

**Avaliação dos Efeitos Decorrentes do Aumento da Extensão Sólida de Arame-Eletrodo (Stick out) – Processo MIG/MAG Convencional com Transferência por Vôo Livre****(Assessment of Effects Due to Solid Wire Electrode Extension (Stick Out) Increase – Conventional MIG/MAG Process with Free Flight Transfer)**

Luiz Eduardo dos Santos Paes<sup>1</sup>, Rafael Costa Barbosa<sup>1</sup>, Francisco Sartori<sup>1</sup>, Jair Carlos Dutra<sup>1</sup>, Régis Henrique Gonçalves e Silva.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Soldagem, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, lepaes16@gmail.com.

**Resumo**

*Um dos fenômenos mais frequentes no processo de soldagem MIG/MAG convencional (fonte de energia tipo tensão constante) relaciona-se com a variação da corrente em função do aumento da extensão sólida de arame-eletrodo (stick out). Tal fato torna-se relevante diante de procedimentos de soldagem semi-automatizados, situação na qual o operador é responsável por conduzir a tocha. Inevitavelmente, a Distância Bico de Contato-Peça (DBCP), e por consequência o comprimento de stick out, oscilam devido a dificuldades encontradas como geometrias complexas e soldagem fora de posição. As características do processo se alteram e podem levar a mudanças significativas no cordão de solda. O presente trabalho investiga efeitos como a queda de corrente, a modificação das parcelas de contribuição para a fusão do arame-eletrodo, seu perfil de temperatura, a diferença de potencial, o aumento de resistência elétrica, e por fim, a geometria do cordão. Os resultados apontaram uma relação linear para a queda de corrente na faixa correspondente à de maior utilização de stick out, apesar da curva não poder ser aproximada de uma reta para outros domínios. Também foi constatado matematicamente um maior grau de pré-aquecimento no arame-eletrodo. A equação diferencial do balanço energético foi resolvida considerando-se a variação das propriedades físicas, e sua solução forneceu o perfil de temperatura referente a cada condição. Tanto a diferença de potencial no arame-eletrodo quanto sua resistência elétrica foram quantificadas e apresentaram tendência linear. Os cordões relativos aos ensaios indicaram uma redução significativa na penetração, fato que evidencia a importância deste estudo para a prevenção de possíveis defeitos.*

**Palavras Chave:** GMAW; Soldagem semi-automática; Queda de corrente; Modelagem matemática.

**Abstract:** *In conventional MIG/MAG welding process (voltage power source), one of the most frequent issues is related to current variation due to solid wire electrode extension (stick out) increase. This fact becomes relevant in semi-automatic welding procedures, where the welding operator is responsible for holding the torch. Inevitably, the Contact Tube-to-Workpiece Distance (CTWD), and as a result, the stick out length, oscillate due to difficulties, such as complex geometry and out-of-position welding. The process characteristics alter, and therefore can lead to significant changes in the welding bead. The present work investigates the effects such as current drop, change on the power distribution for electrode fusion, its temperature profile, the voltage drop, the electrical resistance increase, and finally, the bead geometry. The results pointed a linear relation for the current drop in the most usual stick out band, although the curve can not be approximated to a straight line on other domains. The mathematical model showed a greater degree of pre-heating. The energy balance differential equation was solved considering the variation of physical properties, and its solution provided the temperature profile in each condition. The voltage drop in the electrode, as well as the electrical resistance were quantified and presented a linear trend. The beads resulted from experiments indicated a reduction on penetration, which highlights the importance of this study for the prevention of possible defects.*

**Key-Words:** GMAW; Semi-automatic welding; Current drop; Mathematical modelling.

**1. Introdução**

A crescente demanda por processos de soldagem mais produtivos tem incentivado o desenvolvimento de sistemas mecanizados, e até mesmo automáticos. No entanto, uma significativa parcela das aplicações industriais no setor ainda faz uso do operador para a execução dos procedimentos. Além de todos os problemas relacionados à saúde e à produtividade, a qualidade do produto final muitas vezes é prejudicada.

Um exemplo disso relaciona-se com a soldagem MIG/MAG convencional semi-automática. As inevitáveis variações da Distância Bico de Contato-Peça (DBCP), advindas da dificuldade de acesso em geometrias complexas e soldagem fora de posição, acarretam alterações no processo e na solda. Em determinadas situações, tal fato é plenamente aceitável. Em alguns sensores de segmento de junta, não só é aceitável, mas também necessária [1]. Porém, em aplicações de responsabilidade, as avaliações são mais rigorosas e os defeitos oriundos destas alterações são decisivos na etapa de qualificação.

O afastamento da tocha de soldagem induz à variação da DBCP e da distância entre o bico de contato elétrico e a extremidade do arame eletrodo, conhecida por *stick out*. Por sua vez, a mudança no valor do *stick out*, leva à alteração da resistência elétrica do circuito de soldagem. O presente trabalho investiga os principais efeitos decorrentes deste fato considerando a transferência em vô livre (spray), e relaciona aspectos teóricos relativos à física do arco voltaico, aos resultados experimentais.

### 1.1. Efeitos resultantes do aumento da extensão sólida de arame-eletrodo (*stick out*)

Existem diversas consequências resultantes do aumento do *stick out*. Contudo, apenas algumas destas são relevantes aos aspectos práticos da soldagem. A seguir são descritos os principais efeitos.

#### 1.1.1. Queda de corrente

Em fontes de soldagem com característica estática do tipo tensão constante, as variáveis reguladas são tensão de soldagem ( $U_{ref}$ ) e velocidade de alimentação de arame ( $V_a$ ). A intensidade de corrente será, então, uma consequência da junção destas duas [2]. Com o afastamento da tocha em relação à peça, e consequente aumento do comprimento energizado do arame-eletrodo (*stick out*), há um aumento da resistência elétrica do circuito. Este aumento influencia a condução elétrica e altera a intensidade de corrente, conforme mostrado na Figura 1 [3].

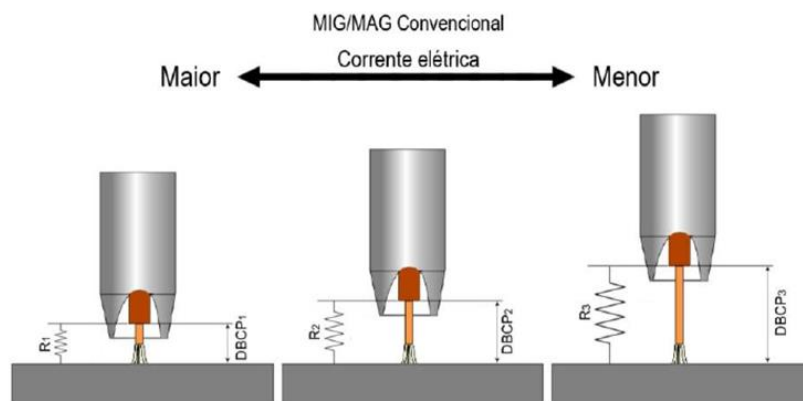


Figura 1. Corrente elétrica em função de diferentes DBCPs no processo MIG/MAG convencional [3].

Com o intuito de solucionar este problema, alguns fabricantes recentemente adicionaram aos seus equipamentos sistemas capazes de monitorar e corrigir as referidas flutuações, compensando-as automaticamente por meio da velocidade de alimentação do arame [4].

#### 1.1.2. Mudança nos percentuais relativos às parcelas de contribuição para a fusão do arame-eletrodo – efeito Joule e aquecimento anódico

A equação empírica proposta por Lesnewich (Equação 1) [5] sugere que a fusão do arame-eletrodo no processo MIG/MAG com polaridade reversa possui duas componentes predominantes: o aquecimento anódico, oriundo da energia cinética e da energia de condensação dos elétrons, e o aquecimento resistivo devido à passagem de corrente, conhecido também como efeito Joule.

$$V_a = \alpha I_m + \beta L (I_{ef})^2 \quad (1)$$

Na Equação 1,  $V_a$  corresponde à velocidade de alimentação,  $I_m$  à corrente média,  $I_{ef}$  à corrente eficaz e  $L$  ao comprimento de *stick out*. Se a transferência metálica do processo ocorrer em vô livre (spray), a corrente média torna-se numericamente igual à corrente eficaz e pode ser denominada de corrente de soldagem. As constantes  $\alpha$

e  $\beta$  estão vinculadas à composição do material do arame-eletrodo e representam as parcelas referentes ao aquecimento anódico e aquecimento por efeito Joule, respectivamente.

Analisando-se a expressão matemática acima para a mesma velocidade de alimentação, que pode ser igualada à taxa de fusão do arame-eletrodo, à medida que o comprimento de *stick out* aumenta, a distribuição das parcelas de contribuição para a fusão associadas ao aquecimento anódico e ao efeito Joule se alteram. Em se tratando de fonte de soldagem com característica estática do tipo tensão constante, apesar da queda de corrente descrita no item 1.1.1., o aumento do *stick out* conduz ao aumento da parcela relacionada ao efeito Joule, com redução da fração referente ao aquecimento anódico. Estudos coordenados por French [6] comprovam que para o processo com arame tubular, ao se aumentar a extensão de *stick out*, o pré-aquecimento por efeito Joule ocorre de forma mais intensa, podendo levar a temperatura do arame-eletrodo a uma variação de 300°C a 1000°C.

### 1.1.3. Alteração do perfil de temperatura do arame-eletrodo

O grau de pré-aquecimento para cada comprimento de *stick out* pode ser determinado teoricamente resolvendo-se a equação diferencial do balanço de energia proposta por Waszink e Van Den Heuvel [7] (Equação 2). Neste caso, a transferência de calor é determinada pelo efeito Joule e pela condução térmica. Sua solução exibe o perfil de temperatura do arame-eletrodo, após especificadas as condições de contorno, as propriedades do material e os parâmetros do processo.

$$\frac{d}{dz} \left( k(T) \frac{dT}{dz} \right) + V_a \rho \frac{d}{dz} (cp(T) T) = -j^2 r(T) \quad (2)$$

Na Equação 2,  $V_a$  corresponde à velocidade de alimentação do arame-eletrodo,  $\rho$  à massa específica,  $j$  à densidade de corrente,  $k(T)$  à condutividade térmica,  $cp(T)$  ao calor específico e  $r(T)$  à resistividade elétrica. Verifica-se que as propriedades físicas  $k(T)$ ,  $cp(T)$  e  $r(T)$  são variáveis com a temperatura. Portanto, apesar da facilidade de se resolver a equação, até mesmo de forma analítica, com os coeficientes  $k$ ,  $cp$  e  $r$  constantes, o resultado obtido não estaria adequado à condição real.

A Figura 2 apresenta esquematicamente as condições de contorno especificadas. Na ponta do arame-eletrodo, ou seja, em  $z=0$ , o material encontra-se na temperatura de fusão,  $T_f$ . Em  $z=L$ , no bico de contato elétrico, o material possui temperatura  $T_c$ .

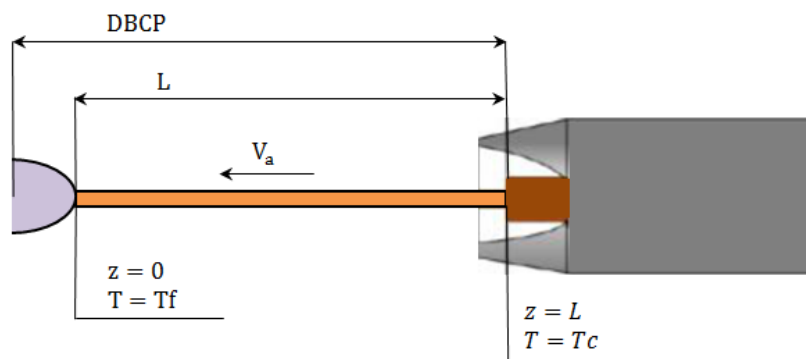


Figura 2. Condições de contorno para a equação de balanço de energia. Adaptado de [3].

O modelo acima assume as seguintes considerações:

- Não há variação de temperatura na direção perpendicular ao eixo do arame-eletrodo.
- O arame se move a uma velocidade constante.
- A distribuição de temperatura ocorre em regime estacionário, ou seja, a temperatura em um determinado ponto não varia com o tempo.
- O ponto de transição sólido-líquido permanece o mesmo e está localizado em  $z = 0$ .

### 1.1.4. Aumento da queda de tensão e da resistência no arame-eletrodo

Um maior comprimento de *stick out* induz ao aumento da impedância do circuito de soldagem, conforme mostrado na Figura 1. Experimentalmente isto é percebido com a redução da corrente elétrica. No entanto, também é possível calcular o aumento da resistência ôhmica, assim como o valor da queda de tensão. Para isso, deve-se conhecer o perfil de temperatura do arame-eletrodo, obtido aplicando-se a metodologia do item 1.1.3.,

uma vez que a resistividade elétrica não é constante. A Equação 3 e a Equação 4 correspondem à queda de tensão  $|\Delta V(z)|$  e à resistência elétrica  $R$ , respectivamente [8].

$$|\Delta V(z)| = \int_0^L \left( \frac{r(z)I}{s} \right) dz \quad (3)$$

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (4)$$

A resistividade elétrica depende da temperatura e possui um valor em cada ponto ( $z$ ) do arame-eletrodo. Portanto, pode ser expressa como uma função  $r(z)$ . A variável  $S$  diz respeito à área da seção transversal do eletrodo, e a variável  $I$ , à corrente de soldagem.

### 1.1.5. Modificação da geometria do cordão

O aumento do *stick out* influencia diretamente na geometria do cordão de solda, uma vez que reduz a intensidade da corrente. Menor corrente significa menor ação dos campos magnéticos e menor pressão sobre a poça de fusão. O mecanismo que representa as gotas impingindo sobre o metal de base com massa e velocidade determinada (*momentum*) também é alterado. A velocidade de chegada das gotas é função da corrente de soldagem [9]. Essers e Walter [10] verificaram em experimentos que com a redução da corrente, a massa da gota aumenta. Porém, tanto sua frequência de transferência quanto sua velocidade no instante do impacto decrescem. Consequentemente, também contribuem para a diminuição do nível de penetração. Resultados apresentados por Kim e Na [11] comprovam o fato descrito mediante ensaios variando-se a DBCP.

## 2. Materiais e Métodos

A metodologia utilizada para a investigação dos efeitos decorrentes do aumento do *stick out* seguiu duas abordagens. A primeira delas, que pode ser classificada como teórica, foi baseada na análise matemática da equação de Lesnewich (Equação 1) e da equação do balanço energético (Equação 2). Os resultados obtidos foram então relacionados com a segunda abordagem, a experimental.

Para o cálculo da queda de corrente, a Equação 1 foi utilizada com os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  obtidos segundo a literatura [12] para o arame de aço carbono (AWS ER70S6), de 1,2 mm de diâmetro. O estudo se concentrou na situação em que as gotas são transferidas em vôo livre (*spray*). Desta forma, a corrente média  $I_m$  torna-se numericamente igual à corrente eficaz  $I_{ef}$ , e pode ser denominada de corrente de soldagem  $I$ . Manipulando-se a Equação 1, chega-se à expressão referente à Equação 5.

$$\alpha I + \beta L(I)^2 - V_a = 0 \quad (5)$$

A equação de segundo grau acima foi resolvida para uma mesma velocidade de alimentação  $V_a = 7,7$  m/min, variando-se o comprimento de *stick out*,  $L$ , na faixa de 1 mm a 40 mm. A raiz positiva da equação representa a corrente de equilíbrio, ou seja, a corrente resultante após o aumento da resistência ôhmica do arame-eletrodo devido ao aumento de  $L$ .

A análise dos percentuais relativos às parcelas de contribuição foi realizada dividindo-se, em cada comprimento de *stick out* da faixa especificada, as componentes de contribuição relativas ao aquecimento anódico,  $\alpha I$ , e ao efeito Joule,  $\beta L(I)^2$ , pela velocidade de alimentação  $V_a$ .

Após encontrar as correntes de equilíbrio, selecionou-se os comprimentos de *stick out* de 5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm para um estudo detalhado, já que este domínio corresponde ao mais utilizado em termos práticos no processo de soldagem MIG/MAG. A Equação 2 foi utilizada para a obtenção do perfil de temperatura do arame-eletrodo, que se relaciona diretamente com a contribuição percentual do efeito Joule, e conseqüente grau de pré-aquecimento. Cabe ressaltar que os coeficientes das propriedades físicas de condutividade térmica  $k$ , calor específico  $c_p$ , e resistividade elétrica  $r$ , são dependentes da temperatura. Suas respectivas curvas foram plotadas na Figura 3, após regressão linear e obtenção das funções polinomiais, conforme os dados da literatura para aço de baixo teor de carbono [13].

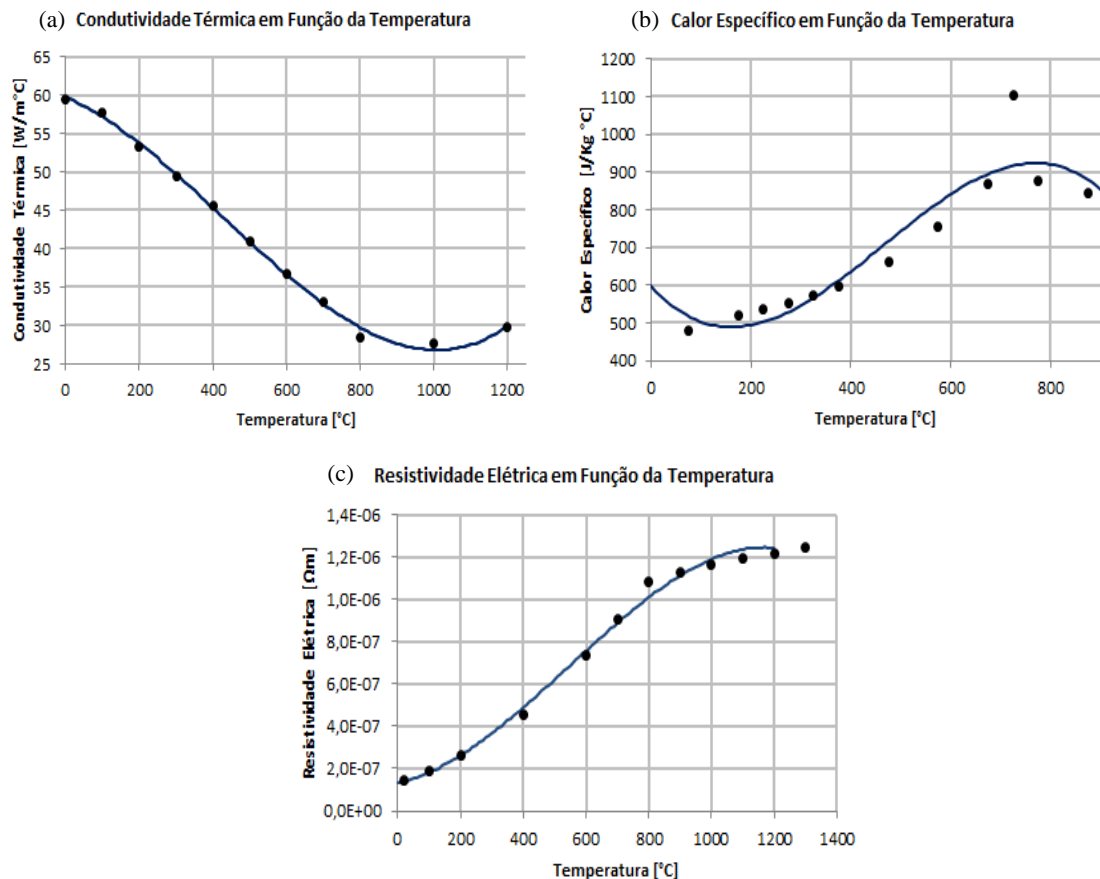


Figura 3. Curvas resultantes da regressão linear para as propriedades físicas: (a) condutividade térmica  $k(T)$ , (b) calor específico  $c_p(T)$ , (c) resistividade elétrica  $r(T)$ .

Com o intuito de se demonstrar a importância da utilização das propriedades da Figura 3, a Equação 2 foi resolvida tanto para o caso de coeficientes constantes (adotando-se os valores à temperatura ambiente) como para o caso de coeficientes variáveis, com a implementação do Método dos Elementos Finitos. As condições de contorno da Figura 2 foram especificadas como: temperatura de fusão do aço,  $T_f=1538\text{ °C}$  [13] e temperatura do bico de contato elétrico,  $T_c=77\text{ °C}$  [7].

Com o perfil de temperatura do arame-eletrodo para os quatro comprimentos de *stick out* selecionados, calculou-se a queda de tensão (Equação 3) e a resistência elétrica (Equação 4) utilizando-se a rotina de integração numérica do Método dos Trapézios.

A etapa experimental consistiu na soldagem de cordões sobre chapas para as DBCPs de 7 mm, 12 mm, 17 mm e 20 mm, com velocidade de alimentação  $V_a$ , fixa em 7,7 m/min e tensão de referência  $U_{ref}$ , de 26,0 V. Variando-se a DBCP, o comprimento de *stick out* também é variado. Desta forma, é possível verificar as tendências da curva de queda de corrente e geometria do cordão para a faixa de comprimento de *stick out* em questão. A fonte de soldagem empregada foi a “IMC MTE Digitec 800”, com 16 kVA de potência e capacidade de corrente de até 800 A. Em todas as soldagens foi utilizada uma tocha MIG/MAG comercial refrigerada a água com capacidade nominal de 450 A, posicionada perpendicularmente à superfície da peça. Os ensaios foram realizados com o arame-eletrodo de aço carbono (AWS ER70S6), de 1,2 mm de diâmetro. A mistura de proteção gasosa se constituiu em Ar-2%  $O_2$  com vazão de 17 l/min, medidos na ponta da tocha com um fluxímetro. As soldagens foram executadas em chapas de aço carbono comum com dimensões 250 mm x 100 mm x 6,5 mm. A movimentação da tocha de soldagem foi efetuada com um robô de seis eixos e velocidade de 900 mm/min em todos os casos. Os sinais de corrente e tensão foram medidos com o sistema de aquisição de sinais “IMC SAP 4.0”. Este sistema permite monitorar os sinais de corrente, tensão e velocidade de alimentação com frequência de 5kHz, além de calcular os seus valores médios. Os corpos de prova foram cortados transversalmente para a análise da macrografia e em seguida foram atacados quimicamente para revelar a área fundida utilizando Nital 5%. Após ataque, as amostras foram fotografadas, e as dimensões do cordão foram medidas utilizando um software de análise de imagens.

### 3. Resultados e Discussão

O primeiro dos efeitos avaliados diz respeito à queda de corrente. Resolvendo-se a equação 5, foi possível prever a curva de decaimento com o crescimento no valor relativo ao comprimento do *stick out*. Para a faixa de 1 mm a 40 mm, a corrente se reduziu de forma não linear, conforme mostrado na Figura 4.

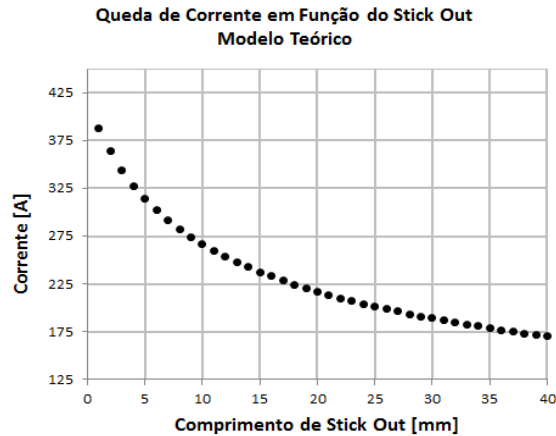


Figura 4. Curva teórica de corrente em função do comprimento de *stick out*.

As parcelas de contribuição para a fusão do eletrodo também se alteraram. Tal fato pode ser constatado a partir da análise da Figura 5. Devido ao aumento da resistência elétrica ao se incrementar o comprimento de *stick out*, a parcela relativa ao efeito Joule aumenta, enquanto a referente ao aquecimento anódico, diminui. O crescimento do efeito Joule representa um maior pré-aquecimento do arame-eletrodo. Embora a corrente de soldagem tenha atingido intensidades menores, grandes comprimentos de *stick out* contribuem para o aumento da resistência elétrica, que por sua vez, favorece a dissipação de potência. Após o valor de *stick out* de 22 mm, o efeito Joule torna-se mais relevante que o aquecimento anódico para a fusão do arame-eletrodo.

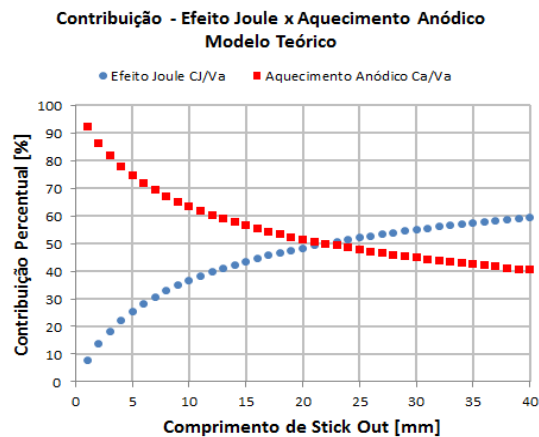


Figura 5. Curva dos percentuais relativos à contribuição por efeito Joule e aquecimento anódico em função do comprimento de *stick out*.

O domínio das curvas da Figura 4 e da Figura 5, correspondente à faixa de 1 mm a 40 mm, não evidencia a situação de ordem prática na soldagem. Usualmente, os valores de *stick out* variam de 5 mm a 20 mm. Uma análise mais detalhada foi realizada com os valores da Tabela 1, resultantes da solução da Equação 5.

Tabela 1. Valores das correntes de soldagem teóricas correspondentes aos comprimentos de *stick out* estudados.

| Stick Out [mm] | Corrente[A] |
|----------------|-------------|
| 5              | 314         |
| 10             | 267         |
| 15             | 238         |
| 20             | 217         |

As parcela de contribuição percentual dos quatro comprimentos de *stick out* apresentados acima pode ser verificada na Figura 6.

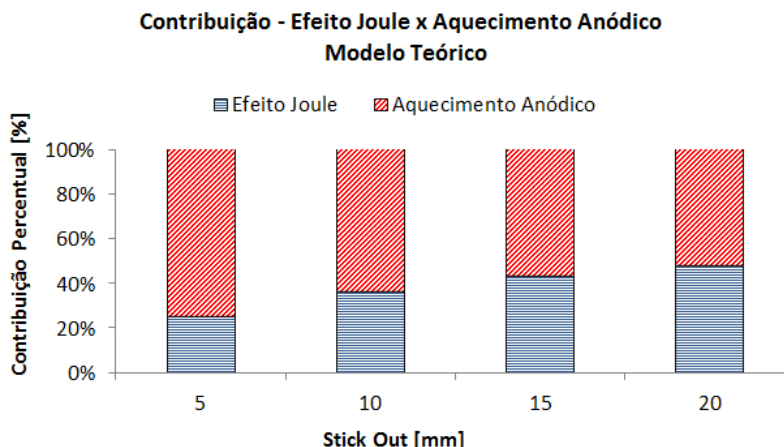


Figura 6. Parcelas de contribuição percentual para os comprimentos de *stick out* de 5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm.

Em decorrência do maior pré-aquecimento do arame-eletrodo ao se aumentar o comprimento de *stick out*, a distribuição de temperaturas é alterada. A solução da Equação 2 para as condições de contorno especificadas exibe este perfil. No entanto, reitera-se o fato das propriedades físicas serem dependentes da temperatura, e não coeficientes constantes. A Figura 7 (a) exibe o perfil de temperatura considerando-se os coeficientes de condutividade térmica  $k$ , calor específico  $c_p$  e resistividade elétrica  $r$  constantes, enquanto a Figura 7 (b) exibe o perfil de temperaturas considerando-se respectivos coeficientes variáveis.

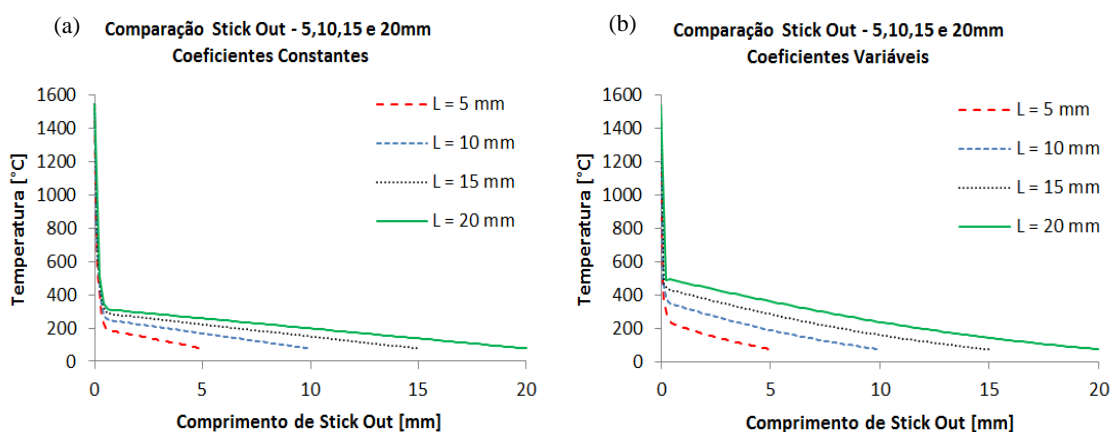


Figura 7. Perfil de temperatura no arame eletrodo para os comprimentos de *stick out* de 5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm. (a) Coeficientes constantes. (b) Coeficientes variáveis.

Conforme previsto, o maior grau de pré-aquecimento devido à contribuição mais significativa do efeito Joule em elevados comprimentos de *stick out* induziu ao aumento da intensidade da temperatura tanto para o caso de coeficientes constantes quanto para o caso de coeficientes variáveis. Os gráficos acima expõem duas regiões: a maior delas se inicia no bico de contato e se caracteriza principalmente pelo aquecimento por efeito Joule. A

segunda, localizada na extremidade do arame-eletrodo, corresponde ao aquecimento anódico e proporciona uma elevação acentuada da temperatura devido ao calor fornecido pelo arco. Verifica-se também que, para o mesmo *stick out*, o valor absoluto atingido foi superior quando se utilizou os coeficientes variáveis. Além disso, a curva da Figura 7 (b) apresentou um padrão menos linear, se comparada com a da Figura 7 (a).

A queda de tensão e a resistência elétrica para os valores da Tabela 1 foram quantificadas mediante a resolução da Equação 3 e da Equação 4, considerando-se a resistividade dependente da temperatura e, portanto, variável ao longo do comprimento de *stick out*. A Figura 8 (a) apresenta o resultado obtido para a queda de tensão, e a Figura 8 (b), o resultado para a resistência. Consta-se que a relação entre a queda de tensão e *stick out*, assim como a relação entre resistência elétrica e *stick out*, para a faixa especificada, ocorre de forma linear, apesar da resistividade elétrica ser dependente da temperatura conforme uma equação polinomial de terceiro grau ( Figura 3 (c) ).

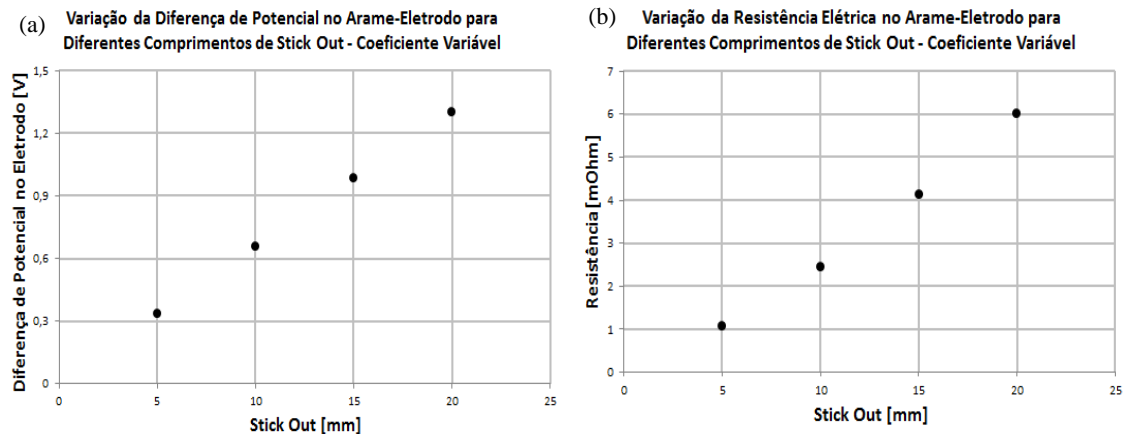


Figura 8. (a) Diferença de potencial em função do *stick out*. (b) Resistência elétrica em função do *stick out*. Faixa correspondente a 5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm.

A etapa experimental do trabalho teve como foco a obtenção da curva de queda de corrente e dos cordões de solda para diferentes DBCPs, e conseqüentemente, diferentes comprimentos de *stick out*. Foram escolhidos quatro valores de DBCPs, correspondentes à faixa de maior utilização em soldagem. Analisando-se a Figura 9, verifica-se que a queda de corrente pode ser aproximada de uma reta. A corrente variou de 343 A, com 7 mm de DBCP, a 252 A, com 20 mm. Isto representa uma queda de 7,0 A/mm. Na curva teórica, plotada na Figura 4, a corrente oscilou de 292 A, com 7 mm de *stick out*, a 217 A, com 20 mm. Neste domínio, o comportamento também pode ser considerado próximo ao linear. A queda de corrente verificada foi de 5,8 A/mm. Portanto, apesar dos valores de corrente absolutos não serem os mesmos em virtude do comprimento relativo à DBCP não ser igual ao comprimento de *stick out*, a redução de corrente para a faixa de estudo foi similar.

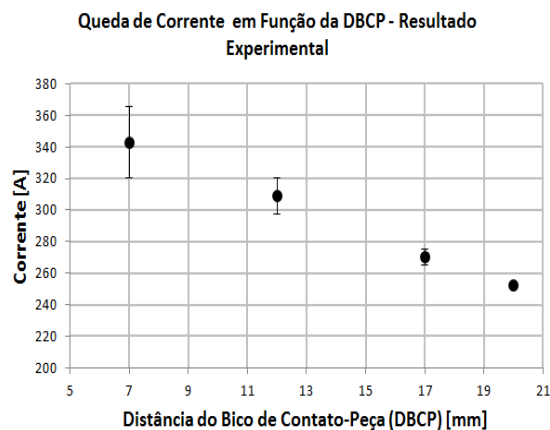


Figura 9. Curva experimental de corrente em função da DBCP.

Os cordões de solda resultantes foram avaliados para as respectivas DBCPs. Os valores referentes à corrente elétrica, profundidade, largura, área total fundida e diluição, encontram-se disponíveis na Tabela 2.



Tabela 2. Valores de corrente e dimensões do cordão obtidos no procedimento experimental para as DBCPs estudadas.

| DBCP [mm] | Corrente[A] | Profundidade [mm] | Largura [mm] | Área Fundida Total [mm <sup>2</sup> ] | Diluição [%] |
|-----------|-------------|-------------------|--------------|---------------------------------------|--------------|
| 7         | 343         | 2,74              | 8,41         | 21,18                                 | 56           |
| 12        | 309         | 2,61              | 8,91         | 19,85                                 | 53           |
| 17        | 270         | 2,37              | 8,12         | 17,86                                 | 43           |
| 20        | 252         | 1,92              | 8,38         | 17,71                                 | 41           |

Em virtude da redução da corrente com o crescimento da DBCP, os cordões atingiram menor profundidade, que variou de 2,74 mm com DBCP=7 mm, a 1,92 mm com DBCP=20 mm. A diluição oscilou de 56%, com DBCP=7 mm, a 41% com DBCP=20 mm. A explicação para isso se baseia na menor ação dos campos magnéticos e na menor pressão do arco sobre a poça de fusão. Com a intensidade de corrente reduzida, o *momentum* diminuiu e atenuou os impactos das gotas sobre o metal de base. Mesmo assim, em todos os casos observou-se o formato característico de cálice, já que na mistura de gás utilizada, o Argônio é o principal elemento constituinte. A Figura 10 exhibe as macrografias referentes a cada DBCP.

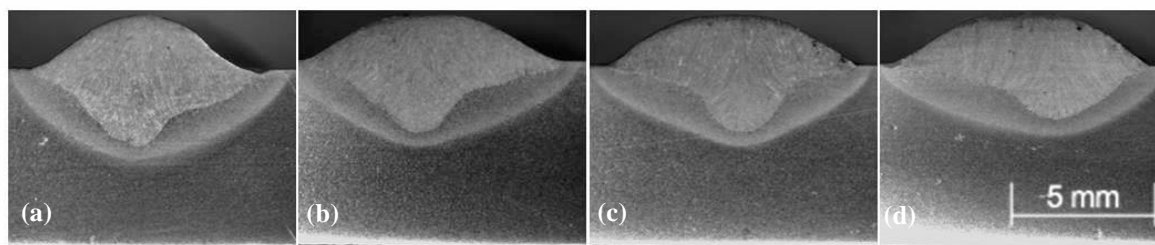


Figura 10. Seção transversal dos cordões de solda resultantes dos ensaios. (a) DBCP=7 mm, (b) DBCP=12mm, (c) DBCP=17mm, (d) DBCP=20 mm.

#### 4. Conclusões

A curva teórica de queda de corrente referente à faixa de 1 mm a 40 mm de *stick out* apresentou um padrão não linear. Porém, tanto no procedimento teórico, para a faixa de *stick out* de 7 mm a 20 mm, quanto no experimental, para a DBCP de 7 mm a 20 mm, a relação pode ser aproximadas de uma reta. Apesar dos valores absolutos de corrente não serem os mesmos, em virtude do comprimento de *stick out* não se equivaler ao da DBCP, as quedas de corrente foram similares, com valores médios de 5,8 A/mm para a curva teórica, e 7,0 A/mm, para a experimental.

Embora a corrente tenha sofrido uma queda significativa com o aumento do *stick out*, a parcela de contribuição para a fusão do arame-eletrodo relativa ao efeito Joule aumentou, devido ao aumento da resistência elétrica. Tal fato induz um maior grau de pré-aquecimento. Isto pôde ser certificado por intermédio do cálculo da equação diferencial do balanço de energia, que fornece o perfil de temperatura. Os resultados considerando-se as propriedades físicas constantes, e as propriedades físicas como funções da temperatura foram diferentes, reiterando a importância da utilização das respectivas funções em cálculos mais realísticos.

Também foram quantificadas a queda de tensão e a resistência elétrica no arame-eletrodo. Constatou-se um aumento linear com o incremento do *stick out*, apesar da resistividade elétrica se relacionar com a temperatura conforme uma equação polinomial de terceiro grau.

As macrografias indicaram uma redução expressiva na profundidade do cordão em maiores comprimentos de *stick out*. Isto está associado à redução da corrente, com consequente diminuição da ação dos campos magnéticos e da intensidade dos impactos das gotas sobre a poça de fusão.

O entendimento dos efeitos abordados neste trabalho é essencial para a melhoria dos procedimentos de fabricação. Contribui também para alertar aos operadores de soldagem de que pequenas mudanças na condução da tocha podem originar diversos problemas, e inclusive ser fonte de defeitos. Incentiva-se, portanto, o desenvolvimento de sistemas de controle capazes de se adaptar às condições impostas e corrigir os parâmetros de maior relevância.

## 5. Referências Bibliográficas

- [1] SILVA, R. H. G. Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz: 2005. 113 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [2] SILVA, R.H.G.; DUTRA, J.C.; GOHR JR, R. Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos Sistemas MIG/MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente. Soldagem e Inspeção, v.13, n.1, p.70-81, 2008.
- [3] MENDONÇA, F.K. Evolução da Técnica de Seguimento de Junta Via Sensoriamento do Arco para Operações de Soldagem em Posições Forçadas. 2013. 125 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Gradua
- [4] ROßMANN, F. Advanced Pulse Welding Characteristics. Welding and Cutting, v.14, n.1, p.12-14, 2015.
- [5] LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding Part I – Control of Electrode Melting Rate. Welding Research Supplement, p. 343-353, Aug.1958.
- [6] FRENCH, I.E. Effects of Electrode Extension on Deposit Characteristics and Metal Transfer of E70T-4 Electrodes. Welding Research Supplement, p. 167-172, June 1984.
- [7] WASZINK, J.H.; VAN DEN HEUVEL, G.J.P.M. Heat Generation and Heat Flow in the Filler Metal in GMA Welding. Welding Journal, Miami, v. 61, n. 8, p. 269-280, Aug. 1982.
- [8] WASZINK, J.H.; VAN DEN HEUVEL, G.J.P.M. Measurements and Calculations of the Resistance of the Wire Extension in Arc Welding. In: Arc Physics and Weld Pool Behaviour International Conference, 1979, Londres, Papers. Londres: The Welding Institute, 1980, v.1. p. 227-238.
- [9] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. 2ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2014, 288p.
- [10] ESSERS, W.G.; WALTER, R. Some Aspects of the Penetration Mechanisms in Metal Inert Gas (MIG) Welding. In: Arc Physics and Weld Pool Behaviour International Conference, 1979, Londres, Papers. Londres: The Welding Institute, 1980, v.1. p.289-295.
- [11] KIM, J.W.; NA, S.J. A Study on the Effect of Contact Tube-to-Workpiece Distance on Weld Pool Shape in Gas Metal Arc Welding. Welding Research Supplement, p. 141-152, May 1995.
- [12] SANTANA, I.J.; MODENESI, P.J. Modelagem Matemática do Processo de Soldagem GMAW – Transferência por Vão Livre. Soldagem e Inspeção, v.16, n.3, p. 213-222, 2011.
- [13] ASM Metals Handbook, Physical properties of carbon and low alloy steels, vol.1, 10th edn, p. 518-533, 1990.