

MODELAGEM DAS DINÂMICAS DA FORMAÇÃO DA GOTA E TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM PROCESSOS DE SOLDAGEM À ARCO

PAULO JEFFERSON DIAS DE OLIVEIRA EVALD* JUSOAN LANG MÓR* CRISTIANO RAFAEL STEFFENS*
SILVIA SILVA DA COSTA BOTELHO* RODRIGO ZELIR AZZOLIN*

*Universidade Federal do Rio Grande - FURG
Km 8 - Av. Itália - Carreiros, 96203-900, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil

Email: [paulo.evald@gmail.com, jusoan66@gmail.com, steffens.bola@gmail.com,
silviacb.botelho@gmail.com, rodrigoazzolin@gmail.com]

Abstract— Welding is an operation that aims to join two or more pieces, holding that in the combination of these parts there will be no discontinuity of physical, chemical and metallurgical properties for its use and performance. For this purpose, it is used several embodiments of the weld according to the need for protection and materials used to perform the weld. In order to produce a uniform welding with adequate width and depth and good appearance, control techniques are implemented to manipulate variables involved in welding process. This paper have focus on welding process modeling and presents two models: the first deal with dynamic of droplet formation while the second model deal with mass transfer dynamic. Moreover, this work propose an alternative control, no addressed yet in welding processes, to control welding current and arc voltage.

Keywords— Arc Welding Process, Mathematical Modeling, Droplet Formation Dynamic, Mass Transfer Dynamic.

Resumo— A soldagem é a operação que tem por finalidade unir duas ou mais peças, assegurando que na junção dessas peças não haverá descontinuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas necessárias ao seu uso e desempenho. Para tal, são utilizados diversas formas de realizar a solda, de acordo com a necessidade de proteção, materiais e acabamentos, desejados nas peças a serem soldadas. Com a finalidade de produzir uma solda uniforme, com a profundidade e largura adequada e boa aparência, são implementadas técnicas de controle para manipular as variáveis envolvidas no processo de soldagem. Este trabalho tem como foco a modelagem do processo de soldagem e apresenta dois modelos: o primeiro modelo trata da dinâmica da formação da gota enquanto o segundo trata da dinâmica da transferência de massa. Além disso, o trabalho propõem uma alternativa de controle, ainda não abordada nos processos de soldagem, que busca controlar a corrente de soldagem e a tensão do arco.

Palavras-chave— Processos de Soldagem à Arco, Modelagem Matemática, Dinâmica da Formação da Gota, Dinâmica da Transferência de Massa.

1 Introdução

A soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é fundamental para muitos processos industriais (AbdelRahman, 1998) e é um dos processos mais produtivos em operações manufatureiras (Jalili-Kharaajoo et al., 2003). Com isso, aliado à versatilidade e mobilidade dos equipamentos necessário para essa soldagem, esse processo ganhou mais popularidade do que os demais, sendo atualmente o processo de soldagem mais encontrado na indústria (Jalili-Kharaajoo et al., 2003).

Nesses processos, a união dos materiais é realizada pela coalescência de um eletrodo metálico consumível e a peça de trabalho (Schiano et al., 1991). O gás (ou mistura de gases) de proteção que atua no arco e na poça de fusão, pode ser ativo ou inerte, ou seja, participa ou não como elemento de adição à solda. Se for utilizado um gás inerte, como Argônio ou Hélio, o processo é chamado MIG (*Metal Inert Gas*) e se for utilizado um gás ativo, como Dióxido de Carbono puro ou misturas de Dióxido de Carbono com Argônio ou Hélio, o processo é chamado MAG (*Metal Active Gas*).

Os processos de soldagem à arco são caracterizados por serem sistemas não-lineares, variantes no tempo, inerentemente multivariáveis, com forte acoplamento dos parâmetros de soldagem e por possuírem incertezas à cada variação das condições de soldagem, (Paul, 2016) e (Bingul and Cook, 2006). Além disso,

são complexos e ainda não foram completamente descritos matematicamente (Bingul and Cook, 2006). Esses processos podem ser controlados por mais de uma variável, portanto nesse trabalho são desenvolvidos modelos matemáticos para controlar a corrente de soldagem e a tensão de arco durante a formação da gota e transferência de massa do eletrodo à poça de fusão.

2 Revisão do Estado da Arte das Técnicas de Controle Aplicadas aos Processos de Soldagem à Arco

No trabalho de (AbdelRahman, 1998) foi implementada uma estratégia de controle para atuar no calor e transferência metálica do processo à poça de fusão. Nesse trabalho foram utilizados a corrente de arco e o comprimento do arame como entrada para a lei de controle. As variáveis controladas foram velocidade do alimentador de arame, tensão da fonte da máquina de solda (tensão de circuito aberto) e distância entre o bico da tocha e a peça de trabalho. Foi imposto um ponto de operação para o processo e a técnica de controle utilizada para testar o rastreamento do ponto de operação foram 2 controles PI (Proporcional-Integral).

Em relação ao controle da geometria do cordão de solda formado, o controle projetado por (Schiano et al., 1991) visa dimensionar adequadamente a largura e profundidade do cordão de solda. Esse trabalho utiliza um modelo matemático MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) e a técnica de controle

utilizada é controle linear quadrático ótimo. Já em (Henderson, 1990) é projetado um PI para controlar a largura do cordão de solda formado. Nesse trabalho foi mostrado que o ajuste dos ganhos do controlador de maneira *off-line* não é recomendado, pois há uma larga faixa de mudanças no ponto de operação durante o processo de soldagem. Então, como alternativa, foi descrito o ajuste dos ganhos do controlador de modo *on-line*, ou seja, durante o processo de soldagem, através do uso de algoritmos adaptativos para manter o processo estável.

Ainda buscando ajustar os ganhos de um controlador clássico durante o processo, os trabalhos de (Junhor et al., 2005) e (Ding et al., 2010) utilizam técnicas *Fuzzy* para sintonização dos ganhos do controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo). No trabalho (Junhor et al., 2005), dada como referência a corrente do arco de soldagem, o controlador atua na velocidade de alimentação do arame para manter o processo estável. Já em (Ding et al., 2010), a técnica de controle detecta o comprimento de arame que há no bico da tocha para atuar no comprimento do arco, pois essa quantidade de arame influencia diretamente na tensão de curto-circuito gerada entre o bico da tocha e a peça.

Diferentemente dos trabalhos anteriores, em (Bera, Bandyopadhyay and Paul, 2013a) foi proposto a utilização de um Controle por Modos Deslizantes (SMC - *Slide Modes Control*) Integral para auxiliar outro controlador nominal. Os controladores nominais propostos foram o PI e o controle não-linear por realimentação, utilizados separadamente, com a finalidade de controlar a corrente e tensão do arco. Já a técnica de controle auxiliar, SMC, foi proposta para rejeitar distúrbios externos e incertezas paramétricas do modelo matemático desenvolvido. Na comparação via simulação dos controles nominais auxiliados pelo SMC Integral, foi mostrado que o controle não-linear por realimentação manteve o rastreamento tanto da tensão do arco quanto da corrente do arco mais próximas e estáveis às referências dadas.

No cenário de controles adaptativos, o SMC está bem conceituado na atuação de controle das variáveis do processo de soldagem, pois consegue suprir eficientemente as incertezas paramétricas do modelo matemático linearizado e dinâmicas não modeladas do processo de soldagem. Em (Khatamianfar et al., 2008) essa técnica de controle é utilizada para controlar o comprimento do arco. Já em (Bera, Bandyopadhyay and Paul, 2013b) é proposto um SMC de ordem superior com algoritmo *Super-Twisting* para controlar corrente e comprimento do arco, usando a tensão da fonte e velocidade de alimentação do arame. Os resultados de simulação mostraram a excelência do algoritmo *Super-Twisting* SMC, nas palavras do autor uma técnica de controle com propriedades de robustez extrema. Em outra abordagem com SMC, no tempo discreto, para controlar corrente e tensão do arco, (Bera, Priya, Bandyopadhyay and Paul, 2013) foi utilizado o conceito de realimentação de múltiplas saídas via medição de saídas infrequentes, onde simulações com-

provaram a efetividade e robustez do algoritmo de controle.

3 Modelagem da Dinâmica da Formação da Gota na Ponta do Eletrodo

A união dos metais no processo de soldagem à arco é dada pela transferência de calor e massa. Esses fenômenos periódicos ocorrem por fases de arco e curto-circuito, respectivamente. Os trabalhos utilizados como base para modelagem foram (Ozcelik and Moore, 2003), (Planckaert et al., 2010) e (Bera, Bandyopadhyay and Paul, 2013a). A Figura 1 representa a formação da gota na ponta do eletrodo durante a fase de arco.

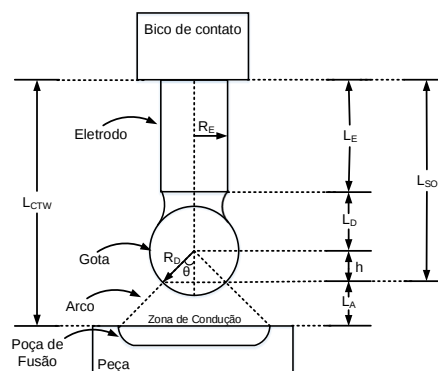


Figura 1: Diagrama da fase de arco

Durante a fase de arco o eletrodo é alimentado continuamente e derretido para formar a gota na ponta do eletrodo. O comprimento de eletrodo em estado sólido no bico de contato L_E é proporcional a velocidade de alimentação do arame V . Em um processo ideal a velocidade de alimentação do arame é igual a taxa de fusão dos metais, assim não haveria eletrodo excedente em estado sólido fora do bico de contato. As forças que atuam sobre a gota formada não são equilibradas, com isso uma distância entre o extremo do eletrodo em estado sólido e o centro da gota é definido L_D . Além disso, também é definido uma distância h equivalente ao comprimento do raio da gota R_D diretamente afetado pelo ângulo de condução de corrente no eletrodo θ , ou seja, $h = R_D \cos(\theta)$. O comprimento do *stick-out* L_{SO} é o somatório dos comprimentos do eletrodo em estado sólido L_E , da fração de raio da gota definido pelo ângulo de condução θ e a distância entre o extremo do eletrodo em estado sólido e o centro da gota L_D . Também é definida a distância entre o bico de contato e a peça de trabalho L_{CTW} e o tamanho do arco L_A que conduz o calor. O raio da gota é dado por:

$$R_D = \left(\frac{3m_d}{4\pi\sigma_e} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

onde:

m_d Massa da gota [kg]
 σ_e Densidade do eletrodo [kg/m^3]

As forças que atuam na gota, quando a transferência de massa é realizada de modo globular, são a força gravitacional F_G , a força eletromagnética F_{EM} , a força de tensão superficial F_γ , a força aerodinâmica F_A e a força dos jatos de vapor F_V . As equações a seguir expõem a influência de cada força. A força da gravidade é apresentada em (2), onde a aceleração da gravidade g é influenciada pela inclinação da posição de soldagem Θ em relação à vertical:

$$F_G = m_d g \cos(\Theta) \quad (2)$$

A força eletromagnética F_{EM} é calculada pela lei de Lorentz, pois essa força depende do sentido do fluxo de corrente de soldagem que passa pela gota formada na ponta do eletrodo. Assumindo que a densidade de corrente na gota é uniforme, tem-se:

$$F_{EM} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} f_z \quad (3)$$

onde:

μ_0	Constante de permeabilidade magnética do material	$[NA^2]$
I	Corrente de soldagem	$[A]$

Segundo (Planckaert et al., 2010), o parâmetro f_z é dado por (4), sendo R_E o raio do eletrodo:

$$f_z = \ln\left(\frac{R_D \sin(\theta)}{R_E}\right) - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos(\theta)} + \frac{2}{(1 - \cos(\theta))^2} \ln\left(\frac{2}{1 + \cos(\theta)}\right) \quad (4)$$

A tensão superficial é uma propriedade de todos os líquidos e age entre as fases do líquido, no caso da gota, entre a fase sólida do eletrodo e a fase líquida da formação da gota. Essa força pode ser calculada pela lei de Tate, que relaciona diretamente o peso máximo da gota, o raio do eletrodo e o módulo de tensão superficial γ , conforme (5):

$$F_\gamma = 2\pi R_E \gamma \quad (5)$$

A força aerodinâmica da atmosfera F_A , atuante ao redor e internamente ao arco, é a força que induz a aerodinâmica da gota e contribui para seu destacamento da ponta do eletrodo. Essa força é dada por:

$$F_A = 0,5\pi\sigma_g V_G^2 R_D^2 C_A \quad (6)$$

onde:

C_A	Coeficiente de resistência de arrasto	-
V_G	Velocidade do gás	$[m/s]$
σ_g	Densidade do gás	$[kg/m^3]$

A força dos jatos de vapor é proveniente da aceleração térmica das partículas de vapor dentro do arco de solda e se opõem ao destacamento da gota. O vapor é gerado em torno do arco devido a corrente com valores elevados. Então, considerando que a temperatura na superfície de soldagem é uniforme, essa força é dada por:

$$F_V = \frac{m_v}{\sigma_v} I J \quad (7)$$

onde:

J	Densidade de corrente	$[A/m^2]$
m_v	Massa vaporizada	$[kg]$
σ_v	Densidade do vapor	$[kg/m^3]$

A relação da aceleração da gota A_D e as forças atuantes na gota são relacionadas pela segunda Lei de Newton, obtendo-se:

$$A_D = \frac{1}{m_d} (F_G + F_{EM} + F_A - F_\gamma - F_V) \quad (8)$$

O circuito elétrico equivalente à fase de arco é mostrado na Figura 2.

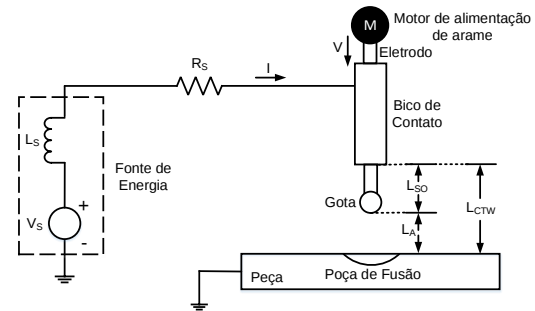


Figura 2: Circuito elétrico equivalente à fase de arco

onde:

L_S	Indutância dos circuitos do sistema de soldagem	$[H]$
R_S	Resistência dos condutores elétricos	$[\Omega]$
V	Velocidade de alimentação do arame	$[m/s]$
V_S	Tensão de soldagem	$[V]$

Aplicando-se a lei de Kirchhoff no circuito mostrado na Figura 2, obtêm-se:

$$L_S \frac{dI}{dt} + (R_A + R_{SO} + R_S)I + V_A = V_S \quad (9)$$

onde V_A , V_S e L_S são a tensão do arco, tensão da fonte e indutância da fonte, respectivamente. Também foi adicionado à resistência dos condutores elétricos R_S , a resistência do arco R_A e a resistência do comprimento de stick-out R_{SO} . Sendo R_{SO} dado por:

$$R_{SO} = \rho_e \left[L_{SO} + \frac{1}{2}(R_D + L_D) \right] \quad (10)$$

onde:

ρ_e	Resistividade do eletrodo	$[\Omega/m]$
----------	---------------------------	--------------

A tensão do arco é dada por:

$$V_A = V_0 + R_A I + E_A (L_{CTW} - L_{SO}) \quad (11)$$

onde:

E_A	Fator de comprimento do arco	$[V/m]$
R_A	Resistência do arco	$[\Omega]$
V_0	Constante de tensão do arco	$[V]$

O comprimento do eletrodo em estado sólido L_E varia pela diferença entre a velocidade de alimentação do arame V e a taxa de fusão do eletrodo M_R . Assumindo que o eletrodo possui volume cilíndrico e que sua densidade é uniforme independentemente da variação de temperatura, então pode-se calcular o L_E por (12).

$$\frac{dL_E}{dt} = V - \frac{M_R}{\pi R_E^2 \sigma_e} \quad (12)$$

e como foi mostrado em (Ozelik and Moore, 2003), M_R é dado por:

$$M_R = (C_1 I + C_2 L_{SO} \rho_{so} I^2) \sigma_e \quad (13)$$

onde:

C_1	Constante relativa ao aquecimento da poça de fusão pelo arco elétrico	$[m^3/As]$
C_2	Constante relativa ao aquecimento da poça de fusão pelo efeito <i>Joule</i>	$[m^3/VAs]$
ρ_{so}	Resistividade elétrica do <i>stick-out</i>	$[\Omega/m]$

Para simplificar o comportamento da formação da gota, assume-se as seguintes hipóteses como verdadeiras (Ozelik and Moore, 2003):

- A fase de arco termina quando o comprimento de *stick-out* for igual a distância entre o bico de contato e a peça de trabalho, ou seja, $L_{SO} = L_{CTW}$
- O raio do volume inicial da gota é igual ao raio do eletrodo e volume da gota aumenta esfericamente em relação a diferença de velocidade de alimentação do arame V e a taxa de fusão do arame M_R
- A densidade do eletrodo σ_e permanece constante diante de variações de temperatura
- O ângulo de condução θ é proporcional ao comprimento de *stick-out* L_{SO}

Também foi considerado no modelo, a presença de um motor de corrente contínua na alimentação de arame, sendo τ_m , K_m e V_{ARM} a constante de tempo do motor, o ganho em regime permanente do motor e a tensão de armadura do motor, respectivamente. As variáveis de estados escolhidas para equacionar o modelo matemático da formação da gota na ponta do eletrodo na fase de arco são:

x_1	Deslocamento da gota	$[m]$
x_2	Velocidade da gota	$[m/s]$
x_3	Corrente de soldagem	$[A]$
x_4	Comprimento do eletrodo em estado sólido	$[m]$
x_5	Massa da gota	$[kg]$
x_6	Velocidade de alimentação do arame	$[m/s]$

Então:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (14)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{x_5} (F_G + F_{EM} + F_A - F_\gamma - F_V) \quad (15)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{L_S} [V_S - (R_S + R_A)x_3 - V_0 - E_A(L_{CTW} - x_4)] - \frac{1}{L_S} \left[\left(x_1 + x_4 + \left(\frac{3x_5}{4\pi\sigma_e} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \rho_{so} x_3 \right] \quad (16)$$

$$\dot{x}_4 = x_6 - \frac{1}{\pi R_E^2 \sigma_e} (C_1 x_3 + C_2 \rho_{so} x_4 x_3^2) \quad (17)$$

$$\dot{x}_5 = (C_1 x_3 + C_2 \rho_{so} x_4 x_3^2) \sigma_e \quad (18)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{\tau_m} (K_m V_{ARM} - x_6) \quad (19)$$

As variáveis de saída são a tensão do arco V_A e a corrente de soldagem I e as variáveis de controle são a tensão de armadura do motor V_{ARM} que realiza a alimentação de arame e a tensão da fonte V_S .

4 Modelagem da Dinâmica da Transferência de Massa

A transferência de massa em si, ocorre na fase de curto-circuito, a qual inicia imediatamente após o término da fase de arco, mostrada na seção anterior. A fim de simplificar a modelagem assume-se que a transferência de massa ocorre somente nesta fase e aceitando-se as hipóteses a seguir como verdadeiras (Planckaert et al., 2010).

- A área do eletrodo é igual à área de contato entre a poça de fusão e a gota em estado líquido
- O formato geométrico da gota líquida que une o eletrodo e a poça é esférico e a evolução do seu volume é proveniente do efeito *Pinch*
- A superfície da poça de fusão permanece plana ao longo do processo de soldagem
- A transferência de massa é estável

Na fase de curto-circuito o comprimento do *stick-out* é igual a distância do bico de contato e a peça de trabalho, ou seja, $L_{SO} = L_{CTW}$. Assim, os parâmetros do arco são desconsiderados e aplicando-se a lei de Kirchoff no circuito da Figura 2, obtém-se:

$$L_S \frac{dI}{dt} + (R_S + R)I = V_S \quad (20)$$

sendo que R é a resistência equivalente à soma das resistências do eletrodo em estado sólido, deslocamento da gota e do comprimento da gota que faz a ponte entre a poça de fusão e o eletrodo sólido. O comprimento dessa ponte é equivalente à $2h$.

A pressão média no centro da gota P_D é determinada pela soma da pressão gerada pelo efeito *Pinch* P_{pinch} em função do raio menor da massa transferida R_1 com a pressão gerada pela tensão superficial da

gota P_γ em função dos raios menor e maior R_2 da massa transferida (Ozelik and Moore, 2003). A Figura 3, ilustra os raios da transferência de massa. O efeito *Pinch* pode ser considerado como uma força de contração sobre o eletrodo que surge devido a formação do campo magnético gerado pelo fluxo de corrente que atravessa o eletrodo, direcionado para o centro do eletrodo através da força de *Lorentz*. As equações a seguir evidenciam essas relações.

$$P_{pinch} = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 R_1^2} \quad (21)$$

$$P_\gamma = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (22)$$

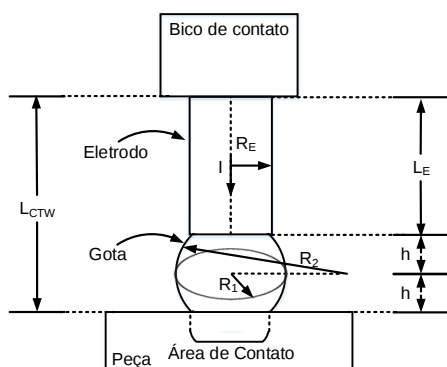


Figura 3: Raios dominantes da transferência de massa

A velocidade de transferência de massa V_M é obtida aplicando-se a equação de *Bernoulli* na equação de P_D , considerando que a velocidade do fluxo dentro da ponte e a pressão dentro da poça de fusão são desprezíveis. Assim, têm-se:

$$P_D = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 R_1^2} + \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (23)$$

$$V_M = \sqrt{\frac{2}{\sigma_e}(P_D + \sigma_e g h \cos(\varphi))} \quad (24)$$

Onde μ_0 é a constante de permeabilidade magnética do material. Como pode ser notado em (24), o ângulo da posição de soldagem φ também possui influência sobre a velocidade de transferência de massa. A velocidade do fluxo entre a gota e a poça de fusão V_F pode ser calculada pela equação de continuidade de fluídos, resultando em (25). As velocidades V_M e V_F e a atuação das forças na dinâmica da gota e da ponte são mostradas na Figura 4.

$$V_F = \frac{V_M R_1^2}{R_E^2} \quad (25)$$

As forças que influenciam a transferência de massa são: a força gravitacional, força eletromagnética e a força gerada pela tensão superficial. A força da gravidade na fase de curto-circuito age equivalentemente a ação na fase de arco, conforme mostrado

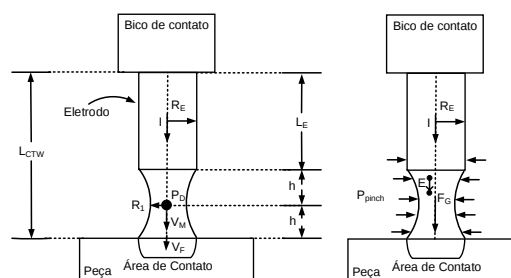


Figura 4: Forças e velocidades associadas à transferência de massa

em (2). Já a força eletromagnética, proveniente da lei de Lorentz, é proporcional à condutividade do eletrodo κ_e . A equação a seguir ilustra essa relação.

$$\vec{F}_{EM} = \kappa_e \vec{E} \times \vec{B} \quad (26)$$

O campo elétrico $\vec{E}$ tem origem na diferença de potencial entre as partículas internas à gota enquanto a corrente de soldagem a percorre. Para simplificar a modelagem da transferência de massa considera-se que a diferença de potencial entre essas partículas é desprezível, assim o campo elétrico formado é tão pequeno que a força eletromagnética tende a ser nula durante os curto-circuitos. Sendo assim, a força responsável pela transferência de massa F_M é a força resultante da pressão exercida sobre a gota P_D em relação à área de contato πR_F^2 e a força da gravidade. Ou seja:

$$F_M = P_D \pi R_F^2 + F_G \quad (27)$$

As variáveis de estado utilizadas para equacionar o modelo matemático da transferência de massa são as mesmas variáveis utilizadas na fase de formação da gota. Bem como as variáveis de saída e de controle. Portanto, o modelo resultante é mostrado à seguir:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (28)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{x_5} (F_G - F_\gamma) \quad (29)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{L_S} [V_S - R_S x_3 - (x_1 + x_4)] + \frac{1}{L_S} \left(\frac{3x_5}{4\pi\sigma_e} \right)^{\frac{1}{3}} \rho_{so} x_3 \quad (30)$$

$$\dot{x}_4 = x_6 - \frac{C_2 \rho_{so} x_4 x_3^2}{\pi R_E^2 \sigma_e} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 &= (C_2 p_{so} x_4 x_3^2) \sigma_e - \\ &\left[\pi R_1^2 \sqrt{\frac{2}{\sigma_e} (P_D + \sigma_e g h \cos(\varphi))} \right] \sigma_e \end{aligned} \quad (32)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{\tau_m}(K_m V_{ARM} - x_6) \quad (33)$$

Assim, têm-se dois modelos matemáticos que são alternados entre as fases do processo de soldagem. Ressaltando que a formação da gota ocorre durante a fase de arco, ou seja, enquanto o comprimento de *stick-out* for menor que a distância da peça de contato e a peça de trabalho. A partir do momento em que esses comprimentos se igualam, ou seja, a distância entre a gota e a poça de fusão é nula, inicia-se a fase de curto-circuito e se mantém nessa fase enquanto o raio menor do volume de massa transferida for maior do que zero.

5 Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre as técnicas de controle aplicadas aos parâmetros que podem ser ajustados durante o processo de soldagem à arco e desenvolvidos dois modelos matemáticos de sexta ordem para representar a transferência metálica durante a soldagem. Um modelo representa a dinâmica da formação da gota na ponta do eletrodo em estado sólido e outro representa a dinâmica da transferência de massa, sendo a tensão do arco e a corrente de soldagem as variáveis de saída e velocidade de alimentação do arame e a tensão da fonte as variáveis de controle.

A proposta para um trabalho futuro é desenvolver uma técnica de controle robusto adaptativo por modelo de referência (RMRAC - *Reference Model Robust Adaptive Control*) (Ioannou and Sun, 2012), pois esta técnica possui robustez para tolerar possíveis variações paramétricas e dinâmicas não modeladas presentes no modelo e ajustar os ganhos do controlador *on-line*, ou seja, durante a operação de soldagem, além disso, o controle pode ser aplicado em situações onde haverá mudanças de pontos de operações durante o processo de soldagem. Por fim, a continuidade desse trabalho será uma contribuição para o cenário de controle de processos de soldagem, pois não foram encontrados registros na literatura da implementação desta técnica de controle nesses processos.

Referências

- AbdelRahman, M. (1998). Feedback linearization control of current and arc length in gmaw systems, *American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998*, Vol. 3, IEEE, pp. 1757–1761.
- Bera, M. K., Bandyopadhyay, B. and Paul, A. K. (2013a). Integral sliding mode control for gmaw systems, *Dynamics and Control of Process Systems*, Vol. 10, pp. 337–342.
- Bera, M. K., Bandyopadhyay, B. and Paul, A. K. (2013b). Robust nonlinear control of gmaw systems-a higher order sliding mode approach, *Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 175–180.
- Bera, M. K., Priya, P. L., Bandyopadhyay, B. and Paul, A. K. (2013). Discrete-time sliding mode control of gmaw systems using infrequent output measurements, *Control Conference (ECC), 2013 European*, IEEE, pp. 3736–3741.
- Bingul, Z. and Cook, G. E. (2006). A real-time prediction model of electrode extension for gmaw, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* **11**(1): 47–54.
- Ding, F., Jiankang, H., Yu, S. and Lihui, L. (2010). Fuzzy pid control of wire extension in pulsed mig welding for aluminum alloy, *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2010 Seventh International Conference on*, Vol. 2, IEEE, pp. 686–690.
- Henderson, D. E. (1990). Adaptive control of an arc welding process, *Technical report*, DTIC Document.
- Ioannou, P. A. and Sun, J. (2012). *Robust adaptive control*, Courier Corporation.
- Jalili-Kharaajoo, M., Gholampour, V., Ebrahimirad, H. and Ashari, A. E. (2003). Robust nonlinear control of current and arc length in gmaw systems, *Control Applications, 2003. CCA 2003. Proceedings of 2003 IEEE Conference on*, Vol. 2, IEEE, pp. 1313–1316.
- Junhor, P. V., Da Silva, D. M. B., Barreto, M. V. S. and Pereira, A. C. (2005). Control of machine of welding mig using controller fuzzy, *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 1845–1849.
- Khatamianfar, A., Fateh, M. M. and Farahani, S. S. (2008). On sliding mode control of the manual gas metal arc welding process, *Systems, Man and Cybernetics, 2008. SMC 2008. IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 3570–3575.
- Ozcelik, S. and Moore, K. (2003). *Modeling, sensing and control of gas metal arc welding*, Elsevier.
- Paul, A. (2016). Robust product design using sosm for control of shielded metal arc welding (smaw) process.
- Planckaert, J.-P., Djermoune, E.-H., Brie, D., Briand, F. and Richard, F. (2010). Modeling of mig/mag welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies, *Applied Mathematical Modelling* **34**(4): 1004–1020.
- Schiano, J., Ross, J. and Weber, R. (1991). Modeling and control of puddle geometry in gas metal-arc welding, *American Control Conference, 1991*, IEEE, pp. 1044–1050.