

UM ESTUDO COMPARATIVO DA SOLDAGEM A ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO EM CORRENTE PULSADA E EM TENSÃO CONSTANTE

Eduardo de Magalhães Braga
Carlos Alberto Mendes da Mota
Jesuvaldo Pereira Farias

Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, 66075-900, Belém, PA, Brasil. E-mail: ebraga@fem.unicamp.br

Resumo

A utilização de arames tubulares autoprotégidos no Brasil ainda é bastante reduzida principalmente em corrente pulsada. Neste trabalho, foram estudadas a estabilidade do arco, as características econômicas do consumível e a geometria do metal depositado com um arame comercial da classe AWS E71T-7, de 2,00mm de diâmetro. As soldagens automatizadas na posição plana, em simples deposição, foram realizadas nos modos corrente pulsada e tensão constante. Durante os experimentos, a tensão e a velocidade de soldagem permaneceram constantes. As variáveis de influência foram a corrente e o comprimento do eletrodo. Os dados foram submetidos a análise de variância utilizando-se um *software* comercial. Os resultados indicaram que para as condições estabelecidas neste trabalho, a estabilidade do arco voltaico e as características econômicas foram afetadas e superiores para a soldagem em corrente pulsada.

Palavras-chave: soldagem, autoprotégido, corrente pulsada.

1 – INTRODUÇÃO

Dentre os processos de soldagem usuais, destaca-se a soldagem manual com eletrodo revestido como uma das técnicas mais comumente aplicadas na indústria (BONISZEWSKY, 1992; MOTA, 1998). Contudo as constantes exigências de competitividade, que impõem requisitos de qualidade e de produtividade a baixos custos, somados a evolução da eletrônica, da informática e da metalurgia têm impulsionado o desenvolvimento de modernas fontes de energia, de *softwares*, de novos materiais e de consumíveis alternativos para a soldagem e com isso, a aplicação industrial dos processos de soldagem MIG/MAG, arco submerso e arame tubular. Este último é um processo de relevante importância tecnológica, uma vez que une as vantagens do eletrodo revestido e dos processos MIG/MAG. Atualmente, o processo a arame tubular autoprotégido é aplicado principalmente na soldagem semi-automática, em substituição a soldagem manual com eletrodo revestido, onde são requeridas altas taxas de deposição e condições de tenacidade não muito severas e na soldagem de grandes estruturas metálicas que exigem, muitas vezes, a sua realização em ambiente aberto sob forte ação do vento (OTEGUI,1985; WIGERY,1994). Na soldagem com arame tubular autoprotégido o metal fundido é protegido por uma camada de escória, pelos gases e pelos elementos desoxidantes/desnitretantes que são resultantes da decomposição do fluxo. Entretanto apesar do progresso alcançado pelo arame tubular autoprotégido em todo mundo, no Brasil ainda existem fatores que dificultam a sua divulgação e o interesse na sua intensificação (MOTA,1998).

Com a recente introdução de novas tecnologias para a fabricação de fontes de energia para soldagem a arco voltaico, tornou-se possível a utilização da corrente pulsada para os processos de soldagem como o MIG, o TIG e o arame tubular, sendo

este último, com a utilização de gás de proteção (NORRISH, 1992). No Brasil, as pesquisas com arame tubular autoprotetido estão em fase inicial, mais raras ainda são as pesquisas com a utilização da corrente pulsada, onde o arco voltaico é mantido com uma corrente de base baixa, enquanto uma corrente de pulso, de curta duração, provoca o destacamento da gota. No modo pulsado, são muitos os fatores variáveis responsáveis pela manutenção da operação de soldagem. Neste sentido, torna-se bastante complexa a tarefa para a seleção de parâmetros que possam ser adequados às necessidades de estabilidade do arco, vantagens econômicas, qualidade da solda e propriedades mecânicas. Desta maneira, no presente trabalho busca-se basicamente o comparativo das características operacionais do processo, das características econômicas do consumível e das características geométricas do cordão de solda utilizando um arame comercial tubular autoprotetido em corrente pulsada e em tensão constante. Neste sentido, tem-se como objetivo a busca de conhecimentos para uma melhor compreensão dos problemas e das vantagens deste processo quando da aplicação dos dois modos e com isso, viabilizando e incentivando um maior interesse para a sua utilização.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram automatizados em simples deposição, em CC, na posição plana, em um único passe e sobre chapas de aço ABNT 1020 de 150x50x9,5 mm. Utilizou-se uma fonte eletrônica do tipo multiprocessado, ajustada para o modo convencional e pulsado com comando de corrente e em tensão constante e uma tocha reta refrigerada à água perpendicular à chapa. Como metal de adição utilizou-se um arame comercial da classe AWS E 71T-7, de 2,0 mm de diâmetro. Permaneceram constantes os valores da tensão em 23,0 V e da velocidade de soldagem em 25,0 cm/min e, além destes, a frequência de pulso em 30 Hz, ou seja, $t_p = 8$ ms e $t_b = 25$ ms (BRAGA, 1997).

Para a aquisição e o processamento dos dados instantâneos da corrente e da tensão de soldagem, empregou-se um sistema de aquisição e de processamento de dados numa frequência de 10 kHz/canal em 12 Bits. O tratamento estatístico dos resultados obtidos foi realizado pelo método da análise de variância (ANOVA) com o auxílio de um *software* comercial, considerando-se um nível de significância (α) igual a 1%.

Neste trabalho, foi estudado o efeito da combinação da corrente e do *stickout* (distância bico de contato peça) conforme mostra a tabela 1. Para a avaliação do desempenho do processo, foram considerados parâmetros relacionados a medição da estabilidade do arco, a taxa de fusão do arame (TF), a taxa de deposição (TD), ao rendimento de deposição real (R_r) e à geometria do cordão de solda. Para a medição da estabilidade do arco foram adotados como critérios uma tensão de referência para curto-circuito (U_r) de 15 V, um tempo mínimo de curto-circuito para a transferência da gota (t_{min}) de 1,5 ms e um tempo máximo de reabertura do arco (t_{max}) de 1,0 ms e considerando-se a metodologia abaixo descrita (FARIAS, 1993):

- Transporte da carga elétrica, em tensão constante, através do inverso do desvio padrão relativo da corrente, $I/\sigma I$, e no modo pulsado, através do inverso do desvio padrão relativo da tensão, $U/\sigma U$.

- Transferência metálica, avaliada através dos quatro índices descritos abaixo:

$$\text{Facilidade de ocorrência de curto-circuito, } F_{cc} = 1 / T \cdot 1000 \text{ (s}^{-1}\text{)}; \quad (1)$$

$$\text{Facilidade de transferência de metal, } F_{tm} = 1 / t_{cc} \cdot 1000 \text{ (s}^{-1}\text{)}; \quad (2)$$

$$\text{Regularidade de ocorrência de curto-circuito, } R_{cc} = T / \sigma T; \quad (3)$$

$$\text{Regularidade de transferência de metal, } R_{tm} = t_{cc} / \sigma t_{cc}. \quad (4)$$

onde:

T é o período médio de curto-circuito (ms);
 t_{cc} é o tempo médio de curto-circuito (ms);
 σT é o desvio padrão do período médio de curto-circuito (ms);
 σt_{cc} é o desvio padrão do tempo médio de curto-circuito (ms).

Para a medição das características econômicas adotaram-se as equações 5, 6, 7.

- Taxa de fusão

$$TF = 3,6 \rho_a L / t \quad [\text{kg/h}] \quad (5)$$

- Taxa de deposição

$$TD = 3,6 (M_f - M_i) / t \quad [\text{kg/h}] \quad (6)$$

- Rendimento de deposição real

$$R_r = [(M_f - M_i) / m_a] 100 \quad [\%] \quad (7)$$

onde:

L é o comprimento do arame consumido (m);

t é o tempo de soldagem (s);

M_i é a massa inicial da chapa (g);

M_f é a massa final da chapa (g);

ρ_a é a densidade linear do arame – metal+fluxo - (g/m);

$m_a = \rho_a \times L$, é a massa de arame consumida (g).

A avaliação da geometria do cordão de solda foi realizada pela análise dimensional da sua seção transversal. Para este trabalho, três amostras equidistantes em relação ao eixo longitudinal da solda foram retiradas e preparadas para a medição da sua geometria. Os parâmetros considerados para a avaliação da geometria do cordão de solda foram, a largura (b), o reforço (r) e a penetração (p).

Tabela 1. Fatores e níveis selecionados.

Fator	Nível		
Im (A)	200	250	300
Stickout (mm)	15	20	25

3 – RESULTADOS

3.1 - Estudo da estabilidade do arco

A tabela 2 apresenta os resultados da estabilidade do arco voltaico. As figuras 1 e 2 mostram o efeito da corrente e do *stickout* respectivamente, sobre a regularidade de ocorrência de curto-circuito (R_{cc}) e regularidade de transferência metálica (R_{tm}). Observa-se de modo geral, que com o aumento da corrente ocorreu a diminuição da R_{tm} e um pequeno aumento da R_{cc} , tanto no modo pulsado quanto no modo convencional. O mesmo comportamento foi verificado, quando do aumento do *stickout*, exceto para a R_{cc} que diminui no modo pulsado. No modo pulsado, o que se deseja é o controle da transferência metálica, ou seja, a redução ou extinção da frequência de curtos-circuitos ocorrendo a transferência de uma gota a cada pulso. Como no processo em estudo a gota cresce, gira na parte metálica do arame e toca aleatoriamente a poça de fusão, curtos-circuitos foram verificados coincidentes ou não com o pulso da corrente.

Portanto, as figuras 3, 4, 5 e 6 confirmam este fato, significando uma menor frequência de curtos-circuitos e uma maior facilidade de transferência metálica quando do uso da corrente pulsada. Observa-se na figura 7 que o efeito da corrente sobre a facilidade de transferência de carga elétrica é mais pronunciado na soldagem em tensão constante, e só passa a ser relevante para elevados valores de corrente (acima de 250 A). Por outro lado, o efeito do *stickout* é mais bem definido para a soldagem em corrente pulsada, como indica a figura 8. O aumento do *stickout* reduz sensivelmente a facilidade de transferência de carga elétrica na corrente pulsada. Deve-se salientar que os critérios de avaliação da transferência de carga elétrica para as duas técnicas de soldagem são diferentes. Em tensão constante, emprega-se o inverso do desvio padrão relativo da corrente. Já na corrente pulsada emprega-se o inverso do desvio padrão relativo da tensão. A falta de um índice comum para os dois casos dificulta bastante a comparação dos dois processos quanto a estabilidade do arco.

Tabela 2. Dados da estabilidade do arco.

Im (A)	S (mm)	Estabilidade do arco									
		Transf. carga elétrica		Transferência de metal							
		U cte.	Pulsado	Tensão (U) cte.				Pulsado			
	$I/\sigma I$	$U/\sigma U$	Fcc	Ftm	Rcc	Rtm	Fcc	Ftm	Rcc	Rtm	
200	15	4,05	6,28	14,58	1285	0,94	0,53	9,96	1650	0,68	1,05
	20	2,53	5,89	17,12	1091	0,94	0,63	18,59	1541	0,87	1,09
	25	3,54	5,63	22,65	1074	1,03	0,47	19,39	1490	0,81	0,94
250	15	4,42	7,93	21,38	705	1,16	1,17	7,10	2294	0,96	1,29
	20	1,96	6,84	40,22	775	0,87	0,82	25,13	1840	0,95	0,98
	25	4,11	5,00	41,00	726	1,29	0,57	22,12	719	0,59	0,32
300	15	5,11	7,21	43,56	520	1,17	0,30	22,31	1134	0,88	0,30
	20	6,13	6,52	43,13	531	1,17	0,45	23,85	957	0,87	0,53
	25	4,06	6,06	51,60	404	1,23	0,50	30,0	905	0,83	0,50

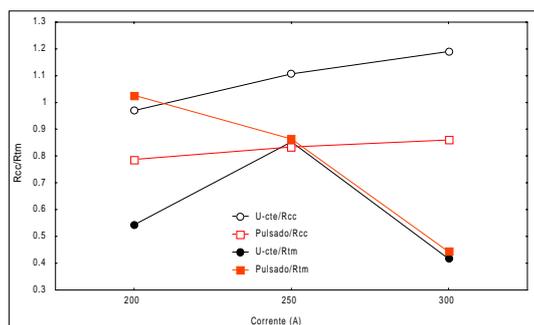


Figura 1. Efeito da corrente sobre a Rcc e Rtm.

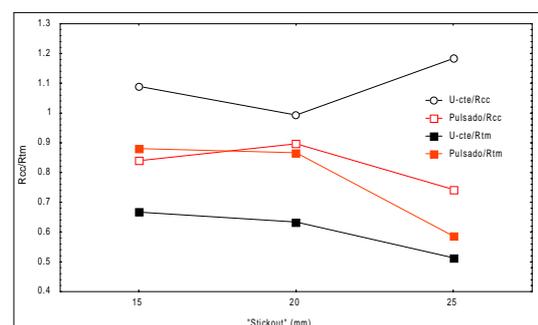


Figura 2. Efeito do *stickout* sobre a Rcc e Rtm.

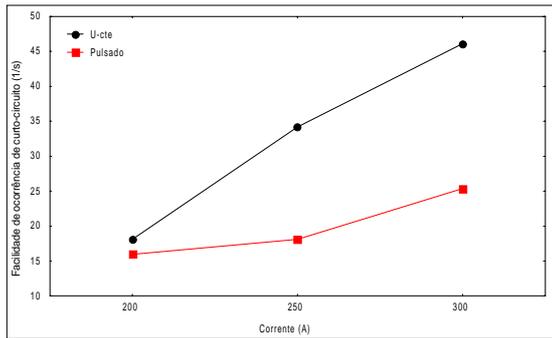


Figura 3. Efeito da corrente sobre a Fcc.

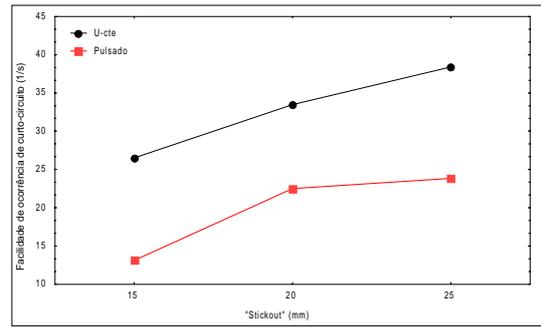


Figura 4. Efeito do *stickout* sobre a Fcc.

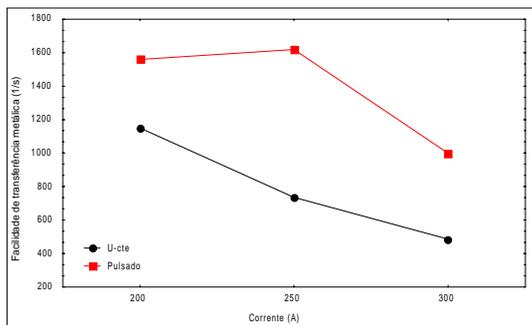


Figura 5. Efeito da corrente sobre a Ftm.

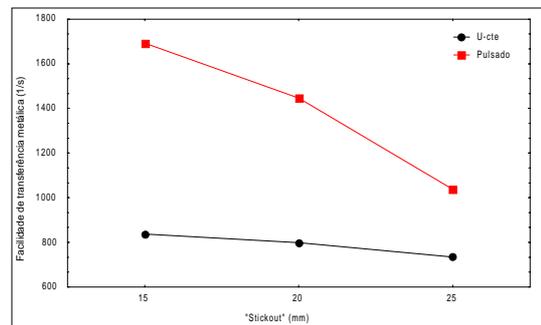


Figura 6. Efeito do *stickout* sobre a Ftm.

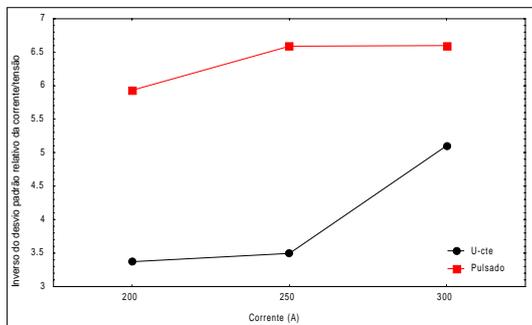


Figura 7. Efeito da corrente sobre $I/\sigma I$ e $U/\sigma U$

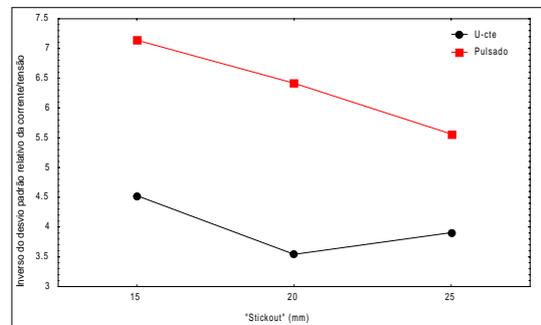


Figura 8. Efeito do *stickout* sobre $I/\sigma I$ e $U/\sigma U$.

3.2 - Estudo das características econômicas

A tabela 3 apresenta os resultados do estudo das características econômicas. As figuras 9 e 10 mostram o efeito da corrente e do *stickout*, respectivamente, sobre a taxa de deposição (TD) e a taxa de fusão (TF). Observa-se que o aumento da corrente proporcionou o crescimento da TD e da TF, ocorrendo o mesmo quando do aumento do *stickout*. Pela análise de variância, observou-se que tanto a taxa de deposição quanto a taxa de fusão têm seus valores iguais com o aumento da corrente, havendo porém, um efeito maior para o *stickout* de 25 mm no modo convencional (fig. 10), ou seja, com o uso da corrente pulsada não foram verificadas melhorias significativas em relação a taxa de deposição e a taxa de fusão. Analisando as figuras 11 e 12, observa-se de modo

geral, maiores valores do rendimento quando do uso da corrente pulsada. Fato este, confirmado pela análise de variância. Portanto, com o uso da corrente pulsada houve melhorias no rendimento do processo, principalmente na corrente de 300 A utilizando os *stickout* de 20 e 25 mm.

Tabela 3. Dados das características econômicas.

Im (A)	Stickout (mm)	Característica econômica					
		Tensão (U) cte.			Pulsado		
		TD (kg/h)	TF (kg/h)	Rend. (%)	TD (kg/h)	TF (kg/h)	Rend. (%)
200	15	1,65	2,20	74	1,54	2,05	75
	20	1,52	2,08	73	1,99	2,65	75
	25	1,86	2,50	74	1,96	2,61	75
250	15	2,30	2,80	82	2,40	3,10	77
	20	2,43	3,11	78	2,39	2,99	80
	25	2,90	3,90	74	2,45	3,17	77
300	15	3,2	3,90	82	3,23	3,85	84
	20	3,2	4,13	77	3,17	4,02	79
	25	3,90	5,00	78	3,41	4,17	82

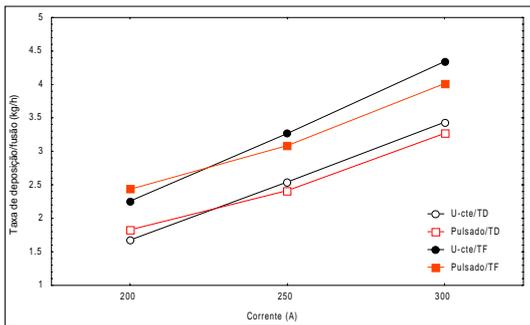


Figura 9. Efeito da corrente sobre a TD e TF.

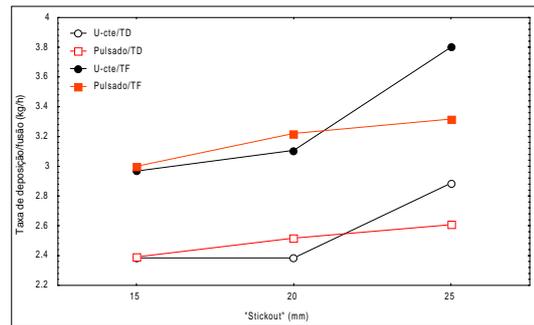


Figura 10. Efeito do *stickout* sobre a TD e TF.

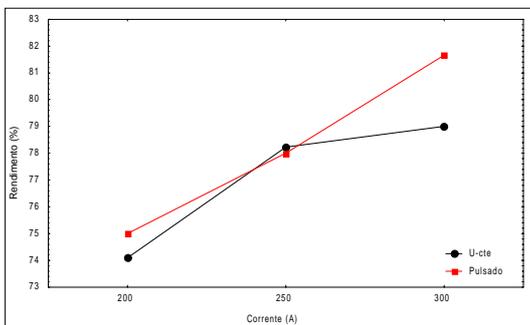


Figura 11. Efeito da corrente sobre o Rr.

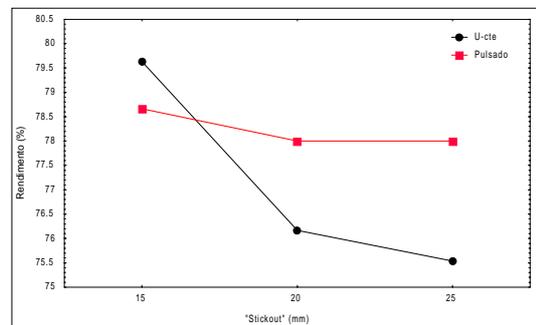


Figura 12. Efeito do *stickout* sobre o Rr.

3.3 - Estudo das características geométricas

A tabela 4 apresenta os resultados do estudo das características geométricas do cordão de solda. Para este estudo, foram medidos os parâmetros da largura (b), do reforço (r) e da penetração (p). As figuras 13 e 14 mostram respectivamente, o efeito da corrente e do *stickout* sobre o reforço e a penetração do cordão de solda. Observa-se nestas figuras o crescimento mais acentuado do reforço, quando da utilização do modo tensão constante e decréscimo da penetração com o aumento do *stickout* e crescimento da mesma com o aumento da corrente, para ambos os modos de soldagem. As figuras 15 e 16 mostram respectivamente o efeito da corrente e do *stickout* sobre a largura do cordão. Observa-se que, enquanto esta variável cresceu com o aumento da corrente, ela mostrou um pequeno decréscimo quando do aumento do *stickout* tanto no modo convencional quando no modo pulsado.

Tabela 4. Dados da geometria do cordão.

Im (A)	Stickout (mm)	Característica geométrica (mm)					
		Tensão (U) cte.			Pulsado		
		Largura	Reforço	Penetra.	Largura	Reforço	Penetra.
200	15	10,63	2,30	2,12	12,35	2,32	2,12
	20	9,71	2,72	1,71	11,41	2,74	2,02
	25	10,64	2,82	1,73	11,39	2,75	1,83
250	15	11,72	2,81	2,75	12,77	2,83	2,55
	20	10,93	2,90	2,45	13,16	2,99	2,14
	25	11,41	3,63	2,30	12,67	2,79	2,45
300	15	12,94	3,94	3,62	15,44	2,93	2,97
	20	11,62	4,24	2,81	15,14	2,80	3,29
	25	10,73	4,85	2,50	14,76	3,18	2,47

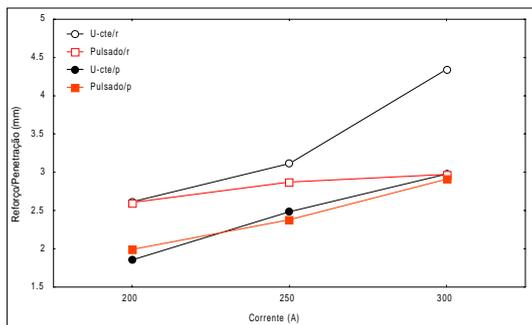


Figura 13. Efeito da corrente sobre o r e a p.

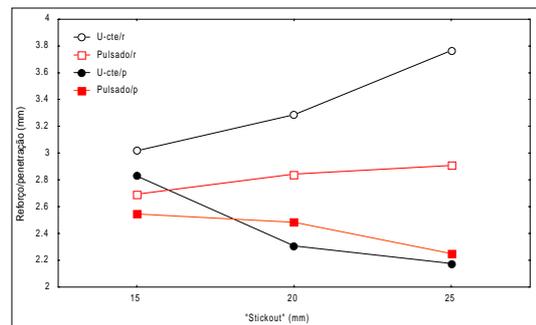


Figura 14. Efeito do *stickout* sobre o r e a p.

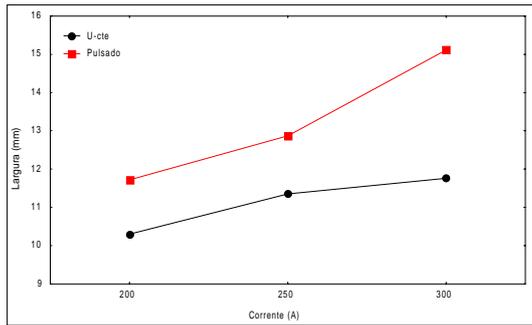


Figura 15. Efeito da corrente sobre a largura

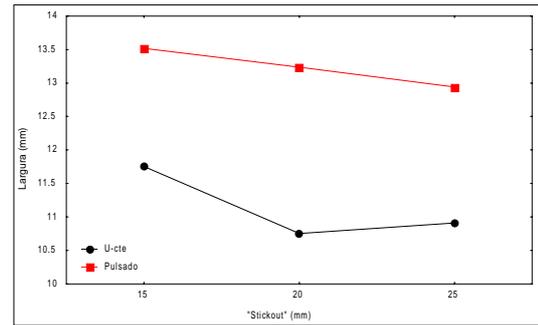


Figura 16. Efeito do *stickout* sobre a largura.

4 - CONCLUSÕES

De modo geral, com o uso da corrente pulsada houve melhoria na estabilidade do arco em relação ao modo convencional. Quanto as características econômicas, o modo pulsado obteve uma pequena melhoria, quando da avaliação do rendimento do processo. Para as características geométricas do cordão, não houve efeito significativo, quando do uso da corrente pulsada. Portanto, o modo pulsado proporciona soldagem com maior produtividade em relação ao modo convencional mas, requer maiores cuidados quanto aos ajustes dos parâmetros.

5 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de manifestar o agradecimento à CONARCO, pela doação dos consumíveis e à UFC pela infra-estrutura indispensável de seus laboratórios.

6 - BIBLIOGRAFIA

- [1] BONISZEWSKY, T., 1992, "Self-Shielded Arc Welding". Woodhead Publishing Ltd. in Association with the Welding Institute, Cambridge England.
- [2] MOTA, C. A. M., 1998, "Níquel e manganês como controladores da tenacidade na soldagem com arames tubulares autoprotetidos". Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC., Brasil, 178p.
- [3] OTEGUI, J.L., De VEDIA, L.A., 1985, "Soldadura com Arambres Tubulares Sin Protección Gaseosa". Boletín Técnico Conarco, nº81, pp. 2-14/27-29.
- [4] WIGERY, D., 1994, "Tubular wire welding". Woodhead publishing Limited, Cambridge England.
- [5] NORRISH, J., 1992, "Advanced Welding Processes" , Institute of Physics Publishing. Bristol, Philadelphia and New York, pp. 131-173.
- [6] BRAGA, E. M., 1997, "Soldagem a arame tubular autoprotetido em corrente pulsada", Dissertação de Mestrado, UFPA. Belém, PA, Brasil, p .
- [7] FARIAS, J. P., 1993, "Magnésio metálico como componente do revestimento na soldagem com eletrodos ao C-Mn-Ni", Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC., Brasil, 224p.