



International Conference for
Academia and Industry Co-operation

20/11/2023 – 24/11/2023

São Luís - Maranhão - Brasil



International Meeting in Materials
Science and Engineering of Maranhão

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DE TRILHOS UIC 60 COM SOLDA ALUMINOTÉRMICA

CHARACTERIZATION STUDY OF UIC 60 RAILS WITH ALUMINOTHERMIC WELDING

Thomas da S. Oliveira¹, Mauro A. C. Florez², Davi M. Aires³, Sérgio Y. R. Soares^{1*}

1 – Laboratório de Ensaio Mecânicos - LEM, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais -
DEMM, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil.
Brasil.

sergiorodrigues@alu.ufc.br

RESUMO

O transporte ferroviário desempenha um papel importante na infraestrutura de muitos países, incluindo o Brasil, onde possui uma extensa malha ferroviária. A evolução dos trilhos de trem ao longo dos anos incluiu o uso da soldagem, que permitiu a criação de trilhos contínuos de aço, eliminando juntas mecânicas. A solda aluminotérmica é amplamente utilizada na fabricação e manutenção de trilhos, permitindo a união de trilhos de diferentes tamanhos e espessuras. No entanto, é necessário analisar cuidadosamente o comportamento mecânico desses trilhos soldados. Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento mecânico de trilhos com solda aluminotérmica por meio de ensaios de flexão estática. Os resultados mostraram que o processo de solda aluminotérmica apresenta um comportamento mecânico satisfatório, com resistência à flexão dentro dos limites estabelecidos pela norma. Além disso, a zona afetada termicamente apresentou uma estrutura com maior refino em comparação ao metal base, mas com valores de dureza similares. Essas informações contribuem para o aprimoramento do conhecimento sobre o comportamento mecânico de trilhos com solda aluminotérmica, auxiliando no desenvolvimento de novas tecnologias de soldagem e na identificação de possíveis problemas de desempenho dos trilhos e maior segurança.

Palavras-chave: Trilhos. Solda aluminotérmica. Comportamento mecânico. Flexão estática. Zona afetada termicamente.

ABSTRACT

Rail transportation plays an important role in the infrastructure of many countries, including Brazil, where it has an extensive railway network. The evolution of train tracks over the years has included the use of welding, which allowed the creation of continuous steel rails, eliminating mechanical joints. Thermit welding is widely used in the manufacturing and maintenance of rails, allowing the joining of rails of different sizes and thicknesses. However, it is necessary to



International Conference for
Academia and Industry Co-operation

20/11/2023 – 24/11/2023

São Luís - Maranhão - Brasil



International Meeting in Materials
Science and Engineering of Maranhão

carefully analyze the mechanical behavior of these welded rails. This study aimed to investigate the mechanical behavior of rails with thermit welding through static bending tests. The results showed that the thermit welding process exhibits satisfactory mechanical behavior, with bending strength within the limits established by the standard. Furthermore, the heat-affected zone exhibited a structure with finer refinement compared to the base metal, but with similar hardness values. This information contributes to the improvement of knowledge regarding the mechanical behavior of rails with thermit welding, aiding in the development of new welding technologies and the identification of possible performance issues of the rails for enhanced safety. (Fonte

Keywords: *Rails. Aluminothermic welding. Mechanical behavior. Static bending. Heat-affected zone.*

INTRODUÇÃO

A ferrovia é um sistema de transporte que se baseia na locomoção de veículos com rodas metálicas, como motores ou rebocados, sobre trilhos metálicos que são os elementos principais da superestrutura e serve como apoio e superfície de rolamento para as rodas dos veículos ferroviários. Existem diferentes tipos de trilhos, classificados de acordo com sua massa nominal em kg/m e composição química [1][2][3][4][5][6][7][8]. O trilho tipo Vignole é o mais comum devido à sua confiabilidade. Os trilhos podem ser laminados ou tratados termicamente, sendo os tratados termicamente amplamente utilizados para transporte pesado. Eles são feitos de aço com composição próxima a eutetóide de carbono e podem ser submetidos a tratamentos térmicos para produzir uma microestrutura fina de perlita. O trilho UIC é um dos padrões mais comuns na indústria ferroviária [4][5][6][7][8][10]. A soldagem de trilhos é uma técnica utilizada para unir as extremidades dos trilhos, permitindo a criação de trilhos contínuos. Trilhos longos soldados (TLS) são trilhos que atendem às condições necessárias para a soldagem contínua, proporcionando benefícios técnicos e econômicos, como a redução de juntas, que são pontos fracos na via férrea que podem causar defeitos e acidentes. Um dos métodos utilizados para a soldagem in situ de trilhos é a soldagem aluminotérmica. Esse processo consiste na reação exotérmica entre pó de alumínio e um óxido metálico, gerando altas temperaturas e calor, trata-se de um método amplamente aplicado em situações que outros tipos de soldagem não são adequados ou flexíveis. Uma das principais vantagens desse processo é a capacidade de ser autossustentável, podendo ser realizado com ou sem pressão [12]. A soldagem aluminotérmica envolve diversas etapas, incluindo a definição da folga entre as extremidades dos trilhos, o alinhamento das extremidades, a montagem de uma forma refratária ao redor da folga e o pré-aquecimento das extremidades do trilho. A reação é iniciada em um cadinho, onde ocorre a fusão do pó de alumínio com o óxido metálico, formando a solda líquida que preenche a folga entre as extremidades dos trilhos. Após a solidificação do aço, os resíduos da solda são removidos e é realizado um processo de esmerilhamento para obter a superfície desejada. Como esse processo utiliza reações específicas entre o óxido metálico e o alumínio, cada reação libera uma quantidade específica de calor, permitindo a seleção da reação adequada para soldar diferentes tipos de trilhos [12]. Na soldagem, o pré-aquecimento das juntas a uma temperatura próxima ou ligeiramente acima das temperaturas comumente utilizadas na normalização dos aços ajuda a uniformizar a estrutura dos trilhos, regularizar o tamanho do grão e obter uma constituição do eutetóide mais fina. Essas alterações



International Conference for
Academia and Industry Co-operation

20/11/2023 – 24/11/2023

São Luís - Maranhão - Brasil



International Meeting in Materials
Science and Engineering of Maranhão

resultam em uma estrutura quase eutetóide, que é desejável para garantir a resistência e a durabilidade dos trilhos soldados [12][13].

MATERIAIS E MÉTODOS

Procedimento de Corte das Amostras do Metal Base e de Corte das Amostras da Região da Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

Utilizando uma serra-fita, foi feito um corte transversal de 17 mm no Laboratório Máquinas Operatrizes (LMO) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). A partir desse corte, foram feitos três cortes adicionais para dividir o material em boleto, alma e patim. Esses cortes foram realizados com uma serra-fita no Laboratório de Pesquisa e Corrosão (LPC) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Em seguida, foram retiradas amostras do boleto, da alma e do patim utilizando uma cortadora cutoff, também no LPC. Utilizando uma serra de fita no LMO do IFCE um corte transversal de 27 mm. Em seguida, é realizado um corte central com a mesma serra de fita no LMO do IFCE. Posteriormente, são retiradas amostras do boleto, da alma e do patim utilizando a cortadora cutoff no LPC.

Ensaio de Dureza do Metal Base e da Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

As amostras do metal base e da ZAC são lixadas até a 600 mesh na politriz no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) da UFC. São realizados dez ensaios de dureza Rockwell na escala C em cada uma das amostras (boleto, alma e patim), totalizando trinta ensaios. Cada peça é submetida a dez ensaios. Para obter a dureza média, são eliminados três resultados de acordo com os requisitos descritos na norma [14].

Análise da Composição Química do Metal Base e da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e simulação no Thermo-Calc®

As amostras são lixadas até a malha 600 em uma politriz no LEM. A análise de composição química das amostras é realizada na máquina de microscópio de emissão óptica no LEM. Para a simulação no software Thermo-calc®, são utilizados os dados da composição química do metal base e da ZAC para obter os resultados dos cálculos termodinâmicos.

Metalografia do Metal Base e da Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

Duas amostras são obtidas do metal base e da ZAC utilizando uma cortadora cutoff no LEM. As amostras são embutidas com a embutidora metalográfica e, em seguida, as superfícies das amostras embutidas são lixadas progressivamente até a malha 1200, posteriormente polidas até 3 µm. Para revelar as características microestruturais das amostras são submetidas a um ataque químico utilizando uma solução de Nital 2%. O tempo de imersão das amostras no Nital varia de acordo com o material, sendo quatro segundos para o metal base e três segundos para a ZAC. As amostras são levadas para um microscópio óptico no LPC. As imagens obtidas são utilizadas para análises quantitativas e qualitativas da microestrutura do material. O software ImageJ® é utilizado para a análise quantitativa dos grãos.



Ensaio de flexão estática

O ensaio de flexão estática em trilhos é realizado na máquina de ensaio WPM seguindo as normas [9][11]. A posição da solda é medida para a amostra com solda aluminotérmica e posicionada no centro para a amostra sem solda. A distância em relação às extremidades é de 500 mm. Os trilhos são posicionados de forma que a flecha superior fique no centro da solda e cada flecha inferior fique a 500 mm de distância do centro, utilizando um martelo de borracha. A amostra é submetida a um teste de flexão estática, aplicando gradualmente uma carga no centro da solda até que ocorra a ruptura no cordão de solda para a amostra com solda aluminotérmica e até que ocorra uma flexão de 20 mm para a amostra sem solda. O ensaio de flexão estática para amostras UIC 60 deve atingir um valor mínimo de carga de ruptura de 1200 kN, conforme a tabela apresentada na norma [9][11].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dureza

Os resultados das identações do metal base e metal da ZAC são apresentados respectivamente na Tabela 1.

Tabela 1: Resultado da dureza do metal base e do metal da ZAC.

Dureza média - Metal Base											
Componente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Dureza média
Boleto (HRC)	39	41	40	40	41	41	41	40	41	40	40,6
Alma (HRC)	41	40	40	41	41	40	41	40	40	40	40,4
Patim (HRC)	43	43	42	44	44	44	43	43	43	42	43,3
Dureza média - Metal da ZAC											
Componente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Dureza média
Boleto (HRC)	37	36	35	36	37	37	37	38	37	38	37,1
Alma (HRC)	37	37	38	37	37	35	44	44	41	37	39,3
Patim (HRC)	35	37	37	40	37	38	39	39	37	40	38,6

Composição Química

Os resultados da análise da composição química do metal base e metal da ZAC são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química do metal de base e do metal da ZAC.

Composição química do Metal de Base																
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	Al	Pb	V	Ti	Feint	Fe%
Boleto	0,936	0,213	1,177	0,012	0,015	0,234	0,192	0,064	0,054	0,006	0,006	0,000	0,004	0,003	57,705	97,084
Alma	0,887	0,212	1,009	0,011	0,015	0,232	0,190	0,067	0,050	0,005	0,007	0,000	0,004	0,003	57,307	97,307
Patim	0,924	0,215	1,178	0,011	0,016	0,261	0,201	0,066	0,048	0,005	0,025	0,000	0,004	0,004	54,791	97,041
Composição química do Metal da ZAC																
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	Al	Pb	V	Ti	Feint	Fe%
Boleto	0,946	0,213	1,172	0,012	0,014	0,233	0,192	0,064	0,052	0,005	0,006	0,000	0,004	0,003	57,701	97,084
Alma	0,870	0,211	1,161	0,011	0,013	0,232	0,190	0,063	0,050	0,004	0,005	0,000	0,003	0,003	60,927	97,184
Patim	0,941	0,211	1,167	0,010	0,015	0,232	0,189	0,061	0,048	0,004	0,005	0,000	0,003	0,003	57,237	97,113

Resultados dos cálculos termodinâmicos

Foram realizadas simulações das frações de massa das fases pela temperatura com base nos dados de composição química do metal base e do metal da ZAC (Tabela 2). A partir das simulações, observou-se que durante a faixa de temperatura acima de 800°C a 1000°C, que corresponde à temperatura mínima de pré-aquecimento da solda, ocorre a completa austenitização do aço.

Metalografia

Foram realizadas análises metalográficas das amostras do metal base e do metal da ZAC. As micrografias das amostras estão ilustradas nas Figuras 1-2. A microestrutura observada nas imagens é composta por um microconstituente perlítico, com regiões mais escuras representando a ferrita e regiões mais claras correspondendo à cementita. Além disso, ao redor da estrutura lamelar, é visível uma estrutura com contraste sólido mais claro, identificada como cementita pró-eutetóide devido à natureza hipereutetóide do aço.



Fig 1: Micrografia da amostra do metal base após ataque químico com Nital 2%. Aumento de 200x. Fonte: (Autor).



Fig 2: Micrografia da amostra do metal da ZAC após ataque químico com Nital 2%. Aumento de 200x. Fonte: (Autor).

Resultado do ensaio de flexão estática

As imagens mostradas na Figura 3 e Figura 4 apresentam a vista frontal da fratura resultante de ensaio com solda aluminotérmica, respectivamente. É possível identificar uma fratura dúctil

que ocorre paralelamente ao cordão de solda, sem a presença de falta de fusão ou defeitos visíveis durante a inspeção visual. A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de flexão estática realizados em trilhos com e sem solda, para fins de comparação. Apesar do efeito da soldagem na carga total absorvida pela amostra, o trilho com solda ainda se encontra dentro dos limites estabelecidos pela norma.

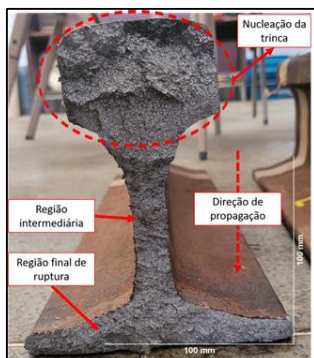


Fig 3: Vista frontal da ruptura. Fonte: (Autor).

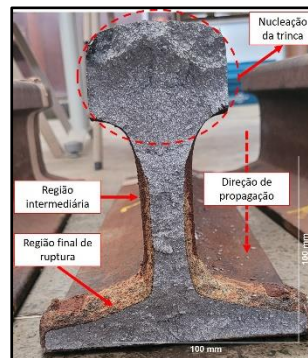


Fig 4: Vista frontal da ruptura com cordão de solda. Fonte: (Autor).

Tabela 3 - Resultado do ensaio de flexão estática.

Amostra	Comprimento (mm)	Carga de ruptura (kN)	Fabricante do Trilho
Amostra com solda	1200	1461,2	Italiano
Sem solda	1398	1755,4	Italiano

CONCLUSÕES

Resultados alcançados foram significativos, revelando que o trilho com solda aluminotérmica apresenta uma redução na resistência à flexão estática em comparação com a amostra sem solda. A tabela 3 mostra que o trilho com solda apresenta menor capacidade de absorção de carga do que a amostra sem solda. No entanto, o trilho ainda atendeu aos critérios estabelecidos pelas normas, suportando cargas superiores ao mínimo exigido até a ruptura. A caracterização química revelou algumas diferenças na composição química entre as amostras do metal base e da ZAC, porém com valores similares, assim como o ensaio de dureza. Portanto, ambos os resultados se apresentaram dentro dos valores esperados na norma.

Com os valores de composição química da alma, que é o elemento que define os limites de resistência estrutural do trilho, foi possível realizar a simulação das fases presentes do metal base e metal da ZAC, ambos, com resultados similares, identificar o comportamento do metal base e metal da ZAC com o processo de pré-aquecimento (faixa de 800 a 1000°C). A análise



metalográfica revelou a presença de uma microestrutura com perlita fina, comum em aços hipereutetóides resfriados lentamente conforme esperado com os valores do resultado da simulação. A ZAC apresentou grãos menores em comparação ao metal base, mas a diferença de dureza entre as duas regiões não teve um impacto significativo no desempenho da junta soldada. Com base nos resultados, pode-se concluir que o presente trabalho atingiu seus objetivos específicos ao caracterizar adequadamente a região de refino de grão na área da solda em comparação ao metal base. Para trabalhos futuros, sugere-se avançar na caracterização da região intercrítica e nas tensões residuais. A análise da fratura indicou diferenças entre a solda e a ZAC, portanto, recomenda-se a realização de estudos mais aprofundados sobre essas diferenças e sua influência nas propriedades mecânicas e na integridade estrutural das soldas aluminotérmicas em trilhos. Além disso, é interessante explorar métodos de mitigação das tensões residuais para melhorar o desempenho e a vida útil dessas soldas.

REFERÊNCIAS

- [1] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Histórico**. 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/ferrovias/historico>.
- [2] KINDERSLEY, D. The train book - The definitive visual history. [S.l.]: Dorling Kindersley, 2014. v. 1v.
- [3] Associação Nacional dos Transportes Ferroviários. **Mapa Ferroviário**. 2022. Disponível em: <https://www.antf.org.br/mapa-ferroviario/>.
- [4] ROSA, R. C. H. R. Rodrigo de A. **Estradas de Ferro: projeto, especificação construção**. [S.l.]: EDITORA UNIVERSITÁRIA EDUFES, 1990. v. 1ed.
- [5] STEFFLER, F. **Via permanente aplicada : guia teórico e prático**. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 2013. v. 1v.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7590: Trilho vignole — requisitos**. Rio de Janeiro, 2012.
- [7] IHHA. **Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Wheel and rail interface issues**. [S.l.]: International Heavy Haul Association, 2001. v. 1ed.
- [8] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. [S.l.]: Edgar Blucher, 2008. v. 4ed.
- [9] AREMA. **American Railway Engineering and Maintenance of Way Association**. [S.l.]: AREMA, 2006. vol.1.
- [10] ASM. **Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**. [S.l.]: The Material Information Company, 1990. vol 1, 10ed.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15997: Trilho — soldagem aluminotérmica**. Rio de Janeiro, 2011.
- [12] VILLANI, P. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. [S.l.]: UFMG, 2009. v. 3ed.
- [13] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. [S.l.]: Associação Brasileiro de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012.v. 7ed.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6805-1: Materiais metálicos - ensaio de dureza rockwell parte 1: Método de ensaio (escalas a,b,c,d,e,f,g,h,k,n,t)**. Rio de Janeiro, 2009.