

## **DETERMINAÇÃO DA TAXA DE FUSÃO DO ELETRODO REVESTIDO PARA SOLDAGEM COM UM ROBÔ INDUSTRIAL IRB 2000:**

**CÓDIGO DE ACESSO: AAAFBI**

***Resumo.** Ao contrário dos processos de soldagem MIG, MAG, e FCAW, a mecanização e a robotização do processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) têm sido dificultadas por interrupções da operação de soldagem para troca de eletrodo, o que reduz a produtividade, dificultando a obtenção de grandes cordões de solda. Por isso, ainda é considerado um processo manual. Entretanto, mesmo com dispositivo eficiente de troca de eletrodo, o aquecimento deste, para correntes acima de 100A, provoca mudanças na sua taxa de fusão, que causam variações do comprimento do arco elétrico, responsáveis pela qualidade indesejável dos cordões de solda resultantes. Neste trabalho, foi medida a taxa de fusão do eletrodo em função do tempo de soldagem, e esta foi assumida como velocidade de mergulho do porta-eletrodo no programa do robô. Testes experimentais de soldagem com robô mostraram que para correntes acima de 100A, se a velocidade de mergulho do eletrodo durante a soldagem for constante, o resultado provável é uma solda ruim. Entretanto, ao assumir a velocidade de mergulho do eletrodo como sendo igual à taxa de fusão do mesmo, o robô consegue compensar o consumo do eletrodo, mantendo o arco elétrico constante, o que resulta em cordões de solda de qualidade aceitável.*

***Palavras-chave:** Aquecimento do eletrodo, taxa de fusão, velocidade de mergulho.*

### **1. INTRODUÇÃO**

O processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) é o mais simples de todos os processos de soldagem, tanto para as necessidades em equipamentos como para a sua aplicação em operações tais como manutenção, construção, e principalmente a soldagem submarina [Juers, 1993]. Ele proporciona um fácil controle da microestrutura e da composição química do cordão de solda, com a possibilidade de se variar o revestimento.

Quando comparado a outros processos de soldagem, é menos sensível a correntes de ar e pode ser usado para a maioria dos metais e suas ligas. Existem vários tipos de eletrodos disponíveis para a soldagem SMA, desde os de aço de baixo carbono, até de cobre, níquel e ligas de alumínio [Welding Handbook, 1991]. Nota-se que a maior vantagem sobre alguns processos de soldagem a arco tais como a soldagem a arco submerso (SAW) por exemplo, é que o metal de adição, os meios de proteção do arco e da zona de fusão, e os ingredientes químicos são todos fornecidos pelo próprio eletrodo, não havendo necessidade de equipamentos auxiliares. Uma das grandes vantagens é a possibilidade de se colocar elementos ligantes no revestimento, o que permite a produção de eletrodos finos (de até

1mm). Isto não seria possível com os arames tubulares (FCAW), o principal concorrente do processo SMAW [Houldcroft, 1986].

Durante a soldagem com eletrodo revestido, a corrente elétrica percorre o comprimento inteiro do eletrodo, e o aquece através do efeito Joule ( $I^2R$ ), causando o aumento da resistividade do material do arame na alma do eletrodo e consequentemente da própria resistência do arame. Entre 40 e 80 segundos aproximadamente, tempo suficiente para a deposição completa do eletrodo fundido, vários fenômenos físicos, químicos, elétricos e metalúrgicos ocorrem na região da solda, os quais são fundamentais nas propriedades mecânicas e microestruturais do cordão de solda. Alguns dos mais importantes são o aumento de temperatura, e o fenômeno de taxa de fusão resultante. O aumento de temperatura no eletrodo durante a operação de soldagem é o resultado do aumento da resistência do arame como afirmado anteriormente. Este aumento de temperatura provoca mudanças na taxa de fusão, que resultam em mudanças da tensão e do comprimento do arco elétrico, alterando as propriedades mecânicas e microestruturais ao longo do cordão de solda [Bracarense, 1994], [Batana, 1998]. Isto significa que a taxa de fusão é um fator fundamental a ser controlado, quando se deseja uma solda de boa qualidade. A taxa de fusão do eletrodo revestido é afetada por vários fatores entre os quais, a corrente de soldagem, a temperatura de fusão, a temperatura do eletrodo durante a soldagem, o diâmetro do arame, o comprimento do eletrodo, a espessura, concentricidade e composição química do revestimento, e mesmo a polaridade da corrente. Na maioria dos processos de soldagem a arco metálico, que utilizam eletrodos consumíveis, a taxa de fusão foi modelada em função da corrente de soldagem, os outros parâmetros foram considerados constantes [Wilson et alli, 1956] e [Waszink et alli, 1982]. Entretanto neste trabalho, pretende-se determinar a taxa de fusão do eletrodo revestido em função do tempo de soldagem e usar o seu valor no programa do robô, para executar a operação de soldagem, visando a qualidade das soldas resultantes através da manutenção do comprimento do arco elétrico constante.

## **2. TAXA DE FUSÃO DO ELETRODO REVESTIDO:**

A taxa de fusão é definida como a velocidade de fusão do eletrodo durante a soldagem. Ao contrário dos outros processos de soldagem a arco elétrico, o fato de a operação de soldagem ser efetuada com corrente constante no processo SMAW, e a tensão do arco ser difícil de se monitorar, torna-se necessária a busca de um outro parâmetro para o controle da taxa de fusão. A temperatura do eletrodo parece ser o parâmetro mais indicado, uma vez que ela tem uma influência muito grande sobre o comportamento da taxa de fusão [Batana, 1998]. No estudo sobre o controle da taxa de fusão pela indução magnética do fluxo líquido na ponta do eletrodo, Waszink et alli [1985] investigaram os fenômenos físicos que controlam a taxa de fusão dos eletrodos revestidos. Pesquisas anteriores mostraram uma influência exercida por parâmetros tais como o diâmetro do eletrodo, a composição química do revestimento e a sua espessura e a polaridade da corrente.

Entretanto, eles apresentaram pela primeira vez a taxa de fusão em termos de geração e transferência de calor no eletrodo revestido. Eles assumiram que o calor necessário para aquecer e fundir a ponta do eletrodo consumível na região do arco é igual a  $IV_0$ , onde  $I$  é a corrente elétrica e  $V_0$  a tensão do arco. Esta tensão geralmente depende da polaridade, da composição do metal na ponta do eletrodo e das propriedades do plasma. Parte desta potência é perdida por radiação e por evaporação do material na superfície. O restante é absorvido pelo metal líquido transferido da ponta do eletrodo para a poça de fusão, formulado da seguinte maneira:

$$\mu = cp_L(Td_r - T_{mp}) \quad (1)$$

Onde  $\mu$  é a taxa de deposição do material por unidade de tempo, isto é, a massa de material do eletrodo fundido por unidade de tempo de soldagem ( $\text{kg.s}^{-1}$ );

$cp_L$  é o calor específico do arame ( $\text{J.kg}^{-1}(\text{°C})^{-1}$ );

$Td_r$  é a temperatura média da gota líquida na ponta do eletrodo ( $\text{°C}$ );

$T_{mp}$  é o ponto de fusão ( $\text{°C}$ ).

A taxa de deposição  $\mu$  é relacionada ao comprimento do eletrodo da seguinte maneira:

$$\mu = -\rho_w A_w \frac{dL_e}{dt} \quad (2)$$

Onde  $\rho_w$  é a densidade mássica do arame ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

$A_w$  é a área de seção transversal do eletrodo ( $\text{m}^2$ );

$L_e$  é o comprimento consumido do eletrodo;

$t$  é o tempo.

Neste trabalho, a taxa de fusão do eletrodo é definida como a variação do comprimento consumido do eletrodo, em relação ao tempo isto é,  $\frac{dL_e}{dt}$ . Desta forma, ela pode ser deduzida igualando as Eq. (1) e (2), o que conduz à seguinte formulação:

$$TF = \frac{dL_e}{dt} = cp_L \frac{(T_{mp} - T_{dr})}{\rho_w A_w} \quad (3)$$

Onde TF é a taxa de fusão do eletrodo.

Ao observar a Eq. (3), que não foi apresentada no modelo de Waszink e alli [1985], constata-se que foram consideradas desprezíveis as perdas de calor por evaporação e por radiação. Entretanto é possível determinar a taxa de fusão do eletrodo revestido através de um modelo matemático simples. Este modelo depende da temperatura de fusão do eletrodo, e a da gota líquida na sua ponta, além do calor específico do arame na sua alma, o que mostra claramente a influência do aquecimento sobre a taxa de fusão do eletrodo. Entretanto, não se trata neste trabalho de modelar a taxa de fusão do eletrodo, mas de determinar o seu valor que deve ser inserido no programa do robô. Por esta razão, a taxa de fusão foi medida e determinada diretamente em função do tempo de soldagem, pois o objetivo era mostrar que se o consumo do eletrodo for compensado por um mergulho do porta-eletrodo fixado na ponta do robô, numa velocidade igual à taxa de fusão, é possível obter cordões de boa qualidade.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

#### 3.1 Determinação da taxa de fusão do eletrodo revestido

Para determinar a taxa de fusão do eletrodo revestido, eletrodos comerciais E7018 de 2,5mm de diâmetro e 350mm de comprimento. foram depositados manualmente por fusão sobre chapas de aço de baixo carbono, com as correntes de 80, 100, e 120 A. A taxa de fusão foi medida abrindo-se e extinguindo-se o arco elétrico depois de intervalos de tempo

pré-estabelecidos, para cada corrente. Foi medido o comprimento consumido em relação ao tempo de soldagem (tabela 1), e as três curvas relacionando o comprimento consumido com o tempo de soldagem são apresentadas na figura 1.

É importante acrescentar as condições iniciais de comprimento consumido zero, no tempo zero.

Tabela 1: Comprimento consumido do eletrodo após diferentes intervalos de tempo

Corrente	80A	100A	120A
Tempo (s)	Comp. Cons. (mm)	Comp. Cons. (mm)	Comp. Cons. (mm)
4	21,0	24,0	27,0
8	39,0	47,0	53,0
12	54,0	63,0	71,0
16	73,0	87,0	100,0
20	90,0	104,0	124,0
24	106,0	123,0	150,0
28	126,0	144,0	177,0
32	142,0	164,0	212,0
36	157,0	185,0	237,0

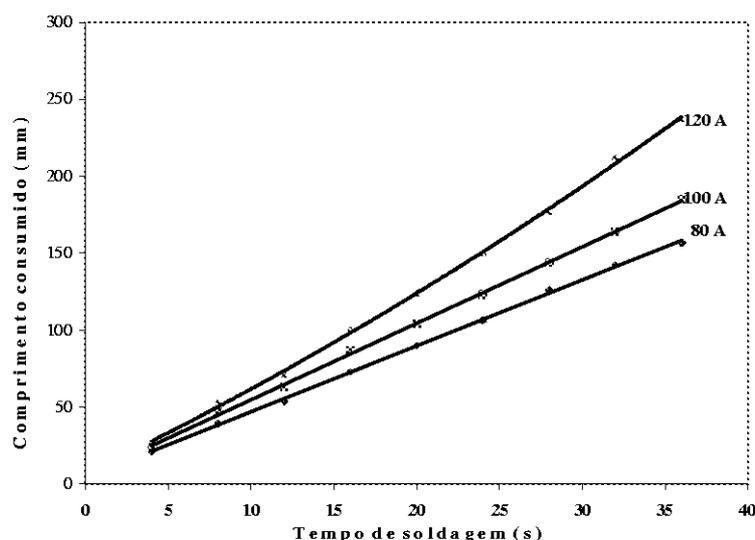


Figura 1: Evolução do consumo do Eletrodo durante o Tempo de Soldagem.

As funções que obedecem ao melhor ajuste linear das curvas para as correntes de 80 e 100A, e ajuste quadrático para 120 Amperes respectivamente, são descritas da seguinte maneira:

$$\begin{cases} L_{80}(t) = 4.2937t + 3.5661 \\ L_{100}(t) = 4,9973t + 4.9307 \\ L_{120}(t) = 0.0367t^2 + 5.0128t + 6.2 \end{cases} \quad (4)$$

Com SE = 0,38%.

Onde  $L$  é o comprimento consumido,  $t$  o tempo de soldagem, e  $SE$  o erro padrão da estimativa. Quanto menor o valor de  $SE$ , mais as funções da Eq.(4) se aproximam dos valores medidos. A taxa de fusão para cada corrente foi obtida pela derivada primeira das funções acima relacionadas, e é apresentada na figura 2.

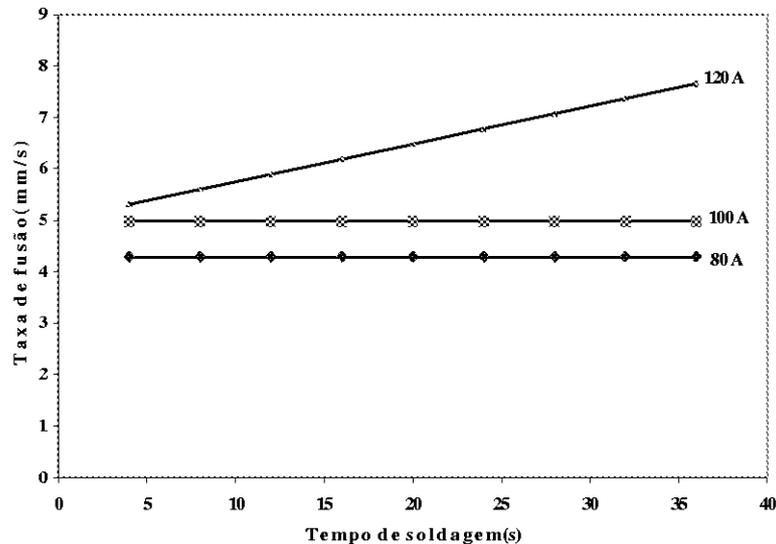


Figura 2: Evolução da Taxa de Fusão durante o Tempo de Soldagem.

As seguintes funções representam a taxa de fusão do eletrodo revestido no tempo, para cada corrente respectivamente:

$$\begin{cases} TF_{80}(t) = 4.2937 \\ TF_{100}(t) = 4.9773 \\ TF_{120}(t) = 0.0734t + 5.01283 \end{cases} \quad (5)$$

Onde  $TF$  é a taxa de fusão do eletrodo revestido, em mm/s.

Observe-se que para 80 e 100A, a taxa de fusão é teoricamente constante, enquanto para 120A, ela é linearmente crescente. Portanto espera-se que a velocidade de mergulho do robô siga esta tendência, conforme a corrente aplicada, para manter o arco elétrico constante.

### 3.2 Teste de soldagem com robô industrial IRB 2000

Vários testes de soldagem foram realizados com o robô como pode ser visto na figura 3. Um porta-eletrodo conectado ao polo positivo da máquina de soldagem foi fixado na ponta do robô, enquanto o outro polo foi conectado à mesa de soldagem. Foi adotada uma inclinação do porta-eletrodo de 10 graus na direção contrária ao sentido de soldagem e a tensão de soldagem variou entre 21 e 24 Volts. No primeiro teste, a corrente de soldagem foi estabelecida em 80A e o robô foi programado para mergulhar após a abertura do arco, com uma velocidade de 4,3mm/s, equivalente à taxa de fusão determinada na Eq.(5). Este teste foi repetido três vezes e os cordões de solda obtidos são apresentados na figura 4.

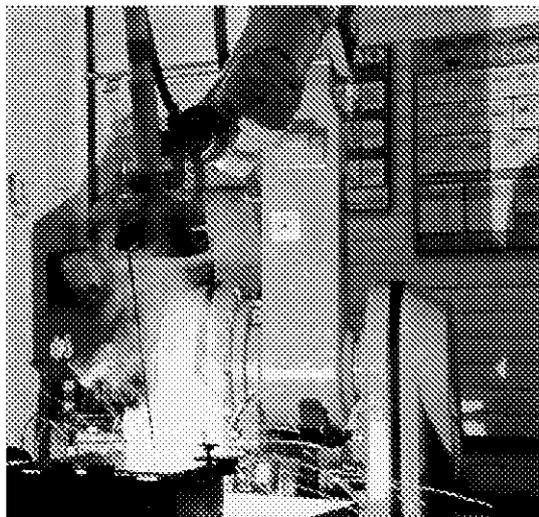


Figura 3: soldagem SMA utilizando um robô industrial IRB 2000.

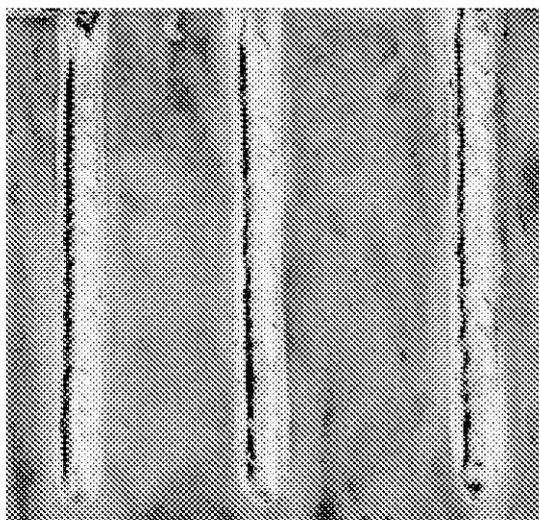


Figura 4: Cordões de solda realizados com robô para corrente de 80A

No experimento seguinte, a corrente de soldagem foi mudada para 100A e a velocidade de mergulho passou para 5,0mm/s, conforme a taxa de fusão correspondente. Foram então executadas as soldas cujos cordões resultantes são apresentados na figura 5.

Nestes dois casos, observa-se que as soldas foram executadas com velocidades constantes, entretanto os cordões obtidos são de aparência aceitável, pois a taxa de fusão é constante para esta faixa de corrente. Isso mostra que para corrente inferior ou igual a 100A, não ocorrem mudanças significativas na taxa de fusão do eletrodo revestido. Para comprovar que mudanças na taxa de fusão influem na qualidade da solda em correntes maiores, foram feitos dois testes de soldagem com o robô, com velocidades constantes, aplicando uma corrente de 120A.

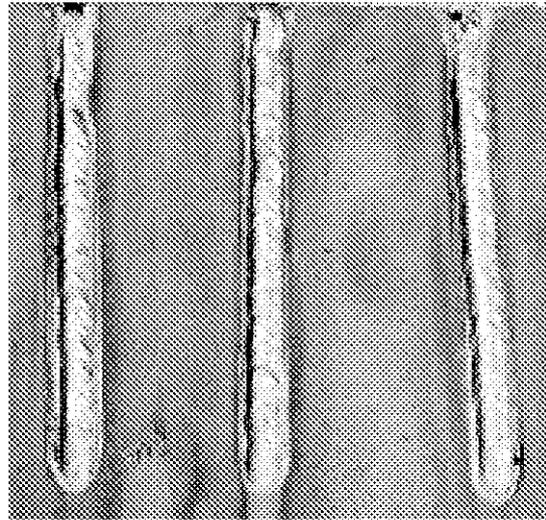


Figura 5: Cordões de solda realizados com robô para corrente de 100A

Inicialmente, o robô foi programado com uma velocidade de mergulho de 5,0mm/s. Foi obtido o cordão de solda (a) da figura 6. Em seguida a velocidade foi aumentada para 6,5mm/s, e foi obtido o cordão (b) da figura 6. Observando os dois cordões, constata-se que ambos são indesejáveis, devido a velocidades inapropriadas para esta corrente. O cordão (a) começa fino e depois aumenta de largura, devido a uma velocidade de mergulho inferior à taxa de fusão, pois enquanto esta aumenta, a velocidade permanece constante, o que proporciona uma deposição não uniforme de material fundido. Já no caso do cordão (b), embora a taxa de fusão aumenta, ela permanece inferior ao mergulho a maior parte do tempo de soldagem, o que torna o arco elétrico instável, devido à variação do seu comprimento. Esta instabilidade gera muitos respingos e porosidades na solda, além de inclusões de escória, resultando numa solda de péssima qualidade. Estes dois testes confirmaram portanto a necessidade de se variar a velocidade de mergulho do eletrodo durante a soldagem para corrente de 120A.

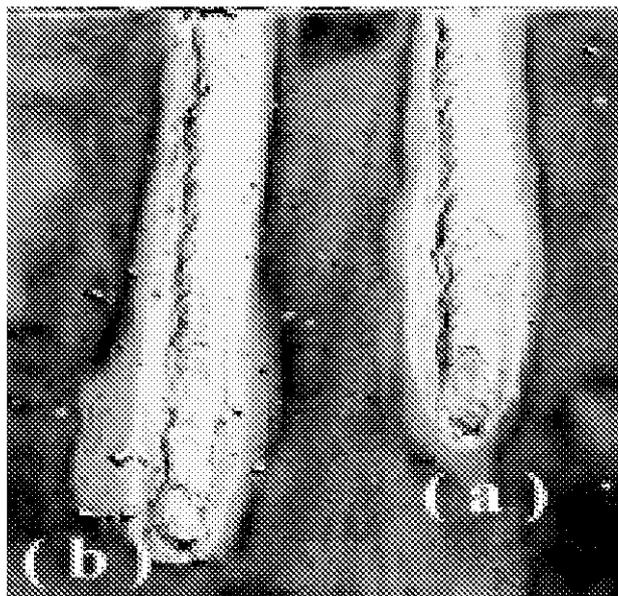


Figura 6: Cordões de solda realizados com robô com velocidade constante para 120A

Num último teste, a velocidade foi variada no programa do robô conforme a taxa de fusão indicada na Eq.(5), começando por 5,0mm/s logo na abertura do arco elétrico, e terminando com 6,6mm/s após 22s. Foram considerados pequenos acréscimos de velocidade da ordem de 0,30mm/s a cada quatro segundos. Os cordões de solda obtidos neste último teste estão apresentados na figura 7. A aparência destes cordões mostra que as mudanças na velocidade de mergulho permitiram compensar as variações na fusão do eletrodo, possibilitando uma deposição uniforme do metal fundido ao longo do cordão de solda.

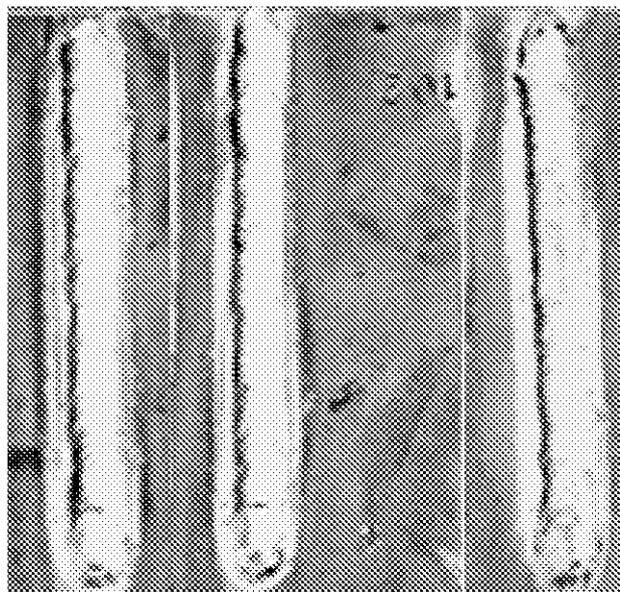


Figura 7: Cordões de solda realizados com robô com velocidade variável para 120A

#### 4. CONCLUSÃO

Este trabalho comprovou a existência de mudanças na taxa de fusão do eletrodo revestido durante o tempo de soldagem. Foi mostrado que para corrente de soldagem inferior a 100A, a taxa de fusão do eletrodo revestido é constante, enquanto para valores acima, ela varia. Foi também mostrado que ao igualar a velocidade de mergulho do robô à taxa de fusão do eletrodo, é possível executar soldas de boa qualidade. Experiências de soldagem com velocidades constantes para corrente de 120A confirmaram que as mudanças na taxa de fusão não são compensadas neste caso pelo mergulho do robô, o que gera instabilidades do arco elétrico, provocando a inclusão de impurezas e piorando a qualidade da solda. Entretanto, ao variar a velocidade de mergulho do robô conforme a variação da taxa de fusão, foi obtido uma solda de boa qualidade.

#### *Agradecimentos*

**J. R. Batana** gostaria de agradecer ao CNPq – Conselho Nacional para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil, pelo apoio financeiro. Os Autores gostariam também de agradecer ao GRACO – Grupo de Automação e controle da Faculdade de tecnologia da UnB, pela disponibilidade do robô ABB - IRB 2000 no desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS:

- Batana, J. R., 1998, Modelamento da Taxa de Fusão através da Monitoração da Temperatura do Eletrodo Revestido para Soldagem Mecanizada, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Bracarense, A.Q., Tese de PhD - Colorado School of Mines, 1994.
- Houldcroft, P.T., 1986, Tecnologia de los procesos de soldadura, 2ª Edición.
- Juers, R. H.,1993, Welding Brazing and Soldering, ASM Handbook, Naval Surface Welfare Center.
- Waszink, J.H. and Van den Heuvel, G.P.M.,1982, Heat and Flow in the filler metal in GMA welding, *Welding Journal* 61(8): 269-282s.
- Waszink, J.H. and Piena, M.J.,1985, Thermal Processes in Covered Electrodes, *Welding Journal* 64(2): 37s-48s.
- Welding Handbook,, AWS, 1991, Vol.2, 8<sup>th</sup> Edition: P.46.
- Wilson,J.L.; Claussen, G.E. and Jackson, C.E.,1956, Effects of I<sup>2</sup>R Heating on Electrode Melting Rate, *Welding Journal* 35(1): 1-8s.

## **DETERMINATION OF THE MELTING RATE OF COVERED ELECTRODE FOR WELDING WITH AN INDUSTRIAL ROBOT IRB2000**

*Abstract.* Differently to the welding processes MIG, MAG, and FCAW, the mechanization and the robotization of the Shielded Metal Arc Welding process (SMAW) have been hindered by interruptions of the welding operation for electrode change, that reduces the productivity, and make difficult the execution of great length welds. That is why this process is still considered as a manual one. However, even with efficient device of electrode change, the heating of the same, for currents above 100A, provokes changes in its melting rate, that cause variations of the electric arc length, responsible for the undesirable quality of the welds. In this work, the melting rate of covered electrode was measured relative to the welding time, and this was assumed as downward feeding speed of the electrode holder in the robot's program. Experimental tests of welding with robot showed that for currents above 100A, if the feeding speed of the electrode during welding goes constant, the probable result is a weld with bad quality. However, when assuming the feeding speed of the electrode equal to the melting rate, the robot gets to compensate the consumption of the electrode, maintaining the electric arc length constant, that results in welds with acceptable quality.

**Key-words:** Heating of the electrode, melting rate, feeding speed.