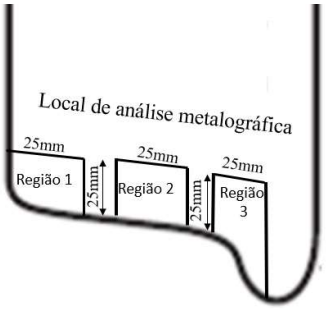


Figura 3. Local de onde foram retirados os corpos de prova para análise metalográfica, ensaios mecânicos e perfil de dureza.

2.3. Método de Taguchi

Como toda essa pesquisa foi experimental, para o seu desenvolvimento empregou-se o método de Taguchi (Apud por Antony e Kaye, 2000). A Tabela 1 apresenta as variáveis analisadas. Empregou-se dois níveis (inferior – 1; superior – 2) e duas réplicas. Como se tratava de 4 variáveis e era importante estudar as possíveis interações entre essas variáveis, empregou-se o arranjo ortogonal L8. Para posicionar as variáveis na matriz ortogonal, empregou-se o gráfico linear de Taguchi, onde os pontos representam as variáveis e as linhas as interações, conforme Figura 4. Percebe-se por este gráfico linear que as interações avaliadas foram: interação entre temperatura de revenimento e tempo de resfriamento - coluna 3; tempo de resfriamento e temperatura da roda - coluna 5; temperatura de revenimento e temperatura da roda antes do resfriamento - coluna 6. Como respostas, se tem as propriedades mecânicas, perfil de dureza e homogeneidade microestrutural. A Tabela 2 mostra matriz de experimento.

Tabela 1. Variáveis estudadas

NÚMERO	SIGLA	NOME DA VARIÁVEL	DESCRIÇÃO
1	TR	Temperatura de revenimento	Temperatura de revenimento no forno
2	TRS	Tempo de Resfriamento	Tempo de resfriamento no *Quenching*
3	TRD	Temperatura da roda	Temperatura de entrada no "Q*uenching"*
4	CE	Carbono equivalente	Conforme ARR M201

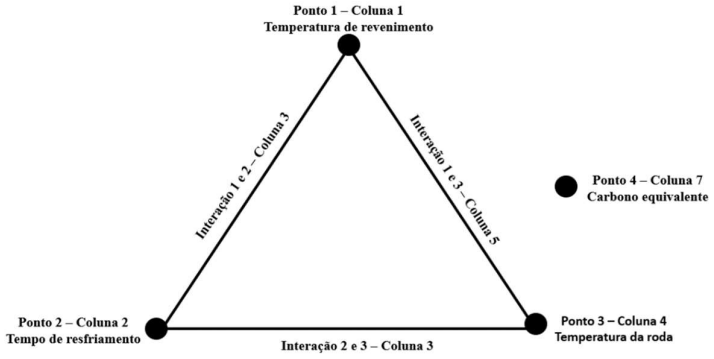


Figura 4. Gráfico linear empregado para posicionar as variáveis na matriz L8.

Tabela 2. Arranjo ortogonal L8 empregado.

COLUNAS	1	2	3	4	5	6	7
RUN	TR	TRS	Interação TR-TRS	TRD	Interação TR-TRD	Interação TRS-TRD	CE
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 exibe uma macrografia típica das que foram encontradas nas análises. Observa-se na macrografia que o tratamento térmico foi adequado ao aço microligado, uma vez que se pode observar uma estrutura mais refinada e compacta com coloração cinza mais escura logo abaixo da pista de rolamento (região a) medindo aproximadamente de 10 a 12 mm e em seguida uma estrutura de coloração mais clara no interior da bandagem da roda, a partir da superfície que tomou o jato de água (região b). Essa variação de coloração se deve a uma variação microestrutural. Como a região que recebe o jato de água resfria com maior velocidade, é de se esperar que, para um aço microligado com composição próxima ao eutetóide, se forme uma camada de bainita. No mais, observa-se a ausência de descarbonetação, além de presença de dendritas, especialmente em regiões mais centrais, que é típico dos metais fundidos. A largura dessa região cinza-escura variou muito pouco com os parâmetros de processo. Isso é um orientativo que essa largura depende dos parâmetros de processo e da composição química. Do ponto de vista mecânico, para aplicações em heavy haull, as macrografias avaliadas estão dentro do esperado e verificado na literatura, (COPAERT, 2008).

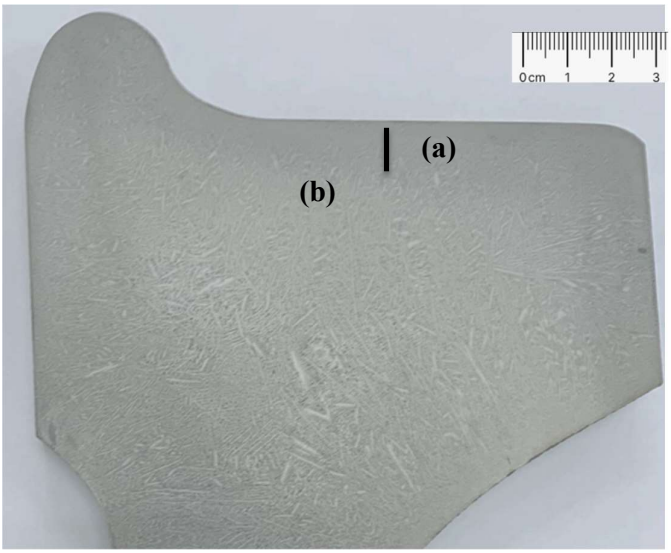


Figura 5. Macrografia típica das verificadas nos experimentos

A Figura 6 indica as regiões de onde foram realizadas as análises microestruturais. Procurou-se dar maior atenção ao centro da pista e a região do friso, por se tratar de regiões onde as solicitações são maiores e serem muito representativas de toda a região de rolamento das rodas, estando sujeitas tanto a desgaste por deslizamento e abrasão quanto fadiga de rolamento.

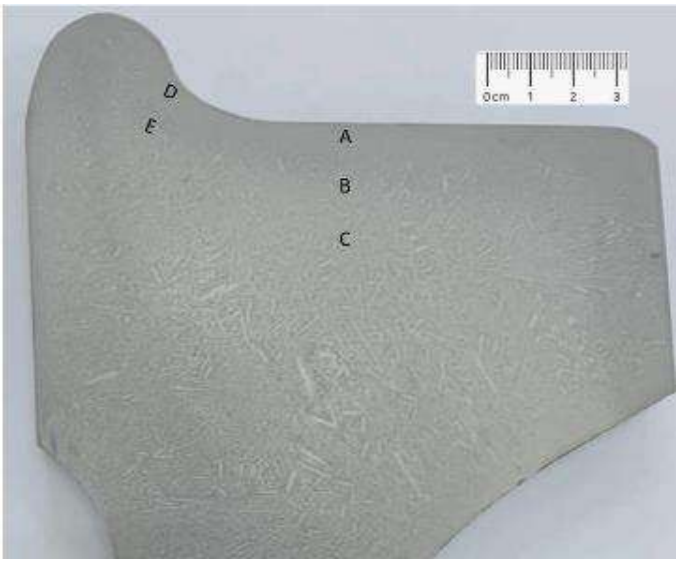


Figura 6. Regiões analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (A, B, C, D, E).

A Figura 7 mostra algumas fotomictrografias predominantes na região A das rodas objeto do estudo. Percebe-se uma predominância de bainita revenida. Porém, observa-se também algumas colônias de perlita isoladas, indicadas com círculos vermelhos na Figura 7. A Figura 8 mostra com maior aumento essas regiões circundadas.

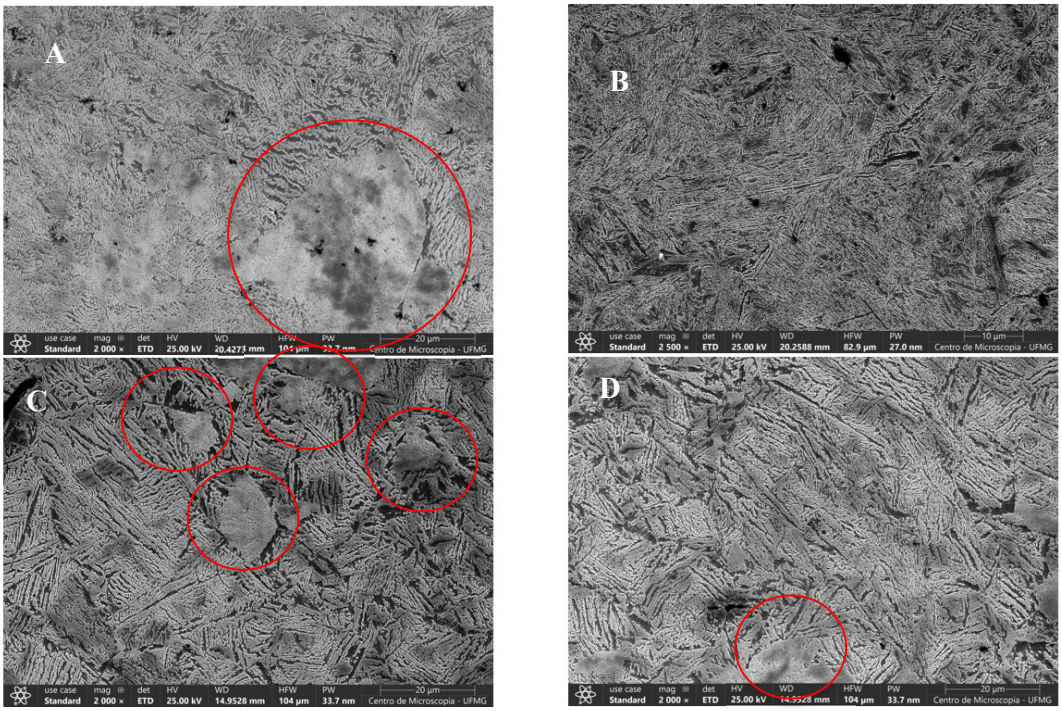


Figura 7. Fotomicrografia obtida por MEV da microestrutura predominante na região A.

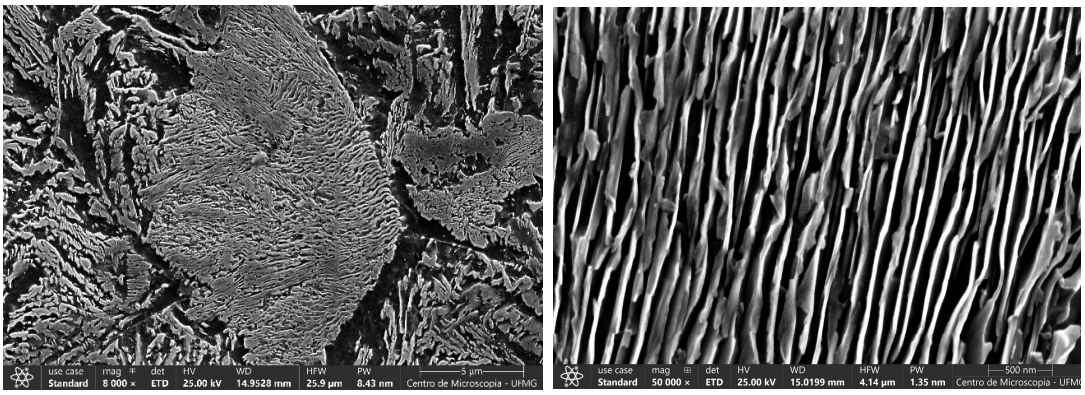


Figura 8. Fotomicrografias obtida por MEV commaior aumento de uma região circundada da Figura 7 C. Perlita muito fina, com espaçamento interlamelar menor que 90 nm.

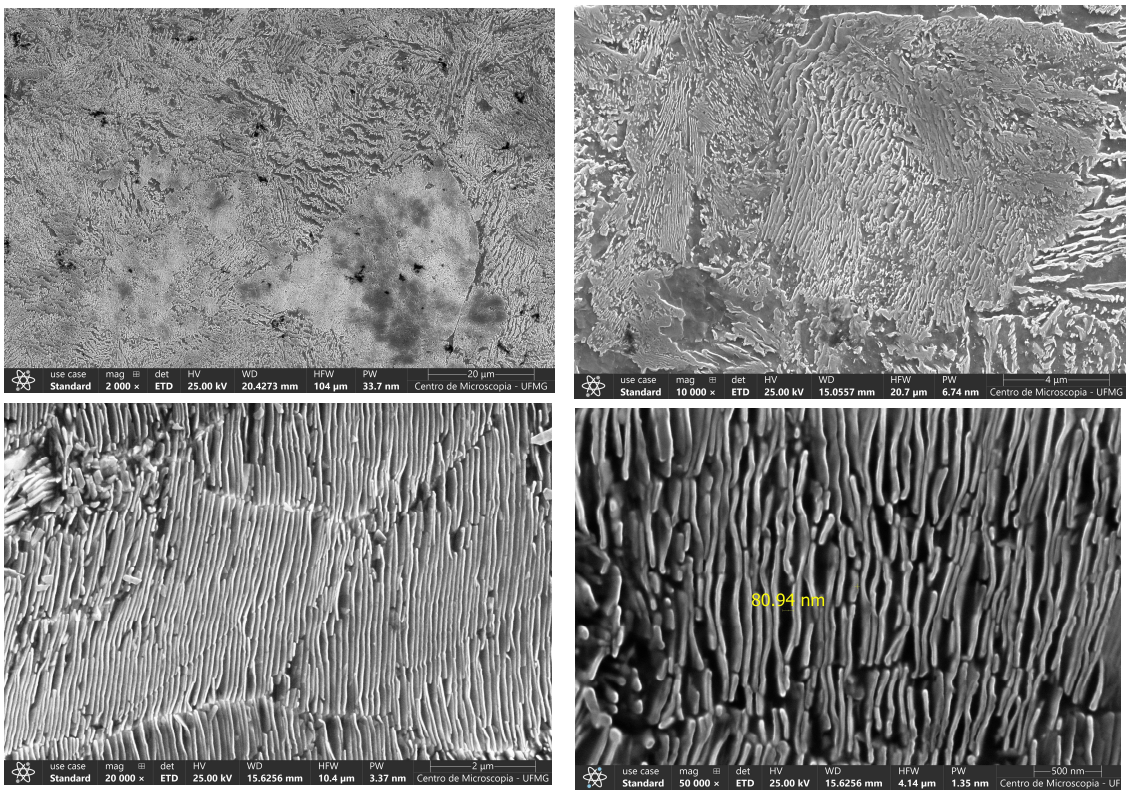


Figura 9. Fotomicrografia da região mostrada na Figura 7 A destacando a região indicada com círculo vermelho. Percebe-se que a região é constituida de colônias de perlita muito fina, com espaçamento interlamelar de 0,08 µm.

A Figura 10 mostra outras regiões fora das colônias de perlita, onde se percebe presença de uma mescla de bainita superior e inferior, revenidas. Percebe-se ainda algumas ferritas aciculares (Figura 10 C). A Figura 11 mostra regiões mais distantes da pista, aproximadamente 12 mm de distância. Percebe-se que à medida que se afasta da região

da pista, que sofreu o jato de água na têmpera, aumenta a fração volumétrica de perlita em relação à bainita. A Figura 12 mostra a região C indicada na figura 6, aproximadamente 20 a 25 mm da pista. Percebe-se uma microestrutura predominantemente perlítica fina com valores de espaçamento interlamelar menor que 90 nm.

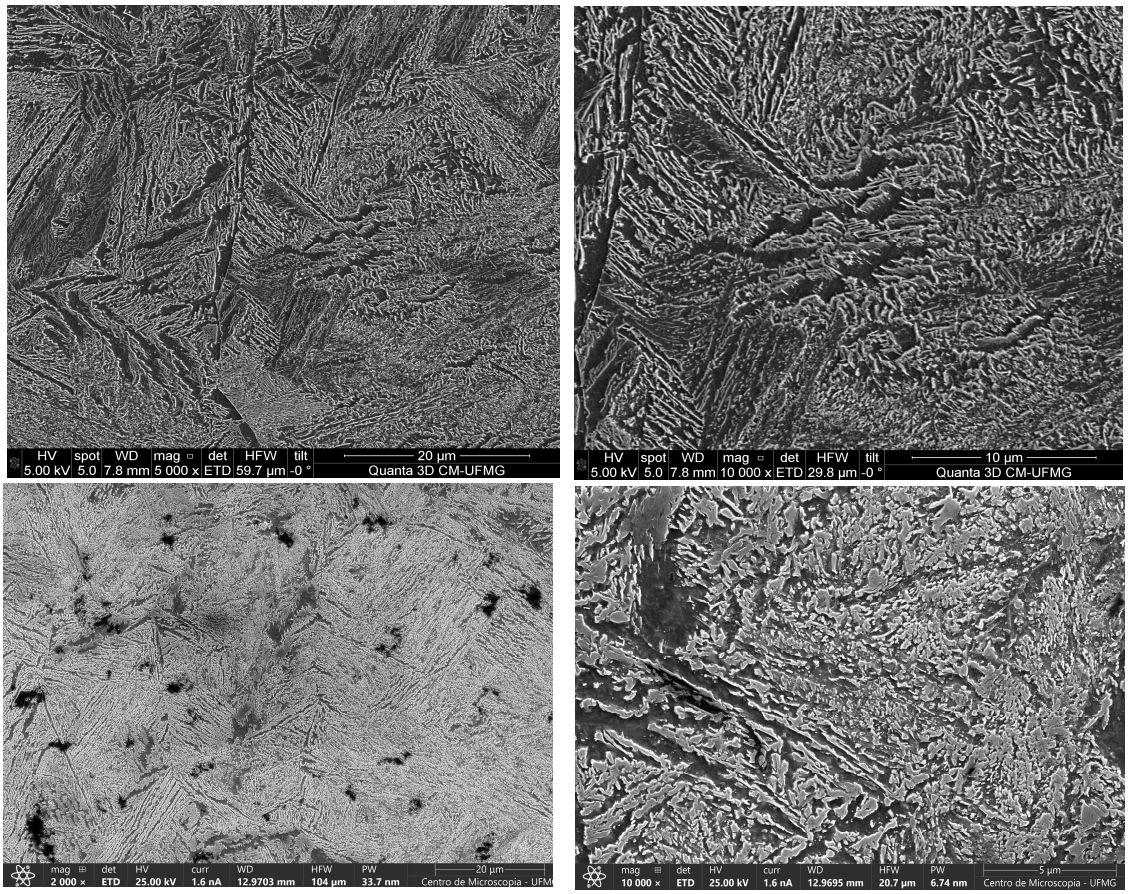


Figura 10. Outras regiões fora das colônias de perlita, mostrada na figura 7, onde se percebe presença de uma mescla de bainita superior e inferior, revenidas.

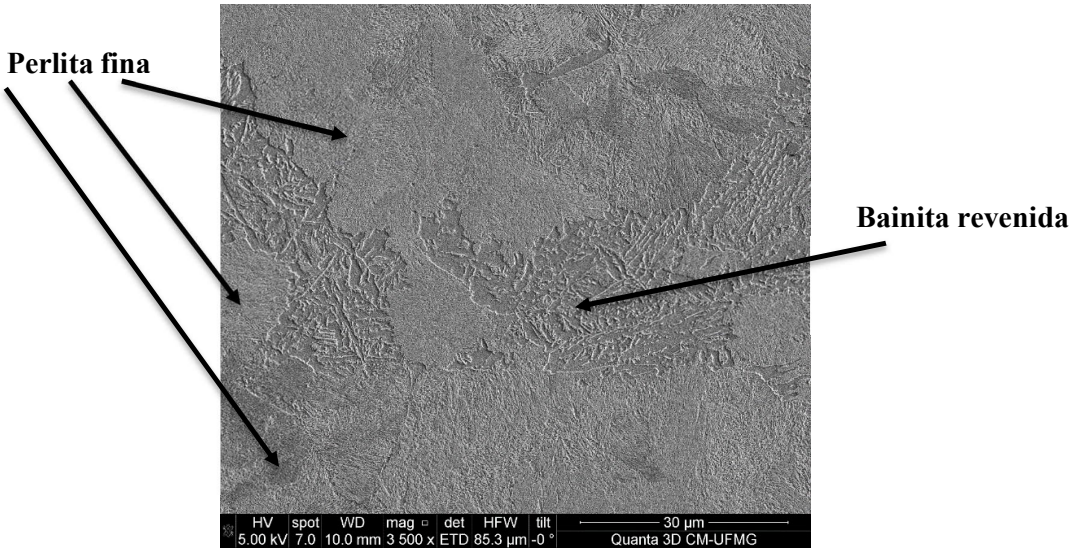


Figura 11. Fotomicrografia obtida por MEV típica da região B mostrada na figura 6 mostrando aumento da fração volumétrica de perlita em relação à bainita.

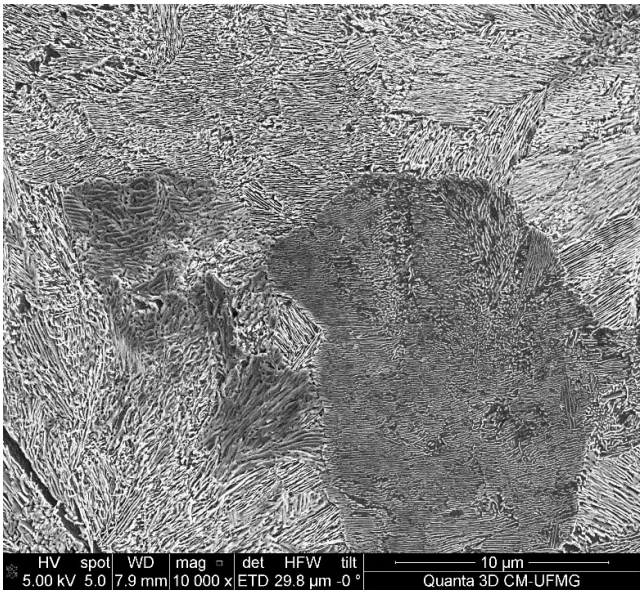


Figura 12. Fotomicrografia obtida por MEV típica da região C mostrada na figura 6 destacando a presença predominante de perlita.

As Figuras 14 e 15 mostram as microestruturas típicas verificadas na região do friso das rodas, regiões D e E mostradas na Figura 6. O comportamento da microestrutura é muito parecido com o apresentado no centro da pista de rolamento. Quanto mais próximo da região que recebeu o jato, maior a presença de bainita, Figura 14. À medida que se encaminha para o interior da roda, aumenta a presença de perlita fina, Figura 15.

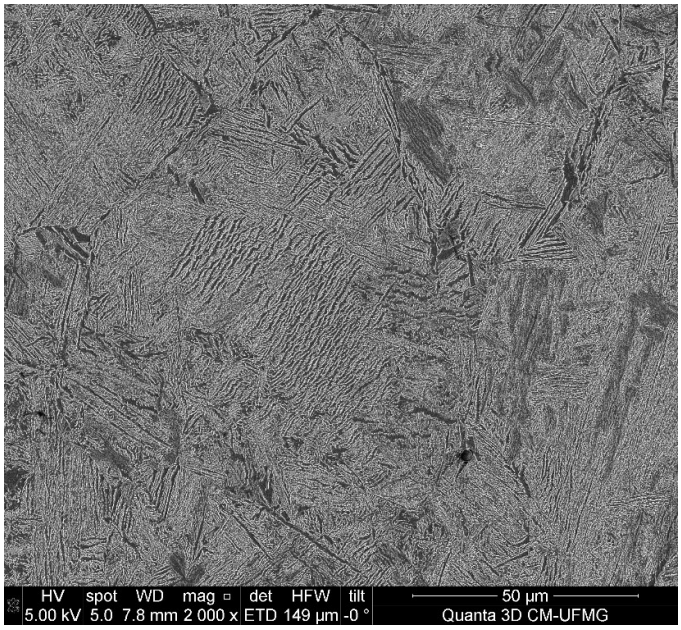


Figura 14. Fotomicrografia obtida por MEV típica da região D (Friso) mostrada na figura 6 destacando a presença maciça de bainita superior.

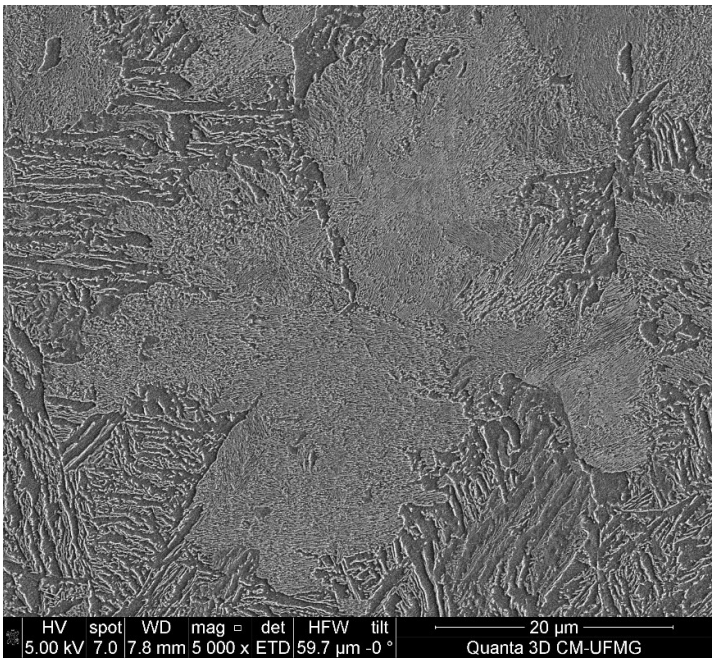


Figura 15. Fotomicrografia obtida por MEV típica da região E (Friso) mostrada na figura 6 mostrando aumento da fração volumétrica de perlita em relação à bainita.

Pelas análises das microestruturas mostradas nas figuras 7 a 15 percebeu-se que à medida que se aproxima da região que sofre o impacto direto do jato de água, a bainita prevalece.

Tal como a perlita, a bainita não é uma fase, mas uma mistura de ferrita e carbonetos que, quando formada nas faixas de temperatura próximas à 500 °C se superpõe a região de formação da perlita. Desta forma, aços transformados nessa faixa de temperatura de 450 a 500 °C como são os aços de rodas, sempre ocorrerão estruturas contendo perlita e bainita (Reed-Hill, 1982, p. 576). Bohemena e Sietsma (2010) mostram que a cinética de formação da bainita em aços depende muito do tamanho de grão austenítico e da composição química. Como em todas as amostras a temperatura de austenitização não variou, portanto, não devendo ter variado o tamanho de grão austenítico, somente a composição química pode fazer variar a fração volumétrica desse agregado eutetóide. Desta forma, quanto mais elementos de liga como Cr, Mo, Mn forem adicionados, maior temperabilidade terá o aço e consequentemente maior deve ser essa camada de bainita.

3. CONCLUSÃO

Pelo apresentado nesse trabalho pode-se tirar as seguintes conclusões:

- O exame da macrografia revelou uma seção com coloração cinza mais escura logo abaixo da pista de rolamento, seguida de uma estrutura de coloração cinza mais clara no interior da bandagem da roda, essa estrutura é a predominante na macrografia. A diferença de coloração observada é devida a variação microestrutural que é normal para esse tipo de material associado ao tratamento térmico que é subtmetido.

- A microestrutura predominante próxima a superfície que sofreu o impacto do jato de água, necessário para obtenção de rodas com qualidade e tensão residual compressiva conforme preconiza a AAR M-107/M-208, foi uma mescla de bainita superior e inferior com alguma presença de perlita extremamente fina com valores de espaçamento inter lamelar menor que 90 nm. Em camadas mais interna, da ordem de 15 a 20 mm, a perlita fina foi a microestrutura predominante;
- A ocorrência de bainita em rodas ferroviárias é totalmente previsível, diante das faixas de temperatura em que as transformações ocorrem.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a DEUS. Aos familiares e amigos pelo carinho e compreensão. Especialmente agradecem à AmstedMaxion por ceder as rodas ferroviárias microligadas para esse estudo sendo representada pelo time de engenharia e qualidade de rodas ferroviárias.

6. REFERÊNCIAS

AAR M-107/M-208. Manual of Standards and Recommended Practices Wheels and Axles. 2020.

ASM Handbook. Vol 1: Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys. ASM International, 2001.

Alves, L.H., Mecanismos de desgaste de rodas ferroviárias, Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ASTM E381 Standard Method of Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Blooms, and Forgings, 2020.

ASTM E3 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, 2001.

BOHEMENA, S.M.C.; SIETSMA, J. The kinetics of bainite and martensite formation in steels during cooling. Materials Science and Engineering A 527 (2010) 6672–6676.

CALLISTER, Willian D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução, Rio de Janeiro: LTC, Brasil, 2002.

CHIAVERINI, V., Tratamento Térmico das Ligas Metálicas. 2° Edição. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2008.

CHIAVERINI, V., Aços e Ferros fundidos. 7° Edição, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 1996.

COLPAERT, H., Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. São Paulo, Edgard Blucher, 2008.

JIJU Antony; Mike Kaye. Experimental Quality. A Strategic Approach to Achieve Improve Quality. Klumer Academic Publishers, 2000.

FONSECA, S. T. DA. Effect of additions of vanadium, niobium and molybdenum on the structure and mechanical properties of steels with 0.7% C used in the manufacture of railway wheels. PhD Thesis – Campinas University, 2015.

NOVIKOV, I., Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais, Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1994.

REED-HILL, R. Princípios de Metalurgia Física. Guanabara dois. Segunda Edição. 1982.

METALLOGRAPHIC CHARACTERIZATION OF CR-MO-V TO MANUFACTURING MICROALLOYED STEEL WHEELS RAILWAY

ABSTRACT

Research on rail transport in Brazil focuses primarily on improving the performance of wheel-rail pairs. Through heat treatment of microalloyed railway wheel steel, it is possible to investigate efficient macrostructures and, especially, microstructures for wear resistance without compromising other wheel properties. In response to this challenge, there has been increasing evolution in heat treatment techniques. This work aimed to study the effects of heat treatment on obtaining the macrostructures and microstructures of microalloyed railway wheels. The morphology of the microconstituents was characterized using scanning electron microscopy and macrographic examination. The macrograph showed a section with a darker gray coloration just below the running surface, followed by a lighter gray structure inside the wheel tread from the surface exposed to the water jet. The color variation is due to distinct microstructures. The predominant microstructure near the surface that underwent the water jet impact, necessary to obtain wheels with quality and compressive residual stress as recommended by AAR M-107/M-208, was a mixture of upper and lower bainite with some presence of extremely fine pearlite. In more internal layers, on the order of 15 to 20 mm, fine pearlite was the predominant microstructure.

Keywords: Railway wheel, microstructure, macrostructure, microalloyed steel.