

ADEQUAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE JUNTAS ALUMINOTÉRMICAS PARA TRILHOS FERROVIÁRIOS - CARACTERIZAÇÃO*

Rodolfo Dal Alva Pinto¹
Guilherme Geada Sampaio²
Willy Ank de Moraes³

Resumo

Uma linha contínua não só melhora o conforto aos usuários, mas também melhora as condições de desgaste, fadiga e manutenção dos equipamentos ferroviários. Porém os parâmetros de soldagem devem ser bem especificados e controlados de forma a obter uma junta soldada adequada. Neste trabalho foi desenvolvida a avaliação do desempenho da soldagem aluminotérmicas de trilhos. Os resultados obtidos foram empregados em ações de melhoria da qualidade da soldagem aluminotérmica, conforme relatado em outro trabalho apresentado neste evento.

Palavras-chave: Trilhos; Soldagem aluminotérmica; Caracterização; Propriedades mecânicas.

ADEQUATION OF ALUMINOTHERMIC WELDING JOINTING OF RAILWAY TRACKS - CHARACTERIZATION

Abstract

A continuous track not only improves comfort to the users, but also improves the wear, fatigue, and maintenance of railway equipment. However, the welding parameters need to be well specified and controlled so as to obtain a proper weld. In this paper was done the evaluation of performance of aluminothermic welding in rails. The obtained results were employed in actions to improve the aluminothermic welding quality as reported in another paper presented at this event.

Keywords: Rails; Aluminothermic welding; Characterization; Mechanical properties.

¹ Laboratorista Industrial. Tecnólogo em Materiais com ênfase em Metais, Técnico Metalográfico, Laboratório Químico/Metalográfico da SGS Labmat.

² Inspetor de Solda Nível 2, Técnico em Siderurgia, Diretor Comercial da INSPEBRAS. Praia Grande, Brasil.

³ Doutorando, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Engenheiro Metalurgista, Téc. em Metalurgia. Professor da Faculdade de Engenharia da Universidade Santa Cecília (UNISANTA); Consultor Técnico da INSPEBRAS. Santos, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Novas linhas para o transporte metropolitano de passageiros estão sendo instaladas ou estão sofrendo expansão por todo o país, nas principais regiões metropolitanas. Esta expansão ocorre devido às várias principais vantagens deste sistema, dentre as quais podem ser citadas: deslocamento rápido, capacidade de levar mais pessoas com menor impacto no espaço urbano, ser não-poluinte, oferecer mais segurança e comodidade aos usuários.

A união dos trilhos é uma das razões devido à qual é possível obter as vantagens citadas para esta modalidade de transporte público. Uma linha contínua não só reduz o desconforto e o ruído imposto aos usuários, mas também melhora as condições de desgaste, fadiga e manutenção dos equipamentos ferroviários [1,2]. Entretanto não é possível produzir e instalar trilhos ferroviários de maneira contínua, os mesmos são unidos 'in loco' por processos de soldagem, especialmente através da aluminotermia, conforme ilustrado na Figura 1.

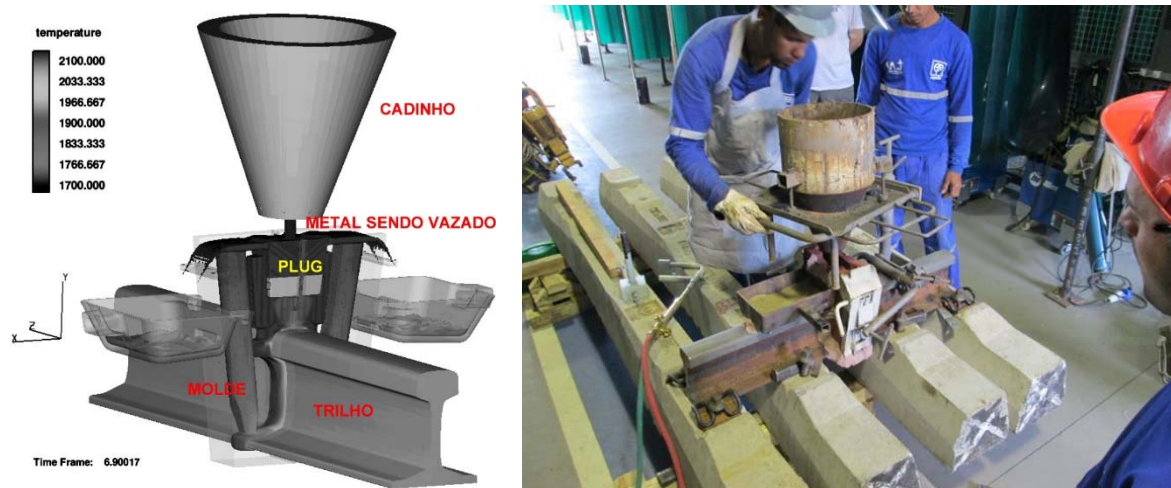


Figura 1. Esquerda: representação esquemática do processo de soldagem aluminotérmica de trilhos ferroviários [3]. Direita: arranjo experimental empregado na INSPEBRAS.

As principais normatizadoras do setor ferroviário preveem uma série de requisitos a serem atendidos pelas juntas soldadas de trilhos, inclusive as obtidas por aluminotermia. Além da composição química e da resistência mecânica, verificada através de ensaios de dureza, a junta deve apresentar uma resistência mecânica e capacidade de deformação por flexão (plasticidade) mínimas, além de resistência à fadiga. O atendimento a estes requisitos depende da correta conciliação de diversos fatores técnicos e humanos que influenciam a qualidade e integridade da união aluminotérmica.

Desta forma, torna-se necessário homologar um procedimento de soldagem para juntas aluminotérmicas, conforme normatização da área. Esta homologação prevê a realização de uma série de ensaios mecânicos dos quais se destacam o dobramento até a ruptura de uma amostra de trilho soldada ao seu centro e do ensaio de fadiga de uma amostra de tamanho similar.

Este trabalho faz parte de uma pesquisa mais ampla visando a melhoria na fabricação de juntas de trilhos ferroviários pelo processo de soldagem aluminotérmica. Este trabalho em particular apresenta a caracterização e os resultados em juntas soldadas aluminotérmicas realizadas na INSPEBRAS, com o objetivo de propor melhorias no processo de soldagem.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Na execução deste trabalho previu-se um conjunto de atividades apresentadas na Figura 13. Este ciclo iniciou-se no dia 12 de Setembro com a realização de duas soldagens aluminotérmicas em amostras previamente preparadas no Centro de Soldagem da INSPEBRAS® em Praia Grande. Nestes testes, foram adotados os procedimentos padrão de uma empresa executante de serviços de soldagem aluminotérmica.

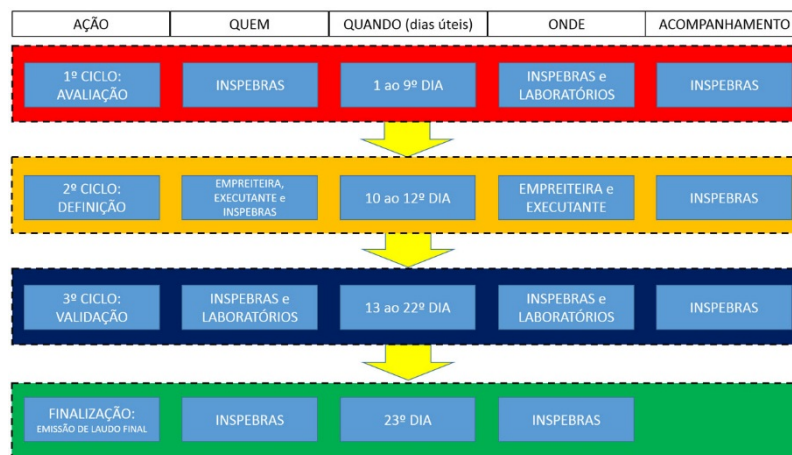


Figura 2. Estruturação do trabalho de avaliação das juntas aluminotérmicas.

Do primeiro dia do ciclo de avaliação foram realizadas as seguintes atividades:

1. Acompanhamento das Soldagens por:
 - 1.1. Fotografia e Vídeo;
 - 1.2. Termografia.
2. Caracterização das Juntas obtidas por
 - 2.1. Ultrassom;
 - 2.2. Macrografia;
 - 2.3. Ensaios Químicos;
 - 2.4. Ensaios Destrutivos;
 - 2.4.1. Dureza (macro) e Perfil de durezas (macro);
 - 2.4.2. Ensaio de tração;
 - 2.4.3. Metalografia.

As juntas soldadas foram avaliadas no Centro de Soldagem da INSPEBRAS® através de ultrassonografia e macrografia. Os demais ensaios destrutivos, ou seja, análise química, dureza Brinell e Vickers, ensaios de tração e metalografia, foram executados nos laboratórios da SMS Labmat, em Guarulhos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Registro Fotográfico e Vídeo

O procedimento de soldagem foi executado conforme ilustrado pelas fotos da Figura 3. Foram feitos dois testes iniciais para gerar amostras de trilhos soldados por aluminotermia na condição padrão (amostra 1 e 2). As fotos das Figuras 3 e 4 ilustram a sequência de passos de preparação para a soldagem aluminotérmica da amostra 1, realizada com acompanhamento termográfico e em vídeo (além das fotos).



Figura 3. Etapas de preparação da junta aluminotérmica.

Na Figura 3 é possível observar, da esquerda para a direita e de cima para baixo o esmerilhamento das extremidades dos trilhos a serem unidos; estado de limpeza do cadinho; posicionamento dos moldes e travamento dos mesmos nas extremidades dos trilhos; selamento com argila; posicionamento do pote para recolhimento do excesso de metal e escória (especialmente alumina) após o vazamento e centralização do cadinho sobre o molde.



Figura 4. Etapas de preparação da junta aluminotérmica - continuação.

Na Figura 4 é possível observar, da esquerda para a direita e de cima para baixo a preparação das superfícies do trilho para termografia (aumento da emissividade); verificação da imagem com uma câmera termográfica auxiliar; pré-aquecimento do cadinho; preparação do fundo do cadinho e pré-aquecimento do plug; colocação da mistura aluminotérmica no cadinho; visão do preparado e da vareta de ignição no cadinho.

As fotos da Figura 5 resumem o acompanhamento em vídeo feito da etapa de soldagem da amostra 2, desde o início do pré-aquecimento do molde até o início de desmontagem do mesmo. A partir destas imagens foi possível criar a Tabela 1 que apresenta as atividades realizadas e o período de tempo necessário para realizá-las.



Início do pré-aquecimento do molde 00m:00s



Preparação do fundo do cadinho 01m:18s



Pré-aquecimento do molde 04m:20s



Registro termográfico no pré-aquecimento 04m:55s



Desprendimento de gases no pré-aquecimento 07m:26s



Acendimento da vareta de ignição 07m:49s



Ignição do processo aluminotérmico 07m:54s



Início do vazamento 08m:11s



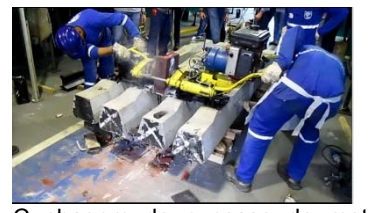
Término do vazamento 08m:24s



Retirada do pote de excesso e escória (alumina) 10m:23s



Início de abertura do molde 12m:15s



Cunhagem do excesso de metal no boleto 13m:30s

Figura 5. Etapas de execução da junta aluminotérmica.**Tabela 1.** Resumo das atividades e do tempo registrado para desempenhá-las.

Atividade	Soldagem 2		
	Duração	Início	Fim
Pré-aquecimento	07:09	00:00	07:09
Processo aluminotérmico	00:17	07:54	08:11
Vazamento	00:13	08:11	08:24
Solidificação (sem movimentos)	03:51	08:24	12:15
Solidificação (sem movimentos bruscos)	05:06	08:24	13:30
Abertura e limpeza da junta	06:41	08:24	15:05

3.2 Termografia

O acompanhamento termográfico foi executado através de um equipamento FLIR T640 com capacidade de registrar temperaturas em uma faixa de -40 a 2.000°C com precisão de 2°C e resolução da imagem termográfica de 640×480 pontos de temperatura. Os registros foram feitos para acessar a história térmica das juntas soldadas. No primeiro teste foram tomadas 96 fotos com o registro termográfico da junta, ao longo de 47 minutos, como ilustrado na Figura 6. No segundo teste registrou-se 86 fotos em 48 minutos. Em todos os registros, a câmera ficou estática

de forma a permitir uma comparação dimensional direta entre as diversas imagens registradas.

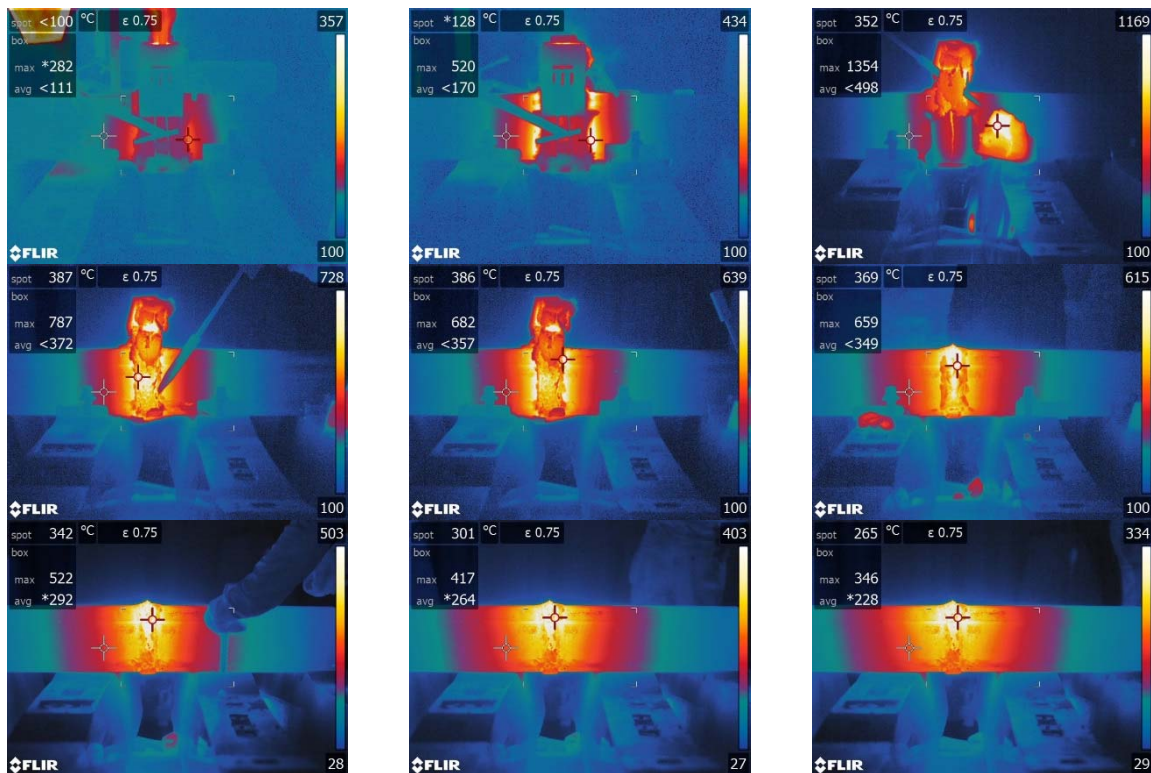


Figura 6. Fotos ilustrando o registro termográfico após a execução de uma soldagem aluminotérmica (intervalo de tempo entre cada imagem de 5 minutos).

A Figura 7.a apresenta a curva CCT do aço do trilho, obtida através de modelamento matemático [4]. Neste caso, a velocidade crítica para o material resfriar do estado austenítico para formação de martensita é de 50 segundos. Pela visualização das imagens é possível perceber que o aquecimento e resfriamento da junta foram relativamente lentos, em face à velocidade crítica para o resfriamento desta liga. Os dados obtidos diretamente pelas imagens termográficas apresentam uma velocidade de resfriamento bem menor, conforme ilustrado pelo gráfico da Figura 7.b obtido diretamente as imagens termográficas.

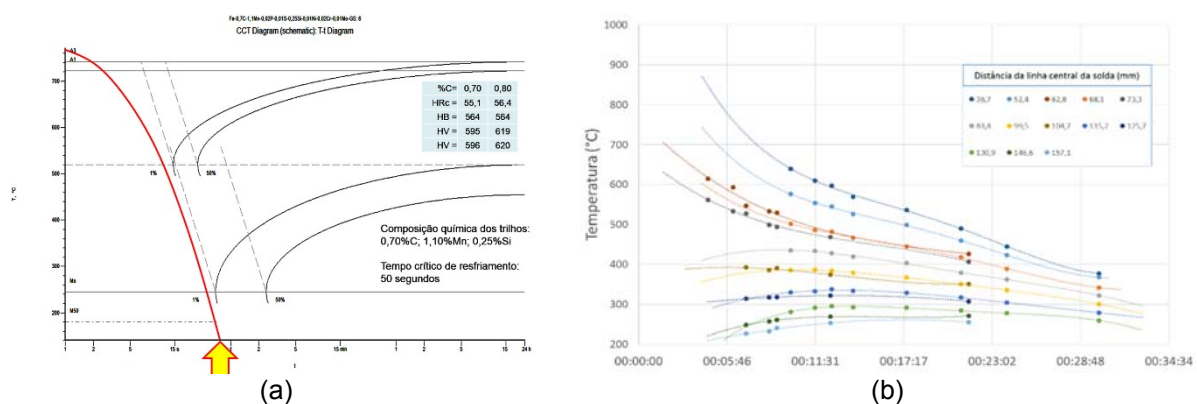


Figura 7. (a) Curva CCT simulada para o aço do trilho, cuja composição e durezas após têmpera estão apresentadas na figura acima, conforme o software SteCal [4]. (b) Curvas de resfriamento das juntas soldadas (dados de duas soldagens sobrepostas) segundo registrados pela termocâmara.

3.3 Ultrassonografia

Para realizar os ensaios de ultrassonografia empregou-se um aparelho de ultrassom próprio da INSPEBRAS® da marca MITECH modelo MFD350B equipado com cabeçotes MWB45N2 e MWB70N2, ambos KK. Utilizou-se furos de referência com diâmetro de 5 mm para traçar a curva DAC (*Distance Amplitude Correction* ou Correção da Amplitude pela Distância), com bloco próprio da INSPEBRAS sempre empregando como acoplante Carboxi Metil Celulose Sódio ($C_6H_7O_2(OH)2CH_2COONa$) solubilizado em água. O laudo foi emitido por um inspetor de ultrassom S2.1 a serviço da INSPEBRAS. O teste demonstrou que não estão presentes, em quantidades significativas defeitos de continuidade nos trilhos, estando os mesmos aprovados pelo critério ultrassônico. Esta inspeção descartou a presença significativa dos defeitos maiores, segundo descrito por Chen et al [4], ou seja: união fria na base do patim (*cold laps*), rechupe interno (*shrinkage cavity*) e porosidades alinhadas centrais (*center-line defects*).

Porém, a medição da atenuação ultrassônica permitiu registrar o efeito da presença de descontinuidades internas, provavelmente microscópicas em sua maioria, que causaram efeito perceptível na atenuação. As fotos da Figura 8 ilustram como foram realizadas as medições e os resultados obtidos de atenuação ultrassônica.

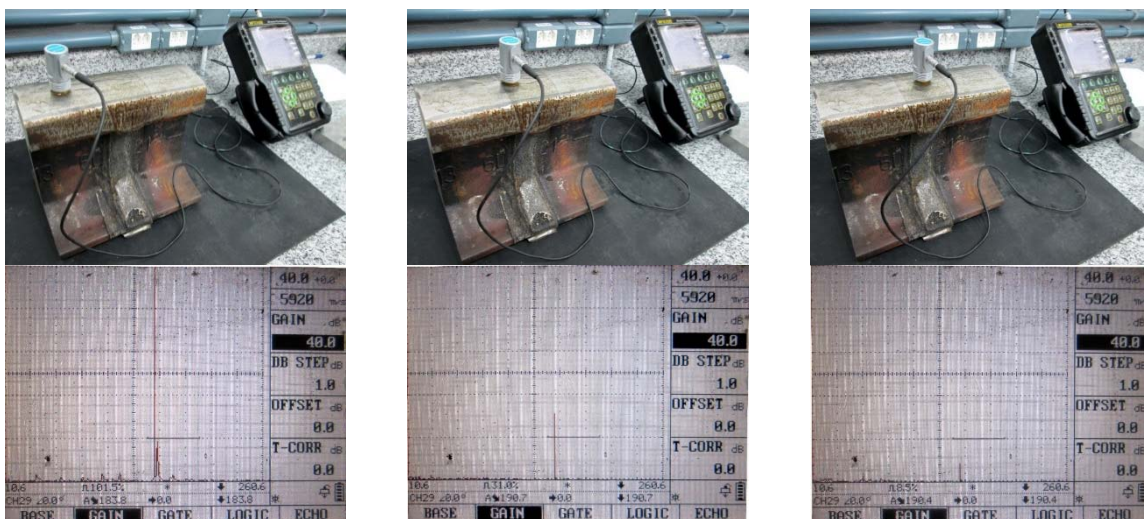


Figura 8. Foto ilustrando a medição da atenuação ultrassônica no metal base, a $\frac{1}{4}$ da solda aluminotérmica e na linha de fusão conforme mostrado nos gráficos imediatamente abaixo.

3.4 Macrografia

Uma seção reta das duas soldas foi preparada por meio de lixamentos sequenciados com lixas de granulometrias decrescentes até obter uma superfície suficientemente lisa e plana para a observação macrográfica. Foi realizado um ataque químico com Nital a 10% e os resultados estão apresentados nas fotos da Figura 9.

As macrografias indicam uma similaridade muito grande entre as duas uniões obtidas, com uma diferença de no máximo 1,5%. Além disso, os trilhos empregados para na primeira soldagem apresentam uma camada diferenciada (endurecida) na região do boleto com uma profundidade entre 15 e 18mm.

Considerando que a separação inicial na junta era aproximadamente 1 polegada, percebe-se uma dissolução média nas extremidades dos trilhos média de 10mm

(8mm na parte estreita de transição entre a alma e o boleto do trilho). Estas dimensões são compatíveis com as recomendações do manual de soldagem australiano [6] e estão acima do mínimo de 7mm indicada no trabalho de Chen et al [5].

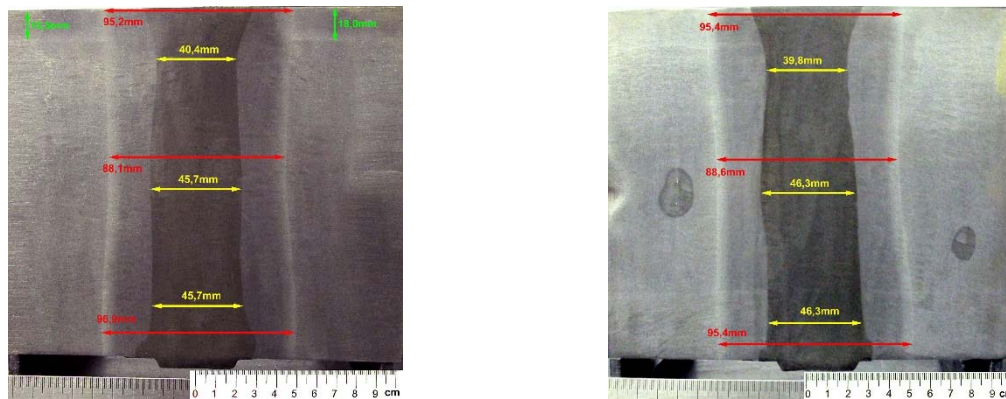


Figura 9. Macrografia de duas juntas soldadas obtida nos primeiros testes com as indicações das dimensões relativas do metal depositado e da Zona Termicamente Afetada (ZTA).

3.5 Análises Químicas

Amostras do metal do trilho e do metal depositado pelo processo aluminotérmico foram analisados quimicamente através de um Espectrômetro de Emissão Óptica da SGS Labmat. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2 na qual também é possível compará-los com os resultados dos certificados dos trilhos (Certificado ArcelorMittal 29336130124 e Certificado Moravia Steel 008636-SIO) e do produto das misturas aluminotérmicas fornecidas [7,8].

Nestas análises percebe-se um incremento nos teores de alumínio, silício e carbono além do aparecimento do elemento vanádio, este já esperado conforme informado pelo fornecedor da mistura aluminotérmica. A Tabela 6 apresenta a comparação das análises obtidas neste estudo para estes elementos-chave com os resultados dos fabricantes dos trilhos.

Tabela 2. Análises químicas dos elementos mais relevantes nos trilhos e no metal de solda.

Material	Origem	Resultado	%C	%Si	%Mn	%Al	%V
Solda (fornecida)	Doc. RAILTECH (Lote 723 / teste 670) [7]	1	0,790	0,83	1,33	0,150	0,160
Solda (fornecida)	Doc. RAILTECH (Lote 724 / teste 671)[8]	1	0,760	0,71	1,14	0,140	0,070
Solda 1 - INSPEBRAS	Análise Emissão ótica Labmat	1	0,866	0,93	1,31	0,626	0,133
Solda 1 - INSPEBRAS	Análise Emissão ótica Labmat	2	0,830	0,90	1,28	0,665	0,125
Solda 2 - INSPEBRAS	Análise Emissão ótica Labmat	1	0,807	0,87	1,28	0,603	0,070
Solda 2 - INSPEBRAS	Análise Emissão ótica Labmat	2	0,834	0,90	1,44	0,709	0,075
Trilho (fornecido)	Certificado ArcelorMittal 29336130124	(Min.+Máx.)/2	0,695	0,25	1,08	0,002	-
Trilho (fornecido)	Certificado Moravia Steel 008636-SIO	(Min.+Máx.)/2	0,730	0,35	0,97	0,004	0,003
Trilho 1 - INSPEBRAS	Análise Emissão ótica Labmat	1	0,702	0,34	1,00	0,000	0,001
Trilho 1 - INSPEBRAS	Análise Emissão ótica Labmat	2	0,704	0,33	0,97	0,000	0,001
Trilho 2 - INSPEBRAS	Análise Emissão ótica Labmat	1	0,686	0,24	1,08	0,000	0,001
Trilho 2 - INSPEBRAS	Análise Emissão ótica Labmat	2	0,667	0,24	1,07	0,000	0,002
	Solda	Méd.	0,777	0,89	1,21	0,377	0,105
	Trilho	Méd.	0,697	0,29	1,03	0,001	0,002
		Dif.	22%	11%	-21%	62%	89%

A presença do silício é costumeira em produtos fundidos, pois este metal melhora a fluidez do aço ou do ferro fundido no estado líquido além de promover uma desoxidação do metal fundido. A presença do alumínio é oriunda do excesso não reagido da reação aluminotérmica. O maior teor de carbono é mais preocupante,

pois leva a junta soldada a uma situação de maior fragilidade, para uma mesma microestrutura de referência, do que o restante do trilho. Além disso um maior teor de carbono tende a criar uma região pastosa (*mushy zone*) mais intensa e com maior probabilidade de formação de microvazios, porosidades e rechupes internos na região da solda.

3.6 Dureza e Microdureza

Amostras retiradas do trilho e do metal adicionado pelo processo de soldagem aluminotérmica tiveram suas durezas determinadas pelo método Brinell. As medições foram feitas próximo à superfície externa e no caso da junta, na sua região mediana, para melhor caracterizar as condições de fragilidade (ou não) da superfície, que é a região mais crítica para a aplicação e onde podem ser iniciar trincas. A dureza foi determinada através de um durômetro analógico da SGS Labmat empregando uma esfera com diâmetro de 5mm e carga de 750kgf. A medição da área de impressão, necessária para a determinação dos valores de dureza Brinell, foi efetuada em um projetor de perfis. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados de dureza Brinell nos trilhos e na união aluminotérmica.

	Trilho		Solda	
	amostra 1	amostra 2	amostra 1	amostra 2
Ponto 1	267	271	336	335
Ponto 2	274	272	344	340
Ponto 3	267	265	349	336
Média	270	269	343	337
Média geral	269		340	

A variação nas durezas entre o centro do metal depositado pelo processo aluminotérmico e o aço padrão do trilho foi avaliada através de uma série de ensaios de dureza Vickers. Os ensaios foram realizados através de um durômetro digital da SGS Labmat e foi empregada uma carga de 5kgf, conforme ilustrado na Figura 10. As amostras foram retiradas na forma de barras de 25 x 25 x 200mm na região inferior da solda, próximo aos patins. A escolha desta região se deve por ser a região mais crítica da soldagem, onde o trilho é submetido a tensões de tração no procedimento de validação do procedimento de soldagem.

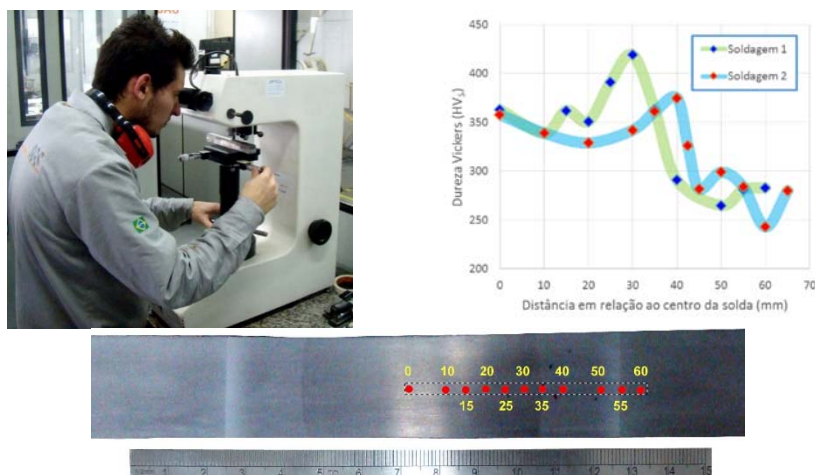


Figura 10. Medição do perfil de durezas ao longo das juntas soldadas aluminotérmicas. A figura mais abaixo mostra a localização da medição dos pontos de dureza na amostra da soldagem.

Os resultados estão mostrados na Figura 10 para as amostras obtidas nas duas soldagens. As medições das durezas foram feitas a cada 10mm do centro da solda acrescidos de medições intermediárias (exemplo: 15, 25, 55mm) sempre que necessário para completar o perfil da curva. A Figura 11 ilustra a sobreposição das curvas de dureza com as macrografias das regiões analisadas.

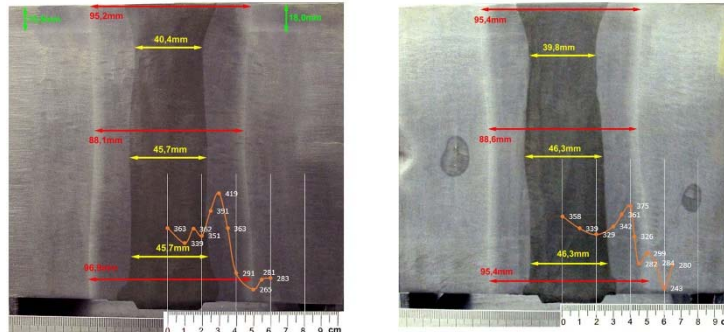


Figura 11. Aspecto do perfil de dureza sobreposto à macrografia das amostras. O perfil de durezas foi feito a 25 mm da parte inferior da união soldada, portanto os gráficos de dureza não estão na posição vertical correta. A posição horizontal das linhas corresponde à realidade.

Pelos gráficos mostrados na Figura 10 e pela sobreposição dos mesmos às macrografias das juntas soldadas, mostrados na Figura 11 é possível notar quatro regiões de variação de dureza ocorrem em regiões específicas da junta:

1. Diminuição branda da dureza do centro da região solda até a interface metal depositado-metal base. Nesta região a dureza diminui a uma taxa média de 1,5HV/mm.
2. Aumento rápido da dureza no início da Zona Termicamente Afetada (ZTA), próximo da interface metal depositado-metal base. Nesta região a dureza aumenta a uma taxa média de 8,5HV/mm.
3. Diminuição rápida da dureza na região final da ZTA, em direção ao metal base. Nesta região a dureza decai a uma taxa média de 12HV/mm.
4. Região de estabilidade da dureza no metal base, onde não há variações de dureza.

3.7 Ensaio de Tração

As mesmas amostras empregadas para fazer o levantamento do perfil de dureza Vickers foram usinadas em CPs cilíndricos. Ensaios de tração foram realizados através de uma máquina universal eletromecânica de ensaios da SGS Labmat (modelo DL60000 da EMIC), equipada com extensômetro digital. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de tração das junta soldadas na região inferior (próximo ao patim).

	S_{LE} (MPa)	S_{LR} (MPa)	%Along. (L0=50mm)	%R.A.	Local de ruptura	D_0 (mm)
Amostra da Soldagem 1	*	731	1,1	0,6	Solda	12,63
Amostra da Soldagem 2	*	681	1,2	0,5	Solda	12,61

* - Amostra com comportamento frágil, rompeu-se na solda sem apresentar deformação plástica.

Pelos dados da tabela pode-se perceber que a solda, na região inferior, próximo aos patins dos trilhos soldados está perigosamente fragilizada. O nível de fragilidade foi tal que não foi possível determinar os valores do limite de escoamento do material

por ausência de deformação plástica, mesmo com o uso de um extensômetro digital fixado aos corpos de prova de tração.

3.8 Metalografia

Considerando a importância dos defeitos internos e da estrutura presente, foram realizados ensaios metalográficos para verificar o nível de porosidades e inclusões presentes na união aluminotérmica assim como as estruturas presentes. Especial importância foi dada à região do metal de solda, que foi a região mais fragilizada, conforme quantificado pelos ensaios de tração e a mais solicitada nos ensaios de qualificação de solda.

Para as análises foi empregado um microscópio ótico Olympus BX51M da SGS Labmat e preparação metalográfica padrão, conforme norma ASTM E407 e ASTM E3. A Figura 12 ilustra os resultados da quantificação do nível de porosidades e inclusões ao longo da zona fundida, depositada por aluminotermia. As estruturas observadas pela análise metalográfica estão apresentadas na Figura 13.

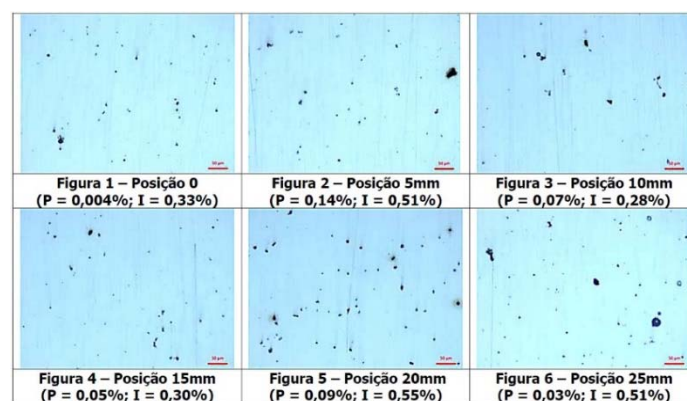


Figura 12. Nível de inclusões e porosidades obtidas na junta soldada aluminotérmica de uma das amostras de solda aluminotérmica. Ampliação ótica 200X, sem ataque químico (amostras simplesmente polidas). A posição é relativa ao centro da junta solda.

As microestruturas registradas, conforme apresentadas na Figura 13, estão compatíveis com a composição química dos metais (base e adicionado) analisados e com o processo de soldagem empregado. Uma estrutura perlítica com refino lamelar apresenta uma resistência mecânica maior, o que está compatível com o aumento de dureza de cerca de 1,5HV/mm registrado no levantamento do perfil de durezas.

Adicionalmente a estrutura Bainítica apresenta uma dureza superior e a presença deste justifica a maior dureza verificada na ZTA das soldas acompanhadas. A Bainita é formada pelo aquecimento em temperaturas acima de 800°C (aproximadamente) em uma região entre 25 a 40mm do centro da junta soldada ou de 12 a 28mm (aproximadamente) das extremidades originais dos trilhos. Esta região foi aquela que apresentou maior variação de temperatura, conforme pode ser registrado pelo acompanhamento termográfico (vide Fig. 7.b).

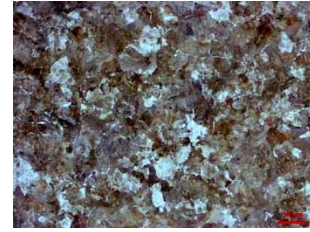
Apesar da amostra exatamente na posição central ter apresentado um baixo nível de porosidades, as regiões mais porosas estão próximas à região central das soldas. Além das porosidades (máximo de 0,14%), têm-se a presença de uma quantidade maior de inclusões, aproximadamente 5 vezes maior em fração volumétrica.



Meio da junta soldada
(matriz perlítica grosseira)



Centro de ZTA
(perlita e bainita)



Metal base (perlita com presença
de ferrita pró-eutetóide)

Figura 13. Metalografias de uma das juntas soldadas nas posições indicadas. Ampliações óticas de 100X, ataque químico: Nital a 2%.

4 CONCLUSÃO

O acompanhamento feito no Centro de Soldagem da INSPEBRAS® e os ensaios de caracterização nas amostras obtidas nestes testes permitem, à luz da revisão bibliográfica apresentada em outro trabalho, obter importantes conclusões a respeito do processo de união de trilhos por aluminotermia que foi avaliado:

1. alguns dos tempos e práticas adotados (Tabela 1) podem ser ajustados em relação às condições ideais relatadas pela bibliografia;
2. o nível de desprendimento de gases oriundo do molde durante o pré-aquecimento é relativamente alto;
3. as duas soldagens geraram produtos com aspecto macrográfico similares;
4. um comprimento de aproximadamente 10mm nas extremidades dos trilhos foi fundida pela mistura aluminotérmica;
5. houve um incremento de alguns elementos químicos na região da união soldada, especialmente no teor de carbono;
6. não foram registrados gradientes térmicos severos pela técnica termográfica;
7. os resultados de dureza e metalografia indicam uma região de maior dureza verificada na zona termicamente afetada (ZTA) das uniões aluminotérmicas;
8. detectou-se uma microestrutura bainítica, portanto não houve têmpera do material;
9. a avaliação ultrassônica não detectou descontinuidades importantes nas soldas;
10. as juntas soldadas apresentam heterogeneidades oriundas do processo de solidificação da liga que puderam ser quantificadas pela atenuação ultrassônica e metalografia.

As porosidades e inclusões registradas são relativamente pequenas (da ordem de 10 a 20µm), não sendo possível detectá-las através de ensaios não destrutivos convencionais, daí a necessidade do uso da técnica de atenuação acústica. Neste último caso, deve-se lembrar que as medidas metalográficas são pontuais e as medidas de atenuação acústica, além de não necessitarem de corte das peças, abrangem mais quantidade de material.

REFERÊNCIAS

- 1 Transportation Research Board. Track Design Handbook for Light Rail Transit (TCRP-Report 155), Second Edition. Chapter 5 Track Components and Materials, pp.5-50 to 5-56 (5.6 Joining Rail). Washington (DC), 2012.

- 2 Rajanna, S.; Shivanand, H.K. Improvement in mechanical behavior of expulsion with heat treated thermite welded rail steel. World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 3, pp.12-29, 2009.
- 3 Gehrman, R.; Radmann, P.; Keichel, J. Optimization of thermit welding. 10th International Heavy Haul Association Conference, Technical Session T6 – Rail Welding (Rail Joining). pp.189-194, 2013.
- 4 SteCal - Low-alloy steels: Their properties and how to obtain them. Version 3.0.3. Materials Park (USA): ASM International, 2004.
- 5 Chen, Y.; Lawrence, F.V.; Barkan, C.P.L.; Dantzig, J.A. Weld defect formation in rail thermite welds. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMechE) - Part F: Journal of Rail and Rapid Transit (JRRT), 44, 2006.
- 6 Australian Rail Track Corporation LTD. Engineering Practices Manual – Civil Engineering - Aluminothermic Welding Manual (RTS 3602), June, 2013.
- 7 Del Razo, L. I. Soldadura Aluminotérmica – Control de Calidad (Lote 723, Prueba 670). Railtech. Enero, 2014.
- 8 Del Razo, L. I. Soldadura Aluminotérmica – Control de Calidad (Lote 724, Prueba 671). Railtech. Enero, 2014.