

Influência do Posicionamento da Tocha de Soldagem sobre a Geometria e Sanidade do Cordão de Solda Produzido com o Processo GMAW Convencional em Elevadas Velocidades de Soldagem

Anna Louise Voigt¹ , Tiago Vieira da Cunha² , Carlos Enrique Niño Bohórquez¹ 

¹ Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Centro Tecnológico, Florianópolis, SC, Brasil.

² Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Centro Tecnológico de Joinville, Joinville, SC, Brasil.

Como citar: Voigt AL, Cunha TV, Niño CE. Influência do posicionamento da tocha de soldagem sobre a geometria e sanidade do cordão de solda produzido com o processo GMAW convencional em elevadas velocidades de soldagem. Soldagem & Inspeção. 2020;25:e2536. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.36>

Resumo: Em processos de soldagem com adição de material, como é o caso do GMAW, a obtenção de menores tempos de soldagem implica na busca por maiores taxas de deposição, visto que assim é possível aumentar as velocidades de soldagem mantendo a área transversal do cordão de solda. Como alternativa, é comum, atualmente, se considerar o emprego de processos híbridos ou modernas técnicas de soldagem derivadas de processos tradicionais. Contudo, isto implica, naturalmente, em maior aporte de investimentos, o que frequentemente não é possível. Diante disso, o presente trabalho tem por objetivo investigar os efeitos produzidos pelo posicionamento da tocha de soldagem sobre a formação de descontinuidades e geometria dos cordões de solda produzidos pelo processo GMAW convencional em elevadas velocidades de soldagem. Para tanto, foram realizados ensaios de soldagem com o processo GMAW convencional robotizado em juntas sobrepostas na posição horizontal. Foram utilizadas chapas de espessura 2,8 e 2,2 mm, sendo estas referentes a posição superior e inferior respectivamente. Empregou-se velocidades de soldagem superiores a 1 m/min e foram avaliados os aspectos morfológicos dos cordões de solda obtidos. Como resultado, foi verificado que o posicionamento da tocha de soldagem possui influência significativa na geometria do cordão e que com ângulos de ataque e de trabalho adequados é possível conferir maior robustez ao processo sem, contudo, perder em produtividade.

Palavras-chave: MIG/MAG convencional; Soldagem em elevadas velocidades; Ângulos de ataque e de soldagem.

Evaluation of the Influence of the Positioning of the Welding Torch on the Morphological Aspects of the Weld Beads Produced with the Conventional GMAW Process at High Welding Speeds

Abstract: In terms of welding with addition of material, as in the case of GMAW process, the obtaining of shorter welding times implies the search for higher deposition rates, since by increasing the deposition rate it is possible to increase the welding speed keeping constant the rate of material deposited per unit of weld bead length. As an alternative, in applications that require high welding speeds, it is currently common to consider the use of hybrid processes or modern welding techniques derived from processes considered as traditional. However, this implies investment that is often not available. The aim of the present work is to analyze the effects of welding torch positioning on the formation of discontinuities and, above all, on geometry of the weld beads produced by the conventional GMAW process at high speeds. For this purpose, welds were welded in overlapping joints, in the horizontal position, at welding speeds over 1 m/min with the conventional GMAW process, and the morphological aspects of weld beads. As a result, it was verified that the positioning of the welding torch has a significant influence on the geometry of the weld bead and that with suitable angles of attack and work it is possible to give greater robustness to the process, even at high welding speeds, without losing productivity.

Key-words: Conventional MIG/MAG; High welding speed; Weld beads morphology.

1. Introdução

A busca constante pela redução de custo de produção e pelo aumento da produtividade nos diferentes segmentos da indústria tem impulsionado o crescente desenvolvimento tecnológico observado nas últimas décadas. Isto é especialmente relevante em se tratando dos processos de soldagem, sobretudo, os processos a arco voltaico, devido à

Recebido: 23 Mar., 2020. Aceito: 30 Set., 2020.

E-mails: alouisevoigt@gmail.com (ALV), t.cunha@ufsc.br (TVC), carlos.nino@ufsc.br (CENB)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution Non-Commercial*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais e que o trabalho original seja corretamente citado.

sua grande aplicação industrial. Portanto, procura-se diminuir o tempo de soldagem, fator esse que, em sua maioria, constitui parte importante dos custos de produção. Em se tratando dos processos de soldagem com adição de material, a obtenção de menores tempos de soldagem implica necessariamente na busca de maiores taxas de deposição, visto que ao aumentar a taxa de deposição é possível aumentar a velocidade de soldagem mantendo constante a área transversal do cordão de solda. Entretanto, dada a própria dinâmica de fusão e solidificação do material envolvida na formação do cordão de solda, o processo encontra limites operacionais para o aumento do aporte de material e, conseqüente, aumento da velocidade de soldagem. Para velocidades de soldagem acima de 1 m/min, a poça de fusão tem características distintas se comparada àquela obtida com valores de velocidade de soldagem abaixo de 0,8 m/min, pois a mesma assume um formato alongado e estreito, com uma forte depressão na frente da poça e com volume de material excessivo na região traseira [1]. Devido a essas características, dentre os defeitos mais comuns decorrentes do emprego de elevadas velocidades de soldagem se destacam a presença de mordedura no cordão de solda e a formação de um cordão ondulado, com grande variação no reforço, conhecido como “humping” [2,3].

Atualmente, diversos trabalhos visam desenvolver novas variantes para aplicações que demandam elevadas velocidades de soldagem como, por exemplo, o emprego de processos híbridos [4] ou modernas técnicas de soldagem derivadas de processos tidos como tradicionais. Para evitar a formação de “humping” no processo GMAW, Wang et al. [5] estudaram a aplicação de um campo magnético externo que, juntamente com a variação da inclinação da tocha, permitiu obter cordões de solda isentos de defeitos e sem respingos com velocidade de soldagem de 2 m/min. Para atingir velocidades ainda maiores, próximas a 4,5 m/min, Ueyama et al. [6] empregaram a configuração *tandem* no processo GMAW juntamente com a pulsação sincronizada das correntes dos dois arcos voltaicos. Os autores observaram que dentre outros parâmetros, os ângulos das tochas têm grande influência nas características do cordão resultante. Contudo, a implementação de processos híbridos e variantes como o tandem GMAW implicam, naturalmente, em aporte de investimentos que muitas vezes não estão disponíveis ou não são viáveis economicamente.

Estudos que tratam da variação dos ângulos da tocha de soldagem são aplicados, sobretudo, em velocidades de soldagem inferiores a 0,8 m/min. Ao avaliar os efeitos do posicionamento do arame na junta e diferentes ângulos da tocha em juntas sobrepostas, Li et al. [7] obtiveram uma variação significativa da morfologia do cordão de solda ao alterar o ângulo de ataque. O direcionamento do arame na junta também alterou a morfologia, pois, segundo os autores, a mudança de posicionamento reflete no posicionamento do arco voltaico alterando, assim, a distribuição de calor na junta. Também em baixas velocidades de soldagem (próximas a 0,2 m/min) e numa configuração de junta muito similar à empregada no presente trabalho (junta sobreposta posicionada horizontalmente), Yu e Kim [8] observaram que o aumento do ângulo de soldagem resultou em cordões de solda mais convexo. Os autores também observaram que quanto mais próximo o arame se encontra da chapa superior maior é a penetração na mesma. Contudo, neste contexto, não foram encontrados trabalhos que abordam os efeitos da variação dos ângulos da tocha de soldagem em velocidades de soldagem superiores a 0,8 m/min.

Diante deste cenário, o presente trabalho tem por objetivo investigar, de forma prática, os efeitos produzidos pela variação do posicionamento da tocha de soldagem (ângulos de ataque e de soldagem) sobre a formação de descontinuidades e, sobretudo, na geometria dos cordões de solda produzidos pelo processo GMAW robotizado em elevadas velocidades. Frente a uma aplicação industrial, serão avaliadas diferentes configurações de posicionamento da tocha de soldagem visando atender a norma ISO 5817:2014 [9], que determina os critérios de avaliação de descontinuidades em cordões de solda. Isto, com o intuito de se obter uma geometria do cordão de solda mais favorável e, com isso, aumentar a robustez do processo no que diz respeito às variações de posicionamento da junta de soldagem comuns dos processos produtivos.

2. Materiais e Métodos

Para a realização do presente trabalho, foi concebida uma bancada de ensaios que permitiu a soldagem de juntas sobrepostas na posição horizontal. Na Figura 1 é apresentado um esquema da bancada com alguns de seus principais elementos. A movimentação da tocha foi realizada com um robô de soldagem antropomórfico de seis graus de liberdade (modelo Almega AX-V6). As chapas foram fixadas num dispositivo que permite, além de fixar, posicionar as chapas superior e inferior de modo que a sobreposição fosse mantida constante ao longo de toda extensão da junta, sendo esta sobreposição igual a 8 mm. Os ensaios de soldagem foram realizados com diferentes configurações de ângulos de soldagem e de ataque (Figura 2). A chapa superior possui $2,2 \pm 0,1$ mm de espessura, enquanto a chapa inferior $2,8 \text{ mm} \pm 0,1$ mm. Ambas com 600 mm de comprimento e 70 mm de largura, confeccionadas de aço carbono SAE 1006.

Com o intuito de avaliar o efeito do posicionamento do arame na junta, foram analisadas três condições de direcionamento do arame. A primeira condição analisada diz respeito ao arame orientado para o centro da junta, sendo essa a configuração mais intuitiva e comumente empregada. As duas outras condições avaliadas consistiram no arame sendo direcionado no centro e na borda da chapa inferior. Quanto aos efeitos dos ângulos de soldagem e de ataque, os ensaios foram divididos em dois blocos. No primeiro se manteve constante o ângulo de soldagem (em 45°) e foram utilizados ângulos de ataque de 50, 65 e 80° (empurrando). No segundo bloco foi fixado o ângulo de ataque (em 65°) e foram empregados ângulos de soldagem de 30, 45 e 60°.

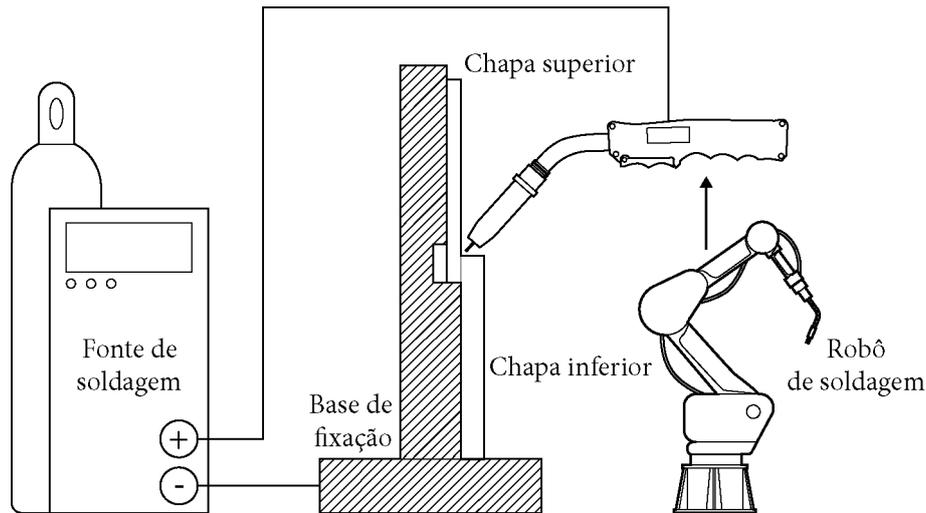


Figura 1. Esquema da bancada de ensaios.

(a) Ângulo de soldagem

(b) Ângulo de ataque

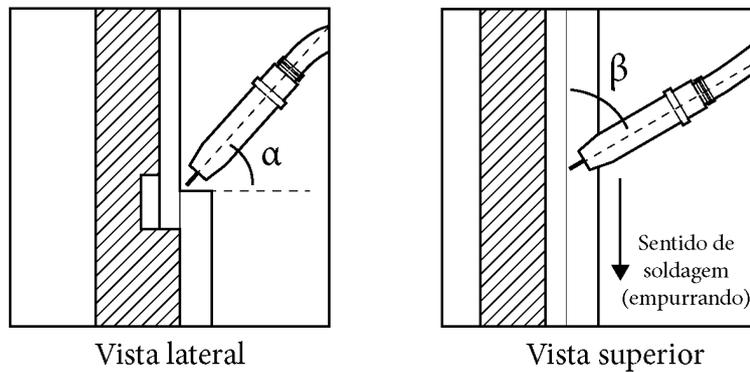


Figura 2. Definição dos ângulos de (a) soldagem α e (b) ataque β .

Todas as condições foram avaliadas na presença de folga e sem folga entre as chapas. Para simular esta folga, comumente encontrada em aplicações industriais devido às variações de produto e de posicionamento das peças, foram utilizados espaçadores entre as chapas, resultando em uma folga de $0,8 \pm 0,2$ mm. Os ensaios foram realizados no modo de transferência por curto circuito forçado e os parâmetros de soldagem foram mantidos fixos em todos os ensaios (Tabela 1), variando-se apenas o posicionamento da tocha de soldagem.

Tabela 1. Parâmetros fixos de soldagem.

Parâmetros	Valores
Tensão de arco [V]	25,4
Velocidade de alimentação do arame [m/min]	8,5
Velocidade de soldagem [m/min]	1,6
Distância entre bico de contato e peça - DBCP [mm]	14
Gás de proteção	Ar+8%CO ₂
Vazão de gás [L/min]	18
Diâmetro do arame [mm]	1,2 mm
Classificação do arame	ER70S-6

Com o objetivo de avaliar a morfologia dos cordões de solda resultantes, foram realizados cortes transversais nos cordões de solda para a obtenção de amostras. As amostras foram preparadas para análise macrográfica. Cada uma das amostras obtidas foi embutida em resina poliéster e preparada metalograficamente utilizando lixas grana 240, 320, 400 e 600. Em seguida, as amostras foram atacadas com Nital 4%. Em um estereoscópio foram obtidas as macrografias da seção

transversal dos cordões de solda para posterior análise de sua geometria. Quanto os aspectos geométricos, estes foram avaliados com base na norma ISO 5817:2014 [9] que trata do nível de discontinuidades aceitáveis no cordão de solda. As medidas geométricas foram realizadas como software ImageJ. Contudo, para a aplicação da norma ISO 5817:2014 [9], é necessário ter as dimensões do cordão de solda projetadas para a junta em questão, logo, na Figura 3 é apresentado um esquemático das medidas de projeto. Neste, espera-se que a dimensão das pernas seja no mínimo igual a espessura da menor chapa utilizada (Figura 3a), logo, 2,2 mm. Ainda, segundo a norma AWS D1.1, para o caso de juntas sobrepostas, a perna não deve exceder a espessura da chapa, portanto, a perna na chapa inferior não deve exceder em 2,8 mm. Nos casos em que há folga entre as chapas, as pernas devem ter dimensão igual a espessura da menor chapa “ t_1 ” acrescida da dimensão da folga “ g ” (Figura 3b). Na Figura 3c é apresentado o dimensionamento da garganta “ a ”. Esta, é a medida da altura de um triângulo retângulo inscrito no cordão, cujos catetos correspondem as pernas.

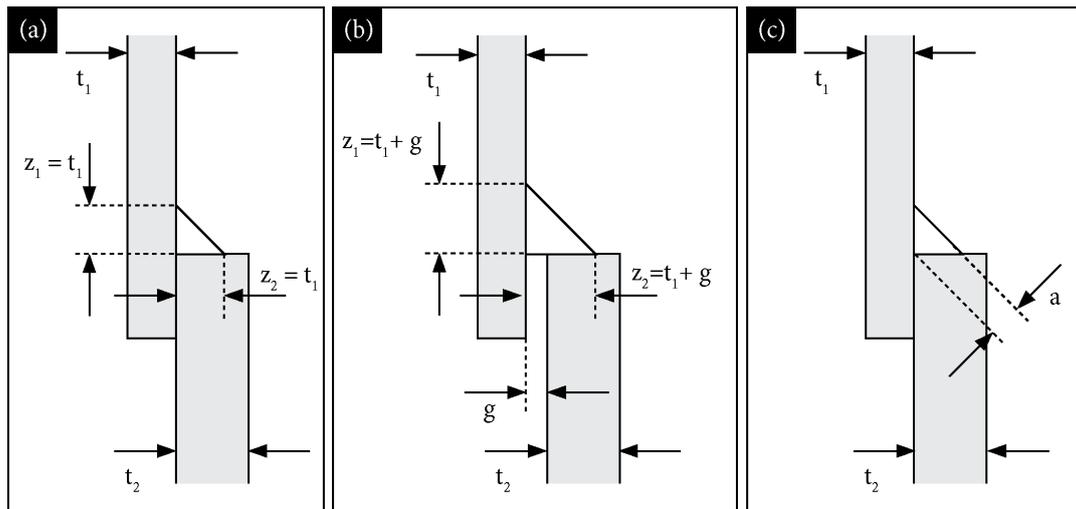


Figura 3. Projeto do cordão de solda.

Na Figura 4 é apresentado um exemplo de medição das pernas “ Z_1 ” e “ Z_2 ”, garganta “ A ” e ângulo entre a linha tangente ao cordão de solda e a chapa superior “ θ ”.

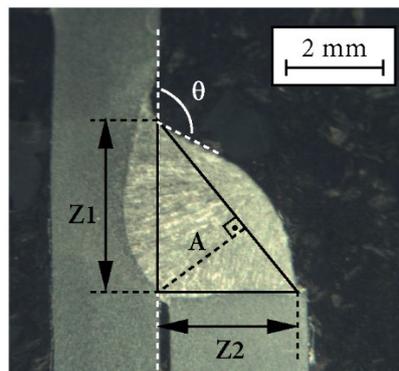
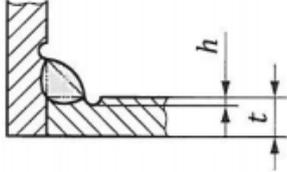
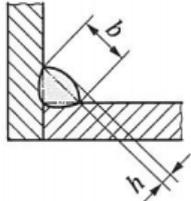
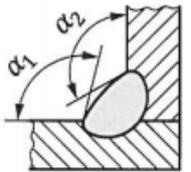
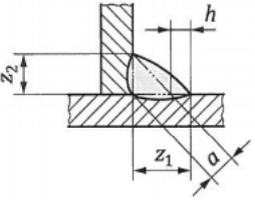
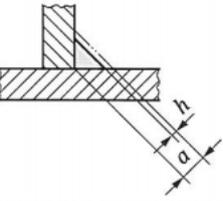
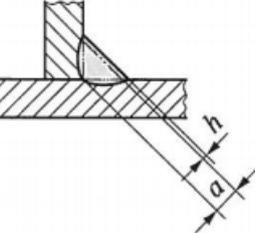


Figura 4. Exemplo de medição das pernas “ Z_1 ” e “ Z_2 ”, garganta “ A ” e ângulo suplementar ao de molhamento “ θ ”.

Com base nessas medidas foram realizadas as análises referentes a convexidade, molhamento, simetria e atendimento aos requisitos do projeto. Neste sentido, foram avaliados os itens da seção “1 Surface Imperfections” da ISO 5817:2014 [9] aderentes ao estudo. Como o presente trabalho trata de soldas de filete em juntas sobrepostas, serão analisados os itens 1.7, referente a mordedura, 1.10, que trata de convexidade excessiva, 1.12, referente ao ângulo suplementar ao ângulo de molhamento do cordão, 1.16, que determina o limite da diferença entre as medidas de perna e, por fim, os itens 1.20 e 1.21 que tratam dos limites mínimo e máximo admissíveis, respectivamente, para a garganta com base na dimensão de projeto. A norma ISO 5817:2014 [9] apresenta três limites de discontinuidades, sendo estes: “D”, “C” e “B”. O nível “D” possui uma maior tolerância a discontinuidades, ao contrário do nível “B”, cuja tolerância é menor. Ao ultrapassar os limites estabelecidos, as discontinuidades são consideradas defeitos. Na Tabela 2 estão resumidos os itens a serem analisados e os critérios conforme a ISO 5817:2014 [9].

Tabela 2. Medidas de referência e critérios conforme ISO 5817:2014 [9].

Nº	Descrição	Medidas de referência	Limites das descontinuidades		
			D	C	B
(a) 1.7	Mordedura		$h \leq 0,4 \text{ mm}$	$h \leq 0,2 \text{ mm}$	Não permitido (h=0)
(b) 1.10	Convexidade excessiva		$h \leq 1 \text{ mm} + 0,25 b$	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 b$	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,1 b$
(c) 1.12	Ângulo suplementar ao de molhamento		$\alpha \geq 90^\circ$	$\alpha \geq 100^\circ$	$\alpha \geq 110^\circ$
(d) 1.16	Assimetria excessiva		$h \leq 2 \text{ mm} + 0,2 a$	$h \leq 2 \text{ mm} + 0,15 a$	$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,15 a$
(e) 1.20	Garganta insuficiente		$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,1 a$	$h \leq 0,2 \text{ mm}$	Não permitido (h=0)
(f) 1.21	Garganta excessiva		Permitido	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,2 a$, mas no máximo 4 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 a$, mas no máximo 3 mm

3. Resultados e Discussão

Na Figura 5a são apresentados os resultados obtidos para a condição em que o arame foi direcionado para o centro da junta, com ângulos de soldagem e ataque de 45 e 65°, respectivamente. Esta configuração consiste na mais intuitiva ao se definir a posição de inserção do arame num procedimento de soldagem. No entanto, como se pode observar, esta resultou em mordeduras em ambas as condições avaliadas, sobretudo, quando há folga entre as chapas. Quanto aos itens da norma ISO 5817:2014 [9], os cordões de solda estariam em desacordo com o item 1.7 (Tabela 2a) referente à mordedura para limites “C” e “B”. Ambos os cordões estariam aceitáveis em todos os itens analisados para um nível de qualidade “D”. Na Tabela 3 são apresentados os valores obtidos para cada condição e os requisitos com base na ISO 5817:2014 [9].

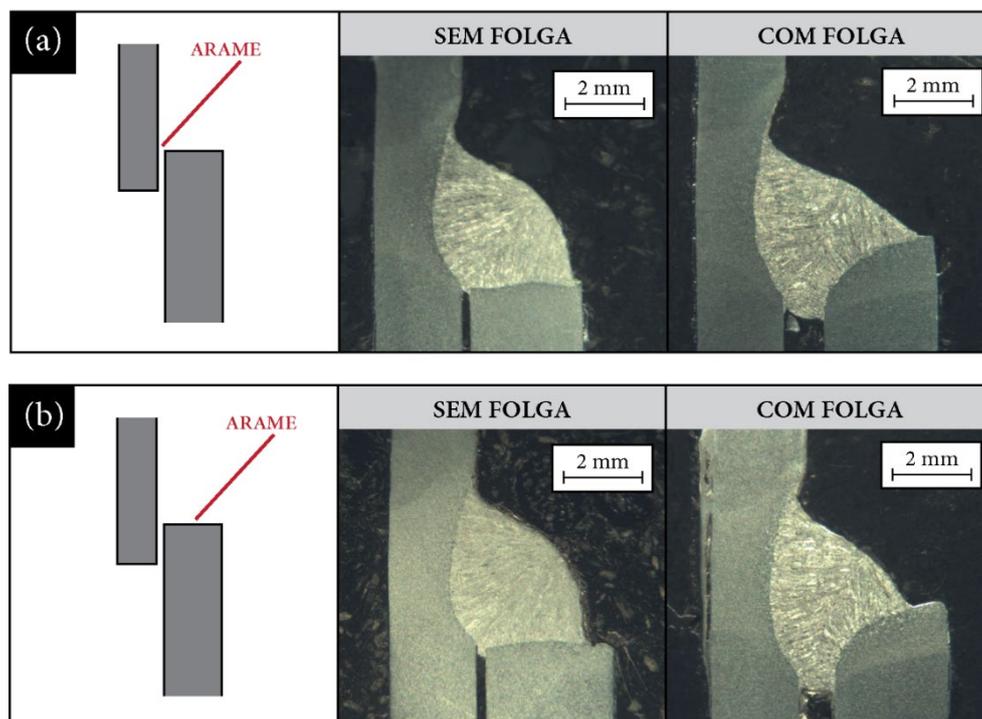


Figura 5. Macrografias dos cordões de solda nas configurações: (a) arame direcionado no centro da junta e (b) direcionado no centro da chapa inferior.

Tabela 3. Medidas obtidas a partir das macrografias para os cordões de solda em que o arame foi direcionado para o centro da junta e para o centro da chapa inferior.

Amostra	1.7 - Mordedura				Pernas			Folga
	h_{medido}	D	C	B	$Z1_{medido}$	$Z2_{medido}$	$Z_{mínimo}$	
Junta s/ folga ($\alpha=45^\circ$ $\beta=65^\circ$)	0,2 mm				3,5 mm	2,9 mm	2,4 mm	0,2 mm
Junta c/ folga ($\alpha=45^\circ$ $\beta=65^\circ$)	0,4 mm				2,1 mm	3,2 mm	3,2 mm	1,0 mm
Meio s/ folga ($\alpha=45^\circ$ $\beta=65^\circ$)	0 mm	$h \leq 0,4$ mm	$h \leq 0,2$ mm	$h = 0$	3,9 mm	2,8 mm	2,4 mm	0,2 mm
Meio c/ folga ($\alpha=45^\circ$ $\beta=65^\circ$)	0,2 mm				2,4 mm	2,7 mm	3,1 mm	0,9 mm

Buscando minimizar as mordeduras, foram realizados ensaios em que o arame foi direcionado para o centro da chapa inferior (Figura 5b). É possível observar que esse deslocamento de 1,4 mm no direcionamento do arame foi responsável por diminuir a mordedura na condição com folga e eliminá-la na condição sem folga. Este resultado sugere, portanto, que pequenas variações nos parâmetros de soldagem (neste caso posicionamento do arame) conduz a resultados significativamente diferentes. Essas variações podem ser consideradas comuns em aplicações industriais, haja vista as variações dimensionais dos componentes e do posicionamento relativo entre peça de trabalho e tocha de soldagem. Ao direcionar o arame para o centro da chapa inferior, o item 1.7 (Tabela 2a) atenderia aos limites “D” e “C” e, inclusive, a condição sem folga entre chapas atenderia também ao limite “B”. Logo, há uma melhora em relação a condição anterior (aramé direcionado para o centro da junta).

Ao realizar as medições de garganta e pernas através de triângulos retângulos inscritos, estas, na condição com folga, não atendem aos requisitos de projeto. Contudo, devido a maior penetração do cordão na folga presente entre as chapas e as características geométricas nessa condição, uma diferente abordagem deve ser considerada. Inclusive, no item 1.20 (Tabela 2e) referente a garganta insuficiente, a norma ISO 5817:2014 [9] comenta que o critério não é aplicável quando há uma maior penetração do cordão de solda. Na Figura 6 é apresentado o triângulo retângulo inscrito utilizando a abordagem tradicional (hachurado) e um triângulo considerando a totalidade da perna na chapa superior. De fato, a região efetiva de união entre as chapas é superior à obtida pela abordagem tradicional.

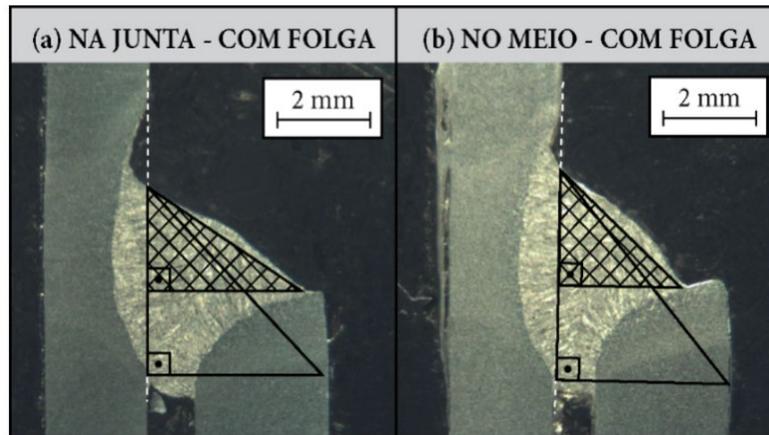


Figura 6. Medições das pernas na condição de (a) arame direcionado na junta e (b) direcionado no centro da chapa inferior em que a área hachurada corresponde a abordagem tradicional.

Com o intuito de verificar se uma alteração ainda maior no posicionamento do arame em relação ao centro da junta teria efeito significativo na geometria e presença de mordedura nos cordões de solda, foram realizados ensaios com o arame direcionado para a borda da chapa inferior. Como resultado, verifica-se, de fato, que esse direcionamento eliminou as mordeduras para ambas as condições (com e sem folga). Ademais, a fusão da chapa inferior é desejável em certas aplicações industriais visto que elimina a presença de “cantos vivos” que poderiam causar lesões na manipulação das peças, seja nos profissionais da linha produção, seja no cliente final. Contudo, na condição com folga entre as chapas, a dimensão da perna na chapa superior não atendeu ao requisito de projeto e o nível de convexidade atendeu apenas ao limite “D”.

Buscando melhorar a molhabilidade do cordão e, assim, atender aos requisitos dimensionais de projeto, avaliou-se diferentes ângulos de soldagem e ataque empregando o direcionamento do arame na borda da chapa inferior. Na Figura 7 são apresentados os cordões de solda obtidos no primeiro bloco de ensaios na presença de folga entre as chapas, sendo essa a situação mais crítica e próxima da realidade industrial. Nesse primeiro bloco foi empregado ângulo de soldagem igual a 45° e diferentes ângulos de ataque. Em comparação com o cordão referência (65°), o aumento do ângulo acarretou maior molhabilidade do cordão. O cordão de solda realizado com ângulo de ataque de 50° atendeu aos limites “D” e “C” de molhabilidade. Com base no conhecimento prático, obtido a partir da experiência, com ângulo menor (50°) era de se esperar menor penetração (já que se estaria “empurrando” mais). Entretanto, nesses patamares de velocidades de soldagem empregadas, a dinâmica de fusão do metal de base e formação da poça de fusão se tornam ainda mais complexos de serem analisados. Acredita-se que, neste caso, com o ângulo de ataque de 50° , maior é o efeito de sobreposição da poça, ou seja, maior é a quantidade de material fundido interposto entre o arco e a poça de fusão. Já que o arco tende a empurrar o material fundido para frente de fusão. Desse modo, o calor proveniente do arco encontra maior dificuldade de alcançar do metal de base, reduzindo, assim, a penetração do cordão de solda. O cordão de solda produzido com ângulo de ataque de 80° também apresentou uma geometria menos convexa, atendendo a todos os limites de molhabilidade. Além disso, verifica-se com este ângulo (80°) uma maior penetração na folga da junta e um aumento da perna da chapa superior atendendo, portanto, aos requisitos de projeto. Na Tabela 4 são apresentadas as medidas para as condições descritas considerando a abordagem tradicional de medição das pernas do cordão.

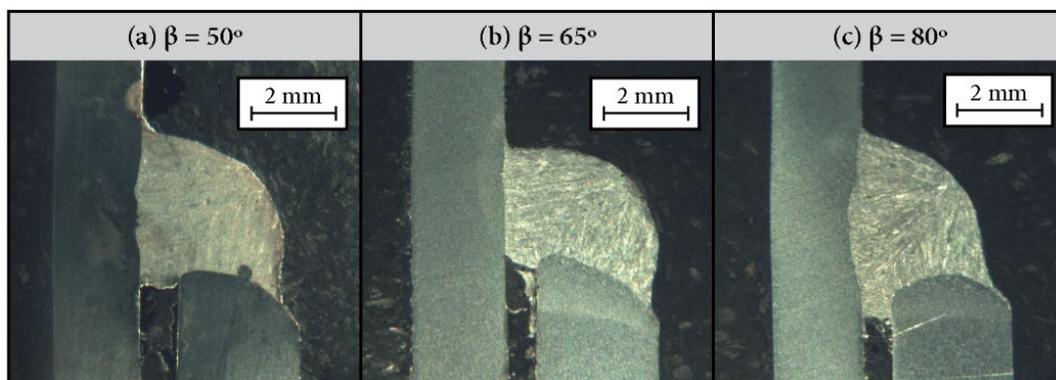


Figura 7. Cordões de solda realizados com folga entre as chapas e com ângulos de ataque de (a) 50° , (b) 65° e (c) 80° para a configuração do arame apontando para a borda da chapa inferior com ângulo de soldagem de 45° .

Tabela 4. Medidas obtidas a partir das macrografias para os cordões de solda em que o arame foi direcionado para a borda da chapa inferior, ângulo de soldagem de 45° e diferentes ângulos de ataque.

Amostra	1.12 - Molhamento				Pernas			Folga
	θ_{medido}	D	C	B	Z1 _{medido}	Z2 _{medido}	Z _{mínimo}	
$\beta=50^\circ$ c/ folga	101°				3,4 mm	3,2 mm	3,1 mm	0,9 mm
$\beta=65^\circ$ c/ folga	91°	$\theta \geq 90^\circ$	$\theta \geq 100^\circ$	$\theta \geq 110^\circ$	2,5 mm	3,4 mm	2,8 mm	0,6 mm
$\beta=80^\circ$ c/ folga	110°				3,3 mm	2,9 mm	2,9 mm	0,7 mm

Na Figura 8 são apresentados os cordões de solda do segundo bloco de ensaios, em que o ângulo de ataque permaneceu fixo (65°) e os ângulos de soldagem foram variados em 30, 45 e 60°. As variações do ângulo de soldagem provocaram alterações significativas, sobretudo, na molhabilidade dos cordões de solda. Isto se deve ao fato de o ângulo de soldagem influenciar no direcionamento do arco na junta. Neste contexto, para ângulo de soldagem de 60° verifica-se um cordão mais convexo e concentrado mais próximo a chapa inferior. Já o menor ângulo de soldagem empregado promoveu uma melhor distribuição do metal na junta e uma maior penetração na chapa superior. Estes resultados concordam com os obtidos por Yu e Kim [8] em baixas velocidades de soldagem. Quanto a aplicação dos critérios da norma ISO 5817:2014 [9], para os ângulos de 45 e 60° a geometria resultante não atendeu aos limites "C" e "B" de molhabilidade (item 1.12 – Tabela 2c) apesar de estar dentro dos limites de convexidade (item 1.10 – Tabela 2b). A redução do ângulo de soldagem para 30° favoreceu o aumento da perna "Z1", estando, portanto, dentro do estabelecido no projeto da solda. Na Tabela 5 são apresentadas as medidas obtidas para as condições descritas.

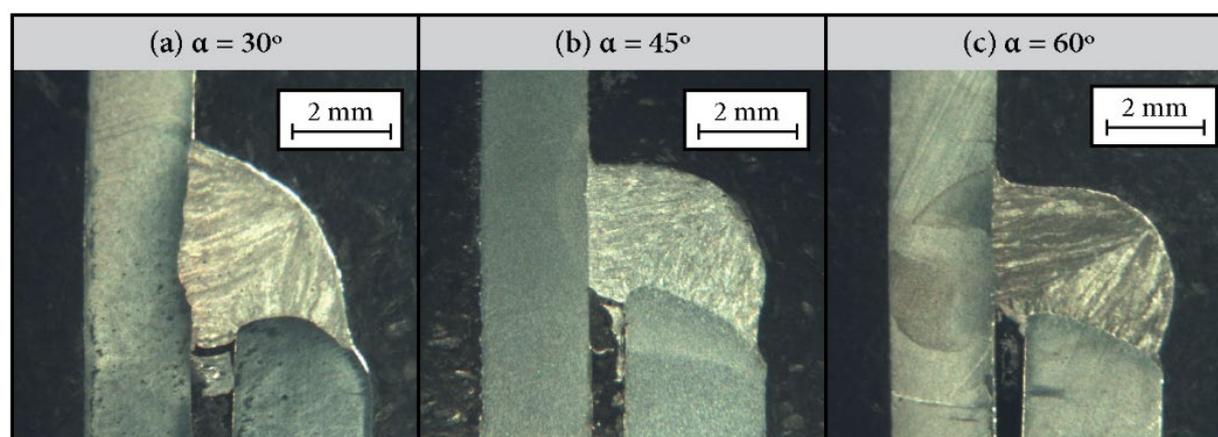


Figura 8. Cordões de solda realizados com folga entre as chapas e com ângulos de soldagem de (a) 30°, (b) 45° e (c) 60° para a configuração do arame apontando para a borda da chapa inferior com ângulo de ataque de 65°.

Tabela 5. Medidas obtidas a partir das macrografias para os cordões de solda em que o arame foi direcionado para a borda da chapa inferior, ângulo de ataque de 65° e diferentes ângulos de soldagem.

Amostra	1.12 - Molhamento				Pernas			Folga
	θ_{medido}	D	C	B	Z1 _{medido}	Z2 _{medido}	Z _{mínimo}	
$\alpha=30^\circ$ c/ folga	115°				3,5 mm	3,1 mm	3,0 mm	0,8 mm
$\alpha=45^\circ$ c/ folga	91°	$\theta \geq 90^\circ$	$\theta \geq 100^\circ$	$\theta \geq 110^\circ$	2,5 mm	3,4 mm	2,8 mm	0,6 mm
$\alpha=60^\circ$ c/ folga	93°				2,5 mm	3,3 mm	2,8 mm	0,6 mm

Conforme visto, o ângulo de soldagem apresentou grande influência na geometria do cordão de solda e os resultados obtidos com diferentes ângulos de ataque apontam para uma menor convexidade com o emprego de menores valores. Diferentemente do que ocorreu para outras posições de arame analisadas, em todos os ângulos avaliados na condição de arame direcionado para a borda da chapa inferior não foram encontradas descontinuidades como, por exemplo, mordeduras. Embora nos cordões de solda da Figura 8 haja ausência de mordeduras, os cordões apresentaram valores de penetração baixos na chapa superior, especialmente, os cordões com ângulo de soldagem de 45 e 60°. Este resultado pode ser atribuído, principalmente, a presença de folga considerável entre as chapas, tendo em vista os resultados obtidos sem folga, ou com valores mínimos

(Figura 9). Nestes, é possível verificar valores de penetração mais elevados na chapa superior. Quanto à geometria dos cordões de solda obtidos na condição sem folga entre as chapas, não é possível observar alterações significativas. Relativo a isso, na Tabela 6 são apresentadas as medidas obtidas nos cordões de solda produzidos com o arame direcionado para a borda da chapa inferior e sem a presença de folga entre as chapas.

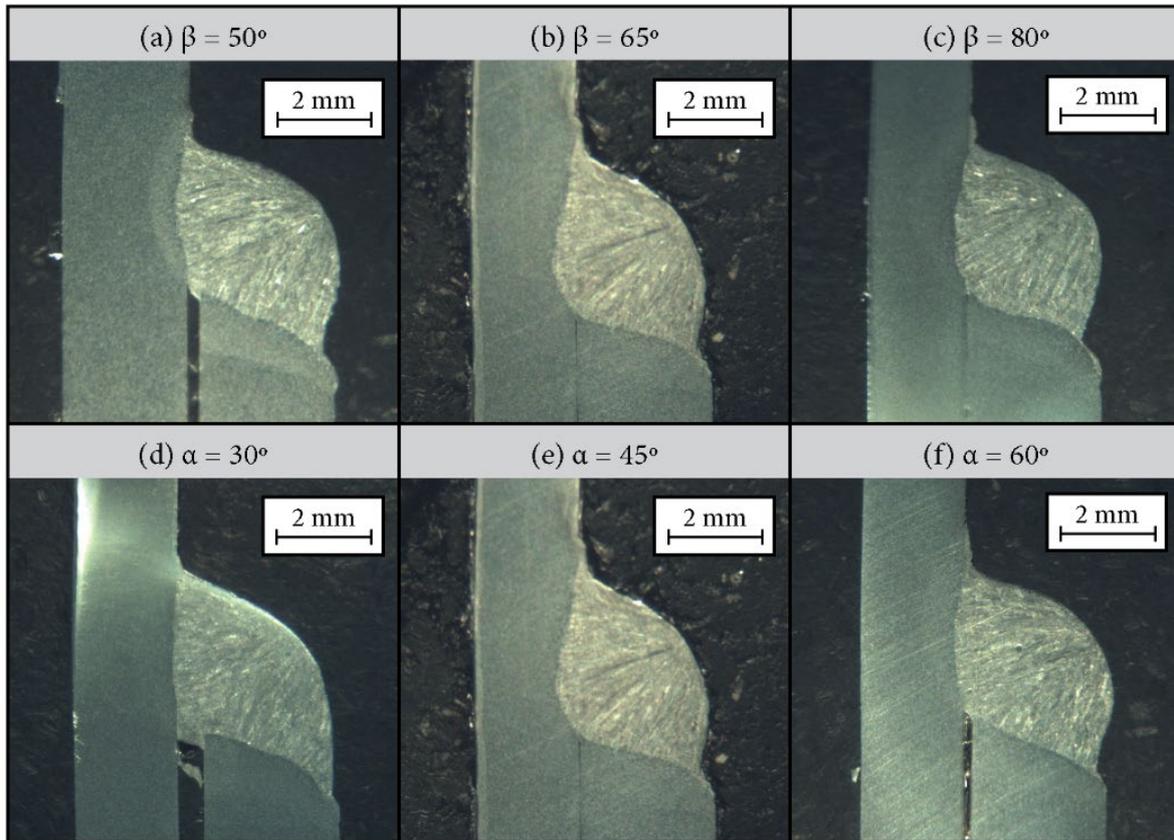


Figura 9. Cordões de solda realizados sem folga entre as chapas e com ângulos de ataque de (a) 50° , (b) 65° e (c) 80° e ângulos de soldagem de (d) 30° , (e) 45° e (f) 60° para a configuração do arame apontando para a borda da chapa inferior

Tabela 6. Medidas obtidas a partir das macrografias para os cordões de solda em que o arame foi direcionado para a borda da chapa inferior e sem a presença de folga entre as chapas.

Amostra	1.12 - Molhamento			Pernas			Folga	
	θ_{medido}	D	C	B	Z1 _{medido}	Z2 _{medido}		Z _{mínimo}
$\beta=50^\circ$ s/ folga ($\alpha=45^\circ$)	106°				3,1 mm	2,8 mm	2,5 mm	0,3 mm
$\beta=65^\circ$ s/ folga ($\alpha=45^\circ$)	117°				3,4 mm	2,5 mm	2,2 mm	0 mm
$\beta=80^\circ$ s/ folga ($\alpha=45^\circ$)	110°				3,0 mm	2,5 mm	2,2 mm	0 mm
$\alpha=30^\circ$ s/ folga ($\beta=65^\circ$)	116°	$\theta \geq 90^\circ$	$\theta \geq 100^\circ$	$\theta \geq 110^\circ$	3,5 mm	3,2 mm	2,7 mm	0,5 mm
$\alpha=45^\circ$ s/ folga ($\beta=65^\circ$)	117°				3,4 mm	2,5 mm	2,2 mm	0 mm
$\alpha=60^\circ$ s/ folga ($\beta=65^\circ$)	104°				3,0 mm	2,8 mm	2,3 mm	0,1 mm

A Tabela 7 traz uma síntese quanto aos critérios de qualidade relativos à geometria e descontinuidades estabelecidos pela ISO 5817:2014 [9] e avaliados no presente trabalho.

Tabela 7. Atendimento aos critérios estabelecidos na norma ISO 5817:2014 [9] para todas as configurações de posicionamento analisadas.

Cordão de solda		Mordedura 1.7			Convexidade 1.10			Molhabilidade 1.12			Assimetria das pernas 1.16			Garganta mínima 1.20			Garganta máxima 1.21			Pernas - projeto	
		D	C	B	D	C	B	D	C	B	D	C	B	D	C	B	D	C	B	Z1	Z2
Junta ($\alpha=45^\circ$ $\beta=65^\circ$)	sem folga	■	■	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	com folga	■	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Meio ($\alpha=45^\circ$ $\beta=65^\circ$)	sem folga	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	com folga	■	■	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Borda ($\alpha=45^\circ$ $\beta=65^\circ$)	sem folga	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	com folga	■	■	■	■	■	■	■	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□
Borda ($\alpha=45^\circ$ $\beta=50^\circ$)	sem folga	■	■	■	■	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	com folga	■	■	■	■	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Borda ($\alpha=45^\circ$ $\beta=80^\circ$)	sem folga	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	com folga	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Borda ($\alpha=30^\circ$ $\beta=65^\circ$)	sem folga	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	com folga	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Borda ($\alpha=60^\circ$ $\beta=65^\circ$)	sem folga	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	com folga	■	■	■	■	■	■	■	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□

■ atende ao critério, □ não atende ao critério.

Com a realização do trabalho, conclui-se que o posicionamento do arame em relação à junta possui efeito significativo quanto a presença de mordeduras. Dentre as três condições de direcionamento do arame avaliadas, aquela em que o arame e, portanto, o arco voltaico, foi direcionado para a borda da chapa inferior, eliminou completamente a presença de mordedura na chapa superior. Contudo, ao empregar os ângulos de soldagem e ataque de 45 e 65°, respectivamente foi obtida uma geometria de cordão convexa e de dimensões que não atendem aos requisitos de projeto. Contudo, ao variar os ângulos de soldagem e ataque foi possível obter cordões de solda que atendam todos os três requisitos de qualidade estabelecidos pela norma ISO 5817:2014 [9], além dos requisitos de projeto. Logo, conclui-se que mesmo em condições de elevadas velocidades de soldagem é possível obter cordões de solda no processo GMAW convencional isentos de defeitos. Para tanto, há de ser considerado o posicionamento da tocha de soldagem em relação à junta e a folga existente entre as peças. Em relação a esta última, verifica-se que a presença de valores acentuados de folga acentua os efeitos oriundos das diferentes configurações de posicionamento avaliadas, tendo em vista que a geometria dos cordões de solda não apresentou alterações expressivas quando obtidas na ausência de folga. Deste modo, é imperativo que nas aplicações industriais haja o conhecimento prévio das possíveis influências quanto ao processamento das peças, bem como, sua fixação e posicionamento em relação à tocha de soldagem. Isto, a fim de viabilizar a adequada especificação dos parâmetros de soldagem a serem empregados, sobretudo, em elevadas velocidades de soldagem.

4. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do posicionamento da tocha de soldagem sobre a morfologia do cordão de solda produzido em elevadas velocidades de soldagem. A partir dos resultados obtidos, e considerando a configuração da junta e espessuras de chapa empregadas, pode-se concluir que:

- O posicionamento do arame em relação à junta possui influência significativa na presença de mordeduras na chapa superior de juntas sobrepostas soldadas na posição horizontal;

- O ângulo de soldagem exerce grande influência sobre a morfologia do cordão, sobretudo, em relação à molhabilidade;
- Dentre as condições analisadas, a configuração em que o arame foi direcionado para a borda da chapa inferior com combinações de ângulos de soldagem e ataque de ($\alpha=45^\circ$ | $\beta=80^\circ$) e ($\alpha=30^\circ$ | $\beta=65^\circ$) resultou em cordões isentos de defeitos em todos os limites estabelecidos pela norma ISO 5817:2014 [9] nas condições com e sem folga entre as chapas;
- Alterando apenas o posicionamento da tocha em relação à junta de solda, sem recorrer a técnicas ou métodos de soldagem que exijam maiores investimentos, foi possível obter uma geometria de cordão mais adequada, capaz de melhor absorver as variações de posicionamento da tocha/peça e, assim, reduzir os índices de retrabalho na indústria.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de pós-graduação bem como ao POSMEC e à Universidade Federal de Santa Catarina. Agradecem também ao Laboratório de Tecnologia da Soldagem (UFSC-Joinville) e à empresa IMC Soldagem pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- [1] Wu CS, Zhong LM, Gao JQ. Visualization of hump formation in high-speed gas metal arc welding. *Measurement Science & Technology*. 2009;20(11):115702. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/20/11/115702>.
- [2] Nguyen TC, Weckman DC, Johnson DA, Kerr HW. High speed fusion weld bead defects. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2006;11(6):618-633. <http://dx.doi.org/10.1179/174329306X128464>.
- [3] Chen J, Wu CS. Numerical analysis of forming mechanism of hump bead in high speed GMAW. *Welding in the World*. 2010;54(9-10):R286-R291. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03266741>.
- [4] Choi HW, Farson DF, Cho MH. Using a hybrid laser plus GMAW process for controlling the bead humping defect. *Welding Journal*. 2006;85(8):174-179.
- [5] Wang L, Wu CS, Gao JQ. Suppression of humping bead in high speed GMAW with external magnetic field. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2016;21(2):131-139. <http://dx.doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000074>.
- [6] Ueyama T, Ohnawa T, Tanaka M, Nakata K. Effects of torch configuration and welding current on weld bead formation in high speed tandem pulsed gas metal arc welding of steel sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2005;10(6):750-759. <http://dx.doi.org/10.1179/174329305X68750>.
- [7] Li J, Li H, Wei H, Gao Y. Effect of torch position and angle on welding quality and welding process stability in Pulse on Pulse MIG welding–brazing of aluminum alloy to stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;84(1-4):705-716. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7734-6>.
- [8] Yu J, Kim D. Effects of welding current and torch position parameters on minimizing the weld porosity of zinc-coated steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;95(1-4):551-567. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-1180-6>.
- [9] ISO. EN ISO 5817:2014. Welding - Fusion-Welded Joints in Steel, Nickel, Titanium and Their Alloys (Beam Welding Excluded). Quality Levels for Imperfections. International Organization for Standardization; 2014.