

Avaliação de Processos MIG/MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado para a Soldagem de Dutos de Aço Carbono em Passe Único

(Assessment of Conventional and Controlled Short-Circuit MIG/MAG Processes for Steel-Pipe Welding in Single Pass)

Thonson Ferreira Costa¹, Edmundo Benedetti Filho¹, Hernán Dario Hernández Arevalo¹, Louriel Oliveira Vilarinho¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC/Laprosolda, Uberlândia, Minas gerais, Brasil thonsoncosta@yahoo.com.br, vilarinho@mecanica.ufu.br

Resumo

O desenvolvimento de fontes de soldagem com processos derivativos MIG/MAG com transferência por curto-circuito, também conhecidos como curto-circuito controlado, tem-se tornado uma tendência na busca de soldas de qualidade e produtividade, principalmente na união de dutos, pois acredita-se que, o controle da corrente permite melhorar a transferência metálica, proporcionando estabilidade ao processo de soldagem e a poça de fusão. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é determinar envelope operacional e estabelecer vantagens e limitações operacionais dos processos MIG/MAG com transferência por curto-circuito convencional e derivativos (STT – Surface Tension Transfer; RMD – Regulated Metal Deposition e CMT – Cold Metal Transfer), para a união de dutos de aço carbono com diâmetro nominal de 2 ½” e parede fina com passe único, nas progressões ascendente e descendente. Para tal, optou-se por variar os parâmetros de regulagem de cada processo e a velocidade de alimentação do arame, além das técnicas de soldagem, procurando manter a mesma quantidade de material depositado por comprimento de solda. Os resultados encontrados mostraram que o curto-circuito convencional apresentou um envelope operacional constante para a progressão ascendente e para a descendente quanto ao número de ensaios. Ao passo que, o STT e o RMD apresentaram um maior envelope operacional na progressão descendente. Por outro lado, o CMT, com envelope operacional maior na ascendente, trabalha com valores de tensão de soldagem muito mais baixos, o que justifica o baixo aporte térmico do processo.

Palavras-chave: MIG/MAG curto-circuito; Processos Convencional e Derivativos; Progressão de Soldagem; Dutos de Pequeno Diâmetro.

Abstract: The development of power sources towards the MIG/MAG derivative processes with short-circuit metal transfer (also known as controlled short-circuit) has become a trend in the search for high productivity and high quality weldments, especially in pipe welding. It is believed that the control of current achieved in such processes improves the metal transfer, reaching stability on both process and weld pool. Therefore, this work aims to establish operational envelopes and also both advantages and limitations of MIG/MAG processes with conventional short-circuit transfer and derivatives (STT, RMD and CMT) for pipe welding. The weldments were carried out in thin-wall carbon-steel pipes with nominal diameter of 2 ½” using single pass and both upward and downward progressions. The parameter sets for each process were varied together with wire-feed speed, keeping the same amount of deposited material, enough to fill up the joint in a single-pass bead. The results show that the conventional short-circuit MIG/MAG process presents a operational envelope more constant about the number of runs for both progressions, .Whereas STT and RMD processes present a larger envelope for downward progression. On the other side, CMT process has a more robust envelope for upward progression and works with lower voltages and, therefore, lower heat input.

Key-words: Short-circuit MIG/MAG; Derivative and Conventional Processes; Welding progression; Small-diameter Pipes.

1. Introdução

O setor de soldagem é constante alvo de investimentos tecnológicos, voltados para a segurança e meio ambiente e para a

redução dos custos, com a obtenção de ganho em produtividade e qualidade. Assim, surge a necessidade de buscar novas tecnologias de soldagem, que estão relacionadas principalmente com o desenvolvimento de novas fontes de soldagem com controle eletrônico do processo.

Neste contexto, como opções comerciais existem os processos derivativos MIG/MAG com transferência por curto-circuito, tais com o CMT® (Cold Metal Transfer da empresa Fronius), RMD® (Regulated Metal Deposition da empresa Miller) e STT® (Surface Tension Transfer da empresa Lincoln), dentre outros.

(Recebido em 23/03/2012; Texto final em 13/07/2012).
Artigo originalmente publicado no CONSOLDA 2011

Trata-se de processos que utilizam sistemas de controle eletrônico e/ou mecânicos para monitorar e controlar a intensidade da corrente durante a transferência metálica. Assim, permite-se o ajuste do formato de onda da corrente de soldagem durante a operação, respondendo às oscilações impostas pelas condições de soldagem [1]. Desta forma, aproveitam-se as vantagens da transferência metálica por curto-circuito, tais como menor aporte térmico e a capacidade de realizar soldas em todas as posições, eliminando ou reduzindo os inconvenientes do processo convencional, como a alta geração de respingos e fumos, além da irregularidade na transferência metálica [2-3].

Para a transferência por curto-circuito convencional (Figura 1(a)), com o contato da gota com a poça de fusão, a alta

corrente de curto-circuito promove o aumento da componente radial da força eletromagnética, favorecendo a formação do empescoçamento no acoplamento gota-eletrodo, devido à maior densidade de corrente. Isto favorece a ação do efeito *Pinch*, auxiliando no rompimento da ponte metálica e impulsionando a gota em progressão da poça de fusão. O alto valor de corrente nesta região provoca o aquecimento súbito [4], proporcionando um rompimento violento da ponte metálica gota-eletrodo que promove a evaporação e a explosão do metal fundido em forma de respingos [5], assim como as força repulsivas que provocam a instabilidade da transferência.

No caso dos processos derivativos, STT e RMD, nas Figuras 1(b) e 1(c), no início do curto-circuito, o contato da gota com a

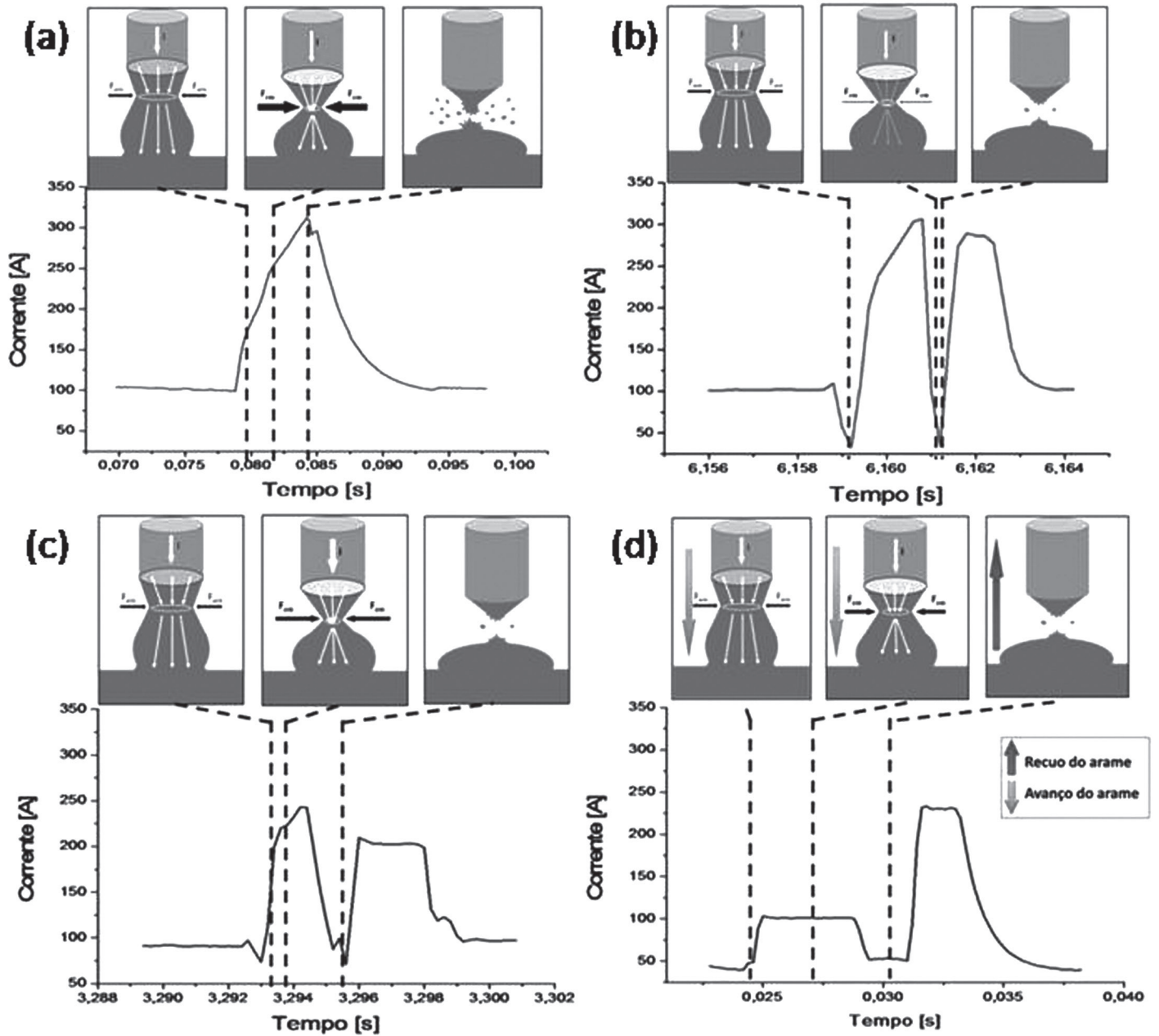


Figura 1. Oscilograma real de corrente durante a transferência para os processos (a) MIG/MAG convencional, (b) STT, (c) RMD e (d) CMT.

poça de fusão, onde o sistema eletrônico da fonte de soldagem passa a controlar a subida da corrente de curto-circuito. Desta forma, é possível fazer com que a transferência metálica inicie de forma suave, reduzindo o risco de repulsão da gota e respingos [6]. Pouco antes da separação da gota, a corrente é reduzida, de modo que o destacamento da gota ocorra sob um menor nível de corrente, reduzindo a intensidade da força magnética e da ação do efeito *Pinch*, o que proporciona um rompimento da ponte metálica de forma suave e com pouco respingo, melhorando a estabilidade da transferência metálica. No processo CMT, a transferência metálica é caracterizada pelo controle eletrônico da fonte e pelo sistema mecânico de recuo do arame. No qual, o princípio para reverter o movimento do arame deve-se a um alimentador de arame acoplado a tocha que movimentava o arame “para frente e para trás” controlado por um servo-motor de corrente alternada. Na Figura 1(d) observa-se que, quando o controle eletrônico da fonte interrompe a subida da corrente, também reduz a intensidade da força eletromagnética. A descida da corrente pouco antes do recuo do arame anula a ação do efeito *Pinch*, onde o sistema de recuo do arame é responsável por proporcionar o rompimento da gota de forma extremamente suave e com pouco respingo.

Estas novas fontes, embora adotem a ideia do sinergismo, ou seja, procurem a autoregulação a partir de um conjunto de parâmetros, elas ainda requerem o ajuste de parâmetros, que anteriormente não existiam. Assim, o conhecimento da influência destes parâmetros sobre a qualidade da união soldada é fundamental. Além disto, deve-se adotar pelo conhecimento real e não comercial das vantagens e limitações de cada abordagem adotada pelos fabricantes para a linha de desenvolvimento tecnológico (controle do formato de onda e/ou alteração da dinâmica de alimentação do arame). Como discutido, é

importante neste universo estabelecer cientificamente vantagens e limitações, mas sem a visão comparativa, pois esta depende de outros fatores importantes como custos de implantação e produção, logística, manutenção, assistência técnica, etc., que são individuais a cada planta fabril.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo determinar envelopes operacionais e estabelecer vantagens e limites operacionais dos processos MIG/MAG curto-circuito convencional e derivativos (STT, CMT e RMD), para a soldagem de dutos de aço carbono, dada a grande importância deste tipo de construção e por ser um material largamente utilizado.

2. Materiais e Métodos

Para determinar o envelope e estabelecer vantagens e limites operacionais dos processos MIG/MAG curto-circuito convencional e derivativos (STT – *Surface Tension Transfer*, RMD – *Regulated Metal Deposition* e CMT – *Cold Metal Transfer*) na união de dutos com passe único, foram utilizados os seguintes parâmetros gerais: dutos de aço carbono com diâmetro nominal de 2 1/2” (63 mm de diâmetro interno) e com espessura de 5,5 mm, preparados com chanfro de acordo com as recomendações da norma AWS D10.12 [7] (Figura 2.a), DBCP (distância pico de contato com a peça) de 12 mm, arame eletrodo ER 70S-6 com 1,2 mm de diâmetro e Ar+25%CO₂ como gás de proteção.

Deste modo, foram planejados experimentos que permitissem levantar a melhor condição de soldagem variando a velocidade de alimentação (2,3; 2,8 e 3,3 m/min) e os parâmetros operacionais de cada processo de soldagem utilizado (Tabela 1). A velocidade de soldagem (12,0; 15,0 e 18,0 cm/min) foi regulada mantendo-se aproximadamente a mesma quantidade de material depositado

Tabela 1. Parâmetros específicos dos processos MIG/MAG convencional, STT, RMD e CMT.

MIG/MAG		STT			RMD		CMT
U [V]	Ângulo de Ataque [°]	I _{Pico} [A]	I _{Base} [A]	Tail Out	Trim	Arc Control	Comprimento do Arco
18	-10	280	60	0	50	0	-20
19	0	300	80	5	65	25	-5
20	10	320	100	10	80	50	10

Nota: U é a tensão de referência; I_{Pico} é a corrente de pico; I_{Base} é a corrente de base.

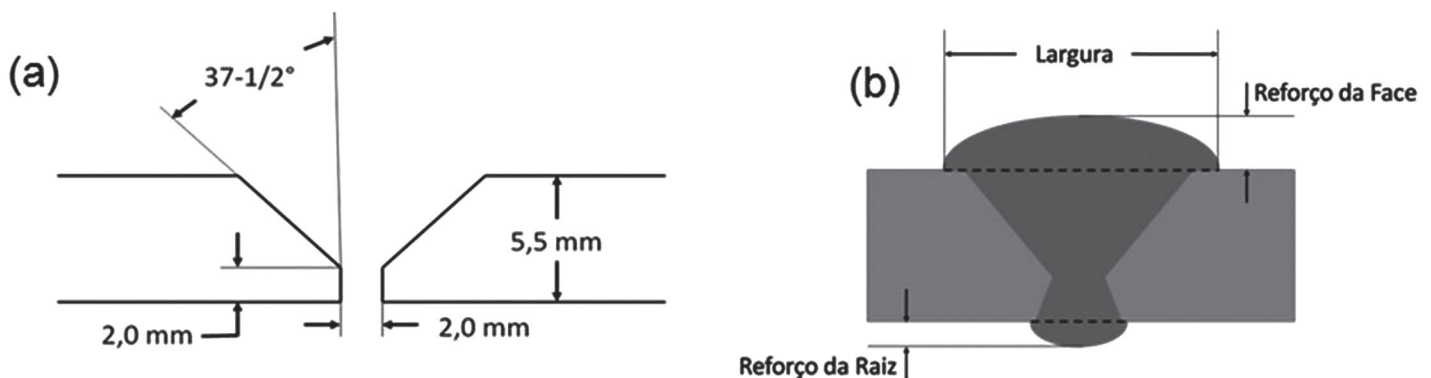


Figura 2. (a) Geometria do chanfro proposto pela norma AWS D10.12; (b) características geométricas do cordão.

Tabela 2. Valores de regulagem e valores medidos para os ensaios com processo MIG/MAG convencional nas progressões ascendente e descendente.

	Valores de Regulagem			Ascendente			Descendente			
	Oscil	V_A [m/min]	U [V]	Âng. tocha [°]	I_M [A]	U_M [V]	E_S [J/cm]	I_M [A]	U_M [V]	E_S [J/cm]
1	Não	2,3	18	-10	110	16,5	151	120	16,5	164
2		2,3	18	10	112	16,5	154	122	16,4	166
3		2,3	20	-10	113	18,2	171	122	18,1	184
4		2,3	20	10	113	18,4	173	118	18,2	179
5		3,3	18	-10	140	16,4	128	157	16,3	142
6		3,3	18	10	142	16,9	134	162	16,2	146
7		3,3	20	-10	146	18,0	146	162	18,0	162
8		3,3	20	10	154	18,4	158	160	18,1	161
9		2,8	19	0	135	17,3	155	141	17,3	163
10	Sim	2,3	19	0	112	17,3	162	119	17,3	171
11		3,3	19	0	146	17,2	140	156	17,1	148
12		2,8	18	0	129	16,4	141	140	16,4	153
13		2,8	20	0	134	18,6	166	148	18,1	178
14		2,8	19	-10	133	17,3	153	146	17,3	168
15		2,8	19	10	131	17,3	151	142	17,3	164
16		2,8	19	0	136	17,1	155	147	17,2	169

Tabela 3. Valores de regulagem e valores medidos para os ensaios com processo STT nas progressões ascendente e descendente.

	Valores de Regulagem				Ascendente			Descendente			
	Oscil	V_A [m/min]	I_{Base} [A]	I_{Pico} [A]	Tail out	I_M [A]	U_M [V]	E_S [J/cm]	I_M [A]	U_M [V]	E_S [J/cm]
1	Não	3,3	100	320	0	141	16,3	128	154	16,1	137
2		3,3	100	280	0	141	15,6	122	156	14,8	128
3		3,3	60	320	10	129	16,4	117	152	16,6	140
4		2,3	100	280	10	109	19,5	177	113	20,3	190
5		3,3	60	280	10	140	15,3	119	148	15,5	128
6		2,3	60	320	0	102	15,1	128	109	15,5	140
7		2,3	100	320	10	100	19,2	161	121	19,6	197
8		2,3	60	280	0	107	14,4	129	108	15,0	135
9		2,8	80	300	5	129	15,6	134	134	16,1	144
10	Sim	2,3	80	300	5	110	17,3	158	120	17,2	173
11		3,3	80	300	5	140	15,6	121	147	15,4	126
12		2,8	60	300	5	124	14,9	123	130	15,4	134
13		2,8	100	300	5	121	17,8	143	145	18,0	174
14		2,8	80	280	5	124	15,8	131	133	16,3	144
15		2,8	80	320	5	122	16,6	135	136	17,0	154
16		2,8	80	300	0	123	15,5	127	135	15,2	137
17		2,8	80	300	10	124	17,2	143	138	17,6	162
18		2,8	80	300	5	124	16,1	133	134	15,2	135

Tabela 4. Valores de regulagem e valores medidos para os ensaios com processo RMD nas progressões ascendente e descendente.

	Valores de Regulagem			Ascendente			Descendente			
	Oscil	V_A [m/min]	Trim	Arc Control	I_M [A]	U_M [V]	E_S [J/cm]	I_M [A]	U_M [V]	E_S [J/cm]
1	Não	2,3	50	0	127	13,8	146	122	14,3	146
2		2,3	50	50	124	13,9	143	125	14,4	150
3		2,3	80	0	125	16,1	167	128	16,0	170
4		2,3	80	50	123	16,2	166	129	16,0	172
5		3,3	50	0	162	13,8	124	175	12,9	125
6		3,3	50	50	153	14,3	122	177	13,3	131
7		3,3	80	0	152	16,5	139	170	15,9	150
8		3,3	80	50	152	16,5	140	173	15,3	147
9		2,8	65	25	165	15,6	171	168	15,8	177
10	Sim	2,3	65	25	115	15,5	149	117	15,7	154
11		3,3	65	25	147	15,6	127	173	14,8	142
12		2,8	50	25	139	14,4	133	147	14,1	138
13		2,8	80	25	144	16,0	154	148	16,1	159
14		2,8	65	0	142	15,1	143	140	15,6	145
15		2,8	65	50	135	15,6	141	143	15,5	147
16		2,8	65	25	135	15,5	139	144	15,3	147

Tabela 5. Valores de regulagem e valores medidos para os ensaios com processo CMT nas progressões ascendente e descendente.

	Valores de Regulagem		Ascendente			Descendente		
	V_A [m/min]	Comprimento do Arco	I_M [A]	U_M [V]	E_S [J/cm]	I_M [A]	U_M [V]	E_S [J/cm]
1	4,2	-20	121	10,5	105	118	10,8	106
2	4,2	-5	125	11,2	117	127	11,4	120
3	4,2	10	123	11,7	120	126	11,9	125
4	5,2	-20	140	11,0	103	134	11,7	104
5	5,2	-5	144	11,6	112	146	11,8	115
6	5,2	10	146	12,3	119	152	12,7	129
7	6,2	-20	161	11,5	103	162	11,7	105
8	6,2	-5	164	12,1	110	171	12,6	119
9	6,2	10	168	12,8	120	177	13,2	130

por comprimento de solda (V_A/V_S constante). Além disto, foram realizados cordões nas progressões ascendentes e descendentes, assim como, com e sem a utilização da oscilação da tocha (exceto para o processo CMT que foi realizado sem oscilação, pois testes preliminares mostraram a inviabilidade de realizar bons cordões com a oscilação da tocha).

Para determinar o envelope operacional, o critério de aceitabilidade dos cordões foi dividido em duas etapas de refino, sendo, que a primeira fundamentada na análise visual para avaliar a qualidade superficial dos cordões. Enquanto que na segunda foram realizados ensaios macrográficos para verificar a possível presença de descontinuidades internas.

Em seguida, foi feita uma correlação dos parâmetros de soldagem de cada processo utilizado e as características

geométricas (Figura 2.b), via análise de variância (ANOVA), com base no PCC (Planejamento Composto Central) proposto para cada processo.

Nas Tabelas 2, 3, 4 e 5 são apresentados os planejamentos experimentais para execução dos ensaios com os processos MIG/MAG convencional, STT, RMD e CMT, assim como os valores de regulagem e os valores medidos de corrente média (I_M), tensão média (U_M) e energia de soldagem (E_S) para as progressões ascendente e descendente, com e sem oscilação (Oscil) da tocha.

Deve-se ressaltar que os ensaios foram denominados de acordo com o processo. Para o MIG/MAG convencional “A” para os ensaios realizados na progressão ascendente e “D” para a progressão descendente. Para o STT “SA” para os ensaios

realizados na progressão ascendente e “SD” para a progressão descendente. Para RMD “RA” para os ensaios realizados na progressão ascendente e “RD” para a progressão descendente e para o CMT “CA” para os ensaios realizados na progressão ascendente e “CD” para a progressão descendente, seguidos do número do ensaio.

3. Resultados e Discussão

3.1. Análise Visual

Inicialmente avaliou-se a qualidade superficial dos cordões para detectar e analisar visualmente a possível presença de descontinuidades, sendo selecionados os cordões considerados aceitáveis à primeira vista.

De forma geral, as soldas realizadas com os processos MIG/MAG convencional, STT e RMD na progressão ascendente

apresentaram maior penetração do que aquelas obtidas na progressão descendente. Deste modo, os cordões feitos na ascendente tendem a apresentar defeitos como mordedura e perfuração da raiz.

A ocorrência da perfuração da raiz (maior motivo de descarte) torna-se mais freqüente em cordões soldados sem oscilação da tocha, assim como tensões de referência de 20 V para o MIG/MAG convencional, considerando que, estes são fatores favoráveis ao aumento da penetração (reforço da raiz). Outros ensaios, tais como os mostrados na Figura 3, mesmo não perfurando a raiz, o excesso de penetração resultou na falta de material para preenchimento da junta na região vertical.

Além disto, na progressão ascendente, a oscilação da tocha e a execução da solda em passe único proporcionaram a formação de grandes mordeduras e falta de fusão nas laterais da junta, como pode ser observado na Figura 4.

Por outro lado, na progressão de soldagem descendente

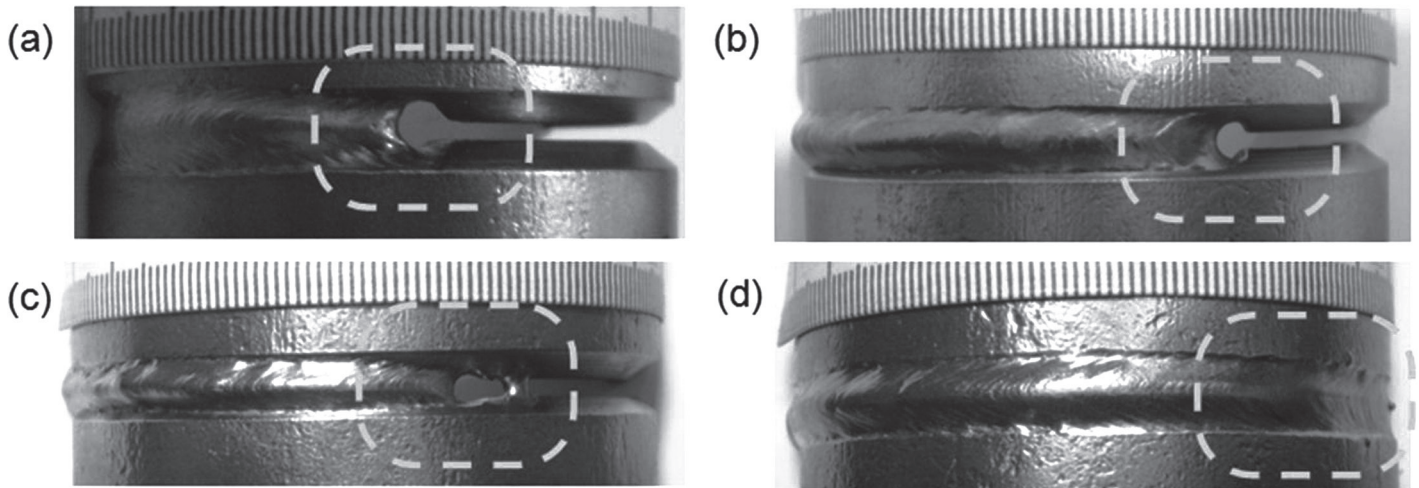


Figura 3. Ensaios com perfuração da raiz (a) A13, (b) SA1 e (c) RA6; e (d) ensaio RA13 com falta de material para enchimento da junta.

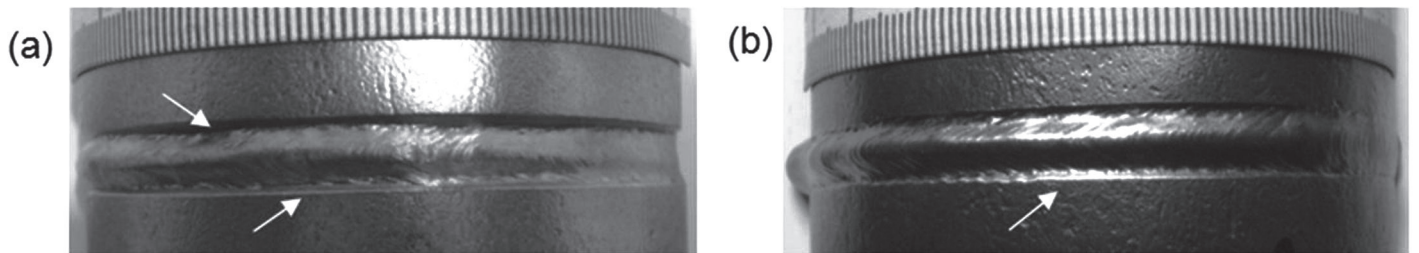


Figura 4. (a) Ensaio SA15 e (b) RA12 com falta de fusão na borda da junta.

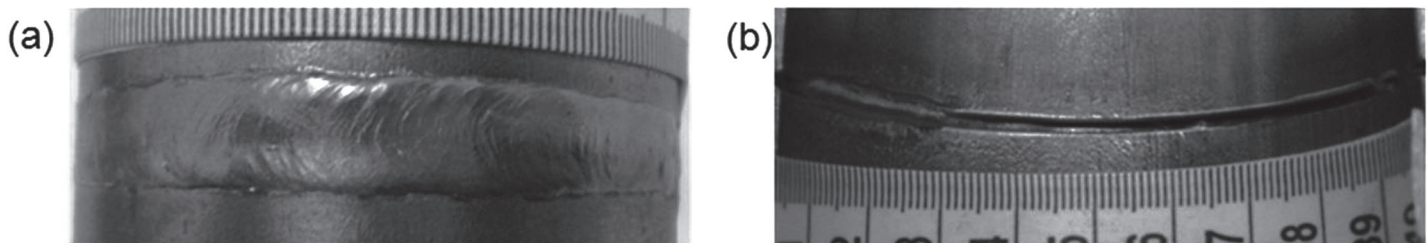


Figura 5. Ensaio D4 com escorrimento da poça de fusão no reforço da face (a) e falta de penetração no reforço da raiz (b)

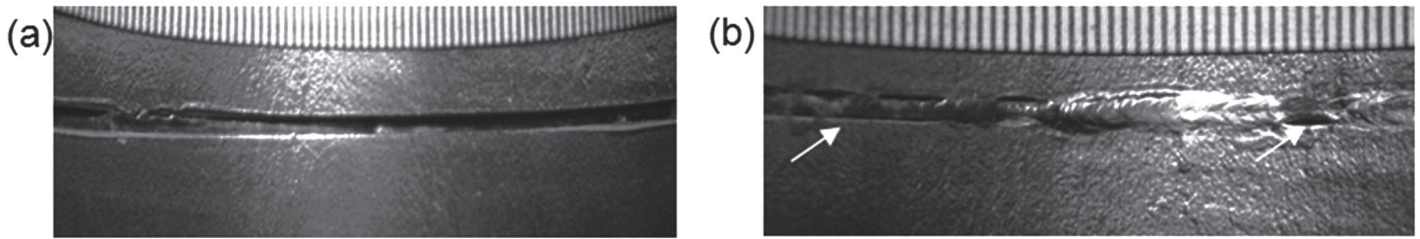


Figura 6. (a) Ensaios RD10, com falta de penetração; e (b) ensaio RD16, falta de fusão da raiz

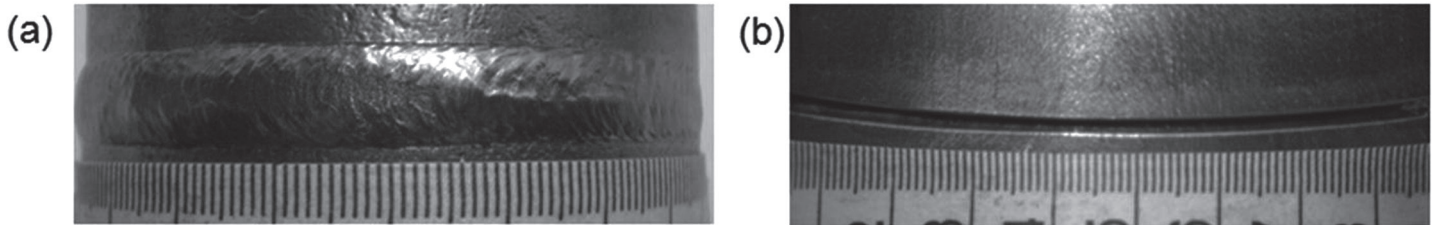


Figura 7. Ensaios CD3 apesar do bom acabamento superficial (a) apresenta falta de penetração (b)

Tabela 6. Ensaios selecionados a partir dos critérios de aceitabilidade

	ASCENDENTE	DESCENDENTE
MIG/MAG	A1, A2, A10, A15 e A16	D3, D5, D7, D11 e D12
STT	SA9, SA10, SA11, SA12, SA14, SA16, SA17 e SA18	SD1, SD2, SD3, SD8, SD9, SD10, SD11, SD12, SD13, SD14, SD15, SD16, SD17 e SD18
RMD	RA11 e RA15	RD4, RD7, RD8, RD9, RD11, RD13 e RD14
CMT	CA1, CA2, CA3, CA4, CA5, CA8 e CA9	CD9

observou-se um maior controle da penetração (menor reforço da raiz), principalmente utilizando o processo STT, minimizando o escoamento do metal fundido, a falta de penetração e falta de fusão da raiz nas posições vertical e sobrecabeça. Visto que, estes defeitos fora observados repetidamente nas soldas realizadas com MIG/MAG convencional e RMD nesta progressão (Figuras 5 e 6).

Diferentemente dos resultados obtidos nos processos anteriores, no processo CMT os ensaios na progressão ascendente apresentaram resultados melhores, onde a maior capacidade de penetração dos cordões soldados nesta progressão suprimiu a baixa energia de soldagem do processo CMT. Pois proporcionou cordões com penetração total e com perfil mais uniformes. Ao passo que, na progressão descendente, mesmo com maior

controle do escoamento do metal fundido, verificou-se um grande número de ensaios com presença de falta de penetração (reforço da raiz negativo), como pode ser observado na Figura 7.

A partir da análise visual dos cordões, foram selecionados para análises seguintes, mostrados na Tabela 6.

3.2. Ensaio Macrográfico

Nesta etapa, os cordões selecionados na etapa anterior, foram submetidos a ensaios macrográfico para verificar e avaliar possíveis descontinuidades internas. Para todos os processos utilizados nos ensaios, ainda que mesmo em alguns ensaios com desalinhamento da junta (Figura 8), devido à irregularidade circunferencial do tubo e a preparação da junta,

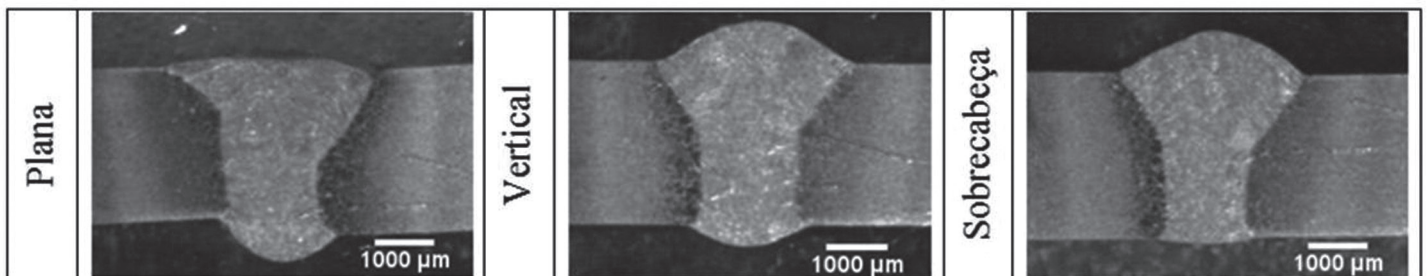


Figura 8. Ensaio A1 com desalinhamento da junta na posição plana

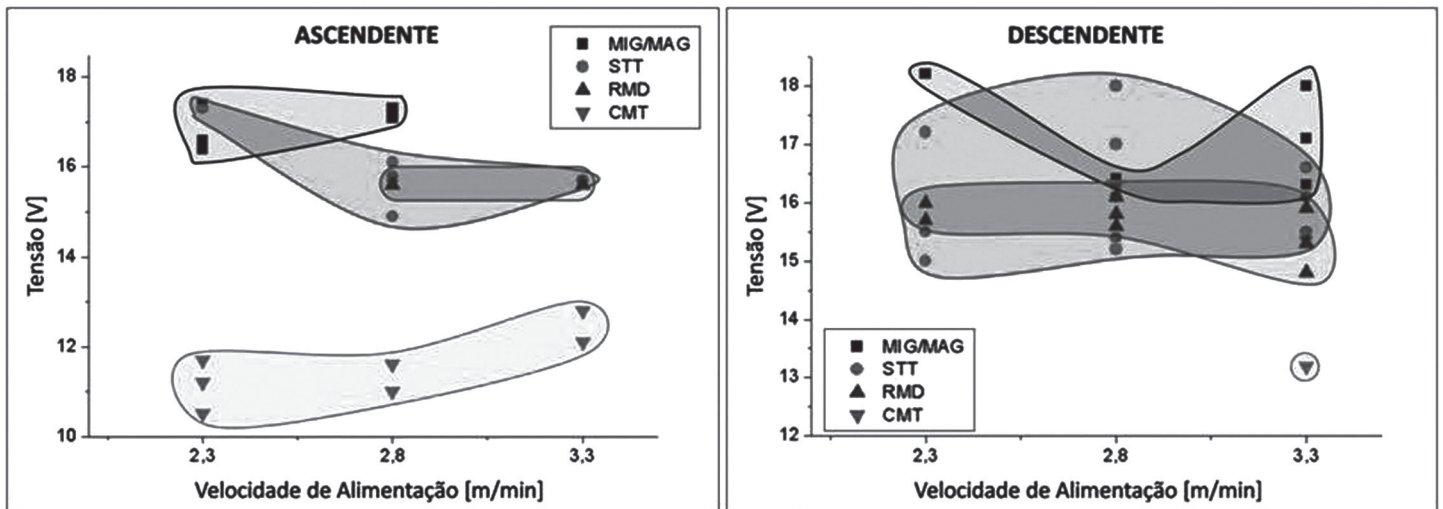


Figura 9. Envelope operacional dos processos utilizados (MIG/MAG, STT, RMD e CMT) na progressão de soldagem ascendente e descendente

em ambas as progressões não foram encontrados indicadores de descontinuidades internas. Ressalta-se que o alinhamento da junta é crucial, pois mesmo um desalinhamento mínimo pode causar falta de fusão e ou penetração das soldas, o que é comum na soldagem de dutos.

3.3. Envelope Operacional

A Figura 9 apresenta os envelopes operacionais encontrados para cada processo utilizado para a soldagem nas progressões ascendente e descendente na união de dutos de aço carbono. Analisando a relação entre a faixa trabalho da tensão e os níveis de velocidade de alimentação (nível mais alto ao nível mais baixo), verifica-se que o curto-circuito convencional trabalha em média num valor mais alto de tensão de soldagem quando comparado com outros processos. Quanto à velocidade de alimentação, na progressão ascendente se utiliza menores níveis, o que favorece o melhor controle da penetração, já que nesta progressão tem maior capacidade de penetração do cordão. Por outro lado, na descendente, onde a penetração do cordão tende a ser menor, utilizam-se níveis mais elevados de velocidade de alimentação.

Observa-se que o processo STT possui uma faixa trabalho maior de tensão de soldagem. Neste caso, esta faixa de trabalho é maior na progressão descendente, ou seja, a utilização do processo STT na descendente possibilita a realização de soldas com penetração total com diferentes níveis de tensão e de velocidade de alimentação. A faixa de trabalho da tensão é maior para a velocidade de alimentação de 2,8 m/min.

Já o processo RMD, na progressão ascendente mostrou-se bastante limitado, com um valor constante de tensão, para níveis mais altos de velocidade de alimentação. Porém, observa-se que na descendente a faixa de trabalho da tensão tende a aumentar com a velocidade de alimentação.

Quanto ao processo CMT, note-se que os valores de tensão de soldagem são muito mais baixos, o que é um indicativo do baixo aporte térmico do processo. Por outro lado, é possível

realizar soldas na progressão ascendente com maior controle da penetração e com perfil da raiz mais uniforme, para todos os níveis de velocidade de alimentação. Ao passo que, na descendente a realização de cordões de qualidade mostrou-se bastante limitado, apenas com tensão 13 V e de velocidade de alimentação de 3,3 m/min.

3.4. Efeitos dos Parâmetros na Geometria do Cordão

Para o processo MIG/MAG convencional, observa-se na Figura 10 que a oscilação de tocha influenciou significativamente todo o perfil do cordão na progressão ascendente, na qual a oscilação da tocha favorece a redução do reforço da raiz e aumenta o reforço da face e a largura do cordão (maior controle da penetração). Ao passo que, na descendente o efeito da oscilação da tocha não foi significativo, porém, nota-se uma tendência em reduzir a penetração dos cordões, evidenciada pelo menor reforço da raiz.

Por outro lado, a velocidade de alimentação do arame apresentou uma tendência apenas nos cordões soldados na progressão descendente. Em que o reforço da raiz aumenta com a velocidade de alimentação, e a largura apresenta um comportamento quadrático, sendo maior para o nível intermediário (2,8 m/min).

Para cordões soldados na ascendente, a tensão de soldagem promoveu o aumento do reforço da raiz e a redução do reforço e da largura da face, onde o nível "3" (20 V) proporcionou a perfuração do cordão (reforço da face negativo, alto reforço da raiz e baixa largura da face). Já para a descendente a tensão influenciou apenas a largura do cordão, em que a largura aumenta com a tensão.

Já para o ângulo da tocha, esperava-se um efeito maior na penetração do cordão em ambas as progressões. Porém, observou apenas que na progressão descendente a tocha com ângulo positivo (empurrando) apresentou uma tendência a reduzir a penetração do cordão, aumentou o reforço da face e reduz o reforço da raiz, enquanto o ângulo negativo (puxando)

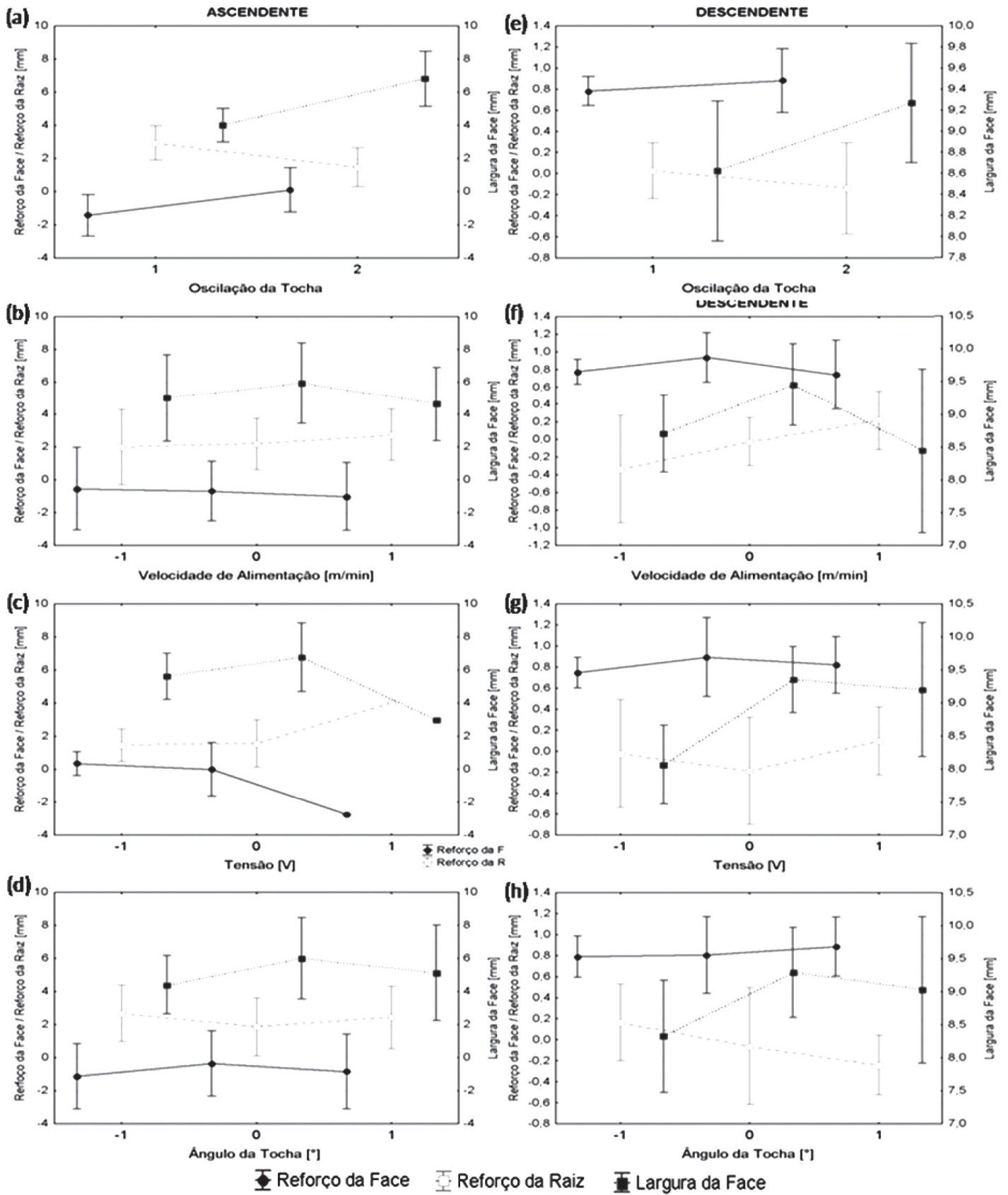


Figura 10. Efeito dos parâmetros operacionais na geometria dos cordões soldados com o processo MIG/MAG convencional, na progressão ascendente e descendente (Oscilação da Tocha “1” ausência e “2” presença)

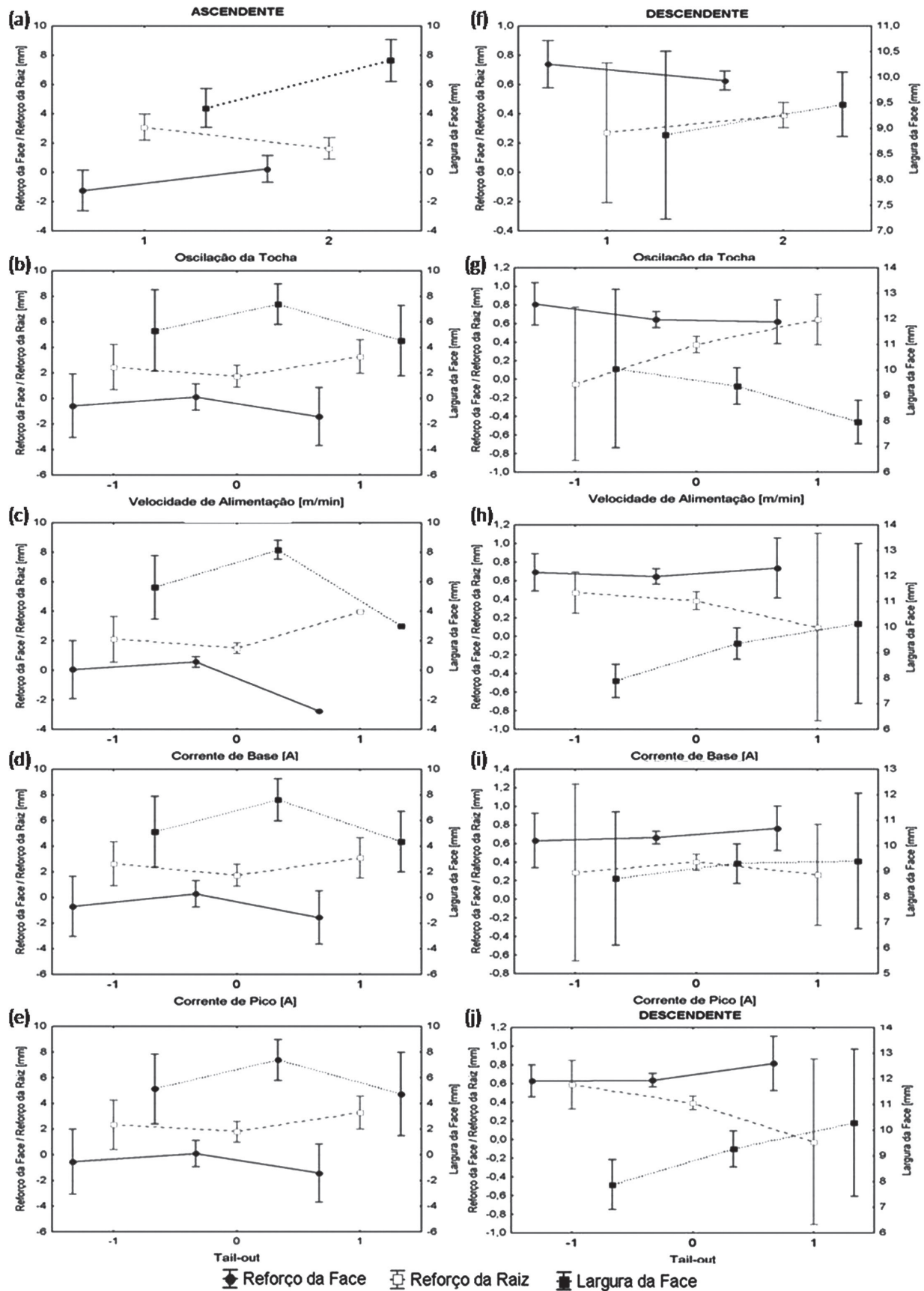


Figura 11. Efeito dos parâmetros operacionais na geometria dos cordões soldados com o processo STT, na progressão ascendente e descendente (Oscilação da Tocha “1” ausência e “2” presença)

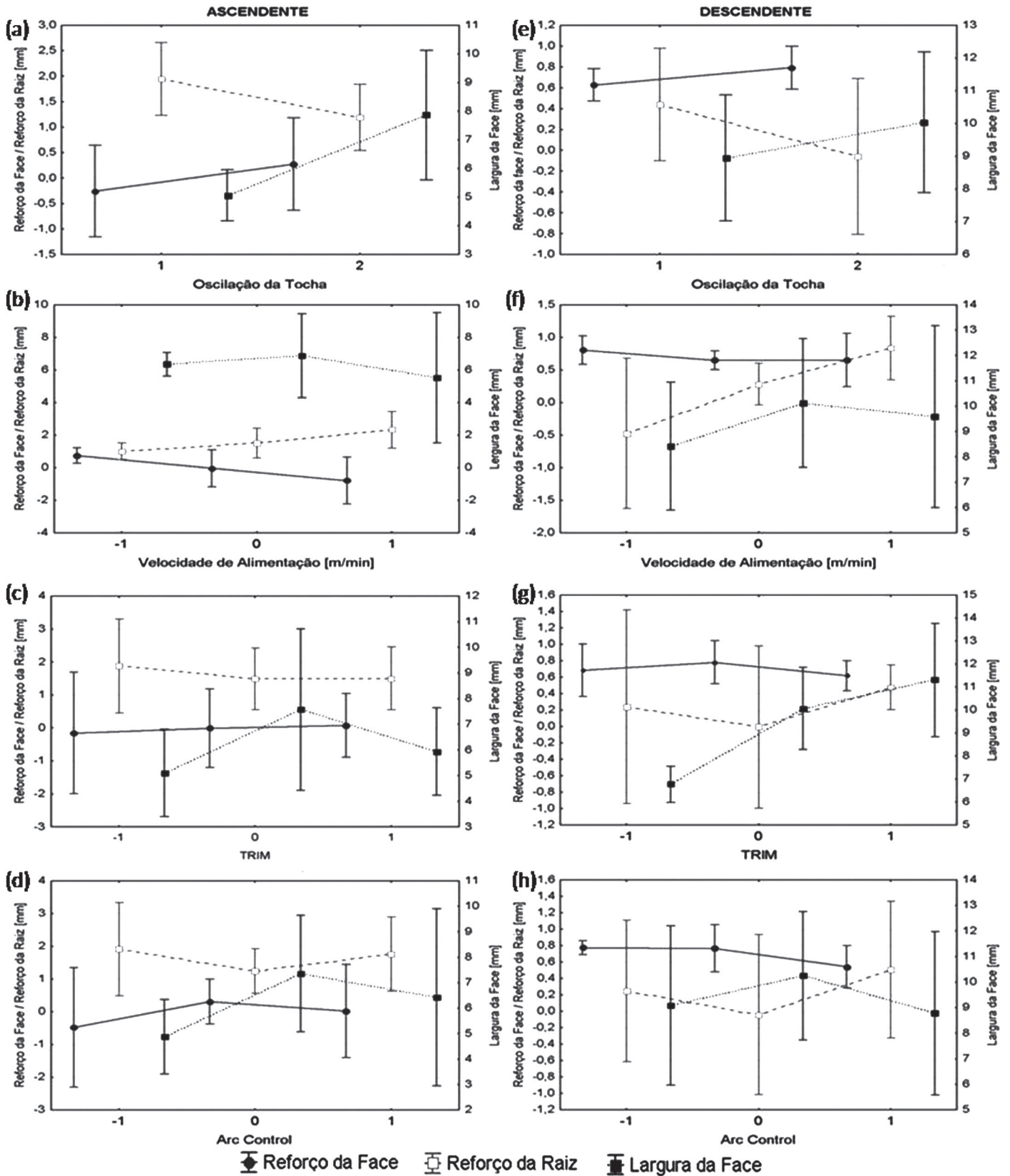


Figura 12. Efeito dos parâmetros operacionais na geometria dos cordões soldados com o processo RMD, na progressão ascendente e descendente (Oscilação da Tocha “1” ausência e “2” presença)

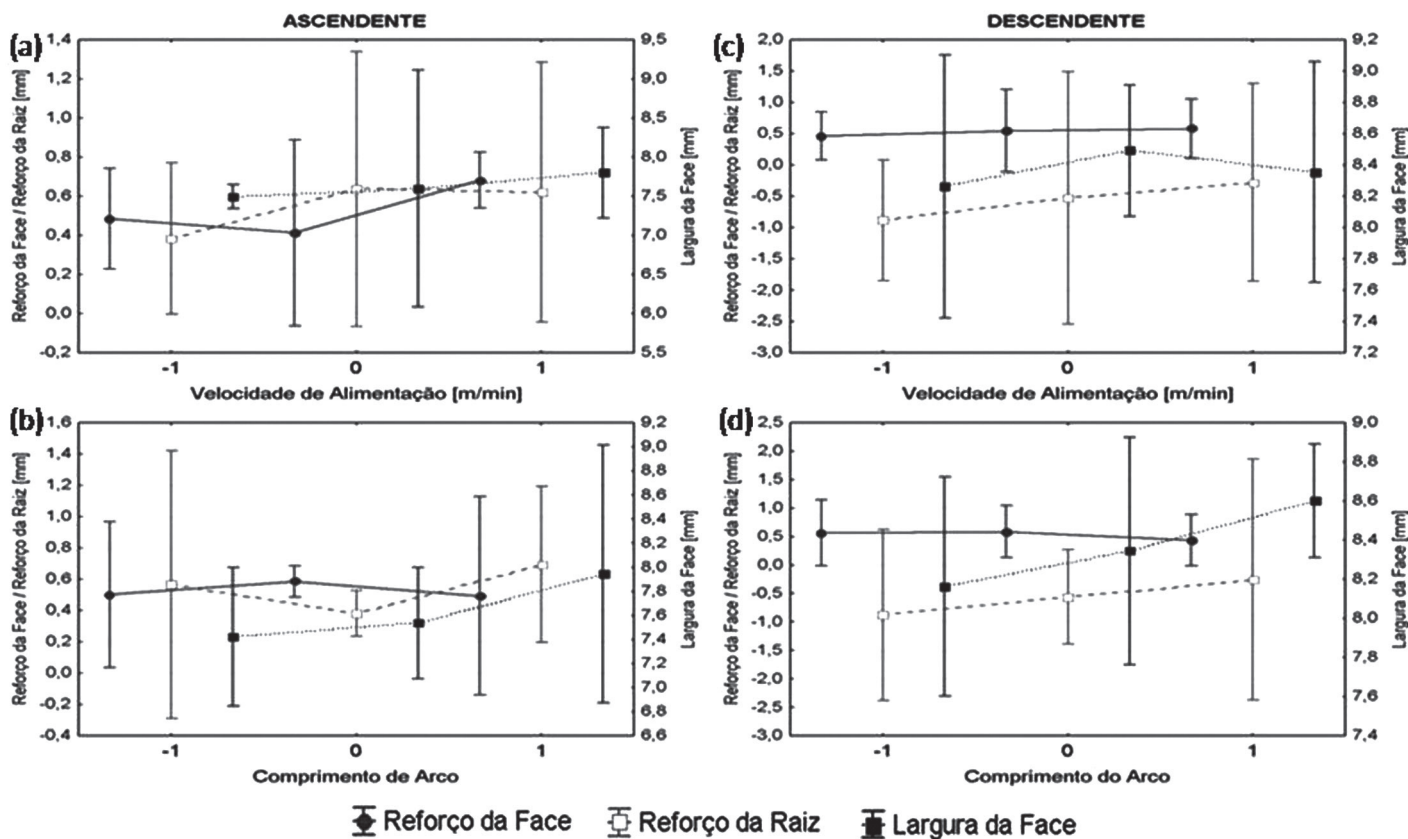


Figura 13. Efeito dos parâmetros operacionais na geometria dos cordões soldados com o processo CMT, na progressão ascendente e descendente

promoveu o aumento da penetração, com a redução do reforço da face e o aumento do reforço da raiz.

Para os resultados obtidos com o STT (Figura 11), a oscilação da tocha, assim como no curto-circuito convencional, afetou significativamente a geometria dos cordões, com a redução do reforço da raiz e aumento do reforço da face e da largura do cordão. Na progressão descendente a oscilação da tocha favoreceu o aumento da penetração, reduziu o reforço da face e aumentou o reforço da raiz.

O *tail-out* tem a função de controlar a descida da corrente após a abertura do arco (comportamento semelhante à indutância), ele apresentou comportamentos semelhantes à velocidade de alimentação e a corrente de pico nos cordões soldados na progressão ascendente, com efeito quadrático, porém sem influência significativa. Nota-se apenas uma tendência dos níveis intermediários “0” ($V_A = 2,8$ m/min; $I_p = 300$ A; e $Tail-out = 5$) em reduzir o reforço da raiz. Por outro lado, na descendente o reforço da raiz tende a aumentar com a velocidade de alimentação, resultando no aumento do reforço da raiz e diminuição do reforço e a largura da face do cordão, como era esperado, uma vez que a maior corrente de soldagem tende a aumentar a penetração. Já o aumento do *tail-out*, tende a reduzir a penetração do cordão, aumentando a largura da face e diminuindo o reforço da raiz.

Nos cordões soldados na ascendente, o aumento da corrente de base favoreceu o aumento da penetração, estando

o maior nível “1” (100 A) diretamente relacionado com a perfuração da raiz dos cordões descartados nos critérios de aceitabilidade. Porém, na progressão descendente a corrente de base apresentou um efeito contrario, reduzindo a penetração do cordão (menor reforço da raiz).

Na Figura 12, para o processo RMD, observa-se que a oscilação de tocha, tanto na progressão ascendente, quanto na descendente, favoreceu o aumento da largura do cordão, consequentemente a redução do reforço da raiz e o aumento do reforço da face. Por outro lado, com era esperado, o aumento da velocidade de alimentação proporcionou maior penetração (aumentou o reforço da raiz e reduziu o reforço da face) sem efeito significativo.

Sobre os demais fatores (*Trim* e *Arc Control*), apenas o *Trim* mostrou alteração significativa na largura da face na progressão descendente, uma vez que segundo o fabricante [8], ele está relacionado diretamente ao comprimento do arco (maior *Trim*, maior comprimento do arco). Ainda segundo o fabricante, o *Arc Control* é responsável pela entrega de calor ao metal de base, controlando o tempo de arco aberto. Porém, o *Arc Control* não apresentou nenhuma influência na geometria dos cordões.

Para o processo CMT, observa-se na Figura 13 que para ambas as progressões não houve influência significativa dos parâmetros (velocidade de alimentação e comprimento do arco) na geometria do cordão, provavelmente devido à sinergia do processo e à condição já otimizada de trabalho.

4. Conclusões

A partir do objetivo proposto de estabelecer vantagens e limites operacionais dos processos MIG/MAG curto-circuito convencional e controlados (STT, RMD e CMT), visando a união de dutos de pequeno diâmetro e parede fina com passe único, é possível concluir que:

- Todos os processos estudados mostraram capazes de realizar a união de dutos de aço carbono de pequeno diâmetro em passe único nas progressões de soldagem ascendente e descendente.
- Para o MIG/MAG convencional, STT e RMD, apresentaram melhores condições de soldagem na progressão descendente, com maior controle da penetração (menor reforço da raiz). Em quanto que, o processo CMT apresentou-se mais eficiente na progressão ascendente, com cordões com perfil da raiz mais uniforme.
- O MIG/MAG curto-circuito convencional apresentou um envelope operacional mais constante quanto ao número de ensaios. Porém para obter cordões com maior qualidade, na progressão ascendente requer níveis mais baixos de velocidade de alimentação, ao passo que, na descendente, utilizam-se níveis mais elevados;
- Em geral, o STT e RMD apresentaram maiores envelopes operacionais para a progressão descendente, quando comparado com a ascendente. Porém, o STT possui uma faixa trabalho maior de tensão para todos os níveis de velocidade de alimentação;
- O CMT apresentou um maior envelope operacional para a progressão ascendente, além de trabalhar com baixos valores de tensão de soldagem, o que justifica o baixo aporte térmico do processo.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pela bolsa de doutorado e Processos 473953/2009-9 e 307554/2008-2, à Fapemig (Processo TEC-APQ-01389-08) e ao Laprosolda/UFU.

6. Referências Bibliográficas

- [1] SILVA, R. H. G.: Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz, 2005. 128 p. Dissertação (Mestrado) – UFSC, Santa Catarina.
- [2] KVASOV, F. V. Special Features of Mechanized Welding with Controlled Electrode Metal Transfer. *Welding International*. v. 14, n. 2, p. 158-161. 2000.
- [3] LINCOLN. Technology gets to the root of pipe welding. Disponível em <www.lincolnelectric.com>. Acesso em: 20 abr. 2010.
- [4] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo, Artliber Editora, 284 p., 2008.
- [5] CHEN, J.H.; SUN, Z.C.; FAN, D. Study on the Mecanism of spatter produced by basicwelding electrodes. *Welding Journal*. Vol 75, p.312-316, 1996.
- [6] HASHIMOTO, T.; MORIMOTO, T. Reduction of Spatter

Generation on Gas Shielded Arc Welding from the Viewpoint of Welding Material. *Welding International*. vol 5, p. 331 – 336, 2007.

[7] ANSI/AWS D10.12-89 An American National Standard; Recommended Practices and Procedures for Welding Low Carbon Steel Pipe.

[8] MILLER, PipePro Welding System – Root-Fill-Cap Welding. Miller Welds Specification Sheets. Disponível em <www.millerwelds.com>. Acesso em: 20 nov. 2010.