

INVESTIGAÇÃO DOS MECANISMOS DE DEFEITO DE UM TRILHO FERROVIÁRIO SOLDADO POR CENTELHAMENTO

Vinicius Silva dos Reis

Carlos Vinicius de Paes Santos

Universidade Federal do Pará, FEM – Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá. CEP 66075-110. Belém – PA, Brasil

e-mail: viniciusreis11@hotmail.com

e-mail: carlosviniciusdepaessantos@gmail.com

Gregory de Oliveira Miranda

Universidade Federal do Pará, FEM – Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá. CEP 66075-110. Belém – PA, Brasil

e-mail: gregmirandamail@gmail.com

Suanny Quemel Mesquita

Universidade Federal do Pará, FEM – Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá. CEP 66075-110. Belém – PA, Brasil

e-mail: suanny.mesquita@itec.ufpa.br

Clóvis Iarlande Oliveira Santos

Universidade Federal do Pará, FEM – Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá. CEP 66075-110. Belém – PA, Brasil

e-mail: clovis.mecanica@hotmail.com

José Maria do Vale Quaresma

Universidade Federal do Pará, FEM – Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá. CEP 66075-110. Belém – PA, Brasil

e-mail: quaresma@fem.unicamp.br

Resumo. A expansão do modal ferroviário brasileiro torna-se iminente ao desenvolvimento da logística de transporte de diversos minérios e grãos no país. Diante disso, a pesquisa visa analisar um trilho soldado por centelhamento substituído de uma ferrovia devido a presença de defeitos superficiais. A caracterização da amostra foi feita por meio da análise química e de dureza nas regiões características da junta soldada. Além disso, fez-se a avaliação microestrutural, com auxílio de microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura (MEV). Nesse sentido, obteve-se que as mudanças quanto aos elementos químicos na amostra foram mínimas, porém a dureza demonstrou modificações substanciais ao longo da linha central e da zona termicamente afetada. A microestrutura mostrou a preponderância de estrutura perlítica, presença de descarbonetação e de esferoidização na ZTA. Os efeitos da soldagem por centelhamento na amostra estudada mostraram-se como fator determinante ao surgimento do defeito encontrado.

Palavras chave: Trilho. Soldagem. Defeitos. Microestrutura. Dureza.

1. INTRODUÇÃO

O modal ferroviário é vital para o desenvolvimento da logística de transporte de grandes volumes em longas distâncias, visto esse modal ser um dos mais eficientes e econômico para o atendimento das demandas no transporte de minerais, produtos agrícolas e passageiros (Schneider, 2005 e ANTF, 2018).

As ferrovias, principalmente, as de transporte de minérios e produtos agrícolas, as quais são conhecidas como Heavy Haul, são fortemente sujeitas a falhas relacionadas ao desgaste visto o ciclo contínuo de altos carregamentos aplicados sobre os trilhos combinados à elevadas velocidades (Chaves, 2017 e Masoumi *et al.*, 2019). Haja vista que o desejo por diminuir o tempo e o custo de transporte, assim notório a necessidade por estudos que possam mitigar o aparecimento desses defeitos.

A soldagem de trilhos ferroviário por meio do processo de centelhamento ou *Flash Butt Welding* (FBW) permite alta produtividade, bons custos e qualidade no produto final (Porcaro *et al.*, 2017 e Sarikavak *et al.*, 2020). Ademais, quando comparada a soldagem aluminotérmica, percebe-se que a primeira é menos favorável a falhas na soldagem (Ozakgul *et al.*, 2015).

A soldagem por meio do centelhamento, por mais que apresente qualidades ainda é suscetível a defeitos sob altas cargas cíclicas aplicadas sobre os trilhos ferroviários (Zhang *et al.*, 2019 e Sarikavak *et al.*, 2020). Em vista da presença de características diferentes da solda se comparada à material base do trilho, isto é, propriedades estruturais e mecânicas, ressalta-se a microestrutura, tensões residuais, resistência e o comportamento à fadiga. Os fatores combinados as solicitações mecânicas em serviço que induzem trincas e riscos como descarrilamento (Anis *et al.*, 2018).

Diante disso, a caracterização mecânica, microestrutural e química de trilhos soldados por centelhamento, torna-se importante para o entendimento dos mecanismos de falha em trilhos em serviço. Por conseguinte, o estudo proposto neste artigo visa analisar um trilho soldado substituído de uma ferrovia.

2. METODOLOGIA

2.1. Seleção da amostra

Os trilhos do tipo TR68 que se utilizou nesse trabalho foram cedidos por uma empresa que opera estradas de ferro que são classificadas como de transporte pesado (*heavy haul*). Ademais, o trilho avaliado nesse trabalho foi retirado da via, pois apresentava um defeito do tipo canoamento na região da junta soldada por centelhamento. A Figura 1 apresenta a amostra seccionada do trilho defeituosos.

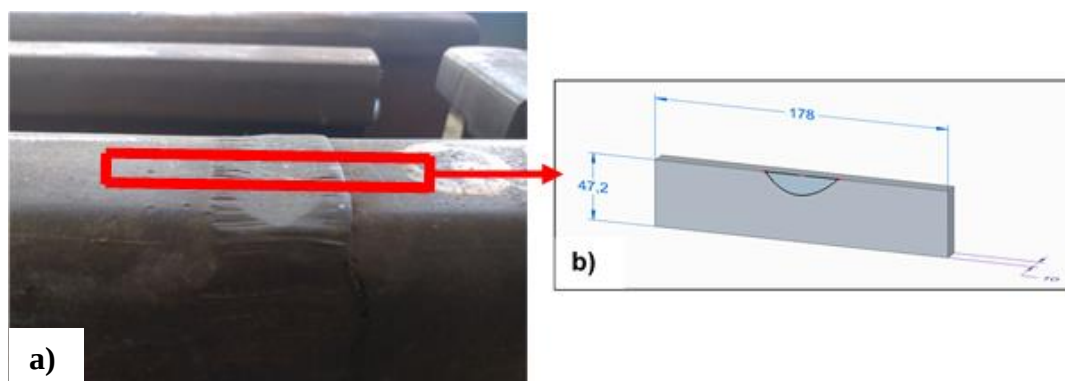


Figura 1. Esquema de secção do trilho (a) trilho e (b) amostra retirada (Autores, 2021)

2.2. Análise química

As análises químicas foram efetuadas, por meio do espectrômetro óptico, marca Brucker, modelo Q4 Tasman, em que se fez 24 (vinte e quatro) medições, sendo que 3 (três) linhas na direção y e espaçadas em 5 mm e 8 (oito) análises em cada linha com espaçamento de 10 mm. O esquema é apresentado na Fig. 2. Valido ressaltar que as análises foram realizadas com intuito de verificar o comportamento da concentração dos elementos no metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e centro (C).

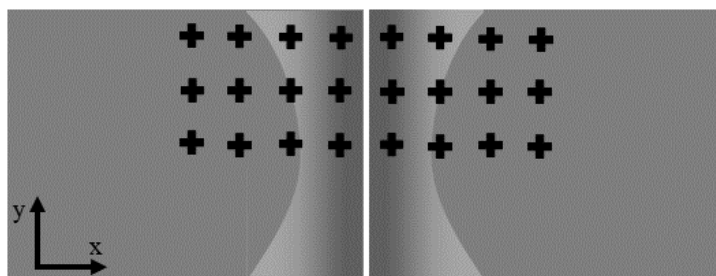


Figura 2. Distribuição das análises químicas na região longitudinal da junta soldada (Autores, 2021)

2.3. Dureza

A aferição da dureza foi realizada no Durômetro Rockwell, modelo 200HRS-150, a Fig. 3 apresenta o esquema que demonstra a disposição das indentações realizadas. Tal caracterização foi realizada na região da junta soldada, isto é, no MB, ZTA e C, ressalta-se que foi abrangido o trilho da região esquerda e direita. Além disso, efetuou-se indentações, com espaçamento de 5 mm na direção y (profundidade) e com 2,5 mm de espaçamento entre as mesmas no eixo x. A Figura. 3 apresenta uma representação esquemática de como as medições foram realizadas ao longo da junta soldada. A carga utilizada para a realização do ensaio foi de 150 kgf pelo tempo de 8s.

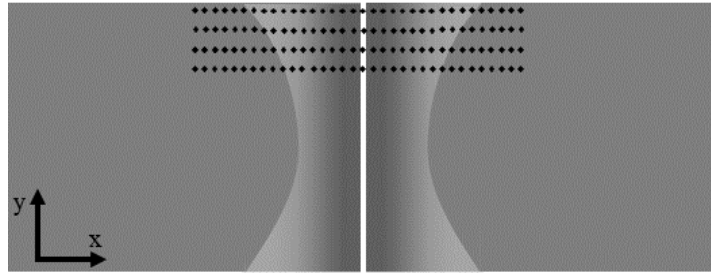


Figura 3. Esquema de medição da dureza na região longitudinal da junta soldada (Autores, 2021)

2.4. Caracterização macro e micro estrutural

A partir do corte longitudinal obtido do boleto do trilho, o qual foi realizado as análises anteriores, fez-se secções nas regiões da junta soldada, conforme mostrado na Fig. 4. Diante disso, tem-se as amostras metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e linha central (C), em que as letras E e D são respectivamente, amostra do trilho esquerda e direita.

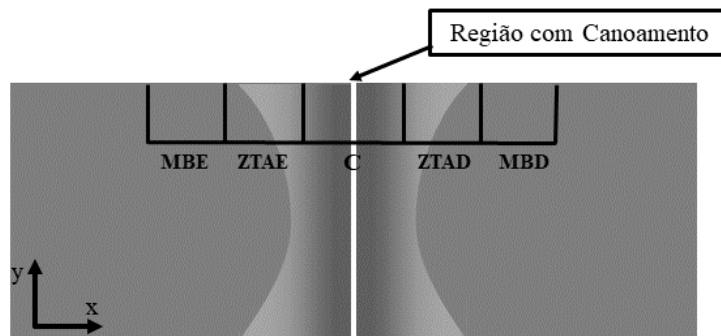


Figura 4. Secção das amostras caracterizadas estruturalmente (Autores, 2021)

Ademais, obteve-se a caracterização macroestrutural, em que as amostras extraídas das respectivas regiões de interesse foram embutidas a quente em baquelite, lixadas com lixas de carbetto de silício nas granulometrias 220, 320 e 600 *mesh*. Foram polidas utilizando de soluções de pasta de diamante de granulometrias 6, 3 e 1 μm e limpas por meio da lavagem em solução de etanol e secagem por jato quente. O ataque químico foi realizado com Nital 2%, por um tempo de 20 s.

A caracterização microestrutural das amostras foi feita por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), em que se fez a mesma metodologia aplicada para revelar a macroestrutura, porém aplicando-se após o processo de polimento, a limpeza por meio do ultrassom por 10 (dez) minutos em etanol.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise química

A avaliação dos elementos de liga presentes na amostra da junta soldada por centelhamento, não evidenciam que há dispersão dos elementos analisados ao longo das posições estudadas que incluem o metal base e zona termicamente afetada. Para os trilhos unidos pelo processo de soldagem, demonstram a manutenção dos elementos, isto é, C, Mn, Si, S, Cr, P e Ni mantiveram-se com perfil constante, visto na Fig. 5, assim pode-se considerar que amostra retirada da ferrovia com presente defeito não apresenta variação significativa dos elementos analisados, e também, pode-se perceber que ambos os trilhos unidos estão nas mesmas faixas de composição química, o que pode ser evidência dos mesmos serem de mesmo fabricante.

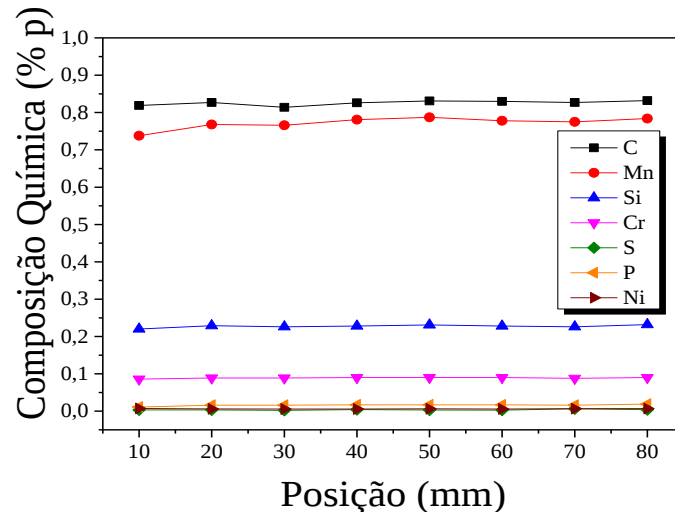


Figura 5. Distribuição da composição química da junta soldada (Autores, 2021)

A Tabela 1 apresenta a composição química geral da secção da junta soldada estudada, em que tendo em vista a manutenção do perfil constante dos elementos conforme as posições analisadas, assim conforme evidenciado por essa tabela, é notório que a variação é pouco significativa como expressada pelo desvio padrão. Além disso, a composição de carbono compreendida no intervalo de 0,77% a 1,00% desse elemento caracteriza o trilho como hipereutetóide (Callister e Rethwisch, 2008).

Tabela 1. Composição química resultante da junta soldada (Autores, 2009)

Elementos (p%)	C	Mn	Si	Cr	S	P	Ni
Média	0,82575	0,772125	0,2275	0,089	0,003663	0,016125	0,006238
Desvio Padrão	0,006228	0,015597	0,003703	0,001414	0,001243	0,002295	0,000614

3.2. Dureza

A análise da dureza da junta soldada por centelhamento cortada longitudinalmente no boleto do trilho ferroviário, evidenciou notórias modificações, tendo em vista as modificações térmicas decorrentes do processo de soldagem, que afetam estruturas do material de base unido. Além disso, percebe-se uma manutenção da dureza ao longo das profundidades analisadas (0 à 15 mm). A Figura 6 expressa o perfil de dureza ao longo da junta soldada.

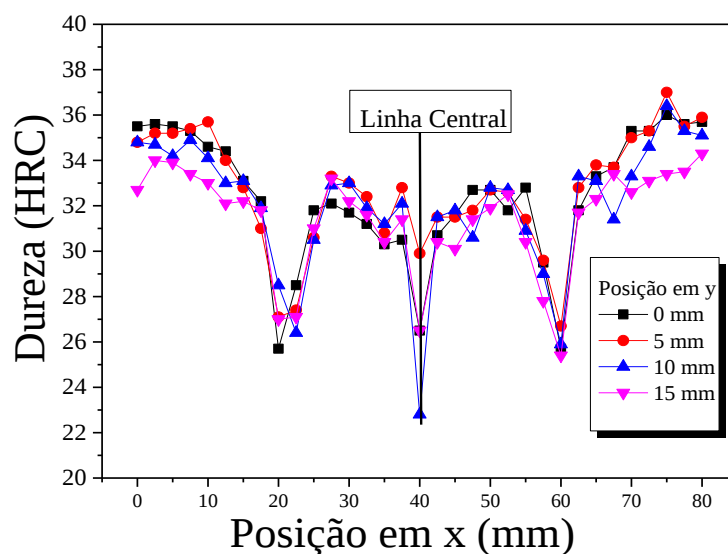


Figura 6. Perfil de dureza da junta soldada (Autores, 2012)

A Figura 6 evidencia a formação de “dentes de vampiro” que decorre do aporte térmico formado durante o processo de soldagem por centelhamento que condiciona mudanças estruturais, assim nas posições referentes a zona termicamente afetada há um decréscimo de dureza (Grigorenko *et al.*, 2016; Porcaro *et al.*, 2019; Sarikavak *et al.*, 2020). O trilho fora substituído da ferrovia pela presença de defeito de canoamento na região da linha central da união soldada que apresentou maior vales de diminuição da dureza, sobretudo na posição 10 mm, o que pode ser indicio da origem do surgimento do defeito, uma vez que há uma diferença de dureza. Diante disso, a região menor dureza é suscetível a formar esse tipo de defeito durante a interação roda trilho e o carregamento aplicado nessa região, fato este contribuído pela formação de estruturas diferentes do metal de base (Mutton *et al.*, 2016).

Ademais, literaturas como Porcaro *et al.* (2019) e Bauri *et al.* (2020) demonstram que a presença dos decréscimos de dureza são desafios no processo de desenvolvimento de soldagens em trilhos, que são consideradas regiões que facilitam a nucleação e propagação de trincas, fato esse que pode condicionar o desenvolvimento de defeitos como o que ocasionou a substituição do trilho avaliado nesta pesquisa.

3.3. Análise microestrutural

As diferenças microestruturais existentes na secção da junta soldada por centelhamento analisada evidenciam a presença de mudanças estruturais que são condizentes com as literaturas (Mutton *et al.*, 2016; Porcaro *et al.*, 2019; Bauri *et al.*, 2020). A Figura 7 demonstra o esquema das microestruturas obtidas por meio do microscópio óptico para as secções obtidas da amostra da junta.

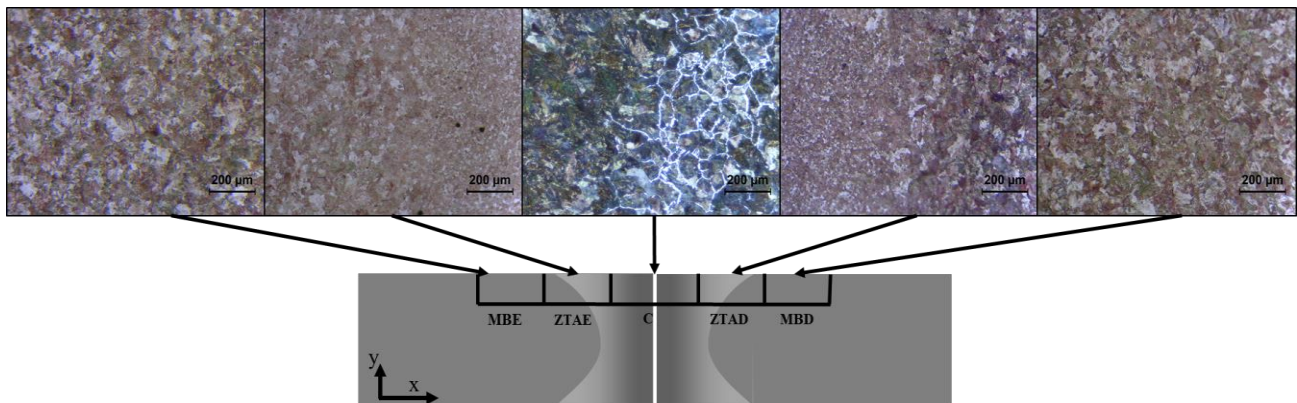


Figura 7. Esquema da microestrutura das áreas da junta soldada (Autores, 2021)

A linha central (C) presente na secção da Fig. 7, apresenta descarbonetação, caracterizadas como ferrita pelas literaturas Porcaro *et al.* (2019) e Sarikavak *et al.* (2020), enquanto nas zonas termicamente afetada (ZTA) é presente a transição na morfologia dos grãos, isto é, a formação de grãos mais refinados, os estão relacionados a diminuição localizada da dureza, ou seja, os “dentes de vampiro” (Mutton *et al.*, 2016). Além disso, o metal de base assim como as demais estruturas é proeminentemente de estrutura perlítica.

A Figura 8 apresenta análise da região da junta soldada em que se percebe na região circulada em amarelo a presença da linha de descarbonetação, a qual está no centro do defeito de canoamento. A descarbonetação pode ser considerada como uma das possíveis causas do desenvolvimento do defeito, uma vez que segundo Garnham, e Davis (2008) pode ocorrer em decorrência do processo de variação térmica oriunda da soldagem o qual gera ferrita pró-eutetóide que está associada à nucleação de trincas e defeitos por fadiga de contato de rolamento. Outrossim, na região circulada em vermelho tem-se outro defeito encontrado superficial, que surge da combinação da corrosão e da fadiga de contato de rolamento, o qual é denominado pela literatura de *pitting* (Datsyshyn e Panasyuk, 2001 e Su *et al.*, 2019).

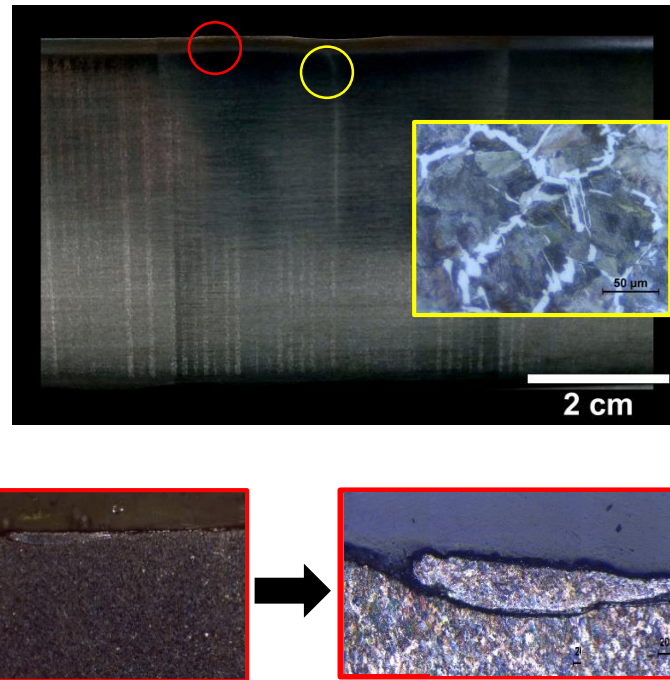


Figura 8. Análise dos defeitos presentes na secção da junta soldada (Autores, 2021)

A análise da microestrutura permitiu verificar a modificação da estrutura dos grãos do material como apresentado na Fig. 9. Nas Fig. 9.a e Fig. 9.b ficou evidente a estrutura do metal de base do trilho, já na Fig. 9.c e na Fig. 9.d é visto a região de refino de grão, enquanto na Fig. 9.e e na Fig. 9.f tem-se a região central ou região de união.

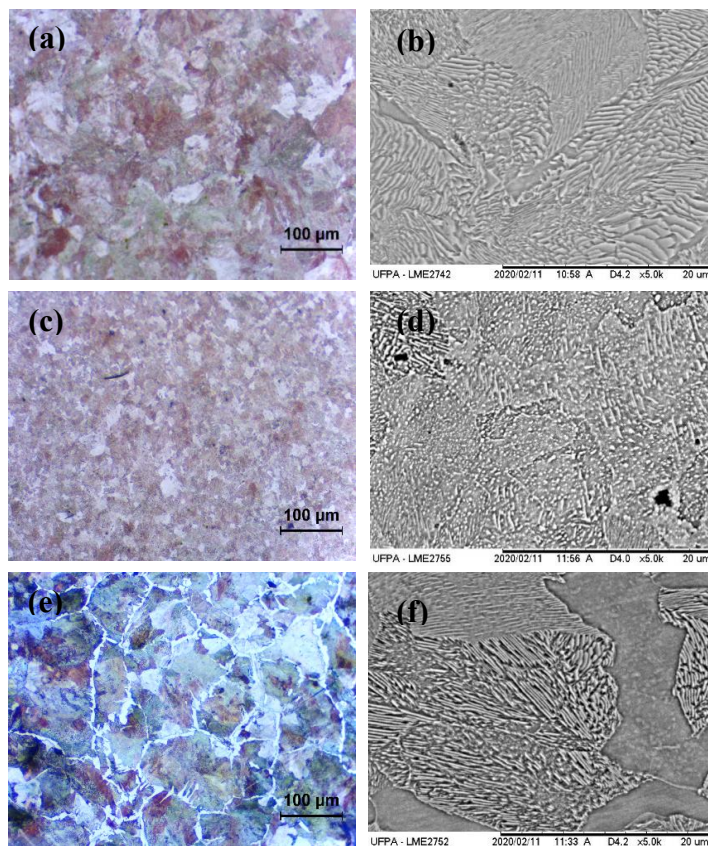


Figura 9. Comparação entre as microestruturas: (a) e (b) MB, (c) e (d) ZTA e (e) e (f) C, nas imagens a esquerda via MO e a direita via MEV (Autores, 2021)

A Figura. 9 destaca por meio das imagens via MEV a proeminência de estruturas perlíticas, contudo devido às variações no aporte térmico da soldagem ocorre mudanças estruturais como visto na Fig. 9.d, em que é possível notar a presença de esferiodização da perlita, a qual apresenta maior espaçamento interlamelar o qual apresenta relação inversamente proporcional a dureza que nessa região apresenta os maiores vales (Mutton *et al.*, 2016 e Porcaro *et al.*, 2019). Além disso, a descarbonetação da amostra como mostrada na Fig. 9.f, demonstra uma diferença estrutural nos contornos de grãos se comparado ao metal de base, o qual como já citado está ligado a presença de ferrita pró-eutetóide.

O trabalho de Porcaro *et al.* (2019) apresenta que a minimização dos problemas envolvendo a microestrutura e o dureza da junta solda é o controle das taxas de resfriamento durante o processo de soldagem por centelhamento, que pode garantir certa homogeneidade da dureza dessa região de união.

4. CONCLUSÃO

A caracterização do trilho ferroviário subtendido da estrada de ferro, possibilitou o entendimento dos mecanismos de desenvolvimento defeitos por fadiga de contato de rolamento em juntas soldadas por centelhamento. Ademais, a junta soldada estuda apresenta modificações pouco significativas na dispersão dos elementos de liga do trilho. Por conseguinte, a influência da modificação estrutural devido ao aporte térmico desenvolvido durante a soldagem condiciona, também, modificações nas propriedades mecânicas, tais como o surgimento de regiões de queda acentuada de dureza.

Por fim, o controle dos parâmetros durante o processo de soldagem, principalmente, no surgimento de esferiodização da perlita, tona-se condição crítica a melhoria da junta, assim garantindo homogeneidade da dureza durante a região, assim evitando canoamento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro e estrutural da Universidade Federal do Pará.

6. REFERÊNCIAS

- Anis, M. A., Srivastava, J. P., Duhan, N. R. e Sarkar, P. K., 2018. Rolling contact fatigue and wear in rail steels: An overview. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 377, No. 1, p. 012098). IOP Publishing.
- ANTF, 2018. “Ferrovias de carga e o futuro do Brasil. Propostas da ANTF para o novo governo 2019 2022”. 06 Jan. 2021 <<https://www.antf.org.br/wp-content/uploads/2018/09/Folder-presidencial4-v2-spread.pdf>>.
- Bauri, L. F., Alves, L. H. D., Pereira, H. B., Tschiptschin, A. P., & Goldenstein, H., 2020. “The role of welding parameters on the control of the microstructure and mechanical properties of rails welded using FBW”. Journal of Materials Research and Technology, Vol. 9, n. 4, p. 8058-8073.
- Callister JR, W. D.; Rethwisch, D. G., 2008. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC editora.
- Chaves, A. P. G, 2017. Rodas ferroviárias: análise, microestrutura e propostas de melhoria. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Datsyshyn, O. P. e Panasyuk, V. V. 2001. Pitting of the rolling bodies contact surface. Wear, Vol. 251, n. 1-12, p. 1347-1355.
- Garnham, J. E. e Davis, C. L. 2008. “The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation”. Wear, Vol. 265, n. 9-10, p. 1363-1372.
- Grigorenko, G., Kostin, V., Zhukov, V., & Zuber, T. (2016). “Peculiarities of structural transformations in HAZ metal of rail steel M76 joint produced by flash-butt welding”. Journal of Physical Science and Application, Vol. 6, n. 5, p. 54-65.
- Masoumi, M., de Lima, N. B., Tressia, G., Sinatora, A., e Goldenstein, H. 2019. “Microstructure and crystallographic orientation evolutions below the superficial white layer of a used pearlitic rail”. Journal of Materials Research and Technology, Vol. 8, n. 6, p. 6275-6288.
- Mutton, P., Cookson, J., Qiu, C. e Welsby, D. 2016. “Microstructural characterisation of rolling contact fatigue damage in flashbutt welds”. Wear, Vol. 366, p. 368-377.
- Ozavgul, K., Piroglu, F. e Caglayan, O, 2015. “An experimental investigation on flash butt welded rails”. Engineering Failure Analysis, Vol. 57, p. 21-30.
- Porcaro, R. R., Faria, G. L., Godefroid, L. B., Apolonio, G. R., Cândido, L. C. e Pinto, E. S. 2019. “Microstructure and mechanical properties of a flash butt welded pearlitic rail”. Journal of materials processing technology, Vol. 270, p. 20-27.
- Porcaro, R. R., Lima, D. A. P. D., Faria, G. L. D., Godefroid, L. B. e Cândido, L. C, 2017. “Microestrutura e propriedades mecânicas de um aço para trilhos ferroviários soldado por centelhamento”. Soldagem & Inspeção, Vol. 22, n. 1, p. 59-71.

- Sarikavak, Y., Turkbas, O. S., e Cogun, C, 2020. "Influence of welding on microstructure and strength of rail steel". Construction and Building Materials, Vol. 243, p. 118220.
- Schneider, E. L, 2005. Análise da Vida Remanescente de Trilhos com Defeitos Transversais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Su, C. R., Shi, L. B., Wang, W. J., Wang, D. Z., Cai, Z. B., Liu, Q. Y., & Zhou, Z. R. 2019. "Investigation on the rolling wear and damage properties of laser dispersed quenched rail materials treated with different ratios". Tribology International, Vol. 135, p. 488-499.
- Zhang, J., Zhang, X., Li, D., LV, Q. e Ma, R. 2019. "Extrusion behavior of impurities in upsetting process of rail flash butt welding based on finite element method". Journal of Materials Research, Vol. 34, n. 19, p. 3351-3360.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

INVESTIGATION OF THE DEFECT MECHANISM OF A RAILROAD RAIL WITH FLASH BUTT-WELDING

Abstract. *The expansion of the Brazilian railway modal is imminent to the development of transport logistics for various ores and grains in the country. In light of this, the research aims to analyze a track welded by replaced sparking of a railway due to the presence of surface defects. The sample was characterized by chemical and hardness analysis in the characteristic regions of the welded joint. In addition, microstructural evaluation was performed, with the aid of an optical microscope and scanning electron microscope (SEM). In this sense, it was obtained that the changes regarding the chemical elements in the sample were minimal, however the hardness showed substantial changes along the central line and the thermally affected zone. The microstructure showed the preponderance of pearlitic structure, presence of decarbonization and spheroidization in the HAZ. The effects of spark welding on the sample studied were shown to be a determining factor in the appearance of the defect found.*

Keywords: Rail. Welding. Defects. Microstructure. Toughness.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.