

Avaliação do Uso do Tecimento na Soldagem a Arco Submerso

Tiago Vieira da Cunha¹, Hélio Ormeu Ribeiro²

¹ Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Joinville, SC, Brasil.

² Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

Recebido: 08 Dez., 2017

Aceito: 04 Abr., 2018

E-mails: t.cunha@ufsc.br (TVC),
horme@ifsc.edu.br (HOR)

Resumo: Apesar de muito comum em diversos processos de soldagem, não se encontra nas aplicações industriais, tampouco na literatura especializada, qualquer referência ao uso do movimento de oscilação transversal do eletrodo na soldagem a arco submerso. Em vista disso, neste trabalho foi realizada uma investigação quanto ao emprego da técnica de tecimento no processo SAW. Para tanto, foram realizados ensaios de soldagem com amplitudes de tecimento (triangular) entre 0 e 30 mm para três níveis diferentes de energia de soldagem e avaliadas a penetração, largura, reforço, área do reforço e da área fundida dos cordões de solda obtidos, além da estabilidade do processo. Como resultado, verificou-se que, além de perfeitamente viável, a aplicação da citada técnica no processo SAW resultou em maior eficiência de fusão no processo, sem, entretanto, acarretar em instabilidades no processo ou problemas relacionados à inclusão de escória.

Palavras-chave: Oscilação transversal; SAW; Eficiência de fusão; Morfologia dos cordões.

Evaluation of Oscillation Movement in Submerged Arc Welding

Abstract: Although very common in many welding processes, there is no reference in the industrial applications, nor in the specialized literature, to the use of transverse oscillation movement of the electrode in submerged arc welding. In view of this, in this work an investigation was made regarding the use of the weaving technique in the SAW process. Therefore, welding tests with amplitudes of weaving (triangular) between 0 and 30 mm were carried out for three different levels of welding energy and the penetration, width, reinforcement, reinforcement area and melt area of the weld beads obtained were evaluated, besides the stability of the process. As a result, it was found that, in addition to being perfectly feasible, the application of cited technique in the SAW resulted in higher process melt efficiency, without, however, process instabilities or problems related to the inclusion of slag.

Key-words: Transverse oscillation; SAW; Fusion efficiency; Weld bead morphology.

1. Introdução

O emprego do processo de soldagem a arco submerso (SAW) na construção pesada como em estaleiros, mineradoras, siderúrgicas, fábricas de perfis e estruturas metálicas é algo recorrente. Isto se deve, sobretudo, a capacidade deste processo em atender a uma demanda comum destas empresas, que consiste na união de chapas de maior espessura.

Uma característica marcante do processo SAW está no seu elevado rendimento de deposição e de fusão. Isto se deve, fundamentalmente, à inexistência de perdas de material por projeções ou respingos e à menor perda de calor para o meio, o que faz com que o processo apresente um rendimento térmico próximo de 100% [1]. Este melhor aproveitamento do calor do arco pelo processo, inclusive, torna desnecessária a refrigeração da tocha de soldagem, mesmo quando utilizados elevados valores de corrente de soldagem. Portanto, o uso de elevadas correntes de soldagem, aliado às altas densidades de correntes presentes no processo, proporciona à soldagem SAW elevada taxa de deposição, muitas vezes não encontradas em outros processos de soldagem. Contudo, é constante o desenvolvimento de técnicas de soldagem com o intuito de aprimorar este processo a fim de atingir o máximo de desempenho e, assim, aumentar a taxa de deposição possível de ser conseguida e/ou obter melhores propriedades mecânicas da junta soldada atrelado a esta alta capacidade de deposição. Neste contexto, é possível encontrar na literatura uma grande quantidade de trabalhos que abordam o emprego de diversas técnicas de soldagem no processo SAW, como a utilização de múltiplos arames [2-6], em configurações conhecidas como “twin-arc” ou “tandem-arc”, o emprego



de arame adicional na modalidade “cold-wire” [7-9] ou “hot-wire” [10], e a soldagem com um prolongador [11-13] com o intuito de aumentar o stickout e, assim, aproveitar o aquecimento produzido por efeito joule devido à passagem da corrente de soldagem.

Conforme pode ser visto, diversas técnicas de soldagem são empregadas com sucesso no processo de arco submerso. Algumas destas não são exclusivas deste processo. É o caso das técnicas twin-arc e hot-wire. Na soldagem GMAW também é comum o emprego de mais de um arame de soldagem, técnica esta conhecida como MIG/MAG duplo arame. Do mesmo modo, na soldagem GTAW o emprego de um arame adicional pré-aquecido é algo um tanto comum no setor produtivo. Entretanto, uma técnica bem difundida nestes processos de soldagem não é encontrada sendo aplicada no processo a arco submerso. É o caso da oscilação transversal do eletrodo. Em relação a esta técnica de soldagem é possível encontrar na literatura uma quantidade considerável de trabalhos que abordam os efeitos do tecimento na soldagem. Dentre estes, naturalmente, o aumento da largura dos cordões de solda é o mais evidente. Entretanto, outros efeitos são possíveis de serem obtidos. Neste contexto, Wang et al. [14], ao aplicar oscilação transversal do arame-eletrodo, com padrão circular, na soldagem de chanfros estreitos com o processo GMAW, afirmam obter uma melhora na formação do cordão de solda. Esta melhora diz respeito ao aumento da penetração nas laterais do chanfro ao mesmo tempo em que a penetração na raiz diminui com o aumento da frequência de oscilação resultando, assim, num cordão de geometria mais adequada. Resultados semelhantes também foram obtidos por Xu et al. [15,16] ao empregarem parâmetros obtidos por simulação numérica na soldagem de chapas de aço baixo carbono com 25 mm de espessura. Já na soldagem de filete da junta dissimilar composta pelo aço inoxidável AISI 304L e o aço baixo carbono S355MC Tasalloti et al. [17] identificaram que o tecimento reduziu a penetração no S355MC e aumentou no 304L. Os autores atribuem este resultado à diferença existente nas condutividades térmicas dos materiais e à maior dissipação de calor devido ao tecimento. Ainda em se tratando de alterações morfológicas do cordão de solda, Zhan et al. [18] ao realizarem um estudo cujo objetivo foi o de comparar a qualidade de juntas soldadas por GMAW do aço Invar (chanfro em V em chapas de 19 mm de espessura) obtidas com tecimento e múltiplos passes simples, observaram que nas juntas produzidas com tecimento foi possível obter uma zona fundida com melhor fusão das paredes do chanfro e melhor penetração na raiz. Como resultado, o emprego do movimento de tecimento conduziu à obtenção de soldas livre de defeitos como trincas ou porosidades. Não obstante, estes autores também observaram que a largura da zona afetada pelo calor foi menor nas juntas produzidas com tecimento.

De acordo com os resultados obtidos por Biradar [19] na soldagem GTAW autógena, e com material de adição AA4043, da liga de alumínio AA2014 T6, o emprego do movimento de tecimento reduz sensivelmente a ocorrência de trincas de solidificação. Segundo Biradar e Raman [20], este aumento na resistência à formação de trincas de solidificação, devido ao tecimento, é resultado do refino de grãos obtido na zona fundida. Conforme os resultados desses autores, uma redução de cerca de 55% no tamanho de grão foi obtido nesta região ao aplicar tecimento com amplitude de 0,9 mm e frequência de 0,5Hz. Ainda de acordo com esses autores [21], esta redução no tamanho médio dos grãos na zona fundida, e correspondente melhora nas propriedades mecânicas, são atribuídas à redução na entrada líquida de calor linear devido ao aumento efetivo da velocidade de soldagem. Isto, conduzindo, portanto, a uma maior taxa de resfriamento quando o tecimento é empregado. Neste contexto, Chen et al. [22], empregando simulação por elementos finitos seguido de ensaios experimentais, investigaram a distribuição de temperatura na soldagem GMAW para diferentes parâmetros associados ao tecimento. Como resultado, identificaram que as temperaturas máxima e média no centro do cordão de solda são menores para maiores amplitudes de tecimento. Resultados semelhantes a este também foram obtidos por Hu et al. [23], a partir de simulação por elementos finitos.

Na soldagem das ligas de Magnésio AZ31 e AZ91 pelo processo GTAW, Yuan et al. [24] também obtiveram significativo refino de grão ao empregarem a oscilação magnética (transversal) do arco. De acordo com as curvas de resfriamento obtidas por esses autores, isto se deve ao fato do movimento de tecimento causar, durante a solidificação da poça de fusão, o reaquecimento do material e a redução do gradiente de temperatura. Isto conduz, portanto, à fragmentação dendrítica, devido à fusão das ramificações dendríticas, e ao crescimento de grãos equiaxiais, em função do aumento do superresfriamento constitucional, respectivamente. Alterações de grãos colunares para equiaxiais no metal de solda foram observadas por Mahajan et al. [25] quando aplicado o movimento mecânico de tecimento na soldagem GTAW do Aço ASTM A36. Os autores atribuem a isto o aumento expressivo na ductilidade do metal de solda obtida.

Conforme visto, há uma série de efeitos possíveis de serem obtidos com a aplicação do tecimento. Estes efeitos podem ser desde aqueles associados aos aspectos operacionais da soldagem até os de ordem metalúrgica. Todavia, não se encontra na literatura especializada, tampouco, no setor produtivo, qualquer referência quanto ao seu emprego no processo de soldagem a arco submerso. De fato, as razões para isso são desconhecidas, já que para realizar o movimento de tecimento basta promover o movimento de oscilação transversal da tocha de soldagem, ficando todo do restante do cabeçote de soldagem estático. Além disso, há de serem consideradas as questões relacionadas à inclusão de escória, uma vez que o processo ocorre sob uma camada de fluxo de soldagem. Entretanto, acredita-se que com parâmetros bem regulados é possível se obter vantagens no processo de arco submerso com a oscilação do arco voltaico. Assim, o presente trabalho tem por objetivo buscar por uma nova variante deste processo, por intermédio do tecimento do cordão de solda, no qual possa torna-lo ainda mais atrativo. Inclusive de forma que o mesmo possa ser empregado em determinadas aplicações de soldagem onde se buscam menores índices de penetração e/ou diluição.

2. Materiais e Métodos

De modo a avaliar os efeitos oriundos do tecimento na soldagem com o processo de arco submerso, foi concebida uma bancada de ensaios composta por uma fonte de soldagem multiprocesso, modelo DigiPLUS A7 com capacidade de corrente de até 800 A, um sistema de deslocamento de tocha com dois graus de liberdade – Tartilope V2F e um sistema de aquisição de dados específico para soldagem – SAP V4.0.

A fonte foi configurada para operar no modo tensão constante, de modo a se obter o auto ajuste da altura de arco (controle interno). Já o sistema de deslocamento de tocha empregado, originalmente equipado com um módulo de fixação de tocha com ajustes manuais, foi alterado para a realização do presente trabalho. Tal alteração diz respeito à substituição do citado módulo por uma base, adaptada ao equipamento, com o objetivo de suportar os corpos de prova (Figura 1). Deste modo, durante a realização dos ensaios de soldagem, foi efetuado o deslocamento dos corpos de prova a partir da movimentação do equipamento ao longo dos seus eixos X (movimento de translação) e Y (movimento de tecimento), enquanto que o cabeçote de soldagem (tocha, reservatório de fluxo e bobina de arame) permaneceu estacionário. Com o auxílio do SAP V4.0 foi possível realizar a aquisição dos dados instantâneos de tensão de arco e corrente de soldagem, o que permitiu a posterior determinação das energias de soldagem.

Para realização dos ensaios, foram utilizados corpos de prova de 235 × 76 mm de aço ASTM A36 com 15,8 mm de espessura. O metal de adição utilizado foi o arame de aço-carbono, classificação EM12K segundo a AWS 5.17, com diâmetro de 2,4 mm e o conjunto arame-fluxo utilizado nos ensaios foi o AWS F7A6-EM12K. A distância entre

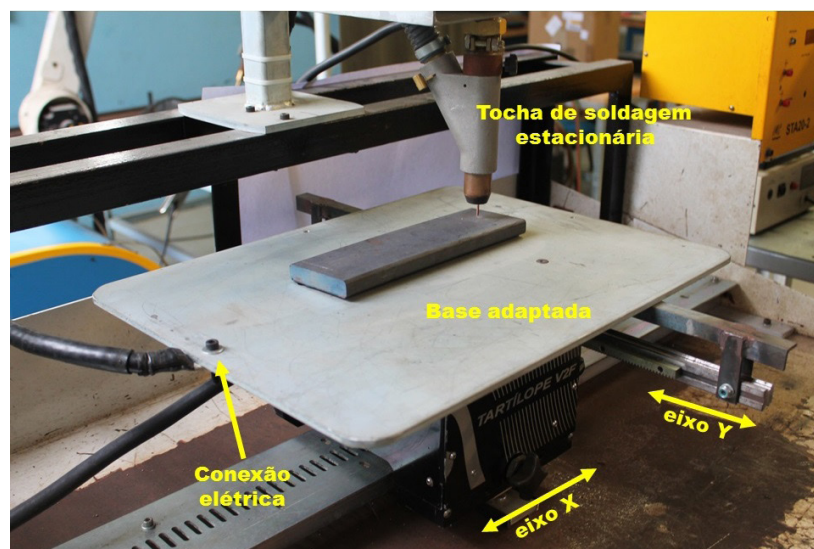


Figura 1. Detalhe da bancada de ensaios evidenciando a chapa de apoio adaptada ao sistema de deslocamento de tocha a fim de permitir o tecimento a partir da movimentação dos corpos de prova.

bico contato-peça (DBCP) foi fixada em 20 mm, enquanto que a frequência de tecimento em 1 Hz com padrão triangular. Este padrão foi escolhido por ser o que envolve o menor número de variáveis, apenas amplitude e frequência de tecimento. A válvula de ajuste de saída de fluxo, presente na tocha de soldagem, foi ajustada na posição máxima em todos os ensaios. Os demais parâmetros de soldagem empregados na realização dos diferentes corpos de prova e seus respectivos valores se encontram na Tabela 1.

Tabela 1. Identificação dos corpos de prova.

Corpo de prova	Tecimento (mm)	Parâmetros					
		Ajustados			Medidos/Calculados		
		U (V)	Va (m/min)	Vs (cm/min)	Um (V)	Im (A)	Es (kJ/cm)
E15-L	Linear*	30	2,0	40,0	28,9	328	14,3
E15-10	10	30	2,0	40,0	28,9	352	15,3
E15-20	20	30	2,0	40,0	28,9	366	15,9
E15-30	30	30	2,0	40,0	28,9	370	16,1
E19-L	Linear*	30	2,5	40,0	28,9	441	19,2
E19-10	10	30	2,5	40,0	28,9	448	19,5
E19-20	20	30	2,5	40,0	28,9	439	19,1
E19-30	30	30	2,5	40,0	28,9	423	18,3
E25-L	Linear*	30	2,5	30,0	28,9	430	24,8
E25-10	10	30	2,5	30,0	28,9	438	25,4
E25-15	15	30	2,5	30,0	28,9	429	24,8
E25-20	20	30	2,5	30,0	28,9	427	24,6
E25-30	30	30	2,5	30,0	28,9	434	25,2

(U) tensão de arco; (Va) velocidade de arame; (Vs) velocidade linear de soldagem; (Um) tensão média de arco; (Im) corrente média de soldagem; e (Es) energia de soldagem; *Sem tecimento.

Conforme pode ser observado na Tabela 1, foram realizados treze diferentes cordões de solda a fim de atender aos objetivos do trabalho. Nestes, foram empregados diferentes valores de velocidade de arame e velocidade de soldagem, objetivando a realização de ensaios com três energias de soldagem diferentes, a saber: 15, 19 e 25 kJ/cm.

Os cordões de solda foram realizados a uma distância de 30 mm do início da chapa, com comprimento aproximado de 180 mm. Com a finalidade de analisar os aspectos geométricos dos cordões de solda obtidos, foram retiradas no centro de cada cordão amostras para realização de macrografias. Cada amostra passou por um processo de lixamento com a lixa de 120 a 1000 mesh. O ataque químico das amostras foi realizado com Nital 2,5% através da técnica de imersão. Com estes procedimentos foi possível revelar na amostra as regiões de interesse para a realização das imagens com o auxílio de um estereoscópio. Através do programa open source ImageJ [26] realizou-se as medidas de penetração, largura, reforço, área do reforço e da área fundida dos cordões obtidos, conforme exemplificado na Figura 2.

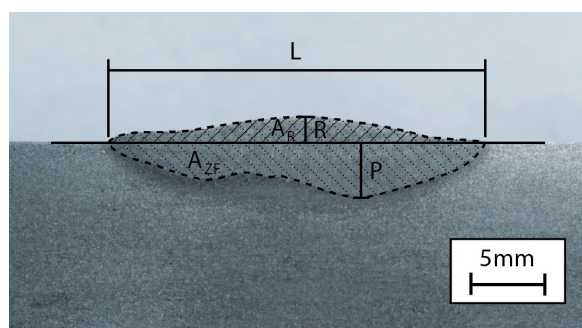


Figura 2. Geometria do cordão. (P) penetração; (L) largura; (R) reforço; (A_{zf}) área fundida; (A_r) área do reforço.

3. Resultados e Discussões

Nas Figuras 3, 4 e 5 são apresentadas as macrografias da seção transversal dos cordões de solda obtidos com as energias de soldagem de 15, 19 e 25 kJ/cm, respectivamente.

Conforme pode ser observado, os cordões de solda produzidos com amplitude de tecimento de 30 mm apresentaram uma superfície muito irregular para todas as energias estudadas. Esta irregularidade refere-se à falta de material de deposição, associada a um elevado índice de mordeduras presentes nas margens dos cordões de solda. Conforme pode ser verificado na Tabela 2, isto pode ser atribuído a um importante resultado obtido. Este diz respeito ao aumento da área fundida com a amplitude de tecimento. Em função disso, para maiores

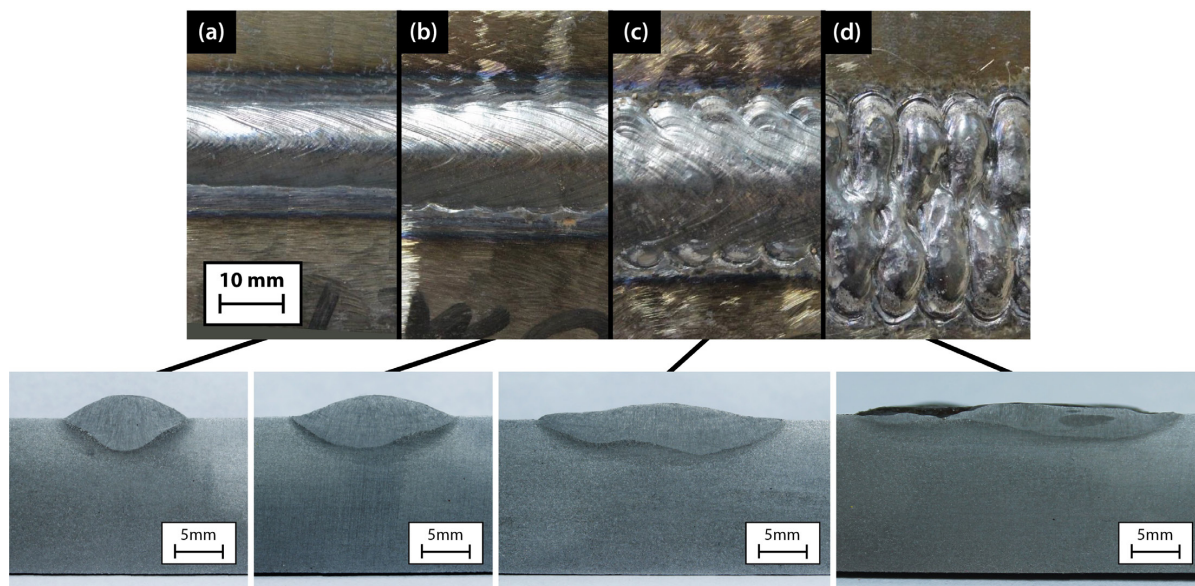


Figura 3. Superfície e seção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 15 kJ/cm e amplitude de tecimento de (a) 0 mm – Linear; (b) 10 mm; (c) 20 mm; e (d) 30 mm.

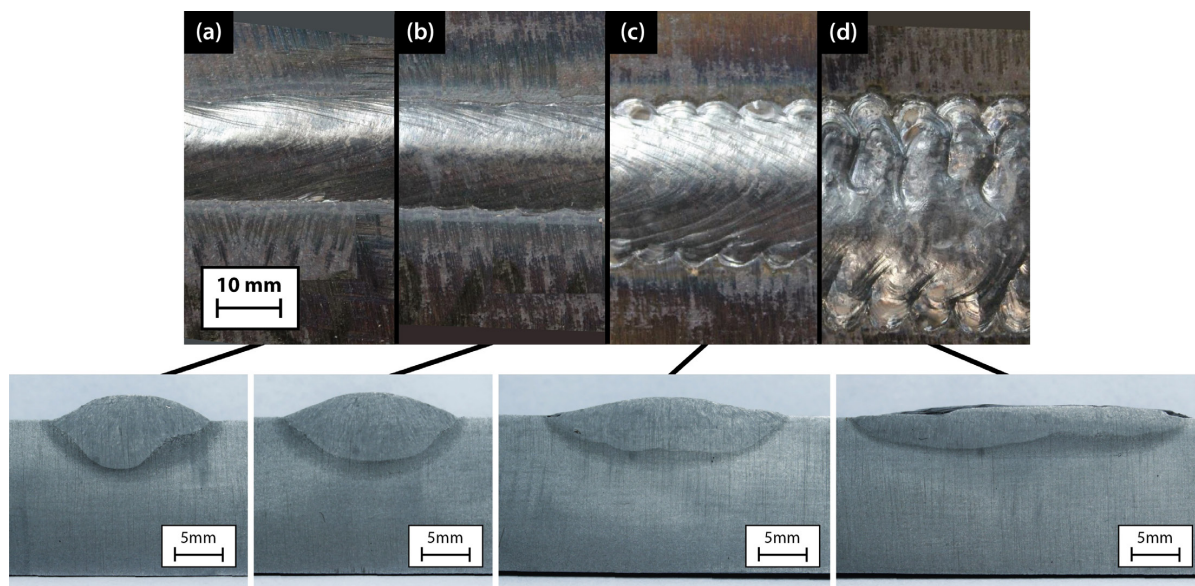


Figura 4. Superfície e seção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 19 kJ/cm e amplitude de tecimento de (a) 0 mm – Linear; (b) 10 mm; (c) 20 mm; e (d) 30 mm.

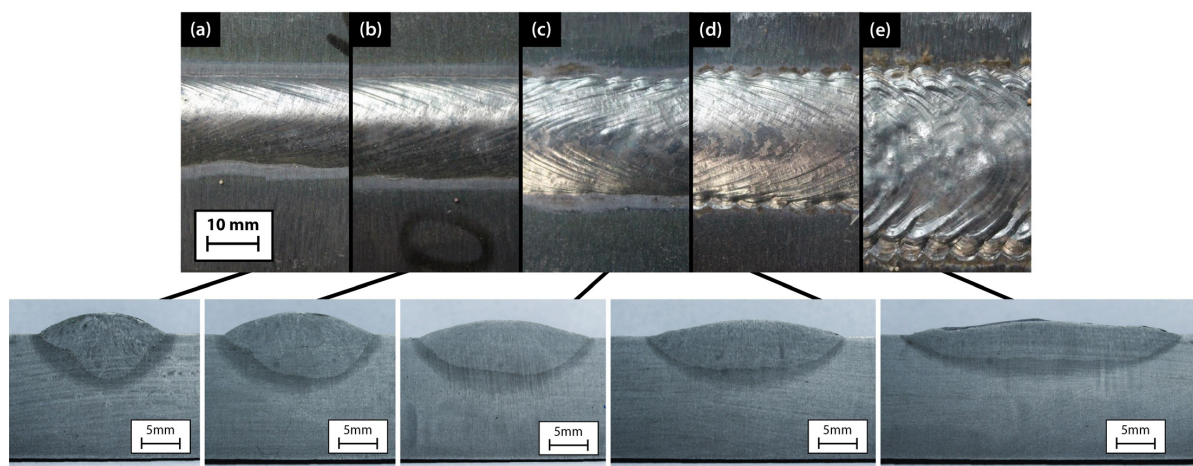


Figura 5. Superfície e secção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 25 kJ/cm e amplitude de tecimento de (a) 0 mm – Linear; (b) 10 mm; (c) 15 mm; (d) 20 mm; e (e) 30 mm.

Tabela 2. Medidas dos cordões de solda obtidos com as energias de soldagem de 15, 19 e 25 kJ/cm.

Corpo de Prova	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)	Área fundida (mm ²)	Área do reforço (mm ²)	Diluição (%)
E15-L	3,4	12,6	2,3	43,2	18,6	56,9
E15-10	3,2	16,5	2,2	55,5	21,6	61,1
E15-20	3,6	24,7	1,7	77,1	22,6	70,7
E19-L	5,0	16,5	2,6	73,5	27,2	63,0
E19-10	4,5	17,8	2,4	83,7	26,9	67,9
E19-20	3,7	23,7	1,9	94,7	28,1	70,3
E25-L	5,7	16,3	2,7	82,9	28,9	65,1
E25-10	5,5	18,8	2,8	106,2	34,0	67,8
E25-15	4,8	21,7	2,2	105,4	31,5	70,1
E25-20	4,7	24,6	2,1	117,7	34,5	70,7

amplitudes de tecimento houve uma maior demanda por metal de adição fornecido a fim de manter o valor do reforço do cordão inalterado. No entanto, conforme pode ser visto na Tabela 2 o valor do reforço decresceu na medida em que a amplitude de tecimento aumentou. Isto se deve ao fato do aporte de material empregado para cada energia de soldagem estudada ser constante. Assim, em função desta superfície irregular, decidiu-se por excluir os cordões de solda produzidos com amplitude de tecimento de 30 mm das análises deste trabalho, uma vez que as grandezas geométricas, definidas segundo a Figura 2, se tornaram dependentes do local em que a secção transversal seria analisada e não dos parâmetros definidos na Tabela 1.

Nos corpos de prova considerados válidos, ou seja, aqueles cuja amplitude de tecimento encontra-se entre 0 e 20 mm, verificou-se que, para uma dada energia de soldagem, o aumento da amplitude de tecimento acarretou em maiores larguras dos cordões. Evidentemente, este resultado já era esperado. Entretanto, assim como a largura, a área fundida (A_{zf}) também aumentou significativamente. Neste caso, ao se comparar as áreas fundidas obtidas com amplitude de tecimento de 20 mm em relação àquelas obtidas sem tecimento, para uma mesma energia de soldagem, verifica-se um ganho de até 78%. Este resultado indica, portanto, que a realização do movimento tecimento conduziu a obtenção de um maior rendimento de fusão do processo, não avaliado neste trabalho. Atribui-se, portanto, a este rendimento de fusão os maiores valores de diluição obtidos nos ensaios realizados com tecimento (Tabela 2). Neste contexto, observa-se que para os três níveis de energia de soldagem estudados no trabalho, houve um aumento na diluição dos cordões na medida em que a amplitude de tecimento aumentou. Resultado este que se mostra contraditório àqueles que normalmente se espera com a aplicação do movimento de tecimento. Contudo, uma análise mais minuciosa dos resultados revela que este aumento na

diluição dos cordões com a amplitude de tecimento se deve, sobretudo, a um perfil de penetração mais regular (sem grandes variações de penetração ao longo de sua secção transversal) associado à maior largura do cordão de solda e não pelo aumento da penetração, que pelo contrário, diminuiu para maiores energias de soldagem. Não obstante, verifica-se também que para amplitudes de tecimento de 20 mm, a diluição foi praticamente a mesma, independente da energia de soldagem empregada. Neste caso, a diluição estabilizou num patamar de cerca de 70%, embora tenha havido um acréscimo de energia de 67% quando considerados os ensaios E15-20 e E25-20. Isto fez com que a diferença existente nos valores de diluição encontrados nos cordões realizados com 20 mm de amplitude e sem tecimento caísse de 25% para somente 8%, quando considerados os ensaios E15-20 e E25-20, respectivamente. Apesar de não apresentar ganhos relacionados à diluição, estes resultados evidenciam, contudo, a possibilidade de ganhos de produtividade com esta variante da técnica de soldagem com Arco Submerso, tornando-a ainda mais atrativa para a indústria da soldagem.

As alterações observadas na morfologia dos cordões decorrentes do movimento de tecimento podem ainda ter influência em outros aspectos da soldagem que não somente associadas à produtividade. Neste contexto, com a redução do reforço e da penetração dos cordões, sobretudo, para maiores energias de soldagem, acredita-se que pode ser possível aplicar a técnica do Passe de Revenido para tratar a ZAC. Em especial, a ZAC de Grãos Grosseiros (ZAC-GG), o que metalurgicamente conduzirá a melhores resultados com a aplicação da técnica. Apesar de as velocidades de soldagem e de alimentação de arame ser mantidas fixas para cada energia de soldagem empregada no trabalho, foram observadas alterações na área do reforço dos cordões. Contudo, conforme pode ser verificado na Tabela 2, não há uma correlação clara desta com a amplitude de tecimento. De fato, acredita-se que estas variações encontradas se devem às variações presentes na superfície dos cordões em decorrência do movimento de tecimento, não se podendo, portanto, afirmar que houve variações na área depositada dos cordões. Isto é mais perceptível nos cordões realizados com a amplitude de 30 mm não considerados nas análises. Ainda no que diz respeito às alterações de morfologia dos cordões, percebe-se que amplitudes de tecimento de somente 10 mm são suficientes para alterar de forma significativa o perfil de penetração dos cordões (do tipo *finger shape*, exceto para a energia de 15 kJ/cm), tornando-os suficientemente simétricos e adequados, especialmente para maiores energias de soldagem.

Com a realização dos ensaios observou-se que para amplitudes de tecimento da ordem de 20 mm, surgiram mordeduras características ao logo do cordão independente da energia de soldagem utilizada (Figuras 3c, 4c e 5d). Isto é decorrente da diminuição da relação existente entre o material de adição fornecido e o aumento da quantidade de material fundido. No entanto, os resultados mostram que na medida em que a energia de soldagem aumenta, seja por intermédio do aumento da velocidade de alimentação do arame ou pela redução da velocidade de soldagem, há um aumento no aporte de metal de adição, o que resultou em cordões com melhor aspecto superficial e redução drástica de tais mordeduras. Cabe salientar que independente do nível de mordeduras encontrados, em todos os casos não houve retenção de escória, sendo que a mesma se desprende facilmente do mesmo modo que nos cordões lineares.

Naturalmente, uma preocupação ao se realizar o movimento de tecimento num processo de características como a do arco submerso, diz respeito a uma eventual inclusão de escória. Contudo, nas diferentes energias de soldagem estudadas, não foi possível identificar qualquer inclusão de escória, mesmo que para amplitudes de tecimento de 20 mm. Acredita-se que as razões para isso são as mesmas que fazem com que este problema também não ocorra em técnicas consolidadas como a *tandem-arc*. Pois, ao se realizar o movimento de tecimento tem-se uma poça de fusão de considerável tamanho. Isto é possível devido à relativa elevada energia de soldagem inerente ao processo e, sobretudo, a frequência de oscilação empregada. Permitindo, assim, que haja tempo hábil para que a escória escape do banho de metal fundido e possa sobrenadar a poça de fusão. Ou seja, apesar de haver o movimento de tecimento, a frente de solidificação da poça de fusão se dá de forma linear na direção de soldagem. Isto é reforçado pelo aspecto superficial dos cordões obtidos, pois conforme pode ser visto nas Figuras 3, 4 e 5, mesmo com amplitudes de tecimento de 20 mm o padrão de solidificação, evidenciado pelas marcas superficiais presentes na superfície dos cordões, são iguais àquelas obtidas nos cordões produzidos sem qualquer oscilação. Deste modo, acredita-se que se for empregada uma frequência de tecimento suficientemente baixa para uma dada condição de soldagem, a frente de solidificação da poça de fusão poderá assumir um comportamento oscilatório acompanhando o movimento de tecimento, fazendo com que haja, portanto, o depósito de material sobre a camada de escória situada sobre o cordão previamente solidificado.

Outro aspecto a ser considerado diz respeito à estabilidade do processo. No tocante a isso, na Figura 6 são apresentados os oscilogramas de tensão de arco e corrente de soldagem para os diferentes cordões produzidos com a energia de soldagem de 25 kJ/cm.

Conforme pode ser observado nas aquisições, o movimento de tecimento acarretou na alteração no padrão de oscilação da corrente de soldagem (Figura 7).

As razões para isso são desconhecidas, conjectura-se que isto possa estar associado à maior área superficial da poça fundida obtida com o movimento de tecimento. Assim, a vibração do metal líquido presente na poça de fusão induzida pelo processo possuiria condições mais favoráveis para se dissipar, acarretando, portanto, em

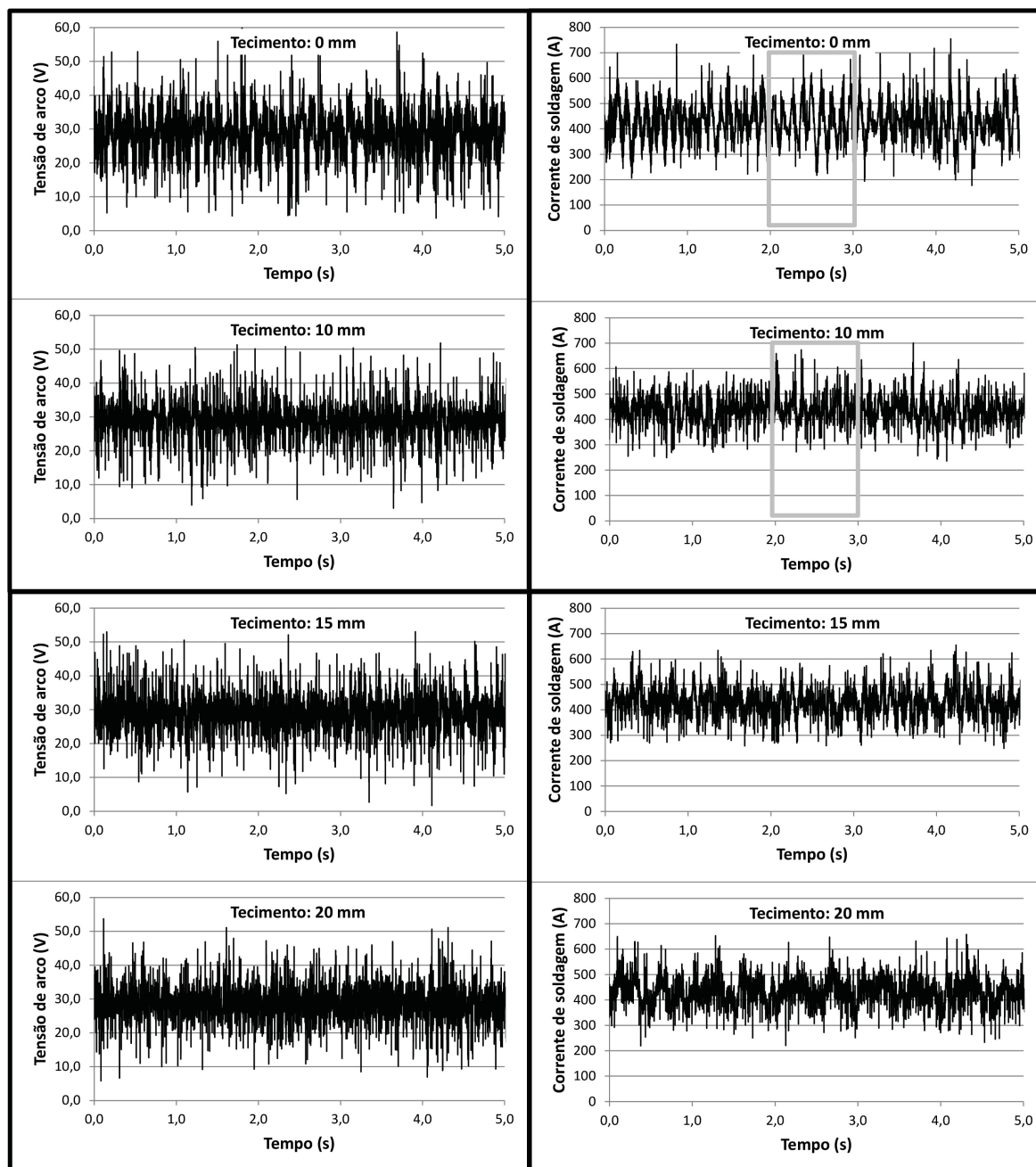


Figura 6. Aquisição dos valores instantâneos de tensão de arco e corrente de soldagem dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 25 kJ/cm e diferentes amplitudes de tecimento.

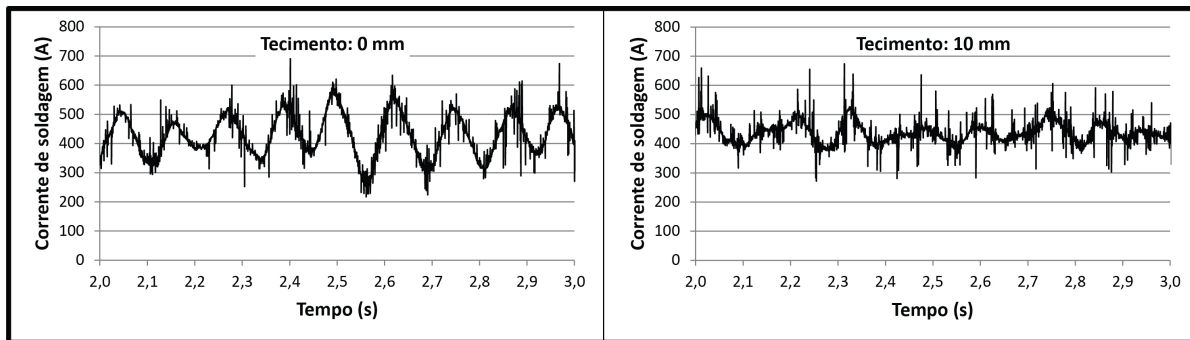


Figura 7. Detalhe da aquisição de corrente destacado na Figura 6.

menores variações na relativa altura de arco. Além disso, analisando os oscilogramas, não se percebe instabilidades no comportamento médio da corrente de soldagem que pudessem ser atribuídas a presença do movimento de tecimento, de modo que se pode afirmar que o movimento de tecimento não comprometeu a estabilidade do processo.

Este trabalho compreendeu a uma abordagem inicial a fim de verificar a viabilidade e potencial de aplicação da técnica de tecimento no processo de soldagem a arco submerso. Deste modo, entende-se que um maior número de estudos devem ser conduzidos a fim de avaliar outros fatores não contemplados no escopo do presente trabalho como, por exemplo, a influência da frequência do tecimento. Pois se acredita que frequências diferentes podem evitar a falta de material de adição e, assim, gerar cordões ainda mais adequados. Outro fator a ser investigado diz respeito ao consumo de fluxo, principalmente em aplicações de revestimento, onde tipicamente são depositados cordões lado a lado.

4. Conclusão

Com base nos resultados obtidos com a realização deste trabalho, é possível concluir que:

- A aplicação da técnica de tecimento no processo de soldagem a arco submerso é perfeitamente viável;
- O emprego do movimento de tecimento conduz a obtenção de cordões de solda com menores índices de penetração e reforço nas condições estudadas;
- Nas condições estudadas, maiores valores de largura e área fundida dos cordões de solda são possíveis de serem obtidos com o movimento de tecimento;
- Com as energias de soldagem utilizadas, a aplicação da técnica de tecimento resulta em maior rendimento de fusão do processo de arco submerso;
- Para o tecimento com amplitude de 20 mm, a diluição encontrada foi praticamente a mesma em todas as energias de soldagem estudadas. Logo, houve uma tendência de estabilização da diluição com o aumento da amplitude de tecimento;
- Nas condições experimentais empregadas, o movimento de tecimento não acarreta em instabilidades no processo, tampouco, em problemas relacionados à inclusão e retenção de escória;
- Com o emprego do tecimento verificou-se há a possibilidade de intervenção na ZAC através do passe de revenido, ampliando deste modo, o leque de aplicações do processo de soldagem a arco submerso.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) da UFSC-Joinville e a empresa IMC Soldagem.

Referências

- [1] Machado IG. Soldagem & técnicas conexas: processos. Porto Alegre: Ed. do Autor; 1996.
- [2] Hinkel JE, Forsthoefel FW. High current density submerged arc welding with twin electrodes. *Welding Journal*. 1976;55(3)
- [3] Sharma A, Arora N, Mishra BK. Statistical modeling of deposition rate in twin-wire submerged arc welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture*. 2009;223(7):851-863. <http://dx.doi.org/10.1243/09544054JEM1342>.
- [4] Tušek J, Umek I, Bajcer B. Weld-cost saving accomplished by replacing single-wire submerged arc welding with triple-wire welding. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2005;10(1):15-22. <http://dx.doi.org/10.1179/174329305X24299>.
- [5] Sharma A, Arora N, Gupta SR. Investigation into arc behavior during twin-wire submerged arc welding. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010;25(8):873-879. <http://dx.doi.org/10.1080/15394450902996593>.
- [6] Kiran DV, Basu B, De A. Influence of process variables on weld bead quality in two wire tandem submerged arc welding of HSLA steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(10):2041-2050. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.008>.
- [7] Mohammadjoo M, Kenny S, Collins L, Henein H, Ivey DG. Influence of cold-wire tandem submerged arc welding parameters on weld geometry and microhardness of microalloyed pipeline steels. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;88(5-8):2249-2263. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8910-z>.
- [8] Ramakrishnan M, Padmanaban K, Muthupandi V. Studies on fracture toughness of cold wire addition in narrow groove submerged arc welding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;68(1-4):293-316. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-4729-z>.
- [9] Mruzec MF, Konkol PJ. Twin-arc and cold-wire-feed submerged-arc welding of HSLA-100 steel. In: *Conference Proceedings for the American Welding Society*; 2005; Chicago. Chicago: AWS; 2005.
- [10] Tsuyama T, Nakai K, Tsuji T. Development of submerged arc welding method using hot wire. *Welding in the World*. 2014;58(5):713-718. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-014-0153-8>.
- [11] Chandel RS, Seow HP, Cheong FL. Effect of increasing deposition rate on the bead geometry of submerged arc welds. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997;72(1):124-128. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00139-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00139-8).
- [12] Tušek J. J. Mathematical modeling of melting rate in twin-wire welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;100(1):250-256. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00485-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00485-9).
- [13] Chandel RS. Mathematical modeling of melting rates for submerged arc welding. *Welding Journal*. 1987;66(5):135.
- [14] Wang J, Zhu J, Fu P, Su R, Han W, Yang F. A swing arc system for narrow gap GMA welding. *ISIJ International*. 2012;52(1):110-114. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.52.110>.
- [15] Xu WH, Lin SB, Fan CL, Zhuo XQ, Yang CL. Statistical modelling of weld bead geometry in oscillating arc narrow gap all-position GMA welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;72(9-12):1705-1716. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-5799-2>.
- [16] Xu WH, Lin SB, Fan CL, Yang CL. Prediction and optimization of weld bead geometry in oscillating arc narrow gap all-position GMA welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;79(1-4):183-196. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-6818-7>.
- [17] Tasalloti H, Kah P, Martikainen J. Effects of welding wire and torch weaving on GMAW of S355MC and AISI 304L dissimilar welds. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;71(1-4):197-205. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5484-x>.
- [18] Zhan X, Zhang D, Liu X, Chen J, Wei Y, Zhou J, et al. Comparison between weave bead welding and multi-layer multi-pass welding for thick plate Invar steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;88(5-8):2211-2225. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8926-4>.
- [19] Biradar NS. Effect of transverse mechanical arc oscillation on hot cracking (solidification & liquation) and weld metal properties of AA2014 T6 TIG welds. *AIMS Materials Science*. 2016;3(4):1544-1560. <http://dx.doi.org/10.3934/matricsci.2016.4.1544>.
- [20] Biradar NS, Raman R. Investigation of hot cracking behavior in transverse mechanically arc oscillated autogenous AA2014 T6 TIG welds. *Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science*. 2012;43(9):3179-3191. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-012-1126-4>.
- [21] Biradar NS, Raman R. Grain refinement in Al-Mg-Si alloy TIG welds using transverse mechanical arc oscillation. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012;21(11):2495-2502. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-012-0207-2>.
- [22] Chen Y, He Y, Chen H, Zhang H, Chen S. Effect of weave frequency and amplitude on temperature field in weaving welding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;75(5-8):803-813. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6157-0>.
- [23] Hu JF, Yang J-G, Fang H-Y, Li G-M, Zhang Y. Numerical simulation on temperature and stress fields of welding with weaving. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2006;11(3):358-365. <http://dx.doi.org/10.1179/174329306X124189>.
- [24] Yuan T, Luo Z, Kou S. Grain refining of magnesium welds by arc oscillation. *Acta Materialia*. 2016;116:166-176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.036>.
- [25] Mahajan S, Biradar NS, Raman R, Mishra S. Effect of mechanical arc oscillation on the grain structure of mild steel weld metal. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2012;65(2):171-177. <http://dx.doi.org/10.1007/s12666-012-0118-9>.
- [26] ImageJ [software]. 2017 [acesso em 25 ago. 2017]. Disponível em: <http://imagej.net/>