CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DE TRILHOS MODELO UIC60 COM SOLDA ALUMINOTÉRMICA

Gustavo Dantas Martins[1] (gustavodantasm97@gmail.com), João Vitor de Araújo Silva [2] (Joaovitorsilvaz@alu.ufc.br), David Diógenes Lopes [2] (daviddiogenes@alu.ufc.br), Diego Lima da Silva [2] (diegolima8414@gmail.com), Caio Victor de Sousa Thomas [2] (victorcaio5033@gmail.com)

[1] Universidade Federal do Ceará (UFC); Departamento de Engenharia Metalúrgica
[2] Universidade Federal do Ceará (UFC); Departamento de Engenharia Mecânica

RESUMO: *A manutenção e a preservação das grandes ferrovias são essenciais para garantir o transporte de mercadorias, por isso a soldagem aluminotérmica e as normas específicas são amplamente utilizadas para garantir a qualidade das soldas nos trilhos. Dito isso, o presente estudo busca realizar a caracterização microestrutural e avaliar algumas das propriedades mecânicas de um trilho modelo UIC60 que passou pelo processo de soldagem aluminotérmica, além de realizar uma comparação entre esse trilho soldado aluminotermicamente e outro trilho do mesmo modelo e fabricante, porém sem a soldagem aluminotérmica. Para isso, as propriedades mecânicas foram avaliadas por meio de ensaios de flexão estática e dureza Rockwell C. Já para observar a microestrutura dos aços que compõem os trilhos foram feitas metalografias, juntamente com o auxílio de microscopia ótica. Os resultados obtidos nos ensaios de flexão estática mostraram que o trilho com soldagem aluminotérmica apresentou uma maior resistência à flexão em comparação com o trilho sem solda. Já os ensaios de dureza evidenciaram que a Zona Afetada pelo Calor (ZAC) apresentou menor dureza em todas as sub-regiões analisadas em comparação com o Metal Base (MB). Por fim, o estudo microestrutural revelou uma microestrutura totalmente perlítica tanto no MB quanto na ZAC.*
PALAVRAS-CHAVE: *CARACTERIZAÇÃO, PROPRIEDADES MECÂNICAS, SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA, TRILHO VIGNOLE UIC60.*

MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION AND MECHANICAL BEHAVIOR OF UIC60 MODEL RAILS WITH THERMIT WELDING

ABSTRACT: *The maintenance and preservation of major railways are essential to ensure the transportation of goods, which is why aluminothermic welding and specific standards are widely used to guarantee the quality of rail welds. With that said, the present study aims to perform microstructural characterization and evaluate some mechanical properties of a UIC60 rail that underwent the aluminothermic welding process, as well as to compare this rail, which was welded using the aluminothermic process, with another rail of the same model and manufacturer but without aluminothermic welding. To do so, mechanical properties were evaluated through static bending tests and Rockwell C hardness. Metallography, along with optical microscopy, was conducted to observe the microstructure of the steels composing the rails. The results obtained from the static bending tests showed that the rail with aluminothermic welding exhibited higher flexural strength compared to the unwelded rail. The hardness tests revealed that the Heat-Affected Zone (HAZ) exhibited lower hardness in all analyzed sub-regions compared to the Base Metal (BM). Finally, the microstructural study revealed a fully pearlitic microstructure in both the BM and HAZ.*
KEYWORDS: *CHARACTERIZATION, MECHANICAL PROPERTIES, UIC60 VIGNOLE RAIL, ALUMINOTHERMIC WELDING.*

1. INTRODUÇÃO

As grandes ferrovias necessitam de constante manutenção, bem como de preservação. Por isso, a soldagem aluminotérmica é amplamente utilizada no desempenho desse papel. O processo de soldagem por aluminotermia possui benefícios ligados ao menor tempo para sua realização, além de que há uma maior flexibilização no seu uso em campo. Muitas vezes, sendo executadas sem a necessidade da paralisação das atividades da via. Outro fator que contribui para simplicidade e versatilidade da soldagem Aluminotérmica é a independência das fontes externas de energia, durante o processo de soldagem dos trilhos.

Nesse contexto, as diferentes normas presentes hoje visam avaliar a soldagem realizada nesses trilhos com o intuito de rejeitá-las ou aprová-las. Tais normas também determinam os tipos de ensaios, assim como a maneira que eles devem ser feitos, para garantir a qualidade da solda. Dentre as normas utilizadas, é possível citar a norma brasileira ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) 2011, a norma americana AREMA (*American Rail Way Engineering and Maintenance Standard Association*), entre outras (SCHIFINO *ET AL.* 2017).

Dito isso, os trilhos podem ser classificados em conformidade com a sua fabricação, bem como pelo peso nominal, propriedades mecânicas, composição química e pelo tipo de tratamento térmico empregado (BAURI, 2020). Dessa forma, as normas padronizadoras associadas aos ensaios de caracterização das propriedades dos trilhos tornam-se essenciais para garantir a integridade dos materiais, promovendo confiabilidade e segurança no desenvolvimento ferroviário.

Com base nesse cenário, este trabalho tem como objetivo principal a realização da caracterização microestrutural, bem como avaliar algumas das propriedades mecânicas de um trilho de fabricação modelo UIC60 que passou pelo processo de soldagem aluminotérmica. Além disso, pretende compará-lo com um trilho de mesmo modelo, mas sem a presença de solda.

Para isso, é preciso realizar a preparação metalográfica a fim de se obter a caracterização microestrutural do Metal Base e da Zona Afetada pelo Calor. Também é necessário observar as possíveis alterações e diferenças nas micrografias das amostras. Da mesma forma, é necessário avaliar a variação da dureza nas diferentes regiões que compõem o perfil do trilho, tais como o boleto, a alma e o patim, em busca de realizar um comparativo entre a dureza do metal base e a dureza da zona afetada pelo calor do trilho e comparar os resultados da dureza com os disponibilizados nas normas reguladoras.

Por fim, faz-se necessário realizar a avaliação das propriedades mecânicas a partir dos ensaios de flexão estática e dureza *Rockwell* C, nos trilhos modelo UIC60 com e sem soldagem aluminotérmica, a fim de se analisar a influência desse tipo de soldagem por meio de um

comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios de flexão estática em ambos os trilhos, bem como analisar se os resultados obtidos estão conforme as normas padronizadoras.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O objeto de estudo deste trabalho é um aço proveniente de um conjunto de trilhos de perfil Vignole, modelo UIC60, que é normalmente utilizado em ferrovias de cargas pesadas. Tal conjunto de trilhos foi cedido de um mesmo fornecedor para o desenvolvimento das análises e ensaios. Dado o contexto da origem do material, é possível enumerar os procedimentos que foram realizados durante esta pesquisa, os quais são:

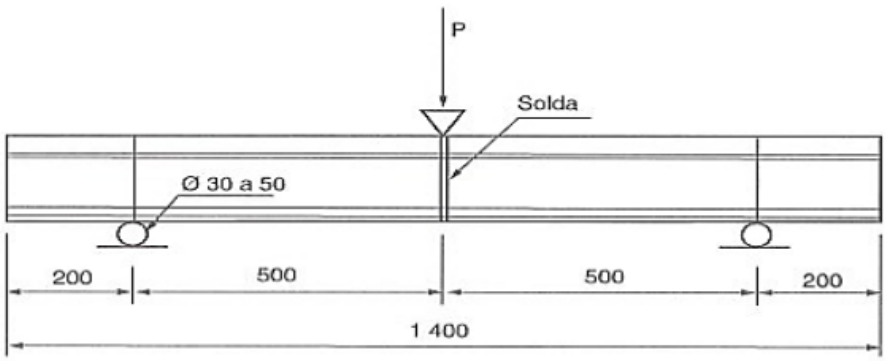
1. Ensaio de flexão estática;
2. Preparação metalográfica;
3. Caracterização microestrutural;
4. Ensaios de dureza.

2.1 Ensaio de Flexão Estática

O fundamento do ensaio de flexão estática, de acordo com a norma ABNT (2011), consiste em aplicar uma crescente carga no centro da solda até que haja a ruptura do trilho. Para isso, o sistema utilizado é composto de uma prensa macho, que incide sobre o centro da solda presente no boleto, dois roletes cilíndricos com diâmetros entre 30 mm e 50 mm, servindo de ponto de apoio para o trilho.

Tais roletes possuem seus centros separados por distância de 1000 mm, cujas dimensões à temperatura ambiente devem estar próximas dos 1400 mm. Vale salientar que o centro da solda deve estar a 500 mm de cada rolete. A figura 1 mostra como se dá a montagem desse sistema:

FIGURA 1: Sistemas trilhos - roletes - prensa e suas respectivas medidas em milímetros.



Fonte: ABNT (2011).

No ensaio de flexão estática seguiu-se os procedimentos descritos no documento: Procedimentos de Inspeção de Materiais PIM 18 - SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA, emitido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DENIT), do ano 2015.

Para o ensaio propriamente em si, utilizou-se a máquina WPM (*Werkstoff PrüfMaschinen Leipzig*), cuja capacidade da célula de carga era de 2.942 KN. Já os roletes presentes no carrinho-guia, onde os trilhos foram posicionados, possuíam diâmetro de 50 mm cada.

Diante disso, é necessário salientar que apesar da norma ABNT NBR 15997: 2011 prevê trilhos, cujo comprimento deve estar próximo da ordem de 1400 mm, o trilho que havia a solda tinha um comprimento de 1200 mm, enquanto o trilho sem solda tinha um comprimento de 1397mm. Entretanto, foi garantido uma distância de 500 mm entre o centro da solda e cada apoio, de modo que a distância que ultrapassou os roletes foi distribuída igualmente.

Após montar o sistema trilho-rolete sobre o carrinho guia, os trilhos foram levados até a posição acima do pistão, o qual tem a função de elevar o sistema e pressionar o trilho contra a prensa macho. Em seguida, a gaiola de segurança foi posicionada, de modo a cobrir todo o sistema, como mostra a Figura 2.

FIGURA 2: Gaiola de segurança sobre o sistema trilho - rolete - pistão.



Fonte: Autor (2023).

Com a gaiola posicionada sobre o sistema trilho-rolete-pistão e a prensa macho devidamente posicionada no centro da solda do trilho, o mesmo processo foi realizado para o trilho que não possuía soldagem aluminotérmica. A partir desse ponto, os ensaios foram iniciados. Primeiramente, ocorreu a elevação do pistão, localizado abaixo do carrinho guia, que sustenta o sistema trilho-roletes. Esse movimento foi direcionado para a prensa macho, a qual irá incidir sobre o centro do trilho ou da solda. Isso resulta na flexão dos trilhos, podendo levar à ruptura ou apenas à flexão dos mesmos

É necessário frisar que o ensaio no trilho com a solda aluminotérmica foi feito até que houvesse a sua ruptura, ao passo que o ensaio do trilho sem a presença da solda foi feito apenas objetificando flexioná-lo em 20 mm.

2.2 Preparação Metalográfica

Para a realização da preparação metalográfica foram feitas diferentes etapas para as variadas amostras obtidas dos cortes finos. Primeiramente uma amostra do boleto da região de Metal Base (MB) e uma amostra do boleto da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) foram utilizadas durante esse processo, totalizando duas amostras.

Sabendo disso, o processo foi realizado a partir da utilização de uma politriz metalográfica de velocidade variável, cujo modelo é o PPV300, da marca *Teclago*, como é possível visualizar na figura 3.

FIGURA 3: Politriz PPV300 utilizada na preparação.



Fonte: Autor (2023).

Para a realização do lixamento das amostras, o processo se deu com a utilização progressiva das lixas de 80, 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 *Mash* de granulometria. Vale salientar que durante o processo as amostras ficam posicionadas de formas estática sobre a superfície rugosa da lixa, enquanto a mesma realizava o movimento de rotação proporcionado pela politriz, sendo que a

cada mudança de lixa, as amostras foram posicionadas de maneira contrária aos riscos causados pela lixa anterior, ou seja, as amostras são rotacionadas em 90°.

Dessa forma, garantindo que se alcançasse uma superfície totalmente plana e livre de riscos profundos, que eventualmente poderiam dificultar o prosseguimento do processo, até que se chegasse a granulometria final de 1200 *Mash*.

Após finalizado o lixamento das amostras, foi possível iniciar a segunda etapa, que consiste na realização do polimento da superfície das amostras. Diferentemente do lixamento, em que as amostras permaneciam estáticas, enquanto a lixa realizava o movimento de rotação, no caso do polimento foi necessário realizar o movimento de rotação das amostras no sentido contrário ao movimento de rotação do pano de polimento.

O processo se caracterizou basicamente por utilizar pastas de diamante com diferentes granulometrias, um diluidor da pasta, que nesse caso foi água destilada, panos de polimento para cada granulometria e um microscópio ótico, com o objetivo de analisar os riscos presentes nas amostras durante o polimento.

Diante disso, o processo se iniciou com a utilização da pasta de diamante de 6 mícron, seguido pelo polimento com as pastas de 3 e 1 mícron, respectivamente. No processo de polimento foi utilizado a mesma politriz do processo de lixamento, se diferenciando apenas pelo uso de panos de polimento ao invés de lixas d’agua. É necessário frisar que cada pasta com sua respectiva granulometria foi preciso utilizar panos de polimentos individuais, uma vez que a utilização do mesmo pano para diferentes granulometrias de pasta causaria a contaminação dos panos e consequentemente o processo não seria eficaz.

O procedimento de polimento teve fim quando a superfície das amostras alcançou uma aparência visualmente espelhada, bem como não apresentou a presença de riscos orientados ou profundos quando observadas ao microscópio óptico.

Com o fim do polimento, a terceira etapa do processo de caracterização microestrutural foi feita, a qual foi realizado o ataque químico das amostras, com o intuito de revelar a microestrutura dos corpos de prova, por meio do contraste causado pela imersão das superfícies polidas durante, aproximadamente, 5 segundos, em uma solução a base de ácido nítrico e álcool etílico, chamada de Nital, no caso da solução utilizada a quantidade de ácido nítrico foi de 2%.

Logo após o ataque, a superfície das amostras foi neutralizada, utilizando água corrente, sendo secadas rapidamente com o auxílio de álcool e um secador, dessa forma, evitando a oxidação da superfície atacada. É importante frisar que todo o processo foi realizado dentro de uma capela, onde a dissipação dos gases ocorreu de forma correta, bem como o uso de EPI’s como luvas, jaleco, sapatos adequados e óculos, objetificando evitar possíveis acidentes, foi feito corretamente.

2.3 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural se deu após o fim da preparação metalográfica em que as amostras depois de atacadas tiveram suas micrografias capturadas utilizando um Microscópio *Leica* DMI 3000M acoplado a um computador, o qual através do *software* de edição de imagens *Leica Aplications Suite V4.9*. Dessa forma, sendo possível identificar, posteriormente, os microconstituintes presentes na microestrutura do material. Na figura 4 é possível visualizar o microscópio e computador utilizados durante o processo.

FIGURA 4: Microscópio *Leica* DMI 3000M acoplado a um Computador.

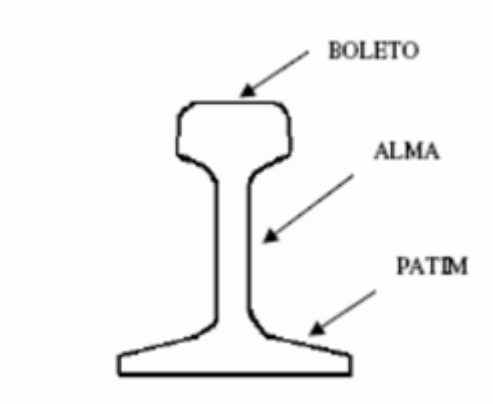


Fonte: Autor (2023).

2.4 Dureza

A realização do ensaio de flexão estática citado anteriormente já foi uma forma de se obter determinadas características das propriedades mecânicas do material empregado nos trilhos. Entretanto, com o intuito de aprofundar os estudos a respeito das características mecânicas do material, foi realizada a medição da dureza das amostras que abrangiam a região do boleto, alma e patim dos trilhos. Na Figura 5 está a representação do perfil do trilho e suas sub-regiões.

FIGURA 5: Perfil Vignole.



Fonte: ROSA (2008).

Vale frisar que antes de iniciar o ensaio de dureza propriamente dito foi necessário realizar o lixamento das amostras progressivamente nas granulometrias de 80, 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 *Mash*, com o objetivo de garantir a planicidade da superfície e a adequada normalidade entre superfície e penetrador.

A partir disso, para obtenção da dureza das amostras foi realizado o ensaio *Rockwell C*, de acordo com a norma ASTM E 18 - 05, que consiste em aplicar, primeiramente, uma pré-carga de 10 kgf sobre a amostra, de modo a garantir um contato firme entre o material que está sendo ensaiado e o penetrador, em seguida, aplica-se a carga de 150 kgf que de fato irá conduzir o ensaio.

Esse método tem como vantagem a leitura direta no próprio visor acoplado no durômetro, de acordo com a escala previamente escolhida, que no caso dos ensaios conduzidos neste trabalho foi a escala C, a qual se utiliza um penetrador de diamante com 120° de conicidade. Vale salientar que o ensaio *Rockwell C* é ideal para materiais que possuem uma faixa de dureza que varia entre 20 e 70 HRC, dentre esses materiais é possível citar o aço, o 56 titânio e aços com camada endurecida profunda. No caso do material em estudo, é sabido que se trata de um aço, dessa forma, o ensaio *Rockwell C* é apropriado para o tipo de material em questão.

Para a realização do ensaio foram feitas 10 indentações na superfície de cada amostra, de modo que as três primeiras foram descartadas, uma vez que as leituras iniciais podem provocar erros na leitura final da dureza do material. Dito isso, após descartar as três leituras iniciais, foi realizada a média aritmética com os sete valores finais de cada amostra, dessa forma, obtendo-se as durezas dos corpos de prova estudados. O Durômetro *Rockwell* utilizado para obtenção dos valores de dureza está disposto na Figura 6.

FIGURA 6: Durômetro *Rockwell*.



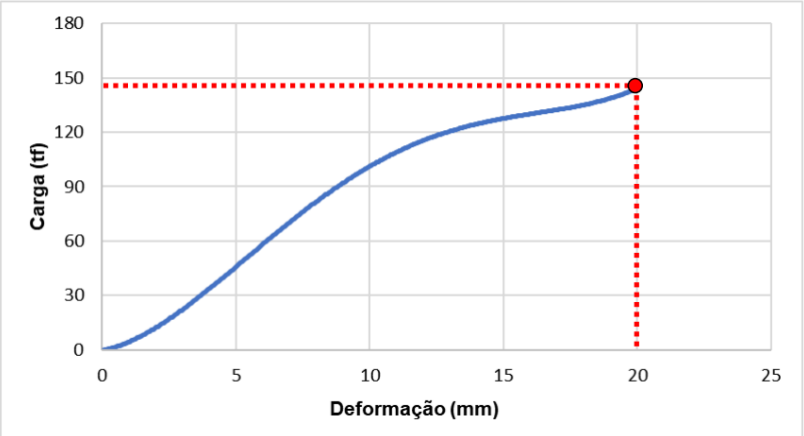
Fonte: Autor (2023).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de flexão estática puderam favorecer a obtenção dos gráficos de Carga (Tonelada-Força) por Deslocamento (Milímetros) para um trilho livre de soldagem, contendo apenas o material base e para um trilho com a presença de soldagem aluminotérmica. Na figura 7 e 8 é possível conferir ambos os gráficos, respectivamente.

Em ambos os gráficos presentes nas Figuras 7 e 8, foi comparado os resultados para uma deformação de 20 milímetros. Dito isso, o resultado do trilho sem a presença de soldagem aluminotérmica mostrou que para uma deformação de 20 milímetros foi necessário a aplicação de uma carga de 142 tnf ou 1392,5 kN.

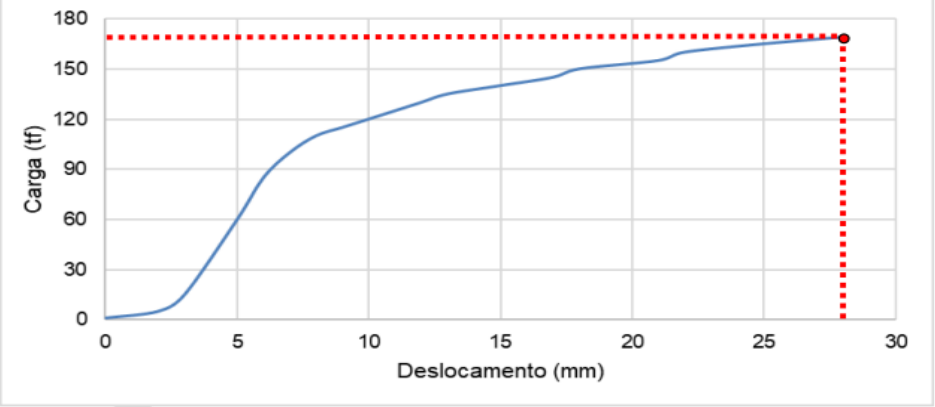
FIGURA 7: Gráfico carga-deslocamento para trilho sem solda.



Fonte: Autor (2023).

Já em relação aos resultados do trilho com a presença de solda aluminotérmica o valor de carga que resultou na deformação de 20 milímetro foi de 153 tnf ou 1500,4 kN.

FIGURA 8: Gráfico carga-deslocamento para trilho com solda.



Fonte: Autor (2023).

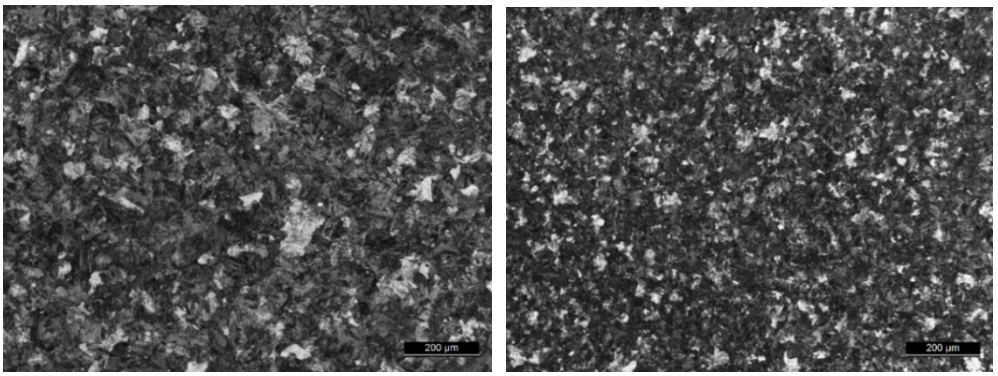
Dessa forma, os resultaram evidenciaram que o trilho com soldagem aluminotérmica possui uma maior resistência à flexão quando comparado ao trilho que possui apenas Metal Base, isso evidencia que o trilho soldado possui uma menor tenacidade, visto que necessitou de uma maior carga para que houvesse a mesma deformação sofrida pelo trilho sem solda.

Além disso, ao observar os gráficos presentes nas figuras 7 e 8 é possível perceber que há uma maior região de deformação linear para o trilho sem solda, enquanto há uma menor região de deformação linear para o trilho soldado. Diante disso, os gráficos apresentam um maior coeficiente angular para o trilho com solda

Entretanto, apesar de ter havido essa diferença entre os valores de carga, a norma americana ABNT (2011) dispõe dos valores de carga de ruptura mínima em Quilonewtons (kN) para os diferentes tipos de trilhos. No caso do trilho UIC60 a carga de ruptura mínima é de 1200 kN. Diante disso, os trilhos com a presença da soldagem aluminotérmica, bem como contendo apenas material base estão dentro da faixa esperada de segurança garantida pela norma.

Nas Figura 9 (a) e 10 (a) está disposto a microestrutura do boleto da região de Metal Base, enquanto a Figura 9 (b) e 10 (b) dispõe da microestrutura do boleto da Zona Afetada pelo Calor. É possível observar na micrografia do boleto do Metal base [Figura 9 (a)] a presença de uma microestrutura perlítica, em que os grãos possuem uma maior granulometria quando comparados com a microestrutura, também perlítica, da Zona Afetada pelo Calor, ocasionado devido ao gradiente de temperatura do processo de soldagem aluminotérmica.

FIGURA 9: (a) Boleto Metal Base (b) Boleto ZAC – 200µm



(a) (b)

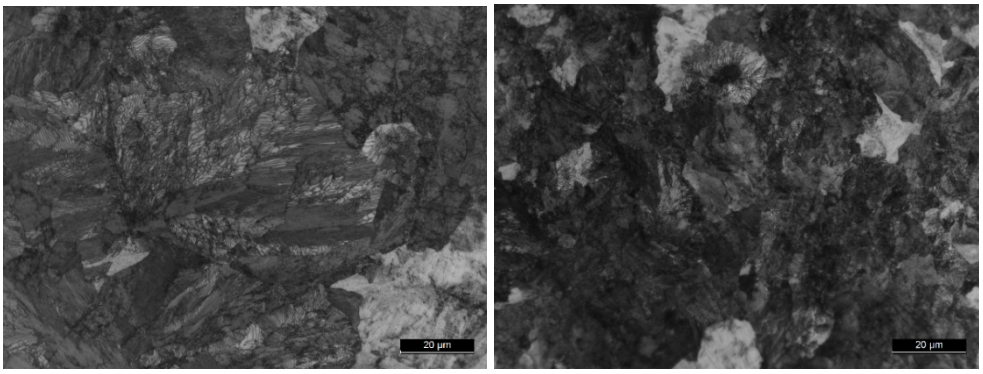
Fonte: Autor (2023).

Vale salientar que essa diferença na granulometria afeta propriedades mecânicas do material, como é o caso da dureza. [Figura 9 (b)]. A variação do tamanho de grãos apresentado na ZAC, está associado com processos de recristalização da microestrutura, como foi também observado na literatura (ROSA,2008; SHIFINO, 2017; YANG LIU, 2021).

A literatura também cita que os microconstituintes como bainita e martensita, bem como a ferrita de morfologia circular, chamada de fase *Widmanstatten* são indesejáveis, uma vez que causam a fragilização do material.

Tais fases não foram identificadas na microestrutura presentes nas Figuras 9 e 10. Ademais, a presença de ferrita livre em pequenas quantidades presentes nos contornos de grão como identificadas na literatura não foram identificadas nas metalografias das Figuras 9 e 10.

FIGURA 10: (a) Boleto Metal Base (b) Boleto ZAC – 200µm.

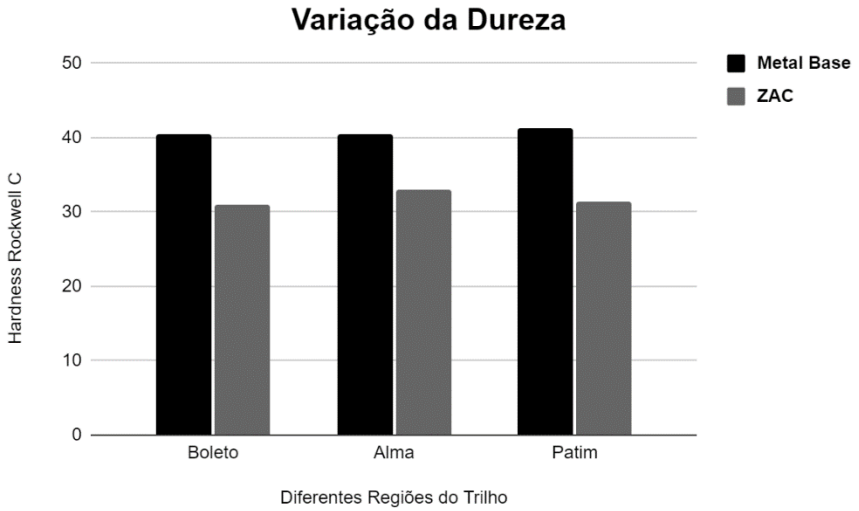


(a) (b)

Fonte: Autor (2023).

O gráfico da Figura 11 dispõe dos valores de dureza *Rockwell C*, tanto da região do Metal Base quanto da Zona Afetada pelo Calor, bem como de suas respectivas sub-regiões. Dito isso, a região de Metal Base apresentou os seguintes resultados: 40,43 HRC para o boleto, 40,45 HRC para a alma e 41,29 HRC para o patim. Já em relação a Zona Afetada pelo Calor, o boleto, alma e patim apresentaram 31,00 HRC, 33,00 HRC e 31,44 HRC, respectivamente.

FIGURA 11: Gráfico da variação da dureza Rockwell C do Metal Base e da ZAC.



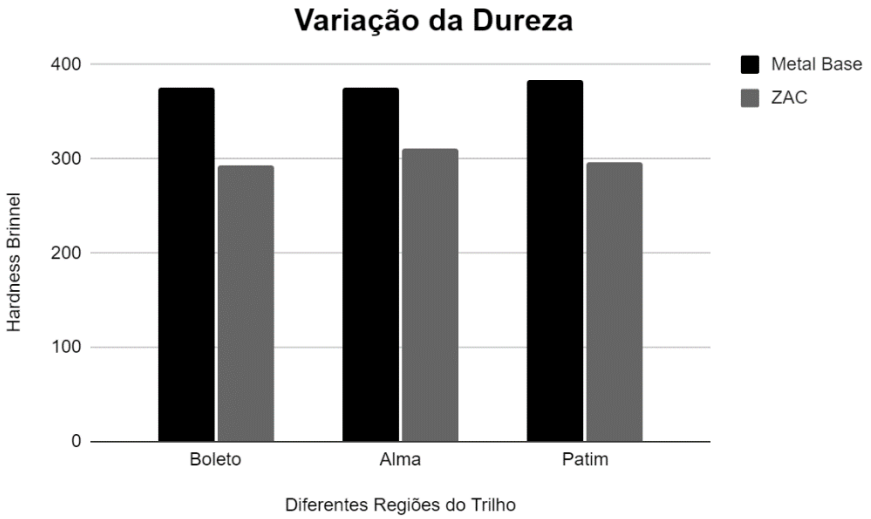
Fonte: Autor (2023).

A partir disso, pode-se perceber que não houve uma grande variação entre as durezas das sub-regiões (boleto, alma, patim) de cada região (metal base e zona afetada termicamente) do trilho, mas quando comparado à mesma sub-região, de regiões diferentes, percebe-se que há uma grande diferença entre elas, e isso ocorre para todas as sub-regiões, havendo uma diferença de aproximadamente 10 HRC do boleto do Metal Base para o boleto da ZAC, por exemplo.

De acordo com a literatura (MYERS; GEIGER; POIRIER, 1982; YANG LIU, 2021), é conhecido que existe essa diferença na dureza, sendo a ZAC que precede a região de Metal Base, a região com a menor dureza quando comparado com Metal Base e o Metal Soldado. Essa menor dureza pode ser explicada devido ao fenômeno de esferoidização das lamelas de cementita que ocorre em regiões mais distantes do centro da solda, predominantemente na região intercrítica e subcrítica da Zona Afetada pelo calor (NISHIKAWA, 2018; YANG LIU, 2021).

Ademais, uma vez que a dureza *Brinnel* é comumente utilizada para estabelecer os valores de dureza dos trilhos, os resultados citados acima foram convertidos de Dureza *Rockwell C* para dureza *Brinnel*, utilizando-se as tabelas de conversão existentes para isso. Na Figura 12 está disposto um gráfico com esses valores.

FIGURA 12: Gráfico da variação da dureza *Brinnel* do Metal Base e da ZAC.



Fonte: Autor (2023).

Ao observar o gráfico da figura 12 é possível perceber que a região de Metal Base apresentou os seguintes resultados: 375 HB para o boleto, 375 HB para a alma e 383HB para o patim. Já em relação a Zona Afetada pelo Calor, o boleto, alma e patim apresentaram 294 HB, 311 HB e 297 HB, respectivamente.

Diante desses valores, quando comparamos os valores de dureza dispostos na norma Americana AREMA à dureza do Metal Base, percebe-se que os trilhos, cujas durezas variam de 375 HB a 383 HB, enquadram-se nos aços tratados de Alta Resistência (*High Strength*), que possuem uma dureza mínima de 370 HB.

4. CONCLUSÃO

Devido a importância do setor ferroviário na realização do transporte de cargas pesadas, faz-se necessário a utilização de métodos eficientes de soldagem que possam atender as solicitações de projeto desse setor. Dessa forma, a soldagem aluminotérmica passa a exercer um papel fundamental nesse contexto, uma vez que esse tipo de técnica possui inúmeras vantagens quando se trata de soldagem em campo, por exemplo, o fato de se caracterizar como um processo independente de fontes externas.

Os processos de soldagem estão associados tanto na manutenção quanto na instalação das vias férreas, promovendo diferentes impactos nas propriedades e microestrutura dos aços presentes nos trilhos. A partir disso, o objetivo geral deste trabalho realizar a caracterização microestrutural e avaliar algumas das propriedades mecânicas de um trilho modelo UIC60 que

passou pelo processo de soldagem aluminotérmica, além de realizar uma comparação entre esse trilho soldado aluminotermicamente e outro trilho do mesmo modelo e fabricante, porém sem a soldagem aluminotérmica

Diante disso, os resultados obtidos evidenciaram que as microestruturas observadas nas metalografias das amostras mostraram uma microestrutura perlítica tanto no metal base quanto na Zona Afetada pelo Calor. O tamanho dos grãos na Zona Afetada pelo Calor é menor devido aos processos de recristalização da microestrutura. Não foram identificados microconstituintes indesejáveis, como bainita, martensita, bem como não foi observado ferrita livre nos contornos do grão.

Ademais, os ensaios de flexão estática indicaram que o trilho com soldagem aluminotérmica apresenta maior resistência à flexão em comparação com o trilho sem solda. No entanto, ambos os trilhos estão dentro da faixa de carga de ruptura mínima estabelecida pela norma AREMA.

Por fim, a análise de dureza mostrou diferenças significativas entre as regiões do metal base e da zona afetada pelo calor. A zona afetada pelo calor apresentou menor dureza em todas as sub-regiões analisadas, o que está possivelmente ligado ao fenômeno de esferoidização das lamelas de cementita que ocorre em regiões mais distantes do centro da solda, predominantemente na região intercrítica e subcrítica da Zona Afetada pelo calor. Os valores de dureza do Metal Base (375 HB a 383 HB) se enquadram na categoria de aços tratados de Alta Resistência, de acordo com a norma AREMA.

Em resumo, os resultados indicam que a soldagem aluminotérmica pode aumentar a resistência à flexão e promover uma variação de dureza para diferentes regiões dos trilhos, enquanto a microestrutura se mantém dentro dos padrões esperados para trilhos de transporte de carga pesada.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. ABNT NBR 7590: Trilhos Vignole**, 1991.

AMERICAN RAILWAY ENGENEERING AND MAINTENANCE OF WAY ASSOCIATION. **AREMA,** v. 1. Lanham, 2010.

BAURI, Luiz Felipe. **Soldagem de topo com centelhamento de trilhos ferroviários: caracterização microestrutural, propriedades mecânicas e desgaste.** 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LIU, Yang; TSANG, Kim Shun; ZHI’EM, Eddie Tan; SUBRAMANIAM, Nellian Alagu; PANG, Jhon Hock Lye. Investigation on material characteristics and fatigue crack behavior of thermite welded rail joint. **Construction and Building Materials**, v. 276, p.122249, 2021.

MYERS, J.; GEIGER, G. H.; POIRIER, D. R. Structure and Properties of Thermite Welds in Rails.

Welding Journal, v. 61, n. 8, p. 258-268, 1982.

NISHIKAWA, Lucas Pintol**. Soldagem de trilhos ferroviários perlíticos: origem das microestruturas**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ROSA, Julio Cesar da Silva. **Avaliação de solda aluminotérmica em ângulo.** Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

SCHIFINO, Alessandra Regina Machado; REGULY, Afonso. Análise crítica das normas utilizadas em ensaios de trilhos soldados aluminotermicamente. **Revista Ciência e Tecnologia** [recurso eletrônico]. Campinas. Vol. 20, n. 37 (jul./dez. 2017), p. 93-104, 2017.

CERRA FLOREZ, M. A. Estudo comparativo da resistência à corrosão entre aços alto manganês e o aço 9% níquel em soluções aquosas de H2SO4 e NaCl. 2017. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.