

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE BAIXO CUSTO PARA MECANIZAÇÃO DA SOLDAGEM GTAW E SUA APLICAÇÃO EM ESTUDO DE SOLIDIFICAÇÃO DE AÇO ABNT 430

Tairine Berbert Tavares ¹
Rodrigo Rangel Porcaro ²
Luiz Cláudio Cândido ²
Geraldo Lúcio de Faria ²
Heitor Vieira Dâmaso ¹

Resumo

Laboratórios de pesquisa em metalurgia da soldagem requerem controle dos principais parâmetros da soldagem ao arco elétrico para obter resultados satisfatórios. Aços inoxidáveis ferríticos são muito utilizados devido ao custo relativamente baixo e sua resistência à corrosão atmosférica, no entanto, a ausência de transformação de fases no estado sólido durante a solidificação oferece certa limitação à soldabilidade. Neste contexto, um dispositivo de baixo custo para mecanização da soldagem GTAW foi desenvolvido e validado, permitindo condições adequadas de controle, repetibilidade e foi aplicado para avaliar a influência de parâmetros de soldagem na solidificação de um aço ABNT 430. Menores velocidades de soldagem, para uma mesma corrente elétrica, resultaram em grãos grosseiros e alongados no centro do cordão e paralelos à direção de soldagem. O aumento da velocidade e da corrente originou subestruturas dendríticas no interior dos grãos, devido à maior instabilidade da poça. Ainda, avaliou-se aplicação de vibração mecânica por sistema de martetele e pré-aquecimento com relação ao refinamento dos grãos e aumento da uniformidade da estrutura no centro do cordão. A aplicação de vibração mecânica gerou uma estrutura mais refinada e homogênea na zona fundida.

Palavras-chave: Soldagem TIG; Aço inoxidável ferrítico; Metalurgia da soldagem; Solidificação na soldagem.

LOW COST MECHANIZED GTAW DEVICE DEVELOPMENT AND ITS APPLICATION ON SOLIDIFICATION STUDIES OF AISI 430 STEEL

Abstract

Research labs focused on welding metallurgy require the control of the major parameters of arc welding to obtain satisfactory results. Ferritic stainless steels (FSS) are largely used due to its relatively low cost and atmospheric corrosion resistance. However, the lack of phase transformation on solid state during solidification implies to these steels certain weldability limitations. In this context, a low cost mechanized autogenous GTAW device with controlled welding speed was developed and validated, obtaining suitable conditions of control and repeatability, to evaluate the influence of welding parameters on the solidification mode of AISI 430 FSS. It was observed that for lower welding speeds and equal current values, elongated grains were formed at the centerline of the weld parallel to the welding direction. The increase in current and speed values produced columnar dendritic structures inside the grains, as a result of the greater instability caused at the weld pool. The effects of mechanical vibration and preheating at the grain structure were also analyzed in order to investigate their influence on grain refinement. The application of mechanical vibration resulted in a more refined and homogeneous structure on the weld metal.

Keywords: GTAW welding; Ferritic stainless steel; Welding metallurgy; Weld solidification.

¹Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

²Rede Temática em Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: rodrigo.porcaro@ufop.edu.br



I INTRODUÇÃO

Desde os esforços de Daniel Rosenthal [1], na década de 1940, para modelar a transferência de calor e entender o seus efeitos na soldagem dos materiais ao arco elétrico, considera-se que os principais parâmetros durante o processo são mantidos constantes, sobretudo a velocidade de movimentação da fonte de calor, a corrente e a tensão, o comprimento do arco, dentre outros. Deste modo, os estudos de metalurgia da soldagem que visam modelar a evolução estrutural dos materiais e/ou aplicar conceitos simplificados que relacionem, por exemplo, aporte de calor com a microestrutura e as propriedades [2], precisam ser realizados em condições padronizadas e com repetibilidade. Assim, sobretudo em laboratórios de pesquisa e desenvolvimento de soldagem, o uso de equipamentos para mecanização dos processos é fundamental para obtenção de resultados satisfatórios.

Devido ao seu custo relativamente baixo e sua resistência à corrosão atmosférica, os aços inoxidáveis ferríticos são largamente utilizados na produção de eletrodomésticos, móveis e equipamentos de laboratório, dentre outros. Durante a solidificação, por possuírem um alto teor de elementos de liga alfa-gêneos, esses aços apresentam, em princípio, estrutura ferrítica para toda a faixa de temperatura, com ausência, portanto, de transformação de fases no estado sólido [3]. Uma importante limitação destes aços está relacionada à soldabilidade, uma vez que os processos de união ao arco elétrico podem levar à precipitação de carbonitretos de cromo, crescimento excessivo do tamanho do grão, trincamento a quente e, em alguns casos, formação parcial de martensita mesmo com baixo conteúdo de carbono devido à não estabilização e segregação de elementos gama-gêneos [4].

O modo de solidificação da poça de fusão é influenciado pelas condições de soldagem, em especial corrente e velocidade, uma vez que essas variáveis influenciam no gradiente térmico (G) e na velocidade de solidificação (R) da poça [5]. A utilização de um dispositivo para soldagem autógena TIG (*Tungsten Inert Gas*) mecanizada com controle de velocidade tende a minimizar a influência do operador e garantir melhor repetibilidade do processo para estudos de metalurgia da soldagem. Dentre as possibilidades, a tocha de soldagem pode ficar disposta sobre um carrinho de deslocamento automático, que mantém sua velocidade e comprimento de arco constante.

Villafuerte et al. [6] observaram que, para uma poça de fusão no formato de gota em uma soldagem TIG autógena de aços inoxidáveis ferríticos, as mudanças observadas nos modos de solidificação são causadas devido a alterações graduais nas condições térmicas existentes na solda. Para Messler [7], o controle da estrutura de solidificação significa, geralmente, promover o refino do grão por meio de alteração na morfologia pela razão G/R ou modificação no tamanho da estrutura pelo parâmetro GxR. Sabe-se que o refinamento dos grãos não só reduz a ocorrência de trincas de solidificação, mas também melhora as propriedades mecânicas do material, como dureza, ductilidade, resistência mecânica sob tração e vida em fadiga [8]. A aplicação de intensidades suficientes de energia acústica e vibração mecânica para promover

modificações na microestrutura durante a solidificação pode auxiliar na diminuição do tamanho de grão, na eliminação de estruturas colunares e formação de grãos equiaxiais, no aumento da uniformidade da estrutura formada e controle do tamanho de inclusões não-metálicas e impurezas [9].

Tendo em vista que as variações no aporte térmico e velocidade de soldagem influenciam os parâmetros G e R de solidificação, nesse trabalho, foi desenvolvido e validado um dispositivo de baixo custo para a mecanização da soldagem TIG que permitiu avaliar como a alteração desses parâmetros afeta a microestrutura final das juntas de um aço ABNT 430. De modo exploratório, cordões de solda foram realizados simultaneamente à aplicação de vibração mecânica, visando promover um maior refinamento dos grãos e aumentar a uniformidade da estrutura de solidificação. Além de caracterização metalográfica, ensaios não destrutivos foram aplicados nas juntas soldadas para verificar a presença de descontinuidades no material.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para a realização dos experimentos foram utilizados dois materiais: (i) chapas de aço baixo carbono com 10mm x 5mm x 3mm de espessura – aplicado para avaliação da repetibilidade do dispositivo para mecanização da soldagem TIG desenvolvido; (ii) aço inoxidável ferrítico (ABNT 430) na forma de chapas com dimensões de 20mm x 20mm x 1mm – utilizado no estudo de solidificação. Para a avaliação da repetibilidade, um material com espessura de 3mm foi escolhido por permitir obter uma condição de penetração parcial e facilitar o monitoramento dos ciclos térmicos durante a soldagem com termopares do tipo K, como será detalhado no próximo item.

2.2 Desenvolvimento do Dispositivo Mecanizado

O projeto para o dispositivo de mecanização do processo de soldagem TIG de baixo custo é apresentado na Figura 1. Pode-se observar que um tirante do tipo “rosca sem fim”

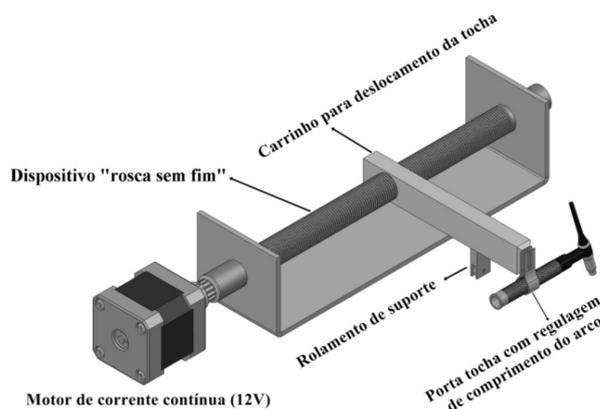


Figura 1. Representação esquemática do projeto para desenvolvimento de dispositivo de baixo custo para mecanização do processo de soldagem TIG.

é o responsável pelo deslocamento linear de um carrinho que movimenta a tocha. A velocidade de avanço é definida pela variação da tensão de alimentação (0V a 12V) de um motor de corrente contínua. Para o desenvolvimento do projeto, todos os materiais empregados foram oriundos de sucatas eletrônicas/mecânicas de modo a reduzir o custo de fabricação.

Para verificar a capacidade de produzir soldas padronizadas a partir do dispositivo montado, amostras de um aço baixo carbono com 3mm de espessura foram utilizadas. Para os experimentos, termopares do tipo K foram soldados por resistência elétrica na face inferior das chapas (Figura 2a), em duas posições adjacentes distanciadas de 30mm sobre a linha de solda, de modo a monitorar e comparar os ciclos térmicos durante a soldagem. Realizou-se um cordão de solda autógeno no centro da chapa, Figura 2b, com os seguintes parâmetros operacionais de modo a obter penetração parcial: corrente constante de 85A e tensão de 10V, velocidade de soldagem de 2,4mm/s e fluxo de gás argônio de 10L/min para proteção da solda e do eletrodo. Imagens macrográficas foram adquiridas em estereoscópio óptico e os parâmetros geométricos do cordão (largura e penetração) foram medidos a partir processamento de imagens no *software* ImageJ, em 3 campos ao longo da região central do cordão de solda.

2.3 Procedimento de Soldagem

Os parâmetros de soldagem mais adequados para o aço ABNT 430 foram determinados em função da espessura da chapa, baseados na literatura e em experimentos exploratórios, já que corrente, tensão, velocidade de soldagem e comprimento do arco exercem influência significativa no formato, aspectos superficiais e geométricos do cordão de solda. Variações de corrente e de velocidade de soldagem foram aplicadas utilizando-se uma fonte TIG, para criação de cordões autógenos, no centro de chapas, por meio de eletrodos de tungstênio com 2% de tório, de diâmetros 1,6mm e 2,4mm, em função da corrente aplicada. Utilizou-se argônio como gás de proteção, com um fluxo mantido a um valor de 10L/min e um comprimento de arco variando entre 2,5mm e 2,8mm, correspondendo a uma tensão aproximada de 10V.

Na Tabela I são apresentadas as velocidades médias de soldagem, corrente, diâmetro do eletrodo e aporte térmico, considerando a eficiência térmica do processo TIG igual a 80% [7], para as diferentes condições estudadas. Foram avaliados: aumento de corrente mantendo-se constante a velocidade de soldagem (Amostras 4 e 5), variação da velocidade para um mesmo valor de corrente (Amostras 2, 3 e 4), alterações nos parâmetros de soldagem mantendo-se o

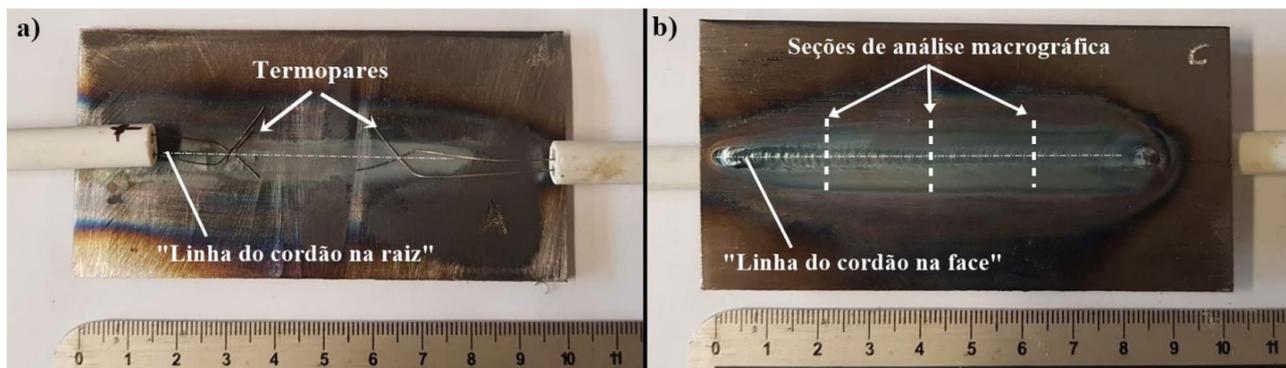


Figura 2. Experimentos para verificar repetibilidade da soldagem mecanizada TIG. (a) Termopares K soldados por resistência elétrica em superfície inferior de chapa de aço baixo carbono; (b) cordão de solda autógeno com indicações de planos de corte para análise metalográfica/medidas de parâmetros geométricos.

Tabela I. Parâmetros de soldagem utilizados para as diferentes condições operacionais estudadas a fim de avaliar sua influência na microestrutura formada

Amostra	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Corrente de Soldagem (A)	Diâmetro do Eletrodo (mm)	Aporte Térmico (J/mm)
1	1,2	18	1,6	120
2	2	45	1,6	171
3	3	45	1,6	113
4 ¹	6	45	1,6	62
5	6	80	2,4	112
6 ²	6	80	2,4	112

¹Condição submetida a vibração mecânica; ²Condição submetida a um pré-aquecimento de aproximadamente 115 °C antes do processo de soldagem TIG.

aporte térmico em torno de 115J/mm (Amostras 1, 3 e 5) e o efeito do pré-aquecimento (Amostra 6) para os mesmos parâmetros de soldagem, avaliado de forma comparativa com a condição de ausência de pré-aquecimento (Amostra 5). Para experimentos com correntes mais altas, aplicou-se eletrodo de maior diâmetro, evitando sua degradação durante o processo. Todos os experimentos foram realizados com corrente contínua, polaridade direta (CC⁻), posição plana e soldagem “para frente” com inclinação da tocha igual a 15° em relação à normal. A abertura do arco elétrico foi realizada com auxílio de alta frequência (arco piloto).

2.4 Procedimento para Aplicação de Vibração Mecânica

Aplicou-se ainda vibração mecânica por meio do sistema de martetele de uma furadeira elétrica manual, de modo a verificar os efeitos sobre a estrutura de solidificação, condição 4 na Tabela 1. Com auxílio de um pino acoplado ao mandril da furadeira, a vibração do martetele foi transmitida ao suporte no qual as chapas de aço ABNT 430 foram fixadas. O suporte foi apoiado sobre mantas de borracha para reduzir a transferência de vibração mecânica para a mesa de soldagem. Após a abertura do arco elétrico, a furadeira foi acionada manualmente e a soldagem ocorreu sob ação da vibração.

2.5 Caracterização dos Cordões de Solda

Para verificar eventuais trincas após o processo de soldagem do aço ABNT 430, foram aplicadas as técnicas de inspeção por líquidos penetrantes, Norma ASTM E165 [10], e por partículas magnéticas fluorescentes, Norma ASTM E709 [11].

Para a detecção de trincas superficiais, utilizou-se um líquido penetrante visível lavável e um revelador não aquoso do tipo suspensão em solvente. A inspeção por partículas magnéticas fluorescentes se deu com a magnetização por meio de um Yoke de corrente alternada, no sentido longitudinal e transversal ao cordão de solda.

Com o intuito de determinar a morfologia dos constituintes presentes, foi realizada análise metalográfica por meio de estereoscópio e microscópio óptico, com a preparação das amostras seguindo os procedimentos padrão para metalografia [12] e ataque químico utilizando o reativo Vilella (2g de ácido Pícrico, 100mL de álcool etílico e 5mL de HCl).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dispositivo de Soldagem TIG Mecanizado

O motor utilizado para aplicação no dispositivo foi oriundo de sistema de limpador de para-brisas de automóveis com uma caixa de redução acoplada. A fonte primária do circuito elétrico alimenta o motor, acionando o dispositivo de rosca sem fim por meio de engrenagens (Figura 3). A fonte secundária, por outro lado, é responsável pela alimentação do circuito dos relés de segurança, que controlam o sentido de giro do motor e limitam o curso do tirante. Um esquema eletrônico do circuito montado é apresentado na Figura 4.

O carrinho de deslocamento foi construído de tal forma que permitisse um deslocamento transversal da tocha ao longo da haste que a suporta, de modo a alterar a posição da soldagem manualmente sem movimentar a chapa a ser soldada (Figura 3 (a)). Um controle vertical

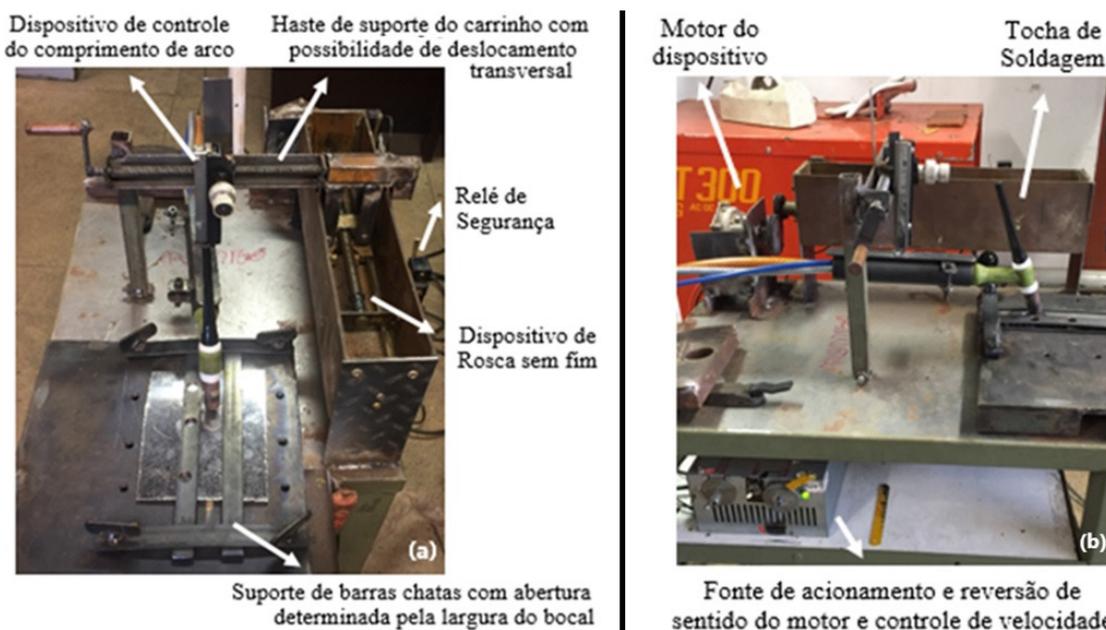


Figura 3. Dispositivo de soldagem TIG mecanizado desenvolvido no projeto com destaque para os componentes de controle do funcionamento. (a) Imagem de topo; e (b) Imagem lateral.

de pequena amplitude oriundo de sucata de microscópio óptico foi adaptado para regular o comprimento de arco por meio do ajuste da distância entre a ponta do eletrodo e as peças metálicas.

As velocidades utilizadas nos experimentos foram definidas com base na potência útil do motor e na relação de redução, que admitiu como velocidade máxima valores próximos de 6mm/s. Por meio do controle de tensão aplicada ao motor, potenciômetro na Figura 4, foi possível obter velocidades de soldagem entre 0,5mm/s e 6mm/s, com boa repetibilidade.

Na Figura 5a são apresentados os resultados de ciclos térmicos monitorados por termopares em duas posições na face inferior de chapa de aço baixo carbono com 3mm de espessura durante a formação de cordão de

solda com o dispositivo mecanizado. Pode-se observar uma grande similaridade entre os principais parâmetros de interesse nos ciclos térmicos obtidos, incluindo as taxas de aquecimento, temperaturas de pico (T_p) e taxas de resfriamento (exemplificadas pelo $\Delta t_{800-500}$). Na Figura 5b, exemplifica-se uma macrografia de seção transversal do cordão de solda obtido e os parâmetros geométricos que foram medidos com auxílio do *software imagej*, resultados apresentados na Figura 5c. Os resultados apresentados na Figura 5 mostram que o dispositivo desenvolvido para mecanização da soldagem TIG foi efetivo na fixação dos parâmetros de soldagem (velocidade, comprimento de arco e tensão), uma vez que os ciclos térmicos monitorados e os parâmetros geométricos medidos apresentaram pequena variação ao longo do cordão.

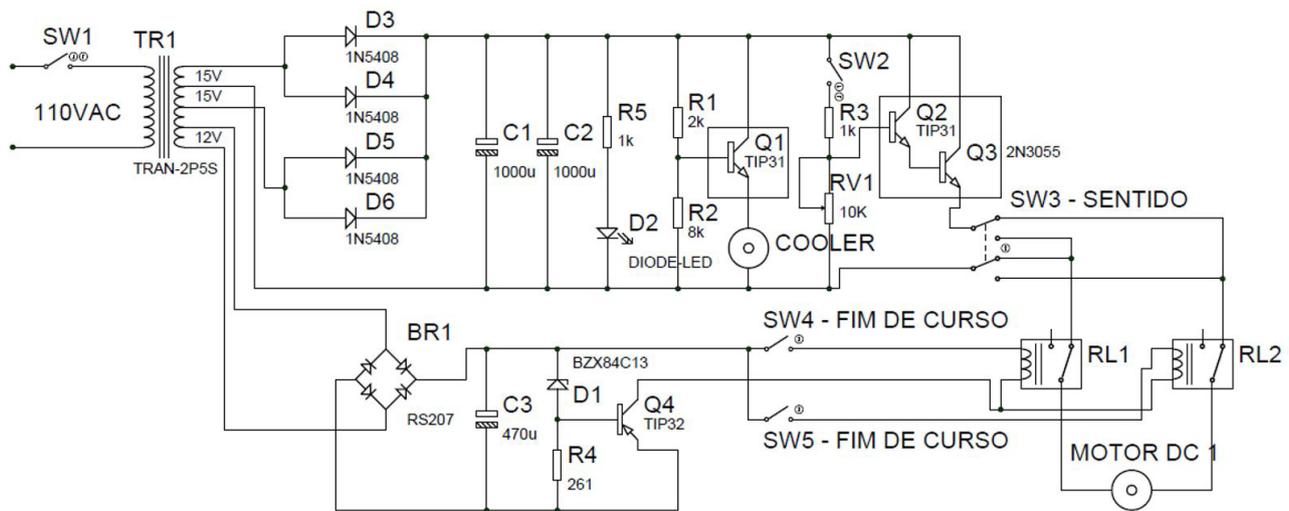


Figura 4. Esquema eletrônico do sistema de deslocamento da tocha para mecanização da soldagem TIG. SW1: chave geral do circuito; TR1: transformador; SW2: chave do motor; SW3: comando de sentido do motor; RV1: potenciômetro que controla a velocidade do motor; D2: led que indica circuito ligado; C1 e C2: capacitores eletrolíticos de 1000µF, 35V; C3: capacitor de 470µF, 35V; D1: diodo zener de 13V, 0,35W; D3 a D6: diodos 1N5408; R1: resistor 2kΩ, 0,25W; R2: resistor 8kΩ, 0,25W; R3 e R5: resistores 1kΩ, 0,25W; R4: resistor 0,26kΩ, 0,25W; RL1 e RL2: relé 12V, 10A; Q1 e Q2: transistor NPN, TIP31A; Q3: transistor NPN, 2N3055. Motor DC 1: motor corrente contínua 12V, 90RPM. A alimentação deve ser de 110V a 127V de corrente alternada 50Hz ou 60Hz.

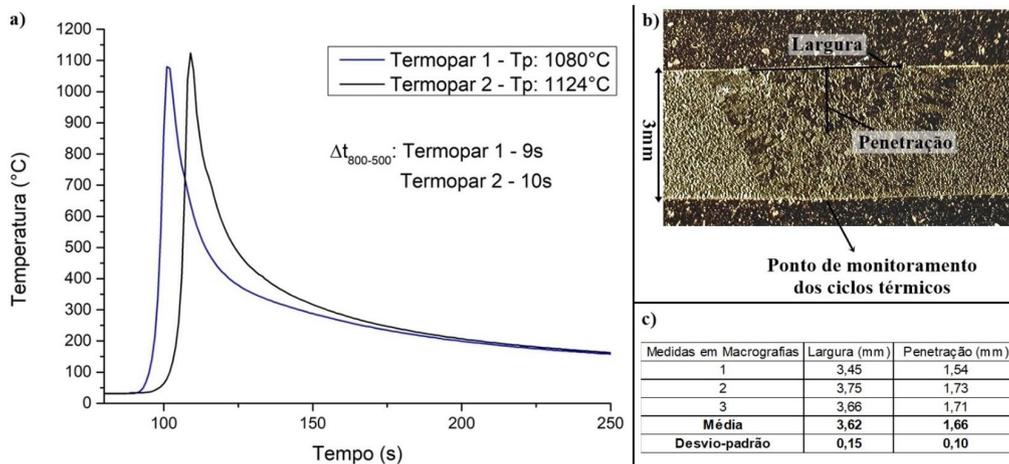


Figura 5. (a) Resultados de ciclos térmicos monitorados por termopares em duas posições adjacentes durante a realização de cordão de solda com o processo TIG mecanizado; (b) Exemplo de macrografia de seção transversal do cordão e medidas de parâmetros geométricos; (c) Resultados de medidas de parâmetros geométricos em três diferentes posições ao longo do cordão de solda. Aço baixo carbono com 3mm de espessura.

3.2 Ensaios Não Destrutivos

Os resultados dos ensaios não destrutivos por líquidos penetrantes e por partículas magnéticas fluorescentes para as amostras 1, 2 e 6 (Tabela 1) indicaram a presença de trincas de cratera nas soldas do aço ABNT 430, descontinuidade associada à remoção repentina da fonte de calor ao final do processo de soldagem, com a presença de vazio durante a solidificação final da poça de fusão (Figura 6). Observou-se, ainda, um acúmulo de partículas magnéticas entre os grãos da ZF com a magnetização, o que indica, portanto, uma variação de propriedades magnéticas nessas regiões que pode ser devido à segregação (Figura 6a).

Os cordões de solda obtidos com aplicação de vibração mecânica, com 6mm/s e 45A, também apresentaram trincas

de cratera ao final do processo de soldagem. Além disso, é possível observar pela Figura 6b, que para a condição onde aplicou-se vibração mecânica com martetele, uma trinca longitudinal ao final cordão foi detectada. Possivelmente a trinca de cratera atuou como um concentrador de tensão e, com a presença da vibração, sua propagação foi facilitada ao longo da linha central após a solidificação.

3.3 Caracterização Metalográfica dos Cordões de Solda

Análises macrográficas dos cordões de solda no aço ABNT 430 são apresentadas na Figura 7. Para baixas velocidades de soldagem, a frente de solidificação é elíptica e os grãos colunares que crescem epitaxialmente a partir da



Figura 6. (a) Resultados de inspeção por partículas magnéticas fluorescentes em juntas de aço ABNT 430 soldado pelo processo TIG; (b) Resultados de inspeção por líquidos penetrantes em juntas de aço ABNT 430 soldado por TIG com 6mm/s e 45A: com e sem vibração mecânica.

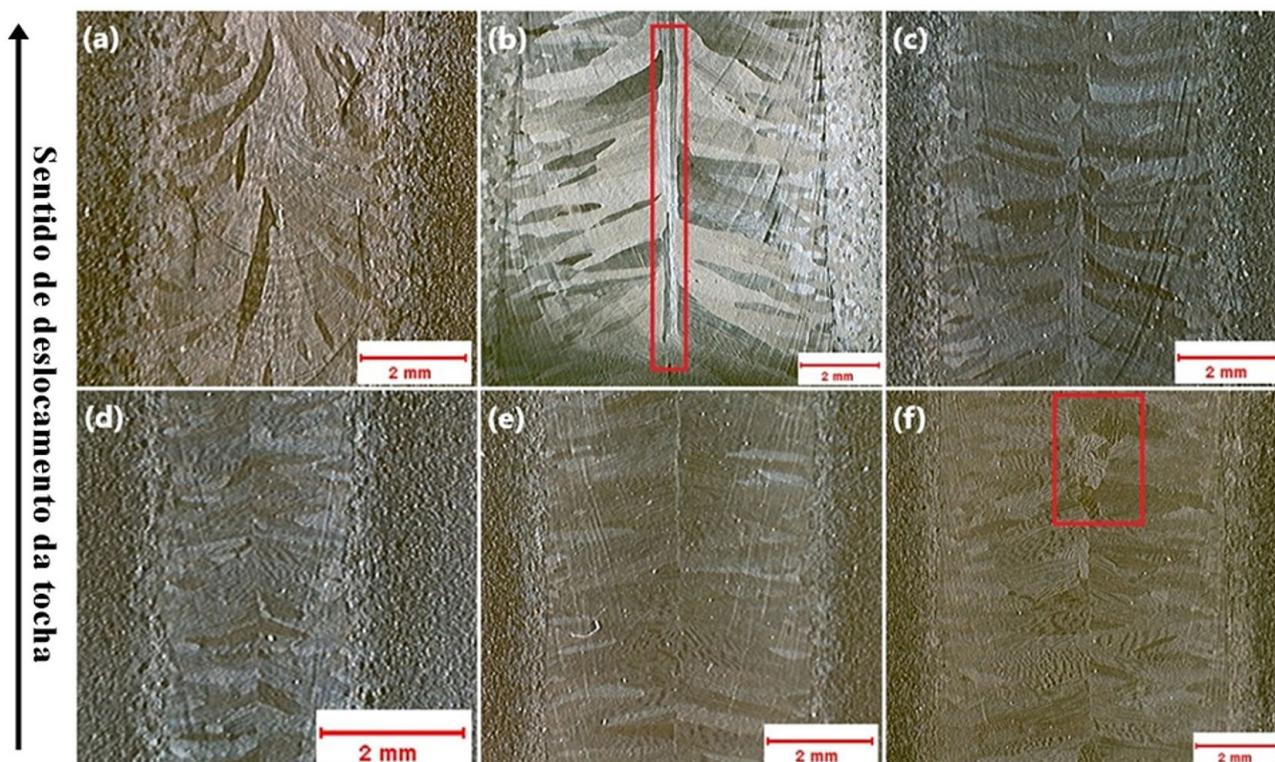


Figura 7. Macrografias dos cordões de solda em estereoscópio das amostras (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; e (f) 6 (Tabela 1). Em destaque grãos alongados e grãos equiaxiais formados no centro do cordão em (b) e (f), respectivamente. Aço ABNT 430, ataque Vilella.

ZTA se curvam na direção de soldagem, a fim de crescer perpendicularmente à direção do maior gradiente de temperatura (Figuras 7a-c). Com o aumento da velocidade (Figuras 7d-f), por outro lado, a poça de fusão adquire o formato de gota, com frente de solidificação com formato constante, favorecendo o crescimento apenas dos grãos melhores orientados perpendicularmente à linha central da solda [13].

Outro ponto de destaque na Figura 7 é a regularidade dos cordões autógenos obtidos em chapas do aço inoxidável ABNT 430 com 1 mm de espessura, sobretudo do ponto de vista da largura da zona fundida. Estes resultados corroboram o sucesso do equipamento para mecanização da soldagem TIG em relação à repetibilidade e fixação dos parâmetros do processo.

Para a situação de pré-aquecimento avaliada, notou-se a formação de grãos equiaxiais no centro do cordão de solda, como destacado na Figura 7f. A presença ou ausência dessa camada pode ser explicada pelo movimento da poça, provocado por forças mecânicas como tensão superficial, forças eletromagnéticas e força do arco elétrico. A hidrodinâmica da poça de fusão desempenha um papel importante na transferência de energia para a ZTA circundante e, devido

aos gradientes de tensão superficial, é predominantemente conduzida pelo Efeito Marangoni, que descreve um movimento de convecção entre a superfície e o fundo da poça [3, 14, 15].

A estrutura de grãos equiaxiais é normalmente mais desejável do que a colunar na soldagem de aços inoxidáveis ferríticos devido às suas características, como maior isotropia estrutural, redução na segregação de elementos de liga na linha central da poça de fusão [6]. Além disso, a formação de uma zona equiaxial central ajuda a inibir a formação de trincas a quente e a fragilização na linha central para deformações plásticas subsequentes [13]. Entretanto, é preciso avaliar os efeitos em outros aspectos estruturais e mecânicos, como o refino da subestrutura e a presença de microsegregação de soluto em regiões intercolunares/interdendríticas durante a solidificação. A camada de grãos equiaxiais centrais só se desenvolveu na condição de aporte térmico relativamente alto e alta velocidade de soldagem e resultou em estrutura relativamente grosseira (baixo GxR).

A transição de uma poça de fusão com formato elíptico em velocidades mais baixas (Figura 8a, b), para uma poça com formato de gota, devido ao aumento da velocidade de soldagem, faz com que a frente de solidificação apresente uma orientação relativamente constante em relação à direção de

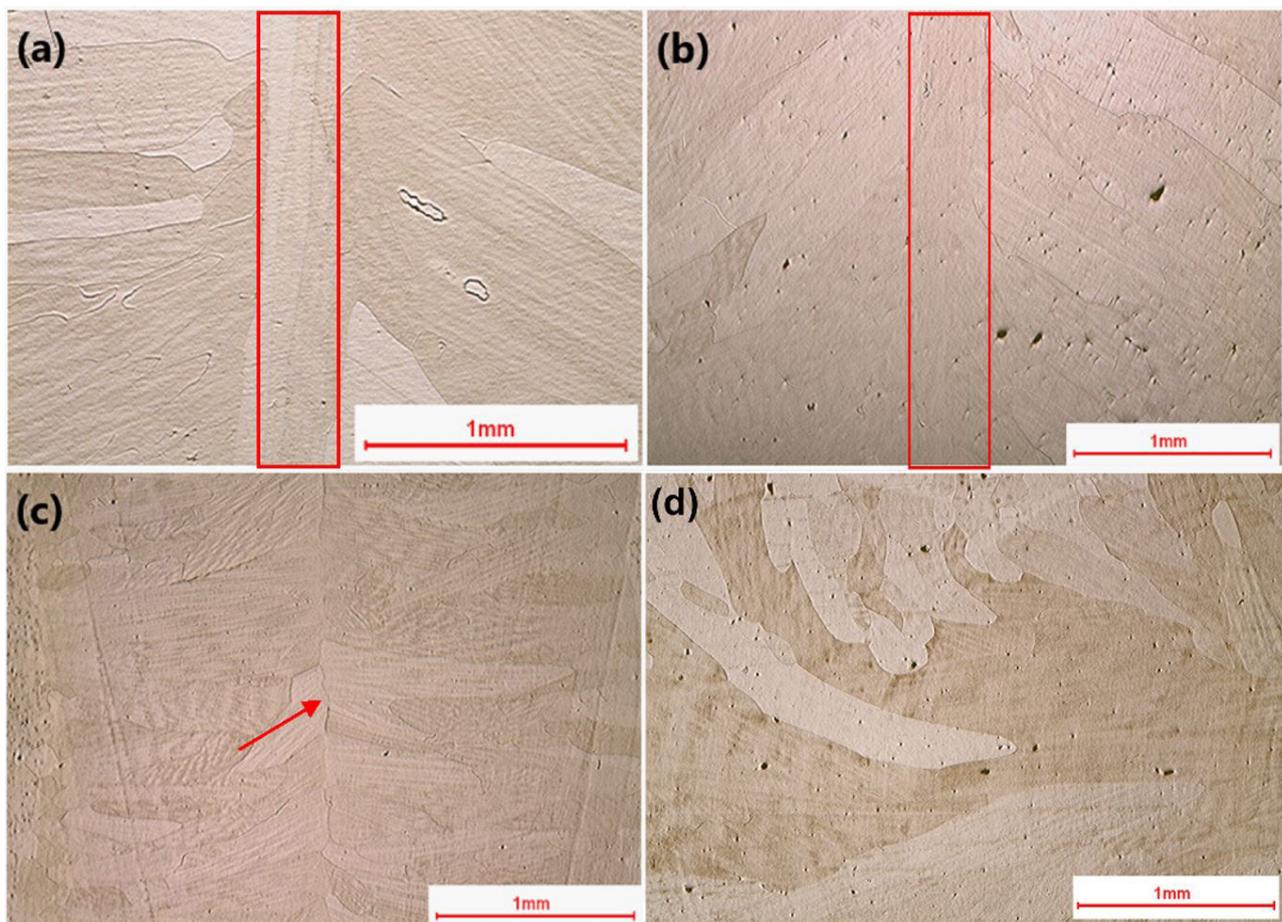


Figura 8. Microestruturas superficiais da ZF de cordões de solda obtidos com 45A (a, b e c) e 18A (d). As condições de solidificação foram alteradas em função da velocidade: (a) Amostra 2; (b) Amostra 3; e (c) Amostra 4; (d) Amostra 1 (Tabela 1). Aço ABNT 430, ataque Vilella.

soldagem (Figura 8c). Este modo de solidificação, contudo, apresenta uma separação nítida entre as duas frentes, o que, no centro da solda, pode viabilizar a segregação de elementos e a permanência de líquido remanescente, podendo levar à fragilização da região central em relação ao restante da solda, o que, em alguns casos, resulta em problemas de trincamento a quente [14]. Além disso, a presença de uma quantidade reduzida de grãos alongados formando-se no centro do cordão para as condições de menores velocidades, como destacado nas Figuras 8a, b, não é favorável, uma vez que compreende grãos relativamente grosseiros e que crescem paralelamente à direção de soldagem ao longo de todo o cordão de solda, o que tende a impactar de forma negativa as propriedades mecânicas do mesmo.

Para um aporte térmico em torno de 120J/mm, menores valores de corrente e velocidade de soldagem, os grãos formados por crescimento epitaxial se encurvam de forma mais proeminente em direção à poça de fusão (Figura 8d). Isto ocorre porque nessa situação o crescimento epitaxial nas direções preferenciais $\langle 100 \rangle$ segue a interface elíptica da poça e o aparente “giro” dos grãos se deve às mudanças dentre as possíveis direções preferenciais [7].

O aumento da velocidade e do aporte para uma situação intermediária (Figura 8b) reduz a quantidade de grãos orientados em direção à poça de fusão, uma vez que apenas grãos melhores orientados passam a ter o seu crescimento favorecido.

O efeito do pré-aquecimento pode ser observado na Figura 9. A redução do gradiente térmico na poça (G), como resultado do pré-aquecimento, combinada com uma corrente elevada (maior aporte térmico) e velocidades altas de soldagem e solidificação (R), causam uma instabilidade ainda maior no contorno da poça de fusão, de modo que o parâmetro de solidificação G/R é ainda mais reduzido e o super-resfriamento constitucional na interface sólido-líquido aumenta, o que culmina na formação de grãos equiaxiais centrais no cordão solidificado, além da questão hidrodinâmica discutida anteriormente. Nota-se a presença de uma subestrutura de solidificação dendrítica, de forma mais discreta no interior dos grãos colunares para a situação sem pré-aquecimento e de forma mais proeminente no interior dos grãos equiaxiais para o pré-aquecimento, como destacado nas Figuras 9c, d, respectivamente. A formação dessas subestruturas dendríticas está justamente relacionada

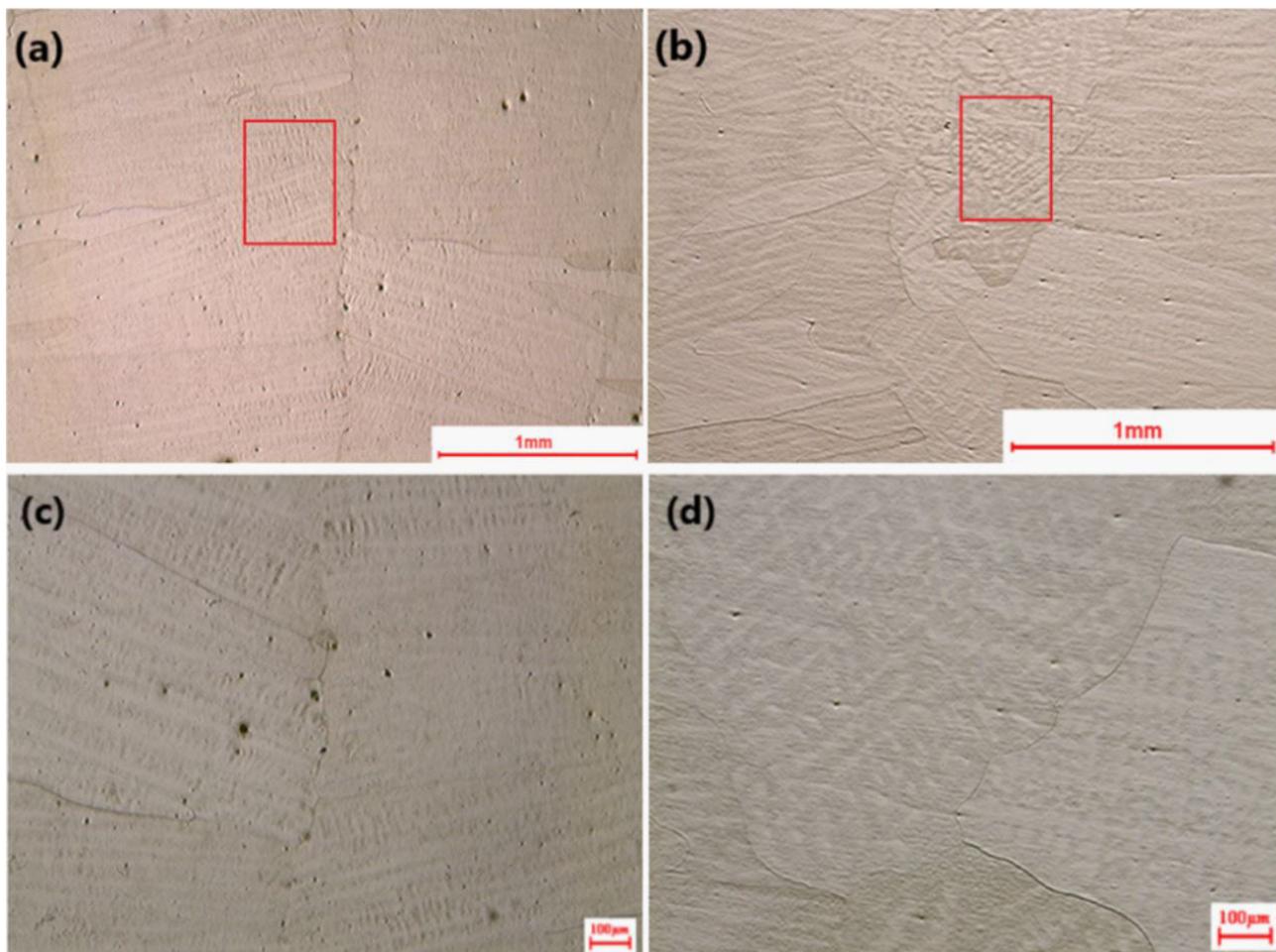


Figura 9. Microestruturas superficiais da ZF de cordões de solda obtidos com 80A. Amostras (a) 5; e (b) 6 (Tabela 1). Subestruturas de solidificação dendríticas formadas (c) sem pré-aquecimento e (d) com pré-aquecimento. Aço ABNT 430, ataque Vilella.

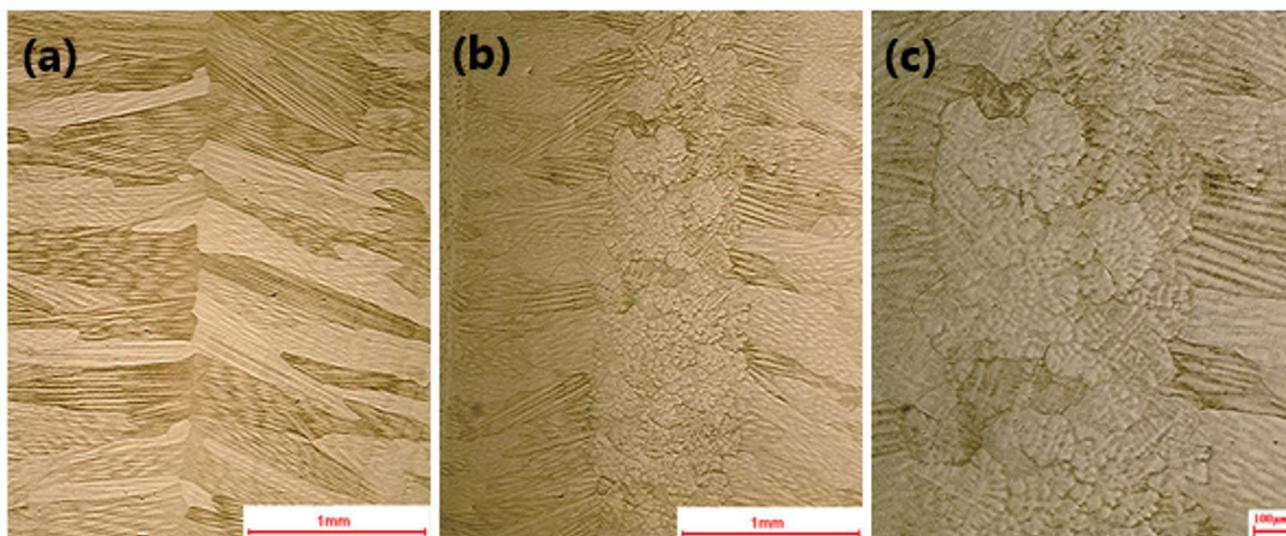


Figura 10. Microestruturas superficiais da ZF de cordões de solda obtidos com 45A e 6mm/s. (a) Sem vibração; e (b) Vibração por sistema de martelete de furadeira; (c) Destaque para subestruturas de solidificação dendríticas formadas no interior dos grãos equiaxiais da condição apresentada em (b). Aço ABNT 430, ataque Vilella.

à maior instabilidade da interface-sólido líquido gerada pelo aumento do super-resfriamento constitucional [13, 16].

A Figura 10 evidencia que a vibração promovida pelo sistema de martelete de furadeira promoveu a nucleação de grãos equiaxiais no centro do cordão, resultando em uma microestrutura mais uniforme, com menores tamanhos de grãos no centro da solda e inibindo o crescimento dos grãos colunares. Neste caso, a agitação da poça de fusão tende a diminuir a temperatura da solda, ajudando a nucleação e estabilização de núcleos [13]. Subestruturas dendríticas ainda foram formadas no interior dos grãos para essa condição (Figura 10c).

Comparativamente, a utilização da vibração mecânica como uma forma de controle da estrutura de solidificação se mostra mais desejável do que o refino promovido com o pré-aquecimento. Para se ter a estrutura equiaxial naquela condição, foi necessário um aumento da corrente para 80A somado a um pré-aquecimento de 115 °C, de modo que esse aporte térmico alto pode levar à formação de dendritas grosseiras no interior dos grãos, com conseqüente aumento do espaçamento interdendrítico, o que pode fragilizar o material por possível aumento da segregação.

4 CONCLUSÕES

Um dispositivo de baixo custo para mecanização da soldagem TIG foi desenvolvido e validado do ponto de vista de fixação dos parâmetros de soldagem autógena, incluindo repetibilidade de ciclos térmicos ao longo de cordão e de parâmetros geométricos das soldas obtidas (penetração e largura), adequando-se para aplicação em estudos de metalurgia da soldagem.

Aplicou-se o aparato mecanizado para verificar a influência de parâmetros de soldagem sobre o modo de

solidificação/estrutura/descontinuidades em aço inoxidável ferrítico ABNT 430, com as seguintes conclusões:

- Ensaios não destrutivos por partículas magnéticas e líquidos penetrantes revelaram a presença de trincas de cratera para todas as condições avaliadas. Para a condição submetida a vibração mecânica durante a soldagem, uma trinca longitudinal originou-se na cratera e propagou-se longitudinalmente na linha central do cordão;
- Velocidades mais baixas, para um mesmo valor de corrente, resultaram na formação de grãos alongados relativamente grosseiros no centro do cordão;
- Para um aporte térmico em torno de 115J/mm, menores valores de corrente e velocidade de soldagem resultaram em poça com formato elíptico e grãos encurvados nas direções de crescimento preferencial. Para maiores velocidades de soldagem, a poça apresentou frente de solidificação com formato constante (gota) favorecendo o crescimento apenas dos grãos melhores orientados perpendicularmente à linha central da solda;
- A combinação de pré-aquecimento a 115°C, com corrente e velocidade de soldagem relativamente elevadas, resultou na formação de uma camada de grãos equiaxiais centrais no cordão. No entanto, subestruturas dendríticas relativamente grosseiras foram observadas no interior dos grãos devido ao aumento do super-resfriamento constitucional;
- A aplicação de vibração mecânica durante a soldagem gerou uma estrutura mais refinada e relativamente homogênea na zona fundida, com surgimento de zona equiaxial central mesmo para altas velocidades de soldagem.

REFERÊNCIAS

- 1 Rosenthal D. The theory of moving sources and its application to metal treatments. Transactions of the ASME. 1946;68:849-866.
- 2 Marques PV, Modenesi PJ. Algumas equações úteis em soldagem. Soldagem e Inspeção. 2014;19(1):91-102.
- 3 Tušek J, Lešnjak A, Pleterški M, Klobčar D. The weld-pool solidification mode of ferritic stainless steels. Metalurgija. 2012;51(2):175-178.
- 4 Carbó HM. Aços inoxidáveis: aplicações e especificações. São Paulo: ArcelorMittal Brasil; 2008. 29 p. [acesso em 15 fev. 2019]. Disponível em: <http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/inonx-apost-tec.pdf>
- 5 Amuda MOH, Mridha S. Microstructural Features of AISI 430 Ferritic Stainless Steel (FSS) weld produces under varying process parameters. International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2009;4(2):160-166.
- 6 Villafuerte JC, Kerr HW, David SA. Mechanisms of equiaxed grain formation in ferritic stainless steel gas tungsten arc welds. Materials Science and Engineering A. 1995;194:187-191.
- 7 Messler RWJ. Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy. Nova York: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2004.
- 8 Kou S, Le Y. Welding Parameters and the Grain Structure of Weld Metal – A Thermodynamic Consideration. Metallurgical Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 1988;19A:1075-1082.
- 9 Kong W, Cang DQ, Song JH. Effects of ultrasonic treatment during the solidification process on the structure formation of low carbon steel. Materials Transactions. 2011;52(9):1844-1847.
- 10 American Society for Testing Materials. E165: standard practice for liquid penetrant examination for general industry. Philadelphia: ASTM; 2012. 19 p.
- 11 American Society for Testing Materials. E709: standard guide for magnetic particle testing. Philadelphia: ASTM; 2015, 48 p.
- 12 American Society for Testing Materials. E3 standard guide for preparation of metallographic specimens. West Conshohocken: ASTM; 2017. 12 p.
- 13 Villafuerte JC, Pardo E, Kerr HW. The effect of alloy composition and welding conditions on columnar-equiaxed transitions in ferritic stainless steel gas-tungsten arc welds. Metallurgical Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 1990;21A:2009-2019.
- 14 Kou S. Welding metallurgy. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2003.
- 15 Saldi ZS. Marangoni driven free surface flows in liquid weld pools [thesis]. Delft: Department of Multi Scale Physics, Faculty of Applied Sciences, Delft University of Technology; 2012.
- 16 Modenesi PJ, Marques PV, Bracarense AQ. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG; 2007.

Recebido em: 25 Maio 2019

Aceito em: 25 Set. 2019