

Figura 6.2 – Características estáticas dos arcos obtidos.

6.2 Caracterização geométrica da transferência metálica

A Tabela 6.3 apresenta quadros representativos das filmagens realizadas e os parâmetros utilizados. Observa-se transferências globulares para 130 A, e sensível redução do tamanho das gotas de 130 para 230 A. Assim, a corrente de transição está entre 130 e 180 A. Salienta-se que a ampliação foi diferente para as DBCPs de 18 e 22 mm, visando um melhor enquadramento do fenômeno da transferência metálica.

Tabela 6.3 – Filmagens realizadas dispostas em função da DBCP e da corrente de soldagem.

I_{REG} (A) \ DBCP	130	180	230
18 mm (arco curto – 5,5 a 7,1 mm)			
22 mm (arco médio – 7,7 a 9,4 mm)			

A Tabela 6.4 apresenta as características geométricas das transferências metálicas. Observa-se que, apesar do controle especial adotado para a fonte de soldagem, o comprimento do arco (a) só aumenta à mesma razão do aumento da DBCP para a corrente de 180 A. Assim, neste capítulo, nem sempre em que for citado o aumento na DBCP está necessariamente se falando em um aumento razoavelmente proporcional no comprimento do arco, como fora obtido e tratado também nos Capítulos 5 e 7. Mais adiante há que se observar que as trajetórias levantadas das gotas são maiores para arcos mais longos (DBCP = 22 mm) em todas as correntes, contrastando um pouco com o que foi mensurado numa análise geral de cada experimento (Tabela 6.4). Esta tabela ainda apresenta os diâmetros das gotas (d), seu desvio padrão (σd), e a frequência de destacamento das mesmas (f). Diferentemente do observado na soldagem com aço, o diâmetro das gotas na soldagem globular ($I = 130$ A) não diminuiu com o aumento do comprimento do arco, apontando que a soldagem com alumínio é menos susceptível à variação no arraste provocado pelo gás de proteção, o aumento no efeito pinch e a uma provável variação no perfil do arco, com seu estreitamento. A soldagem com 180 A é o único grupo de experimentos com alumínio onde há efetivamente uma diferença nos comprimentos de arco proporcional à DBCP.

Tabela 6.4 – Características geométricas das transferências metálicas.

I (A)	DBCP (mm)	a (mm)	Δa (mm)	σa (mm)	d (mm)	Δd (mm)	σd (mm)	f (Hz)
130	18	6,9		0,7	1,4	-	0,22	77
	22	8,0	1,1	0,4	1,4	0,0	0,24	78
180	18	5,5	-	0,6	1,2	-	0,13	204
	22	9,4	3,9	0,7	1,1	-0,1	0,07	210
230	18	7,1	-	0,2	1,0	-	0,08	272
	22	7,7	0,6	0,5	1,0	0,0	0,06	290

Ainda discutindo os resultados da Tabela 6.4, estimou-se na Tabela 6.5 a frequência esperada de destacamento, bem como seus valores mínimos e máximos baseados no desvio padrão dos diâmetros das gotas. Para se determinar a menor frequência esperada de destacamento, utiliza-se o valor médio do diâmetro das gotas acrescido do seu desvio padrão. Para se determinar a maior frequência esperada de destacamento, utiliza-se o valor médio do diâmetro das gotas subtraído de seu desvio padrão. Para a estimativa das massas das gotas (M_g) adotou-se uma densidade de 2303 kg/m^3 para o alumínio líquido. Observa-se ser coerentes os valores medidos com o programa “Vídeo Analisador”, quando comparados aos valores calculados. Tal como no Capítulo 5, esta frequência esperada (f_{ESP}) de transferência foi calculada utilizando-se o diâmetro médio das gotas, a frequência máxima utilizando-se o diâmetro médio subtraído de seu desvio padrão e a frequência mínima

utilizando-se o diâmetro médio adicionado do desvio padrão. Em todas as soldagens os valores medidos de frequência de destacamento estão próximos do valor esperado, destacadamente para a soldagem com 180 A. Valores de frequência medida menores que os calculados sugerem que a maioria das gotas é maior que a média. Salienta-se que não se foi considerada a evaporação do eletrodo. Este comportamento é considerado coerente, como foi observado para a soldagem com aço.

Tabela 6.5 – Relação entre a frequência esperada de destacamento e a frequência real.

I (A)	DBCP (mm)	Va (kg/s)	d (mm)	Mg (kg)	f_{ESP} (Hz)	Max (Hz)	Min (Hz)	f (Hz)
130	18	2,79E-04	1,4	3,3E-06	84	141	54	77
	22	2,79E-04	1,4	3,3E-06	84	148	52	78
180	18	3,80E-04	1,2	1,9E-06	202	289	147	204
	22	3,80E-04	1,1	1,8E-06	213	257	178	210
230	18	4,56E-04	1,0	1,4E-06	336	428	269	272
	22	4,56E-04	1,0	1,4E-06	336	402	284	290

6.3 Medição das características cinemáticas das gotas

A medição das características cinemáticas das gotas foi realizada seguindo a metodologia apontada, avaliada e utilizada nos capítulos anteriores. As figuras 6.3 a 6.8 mostram as trajetórias levantadas nos experimentos. Observa-se que só houve dispersão nas gotas para a corrente de 130 A (Figura 6.3 e Figura 6.4), ou seja, no modo de transferência globular, onde se espera que o movimento das gotas seja mais susceptível à eventual turbulência do jato de plasma.

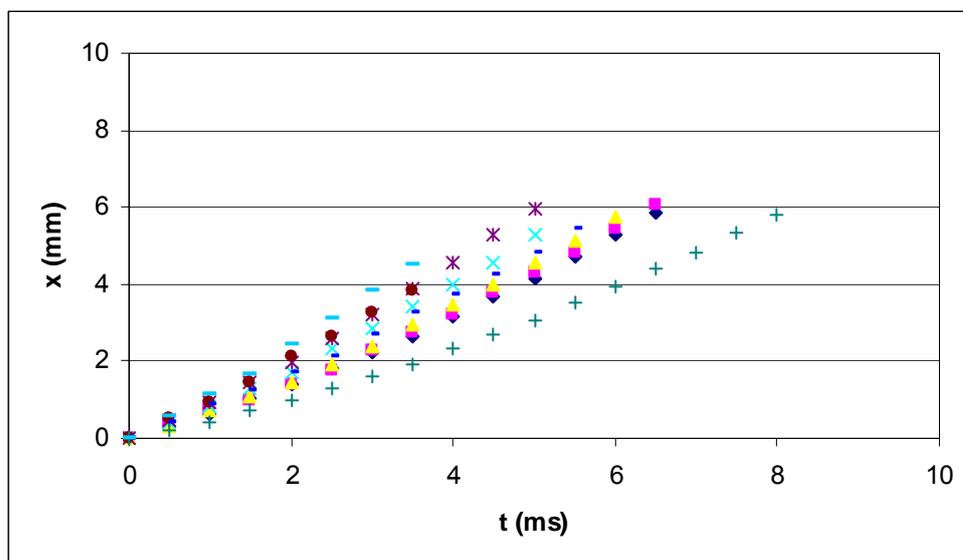


Figura 6.3 – Curvas posição x tempo. I = 130 A; DBCP = 18 mm. ($a = 6,9$ mm)

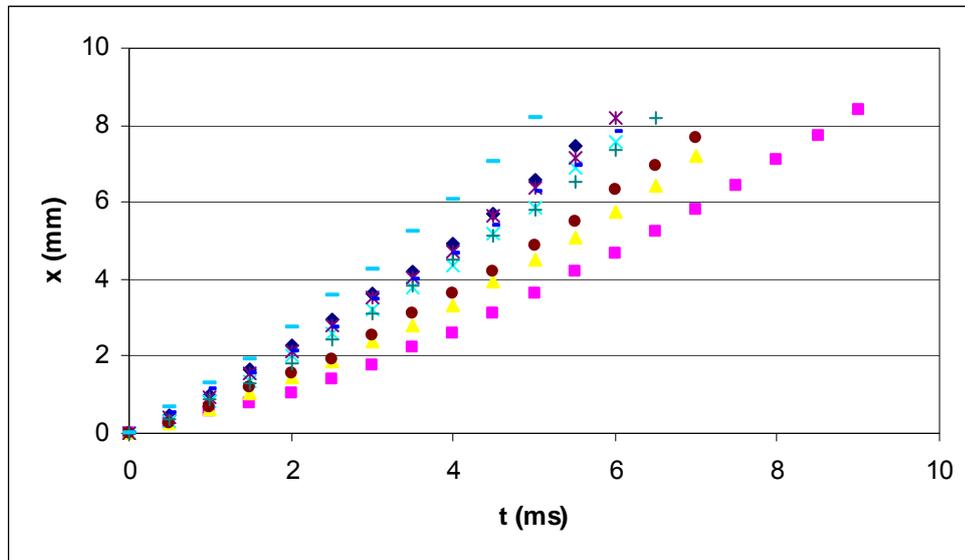


Figura 6.4 – Curvas posição x tempo. $I = 130$ A; DBCP = 22 mm. ($a = 8$ mm)

Nas soldagens com modo de transferência goticular, a 180 e 230 A observa-se uma razoável sobreposição das trajetórias das gotas, caracterizando um comportamento diferente do observado nas trajetórias das gotas de aço, onde se percebeu que cada gota é criada e se desloca no plasma de um modo particular, mesmo que em média, sob as mesmas condições. Com eletrodo de alumínio há uma homogeneidade maior neste comportamento, que pode ser resultado da menor inércia das gotas e da menor sensibilidade do alumínio ao efeito “pinch”.

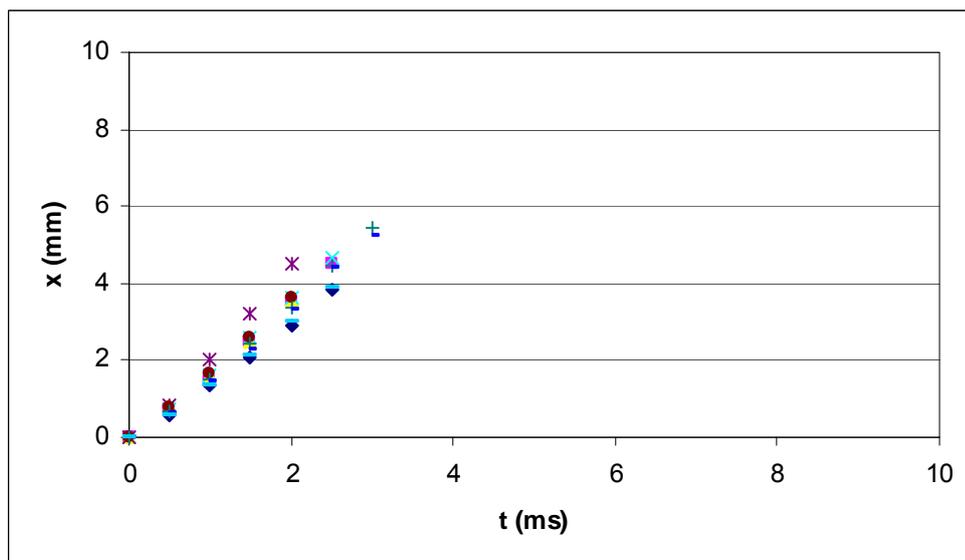


Figura 6.5 – Curvas posição x tempo. $I = 180$ A; DBCP = 18 mm. ($a = 5,5$ mm)

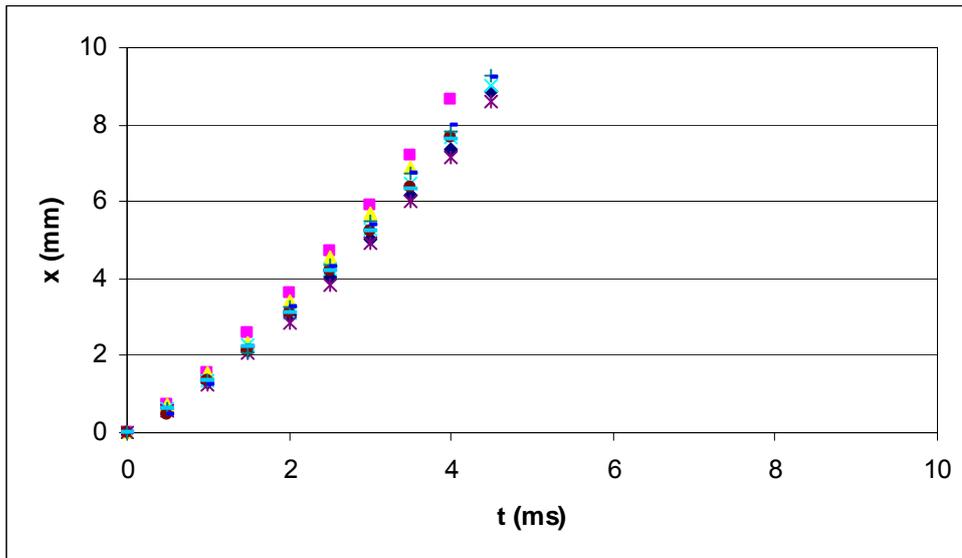


Figura 6.6 – Curvas posição x tempo. $I = 180$ A; DBCP = 22 mm. ($a = 9,4$ mm)

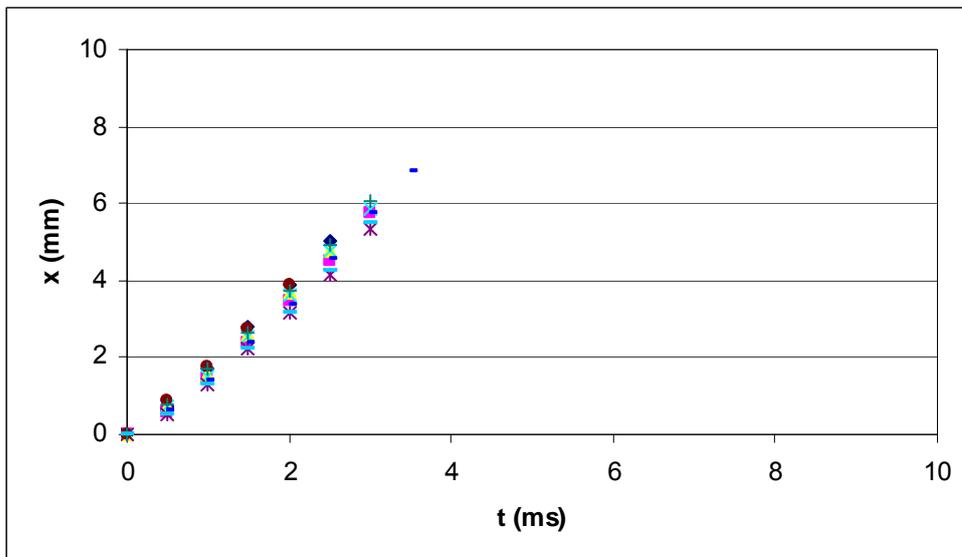


Figura 6.7 – Curvas posição x tempo. $I = 230$ A; DBCP = 18 mm. ($a = 7,1$ mm)

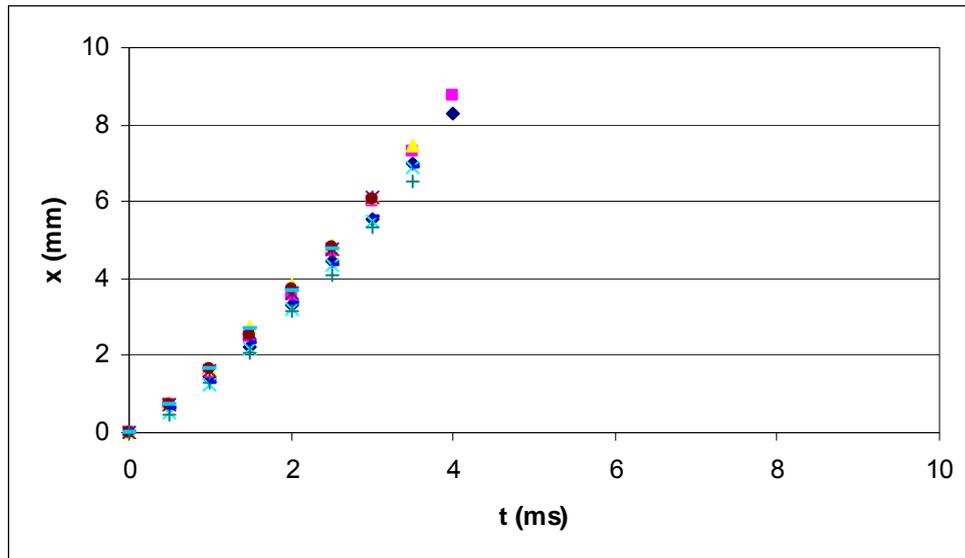


Figura 6.8 – Curvas posição x tempo. $I = 230$ A; DBCP = 22 mm. ($a = 7,7$ mm)

6.3.1. Avaliação da velocidade de chegada das gotas à poça de fusão

A Tabela 6.6 apresenta os valores medidos de velocidade de chegada das gotas à poça de fusão (V_{CHE}) na soldagem com alumínio, bem como seus valores médios e o resultado da análise de variância, agrupados pela corrente de soldagem. Diferentemente dos resultados apresentados na soldagem com aço, observa-se que o comprimento do arco afeta significativamente V_{CHE} em todas as correntes adotadas. A Tabela 6.7 apresenta essas medidas agrupadas pelo comprimento do arco, onde se pode observar que, também similarmente à soldagem com aço, a corrente de soldagem afeta V_{CHE} nos dois comprimentos de arco utilizados. Nessas tabelas, os valores são bem superiores aos encontrados até então, variando de 0,91 a 2,98 m/s, já nas soldagens com aço, observou-se valores de 0,20 a 2,00 m/s. A menor inércia das gotas de alumínio, bem como uma maior velocidade de alimentação do eletrodo podem ter contribuído para esse resultado, bem como a ausência de reações químicas entre a gota e o arco, agora composto inteiramente de gás inerte. A menor corrente utilizada também proporciona uma aceleração menor no jato de plasma, o que reduziria a velocidade das gotas, o que não foi observado. Uma menor ocorrência de reações na conexão catódica também pode ter contribuído para que fossem mais uniformes os resultados, quando comparados com aqueles observados nas soldagens com aço.

A Figura 6.9 apresenta o efeito de I e do comprimento do arco sobre a velocidade de chegada das gotas à poça de fusão na soldagem com alumínio. Tal como na soldagem com aço, para arco curto, vê-se que o aumento de V_{CHE} é mais crítico quando da mudança no modo de transferência metálica que no aumento da corrente de soldagem nas soldagens no modo goticular. Observa-se que o efeito do comprimento do arco sobre V_{CHE} é mais pronunciado na

corrente de 180 A e que o valor de V_{CHE} não aumenta com a corrente na soldagem goticular, como se poderia supor baseado nos resultados do Capítulo 5, para arcos médios. Vale salientar neste caso que o comprimento do arco para a soldagem com 180 A é razoavelmente superior e que essa diferença é considerável, dada à magnitude da aceleração dessas gotas, o que será mostrado adiante. A tendência que se verifica nesses resultados é que V_{CHE} aumenta realmente com o comprimento do arco, pois nessa DBCP de 22 mm, a soldagem com 180 A tem arco medido de 9,4 mm, contra 7,7 da soldagem com 230 A, justificando o maior valor de V_{CHE} a uma menor corrente. Caso o arco à soldagem com 180 A de DBCP de 22 mm fosse do mesmo comprimento, 7,7 mm, e fossem extrapoladas suas curvas posição versus tempo para esse comprimento de arco, a velocidade de chegada média nesse experimento seria de 2,45 m/s, portanto menor que à soldagem com 230 A e DBCP 22 mm, reiterando que para um mesmo comprimento de arco, uma maior corrente implicará numa maior velocidade de chegada das gotas à poça de fusão, conforme observado no Capítulo 5. Mais adiante há de se observar que a aceleração média das gotas é maior a 230 A, mas uma redução no comprimento de sua trajetória (comprimento do arco) reduziu criticamente o tempo em que as gotas sofreram essa aceleração, resultando numa V_{CHE} menor. Outra possibilidade é a maior turbulência próxima à poça de fusão gerada por evaporação da poça e geração de plasma próxima à conexão catódica, que seriam incrementados pelo aumento da corrente de soldagem, como fora levantado para o aço, mas que teriam um efeito secundário frente à redução do comprimento do arco. Assim, observa-se que na soldagem com alumínio o comprimento do arco é mais crítico que a corrente de soldagem na concorrência de fenômenos governantes da transferência metálica goticular.

Tabela 6.6 – Velocidade de chegada: medidas, médias e resultado da ANOVA (V_{CHE} – I x Comprimento de arco).

Corrente (A)	130		180		230	
	Curto	Médio	Curto	Médio	Curto	Médio
Medidas (m/s)	1,11	1,77	1,87	2,94	2,21	2,62
	1,28	1,36	1,94	2,84	2,49	2,98
	1,23	1,59	2,21	2,41	2,18	2,71
	1,40	1,36	2,13	2,77	2,18	2,77
	1,31	2,01	2,63	2,84	2,36	2,71
	1,16	1,45	2,12	2,57	2,21	2,44
	0,91	1,61	2,01	2,87	2,27	2,42
	1,20	1,78	1,71	2,51	2,17	2,64
	1,33	2,25	1,76	2,61	2,40	2,17
Média (m/s)	1,21	1,68	2,04	2,70	2,27	2,60
Nível de significância	p < 0,01		p < 0,01		p < 0,01	

Tabela 6.7 – Velocidade de chegada: medidas, médias e resultado da ANOVA (V_{CHE} – comprimento de arco x I)

Arco	Curto			Médio			
	Corrente	130	180	230	130	180	230
Medidas (m/s)		1,11	1,87	2,21	1,77	2,94	2,62
		1,28	1,94	2,49	1,36	2,84	2,98
		1,23	2,21	2,18	1,59	2,41	2,71
		1,40	2,13	2,18	1,36	2,77	2,77
		1,31	2,63	2,36	2,01	2,84	2,71
		1,16	2,12	2,21	1,45	2,57	2,44
		0,91	2,01	2,27	1,61	2,87	2,42
		1,20	1,71	2,17	1,78	2,51	2,64
		1,33	1,76	2,40	2,25	2,61	2,17
Média (m/s)	1,21	2,04	2,27	1,68	2,70	2,60	
Significância	p < 0,01			p < 0,01			

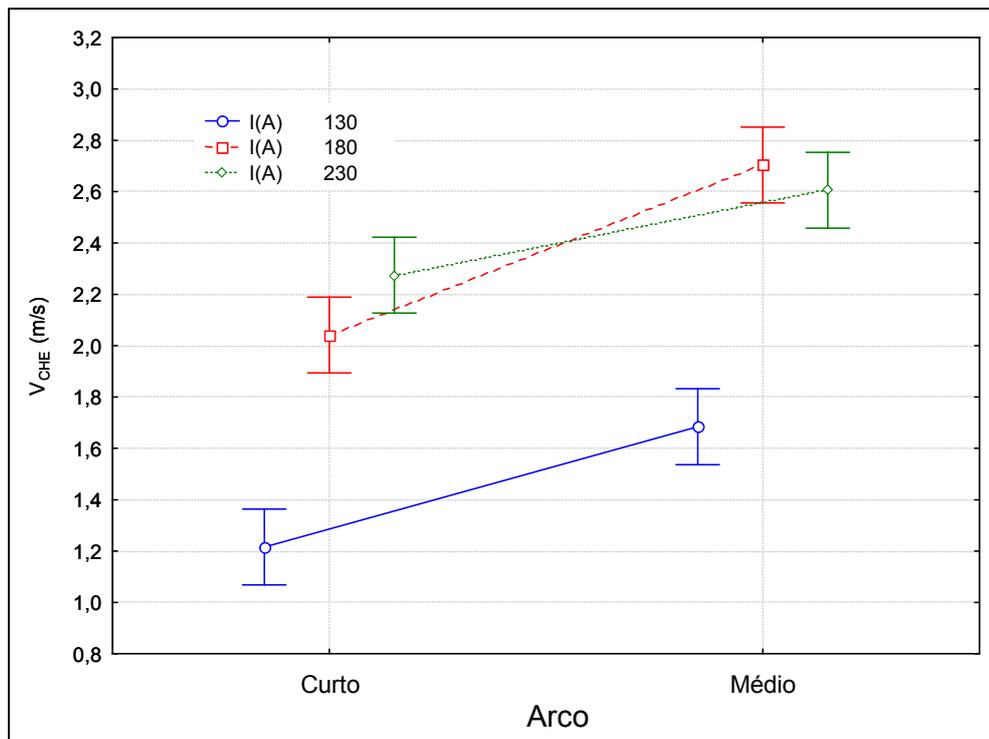


Figura 6.9 – Efeito de I do comprimento de arco sobre V_{CHE} .

6.3.2. A aceleração das gotas durante a trajetória

As Tabelas 6.8 e 6.9 apresentam os valores obtidos de aceleração média das gotas durante sua trajetória. Esses valores, tal como os valores de V_{CHE} , também são bem superiores aos observados nos experimentos com aço, sendo atribuídos à reduzida inércia dessas gotas de alumínio, estando mais suscetíveis à ação da força de arraste do jato de plasma. Observa-se na Tabela 6.8 que somente à corrente de 130 A houve influencia do comprimento do arco

na A_{MED} , tal como observou-se na soldagem de aço, e que foi atribuído, naqueles experimentos, a um comportamento errático dessa variável. Na Tabela 6.9 observa-se que I influencia A_{MED} nos dois comprimentos de arco utilizados.

Na Figura 6.10 vê-se o efeito de I e do comprimento de arco sobre A_{MED} . Diferentemente da que foi obtida nos experimentos com aço, esta figura apresenta menores desvios-padrão, e um comportamento uniforme da variável nas condições aplicadas. Observa-se também que a variação de A_{MED} com o aumento da corrente é mais pronunciada quando associada à mudança no modo de transferência metálica que no aumento de 180 para 230 A, no modo goticular. Diferentemente dos experimentos com aço, não foi observada nenhuma tendência de frenagem de gotas, nem de aumento de A_{MED} com o comprimento do arco na corrente mais elevada, também devido ao fato de a diferença entre os comprimentos de arco obtidos não ser tão expressiva.

Tabela 6.8 – Aceleração média: medidas, médias e resultado da ANOVA (V_{CHE} – I x Comprimento do arco).

Corrente (A)	130		180		230	
	Curto	Médio	Curto	Médio	Curto	Médio
Medidas (m/s) ²	138,8	129,4	521,4	350,8	337,0	434,0
	124,0	110,4	294,2	360,4	443,6	401,0
	80,8	121,6	375,8	365,0	404,4	311,2
	110,6	136,8	369,6	331,4	349,6	500,4
	76,0	139,6	329,2	364,8	418,8	446,2
	102,0	127,6	357,4	351,8	331,8	384,0
	99,2	119,2	270,8	347,2	315,0	441,8
	89,4	118,0	272,8	331,8	359,0	434,8
	74,4	179,8	275,0	335,0	487,6	302,6
Média (m/s)²	99,5	131,4	340,7	348,7	383,0	406,2
Nível de significância	p < 0,01		p = 0,77		p = 0,43	

Tabela 6.9 – Aceleração média: medidas, médias e resultado da ANOVA (V_{CHE} – Comprimento do arco x I).

Arco	Curto			Médio		
	Corrente	130	180	230	130	180
Medidas (m/s) ²	138,8	521,4	337,0	129,4	350,8	434,0
	124,0	294,2	443,6	110,4	360,4	401,0
	80,8	375,8	404,4	121,6	365,0	311,2
	110,6	369,6	349,6	136,8	331,4	500,4
	76,0	329,2	418,8	139,6	364,8	446,2
	102,0	357,4	331,8	127,6	351,8	384,0
	99,2	270,8	315,0	119,2	347,2	441,8
	89,4	272,8	359,0	118,0	331,8	434,8
	74,4	275,0	487,6	179,8	335,0	302,6
Média (m/s)²	99,5	340,7	383,0	131,4	348,7	406,2
Nível de significância	p < 0,01			p < 0,01		

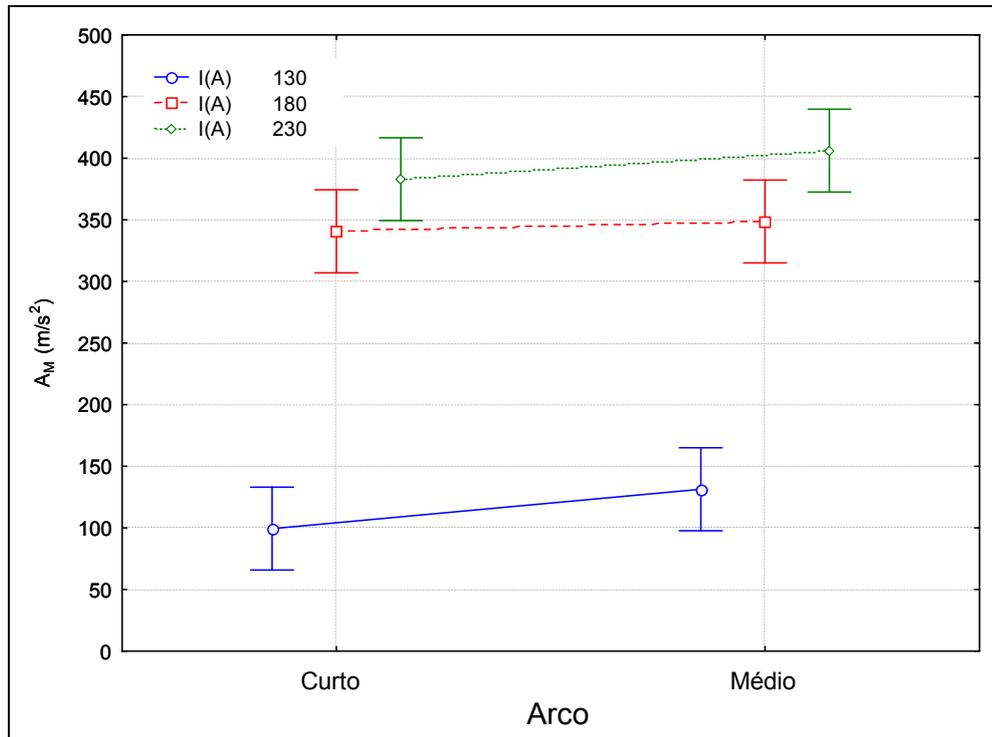


Figura 6.10 – Efeito de I e do comprimento do arco sobre A_{MED} .

6.4 Caracterização geométrica dos cordões de solda

A Tabela 6.10 apresenta os parâmetros geométricos dos cordões de solda, onde P é a penetração da solda, R é o reforço, L é a largura, A_T é a área total do cordão de solda, que compreende A_{AM} , sua área adicionada medida e A_F , área fundida, ilustrados pela Tabela 6.11. Diferente do observado nas soldagens com aço, e apesar dos valores substancialmente maiores de velocidade de chegada das gotas à poça de fusão, estas macros não apresentaram a penetração profunda e estreita comum em MIG/MAG e anteriormente atribuída ao momentum das gotas denominada de “finger-like”. Salienta-se que foi mantida constante a relação entre V_a e V_s , o que resultaria numa energia de soldagem aproximada em todos os experimentos.

A Tabela 6.12 traz os níveis de significância (p) obtidos pela análise de variância dos respectivos parâmetros. A corrente mostrou influenciar diretamente a penetração, a área fundida e a largura do cordão de solda, tendo influência menos expressiva sobre o reforço. Mesmo com aproximadamente a mesma energia de soldagem, fica evidente que há um melhor aproveitamento do calor quando se passa da transferência globular para a goticular. Mas deve-se chamar a atenção para o fato de que não se pode ligar esse efeito diretamente com a transferência, pois há claramente uma componente térmica (quanto maior a corrente parece que fica mais difícil dissipar o calor pelas laterais da chapa). Observa-se que a largura tende a

aumentar, apesar da mesma relação V_a/V_s , o que não deveria encontrar justificativa no modo de transferência e sim numa provável atuação da componente térmica citada. Observa-se que a penetração da solda é influenciada significativamente apenas pela corrente de soldagem, como mostrado na Figura 6.11, de forma similar nos dois comprimentos de arco adotados. O comprimento de arco afeta o reforço do cordão de solda, tendo este sido reduzido com o aumento do comprimento do arco, como mostra a Figura 6.12. Nesta figura, observa-se que ao menor comprimento de arco o reforço do cordão não se altera com a mudança do modo de transferência metálica, apenas se observa redução do reforço com o aumento da corrente de soldagem no modo goticular. Já no maior comprimento de arco uma redução gradual do reforço é observada com o aumento da corrente, fato complementado pelo aumento da largura do cordão, como pode ser visto na Figura 6.13. Observa-se nessa Figura 6.13 que o aumento da largura do cordão de solda com o comprimento de arco é mais pronunciado para a corrente de 230 A. Um fluxo de calor não aliviado pelas bordas da chapa nessa corrente, como já citado, pode ter ocasionado uma poça de fusão maior, um maior rendimento de fusão pela contenção da transferência deste calor. A Figura 6.14 mostra a área adicionada dos cordões de solda, que segundo o planejamento experimental deveria permanecer constante. O comportamento desta variável não revela nenhuma tendência clara, mas apresentou uma redução significativa com o aumento do comprimento do arco para a corrente de 180 A, o que pode estar relacionado a eventuais erros de medição, e até a alguma redução do diâmetro do eletrodo no trecho da bobina que foi utilizado. A área fundida (Figura 6.15), por sua vez, foi afetada pela corrente e pelo comprimento do arco, bem como pela interação entre as duas variáveis. Tal como ocorreu na soldagem com aço, a área fundida foi afetada pela corrente de soldagem, e só apresentou variação marcante com o comprimento de arco para a corrente de 230 A. Para as demais correntes, esta variável mostrou-se indiferente à mudança de arco curto para arco médio.

Salienta-se mais uma vez que foi mantida a relação V_a/V_s (ou I/V_s) constante nos experimentos, e que houve aumento na penetração da solda com o aumento da corrente de soldagem, mesmo tendo sido mantida aproximada a energia imposta na soldagem em cada comprimento de arco.

Tabela 6.10 – Geometria dos cordões de solda: medidas realizadas.

I (A)	Arco	P (mm)	R (mm)	L (mm)	A _T (mm ²)	A _{AM} (mm ²)	A _F (mm ²)
130		1,486	2,416	8,427	21,790	15,652	6,138
		1,897	2,291	8,138	22,308	14,713	7,595
		1,770	2,446	8,357	25,920	16,547	9,373
180	Curto	2,282	2,513	9,384	31,564	17,332	14,232
		2,600	2,262	9,477	29,478	16,592	12,886
		2,568	2,388	9,346	30,981	16,517	14,464
230		3,424	1,948	9,626	34,571	14,883	19,688
		3,400	2,362	9,418	36,725	16,388	20,337
		3,230	2,228	9,696	35,160	15,818	19,342
130		1,933	2,295	8,984	25,354	15,798	9,56
		1,839	2,170	8,439	25,256	15,567	9,69
		1,680	2,141	8,552	23,299	15,505	7,79
180	Médio	2,663	2,014	10,650	28,950	13,681	15,27
		2,437	2,011	10,232	28,110	13,654	14,46
		2,473	2,138	10,086	27,973	15,609	12,36
230		3,650	2,012	11,644	45,614	15,840	29,77
		3,647	1,853	11,605	43,585	17,611	25,97
		3,552	2,041	11,210	43,991	16,375	27,62

Tabela 6.11 – Geometrias obtidas dos cordões dispostas em função do comprimento do arco e da corrente de soldagem.

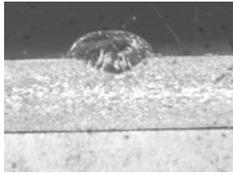
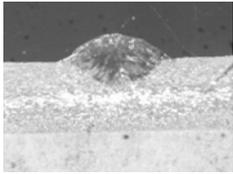
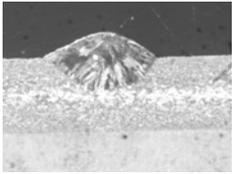
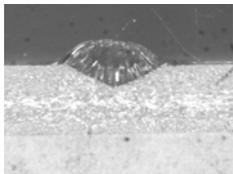
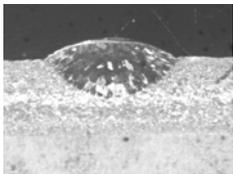
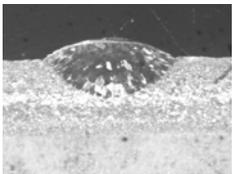
		I (A)		
		130	180	230
Arco	Curto			
	Médio			

Tabela 6.12 – Níveis de significância “p” obtidos pela ANOVA.

Fatores	Variáveis					
	P	R	L	A _T	A _{AM}	A _F
I	0,00	0,03	0,00	0,00	0,40	0,00
Comprimento do arco	0,07	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00
I x Comprimento do arco	0,39	0,54	0,00	0,00	0,01	0,00

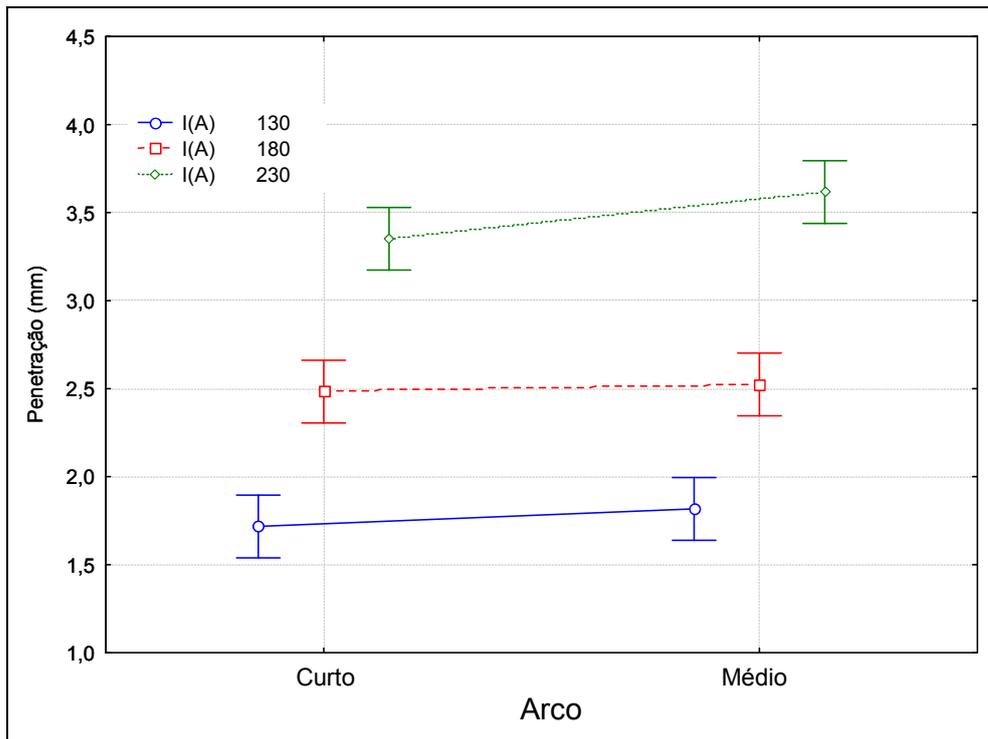


Figura 6.11 – Efeito de I e do comprimento do arco sobre a penetração.

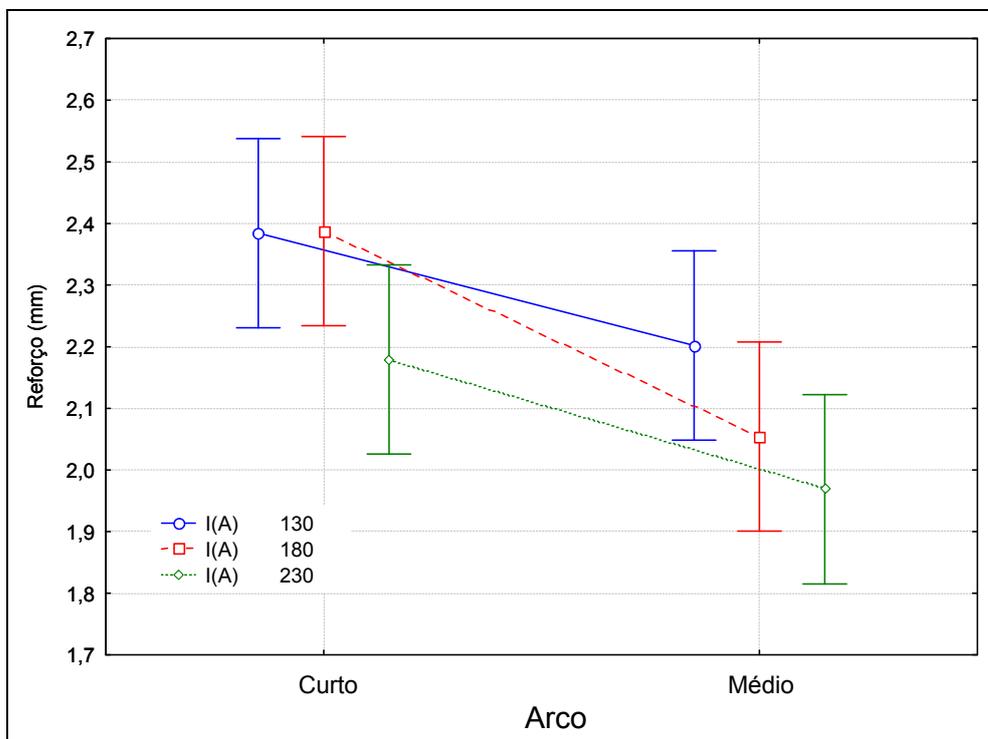


Figura 6.12 – Efeito de I do comprimento do arco sobre o reforço.

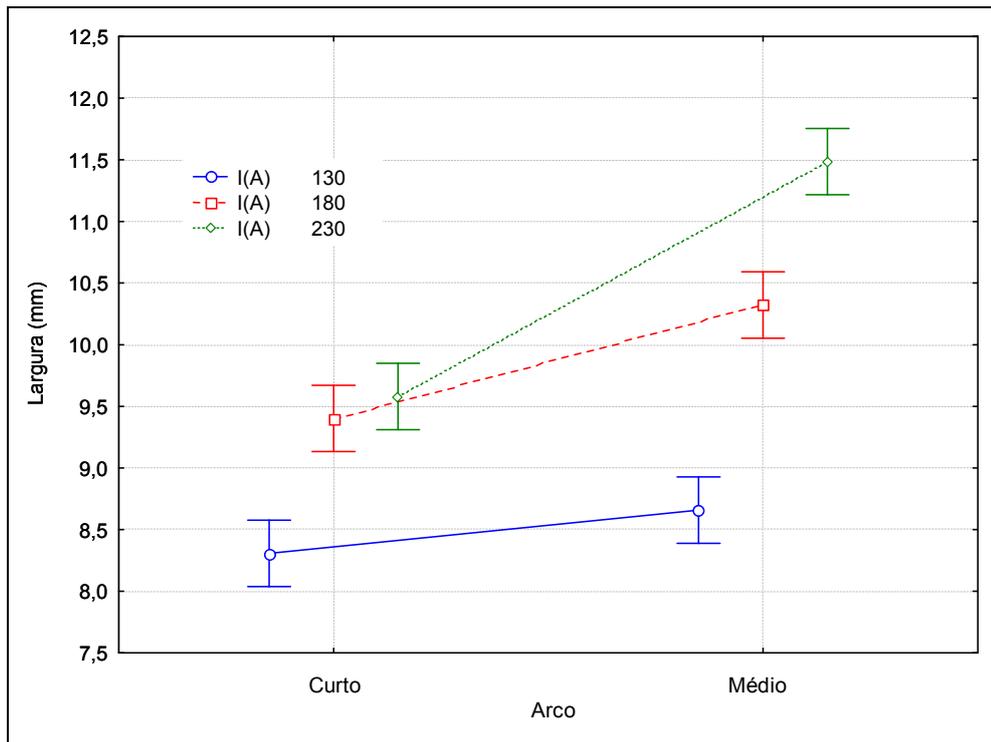


Figura 6.13 – Efeito de I do comprimento do arco sobre a largura.

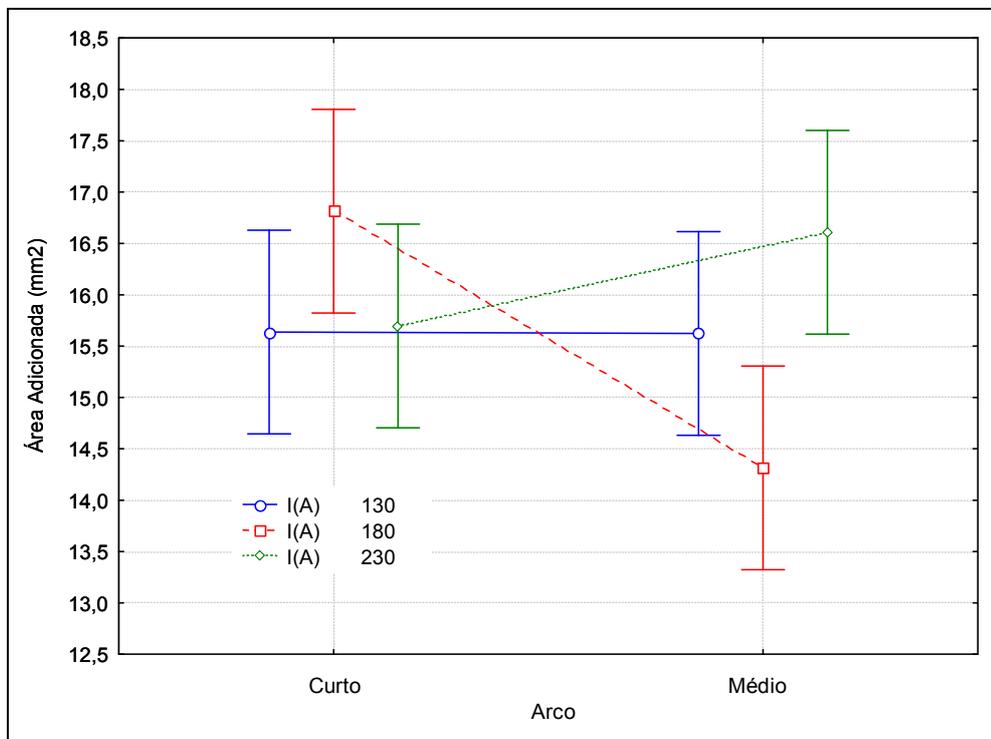


Figura 6.14 – Efeito de I do comprimento do arco sobre a área adicionada.

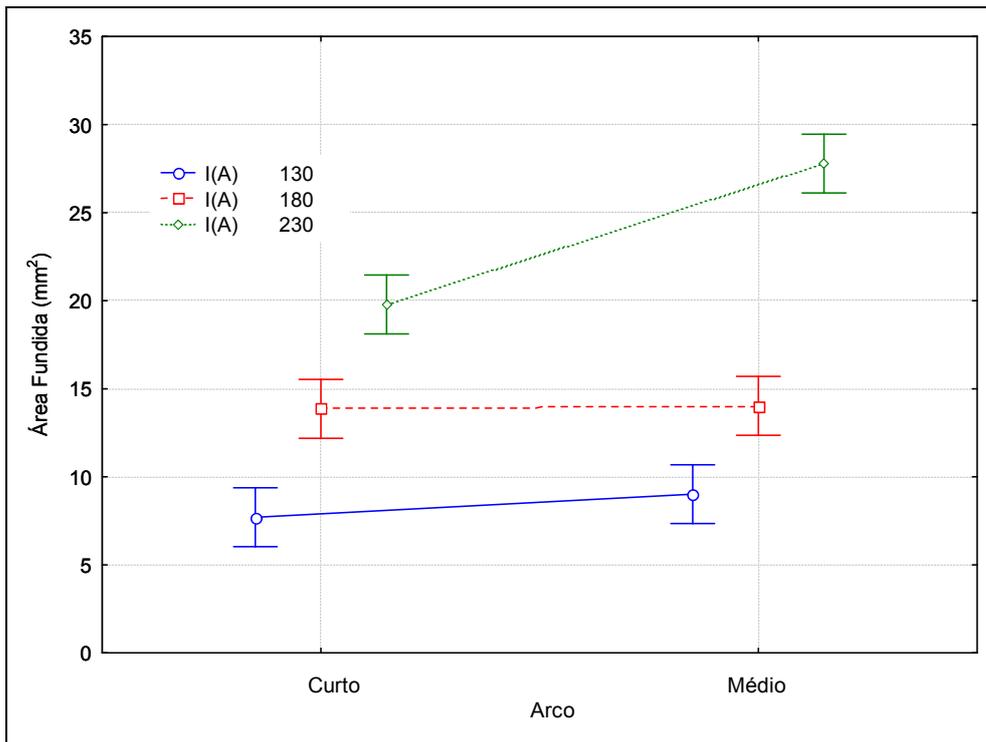


Figura 6.15 – Efeito de I do comprimento do arco sobre a área fundida.

6.5 Quantidade de Movimento Efetiva das gotas em transferência

A Tabela 6.13 apresenta as características geométricas das gotas em transferência, bem como a Quantidade de Movimento (Q), a Taxa de Quantidade de Movimento (T) e a Quantidade de Movimento Efetiva (Qe) das gotas, obtidas pelas equações 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente. Tal como ocorreu na soldagem com aço, Q caiu enquanto T e Qe cresceram com o aumento da corrente na mudança do modo globular para goticular de transferência metálica e tendem a cair com o aumento da corrente de soldagem no modo goticular, exceto T. O aumento do comprimento do arco influenciou as variáveis dinâmicas Q, T e Qe de forma similar, também aumentando seu valor. Observa-se que essas tendências são idênticas às apresentadas na soldagem com aço.

O efeito das variáveis dinâmicas Q, T e Qe sobre a penetração das soldas é mostrado respectivamente na Figura 6.16, Figura 6.17 e Figura 6.18. Tal como na soldagem com eletrodo de aço, não é muito clara a influência das variáveis dinâmicas na penetração da solda, e para tentar explicitar um pouco melhor a influência dos diversos fatores envolvidos, normalizou-se os parâmetros I, a e Qe, conforme a Tabela 6.14. Procedeu-se uma regressão múltipla linear com estes parâmetros e a penetração da solda, cujo resultado é a Equação 6.1, na qual se pode observar que a quantidade de movimento efetiva tem influência menor que a corrente e comprimento do arco na composição da penetração da solda de alumínio. A Tabela

6.14 ainda apresenta os valores de penetração calculados com esta equação e os valores observados nos experimentos.

A Figura 6.19 apresenta os valores preditos versus os observados de penetração destes experimentos. O coeficiente de correlação obtido foi de 0,96, melhor do que o obtido para as soldas de aço, mas também de baixa confiabilidade devido a Q_e ser de origem experimental, e de natureza não ortogonal. Fica claro que o peso de Q_e se aproxima do peso das outras variáveis, e que também neste caso, esta é a característica citada de menor influência no fenômeno da formação da penetração.

$$P = 2,588 + 0,890 \cdot I + 0,081 \cdot a - 0,068 \cdot Q_e$$

6.1

Tabela 6.13 – Características das transferências e características dinâmicas das gotas.

I (A)	DBCP (mm)	a (mm)	d (mm)	f (Hz)	V_{CHE} (m/s)	$Q \times 10^{-5}$ (kg.m.s ⁻¹)	$T \times 10^{-4}$ (N)	Q_e (kg/s)
130	18	6,9	1,4	77	1,22	0,402	10,08	0,05
	22	8,0	1,4	78	1,68	0,557	14,15	0,07
180	18	5,5	1,2	204	2,04	0,384	25,52	0,09
	22	9,4	1,1	210	2,70	0,483	33,01	0,12
230	18	7,1	1,0	272	2,27	0,308	27,32	0,08
	22	7,7	1,0	290	2,61	0,353	33,36	0,10

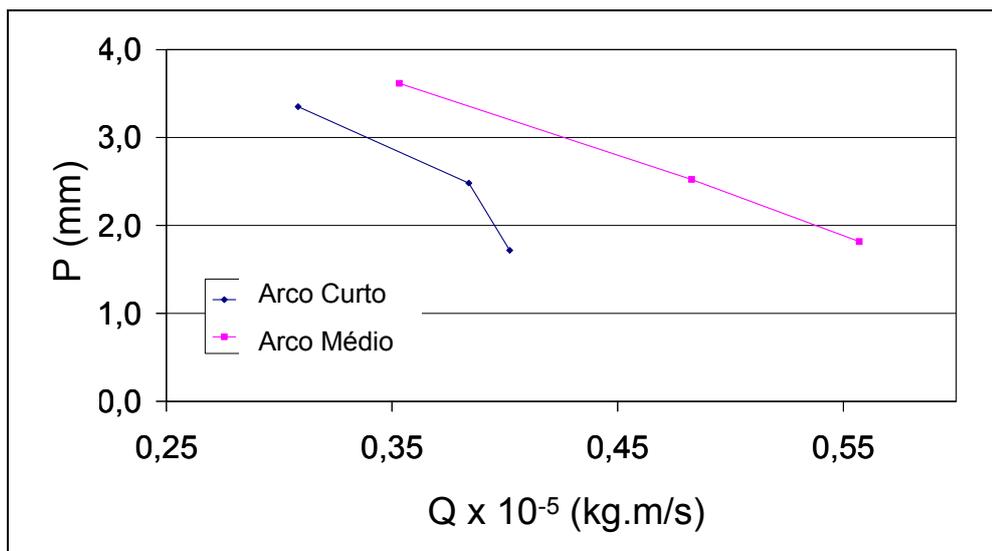


Figura 6.16 – Efeito da Quantidade de Movimento das gotas impingindo na poça de fusão sobre a penetração.

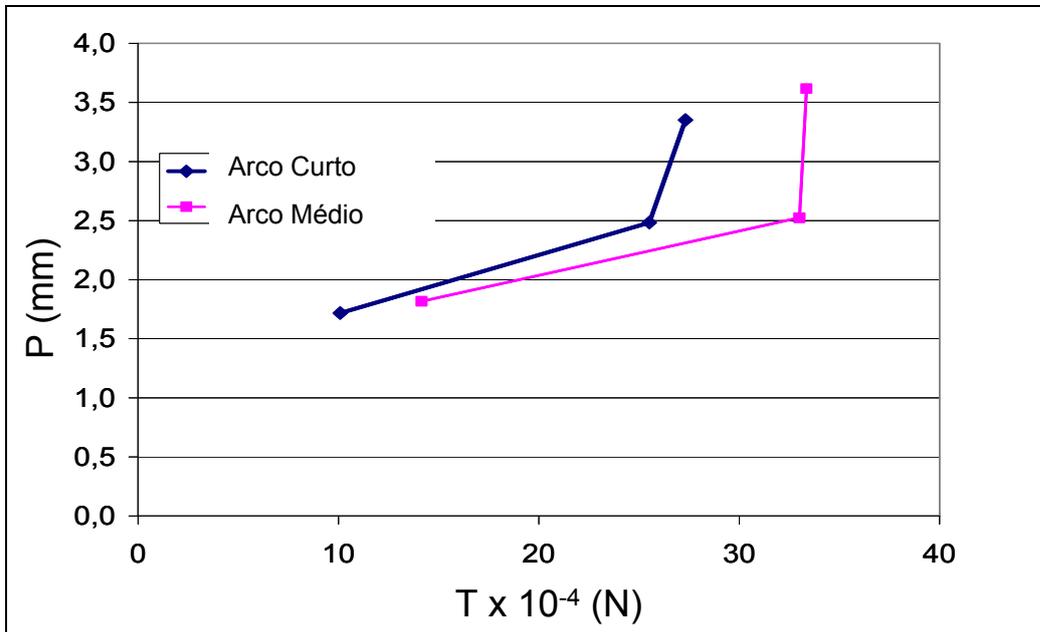


Figura 6.17 – Efeito da Taxa de Quantidade de Movimento das gotas sobre a penetração do cordão de solda.

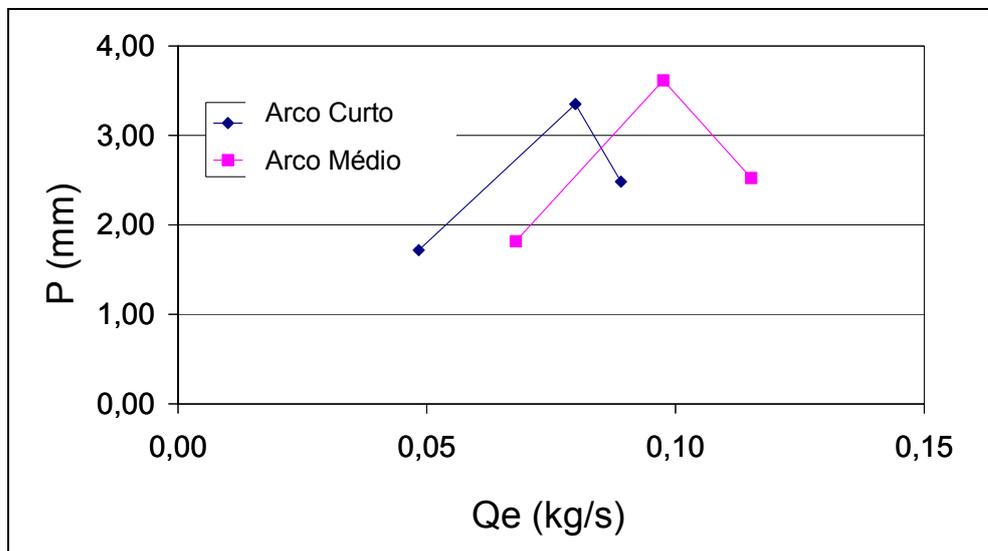


Figura 6.18 – Efeito da Quantidade de Movimento efetiva das gotas impingindo na poça de fusão sobre a penetração.

Tabela 6.14 – Valores normalizados de I, a e Qe; valores preditos e observados de P.

I (A)	a (mm)	T (N)	Q (kg.m.s ⁻¹)	Qe (kg/s)	P pela Eq 6.1 (mm)	P (mm)
-1	-0,3	-1,0	-0,25	-1,00	1,74	1,49
-1	-0,3	-1,0	-0,25	-1,00	1,74	1,90
-1	-0,3	-1,0	-0,25	-1,00	1,74	1,77
-1	0,3	-0,7	1,00	-0,42	1,75	1,93
-1	0,3	-0,7	1,00	-0,42	1,75	1,84
-1	0,3	-0,7	1,00	-0,42	1,75	1,68
0	-1,0	0,3	-0,39	0,22	2,49	2,28
0	-1,0	0,3	-0,39	0,22	2,49	2,60
0	-1,0	0,3	-0,39	0,22	2,49	2,57
0	1,0	1,0	0,40	1,00	2,60	2,66
0	1,0	1,0	0,40	1,00	2,60	2,44
0	1,0	1,0	0,40	1,00	2,60	2,47
1	-0,2	0,5	-1,00	-0,06	3,47	3,42
1	-0,2	0,5	-1,00	-0,06	3,47	3,40
1	-0,2	0,5	-1,00	-0,06	3,47	3,23
1	0,1	1,0	-0,64	0,47	3,46	3,65
1	0,1	1,0	-0,64	0,47	3,46	3,65
1	0,1	1,0	-0,64	0,47	3,46	3,55

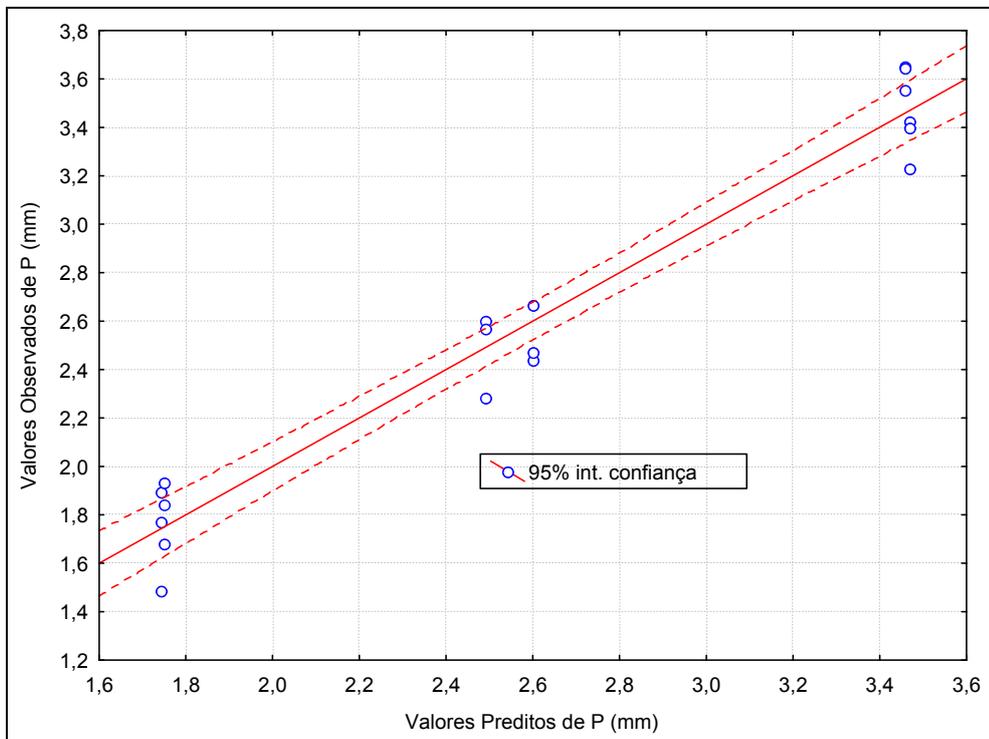


Figura 6.19 – Penetração predita pela equação 6.1 versus valores experimentais ($R^2 = 0,96$).

6.6 Conclusões parciais

Tendo em vista as condições empregadas neste capítulo (soldagem com eletrodo de alumínio, posição plana, fonte em corrente constante, etc.) conclui-se:

6.6.1. Relacionando os parâmetros de entrada (corrente e comprimento de arco) com as características cinemáticas:

- A corrente de soldagem e o comprimento do arco de soldagem influenciam a velocidade de chegada da gota à poça de fusão: quanto maiores, maior a velocidade de chegada;
- O efeito da corrente de soldagem sobre a velocidade de chegada da gota à poça de fusão é mais pronunciado quando se passa de um corrente com transferência globular para uma corrente com transferência goticular;
- O efeito do comprimento do arco sobre a velocidade de chegada da gota à poça de fusão é pronunciado independentemente do tipo de transferência.
- A corrente de soldagem e o comprimento do arco influenciam a aceleração média das gotas durante a transferência: Quanto maiores, maior a aceleração;
- O comprimento do arco só influencia a aceleração média das gotas durante a transferência no modo globular;

6.6.2. Relacionando os parâmetros de entrada (corrente e comprimento de arco) com as características dinâmicas:

- O aumento da corrente de soldagem aumenta a quantidade de movimento efetiva impingida pelas gotas na poça de fusão apenas quando se passa de transferência globular para goticular;
- O aumento do comprimento do arco aumenta a quantidade de movimento efetiva das gotas independentemente do modo de transferência.

6.6.3. Relacionando os parâmetros de entrada (corrente e comprimento do arco) com a geometria da solda

- A corrente de soldagem aumenta a penetração do cordão de solda e a sua área fundida, bem como modifica a convexidade do cordão de solda, mesmo mantendo-se a mesma área adicionada (aproximadamente mesmo calor imposto);

- O aumento do comprimento do arco diminui o reforço e aumenta a largura do cordão de solda e sua área fundida, mesmo mantendo-se a mesma área adicionada (aproximadamente mesmo calor imposto).

6.6.4. Relacionando as características dinâmicas e a geometria da solda

- A quantidade de movimento efetiva das gotas aumenta a penetração da solda, sobretudo na mudança de modo de transferência metálica de globular para goticular;
- A quantidade de movimento efetiva afeta a penetração dos cordões de solda de forma menos marcante que a corrente e o comprimento do arco.

Capítulo 7

7. Efeito do gás de proteção sobre as características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica

7.1 Planejamento Experimental

A proposta metodológica deste capítulo é estudar a influência do gás de proteção sobre as características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica de um aço comum ao carbono em dois comprimentos de arco e com transferência metálica goticular (Tabela 7.1). Para esses experimentos, determinou-se a utilização da corrente de soldagem de 250 A, dada sua característica de transferência goticular estável com alongamento mínimo para o dado gás de proteção base Ar + 5%O₂ (ver Capítulo 5). Este experimento foi tomado como referencia, a partir do qual foi feita a crescente adição dos teores de He. Foi escolhido o hélio como componente do gás de proteção devido ao mesmo ser inerte e possuir propriedades notadamente diferentes do argônio, como sua condutividade térmica e seu potencial de ionização. Manteve-se o arame-eletrodo AWS ER70S-6, Ø1,2 mm, e chapas de teste de aço baixo carbono (300 x 38 x 12,7 mm).

Tabela 7.1 – Combinação de DBCP com as composições de gás utilizadas.

<i>DBCP (mm)</i>	<i>Composição do gás de Proteção</i>
18	Ar + 5% O ₂
	Ar + 5% O ₂ + 5% He
	Ar + 5% O ₂ + 10% He
	Ar + 5% O ₂ + 15% He
	Ar + 5% O ₂ + 20% He
	Ar + 5% O ₂ + 25% He
26	Ar + 5% O ₂
	Ar + 5% O ₂ + 5% He
	Ar + 5% O ₂ + 10% He
	Ar + 5% O ₂ + 15% He
	Ar + 5% O ₂ + 20% He
	Ar + 5% O ₂ + 25% He

Para a obtenção das composições de gás pretendidas, utilizou-se um misturador de gases laboratorial, e um analisador de misturas gasosas comercial. O aparato foi avaliado segundo o Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU/009/2005, que está apresentado no Anexo II.

A Tabela 7.2 apresenta os valores regulados de DBCP, V_a , V_s e Gás de proteção, bem como os valores medidos de corrente (I_M) e tensão (U_M) médios durante as soldas. Estas medições foram feitas através de aquisição de dados por 5 s, a uma frequência de 10 kHz com resolução de 12 bits. A Figura 7.1 mostra o comportamento da tensão de soldagem com a mudança do gás de proteção, para os dois comprimentos de arco (duas DBCP) aplicadas.

Tabela 7.2 – Parâmetros de soldagem regulados e monitorados durante a avaliação do efeito do teor de He.

<i>Valores de regulagem</i>			<i>Valores Monitorados</i>		
DBCP (mm)	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	Gás	I_M (A)	U_M (V)
18 (arco curto)	6,9	40,8	Ar + 5% O ₂	249	32,2
			Ar + 5% O ₂ + 5% He	250	31,1
			Ar + 5% O ₂ + 10% He	250	32,5
			Ar + 5% O ₂ + 15% He	249	33,0
			Ar + 5% O ₂ + 20% He	249	32,2
			Ar + 5% O ₂ + 25% He	249	32,3
26 (arco longo)			Ar + 5% O ₂	249	35,1
			Ar + 5% O ₂ + 5% He	249	34,8
			Ar + 5% O ₂ + 10% He	249	36,0
			Ar + 5% O ₂ + 15% He	249	34,8
			Ar + 5% O ₂ + 20% He	249	35,8
			Ar + 5% O ₂ + 25% He	249	36,2

Observa-se na Figura 7.1 que não há tendência clara de algum efeito da composição do gás de proteção sobre a tensão medida nas soldagens. As pequenas oscilações observadas devem ser relativas a pequenas variações nos comprimentos de arco observados.

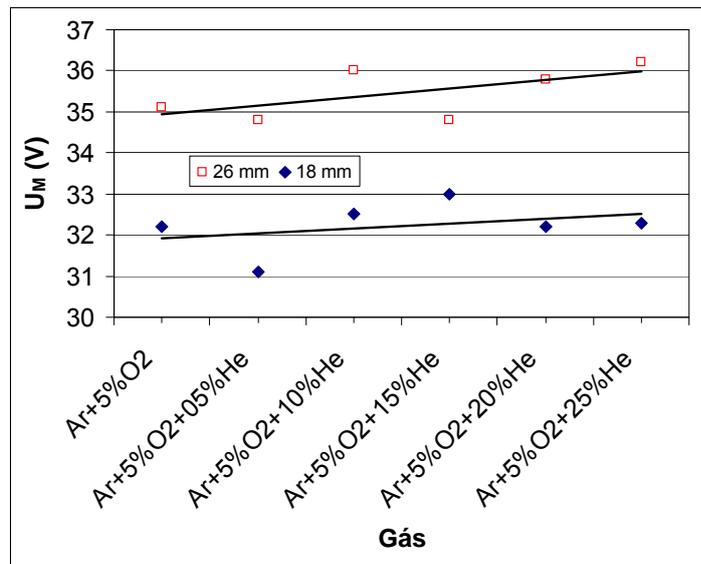


Figura 7.1 – Tensão medida durante as soldagens para cada DBCP e Gás de proteção.

7.2 Caracterização geométrica da transferência metálica

A Tabela 7.3 mostra quadros representativos das filmagens realizadas a 2000 quadros por segundo. Neste capítulo, para cada comprimento de arco foi utilizada uma configuração de ampliação que melhor enquadrasse a transferência metálica, com o intuito de otimizar a avaliação das filmagens pelo Vídeo Analisador da transferência metálica. Observa-se uma homogeneidade do tipo de transferência em cada comprimento de arco utilizado. A Tabela 7.4 e a Figura 7.2 apresentam as características geométricas da transferência medidas. Observa-se que para arcos curtos (DBCP = 18 mm) há uma tendência de redução no comprimento do arco com o aumento do teor de hélio. Olhando especificamente para a diferença entre a soldagem sem He e a soldagem com 5% de He, observa-se que não houve variação no comprimento do arco, muito embora na Figura 7.1 tenha-se observado uma queda de tensão, da ordem de 1,1 V, ou seja, nas mesmas condições a soldagem com He proporcionou uma tensão menor no arco. Este comportamento conduz à idéia de que uma pequena adição de gás hélio pode tornar o arco de soldagem mais “eficiente”, ou seja, com o mesmo comprimento e uma tensão menor. Salienta-se que esta observação é feita com todos os outros parâmetros da soldagem MIG/MAG constantes (corrente; velocidade de alimentação e comprimento energizado do eletrodo; e DBCP). Este comportamento também é observado, muito embora mais tênue, para a soldagem com arcos longos.

Observando os experimentos com arcos curtos, pode-se afirmar que a adição de gás He provoca a redução do comprimento do arco para um valor aproximadamente constante de tensão. Isso contradiz a idéia comentada no parágrafo acima. Inclusive pelo fato de que um arco menor, à mesma DBCP, acarreta um maior comprimento energizado de arame,

aumentando o aproveitamento da energia imposta pela fonte pelo maior efeito Joule, efeito consoante com o anterior, que deveria reduzir a tensão obtida e que pode ser considerado consequência indireta da utilização de He na composição do gás de proteção.

Tabela 7.3 – Filmagens realizadas dispostas em função da DBCP e da composição do Gás de proteção utilizado.

DBCP (mm)	Composição do Gás de Proteção					
	Ar + 5% O ₂	Ar + 5% O ₂ + 5% He	Ar + 5% O ₂ + 10% He	Ar + 5% O ₂ + 15% He	Ar + 5% O ₂ + 20% He	Ar + 5% O ₂ + 25% He
18 (arco curto – 5,9 a 7,8 mm)						
26 (arco longo – 9,6 a 11,7 mm)						

Tabela 7.4 – Características geométricas das transferências metálicas para as diferentes composições do gás de proteção.

Arco	DBCP (mm)	Gás	a (mm)	σa (mm)	f (Hz)	d (mm)	σd (mm)
Curto	18	Ar + 5% O ₂	7,7	0,9	315	1,0	0,2
		Ar + 5% O ₂ + 5% He	7,8	0,6	272	1,1	0,2
		Ar + 5% O ₂ + 10% He	6,9	0,5	252	1,0	0,2
		Ar + 5% O ₂ + 15% He	7,1	0,7	296	1,0	0,2
		Ar + 5% O ₂ + 20% He	6,9	0,8	316	1,0	0,2
		Ar + 5% O ₂ + 25% He	5,9	0,6	256	1,1	0,2
Longo	26	Ar + 5% O ₂	10,9	0,8	204	1,1	0,2
		Ar + 5% O ₂ + 5% He	11,0	0,7	208	1,2	0,3
		Ar + 5% O ₂ + 10% He	10,2	0,8	376	1,0	0,2
		Ar + 5% O ₂ + 15% He	9,6	0,9	316	1,0	0,2
		Ar + 5% O ₂ + 20% He	11,7	0,8	228	1,1	0,2
		Ar + 5% O ₂ + 25% He	11,3	0,8	360	0,9	0,1

O comportamento da frequência de destacamento das gotas (f) não apresentou, de maneira geral, tendência clara nos experimentos realizados. Contudo, na transição entre a soldagem sem He para teores de até 10% de He no gás de proteção evidencia-se uma redução na frequência de destacamento medida na soldagem com arcos curtos. Um arco com fluxo de plasma mais instável, alinhado com o efeito térmico provocado pelo He (maior aquecimento do arco) e seu maior potencial de ionização podem ser considerados causas deste comportamento e da tendência aparentemente aleatória apresentada pela frequência de destacamento das gotas em soldas de arco longo. Também não se pode deixar de considerar uma eventual falha no dimensionamento da amostra, tal como fora observado pelos autores de um recente trabalho (Morales et al, 2007), onde foram obtidos diferentes valores de frequência de destacamento para diferentes tamanhos de amostras. Os autores publicaram os valores da amostras maiores, da ordem de 5 s, pois julgaram mais confiáveis. Para se certificar dos valores de frequência de destacamento foram repetidas as medições, os valores foram os mesmos ou muito próximos dos já apresentados, mas mesmo assim não se pode classificar como confiáveis os valores obtidos de frequência de destacamento das gotas nos experimentos deste capítulo.

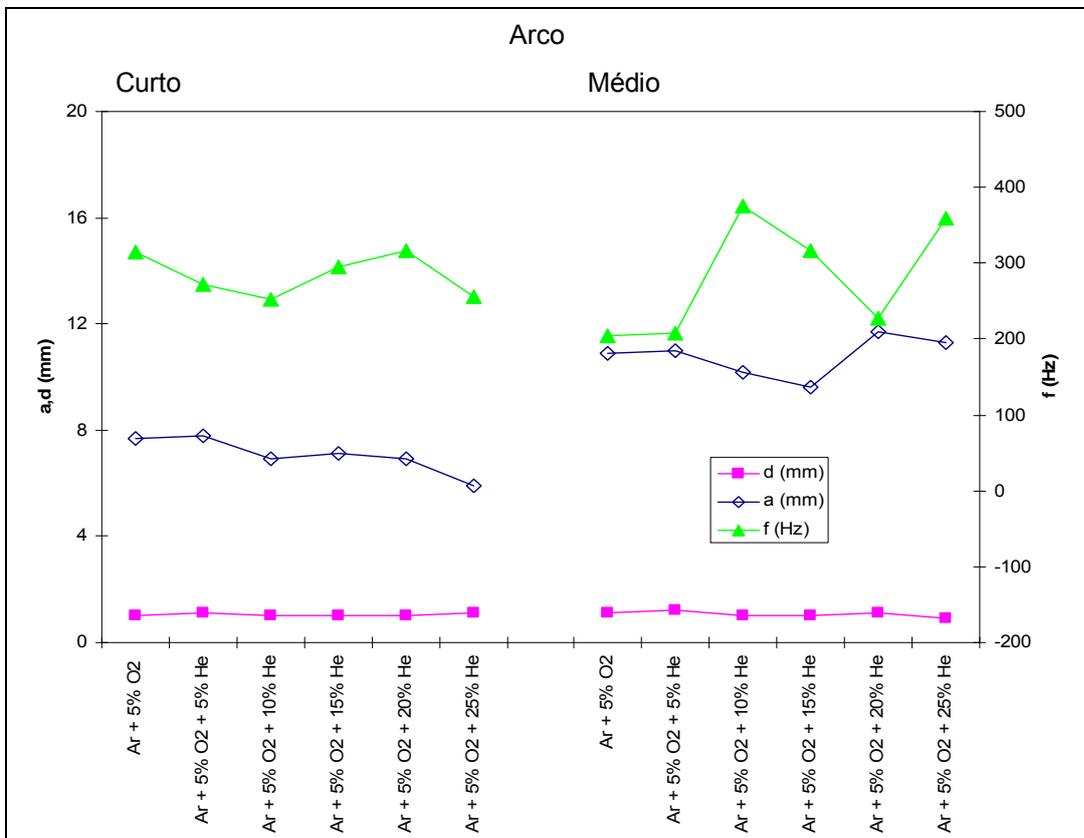


Figura 7.2 – Comprimento do arco (a), diâmetro das gotas (d) e frequência de destacamento (f) versus Comprimento do arco e Composição do Gás de Proteção.

Tal como nos capítulos anteriores, para verificar a coerência dos valores obtidos dos diâmetros das gotas, procede-se a análise a seguir. A Tabela 7.5 apresenta uma estimativa da frequência real de destacamento baseada nas medições do diâmetro das gotas e seu desvio padrão, apresentados na tabela anterior. Para a estimativa da massa das gotas (M_g), adotou-se, para a densidade das gotas, o valor de 7500 kg/m^3 (Kin & Na, 2001). A frequência esperada (f_{ESP}) foi calculada utilizando-se o diâmetro médio das gotas; a máxima frequência foi calculada utilizando-se o diâmetro mínimo das gotas, ou seja, o diâmetro médio subtraído do desvio padrão; e a frequência mínima foi calculada de forma análoga, mas com o máximo diâmetro das gotas. Observa-se que em todos os casos as frequências medidas estão entre a máxima e a mínima frequência esperadas, mas são maiores que a frequência esperada calculada. Este comportamento dá a entender que a maioria das gotas tende a ser um pouco menor do que a média, o que faz com que a frequência medida seja um pouco maior que a esperada. Ainda há que se considerar um eventual erro de medição da frequência das gotas, já citado anteriormente. Este comportamento é diferente do apresentado nas soldas dos capítulos 5 e 6 dada a influência do hélio com seu maior potencial de ionização, aumentando a temperatura na conexão do arco com o eletrodo, facilitando, nestas proporções utilizadas, o destacamento das gotas. Lembra-se que nestes cálculos não se levou em consideração a evaporação do eletrodo, considera-se coerente o comportamento observado para as frequências obtidas em relação ao intervalo de frequência esperada obtido.

Tabela 7.5 – Relação entre a frequência de destacamento esperada (f_{ESP}) e a observada (f).

Arco	Gás	V_a (kg/s)	d (mm)	M_g (kg)	f_{ESP} (Hz)	Max (Hz)	Min (Hz)	f (Hz)
Curto	Ar + 5% O ₂	1,01E-3	1,0	3,9E-06	258	505	150	315
	Ar + 5% O ₂ + 5% He		1,1	5,2E-06	194	354	118	272
	Ar + 5% O ₂ + 10% He		1,0	4,4E-06	230	366	153	252
	Ar + 5% O ₂ + 15% He		1,0	3,9E-06	258	505	150	296
	Ar + 5% O ₂ + 20% He		1,0	4,3E-06	236	406	150	316
	Ar + 5% O ₂ + 25% He		1,1	4,5E-06	223	379	142	256
Longo	Ar + 5% O ₂		1,1	5,7E-06	179	274	123	204
	Ar + 5% O ₂ + 5% He		1,2	6,0E-06	170	421	85	208
	Ar + 5% O ₂ + 10% He		1,0	4,0E-06	251	505	142	376
	Ar + 5% O ₂ + 15% He		1,0	3,8E-06	266	588	142	316
	Ar + 5% O ₂ + 20% He		1,1	4,5E-06	223	421	132	228
	Ar + 5% O ₂ + 25% He		0,9	3,0E-06	343	524	236	360

7.3 Comportamento cinemático das gotas e sua velocidade de chegada à poça de fusão

As Figuras 7.3 a 7.14 apresentam as curvas posição versus tempo das gotas em cada experimento realizado. Observou-se apenas para o gás de proteção com 5% He um aumento na dispersão quando do aumento do comprimento de arco (passagem da DBCP de 18 para 26 mm), como mostram as Figuras 7.5 e 7.6. A dispersão entre os experimentos, bem como entre as curvas de cada experimento é baixa, levando à idéia de que não há interferência das adições de He na disposição da trajetória das gotas.

Na Tabela 7.6 tem-se os valores medidos da velocidade de chegada das gotas à poça de fusão (V_{CHE}), bem como os níveis de significância obtidos pelo teste ANOVA. Observa-se que a composição do gás de proteção não afetou significativamente V_{CHE} nas condições dadas ($p = 0,18$), e que o comprimento de arco a afetou ($p < 0,01$), diferentemente do observado no Capítulo 5, Tabela 5.4, para a corrente de 250 A, onde o nível de significância foi de 0,07. A Figura 7.15 mostra uma tendência de redução do valor de V_{CHE} para teores mais elevados de He no gás de proteção, a partir de 10%, com arco curto, bem como um aumento de V_{CHE} para pequenas adições de He nesse comprimento de arco. Tal fato pode estar associado ao aumento da pressão axial do arco provocada pelo He não ionizado, o que estreitaria a região de plasma no centro do arco aumentando a componente devida à aceleração de plasma na aceleração da gota à poça e conseqüentemente sua velocidade ao final do vôo. Para se repetir este fenômeno em arco longo, provavelmente seria necessária uma maior quantidade de gás He na mistura, uma vez que o arco é maior em comprimento, e ainda maior em volume. Na Figura 7.15 observa-se essa tendência de crescimento de V_{CHE} para teores de até 20% de He. Para teores acima de 10% de He e arco curto e acima de 20% He para arco longo o estrangulamento da região ionizada do arco é tal que a mesma deve atingir diâmetros menores que o das gotas, reduzindo a participação do arraste na composição da aceleração das mesmas, reduzindo sua velocidade final. A extrapolação desta observação conduz ao resultado prático da impossibilidade de se obter transferência metálica por vôo livre na soldagem com altos teores de He apresentado por Rhee & Kannatey-Asibu (1992).

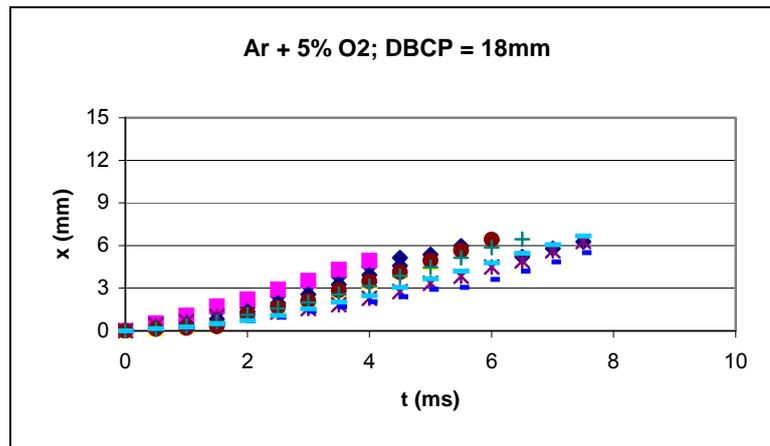


Figura 7.3 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. ($a = 7,7$ mm)

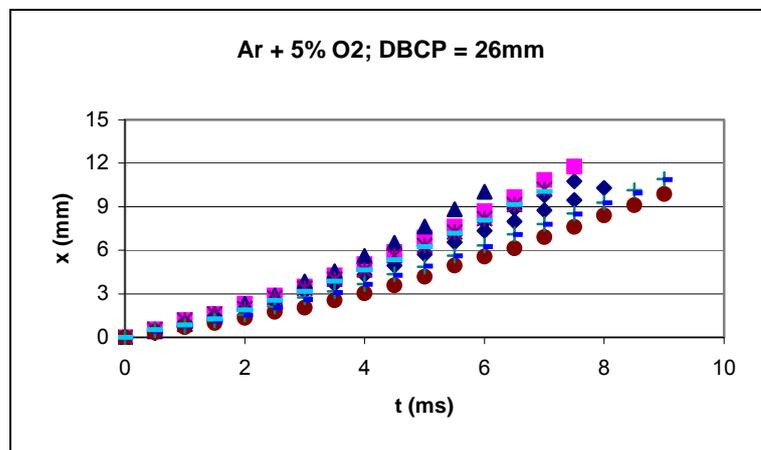


Figura 7.4 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. ($a = 10,9$ mm)

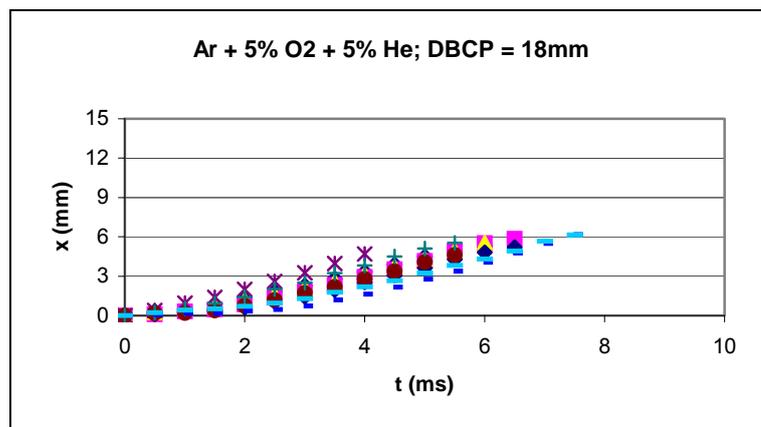


Figura 7.5 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. ($a = 7,8$ mm)

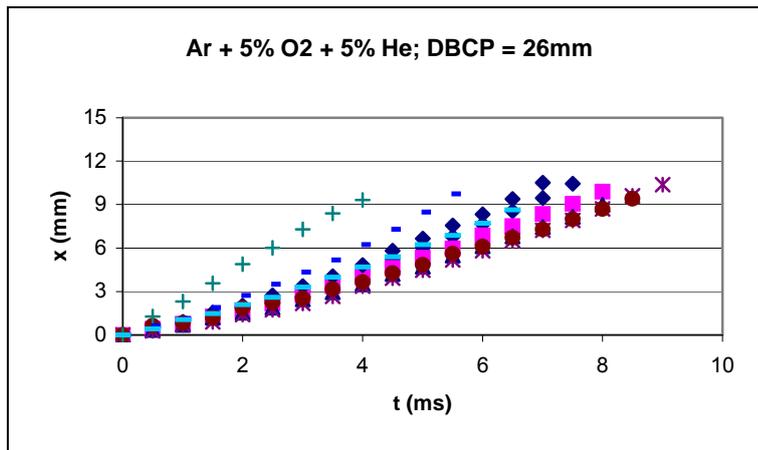


Figura 7.6 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 11,0 mm)

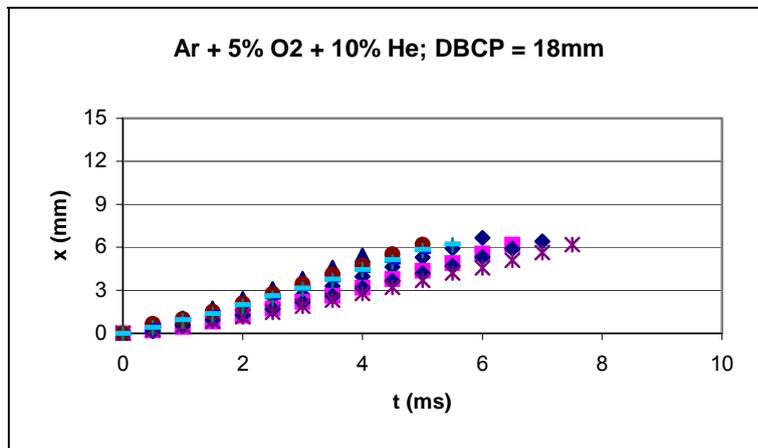


Figura 7.7 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 6,9 mm)

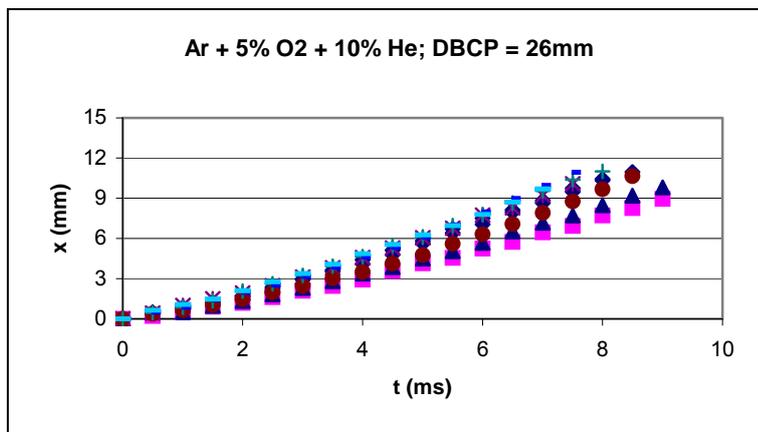


Figura 7.8 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 10,2 mm)

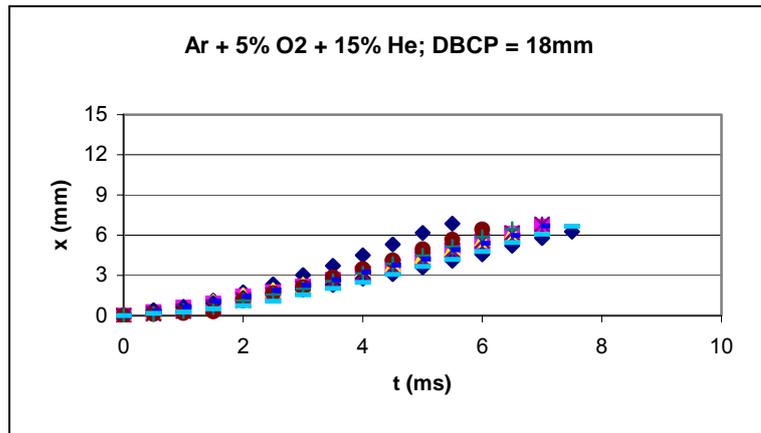


Figura 7.9 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 7,1 mm)

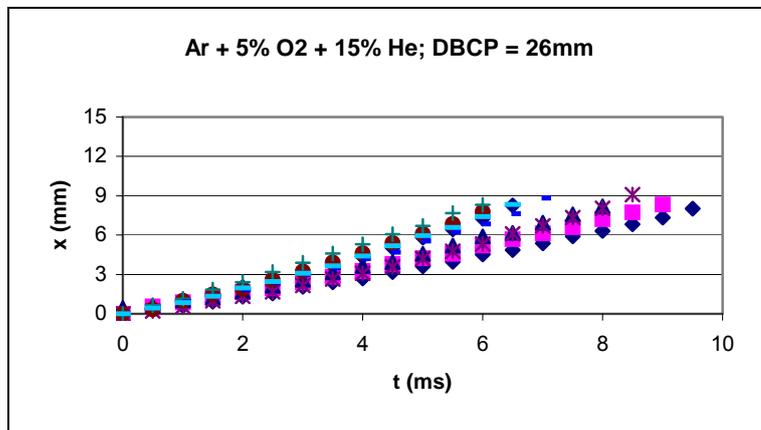


Figura 7.10 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 9,6 mm)

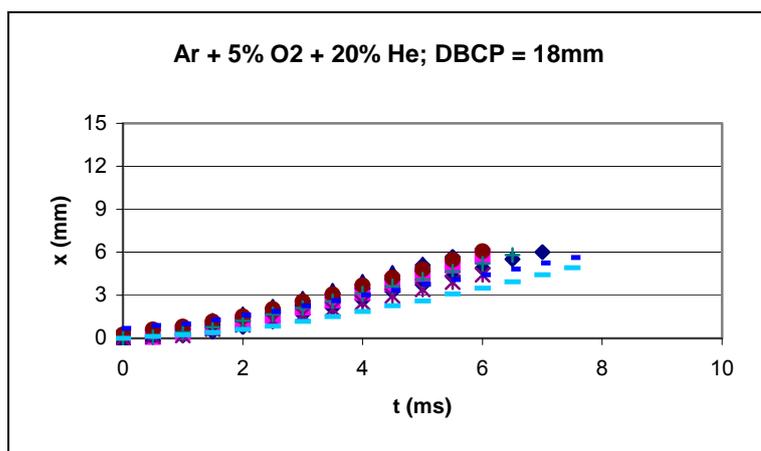


Figura 7.11 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 6,9 mm)

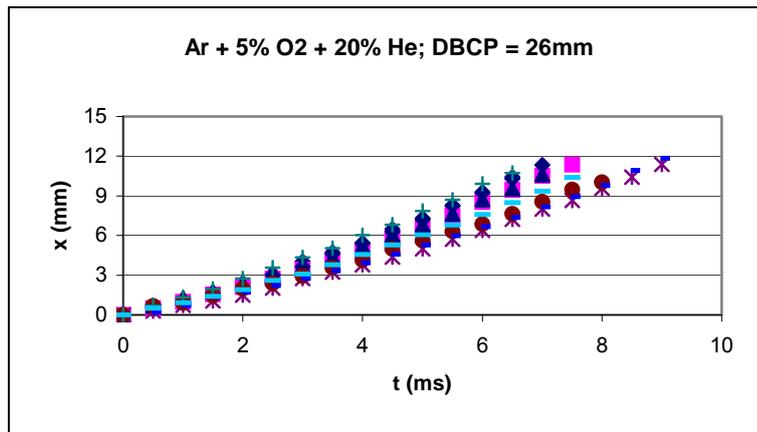


Figura 7.12 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 11,7 mm)

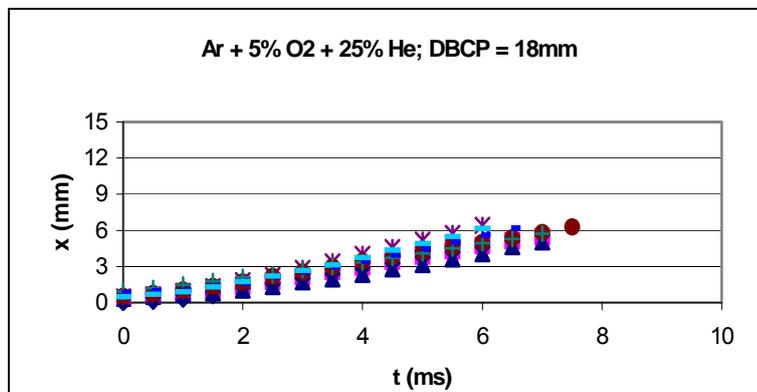


Figura 7.13 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 5,9 mm)

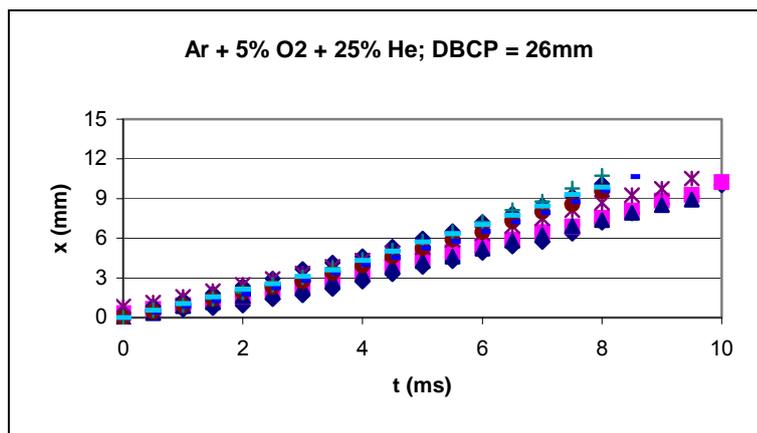
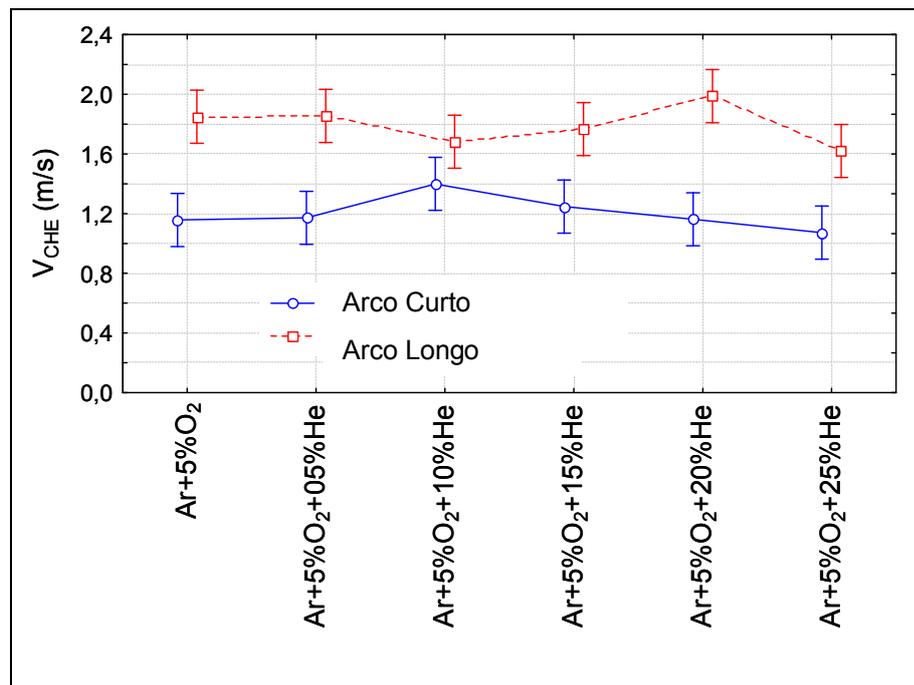


Figura 7.14 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 11,3 mm)

Tabela 7.6 – Velocidade de chegada: medidas; médias e resultado da ANOVA.

Arco	Curto						Longo					
	0	5	10	15	20	25	0	5	10	15	20	25
% He	0	5	10	15	20	25	0	5	10	15	20	25
V_{CHE} (m/s)	1,23	0,93	1,50	1,36	1,24	1,12	2,39	1,70	1,68	1,25	2,24	1,71
	1,29	1,29	1,26	1,30	1,40	1,18	1,82	1,68	1,55	1,24	2,11	1,60
	1,29	1,22	1,66	1,29	1,23	0,81	1,96	1,97	1,39	1,36	2,11	0,80
	1,22	1,07	1,07	1,15	1,41	0,91	1,53	1,39	1,69	1,82	1,84	1,54
	1,22	1,44	1,08	1,29	1,01	1,37	2,10	1,54	1,95	2,10	1,94	1,97
	1,23	1,08	1,57	1,52	1,24	0,95	1,65	2,26	1,71	1,96	2,10	1,83
	0,93	1,22	1,56	1,16	1,21	0,82	1,82	1,83	1,96	1,82	2,08	1,11
	0,71	1,36	1,50	0,94	0,78	1,16	1,82	2,52	1,95	2,38	1,82	2,10
	1,29	0,93	1,41	1,22	0,96	1,33	1,56	1,83	1,26	1,98	1,66	1,94
Média	1,16	1,17	1,40	1,25	1,16	1,07	1,85	1,86	1,68	1,77	1,99	1,62
p	Arco: <0,01; Composição do Gás de Proteção: 0,18; Interação: 0,06.											

Figura 7.15 – Efeito da composição do gás de proteção e do comprimento de arco sobre V_{CHE} .

7.4 Caracterização geométrica dos cordões de solda

A Tabela 7.7 apresenta as medidas realizadas de penetração (P), reforço (R), largura (L), área total (A_T), área adicionada medida (A_{AM}) e área fundida (A_F) dos cordões de solda. A Tabela 7.8 apresenta as macrografias dos cordões de solda, onde se pode observar,

particularmente para a soldagens com arco curto, uma redução do efeito “finger like” como aumento do teor de He no gás de proteção, o que também foi observado no trabalho de Morales et al (2007). A Tabela 7.9 apresenta os níveis de significância obtidos na ANOVA, onde observa-se que a composição do gás de proteção afeta significativamente o reforço, a largura, a área total e a área fundida do cordão de solda. O comprimento de arco, por sua vez, afetou a penetração, e o reforço do cordão somente, tal como no trabalho de Morales et al (2007). A interação entre os dois fatores mostra que o reforço do cordão, a área total e a área fundida são afetados diferentemente pelo teor de hélio no gás de proteção em cada comprimento de arco adotado, o que não se confirmou nos resultados de Morales et al (2007), que observou desvios padrão altos para essas variáveis.

Na Figura 7.16 observa-se, particularmente para a soldagem com arco curto e para teores de até 10% de He uma tendência de aumento da penetração que acompanha a tendência apresentada na análise de V_{CHE} (Figura 7.15), mostrando que a velocidade de chegada das gotas à poça de fusão foi consoante com a penetração do cordão de solda nessa condição específica. Contudo, para teores acima de 10% He e comprimento de arco curto, observa-se uma tendência de se manter o valor da penetração, em detrimento à queda do valor de V_{CHE} . Esse comportamento indica que para teores mais altos de hélio, sua maior capacidade térmica torna-se importante na composição da temperatura da poça, mantendo os patamares de penetração, mesmo com a queda dos valores de V_{CHE} . O resultado da concorrência dos efeitos foi favorável à manutenção dos valores da penetração, por prevalecer o aumento do teor de hélio sobre a redução percebida dos valores de V_{CHE} . Já com arcos maiores a penetração do cordão de solda acompanha a tendência de V_{CHE} também apenas até o teor de 10% He. Acima disso também considera-se dominante a capacidade térmica do hélio sobre V_{CHE} .

A Figura 7.17 apresenta o efeito do comprimento do arco (análogo à DBCP) e da composição do gás de proteção sobre o reforço do cordão de solda. Evidencia-se, particularmente para arcos mais curtos (DBCP = 18 mm) que a adição de pequenos teores de He à mistura gasosa reduz consideravelmente o reforço do cordão de solda, tornando-o mais tênue. Para os demais valores obtidos não houve tendência observada. A Figura 7.18 apresenta o efeito dos fatores sobre a largura do cordão. Para arcos curtos (DBCP = 18 mm), há uma tendência clara de aumento da largura do cordão de solda com o aumento do teor de He no gás de proteção, até teores de 20% He. A maior retenção de calor no arco seria responsável por esta maior fluidez do cordão de solda. Para arcos longos (DBCP = 26 mm), percebe-se que a mudança na composição do gás atua diferentemente que para arcos curtos, uma vez que não houve tendência observada.

Tabela 7.7 – Geometria dos cordões de solda: medidas realizadas.

DBCP (mm)	Gás	P (mm)	R (mm)	L (mm)	A_T (mm ²)	A_{AM} (mm ²)	A_F (mm ²)
18	Ar + 5% O ₂	2,4	3,0	8,7	30,9	20,3	10,6
		2,7	3,3	10,5	36,1	23,3	12,8
		2,2	3,5	11,2	37,3	26,5	10,8
	Ar + 5% O ₂ + 5% He	2,4	2,9	9,7	30,1	20,7	9,4
		2,5	2,8	9,8	30,5	20,1	10,4
		2,5	2,7	10,7	30,4	18,3	12,1
	Ar + 5% O ₂ + 10% He	2,5	2,7	9,3	30,7	16,7	14,0
		2,8	2,8	10,8	37,3	21,8	15,5
		2,7	2,8	11,6	41,3	23,9	17,4
	Ar + 5% O ₂ + 15% He	2,2	2,7	10,9	31,7	22,4	9,3
		2,1	2,6	10,1	26,6	17,3	9,3
		2,5	2,7	10,3	30,8	20,9	9,9
	Ar + 5% O ₂ + 20% He	2,6	3,1	11,2	39,7	23,8	15,9
		2,5	2,8	12,1	39,2	24,4	14,8
		2,5	2,6	10,9	35,7	19,2	16,6
	Ar + 5% O ₂ + 25% He	2,8	2,8	10,6	37,4	20,2	17,2
		2,6	2,5	11,2	37,2	19,4	17,7
		2,7	2,9	10,7	38,5	21,8	16,7
26	Ar + 5% O ₂	2,1	2,8	9,7	31,3	19,2	12,1
		2,4	2,7	10,0	32,9	20,0	13,0
		2,3	2,5	10,3	32,2	19,4	12,8
	Ar + 5% O ₂ + 5% He	2,0	2,7	11,0	33,0	19,9	13,1
		2,5	2,6	11,8	38,8	22,1	16,7
		2,5	2,8	11,0	38,1	21,2	16,8
	Ar + 5% O ₂ + 10% He	2,2	2,8	10,5	33,2	21,2	11,9
		2,2	2,5	10,9	36,2	21,2	15,0
		1,6	2,5	10,2	30,9	20,2	10,7
	Ar + 5% O ₂ + 15% He	2,2	2,6	10,1	34,6	20,4	14,1
		2,3	2,8	10,0	33,5	21,6	11,9
		2,5	2,8	9,5	35,0	21,4	13,6
	Ar + 5% O ₂ + 20% He	2,3	2,8	12,2	43,5	26,9	16,6
		2,3	2,3	11,5	33,5	18,7	14,8
		2,0	2,5	11,3	33,1	20,2	12,9
	Ar + 5% O ₂ + 25% He	2,4	2,3	11,1	36,4	22,1	14,3
		2,1	2,4	10,9	36,3	23,3	13,0
		2,2	2,7	11,1	37,0	24,6	12,5

Tabela 7.8 – Macrografias dos cordões de solda.

DBCP (mm)	Composição do Gás de Proteção					
	Ar + 5% O ₂	Ar + 5% O ₂ + 5% He	Ar + 5% O ₂ + 10% He	Ar + 5% O ₂ + 15% He	Ar + 5% O ₂ + 20% He	Ar + 5% O ₂ + 25% He
18						
26						

Tabela 7.9 – Níveis de significância obtidos pela ANOVA.

Variáveis	P	R	L	A _T	A _{AM}	A _F
Fatores						
DBCP	0,00	0,00	0,55	0,65	0,85	0,73
Composição do Gás	0,71	0,05	0,01	0,02	0,72	0,00
DBCP x Comp. Gás	0,17	0,04	0,27	0,05	0,24	0,00

A Figura 7.19 apresenta o comportamento da área total do cordão de solda com o comprimento de arco e a composição do gás. Para arcos longos, há uma tendência clara de aumento da largura do cordão de solda com o aumento do teor de He no gás de proteção. Mais uma vez, a maior retenção de calor no arco pelo gás He seria responsável por este resultado, uma maior área fundida. Para arcos curtos, percebe-se que a mudança na composição do gás atua diferentemente que para arcos longos, mas não houve tendência clara observada. A Figura 7.20 apresenta os resultados obtidos de área fundida. Observa-se um aumento da área fundida para arcos curtos até teores de 10% He, a partir de 15%, mas dentro do mesmo patamar médio. Para arcos longos, a maior variação apresenta-se quando da adição de He à mistura gasosa. Tal como os efeitos anteriores, estes também são devido à combinação e ao balanço de V_{CHE} com a propriedade do gás He de prover à poça de fusão maior aporte térmico. Não foi observada diferença significativa entre os valores da área adicionada, como pode ser visto na Figura 7.21, dado que os valores de velocidade de alimentação e soldagem mantiveram-se constantes para todos os experimentos.

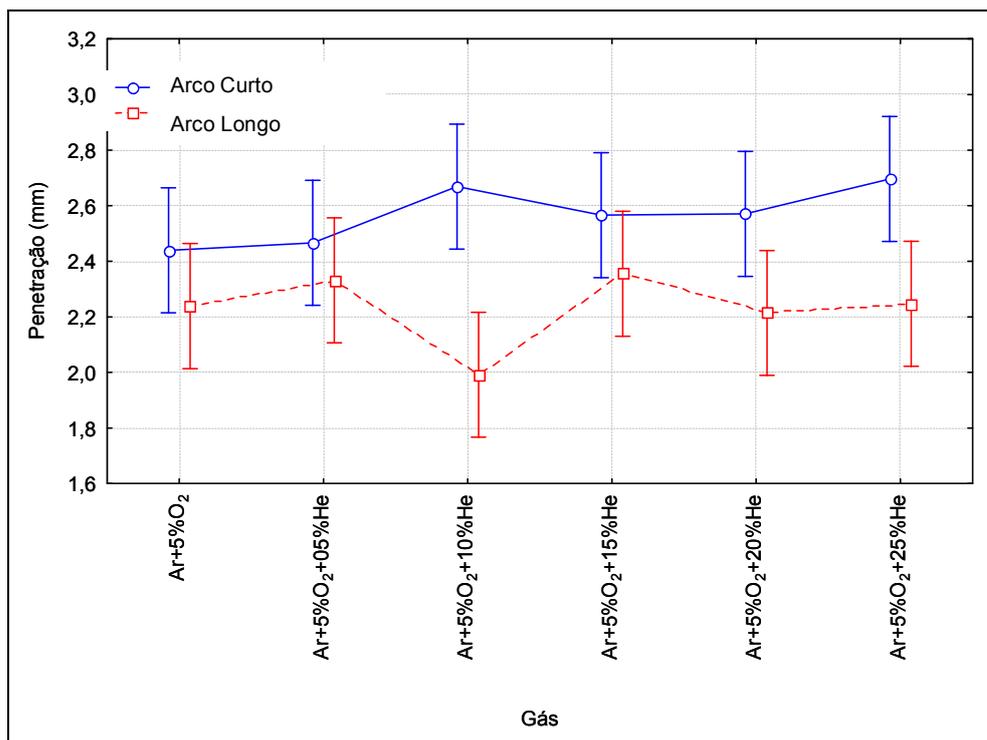


Figura 7.16 – Efeito do Gás de Proteção e do comprimento do arco sobre a Penetração.

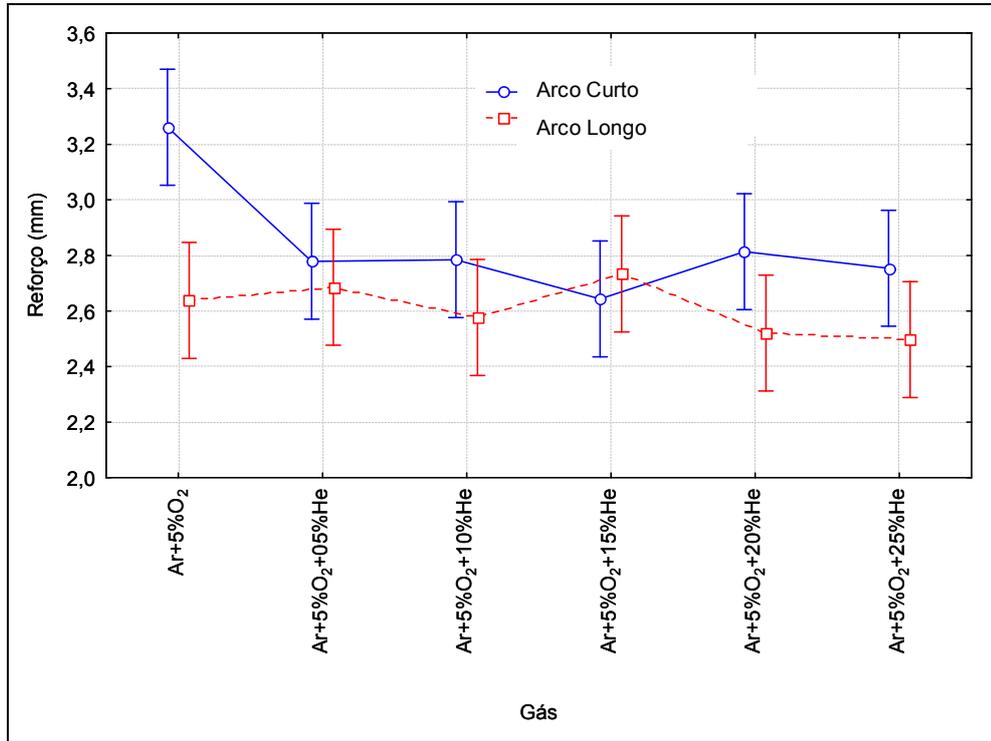


Figura 7.17 – Efeito do Gás de Proteção e do comprimento do arco sobre o Reforoço.

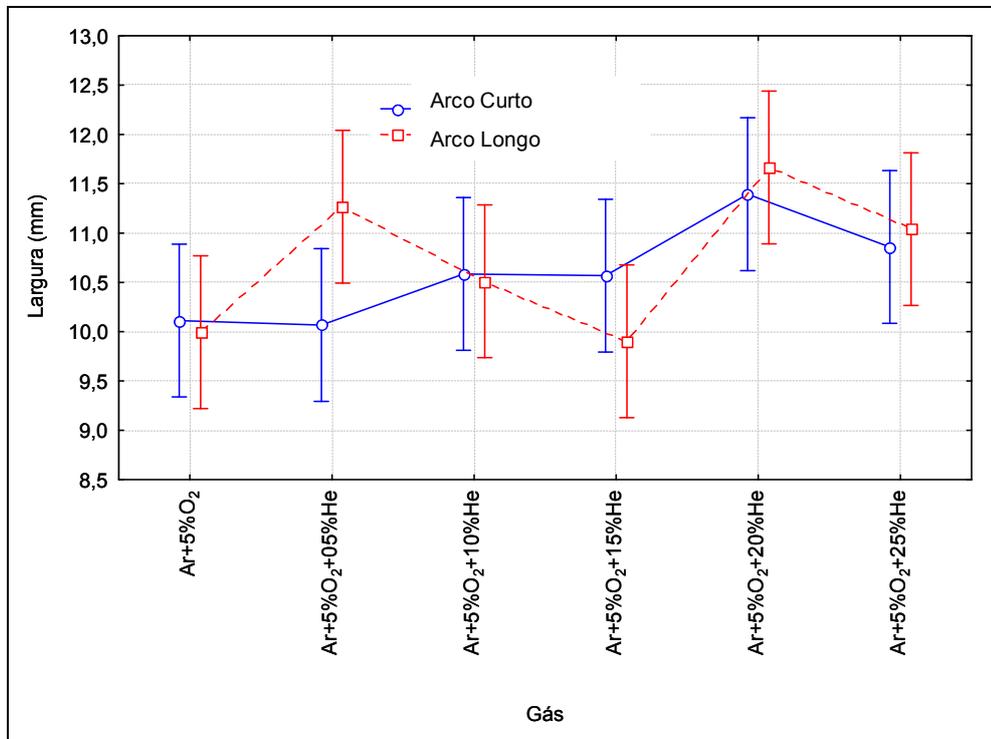


Figura 7.18 – Efeito do Gás de Proteção e do comprimento do arco sobre a Largura.

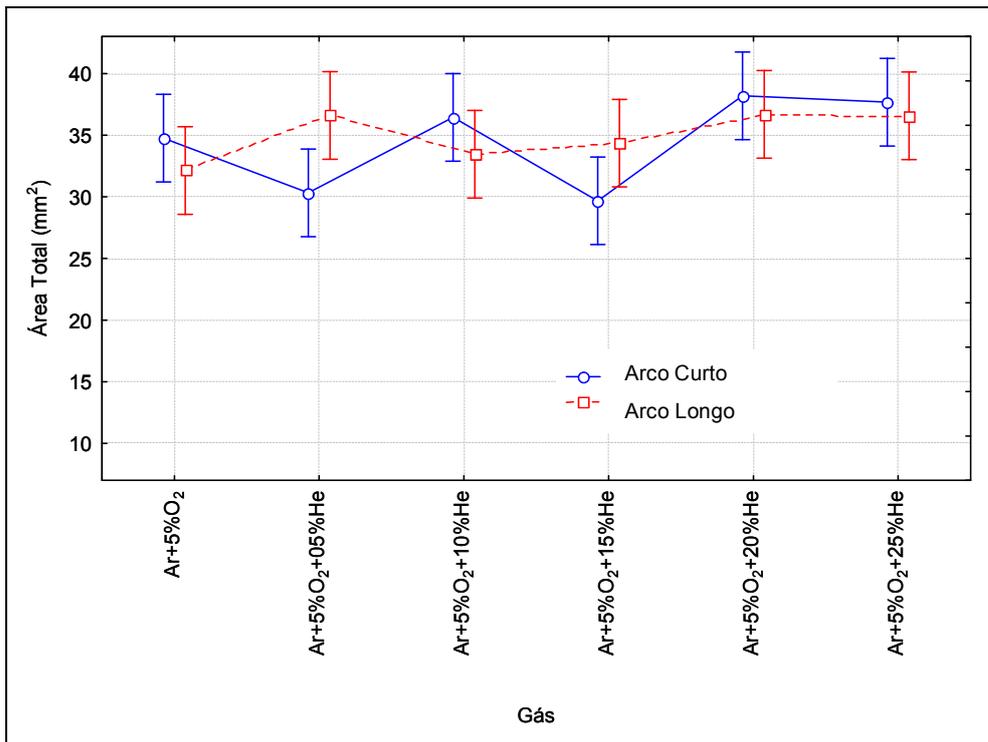


Figura 7.19 – Efeito do Gás de Proteção e do comprimento do arco sobre a Área Total.

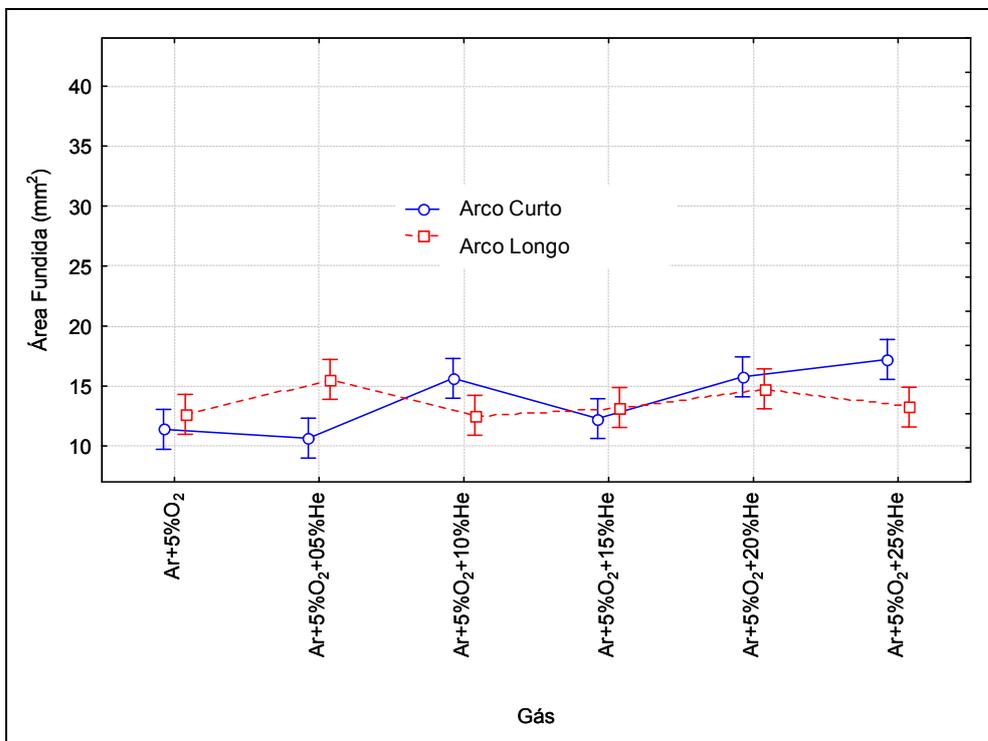


Figura 7.20 – Efeito do Gás de Proteção e do comprimento do arco sobre a Área Fundida.

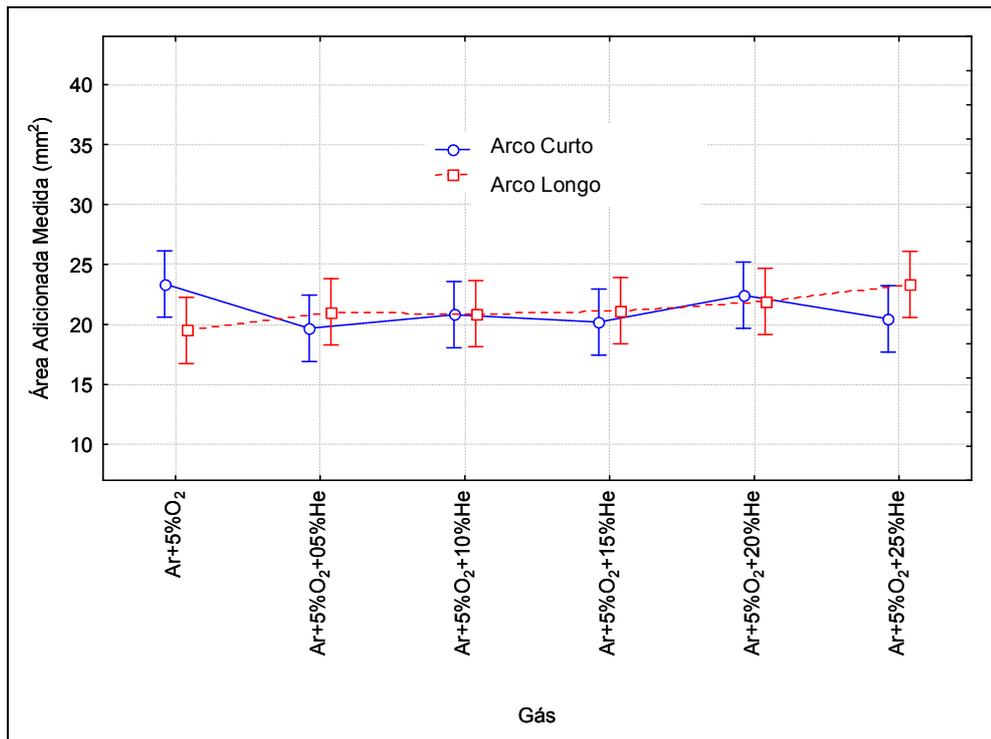


Figura 7.21 – Efeito do Gás de Proteção e do Comprimento do arco sobre a Área Adicionada.

7.5 Quantidade de Movimento Efetiva das gotas em transferência

A Tabela 7.10 apresenta as características das transferências metálicas e também a Quantidade de Movimento (Q), a Taxa de Quantidade de Movimento (T) e a Quantidade de Movimento Efetiva (Qe) das gotas, obtidas respectivamente através das Equações 3.2, 3.3 e 3.4. As figuras 7.22, 7.23 e 7.24 apresentam o comportamento das variáveis dinâmicas citadas e da penetração da solda com o aumento do teor de He na mistura. Não é perceptível nenhuma relação lógica dessas variáveis com a penetração da solda, nem com o aumento do teor de He no gás de proteção. Para arcos longos, pode-se supor uma queda nas características dinâmicas com o aumento do teor de He na mistura, fato que não encontra subsídio teórico nem prático, uma vez que não acompanhou o comportamento razoavelmente uniforme da penetração da solda com o aumento do teor de He na mistura.

Tabela 7.10 – Características de transferência metálica e de dinâmica das gotas.

DBCP (mm)	Gás	a (mm)	d (mm)	f (Hz)	V_{CHE} (m/s)	$Q \times 10^{-4}$ (kg.m/s)	$T \times 10^{-4}$ (N)	$Q_e \times 10$ (kg/s)
18	Ar + 5% O ₂	7,7	1,0	315	1,15	0,045	14,22	2,09
	Ar + 5% O ₂ + 5% He	7,8	1,1	272	1,17	0,061	16,63	2,44
	Ar + 5% O ₂ + 10% He	6,9	1,0	252	1,40	0,062	15,58	2,29
	Ar + 5% O ₂ + 15% He	7,1	1,0	296	1,25	0,049	14,52	2,14
	Ar + 5% O ₂ + 20% He	6,9	1,0	316	1,16	0,050	15,72	2,31
	Ar + 5% O ₂ + 25% He	5,9	1,1	256	1,07	0,049	12,45	1,83
26	Ar + 5% O ₂	10,9	1,1	204	1,85	0,105	21,37	3,14
	Ar + 5% O ₂ + 5% He	11,0	1,2	208	1,86	0,111	23,09	3,40
	Ar + 5% O ₂ + 10% He	10,2	1,0	376	1,68	0,068	25,54	3,76
	Ar + 5% O ₂ + 15% He	9,6	1,0	316	1,77	0,067	21,30	3,13
	Ar + 5% O ₂ + 20% He	11,7	1,1	228	1,99	0,090	20,62	3,03
	Ar + 5% O ₂ + 25% He	11,3	0,9	360	1,62	0,048	17,26	2,54

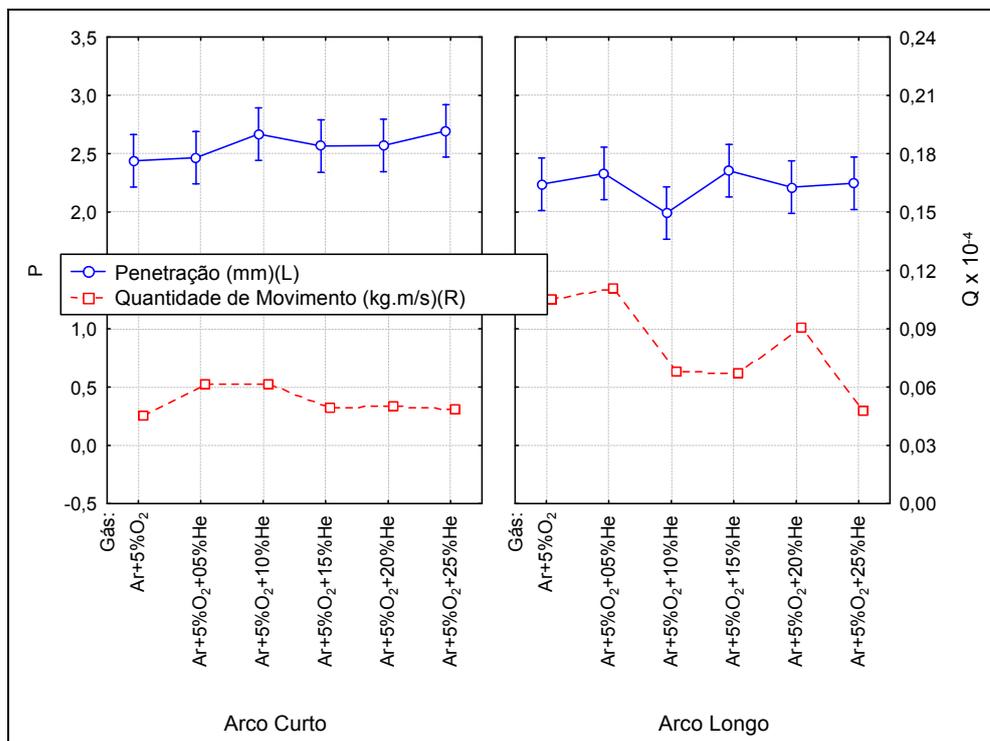


Figura 7.22 – Penetração e Quantidade de Movimento em função da Composição do Gás.

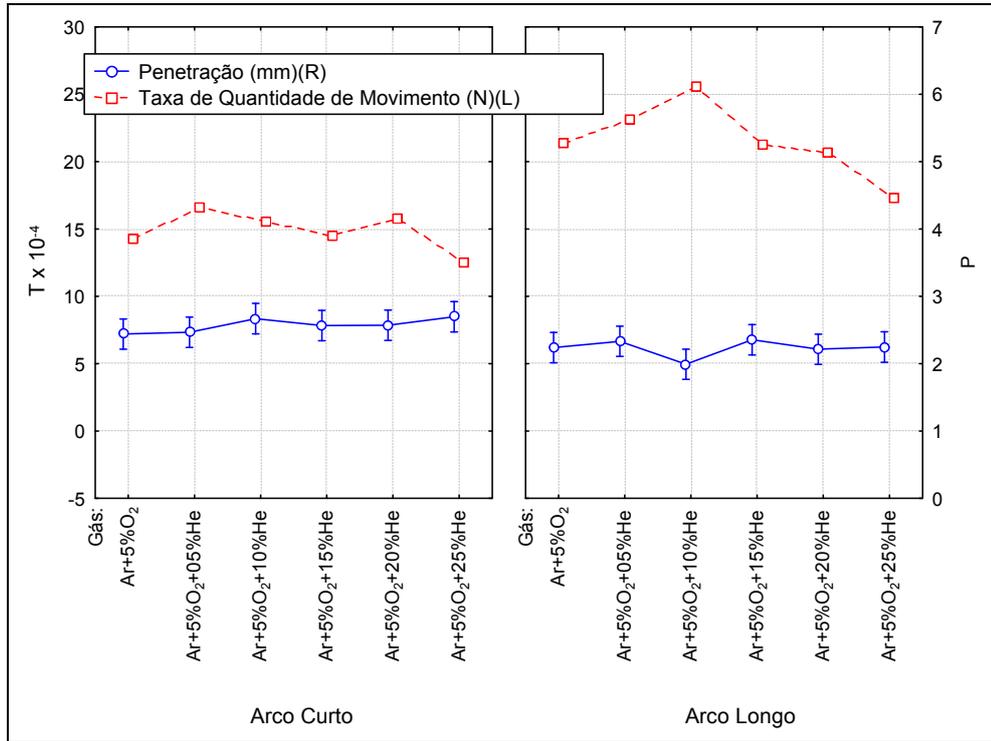


Figura 7.23 – Penetração e Taxa de Quantidade de Movimento em função da Composição do Gás.

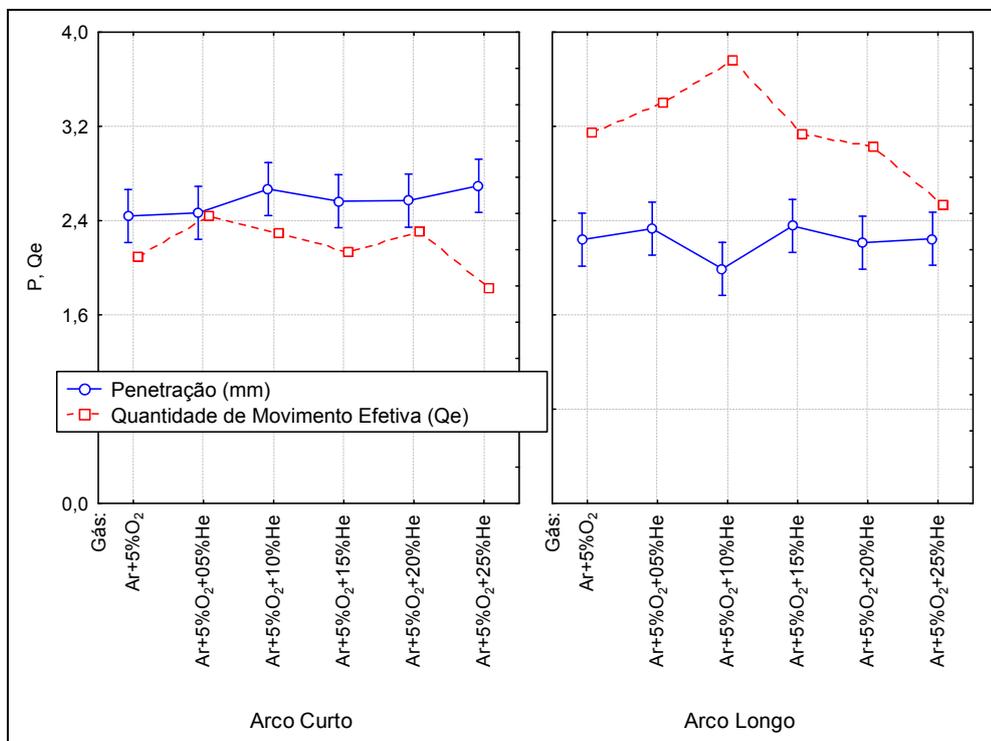


Figura 7.24 – Penetração e Quantidade de Movimento Efetiva em função da composição do gás.

7.6 Conclusões Parciais

Tendo em vista as condições adotadas neste capítulo, composições do gás de proteção, corrente de soldagem constante, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem constantes, conclui-se que:

7.6.1. Relacionando os parâmetros de entrada (composição do gás de proteção e comprimento de arco) com as características cinemáticas:

- O aumento do teor de hélio no gás de proteção:
 - Não provoca efeito significativo nas trajetórias das gotas;
 - Não afeta a velocidade de chegada das gotas à poça de fusão;
- O aumento do comprimento do arco:
 - Não provoca efeito significativo nas trajetórias das gotas;
 - Aumenta a velocidade de chegada das gotas à poça de fusão para todas as composições de gás utilizadas;

7.6.2. Relacionando os parâmetros de entrada (composição do gás de proteção e comprimento de arco) com as características dinâmicas:

- O aumento do teor de hélio no gás de proteção não provoca efeito claro nas características dinâmicas das gotas;
- O aumento do comprimento do arco aumenta o valor das características dinâmicas das gotas para todas as composições de gás utilizadas;

7.6.3. Relacionando os parâmetros de entrada (composição do gás de proteção e comprimento de arco) com a geometria da solda:

- O aumento do teor de hélio no gás de proteção:
 - Reduz sensivelmente a formação da penetração profunda e estreita conhecida como “finger like”;
 - Não afeta a penetração das soldas;
 - Reduz o reforço e aumenta a largura dos cordões de solda;
 - Aumenta a área fundida do cordão de solda, mas apenas em soldagem com arco curto;

- O aumento do comprimento do arco diminui a penetração e a área fundida em todas as composições de gás de proteção utilizadas;

7.6.4. Relacionando as características dinâmicas com a geometria da solda:

- As características dinâmicas gotas não apresentaram correlação com a penetração da solda nas condições empregadas.

Capítulo 8

8. Efeito da polaridade da corrente nas características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica de um eletrodo de aço carbono

A soldagem MIG/MAG em polaridade direta (CC-), tomando como base a soldagem em polaridade inversa (CC+), é citada como de baixa penetração, alta taxa de fusão do arame para uma dada corrente, pequena quantidade de calor transferido para a peça e de quantidade de respingos alta. Talkington (1998), ao estudar a soldagem MIG/MAG com polaridade variável, afirma que a aplicação de polaridade direta em MIG/MAG é limitada geralmente à transferência globular, e é pouco usada devido ao arco ser instável e muitos respingos serem produzidos. Este pesquisador afirma ainda que o maior problema inerente à soldagem em CC- é a força catódica repulsiva que atua na extremidade fundida do eletrodo, já que nesta configuração os elétrons são emitidos do eletrodo e transferidos à peça de trabalho. Esta força de reação é descrita por Lancaster (1984) como a principal causa para gotas assimetricamente repelidas durante o MIG/MAG em CC-. De acordo com o autor há um posicionamento instável do ponto catódico na extremidade da gota: durante a soldagem, ponto este identificado por uma intensa concentração de luz emitida de uma área localizada da gota. A Figura 8.1 ilustra esse fenômeno. O ponto catódico pode ser observado se movimentando aleatoriamente ao redor de uma gota grande no momento em que ela está sendo assimetricamente repelida. A transferência metálica por gotas repelidas, bem como a movimentação aleatória do ponto catódico foram observados em perfilografia por Talkington (1998) (Figura 8.2), utilizando polaridade variável com 50% de CC- a 90 Hz e gás de proteção Ar + 2%O₂.

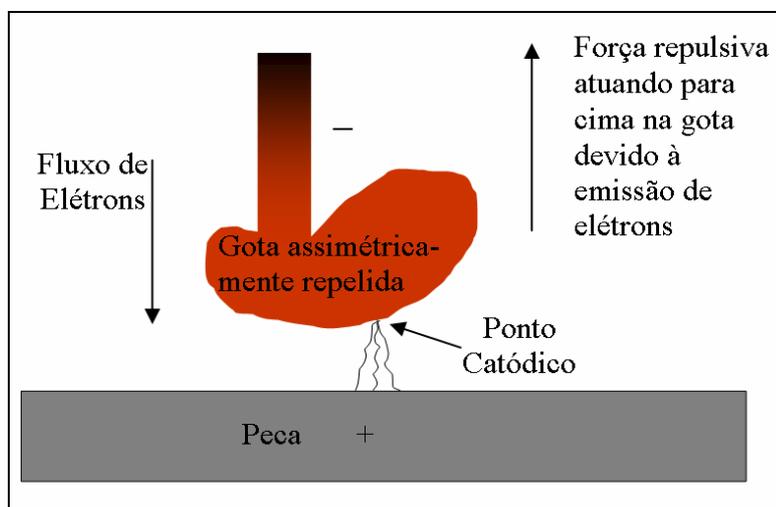


Figura 8.1 – Gota assimetricamente repelida e o ponto catódico (Lancaster, 1984).

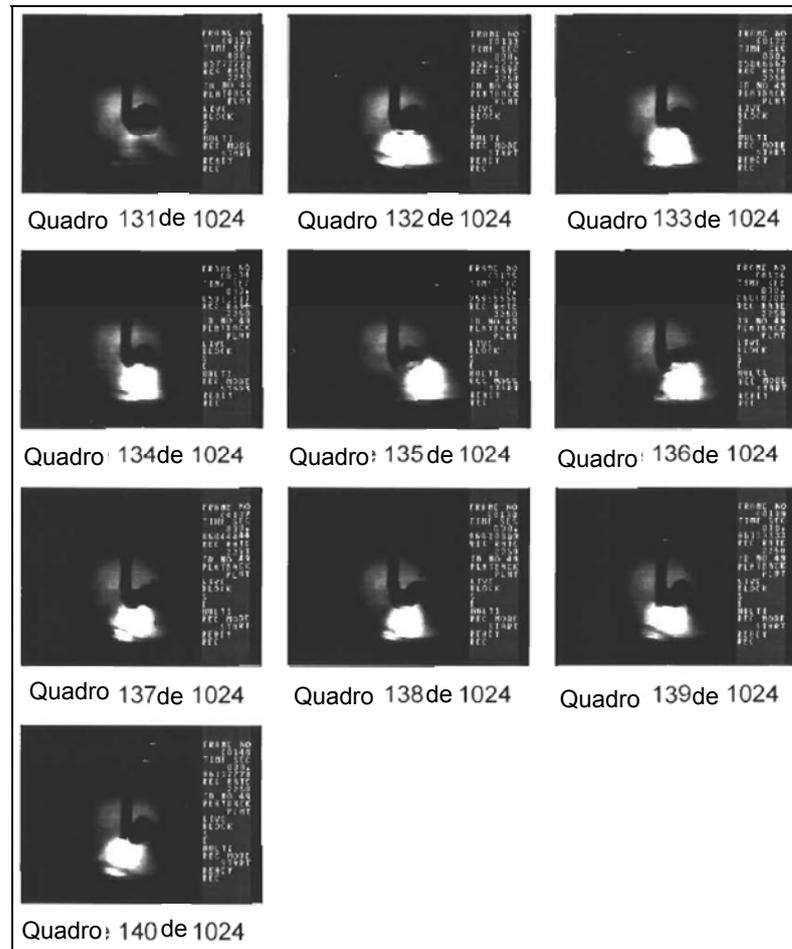


Figura 8.2 – Gota assimetricamente repelida e o ponto catódico (Talkington, 1998).

Apesar das características indesejáveis de se soldar em CC-, esta polaridade oferece algumas características úteis para a soldagem MIG/MAG. O principal benefício da CC- seria o balanço reverso de calor produzido no arco. Acredita-se que a característica da soldagem MIG/MAG em CC+ é que a menor parte do calor gerado no arco é transferida ao eletrodo e o restante ao metal de base. Este balanço energético é reverso para soldagem na CC-, a menor parte da energia é transferida ao metal de base e uma maior parcela do calor para o eletrodo, o que é interessante quando se procura maiores taxas de fusão do arame. Alguns pesquisadores, como Lancaster (1984), estudaram os vários fatores que afetam a velocidade de fusão e tem mostrado que tanto maiores velocidades de fusão (maior volume depositado por unidade de comprimento de solda) como menores penetrações são obtidas em CC- quando comparada a CC+. O cordão assume, entretanto, um formato extremamente convexo, não adequado para soldagem. Segundo Talkington (1998), a Figura 8.3 resume as diferenças relativas esperadas entre os perfis dos cordões de solda resultantes da soldagem MIG/MAG em CC- e CC+.

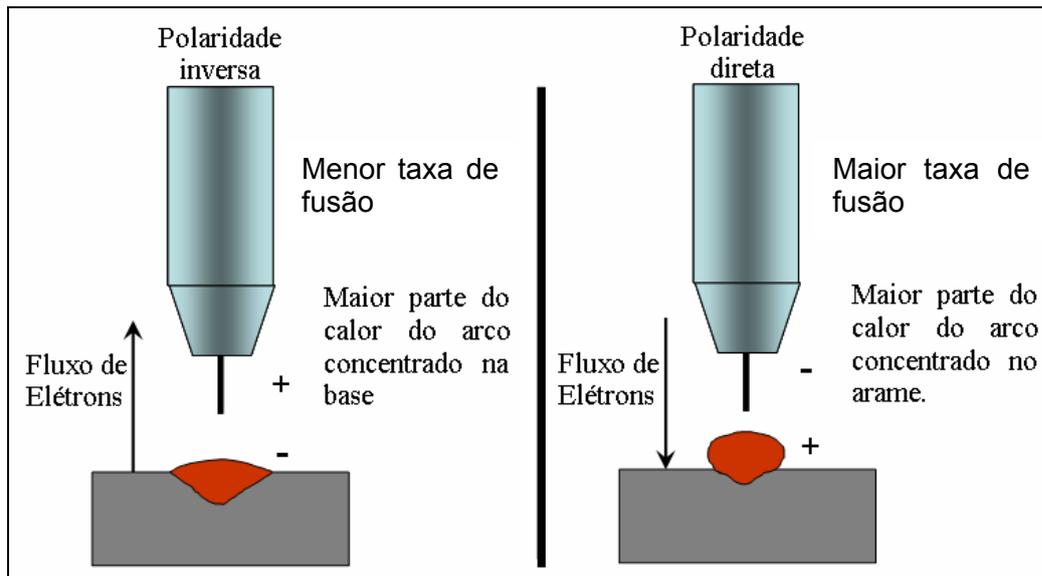


Figura 8.3 – Características da soldagem em CC+ (inversa) e CC- (direta) (Talkington, 1998).

Por outro lado, estudos mostraram que aplicando CC- em condições favoráveis (sobre aspecto do cordão e estabilidade do processo) foram obtidos transferência metálica globular e goticular (Souza et al, 2007), valores razoáveis de penetração quando comparados à soldagem em CC+ (Mota et al, 2005) e excelente acabamento do cordão de solda, tanto na soldagem com aço carbono (Souza et al, 2007) como na soldagem com alumínio (Magalhães et al, 2007; Farias et al 2006). Souza et al (2007) só perceberam excesso de respingos quando utilizaram gás de proteção rico em CO_2 . Então se percebe que são controversos os resultados de estudos sobre este tema, ou pelo menos são resultados não genéricos.

Portanto, o objetivo deste capítulo é incrementar o conhecimento da transferência metálica em CC- através de sua avaliação cinemática e dinâmica, aplicando a mesma metodologia utilizada para soldas em CC+ dos capítulos anteriores. Adicionalmente, compararam-se os resultados obtidos com resultados em condições similares do Capítulo 5, obtidos em CC+.

8.1 Planejamento Experimental

Neste capítulo apresenta-se uma breve avaliação exploratória da soldagem MIG/MAG em polaridade direta. Para viabilizar uma comparação com resultados obtidos no Capítulo 5, procurou-se utilizar da mesma relação V_a/V_s (aproximadamente a mesma energia de soldagem), bem como duas correntes utilizadas naquele capítulo, estas associadas a dois modos distintos de transferência metálica (globular e goticular), como pode ser visto no planejamento experimental apresentado na Tabela 8.1, onde os experimentos em CC- são caracterizados pelo sinal negativo nos valores de corrente de regulagem (I_{REG}). Manteve-se o

mesmo eletrodo AWS ER70S-6, com diâmetro 1,2 mm, soldando sobre chapas de aço comum ao carbono tipo ABNT 1020 (300 x 38 x 12,7 mm), com gás de proteção Ar + 5%O₂ e vazão de 14 l/min. Saliencia-se que as soldagens em CC- foram realizadas com corrente constante e velocidade de alimentação também constante, tal como foram realizadas as soldagens do Capítulo 5.

A Tabela 8.2 traz os parâmetros de regulagem, bem como os valores monitorados de tensão média (U_M) e corrente média (I_M) através de amostras de 5 s a uma taxa de aquisição de 10 kHz por canal e resolução de 12 bits. Percebe-se um maior valor de velocidade de alimentação utilizado nas soldagens com polaridade direta, ajustado para se alcançar os mesmos patamares de corrente utilizados nas soldagens do Capítulo 5, 200 e 250 A, para possibilitar uma comparação. Oscilogramas de corrente e tensão são apresentados no Anexo I, onde, ao contrário do que se espera baseado nos estudos de Lancaster (1984) e Talkington (1998), olhando para os sinais de tensão (a corrente foi constante) percebe-se soldagens razoavelmente estáveis, o que também difere do que foi observado por Sousa et al (2007). Tal como nos experimentos realizados por Sousa et al (2007), foram obtidos valores de tensão de soldagem maiores em módulo para os testes em CC-. Isto pode ser atribuído à conexão do arco com o eletrodo (no caso conexão anódica), a qual, segundo Souza et al (2007), escala o eletrodo em busca de óxido provocando um melhor aproveitamento do calor gerado nesta conexão anódica para o aquecimento do eletrodo, justificando assim as maiores taxas de fusão obtidas em CC-. Esta “escalada” do arco no eletrodo também foi observada nas soldagens deste capítulo e registrada através da filmagem em alta velocidade usando como filtro uma lente comum de solda classe 10, conforme apresentado na Figura 8.4 e na Figura 8.5.

Tabela 8.1 – Planejamento experimental.

I_{REG} (A)	DBCP (mm)
200	26
-200	
250	
-250	

Tabela 8.2 – Parâmetros de regulagem para as soldagens e valores monitorados.

Valores de Regulagem				Valores Monitorados	
I_{REG} (A)	DBCP (mm)	Va (m/min)	Vs (cm/min)	I_M (A)	U_M (V)
200	26	4,8	28,8	201	36,6
-200		8,8	52,0	-199	-30,5
250		6,9	40,8	248	36,3
-250		10	59,1	-248	-31,9

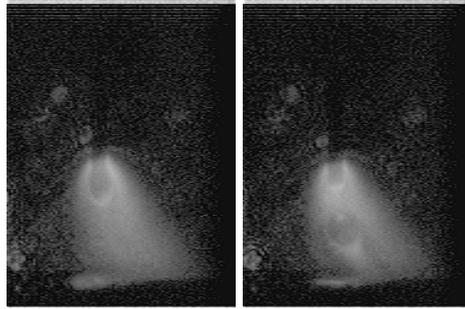


Figura 8.4 – Observação do arco voltaico em CC-, $I = -200$ A.

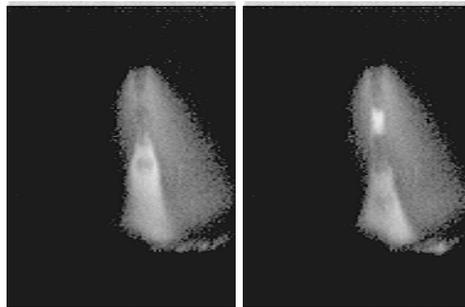
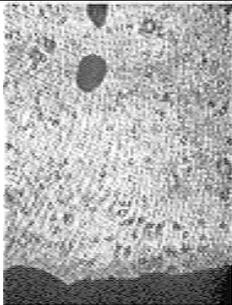
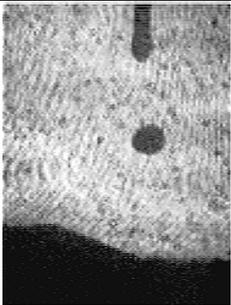
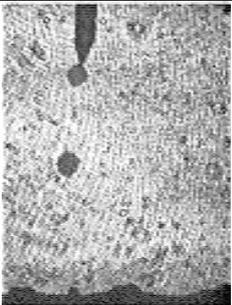
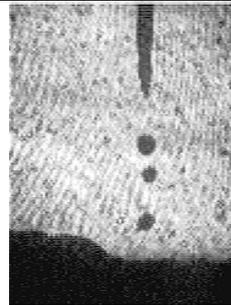


Figura 8.5 – Observação do arco voltaico em CC-, $I = -250$ A.

8.2 Caracterização geométrica da transferência metálica

A Tabela 8.3 apresenta quadros representativos das filmagens realizadas nas diferentes correntes e polaridades. Nem todos os filmes estão na mesma ampliação, sendo diferente a ampliação para cada polaridade utilizada. Os quadros das soldagens em CC+ são aqueles do Capítulo 5 para DBCP de 26 mm nas correntes dadas.

Tabela 8.3 – Filmagens realizadas.

I_{REG} (A)			
200	-200	250	-250
			

A Tabela 8.4 apresenta as características geométricas das transferências metálicas. O comprimento de arco apresentado aparentemente é menor para as soldagens em

CC-, mas isso é devido a um maior comprimento de eletrodo percorrido por corrente que fica mergulhado no arco, ou que é escalado por ele, como mencionado por Souza et al (2007). Observa-se ainda um valor maior para os diâmetros das gotas (d), com um menor desvio padrão, dando a entender que a formação e o destacamento das gotas são mais uniformes na soldagem em CC-. Observa-se que as freqüências de destacamento foram idênticas, muito embora a velocidade de alimentação do arame tenha sido maior na soldagem com CC-.

Tabela 8.4 – características geométricas das transferências metálicas.

I_{REG} (A)	a (mm)	σa (mm)	d (mm)	σd (mm)	f (Hz)
200	14,5	2,1	1,5	0,3	32
-200	12,5	3,3	2,1	0,07	34
250	13,2	1,4	1,0	0,2	210
-250	12,2	2,1	1,2	0,06	210

Tal como nos capítulos anteriores, procede-se uma estimativa da freqüência esperada de transferência metálica (f_{ESP}), que é apresentada na Tabela 8.5, bem como seus valores mínimos e máximos, baseados no desvio padrão do tamanho das gotas. Adotou-se a densidade da gota como sendo de 7500 kg/m^3 (Kim & Na, 2001). Como os desvios padrão para o tamanho das gotas em CC- são bem menores, também são menores as faixas de freqüência esperada, mas a freqüência medida esteve, como em todos os outros experimentos, entre as freqüências máxima e mínima.

Tabela 8.5 – Relação entre a freqüência esperada de destacamento e a freqüência real.

I_{REG} (A)	V_a (kg/s)	d (mm)	M_g (kg)	f_{ESP} (Hz)	Max (Hz)	Min (Hz)	f (Hz)
200	7,05E-4	1,5	1,3E-5	53	104	31	32
-200	1,29E-3	2,1	3,6E-5	36	39	32	34
250	1,01E-3	1,0	3,9E-6	258	505	150	210
-250	1,47E-3	1,2	6,8E-6	217	253	187	210

8.3 Medição das características cinemáticas das gotas

Seguindo a metodologia apontada no Capítulo 3, foram levantadas as curvas posição x tempo para as gotas das soldagens em CC- e comparadas com resultados obtidos no Capítulo 5. Observe que a Figura 8.6 corresponde à Figura 5.6 e a Figura 8.8 corresponde à Figura 5.9. Nas figuras de número 8.7 e 8.9 vê-se que as trajetórias das gotas são relativamente menores, dado que o eletrodo fica emerso no arco, mais próximo da poça, tornando a viagem das gotas mais curtas. Em se tratando do modo de transferência globular, observa-se uma dispersão bem menor nas trajetórias das gotas levantadas, o que reforça a

idéia que as gotas são geradas e se destacam de maneira mais uniforme que na soldagem em CC+.

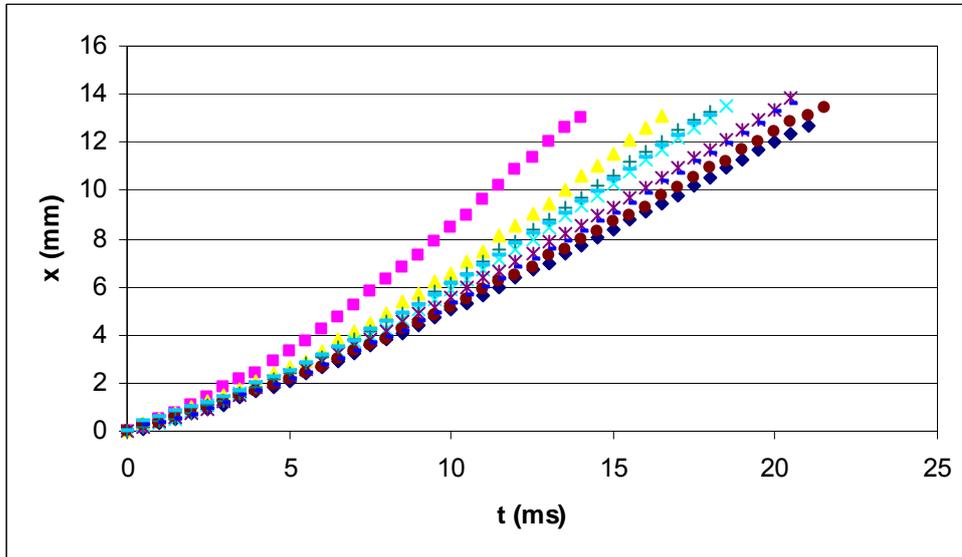


Figura 8.6 – Curvas posição x tempo, $I = 200$ A. ($a = 14,5$ mm)

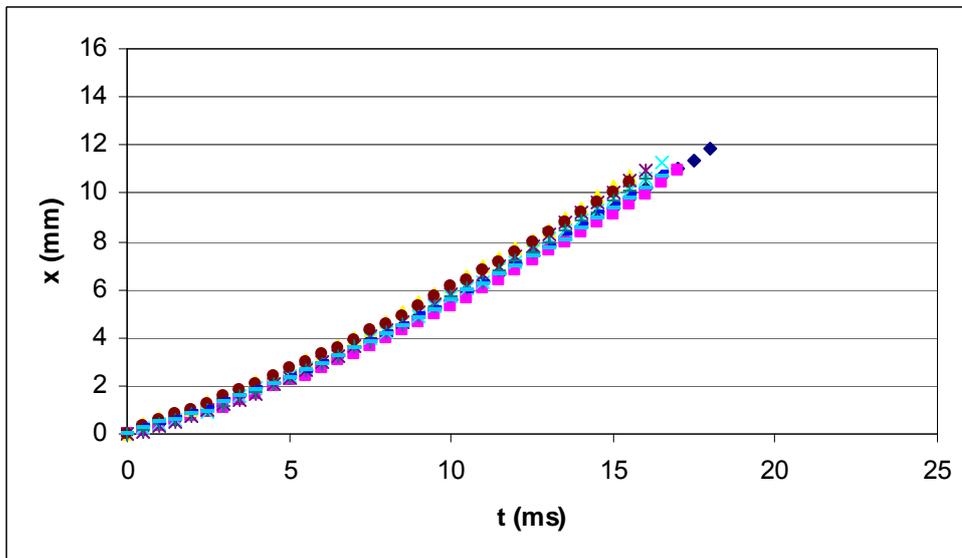


Figura 8.7 – Curvas posição x tempo $I = -200$ A. ($a = 12,5$ mm)

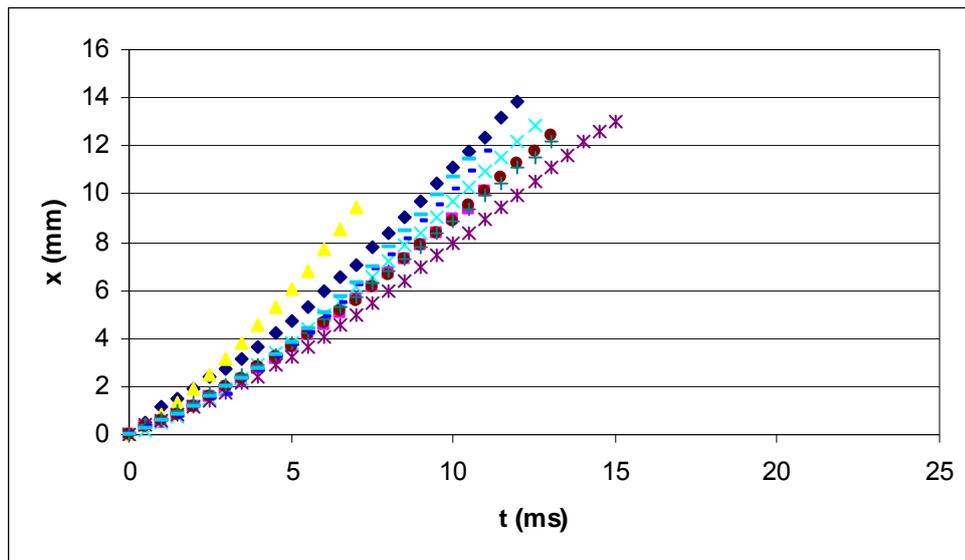


Figura 8.8 – Curvas posição x tempo, $I = 250$ A. ($a = 13,2$ mm)

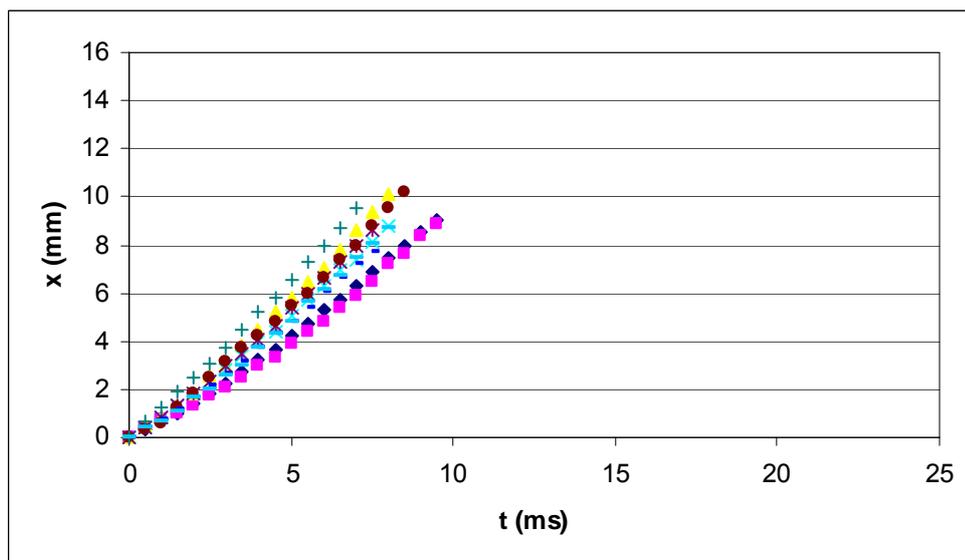


Figura 8.9 – Curvas posição x tempo, $I = -250$ A. ($a = 12,2$ mm)

8.3.1. Avaliação da velocidade de chegada das gotas à poça de fusão

A Tabela 8.6 apresenta os valores de velocidade de chegada das gotas à poça de fusão, suas médias e o resultado da ANOVA agrupados pelo valor da corrente de soldagem, ou seja, pelo tipo de transferência metálica. Observa-se que a polaridade da corrente só afeta significativamente V_{CHE} nas soldagens em transferência globular, tendo sido maior a velocidade de chegada das gotas na soldagem em CC-, ao contrário do que se poderia intuitivamente esperar pelo fato de que o balanço estático das forças se tornaria menos favorável à transferência pela inversão da parcela correspondente ao jato de plasma. Isso pode até ser

verdade para os momentos de formação da gota, mas vê-se que durante a trajetória a maior força gravitacional agindo nas gotas formadas em CC-, associadas a uma maior velocidade inicial lhes conferiram uma maior velocidade de chegada na poça de fusão, como mostra a Figura 8.10. Já para a soldagem com transferência goticular a menor inércia das gotas pode ser a causa da não observação do fenômeno descrito acima.

Tabela 8.6 – Velocidades de chegada: medidas, médias e resultado da ANOVA.

Corrente (A)	-200	200	-250	250
Medidas (m/s)	0,94	0,56	1,02	1,28
	1,02	0,92	1,02	1,40
	0,86	1,00	1,44	1,75
	1,32	0,98	1,19	1,28
	0,86	1,06	1,36	0,76
	0,84	0,58	1,36	1,26
	1,02	0,70	1,53	1,24
	1,20	0,78	1,02	1,56
	0,94	0,80	1,36	1,56
Média (m/s)	1,00	0,82	1,26	1,34
Nível de significância	p = 0,04		p = 0,07	

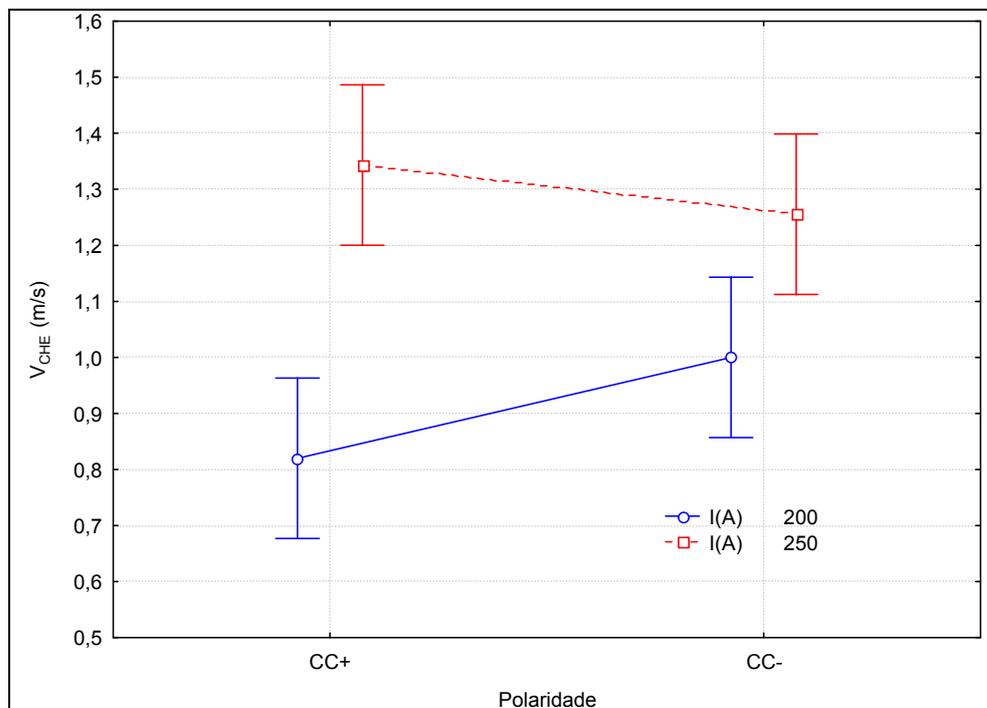


Figura 8.10 – Efeito da Corrente e da Polaridade sobre V_{CHE} .

8.3.2. Avaliação da aceleração das gotas durante a trajetória

A Tabela 8.7 apresenta os valores da aceleração média das gotas durante a trajetória, suas médias e o resultado da ANOVA agrupado pela corrente, ou seja, pelo tipo de transferência metálica. Também ao contrário do que se poderia esperar, não houve influencia da polaridade sobre os valores das acelerações médias obtidos, o que também pode ser constatado na Figura 8.11. Tal como na soldagem em CC+, há um aumento significativo dos valores de A_{MED} quando se passa de uma soldagem com transferência globular para uma com transferência goticular.

Tabela 8.7 – Aceleração média: medidas, médias e resultado da ANOVA.

Corrente (A)	-200	200	-250	250
Medidas (m/s ²)	26,0	34,0	55,2	115,6
	31,2	25,6	76,8	104,6
	30,4	32,0	80,0	39,0
	33,2	19,2	85,8	50,2
	35,8	20,6	55,2	39,2
	27,4	34,8	78,6	54,0
	33,0	44,0	55,8	140,2
	31,0	51,8	51,0	60,6
	29,4	17,6	58,4	66,6
Média (m/s²)	30,8	31,1	66,3	74,4
Nível de significância	p = 0,64		p = 0,15	

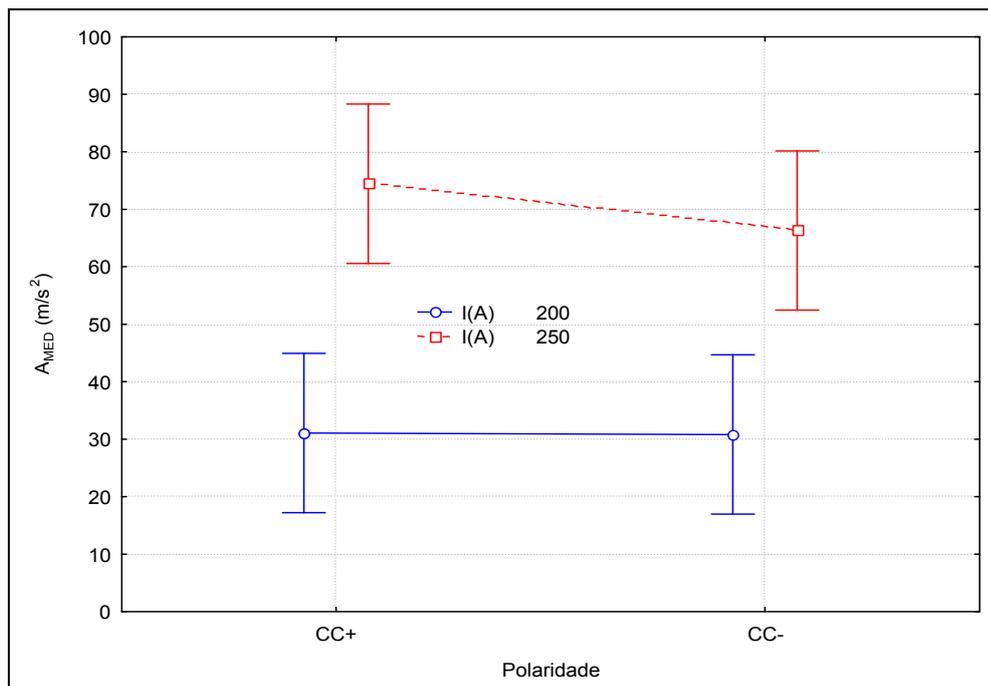


Figura 8.11 – Efeito da corrente e da polaridade sobre A_{MED} .

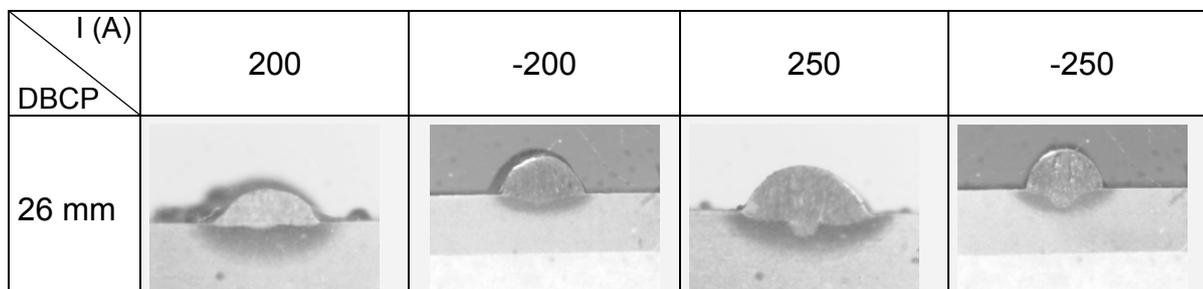
8.4 Caracterização geométrica dos cordões de solda

A Tabela 8.8 apresenta os valores das características geométricas dos cordões de solda, onde P é a penetração, R é o reforço, L é a largura, A_T é a área total, A_{AM} é a área adicionada medida, e A_F a área fundida dos cordões de solda, cujos perfis estão mostrados na Tabela 8.9. Salienta-se que as macros não estão na mesma ampliação, apenas aquelas que são de mesma polaridade. Observa-se a formação da penetração profunda e estreita frequentemente chamada de “finger like” nas soldagens com 250 A, bem como a tendência de ser mais esbeltos os cordões em CC-, quando comparados à CC+ em cada corrente. Souza et al (2007) verificaram que a forma da penetração depende não somente da polaridade da corrente, mas também do tipo de gás de proteção utilizado.

Tabela 8.8 – Medidas das características geométricas dos cordões de solda.

I (A)	P (mm)	R (mm)	L (mm)	A_T (mm ²)	A_{AM} (mm ²)	A_F (mm ²)
200	0,96	3,28	13,34	32,37	28,76	3,60
	0,49	2,50	7,89	15,95	13,02	2,93
	0,21	3,17	14,16	30,57	27,42	3,14
-200	0,87	3,96	7,33	24,78	22,61	2,18
	1,12	3,62	7,56	22,42	19,46	2,95
	0,83	3,64	7,71	24,78	21,77	3,01
250	1,62	2,84	9,81	26,45	17,65	8,80
	1,98	3,36	9,98	33,19	23,39	9,79
	1,53	3,38	9,90	29,83	21,63	8,20
-250	1,86	3,99	7,08	27,57	22,60	4,97
	1,75	3,19	7,57	22,73	17,33	5,41
	1,77	3,61	6,92	24,79	19,42	5,37

Tabela 8.9 – Geometrias obtidas dos cordões de solda (imagens em ampliações diferentes).



A Tabela 8.10 apresenta os níveis de significância p obtidos pela ANOVA. Observa-se que a polaridade da solda não afeta significativamente a penetração da solda, porém afeta o reforço e a largura do cordão, bem como sua área fundida. Neste grupo de experimentos a corrente de soldagem influenciou apenas a penetração das soldas e sua área fundida.

Salienta-se que estes resultados foram obtidos a uma relação V_a/V_s constante. A Figura 8.12 apresenta o efeito da corrente e polaridade sobre a penetração da solda, onde percebe-se, ao contrário dos resultados obtidos por Souza et al (2007), que as médias das soldagens em CC- são maiores que as de CC+, mas essa diferença não foi estatisticamente confirmada. Por outro lado, observando as Figuras 8.13 e 8.14 encontra-se a variação esperada no perfil dos cordões de solda quando se passa a soldar com CC-, variação também observada por Souza et al (2007) e Talkington (1998) e comentada por Lancaster (1984), caracterizada pelo o aumento do reforço e a redução da largura dos cordões, sendo mais esbeltos os cordões para a polaridade direta. A área fundida foi afetada pela corrente, como nos outros capítulos, bem como pela polaridade, especialmente na soldagem com transferência metálica goticular (250 A), como pode ser visto na Figura 8.15.

Tabela 8.10 – Níveis de significância “p” obtidos pela ANOVA.

Variáveis Fatores	P	R	L	A_T	A_{AM}	A_F
I	0,00	0,87	0,29	0,45	0,53	0,00
Polaridade	0,13	0,02	0,01	0,25	0,62	0,00
I x Polaridade	0,30	0,40	0,46	0,68	0,91	0,01

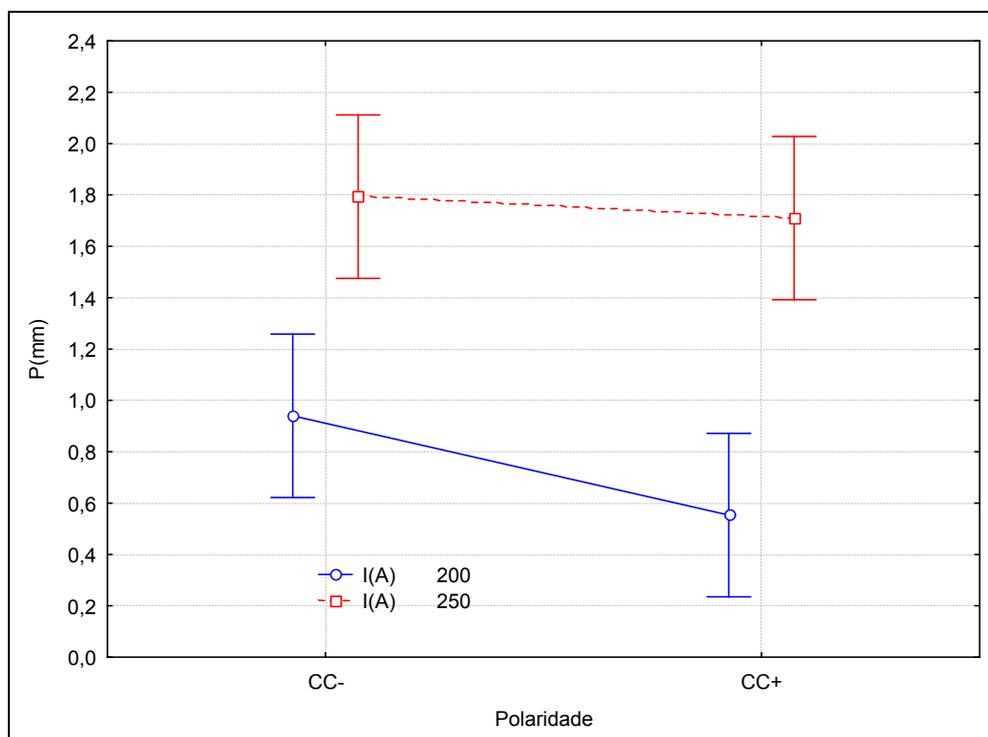


Figura 8.12 – Efeito da corrente e da polaridade sobre P.

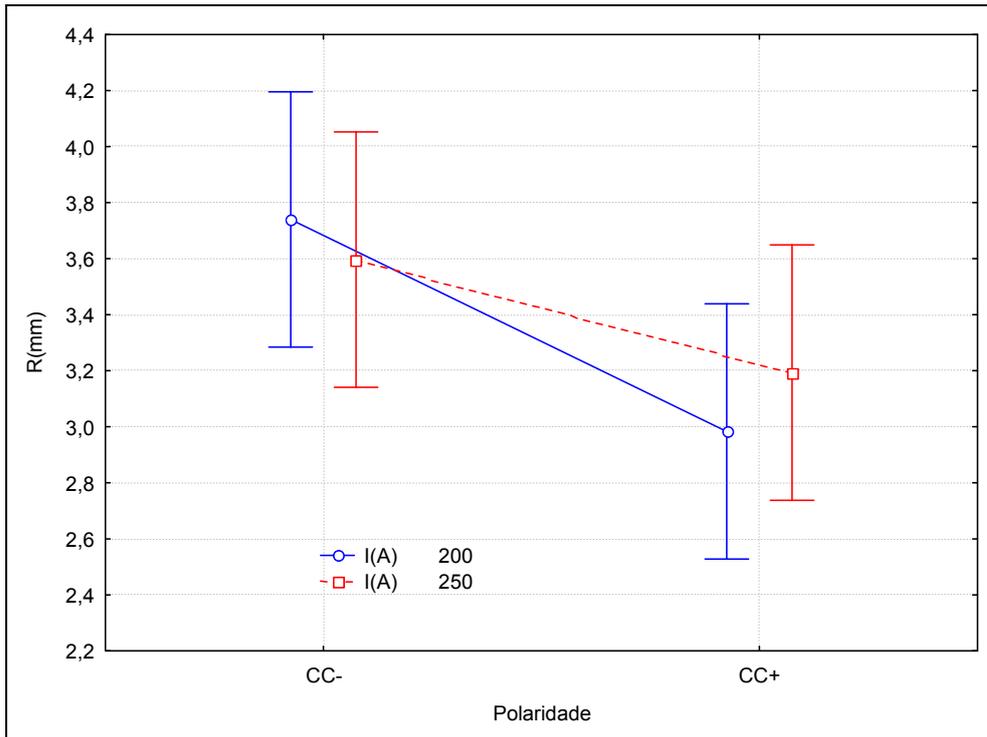


Figura 8.13 – Efeito da corrente e da polaridade sobre R.

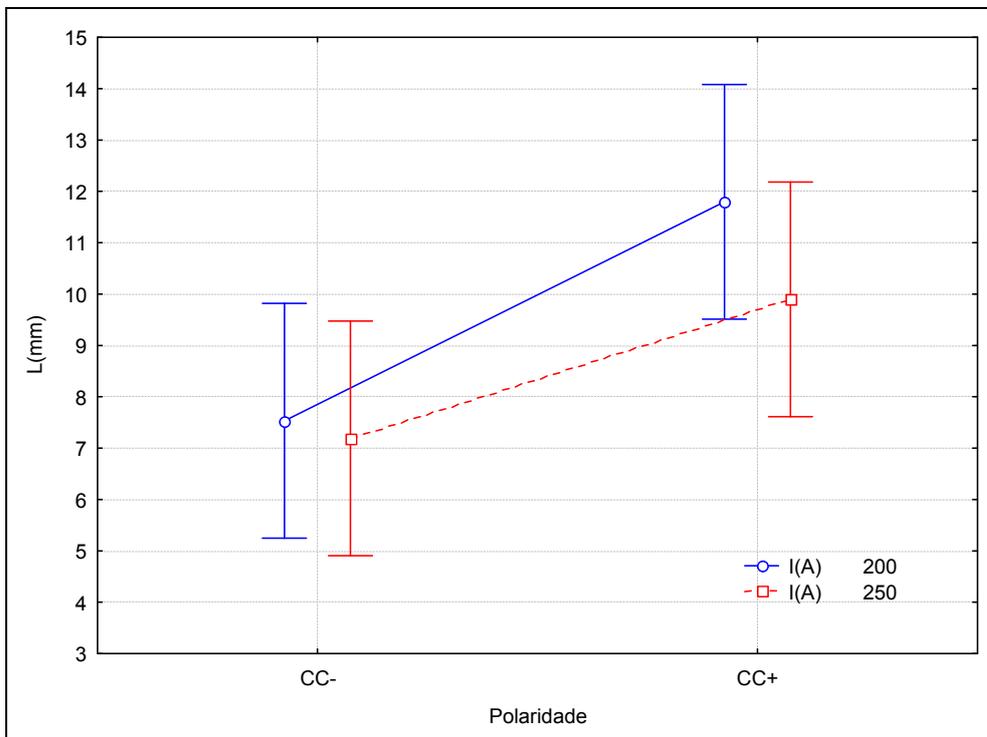


Figura 8.14 – Efeito da corrente e da polaridade sobre L.

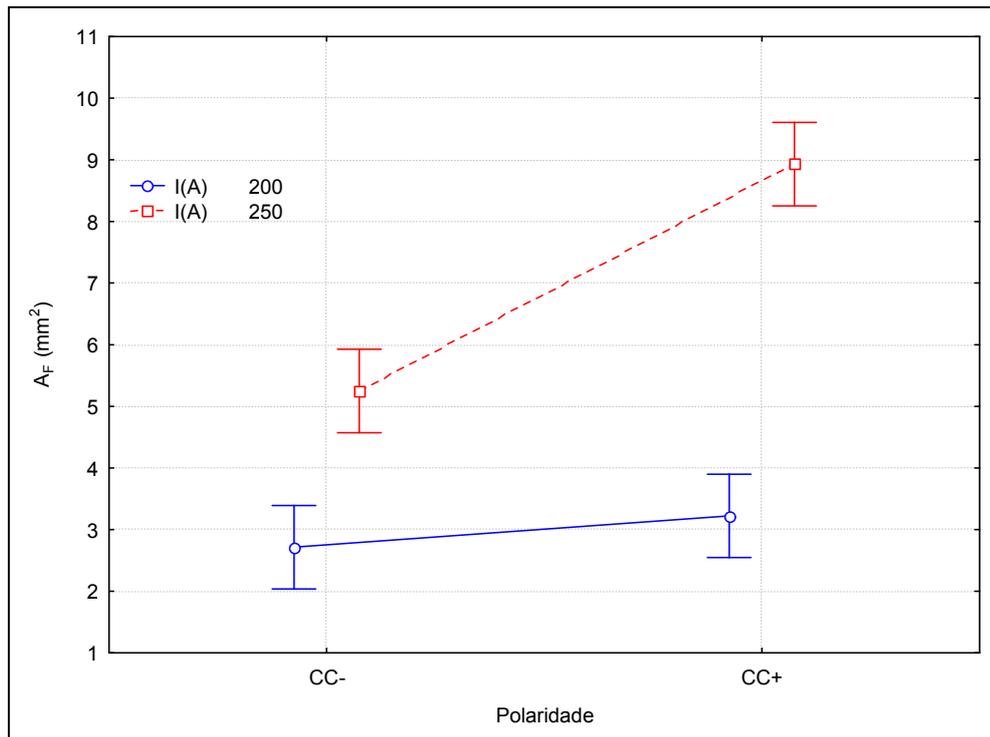


Figura 8.15 – Efeito da corrente e da polaridade sobre A_F .

8.5 Quantidade de Movimento Efetiva das gotas em transferência

A Tabela 8.11 apresenta as características geométricas das gotas em transferência, bem como a Quantidade de Movimento (Q), a Taxa de Quantidade de Movimento (T) e a Quantidade de Movimento Efetiva (Q_e) das gotas, obtidas pelas equações 3.2, 3.3 e 3.4 respectivamente. Tal como ocorreu nos capítulos anteriores, Q caiu enquanto T e Q_e cresceram com o aumento da corrente na mudança do modo globular para goticular de transferência metálica em ambas as polaridades. Observa-se que essa tendência é similar àquelas apresentadas no Capítulo 5 com aço e no Capítulo 6 com alumínio. Também é observado que o valor das variáveis dinâmicas é maior nas soldagens em CC-, o que é decorrente principalmente da maior massa apresentada pelas gotas nesta polaridade.

O efeito das variáveis dinâmicas Q , T e Q_e é mostrado respectivamente nas figuras 8.16, 8.17 e 8.18. Pode-se observar que apesar de as variáveis dinâmicas terem valores maiores em CC-, a tendência das curvas é a mesma, então as variáveis dinâmicas possuem comportamento idêntico nas duas polaridades quando se muda o modo de transferência de globular para goticular.

Tabela 8.11 – Características da transferência metálica e características dinâmicas das gotas.

I_{REG} (A)	a (mm)	d (mm)	f (Hz)	V_{CHE} (m/s)	$Q \times 10^{-4}$ (kg.m/s)	$T \times 10^{-4}$ (N)	Q_e (kg/s)
200	14,5	1,5	32	0,82	0,11	3,48	0,07
-200	12,5	2,1	34	1,00	0,36	12,36	0,13
250	13,2	1,0	210	1,34	0,05	11,07	0,16
-250	12,2	1,2	210	1,26	0,09	17,89	0,21

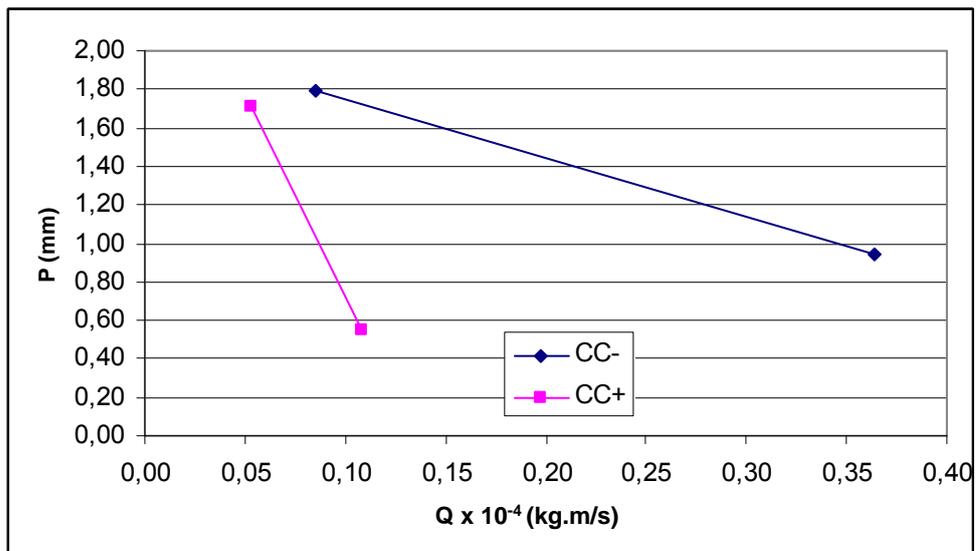


Figura 8.16 – Efeito da polaridade e Q sobre a penetração da solda.

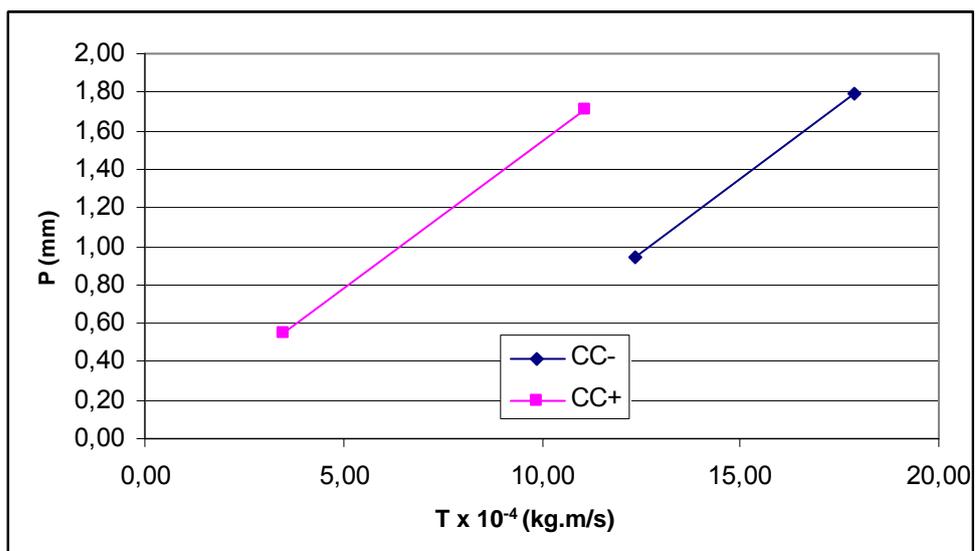


Figura 8.17 – Efeito da polaridade e T sobre a penetração da solda.

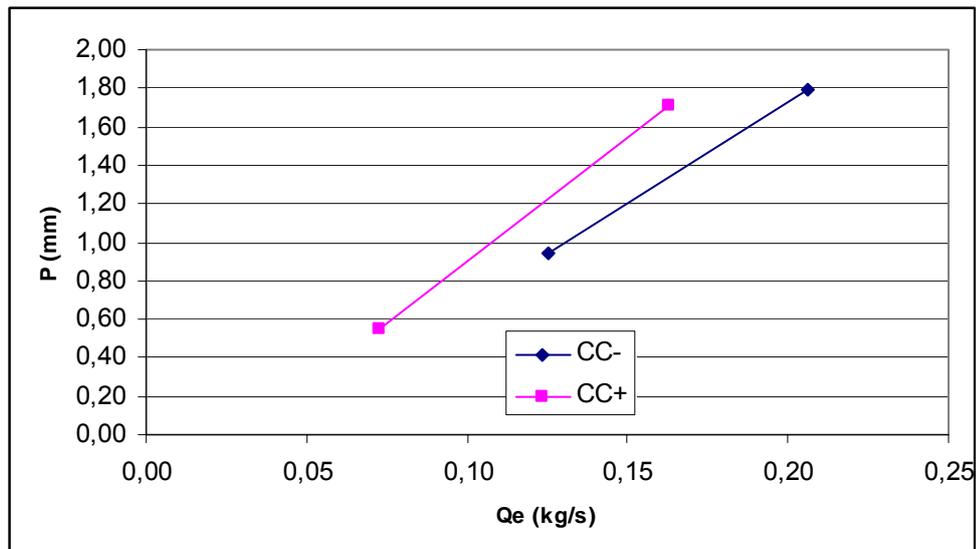


Figura 8.18 – Efeito da polaridade e Q_e sobre a penetração da solda.

8.6 Conclusões parciais

Tendo em vista as condições empregadas (soldagem com eletrodo de aço em CC+ e CC-, posição plana, fonte em corrente constante, etc.) conclui-se que:

8.6.1. Relacionando os fatores de entrada (corrente e polaridade) com as características cinemáticas:

- A corrente de soldagem influencia a velocidade de chegada da gota à poça de fusão: quanto maior, maior a velocidade de chegada.
- A polaridade influencia a velocidade de chegada das gotas à poça somente no modo globular de transferência metálica;

8.6.2. Relacionando os fatores de entrada (corrente e polaridade) com as características dinâmicas:

- O aumento da corrente provoca aumento da quantidade de movimento efetiva impingida pelas gotas na poça de fusão em CC+ e CC-.
- A mudança de polaridade aumentou os valores das características dinâmicas nas duas correntes utilizadas.

8.6.3. Relacionando os fatores de entrada (corrente e polaridade) com a geometria da solda:

- A corrente de soldagem aumenta a penetração do cordão de solda e a sua área fundida, mesmo mantendo-se a mesma área adicionada (aproximadamente mesmo calor imposto) em CC+ e CC-;
- A mudança de CC- para CC+ diminui o reforço e aumenta a largura do cordão de solda, mesmo mantendo-se aproximadamente o mesmo calor imposto.

8.6.4. Relacionando as características dinâmicas com a geometria da solda:

- A quantidade de movimento efetiva das gotas aumenta a penetração na mudança de modo de transferência metálica de globular para goticular em CC+ e CC-.

Capítulo 9

9. Considerações Finais

A Tabela 9.1 apresenta os efeitos gerais observados da corrente, do comprimento do arco, da composição do gás de proteção e da polaridade da corrente sobre as características cinemáticas da transferência metálica.

Tabela 9.1 – Efeito dos parâmetros de entrada sobre as características cinemáticas.

Entradas	Efeitos Observados			
	Arame de aço; Gás Ar+O ₂ ; CC+ (Capítulo 5)	Arame de Alumínio; Gás Ar; CC+ (Capítulo 6)	Gás Ar+O ₂ versus Ar+O ₂ + He Arame de aço; CC+ (Capítulo 7)	CC+ versus CC- Arame de aço; Gás Ar+O ₂ (Capítulo 8)
Efeito conjunto da corrente de soldagem e do comprimento do arco de soldagem sobre "V _{CHE} "	Quanto maiores, maior a velocidade de chegada.	Quanto maiores, maior a velocidade de chegada.	Não avaliado.	Não avaliado.
O efeito da corrente de soldagem sobre "V _{CHE} "	É mais pronunciado quando se passa de uma corrente com transferência globular para uma corrente com transferência goticular.	É mais pronunciado quando se passa de um corrente com transferência globular para uma corrente com transferência goticular.	Não avaliado.	Quanto maior, maior a velocidade de chegada nas duas polaridades, em globular e goticular;
O efeito do comprimento do arco sobre "V _{CHE} "	É pronunciado independentemente do tipo de transferência.	É pronunciado independentemente do tipo de transferência.	É pronunciado independente do tipo de gás	Não avaliado.
Efeito da corrente sobre "A _{MED} "	A corrente só afeta a aceleração média das gotas em comprimentos de arco curto e médio.	A corrente de soldagem influencia a aceleração média das gotas durante a transferência: quanto maiores, maior a aceleração.	Não avaliado.	Não influenciou A _{MED} (usou-se apenas arco longo)
Efeito do comprimento do arco sobre "A _{MED} "	O comprimento do arco só afeta a aceleração média das gotas ao maior nível de corrente.	O comprimento do arco só influencia a aceleração média das gotas durante a transferência no modo globular: quanto maiores, maior a aceleração.	Não avaliado.	Não avaliado.
Efeito do gás sobre "V _{CHE} "	Não avaliado.	Não avaliado.	Não influencia as características cinemáticas	Não avaliado.
Efeito da polaridade	Não avaliado.	Não avaliado.	Não avaliado.	Só influencia em transferência globular

Observando a Tabela 9.1 pode-se constatar a grande semelhança entre os resultados obtidos nas soldagens com aço e alumínio, para o efeito da corrente de soldagem e o comprimento do arco nas características cinemáticas. Estes efeitos se repetiram em

polaridade direta, quando comparados às soldagens com aço (Capítulo 5), tal como o aumento da velocidade de chegada das gotas com o aumento da corrente e o fato de a aceleração das gotas não ter sido influenciada pela corrente de soldagem em arcos mais longos. Assim, vê-se que o comportamento das características cinemáticas é independente do material, do gás de proteção e da polaridade de corrente utilizados.

A Tabela 9.2 apresenta os efeitos da corrente de soldagem, do comprimento do arco, da composição do gás de proteção e da polaridade da corrente sobre as características dinâmicas da transferência metálica. Neste caso, o efeito da corrente é similar nas condições em que foi avaliado (Capítulos 5, 6 e 8), onde há um aumento da quantidade de movimento efetiva das gotas com a mudança no modo de transferência, inclusive na soldagem com polaridade direta. Contudo o efeito do comprimento do arco sobre as características dinâmicas da transferência metálica na soldagem com aço é menor que na soldagem com alumínio (dado que só foi possível percebê-lo com a mudança do modo de transferência) mas mantém a tendência de aumento nas soldagens com várias composições de gases de proteção. A variação na composição do gás de proteção, por sua vez, não apresentou efeito claro sobre as características dinâmicas das gotas. Vê-se também que a mudança na polaridade da corrente fez aumentar os valores desta variável dinâmica. Assim, conclui-se que as características dinâmicas são influenciadas pelas entradas com mais clareza na soldagem com alumínio, bem como quando se tenta variar a polaridade da corrente.

Tabela 9.2 – Efeito dos parâmetros de entrada sobre Q_e .

Entradas	Efeitos Observados			
	Arame de aço; Gás Ar+O ₂ ; CC+ (Capítulo 5)	Arame de Alumínio; Gás Ar; CC+ (Capítulo 6)	Gás Ar+O ₂ versus Ar+O ₂ + He Arame de aço; CC+ (Capítulo 7)	CC+ versus CC- Arame de aço; Gás Ar+O ₂ (Capítulo 8)
O aumento da corrente de soldagem	Aumenta a quantidade de movimento efetiva das gotas apenas quando associada à mudança do modo de transferência de globular para goticular.	Aumenta a quantidade de movimento efetiva das gotas apenas quando associada à mudança do modo de transferência de globular para goticular.	Não avaliado.	Aumenta a quantidade de movimento efetiva das gotas em todos os casos.
O aumento do comprimento do arco	Aumenta a quantidade de movimento efetiva somente no modo globular de transferência metálica.	Aumenta a quantidade de movimento efetiva das gotas independentemente do modo de transferência.	Aumenta a quantidade de movimento efetiva independente do gás de proteção.	Não avaliado.
Composição do gás de proteção	Não avaliado.	Não avaliado.	Não possui relação clara com as características dinâmicas.	Não avaliado.
A polaridade da corrente	Não avaliado.	Não avaliado.	Não avaliado.	Aumenta a quantidade de movimento efetiva das gotas quando se muda de CC- para CC+

A Tabela 9.3 apresenta os principais efeitos observados das entradas (corrente, comprimento do arco, composição do gás e polaridade) sobre a geometria dos cordões de solda, onde se pode observar que a corrente afeta de modo similar soldagens em aço carbono, em alumínio e em polaridade direta, aumentando os valores de penetração e área fundida. Evidenciou-se que o efeito da corrente de soldagem é muito marcante em todas as condições em que foi avaliado, como seria intuitivamente esperado, especialmente quando se passou do modo de transferência globular para o goticular de transferência metálica, significando que há um efeito paralelo do modo de transferência metálica se somando ao efeito dos parâmetros. Este fato ocorreu para as características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica, bem como para a geometria do cordão de solda. Mesmo se mantendo aproximadamente o mesmo calor imposto, ou seja, a mesma relação V_a/V_s , o aumento na corrente esteve sempre associado a aumentos, por exemplo, na penetração dos cordões de solda e na sua área fundida, tanto na soldagem com aço como na soldagem com alumínio e ainda nas soldagens com diferentes polaridades. O comprimento do arco, por sua vez, possui um efeito que pode ser considerado controverso: ao passo em que seu aumento faz elevarem-se os valores da velocidade de chegada à poça de fusão e da quantidade de movimento efetiva das gotas em transferência, provoca uma queda nos valores de penetração e área fundida tanto na soldagem com aço, como na soldagem com alumínio e sob a ação de diversos gases de proteção aplicados. Foi evidenciado então que a redução na concentração do arco provocada pelo seu crescimento foi mais crítica que os aumentos nas características cinemáticas e dinâmicas na composição de seu efeito sobre a penetração e área fundida em todas as situações avaliadas.

Sobre o efeito do gás de proteção na geometria da solda, também apontado na Tabela 9.3, pode-se dizer que não teve tanta influência quanto se pensou ao início do trabalho. Não influenciou claramente as características cinemáticas nem dinâmicas, o que poderia levar inclusive a dúvidas sobre o mecanismo misturador de gases, mostrado no Anexo 2. Contudo, reduziu o efeito “finger-like” como intuitivamente se esperava, e tornou mais tênues os cordões de solda, reduzindo seu reforço e aumentando sua largura, o que confirma que se conseguiu realmente misturar hélio ao gás de proteção, e que a resposta obtida é válida para as composições avaliadas. Destaca-se também o efeito da utilização de gás hélio sobre a área fundida dos cordões de solda, dado que a mesma aumenta com o aumento do teor de hélio no gás de proteção, muito embora apenas em soldagens com arcos curtos.

A Tabela 9.4 apresenta os efeitos da quantidade de movimento efetiva das gotas em transferência sobre a geometria das soldas. Observa-se que foi muito similar na soldagem com aço, alumínio e em polaridade direta, mas que não apresentou tendência clara de efeito sobre a penetração das soldas nas soldagens com diferentes gases de proteção. Desse modo, dentre as entradas avaliadas, apenas a mudança na composição do gás não apresentou

tendência clara do efeito da quantidade de movimento efetiva das gotas em transferência sobre a penetração dos cordões de solda.

Tabela 9.3 – Efeito dos parâmetros de entrada sobre a geometria das soldas.

Entradas	Efeitos Observados			
	Arame de aço; Gás Ar+O ₂ ; CC+ (Capítulo 5)	Arame de Alumínio; Gás Ar; CC+ (Capítulo 6)	Gás Ar+O ₂ versus Ar+O ₂ + He Arame de aço; CC+ (Capítulo 7)	CC+ versus CC- Arame de aço; Gás Ar+O ₂ (Capítulo 8)
O aumento da corrente de soldagem	Aumenta a penetração do cordão de solda e a sua área fundida, bem como modifica a convexidade do cordão de solda, mesmo procurando-se manter a mesma área adicionada esperada.	Aumenta a penetração do cordão de solda e a sua área fundida, bem como modifica a convexidade do cordão de solda, mesmo mantendo-se a mesma área adicionada;	Não avaliado.	Aumenta a penetração do cordão de solda e a sua área fundida, mesmo mantendo-se a mesma área adicionada em CC+ e CC-;
O aumento do comprimento do arco:	Diminui a penetração do cordão de solda e sua área fundida, mesmo mantendo-se a mesma área adicionada esperada.	Diminui o reforço e aumenta a largura do cordão de solda e sua área fundida, mesmo mantendo-se a mesma área adicionada.	Diminui a penetração e a área fundida em todas as composições de gás de proteção utilizadas	Não avaliado.
Composição do gás de proteção	Não avaliado.	Não avaliado.	Reduz a formação do "finger like"; Não afeta a penetração das soldas; Reduz o reforço e aumenta a largura dos cordões de solda; Aumenta a área fundida do cordão de solda, mas apenas em soldagens com arco curto;	Não avaliado.
A polaridade da corrente	Não avaliado.	Não avaliado.	Não avaliado.	A mudança de CC- para CC+ diminui o reforço e aumenta a largura, mesmo mantendo aproximadamente o mesmo calor imposto.

Tabela 9.4 – Efeito da característica dinâmica sobre a penetração das soldas.

Entradas	Efeitos Observados			
	Arame de aço; Gás Ar+O ₂ ; CC+ (Capítulo 5)	Arame de Alumínio; Gás Ar; CC+ (Capítulo 6)	Gás Ar+O ₂ versus Ar+O ₂ + He Arame de aço; CC+ (Capítulo 7)	CC+ versus CC- Arame de aço; Gás Ar+O ₂ (Capítulo 8)
O aumento de Q _e	Aumenta a penetração das soldas quando se muda o modo de transferência; Q _E afeta a penetração das soldas de forma menos marcante que a corrente e o comprimento do arco de soldagem.	Aumenta a penetração da solda, sobretudo na mudança de modo de transferência; Q _E afeta a penetração dos cordões de solda de forma menos marcante que a corrente e o comprimento do arco	Não apresenta relação clara com a penetração dos cordões de solda	Aumenta a penetração da solda em CC+ e CC-.

Capítulo 10

10. Conclusões

Tendo em vista os objetivos do trabalho, os materiais, consumíveis e condições aplicadas conclui-se:

10.1 Relacionando-se os parâmetros de entrada (corrente, comprimento do arco, material do eletrodo, composição do gás de proteção e polaridade) com as características cinemáticas:

- As características cinemáticas são influenciadas pelos parâmetros de entrada, exceto pela composição do gás de proteção: aumentam com a corrente, com o comprimento do arco e com a mudança de CC- para CC+ (neste ultimo caso apenas em transferência globular);
- O comportamento das características cinemáticas da gota é semelhante na soldagem com aço e alumínio, bem como nas polaridades direta e inversa.

10.2 Relacionando-se os parâmetros de entrada (corrente, comprimento do arco, material do eletrodo, composição do gás de proteção e polaridade) com as características dinâmicas:

- A quantidade de movimento efetiva é influenciada claramente quando se passa do modo globular para o goticular de transferência metálica, aumentando independentemente do material e da polaridade utilizados;
- A adição de hélio no gás de proteção não exerce influência clara sobre os valores das características dinâmicas das gotas em transferência;
- O comportamento das características dinâmicas é semelhante nas soldagens com aço e alumínio, bem como nas polaridades direta e inversa.

10.3 Relacionando-se os parâmetros de entrada (corrente, comprimento do arco, material do eletrodo, composição do gás de proteção e polaridade) com a geometria da solda:

- O aumento da corrente de soldagem:
 - Aumenta a penetração da solda e a área fundida, mesmo sendo mantido aproximadamente o mesmo calor imposto em todas as condições empregadas;
- O aumento no comprimento do arco:
 - Diminui a penetração da solda e a área fundida; bem como diminui o reforço e aumenta a largura dos cordões de solda em todas as condições empregadas;
- A adição de hélio no gás de proteção:
 - Reduz significativamente o reforço dos cordões de solda;
 - Reduz sensivelmente a ocorrência do efeito “finger like” na penetração dos cordões de solda;
 - Não afeta o valor da penetração dos cordões de solda;
 - Aumenta a área fundida dos cordões nas soldagens com arcos curtos.
- A mudança de CC- para CC+:
 - Diminui o reforço e aumenta a largura do cordão de solda, mesmo mantendo-se aproximadamente o mesmo calor imposto.

10.4 Relacionando-se as características dinâmicas e a geometria dos cordões de solda:

- A quantidade de movimento ou a taxa de quantidade de movimento por si só não apresentam relação com a penetração. A quantidade de movimento efetiva das gotas representa melhor o fenômeno, sendo, portanto, um dos componentes que governam a formação do cordão de solda;
- A quantidade de movimento efetiva das gotas não pode ser diretamente relacionada nem com a massa nem com a frequência de destacamento das gotas, mas a combinação destes parâmetros com o comprimento do arco, corrente e velocidade de soldagem torna possível aumentar a quantidade de movimento efetiva sem necessariamente ter-se uma corrente mais alta. A importância da medição de todos os parâmetros componentes desta quantidade de movimento efetiva é ressaltada pela revelação do efeito mecânico das gotas impingindo na poça de fusão;

- A quantidade de movimento efetiva das gotas que impingem na poça aumenta a penetração dos cordões de solda, embora com efeito menos marcante que a corrente e o comprimento arco para todos os materiais e polaridades;
- Utilizando-se os mesmos parâmetros de soldagem e várias composições de gases de proteção, mesmo obtendo-se valores diferentes das características dinâmicas para as diversas adições de hélio ao gás de proteção, isso não levou a alterações significativas na penetração dos cordões.

Capítulo 11

11. Propostas para trabalhos futuros

- Avaliar as características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica em MIG/MAG pulsado e MIG/MAG com pulsação térmica, e sua contribuição para a formação do cordão de solda nestes processos, especialmente comparando-se soldagens com parâmetros de regulação diferentes, mas de igual corrente média e/ou eficaz, o que poderia separar com resolução maior o efeito da corrente do efeito das características da transferência metálica;
- Avaliar as características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica em MIG/MAG com polaridade variável, ou MIG-CA, em diversas posições de soldagem e tipos de juntas, visando aperfeiçoar a soldagem de chapas finas;
- Avaliar o efeito do gás de proteção nas características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica em condições de soldagem diferentes da apresentada, como por exemplo, em soldagens em fundo de chanfro e utilizando alumínio como material;
- Avaliar as características cinemáticas filmando-se simultaneamente o perfil transversal (posicionando-se a câmera de frente para a direção de soldagem) e o longitudinal (como neste trabalho) da transferência metálica, o que permitiria ter uma noção tridimensional do movimento das gotas, bem como a análise das características dinâmicas na forma vetorial.

Capítulo 12

12. Referências Bibliográficas

- ADAMS Jr., C. M.. 1958. Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion *Welding Journal* AWS Maio 1958, pp210–215
- ALBRECHT, H. –E., TROPEA, M. B., DAMASCHKE, N. 2000. *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Experimental Fluid Mechanics. Springer-Verlag, Berlin.
- ALLUM, C. J. 1983. MIG welding – time for a reassessment. *Metal Construction*, vol. 15, pp. 24 - 29.
- BÁLSAMO, P.S.S., VILARINHO, L. O., VILELA, M. & SCOTTI, A.; 2000, Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy, *The Int. Journal for the Joining of Materials*, vol 12, no. 1, The European Institute for Joining of Materials (JOM), Denmark, pp1-12
- BINGUL, Z., COOK. G. E., BARNETT, R. J., STRAUSS, A M., WELLS, B. S., 1996, *An Investigation of Constant Potential GMAW Instability Behavior*, ASM-AWS: Trends in Welding Research, Nashville, Tennessee.
- BIRCHFIELD, J. R. 1985. High rate welds need more current, a different gas and gun cooling. *Welding Design and Fabrication* (6): 32–37.
- BUDAI, P. 1988. Measurement of droplet transfer stability in weld processes with short circuiting drop transfer. *Conf. Computer Technology in Welding*. pp149–155.
- CARON, V. 1962. Study of drop motion in the mild steel-argon arc welding system. *Canadian Metallurgical Quaterly*, Vol. 9, n. 1, pp. 373-380.
- COOKSEY, C. J., and MILNER, D. R. 1962. Metal transfer in gas-shielded arc welding. *Proc. Symp. Physics of the Welding Arc*. The Welding Institute, London, U.K., pp. 123–132.
- CORREIA, D. S. 2003. Seleção de processo de soldagem utilizando uma metodologia baseada nos custos da não qualidade. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal de Uberlândia. Abril, 2003.

- COSTA, A. V. da. 2003. Desenvolvimento de metodologias para a determinação de quedas de tensão em arcos de soldagem. *Tese de Doutorado*, Universidade Federal de Uberlândia. Fevereiro, 2003.
- CRAMER, R. von. 1988. Betrachtungen über Stromdüsen beim Schutzgasschweißen. *Schweißtechnik* 42: pp195–196.
- DILLENBECK, V. R.; CASTAGNO, L.; 1987. The effects of various shielding gases and associated mixtures in GMA welding of mild steel. *Welding Journal* 66 (9),1987, pp. 45s–49s.
- DORN, L., and RIPPL, P. 1982. Untersuchung des Werkstoffübergangs beim Metall-Schutzgasschweißen unter Mischgas und Kohlendioxid. *Schweißen und Schneiden* 34(8) pp378–385.
- DORN, L., and RIPPL, P. 1984. Prozeßanalyse beim Metall-Schutzgasschweißen- Lichtbogenstabilität, Spritzerbildung und Momentanwert-verlauf der elektrischen Größen bei Veränderung der Verfahrensparameter. *Schweißen und Schneiden* 36(5): pp219–224.
- DRAIN, L. E. 1980. *The Laser Droplet Technique*. John Wiley & Sons, New York.
- EAGAR, T.W., TSAI, N.S.. 1983. Temperature Fields Produced by Traveling Distributed Heat Sources. *Welding Journal* AWS, Dezembro, 1983 p346.
- ESSERS, W. G., WALTER, R. 1981. Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding, *Welding Journal*, 60, 37s–42s.
- FAN, H. G., KOVACEVIC, R. 1998. Dynamic analysis of globular metal transfer in gas metal arc welding – a comparison of numerical and experimental results, *Journal of Physics D: Applied Physics*. 31 (1998) 2929–2941.
- FAN, H. G., KOVACEVIC, R. 1999. Droplet formation, detachment, and impingement on the molten pool in gas metal arc welding. *Metallurgical Transcriptions*. 30B (1999) 791–801.
- FAN, H. G., KOVACEVIC, R. 2004. A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37 (2004) 2531–2544
- FARIAS, J. P., MIRANDA, H. C., MOTTA M. F., PAIVA F. D. Q., PESSOA E. F. 2005. Efeito da Soldagem MIG/MAG em Corrente Alternada Sobre a Geometria da Solda. *Soldagem & Inspeção*, vol 10, n°4, p. 173 – 181.

- FARIAS, J. P., LUZ T. S., RODRIGUES, C. E. A. L.. 2002. Estudo da operacionalidade do arame tubular AWS E71T-1. *Congreso de Materiales CONAMET-SAM-Simposio Materia 2002*, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. 2002 CD-ROM.
- FROHN, A., ROTH, N., 2000. *Dynamics of Droplets*. Springer-Verlag, Alemanha, 292p.
- GOHR, R., PELLIZARO, F., BAIXO, C. E. , SILVA, R. H.. 2003. Desenvolvimento do Processo MIG/MAG com Curtocircuito Controlado para a Soldagem de Reparo e União de Dutos. *Anais do 2o Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás*. 15 a 18 de Junho de 2003, Hotel Gloria, Rio de Janeiro, Brasil.
- GUPTA, S. R., and GUPTA, P. C . 1984. Effect of some variables on spatter loss. *Welding and Metal Fabrication* 54 (11/12): pp361–364.
- HERMANS, M. J. M., OUDEN, G. DEN. 1999. Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal* 76 (1) pp132-137
- HERMANS, M. J. M., SIPKES, M. P., and OUDEN, G. den. 1993. Characteristic features of the short circuiting arc welding process. *Welding Review International* 12(2): pp80–86.
- HIRATA, Y. 1989. Recent Japanese papers relating to spatter. *International Institute of Welding IIW doc*. 212-740-89.
- HU, J., TSAI, H. L. 2007a. Heat and mass transfer in gas metal arc welding Part I The arc. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007) 833–846.
- HU, J., TSAI, H. L. 2007b. Heat and mass transfer in gas metal arc welding Part II The metal. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007) 808-820.
- JONES, L. A., EAGAR, T. W., LANG, J. H. 1998a. Images of steel electrode in Ar–2%O₂ shielding during constant current gas metal arc welding, *Welding Journal*. (abril 1998) 135s–141s.
- JONES, L. A., EAGAR, T. W., LANG, J. H. 1998b. Magnetic forces acting on molten drops in gas metal arc welding *Journal of Physics D: Applied Physics*. 31 (1998) 93–106.
- JONES, L. A., EAGAR, T. W., LANG, J. H. 1998c. A dynamic model of drops detaching from a gas metal arc welding electrode. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 31 (1998) 107–123.

- KIM, C.-H., ZHANG, W., DEBROY, T.. 2003. Modeling of temperature field and solidified surface profile during gas-metal arc fillet welding *Journal Of Applied Physics* Volume 94, Number 4. 15 de Agosto de 2003.
- KIM, J.-W. & NA S.-J. 1995. A study of the effect of contact tube-to-workpiece distance on weld pool shape in gas metal arc welding. *Welding Journal*, Maio de 1995, 74, pp. 141–152.
- KIM, Y.-S.; . EAGAR, T. W. Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, 1993, 72, 269s–278s.
- LANCASTER, J. F. 1984. *The physics of welding*. Pergamon Press, pp 54-258.
- LESNEWICH, A. 1958. Control of melting rate and metal transfer in gas shielded metal arc welding. *Welding Journal, AWS*, 37 (8), pp 343s-353s e 418s-425s.
- LEWIS, P. D., and BAX, D. N. A. 1964. Effect of inductance on spatter loss in CO₂ shielded welding of mild steel. *British Welding Journal* (4) pp 157–162.
- LIN, Q., LI, X. SIMPSON, S. W. 2001. Metal Transfer Measurements In Gas Metal Arc Welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34, pp 347-353.
- LINCOLN ELETRIC CO.. 2001. Página da internet. Caminho: http://www.lincolnelectric.cz/oc_vysledky_zkousek_e.htm. Acessado em 27/06/2003.
- LUDWIG, H. C. 1957. Metal Transfer Characteristics in gas-shielded metal arc welding, *Welding Journal, AWS*, 36 (1), pp . 23s-26s.
- MAGALHÃES, S. G., MIRANDA, H. C., MOTTA, M. F. 2007. Qualidade e Geometria da Solda do Processo MIG/MAG com Corrente Alternada em Alumínio. XXXIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, 27 a 30 de agosto de 2007.
- MAIA, T. C. G.. 2001. Utilização de técnicas de processamento digital de imagens no estudo de transferência metálica em soldagem a arco voltaico. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Uberlândia, maio 2001.
- MAIA, T. C. G., FLÔRES, E. L. & SCOTTI, A., Quantificação da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG por Processamento de Imagens, II Congresso Nacional da Engenharia Mecânica - CONEM 2002, 12 a 16 de Agosto, João Pessoa, UFPB/ABCM, CPB1200, 10 p.
- MAIA, T. C. G., FLÔRES, E. L. & SCOTTI, A., 2003, Avaliação Comparativa entre Análises Quantitativas Automatizada e Manual Aplicadas sobre Imagens de

- Transferência Metálica em Soldagem MIG\MAG, II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, Uberlândia, MG, CD ROM;
- MAZUMDER, J., TEKRIWAL P.. 1988. Finite Element Analysis of Three-Dimensional Transient Heat Transfer in GMA Welding. *Welding Journal* Jul. 1988 pp150-156
- MIRANDA, H. C. de; FERRARESI V. A. 2003 Identificação da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG Pulsada de Aço Inoxidável a Partir de um Sensor Óptico *Anais do II COBEF*, CD-ROM.
- MIRANDA, H. C. de, FERRARESI, V. A., SCOTTI, A. 2007. Identification and control of metal transfer in pulsed GMAW using optical sensor. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 12, p. 249-257, 2007.
- MIYASAKA, F., MUKAI, N., YAMAZAKI, Y., WAKAMATSU, T., OHJI, T. 2006. Application of a GMA Welding Process Model for Various Joints. *International Institute of Welding IIW Doc XII-1903-06*.
- MODENESI, P. J., AVELAR, R. C. de. 1999. The Influence of Small Variations of Wire Characteristics on Gas Metal Arc Welding Process Stability. *Journal of Materials Processing Technology* 86, pp. 226–232
- MODENESI, P. J., REIS, R. I. 2005. Modelagem da Fusão do Eletrodo no Processo de Soldagem MIG/MAG. *COBEF 2005 – III Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação; CD-ROM*.
- MORALES, R. F., FERNANDES, D. B., SCOTTI, A. Influence of helium in the shielding gas on the bead geometry of carbon steel GMAW. *COBEM 2007 – 19º International Congress of Mechanical Engineering*, Brasília – Brasil, 5 a 9 de Novembro, 2007.
- MURRAY, P. E., SCOTTI, A. 1999. Depth of penetration in gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining* .1999 Vol. 4 No. 2, pp 112 – 117.
- NAGESH D.S., DATTA G.L.. 2002. Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks. *Journal of Materials Processing Technology*, 123 (2002) 303–312
- NEEDHAM, J. C., COOKSEY, C. J., MILNER, D. R. 1960. Metal transfer in inert gas shielded arc welding. *British Welding Journal*, 7 (2), pp. 101-114.
- PACHE, N. 1988. Mit Drahtreiniger ist das Metall-Schutzgasschweißen wesentlich billiger. *Der Praktiker* 40(6): 288–295.

- PONOMAREV V., DA COSTA A. V. & SCOTTI A. 2002. Effect of electrode metal drop on arc voltage in shielded-gas welding, *Patton Welding Journal*, no. 4 (589), April 2002, pp. 7- 11 (in English) (ISSN: 0957-798X - www.nas.gov.ua/pwj).
- POPKOV, A. M. 1971. Causes of spatter loss in welding with the short circuiting CO₂-shielded arc. *Welding Production* (5): 20–23.
- QUINN, T. P., MADIGAN, R. B., MORNIS, M. A., SIEWERT, T. A. 1995. Contact tube wear detection in gas metal arc welding. *Welding Journal* 74(4): pp115-121.
- RAFFEL, M., WILLERT, C., KOMPENHANS, J. 1998. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Experimental Fluid Mechanics. Springer-Verlag, Berlin.
- REHFELDT, D., SEYFERTH, J., and WANDTKE, R. 1985. Arc short circuiting and arc reignition during GMAW. IIW doc. 212-629-85: pp1–10.
- REIS, R. P. 2006. Utilização de Unidades de Medida Segundo o SI em Redações Técnico-Científicas. *Revista Soldagem & Inspeção* – Vol. 11, No. 1, Jan/Mar 2006
- RODRIGUES, C. E. A. L.; LUZ, T. S.; SCOTTI, A.. 2004. Metodologia para análise cinemática da transferência metálica no MIG/MAG. *III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - 2004. CD-ROM*.
- ROSENTHAL, D. 1946. *Trans. ASME*, 1946, 68, pp849–866.
- SCHODL, R. 1986, Laser-two-Focus Velocimetry. *Proc. Advanced Instrumentation for Aero Engines Components*, AGARD-CP-399, pp. 7-1 a 7-31.
- SCOTTI A.. 1998. A review on special metal transfer modes in gas metal arc welding. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol. XX, (3), pp. 465 – 478.
- SCOTTI, A.. 2000. Mapping transfer modes for stainless steel gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding & Joining*, 1 April 2000, vol. 5, no. 4, pp. 227-234(8). Institute of Materials, published by Maney Publishing
- SCOTTI, A., PONOMAREV, V., da COSTA, A. V.. 2006. A methodology for voltage drop determination in GMA welding: arcs with short-circuiting metal transfer. *European Physical Journal Applied Physics*, EDP Sciences, v. 34, p. 231-236, 2006.
- SHINODA, T., KANEDA, H., and TAKEUCHI, Y. 1989. An evaluation of short circuit arc phenomena in GMA welding. *Welding and Metal Fabrication* 57(12): pp522–525.
- SILVA NETO; O. V. V. da, MACIEL T. M. 2003. Efeito do gás de proteção sobre o teor de fumos em processos de soldagem ao arco elétrico. *Anais do II COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, CD-ROM.

- SILVA, C. L. M. da; 2003. Avaliação da técnica de pulsação térmica na soldagem de alumínio. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal de Uberlândia.
- SILVA, C. L. M. da; SCOTTI, A. 2003. Reavaliação do Efeito de Técnicas MIG Pulsado sobre a Suscetibilidade a Trincas de Solidificação da Liga AA 5052 pelo Teste Transvarestraint *Anais do II COBEF*, CD-ROM.
- SOARES, D. S. L. 2003. A Aceleração da Gravidade na Superfície da Terra. Página da Internet. Caminho: <http://www.observatorio.ufmg.br/pas46.htm>. Acessado em 10/06/2007.
- SOUZA, D., RESENDE, A. A., SCOTTI, A. 2007. A quantitative model to explain the polarity influence on the fusion rate in the MIG/MAG process. *Anais do IV COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, CD-ROM.
- SUBRAMANIAM, S.; WHITE, D. R.; JONES, J. E.; LYONS, D. W. 1998. Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum. *Welding Journal, AWS*, 77 (11), pp. 458s-464s.
- TALKINGTON, J. E. Variable polarity gas metal arc welding. Dissertação de Mestrado, The Ohio State University. 1998. 113p.
- TSAO, K.C., WU, C.S. 1988. Fluid Flow and Heat Transfer in GMA Weld Pools, *Welding Journal AWS* pp70-75 Mar.
- VILARINHO, L. O., SCOTTI, A. 2000. An alternative Algorithm for Synergic Pulsed GMAW of Aluminum. *Australasian Welding Journal*, v. 45, n. 2nd, pp. 36-44.
- WANG, Y., TSAI, H.L. 2001. Impingement of filler droplets and weld pool dynamics during gas metal arc welding process. *International Journal of Heat and Mass Transfer* (44) pp. 2067-2080
- WASZINK, J. H., GRAAT L. H. J.. 1983. Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal. *Welding Journal*, vol. 62, 109s–116s.
- WASZINK, J. H.; PIENA, M. J. 1986. Experimental investigation of drop detachment and drop velocity in GMAW, *Welding Journal*, vol. 65 (11), pp. 289s – 298s.
- ZARUBA, I. I. 1974. Factors governing metal spatter during welding with short-circuiting. *Automatic Welding* (8): 71.
- ZWICKERT, H. 1987. Untersuchungen zur Klärung einiger Vorgänge bei der Stromübertragung im Gleitkontakt Kontaktdüse-Schweißdraht. *ZIS-Mitteilungen, Halle* 29(11): pp 1159–1169.

Anexos

13. Anexo I – Oscilogramas: Comportamento dinâmico da fonte de soldagem

13.1 Soldagens realizadas na Avaliação Cinemática da Transferência Metálica com aço-carbono

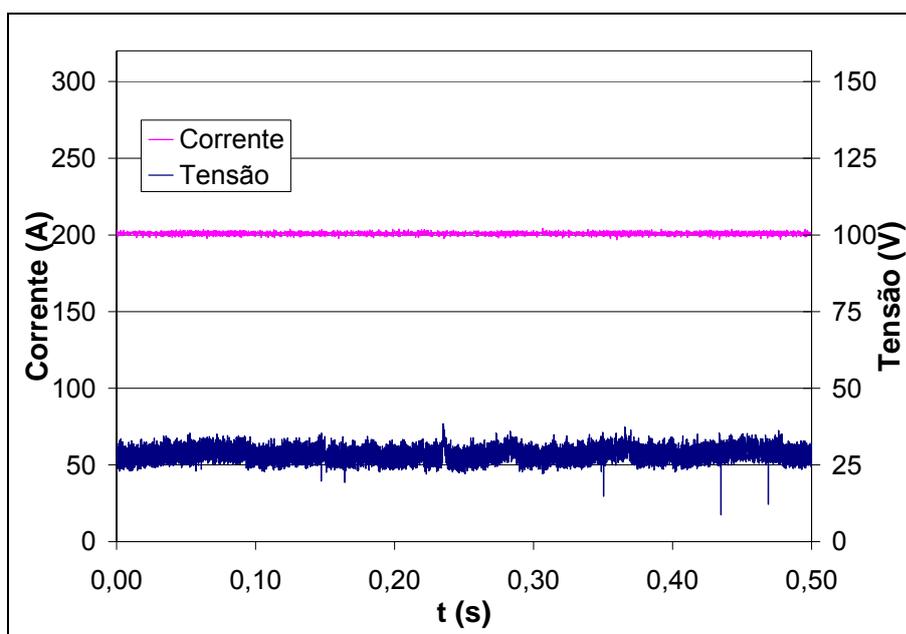


Figura 13.1 – Comportamento dinâmico do experimento A ($I_{REG} = 200$ A; DBCP = 18 mm)

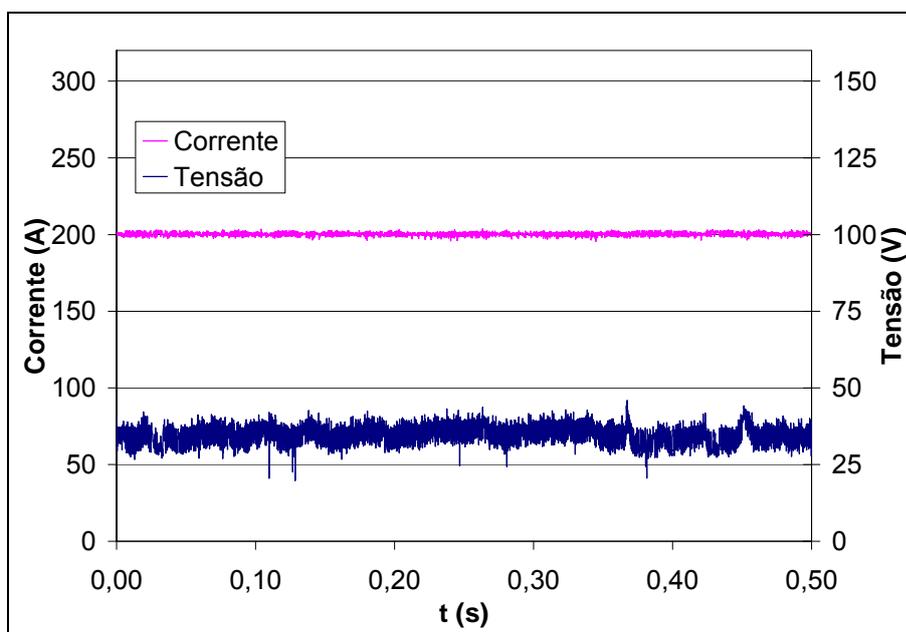
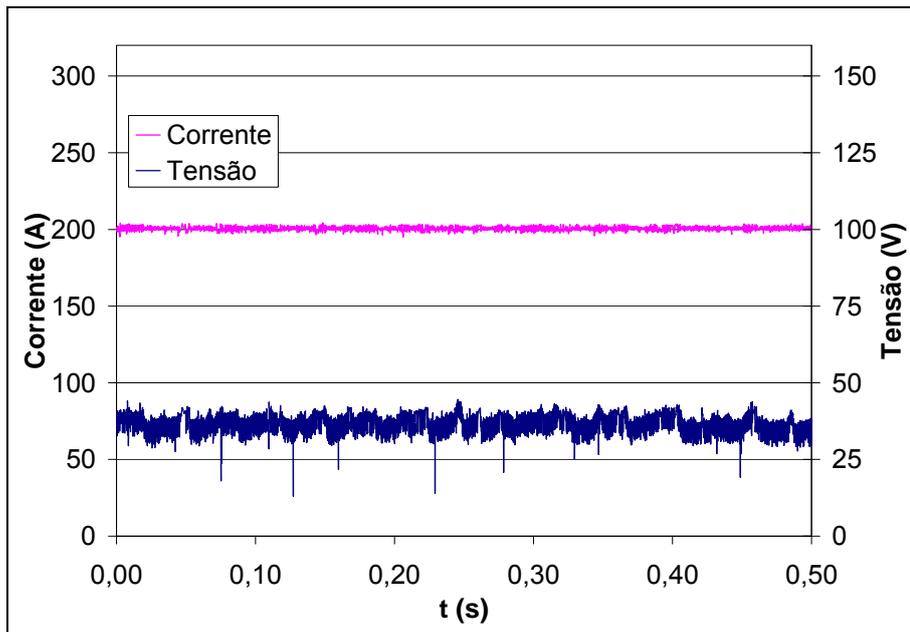
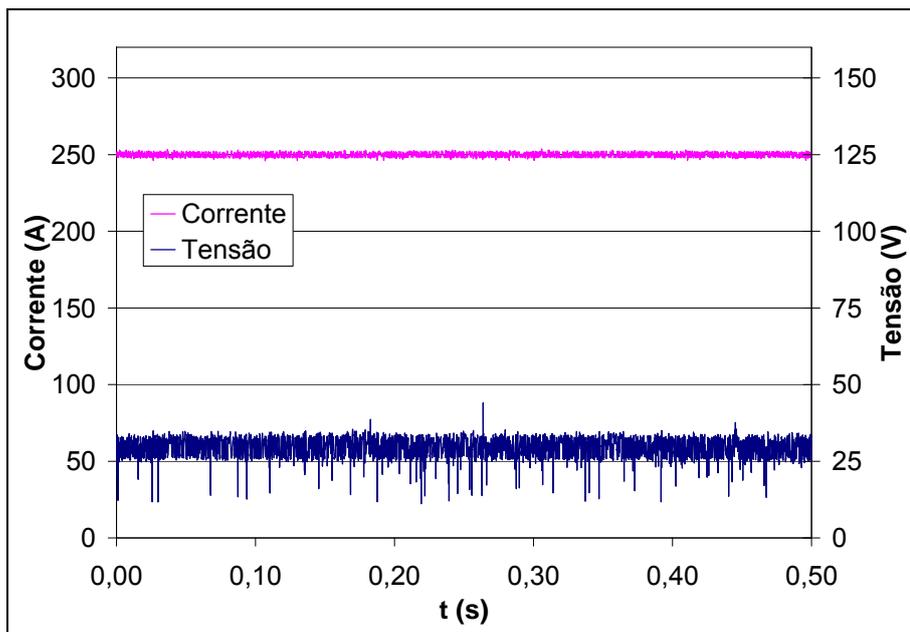
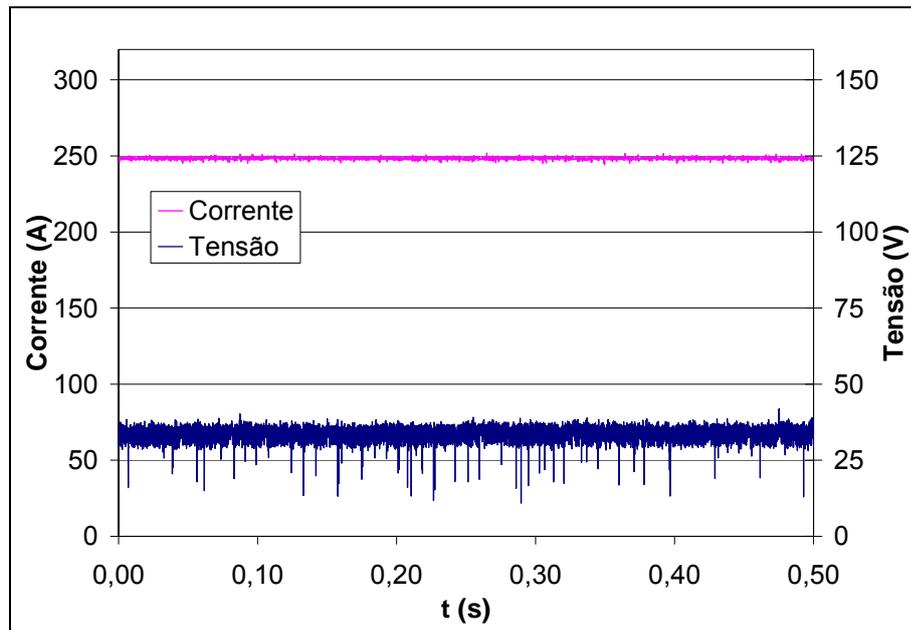
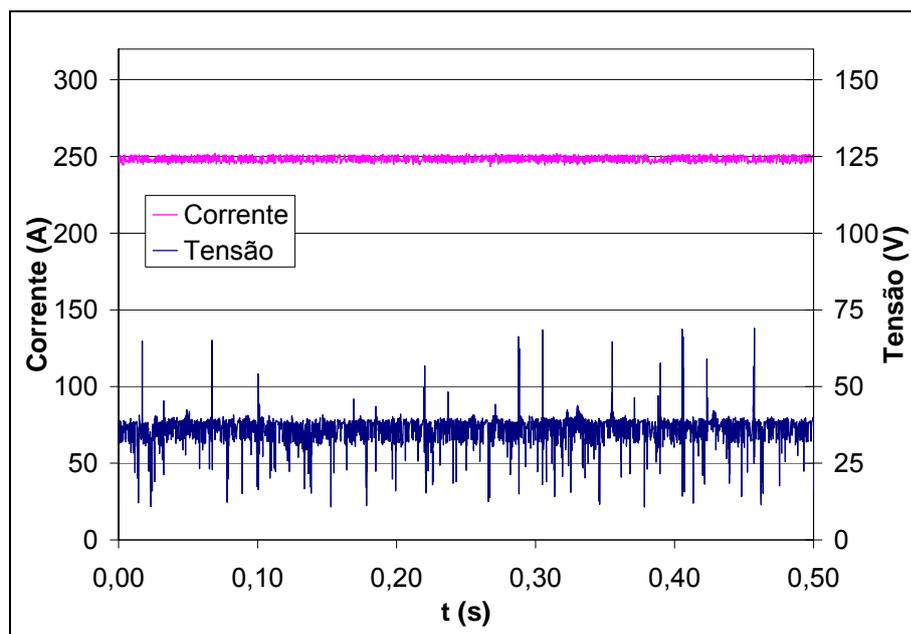
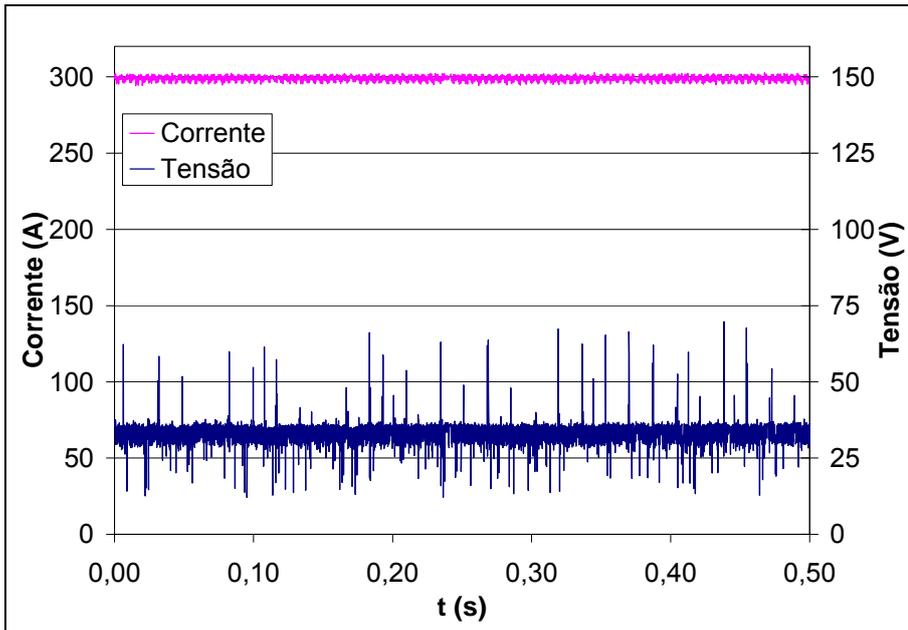
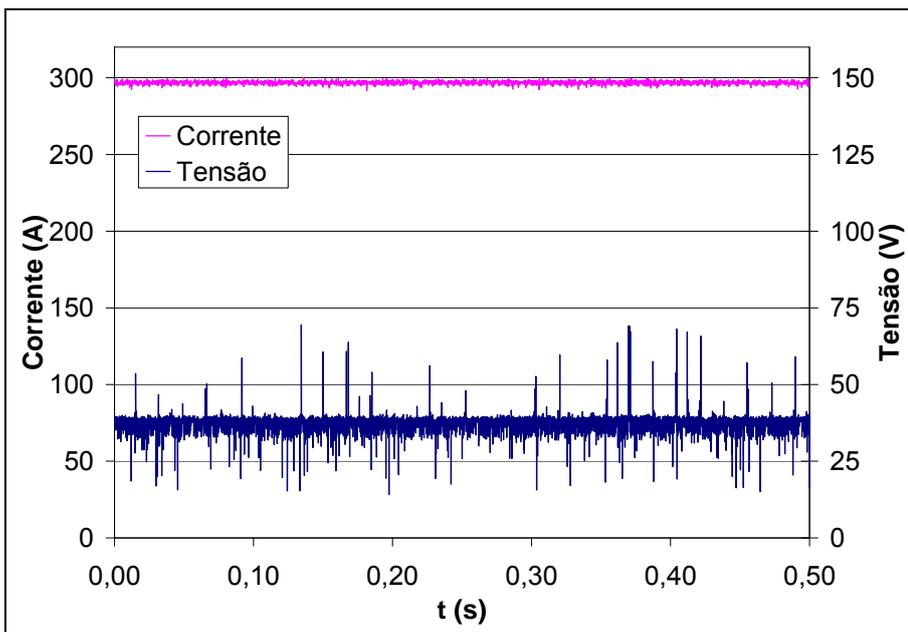


Figura 13.2 – Comportamento dinâmico do experimento B ($I_{REG} = 200$ A; DBCP = 22 mm)

Figura 13.3 – Comportamento dinâmico do experimento C ($I_{REG} = 200$ A; DBCP = 26 mm)Figura 13.4 – Comportamento dinâmico do experimento D ($I_{REG} = 250$ A; DBCP = 18 mm)

Figura 13.5 – Comportamento dinâmico do experimento E ($I_{REG} = 250$ A; DBCP = 22 mm)Figura 13.6 – Comportamento dinâmico do experimento F ($I_{REG} = 250$ A; DBCP = 26 mm)

Figura 13.7 – Comportamento dinâmico do experimento G ($I_{REG} = 300$ A; DBCP = 18 mm)Figura 13.8 – Comportamento dinâmico do experimento H ($I_{REG} = 300$ A; DBCP = 22 mm)

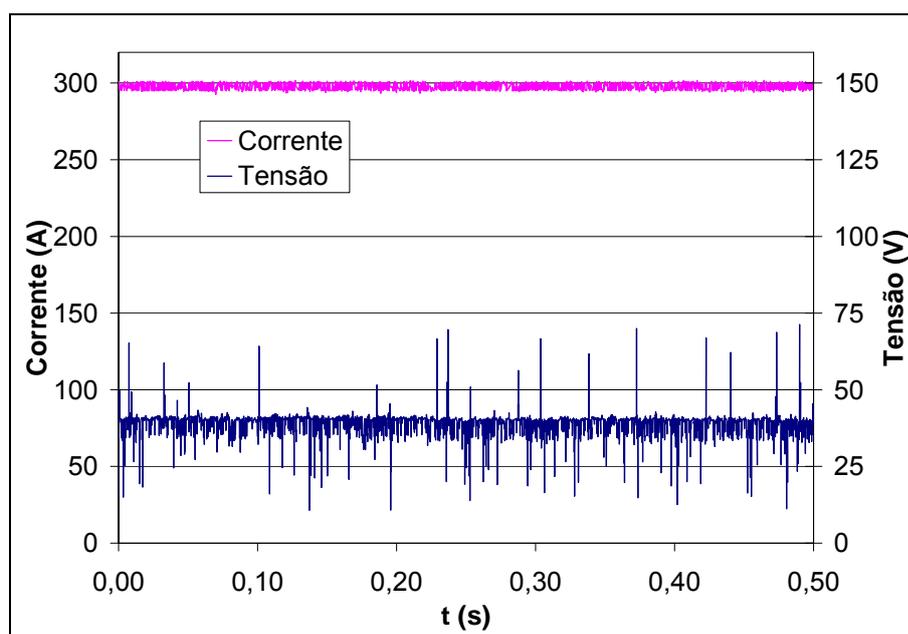


Figura 13.9 – Comportamento dinâmico do experimento I ($I_{REG} = 300$ A; DBCP = 26 mm).

13.2 Soldagens realizadas na avaliação cinemática e dinâmica da transferência metálica com eletrodo de alumínio

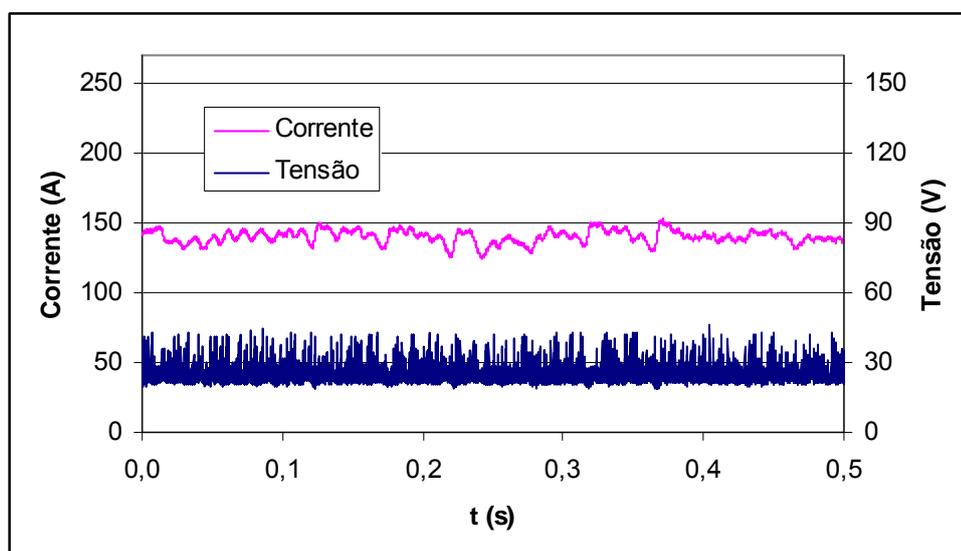


Figura 13.10 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 130$ A e DBCP = 18 mm.

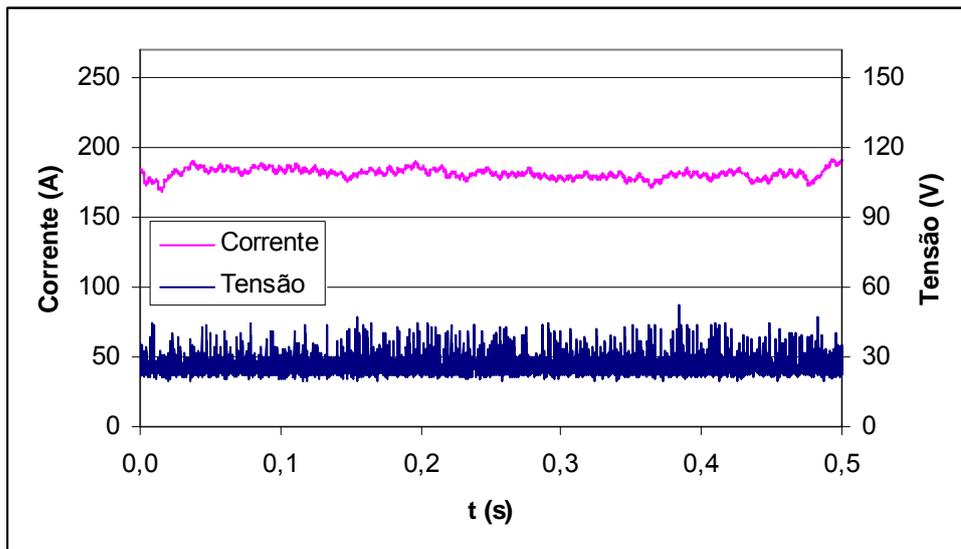


Figura 13.11 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 180$ A e DBCP = 18 mm.

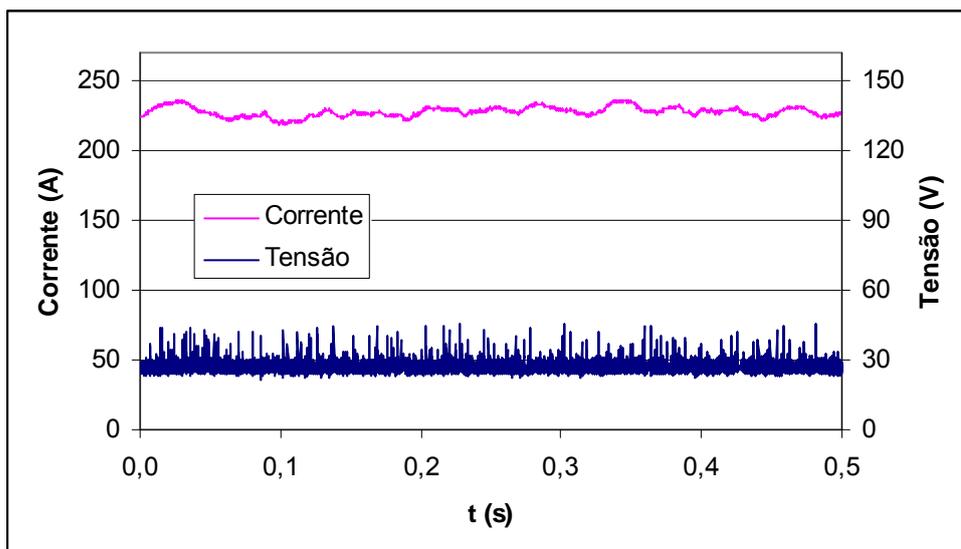


Figura 13.12 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 230$ A e DBCP = 18 mm.

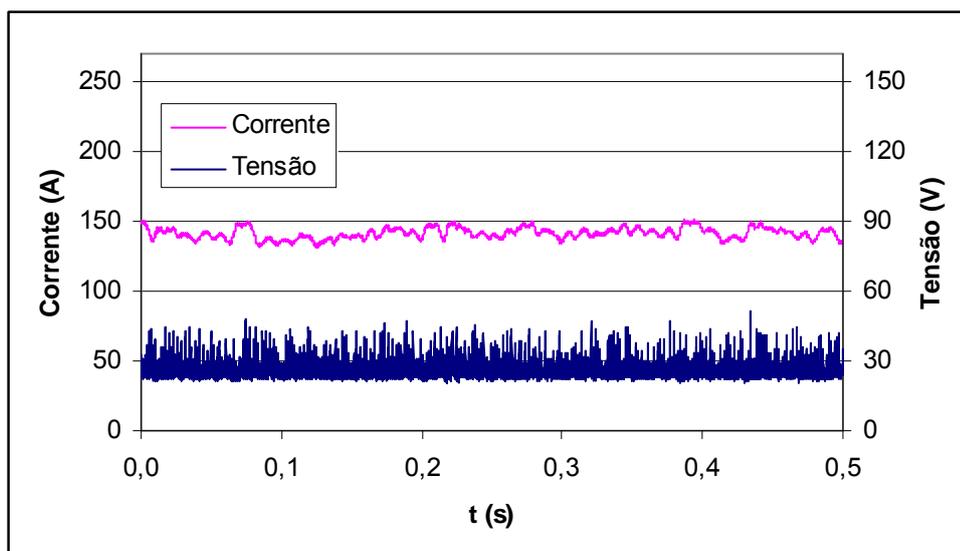


Figura 13.13 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 130$ A e DBCP = 22 mm.

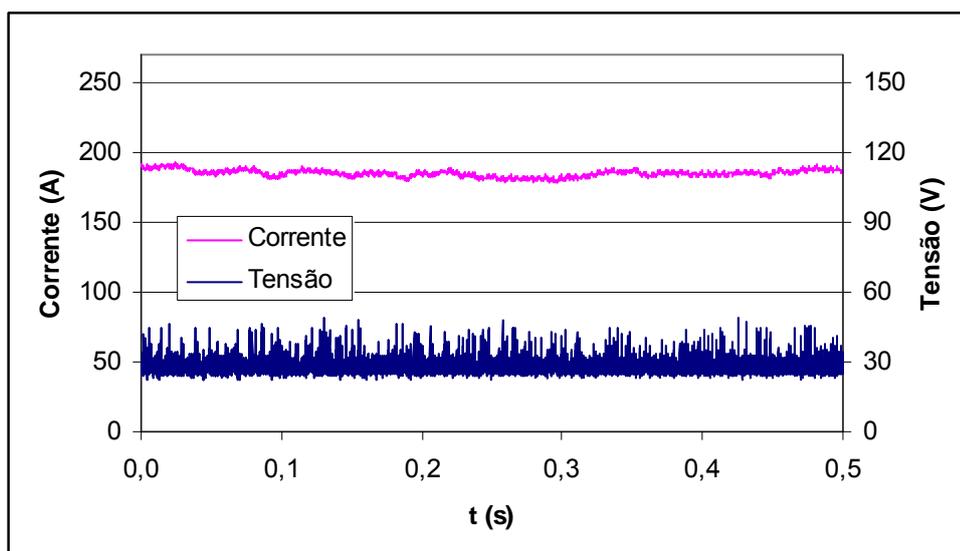


Figura 13.14 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 180$ A e DBCP = 22 mm.

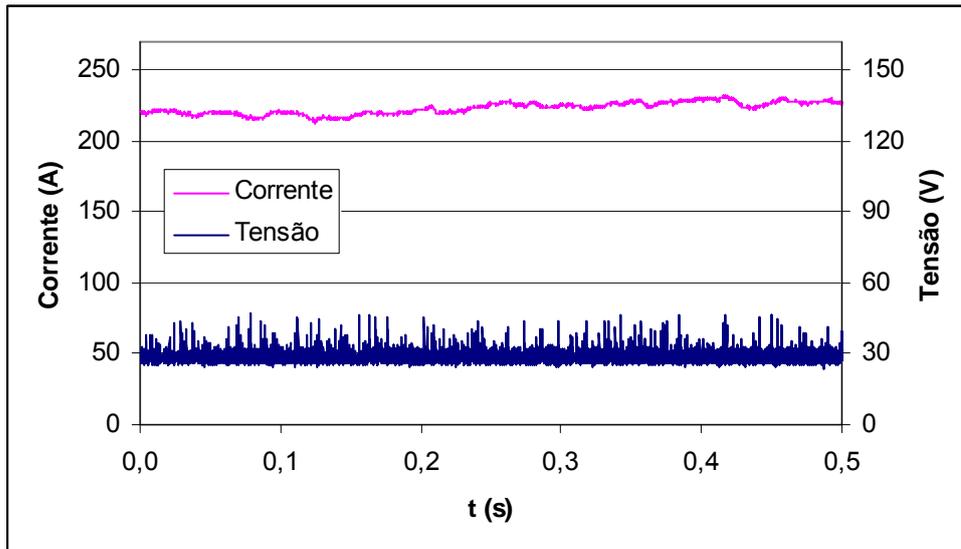


Figura 13.15 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 230$ A e DBCP = 22 mm.

13.3 Soldagens realizadas na avaliação do efeito do gás de proteção nas características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica com eletrodo de aço carbono

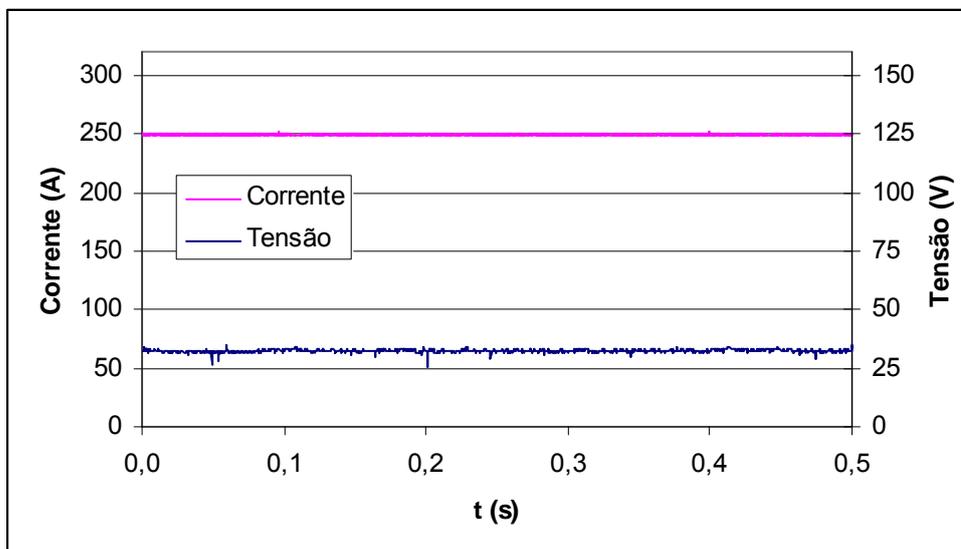
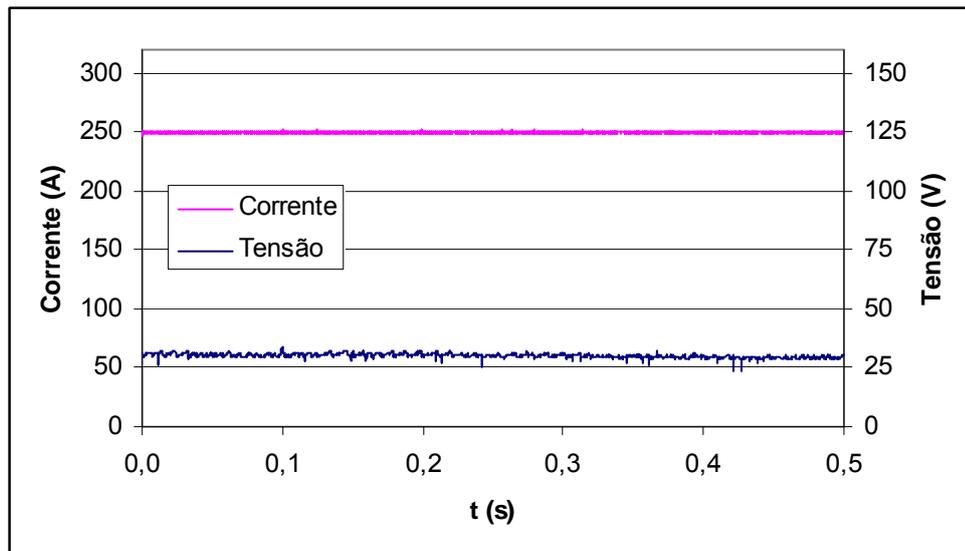
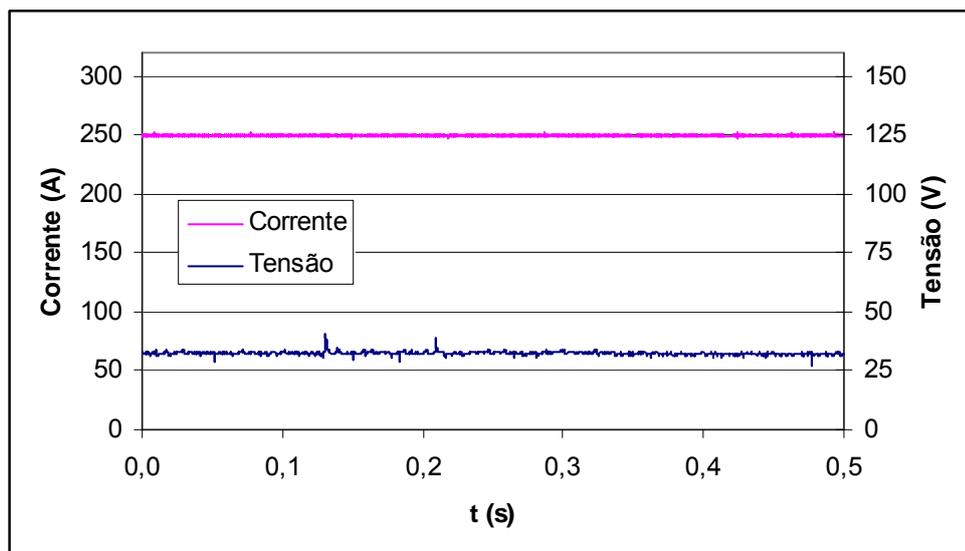
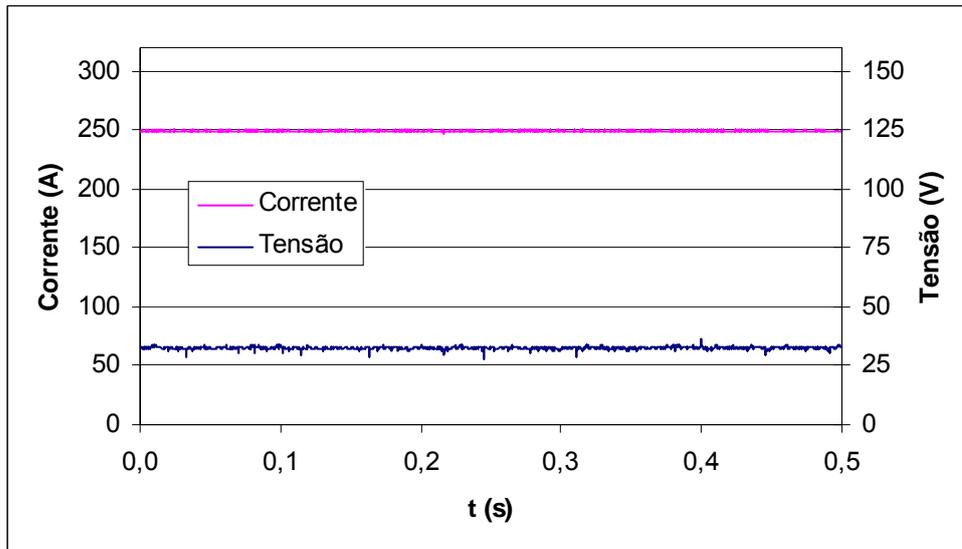
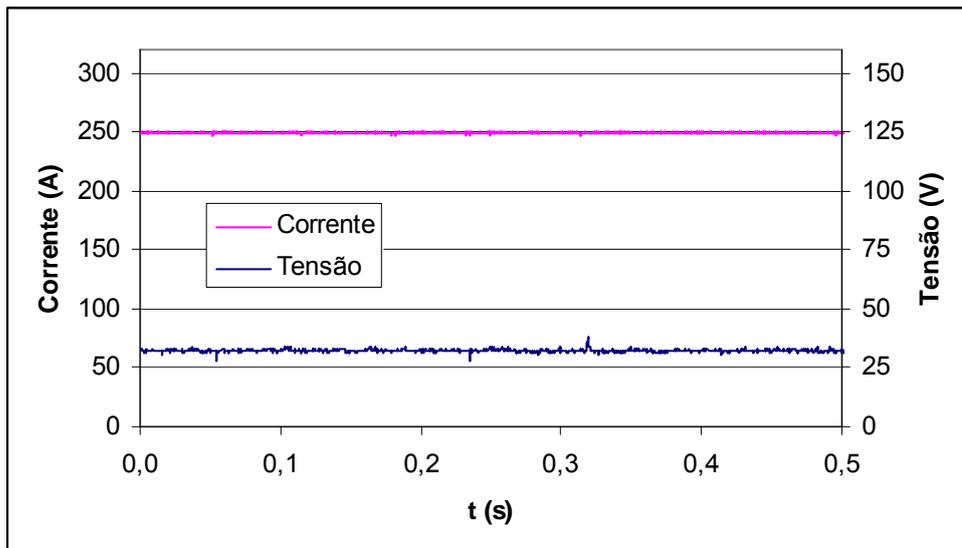


Figura 13.16 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O₂.

Figura 13.17 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O₂ + 5% He.Figura 13.18 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O₂ + 10% He.

Figura 13.19 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O₂ + 15% He.Figura 13.20 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O₂ + 20% He.

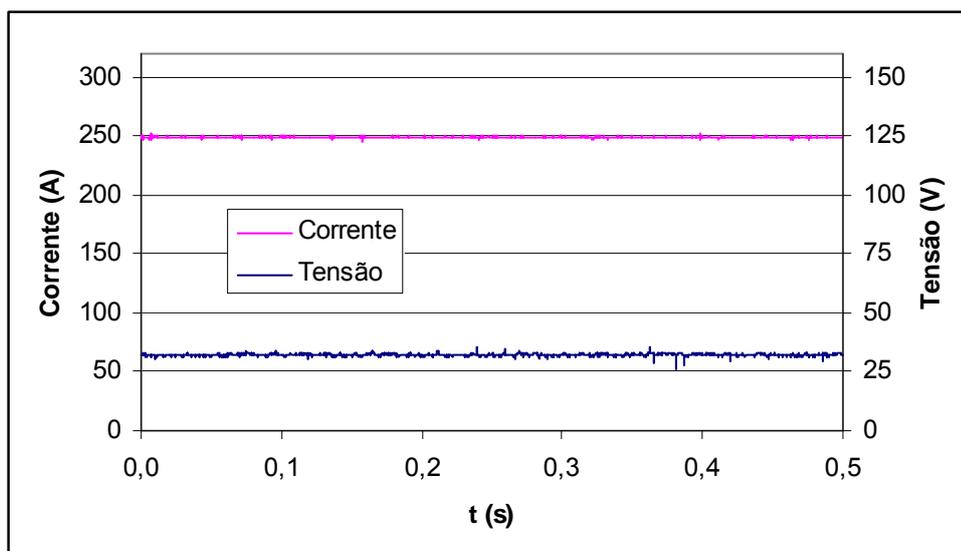


Figura 13.21 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O₂ + 25% He.

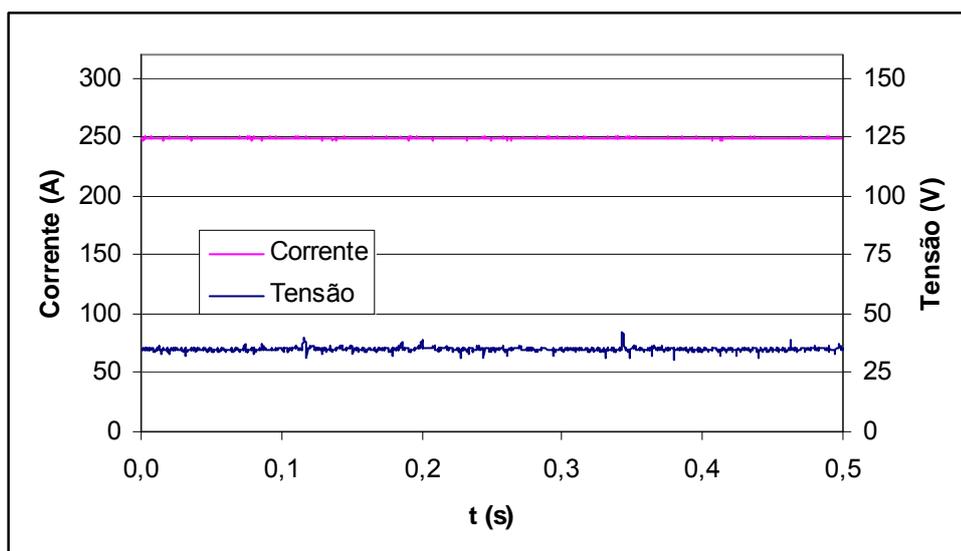
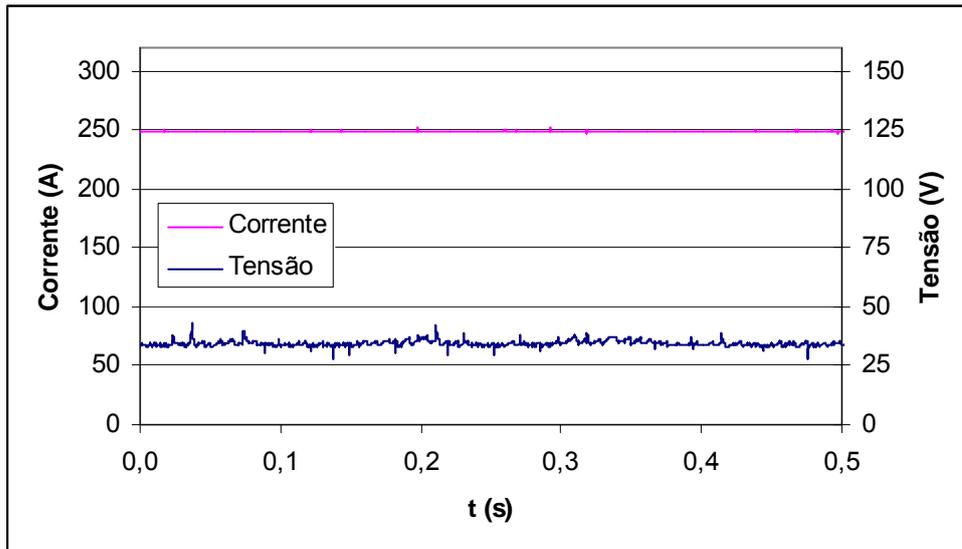
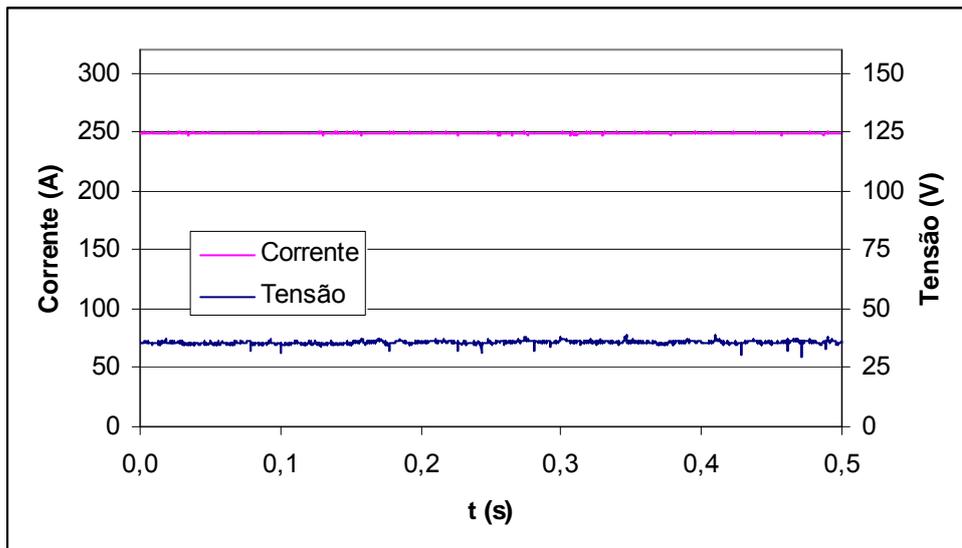
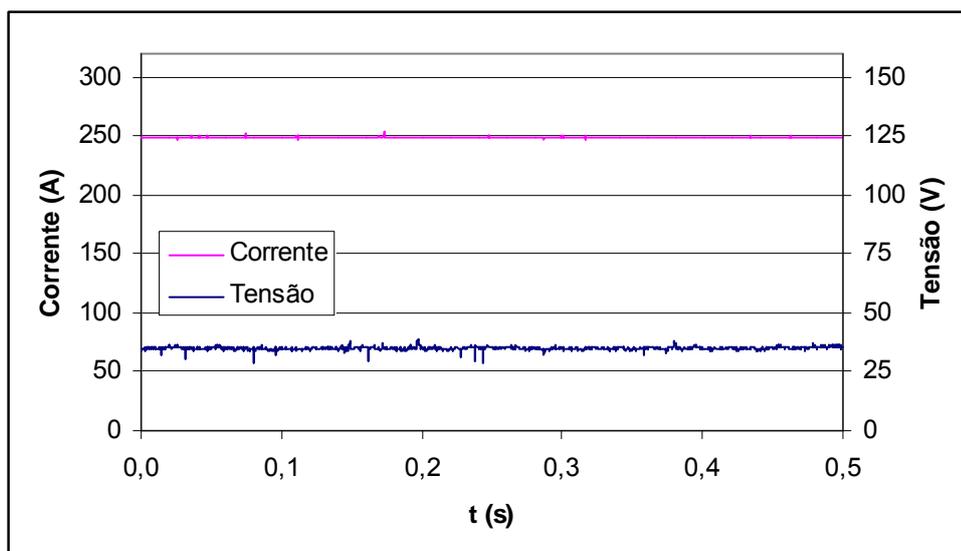
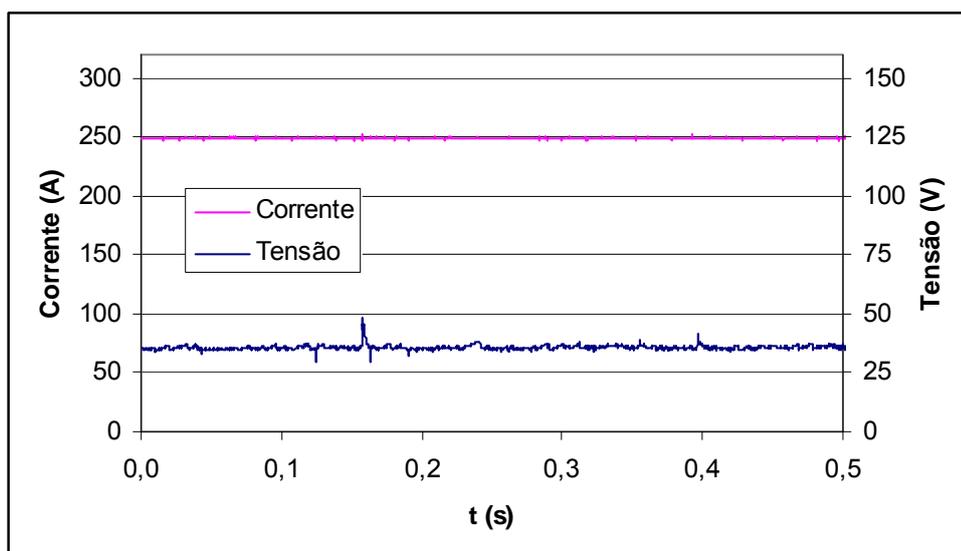


Figura 13.22 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O₂.

Figura 13.23 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O₂ + 5% He.Figura 13.24 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O₂ + 10% He.

Figura 13.25 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O₂ + 15% He.Figura 13.26 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O₂ + 20% He.

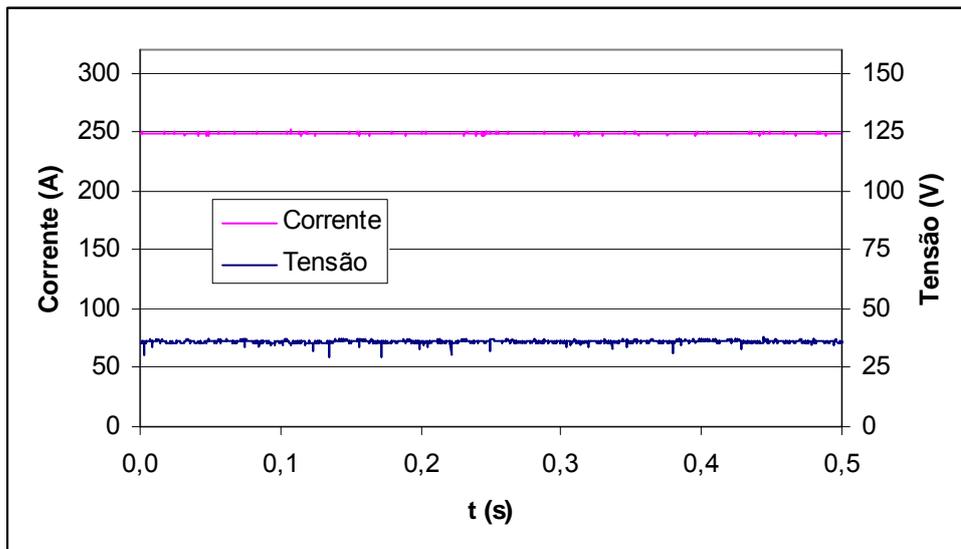


Figura 13.27 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O₂ + 25% He.

13.4 Soldagens em polaridade direta

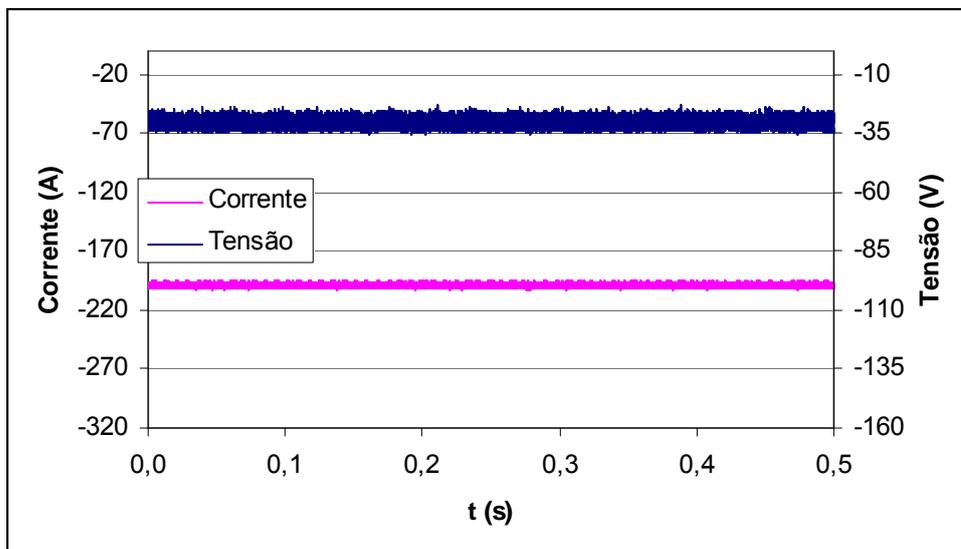


Figura 13.28 – Comportamento dinâmico da soldagem com I_{REG} = -200 A e DBCP = 26 mm.

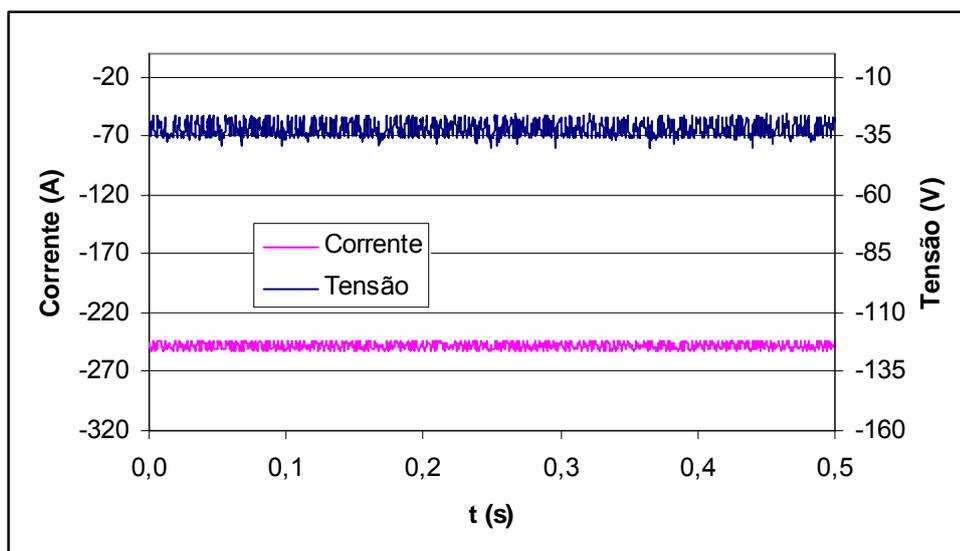


Figura 13.29 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = -250$ A e DBCP = 26 mm.

14. Anexo II: Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU/009/2005



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Utilização do Analisador de Misturas Binárias de Gases Industriais para Aferição do Misturador de Gases do Laprosolda



Autores: Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues
Clayton Orivan Moraes
Américo Scotti

Maio de 2005

Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU 09/2005



Laboratório para o Desenvolvimento de
Processos de Soldagem - LAPROSOLDA/UFU

1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do misturador de gases do Laprosolda através da medição do teor dos gases de diversas misturas por um Analisador de Gases Industriais.

2 O ANALISADOR DE GASES

2.1 CARACTERIZAÇÃO

O Analisador de misturas (Figura 1) utilizado neste trabalho é um analisador de gases para misturas binárias, de fabricação da Thermco, modelo 9600, que apresenta as seguintes características, de acordo com seu manual de operação:



Figura 1 - Painel frontal do Analisador Thermco 6900

- O analisador pode ser usado tanto para análise pontuais (“spot checking”) quanto para análises de fluxo contínuos. No caso de fluxo contínuo, alguns desvios poderão ocorrer e será necessária uma “rezeragem” periódica;
- O funcionamento do Analisador de Misturas baseia-se no aquecimento de um arame suspenso na extremidade da tubulação da mistura a ser avaliada. Devido

às diferenças entre as condutividades térmicas entre este gás e o gás de referência, a temperatura do arame varia com a sua composição. Assim, o gás de referência sempre deve ser componente da mistura a ser avaliada;

- Os gases de referência pré-calibrados são o argônio e o nitrogênio e as faixas de medição do aparelho são para proporções de CO₂, O₂, He e H₂ em mistura com os gases de referência e de N₂ no Ar;
- A resolução do aparelho é de 0,1% e o tempo de resposta é 45 s para alcançar 95% da resposta para misturas típicas de gases (no manual não é mencionada a precisão);
- A pureza do gás de referência deverá ser de no mínimo 99,9% para garantir precisão nas medidas;
- Este analisador **NÃO** é apto a medir proporções de oxigênio em nitrogênio para fins de ar para respiração humana ou animal.

2.2 UTILIZAÇÃO DO ANALISADOR DE GASES (PREPARAÇÃO E ZERAGEM)

A Figura 2 ilustra a face de trás do equipamento por onde são ligados os gases de referência e de medição. Também ilustra as válvulas de controle de vazão adaptadas no aparelho para se fazer as medidas.

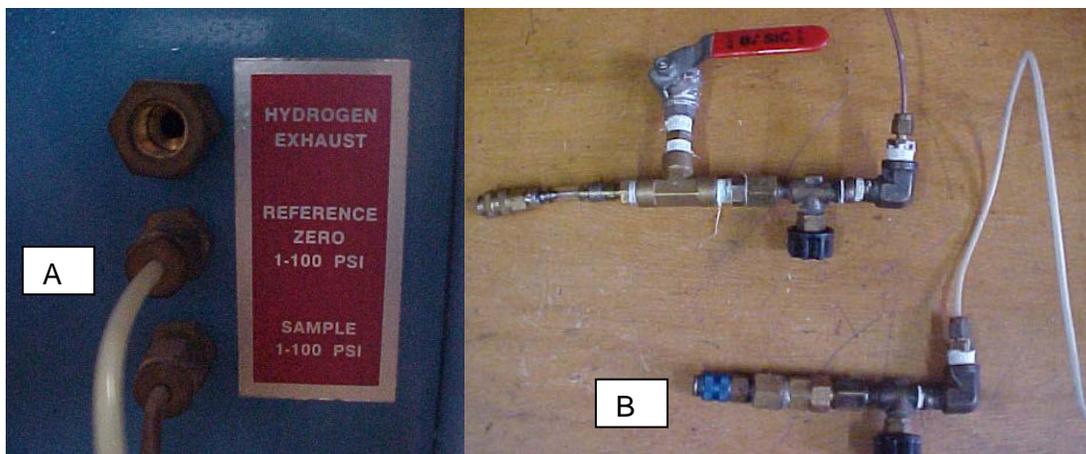


Figura 2 – Analisador de Gases. A) Entradas na parte de trás do aparelho; B) Conectores.

Antes de se ligar o equipamento, deve-se conectar na entrada “reference zero” (Figura 2) o gás de referência e abrir o cilindro, a uma pressão de 0,07 a 7 Kg/cm². Na montagem atual,

usa-se a mangueira branca com uma válvula de agulha para regular a vazão do gás (regulagem grosseira, já que a regulagem propriamente dita será explicada adiante). Esta válvula deve ficar inicialmente pouco aberta. Esta mangueira é ligada à válvula reguladora de pressão do cilindro por um conector de engate rápido.

Na outra entrada, “*sample*” (Figura 2), deve-se conectar, por um conector de engate rápido, a mistura a ser avaliada vinda do cilindro ou do Misturador de Gases. Na montagem atual, usa-se a mangueira marrom com uma válvula de agulha para regular a vazão do gás (regulagem grosseira - deve também ficar inicialmente pouco aberta) e um T, com a saída bloqueada por uma válvula de gaveta (alavanca vermelha). A utilização desta válvula (alavanca vermelha) será também mencionada adiante.

Estando os gases conectados e habilitados, liga-se o aparelho e seleciona-se a mistura a ser medida (escala), apertando-se os botões **P**, **↑** e **↓** indicados no display do aparelho (Figura 1). Ao apertar o botão **P**, o painel se torna auto-explicativo. A chave “*sample/zero*” no painel frontal do aparelho deve, então, ser virada para o lado ZERO, conforme a Figura 3, para que se possa proceder à “zeragem” do Analisador.



Figura 3 – Chave “*sample/zero*” virada para zero.

Em seguida, os rotâmetros no painel frontal do aparelho devem ser regulados para aproximadamente as vazões cujos valores são indicados ao lado de cada um, como na Figura 4. Neste momento pode-se atuar melhor sobre a regulagem grosseira. Se não se conseguir inicialmente a vazão desejada, abre-se mais um pouco a respectiva válvula. Na regulagem grosseira, a vazão deve ficar pouco maior do que a vazão requerida, para diminuir flutuações, mas isto só é possível acertar de forma iterativa com a própria válvula de regulagem/rotâmetro

do analisador, ou seja, regula-se a vazão no analisador e depois vai-se fechando a válvula de agulha da mangueira de entrada até sentir que se está próxima do valor da vazão desejada, sempre reajustando uma e outra válvula. Assim, deve-se deixar o aparelho ligado por 10 min, com as vazões nos rotômetros reguladas. Deve-se deixar claro que só o gás de referência estará circulando no aparelho nesse período (tanto no rotômetro do gás de referência como no rotômetro do gás amostral).

Terminado este tempo, o display do aparelho apresentará uma leitura que deverá ser 0.0, mas não necessariamente o será, como ilustra a Figura 5A. Caso não seja 0.0 a leitura do aparelho, o operador deverá “zerar” o aparelho ajustando essa leitura através da rotação do botão “Zero” (não confundir com a chave “sample/zero” da Figura 3), localizado no painel frontal abaixo do rotômetro da direita (Figura 1), até que a leitura seja zero, como na Figura 5B.

Então, pode-se proceder à análise de uma mistura, conforme será descrito adiante.

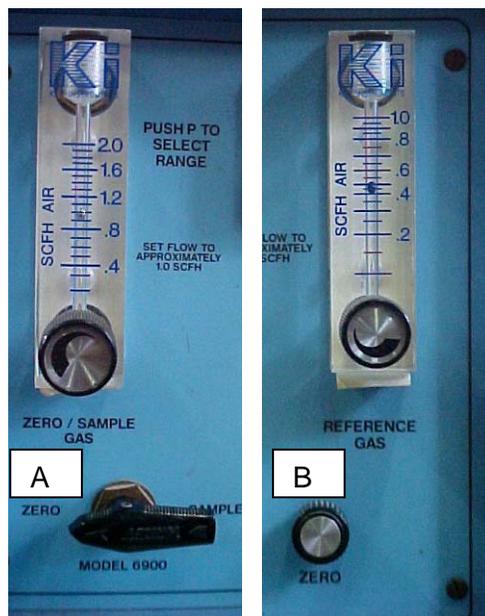


Figura 4 – Ilustração dos Rotômetros e respectivos ajustes: A) Lado esquerdo do aparelho, vazão regulada em 0.9 SCFH; B) Lado direito, vazão regulada em 0.4 SFH. A não exatidão do ajuste se deve à grande sensibilidade destes rotômetros.

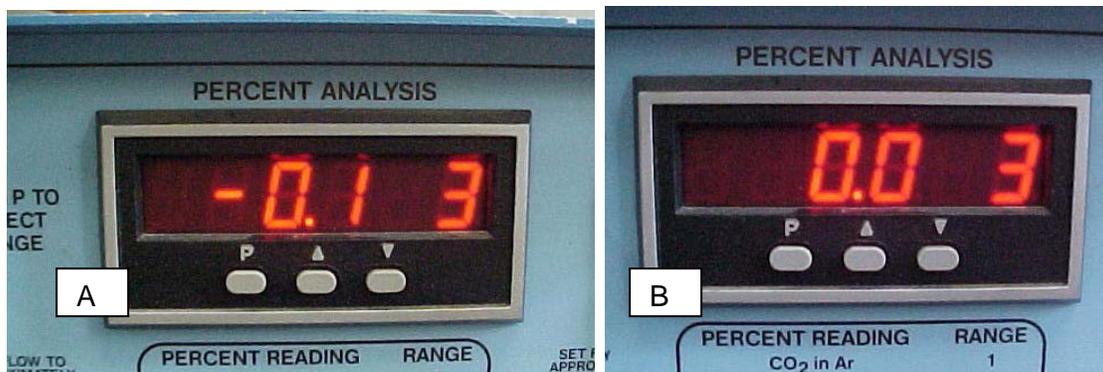


Figura 5 – Leitura do aparelho depois de 10 min com os rotômetros regulados e a chave “Sample/Zero” virada para Zero: A) Antes da regulagem pelo botão “Zero”; B) Depois da zeragem. O dígito 3 indica a escala de operação do aparelho, no caso He-Ar.

2.3 AFERIÇÃO DE MISTURAS EM CILINDROS

Com o intuito de verificar se as medidas do Analisador de Gases corresponderiam às aquelas declaradas por fabricantes de gases, realizou-se algumas medidas em cilindros com misturas comerciais e também em cilindros com gases comercialmente puros.

Para realizar-se este procedimento, o cilindro do gás amostral deverá estar adequadamente conectado e aberto e a válvula de esfera com alavanca vermelha (Figura 3B) deve estar fechada. O gás de referência deve permanecer conectado e fluindo, como na zeragem. Escolhe-se o gás de trabalho para o analisador (escala), de acordo com a mistura a ser analisada, apertando os botões do display (ver item 2.2). Note que o operador deverá sempre saber de que é composta a mistura a ser analisada, sob pena de fazer uma leitura inconsistente.

Vira-se, então, a chave “Sample/Zero” para a posição “sample” e regula-se o rotômetro à esquerda, para o valor recomendado de 1.0 SCFH, e o rotômetro à direita, para o valor recomendado de 0.5 SCFH. O tempo que o aparelho leva para estabilizar a leitura em 95% é 45 s. Entretanto, a experiência mostrou que para completa estabilização dos resultados, é preciso deixar 10 minutos estabilizando, dependendo do gás (isto chega a representar 3 décimos na medida). Passado este tempo, faz-se a leitura do percentual do gás misturado ao gás de referência, de acordo com a escala escolhida.

A Tabela 1 mostra algumas medidas realizadas em cilindros comerciais existentes no Laprosolda/ UFU. Nos cilindros de misturas, o principal gás é o argônio, logo, Argônio foi utilizado como gás de referência. As repetições foram em dias diferentes, depois de desligado e re-aferido o analisador.

Tabela 1 – Medidas realizadas para aferição do analisador em misturas de gases comerciais.

Garrafa	Composição esperada (%)	Escala	Medida 1	Medida 2	Erro abs. Máximo	Erro relativo máximo (%)
F24	2% O ₂	Ar/O ₂	2,2% O ₂	2,4% O ₂	+0,4	20
F36	5% O ₂	Ar/O ₂	5,4% O ₂	5,0% O ₂	+0,4	8,0
I40 Cilindro 1*	4% CO ₂	Ar/CO ₂	6,9% CO ₂	6,6% CO ₂	+2,9	72,5
I40 Cilindro 2	4% CO ₂		9,8% CO ₂		+5,8	145,0
Atal	18% CO ₂	Ar/CO ₂	18,5% CO ₂		+0,5	2,8
Mistura 20 (IBG)	20% CO ₂	Ar/CO ₂	19,5% CO ₂		-0,5	2,5
O ₂ (IBG)	Pureza comercial	Ar/O ₂	100% O ₂	100,2% O ₂	+0,2	0,2
Ar (WM)	Pureza comercial	Ar/CO ₂	-0,1% CO ₂	0% CO ₂	-0,1	0,1
Ar (WM)	Pureza comercial	Ar/He	0,0% He		0,0	0,0
H ₂ (WM)	Pureza comercial	Ar/H ₂	100% H ₂	101,6% H ₂	+1,6	1,6
He (WM)	Pureza comercial	Ar/He	99,9% He	101,0% He	+1,0	1,0
CO ₂ (Air Liquid)	Pureza comercial	Ar/CO ₂	93,2% CO ₂		-6,8	6,8

* - Lote 2749/04 – UNP:STZ

Para os cilindros com gases comercialmente puros, os resultados não apresentaram erros significantes, exceção para o cilindro de CO₂ puro. Ao ser colocado outro cilindro de argônio como gás a ser avaliado (“*sample gas*”), obteve-se uma diferença máxima de -0,1%, mesmo usando-se escalas diferentes de composição a ser analisada.

Resultados com maiores diferenças foram obtidos ao se usar 5 misturas comerciais como gás amostral. Com a mistura F24 e F36, a máxima diferença entre valores lidos e valores esperados foi de 0,4%, respectivamente. Segundo a norma da White Martins WM-ES-0027, o erro máximo admitido na composição é de 10% do percentual de cada gás, o que não aconteceu para mistura F24. Com certeza pode-se admitir que o erro do analisador esteja acima dos 10%, pelo menos para o fundo de escala (menor percentual na mistura). Para a mistura I40 foi apresentada uma medida cujo erro absoluto muito grande, e foi avriável em função do cilindro analisado (de 2,9% e 5,8%, respectivamente), que representou um erro maior do que 70% da composição do gás testado. Este fato coloca estes cilindros como totalmente

fora dos padrões da White Martins, a menos que o analisador tenha um erro muito grande, pelo menos ao se trabalhar com a escala Ar/CO₂ (afirmativa com evidências se analisado o resultado com CO₂ puro da Air Liquid, mas sem suporte se analisado os resultados das medições das misturas Atal e Mistura 20). Deve-se lembrar de que este analisador havia sido avaliado por Lobato e Santiago Neto (2003).

Então, fica-se a dúvida sobre a eficiência do analisador ou sobre a qualidade de gases comerciais em cilindros.

3 O MISTURADOR DE GASES

3.1 CARACTERIZAÇÃO

Para se fazer misturas de gases de proteção no Laprosolda, utiliza-se um misturador (Figura 6) que consiste de quatro rotômetros, duas câmaras (pulmões) de mistura e um programa para cálculo das vazões de cada gás para se conseguir a mistura desejada. Os gases são misturados no interior de dois “pulmões”, posicionados em série à saída dos rotômetros. Cada rotômetro possui dois flutuadores esféricos, um de aço inoxidável outro de vidro, que são escolhidos de acordo com o gás de trabalho. Os gases que podem ser utilizados neste misturador são: argônio, dióxido de carbono, hélio, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio.

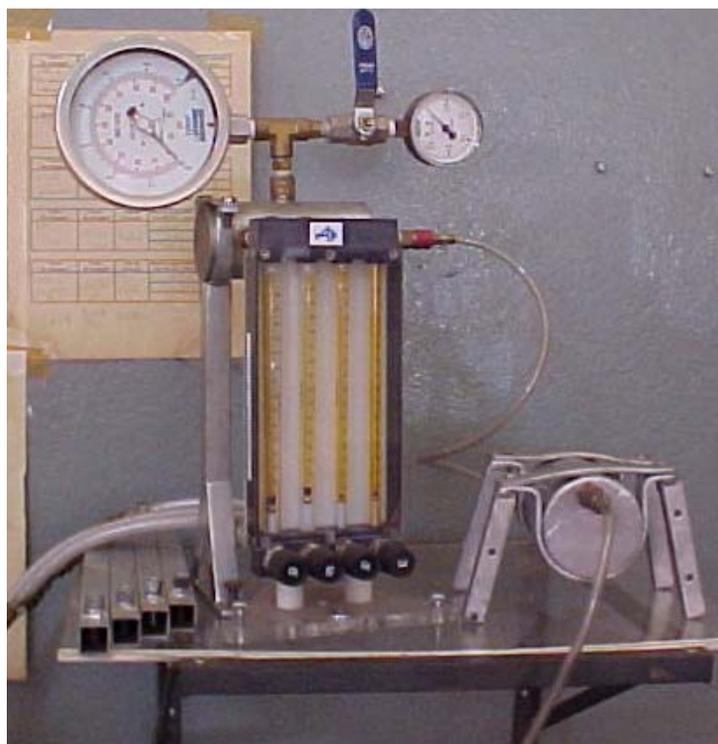


Figura 6 – Misturador de Gases do Laprosola

Para obter-se uma certa mistura de gases, à partir de uma regulagem consciente e precisa das vazões nos rotômetros, faz-se uso de um programa denominado ROTO_BR, desenvolvido com base em diversas propriedades dos gases, como por exemplo seu fator de compressibilidade, e na calibração de cada rotômetro. Uma descrição mais detalhada do Misturador e do programa ROTO_BR pode ser encontrada no trabalho de Lobato e Santiago N. (2003) e no de Reis e Scotti (2003).

3.2 AVALIAÇÃO DO MISTURADOR DE GASES

Vê-se que o Misturador é capaz de executar até misturas quaternárias. No entanto, no presente caso, só há ferramentas (analisador) para avaliar seu desempenho em misturas binárias.

Antes de tudo, procede-se a “preparação e zeragem” do equipamento, conforme descrito no item 2.2. Depois, vira-se a chave “*sample/zero*” para a posição “Sample”. À saída do misturador de gases (Figura 6) deverá estar conectada à entrada “*sample*” cuja mangueira é a marrom (Figura 2). Como o misturador de gases demanda uma vazão mínima para seu funcionamento, maior do que a vazão de gás requerida pelo Analisador, usou-se o artifício de construir um caminho suplementar para o gás. Assim, a chave vermelha à extremidade do conector da entrada “*sample*” (Figura 2) deverá ser totalmente aberta.

Tendo sido feita a regulagem do misturador, conforme seu manual de operação, o operador deverá estrangular gradativamente a chave vermelha, como na Figura 7, até que a pressão no manômetro do Misturador de Gases seja aquela utilizada no programa “ROTO-BR”. Para facilitar, é bom utilizar um valor “redondo” de pressão, como 1 atm. Ao fazer o estrangulamento da válvula, as posições das esferas de referência nos rotômetros do misturador de gases poderão se alterar. Caso isso aconteça, o operador deverá corrigir a vazão em cada rotômetro. Tendo feito isso, em média 45 s depois, poderá ser feita a leitura da composição da mistura preparada pelo Misturador. Após cada leitura, deve-se proceder à zeragem do Analisador, virando-se novamente a chave “*Sample/Zero*” para a posição Zero e procedendo-se como no item 2.2.

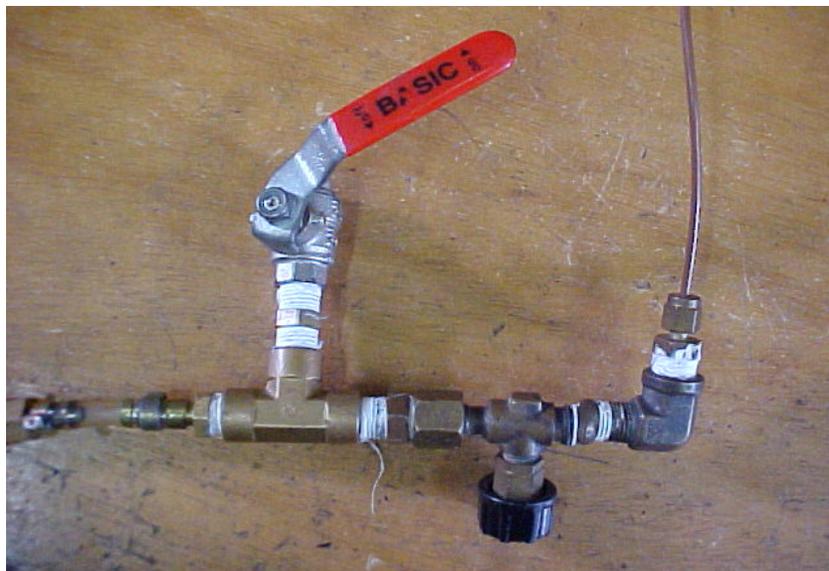


Figura 7 – Chave Vermelha parcialmente estrangulada.

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam regulagens a partir do Misturador de Gases e as respectivas medidas com o Analisador de Misturas Gasosas de algumas proporções de diferentes misturas, dentre as quais Ar-CO₂; Ar-O₂ e Ar-He. Para realizar estas regulagens, utilizou-se os seguintes dados de entrada no programa “ROTO-BR”: Pressão de 1,0 atm; Vazão de 40 l/min (vazões maiores são mais fáceis de controlar pela válvulas controladoras de vazão); temperatura ambiente de 27°C e gás de referência argônio (sempre na entrada 1 do Misturador).

Considera-se como esperado o valor calculado segundo o programa. Por exemplo, se for calculada uma mistura de Ar + 10% de CO₂, considera-se esperado que o Analisador leia 10,0% de CO₂, descontando-se o erro natural de medida do aparelho.

Na Tabela 2, para misturas de argônio e CO₂, observa-se que o erro absoluto máximo de 0,7% e que em três proporções foi obtido uma medida dentro do esperado (erro de até 0,1% na mistura). Na Tabela 3, vê-se um erro absoluto máximo de 0,8% para as proporções de oxigênio e uma certa tendência de o misturador errar para menos. Na Tabela 4, observa-se uma dispersão um pouco maior nas medidas, o que levou à realização de uma segunda bateria de testes, na qual foi observada uma boa repetibilidade do ajuste do misturador. No entanto, nas duas baterias de testes realizadas, observa-se pouca dispersão para valores intermediários de composição.

Tabela 2 – Avaliação do misturador de gases atuando com Ar + CO₂.

<i>%CO₂</i>	<i>Regulagem:número do rotâmetro (vazão)</i>	Medida (%)	Erro abs. (%)
5	1(113), 3(43,86)	5,7	+0,7
10	1(106), 3(89)	9,8	-0,2
15	1(100), 2(42,84)	15,0	0,0
20	1(94), 2(57,112)	20,7	+0,7
30	1(82,41), 2(87)	30,1	+0,1
40	1(70,124), 2(119)	40,0	0,0

Tabela 3 – Avaliação do misturador de gases atuando com Ar + O₂.

<i>%O₂</i>	<i>Regulagem:número do rotâmetro (vazão)</i>	Medida (%)	Erro abs (%)
5	1(113), 3(36,72)	4,9	-0,1
10	1(106), 3(74)	9,4	-0,6
15	1(100), 3(124)	14,2	-0,8
20	1(94), 2(48,96)	19,7	-0,3
30	1(82,41), 2(73,143)	29,5	-0,5
40	1(70,124), 2(100)	40,0	0,0

Tabela 4 – Avaliação do misturador de gases atuando com Ar + He.

<i>%He</i>	<i>Regulagem:número do rotâmetro (vazão)</i>	Medida 1 (%)	Medida 2 (%)	Máx. Erro abs (%)
5	1(113), 3(24,42)	6,7	6,5	+1,7
10	1(106), 3(36,69)	10,7	10,4	+0,7
15	1(100), 3(49,106)	15,1	15,3	+0,2
20	1(94), 3(65)	19,9	20,0	-0,1
30	1(82,41), 3(103)	30,2	30,2	+0,2
40	1(70,124), 2(46,86)	42,4	42,3	+2,4

Os resultados apresentados estão coerentes com a análise realizada por Lobato & Santiago Neto (2003) para um misturador muito similar, em cujo trabalho ainda se utilizou outros dois analisadores para comparação: um cromatógrafo Varian Star 3600 Cx, aplicável às misturas de argônio e hélio, e um analisador Panametrics Oxygen Analyser Series 350, este para avaliar teores de oxigênio.

Com relação ao observado na medição de misturas em cilindros, partindo do pressuposto que o Avaliador de Misturas Gasosas Thermco 6900 é uma boa referência, as misturas feitas com o Misturador de gases possuem precisão de composição aceitável, na maioria do caso com menos de 1% do valor do gás de mistura. Este valor é bem menor do que os 10% de tolerância assumidos na fabricação pela WM. Um erro maior com o uso do He pode ser atribuído tanto a um erro maior do misturador quando se faz misturas com Helio ou um erro maior do analisador quando se analisa misturas Ar/He.

4 DISCUSSÃO GERAL

Considerando que os resultados ao se usar o misturador para fabricar misturas de Ar com CO₂ mostrou um baixo erro, acredita-se que o problema na medição com a mistura I40 e com CO₂ puro da Air Liquid, ambos gases em cilindros, seja mais causado por problemas nos próprios cilindros do que no analisador.

Deve-se, por outro lado, observar que as misturas Ar+CO₂ feitas no misturador e usadas nos ensaios mostrados na Tabela 2, foram obtidas a partir do cilindro de CO₂ puro da Air Liquid, assumindo que ele fosse 100% CO₂. Corrigindo o valor esperado para um gás de mistura com somente 93,2% CO₂, numa aproximação bastante grosseira, já que não se conhece o erro da medida no analisador naquela faixa de composição da mistura Ar+CO₂, pode-se notar pela Tabela 5 que mesmo assim a variação entre o esperado para o gás provindo do misturador e encontrado foi bem menor do que a esta variação quando a mistura estava em cilindro.

Tabela 5 – Correção do valor esperado de CO₂ na mistura Ar + CO₂ apresentada na Tabela 2, assumindo que o CO₂ utilizado tinha um percentual de somente 93,2% CO₂

Valor esperado sem correção (% CO ₂)	Valor esperado com correção (% CO ₂)	Medida (%) – Tabela 2	Erro Abs. em relação ao valor corrigido (%)	Erro relativo. em relação ao valor corrigido (%)
5	4,66	5,7	1,0	22,3
10	9,32	9,8	0,5	5,2
15	13,98	15	1,0	7,3
20	18,64	20,7	2,1	11,1
30	27,96	30,1	2,1	7,7
40	37,28	40	2,7	7,3

5 CONCLUSÃO

Considerando os objetivos do trabalho e os resultados obtidos, conclui-se que o Misturador de Gases do Laprosolda/UFU mistura adequadamente CO₂, O₂ e He em argônio, sendo perfeitamente viável sua utilização para fins experimentais em soldagem. Estabeleceu-se, assim, um erro esperados de até 1% nos teores dos gases em misturas com argônio.

E relação aos cilindros de gases comerciais I40 e CO₂, existem fortes evidências de serem misturas contaminadas.

6 REFERÊNCIAS

- Lobato, M. M. e Santiago Neto, N. A., 2003. *Desenvolvimento de um misturador de gases de soldagem e do programa ROTO-BR*, Projeto de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, EP/DEM, Fevereiro de 2003, 81p.
- Reis, R. P., Scotti, A., 2003. VIII Relatório Parcial do Projeto Soldagem Plasma de Aço Carbono: "Modificações feitas no misturador com o intuito de melhorar a homogeneização das misturas", Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU 05/2003.

Responsáveis:

Eng. Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues

Eng. Clayton Orivan Moraes

De acordo:

Prof. Dr. Américo Scotti