

Aplicação de CaCO_3 e SiO_2 Como Fluxo na Soldagem MIG e Seu Efeito na Transferência por Queda Livre

Luana Araújo Batista¹ , Paulo José Modenesi¹ 

¹ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Recebido: 14 Fev., 2019

Aceito: 15 Fev., 2019

E-mails: luana-ab@eng-min.mest.ufmg.br, luana.araujob2@gmail.com (LAB), modenesi@demet.ufmg.br (PJM)

Resumo: O modo como a transferência metálica ocorre na soldagem MIG/MAG influencia diretamente na produtividade e estabilidade do processo, assim como, nos aspectos geométricos do cordão de solda. O presente trabalho avaliou o uso do carbonato de cálcio e do dióxido de silício como fluxos na soldagem A-MIG do aço inoxidável austenítico AISI 304L. Foi avaliada a influência desses fluxos em aspectos operacionais e no modo da transferência metálica por voo livre. Para isto, foram realizadas soldagens com corrente constante variando entre 160 e 250 A com proteção de Ar-2,5% CO_2 e controle do comprimento do arco por sua projeção e variação da velocidade de alimentação. Sinais elétricos de tensão e corrente foram adquiridos e analisados. Os resultados mostram uma atuação ativa dos fluxos no processo. Com o uso do carbonato de cálcio ocorreu redução da tensão do arco e da frequência de transferência metálica, atrasando a transição entre os modos globular e spray. De forma diversa, com a sílica houve o aumento da tensão do arco e alteração na transferência metálica pouco significativa. Tais efeitos resultaram também em mudanças nos aspectos geométricos do cordão de solda como na morfologia, largura e penetração.

Palavras-chave: Soldagem A-MIG; Fluxo ativo; Aspectos operacionais; Transferência metálica; Corrente de transição.

Application of CaCO_3 and SiO_2 Fluxes in MIG Welding and Their Effect on the Free-flight Metal Transfer

Abstract: The metal transfer mode in MIG/MAG welding directly influences the productivity, process stability and the weld bead shape. The present work evaluates the use of calcium carbonate and silicon dioxide as fluxes in A-MIG welding of AISI 304L austenitic stainless steel. The flux influence on operational aspects was evaluated with free flight metal transfer by free flight. Welds were carried out for currents between 160 and 250 A using Ar-2.5% CO_2 shielding and a constant current power supply. Welding voltage and current signals were acquired and analyzed. Arc length was measured with projection system and was controlled by manually varying the wire feed rate. The results show that the fluxes actively affect the process. It was observed that calcium carbonate reduces the arc voltage and metal transfer frequency, delaying the transition between globular and spray modes. On the other hand, silica increases the arc voltage and do not significantly change metal transfer. Both fluxes also caused modifications in the geometric aspects of the weld bead width penetration and profile.

Key-words: A-MIG welding; Active flux; Operational characteristics; Metal transfer; Transition current.

1. Introdução

O processo de soldagem MIG/MAG é largamente utilizado em diversos setores da economia devido a vantagens como alta taxa de deposição aliada a produção de soldas de boa qualidade. Isso é possível com a correta seleção de variáveis operacionais como tensão e corrente de soldagem, composição do gás de proteção, tipo e diâmetro do arame, entre outras, que tradicionalmente são apontadas como principais determinantes do modo como o metal líquido é transferido para a poça de fusão [1]. Esses fatores impactam diretamente na estabilidade do processo e na qualidade final do cordão de solda.

Nas últimas décadas, fabricantes de equipamentos de soldagem desenvolveram fontes de energia com controle eletrônico e algoritmos inteligentes para controle do processo. Os avanços alcançados com essas fontes na soldagem MIG/MAG incluem, entre outros, soldagem por corrente pulsada, redução de respingos da transferência de metal por curto-circuito e ajuste fino da entrada de calor [2]. No entanto, apesar da redução de



custos do fornecimento, esses desenvolvimentos ainda representam um investimento considerável. Além disso, essas fontes tendem a ser menos robustas, exigem manutenção mais especializada, além de serem mais complexas de ser operadas do que as fontes de energia eletromecânicas.

Neste contexto, o uso de fluxos ativos na soldagem MIG pode ser uma alternativa interessante para alterar as características operacionais do processo de maneira menos complexa. Além disto, essa técnica pode ser usada como uma ferramenta interessante para avaliação da resposta do processo à presença de diferentes materiais, incluindo contaminantes, na região do arco. O uso de fluxo ativo em soldagem com proteção gasosa iniciou-se na antiga União Soviética com a chamada soldagem A-TIG na década de 1960. No final do século passado, essa técnica atraiu considerável atenção, tendo sido amplamente estudada nos últimos 20 anos [3,4]. A soldagem com proteção gasosa e fluxo ativo consiste simplesmente na aplicação de uma fina camada de fluxo contendo principalmente óxidos, fluoretos e cloretos dispersos em um solvente na superfície do metal a ser soldado. No processo TIG, essa técnica (Soldagem A-TIG) proporciona um grande aumento na penetração da solda com potencial para aumentar a produtividade do processo [3,4].

Com o processo MIG/MAG o uso de fluxo ativo (Soldagem A-MIG) é mais recente e muito menos estudado. A maioria dos estudos sobre a aplicação de fluxo ativo nos processos de soldagem aborda a influência no formato do cordão de solda devido ao efeito muito forte dos fluxos na penetração na soldagem TIG (frequentemente, superior a 100%). Contudo, o incremento de penetração observado para o processo A-MIG é menos expressivo, tendendo a ser, no máximo, da ordem de 25% [5,6]. Até o momento, poucos pesquisadores investigaram o efeito da utilização de fluxos ativos nos aspectos operacionais da soldagem A-MIG. Zhang e Cao [7] estudaram o uso de fluxos na soldagem da liga de magnésio AZ61 e verificaram que, com o uso de KCl como fluxo, houve aumento da corrente de soldagem, redução do tamanho das gotas e do período de transferência em comparação à soldagem sem fluxo com condições similares. Por outro lado, com o CaCl₂ ocorreu o decréscimo da corrente e aumento do período de transferência metálica e com a utilização de TiO₂ não houveram mudanças significativas.

Ferreira et al. [8] estudou a soldagem A-MIG de um aço carbono (ABNT 1020) com transferência por curto-circuito. Ele verificou que a utilização de fluxos gera mudanças na corrente e tensão do arco, assim como, alterações na frequência da transferência por curto-circuito e na morfologia do cordão de solda. Não foram encontrados trabalhos sobre os aspectos operacionais da soldagem MIG com fluxo ativo para aços inoxidáveis, e em particular, os austeníticos que são, juntamente com ligas de titânio, os materiais mais estudados com a soldagem A-TIG. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar a influência de dois fluxos simples de um componente (carbonato de cálcio e dióxido de silício) nos aspectos operacionais e na transferência metálica por voo livre do aço inoxidável austenítico AISI 304L. Os dois compostos foram selecionados com base em resultados encontrados na literatura [8] e em resultados preliminares na soldagem A-MIG com transferência por curto-circuito do material aqui estudado.

2. Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento do trabalho foram realizados cordões sobre chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304L com 6,20 mm de espessura. Para isto, foi usado um arame AWS E308 de 1,20 mm de diâmetro e proteção gasosa de Ar-2,5%CO₂. Os parâmetros utilizados nos testes podem ser verificados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem mantidos fixos nos testes com e sem fluxo com corrente constante.

Parâmetros de soldagem	Configuração
Corrente	160, 190, 200, 215, 230, 250 A
Tipo de corrente	CC+
Gás de proteção / vazão	Ar-2%CO ₂ / 15 L/min
Velocidade de soldagem	40 cm/min
Distância do bico de contato à peça	25 mm
Comprimento do arco na região sem fluxo	6 mm
Orientação do eletrodo	Perpendicular ao plano da mesa
Eletrodo-aramé	AWS E308
Diâmetro do eletrodo	1,2 mm

Inicialmente, foram confeccionados cordões pelo processo MIG/MAG sem fluxo para parametrização do processo e, posteriormente, com a aplicação de fluxo sobre parte da chapa (A-MIG). As chapas para soldagem foram inicialmente limpas com água e sabão neutro e antes de cada soldagem também foram limpas com acetona. Para os testes com soldagem A-MIG, os corpos de prova passaram por preparação que envolvia a aplicação de uma fina camada do fluxo (CaCO_3 ou SiO_2) sobre parte de sua superfície com densidade superficial de 100 g/m^2 . Os componentes usados como fluxo tinham pureza analítica e foram moídos com o auxílio de um gral e pistilo para granulometria inferior a 200 #. A camada de fluxo foi depositada na superfície da chapa, na parte correspondente ao final do cordão de solda (Figura 1), em uma área conhecida (1000 mm^2) delimitada por uma máscara. O material foi espalhado e homogeneizado sobre essa área com auxílio de acetona.

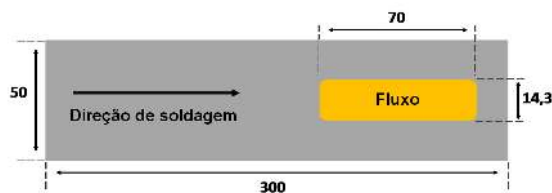


Figura 1. Desenho esquemático da superfície do corpo de prova com o fluxo (em mm).

Nas chapas com fluxo, a soldagem foi iniciada na região sem fluxo e o arco foi deslocado em direção à região com fluxo (Figura 1). Foi depositado apenas um cordão sobre cada chapa de teste e foram feitos pelo menos dois testes para cada condição estudada. Foram utilizados para a soldagem uma fonte multiprocessos transistorizada no secundário e um dispositivo mecanizado com controle de velocidade para o deslocamento da tocha. Para melhor caracterizar o efeito do fluxo nas condições operacionais, particularmente, no modo de transferência em um dado valor de corrente de soldagem, os testes foram realizados com a fonte operando em corrente constante.

Dados de tensão, corrente e velocidade de alimentação foram coletados durante todos os ensaios através do sistema digital de aquisição de dados em conjunto com o software dedicado e com taxa de aquisição de 5000 Hz. Posteriormente, os dados foram analisados pelo software específico para a avaliação de dados de soldagem. Para essa análise, descartou-se, nos oscilogramas de tensão e corrente, a sua região inicial correspondente a parte da região sem fluxo das chapas de teste em que foi feita a regulagem inicial do comprimento do arco pelo ajuste da velocidade de alimentação. Na maioria dos casos, este período inicial correspondeu a um tempo de aproximadamente 10 s. Nas amostras com fluxo, foram descartados, além do intervalo citado, 2 s antes e 2 s após a entrada do arco elétrico no fluxo. Além desses, foi também descartado para todos os testes realizados, os 3 s finais de soldagem. Para análise dos resultados, foi considerada a diferença entre o valor de um dado parâmetro medido na região correspondente à soldagem com fluxo (A-MIG) e o seu valor medido na região sem fluxo (MIG), com valores obtidos no mesmo teste de soldagem. Por exemplo, a variação de tensão (U) é dada pela Equação 1:

$$\Delta U = U_{A-MIG} - U_{MIG} \quad (1)$$

A normalidade dos dados foi verificada com o teste Shapiro-Wilk. Foi realizado teste de hipótese para avaliar a igualdade dos resultados obtidos na soldagem MIG e os resultados individuais de cada um dos fluxos. O nível de significância (α) utilizado foi de 0,05. A hipótese nula (H_0) considerada foi que a média de cada parâmetro analisado na condição MIG é igual a de cada fluxo individual. Como hipótese alternativa (H_1) foi considerado que as médias são diferentes e que o fluxo tem efeito sobre o parâmetro. Nos casos em que o valor- $p \leq \alpha$, rejeitou-se H_0 e considerou-se H_1 .

Os testes de soldagem foram realizados procurando manter-se na região sem fluxo um comprimento do arco (l_a) médio de 6 mm. Esse comprimento, como já mencionado, foi ajustado no início de cada teste variando a velocidade de alimentação do arame. Para isto, foi usado um dispositivo para a projeção ampliada do arco elétrico durante a soldagem (Figura 2). Não foram feitos ajustes adicionais na velocidade de alimentação após a entrada do arco elétrico na região com fluxo. Assim, diferenças de comprimento de arco observadas entre as regiões foram

consideradas como decorrentes do efeito do fluxo nas condições operacionais. O comprimento médio do arco foi ajustado e, em seguida, medido na região sem fluxo e medido novamente após a entrada do arco na região com fluxo e estabilização do processo.

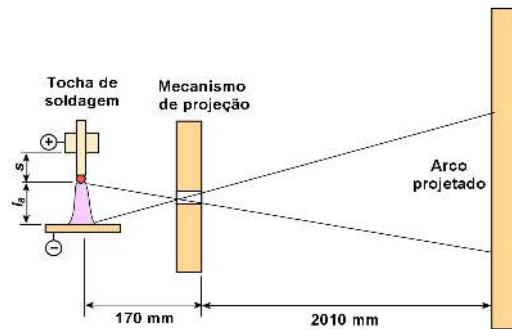


Figura 2. Desenho esquemático do mecanismo de projeção do arco elétrico. Comprimento do arco elétrico (l_a) e comprimento do eletrodo-arama (S).

Por fim, alguns dos cordões foram preparados para análise macrográfica. A preparação envolveu o corte transversal dos cordões em regiões representativas das soldagens MIG e A-MIG, o embutimento a quente das amostras com baquelite, lixamento manual e ataque com o reativo Marble. O registro das macrografias foi feito por câmera fotográfica digital e as medidas da largura e penetração dos cordões foram feitas com o software Image J.

3. Resultados e Discussão

Na Figura 3 é apresentado o oscilograma de tensão de um teste feito com CaCO_3 e corrente de 200 A. Também é possível verificar na figura a variabilidade da tensão ao longo deste teste caracterizada pelo desvio padrão da tensão para grupos de 100 medidas. Após o arco entrar na região com o fluxo, observa-se uma redução da tensão e uma maior variabilidade desta. Para o intervalo correspondente à soldagem MIG, o desvio padrão de grupos de 100 pontos foi, em média, 0,36 V, enquanto que, na região com fluxo o seu valor foi 0,65 V. Ambos os resultados são típicos de soldagem com transferência por queda livre, contudo, a diferença encontrada sugere uma menor estabilidade com a presença de CaCO_3 . Resultado similar foi observado para todas as correntes testadas, quando o CaCO_3 foi usado como fluxo.

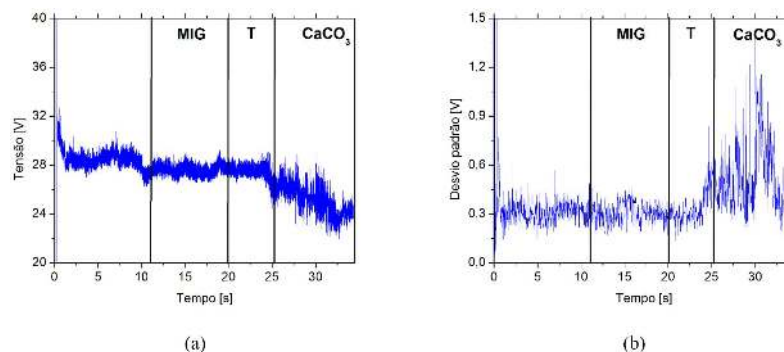


Figura 3. (a) Oscilograma de tensão obtido na soldagem com 200 A e fluxo de CaCO_3 ; (b) Desvio padrão da tensão calculado para grupos de 100 pontos ao longo do teste. As linhas verticais delimitam a região inicial de acerto do comprimento do arco, a região MIG, a de transição (T) e a com adição de fluxo.

Por outro lado, como pode ser verificado na Figura 4, com o uso da sílica ocorreu aumento da tensão de soldagem. Enquanto que a dispersão, caracterizada da mesma forma anterior, não parece ser afetada pela presença do fluxo. No teste mostrado, a média do desvio padrão durante a soldagem MIG foi de 0,24 V e, na soldagem com SiO_2 foi de 0,22 V.

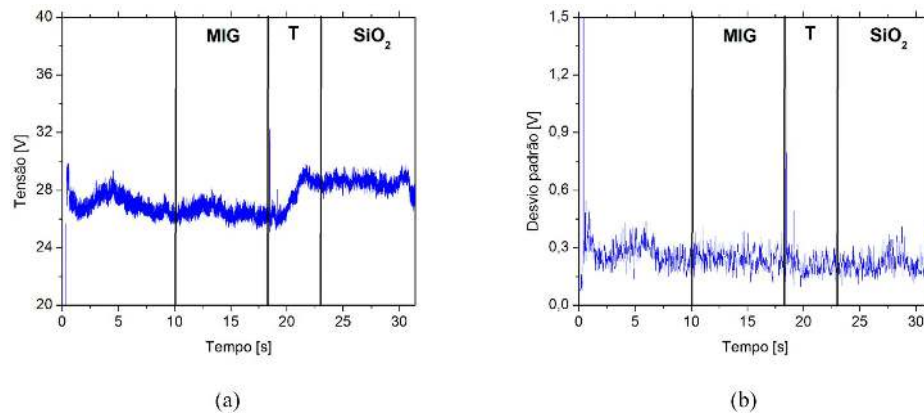


Figura 4. (a) Oscilograma de tensão obtido na soldagem com 200 A e fluxo de SiO_2 ; (b) Desvio padrão da tensão calculado para grupos de 100 pontos ao longo do teste. As linhas verticais delimitam a região inicial de acerto do comprimento do arco, a região MIG, a de transição (T) e a com adição de fluxo.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios e os desvios padrões de parâmetros elétricos do processo MIG e das condições com o uso dos fluxos. Na Tabela 3 é apresentado o resultado do teste de hipótese dos parâmetros comparando o processo MIG com os fluxos de forma individual. O teste sugere que os dois fluxos modificaram de forma significativa ($p < \alpha$) a tensão e a corrente de soldagem. Para a soldagem com CaCO_3 , o valor-p do comprimento do arco ficou bem próximo ao limite para ser considerado que o fluxo teve efeito nesse parâmetro.

Tabela 2. Parâmetros elétricos e comprimentos do arco médios dos testes realizados.

Corrente regulada (A)	Condição	Corrente (A)		Tensão (V)		Velocidade de alimentação (m/min)		Comprimento do arco (mm)	
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
160	MIG	160	1	26,8	0,6	4,6	0,1	6,0	0,0
	CaCO_3	161	1	27,0	0,8	4,4	0,1	4,7	0,9
	SiO_2	160	0	25,6	4,4	4,6	0,1	6,2	1,3
190	MIG	190	4	26,9	0,4	6,0	0,1	6,0	0,0
	CaCO_3	189	1	25,1	0,7	6,0	0,2	6,3	0,1
	SiO_2	189	0	29,7	0,5	5,9	0,1	6,3	0,0
200	MIG	199	0	27,1	0,4	6,4	0,2	6,0	0,0
	CaCO_3	199	1	24,9	0,1	6,5	0,3	5,5	0,2
	SiO_2	198	0	29,2	1,0	6,3	0,0	5,9	1,0
215	MIG	213	1	27,6	0,5	7,0	0,2	6,0	0,0
	CaCO_3	213	1	24,8	0,0	6,9	0,2	5,0	0,0
	SiO_2	214	1	30,6	0,4	6,9	0,3	5,9	0,7
230	MIG	228	1	28,4	0,5	7,6	0,1	6,0	0,0
	CaCO_3	229	1	25,9	1,2	7,7	0,1	5,5	0,5
	SiO_2	228	2	30,8	0,7	7,7	0,1	5,1	0,1
250	MIG	247	1	28,9	0,5	8,4	0,2	6,0	0,0
	CaCO_3	247	1	28,5	0,2	8,4	0,2	6,5	0,4
	SiO_2	247	1	31,3	0,2	8,4	0,2	6,1	0,6

Tabela 3. Resultados de p-value dos testes de hipóteses.

Parâmetros	CaCO ₃	SiO ₂
Tensão	0,00005	0,00100
Corrente	0,02358	0,00070
Comprimento do arco	0,05273	0,35122
Velocidade de alimentação	0,35830	0,43134

Os efeitos dos fluxos sobre a tensão de soldagem e o comprimento do arco (l_a), caracterizados pela diferença de cada parâmetro na soldagem com e sem fluxo (Equação 1), são exibidos na Figura 5. Os resultados indicam uma redução da tensão de soldagem com o uso de CaCO₃, particularmente, para os valores intermediários de corrente (entre 190 e 230 A), com uma redução média de 1,6 V em comparação à soldagem sem fluxo. Observa-se, também, embora com uma maior dispersão, uma tendência para uma redução do l_a com o uso desse fluxo.

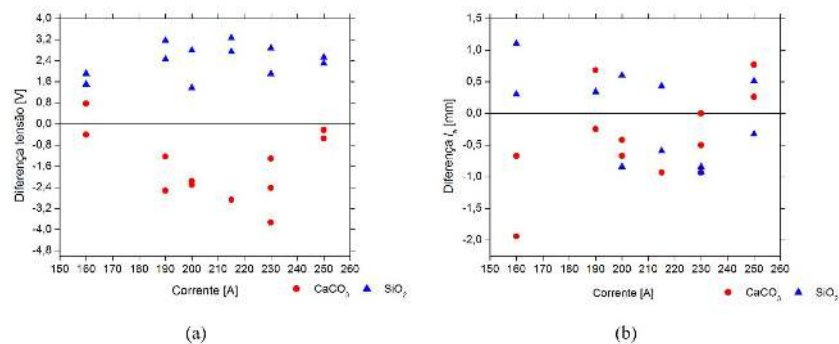


Figura 5. Diferença da (a) tensão e do (b) comprimento do arco (l_a) com o uso dos fluxos em função da corrente.

De forma oposta, para todas as correntes testadas, com a sílica ocorre um acréscimo de tensão em média de 2,2 V em relação à soldagem sem fluxo. Por outro lado, a Figura 5 sugere e o teste de hipótese confirma (Tabela 3) que a sílica não altera de forma significativa o comprimento do arco. Um aumento de tensão similar ao encontrado neste trabalho é relatado na soldagem A-TIG com o uso de SiO₂ [4,9,10], o que sugere que o efeito desse fluxo sobre o arco pode ser independente do processo de soldagem. No processo TIG, o efeito da sílica na tensão do arco é associado a um aumento da resistência elétrica provocada por esse fluxo junto à peça [9,10]. Como a sílica é um óxido refratário, a sua presença na superfície dificultaria a passagem da corrente elétrica entre a peça e o arco, aumentando a tensão [11]. Na soldagem MIG, mecanismo similar poderia atuar, mas isto ainda precisa ser avaliado. Segundo alguns pesquisadores [9], uma consequência adicional do efeito isolante da sílica seria causar uma constricção do arco, sendo este um possível mecanismo para o aumento de penetração na soldagem A-TIG.

Como os testes foram feitos com a fonte em corrente constante e sem alteração da velocidade de alimentação após a sua regulagem inicial, as variações de tensão e comprimento de arco devem resultar de mudanças no arco e/ou nas condições de fusão do eletrodo causadas pelos fluxos.

A tensão de soldagem (U_{sol}) pode ser representada, de uma forma simplificada pela Equação 2:

$$U_{sol} = \rho_e (h - l_a) I + (U_C + E l_a + U_A) I + R_p I \tag{2}$$

onde ρ_e é a resistividade elétrica do eletrodo; h é a distância do bico de contato à peça; l_a é o comprimento do arco; I é a corrente de soldagem; U_C é a variação de potencial no cátodo; E é o campo elétrico na coluna do arco; U_A é a variação de potencial no ânodo; e R_p é a resistência elétrica de outros eventuais componentes do circuito (por exemplo, cabos, caso a medição seja feita nos bornes da fonte). Assim, a diferença de tensão em um dos testes realizados seria, para um dado valor de corrente (I_c), descrita pela Equação 3a:

$$\Delta U = -\rho_e \Delta l_a \cdot I_t + [\Delta U_C + \Delta(E l_a) + \Delta U_A] I_t \quad (3a)$$

onde o Δ representa a diferença entre os valores de um dado parâmetro nas soldagens com e sem fluxo e foi suposto que ρ_e e R_p não se alteram pela presença do fluxo.

Considerando que a resistividade do eletrodo é relativamente baixa e que as variações de comprimento de arco estiveram, na maioria dos resultados, entre ± 1 mm, a Equação 3a pode ser simplificada para a Equação 3b:

$$\Delta U \approx [\Delta U_C + \Delta E \cdot l_a + \Delta U_A] I_t \quad (3b)$$

Assim, as mudanças de tensão causadas pelos fluxos estariam relacionadas a variações na tensão na região catódica (junto à peça), no campo elétrico na coluna do arco e/ou na região anódica (junto à ponta do eletrodo). Espera-se que, para as duas últimas possibilidades, seja necessária a vaporização de componentes dos fluxos e a sua incorporação ao arco.

O valor de l_a , para uma dada condição de soldagem, depende do balanço entre as velocidades de fusão (w) e alimentação do arame (f) que pode ser descrito pela Equação 4:

$$\frac{dl_a}{dt} = w - f \quad (4)$$

Essa equação implica na igualdade dos valores médios das duas velocidades em uma condição estacionária de soldagem. Assim, como f foi mantido constante após o seu ajuste inicial, w também não pode ter variado após o processo se estabilizar em cada uma das condições. Um modelo simples [12] descreve a velocidade de fusão através da Equação 5:

$$w = \alpha I + \beta (h - l_a) I^2 \quad (5)$$

onde α e β são parâmetros que estão associados, respectivamente, ao aquecimento do eletrodo pelo arco (aquecimento anódico) e por efeito Joule. Considerando a igualdade de w e f em condições estacionárias de soldagem e supondo que β não seja alterado pela presença do fluxo, o valor de Δl_a pode ser estimado pela Equação 6:

$$\Delta l_a \approx \frac{\Delta \alpha}{1 + \beta I^2} \cdot I \quad (6)$$

Isto é, nas condições estudadas, variações de comprimento do arco devem estar associadas principalmente a alterações no aquecimento do eletrodo pelo arco, particularmente, a variações na tensão na região anódica.

Assim, considerando esse desenvolvimento e os resultados obtidos de ΔU e Δl_a para os dois fluxos tem-se que:

- A sílica parece atuar na região catódica do arco, possivelmente, dificultando a passagem da corrente elétrica e, com isto, aumentando a tensão de soldagem, mas não afetando o comprimento do arco;
- O carbonato de cálcio, além de poder ter um efeito similar à sílica, parece atuar na coluna do arco e, possivelmente, na região anódica. Uma possível causa desse efeito seria a vaporização, ionização e incorporação de cálcio ao arco. Uma segunda possibilidade seria formação de CO_2 pela decomposição do carbonato de cálcio e sua atuação no arco.

Os fluxos também afetaram a transferência do metal de adição como indicado pelas mudanças nos sinais de tensão exibidos nas Figuras 6 e 7. Cada trecho dos oscilogramas dessas figuras apresenta dois períodos representativos de cada condição de soldagem com o intervalo entre eles removido para facilitar a comparação.

Na soldagem sem fluxo com corrente de 160 A a variação de tensão é característica de transferência globular com uma frequência de transferência de, aproximadamente, 10 gotas por segundo. Para correntes superiores, o tempo de transferência (caracterizado, em transferência globular, pelo serrilhado na tensão) se reduz como esperado. Os oscilogramas sugerem que a transição de globular para spray ocorre entre 200 e 215 A. A faixa de transição foi determinada pela análise dos oscilogramas, determinando-se, de forma aproximada, a frequência

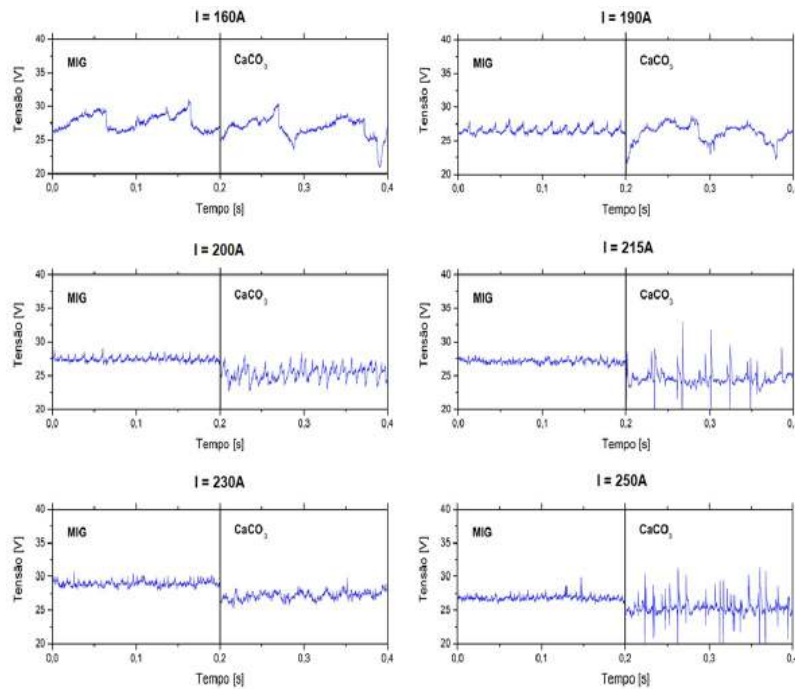


Figura 6. Comparação da variação da tensão de soldagem nas condições de operação sem fluxo (0-0,2 s) e com o fluxo CaCO_3 (0,2-0,4 s) para correntes de 160 a 250 A.

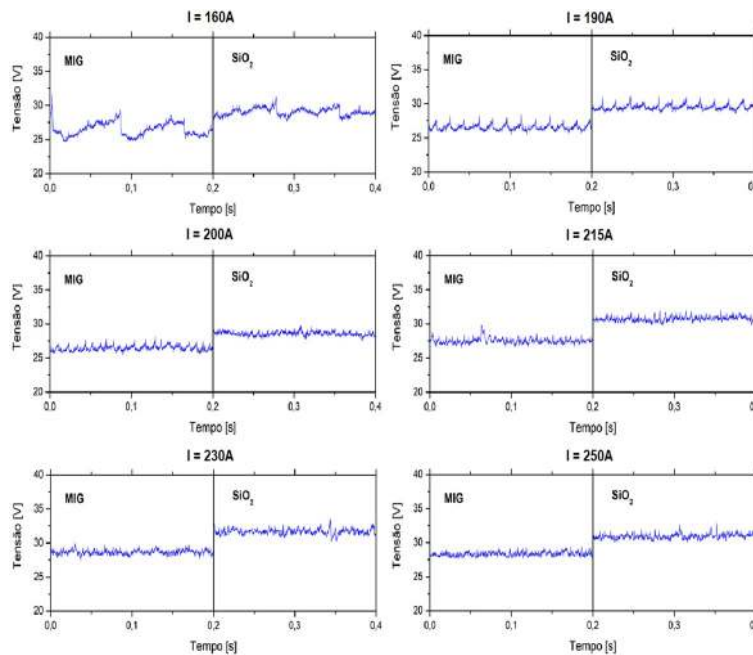


Figura 7. Comparação da variação da tensão de soldagem nas condições de operação sem fluxo (0-0,2 s) e com o fluxo SiO_2 (0,2-0,4 s) para correntes de 160 a 250 A.

de transferência. A soldagem foi considerada em spray quando a frequência de transferência atingia a ordem de centenas de gotas por segundo.

Quando o CaCO_3 (Figura 6) foi utilizado como fluxo, são observados tempos de transferência mais longos, indicando a transferência com gotas maiores para um dado valor de corrente em comparação à soldagem sem fluxo, não estando clara a transição para transferência spray até a corrente de 250 A. Foram observadas, para

os valores mais elevados de corrente, variações bruscas de tensão que sugerem a ocorrência de curtos-circuitos rápidos, sem transferência de metal. Os oscilogramas também mostram a queda no valor médio da tensão de soldagem já discutida. Assim, os oscilogramas indicam que a maior variabilidade da tensão associada a esse fluxo (Figura 3b) está ligada à formação de gotas maiores durante a transferência de metal e pelos bruscos picos de tensão observados para correntes mais elevadas.

Na soldagem usando sílica como fluxo (Figura 7), os oscilogramas de tensão mostram alterações pouco significativas nas condições de transferência de metal em relação à soldagem sem fluxo. Considerando os critérios usados anteriormente, a corrente de transição parece ser similar à encontrada para a soldagem sem fluxo ou, possivelmente, um pouco menor. Por outro lado, como já mencionado, pode-se observar um aumento da tensão de soldagem. Em linha com o já discutido, a ausência de mudanças claras na transferência de metal reforça a proposta de que a sílica atua principalmente na região catódica (junto à chapa) tendo pouco efeito na coluna do arco e na região anódica. Assim, uma possível forma de atuação da sílica seria causar uma maior dificuldade à passagem da corrente elétrica de forma similar à que já foi proposta na soldagem A-TIG. O presente trabalho, contudo, não chegou a avaliar esse aspecto mais profundamente.

Com relação ao carbonato de cálcio, anteriormente, foram indicados dois possíveis mecanismos para explicar o seu efeito nas variações de tensão e comprimento do arco. Esses mecanismos (decomposição do CaCO_3 liberando CO_2 no arco e vaporização do cálcio e sua ionização) também poderiam afetar a transferência de metal. Um terceiro mecanismo possível seria a alteração da tensão superficial do metal líquido na ponta do eletrodo pela absorção de algum componente vaporizado do fluxo.

É bem conhecido que a presença de CO_2 na proteção dificulta a transferência spray, elevando a corrente de transição globular/spray. Considerando a reação de decomposição do CaCO_3 (Equação 7), calculou-se por balanço de massa a quantidade de CO_2 gerada durante a soldagem. Para tal cálculo, foram utilizadas a densidade de fluxo na superfície da chapa, a velocidade de soldagem e composição e vazão do gás de proteção. A partir da quantidade de CO_2 formada, calculou-se o teor efetivo desse gás na atmosfera do arco pela Equação 8, onde $V_{\text{CO}_2-\text{CaCO}_3}$ corresponde ao volume de CO_2 oriundo da decomposição do fluxo; $V_{\text{CO}_2-\text{gás}}$ ao volume de CO_2 do gás de proteção e $V_{\text{gás}}$ ao volume do gás de proteção.



$$\% \text{CO}_{2 \text{ total}} = \frac{V_{\text{CO}_2-\text{CaCO}_3} + V_{\text{CO}_2-\text{gás}}}{V_{\text{gás}}} \quad (8)$$

Supondo uma condição ideal em que todo o fluxo é decomposto e que todo CO_2 é incorporado ao gás de proteção, a decomposição do fluxo resultaria em um acréscimo de cerca de 1% de CO_2 no ambiente do arco, ou seja, o gás de proteção teria efetivamente 3,5% CO_2 . Esse aumento idealizado do teor de CO_2 é pequeno para explicar os resultados encontrados no presente trabalho. Além disto, no processo real, considerando que apenas parte do fluxo é decomposta e a ação do jato de plasma, a quantidade de CO_2 deve ser muito menor.

Considerando a redução significativa da tensão na soldagem com CaCO_3 , a incorporação de íons de cálcio no arco a partir da vaporização desse elemento no fluxo parece ser uma hipótese mais provável para as alterações observadas no processo.

Quantidades pequenas de vapor metálico têm grande potencial para alterar de forma significativa a densidade de corrente e outras características do arco [13-16]. Block-Bolten e Eagar [17] mostram, através de cálculos termodinâmicos, que uma pequena variação na concentração de um elemento químico na poça de fusão pode produzir forte mudança na sua concentração no arco elétrico. Diferentes autores [7,14] detectaram por espectroscopia a presença de vapores metálicos, inclusive cálcio, no arco. Dunn et al. [14] analisaram por espectroscopia o arco da soldagem TIG em aços AISI 304 com diferenças de composição química. Foi verificado um aumento da intensidade de raios do cálcio no espectro em um aço com maior teor desse elemento. Zhang e Cao [7] também detectaram por espectroscopia a presença átomos e cátions (Ca^+ , Ca^{++}) de cálcio no arco elétrico quando CaCl_2 foi utilizado na soldagem A-MIG de uma liga de magnésio.

O cálcio tem energia de ionização relativamente baixa, podendo favorecer um aumento da condutividade elétrica do plasma. Como resultado, a densidade de corrente em diferentes regiões do arco pode ser alterada afetando as forças de origem magnética que são fundamentais para a transferência spray. Zhang e Cao [7] também associaram o uso de um fluxo contendo cálcio com um aumento no período da transferência metálica globular e com a maior dificuldade de desprendimento da gota da extremidade do arame. Eles também consideram que, com a presença do fluxo, pode ocorrer uma redução das forças eletromagnéticas estendendo o período de transferência metálica.

A terceira hipótese considerada foi de uma alteração da tensão superficial do metal líquido da ponta do eletrodo. Uma maior tensão superficial retém a gota de metal líquido na ponta do eletrodo por um maior período de tempo [18], o que poderia favorecer a transferência globular na presença de CaCO_3 , mesmo com maiores valores de corrente. É de conhecimento que a presença de cálcio na poça de fusão tende a aumentar a tensão superficial, o que é atribuído à remoção pelo cálcio de oxigênio e enxofre (elementos tensoativos) do metal líquido [19]. No entanto, não foram encontrados na literatura dados sobre a influência de vapores de cálcio sobre o metal líquido na transferência metálica.

O uso de fluxo também afetou o formato do cordão de solda (Figura 8). Nas regiões sem fluxo, é observado que, com o aumento da corrente, a penetração assume formato mais estreito e profundo, conhecido como penetração em dedo, que é associado com transferência por spray [20]. Na soldagem com o CaCO_3 , o cordão assume formato

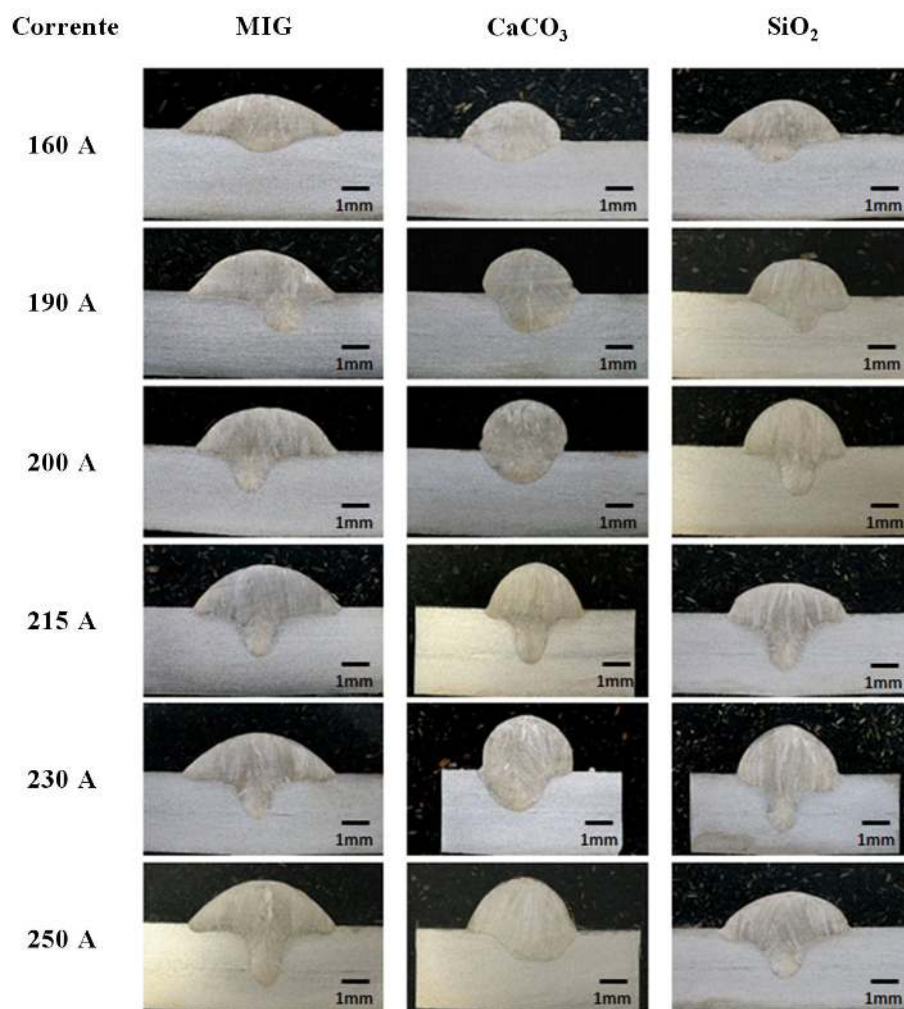


Figura 8. Macrografias de soldas MIG e A-MIG nas diferentes correntes testadas.

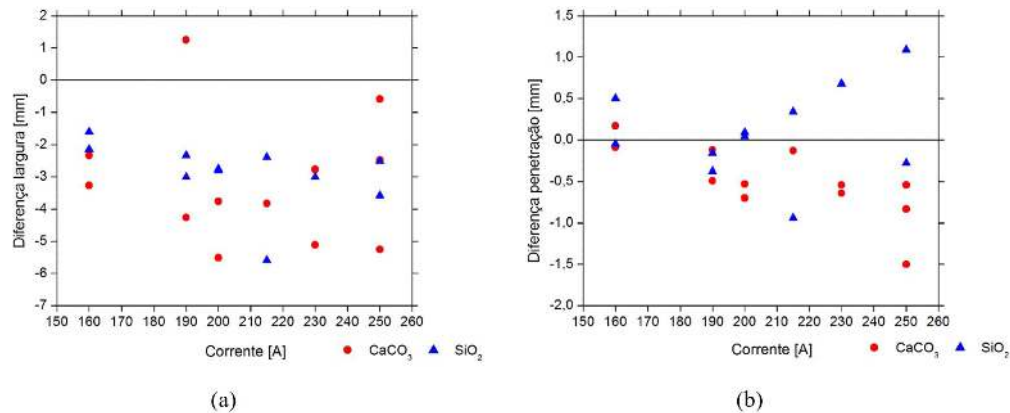


Figura 9. Diferença da (a) largura e da (b) penetração do cordão entre as soldagens com o uso de CaCO₃ e SiO₂ e a soldagem MIG.

mais arredondado e o perfil de penetração em dedo é mais dificilmente observado. Essa tendência foi associada à maior dificuldade de se atingir a transferência spray com o uso CaCO₃.

A adição da sílica modificou de forma menos acentuada o formato do cordão em relação ao observado na soldagem sem fluxo. Contudo, esse fluxo (e, também, o CaCO₃) levou a uma redução da largura do cordão (Figura 9a). Para as correntes mais elevadas, a sílica também parece favorecer um aumento de penetração (Figura 9b). Alterações no formato do cordão são usualmente associadas na soldagem A-TIG com o efeito Marangoni [21]. Elas podem estar também associadas com um efeito de constricção mecânica do arco que é considerado como importante por alguns autores na soldagem A-TIG usando fluxos a base de sílica [21].

4. Conclusões

O presente trabalho avaliou o efeito do uso de carbonato de cálcio e sílica como fluxos para a soldagem A-MIG de um aço AISI 304 com transferência em queda livre. O estudo foi realizado com uma fonte operando em corrente constante em um intervalo 160 a 250 A. As principais conclusões do trabalho foram:

- O uso de CaCO₃ provocou redução da tensão do arco elétrico e da frequência de transferência metálica com aumento da corrente de transição da transferência globular para spray sem afetar de forma significativa o comprimento do arco. Esses efeitos foram atribuídos à vaporização cálcio e incorporação de seus íons ao arco elétrico. Foi observada também a ocorrência de curtos-circuitos rápidos em correntes elevadas;
- Com o uso de SiO₂, ocorreu aumento da tensão do arco elétrico, uma tendência de redução do comprimento de arco e ausência de alterações significativas no modo de transferência. As modificações operacionais causadas pela sílica no processo A-MIG foram atribuídas, de forma similar à considerada por alguns autores na soldagem A-TIG, a um efeito isolante desse fluxo na região da poça de fusão;
- Os fluxos também afetaram o formato do cordão de solda. Com o uso de CaCO₃, a penetração em dedo, comumente associada com a transferência spray, tendeu a não ocorrer. Como resultado, para correntes mais elevadas a penetração foi menor que a obtida na soldagem sem fluxo. Com o uso de sílica, as mudanças no formato do cordão, em relação ao observado na soldagem sem fluxo, foram menos pronunciadas. Contudo, em ambos os casos, o uso do fluxo levou a uma redução da largura do cordão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências de fomento CAPES-PROEX, CNPq e Fapemig. Assim como ao PPGEM/UFMG, ao Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação (LRSS) e à Aperam. Os autores também agradecem à Leandro Brito Gonçalves, Matheus Azevedo Mendes e Eustáquio Roberto Apolinário pelas contribuições ao trabalho.

Referências

- [1] Rykała J, Pfeifer T. Influence of the technological conditions of welding using the MIG/MAG method on metal transfer in the welding arc. *Welding International*. 2014;28(12):931-940. <http://dx.doi.org/10.1080/09507116.2012.753233>.
- [2] Kah P, Suoranta R, Martikainen J. Advanced gas metal arc welding processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;67(1-4):655-674. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4513-5>.
- [3] Lucas W, Howse D. Activating flux: increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes. *Welding and Metal Fabrication*. 1996;64(1):11-17.
- [4] Modenesi PJ, Apolinário E, Pereira IM. TIG welding with single-component fluxes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;99(1-3):260-265. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00435-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00435-5).
- [5] Huang H-Y. Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding. *Materials & Design*. 2010;31(5):2488-2495. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.043>.
- [6] Ruan Y, Qiu XM, Gong WB, Sun DQ, Li YP. Mechanical properties and microstructures of 6082-T6 joint welded by twin wire metal inert gas arc welding with the SiO₂ flux. *Materials & Design*. 2012;35:20-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.002>.
- [7] Zhang ZD, Cao QJ. Study on metal transfer behaviour in metal inert gas arc welding with activating flux for magnesium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2012;17(7):550-555. <http://dx.doi.org/10.1179/1362171812Y.0000000046>.
- [8] Ferreira JR No, Lopes PB, Apolinário ER, Modenesi PJ. Uma avaliação da soldagem MIG/MAG com fluxos. In: *Anais do XLII Congresso Nacional de Soldagem (CONSOLDA)*; 2016; Belo Horizonte. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem; 2016.
- [9] Lowke JJ, Tanaka M, Ushio M. Mechanisms giving increased weld depth due to a flux. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005;38(18):3438-3445. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/38/18/018>.
- [10] Ramkumar KD, Varma JLN, Chaitanya G, Logesh S, Krishnan M, Arivazhagan N, et al. Experimental investigations on the SiO₂ flux-assisted GTA welding of super-austenitic stainless steels. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;93(1-4):129-140. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7876-6>.
- [11] Li Q, Wang X, Zou Z, Wu J. Effect of activating flux on arc shape and arc voltage in tungsten inert gas welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2007;17(3):486-490. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(07\)60120-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(07)60120-4).
- [12] Halmoy E. Wire melting rate, droplet temperature, and effective anode melting potential, arc physics and weld pool behaviour. In: *Proceedings of the Arc Physics and Weld Pool Behaviour: an International Conference*; 1979; London. London: The Welding Institute; 1979. p. 49-57.
- [13] Block-Bolten A, Eagar TW. Metal vaporization from weld pools. *Metallurgical Transactions B: Process Metallurgy*. 1984;15B:461-469. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02657376>.
- [14] Dunn GJ, Allemand CD, Eagar TW. Metal vapors in gas tungsten arcs: part I. Spectroscopy and monochromatic photography. *Metallurgical Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 1986;17A:1851-1863. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02817281>.
- [15] Murphy AB. The effects of metal vapour in arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2010;43(43):1-31. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/43/43/434001>.
- [16] Dunn GJ, Eagar TW. Metal vapors in gas tungsten arcs: part II. Theoretical calculations of transport properties. *Metallurgical Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 1986;17A:1865-1871. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02817282>.
- [17] Block-Bolter A, Eagar TW. Selective evaporation of metals from weld pools: trends in welding research. *Metals Park: ASM*; 1982. p. 53-73.
- [18] Scotti A, Ponomarev V, Lucas W. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(6):1406-1413. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.01.021>.
- [19] Mills KC, Keene BJ. Factors affecting variable weld penetration. *International Materials Reviews*. 1990;35(4):185-216. <http://dx.doi.org/10.1179/095066090790323966>.
- [20] O'Brien A. *Welding handbook: welding process, part 1*. 9th ed. Vol. 2. Miami: American Welding Society; 2004.
- [21] Modenesi PJ. A química da formação do cordão na soldagem TIG. *Soldagem e Inspeção*. 2013;18(3):287-300. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242013000300011>.