

# ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO, ATRAVÉS DA INDUTÂNCIA, SOBRE AS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E RENDIMENTO REAL DE DEPOSIÇÃO

**Yukio Kobayashi**

Faculdade de Engenharia da UNESP – campus de Bauru

Av. Edmundo Carrijo Coube, s/n

[kio@feb.unesp.br](mailto:kio@feb.unesp.br)

**Ana Carolina Silva Amoroso Anastacio**

Faculdade de Engenharia da UNESP – campus de Bauru

Rua Felício Soubhie, 1-25 apto 24

[carol\\_anastacio@yahoo.com.br](mailto:carol_anastacio@yahoo.com.br)

**Carlos De Nardi**

Gerência de Ensino e Pesquisa do CEFET-PR. – unidade de Cornélio Procópio

**Resumo:** *Estudou-se o comportamento das características geométricas definidas como largura, penetração e reforço e ainda rendimento real de deposição para o processo de soldagem com arame tubular com transferência do tipo curto-circuito, sob proteção de uma mistura gasosa com 25% de CO<sub>2</sub> e 75% Ar. Utilizou-se o aço ABNT 1020 como material de base, o arame E70C-6M como metal de adição, uma fonte de solda multiprocesso microprocessada, um sistema de aquisição de dados com interface para computador e um sistema de medição de consumo e velocidade de alimentação de arame. Os parâmetros analisados foram a indutância regulada no potenciômetro da máquina de solda e a corrente de soldagem regulada através da velocidade de alimentação de arame. As soldas foram realizadas por simples deposição, com vazão do gás, voltagem e “stick out” mantidos praticamente constantes. Para obtenção das características geométricas utilizou-se o software AutoCad e os resultados obtidos foram analisados estatisticamente com o objetivo de identificar, quantificar e localizar a significância e as dispersões. Verificou-se que o rendimento real de deposição se manteve constante com a variação do percentual de indutância, sendo que as características geométricas e o consumo sofreram variações. Com a mudança da corrente notou-se que a variação da velocidade de subida da corrente permaneceu praticamente constante e para maiores correntes de soldagem a indutância tem maior influência nas características geométricas do cordão de solda.*

**palavras – chave:** *indutância, arame tubular, curto-circuito, rendimento de deposição, características geométricas.*

## 1. INTRODUÇÃO

A soldagem a arco elétrico com arame tubular (FCAW-flux cored arc welding) tem se revelado como aquele de maior ascensão no ambiente industrial, devido a sua alta produtividade e excelente qualidade do cordão. Os arames tubulares têm estabilidade de arco e rendimento de deposição, similares ao arame maciço. A proteção primária na soldagem com arame tubular pode ser feita pelos

ingredientes do fluxo interno do arame que são depositados como escória sobre o cordão de solda e complementada por uma proteção extra com a aplicação do gás de proteção<sup>(1,2,3)</sup>.

O aumento da popularidade do FCAW deve-se ao grande número de vantagens que o processo oferece como por exemplo a alta e eficiente taxa de deposição, alta penetração, fatores de operação elevados, preferência dos soldadores, além disso a razão de fusão do arame tubular na soldagem é muito mais alta que na soldagem com eletrodo revestido e de certo modo mais alto que na soldagem com arame sólido<sup>(4,5,6)</sup>.

O ajuste dos parâmetros no processo de soldagem como por exemplo as variações comuns dos gases de proteção, fonte de energia e tipos de arames têm efeito significativos que podem produzir basicamente três diferentes modos de transferência de metal através do arco: globular, por curto circuito e por “spray”<sup>(6)</sup>.

A transferência por curto circuito tem esse nome porque o metal de soldagem atua curto circuitando (tocando) o metal de base muitas vezes por segundo. Quando o gatilho da tocha é pressionado, o arame é alimentado continuamente para a região da solda, curto circuitando com o metal de base. Numa condição típica de soldagem, acontecem entre 90 e 150 curtos circuitos por segundo. O número de curtos circuitos dependerá de alguns fatores como inclinação da tocha, indutância, o tamanho do arame usado e velocidade de alimentação de arame. Os salpicos são provavelmente gerados, quando o tempo de curto circuito ou tempo de arco é irregular. Um arco estável causa baixa taxa de salpicos e uma forma de onda regular enquanto que um arco instável causa uma alta taxa de salpicos. Essa taxa de salpicos pode ser controlada pela regulagem da indutância<sup>(7,8)</sup>. A indutância é uma importante característica dinâmica deste processo e deve ser ajustada adequadamente. A indutância permite regular a taxa de variação da corrente elétrica no decorrer da soldagem. Sendo muito útil pois possibilita o controle do efeito de constrição (efeito “pinch”) do eletrodo durante o aumento da corrente elétrica no instante do curto - circuito. A taxa de variação da corrente deve ser alta o bastante para causar a transferência da gota e baixa o bastante para minimizar os respingos e melhorar a estabilidade. Acredita-se que o controle da indutância pode minimizar ou maximizar as perturbações geradas no arco, pois atua diretamente na cinética das forças que atuam na transferência<sup>(9)</sup>. Além disso, a adição de indutância causa na soldagem, um acréscimo na transferência de curto circuito no tempo de abertura de arco e de curto circuito, resultando em menos curtos circuitos por segundo. Uma redução na frequência de curto circuito (tempo de arco maior) gera mais calor na solda, o que pode alterar o rendimento e as características geométricas da solda<sup>(10)</sup>.

## **2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

### **2.1. Materiais e Métodos**

Para se atingir os objetivos, utilizou-se como material de base o aço ABNT 1020, com espessura de 6,35 mm ( $\frac{1}{4}$ ”), comprimento de 200 mm e largura de 38,1 mm ( $1\frac{1}{2}$ ”), arame tubular E70C-6M, segundo a norma ASME SFA-5.18, com 1,2 mm de diâmetro e o gás utilizado foi uma mistura gasosa com 25% de CO<sub>2</sub> e com 75% de Argônio (Ar).

Para soldagem dos corpos de prova foi utilizada uma fonte de energia multiprocessos microprocessada da marca Miller modelo MAXTRON 450, para seleção das correntes de soldagem para obtenção de curto circuito, as faixas de indutância e a voltagem, foram realizados testes preliminares. Os valores adotados foram: 2,5; 3,1; 3,8 e 4,5 m/min para velocidade do arame e para cada velocidade variou-se a indutância para 0, 20, 40 e 60%.

As soldas foram realizadas em simples deposição e na posição plana, com tocha posicionada perpendicularmente a direção transversal da chapa e fixa em relação ao metal de base. O ângulo de arraste foi fixado em 15°, o “stick out” em 10 mm e o bico de contato faceando o bocal. O metal de base movimentou-se com velocidade constante de 23,6 cm/min, com auxílio de um equipamento de translação para corte oxi-gás adaptado. A vazão do gás foi mantida constante em 20 l/min, e a tensão

média em aproximadamente 18 V. O tempo de soldagem para cada corpo de prova foi de aproximadamente 30 segundos. Os resultados foram registrados com auxílio de um sistema de aquisição de dados com interface para microcomputador e a velocidade do arame dada pela máquina foi comparada com a velocidade dada por um sistema de medição e monitoração da produtividade em operações de soldagem, modelo MVA-2, este aparelho também possibilitou a medição do consumo de arame em metros e do tempo de arco aberto.

## 2.2. Rendimento Real de Deposição

Para o cálculo do rendimento real de deposição foi necessária a pesagem de segmentos de aproximadamente 1 metro do arame utilizado para cálculo da massa total. De acordo com essas medições a massa linear ( $m_e$ ) do arame tubular é de 7,83g/m.

Antes e após a realização de cada solda, os corpos de prova foram pesados, obtendo-se o valor da massa inicial ( $M_i$ ), massa do corpo de prova antes da soldagem, e massa final ( $M_f$ ), massa do corpo de prova após a soldagem, e depois de uma limpeza para retirada de salpicos.

Como o eletrodo tubular utilizado não forma escória, considerou-se que a massa total do eletrodo consumido deveria ser transferida para a solda, se não houvesse perdas por salpicos. Portanto o rendimento real ( $\eta_r$ ) foi calculado utilizando-se a massa do arame considerando seu fluxo interno, já que o mesmo contém pó de ferro que influencia na massa depositada. O consumo linear ( $c$ ) foi medido através do sistema de aquisição de soldagem, MVA-2. Para cálculo do rendimento real foi utilizada a equação 1.

$$\eta_r = \frac{M_f - M_i}{m_e * c} * 100 \quad (1)$$

## 2.3. Características Geométricas

Após a soldagem cada corpo de prova foi cortado, utilizando uma máquina de corte com disco abrasivo, e foram selecionadas três amostras. As amostras foram preparadas e atacadas com uma solução de nital 5%.

Após o ataque as amostras foram fotografadas e as imagens digitalizadas foram medidas utilizando o software AutoCad 2000. Para os corpos de prova calculou-se o valor médio das características obtidas, resultando em quatro valores médios para cada condição, esses valores foram analisados através da técnica estatística denominada análise de variância (ANOVA). Os resultados obtidos com a análise de variância determinam se existem diferenças significativas, porém, não identificam entre quais elas ocorrem. Para tanto, utilizou-se o Teste de Tukey<sup>(12,13)</sup>.

## 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o sistema de aquisição foi possível obter-se a velocidade de aumento e diminuição de corrente em função do tempo de acordo com a alteração da faixa de indutância, corrente de soldagem e número de picos. Os dados obtidos estão apresentados nas Tabelas 1 e 2. A massa depositada foi obtida subtraindo a massa final do corpo de prova da massa inicial.

Através dos dados obtidos foram feitas comparações dos efeitos que a variação de indutância e da corrente tiveram sobre o rendimento de deposição e parâmetros geométricos. O acréscimo da indutância diminui a velocidade de aumento da corrente durante o curto-circuito, conforme mostra a Figura 1. Isso acontece para as quatro correntes de soldagem.

A Figura 2 mostra o comportamento do rendimento real de deposição em função da variação de corrente com o tempo. Apesar de visualmente termos um grande aumento, de acordo com o Teste de

Tukey não ocorreu uma variação significativa dos dados. Apesar da literatura dizer que a indutância é regulada para aumentar o rendimento real de deposição.

Tabela 1 – Relação entre massa consumida, rendimento real de deposição e características geométricas com a alteração da faixa de indutância

Corrente Média (A)	Indutância (%)	dI/dt (A/ms)	Massa Depositada (g)	$\eta_r$ (%)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Largura (mm)
111	0	27,88	14,81	98	0,98	2,48	6,02
113	20	24,38	15,05	98	1,11	2,61	6,59
112	40	19,54	15,07	98	1,02	2,57	6,30
113	60	16,46	14,91	98	1,15	2,54	6,49
129	0	32,17	18,44	98	1,21	2,68	6,83
128	20	27,21	18,64	98	1,16	2,76	6,84
130	40	19,58	18,69	97	1,17	2,83	7,14
130	60	17,67	18,62	99	1,24	2,83	7,11
156	0	32,25	22,53	96	1,45	3,22	7,26
153	20	27,04	23,41	97	1,51	3,36	7,97
154	40	20,29	22,54	97	1,42	3,13	8,16
157	60	18,07	22,16	99	1,62	3,24	8,41
174	0	33,23	25,08	96	1,99	3,49	8,29
172	20	28,00	25,94	97	1,80	3,26	7,08
175	40	20,73	26,66	98	1,98	3,64	8,78

Tabela 2 – Relação entre a corrente média e o número de picos

Indutância (%)	Corrente Média (A)	Número de Picos	Indutância (%)	Corrente Média (A)	Número de Picos
0	111	377	0	156	305
20	113	354	20	153	273
40	112	351	40	154	261
60	113	336	60	157	237
0	129	323	0	174	273
20	128	319	20	172	259
40	130	324	40	175	207
60	130	316			

Analisando as Figuras 3 a 5, para a corrente de 112 A, nas condições dI/dt = 27,88 (IND = 0%) e 24,38 A/ms, (IND = 20%), a solda teve um aumento da penetração, largura e reforço.

O aumento da penetração, com o aumento da indutância pode ter ocorrido pela redução do número de picos (número de curto-circuitos), que é ilustrado na Figura 6, conseqüentemente aumentando o tempo de arco aberto. Com o aumento do tempo de arco aberto, a ação do arco elétrico é mais efetiva sob a poça de solda e eletrodo, causando um aumento na penetração com conseqüente aumento da velocidade de fusão, ou seja aumento de consumo, como pode ser notado na Figura 7. O aumento da indutância diminui a tensão superficial e a viscosidade tornando o cordão mais largo, menos convexo. Essa pode ser a explicação para o aumento da largura<sup>(10)</sup>.

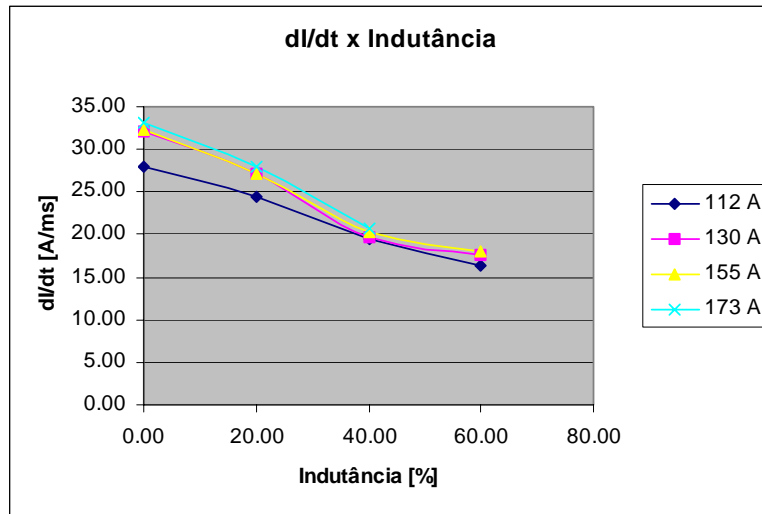


Figura 1 - Relação entre a indutância percentual e a velocidade de aumento de corrente (dI/dt)

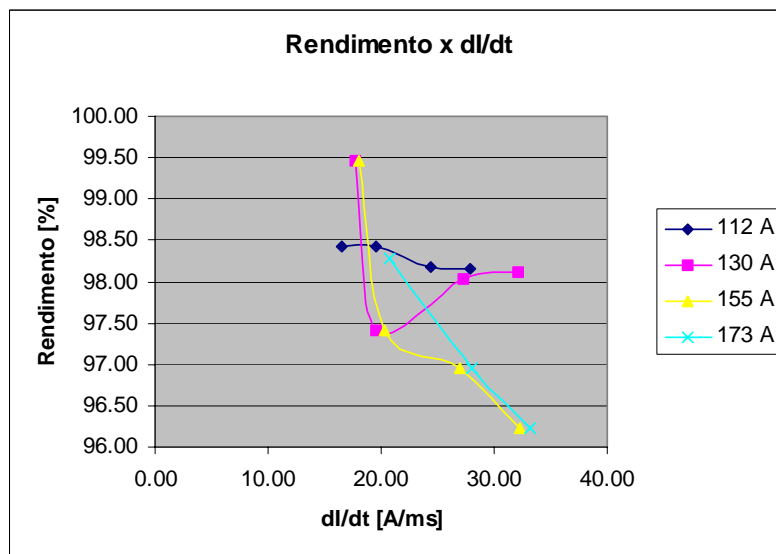


Figura 2 - Relação entre o rendimento real de deposição e a variação de corrente com o tempo (dI/dt)

Um maior consumo faz com que o cordão de solda tenha um aumento no volume de massa depositada podendo causar acréscimo do reforço e largura.

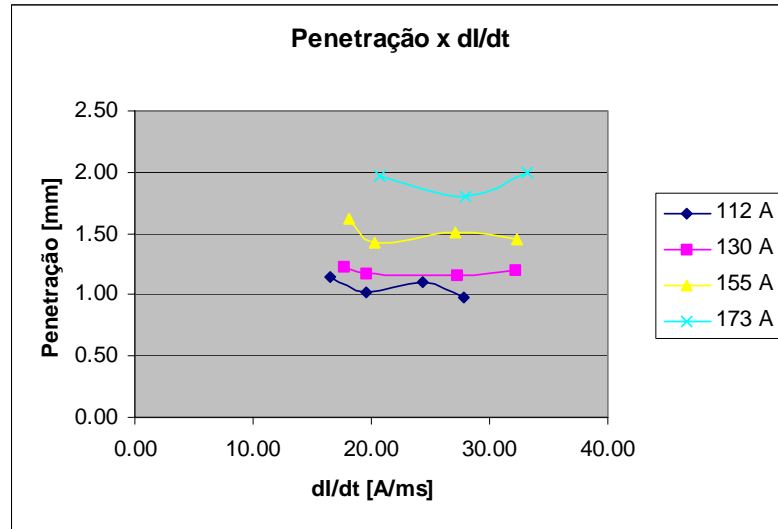


Figura 3 – Relação entre a penetração e a variação de corrente com o tempo (dI/dt)

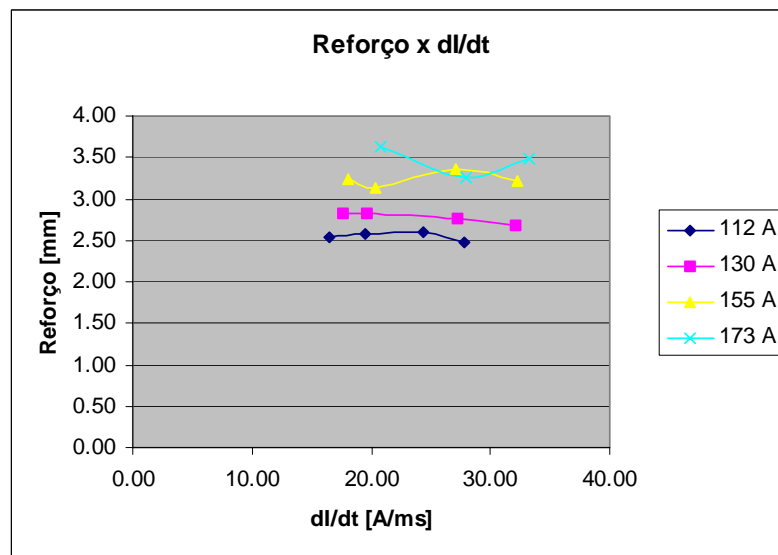


Figura 4 - Relação entre o reforço e a variação de corrente com o tempo (dI/dt)

Com relação às condições com indutância de 20% ( $dI/dt = 24,38$  A/ms) e indutância de 40% ( $dI/dt = 19,54$  A/ms) observamos uma diminuição da penetração e largura enquanto o reforço possui alteração insignificante. Como a variação do número de picos é muito pequena, o tempo de ação do arco é o mesmo, porém com o decréscimo de  $dI/dt$  temos um menor aquecimento por efeito Joule conseqüentemente tem-se uma maior tensão superficial e viscosidade que fazem com que a largura e a penetração diminuam. O consumo e o rendimento real de deposição não possuem variações significativas.

Com a mudança da condição de indutância para 60% ( $dI/dt = 16,46$  A/ms) tem-se um aumento da penetração e largura, e o reforço não possui variação significativa. Esse novo aumento da penetração pode ser causado pela diminuição do número de picos notada na Figura 6, que causa uma maior ação do arco e pelo aumento do aquecimento diminui a viscosidade e tensão superficial podendo justificar o aumento na largura do cordão de solda. Com menor  $dI/dt$  tem-se menor aquecimento o que explica a redução no consumo, mostrado na Figura 7.

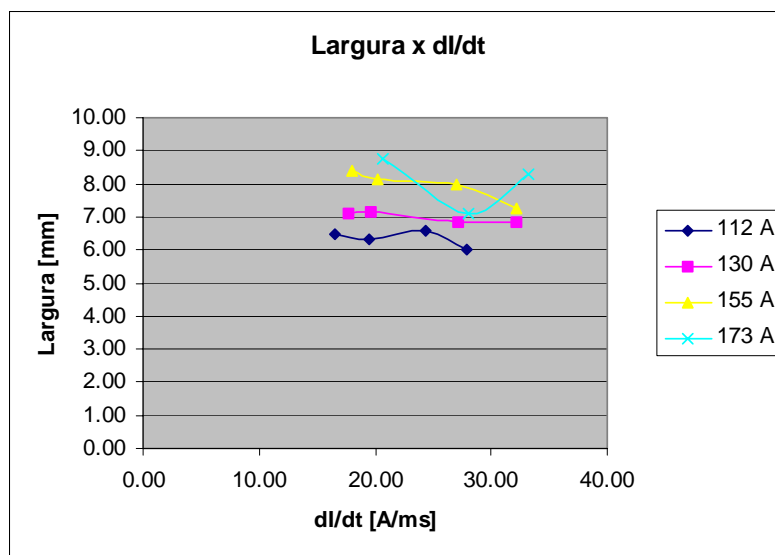


Figura 5 - Relação entre a largura e a variação de corrente com o tempo ( $dI/dt$ )

Analisando as Figuras 3 a 5, para corrente média de 130 A nota-se que o único parâmetro que tem alteração significativa estatisticamente, quando se muda a indutância de 0% para 20% é o reforço, que sofre um aumento, esse aumento pode ser causado pelo aquecimento mais lento por efeito Joule, devido a redução de  $dI/dt$ . Aquecendo mais lentamente, a temperatura da gota pode estar menor quando ocorre a transferência, causando um aumento da tensão superficial e da viscosidade proporcionando um cordão de solda mais convexo.

Alterando a indutância para 40% nota-se que a penetração possui variação insignificante estatisticamente, e o reforço e a largura têm um acréscimo. A redução de  $dI/dt$  faz com que o material tenha um menor aquecimento o que pode ter causado um aumento no reforço.

Quando altera-se para 60%, nota-se um aumento da penetração enquanto o reforço e a largura permanecem com variações insignificantes. Como mostra a Figura 6, há uma tendência de queda no número de picos, ou seja, tem-se maior ação o arco e conseqüentemente maior penetração. Na Figura 7, observa-se que houve uma redução no consumo o que pode ser causado pela diminuição de  $dI/dt$  que implica em menor tempo de aquecimento do arame.

Para a soldagem com corrente média de 155 A quando se alterou a indutância de 0% para 20% ocorreu um aumento da largura e do reforço. Quanto à penetração ocorreu uma tendência de aumento, porém as variações não são significativas.

Como explicado anteriormente o aumento de indutância pode causar uma redução no número de picos conforme mostra a Figura 6 causando maior aquecimento no metal de solda e fazendo com que o cordão de solda fique mais largo. Como o tempo de arco aumenta, o consumo de arame aumenta como pode ser visto na Figura 7. Para 40% de indutância houve uma redução da penetração e do reforço e um aumento da largura. A variação do número de picos teve uma pequena redução. Como o aumento de  $dI/dt$  reduz a taxa de aquecimento, pode se ter a redução do reforço.

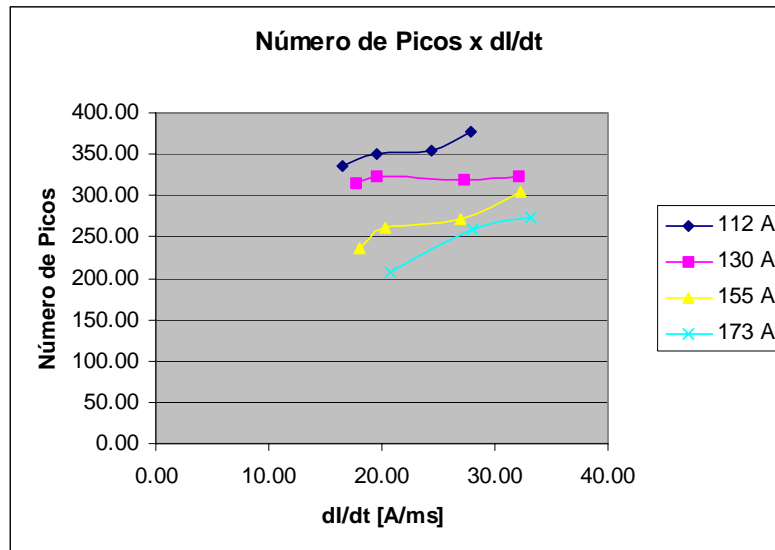


Figura 6 - Relação entre o número de picos a variação de corrente com o tempo (dI/dt)

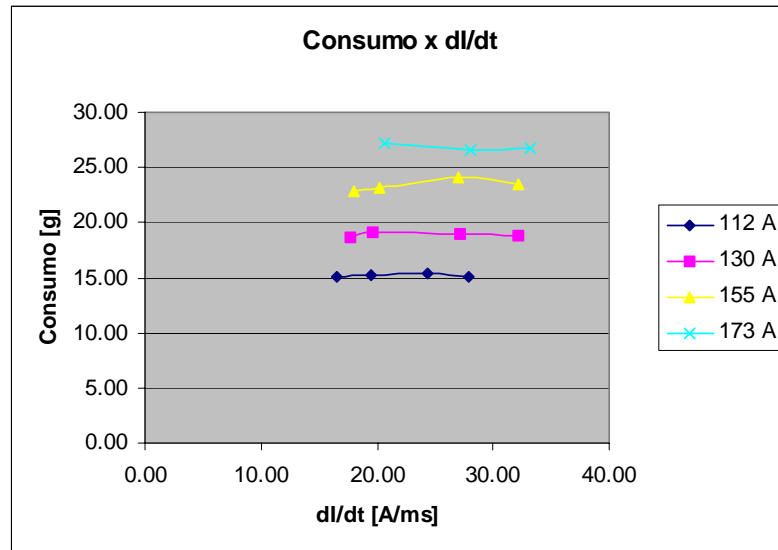


Figura 7 - Relação entre o consumo e a variação de corrente com o tempo (dI/dt)

O aumento de largura pode ser explicado pelo aumento do número de picos, Figura 6, que pode aumentar o aquecimento do cordão de solda. Na Figura 7 observa-se que o consumo teve uma tendência de queda que pode ser justificado por uma menor energia para a fusão do arame. Essa redução de energia pode acarretar uma pequena redução na penetração devido a diminuição de dI/dt.

Quando altera-se para indutância de 60%, nota-se um aumento da penetração, que pode ser justificado pela diminuição do número de picos, mostrado na Figura 6.

A diminuição do número de picos também pode causar um aumento na largura do cordão<sup>(10)</sup>. O rendimento teve uma tendência ao aumento como mostrado na Figura 2, isso significa que mais material consumido do arame foi transferido para a solda podendo causar um aumento de reforço.

As variações de consumo, Figura 7, não foram muito significativas segundo Teste de Tukey.

Com a corrente média de 173 A não foi possível soldar com indutância percentual de 60%. De acordo com a Figura 3 a 5 a penetração, o reforço e a largura tiveram uma tendência a redução e posterior aumento.



A redução de  $dI/dt$  causou uma pequena diminuição no número de picos como ilustra a Figura 6. O aquecimento mais lento do arame por efeito Joule pode acarretar um menor consumo, como pode ser visto na Figura 7. A diminuição do consumo propiciou um menor volume de material transferido tornando o cordão com menor reforço e largura.

Quando altera-se a indutância para 40% há um aumento na penetração o que pode ser explicado pela diminuição do número de picos, que aumenta o tempo de arco aberto.

Como o tempo de arco aberto aumentou, o aquecimento do arame é maior, propiciando um aumento do consumo como pode ser visto na Figura 7. Conseqüentemente o volume de material na solda aumenta, tornando o cordão maior, ou seja, maior reforço e largura. Isso pode ser observado pela tendência de aumento do rendimento real de deposição na Figura 2.

#### **4 -Conclusões**

Das variações realizadas no trabalho e analisando os dados obtidos concluiu-se que:

- 1 – Que o aumento de percentual de indutância (redução de  $dI/dt$ ) alterou as características geométricas do cordão de solda;
- 2 – De acordo com teste estatístico, altos valores de indutância propiciaram um aumento de reforço e largura o cordão de solda;
- 3 – A indutância tem maior influência na geometria do cordão de solda para maiores correntes;
- 4 – O consumo do eletrodo também foi alterado pelo aumento do percentual de indutância;
- 5 – O rendimento real de deposição praticamente não foi alterado pela indutância;
- 6 – A variação do percentual de indutância propiciou praticamente o mesmo valor de  $dI/dt$  para todas as correntes analisadas.

#### **5 - Agradecimentos**

A FAPESP, pelo apoio financeiro (processo 03/01352-6), a FUNDUNESP (processo 00324/03-DFP) e a Faculdade de Engenharia de Bauru.

#### **6 - Referências.Bibliográficas**

- (1) COSTA, M.C.M.S.; BRACARENSE, A.Q. Estudo da influência da corrente de soldagem com arame tubular na quantidade de hidrogênio difusível no metal de solda. XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Belo Horizonte, Minas Gerais, p. 10, 1999.
- (2) RIBEIRO, L.G.;COSTA,S.C. Influência dos Parâmetros de Pulso no Processo MIG sobre a Geometria do Cordão de Solda. 2001. 8 f. I Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Curitiba. Paraná.
- (3) QUITES, A.M. Introdução à soldagem a arco voltaico. Florianópolis: Editora SOLDASOFT, 2002.351 p., Bibliografia: p.345-348. 21 cm
- (4) FERREE, S. E. New Generation of Cored Wires Creates Less Fume and Spatter. Welding Journal, p. 45 – 49, december, 1995.
- (5) SUBAN, M.; TUSEK, J. Methods for the determination of arc stability. Journal of Material Processing Technology, v. 143-144, p. 430-437, 2003.
- (6) ESAB. Arames tubulares OK. Appleton: Cleber Fortes – Assistência Técnica de Consumíveis, 2003. 39 p., 29 cm.
- (7) MILLER ELETRIC MFG. CO. GMAW-P Pulsed Spray transfer. 1995. 21 p. 29 cm.

- (8) KANG, M.J.; KIM, Y.; AHN, S.; RHEE, S. Spatter Rate Estimation in the Short-Circuit Transfer Region of GMAW. *Welding Journal*, p. 238-247, september, 2003
- (9) MIRANDA, H.C.; MOTA C.A.M.; FARIAS J.P. Efeito Indutivo na Soldagem com Arame Tubular Autoprottegido. 1998.11 f. XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. XI Congresso Latino-Americano. V Íbero-Americano de Soldagem. Fortaleza.Ceará.
- (10) CRAIG, E. *Gas Metal Arc and Flux Cored Welding*, Chicago, 1991, p. 156. 29 cm.
- (11) AWS, *Welding Handbook – Welding Processes*. 8<sup>th</sup> ed., Miami – USA. American Welding Society, v. 2, 1991, p.955. 26 cm.
- (12) FONSECA, J. S. Da, MARTINS, G. de A. Comparação de várias médias: análise de variância. In: \_\_. *Curso de Estatística*. 3.ed. São Paulo: Atlas, 1981, p.221-53.
- (13) SPIEGEL, M. R. *Estatística*. 3 ed. São Paulo: Makron Books do Brasil Editora, 1993, p.515-30.

## **INFLUENCE OF THE SHORT CIRCUIT CURRENT VARIATION, THROUGH THE INDUCTANCE, ON THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS AND REAL DEPOSITION RATE**

### **Yukio Kobayashi**

Faculdade de Engenharia da UNESP – campus de Bauru  
Av. Edmundo Carrijo Coube,s/n  
[kio@feb.unesp.br](mailto:kio@feb.unesp.br)

### **Carlos De Nardi**

Gerência de Ensino e Pesquisa do CEFET-PR. – unidade de Cornélio Procópio

### **Ana Carolina Silva Amoroso Anastacio**

Faculdade de Engenharia da UNESP – campus de Bauru  
Av. Nações Unidas,53-53 apto 23  
[carol\\_anastacio@yahoo.com.br](mailto:carol_anastacio@yahoo.com.br)

**Abstract:** *The behavior of the geometric characteristics and real deposition rate for the process of welding with cored wire with short circuit transfer, under protection of a gaseous mixture with 25% of CO<sub>2</sub> and 75% Argônio. Used steel ABNT 1020 as base material, wire E70C-6M, a microprocessed multiprocess power source, a system of data acquisition with interface for computer and a system of measurement of burn-off rate and speed of feed wire. The weld had been carried bead on plate, with outflow of the gas, voltage and "stick out" practically constant. For analysis of the geometric characteristics was used AutoCAD software and the gotten results had been analyzed with statistical tools to identify, quantify and locate the significance and the dispersions. It was verified that the real deposition rate kept constant with the inductance variation, being that the geometric characteristics and the melting rate had variations. With the change of welding current the rate of current rise practically remained constant and for greater welding current the inductance had more influence in the geometric characteristics of the weld bead.*

**Keywords:** *inductance, cored-wire, short-circuit, deposition rate, bead geometry.*