

# ADEQUAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE JUNTAS ALUMINOTÉRMICAS PARA TRILHOS FERROVIÁRIOS - ANÁLISE\*

Rodolfo Dal Alva Pinto<sup>1</sup>  
Guilherme Geada Sampaio<sup>2</sup>  
Willy Ank de Moraes<sup>3</sup>

## 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 análise dos resultados obtidos anteriormente e implementadas melhorias de desempenho no processo de soldagem aluminotérmicas de trilhos.

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

## ADEQUATION OF ALUMINOTHERMIC WELDING JOINTING OF RAILWAY TRACKS - ANALYSIS

### 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. This work was developed to analyze the results obtained previously and it was implemented performance improvements in aluminothermic welding process rails.

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

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

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

<sup>3</sup> 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

As principais normatizadoras do setor ferroviário preveem uma série de requisitos a serem atendidos pelas juntas soldadas de trilhos, inclusive as obtidas por aluminotermia. 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.

A INSPEBRAS® realizou um trabalho de análise para propor melhorias no desempenho de um processo de soldagem aluminotérmica para um cliente que contratou um serviço de consultoria. Este trabalho foi realizado em 4 etapas:

1. avaliação do problema;
2. definição de soluções a serem consensadas com o cliente
3. validar as soluções acordadas na 2ª fase;
4. finalizar o trabalho com a emissão de um laudo final.

Ao longo deste ano foi emitido um parecer [1] finalizando a 1ª Fase do trabalho, durante a qual o problema foi avaliado. Esse parecer cobria os seguintes assuntos:

1. Uma descrição do processo de soldagem aluminotérmica, suas principais variáveis de influência e os defeitos mais comuns que podem ocorrer conforme relatado por inúmeras e atualizadas literaturas técnicas da área.
2. As experiências realizadas no Centro de Soldagem da INSPEBRAS®, realizadas na condição padrão com o objetivo de se avaliar o processo e procedimentos de soldagem normalmente empregados.
3. Os resultados e análises dos ensaios de caracterização feitos no material avaliado, descrevendo as condições estruturais do material e de desempenho das soldas obtidas.
4. Cinco recomendações para a melhoria de desempenho da junta soldada, descritas em termos de facilidade de implementação e eficiência no uso.

Na primeira fase do trabalho, determinou-se que as juntas soldadas apresentam um desempenho insatisfatório nos testes de homologação devido à grande presença de microporosidades e também pelo tipo de microestrutura formada (resistente e frágil). Corpos de prova de tração, retirados da junta soldada, não apresentaram plasticidade ao longo do ensaio e romperam-se fragilmente, ou seja, sem deformação plástica perceptível.

A Tabela 1 resume todas as cinco recomendações de melhoria oferecidas após as experiências e análises feitas na 1ª Fase deste trabalho e as duas recomendações que o cliente definiu a serem executadas. Cada uma das cinco recomendações possuem facilidade de implementação e eficiências relativas variadas, sendo que as duas medidas implementadas são as que menos impacto no processo de soldagem como um todo.

Considerando a execução prévia das três fases de avaliação das juntas aluminotérmicas em trilhos do metrô, este trabalho tem como objetivo:

1. Descrever os resultados das experiências finais de análise de juntas soldadas feitas em trilhos ferroviários através do processo de aluminotermia.
2. Verificar a eficiência relativa das recomendações de melhoria oferecidas nas etapas anteriores do trabalho.
3. Apontar uma solução para homologar o procedimento de soldagem dos trilhos por aluminotermia.

**Tabela 1.** Avaliação qualitativa das soluções apresentadas no final da 1ª Fase do trabalho e medidas aceitas para implementação pelo cliente [1].

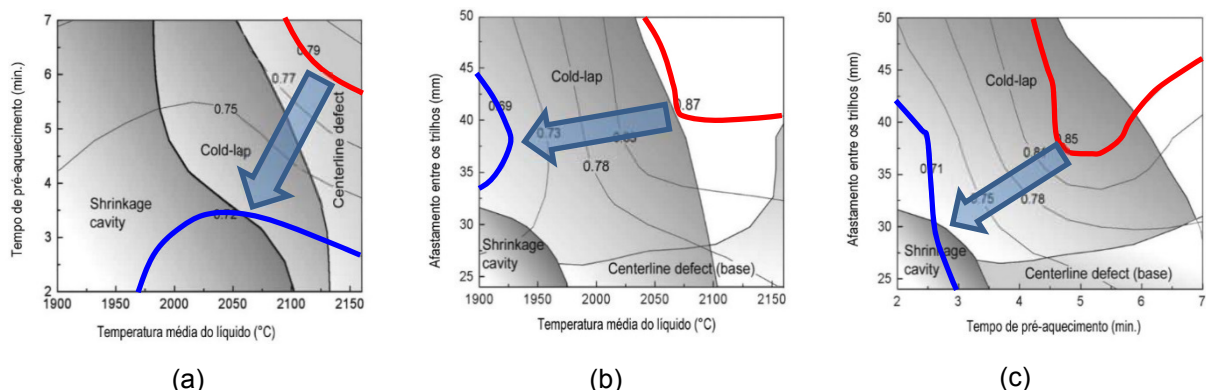
Técnica	Facilidade	Eficiência	Implementação
Aumentar o tempo de espera	1	1	SIM
Ajustar o tempo de pré-aquecimento	1	2	SIM
Introdução de vibração mecânica	2	5	NÃO
Uso de um núcleo de solidificação	2	7	NÃO
Tratamento térmico localizado	3	7	NÃO

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Na 1ª Fase foram executadas duas experiências de soldagem aluminotérmica. Estas soldagens foram realizadas no Centro de Soldagem da INSPEBRAS® empregando a mesma equipe de soldador e auxiliares que está atualmente trabalhando em obras ferroviárias na Baixada Santista.

Em função dos resultados obtidos nestas duas experiências, como forma de melhorar o processo de soldagem e obter uma melhor qualidade da junta soldada, foram realizadas quatro novas experiências. Porém, neste caso, as operações de soldagem foram executadas com interferência da equipe da INSPEBRAS® nos procedimentos da mesma equipe de soldagem anterior, de forma a serem testados diferentes combinações de parâmetros de execução de soldagem. Os parâmetros de soldagem foram variados dentro das opções possíveis, conforme Tabela 1:

1. Aumentar o tempo de espera para as operações de cunhagem e desmorte do molde para evitar a formação de descontinuidades na junta soldada.
2. Ajustar o espaço entre os trilhos antes da soldagem para uma dimensão mais próxima do mínimo.
3. Ajustar o tempo de pré-aquecimento com base nos gráficos apresentados na Figura 1 de forma a minimizar ao máximo a formação de porosidades sem, entretanto, criar outros defeitos que não apareciam antes.



**Figura 1.** Tendência de redução do defeito microporosidades conforme os Mapas de formação de defeitos apresentados pelo trabalho de Chen et al [2]: (a) redução do tempo de pré-aquecimento; (b) diminuição do afastamento entre os trilhos e (c) redução da temperatura do líquido.

Como forma de complementar o estudo, outras soldagens adicionais foram feitas posteriormente, visando disponibilizar trilhos para testes de dobramento e para análises posteriores. Como estas duas soldas são destinadas aos ensaios de dobramento, em princípio estas não serão analisadas por outros ensaios destrutivos, ao menos antes do teste de dobramento.

A exemplo das análises feitas nas juntas soldadas obtidas na 1ª Fase do trabalho, as novas juntas obtidas foram avaliadas da seguinte forma:

1. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (todas as juntas)
  - a. Acompanhamento fotográfico e por vídeo.
  - b. Medição da dilatação dos trilhos nas regiões do boleto e patim.
  - c. Avaliação da atenuação ultrassônica no trilho e na solda.
2. ENSAIOS DESTRUTIVOS (apenas 4 juntas)
  - a. Análise química.
  - b. Exame macrográfico e perfil de durezas.
  - c. Ensaio de Tração.

A Tabela 2 descreve os parâmetros variados durante as soldagens realizadas. Neste caso foram variados parâmetros que possuem relação com as variáveis mostradas nos gráficos da Figura 1.

**Tabela 2.** Parâmetros de soldagem variados em todas as experiências de soldagem aluminotérmica realizados no Centro de Soldagem da INSPEBRAS®.

	1ª Sim.	2ª Sim.	3ª Sim.	4ª Sim.	5ª Sim.	6ª Sim.	7ª Sim.	8ª Sim.
Data	12/09/14	12/09/14	13/10/14	13/10/14	13/10/14	13/10/14	22/10/14	22/10/14
Distância média entre trilhos (mm)	28	28	28	28	25	24	25	24
Tempo de pré-aquecimento (min.)	6,4	7,3	3,8	2,2	2,4	2,0	2,4	3,6
Tempo para abertura (min.)	3,8	3,9	3,3	3,7	4,1	2,5	2,9	2,7
Tempo para cunhagem (min.)	4,9	4,6	4,5	4,7	5,2	3,4	3,9	3,4

Segundo o fabricante, a distância média entre os trilhos deve ser de 25±2mm, faixa esta compatível com a faixa inferior dos mapas de defeitos mostrados na Figura 1. Nos testes anteriores, conforme pode ser observado na Tabela 2, a distância medida na operação foi maior (28mm). Esta diferença se deu pelo tipo de calibrador empregado na montagem da junta que possuía uma largura de 26mm. Neste caso, como os trilhos não possuem alinhamento perfeito e ao final dos ajustes a tendência é que a separação entre os mesmos fique um pouco acima (28mm) do valor objetivado (26mm).

Conforme visto no parecer emitido no final da 2ª Fase, a distância entre os trilhos influencia o processo de soldagem aluminotérmica (vide Figura 1). Por isso a foi providenciado um novo calibre, produzido no Centro de Soldagem da INSPEBRAS®. Este novo calibre foi feito com uma dimensão de 23mm, o que permitiu que os trilhos das demais simulações (5ª em diante) ficassem com um afastamento mais próximo dos valores desejados ideais (25mm).

Nas primeiras simulações, realizadas conforme o padrão normal até então adotado, o pré-aquecimento foi relativamente longo (média de 7 minutos), em relação ao indicado pela bibliografia e pelo fornecedor da solda, que é de 4 minutos. O tempo de pré-aquecimento é função dos tipos de gases empregados e da pressão de trabalho:

1. tipo de gás empregado para a combustão, neste caso, conforme indicado pelo fabricante da solda, propano puro (nome comercial: "Spral 29");
2. uso de ar ou oxigênio, neste caso, usado oxigênio;
3. pressão de trabalho, neste caso empregado 82psi ou 5,8kgf/cm<sup>2</sup> para o oxigênio e 6,2psi ou 0,5kgf/cm<sup>2</sup> para o propano.

Para avaliar o efeito do tempo de pré-aquecimento, foram empregados valores variados entre 2 e 4 minutos. O tempo de pré-aquecimento tem influência direta na dissolução do trilho na junta soldada e na formação de uma região mais resistente

na ZTA (Zona Termicamente Afetada) por diferenças no resfriamento da região após o pré-aquecimento e soldagem.



3ª SOLDA/Boleto: 28,33mm



3ª SOLDA/Alma: 27,10mm



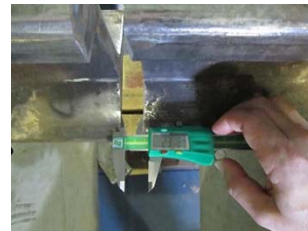
3ª SOLDA/Patim: 27,22mm



7ª SOLDA/Boleto: 24,68mm



7ª SOLDA/Alma: 24,45mm



7ª SOLDA/Patim: 23,78mm

**Figura 2.** Ajuste nos valores de espaçamento entre os trilhos ao longo das experiências.

Um objetivo importante na alteração do tempo de pré-aquecimento foi verificar a diminuição da emissão de gases pelos moldes. Na 1ª Fase do trabalho, detectou-se uma formação muito intensa de gases a partir de 3 minutos de pré-aquecimento, aproximadamente, conforme ilustrado na Figura 3. Importante destacar que a equipe de soldagem, que participou deste estudo, normalmente executa trabalhos de soldagem em linhas férreas na baixada Santista, mas que são fornecidas por outro fabricante. Os técnicos informaram que o desprendimento de gases observado após 3 minutos de aquecimento no material estudado não é observado com o material (moldes) do outro fabricante com o qual trabalham.



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



Término do pré-aquecimento, ainda com  
desprendimento de gases 07m:09s

**Figura 3.** Grande desprendimento de gases na 1ª soldagem devido a um longo pré-aquecimento.

Sabe-se que uma movimentação prematura da região da solda pode ser prejudicial, levando à formação de trincas nos primeiros 10 minutos após o vazamento, durante os quais não é recomendável fazer vibração ou mesmo movimentação da junta soldada obtida.

- O manual para soldagem aluminotérmica do Governo Indiano [3] recomenda esperar 6 minutos após o vazamento, para um espaçamento de 25mm, para a retirada dos moldes e cunhagem da cabeça do excesso de metal na cabeça do boleto.

- A norma AWS D15.2/D15.2M:2013 [4] salienta que a junta não pode apresentar movimentos relativos, por exemplo, oriundos de dilatação e contração térmica, ao longo do processo de soldagem.
- O Manual de soldagem aluminotérmica da ARTC (Australian Rail Track Corporation) [5] recomenda que a união não seja perturbada durante 20 minutos, a não ser pela cunhagem do excesso no boleto. Este mesmo documento recomenda que se houver alguma movimentação dos trilhos neste período que a solda deve ser retirada e substituída por uma nova.

Apesar das indicações em contrário, foi percebido em operações de soldagem em campo pelo cliente que as soldas mais resistentes foram justamente aquelas que tiveram a abertura do molde e cunhagem do excesso de metal no boleto mais rápido. Neste caso, os moldes são afixados nas extremidades dos trilhos através de grampos, como mostrado na Figura 4, sendo que o molde em si é constituído de material cerâmico poroso e leve. Conforme observado nas medições termográficas realizadas nas duas primeiras soldagens executadas na 1ª Fase, o material tem características de isolamento térmico. Por isso, uma abertura mais rápida dos moldes deve facilitar a extração de calor e também facilitar a dilatação da junta, permitindo uma melhor acomodação das tensões térmicas [6].



**Figura 4.** Fixação dos moldes cerâmicos através de suportes e grampos metálicos.

Por isto, nas 4 experiências feitas na 3ª Fase, foram variados os tempos para a abertura do molde (de 2 a 4 minutos) e tempo para cunhagem do excesso no boleto (de 3 a 5 minutos).

A execução de todas as juntas soldadas foi acompanhada por fotografias, sendo que todas as operações de soldagem foram filmadas desde o início do pré-aquecimento até o desmonte dos moldes e cunhagem do excesso no boleto. Desta forma, os vídeos permitiram registrar e documentar:

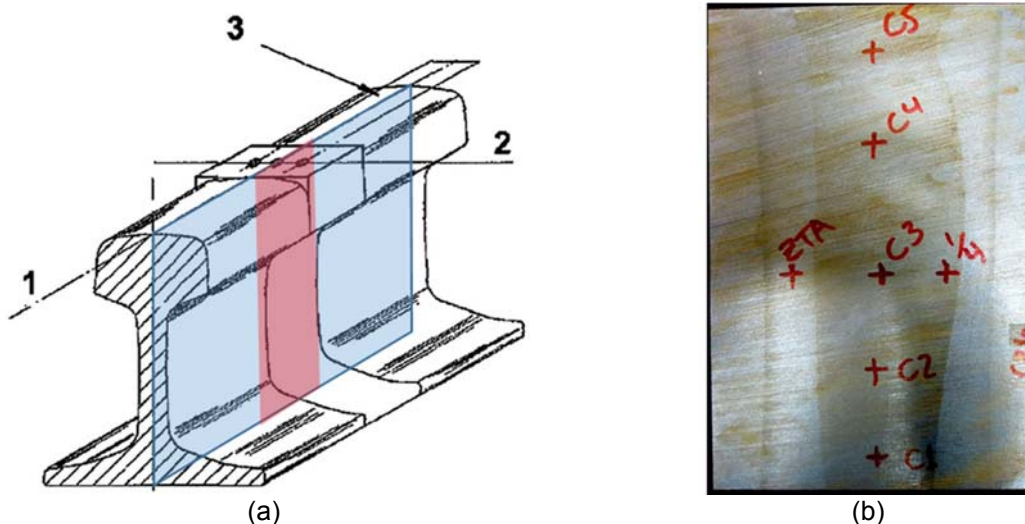
1. a distância entre os trilhos em cada simulação (vide Figura 2);
2. os tempos de execução das atividades (vide Tabela 2);
3. os valores de expansão térmica (dilatação) dos trilhos.

Nas experiências feitas neste trabalho, relógios comparadores, que medem deslocamentos com uma precisão de 0,01mm, foram estrategicamente colocados nas extremidades dos trilhos a serem soldados, na região do Patim e do Boleto, conforme ilustrado na Figura 5.a.



**Figura 5.** (a) Posicionamento dos relógios comparadores na determinação da expansão linear (dilatação) dos trilhos durante o procedimento de soldagem aluminotérmica. (b) Medição da atenuação ultrassônica a  $\frac{1}{4}$  da solda aluminotérmica.

Na fase anterior, verificou-se o potencial emprego das medições de atenuação ultrassônica das juntas, considerando-se o aço do trilho como referência para medir qual é o ganho residual de uma onda ultrassônica que se propague em igual distância na região da solda. Neste trabalho foram feitas medições de atenuação ultrassônica, como ilustrado na Figura 5.b, através de um aparelho de ultrassom da marca MITECH modelo MFD350B. Uma vez calibrado o ganho ultrassônico no metal base (trilho), mediu-se os ganhos residuais na junta soldada no centro exato da solda e na parte intermediária (1/4) entre o centro da solda e a linha de fusão. Quatro soldas executadas foram cortadas longitudinalmente, como mostrado na Figura 6.a, de forma a obter seções retas com o Metal de Solda (MS) adicionado por aluminotermia, a Zona Termicamente Afetada (ZTA) e o Metal de Base (MB) ao redor da solda. Estas três regiões tiveram sua análise química feita pontualmente através de um Espectrômetro de Emissão Ótica, que permite obter a análise química pontualmente em uma amostra. As regiões analisadas em 4 amostras estão exemplificadas na Figura 6.b. Um total de 22 pontos foram testados quimicamente.



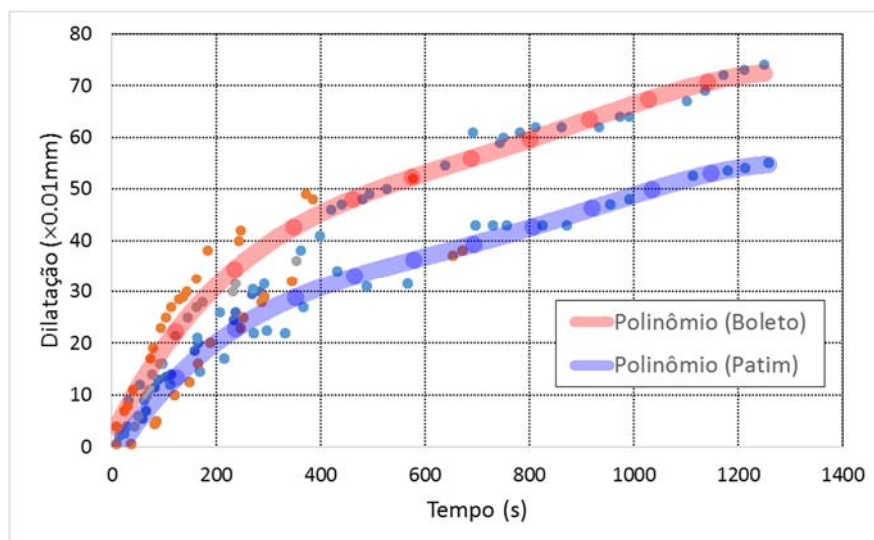
**Figura 6.** (a) Posicionamento dos relógios comparadores na determinação da expansão linear

Uma seção reta das soldas foi preparada para a observação macrográfica. Foi realizado um ataque químico com o reagente Nital a 10%. O objetivo foi verificar se as variações das dimensões da região fundida (Metal de Solda) e da Zona Termicamente Afetada ZTA) estavam associadas às variações adotadas no processo de soldagem, basicamente distância entre os trilhos e tempo de pré-aquecimento.

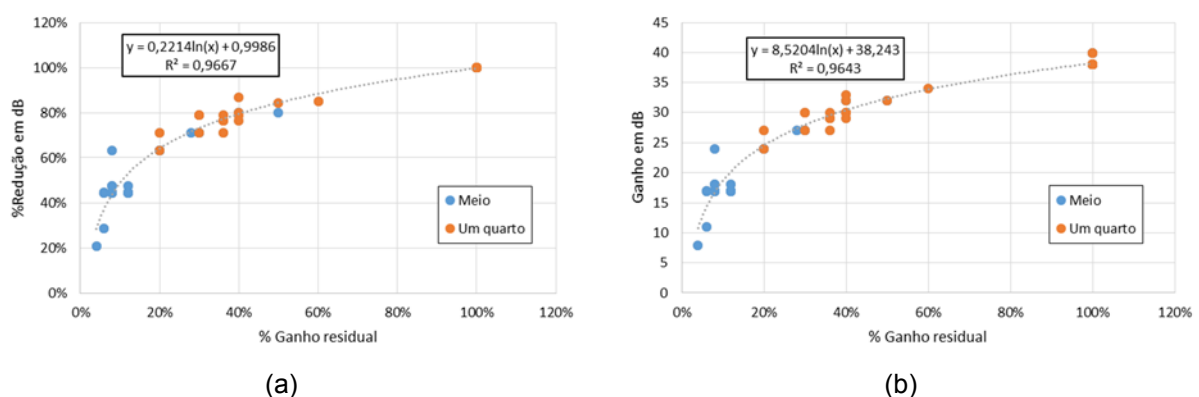
### 3 RESULTADOS

Os resultados de medição a dilatação revelaram que o patim e o boleto dilatam-se de formas diferentes. Além disso, o trilho dilata-se de forma diferente durante o pré-aquecimento e após a soldagem, conforme descrito no gráfico da Figura 7.

Os resultados das medições feitas, tanto em dB (decibéis) quanto em percentual de ganho residual estão apresentados nos gráficos da Figura 8. É possível notar a tendência de maior dispersão da onda ultrassônica na região central da solda, detectada nas etapas anteriores deste trabalho. Os pontos relacionados à posição central da solda apresentam um ganho ultrassônico médio de apenas 17%, enquanto que a região intermediária entre o centro da solda e o início da ZTA apresenta um ganho maior que o dobro da região central: 37%.



**Figura 7.** Variações das dilatações dos trilhos (comprimento base total  $1428 \pm 5,4$ mm).



**Figura 8.** Resultados das medições de (a) atenuação ultrassônica ou (b) ganho residual nas juntas soldadas aluminotérmicas.

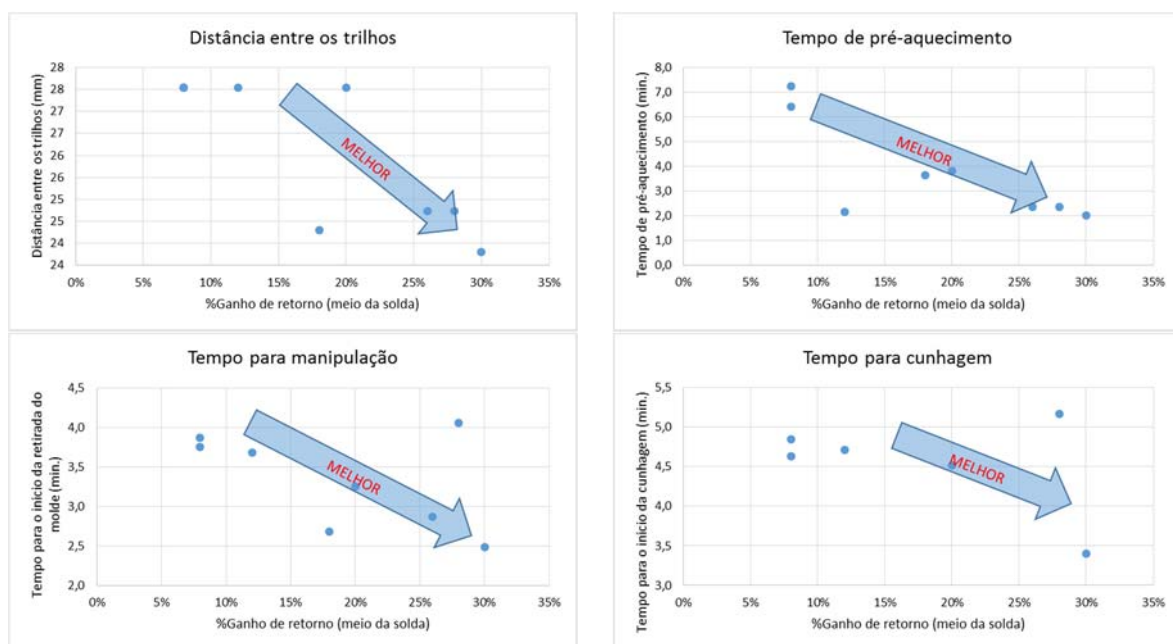
Foi possível associar os resultados de atenuação ultrassônica (Figura 8) com os parâmetros de fabricação das juntas soldadas (Tabela 2) e obter uma tendência de combinações de parâmetros que melhorem o desempenho da junta soldada, ao menos sob o ponto de vista da atenuação ultrassônica. Estes resultados estão mostrados nos gráficos da Figura 9 e serviram para executar as duas últimas soldas que foram executadas visando o teste de dobramento. Algumas tendências mais nítidas entre os parâmetros descritos na Figura 9, como por exemplo a diminuição



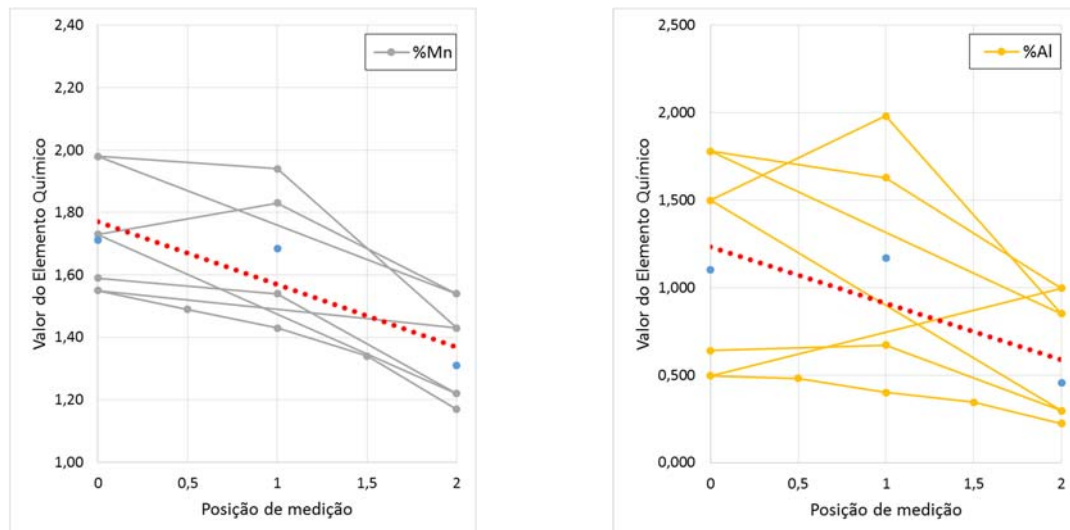
da distância entre os trilhos e do tempo de pré-aquecimento, devem ser validadas com base nos resultados dos ensaios mecânicos.

Os pontos de análise química permitiram verificar a tendência ou não de concentração de elementos químicos na junta soldada. As análises permitiram verificar a tendência na concentração de alguns elementos na parte inferior da solda, na região do Patim (ponto C1, Fig. 6), ou na parte superior, na região do boleto (ponto C5, Fig. 6).

Neste caso houve uma variação na concentração dos elementos silício e vanádio e uma grande variação na concentração dos elementos manganês e alumínio, conforme mostrado na Figura 10. O carbono não apresentou tendência de variação. O mesmo tipo de análise foi feito com a concentração dos elementos químicos de liga do centro da Zona Fundida até a ZTA. Os gráficos da Figura 13 mostram que não houve uma tendência de concentração de nenhum dos elementos de liga do centro da solda para a linha de fusão a não ser pelo vanádio.

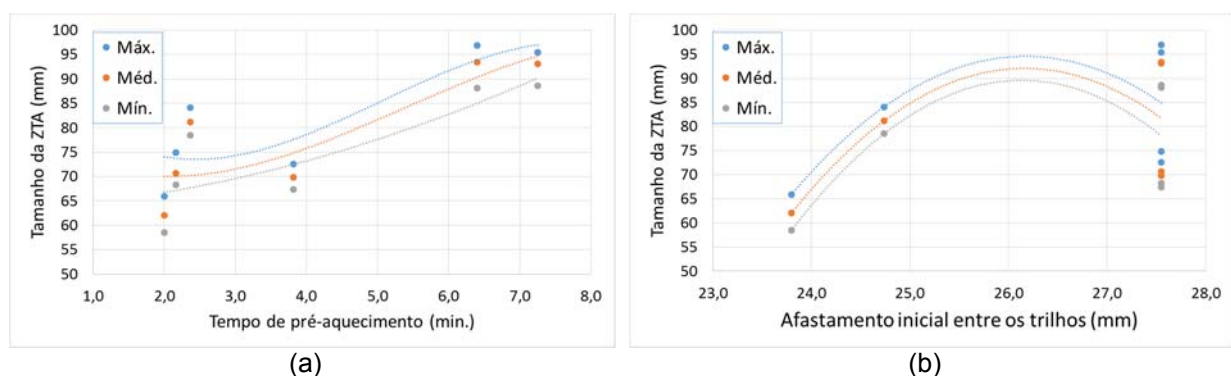


**Figura 9.** Associação dos resultados de atenuação ultrassônica com os parâmetros de soldagem aluminotérmica com a indicação de possíveis tendências para melhoria da qualidade da junta.



**Figura 10.** Variação dos elementos de liga nas soldas aluminotérmicas em função da posição de medição vertical: 0=região inferior (patim) e 2=região superior (boleto).

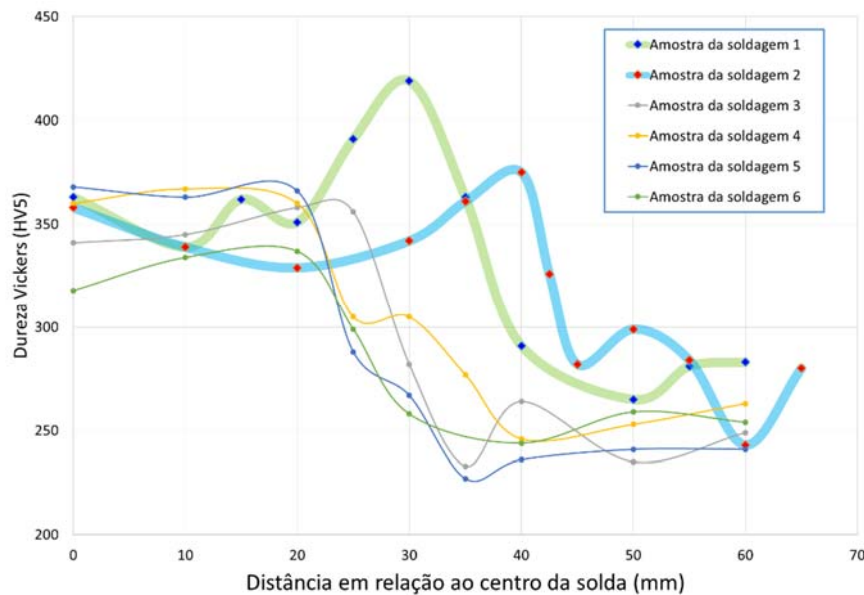
Os gráficos da Figura 11 associam os valores do tamanho da região fundida relacionada ao metal de solda e da ZTA (Zona Termicamente Afetada) com o tempo de pré-aquecimento (Fig. 11.a) e com o afastamento entre os trilhos (Fig. 11.b). Pela Figura 11.a pode-se perceber que há uma tendência nítida e lógica da diminuição da ZTA com o tempo de pré-aquecimento: 35mm de variação em 75mm de tamanho médio da ZTA (ou aprox. 45%). Esta mesma variação também ocorre no tamanho da zona fundida (ZF), porém de forma menos intensa: 10mm de variação em 40mm de tamanho médio da ZF (ou 25%). Na Figura 11.b pode-se notar que a variação das dimensões da ZTA é menos sensível com o afastamento inicial dos trilhos. Porém é possível perceber um efeito relativamente grande quando o afastamento é reduzido na faixa abaixo de 25mm.



**Figura 11.** Variação das dimensões da ZTA em função do: (a) tempo de pré-aquecimento e (b) das 4 soldadas aluminotérmicas de trilhos R260; (b) afastamento inicial dos trilhos das 4 soldadas aluminotérmicas de trilhos R260 obtidas.

Amostras para verificação do perfil de dureza Vickers empregando-se uma carga de 3kgf ao longo da solda (Metal de Solda, ZTA até o Metal Base) foram retiradas das 4 soldas aluminotérmicas. Posteriormente a mesmas amostras foram usinadas na forma de corpos de prova (CPs) de tração, que foram posteriormente ensaiados. Os resultados das medições dos perfis de dureza estão apresentados da Figura 12. Comparando-se os perfis de dureza obtidos nas 4 últimas soldagens, realizadas após ajustes no processo de soldagem, com as 2 soldagens na condição padrão,

observa-se uma grande diferença no comportamento mecânico das juntas obtidas, conforme mostrado no gráfico da Figura 12.



**Figura 12.** Variação de dureza em juntas soldadas aluminotérmicas de trilhos R260 obtidas no Centro de Soldagem da INSPEBRAS®. As curvas mais finas são das amostras cuja soldagem foi ajustada.

Uma possível causa desta variação seria a composição química entre as 2 soldas iniciais e das 4 soldas obtidas posteriormente. Porém a análise química realizada, em inclusive em inúmeros pontos, não indicou diferenças significativas entre as composições químicas das soldas obtidas nas duas ocasiões. Além disso, a diferença ocorreu na ZTA, que não é afetada pela composição química do metal de solda e sim pelas condições de aquecimento e resfriamento da solda. Isso indica que as soldagens realizadas após os ajustes nos parâmetros do processo foram mais adequadas do que as realizadas na condição padrão.

As mesmas amostras empregadas para fazer o levantamento do perfil de dureza Vickers (item 3.7) foram usinadas em CPs cilíndricos. Os valores praticamente nulos de alongamento obtidos indicam que a solda, na região inferior, próximo aos patins dos trilhos soldados ainda está fragilizada, não tendo sido efetiva a variação dos parâmetros de soldagem em termos de plasticidade no material.

#### 4 DISCUSSÃO

As experiências de soldagem aluminotérmica no Centro de Soldagem da INSPEBRAS® foram baseadas na análise feita em 2 soldagens executadas previamente. Naquela ocasião, foram indicadas algumas opções com variados graus de eficiência e dificuldade de implementação (vide Tabela 1).

Algumas destas soluções foram definidas a serem executadas pelo cliente e os resultados apresentados neste Laudo final indicam que:

1. Havia um excesso de distância entre os trilhos que foi resolvida pela criação de um novo calibre com dimensões mais apropriadas para a operação prática em campo.
2. A diminuição do tempo de pré-aquecimento possibilitou diminuir ou mesmo evitar a formação de gases oriundos do molde nas quatro soldagens, como foi visto nas duas experiências anteriores.

3. Ocorre uma dilatação diferenciada entre a região do Patim e do Boleto dos trilhos sendo soldados, sendo que a região do Boleto dilata-se cerca de 30% mais do que a região do Patim dos trilhos.
4. A dilatação dos trilhos ocorre em maior intensidade durante o processo de pré-aquecimento, confirmando que a operação envolve um gradiente térmico elevado em relação à operação de vazamento e resfriamento do metal de solda.
5. Há uma diferença nítida entre a atenuação ultrassônica na região central com a região intermediária (1/4) da junta soldada aluminotérmica que segue uma relação entre o ganho ultrassônico e a intensidade ultrassônica (em decibéis) logarítmica.
6. A medição da atenuação ultrassônica mostrou-se bem sensível aos parâmetros de soldagem aluminotérmica, indicando que as melhores opções de trabalho são: redução da distância entre os trilhos e diminuição do tempo de abertura dos moldes.
7. As análises químicas demonstraram uma forte tendência de segregação da maioria dos elementos de liga (manganês, silício, alumínio e vanádio) na região inferior da solda, onde fica o Patim, porém sem tendência de concentração ao longo da espessura da solda.
8. Os ensaios macrográficos das juntas soldadas obtidas apresentaram uma tendência nítida de aumento da ZTA com o tempo de pré-aquecimento e com até em certo grau com o afastamento entre os trilhos.
9. Houve uma melhora relevante no perfil de durezas entre as amostras soldadas depois em relação as amostras soldadas na condição padrão, o que pode ser atribuído à diminuição do tempo de pré-aquecimento. Salienta-se que esta diferença ocorreu na Zonta Termicamente Afetada (ZTA) que não recebe influência da composição química do metal de solda.
10. As diferenças entre as composições químicas do metal de solda das juntas obtidas antes e depois são pequenas e as juntas são praticamente iguais em termos de composição química e propriedades mecânicas.
11. Os ensaios de tração realizados em todas as amostras não apresentam diferenças em termos de propriedades mecânicas, o que já era esperado pelos dados de dureza.

## 5 CONCLUSÃO

Por isso, com base nos dados obtidos em todas as fases deste trabalho, pode-se concluir que:

1. Como esperado o tempo de pré-aquecimento e distância entre os trilhos influenciam a junta soldada obtida.
2. O tamanho da Zona Termicamente Afetada (ZTA) pelo calor da solda aluminotérmica (oriunda do pré-aquecimento e do vazamento do metal líquido) pode ser reduzido diminuindo-se o tempo de pré-aquecimento e a distância inicial entre os trilhos. Esta diminuição tende a favorecer o desempenho em dobramento das juntas soldadas por diminuir o volume de material fragilizado presente.
3. O gradiente de dureza na ZTA também diminuiu, com a variação dos parâmetros de soldagem. Isso também é uma condição desejada já que

uma maior dureza dificulta que o material apresente plasticidade, especialmente no teste de dobramento.

4. O desempenho do material na região de solda manteve-se frágil, não sendo possível, pelos métodos adotados, melhorar esta condição de forma relevante. Para tal, somente a implementação das três outras opções oferecidas anteriormente (vide Tabela 1) poderiam melhorar este desempenho.

Como conclusão geral pode-se afirmar que o desempenho da junta soldada (zona fundida + zona termicamente afetada + metal base) vai melhorar com a adoção de um tempo de pré-aquecimento mais curto, uma menor distância entre os trilhos e abertura do molde mais rápida, mas o comportamento da zona fundida ainda manter-se-á frágil sem uso das demais opções oferecidas na Tabela 1.

## REFERÊNCIAS

- 1 Morais, W. A. Parecer de avaliação e melhoria de desempenho em trilhos unidos por soldagem aluminotérmica. Praia Grande: INSPEBRAS, 2014. 53p.
- 2 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.
- 3 Government Of India – Ministry Of Railways. Manual for fusion welding of rails by the alumino-thermic process. Research Designs & Standards Organization (Lucknow-226011), 2012.
- 4 American Welding Society. AWS D15.2/D15.2M:2013 - Recommended Practices for the Welding of Rails and Related Rail Components for Use by Rail Vehicles. Doral (FL), 2013.
- 5 Australian Rail Track Corporation Ltd. Engineering Practices Manual – Civil Engineering - Aluminothermic Welding Manual (RTS 3602), June, 2013.
- 6 Müller, A.; Solidificação e Análise Térmica dos Metais. Editora UFRGS, 1ª edição, 2002.