

Efeitos das Variáveis do Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados nas Características Geométricas do Cordão de Solda

(Effect of the variable of Double Wire MIG/MAG Process with Insulated Potentials on the Weld Bead Geometry)

Marcelo Ferreira Motta¹, Jair Carlos Dutra²

¹Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção/Centro de Tecnologia, Fortaleza, Ceará, Brasil, marcelof@ufc.br

²Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica/Centro Tecnológico, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, jdutra@labsolda.ufsc.br

Resumo

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo dos efeitos das variáveis do processo MIG/MAG Duplo Arame (ângulo entre os eletrodos, defasagem entre os pulsos de corrente, corrente média, posicionamento dos eletrodos, comprimento dos arcos e diâmetro dos eletrodos) sobre as características geométricas do cordão de solda. As soldagens foram feitas por simples deposição sobre chapas de aço baixo carbono, na posição plana. Os resultados encontrados mostraram que aumentos na corrente média e no ângulo entre os eletrodos resultam em crescimentos na penetração e na diluição. O posicionamento em “tandem” dos eletrodos resulta em maior penetração no centro do cordão.

Palavras-chave: Duplo arame; MIG/MAG; Geometria da solda, Corrente pulsada.

Abstract: *This work intends to study the effects of the Double Wire MIG/MAG variables (out-of-phase current pulses, mean current, positioning of the electrodes, arcs lengths and diameter of the electrodes) on the geometric characteristics of the deposits. Bead-on-plate was deposited in the plane position. The results showed that an increment in the mean currents and in the angles between the electrodes increases the penetration and the dilution of the weld bead. The positioning in “tandem” of the electrodes results in a larger penetration in the center of the weld bead.*

Key-words: Double wire, MIG/MAG; Bead shape; Pulsed current.

1. Introdução

O processo de soldagem MIG/MAG com Duplo Arame e com Potenciais Isolados emprega dois eletrodos isolados eletricamente que se fundem sobre uma única poça fundida. Devido à característica de proporcionar uma alta taxa de deposição de material, o processo foi utilizado inicialmente na soldagem de chapas grossas [1]. Todavia, sua grande aplicação tem sido principalmente na soldagem de chapas finas com altas velocidades, que chegam a atingir mais de 2 m/min [2,3,4].

A característica de proporcionar uma elevada taxa de deposição de material tem impulsionado a utilização do Duplo Arame no meio industrial neste princípio de século, principalmente em aplicações automatizadas. Contribuem para este crescimento, a vinculação de propagandas promocionais que creditam ao processo vantagens tais como: maior produtividade, menor aporte térmico à peça e consequentemente menor distorção, entre outras. Em muitas aplicações, os resultados são realmente satisfatórios e apontam aumentos significativos na velocidade de soldagem, reduzindo, por conseqüência, o tempo total de operação. Por outro lado, há poucos trabalhos científicos que comprovem ou investiguem as informações (vantagens) anunciadas, ou que apresentem estudos sobre o processo.

Em relação ao MIG/MAG com um arame, o Duplo Arame

apresenta uma maior complexidade operacional. Além do número superior de parâmetros a serem ajustados na soldagem com dois arames, os fabricantes de equipamentos incorporaram detalhes tecnológicos que são divulgados como sendo da maior relevância em termos de resultados da solda, mas que aumentam a dificuldade operacional do processo. Exemplo disso é a defasagem de tempo entre os pulsos de corrente (instante em que um dos arames está no período de pulso da corrente e o outro no de base). Esta tecnologia é empregada com o objetivo de reduzir as interações eletromagnéticas (sopro magnético) entre os arcos, conferindo a esses uma maior estabilidade [1,2,3,5,6].

A maior complexidade operacional do Duplo Arame pode resultar em aplicações frustradas do processo, que causam prejuízos irreparáveis. No Brasil, há casos relatados de usuários do Duplo Arame que foram obrigados a desativar toda uma célula de fabricação, por não alcançarem com o processo a produtividade pretendida. Dificuldades com a obtenção de arcos voltaicos estáveis e com a acessibilidade e o posicionamento das tochas sobre a junta limitaram as velocidades de soldagem desejada ou qualidade do cordão, causando um alto índice de refugo de peças.

Este trabalho alerta para a necessidade de se efetuar estudos mais detalhados sobre a soldagem com o Duplo Arame. As dificuldades citadas têm relação com a escassez de informações técnicas e científicas sobre o processo. Algumas afirmações apregoadas na literatura necessitam ser cuidadosamente checadas quanto a sua veracidade, com intuito de melhor informar o usuário. Parâmetros importantes

(Recebido em 10/12/2004; Texto Final em 08/04/2005)

Trabalho baseado em versão apresentada no XXX CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem de 13 à 16 de setembro de 2004.

cujos efeitos são pouco conhecidos na performance do processo, como ângulo entre tochas, diâmetro dos eletrodos, posição destes em relação à direção de soldagem e comprimento dos arcos precisam ser analisados em conjunto com a defasagem dos pulsos de corrente para se determinar suas influências sobre, por exemplo, os cordões de solda. Desta forma, este trabalho tem por objetivo estudar os efeitos que estas variáveis (defasagem entre os pulsos de corrente, a corrente média, posicionamento dos eletrodos em relação ao sentido de deslocamento da soldagem, comprimento dos arcos, diâmetro dos eletrodos) exercem sobre o perfil geométrico dos depósitos e discutir as potencialidades de aplicações do processo.

2. Equipamentos, Materiais e Metodologia Experimental.

2.1. Equipamentos

Todas as soldagens executadas neste trabalho foram realizadas empregando-se duas fontes de soldagem multiprocesso, microprocessadas e com uma capacidade máxima de corrente de 450 A. A corrente pulsada com defasagem dos pulsos de corrente entre as fontes de soldagem foi utilizada em todos os ensaios. Para promover esta defasagem, um circuito eletrônico foi implementado nas fontes de soldagem com o intuito de controlar os instantes de pulsação das correntes de cada fonte. Por intermédio desse circuito, o início da pulsação de corrente de uma das fontes (fonte escrava) era comandado pela outra (fonte mestra). O tempo de defasagem entre os pulsos de corrente (tempo "Td" na Figura 1) era especificado pelo usuário e correspondia ao tempo que a fonte escrava deveria retardar o início de sua pulsação em relação ao início dos pulsos da fonte mestra. Além das duas fontes de soldagem, a bancada de ensaios utilizada era composta por: a) um sistema de deslocamento linear das tochas de soldagem; b) duas tochas robô; c) dois suportes de fixação das tochas; d) dois sistemas de medição das velocidades de arame; e) um sistema de medição das grandezas elétricas (tensão e corrente) e f) um sistema de aquisição de dados.

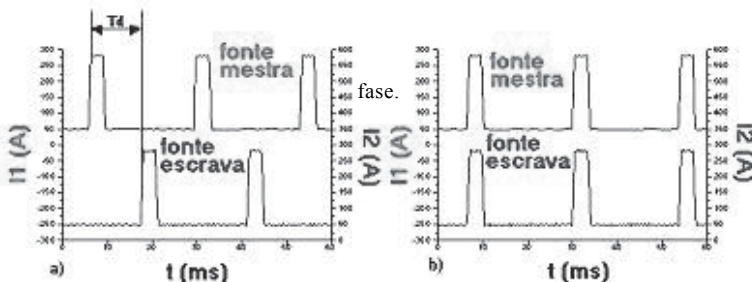


Figura 1 – Oscilogramas de corrente: a) Pulsos de corrente defasados (Td – tempo de defasagem). b) Pulsos de corrente em fase.

2.2. Materiais

Todas as soldagens foram feitas sobre chapas de aço baixo carbono da classe ABNT 1010, que foram cortadas

nas dimensões de 12,5X100X200 mm e esmerilhadas para remoção da camada de óxido. Os arames eletrodos usados eram da classe ER70S-6 com diâmetros de 1,0 e de 1,2 mm de espessura. Como gás de proteção, empregou-se uma mistura recomendada pelo fabricante para soldagens com corrente pulsada, com 96% de Ar e 4% de CO₂ a uma vazão média de 17l/min.

2.3. Metodologia Experimental

Devido ao número elevado de variáveis a serem analisadas, os ensaios foram divididos em duas etapas. Na primeira, apenas os efeitos do ângulo entre os eletrodos sobre as variáveis de resposta dos experimentos foram analisados.

Na segunda, os efeitos das variáveis defasagem entre os pulsos de corrente, corrente média, posicionamento dos eletrodos em relação ao sentido de deslocamento da soldagem e comprimento dos arcos foram analisados em conjunto.

As características geométricas do perfil do cordão foram consideradas como variáveis de respostas dos experimentos (Figura 2). São elas: índice de convexidade¹ (ICV); penetração média nas laterais do cordão (Plm); penetração no centro do cordão (PC); perfil de penetração² (Pp) e porcentagem de área diluída (AD%). A escolha destas variáveis relacionadas ao perfil do cordão de solda, como respostas do experimento, teve o propósito de se avaliar como a geometria da solda muda com as variáveis do processo. Pretendia-se verificar qual o perfil mais adequado às principais aplicações do processo, como por exemplo, as soldagens de revestimento, que requerem cordões largos, planos (portanto com baixo ICV) e com baixa diluição.

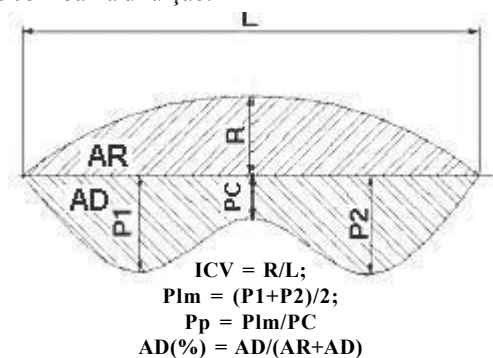


Figura 2 - Representação esquemática do perfil geométrico de um cordão de solda. AR – área do reforço e AD(%) – área diluída.

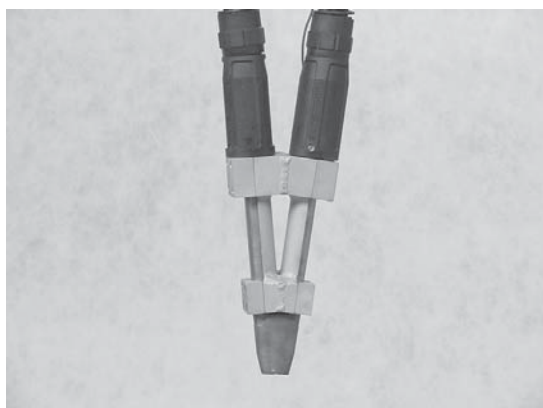
Cada cordão de solda executado, de aproximadamente 150 mm de comprimento, foi cortado no sentido transversal em duas posições. Tomou-se o cuidado de descartar 30 mm do início e do final dos cordões. Sendo assim, duas amostras das seções transversais de cada condição de soldagem ensaiada foram preparadas para as medições. As amostras foram lixadas (até a lixa de 600 mesh) e atacadas com uma solução de nital a 3%, para revelação dos perfis de penetração e posteriormente fotografadas. As características geométricas apresentadas na Figura 2 foram medidas com o auxílio de um software comercial.

¹ Quanto menor esse índice, mais plano é o cordão de solda. / ² Quanto mais próximo do valor um for este índice, mais uniforme é o perfil de penetração da solda.

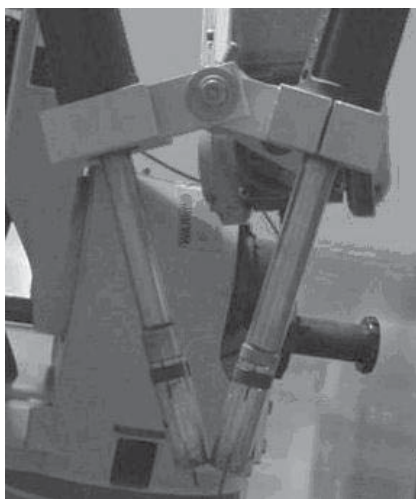
2.3.1. Etapa 1 – Efeito do Ângulo entre os Eletrodos sobre a Geometria do Cordão de Solda.

Os ensaios experimentais realizados neste subitem tiveram como objetivo verificar quais os efeitos que o ângulo entre os eletrodos exerce sobre as características geométricas dos depósitos. Dois suportes com ângulos distintos de fixação das tochas foram empregados na realização dos testes (Figura 3). Por este ser um trabalho de pesquisa, os suportes foram desenvolvidos especificamente para estes ensaios. Entretanto, os autores deste trabalho procuraram projetá-los com características construtivas (ângulo entre tochas, distância entre arame) similares às observadas em suportes e tochas disponíveis no comércio para os sistemas com duplo arame.

As condições de soldagem em que foram conduzidos estes ensaios estão apresentadas na Tabela 1. Os parâmetros de pulsação da corrente foram ajustados de forma similar em ambos os eletrodos. Os ensaios foram feitos com os eletrodos posicionados um ao lado do outro em relação ao sentido de deslocamento da soldagem (posição “lado a lado”) e, para cada condição, soldaram-se dois cordões.



Suporte 1- ângulo entre tochas: 13°



Suporte 2 - ângulo entre tochas: 30°

Figura 3 – Suportes de fixação das tochas utilizados nos ensaios

2.3.2. Etapa 2 – Efeitos das Variáveis Defasagem entre os Pulsos de Corrente, Corrente Média, Posicionamento dos Eletrodos e Comprimento dos Arcos sobre o Perfil dos Cordões.

Todas as soldagens foram realizadas empregando-se corrente pulsada em ambos os eletrodos e com valores médios em dois níveis: 100 e 160 A/arame. A posição dos eletrodos (PE) em relação ao deslocamento da soldagem foi analisada em duas situações distintas: eletrodos posicionados um ao lado do outro (“lado a lado” - LL) e eletrodos posicionados um a frente do outro (“tandem” TD). A foto da Figura 4 ilustra o posicionamento LL dos eletrodos para a realização dos ensaios.

Quanto à defasagem entre os pulsos de corrente (DF), esta variável foi analisada com os pulsos de corrente defasados (Df) e com os pulsos em fase (F), neste caso $T_d = 0$ ms (Figuras 1a e 1b respectivamente). Os comprimentos dos arcos foram incluídos entre as variáveis a serem analisadas com o objetivo de se verificar os seus efeitos sobre o perfil e o acabamento dos depósitos, ao oscilarem entre valores toleráveis para as estabilidades dos arcos (comprimentos entre aproximadamente 5 e 8 mm).

O procedimento adotado para a execução dos ensaios baseou-se num projeto fatorial fracionado de quatro fatores a dois níveis o que totalizou 8 condições de soldagem. Como os testes foram realizados em dois blocos, um com o eletrodo de 1,0 e o outro com o de 1,2 mm, totalizaram-se 16 ensaios.

O projeto fatorial fracionado pode ser utilizado no planejamento de experimentos que apresentam um número elevado fatores a serem investigados, com o intuito de reduzir o número de ensaios. Segundo Montgomery [7], com essa técnica, é possível analisar os efeitos de K fatores em dois níveis cada um, em 2^{k-p} combinações de testes, realizando-se apenas uma parte do experimento, sem comprometer significativamente a confiabilidade nas conclusões obtidas das análises dos resultados (para $p=1$, apenas metade dos experimentos são executados, para $p=2$, apenas $1/4$).

A Tabela 2 apresenta a seqüência de experimentos executada para o eletrodo de menor diâmetro, e a Tabela 3, para o de maior. Em cada bloco de testes, variou-se a velocidade de soldagem entre os ensaios, com o propósito de se manter o volume de material depositado na unidade de tempo aproximadamente constante. Com esse procedimento, acredita-se que as energias impostas em todas as combinações de ensaio sejam similares e que as comparações entre depósitos, soldados com diferentes níveis de corrente média, possam ser feitas.

Nestes ensaios, o suporte com o ângulo entre tochas de 30° foi utilizado.

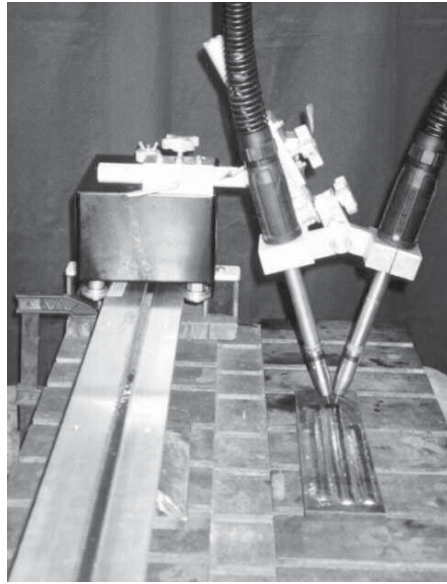


Figura 4 - Posicionamento “lado a lado” dos eletrodos para a realização das soldagens.

Tabela 1 - Condições de soldagem em que foram realizados os ensaios

Im (A/ar.)	Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)	Td (ms)	ϕ ($^{\circ}$)	Vs (cm/min)	da (mm)	Va1 (m/min)	Va2 (m/min)	ca (mm)	d _e (mm)
100	240	4,1	46	10,6	7,4	13	30	8	4,5	4,9	≈ 5	1,0
100	240	4,1	46	10,6	7,4	30	30	8	4,5	4,9	≈ 5	1,0

Obs. Im – corrente média em cada arame; Ip – corrente de pulso; tp – tempo e pulso; Ib – corrente de base; tb – tempo de base; ϕ – ângulo entre tochas; Vs – velocidade de soldagem; da – distância entre arames; Va1 – velocidade do arame 1; Va2 – velocidade do arame 2; ca – comprimento dos arcos; d_e – diâmetro do eletrodo.

Tabela 2 - Seqüência dos ensaios executados para o arame de 1,0 mm

Sequen.	Im (A/ar.)	Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)	Td (ms)	PE.	ca (mm)	Vs (cm/min)	Va1 (m/min)	Va2 (m/min)
1	100	270	3,9	47	12,6	8,3	LL	5	22	4,1	4,8
2	100	270	3,9	47	12,6	0,0	LL	8	20	3,7	4,4
3	160	270	3,9	76	5,6	4,8	LL	8	34	6,1	7,4
4	160	270	3,9	76	5,6	0,0	LL	5	33	6,4	7,7
5	100	270	3,9	47	12,6	8,3	TD	8	22	3,5	4,2
6	100	270	3,9	47	12,6	0,0	TD	5	22	3,9	4,7
7	160	270	3,9	76	5,6	4,8	TD	5	33	6,3	7,6
8	160	270	3,9	76	5,6	0,0	TD	8	34	6,1	7,4

Tabela 3 – Seqüência dos ensaios executados para o arame de 1,2 mm

Sequen.	Im (A/ar.)	Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)	Td (ms)	PE.	ca (mm)	Vs (cm/min)	Va1 (m/min)	Va2 (m/min)
1	100	300	4,0	55	17,8	10,9	LL	8	22	2,5	2,4
2	100	300	4,0	55	17,8	0,0	LL	5	20	2,9	2,6
3	160	300	4,0	102	9,6	6,8	LL	5	34	4,3	4,4
4	160	300	4,0	102	9,6	0,0	LL	8	33	4,0	4,1
5	100	300	4,0	55	17,8	10,9	TD	5	22	2,4	2,4
6	100	300	4,0	55	17,8	0,0	TD	8	22	2,3	2,3
7	160	300	4,0	102	9,6	6,8	TD	8	33	3,9	3,9
8	160	300	4,0	102	9,6	0,0	TD	5	34	4,2	4,1

Tabela 4 - Características geométricas medidas nos cordões de solda

Cordões	ϕ (°)	L (mm)	R (mm)	PC (mm)	Plm (mm)	(Plm/PC)	AD(%)
Cordão 1	13	14,39	2,57	0,046	1,61	35,0	21,34
Cordão 2	13	14,85	2,66	0,06	1,68	28,0	21,67
Cordão 1	30	14,34	2,63	0,16	1,69	10,6	24,37
Cordão 2	30	13,72	2,69	0,15	1,82	12,1	25,10

Tabela 5 – Níveis de significância calculados para os efeitos dos ângulos das tochas sobre as variáveis de respostas

Variáveis	L	R	PC	Plm	Plm/PC	AD(%)
“ α ”	0,266	0,493	<u>0,007</u>	0,274	<u>0,027</u>	<u>0,015</u>

3. Resultados Experimentais e Discussão

3.1. Etapa 1 – Efeitos do ângulo entre os eletrodos sobre geometria do cordão de solda.

Os resultados obtidos dos ensaios dessa etapa podem ser visualizados na Tabela 4, onde estão apresentados os valores médios das características geométricas dos cordões.

A esses resultados foram aplicadas análises de variância. Os valores dos níveis de significância “ α ” estão apresentados na Tabela 5. Com uma confiabilidade de 95%, os valores sublinhados indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, significam que há uma probabilidade de erro menor que 5% em se admitir que o fator ângulo entre tochas esteja influenciando as variáveis de resposta analisadas.

Os níveis de significância listados na Tabela 5 indicam que o ângulo entre as tochas exerce influência significativa em PC, em Pp (Plm/PC) e em AD (%). Esses efeitos podem ser vistos nos gráficos das Figuras 5, 6 e 7.

Os três gráficos mostram que tochas separadas com ângulos maiores promovem aumentos na diluição das soldas, tendem a aumentar a penetração no centro dos cordões e favorecem a formação de perfis mais uniformes, pois há uma tendência de redução na diferença de penetração entre o meio do cordão e as extremidades. Este perfil descrito

pode ser visto na foto da Figura 8a. A foto da Figura 8b ilustra um perfil de penetração obtido com o ângulo entre tochas menor (13°). Percebe-se a menor penetração no centro do cordão em relação à penetração nas laterais.

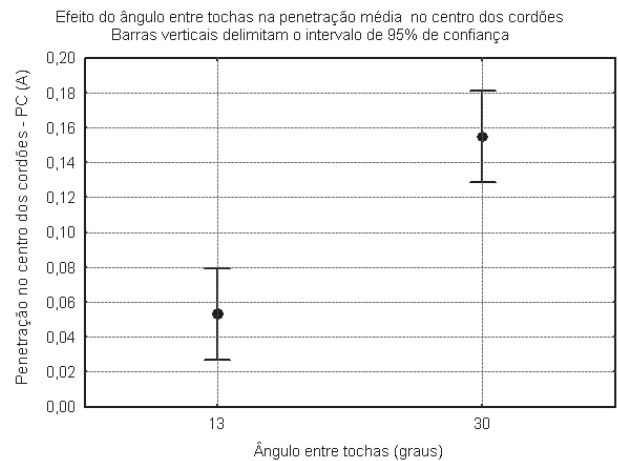


Figura 6 - Efeito da variação do ângulo entre as tochas sobre o perfil de penetração Pp (Plm/PC)

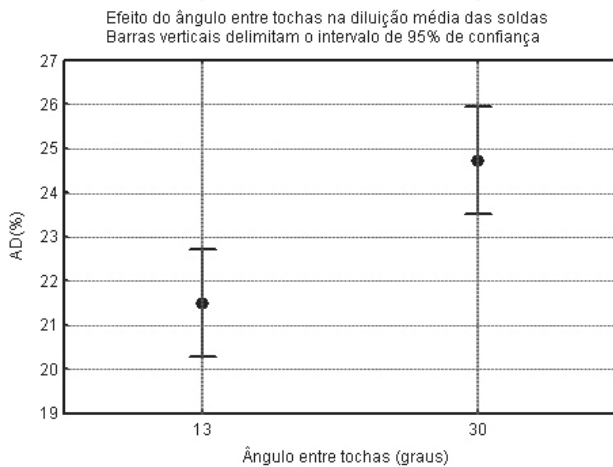


Figura 5 - Efeito da variação do ângulo entre as tochas sobre a penetração no centro do cordão

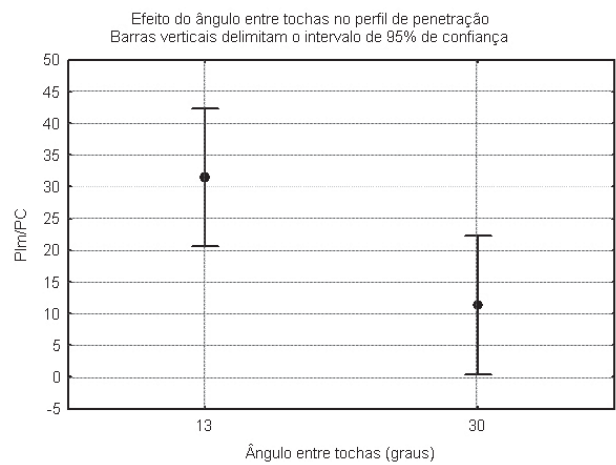
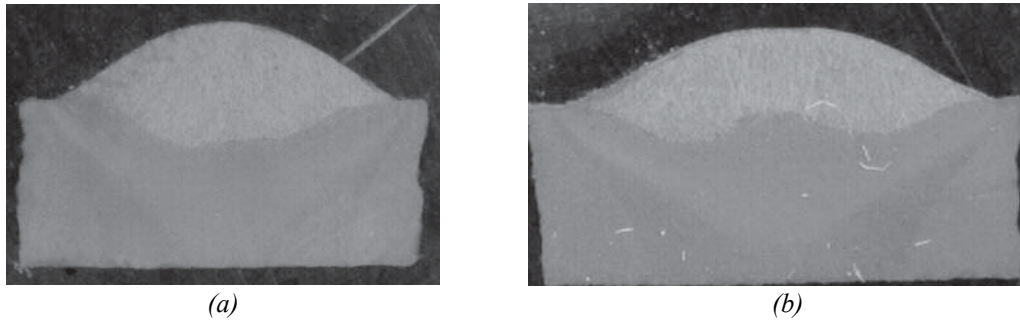


Figura 7 – Efeito da variação do ângulo entre as tochas sobre a diluição.



**Figura 8 - a) - Perfil de penetração mais uniforme. $I_m = 100A/\text{arame}$, $\phi = 30^\circ$; 8
b) Perfil menos uniforme com características de dupla penetração. $I_m = 100A/\text{arame}$, $\phi = 13^\circ$.**

3.2. Etapa 2 – Efeitos das Variáveis Defasagem entre os Pulsos de Corrente, Corrente Média, Posicionamento dos Eletrodos e Comprimento dos Arcos sobre o Perfil dos Cordões.

Os valores medidos das características geométricas dos depósitos estão apresentados na Tabela 6 para os ensaios realizados com os eletrodos de 1,0 e de 1,2 mm.

Análises de correlação foram feitas com o intuito de determinar o grau de associação entre as variáveis analisadas e as características geométricas medidas. A Tabela 7 apresenta os coeficientes de correlação e os respectivos níveis de significância (valores entre parênteses), para os ensaios realizados com os arames de 1,0 e de 1,2 mm. Com confiabilidade de 95%, os níveis de significância menores que 0,05 indicam “correlação não zero”, ou seja, as variáveis

Tabela 6. Características geométricas medidas nos cordões soldados com eletrodos de 1,0 e 1,2 mm

Sequência	d_e (mm)	L (mm)	ICV	PC (mm)	Plm (mm)	Pp	AD(%)
1	1,0	14,47	0,22	0,20	1,55	7,75	24,33
	1,2	13,6	0,20	0,23	1,00	6,93	25,67
2	1,0	11,20	0,32	1,53	0,50	0,34	22,00
	1,2	13,23	0,23	1,07	0,52	0,48	24,00
3	1,0	15,83	0,18	0,83	1,93	2,53	37,33
	1,2	16,77	0,14	0,63	1,38	2,23	36,00
4	1,0	15,63	0,20	1,43	0,77	0,54	29,67
	1,2	14,23	0,21	1,00	0,70	0,71	26,00
5	1,0	9,97	0,35	1,23	0,40	0,31	18,00
	1,2	10,47	0,30	1,40	0,38	0,28	22,00
6	1,0	11,77	0,30	1,63	0,60	0,38	24,67
	1,2	10,90	0,27	1,33	0,27	0,20	22,00
7	1,0	15,03	0,23	2,13	0,70	0,32	34,00
	1,2	14,27	0,18	1,03	0,48	0,47	25,67
8	1,0	14,40	0,20	1,60	0,55	0,35	28,33
	1,2	15,17	0,18	1,70	0,57	0,34	30,00

Tabela 7. Correlações entre as variáveis de entrada e as respostas dos experimentos. Coeficientes e níveis de significância (valores entre parênteses)

Variável	d_e (mm)	L	CV	PC	Plm	Pp (Plm/PC)	AD(%)
PE LL \Rightarrow TD	1,0	-0,357 (0,385)	0,310 (0,455)	0,594 (0,121)	-0,601 (0,115)	-0,502 (0,205)	-0,175 (0,678)
	1,2	-0,450 (0,264)	0,398 (0,329)	0,739 (0,036)	-0,696 (0,055)	-0,525 (0,182)	-0,346 (0,402)
Im	1,0	0,808 (0,015)	-0,805 (0,016)	0,319 (0,440)	0,216 (0,607)	-0,258 (0,538)	0,848 (0,008)
	1,2	0,782 (0,022)	-0,729 (0,04)	0,097 (0,819)	0,354 (0,39)	-0,239 (0,568)	0,691 (0,058)
DF Df \Rightarrow F	1,0	-0,138 (0,745)	0,092 (0,829)	0,411 (0,311)	-0,521 (0,186)	-0,476 (0,233)	-0,189 (0,653)
	1,2	-0,100 (0,813)	0,176 (0,676)	0,525 (0,181)	-0,439 (0,276)	-0,474 (0,235)	-0,211 (0,616)
ca	1,0	-0,330 (0,426)	0,250 (0,558)	-0,050 (0,914)	-0,060 (0,895)	-0,280 (0,502)	-0,150 (0,728)
	1,2	-0,168 (0,690)	0,060 (0,887)	-0,350 (0,395)	-0,147 (0,729)	0,288 (0,489)	-0,365 (0,374)

Obs. LL \Rightarrow TD representa a passagem da variável PE do nível LL para o nível TD. Df \Rightarrow F representa a passagem da variável DF do nível defasado para o nível fase.

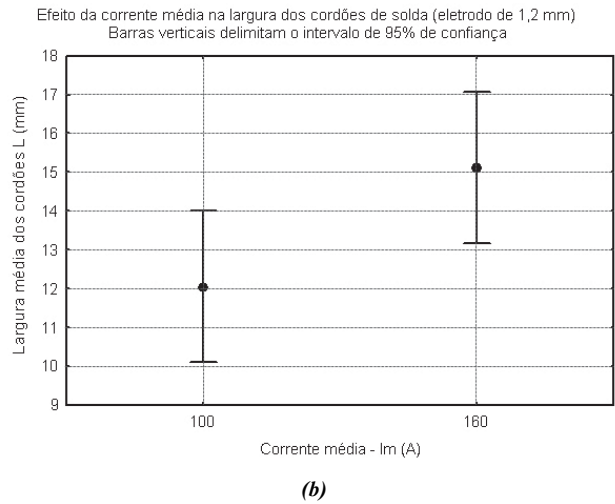
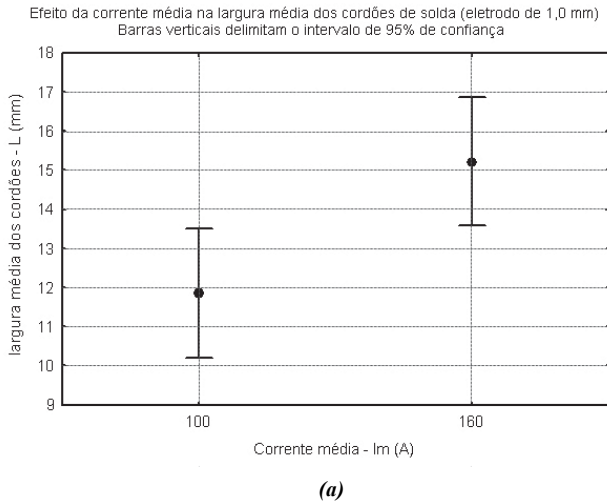


Figura 9 - Efeito da corrente na largura dos cordões de solda. a) arame de 1,0 mm e b) arame de 1,2 mm.

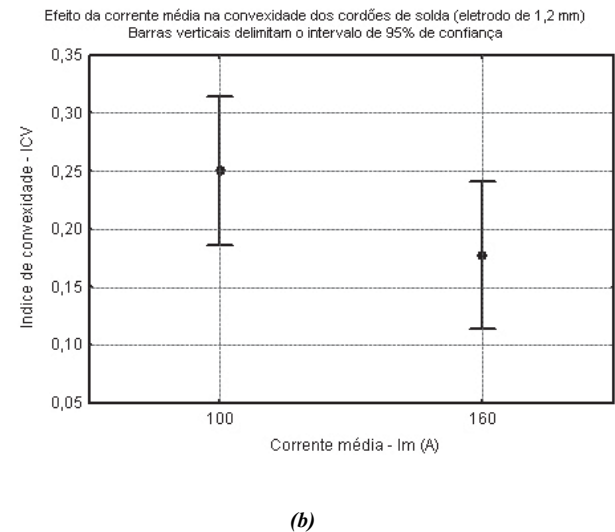
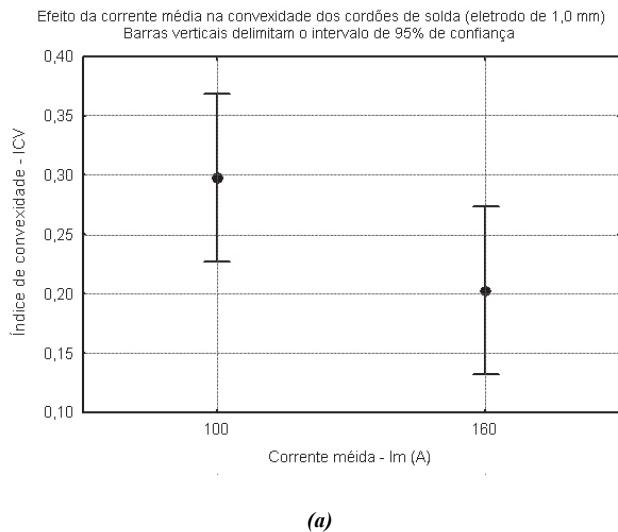


Figura 10 - Efeito da corrente no índice de convexidade. a) arame de 1,0 mm e b) arame de 1,2 mm.

são correlacionadas estatisticamente de forma significativa (com uma probabilidade de erro menor que 5%). Os índices sublinhados indicam quais são essas variáveis.

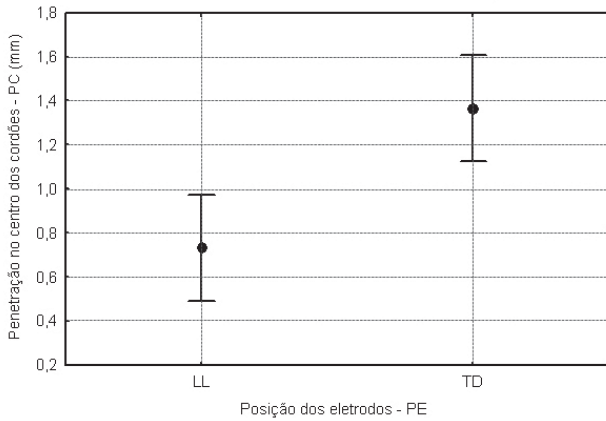
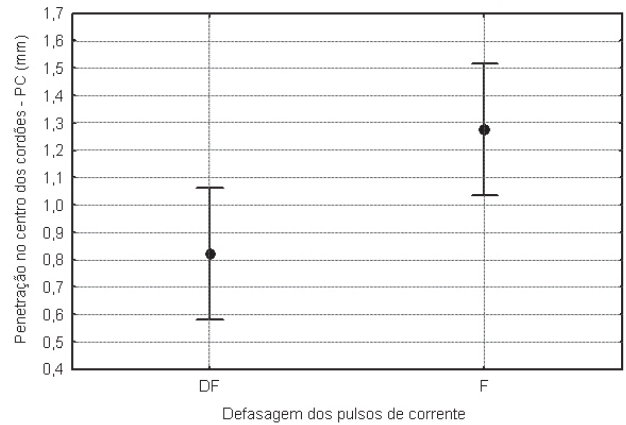
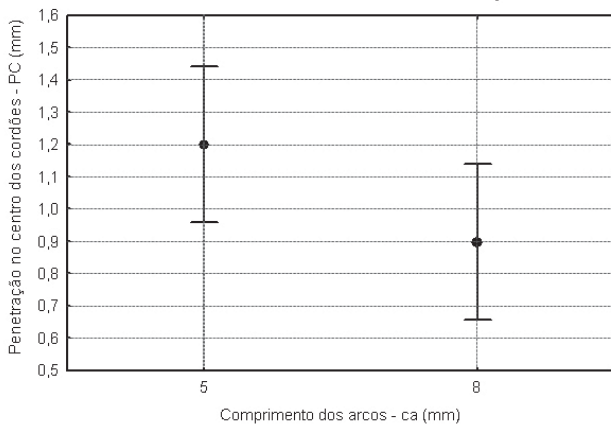
Pode-se observar que em ambos os grupos de experimentos (ensaio com os arames de 1,0 e 1,2 mm), as correlações entre as variáveis apresentaram as mesmas tendências, por exemplo, a largura dos cordões tende a aumentar, e o índice de convexidade, a reduzir, (significativamente para os dois diâmetros de eletrodos) com o crescimento da corrente média. As Figuras 9 e 10, respectivamente, mostram essas tendências. Os coeficientes indicam que a variável comprimento dos arcos apresenta correlações pequenas com as variáveis analisadas. Entretanto, comparando entre os eletrodos, há uma inversão nos sinais dos coeficientes de correlação entre as variáveis comprimento dos arcos (ca) e perfil de penetração ($Pp = PLM/PC$).

3.2.1. Análise de Correlação Parcial

A análise de correlação parcial fornece uma visão mais clara dos efeitos individuais de cada variável independente sobre a variável de resposta, uma vez que ela mede a correlação de duas variáveis, mantendo as demais constantes. A Tabela 8 apresenta os coeficientes das análises de correlação parcial aplicadas aos dados da Tabela 6. Percebe-se que não houve mudanças nas tendências já observadas na análise de correlação da Tabela 7, no entanto, algumas correlações mais significativas são evidenciadas. São os casos das correlações das variáveis: posição dos eletrodos (PE), defasagem dos pulsos de corrente (DF) e comprimento dos arcos (ca) com a penetração no centro do cordão (PC), e da posição dos eletrodos (PE) com perfil de penetração ($Pp = Plm/Pc$), para o eletrodo de 1,2 mm. As Figuras 11, 12 e 13, respectivamente, mostram estas tendências.

Tabela 8 - Coeficientes de correlação parcial entre as variáveis de entrada e as respostas dos experimentos

Variáveis	d _e (mm)	L	CV	PC	Plm	Pp (Plm/PC)	D(%)
PE LL→TD	1,0	-0,763	0,582	0,697	-0,729	-0,633	-0,371
	1,2	-0,761	0,604	0,960	-0,856	-0,658	-0,588
Im	1,0	0,937	-0,881	0,464	0,358	-0,387	0,888
	1,2	0,898	-0,811	0,412	0,645-	-0,370	0,824
DF Df→F	1,0	-0,415	0,207	0,558	-0,678	-0,613	-0,397
	1,2	-0,253	0,318	0,926	-0,723	-0,620	-0,406
ca	1,0	-0,737	0,493	-0,075	-0,099	-0,415	-0,318
	1,2	-0,402	0,114	-0,852	-0,330	0,433	-0,609

Efeito da posição dos eletrodos na penetração no centro dos cordões (eletrodo de 1,2 mm)
Barras verticais delimitam o intervalo de 95% de confiança**Figura 11** – Efeito da variação da posição dos eletrodos sobre a penetração no centro dos cordõesEfeito da corrente média na penetração no centro dos cordões (eletrodo de 1,2 mm)
Barras verticais delimitam intervalo de 95% de confiança**Figura 12** – Efeito da defasagem entre os pulsos de corrente sobre a penetração no centro dos cordõesEfeito do comprimento dos arcos na penetração no centro dos cordões (eletrodo de 1,2 mm)
Barras verticais delimitam o intervalo de 95% de confiança**Figura 13** – Efeito do comprimento dos arcos sobre a penetração no centro dos cordões

De forma semelhante à análise de correlação da Tabela 7, observa-se na Tabela 8 que, apesar de pequenos, os coeficientes de correlação parcial de ambos os eletrodos indicaram efeitos contrários entre as variáveis comprimento dos arcos (*ca*) e perfil de penetração ($Pp = Plm/PC$). Esse

resultado não significa que os efeitos da variável comprimento dos arcos (*ca*) sobre as variáveis penetração média nas laterais do cordão (*Plm*) e penetração no centro do cordão (*PC*) sejam diferentes para os dois diâmetros analisados. Pode-se verificar pelos coeficientes da Tabela 8, para os dois diâmetros de eletrodos, que tanto *PC*, quanto *Plm* tendem a diminuir com o crescimento dos comprimentos dos arcos. A inversão nos sinais dos coeficientes significa que os perfis de penetração dos cordões soldados com os eletrodos de 1,2 mm e arcos voltaicos altos apresentaram características de dupla penetração (menos uniforme) mais claras em relação aos perfis soldados nas mesmas condições com os eletrodos de 1,0 mm. Isso porque as soldagens com o eletrodo de maior diâmetro e arcos altos apresentaram uma baixa penetração no centro dos cordões, (o alto coeficiente de correlação parcial entre as variáveis comprimento dos arcos (*ca*) e penetração no centro do cordão (*PC*) confirma esse resultado). Esses resultados concordam com os que foram observados por Ecer [8] que estudou os efeitos de um campo magnético externo, paralelo à direção de soldagem, sobre o comportamento de arcos voltaicos no processo TIG. O autor alegou que: arcos formados a partir de eletrodos de maior diâmetro defletem menos, no entanto, são mais frios em relação aos que se formam a partir de eletrodos de diâmetros menores; arcos

longos, apesar de se defletirem mais facilmente, apresentam uma densidade de corrente menor junta a poça fundida, não sendo suficiente para fundir o material na região. A redução da penetração no centro dos cordões (mais evidente para o arame de 1,2 mm) pode ser explicada pelos resultados obtidos por Ecer [8].

Na análise dos resultados deste trabalho pôde-se verificar que um ângulo entre as tochas maior tende a proporcionar aos cordões um perfil de penetração mais uniforme e uma maior diluição.

De um modo geral, as variáveis relacionadas às penetrações dos cordões (PC, Plm e %AD) são mais propensas a aumentarem com o crescimento da corrente média. A penetração no centro dos cordões tende a aumentar e, nas laterais, a diminuir, com a mudança no posicionamento dos eletrodos de “lado a lado” para “tandem” (característica geométrica do cordão similar ao perfil apresentado na Figura 8a). Essa mesma tendência é verificada com alteração da condição de pulsos defasados para pulsos em fase.

A possibilidade de se trabalhar com essas variáveis, e, como resultado, modificar as características geométricas dos cordões, mostra a flexibilidade do processo. Conforme a aplicação, se um usuário do processo deseja aplicar o duplo arame em operações de revestimento (pouca penetração e cordão mais plano) ele deve utilizar um suporte com um ângulo menor entre as tochas, empregar níveis de corrente média baixos em cada arco, eletrodos posicionados “lado a lado” e pulsos de corrente defasados. No entanto, se ele deseja soldar em juntas, mesmo com eletrodos lado a lado, deve ajustar níveis de corrente média mais altos em cada arco e pulsos de corrente em fase, pois estas condições proporcionam um cordão com maior regularidade (Pp próximo do valor 1) e maior penetração no centro do cordão. Deve-se ressaltar que, como as soldas foram feitas de simples deposição (mais próximo da realidade de revestimento), deve-se usar com ressalvas esta tendência para soldas em junta com chanfro.

4. Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho para a soldagem de aço carbono permitem concluir que:

- Ângulo maior entre os eletrodos causou aumentos na penetração no centro dos cordões, na diluição e tende a proporcionar soldas com penetração mais uniforme.
- A mudança do posicionamento dos eletrodos de “lado a lado” para “tandem” aumenta a penetração no centro dos cordões e tende a proporcionar soldas com penetração mais uniforme.
- Aumentos na corrente média tendem a aumentar a penetração, a diluição e a largura dos cordões, tornando-os mais planos.
- Mantendo as demais variáveis constantes, aumentos no comprimento dos arcos causam diminuição da penetração no centro e nas laterais dos cordões.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à equipe do LABSOLDA – Laboratório de Soldagem da UFSC que contribuiu para a realização deste trabalho. Desejam agradecer também à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

6. Referências Bibliográficas

- [1] LASSALINE, B. et al. Narrow Groove Twin-Wire MIG/MAG of High-Strength Steel. *Welding Journal*. USA, n. 9, pp. 53-58, Sep 1989.
- [2] HACKL, H. Faster with Two Wire Electrodes Metal Inert Gas Welding of Aluminium. *Materials Proceedings, Exploiting Advances in Arc Welding Technology*. TWI, Abington, U.K. 1997.
- [3] MICHIE, K., BLACKMAN, S. & OGUNBIYI, T. E. B. Twin Wire GMAW: Process Characteristics and Applications. *Welding Journal*. USA, n. 5, pp. 31 a 34, May 1999.
- [4] MOTTA, M. F. & DUTRA, J. C. Uma Discussão sobre a Utilização da Corrente Pulsada no Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Isolado. XXVII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, ABS, São Paulo, CT-23, 2002. CD-ROM.
- [5] VOROPAY, N. M. & PROTSENKO, P.P. Features of Weld and HAZ Formation in Gas-Shielded Pulsed Double-Arc Welding in High-Strength Low-Alloyed Steels. *The Paton Welding Journal*, n. 8, pp. 40–46, Aug. 2000.
- [6] TROMMER G. Welding with Two Wire Electrodes – Status and Prospects of the Optimisation of Gas – Shielded Metal – Arc Welding, *Welding and Cutting*, n. 3, pp. 122-125, March 2002.
- [7] MONTGOMERY, D. C., *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 4th Edition, USA, 704 p., 1996.
- [8] ECER, M. G. Magnetic Deflection of the Pulsed Current Welding Arc. *Welding Journal*. USA, n. 6, pp. 183s-191s, jun. 1980.