

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA POR PROJETO DE EXPERIMENTOS FATORIAL FRACIONADO¹

Gustavo Simões Teixeira²

Resumo

O objetivo deste trabalho é analisar a influência dos parâmetros de um sistema mecanizado de soldagem, composto por uma tocha TIG e outra MAG em tandem, sobre a geometria do cordão de solda. Os resultados foram comparados com soldas realizadas pelos processos TIG e MAG operando isoladamente. A execução dos cordões ocorreu por simples deposição sobre chapas de aço ao carbono AISI 1010 com espessura de 6,3 mm, onde um dispositivo de soldagem mecanizado permitiu a variação da velocidade de soldagem, distância da ponta do eletrodo TIG e a distância entre tochas. Os parâmetros analisados foram: corrente de soldagem e distância da ponta do eletrodo a peça no processo TIG, velocidade de alimentação de arame e tensão do arco no processo MAG, velocidade de soldagem e distância entre as tochas. Os ajustes de corrente e tensão de soldagem foram feitos em duas fontes de potência separadas, do tipo transformador-retificador, uma para cada tocha, devido as suas diferentes curvas características. Através do projeto de experimento fatorial fracionado, avaliaram-se os efeitos de dois níveis, um mínimo e outro máximo, mais quatro réplicas dos seus níveis intermediários, resultando em 20 experimentos para cada processo de soldagem. Os resultados finais indicam uma diferença ao utilizar uma tocha TIG para pré-aquecer o material base, mas, estatisticamente, essa diferença não é significativa entre os processos TIG e MAG em tandem e MAG convencional para a faixa de parâmetros de soldagem adotada.

Palavras-chave: Processo MAG; Processo TIG; Soldagem TIG – MAG em Tandem; Geometria do cordão de solda.

ANALYSIS OF THE WELDING PARAMETERS INFLUENCE OVER THE WELD BEAD GEOMETRY BY FRACTIONAL FACTORIAL DESIGN OF EXPERIMENT

Abstract

This study aims to investigate the influence of process parameters of a mechanized welding system, comprising a GTAW torch and a GMAW torch in tandem configuration, on the geometry of the resulting weld bead, performed using GTAW and GMAW welding processes in tandem. The results were compared with weld beads performed by conventional GTAW and GMAW welding processes. The tests were conducted performing bead-on-plate deposits over AISI 1010 6.3 mm thick carbon steel plates. GTAW current, GMAW wire feed speed, GTAW arc length, GMAW voltage, welding speed and the distance between GTAW and GMAW torches were the analyzed parameters. The weld beads were performed in a mechanized welding bench, which allows the variation of speed, distance between torches and arc length of the GTAW torch. Current and voltage adjustments were made in two separate transformer-rectifier power sources, one for each welding torch, due to their different characteristic curves of each process. Through the fractional factorial design of experiment, the effects of two different levels for each parameter were analyzed, plus four replicates of the average values of these levels, resulting in 20 experiments for each welding process. The results show a difference on the weld bead geometry using a GTAW torch to preheat the base metal, however, this difference is not statistically significant between GTAW and GMAW welding process in tandem and GMAW welding process for the adopted range of welding parameters.

Key words: GMAW; GTAW; GTAW – GMAW welding in Tandem; Weld bead geometry.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia, Professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Câmpus Rio Grande, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A Aplicação de dois ou mais processos de soldagem tem sido um dos objetivos da indústria nos últimos anos. O motivo deste interesse é obter um aumento de produtividade empregando processos de soldagem com suas tochas configuradas em tandem, ou com os arcos elétricos numa mesma poça de fusão com a disposição híbrida, ou utilizar as tochas operando simultaneamente em uma configuração geminada.

Muitos pesquisadores concentraram seus estudos na soldagem híbrida por Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) e por plasma com outros processos de soldagem, como o MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*) e o TIG (*Tungsten Inert Gas*).

Após alguns anos de estudo, o processo de soldagem híbrido Laser-TIG apresentou bons resultados no que diz respeito ao aumento de penetração e melhor estabilidade de arco, com baixos custos de operação ⁽¹⁾. O processo de soldagem híbrido Laser-MIG é foco de estudos devido ao seu grande interesse na indústria naval e automotiva. Elevadas velocidades de soldagem sobre chapas grossas, e em único passe, explicam este interesse ⁽²⁾. O processo de soldagem híbrido Plasma-MIG tem como grande vantagem a independência entre o aporte de calor do arco plasma e o material de adição depositado pela tocha MIG, o que facilita a manipulação da geometria do cordão de solda ⁽³⁾. O processo de soldagem híbrido Plasma-Laser é um dos mais recentes, e permite uma deposição de material precisa e controle do aporte de calor ⁽⁴⁾. O processo de soldagem híbrido TIG – MIG permite o aumento da velocidade de soldagem, maior penetração e uma solda mais limpa, com menos respingos e melhor aparência do cordão de solda se comparado com o processo de soldagem MIG/MAG convencional ⁽⁵⁾. Até agora, a maioria dos processos dos processos de soldagem aplicados na configuração em tandem correspondem à tochas de soldagem de mesmo processo, como cabeçotes de soldagem por arco submerso e tochas MIG/MAG acopladas em tandem.

O objetivo da investigação dos processos de soldagem TIG e MAG operando em tandem é que uma solução relativamente simples pode representar um aumento de produtividade na indústria, unindo dois processos de soldagem em uma bancada de soldagem mecanizada, de forma a obter cordões de solda com boa qualidade, gastando menos tempo e com uma alta repetitividade para toda a aplicação.

Técnicas de estatística, como o projeto de experimentos, foram adotadas neste trabalho para analisar os efeitos dos principais parâmetros desses processos de soldagem em tandem, a fim de otimizar a operação dos processos TIG e MAG trabalhando juntos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A determinação dos parâmetros de soldagem para os processos TIG e MAG tiveram por base os seguintes fatores:

- presença de descontinuidades detectadas através de inspeção visual;
- emprego da maior corrente de soldagem possível;
- emprego da maior velocidade de soldagem possível;
- visualização da linha de solda na raiz, para verificar se houve ou não penetração total; e
- qualidade e acabamento do cordão de solda.

Os parâmetros adotados para os pré-testes tiveram como base experiências anteriores destes processos feitas no LS&TC (Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas) da UFRGS, informações disponíveis na literatura ^(6,7) e, para o processo MAG, de parâmetros recomendados pelo fabricante do arame-eletrodo. Além disso, alguns parâmetros de foram mantidos constantes durante os experimentos (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros de soldagem inalterados durante os experimentos

Diâmetro do eletrodo TIG	2,4 mm
Tipo de eletrodo TIG	EWTh-2
Ângulo da ponta do eletrodo TIG	45°
Material do bocal da tocha TIG	Ceramic
Diâmetro do bocal da tocha TIG	12 mm
Vazão e tipo de gás de proteção TIG	12 l/min – 100% Ar
Diâmetro do bocal da tocha MAG	15 mm
Tipo de arame-eletrodo MAG	ER70S-6
Diâmetro do arame-eletrodo MAG	1,2 mm
Distância do bico de contato à peça MAG	20 mm
Vazão e tipo de gás de proteção MAG	15 l/min – 100% CO ₂

Fonte: TEIXEIRA, G.S. *Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.*⁽⁸⁾

As velocidades de soldagem escolhidas foram as que obtiveram os melhores desempenhos nos processos TIG e MAG convencionais. Neste caso, escolheram-se valores que apresentaram resultados satisfatórios comuns para ambos os processos.

Devido a limitações de espaço da bancada de soldagem, as tochas TIG e MAG ficaram fixas num ângulo de 90° com a chapa de aço ao carbono.

No caso da distância entre as tochas, procurou-se estabelecer a mais próxima possível. A presença de deflexão eletromagnética e o limite de espaço físico foram os fatores determinantes para a escolha da distância mínima.

Os cordões de solda foram feitos em chapas de aço AISI 1010, com dimensões de 300 x 150 x 6,3 mm, na posição plana, modo de operação semiautomática, com preaquecimento feito pela tocha TIG e a deposição de metal de adição a cargo tocha MAG. Uma bancada de soldagem permitiu a mecanização do processo, mantendo a velocidade de soldagem e distância entre tochas constante durante o processo. Na Figura 1, temos um esquema dos equipamentos utilizados.

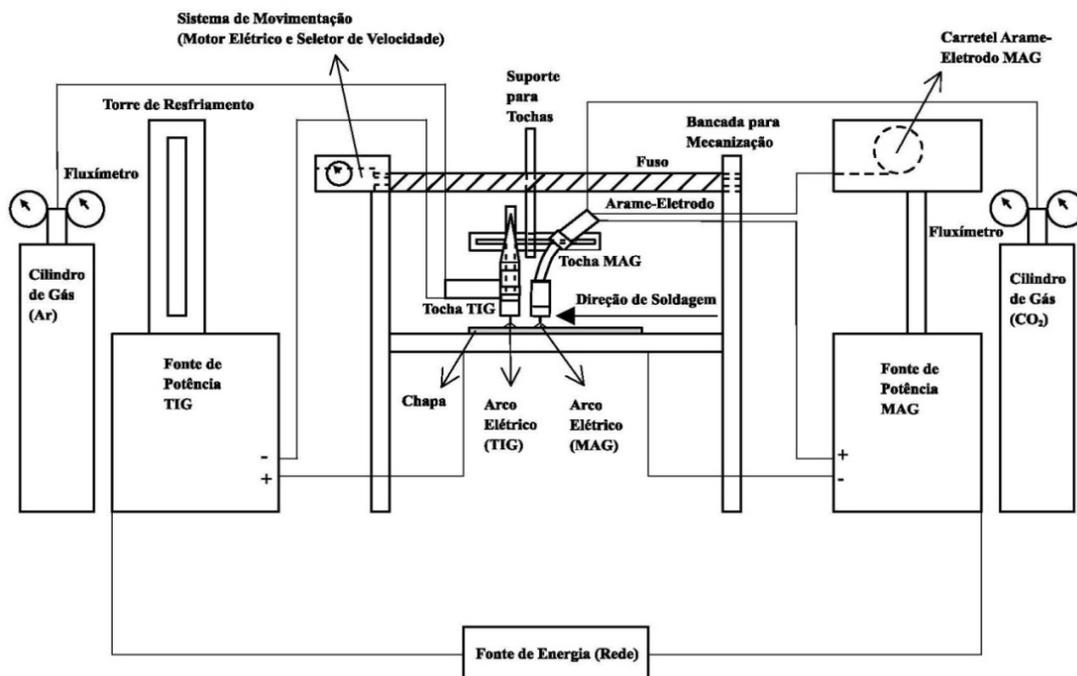


Figura 1. Esquema dos equipamentos utilizados na execução dos cordões de solda. Fonte: TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.⁽⁸⁾

Devido à ausência de dados preliminares e escassez de literatura sobre experiências do processo em tandem, optou-se por um projeto de experimentos utilizando o método fatorial fracionado, que permite uma análise adequada do processo com poucos experimentos. Neste modelo, utilizaram-se dois níveis, em que cada fator assume um valor máximo e um valor mínimo, e quatro pontos centrais. A Tabela 2 apresenta os parâmetros analisados, níveis mínimos, máximos e intermediários.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem utilizados

Parâmetro	Nível mínimo	Nível intermediário	Nível máximo
Velocidade de alimentação de arame MAG (m/min)	6,0	6,5	7,0
Tensão MAG (V)	26	29	32
Corrente TIG (A)	150	200	250
Velocidade de soldagem (mm/s)	4,5	5,0	5,5
Distância do eletrodo a peça TIG (mm)	2,0	2,5	3,0
Distância entre tochas (mm)	30	40	50

Fonte: TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.⁽⁸⁾

A determinação do número de ensaios ocorre através da seguinte relação:

$$2^{k-p} + n_c \rightarrow 2^{6-2} + 4 = 2^4 + 4 = 16 + 4 = 20 \quad (1)$$

Logo, determina-se o número de ensaios, como sendo igual a 20 experimentos. Duas amostras foram retiradas de cada experimento, resultando em 120 amostras, 40 do processo TIG convencional, 40 do processo MAG convencional, e 40 das

tochas TIG e MAG operando em tandem. Cada amostra foi cortada e preparada de acordo com a Figura 2, para análise macroscópica da geometria do cordão de solda, o que incluiu a medição da área, penetração, largura e altura do reforço do cordão de solda.

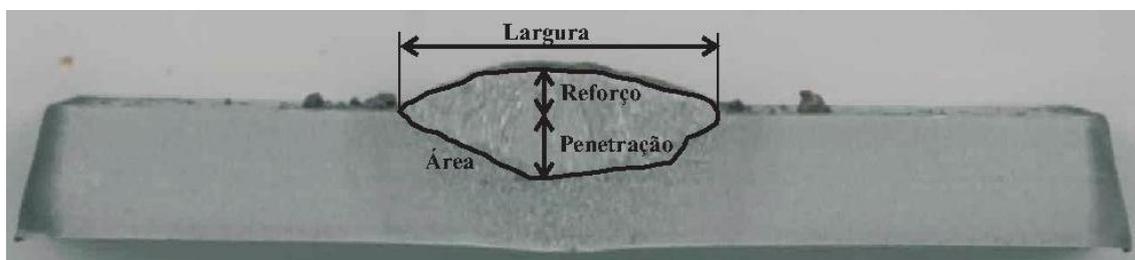


Figura 2. Dimensões do cordão de solda. Fonte: TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.⁽⁸⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto de experimentos fatorial fracionado é descrito na Tabela 3. Adotou-se uma resolução IV e um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 3. Planejamento fatorial fracionado do experimento para os processos de soldagem

Experimento	Ordem Execução	Velocidade Alimentação Arame (m/min)	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Distância Eletrodo (TIG) à Peça (mm)	Distância entre Tochas (mm)
8	1	7,0	26	150	5,5	3,0	50
6	2	6,0	26	150	4,5	2,0	30
7	3	7,0	32	250	4,5	3,0	30
10	4	6,5	29	200	5,0	2,5	40
9	5	6,0	32	250	5,5	2,0	50
14	6	7,0	26	250	5,5	2,0	30
11	7	7,0	32	150	4,5	2,0	50
12	8	6,0	26	250	4,5	3,0	50
13	9	6,0	32	150	5,5	3,0	30
15	10	6,5	29	200	5,0	2,5	40
20	11	6,5	29	200	5,0	2,5	40
16	12	7,0	26	150	4,5	3,0	30
17	13	6,0	32	250	4,5	2,0	30
19	14	7,0	32	250	5,5	3,0	50
18	15	6,0	26	150	5,5	2,0	50
4	16	6,0	26	250	5,5	3,0	30
3	17	7,0	32	150	5,5	2,0	30
2	18	7,0	26	250	4,5	2,0	50
1	19	6,0	32	150	4,5	3,0	50
5	20	6,5	29	200	5,0	2,5	40

Fonte: TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.⁽⁸⁾

3.1 Área do Cordão de Solda

A Figura 3 mostra uma comparação dos valores das áreas dos cordões de solda encontradas para cada processo de soldagem.

Para as Figuras 3 a 6, o algarismo 1 corresponde ao processo TIG-MAG em tandem, 2 para o processo TIG e 3 para o processo MAG.

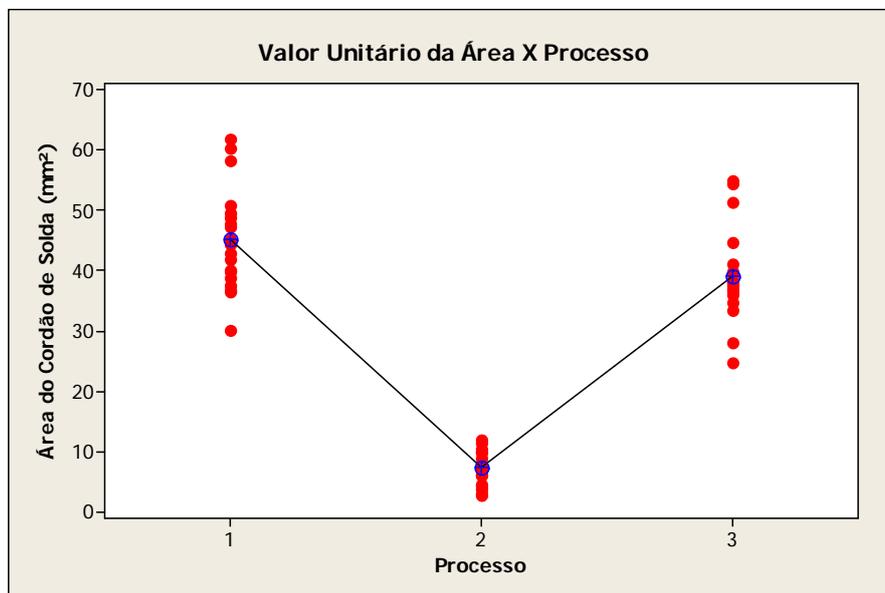


Figura 3. Comparação dos resultados das áreas dos cordões de solda para cada processo. Fonte: TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.⁽⁸⁾

A Tabela 4 mostra os valores médios encontrados para as áreas dos cordões de solda, bem como os valores do desvio-padrão.

Tabela 4. Médias e desvios padrão das áreas para cada processo de soldagem

Processo de soldagem	Média (mm ²)	Desvio padrão (mm ²)
TIG-MAG em tandem	45,23	8,28
TIG	7,16	2,68
MAG	39,22	7,58

Fonte: TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.⁽⁸⁾

Os valores máximos para área do cordão de solda atingem-se utilizando o processo TIG-MAG em tandem. Entretanto, pelos valores do desvio padrão, as faixas de valores dos processos TIG-MAG em tandem e MAG convencional se sobrepõem.

3.2 Penetração do Cordão de Solda

A Figura 4 mostra uma comparação dos valores das penetrações dos cordões de solda encontradas para cada processo de soldagem.

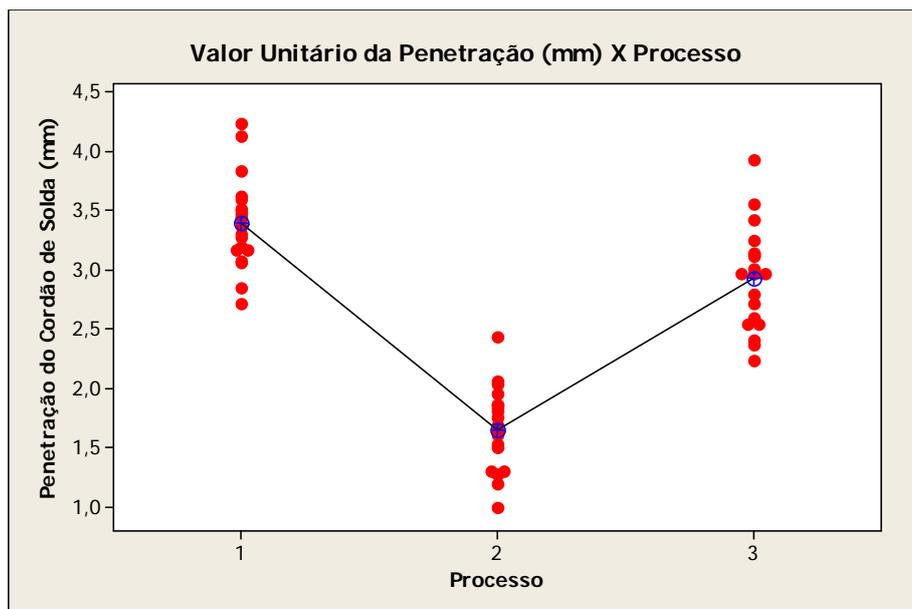


Figura 4. Comparação dos resultados das penetrações dos cordões de solda para cada processo. Fonte: TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.⁽⁸⁾

A Tabela 5 mostra os valores médios encontrados para as penetrações dos cordões de solda, bem como os valores do desvio-padrão.

Tabela 5. Médias e desvios padrão das penetrações para cada processo de soldagem

Processo de soldagem	Média (mm)	Desvio padrão (mm)
TIG-MAG em tandem	3,39	0,38
TIG	1,64	0,36
MAG	2,93	0,42

Fonte: TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.⁽⁸⁾

Os valores máximos para penetração do cordão de solda atingem-se utilizando o processo TIG-MAG em tandem. Entretanto, pelos valores do desvio padrão, as faixas de valores dos processos TIG-MAG em tandem e MAG se sobrepõem.

3.3 Largura do Cordão de Solda

A Figura 5 mostra uma comparação dos valores das larguras dos cordões de solda encontradas para cada processo de soldagem.

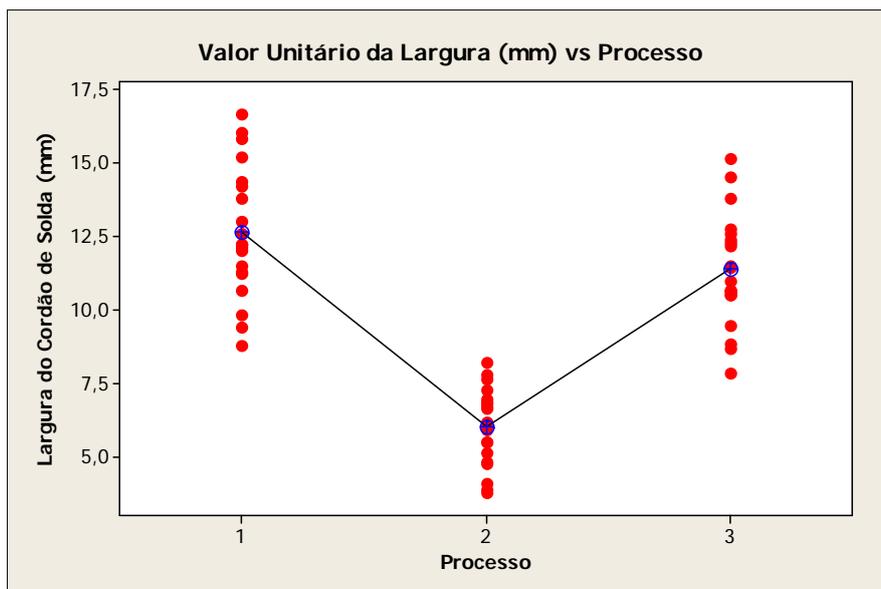


Figura 5. Comparação dos resultados das larguras dos cordões de solda para cada processo. Fonte: Fonte: TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.⁽⁸⁾

A Tabela 6 mostra os valores médios encontrados para as larguras dos cordões de solda, bem como os valores do desvio-padrão.

Tabela 6. Médias e desvios padrão das larguras para cada processo de soldagem

Processo de soldagem	Média (mm)	Desvio padrão (mm)
TIG-MAG em tandem	12,65	2,23
TIG	6,04	1,32
MAG	11,38	1,90

Fonte: TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.⁽⁸⁾

Os valores máximos para largura do cordão de solda atingem-se utilizando o processo TIG-MAG em tandem. Entretanto, pelos valores do desvio padrão, as faixas de valores dos processos TIG-MAG em tandem e MAG convencional se sobrepõem.

3.4 Altura do Reforço do Cordão de Solda

A Figura 6 mostra uma comparação dos valores das alturas dos reforços dos cordões de solda encontradas para cada processo de soldagem.

aumento na penetração e na altura do reforço do cordão de solda para os processos MAG convencional e TIG-MAG em tandem.

Vale ressaltar o aumento da penetração no cordão de solda com a corrente em seu nível máximo, no processo TIG-MAG em tandem. A distância da ponta do eletrodo não consumível a peça e a distância entre tochas de soldagem não exerceram significância em nenhum processo de soldagem para a faixa de parâmetros estudada.

A análise da variância permitiu a comparação dos três processos, e provou que apesar das diferenças entre os resultados, estatisticamente os processos TIG-MAG em tandem e MAG convencional não apresentam diferença sensível na geometria do cordão de solda, para os valores de parâmetros selecionados, pois seus resultados máximos e mínimos se sobrepõem, de acordo com os valores médios e desvios padrão apresentados.

REFERÊNCIAS

- 1 LIU, L.; JIFENG, W.; SONG, G. Hybrid laser-TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A* 381, 2004. p.129-133.
- 2 REUTZEL, E.W.; SULLIVAN, M.J.; MIKESIC, D.A. Joining Pipe with the Hybrid Laser-GMAW Process: Weld Test Results and Cost Analysis. *Welding Journal* 85, no. 6, 2006. p.66-71.
- 3 FERRARESI, V.A.; RESENDE, A.A. O Processo de Soldagem Plasma-MIG. 17^o Simpósio do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- 4 MESSLER JR., R.W. What's Next for Hybrid Welding?. *Welding Journal* 83, no. 3, 2004. p.30-34.
- 5 DYKHNO, I.; DAVIS, R. Joining GMAW and GTAW – Hybrid welding takes on a whole new meaning with new technology developments. *The Fabricator*, 2006. Disponível em <<http://www.thefabricator.com>>. Acesso em: 16 de junho de 2010.
- 6 MACHADO, I.G. Soldagem e Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.
- 7 MARQUES, P.V. Soldagem: fundamentos e tecnologia / Paulo Villani Marques, Paulo José Modenesi, Alexandre Queiroz – 3^a edição atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
- 8 TEIXEIRA, G.S. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG – MAG em tandem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.