



ESTUDO DE DESEMPENHO DE DISPOSITIVOS DE PRÉ-AQUECIMENTO EM SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS NA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS

Ricardo do Nascimento Souza¹; João Fagundes²; Joaquim Dutra³

¹Vale — Brasil

²Vale — Brasil

³Vale — Brasil

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados dos testes comparativos de desempenho entre equipamentos de pré-aquecimento de alta vazão (High Flow Pré-Heating – HFP) e maçaricos tradicionais de 22 furos utilizados no processo de soldagem aluminotérmica na Estrada de Ferro Carajás - EFC. O estudo aborda os aspectos de utilização de cada equipamento e suas características de utilização, assim como a análise dos resultados de amostras confeccionadas com cada um deles, comparando o desempenho apresentado em ensaios laboratoriais conforme definido na norma ABNT NBR 15997:2024 e coletas de dados de soldas instaladas em campo, com o objetivo de avaliar as configurações de utilização desses dispositivos que resultem em menor probabilidade de ocorrência de falhas em soldas aluminotérmica cujas causas possuem relação com a etapa de pré-aquecimento de soldas, além de apresentar fundamento técnico para implantação do equipamento de pré-aquecimento de alta vazão (HFP) nas atividades de soldagem aluminotérmica em ferrovias de carga como a Estrada de Ferro Carajás – EFC. Os dados analisados durante o estudo demonstram a viabilidade para utilização do equipamento pré-aquecedor de alta vazão e a similaridade do comportamento de soldas confeccionadas com o equipamento e o maçarico tradicional, com significativas oportunidades de melhoria de performance quando adotadas configurações específicas de tempo de pré-aquecimento e altura do maçarico em relação ao trilho.

Palavras-chave: Solda Aluminotérmica, Pré-Aquecimento, Metalurgia, Ferrovia.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem aluminotérmica é um processo que utiliza o calor gerado por uma reação química exotérmica de uma mistura balanceada de pó de alumínio, óxidos de ferro, pó de ferro, ligas metálicas e fundentes para efetuar a união de trilhos ferroviários. Esse fenômeno termoquímico produz metal líquido que flui para o molde/cadinho e realiza a coalescência entre as duas extremidades preparadas.

A Equação 1 apresenta a reação química e o calor gerado no processo de aluminotermia (SCHWARTS, 1996, p.835) conforme demonstrado na Figura 1.



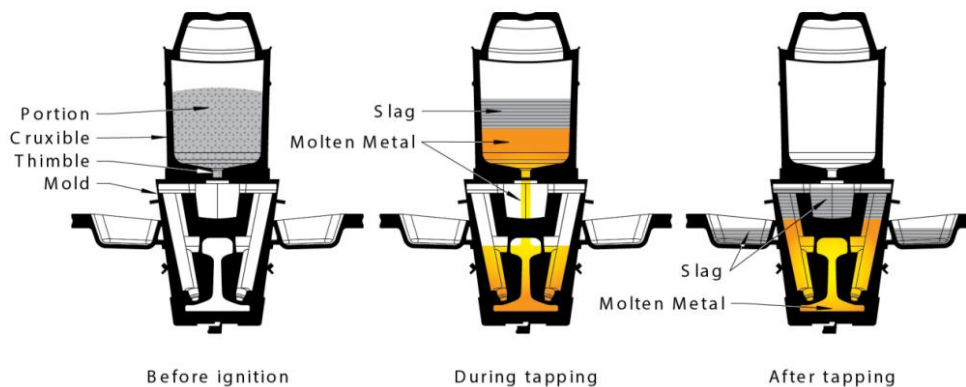


Figura 1. Processo de soldagem de trilhos por aluminotermia

No âmbito da manutenção ferroviária a soldagem aluminotérmica é aplicada para unir trilhos ferroviários sem a necessidade de instalação de talas, permitindo que a via opere dentro dos conceitos do TCS (trilho contínuo soldado).

Por ser um processo de execução em campo e cuja execução concentra-se na atuação manual dos soldadores, alguns dos modos de falhas em soldas aluminotérmicas tem relação com o processo de execução das soldas, exigindo que os profissionais envolvidos nessas atividades recebam treinamentos contínuos para manutenção da qualidade das juntas soldadas. Outros fatores como a qualidade dos materiais e ferramentais, armazenamento dos consumíveis, montagem dos moldes, preparação das extremidades a serem soldadas, controle das condições ambientais no local da execução da solda e cumprimento do procedimento de soldagem são de extrema importância para garantir a boa qualidade das soldas executadas.

O objetivo deste trabalho é apresentar o desempenho da aplicação de equipamentos e metodologias que visam reduzir a probabilidade de desvios no processo de execução de soldas aluminotérmica e a conformidade com os parâmetros definidos em normas nacionais e internacionais que regulam a aplicação de soldas aluminotérmica em ferrovias *heavy haul*.

2. DESENVOLVIMENTO

Os estudos foram desenvolvidos na Estrada de Ferro Carajás – EFC, localizada nos estados do Maranhão e Pará, nas regiões Nordeste e Norte do Brasil. A Estrada de Ferro Carajás tem 972 quilômetros de extensão, ligando a maior mina de minério de ferro a céu aberto do mundo, em Carajás, no sudeste do Pará, ao Porto de Ponta da Madeira, em São Luís - MA. A Figura 2 apresenta o layout da Estrada de Ferro Carajás. Por seus trilhos, são transportados 120 milhões de toneladas de carga e 350 mil passageiros por ano. Circulam cerca de 35 composições simultaneamente, entre os quais um dos maiores trens de carga em operação regular do mundo, com 330 vagões e 3,3 quilômetros de extensão.



Figura 2. Estrada de Ferro Carajás - EFC

2.1. Materiais e Metodologia

Para confecção das amostras de soldas aluminotérmica foram utilizados os kits de solda QP CJ para trilhos de perfil TR-68 com cadinho descartável do fabricante Pandrol, os mesmos utilizados na manutenção de via permanente da Estrada de Ferro Carajás. Para confecção das amostras foram utilizados ferramentas e materiais do fornecedor Pandrol, incluindo maçarico tradicional de 22 furos e Pré-Aquecedor de Alta Vazão (HFP 36V), conforme Figura 3. O HFP é composto por um soprador de ar de velocidade variável alimentado por bateria, um dispositivo de injeção de gás e componentes internos que eliminam a necessidade de utilização do cilindro de oxigênio no processo de pré-aquecimento uma vez que utiliza o ar coletado da atmosfera para realizar a mistura na tocha do equipamento e efetua o controle do tempo de aplicação da chama nas extremidades a serem soldadas.



Figura 3. Pré-Aquecedor de Alta Vazão - HFP



Os dados de temperatura foram coletados com câmera termográfica FLIR T540 com capacidade de medição de temperatura de até 1500°C. As coletas foram realizadas nas faces de trilhos logo após a finalização do pré-aquecimento em amostras que não foram soldadas, sendo realizado o processo de soldagem somente até a etapa de pré-aquecimento.

Os dados e ensaios considerados neste estudo foram gerados e coletados a partir entre julho e novembro de 2025, quando foram realizados os testes em ambiente controlado fora da via de circulação e aplicação de 07 soldas na linha principal da EFC a partir de novembro de 2025.

2.2. Configurações de Dispositivos

A configuração de utilização dos dispositivos de pré-aquecimento possui relação direta com as características metalúrgicas e o desempenho das soldas aluminotérmica quando instaladas em campo e submetidas aos esforços da interação veículo-via.

Para os estudos foram consideradas as configurações de teste com o pré-aquecimento de alta vazão e o maçarico de tradicional de 22 furos conforme Tabela 1:

Tabela 1. Configurações de dispositivos de pré-aquecimento.

Configurações de dispositivos		Tempo de Pré-Aquecimento	Pressão GLP (kgf/cm ²)	Pressão Oxigênio (kgf/cm ²)	Altura do Maçarico/tocha (mm)
1	HFP	9 minutos	0,8	-	76
2	HFP	9 minutos	0,8	-	90
3	Maçarico 22 Furos	5 minutos	1,4	5	50
4	Maçarico 22 Furos	6 minutos	1,4	5	50

2.3. Dados de Temperatura das Faces dos Trilhos

Os dados de comportamento do aquecimento das faces dos trilhos foi umas das variáveis consideradas nesse estudo, uma vez que esta etapa contribui em grande parte para a qualidade da junta soldada. Em ambiente fora da via de circulação foram montados os arranjos com trilhos novos e usados com desgaste de 4mm na vertical nas configurações 2, 3 e 4 da Tabela 1. Os arranjos de simulação de soldagem seguiram o procedimento de soldagem adotado pela Estrada de Ferro Carajás conforme PRO-0020966 – Executar Solda Aluminotérmica na EFC, até a etapa de pré-aquecimento. Após a finalização do pré-aquecimento as formas e moldes foram retiradas e as extremidades dos trilhos foram desalinhadas para medição de temperatura das faces dos trilhos.

Para cada arranjo proposto na Tabela 1 foram realizadas medições de temperatura com câmera termográfica em ambas as faces dos trilhos em 9 pontos distintos de cada face, conforme Figura 4.

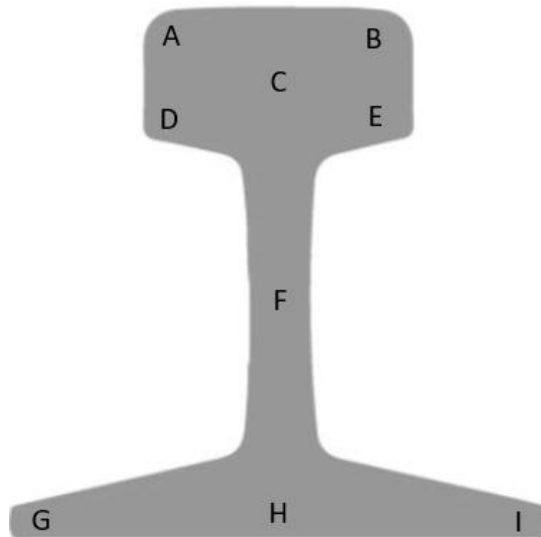


Figura 4. Pontos de coleta de temperatura

2.4. Caracterização Metalúrgica de Soldas Aluminotérmicas

Para a caracterização de soldas confeccionadas com o HFP foram produzidas 03 amostras de soldas considerando as configurações 1 e 2 da Tabela 1, com altura de tocha em relação ao trilho de 76mm e 90mm. As amostras foram confeccionadas utilizando trilhos novos e trilhos com desgaste vertical de 4mm.

As amostras foram submetidas aos ensaios de Macrografia, Micrografia, Perfil de Dureza Longitudinal e Análise Química, conforme definido na Norma ABNT NBR 15997:2024 – Trilho – Solda Aluminotérmica.

2.4.1 Macrografia

A análise de macrografia tem por objetivo avaliar o comportamento da junta soldada quanto aos principais parâmetros de dimensão e formato da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Zona de Fusão (ZF). Foram analisadas em laboratório amostras retiradas do boleto, alma e patim do trilho das soldas de teste.

2.4.2 Micrografia

A análise de micrografia foi realizada nas amostras retiradas do boleto, alma e patim do trilho para avaliação da microestrutura presente na solda, na ZTA e no metal base, garantindo a presença de formação perlítica e sem presença de martensita nessas regiões, além de avaliar a presença de inclusões, porosidades e/ou evidências de falta de fusão.

2.4.3 Perfil de dureza longitudinal

No ensaio de dureza longitudinal da solda o objetivo é identificar os valores de dureza máxima na região de fusão, o formato e simetria do gráfico de dureza a partir do centro da solda, ZTA e metal base e a largura da Zona Amolecida. Esses dados indicam

o comportamento da solda quando esta estiver sendo submetida aos esforços da interação roda-trilho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta as dimensões das ZTAs das amostras confeccionadas com as configurações 1 e 2, medidas nas regiões do boleto, alma e patim do trilho. Verifica-se que as amostras S1 e S2 confeccionadas com o HFP com tocha posicionada a uma altura de 90mm em relação ao topo do trilho apresentaram maior uniformidade da ZTA e ZF ao longo do perfil do trilho, nas regiões do boleto, alma e patim quando comparadas com a amostra S3 confeccionada com a tocha do HFP posicionada a 76mm, conforme recomendação inicial do fabricante. A Figura 5 apresenta a macrografia da amostra S2. Verifica-se também que para altura de tocha de 90mm a ZTA foi menor quando comparada a altura de tocha de 76mm, o que representa em redução da região amolecida da solda e com menor susceptibilidade a surgimento de defeitos superficiais oriundos do contato roda-trilho.

Tabela 2. Dimensões de ZTA e ZF em amostras de soldas.

Região do Trilho	Largura ZTA			Largura Zona de Fusão		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Boleto	124,17	124,52	132,94	71,25	78,75	81,11
	122,28	121,59	133,12	51,81	52,32	62,99
Alma	111,71	109,78	118,20	51,20	49,21	52,99
	106,80	107,60	113,34	49,54	53,03	50,32
Patim	108,30	108,63	110,02	52,78	55,21	40,12
	106,70	107,94	111,43	57,65	69,16	49,62

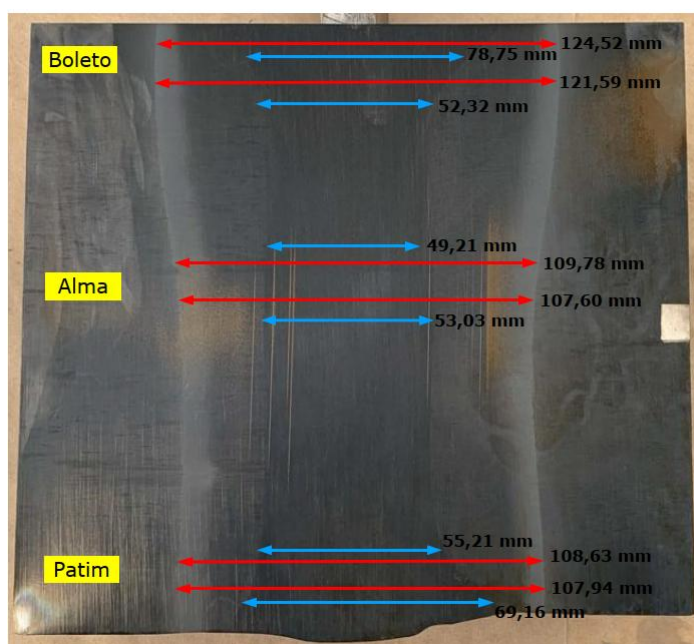


Figura 5. Macrografia da amostra S2.

Quando comparado ao processo de pré-aquecimento com a utilização de maçarico tradicional de 22 furos, os resultados da configuração 2 foram semelhantes aos obtidos nos estudos de otimização de soldas aluminotérmica na EFC (ALVES, 2017), onde a configuração com utilização de maçarico tradicional de 22 furos, tempo de pré-aquecimento de 5 minutos e gap entre trilhos de 27mm apresentaram menor probabilidade de surgimento de defeitos internos detectados por ultrassom, sendo esta a configuração adotada no procedimento de soldagem aluminotérmica da EFC. Os resultados da configuração 2 se assemelham aos obtidos com a utilização de HFP com tempo de pré-aquecimento de 7min30seg e em conformidade com parâmetros padrões para solda aluminotérmica na BNSF (KAVISHWAR, 2024).

A análise de micrografia em amostras para as configurações propostas revelou que as soldas se comportaram de maneira similar, independente do dispositivo de pré-aquecimento utilizado, do tempo de pré-aquecimento adotado e da altura da tocha em relação ao topo do trilho. As amostras apresentaram microestrutura de perlita fina sem indícios de martensita no metal base, ZTA e solda, com tamanhos de grão entre 5-6 no metal base, 8 na região da solda e 2 na ZTA, conforme Figura 6.

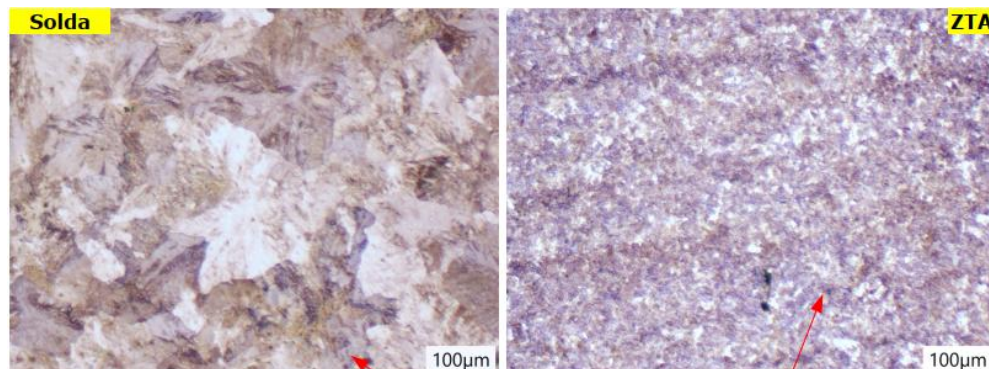


Figura 6. Micrografia da solda e ZTA do boleto da amostra S2.

Os dados de dureza Vickers HV30 ao longo do perfil longitudinal foram obtidos a 5mm da superfície do boleto das amostras e apresentaram comportamento similar para as configurações avaliadas, apresentando simetria em relação ao centro da solda, conforme Figura 7 da amostra S2.

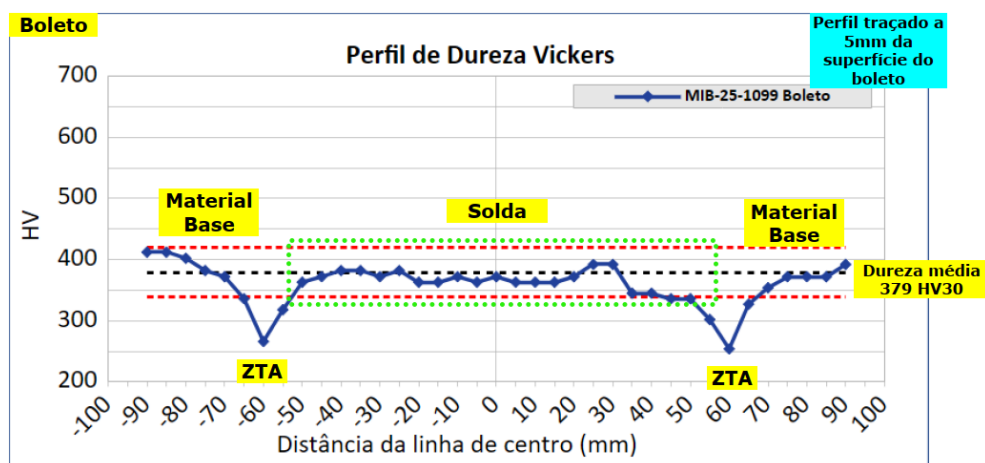


Figura 7. Perfil de dureza longitudinal do boleto da amostra S2.

A Tabela 3 apresenta os dados de temperatura obtidos com a câmera termográfica após 1min30seg da finalização do pré-aquecimento para as configurações avaliadas, conforme Figura 8.

Tabela 3. Dimensões de ZTA e ZF em amostras de soldas.

Trilho	Desgaste(mm)	Tempo(min)	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Trilho 1	0	5	557	553	618	591	579	603	475	540	592
Trilho 2	4		520	579	591	480	546	540	560	544	538
Trilho 3	0	6	495	590	592	583	568	596	585	517	614
Trilho 4	4		520	524	557	505	523	494	564	504	493
Trilho 5	0	9	573	564	625	598	571	533	575	594	594
Trilho 6	4		522	532	549	512	529	538	630	640	641

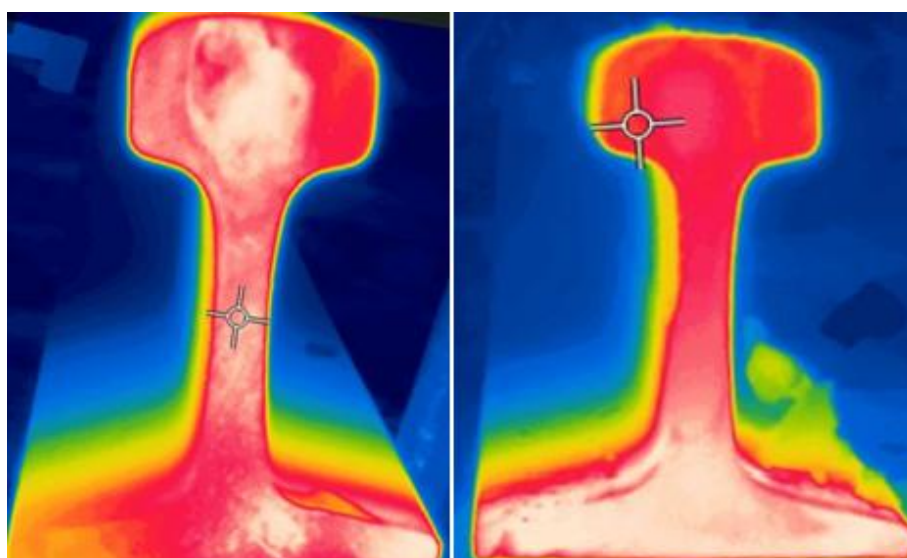


Figura 8. Temperatura nas faces dos trilhos com maçarico 22 furos (à esquerda) e HFP (à direita).

Amostras confeccionadas com HFP durante o pré-aquecimento apresentaram maior uniformidade na distribuição de calor em uma mesma região do trilho como a região central e extremidades dos boletos. Atenção especial foi dada a essa região em função da característica de trincas à quente que se originam na região de interface boleto e alma e tem como principais fatores de causa desalinhamento de formas, estrangulamento dos alimentadores, variação de composição química da porção de solda, retirada precoce dos alimentadores e desvios no processo de pré-aquecimento, objeto deste estudo. Na Estrada de Ferro Carajás as trincas à quente representaram 47% do modo de falha de fraturas em soldas aluminotérmica entre os anos de 2015 e 2019 e em 2025 representaram 60% das fraturas.

Os dados coletados nas faces dos trilhos coletados com câmera termográfica corroboram com as distribuições de temperatura obtidas com aplicação termopares em diferentes regiões da face dos trilhos para monitoramento e acompanhamento da



temperatura dos trilhos durante o processo de pré-aquecimento e temperatura após a etapa de pré-aquecimento (KAVISHWAR, 2024).

4. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados nos ensaios e coletas realizados neste estudo apontam que soldas confeccionadas com o Pré-Aquecedor de Alta Vazão (HFP) apresentam desempenho similar a soldas confeccionadas com maçaricos de pré-aquecimento de 22 furos e tempo de pré-aquecimento de 5 minutos, conforme padrão adotado na manutenção de Via Permanente da EFC, principalmente a configuração com altura de tocha de 90mm, tempo de pré-aquecimento de 9 minutos e pressão de GLP de 0,8 Kg/cm². Os dados também mostram que a distribuição e o gradiente de calor nas faces dos trilhos ocorrem de maneira mais uniforme com a utilização do HFP em comparação ao maçarico tradicional de 22 furos, onde comumente é possível verificar a ocorrência de aquecimento irregular entre os trilhos e entre as diferentes partes de uma mesma face do trilho.

A utilização de equipamentos de pré-aquecimento de soldas se apresenta como uma alternativa importante para a melhoria dos padrões de qualidade para realização de soldas aluminotérmica nas manutenções de via permanente. Em continuidade ao processo de verificação de desempenho de soldas confeccionadas com este dispositivo, foram instaladas na linha principal da Estrada de Ferro Carajás 07 soldas aluminotérmicas entre novembro de 2025 e janeiro de 2026, a serem monitoradas e inspecionadas após o tráfego de 50MTBT, 100MTBT e 200MTBT.

5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece a Vale S/A e a equipe de manutenção de via permanente do distrito de Bacabeira-MA por todo o apoio durante a confecção de amostras, coletas de dados e instalação das soldas na via, tornando possível a execução deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- SCHWARTZ, B. ASM HANDBOOK, VOL. 6. WELDING BRAZING AND SOLDERING, 4. Edición, 1996, P.835- 838.
- ALVES, Luiz Henrique Dias; MACHADO, Aldo; BALDEZ, Raimundo; SOUZA, Ricardo; FILHO, Roberto Malheiros Moreira. Employing the Design of Experiments for Optimization and Modeling of Thermit Welds of Rails Used on the EFC Line. IHHA, 2017.
- ALVES, LHD; LAGARES, ML; FILHO, RMM; Caracterização e Modelagem Estatística Preditiva das Soldas e Regiões Afetadas pela solda de trilho empregados pela Vale. UFJF, Dez, 2017.
- KAVISHWAR, ARCHIT; 136RE Preheating comparison QP. Pandrol, França.
- KAVISHWAR, ARCHIT; High-flow pre-heater (HFP) trials BNSF lab. USA, Jan, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15997-Trilho-Soldagem Aluminotérmica. 2024.



AUSTRALIAN STANDARD. AS 1085.20; Railway Track Materials, Part 20: Welding of Steel Rail. 2020.



PERFORMANCE STUDY OF PREHEATING DEVICES IN ALUMINOTHERMIC RAIL WELDS ON THE CARAJÁS RAILWAY

ABSTRACT

This paper presents the results of comparative performance tests between High-Flow Pre-Heating (HFP) equipment and conventional torches used in the aluminothermic welding process on the Carajás Railway (EFC). The study examines the operational aspects and characteristics of each heating device, as well as the analysis of samples produced with both technologies. The performance of these samples was compared using laboratory tests in accordance with ABNT NBR 15997:2024 and field data collected from installed welds, to evaluate the heating configurations that can reduce the probability of weld failures associated with the preheating stage. The study also provides technical justification for implementing the High-Flow Pre-Heater (HFP) in aluminothermic welding activities on heavy haul railroads such as the Carajás Railway. The data demonstrates the feasibility of applying HFP equipment and the similarity in weld behavior when compared to traditional torches, highlighting significant opportunities for performance improvement when adopting optimized preheating time and torch height configurations.

Keywords: *Aluminothermic Welding; Preheating; Metallurgy; Railway.*