

## ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MODALIDADES MIG/MAG CONVENCIONAL E COM IMPOSIÇÃO DE CORRENTE VISANDO-SE À SOLDAGEM DE JUNTAS T DE AÇO ARBL NA POSIÇÃO VERTICAL

Diego Becker (LASOLDAM-Instituto Federal Catarinense-Campus Luzerna); beckerdi30@gmail.com  
Welinton Trentin (LASOLDAM-Instituto Federal Catarinense-Campus Luzerna);  
welintontrentin@gmail.com;  
Aloysio Arthur Becker Fogliatto (LASOLDAM-Instituto Federal Catarinense-Campus Luzerna);  
aloycio.fogliatto@ifc.edu.br:

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma análise de diferentes modalidades do processo de soldagem MIG/MAG consideradas de “baixo aporte térmico”, as quais são comumente utilizadas na indústria metalmeccânica para a soldagem de chapas finas fora da posição plana. Utilizando-se como metal de base um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL), realizou-se um comparativo entre três modalidades específicas: Curto-Circuito Convencional, Curto-Circuito Controlado e Corrente Pulsada. Utilizou-se o método de Taguchi como procedimento experimental e a comparação entre as três modalidades de processo realizou-se por meio de avaliações qualitativas e quantitativas acerca da eficiência de deposição, geometria dos cordões, descontinuidades e energia de soldagem. Entre os resultados obtidos, cita-se a maior eficiência de deposição observada nos modos forçados, sendo que o adequado controle da indutância na modalidade convencional contribuiu para o aumento desta eficiência. Adicionalmente, a modalidade pulsada apresentou as melhores condições de penetração para juntas T. Finalmente, cita-se a necessidade de serem observados alguns cuidados com tolerâncias de montagem das juntas e precisão de movimentação do sistema automatizado, para que o emprego das modalidades com imposição de corrente possa ser bem sucedido.

**Palavras-chave:** ARBL, SOLDAGEM, MIG/MAG, PULSADO, CCC.

## COMPARATIVE STUDY OF GMAW, GMAW-P AND GMAW-CSC FOCUSING ON ASSESSING THE WELD DEPOSITION EFFICIENCY AND QUALITY

**Abstract:** This work presents an analysis of different modalities of the GMAW welding process considered low heat input, which is in the metalworking industry for welding thin plates outside the flat position. Using as base metal a high strength low alloy steel (HSLA) a comparison made between three specific modalities: Conventional, Controlled Short Circuit, and Pulsed. The Taguchi method used as an experimental procedure and the comparison between the three process modalities performed through qualitative and quantitative evaluations of the deposition efficiency, weld geometry, discontinuities, and heat input. Among the results obtained, we mention the higher deposition efficiency observed in forced modes, and the adequate control of inductance, in the conventional modality contributed to the increase of this efficiency. Also, the pulsed modality presented the best penetration conditions for T joints. Finally, it mentions the need to observe some care with tolerances of assembly of joints and precision of movement of the automated system, so that the use of modalities with current imposition can be successful.

**Keywords:** HSLA, WELDING, GMAW, GMAW-P, GMAW-CSC.

### 1. Introdução

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) foram desenvolvidos e vêm sendo aprimorados a partir de necessidades crescentes do mercado – automotivo, principalmente – como redução de peso e aumento de desempenho dos componentes (CINDRA FONSECA *et al.*, 2007). Isto vem sendo possível, entre outros fatores, graças aos avanços tecnológicos das siderúrgicas, os quais vêm ocorrendo para atender às demandas de diferentes ramos da indústria metalmeccânica. Estes aços possuem elevados limites de resistência e de escoamento, além de alta tenacidade a baixas temperaturas, quando comparados aos aços comuns com percentual de carbono similar.

Como consequência deste avanço tecnológico no desenvolvimento dos aços ARBL, surge a necessidade de adequação dos processos de fabricação, - entre eles o processo de soldagem, com destaque especial para o MIG/MAG (ou GMAW). O processo MIG/MAG tem sido cada vez mais utilizado no segmento industrial graças a sua capacidade de ser automatizado/robotizado, relativo baixo nível de respingos e fumos gerados, capacidade de soldar fora da posição plana, formato do cordão e estabilidade do processo (CINDRA FONSECA *et al.*, 2007; MODENESI, P. J., 2007).

Os modos de transferência de metal que ocorrem no processo MIG/MAG são divididos em três: curto-circuito, globular e goticular axial projetado (*spray*) (CINDRA FONSECA *et al.*, 2007; MODENESI, P. J., 2007). Adicionalmente, estes modos de transferência podem ser classificados em “naturais” e “forçados”. Como exemplo de modo “natural”, cita-se o MIG/MAG convencional com imposição de tensão, como exemplo de modo “forçado”, cita-se o MIG/MAG com corrente pulsada e o CCC (Curto Circuito Controlado), sendo que ambos utilizam a lógica de imposição de corrente (SARTORI; *et al.*, 2015).

Diversos pesquisadores têm utilizado o processo MIG/MAG com imposição de corrente para atendimento de aplicações em diversos segmentos industriais. Sartori *et al.* (2005) avaliou a raiz na soldagem orbital mecanizada de tubos utilizando diferentes versões do processo MIG/MAG com curto circuito controlado. Estes autores comprovaram que as três versões (CCC, STT e CMT) apresentaram boa estabilidade de processo durante a soldagem da junta, conseqüentemente, obtiveram cordões com boa aparência superficial e penetração total na parte interna da raiz dos tubos (SARTORI; *et al.*, 2015).

Possebbon (2009) realizou experimentos de soldagem utilizando-se MIG/MAG CCC sob severas condições de troca de calor – devido a soldagem ser realizada com o fluxo de fluido em operação – em diferentes níveis de energia, juntamente com diferentes posições. Entretanto, este processo apresentou a ocorrência contínua de falta de fusão (POSSEBON, 2009).

Castro, Pinheiro e Motta (2017) compararam três modalidades de soldagem MIG/MAG de baixa energia: corrente pulsada, curto circuito convencional e curto circuito controlado na posição vertical descendente, variando-se a DBCP e o ângulo de deslocamento da tocha. Os pesquisadores concluíram que as soldagens com CCC mantêm a geometria e a energia aproximadamente iguais mesmo com a variação da DBCP e do ângulo, o que não aconteceu com as outras duas modalidades. A corrente pulsada apresentou bons resultados apenas quando se utilizou o ângulo 15 graus puxando.

Neste trabalho pretende-se realizar um estudo comparativo entre três modalidades do processo MIG/MAG consideradas de “baixo aporte térmico”: curto-circuito convencional, curto-circuito controlado e corrente pulsada, no sentido de avaliar-se qualitativamente as diferenças operacionais, as vantagens e as limitações de cada uma, visando-se obter subsídios para a implantação de cada modalidade de processo na soldagem de juntas de ângulo, na posição vertical ascendente. Para tanto, alguns parâmetros de processo de cada modalidade foram selecionados com o objetivo de avaliar-se a influência destes nas características geométricas dos cordões de solda, na geração de descontinuidades, assim como avaliar-se a eficiência de deposição de cada modalidade.

## 2. Metodologia

Utilizou-se como metal de base um aço estrutural de alta resistência e baixa liga

(ARBL), com resistência ao escoamento de 700 MPa, e espessura de 4 mm. (Composição Química: C 0,062%; Si 0,02%; Mn 1,87%; P 0,012%; S 0,002; Cr 0,02% Cu 0,01%; Ni 0,04%, Mo 0,1%; V 0,01%; Nb 0,061%; B 0,0001%). Para verificar se este aço possui uma boa soldabilidade ( $CEHSLA \leq 0,40\%$ ), utilizou-se a equação designada para aços de alta resistência e baixa liga, para encontrar o Carbono Equivalente, sendo este igual a 0,2065% (WECK;; SILVA, 2005).

Quanto ao metal de adição empregou-se o arame ER70S-6, com diâmetro de 1,0 mm. (Composição química: C 0,08%; Mn 1,44%; Si 0,86%; P 0,012%; S 0,014%; Cr 0,02%; Ni 0,04%; Mo 0,003%; V 0,005%; Cu 0,2%).

Para a realização dos procedimentos de soldagem recorreu-se uma fonte microprocessada Digi Plus A7, programada nos modos: MIG/MAG Convencional (CC), MIG/MAG Curto Circuito Controlado (CCC) e MIG/MAG Pulsado. Utilizou-se para a movimentação da tocha o dispositivo automatizado TARTÍLOPE V2F. Sinais de corrente e tensão de soldagem foram adquiridos com o sistema de aquisição de dados portátil (SAP), com taxa de aquisição de 5 kHz. O gás de proteção empregado consiste em uma mistura de Ar + 15% CO<sub>2</sub>, com vazão de 15 l/min. Os cordões de solda foram depositados em chapas de 300 mm de comprimento, na posição vertical, com progressão ascendente.

Como o objetivo deste estudo é comparar três modalidades do processo MIG/MAG, optou-se pela utilização do método de Taguchi, o qual possibilita a investigação acerca da influência das variáveis de entrada - e suas interações - nas respostas do processo. O método torna possível reduzir significativamente a quantidade de experimentos originalmente planejados, por se tratar de uma estrutura composta por matrizes fracionadas saturadas, que proporciona grande redução de custos relativos à experimentação, podendo ser implementado em situações que envolvam produtos e/ou processos (PIMENTA *et al.*, 2012).

Por meio de testes prévios, determinou-se os parâmetros fixos para cada uma das modalidades de processo. Na Tabela 1 encontra-se dois parâmetros que foram mantidos fixos para os três modos de transferência. Na Tabela 2 estão os parâmetros fixos para as modalidades pulsada, convencional e curto circuito controlado, respectivamente.

Tabela 1-Parâmetros fixos para os 3 modos de transferência

DBCP (mm)	V <sub>s</sub> (cm/min)
12	21,5

Fonte: Os autores.

Tabela 2-Parâmetros constantes – Modalidades Pulsada, Convencional e Curto Circuito Controlado

Pulsada		Convencional	Curto Circuito Controlado					
V <sub>A</sub> (m/min)	T (ms)	Tensão (V)	Arco	Curto	Configurar			
4,6	13,9	23	Ia1 (A)	500	Ic1 (A)	50	Ucc (V)	10
-	-	-	ta1 (ms)	5	tc1 (ms)	1	KR	1,15
-	-	-	ta2 (ms)	4	tr2 (ms)	0,5	tr1	1,5
-	-	-	VA (m/min)	4,6	-	-	Ic3 (A)	280

Fonte: Os autores.

Visando-se atingir o propósito de investigação deste trabalho, foram utilizados quatro parâmetros, cada um com três níveis a serem analisados para cada modalidade. Tais foram definidos por meio de testes prévios e estão apontados na Tabela 3. No modo convencional, o parâmetro VA é proporcional à corrente do processo, dessa maneira optou-se por analisá-lo.

Tabela 3-Parâmetros variáveis - Modalidades Pulsada, Convencional e Curto Circuito Controlado

Pulsada			Convencional				Curto Circuito Controlado				
Nível	1	2	3	Nível	1	2	3	Nível	1	2	3
Ângulo (°)	0	10	25	Ângulo (°)	0	10	25	Ângulo (°)	0	10	25
DC (%)	33	34	34,5	V <sub>A</sub> (m/min)	4,2	4,4	4,6	di3 (A/ms)	250	350	450
I <sub>p</sub> (A)	280	287	297	K <sub>S</sub>	100	150	200	Ia2 (A)	230	300	350
I <sub>b</sub> (A)	28	32	35	K <sub>D</sub>	100	150	200	Ia3 (A)	85	90	95

Fonte: Os autores.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os projetos de experimentos, os quais foram planejados utilizando-se o método de Taguchi.

Tabela 4-Projeto de experimentos – Modalidade Pulsada

Exp.	Ângulo	DC (%)	I <sub>p</sub> (A)	I <sub>b</sub> (A)
1	0	33	280	28
2	0	34	287	32
3	0	34,5	297	35
4	10	33	287	35
5	10	34	297	28
6	10	34,5	280	32
7	25	33	297	32
8	25	34	280	35
9	25	34,5	287	28

Fonte: Os autores.

Tabela 5-Projeto de experimentos – Modalidades Convencional e CCC

Exp.	Modalidade Convencional				Modalidade CCC			
	Ângulo (°)	V <sub>A</sub> (m/min)	K <sub>S</sub>	K <sub>D</sub>	Ângulo (°)	di3 (A/ms)	Ia2 (A)	Ia3 (A)
1	0	4,2	100	100	0	250	230	85
2	0	4,4	150	150	0	350	300	90
3	0	4,6	200	200	0	450	350	95
4	10	4,2	150	200	10	250	300	95
5	10	4,4	200	100	10	350	350	85
6	10	4,6	100	150	10	450	230	90
7	25	4,2	200	150	25	250	350	90
8	25	4,4	100	200	25	350	230	95
9	25	4,6	150	100	25	450	300	85

Fonte: Os autores.

Os cordões realizados resultaram no comprimento de 250 mm, exceto o teste 3 da modalidade pulsada, devido a uma falha na realização do procedimento.

Para quantificar a eficiência de deposição das três modalidades de processo, realizou-se a medição da massa (g) das chapas antes de serem soldadas e após a retirada dos fumos e salpicos. A balança de precisão utilizada é do modelo UX6200H do fabricante Shimadzu, com sensibilidade de 0,01 g.

Para obter-se a eficiência de deposição, faz-se necessário calcular a taxa de fusão W<sub>m</sub> (kg/s), segundo a Equação 1.

$$W_m = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) * \rho * V_A \tag{1}$$

Onde *d* é o diâmetro do eletrodo (mm),  $\rho$  a massa específica do aço (7860 kg/m<sup>3</sup>) e V<sub>A</sub> a velocidade de alimentação (m/s).

Com os valores de W<sub>m</sub>, procedeu-se ao cálculo da massa teórica *m<sub>teor</sub>* (g), a qual é direcionada para a poça de fusão, utilizando-se a Equação 2.

$$m_{teor}(g) = W_m * \left(\frac{l}{V_s}\right) * 1000 \tag{2}$$

Onde  $l$  é o comprimento do cordão (m) e  $V_s$  é a velocidade de soldagem (m/s).

Deste modo, a eficiência de deposição  $\varphi$  (%) foi calculada por meio da Equação 3.

$$\varphi(\%) = \frac{(m_{apóslimpeza} - m_{chapa})}{(m_{teor})} * 100 \tag{3}$$

Onde  $m_{apóslimpeza}$  (g) é a massa total da junta soldada após a retirada dos fumos e salpicos e  $m_{chapa}$  (g) é massa da junta antes da soldagem.

Após a soldagem, os corpos de prova foram seccionados transversalmente, sendo extraídas três amostras de cada cordão de solda para realização de análise macrográfica. Cada amostra foi embutida, lixada e polida segundo a norma ASTM E3-11 e posteriormente atacada com reagente Nital 2%. As imagens foram obtidas com auxílio do estereoscópio Óptica SZP-6ERGC. Para a realização das medições das características geométricas de cada cordão – as quais foram realizadas conforme a Figura 1 – utilizou-se o software *Image J*, em seguida, procedeu-se ao cálculo da média aritmética e do desvio padrão.

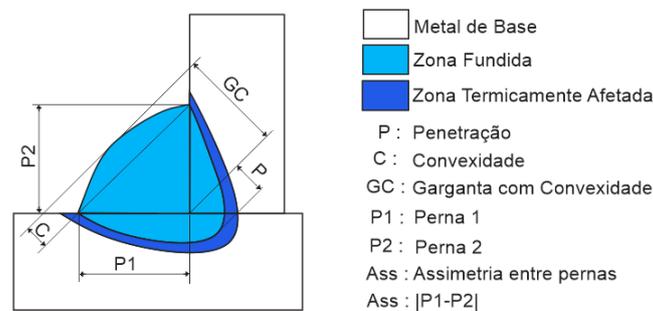


Figura 1- Características Geométricas

Utilizando-se os dados de tensão e corrente adquiridos, calculou-se a potência instantânea  $P_m$  (W) a partir da Equação 4 (NASCIMENTO *et al.*, 2006).

$$P_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i I_i \tag{4}$$

Onde  $U_i$  (V) é a tensão de soldagem,  $I_i$  (A) é a corrente de soldagem e  $n$  é a quantidade de pontos analisados.

A Energia de Soldagem  $E$  (J/mm) foi calculada a partir da Equação 5 (NASCIMENTO *et al.*, 2006).

$$E = \frac{P_m}{V_s} \tag{5}$$

Onde  $V_s$  é a velocidade de soldagem (mm/s).

### 3. Resultados

Os valores da taxa de fusão e da massa teórica, para cada Velocidade de Alimentação, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Taxa de fusão e massa teórica

$V_A$ (m/min)	Taxa de fusão (kg/s)	Massa teórica (g)
4,2	0,000432126	30,1483
4,4	0,000452704	31,5840
4,6	0,000473281	33,0196

Fonte: Os autores.

As eficiências de deposição de cada modalidade de processo são apresentadas na Tabela 7. Para o cálculo da média e do desvio padrão, optou-se por descartar os seguintes testes: 3, do pulsado, devido ao fato de o comprimento do cordão ter sido maior que 250 mm e 6, do curto-circuito convencional (CC), pois, o valor de eficiência de deposição resultante ficou superior dos demais, nesta mesma modalidade de processo.

Tabela 7-Eficiência de Deposição

Mod.	Experimentos	Eficiência de Deposição	Média e Desvio da Eficiência de Deposição
Pulsada	1	92,36938%	93,43314% $\pm$ 1,02388%
	2	91,76368%	
	3	103,96855%	
	4	94,73161%	
	5	93,64135%	
	6	94,33791%	
	7	92,79337%	
	8	93,91392%	
	9	93,91392%	
CC	1	91,51419%	91,38383% $\pm$ 0,12813%
	2	91,53379%	
	3	91,33969%	
	4	91,34834%	
	5	91,18551%	
	6	96,70014%	
	7	90,05474%	
	8	91,37548%	
	9	92,30881%	
CCC	1	92,94480%	93,39571% $\pm$ 0,44803%
	2	93,58078%	
	3	93,97449%	
	4	94,15620%	
	5	93,45964%	
	6	92,94480%	
	7	93,18708%	
	8	92,94480%	
	9	93,36879%	

Fonte: Os autores.

A Figura 2 apresenta um gráfico contendo os valores médios da eficiência de deposição de cada modalidade de processo, com seus respectivos desvios padrão.

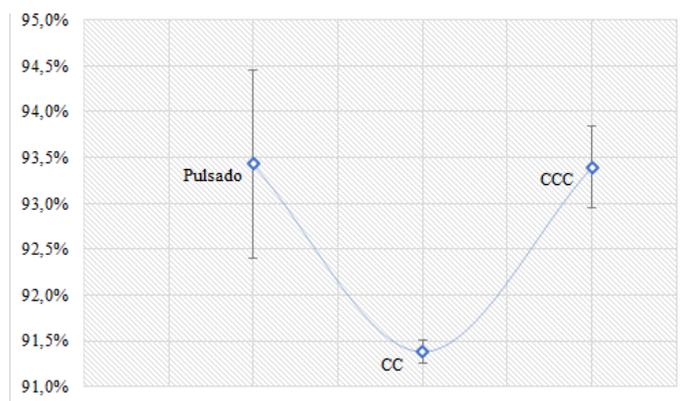


Figura 2-Média e desvio padrão dos modos de transferência

Nota-se, pela análise da Figura 2, que a média das eficiências de deposição dos modos forçados foi maior que a do modo convencional, fato esse que corrobora o exposto por Scotti e Ponomarev (2014), os quais citam que os modos pulsado e curto-circuito controlado possuem como efeito a redução de respingos em relação ao curto-circuito. Os valores de eficiência dos três processos estão de acordo com os estudos de Modenesi (2001), o qual afirma que a eficiência de deposição para o processo GMAW é entre 90-95%.

Analisando-se as Tabelas 5 e 7, observa-se que valores maiores de KS (indutância baixa) conduziram à obtenção de menores valores de eficiência de deposição. Este resultado corrobora ao exposto por Scotti e Ponomarev (2014), os quais citam que a indutância baixa determina um gradiente elevado de subida de corrente de curto circuito, acarretando em uma ação separativa exagerada pelo efeito *Pinch*, gerando respingos de grandes dimensões. Por outro lado, a indutância alta reduz o gradiente de subida da corrente de curto circuito e, assim, minimiza a probabilidade de ocorrência de tais repulsões.

Na Figura 3, é possível visualizar as três modalidades de processo em operação.

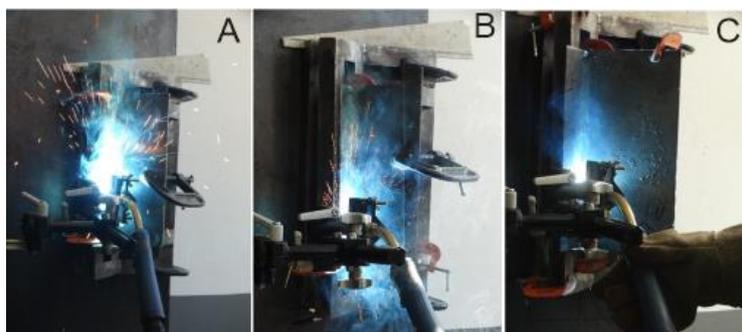


Figura 3 - Comparativo (qualitativo) entre as modalidades A) CC, B) CCC e C) Pulsado.

Realizando-se uma comparação visual (qualitativa) entre as três modalidades de processo, percebe-se que houve menor geração de fumos e salpicos nos modos forçados. No modo CCC, pode-se atribuir esta diferença à redução da corrente na fase final do efeito *Pinch*, fato este que conduz a uma menor ocorrência de respingos – os quais são inerentes a esta fase da transferência de metal na modalidade convencional (WECK; SILVA, 2005).

A Tabela 8, mostra os valores das características geométricas de todos os cordões de solda analisados neste trabalho, assim como as análises realizadas segundo os critérios

das normas AWS D 1.1, NBR 8800, ISO 5817 e o critério adicional adotado por Bodanese (2019) sendo que para essas análises foram considerados os piores casos.

Tabela 8-Medidas da geometria dos cordões e análise segundo Normas

Mod.	Exp	P (mm)	C (mm)	GC (mm)	Análise Segundo Critério das Normas			
					C (mm)	GE (mm)	ASS (mm)	P (mm)
Pulsada	1	1,584 ± 0,610	1,535 ± 0,119	4,908 ± 0,123	1,654	3,131	0,016	0,974
	2	1,030 ± 0,091	1,577 ± 0,169	4,866 ± 0,110	1,746	3,009	0,014	0,939
	3	1,522 ± 0,054	1,590 ± 0,042	4,955 ± 0,035	1,632	3,288	0,004	1,468
	4	1,082 ± 0,158	1,566 ± 0,168	5,007 ± 0,162	1,735	3,109	0,010	0,924
	5	0,933 ± 0,060	1,664 ± 0,091	4,885 ± 0,303	1,754	2,828	0,013	0,872
	6	1,112 ± 0,174	2,005 ± 0,461	4,938 ± 0,077	2,466	2,394	0,015	0,938
	7	0,000 ± 0,000	1,870 ± 0,746	4,911 ± 0,213	2,616	2,083	0,008	0,000
	8	0,889 ± 0,154	1,141 ± 0,098	4,794 ± 0,050	1,238	3,506	0,013	0,736
	9	0,830 ± 0,091	1,272 ± 0,146	4,772 ± 0,149	1,418	3,205	0,015	0,739
CC	1	0,000 ± 0,000	0,954 ± 0,074	4,486 ± 0,188	1,027	3,344	0,011	0,000
	2	0,145 ± 0,062	1,329 ± 0,147	4,679 ± 0,096	1,476	3,253	0,012	0,083
	3	0,465 ± 0,033	1,672 ± 0,100	4,861 ± 0,110	1,772	3,006	0,014	0,432
	4	0,000 ± 0,000	0,813 ± 0,062	4,270 ± 0,021	0,875	3,289	0,015	0,000
	5	0,337 ± 0,078	1,107 ± 0,098	4,361 ± 0,075	1,204	3,079	0,004	0,259
	6	0,507 ± 0,023	1,898 ± 0,120	4,968 ± 0,131	2,018	2,877	0,015	0,483
	7	0,135 ± 0,045	1,040 ± 0,414	4,591 ± 0,469	1,454	2,985	0,020	0,091
	8	0,196 ± 0,100	1,122 ± 0,214	4,807 ± 0,496	1,336	3,069	0,017	0,097
	9	0,443 ± 0,105	1,252 ± 0,063	4,855 ± 0,115	1,315	3,074	0,017	0,338
CCC	1	0,000 ± 0,000	1,603 ± 0,147	4,441 ± 0,040	1,750	2,651	0,013	0,000
	2	0,343 ± 0,070	0,792 ± 0,048	4,383 ± 0,079	0,840	3,463	0,014	0,273
	3	0,126 ± 0,056	1,191 ± 0,185	4,679 ± 0,108	1,375	3,195	0,008	0,070
	4	0,119 ± 0,018	1,038 ± 0,145	4,437 ± 0,160	1,183	3,094	0,012	0,102
	5	0,000 ± 0,000	0,654 ± 0,226	4,225 ± 0,566	0,880	2,779	0,008	0,000
	6	0,300 ± 0,116	1,124 ± 0,209	4,561 ± 0,058	1,333	3,169	0,013	0,183
	7	0,035 ± 0,060	1,148 ± 0,226	4,429 ± 0,125	1,374	2,931	0,014	0,000
	8	0,033 ± 0,058	1,215 ± 0,075	4,544 ± 0,090	1,290	3,164	0,015	0,000

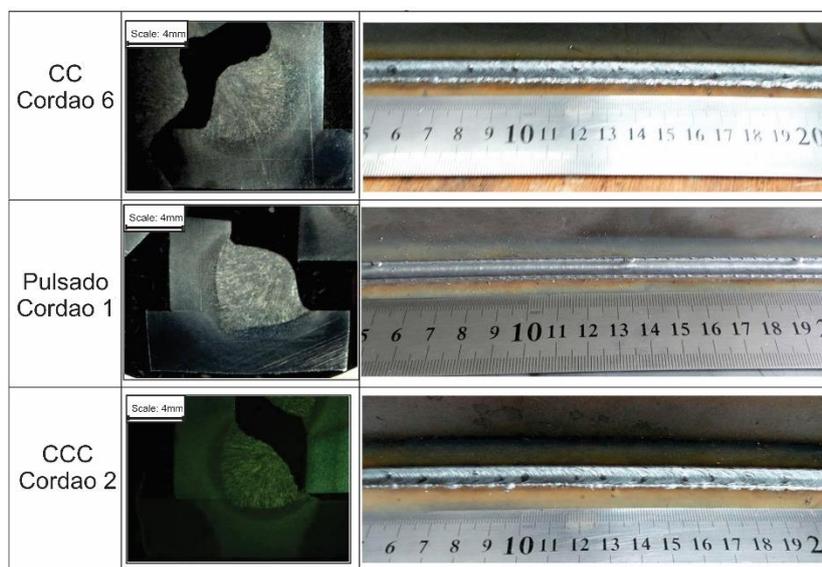
9	0,163 ± 0,066	0,852 ± 0,209	4,515 ± 0,016	1,061	3,438	0,007	0,098
---	------------------	------------------	------------------	-------	-------	-------	-------

Fonte: Os autores.

Analisando-se a Tabela 8, nota-se que 22 dos 27 experimentos resultaram em convexidade de até 2 mm, destacando-se principalmente os cordões do CCC, em que todos os experimentos estiveram abaixo desse valor, que quantitativamente é considerado um valor desejável segundo a norma AWS D1.1. Em relação à garganta efetiva – garganta com convexidade menos a convexidade – percebe-se que 19 dos 27 cordões resultaram em uma garganta maior que a mínima considerada pela norma NBR 8800, sendo 3 mm. Pelo critério adotado por Bodanese (2019), apenas 10 dos 27 experimentos resultaram em uma penetração mínima equivalente a 0,4 mm, destacando-se a modalidade pulsada, em que 8 dos 9 experimentos resultaram em valores superiores ao mínimo; observa-se que, na modalidade CCC, nenhum cordão atingiu o valor mínimo de 0,4 mm. Em relação à assimetria entre pernas percebe-se que, para as três modalidades, a assimetria máxima foi de 0,020mm, o que ocorreu no experimento 7 do processo CC. Sendo assim, todos os experimentos atendem aos três níveis (B, C e D) da norma ISO 5817 n. 1.16 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2014).

A Tabela 9, apresenta imagens dos cordões de solda, juntamente com suas respectivas macrografias. Visando-se analisar o formato de penetração resultante em cada modalidade de processo, selecionou-se o cordão com o maior valor desta característica geométrica, em cada caso.

Tabela 9-Macrografia e cordão de solda



Fonte: Os autores.

A partir da análise da Tabela 9, percebe-se que o formato característico da penetração dos cordões do modo pulsado é o *finger-shaped* (formato de dedo). Este resultado pode ser atribuído a maior quantidade de Argônio presente na composição do gás de proteção, assim como à queda constante das gotas do metal de adição, o que gera uma melhor eficiência na transferência das gotas aquecidas ao metal de base, e produz, como consequência, uma maior penetração (ESSERS *et al.*, 1981; SCOTTI; PONOMAREV, 2014). Outro fator que contribui para o *finger-shaped* no modo pulsado é o fato de a corrente de pico ser maior do que a corrente de transição; dessa maneira, a quantidade de movimento se torna maior, sendo que esta última tem contribuição expressiva na

formação do *finger-shaped* (CASTRO; PINHEIRO; MOTTA, 2017).

A modalidade pulsada resultou em maiores valores de desvio padrão da penetração, comparando-se com as demais modalidades. Pode-se explicar este fato considerando-se que os modos de transferência de metal por curto-circuito baseiam-se na dinâmica da ponte metálica, isto é: a gota metálica, ao entrar em contato com a poça fundida, fica submetida à tensão superficial; dessa maneira, passa a ser puxada em direção à poça (POSSEBON, 2009) – sendo esta capacidade conhecida internacionalmente como *bridgeability* (em uma tradução livre, significa “habilidade de formar pontes”) – permitindo que o arame toque na região da junta; sendo assim, a ocorrência de desalinhamento tende a ser menor, fato que não ocorre com a modalidade pulsada, pois, neste caso, ocorre o modo de transferência goticular axial projetado. Neste modo de transferência, não há o contato do arame-eletrodo com o material de base (transferência por voo livre), sendo levantada a hipótese de que este fato ocasiona uma maior suscetibilidade ao desalinhamento – com consequentes maiores desvios padrão nas medições da penetração – o qual observou-se nos cordões da modalidade pulsada.

Na Figura 4 é possível visualizar a influência da  $V_A$  na penetração no processo CC.

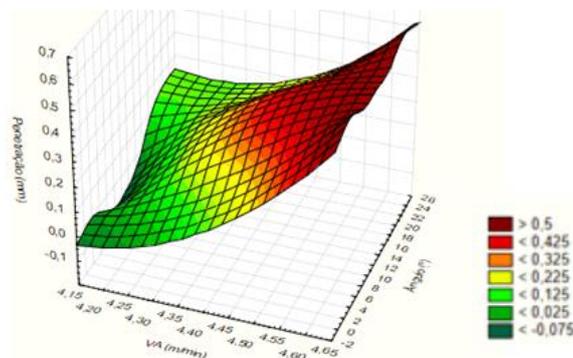


Figura 4- Influência da Velocidade de Alimentação e do Ângulo na Penetração

Dentre os parâmetros analisados, a velocidade de alimentação causou maior influência na penetração, na modalidade CC, devido ao fato de este parâmetro ser diretamente proporcional à corrente. Segundo Scotti e Ponomarev (2014), o aumento da corrente para uma mesma velocidade de soldagem produz maior penetração e poças com maior volume, isto é, pode-se conseguir ao mesmo tempo preencher um maior volume da junta e garantir a sua integridade pela penetração completa. Na convexidade e na garganta com convexidade, a  $V_A$  também exerceu grande influência (vide Tabelas 5 e 8), devido ao fato de quanto maior for a velocidade de alimentação, maior será a quantidade de material depositado no cordão, corroborando o que é exposto na literatura (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

Na Figura 5 é possível verificar a influência da Corrente de pico e do Ângulo na penetração (na modalidade pulsada).

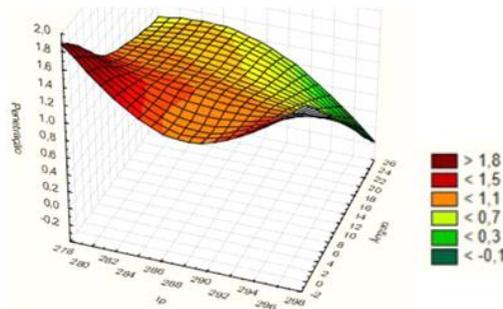


Figura 5-Influência da Corrente de pico e do Ângulo na Penetração

Analisando-se a Figura 5, percebe-se que com o aumento do ângulo a penetração diminuiu. Relaciona-se o ângulo empurrando (positivo) da plana com o ângulo de 25 graus na vertical ascendente. Sabe-se que na posição plana, o ângulo empurrando (positivo) provoca um pré-aquecimento à frente da poça se formando, aumentando a molhabilidade e levando a um cordão com maior largura, porém com menor penetração; com o ângulo de ataque puxando (negativo) a poça tende a aumentar a penetração, por conta que o jato de plasma empurra a poça para trás, facilitando a ação do acoplamento arco-metal de base no fundo da poça (SCOTTI; PONOMAREV, 2014). Deste modo, supõe-se que esse mesmo efeito acontece à ângulos positivos na posição vertical ascendente.

Analisando-se as Tabelas 4 e 8 e a Figura 5 nota-se que, no sétimo experimento do modo pulsado, a penetração resultou nula; isto pode ter acontecido devido ao valor da corrente de pico ser relativamente alta e o valor do tempo de pico ser o menor (DC = 33%), sendo que este se torna insuficiente para possibilitar a adequada formação da gota e sua consequente transferência no final do pulso. Deste modo, a transferência se dará em um período de base seguinte, podendo ocorrer a cada dois ou mais pulsos subsequentes, ocasionando o comportamento chamado de menos de uma gota por pulso (-UGPP) (SCOTTI; PONOMAREV, 2014). Visando-se complementar este raciocínio, cita-se o estudo de Fogliatto (2013), no qual o autor avaliou a influência dos parâmetros do CCC na geometria do cordão, concluiu que a combinação de valores relativamente altos do parâmetro  $I_{al}$  (corrente de pico da fase de arco), com valores mais baixos do parâmetro  $t_{al}$  (tempo de atuação da corrente de pico de arco), poderia comprometer a formação da gota na fase de arco, com consequências diretas sobre a eficiência da transferência de calor, a geometria do cordão de solda e a ocorrência de discontinuidades como falta de fusão e sobreposição. Apesar do que ocorreu com o cordão 7, pode-se afirmar que a modalidade pulsada destacou-se pela maior penetração. Segundo Scotti e Ponomarev (2014), a força axial de Lorentz influencia diretamente na penetração, ou seja, a aceleração da gota destacada durante a fase de pulso é muito alta e o impacto da gota com a poça se dá em altas velocidades.

O gráfico da Figura 6 apresenta os valores de energia de soldagem de todos os cordões, para as três modalidades de processo.

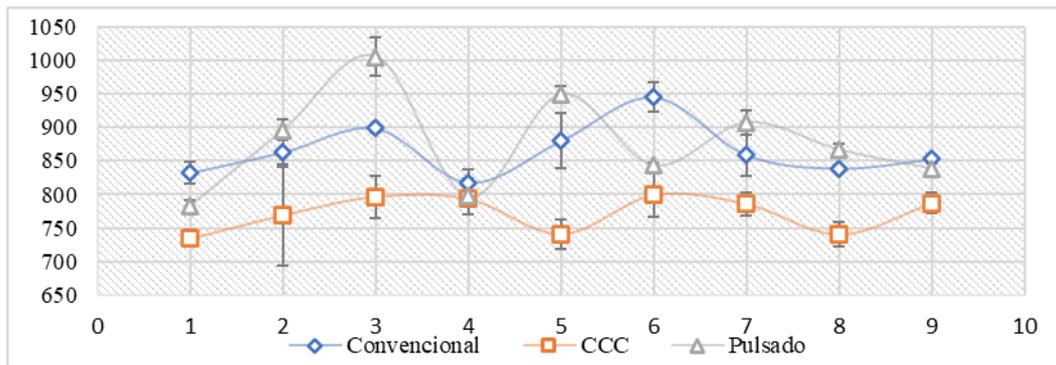


Figura 6 -Energia de Soldagem (J/mm)

Analisando-se os experimentos 1 e 5 do CCC, pode-se observar que os dois resultaram em penetração nula (Tabela 8). Verificando-se os parâmetros destes experimentos (Tabela 5), observa-se que nos dois experimentos a corrente  $I_{a3}$ , foi a mesma, sendo 85 A. No experimento 9, a corrente  $I_{a3}$ , foi também 85 A, e resultou em uma penetração igual a  $0,163 \pm 0,66$  mm. No experimento 9, a taxa de subida da corrente ( $di3$ ), foi a maior (450 A/ms). É possível perceber que energia de soldagem do 9 (Figura 6), foi a maior dentre os três experimentos, dessa maneira levanta-se a hipótese de que tenha influenciado na penetração nesse experimento.

A partir da análise da Figura 6, nota-se que os valores de energia de soldagem do CCC foram os menores, como é citado por Silva (2005). Cita-se aqui que esta modalidade de processo foi desenvolvida visando-se evitar respingos e atingir maior estabilidade térmica; dessa maneira, para reduzir a geração de respingos, a corrente fornecida pela fonte, tanto no início do curto-circuito como no instante do rompimento da ponte de metal líquido, deve ser baixa (MODENESI, P. J., 2007). Fato que justifica uma maior eficiência de deposição do CCC quando comparado ao CC.

#### 4. Conclusões

A partir das análises qualitativas e quantitativas realizadas, verificou-se que a menor geração de fumos e salpicos observada nos modos forçados (maior estabilidade do arco elétrico) foi determinante para o atingimento de maiores eficiências de deposição. No caso da modalidade convencional, observou-se que valores maiores de KS (indutância baixa) conduziram à obtenção de menores valores de eficiência de deposição.

Pode-se afirmar que o formato característico de penetração conhecido como *finger-shaped* contribuiu para o resultado positivo da modalidade pulsada no critério normativo de penetração. Enquanto os resultados negativos de penetração observados nas modalidades CC e CCC podem ser atribuídos, dentre outros fatores, à ausência da contribuição do momento mecânico da gota para o aumento da penetração. Deste modo, conclui-se que a modalidade pulsada proporcionou as melhores condições para o atingimento de adequada penetração em juntas T, considerando-se a mesma Vs.

Conclui-se que as modalidades com controle de corrente (modos forçados) apresentam sensibilidade relativamente alta a perturbações diversas que podem ocorrer no processo – p. ex., tolerâncias de montagem/alinhamento da junta, tolerâncias de precisão de movimentação dos eixos x, y e z do sistema automatizado/robotizado – além de exigirem uma seleção e combinação adequadas dos parâmetros da curva de corrente, sob o risco de não se obter uma adequada transferência de metal, com consequente geração de descontinuidades na junta soldada.

## 5. Referências

BODANESE, Letícia Martins. *Análise da soldagem MIG/MAG mecanizada com tecimento sincronizado para juntas em T com espessura dissimilares*. Joinville: [s.n.]. Disponível em: <<http://waset.org/publications/14223/soil-resistivity-data-computations-single-and-two-layer-soil-resistivity-structure-and-its-implication-on-earthing-design>%0Ahttp://www.jo-mo.com/fadoohelp/data/DotNet/Ethical security.pdf%0Ahttp://link.springer.com/10.10>. , 2019

CASTRO, Jamil Nobre De; PINHEIRO, Bruno Ribeiro; MOTTA, Marcelo Ferreira. Estudo Da Variação Da Dbc E Do Ângulo De Soldagem Em Corrente Pulsada, Curto Circuito Convencional E Curto Circuito Controlado Em Soldagem Mig/Mag. v. 72, p. 2780–2791, 2017.

CINDRA FONSECA, M. P. *et al.* Estudo das propriedades mecânicas e tensões residuais em juntas soldadas de aço arbl bifásico usado na indústria automobilística. *8º Congresso Iberoamericano De Ingeniería Mecánica*, n. 18, p. 8, 2007. Disponível em: <<http://www.pucp.edu.pe/congreso/cibim8/pdf/16/16-23.pdf>>.

ESSERS, W. G. *et al.* Plasma-Mig Welding - a New Torch and Arc Starting Method. *Metal construction*, v. 13, n. 1, p. 36–42, 1981.

FOGLIATTO, Aloysio Arthur Becker. *Influência dos parâmetros do processo MIG/MAG com curto-circuito controlado sobre a geometria do cordão de solda*. Porto Alegre: [s.n.], 2013

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 5817. *Welding- Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels*. [S.l: s.n.], 2014

MODENESI, P. J. Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais. *Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG*, p. 151, 2007. Disponível em: <<http://www.demet.ufmg.br/labs/soldagem>>.

MODENESI, Paulo J. *Estimativa de Custos em Soldagem. Custos em Soldagem*. [S.l: s.n.]. Disponível em: <[https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/custo\\_em\\_soldagem.pdf](https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/custo_em_soldagem.pdf)>. , 2001

NASCIMENTO, Alexandre Saldanha Do *et al.* Avaliação Dos Métodos De Cálculo De Potência Elétrica em Soldagem a Arco. *Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, 2006.

PIMENTA, Cristie Diego *et al.* Método Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da decarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização. *GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, n. 2, p. 97, 2012.

POSSEBON, Silvano. Utilização De Mig/Mag Com Curto-Circuito Controlado Na Soldagem Em Operação. p. 132, 2009.

SARTORI, Francisco; *et al.* Avaliação de Raiz na Soldagem Orbital Mecanizada de Tubos Utilizando Diferentes Versões do Processo MIG / MAG com Curto Circuito Controlado. 2015.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. *Soldagem MIG/MAG, Melhor entendimento, Melhor desempenho*. 2ª ed. São Paulo: Artliber, 2014.

SILVA, Regis *et al.* Ct-05 Soldagem Mig / Mag Em Curto-Circuito Controlado ( Ccc ). *Congresso Nacional de Soldagem De 28 de novembro a 01 de dezembro de 2005 - São Paulo - SP*, n. Ccc, 2005.

WECK, Leonardo Willyam de Assis;; SILVA, Regis Henrique Gonçalves e. PROCESSO MIG-MAG CCC APLICADO AO PASSE DE RAÍZ E METODOLOGIA PARA FORMULAÇÃO DE PROGRAMAS SINÉRGICOS. *3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*, n. 3, p. 2-6, 2005.