

OTIMIZAÇÃO DA SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM GMAW ROBOTIZADO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TAGUCHI

Sérgio Augusto Ferrazza da Silva

Alexandre Aparecido Buenos

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM – Santa Maria/RS

sergioferrazza.unipampa@gmail.com

alebuenos@gmail.com

Diego Tolotti de Almeida

Bruning Tecnometal – Panambi/RS

diegot@bruning.com.br -mail

Diego Michael Cornelius dos Santos

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM – Santa Maria/RS

diego.mdossantos@hotmail.com

Resumo: A soldagem a arco elétrico com atmosfera gasosa de proteção (GMAW) é um dos meios de soldagem mais utilizado na indústria metalmeccânica, visto sua grande produtividade e possibilidade de soldagem de componentes de diversas espessuras. O aumento da performance e redução de desperdícios tem sido um desafio constante para as indústrias do ramo. Tal desafio está diretamente relacionado à seleção dos parâmetros de soldagem, pois estes afetam significativamente no consumo de consumíveis de soldagem. Frente a isso, o objetivo deste trabalho é a otimização da seleção de parâmetros de soldagem do processo GMAW Robotizado, visando a maior eficiência térmica, através do método de Taguchi. Visando atestar com confiabilidade de 95% a hierarquia de influência sobre o resultado foi realizada a análise de variância (ANOVA), com comprovação experimental através do método one-factor-at-a-time (OFAT). As combinações resultantes do método OFAT foram submetidas às análises de rendimento depositado, diluição, dureza e microscopia. Os resultados evidenciaram a composição do gás de proteção como sendo o parâmetro de maior influência sobre os resultados com 76% de influência no ANOVA. A combinação otimizada definida pelo método de Taguchi consistiu na utilização do gás C10, com vazão de 15 litros por minuto, stick-out de 20 milímetros, velocidade de soldagem de 350 milímetros por minuto. A combinação otimizada proporcionou 62% de eficiência térmica, diluição de 36,7% e rendimento depositado de 88,6%, no entanto foi constatado redução de dureza na ZTA, na ordem de 10,2 HV em relação à dureza do metal base. As análises metalográficas evidenciaram ferrita de segunda fase alinhada e bainita granular na ZTA-GG e refino de grão com fases de perlita e ferrita na ZTA-GR.

Palavras-chave: Eficiência Térmica; GMAW; Método de Taguchi; OFAT; Soldagem.

1. INTRODUÇÃO

O aumento do aporte de tecnologia nos processos de fabricação, a demanda de componentes com geometrias cada vez mais complexas e com restrições dimensionais cada vez mais estreitas associados à competitividade crescente do mercado, exige que as empresas que buscam perpetuar-se estejam à frente na geração de conhecimento e inovação. Os processos de soldagem atualmente ocupam uma posição de extrema relevância nas operações das indústrias do ramo metalmeccânico e devido à sua ampla aplicação há a necessidade de um maior entendimento da influência de cada parâmetro no processo. Os processos de soldagem à arco elétrico com gás de proteção (GMAW – Gas Metal Arc Welding), os quais também são conhecidos como processos de soldagem MIG/MAG, são os mais utilizados industrialmente, portanto, empresas que conseguirem utilizar eficientemente os recursos envolvidos nestes processos possuirão um importante diferencial competitivo. Segundo Búrigo *et al.* (2009) e Sgarbi (2013), a principal fonte de energia do processo de soldagem é o calor, o qual precisa ser aplicado com intensidade e quantidade necessárias para uma eficiente junta soldada, bem como a aplicação de calor sobre o material interfere diretamente em suas propriedades mecânicas, além de influenciar no comportamento metalúrgico do material. O método de obtenção do aporte térmico nos processos a arco elétrico é função da tensão, corrente e velocidade de soldagem, multiplicados pelo coeficiente de eficiência térmica, o qual comumente é adotado conforme a norma específica para estes processos (DIN EN 1011-1). No entanto estudos utilizando a calorimetria para determinar os valores reais do coeficiente de eficiência térmica comprovaram que os valores apresentados na norma não são constantes e podem variar em função dos parâmetros de soldagem utilizados (SGARBI, 2013). Determinar os coeficientes de eficiência térmica através da calorimetria tem como objetivo aproximar os valores simulados de aporte térmico aos realmente obtidos, pois a divergência entre os parâmetros esperados e obtidos causam alteração na velocidade de solidificação e resfriamento do material, podendo interferir na estrutura cristalina do material,

na extensão da zona termicamente afetada (ZTA) e nas propriedades mecânicas da união soldada, causando alterações na resistência à tração e na dureza (QUINTINO *et al.*, 2013).

Considerando exposto, o trabalho visa determinar a combinação de parâmetros que proporcione maior eficiência térmica através da utilização do método de Taguchi e avaliar as propriedades mecânicas e metalúrgicas resultantes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As chapas para soldagem foram confeccionadas em aço DIN EN10025-2-04 S275JR-AR com 6,3 mm de espessura e dimensões de 300 x 150 mm. O metal de adição utilizado foi o ER 70S-6 com 1,2 mm de diâmetro. Foram avaliados neste trabalho 5 parâmetros de soldagem, 4 com 3 níveis de variação e 1 com 2 níveis de variação, sendo eles a composição e a vazão do gás de proteção, a velocidade de soldagem, velocidade de alimentação de arame e o *stick-out*, conforme apresentado na Tabela 1. Visto o presente estudo ter sido realizado em ambiente fabril, os parâmetros e suas variações foram definidos a partir de parâmetros já utilizados no processo GMAW na empresa Bruning Tecnometal LTDA, onde o estudo foi realizado.

Tabela 1. Parâmetros variáveis utilizados no estudo (Próprio autor)

Níveis [esp.]	Gás de proteção [esp.]	Vazão do Gás [l/min]	Vel. de Soldagem [mm/min]	Vel. de Alimentação [m/min]	Stick-out [mm]
I	C10	15	250	7	15
II	C25	20	300	9	20
III	F36		350	11	25

O método de Taguchi foi aplicado utilizando a matriz ortogonal L₁₈, permitindo reduzir de 162 combinações, provenientes do método fatorial completo, para 18 com a utilização do método de Taguchi com auxílio do software Minitab®. A validação dos resultados obtidos pelo método de Taguchi, foi realizada pelo método *One Factor At a Time* (OFAT) ou Um Fator Por Vez. O método foi aplicado considerando a hierarquia de influência entregue pelo método de Taguchi, fixando o fator e o nível de maior influência e variando os demais fatores, seguindo a mesma hierarquia de priorização, do mais influente para o menos influente, sempre fixando o parâmetro avaliado no nível de maior influência para a sequência do método.

As soldagens foram realizadas em uma célula de soldagem, constituída por um robô de soldagem Motoman YR-EA 1400N, uma mesa de soldagem, uma fonte de soldagem Fronius TPS 5000 e um controle remoto Fronius RCU 5000i. Para avaliar o aporte térmico durante a soldagem foi definido como padrão um cordão de solda de 250 mm de comprimento depositado sobre a chapa, tendo sido utilizado no ensaio o calorímetro de fluxo contínuo de água desenvolvido por Kuntz (2017) o qual possui termopares para medição da temperatura de entrada e saída da água e divisórias internas para eliminar a ocorrência de gradiente de temperatura no sentido transversal ao fluxo de água (Fig. 1), a vazão de água adotada foi de 2,3 litros por minuto.

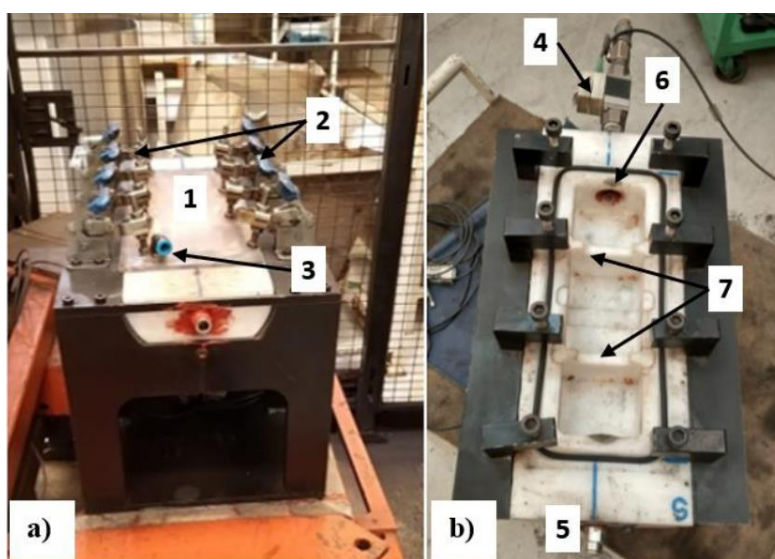


Figura 1. Calorímetro (Próprio autor).

A Figura 1a mostra o calorímetro com o corpo de prova posicionado (1) e fixado por grampos (2), onde é possível visualizar a conexão de 1/2 polegada para retirada completa do ar do sistema (3). A Figura 1b mostra maiores detalhes

sobre a estrutura do calorímetro, onde é possível identificar o sensor de medição de temperatura (4), ponto de entrada (5) e saída de água (6) além das divisórias internas (7).

A eficiência térmica do processo de soldagem, também denominada como rendimento térmico ou eficiência do arco, pode ser obtida experimentalmente através da Equação 1, a qual relaciona o calor aportado à peça soldada (Q_a) com a potência de soldagem (P) e o tempo de arco aberto (t_s), ou também denominado tempo de soldagem (SGARBI, 2013). Conforme Kuntz (2017) o cálculo do calor aportado a peça para calorímetros de fluxo aberto de água (Q_a) é obtido pela Equação 2, na qual: V = vazão de água [m^3/s]; c_p = calor específico da água [$J/kg.K$]; ρ = densidade [kg/m^3]; T_e = temperatura de entrada [K]; T_s = temperatura de saída [K]; Δt = intervalo de tempo para aquisição conforme configuração no sistema de aquisição [s].

$$\eta = Q_a / (P \times t_s) \quad (1)$$

$$Q_a = V \times \rho \times c_p \times \sum (T_s - T_e) \times \Delta t = [J] \quad (2)$$

A taxa de diluição, conforme Modenesi, Marques e Santos (2012), pode ser obtida através relação das áreas penetradas e de reforço, conforme apresentados na Figura 2 e Equação 3. Assumindo-se as geometrias das áreas como semi-elipses, as áreas das regiões A e B podem ser obtidas através das Equações 4 e 5;

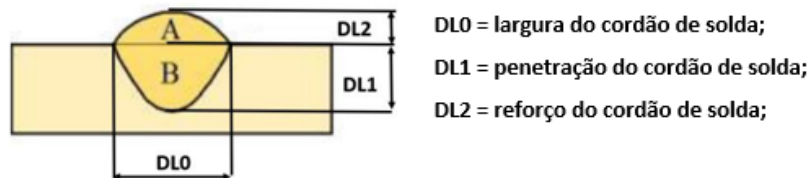


Figura 2. Áreas e dimensões para cálculo da diluição. (Adaptado de Modenesi, Marques e Santos (2012)).

$$\delta = [B / (A + B)] \times 100 = [\%] \quad (3)$$

$$A = (\pi \times DL0 \times DL2) / 4 \quad (4)$$

$$B = (\pi \times DL0 \times DL1) / 4 \quad (5)$$

As medições de dureza foram realizadas em 10 pontos na seção transversal (Fig. 3), conforme norma DIN EN ISO 9015-1 (2011) através do microdurômetro Emco-Test Duracan 20, aplicando uma força de 50N (5kgf), durante um intervalo de 10 segundos (padrão de carga HV5).

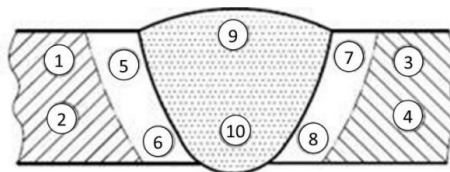


Figura 3. Regiões para teste de dureza. (Adaptado de DIN EN ISO 9015-1, 2011)

Para caracterização das regiões de soldagem e identificação das fases presentes na microestrutura foram realizadas ampliações de 25 a 200 vezes em um microscópio Olympus BX60M e de 5.000 e 10.000 vezes utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Tescan, modelo VEGA LM 3.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de energia de soldagem, aporte e eficiência térmica para as 18 combinações do método de Taguchi são apresentados na Figura 4. Os resultados obtidos para a eficiência térmica foram inseridos novamente no software Minitab® como resposta ao método de Taguchi para condições propostas, onde os valores são transformados em médias e razão sinal/ruído (S/N). As médias consistem nas médias aritméticas dos valores obtidos experimentalmente e a razão S/N consiste em uma ferramenta analítica do método de Taguchi, a qual mensura o desvio na resposta (sinal) causado pelas variáveis externas do processo (ruído) em relação aos valores desejados (FISCHER, 2015). Com o objetivo de maximizar a eficiência térmica do processo de soldagem selecionou-se o critério “maior é melhor” para a razão S/N.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2, onde o índice delta mensura a intensidade da variação na resposta mediante alterações individuais em cada um dos parâmetros avaliados e a linha posto apresenta, em ordem crescente, a

influência de cada parâmetro sobre a eficiência térmica do processo, onde o parâmetro com maior influência está referenciado com o posto 1 e o de menor influência com o posto 5.

Após a determinação da ordem de influência dos valores realizou-se a análise de variância (ANOVA), visando determinar a influência relativa dos parâmetros de soldagem sobre a eficiência térmica do processo, utilizando confiabilidade de 95% ($\alpha=5\%$; 0,005), onde apenas exercem influência relevante os parâmetros com valores-P inferiores ao alfa adotado, conforme apresentado na Tabela 3.

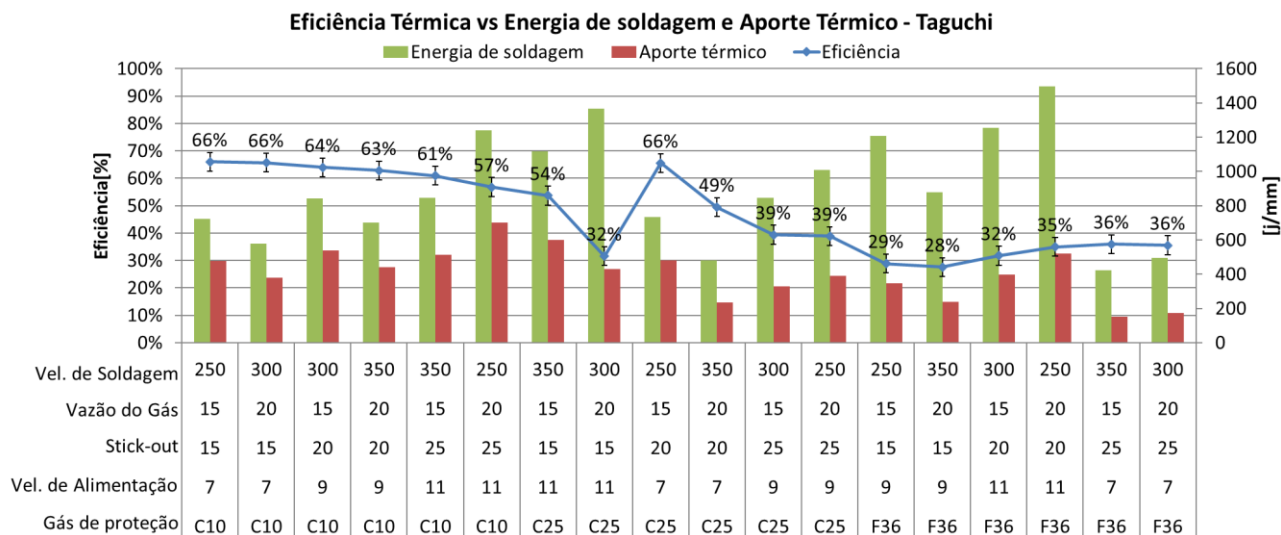


Figura 4. Eficiência Térmica vs Energia de Soldagem e Aporte Térmico – Taguchi (Próprio autor).

Tabela 2. Resultados das Médias e Razão Sinal conforme Taguchi. (Próprio autor).

Nível	Vazão do Gás [l/min]		Gás de proteção [esp.]		Vel. de Soldagem [mm/min]		Vel. Aliment. de Arame [m/min]		Stick-out [mm]	
	Médias	Razão S/N	Médias	Razão S/N	Médias	Razão S/N	Médias	Razão S/N	Médias	Razão S/N
1	0,4956	-6,512	0,6272	-4,064	0,4851	-6,718	0,5304	-5,819	0,4558	-7,44
2	0,4493	-7,357	0,4641	-6,917	0,4465	-7,413	0,4358	-7,7	0,5142	-6,132
3			0,3245	-9,823	0,4841	-6,655	0,4496	-7285	0,4458	-7,231
Delta	0,0473	0,845	0,3227	5,759	0,0386	0,776	0,0946	1,882	0,0684	1,309
Posto	4		1		5		2		3	

Tabela 3. Análise de variância (ANOVA) (Próprio autor)

Parâmetros	Grau de Liberdade	Soma dos quadrados	Contribuição [%]	Valor-P
Vazão do Gás [l/min]	1	0,010081	2,78	0,1055835
Gás de proteção [esp.]	2	0,275417	75,83	0,0000428
Vel. de Soldagem [mm/min]	2	0,005802	1,60	0,4238402
Vel. de Aliment. de Arame[m/min]	2	0,031305	8,62	0,0362642
Stick-out [mm]	2	0,016367	4,51	0,1269689

Pode-se observar que com a confiabilidade de 95% adotada, apenas a composição do gás de proteção (75,83%) e a velocidade de alimentação de arame (8,62%) apresentam influência relevante sobre os resultados de eficiência térmica.

A otimização realizada pelo método de Taguchi também propõe a combinação de parâmetros que resultam na maior eficiência térmica, a combinação proposta é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Melhor combinação de parâmetros para máxima eficiência térmica (Próprio autor).

Gás de proteção [esp.]	Vel. Aliment. de Arame [m/min]	Vazão do Gás [l/min]	Vel. de Soldagem [mm/min]	Stick-out [mm]
C10	7	15	350	20

Esta combinação de parâmetros não foi testada na fase inicial do método de Taguchi, deste modo a sua confirmação como melhor condição foi realizada através do método OFAT, no qual a composição do gás de proteção foi mantida fixa, variando-se um parâmetro por vez a cada nova combinação. As combinações e os valores de energia de soldagem, aporte e eficiência térmica são apresentados na Figura 5.

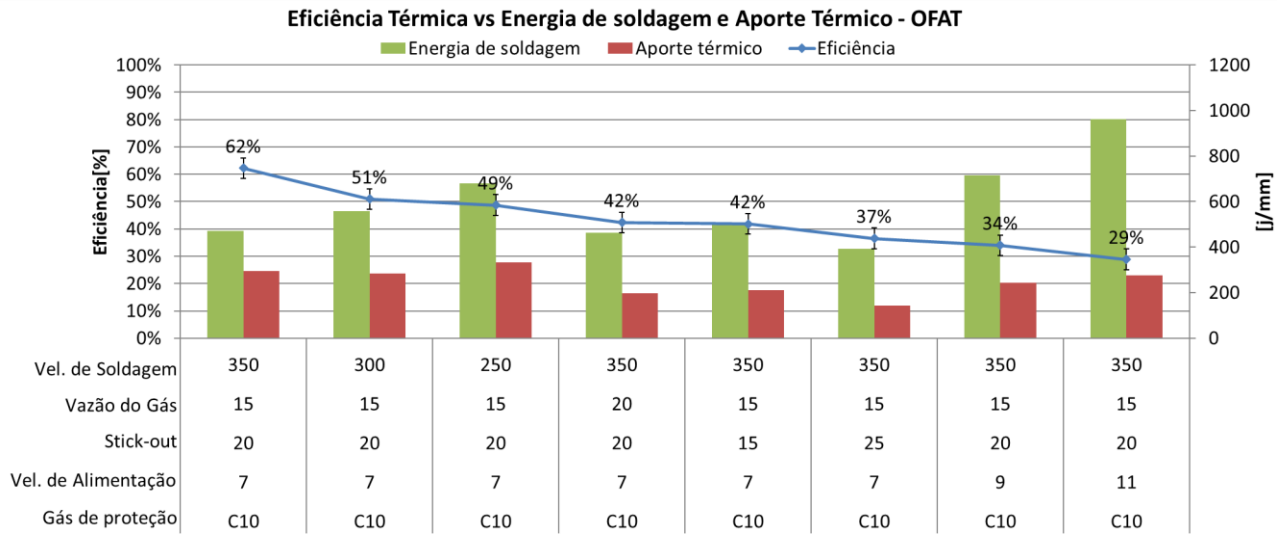


Figura 5. Eficiência Térmica vs Energia de Soldagem e Aporte Térmico – OFAT (Próprio autor).

Nota-se que a combinação de maior eficiência foi a combinação indicada pelo método de Taguchi, decaindo com o aumento da velocidade de alimentação de arame de 7 para 11 m/min. Esse efeito foi observado também no trabalho de SGARBI (2013), onde a queda na eficiência térmica é ocasionada pelo aumento da corrente de soldagem para garantir a fusão de uma maior massa de arame por unidade de tempo. Ao comparar os resultados experimentais do método de Taguchi com os resultados da validação OFAT, observa-se que a eficiência térmica obtida nos primeiros ensaios apresentou alguns resultados mais elevados. No entanto, na segunda etapa tem-se um resultado decrescente na eficiência térmica à medida que se afasta da condição otimizada. Pode-se creditar o resultado inferior obtido através da solução otimizada à fatores não controlados neste estudo, como por exemplo temperatura e umidade relativa do ar ambiente, que tem influência sobre a troca de calor por convecção na parte superior da chapa soldada.

Após as análises dos resultados de eficiência térmica, avaliou-se a diluição obtida nas soldagens da validação pelo método OFAT. A Figura 6 apresenta o comparativo entre a diluição e a eficiência térmica.

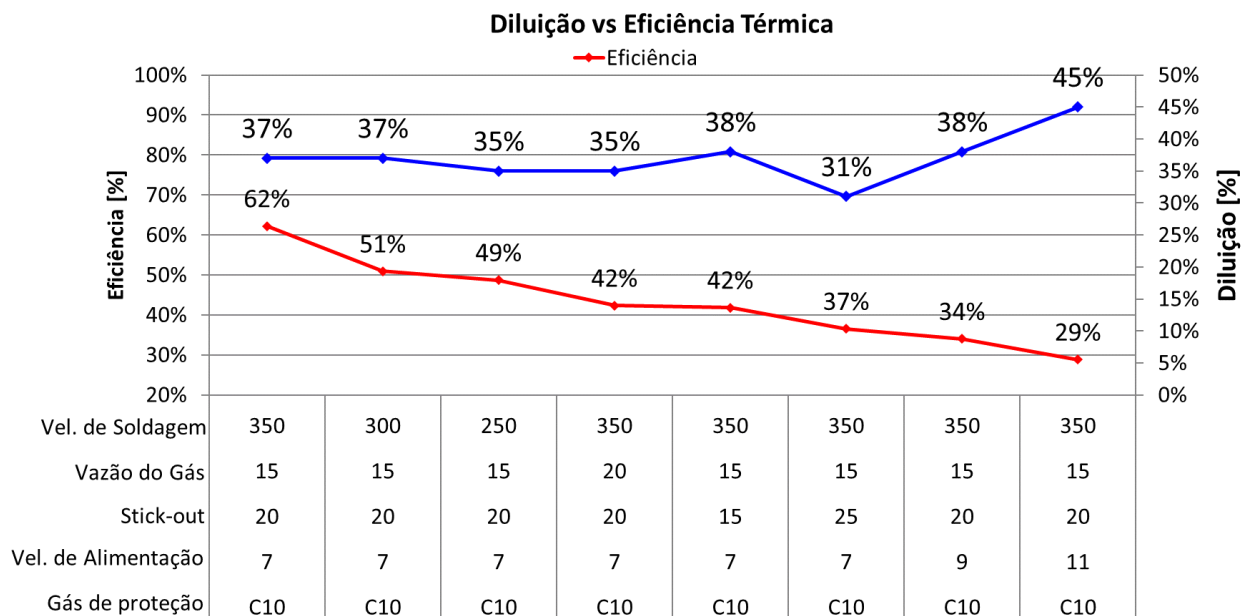


Figura 6. Comparativo entre Eficiência Térmica e Diluição (Próprio autor).

A análise gráfica do comparativo entre os resultados de eficiência térmica e diluição confirmam que o melhor par de resultados é proporcionado pela combinação otimizada proposta por Taguchi (primeira combinação do OFAT), a qual proporcionou 62,2% de eficiência térmica e 36,7% de diluição. Já as combinações que apresentaram melhores resultados para a diluição apresentaram em contrapartida resultados de eficiência térmica consideravelmente inferiores. Por conta do modo de soldagem utilizado no estudo ser a deposição sobre chapa, os valores elevados de diluição, obtidos em baixas eficiências térmicas, são resultado de um maior reforço e menor penetração do cordão de solda.

A Figura 7 apresenta o comparativo do perfil de dureza obtido para as 8 combinações da validação OFAT, para fins de simplificação a nomenclatura foi simplificada conforme o exemplo para a combinação otimizada: C10 + VA7 + ST20 + VG15 + VS350.

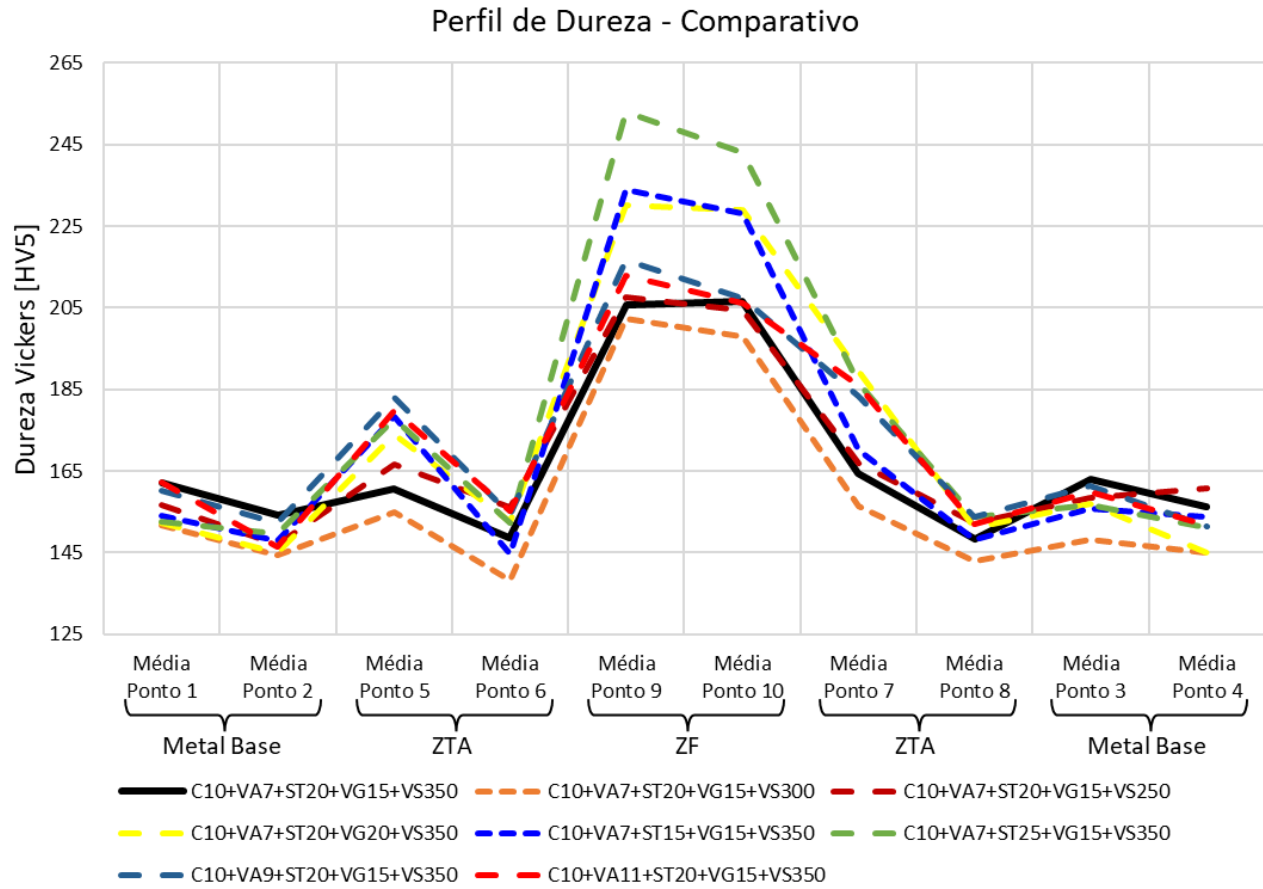


Figura 7. Comparativo do perfil de dureza de cada ponto para as 8 combinações do método OFAT (Próprio autor).

A combinação proposta pelo método de Taguchi obteve um resultado mediano para o perfil de dureza, não apresentando os maiores picos na zona fundida (ZF) nem os resultados mais baixos para os pontos críticos da zona termicamente afetada (ZTA), conforme observado pela linha preta contínua no gráfico da Figura 7. Com o objetivo de normalizar os resultados, subtraíram-se dos valores obtidos para a ZTA e ZF as respectivas médias de dureza dos pontos do metal base, eliminando assim qualquer oscilação de dureza pontual oriunda do processo de fabricação do metal base, os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Comparativo das variações na dureza em relação ao metal base (Próprio autor).

Combinação	Variação de dureza [HV5]					
	ZTA		ZF		ZTA	
	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 7	Ponto 8
C10+VA7+ST20+VG15+VS350	1,75	-10,25	46,75	47,75	5,42	-10,58
C10+VA7+ST20+VG15+VS300	7,67	-9,00	55,00	50,67	9,00	-4,33
C10+VA7+ST20+VG15+VS250	11,00	0,33	52,00	48,67	11,33	-3,33
C10+VA7+ST20+VG20+VS350	24,17	2,83	80,17	79,17	39,50	1,17
C10+VA7+ST15+VG15+VS350	25,50	-8,17	81,17	75,17	17,17	-4,50
C10+VA7+ST25+VG15+VS350	25,17	-0,17	100,50	90,50	34,17	1,17
C10+VA9+ST20+VG15+VS350	26,67	-2,00	60,33	51,00	27,00	-2,67
C10+VA11+ST20+VG15+VS350	24,58	0,25	57,92	50,92	30,92	-3,08

Observa-se que em geral a maioria dos corpos de prova tiveram perda de dureza nos pontos 6 ou 8 como mostra os valores negativos, sendo esses pontos de maior profundidade de análise de dureza na ZTA. Este comportamento também foi observado por Silva (2010), o qual identificou redução na dureza do metal de base nas regiões subcríticas. Dentre todas as combinações testadas, a combinação proposta pelo método de Taguchi para maior eficiência térmica apresentou

o maior enfraquecimento da ZTA nos pontos 6 e 8, resultados alinhados com os encontrados por Maron (2018), onde o mínimo valor do perfil de dureza foi obtido para o maior aporte térmico, 34% inferior ao metal base.

Após as análises de dureza os corpos de prova foram preparados para as análises de microscopia óptica e MEV. Definiram-se 4 regiões de interesse para a realização da microscopia óptica, sendo elas a zona fundida (ZF), zona termicamente afetada de grãos grosseiros (ZTA-GG) e de grão refinados (ZTA-GR) além do metal de base (MB). Como as 8 condições do OFAT foram soldadas com o mesmo arame de soldagem, metal base e composição do gás, os microconstituintes formados tendem à ser os mesmos, sendo assim, realizar a caracterização por microscopia ótica e MEV em apenas uma amostra seria o suficiente. A condição 1, combinação otimizada de parâmetros proposta pelo método de Taguchi, foi selecionada.

A Figura 8 apresenta as micrografias obtidas no microscópio ótico para a combinação otimizada pelo método de Taguchi. As imagens comprovam a formação durante a solidificação de uma morfologia de perfil alongado dos grãos nas zonas fundidas (ZF), bem como a orientação alinhada com o gradiente de temperatura proporcionado durante a soldagem.

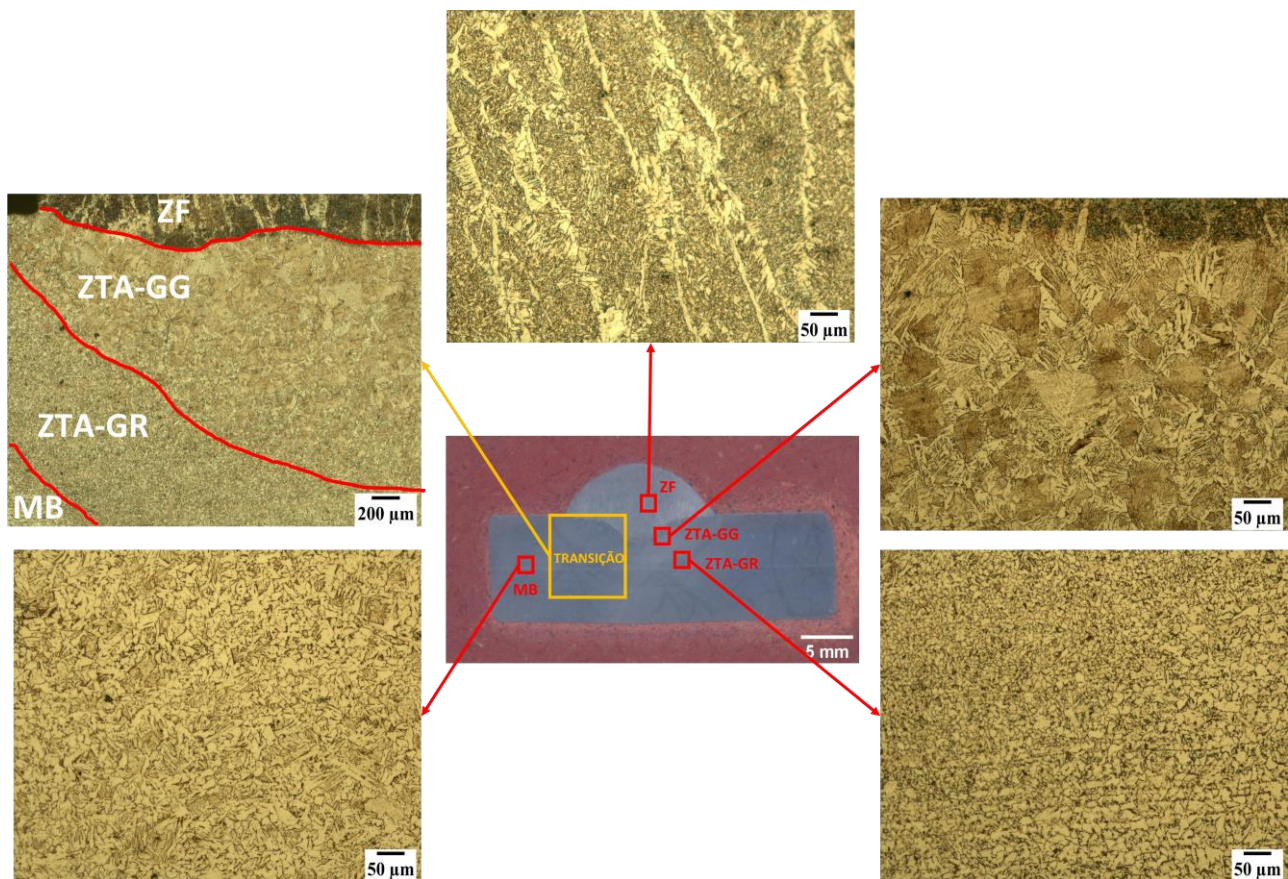


Figura 8. Micrografia na condição de soldagem 1: Gás = C10; Vel. Alim. = 7 m/min; Stickout = 20 mm; Vazão gás = 15 L/min; Vel. soldagem = 350 (Próprio autor)

Através das imagens de MEV foi possível identificar que o MB apresenta uma estrutura morfológica constituída predominantemente por uma matriz ferrítica, com grãos de perlita dispersos ao longo da matriz, conforme apresentado na Fig. 9a e 9b.

A morfologia da microestrutura da ZTA-GR não apresentou modificação relevantes em relação as fases presentes, onde foram identificados grãos de ferrita (F) e grãos de perlita (P), conforme apresentado na Fig. 9c e 9d.

Na ZTA-GG, conforme apresentado na Fig. 9e e 9f, ocorreram variações microestruturais significativas, onde foi possível observar um crescimento de grão, a formação de ferrita de segunda fase alinhada (FS (A)), com alguns pequenos carbonetos dispersos, grãos de bainita granular (BG) e ferrita de widmanstätten intragranular (FN) em algumas regiões.

Conforme é apresentado na Fig. 9g e 9h, a ZF apresentou uma estrutura de grão colunares, com a presença de regiões de ferrita de contorno de grão (PF (G)), com grãos colunares, áreas de ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)) e regiões de ferrita acicular (FA).

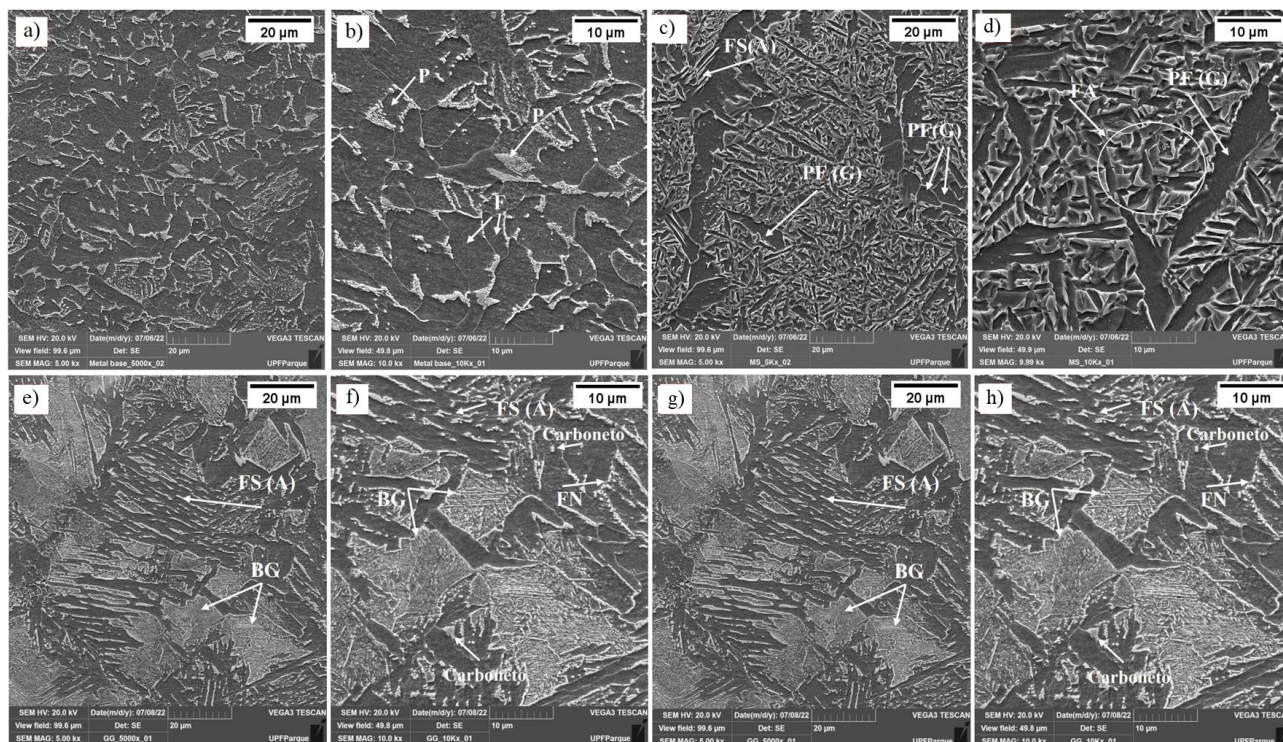


Figura 9. MEV MB: a) ampliação 5.000x. b) ampliação 10.000x; ZTA-GR: c) ampliação 5.000x. d) ampliação 10.000x; ZTA-GG: e) ampliação 5.000x. f) ampliação 10.000x; ZF: g) ampliação 5.000x. h) ampliação 10.000x (Próprio autor).

Observa-se que a ZF não apresenta ocorrência de perlita devido à taxa de resfriamento elevada à qual a região é submetida após a soldagem impedir a difusão do carbono na austenita, favorecendo a formação de ferrita de contorno de grão e ferrita acicular no interior do grão austenítico, sendo que a ocorrência destas fases também é favorecida pelo teor em massa de manganês presente no metal de base. Tratando-se de propriedades mecânicas a ocorrência de ferrita acicular confere ao material maior resistência mecânica, já a ferrita de contorno de grão melhora a tenacidade do material (LINNERT, 1994; BRAZ, 1999; TRINDADE *et al.*, 2017; SCHWANKE, 2017).

O aço S275JR-AR possui baixo teor de carbono e adição de 0,86% de manganês como elemento de liga em sua composição, conforme apresentado na revisão bibliográfica, sendo que estes fatores quando combinados induzem a formação de ferrita de widmanstätten e bainita na ZTA-GG. Segundo Abdalla *et al.* (2006) a ocorrência de bainita proporciona ao material nesta região um aumento no limite de resistência sem comprometimento da ductilidade.

A ZTA-GR não apresentou mudanças de fases significativas, mantendo uma estrutura constituída de ferrita e perlita, porém com um considerável refino de grão em relação ao MB, o que proporciona um aumento na tenacidade da região (CALLISTER JR, 2002; NOGUEIRA, 2013; LIMA, 2019).

4. CONCLUSÕES

A utilização do método de Taguchi para otimização do experimento, aliado ao método OFAT para validação dos resultados, permitiu reduzir de 162 para 18 os corpos de prova soldados em comparação ao método fatorial completo.

Como combinação otimizada de parâmetros para maior eficiência térmica obteve-se a composição do gás C10, velocidade de alimentação de 7 m/min, *stick-out* de 20 mm, vazão do gás de 15 l/min e velocidade de soldagem de 350 mm/min, obtendo 62% de eficiência.

A composição do gás de proteção e a velocidade de alimentação, são os dois parâmetros avaliados que exercem influência relevante nos resultados de eficiência térmica. Conforme ANOVA, a composição do gás representa 75,83% de influência sobre a eficiência, seguido pela velocidade de alimentação de arame com 8,62%. Os demais parâmetros não exercem influência relevante com a confiabilidade adotada de 95%.

A combinação de parâmetros otimizada foi comprovada através do método OFAT no qual nenhuma outra combinação apresentou resultados superiores, no entanto alguns experimentos da fase inicial obtiveram 66% de eficiência, o que leva a conclusão de que há outros fatores de influência que não foram abordados e monitorados neste estudo.

Para a diluição o resultado obtido foi de 36,7%, deste modo a combinação otimizada apresentou a melhor combinação entre eficiência térmica e diluição.

O maior enfraquecimento na ZTA foi observado na combinação otimizada, a qual conferiu o maior aporte térmico durante a soldagem.

Através das análises metalográficas evidenciaram-se as características das regiões de interesse da combinação otimizada pelo método de Taguchi e validada através do método OFAT. Nesta combinação não ocorreu a formação de martensita, indicando uma taxa de resfriamento suficiente para o surgimento de ferrita acicular na ZF e de bainita em detrimento da martensita na ZTA-GG. Já para a ZTA-GR a estrutura observada manteve-se sendo perlita e ferrita, mas com um refino de grão que é um indicativo de endurecimento e de melhora na tenacidade em relação ao MB.

5. REFERÊNCIAS

- ABDALLA, A. J. *et al.* 2006. Formação da Fase Bainítica em Aços de Baixo Carbono. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v. 25, n. 3, 175-181.
- BRAZ, M. H. P. 1999. Propriedade de Fadiga de Soldagem de Alta Resistência e Baixa Liga Com Diferentes Composições Microestruturais. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais). USP, São Paulo.
- BÚRIGO, B. A. *et al.* 2009. Aquisição do ciclo térmico de soldagem. Faculdade SATC. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAQg0AC/artigo-ciclo-termico-soldagem>>.
- CALLISTER JR. W. D. 2002. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5a Ed. LTC Editora. Rio de Janeiro.
- DIN EN 1011-1. 2009. *Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 1: General guidance for arc welding*.
- DIN EN ISO 9015-1. 2011. *Destructive tests on welds in metallic materials - Hardness testing - Part 1: Hardness test on arc welded joints*.
- FISCHER, A. 2011. Estudo da Influência dos Parâmetros no Processo de soldagem GMAW - Arco Pulsado. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). UFMG, Belo Horizonte.
- KUNTZ, A. A. K. 2017. Simulação Numérica e Verificação Experimental de Um Calorímetro Para Medição da Eficiência Térmica Nos Processos de Soldagem. Monografia (Engenharia Mecânica). Unijuí, Panambi.
- LIMA, R. B. E. 2019. Influência da Mistura de Gases de Proteção no Perfil Geométrico na Microestrutura e na Corrente de Transição na Soldagem MIG/MAG. Monografia (Engenharia Metalúrgica). UFC, Fortaleza.
- LINNERT, G. E. 1994. *Welding Metallurgy: Carbon and Alloy Steels*. 4ª ed. Miami, ASM International.
- MARON, D. S. 2018. Estudo da Influência do Aporte Térmico no Processo de Soldagem MAG Robotizada do Aço Docol 1000DP. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). UFRS, Porto Alegre.
- MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; SANTOS, D.B. 2012. *Introdução à metalurgia da soldagem*. UFMG, Belo Horizonte.
- NOGUEIRA, R. C. 2013. Caracterização Mecânica e Análise Microestrutural Com a Utilização Dd Técnica de Tríplex Ataque do Aço Multifásico AISI 4350. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) UNESP, Guaratinguetá.
- QUINTINO, L. *et al.* 2013. Heat input in full penetration welds in gas metal arc welding (GMAW). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI 10.1007/s00170-0134862-8.
- SCHWANKE, R. G. L. 2017. Influência do Metal de Adição e da Energia de Soldagem na Microestrutura e Resistência à Fadiga de Juntas Soldadas de Aço de Alta Resistência d Baixa Liga DIN S700MC. Dissertação (Mestrado em Engenharia e dos Ciências de Materiais). UCS, Caxias do Sul.
- SGARBI, P. V. 2013. Construção e Validação de um Calorímetro com Vazão Contínua de Água para Avaliação do Rendimento Térmico em Processo de Soldagem. Dissertação (Mestrado em Engenharia). UFRGS, Porto Alegre.
- SILVA, R. F. 2010. Caracterização da Zona Termicamente Afetada de Aço Produzido Via Resfriamento Acelerado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). UFMG, Belo Horizonte.
- SILVA, S. A. F. 2022. Otimização da Seleção de Parâmetros através do Método de Taguchi para Soldagem em Aço DIN EN 10025 2 S275JR-AR pelo Processo GMAW Robotizado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UFSM, Santa Maria.
- TRINDADE, V. B. *et al.* 2017. Características Microestruturais e Mecânicas ao Longo da Seção Transversal de Juntas Soldadas em Multipasses pelo Processo GMAW de um Aço API 5L X65Q. *Soldagem e Inspeção*, vol. 22, nº 2.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

OPTIMIZATION OF PARAMETER SELECTION USING THE TAGUCHI METHOD FOR WELDING THROUGH THE ROBOTIC GMAW PROCESS

Sérgio Augusto Ferrazza da Silva

Alexandre Aparecido Buenos

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM – Santa Maria/RS
alebuenos@gmail.com

Diego Tolotti de Almeida

Bruning Tecnometal – Panambi/RS
diegot@bruning.com.br -mail

Diego Michael Cornelius dos Santos

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM – Santa Maria/RS
diego.mdossantos@hotmail.com

Abstract. Gas metal arc welding (GMAW) is one of the most used welding methods in the metalworking industry, due to its high productivity and the possibility of welding different thicknesses components. The increase in performance and reduction of waste has been a constant challenge for industries. Such challenge is directly related to welding parameters selection processes, which significantly affects welding consumables consumption, such as welding wire and shielding gas, in addition to being linked to a welded joint mechanical property. In view of this, this work focus on optimize welding parameters selection through Taguchi's method aiming at greater thermal efficiency in the Robotic GMAW process. DIN EN 10025-2 S275JR-AR steel, used as base metal, contains 0.12% of carbon with a microstructure formed by a ferritic matrix with dispersed pearlite grains. As variable parameters, shielding gases C10, C25 and F36 were used with flow rates of 15 and 20 liters per minute, stick-out of 15, 20 and 25 millimeters, welding speeds of 250, 300 and 350 millimeters per minute and feed of 7, 9 and 11 meters per minute. Taguchi's method with L18 experimental matrix was used and 3 welds were performed for each combination. Aiming to attest with 95% reliability the hierarchy of influence on the result, analysis of variance (ANOVA) was performed, with experimental confirmation through the one-factor-at-a-time (OFAT) method. Following the statistical analysis, experimental proof was carried out using the one-factor-at-a-time (OFAT) method, where the greatest influence parameter was kept constant, while changing the others. OFAT method resulting combinations were submitted to deposited yield, dilution, hardness and microscopy analyses. The constituent phases and impacts on the heat-affected zone (HTA) hardness resulting from the heat input optimization were also evidenced. Results showed shielding gas composition as results greatest influence parameter, with 76% influence on the ANOVA. Taguchi's method optimized combination consisted of using C10 gas, 15 liters per minute flow rate, 20 millimeters stick-out and 350 millimeters per minute welding speed. Optimized combination provided a thermal efficiency of 62%, 36,7% dilution and 88,6% deposited yield, however a reduction in hardness was observed in the HAZ, in the order of 10.2 HV in relation to base metal hardness. Metallographic analyzes showed aligned second-phase ferrite and granular bainite in the HAZ-GG and grain refining with pearlite and ferrite phases in the HAZ-GR.

Keywords: GMAW; OFAT; Taguchi Method; Thermal Efficiency; Welding.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.