

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

Carolline Garcia Trindade Real¹
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. Este trabalho oferece uma revisão geral sobre as características básicas de uniões aluminotérmicas de forma a subsidiar a avaliação e melhoria no desempenho de soldagem aluminotérmicas de trilhos, realizada em um outro trabalho também sendo apresentado.

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

ADEQUATION OF ALUMINOTHERMIC WELDING JOINTING OF RAILWAY TRACKS - EVALUATION

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 paper provides a general review of the basic characteristics of aluminothermic unions in order to support the evaluation and improvement in aluminothermic welding performance rails held in another study also being presented.

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

¹ *Graduada em Marketing e Propaganda. Integrante da Equipe Comercial da INSPEBRAS. Praia Grande, Brasil.*

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 as principais formas de melhoria disponíveis que poderiam ser empregadas para ajustar a qualidade dos produtos (juntas) obtidos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando a soldagem aluminotérmica como sendo um processo muito similar ao de fundição [2, 4, 5], muitas das técnicas e procedimentos de melhoria da junta soldada foram herdadas das práticas para obter um produto fundido de boa qualidade. Conforme apontado por Chen et al [5], vários estudos buscando melhorar a qualidade da soldagem aluminotérmica têm sido conduzidos ao longo dos anos. Conforme estes autores, os esforços têm sido concentrados no controle da dureza da solda, em tratamentos térmicos (após a soldagem), alterações no procedimento de soldagem e na forma do depósito de solda. Em função da utilização dos trilhos soldados sob condições de fadiga, alguns estudos têm investigado o papel da microestrutura, especialmente da presença das porosidades (micro e macro) no desempenho à fadiga destas juntas.

Longsdale [4] faz um resumo dos métodos que foram empregados nos últimos anos para melhorar a ductilidade e o nível de tenacidade de juntas soldadas aluminotérmicas em trilhos. Os métodos geralmente buscam reduzir a porosidade, o nível de inclusões e o tamanho de grão da junta obtida. Em seu trabalho ele indica que se for possível empregar um método de baixo custo, alinhado com o baixo custo do processo aluminotérmico, que permita produzir uma estrutura de grãos equiaxiais finos (baixo tamanho de grão) com uma quantidade mínima de descontinuidades, as características mecânicas da junta aluminotérmica irão melhorar e permitir uma maior vida em serviço.

Apesar da quantidade de defeitos em uma junta soldada ser a principal condição limitante do desempenho final da união, Chen et al [5] existem poucos trabalhos avaliando a influência dos parâmetros de soldagem na geração dos defeitos de solda. Através da realização de soldagens aluminotérmicas em ambiente controlado (laboratorial), estes autores determinaram mapas de formação de defeitos com os três principais parâmetros da soldagem aluminotérmica: espaçamento entre os trilhos, temperatura de vazamento do líquido e tempo de pré-aquecimento. Os resultados das análises de Chen et al [5] estão ilustrados nos gráficos da Figura 2.

De uma forma geral, os parâmetros de processo que tendem a formar as microporosidades são contrários a formação dos demais defeitos na junta aluminotérmica. O que leva-se à conclusão que apesar de minimizadas, as microporosidades não podem ser eliminadas apenas pela alteração dos parâmetros de soldagem [5]. Esta é a principal razão para o aparecimento e desenvolvimento de inúmeras técnicas envolvendo a alteração da estrutura de solidificação ou da forma de cristalização da solda aluminotérmica. No primeiro caso são empregadas a compressão, vibração e agitação magnética ainda com a solda no estado líquido ou pastoso. No segundo caso são empregados tratamentos térmicos ou adições diferenciadas de elementos de liga [4].

Os fabricantes e usuários das soldas aluminotérmicas buscam obter os menores tamanho de grão possível nas suas uniões, já que um tamanho de grão menor (fino) apresenta melhores resistência, ductilidade e tenacidade à fratura [4]. Em soldas aluminotérmicas antigas, o tamanho de grão ASTM na região da solda era de aproximadamente #1,5 (equivalente à 215 μ m). Atualmente o tamanho de grão que pode ser encontrado na região da solda é da ordem de ASTM #4 (equivalente à 90 μ m). Esta diminuição é atribuída por Longsdale [4] ao uso de elementos de liga adequados nas formulações dos preparados para soldagem aluminotérmicas.

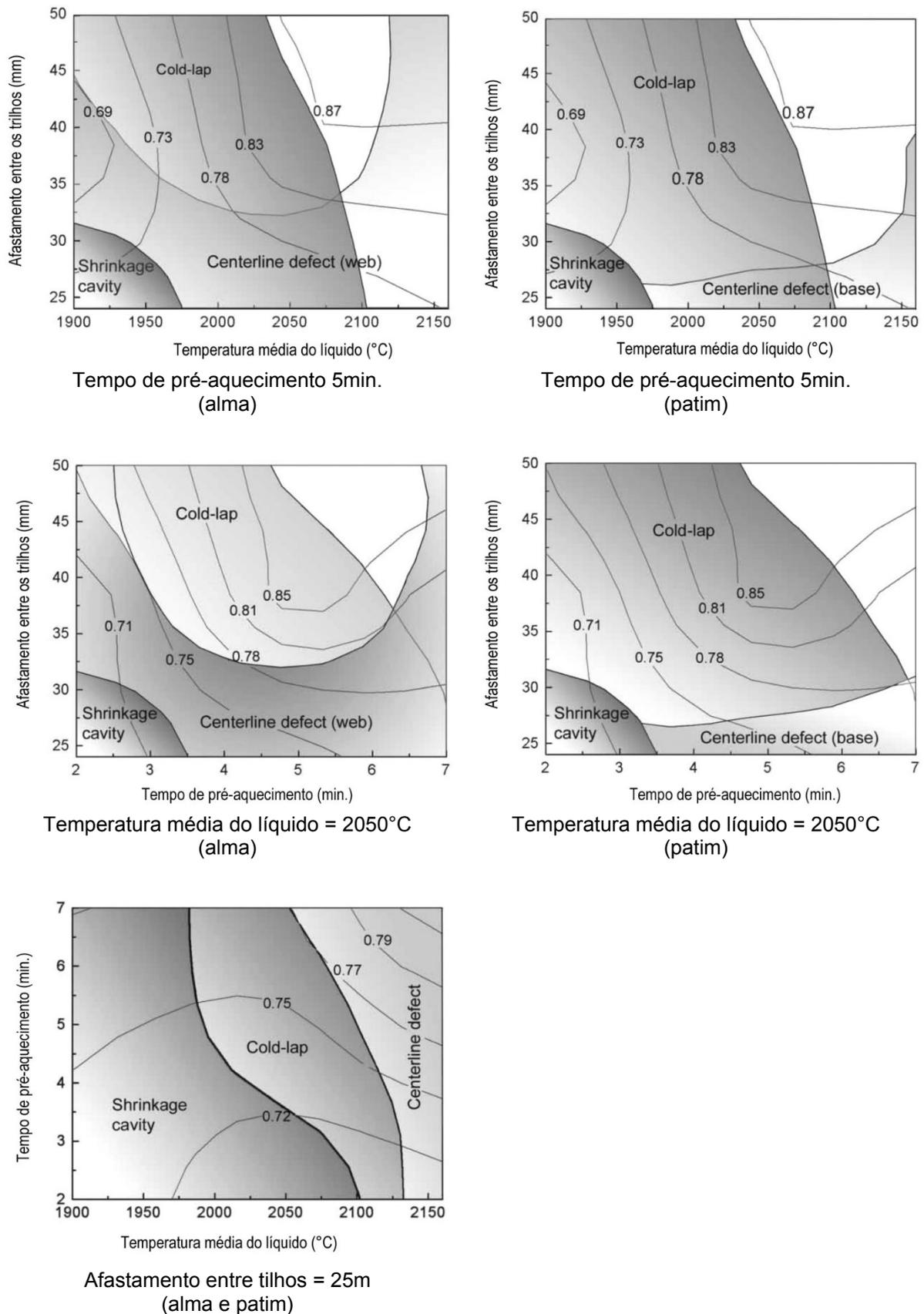


Figura 2. Mapas de formação de defeitos em função dos parâmetros de soldagem aluminotérmica, parcialmente traduzido do trabalho de Chen et al [5]. As linhas iso-paramétricas indicam a mesma fração de porosidades (%VP) formadas nas combinações dos parâmetros em cada gráfico.

2.1 Tratamentos Térmicos

Um tratamento térmico de normalização é uma das possíveis técnicas empregáveis para melhorar o desempenho de juntas aluminotérmicas. O tratamento térmico altera a microestrutura de grãos colunares formados com o objetivo de reduzir o tamanho de grão final e assim melhorar as propriedades mecânicas da junta obtida por aluminotermia [4].

Rajanna e Shivanand [2] testaram com relativo sucesso dois métodos para melhorar a estrutura de uniões aluminotérmicas, consideradas tais como sendo similares a de um produto fundido. Um dos métodos empregados foi um tratamento térmico similar ao de normalização empregando uma temperatura de 820°C para homogeneização da junta e das extremidades do trilho soldado seguido de um resfriamento ao ar por 45 minutos. Os autores avaliaram o impacto desta operação nas propriedades mecânicas (tração, impacto Charpy e dureza) e metalografia.

No trabalho de Rajanna e Shivanand [2], a normalização produziu uma inversão no perfil de durezas na ZTA (Zona Termicamente Afetada) e no metal depositado. Sem tratamento as durezas se elevavam até cerca de um patamar de 340HB na ZTA e caíam para 320HB no metal de solda. Após o tratamento as durezas passaram a apresentar uma variação contínua cuja média foi de 260HB na ZTA e 230HB no metal de solda. Em ambos os casos, o trilho apresentava uma dureza de 290HB.

Uma dureza tão baixa em relação ao metal base do trilho pode representar um problema, já que o local pode ser tornar um ponto de desgaste acentuado e mesmo porque normas, tal como a AWS D15.2/D15.2M:2013 [6], exigem uma dureza mínima acima do valor obtido. No caso da AWS [6], a dureza mínima é de 248HB.

O tratamento térmico também mudou o comportamento a fratura da junta de frágil para dúctil através da mudança de estrutura obtida de grãos grosseiros (típicos de produto fundido) para grãos mais finos, obtidos por normalização. Longsdale [4] indica que um tratamento térmico feito na solda já solidificada consta em um aquecimento até uma temperatura de 790°C seguida de resfriamento lento ao ar.

O tratamento é feito com uso de queimadores a gás e quando bem executado aumentam a resistência mecânica, alongamento e redução de área obtidos em ensaios de tração. Considerando um tamanho de grão inicial ASTM #1,5 (equivalente à 215µm) é possível reduzir o seu tamanho neste tratamento após resfriamento ao ar calmo para ASTM #4 (equivalente à 90µm).

Se ao invés de resfriamento lento for empregado jato de ar é possível obter um tamanho de grão ainda menor, da ordem de ASTM #5 (equivalente à 45µm). Porém esta prática não deve ser empregada para trilhos e soldas de aço cromo-manganês ou cromo-vanádio, devido à maior temperabilidade das mesmas. Nestes casos, deve-se mantê-las recobertas com uma cobertura de isolamento para diminuir a taxa de resfriamento por pelo ao menos 20 minutos [7].

Porém é muito difícil fazer ou garantir o controle neste processo e assim obter valores uniformemente consistentes de uma prática para outra. Além disso, a praticidade deste método é questionável ao ser realizada em campo. Por isso um fabricante de preparados para soldagem aluminotérmica criou um processo (STTW – *Strengthen the Thermite Weld*) no qual uma caixa de grafita é empregada para envolver a solda após ter sido aquecida pelo calor de outra reação aluminotérmica específica. O calor residual dentro da caixa é suficiente para promover a austenitização do metal envolvido pela caixa e assim promover sua normalização.

2.2 Compressão Mecânica da Junta sendo Solidificada

No setor siderúrgico existem equipamentos de lingotamento contínuo que fazem uma compressão suave do aço no final do processo de solidificação com o objetivo de quebrar a estrutura fundida, reduzindo o tamanho final dos grãos, a porosidade e segregação central. Esta mesma técnica vem sendo pesquisada e eventualmente utilizada na soldagem aluminotérmica de trilhos.

A compressão axial dos trilhos é empregada no processo de soldagem aluminotérmica tradicional através de uma etapa de forjamento enquanto a solda ainda está líquida. Longsdale [4] descreve que muito do aço líquido é expelido da região soldada no processo e que no final uma união soldada mais estreita é obtida. Porém esta união apresenta menos inclusões e porosidades com ganhos substanciais em ductilidade e em fadiga em relação ao processo sem compressão.

No trabalho de Rajanna e Shivanand [2] uma compressão axial dos trilhos sendo unidos é realizada até ocorrer a expulsão de material na região da solda, que deve estar ainda no estado pastoso (parcialmente solidificado). A compressão foi seguida de um tratamento térmico similar a normalização, relatado no item anterior. O objetivo dos autores foi verificar se este procedimento, com expulsão de material na região da junta, realmente alterou a microestrutura de solidificação, reduzindo o número e tamanho (severidade) das descontinuidades metalúrgicas e assim melhorar o desempenho da junta.

Ensaio mecânicos e metalográficos reportados no trabalho de Rajanna e Shivanand [2] indicaram a obtenção da mesma alteração no perfil de durezas, mostrado na Figura 3, e modo de falha dúctil ao invés de frágil. Além disso, também foi relatado uma diminuição da quantidade de porosidades e microinclusões, aumento nos valores de limite de resistência, limite de escoamento e alongamento obtidos em ensaios de tração. Finalmente os autores relataram que o tratamento conjunto de compressão e normalização da junta levaram à mesma a apresentar uma deformação plástica muito superior à junta sem tratamento nos ensaios mecânicos de dobramento até a fratura.

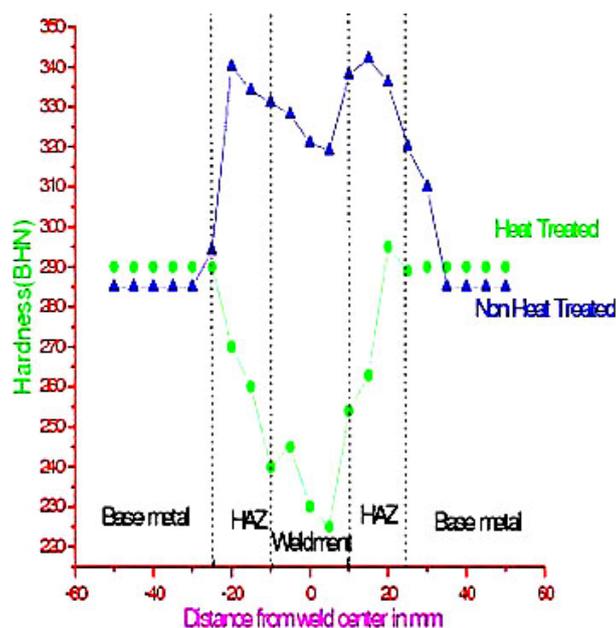


Figura 3. Distribuição de durezas Brinell ao longo de uma junta soldada aluminotérmica com e sem um tratamento de normalização (a 820°C) [2].

Apesar de promissora a técnica necessita de mais testes de forma a gerar parâmetros que permitam sua utilização prática e, claro, equipamentos que consigam fazer a compressão em soldagens reais de trilhos em campo. Outras limitações deste método são [4]: manutenção do alinhamento dos trilhos durante a operação; remoção do excesso de metal expulso pela compressão e piora nos resultados dos testes de dobramento.

2.3 Compressão Mecânica da Junta sendo Solidificada

Sabe-se que vibrações mecânicas levam à obtenção de refino de grãos em produtos fundidos e também favorece a obtenção de uma estrutura de grãos equiaxial ao invés de grãos colunares ou dendríticos [8]. Longsdale [4] cita melhorias nos valores de alongamento de amostras retiradas de juntas formadas com controle de vibração. A frequência de vibração varia de 20 a 100Hz ou de 1.200 a 6.000VPM [4], estes valores são compatíveis com muitos equipamentos disponíveis com uma função relativamente similar na construção civil em concreto. Uma patente [9] indica frequências de vibração similares para juntas aluminotérmicas de trilhos: de 75 a 800Hz (4.500 a 5.100VPM) em uma amplitude de 0,5mm por ciclo. Vibrações sub harmônicas também podem ser empregadas após finalizada a soldagem para reduzir o nível de tensão residual, mas neste caso a estrutura final já está definida.

A vibração sozinha não produz redução no nível de porosidades e sua praticidade ainda é discutível. Além disso, cuidados devem ser tomados para que a vibração não ocorra nos últimos estágios da solidificação da junta, pois as ondas mecânicas podem produzir trincas a quente, especialmente no centro da solda e assim prejudicar, ao invés de melhorar, o desempenho da união.

Conforme reportado por técnicas de emissão acústica [5], o período mais crítico para ocorrer trincamento na junta soldada são os 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 [10] recomenda esperar 6 minutos após o vazamento, quando o espaçamento inicial era 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 [6] salienta que a junta não pode apresentar movimentos relativos, por exemplo, oriundos de dilatação e contração térmica, ao longo do processo de soldagem. Já o Manual de soldagem aluminotérmica da ARTC (Australian Rail Track Corporation) [11] 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.

2.4 Filtragem do Metal Líquido

Outra prática importada as operações de fundição é o uso de filtros cerâmicos porosos para filtrar o excesso de inclusões oriundo do processo aluminotérmico. O fluxo líquido obtido no cadinho é vazado através de um filtro de material cerâmico refratário, por exemplo composto de zircônia (ZrO_2) e mulita ($3(Al_2O_3).2(SiO_2)$) [4], e o volume final de inclusões é reduzido. O emprego de filtros com boa durabilidade melhora a qualidade média e aumento o tempo em serviço de juntas aluminotérmicas, mas precisam ser limpos ou trocados constantemente devido ao entupimento que é gerado ao longo das operações.

2.5 Agitação Magnética

A agitação magnética (ou EMS – *Electromagnetic Stirring*) é uma prática muito empregada no setor siderúrgico e usada no lingotamento contínuo do aço em usinas siderúrgicas [4]. Neste caso, um campo magnético variado agita o aço líquido, induzindo movimentos rotacionais que auxiliam a quebrar grãos colunares ou equiaxiais em formação e crescimento, promovendo a formação de grãos equiaxiais mais finos e com menor porosidade.

A prática requer a colocação de uma bobina elétrica ao redor da solda de forma que possa ser induzida uma força eletromagnética à região fundida. Além das questões práticas, a agitação magnética necessita de energia elétrica para funcionar, o que justamente vai contra o emprego do processo aluminotérmico que dispensa este recurso. Finalmente, agitação em excesso pode criar vazios e agrupamentos de inclusões que vão prejudicar o desempenho da solda.

2.6 Formas de Avaliação Acústica (Ultrassom)

Existem vários métodos de se avaliar uma junta soldada aluminotérmica, porém os que dão resultado mais rápido e possuem menos custo são as avaliações não destrutivas.

Emissão acústica é um método de monitoração passivo que detecta a criação de um defeito pelo registro do som emitido na sua criação. Esta técnica tem sido empregada em soldas aluminotérmicas através de um pequeno transdutor [4] que monitora a junta durante o resfriamento após a solidificação durante um determinado período de cerca de 10 minutos. Ao longo deste período mais crítico, uma solda ruim emite mais sons e em diferentes amplitudes, do que uma solda considerada boa.

A inspeção ultrassônica foi citada por Rajanna e Shivanand [2] como sendo um dos mais importantes testes, que deve ser adotada em um intervalo de tempo específico devido às considerações de segurança, especialmente em trechos curvos da linha férrea onde uma falha pode produzir consequências mais sérias. O uso de ultrassom também é destacado por Mundrey [7] como sendo a melhor forma de detectar uma junta defeituosa antes da mesma entrar em operação prática. Outra recomendação vem da norma AWS D15.2/D15.2M:2013 [6], que não só recomenda a realização de exames ultrassônicos, mas também visuais para garantir a integridade de junta soldada.

A estimativa da atenuação ultrassônica é um índice quantitativo associado à perda de energia de uma onda mecânica de alta frequência quando se propagar no meio em análise. A medição dessa variável é amplamente utilizada nas técnicas de caracterização quantitativas para diferenciar materiais, objetivando a classificação dos mesmos e possibilitando o entendimento entre propriedades físicas do meio envolvido e o seu índice de atenuação.

Esta perda de energia pode estar associada à reflexão, espalhamento ou absorção do meio de propagação. Para um sistema heterogêneo, como o caso de uma solda aluminotérmica com microporosidades, a atenuação é dada pelo espalhamento da energia mecânica (ultrassom). Assim sendo é possível empregar esta variável como forma de quantificar rapidamente a integridade de uma junta soldada sem a necessidade de ensaios destrutivos.

3 CONCLUSÃO

As técnicas apresentadas neste trabalho conciliada com uma revisão bibliográfica pertinente (já apresentada em outro trabalho) permite obter importantes conclusões a respeito do processo de união de trilhos por aluminotermia que foram empregadas em um estudo de caracterização e melhoria de operações de soldagem práticas:

1. O procedimento de soldagem aluminotérmica é bastante susceptível a interferências diversas que podem impactar na qualidade da junta soldada obtida.
2. Alguns dos tempos e práticas podem ser melhorados em direção às condições ideais relatadas pela bibliografia, conforme resumido a seguir:
 - a. aumentar o tempo de espera para as operações de cunhagem e desmonte do molde para evitar a formação de microtrincas e abertura de porosidades na junta soldada;
 - b. ajustar o tempo de pré-aquecimento com base nos gráficos apresentados na Figura 2 de forma a minimizar ao máximo a formação de porosidades sem, entretanto, criar outros defeitos;
 - c. fixação de um vibrador mecânico, que deve ser acoplado mecanicamente a um dos trilhos no lado contrário dos suportes dos moldes- este equipamento, similar ao usado para assentamento de concreto em formas, deve ser regulado a uma frequência de 70 a 100Hz (4.000 a 6.00VPM);
 - d. fazer um acompanhamento ultrassônico para determinar o tempo limite no qual o aparelho pode atuar (tempo de final de solidificação);
 - e. introdução de um núcleo de solidificação na região inferior da junta soldada antes do pré-aquecimento, na região do patim;
 - f. realização de um tratamento térmico de normalização localizado na região inferior do patim, com o aquecimento desta região à aproximadamente 820°C, durante um tempo de 15 minutos, seguido de resfriamento lento.

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 Longsdale, C.P. Thermite Rail Welding: history, process developments, current practices and outlook for the 21st century. AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association) Conference Proceedings, Baltimore, MD - August 29, - September 1, 1999.
- 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 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.

- 7 Mundrey, J.S. Railway Track Engineering. 4th Edition. Chapter 9 – Welding of Rails. pp. 247-266. Tata McGraw-Hill Education, Sep 1, 2000.
- 8 Müller, A.; Solidificação e Análise Térmica dos Metais. Editora UFRGS, 1ª edição, 2002.
- 9 Jury, B.F. Apparatus and method of thermite welding of railway lines. Requerimento de patente número WO2014014359 A2. Disponível em <http://www.google.com/patents/WO2014014359A2?cl=en> <data de acesso 22/09/2014>. Data de publicação: 23 jan. 2014.
- 10 Government Of India – Ministry Of Railways. Manual for fusion welding of rails by the alumino-thermic process. Research Designs & Standards Organization (Lucknow-226011), 2012.
- 11 Australian Rail Track Corporation LTD. Engineering Practices Manual – Civil Engineering - Aluminothermic Welding Manual (RTS 3602), June, 2013.