

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

Guilherme Geada Sampaio<sup>1</sup>  
Willy Ank de Moraes<sup>2</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. 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 neste Congresso.

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

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

### 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 in this Congress.

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

<sup>1</sup> Inspetor de Solda Nível 2, Técnico em Siderurgia, Diretor Comercial da INSPEBRAS. Praia Grande, SP, Brasil.

<sup>2</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, SP, 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, segurança e comodidade.

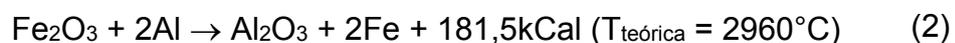
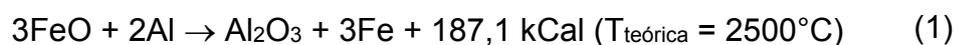
A união dos trilhos é uma das razões devido à qual é possível obter as vantagens citadas para esta modalidade de transporte público. Uma linha contínua não só reduz o desconforto e o ruído imposto aos usuários, mas também melhora as condições de desgaste, fadiga e manutenção dos equipamentos ferroviários [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.

Este trabalho faz uma avaliação geral do processo de soldagem aluminotérmica e foi empregado em um projeto de melhoria geral do desempenho de juntas aluminotérmicas de trilhos. Estão abordadas as principais características do processo assim como os possíveis problemas que podem ocorrer.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme apontado pela bibliografia [1,2], linhas férreas contínuas, formadas através da soldagem dos trilhos constituintes, têm se tornado cada vez mais costumeiras devido às suas vantagens em relação às linhas férreas tradicionais descontínuas, formadas por juntas de dilatação entre os trilhos. Dentre estas vantagens, destacam-se simplificação do custo de manutenção e inspeção das linhas, controle do nível de ruído e vibração e garantia de uma operação mais segura da linha.

Existem vários processos para soldagem de trilhos todos com suas características, vantagens e desvantagens [1,3]. Porém em termos mundiais, o processo que apresenta os melhores resultados em termos de custo e benefício, especialmente em termos de solda no campo, é o processo aluminotérmico. Neste processo, alumínio metálico puro reage com óxidos de ferro através de reações fortemente exotérmicas [4]:



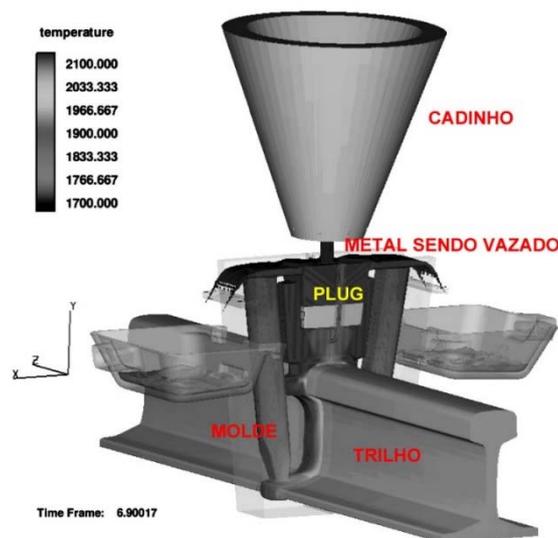
A primeira reação, descrita pela Eq. 1, é a menos efetiva, por isso, conforme Hauser [3], a reação descrita pela Eq. 2 foi usada pelo processo patenteado por Theodor Goldschmidt em 1895 com o nome Thermit® para a criação de linhas férreas contínuas pela soldagem de trilhos. Já a reação descrita pela Eq. 3 foi posteriormente desenvolvida e empregada nos Estados Unidos.

O processo dispensa a necessidade de uso de energia elétrica e além desta grande vantagem, têm-se a facilidade e rapidez na qual este processo de solda é executado e o baixo custo, sendo que mais da metade do custo do processo está vinculado à mão de obra envolvida na sua execução [3].

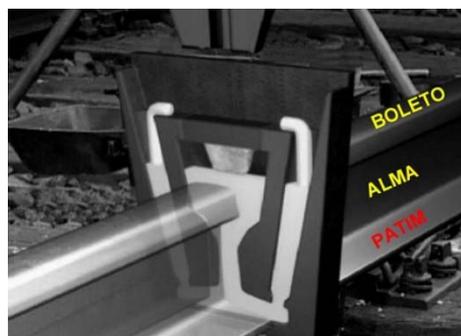
A reações aluminotérmicas são processadas dentro de um cadinho refratário ou revestido de refratário, conforme ilustrado pelas Figuras 1 e 2. Devido às elevadas temperaturas envolvidas que, conforme informados por diversas bibliografias consultadas, podem chegar à 2450°C [5], 2760 [3] ou 3090°C [6,7]. Porém a presença de elementos de liga [1] e outras perdas térmicas fazem diminuir no momento do vazamento para cerca de 1900 [3] a 2000°C [6,8].

O processo de soldagem aluminotérmica SmW, anteriormente usado, era mais longo e complexo, porém o desenvolvimento da técnica SkV, no qual o pré-aquecimento é mais curto e os moldes pré-fabricados [5] permitiu um grande desenvolvimento desta tecnologia de soldagem. Atualmente a soldagem aluminotérmica (processo SkV) é rapidamente realizada conforme as seguintes etapas [3,5,6]:

1. a redução dos óxidos de ferro ( $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$  e  $FeO$ ), liberando ferro puro;
2. a fusão do ferro metálico e do óxido de alumínio (alumina) liberados da reação;
3. a mistura do ferro metálico líquido com as ferro-ligas eventualmente adicionadas à mistura;
4. a separação da alumina da massa metálica líquida, formada basicamente por ferro
5. o vazamento e solidificação da massa líquida, com composição química ajustada, formando a união soldada.

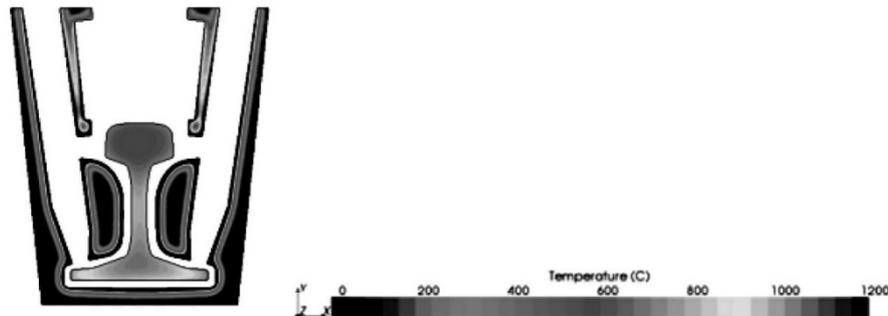


**Figura 1.** Representação esquemática do processo de soldagem aluminotérmica de trilhos ferroviários [9].



**Figura 2.** Ilustração do vazamento do metal dentro do molde ao redor das extremidades dos trilhos a serem unidos [9].

O pré-aquecimento feito no conjunto formado pelas extremidades dos trilhos a serem unidos e moldes que conterão o metal líquido a ser vazado do cadinho é feito pela chama produzida por um maçarico. A temperatura das extremidades finais do trilho alcança cerca de 1000°C [2] e é necessária para auxiliar o metal vazado na retirada de oxidações superficiais na região das extremidades dos trilhos. Importante frisar que a temperatura ao longo do perfil do trilho não é constante. Moarrefzadeh [8], fez um estudo sobre a ZTA no processo aluminotérmico e concluiu que a temperatura do líquido, após o vazamento, aumenta do patim ao boleto. A Figura 3 ilustra o perfil de temperaturas envolvidas no pré-aquecimento da extremidade do trilho e dos moldes conforme calculadas por Gehrman et al [9].



**Figura 3.** Cálculo da distribuição de temperaturas no pré-aquecimento de uma junta a ser soldada por aluminotermia, antes do vazamento [9].

Se não houvesse o pré-aquecimento, o metal vazado do cadinho na junta poderia resfriar rapidamente e solidificar-se imediatamente ao tocar as extremidades do trilho [10,11]. O pré-aquecimento também favorece a fusão parcial das extremidades do trilho, que se misturam ao metal vazado do processo aluminotérmico, criando uma diluição adequada solda-metal base. Pré-aquecimento excessivo poderia gerar fusão das extremidades do trilho, antes do vazamento do metal do cadinho, criando inclusões e possivelmente criando uma região de menor dureza e conseqüente menor resistência ao desgaste no trilho [11]. O tempo de pré-aquecimento também é função do tipo de gás usado: de 2-2,5 minutos a 10-12 minutos em função do tipo de combustível e uso de ar ou oxigênio [10]. Quando gás liquefeito de petróleo (GLP) é empregado com oxigênio a pressão de saída dos cilindros deve ser ajustada de 2,0-2,5kgf/cm<sup>2</sup> para o GLP e para 7,0-8,0 kgf/cm<sup>2</sup> para o oxigênio [10].

Uma parte importante do processo é a separação da alumina formada pelas reações químicas da massa metálica líquida o que pode ser alcançada em um curto período por uma melhor fluidez do metal que é devido a uma maior temperatura ou pela adição de compostos fluidizantes tais como carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) ou fluorita (CaF<sub>2</sub>). As misturas comerciais comumente empregam 5 partes de óxidos de ferro em pó misturado a 3 partes de pó de alumínio [2] e pesam tipicamente entre 13 a 15kg, aproximadamente [5].

Após a reação aluminotérmica finalizar dentro do cadinho, o que ocorre de 18 a 28 segundos após a ignição [11], o que pode ser verificado pelo grau de luminosidade emitida, deve-se permitir um tempo mínimo para que a alumina, que é mais leve que o metal líquido formado, possa ascender pela massa metálica e formar uma escória na parte de cima do interior do cadinho. Este tempo varia em torno de 20 a 25 segundos [2,5,6] e deve ser controlado para garantir que a união formada após o vazamento do metal líquido do cadinho não esteja contaminada com alumina. Caso contrário, será obtida uma união fraca, com grande presença de aluminatos no seu interior.

Posteriormente o excesso de metal na parte de cima do boleto deve ser entalhado (trimming) ainda a quente (rubro) para permitir o seu corte posterior. O resfriamento da junta pode proceder naturalmente ao ar, mas aços ligados ao cromo-manganês e cromo-vanádio devem ter um resfriamento ainda mais lento, garantido por um tampo isolante colocado sobre a junta por pelo menos 20 minutos após a soldagem [5].

## 2.1 Limitações Conhecidas do Processo

Uma união por soldagem aluminotérmica é basicamente uma união por fundição e sendo assim esta tem uma microestrutura de metal fundido, com características estruturais típicas, ou seja, grandes grãos do tipo colunar ou dendríticos e defeitos comuns a um produto fundido. Esta condição faz com que este tipo de solda apresente baixa ductilidade e uma fratura através do mecanismo de clivagem (frágil). A porosidade, vazios e inclusões no metal soldado, entalhes mecânicos e áreas de transformação martensítica formada no acabamento após a soldagem são os principais motivos de falha em serviço de uma junta aluminotérmica [6]. Mundrey descreve em seu livro [5] que 80% dos casos de falhas em trilhos originam-se nos patins e apenas 10% são originados nos boletos devido a um problema de heterogeneidade no pré-aquecimento do conjunto (trilho e moldes).

A Quadro 1 apresenta as principais características da solda aluminotérmica em comparação às obtidas por outros processos mais complexos ou tradicionais: (1) soldagem por resistência elétrica (*flash welding*) [1]; (2) soldagem por aquecimento e pressão (*Gas Pressure Weld*) [12]; (3) Arco elétrico enclausurado (*Enclosed Arc Welding*) e (4) soldagem por arco elétrico submerso (*Submerged slag weld*). A Quadro 2 destaca o desempenho das diferentes juntas soldadas de trilhos em comparação ao material original (*parent rail*) [5]. Neste caso é notória a menor vida em fadiga das juntas soldadas obtidas por aluminotermia.

**Quadro 1.** Alguns resultados de ensaios mecânicos em juntas soldadas de trilhos obtidas por processos diferentes [3]

Property	Weld	Welding Method					
		Flash Weld	Gas Pressure Weld	Enclosed Arc Weld	Thermite Weld	Submerged Slag Weld	
Fatigue Strength, MPa	rotating bending bending	227 to 276 290 to 331	283 to 303 331	276	262 to 303 179 to 214	227	
Static bending strength <sup>a</sup>	bending strength, MN	1.14 to 1.36	1.19 to 1.34 1.11 to 1.28	1.18 to 1.33	0.725 to 0.894 0.970 to 0.983	1.08 to 1.14	
		HD <sup>b</sup>	0.970 to 1.16	1.16 to 1.29 0.979 to 1.19	0.921 to 1.04	0.832 to 0.930 0.863 to 0.970	1.10 to 1.17
	deflection, mm	HU	30 to 97	25 to 84	28 to 49	7 to 11 17 to 23 9 to 11 11 to 18	23 to 34
		HD	13 to 64	23 to 90	15 to 23		29 to 40
Drop weight strength	height, m	JIS <sup>c</sup>	1.5 to 5.0	2.0 to 3.5 1.0 to 4.0	3 to 8 x 7	2.0 to 3.5 2.5 to 4.0	
		french <sup>d</sup> type	3 to 8 x 5			0.5 to 6.6 4.0 to 9.4	
	deflection, mm	JIS french type	7 to 69 7 to 57	15 to 53 6 to 74	4 to 50		

<sup>a</sup>1.5-m-long rail is supported with a 1-m (39.4-in) span with the weld in the center. The load is applied with a 127-mm-radius (5-in.-radius) die. The bending strength is the load at fracture and the deflection is that at the center of the span just before fracture.

<sup>b</sup>HU = head up. HD = head down.

<sup>c</sup>The span is 914 mm (36 in.) and the tup weighs 8896 N (2000 lb) and has a tip radius of 127 mm (5 in.). The specimen is supported by two springs.

<sup>d</sup>The span is 500 mm (19.7 in.), the tup weighs 3434 N (772 lb), and no springs are used to support the rail. The height of the tup is stepped up at 0.5-m intervals to 4 m (13.1 ft). If the rail does not fracture, the height is increased to 8 m (26.2 ft) in 1-m intervals. If the rail still does not fracture, the test is repeated at 8 m: 8 x 5 means five repetitions at a height of 8 m (26 ft).

Rajanna e Shivanand [2] relataram que análises com microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram que a junta obtida por este método apresenta uma microestrutura constituída de grãos dendríticos com inclusões de óxido de alumínio nos espaços interdendríticos. As juntas aluminotérmicas apresentam também carbonetos precipitados ao longo do contorno dos grãos ferríticos que reduzem a ductilidade e tenacidade [2].

**Quadro 2.** Comparação da resistência à fadiga de juntas soldadas obtidas por diferentes processos [5]

Item	Fatigue limit in kg/mm <sup>2</sup>	Percentage of fatigue life as compared to parent rail
Parent rail	33–36	100
Gas pressure welding	34	95.8
Flash butt welding	30–34	90.1
Enclosed ARC welding	28–78	90.0
Alumino-thermic welding	18–22	56.4

A grande desvantagem do processo aluminotérmico são as várias etapas a serem realizadas, cuja correta execução dependem das condições ambientais e do pessoal que estiver executando a soldagem [5,6,13]. Pequenas alterações na correta execução de todos os procedimentos nestas etapas compromete o desempenho final da junta soldada. A norma AWS D15.2/D15.2M:2013 [14] indica, por exemplo, que algumas variáveis do processo de soldagem, incluindo técnicas de pré-aquecimento, método de ignição da mistura, taxa de resfriamento e remoção do molde, devem ser rigidamente seguidas conforme indicadas pelo fornecedor da mistura e acessórios para a soldagem aluminotérmica. O cadinho, por exemplo, deve sempre ser limpo e seco em todas as operações [14], por isso alguns fabricantes até disponibilizam cadinhos descartáveis.

Algumas das variáveis importantes para o controle do processo são listadas por Longsdale [6] em seu trabalho de revisão sobre o processo de soldagem aluminotérmica para união de trilhos ferroviários:

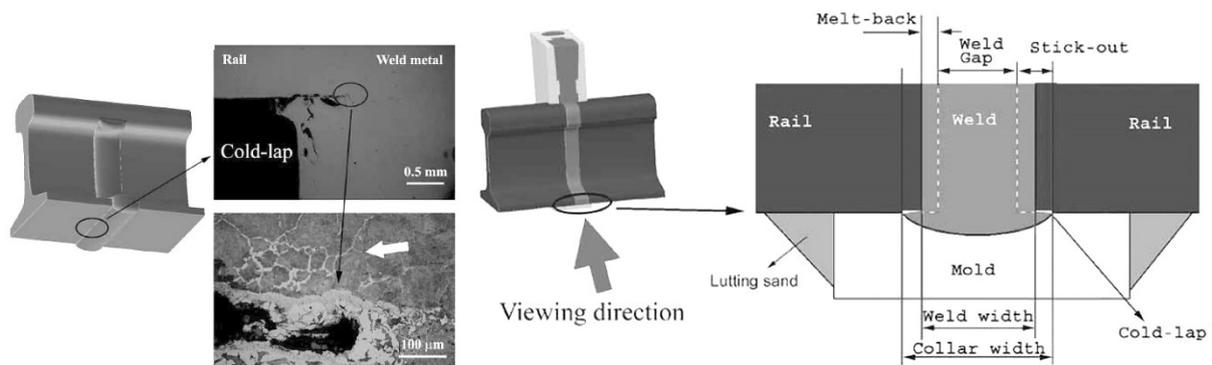
- desalinhamento dos trilhos;
- variação do tamanho ou forma das seções retas dos trilhos;
- afastamento (abertura) entre os trilhos a serem unidos;
- qualidade da montagem dos moldes nas extremidades do trilho;
- duração do pré-aquecimento;
- pré-aquecimento do cadinho e do plug de desvio;
- umidade do ar;
- tempo transcorrido para a remoção dos moldes;
- movimentação excessiva dos trilhos durante a solidificação da solda.

O trabalho de Chen et al [4] apresenta detalhes dos principais defeitos que podem ser obtidos após a soldagem aluminotérmica de trilhos assim como as principais condições de formação. Segundo estes autores [4], tais defeitos apresentam sensibilidade aos parâmetros de soldagem:

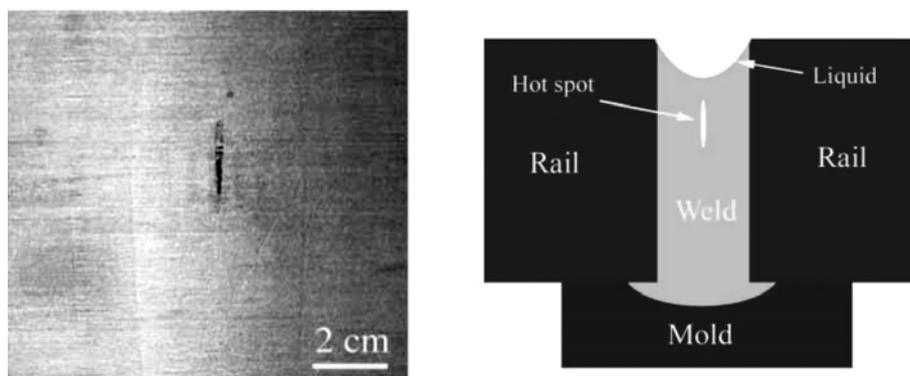
1. União fria na base do patim (*cold laps*) – causadas pela fusão inadequada entre o metal de solda e as extremidades dos trilhos (baixa diluição). É especialmente comum quando menos do que 7mm da extremidade do trilho passa a formar a zona fundida da solda. Um valor adequado fica em torno de 10mm [11]. A Figura 4 descreve visualmente o defeito.
2. Rechupe interno (*shrinkage cavity*) – tipicamente encontrado na região da alma soldada do trilho, especialmente no centro da zona fundida. É

causada pela diferença de contração entre o metal líquido e sólido durante a solidificação, o que eventualmente forma regiões fechadas na frente de solidificação final. Essas regiões fechadas não recebem mais líquido para completar a solidificação no seu interior o que leva a uma região de solidificação incompleta ou vazio. Este defeito também é observado na operação de soldagem por eletroescória [15]. A Figura 5 ilustra esse defeito.

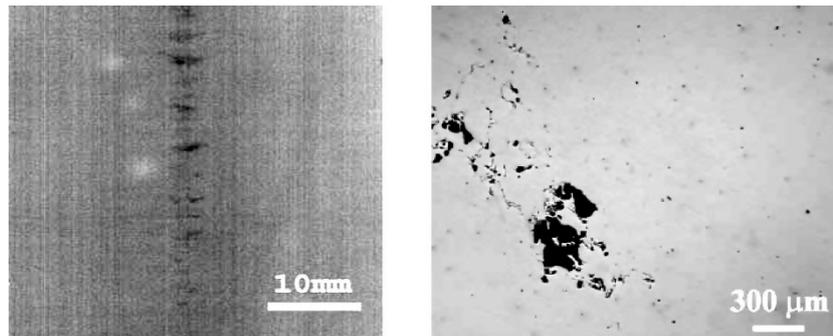
3. Porosidades alinhadas centrais (*center-line defects*) – basicamente um acúmulo de rechupes internos menores, mais comuns na região da alma soldada do trilho do que no patim, também causada pela contração volumétrica e queda da pressão do líquido na região pastosa, durante a solidificação. Neste caso, a diferença entre este defeito e o rechupe interno é sua causa: aqui a queda de pressão criada pela passagem do líquido em uma estrutura dendrítica com a assistência de gás produzido na solidificação é suficiente para produzir os defeitos. A Figura 6 apresenta um exemplo deste defeito.
4. Microporosidades distribuídas (*distributed microporosity*) – É um defeito inexoravelmente presente nas juntas soldadas aluminotérmicas e constituem-se de pequenos poros cujo tamanho varia de poucos microns ( $1 \text{ a } 5 \mu\text{m} = 0,001 \text{ a } 0,005 \text{ mm}$ ) a até décimos de milímetro ( $0,1 \text{ a } 0,5 \text{ mm}$ ). Podem ter forma esférica e irregular e estão usualmente localizados nas regiões interdendríticas, conforme ilustrado pela Figura 7.



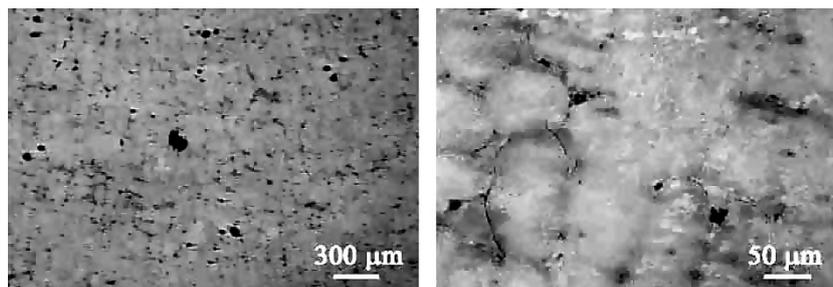
**Figura 4.** Localização e detalhamento de uma união fria na região inferior do Patim (*cold-lap*) que pode ocorrer na soldagem aluminotérmica de trilhos [4].



**Figura 5.** Localização e geometria do defeito rechupe interno (*shrinkage cavity*) que podem ocorrer na soldagem aluminotérmica de trilhos [4].



**Figura 6.** Localização e geometria de defeitos alinhados centrais (*center-line defects*) que podem ocorrer na soldagem aluminotérmica de trilhos [4].



**Figura 7.** Localização e geometria de microporosidades distribuídas (*distributed microporosity*) que sempre ocorrem (em graus de intensidade variadas) no metal depositado por soldagem aluminotérmica de trilhos [4].

O manual para soldagem aluminotérmica do Governo Indiano [10] indica uma série de defeitos que podem ocorrer na soldagem aluminotérmica, suas prováveis causas e medidas para prevenção destes defeitos, com base nas causas primárias. Algumas destas informações estão destacadas na Quadro 3.

**Quadro 3.** Defeitos, causas e medidas de prevenção na soldagem aluminotérmica de trilhos, traduzido do manual para soldagem aluminotérmica do Governo Indiano [10].

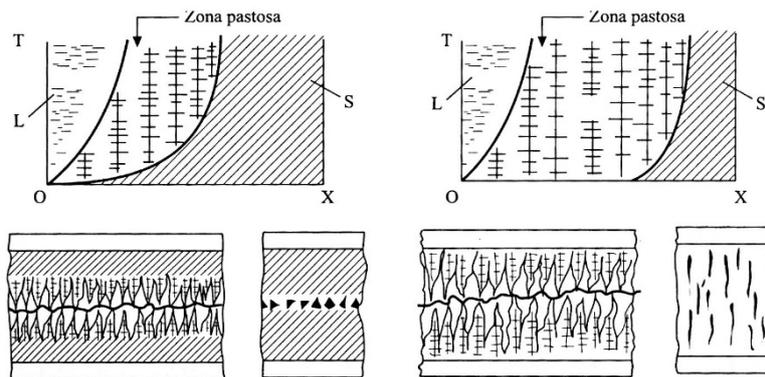
Tipo de defeito	Causa do Defeito	Medidas de prevenção para evitar o defeito
Trincas longitudinais na alma do trilho	Corte de trilhos de alta resistência por chama	Não usar corte a chama devido à probabilidade de trincamento na região da alma do trilho.
Falta de fusão no patim do trilho	Corte por chama nas extremidades dos trilhos	Nunca usar corte por chama para ajustar o tamanho da abertura dos trilhos.
Falta de fusão grosseira na extremidade do trilho	Incompatibilidade entre as dimensões dos moldes e dos trilhos	Não tentar solda um trilho usado a um novo ou soldar trilhos de dimensões dissimilares.
Porosidade no aço depositado pelo cadinho	Argila de vedação muito úmida	A argila de vedação deve estar úmida para ser moldável ao redor das extremidades do trilho a ser soldado e do molde. Nunca usar argila molhada.
Inclusões grosseiras de escória no boletó	Vazamento sem o correto posicionamento do plug	Após o pré-aquecimento, ajustar o plug na parte superior do molde pressionando-o levemente.
Fratura através do centro da solda	Imposição prematura de tensões na junta soldada	Durante a solidificação e imediatamente após o vazamento a união não deve ser submetida a esforços de tração.

## 2.2 Microporosidades

Como as microporosidades são um defeito constante nas juntas aluminotérmicas [4, 6, 13], torna-se importante conhecer melhor o seu processo de formação. Longsdale [6] ressalta que microporosidades e até mesmo inclusões não metálicas aparecem em quantidades substanciais em soldas aluminotérmicas e que estas contribuem

para a menor ductilidade e menor resistência ao impacto deste tipo de junta. Dentre as causas de falhas apontadas por Tzanakakis em seu livro [13], a limpidez interna (presença ou não de inclusões e porosidades) é a principal variável que limita o desempenho da junta obtida por aluminotermia.

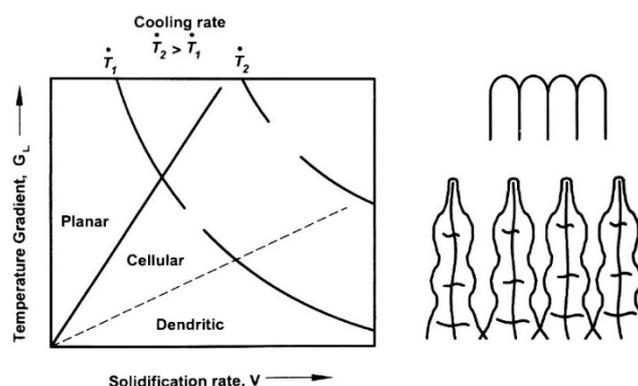
Chen et al [4] descrevem o processo de geração das microporosidades como sendo uma conjunção entre a evolução de gás durante a solidificação e queda da pressão interna do líquido. Esta situação ocorre na região pastosa da frente de solidificação, ilustrada na Figura 8, e conforme descrito por Chen et al [4], a condição descrita é mais favorável ao aumento do volume percentual de poros quando o espaçamento entre os braços dos grãos dendríticos é maior.



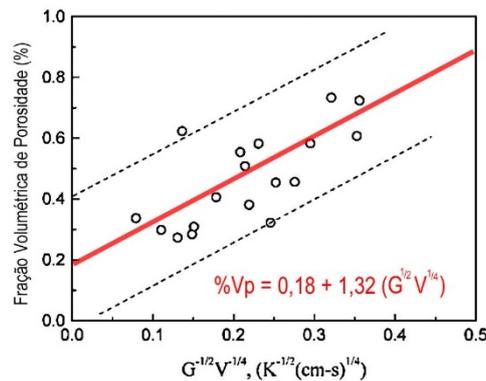
**Figura 8.** Influência do tamanho da região pastosa sobre a distribuição de discontinuidades em ligas solidificadas [17].

Como a formação de uma estrutura dendrítica é uma característica conhecida e modelável [16,17], conforme ilustrado na Figura 9, através dos parâmetros de resfriamento: gradiente local de temperaturas ( $G$ ) e da taxa de solidificação ( $V$ ). Assim é possível, por reflexo, associar estes parâmetros de resfriamento, para gerar uma estrutura dendrítica grosseira, de forma a obter uma relação que descreva a fração volumétrica de vazios observados na junta aluminotérmica com suas condições de resfriamento. Chen et al [4] realizaram várias soldagens aluminotérmicas em ambiente laboratorial de forma que estes perceberam uma dependência clara entre a fração volumétrica de vazios e os parâmetros de solidificação, conforme ilustrada pelo gráfico da Figura 10. Analisando os dados apresentados [4] é possível obter a seguinte equação descritiva da fração volumétrica das porosidades formadas (%VP):

$$\%VP = 0,18 + 1,32 (G^{-1/2} \cdot V^{-1/4}) \quad (4)$$



**Figura 9.** Condições gerais para a formação de grãos dendríticos durante o resfriamento de um metal [18].



**Figura 10.** Dependência entre os parâmetros de solidificação e a fração volumétrica de vazios em uma união soldada aluminotérmica de trilho conforme adaptado do trabalho de Chen et al [4].

### 3 CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica apresentada neste 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 depende da execução de inúmeros procedimentos envolvendo vários operadores, sendo portanto, susceptível a interferências diversas que podem impactar na qualidade da junta soldada obtida.
2. As juntas soldadas apresentam heterogeneidades oriundas do processo de solidificação da liga que podem ser quantificadas por técnicas de caracterização mecânicas (ensaios de tração e impacto) ou estruturais (metalografia).
3. O atendimento aos requisitos mecânicos, especialmente ductilidade de vida em fadiga, das juntas aluminotérmicas é mais desafiador do que para os demais processos de soldagem de trilhos.

### 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 Hauser, D. Welding of Railroad rails – a literature and industry survey. Symposium on Rail Steels—Developments, Processing, and Use, Denver, CO, 17-18 Nov. 1976. ASTM STP 644. American Society for Testing and Materials, pp.118-141. 1978.
- 4 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.
- 5 Mundrey, J.S. Railway Track Engineering. 4th Edition. Chapter 9 – Welding of Rails. pp. 247-266. Tata McGraw-Hill Education, Sep 1, 2000.
- 6 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.

- 7 Schwartz, B. Thermite Welding. ASM Metals Handbook Vol. 6 – Welding, Brazing and Soldering. pp.835-839. ASM International. 1998.
- 8 Moarrefzadeh, Study of heat affected zone (HAZ) in thermit welding process. International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, Vol. 2, n.7, October, 2011.
- 9 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.
- 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.
- 12 Yamamoto, R.; Fukada, Y.; Ueyama, K.; Tatsumi, M.; Oishibashi, H. Gas pressure welding method for steel reinforced bars. American Welding Society. Welding Journal. v.5. May, pp. 188-192, 1998.
- 13 Tzanakakis, K. The Railway Track and Its Long Term Behaviour: A Handbook for a Railway Track of High Quality. Berlin. Springer, 414p., 2013.
- 14 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.
- 15 Liu, S. Electroslag and Electrogas Welding. ASM Metals Handbook Vol. 6 – Welding, Brazing and Soldering. pp. 803-804. ASM International. 1998.
- 16 Morais, Willy A. Soluções sólidas e diagramas de fases: aplicações e exemplos (Cap. 6). In: Morais, Willy A.; Netto, Eliana B. M. e Magnabosco, Antonio S. Metalurgia Física e Mecânica Aplicada. 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração; 2008. p. 103-152.
- 17 Müller, A.; Solidificação e Análise Térmica dos Metais. Editora UFRGS, 1ª edição, 2002.
- 18 Sinha, A.K.; Physical Metallurgy Handbook. McGraw-Hill books, 2003.