

Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular “Metal Cored”

(Bead Characterization on FCAW Welding of a Metal Cored Tubular Wire)

Cícero Murta Diniz Starling¹, Paulo José Modenesi², Tadeu Messias Donizete Borba³

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, ciceroSTARLING@ufmg.br

²Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, modenesi@demet.ufmg.br; tadeumdborba@yahoo.com.br

Resumo

Este trabalho objetivou o estudo do efeito de algumas condições operacionais nas características do cordão produzido por um arame tubular “metal cored” (ASME SFA-5.18: E70C-3M) de fabricação nacional com 1,2 mm de diâmetro, destinado à soldagem de aços carbono comuns estruturais de baixo e médio teor de carbono. Realizaram-se testes de soldagem, na posição plana, sobre chapas grossas (espessura de 12 mm) de aço de baixo carbono utilizando-se uma fonte operando no modo “tensão constante” e com monitoração dos sinais de corrente e tensão do arco e velocidade de alimentação (fusão) do arame. Variaram-se a composição do gás de proteção (75%Ar-25%CO₂ e 100%CO₂), a polaridade do eletrodo (positiva e negativa) e a velocidade de alimentação do arame (7 e 9 m/min). Os demais parâmetros de soldagem foram mantidos fixos, incluindo-se os comprimentos energizado do eletrodo (16 mm) e do arco (3,5 mm). Avaliaram-se os efeitos das condições operacionais nas principais características do cordão incluindo a sua geometria (penetração, reforço, largura, área fundida, área depositada e diluição), presença de descontinuidades, microestrutura e dureza. Levantaram-se, para o arame “metal cored”, as condições operacionais de maior produtividade (maior taxa de deposição) associadas a um cordão com características adequadas à soldagem de chapas grossas de aços estruturais.

Palavras-chave: Processo FCAW; Arame Tubular “Metal Cored”; Formato do Cordão; Microestrutura.

Abstract: This work evaluates the relationship between operational conditions and the characteristics of weld beads deposited with a 1.2 mm produced in Brazil metal cored tubular wire (ASME SFA-5.18: E70C-3M). Welding trials were performed in downhand position on 12mm thick low-carbon steel plates using a constant voltage power supply. Welding current and voltage, and wire feed rate were monitored in all trials. While the shielding gas composition (75%Ar-25%CO₂ and 100%CO₂), wire polarity, and wire feed rate (7 and 9 m/min) were changed, other process variables, including electrode and arc lengths (16 mm and 3.5 mm, respectively) were kept constant throughout the experimental program. Weld bead geometry parameters (penetration depth, reinforcement, width, fused and deposited areas, and weld dilution), presence of weld discontinuities, microstructure, and fusion zone hardness were measured and correlated to the operational conditions. Operational conditions that yielded both high productivity levels (high deposition rates) and weld bead characteristics favored for the welding of thick plates of structural steels were determined.

Key-words: FCAW Process; Metal Cored Tubular Wire; Weld Bead Shape; Microstructure.

1. Introdução

A soldagem a arco com arame tubular (FCAW) é um processo que acumula as principais vantagens da soldagem com arame maciço e proteção gasosa (GMAW), como alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, alto rendimento, resultando em alta produtividade e qualidade da solda produzida. Inclui também as vantagens da soldagem manual com eletrodos revestidos (SMAW), como alta versatilidade, possibilidade de ajustes da composição química do cordão de solda e facilidade de operação em campo[1-2]. Na soldagem FCAW e em outros processos de soldagem com eletrodo consumível, o material do

eletrodo precisa ser aquecido desde a sua temperatura inicial, próxima da temperatura ambiente, até a sua temperatura de fusão e, a seguir, ser fundido e separado do eletrodo. A velocidade com que o eletrodo é fundido deve ser, em média, igual à velocidade que este é alimentado de forma a manter um comprimento de arco relativamente constante.

Os autores do presente trabalho estudaram anteriormente as características e os fatores determinantes da fusão de arames tubulares nacionais (destinados à soldagem de aços carbono comuns de baixo e médio teor de carbono) dos tipos básico (ASME SFA-5.20: E71T-5/E71T-5M), rutilico (ASME SFA-5.20: E71T-1/E71T-9/E71T-9M) e “metal cored” (ASME SFA-5.18: E70C-3M) com 1,2 mm diâmetro, utilizando uma fonte do tipo “tensão constante” e condições de soldagem essencialmente sem a ocorrência de curtos-circuitos. Nesses trabalhos anteriores:

- Promoveu-se a caracterização dos arames, através da

(Recebido em 12/07/2011; Texto final em 20/09/2011).

determinação das suas características geométricas e resistividade e avaliação dos principais constituintes do fluxo[3].

- Levantou-se as principais características de transferência metálica, através da técnica de perfilografia (shadowgrafia) [4].
- Avaliou-se a velocidade de fusão e a taxa de deposição dos arames em função de diferentes parâmetros operacionais, como corrente de soldagem, gás de proteção (100%CO₂ e 75%Ar-25%CO₂), comprimento energizado do eletrodo, comprimento do arco e polaridade do eletrodo [5-7] e
- Foi proposto um modelo alternativo para a fusão do eletrodo na soldagem com arames tubulares[3].

A partir da caracterização dos arames tubulares, verificou-se, por exemplo, que o fluxo interno do arames rutilico, básico e “metal cored” devem ser constituídos respectivamente por grandes proporções de TiO₂, CaO e adições metálicas. Às temperaturas ambiente e de fusão, as resistividades dos arames tubulares básico e rutilico são próximas. De uma forma geral, o modelo clássico para a velocidade de fusão pode descrever satisfatoriamente a fusão dos arames tubulares avaliados, apesar das suas diferenças em relação aos arames maciços. Na soldagem com “tensão constante” e o eletrodo positivo verificou-se, por exemplo, que a composição do gás de proteção e o valor do comprimento do arco não exercem um maior efeito na velocidade de fusão dos arames tubulares rutilico, básico e “metal cored”. O arame “metal cored” apresenta velocidades de fusão mais próximas à de arames maciços. Apesar de apresentarem fluxos internos de natureza diferente, os arames rutilico e básico tiveram velocidades de fusão muito próximas para os dois gases de proteção e comprimentos energizados do eletrodo utilizados. De uma forma geral, o tipo de transferência metálica observada para os arames tubulares é globular ou globular repulsiva. Em particular, para os arames básico e rutilico verificou-se que, em muitas condições operacionais, se forma uma coluna de fluxo projetada em direção à poça de fusão. À exceção da soldagem do arame “metal cored” a altas correntes com 75%Ar-25%CO₂, não se notou a ocorrência da transferência do tipo spray. Estes aspectos, até então estudados, foram muito importantes, tendo aplicação na determinação de condições operacionais de maior produtividade, no controle do processo e no projeto de juntas soldadas.

Encontrou-se na literatura alguns estudos relativos às características do cordão de solda (por exemplo, geometria, presença de descontinuidades e microestrutura) na soldagem com arames tubulares[8-15]. De uma forma geral, estes estudos associam as características do cordão com os parâmetros de soldagem ou com as propriedades mecânicas da junta soldada. Entretanto, percebe-se que os aspectos relativos às características do cordão de solda no processo FCAW não foram, ainda, estudados de forma mais abrangente, por exemplo, associando estas características às condições operacionais para aplicações envolvendo arames tubulares destinados à soldagem de aços carbono comuns de baixo e médio teor de carbono. Dessa forma, informações relativas às condições operacionais de maior produtividade, associadas a um cordão com características adequadas à soldagem de aços estruturais são, até então,

limitadas.

Da mesma forma que o estudo das características e dos fatores determinantes da fusão de arames tubulares, um estudo exploratório, realizado para arames tubulares nacionais destinados à soldagem de aços carbono comuns de baixo e médio teor de carbono, sobre o efeito das condições operacionais nas características do cordão de solda (por exemplo, geometria, presença de descontinuidades e microestrutura) revela-se igualmente importante. No presente trabalho, esse estudo será realizado para um arame tubular nacional do tipo “metal cored” (ASME SFA-5.18: E70C-3M). Espera-se que os resultados gerados para esse arame tubular possam contribuir para a otimização de condições operacionais de maior produtividade, associadas a um cordão de solda com características adequadas à soldagem de aços estruturais.

2. Materiais e Métodos

Neste trabalho, utilizou-se o processo FCAW com um arame tubular comercial de fabricação nacional (destinado à soldagem de aços carbono comuns de baixo e médio teor de carbono) do tipo “metal cored” (ASME SFA-5.18: E70C-3M), possuindo diâmetro nominal de 1,2 mm. Os testes de soldagem foram realizados na posição plana por simples deposição de cordões sobre chapas de aço carbono comum (ABNT 1010, com 50x250x12 mm), utilizando-se uma fonte de soldagem operando no modo “tensão constante” e ângulo de soldagem de 90°. Variaram-se a velocidade de alimentação (fusão) do arame (7 e 9 m/min), o gás de proteção (75%Ar-25%CO₂ e 100%CO₂) e a polaridade do eletrodo (positiva e negativa), totalizando 8 condições operacionais distintas. Realizaram-se duas ou mais soldas para cada condição operacional avaliada. No início de cada teste, o valor desejado da velocidade de alimentação do arame era ajustado através de um potenciômetro ligado ao alimentador de arame e, em seguida, promovia-se o ajuste do comprimento do arco através da variação da tensão fornecida pela fonte de soldagem. Durante os testes, a imagem invertida do arco elétrico era projetada (por meio de uma lupa) com uma ampliação conhecida sobre um anteparo graduado de forma a possibilitar o ajuste do seu comprimento (L_a) ao valor pretendido (3,5 mm). Para que a projeção do arco não se movesse em relação ao anteparo, facilitando o ajuste do comprimento do arco, manteve-se a tocha de soldagem fixa durante os testes, enquanto o corpo de prova se deslocava por intermédio de um dispositivo tipo “tartaruga”. Previamente, a distância entre a peça e o bico de contato (DBCP) era fixada em 19,5 mm resultando, após o ajuste do comprimento do arco, em um comprimento energizado do eletrodo (s) igual a 16,0 mm. De forma a se manter aproximadamente constante o volume da poça de fusão e, assim, tornar sistemática a sua influência no ajuste do comprimento do arco, foi estabelecida uma relação de proporcionalidade entre as velocidades de soldagem (v_s) e de alimentação do arame (w), utilizando-se as mesmas unidades:

$$v_s = 0,04.w \quad (1)$$

Após estes ajustes, os valores resultantes de corrente de soldagem, tensão do arco (avaliada entre o bico de contato e a peça)

e velocidade de alimentação do arame eram coletados através de placas de aquisição de dados acopladas a microcomputadores. Para a aquisição da corrente, utilizou-se um sensor de efeito Hall e, para a aquisição da tensão, um sensor divisor de tensão, ambos ligados a uma placa de conversão analógico/digital controlada por um programa de computador desenvolvido previamente. Para a aquisição da velocidade de alimentação do arame, utilizou-se um sensor de disco óptico ligado a uma placa de aquisição de dados, controlada por um programa de computador específico. A Figura 1 mostra esquematicamente a montagem experimental utilizada, incluindo o sistema de projeção do arco elétrico.

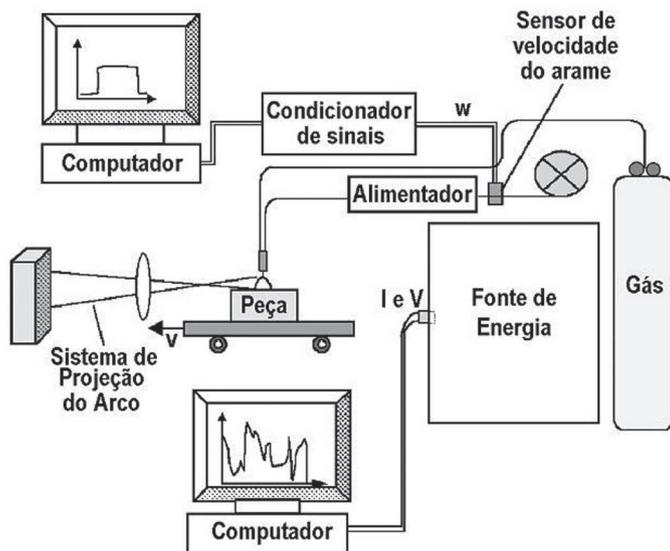
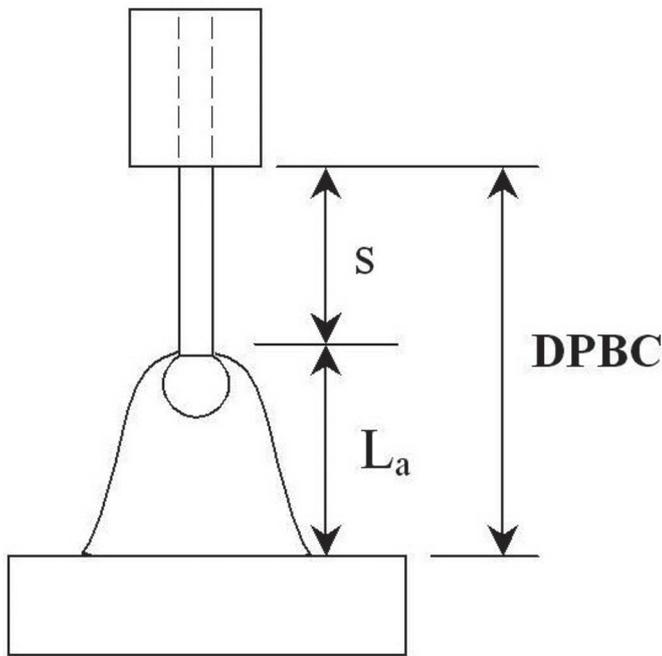


Figura 1. (a) Representação da distância entre a peça e o bico de contato (DBPC) e os comprimentos do arco (L_a) e energizado do eletrodo (s). (b) Representação esquemática da montagem experimental.

A caracterização de cada condição operacional foi realizada através da avaliação da estabilidade operacional, do aspecto superficial do cordão de solda, da taxa de deposição e, também, extraíndo-se corpos de prova transversais ao cordão para análises macroestrutural e microestrutural e para realização de testes de dureza Vickers.

A estabilidade operacional de cada uma das condições testadas foi avaliada através das análises dos oscilogramas de tensão do arco e corrente de soldagem (em particular da relação entre o desvio padrão e a média destes parâmetros, que indicam os seus níveis de flutuação durante a operação de soldagem), do aspecto superficial do cordão, do nível de respingos produzidos e da eficiência de deposição. Para a obtenção da eficiência de deposição do arame tubular “metal cored” (ϕ_{tubular}), inicialmente promovia-se a determinação da massa de uma chapa limpa e esmerilhada e, em seguida, depositava-se na mesma um cordão de solda utilizando-se uma das condições operacionais avaliadas. Após a soldagem, removia-se (com escova de aço giratória e talhadeira) todos os óxidos e respingos formados e determinava-se o ganho de massa do corpo de prova devido ao metal depositado. O consumo de arame (em metros) para a deposição do cordão era avaliado a partir da monitoração, durante a soldagem, da velocidade de alimentação do arame. Com o conhecimento da densidade linear do arame (8,05g/m), calculada conforme procedimento descrito em Starling e Modenesi[3], era possível determinar a massa total de arame fundido durante a soldagem. Dessa forma, a eficiência de deposição era avaliada através da relação entre o ganho de massa do corpo de prova e a massa total de arame fundido. Para cada condição operacional, avaliou-se a eficiência de deposição média realizando-se pelo menos 2 soldas. A taxa de deposição (TD_{tubular}) do arame tubular “metal cored” depende da eficiência de deposição (ϕ_{tubular}) e da velocidade de alimentação (w), sendo dada por:

$$TD_{\text{tubular}} = 0,06 \cdot \phi_{\text{tubular}} \cdot (A_{\text{tubular}} \cdot \rho_{\text{tubular}} \cdot w) \quad (2)$$

Para TD_{tubular} (kg/h) e w (m/min). Nesta equação, A_{tubular} se refere à área total da seção transversal (1,0740 mm²) e ρ_{tubular} à densidade volumétrica (7,50 g/cm³) do arame tubular “metal cored” calculadas conforme procedimento descrito em Starling e Modenesi[3].

Prepararam-se 2 macrografias e 1 micrografia para cada uma das 8 condições operacionais avaliadas. A preparação macrográfica foi realizada em dois corpos de prova transversais a um mesmo cordão e consistiu no lixamento com lixas d’água (granulometrias iguais a 100, 240, 320, 400, 600 e 1000), seguindo-se ataque com nital 10 %. A preparação micrográfica foi realizada em um único corpo de prova transversal ao cordão e consistiu no seu embutimento a quente com resina termofixa (baquelite), lixamento com lixas d’água (mesmas granulometrias anteriores), polimento com pastas de diamante (com granulometria de 9, 3 e 1 μm) e ataque com nital 2 %. Após a preparação das amostras, foram realizadas macrofotografias e microfotografias digitais da seção transversal do cordão. O aspecto superficial do cordão também foi documentado através de microfotografia digital.

A partir das macrografias produzidas e, também, através do

exame do aspecto superficial do cordão foi verificada a presença de eventuais descontinuidades (por exemplo, aspecto irregular do cordão, porosidades, mordeduras e inclusão de escória). As macrografias produzidas foram avaliadas em um projetor de perfil para a observação dos contornos da zona fundida e medição de alguns parâmetros geométricos (largura, penetração máxima e reforço, Figura 2). Esses contornos foram desenhados em uma transparência colocada sobre a tela do projetor, digitalizados através de um scanner e, através de um programa de computador, foram determinadas outras características geométricas do cordão (área depositada e área de penetração, Figura 2) e um parâmetro derivado (diluição). Os testes de dureza Vickers foram realizados na zona fundida de cada uma das 8 condições operacionais avaliadas. Utilizou-se uma carga de 98,1 N (10 kgf) com 10 a 15 medidas para cada condição e apresentaram-se os resultados para um intervalo de confiança de 95 %.

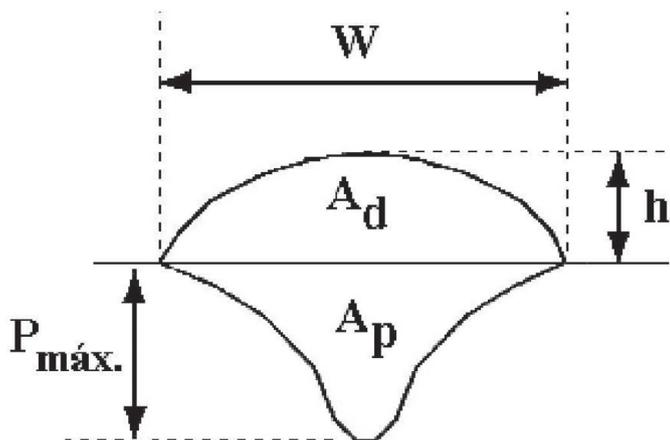


Figura 2. Representação esquemática das características geométricas do cordão. W – largura, h – reforço, $P_{\text{máx}}$ – penetração máxima, A_d – área depositada e A_p – área de penetração.

A caracterização microestrutural foi realizada através de exames ao microscópio óptico na seção transversal dos cordões para a identificação geral dos microconstituintes presentes na zona fundida. Também foram determinadas as frações volumétricas dos microconstituintes por metalografia quantitativa. A identificação dos microconstituintes foi baseada no documento IX-1533-88 do IIW - Instituto Internacional de Soldagem[16]. As frações volumétricas dos microconstituintes foram medidas pelo método de contagem manual de pontos, segundo a norma ASTM E 562-89[17]. Utilizou-se uma malha de 25 pontos a qual foi colocada na tela de um monitor de alta resolução acoplado a um microscópio óptico. As contagens foram realizadas para um aumento fixo de 200 X no microscópio,

o qual resultava em um aumento de, aproximadamente, 480 X no monitor. Calculou-se um intervalo de confiança de 95 % para os valores da fração volumétrica de cada microconstituinte. Para cada amostra, foram realizadas 100 aplicações da malha de forma a se cobrir todas as regiões da zona fundida. Resultou-se, assim, na contagem de 2.500 pontos por amostra e, considerando-se as 8 condições operacionais distintas, 20.000 pontos no total.

3. Resultados e Discussão

As Figuras 3 e 4 mostram os oscilogramas obtidos para as soldas com o arame “metal cored” e proteção gasosa, respectivamente, por 75%Ar-25%CO₂ e 100%CO₂. Nas legendas são indicados a média e o desvio padrão dos valores coletados da velocidade de alimentação do arame, da corrente de soldagem e da tensão do arco e, também, a flutuação dos valores de corrente e tensão (relação entre o desvio padrão e a média correspondente). No caso da velocidade de alimentação, acredita-se que as oscilações nos valores coletados são devidas principalmente ao sistema de medição utilizado (por meio do sensor de disco óptico) e não a variações no alimentador de arame. As Figuras 5 e 6 mostram o aspecto superficial dos cordões e as macrografias e micrografias obtidas de suas seções transversais para as soldas com proteção, respectivamente, por 75%Ar-25%CO₂ e 100%CO₂. Nessas figuras, os resultados são apresentados para as diferentes polaridades e velocidades de alimentação do arame avaliadas.

A Tabela 1 indica os valores da energia de soldagem, das eficiências de deposição do arame tubular “metal cored” e das taxas correspondentes de deposição. Em função da utilização de uma fonte do tipo “tensão constante” e de condições de soldagem essencialmente sem a ocorrência de curtos-circuitos, a energia de soldagem foi calculada considerando-se a potência média aritmética do arco, ou seja, a partir do produto dos valores médios da corrente de soldagem e da tensão do arco, dividido pela velocidade de soldagem ajustada. A Tabela 2 mostra os parâmetros geométricos e a diluição obtida para os cordões de solda. As Tabelas 3 e 4 indicam, respectivamente, a fração volumétrica dos microconstituintes presentes na zona fundida e a dureza dessa região, considerando-se o intervalo de confiança de 95 %. Nessas tabelas, os resultados são apresentados para as diferentes polaridades, velocidades de alimentação do arame e gases de proteção avaliados.

3.1 Efeito da Velocidade de Alimentação do Arame

De acordo com as Figuras 3 e 4, observa-se que, como esperado, um aumento na velocidade de alimentação do arame (nominalmente de 7 para 9 m/min) resulta em um aumento no valor médio da corrente de soldagem (variação máxima de 221 para 270 A) e, como o comprimento do arco foi mantido constante, também em um aumento correspondente no valor da tensão média do arco (variação máxima de 34,2 para 37,3 V). Este efeito foi verificado para os dois gases de proteção e polaridades

do eletrodo avaliados. Na soldagem com 100%CO₂ (para as duas polaridades do eletrodo), um aumento na velocidade de alimentação do arame resulta em um aumento na flutuação dos valores de corrente de soldagem e de tensão do arco (aumento na relação entre o desvio padrão e a média destes parâmetros), indicando uma redução da estabilidade operacional. Entretanto, verifica-se uma tendência de comportamento inverso na soldagem com 75%Ar-25%CO₂, ou seja, a estabilidade operacional tende a aumentar com o aumento da velocidade de alimentação do arame. Isto é revelado por uma redução na flutuação dos valores de corrente de soldagem (para as duas polaridades do eletrodo) e de tensão do arco (para a polaridade do eletrodo positiva) com o aumento da velocidade de alimentação do arame. Esta diferença de comportamento pode estar associada com efeitos distintos (dependendo do tipo de gás de proteção) do aumento da corrente de soldagem nos parâmetros da transferência metálica do arame tubular “metal cored”, por exemplo, no tipo de transferência, no tamanho das gotas formadas, na frequência de destacamento das mesmas e na forma de interação das gotas metálicas com o material do fluxo. Starling e Modenesi[4] estudaram, pela técnica de perfilografia (shadowgrafia), a transferência metálica do mesmo arame tubular “metal cored” avaliado no presente trabalho na soldagem com polaridade positiva e proteção por 75%Ar-25%CO₂ ou 100%CO₂ em condições essencialmente sem a ocorrência de curtos-circuitos. De uma forma geral, os autores perceberam que um aumento na corrente de soldagem resulta em uma redução no tamanho médio das gotas de metal e em um aumento na frequência de destacamento das mesmas. Também perceberam que, na soldagem com 100%CO₂, a transferência é do tipo globular repulsiva. Na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ para valores mais baixos de corrente, a transferência é do tipo globular com a presença de alguns curtos-circuitos. Para maiores valores intermediários de corrente na soldagem com 75%Ar-

25%CO₂, além da redução no diâmetro médio da gota, observa-se que a transferência ocorre de forma axial de forma similar a spray projetado. Para maiores valores de corrente na soldagem com o mesmo gás, o diâmetro médio da gota diminui e já se nota a formação de um pequeno filamento (alongamento) na ponta do eletrodo. A maior flutuação dos valores de corrente de soldagem e tensão do arco observada no presente trabalho para as soldas com 75%Ar-25%CO₂ e polaridade positiva realizadas com a menor velocidade de alimentação do arame (menor corrente de soldagem) são, assim, consistentes com os resultados de Starling e Modenesi [4].

De acordo com a Tabela 1, nota-se que na soldagem com 100%CO₂ (para as duas polaridades do eletrodo) ocorre uma pequena redução na eficiência de deposição (variação máxima de 62 pra 59 %) com o aumento da velocidade de alimentação, também indicando alguma redução na estabilidade operacional. A Figura 6 mostra que todas as soldas com 100%CO₂ apresentam respingos e cordões com irregularidades superficiais sendo que, em ambas as polaridades, um aumento na velocidade de alimentação resulta em algum aumento no nível de respingos, também revelando uma redução na estabilidade operacional. Ainda de acordo com a Tabela 1, nota-se que na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ (para as duas polaridades do eletrodo) ocorre um pequeno aumento na eficiência de deposição (variação máxima de 89 para 97 %) com o aumento na velocidade de alimentação, também indicando uma tendência de aumento na estabilidade operacional. A Figura 5 mostra que todas as soldas com 75%Ar-25%CO₂ apresentam poucos respingos e cordões regulares superficialmente sendo que, em ambas as polaridades, um aumento na velocidade de alimentação resulta em uma redução no nível de respingos, também revelando um aumento na estabilidade operacional.

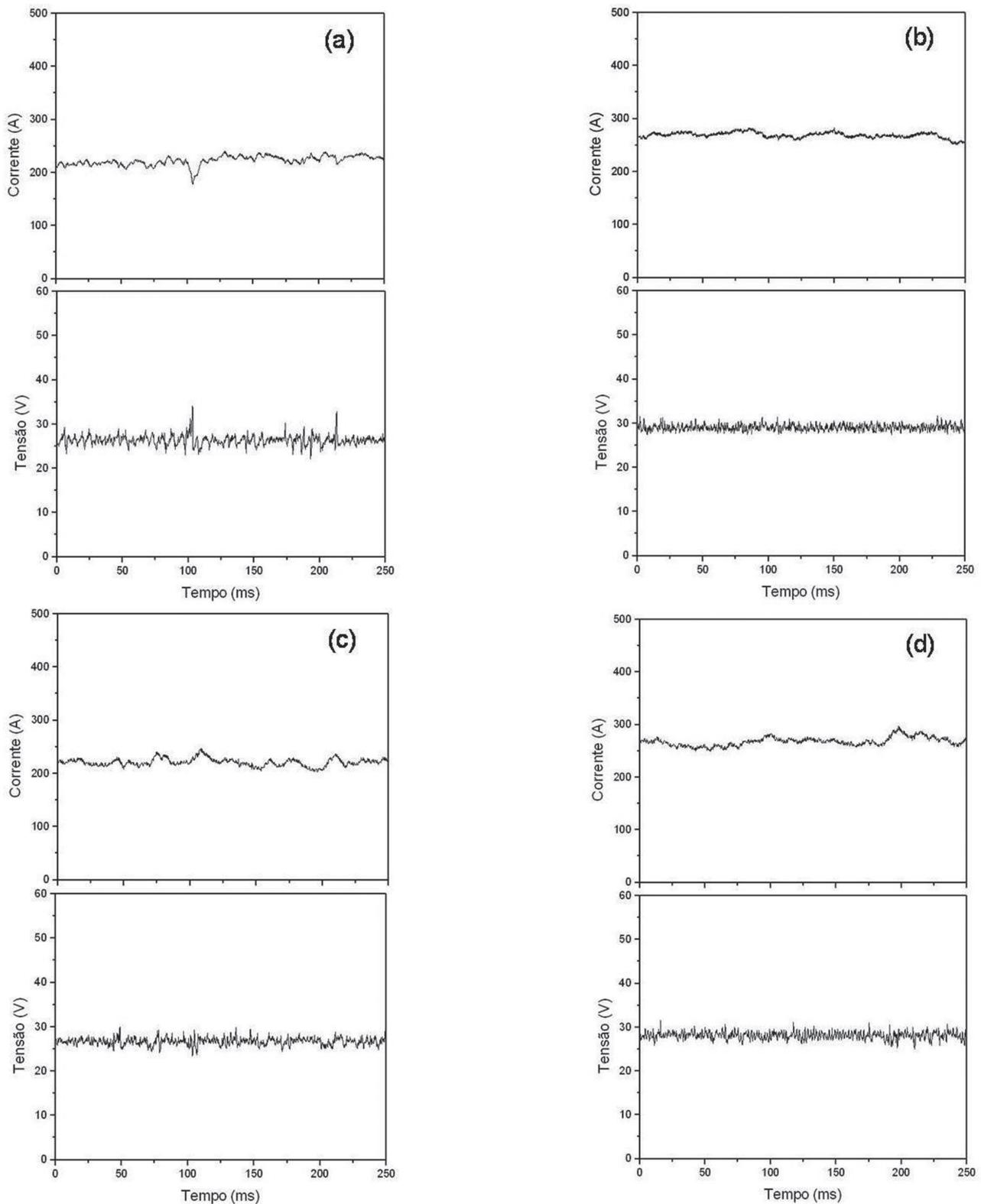


Figura 3. Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos para proteção com 75%Ar-25%CO₂.

(a) Polaridade positiva, $w = 7,10 \pm 0,03$ m/min, $I = 221 \pm 8$ A (3,6 %) e $V = 26,4 \pm 1,1$ V (4,2 %).

(b) Polaridade positiva, $w = 9,07 \pm 0,03$ m/min, $I = 270 \pm 6$ A (2,2 %) e $V = 29,0 \pm 0,7$ V (2,4 %).

(c) Polaridade negativa, $w = 7,00 \pm 0,03$ m/min, $I = 223 \pm 8$ A (3,6 %) e $V = 26,7 \pm 0,7$ V (2,6 %).

(d) Polaridade negativa, $w = 8,94 \pm 0,03$ m/min, $I = 266 \pm 7$ A (2,6 %) e $V = 28,1 \pm 0,9$ V (3,2 %).

w, I e V se referem, respectivamente, aos parâmetros “média \pm desvio padrão” dos valores de velocidade de alimentação do arame, corrente de soldagem e tensão do arco. Valores entre parênteses se referem à flutuação dos valores de corrente e tensão (relação entre o desvio padrão e média correspondente).

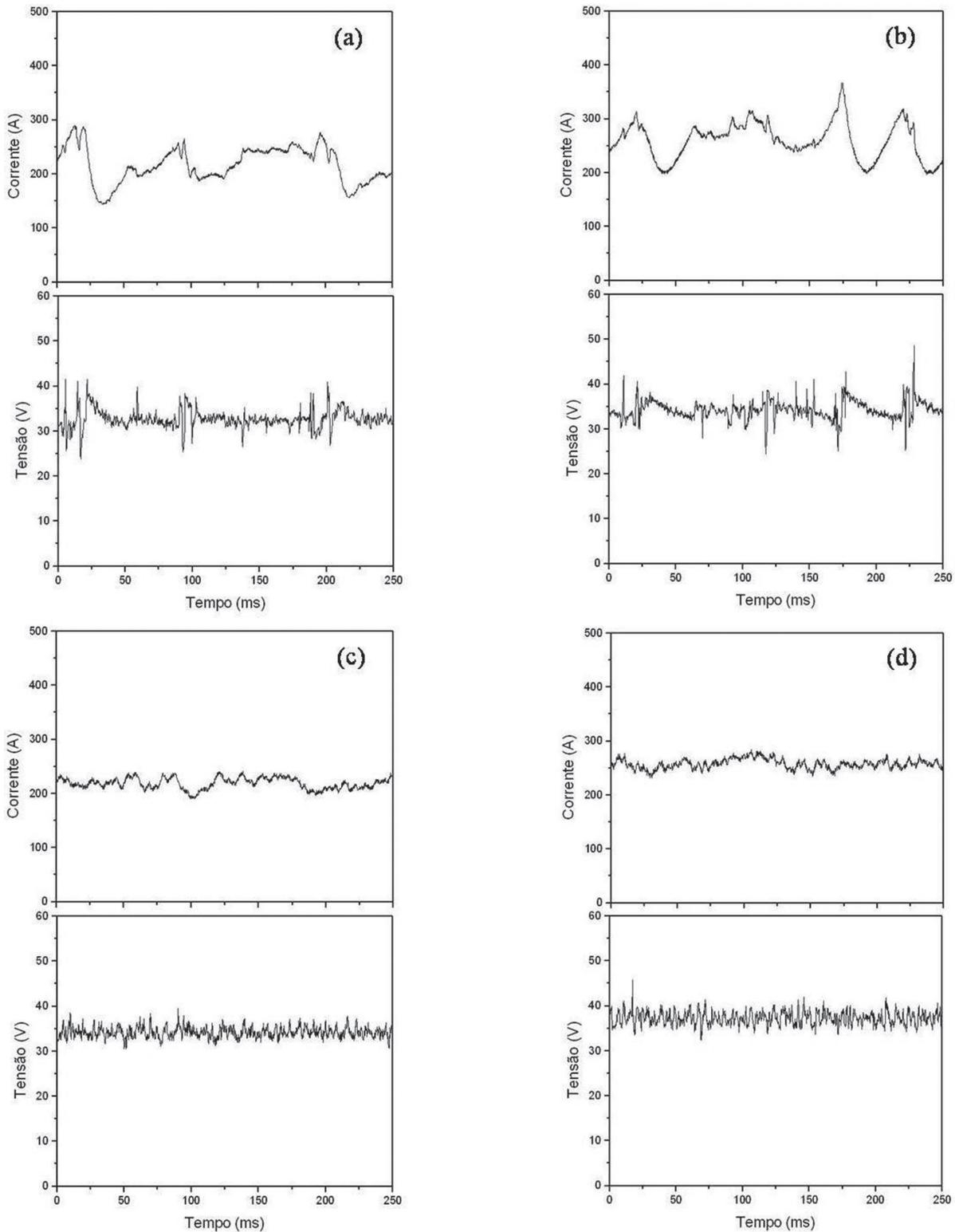


Figura 4. Oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos para proteção com 100%CO₂.

(a) Polaridade positiva, $w = 7,02 \pm 0,03$ m/min, $I = 217 \pm 34$ A (15,7 %) e $V = 32,6 \pm 2,2$ V (6,7 %).

(b) Polaridade positiva, $w = 8,94 \pm 0,02$ m/min, $I = 261 \pm 43$ A (16,5 %) e $V = 34,2 \pm 2,4$ V (7,0 %).

(c) Polaridade negativa, $w = 7,01 \pm 0,04$ m/min, $I = 218 \pm 12$ A (5,5 %) e $V = 34,2 \pm 1,3$ V (3,8 %).

(d) Polaridade negativa, $w = 8,95 \pm 0,03$ m/min, $I = 259 \pm 15$ A (5,8 %) e $V = 37,3 \pm 1,6$ V (4,3 %).

w , I e V se referem, respectivamente, aos parâmetros “média \pm desvio padrão” dos valores de velocidade de alimentação do arame, corrente de soldagem e tensão do arco. Valores entre parênteses se referem à flutuação dos valores de corrente e tensão (relação entre o desvio padrão e média correspondente).

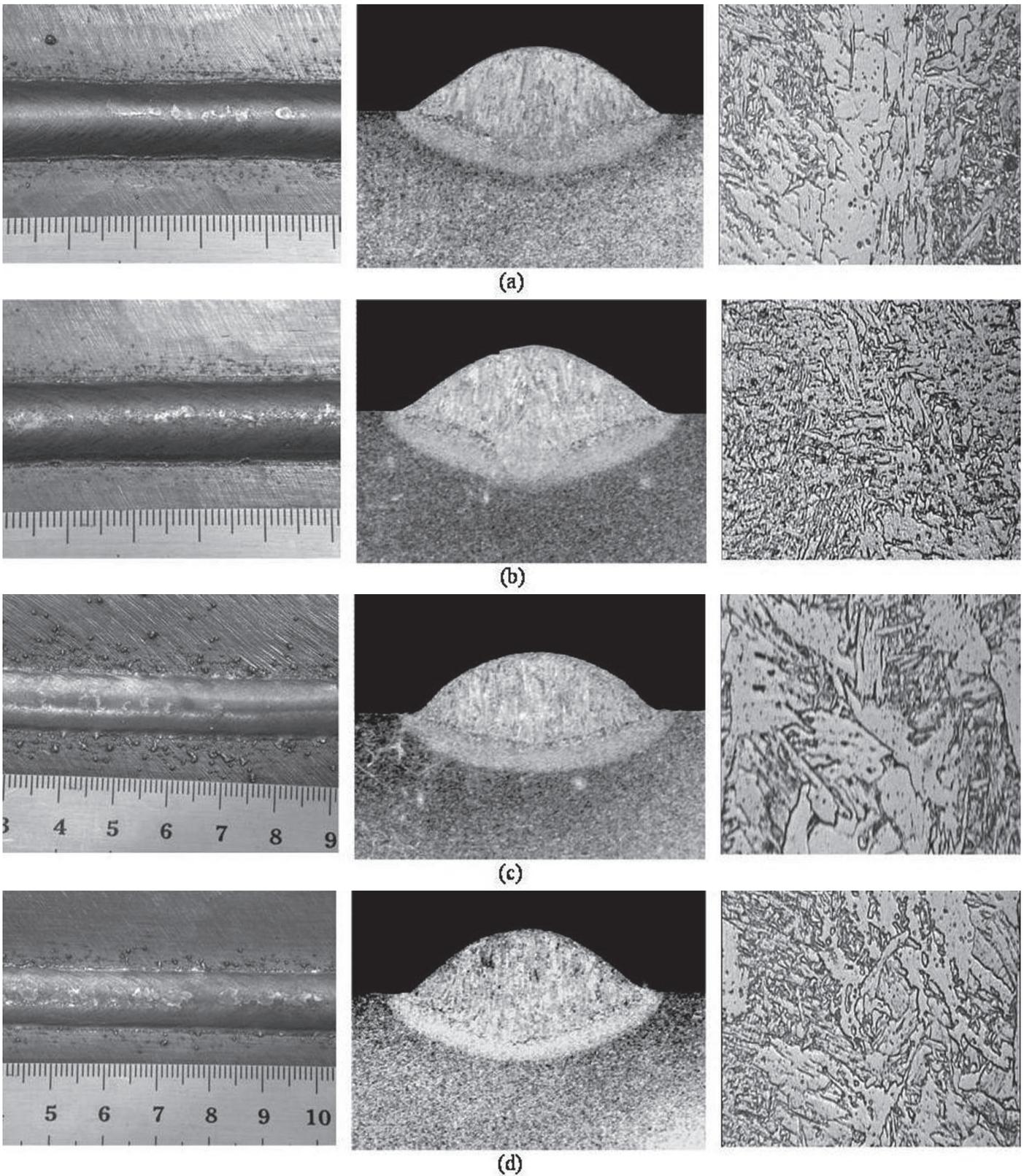


Figura 5. Cordões obtidos para as soldas do arame “metal cored” com 75%Ar-25%CO₂. Aspecto superficial (esquerda). Macrografia – Nital 10 % (centro). Micrografia – MO, aumento original 500 X, Nital 2 % (direita).

- (a) Polaridade positiva, velocidade de alimentação nominal de 7 m/min.
- (b) Polaridade positiva, velocidade de alimentação nominal de 9 m/min.
- (c) Polaridade negativa, velocidade de alimentação nominal de 7 m/min.
- (d) Polaridade negativa, velocidade de alimentação nominal de 9 m/min.

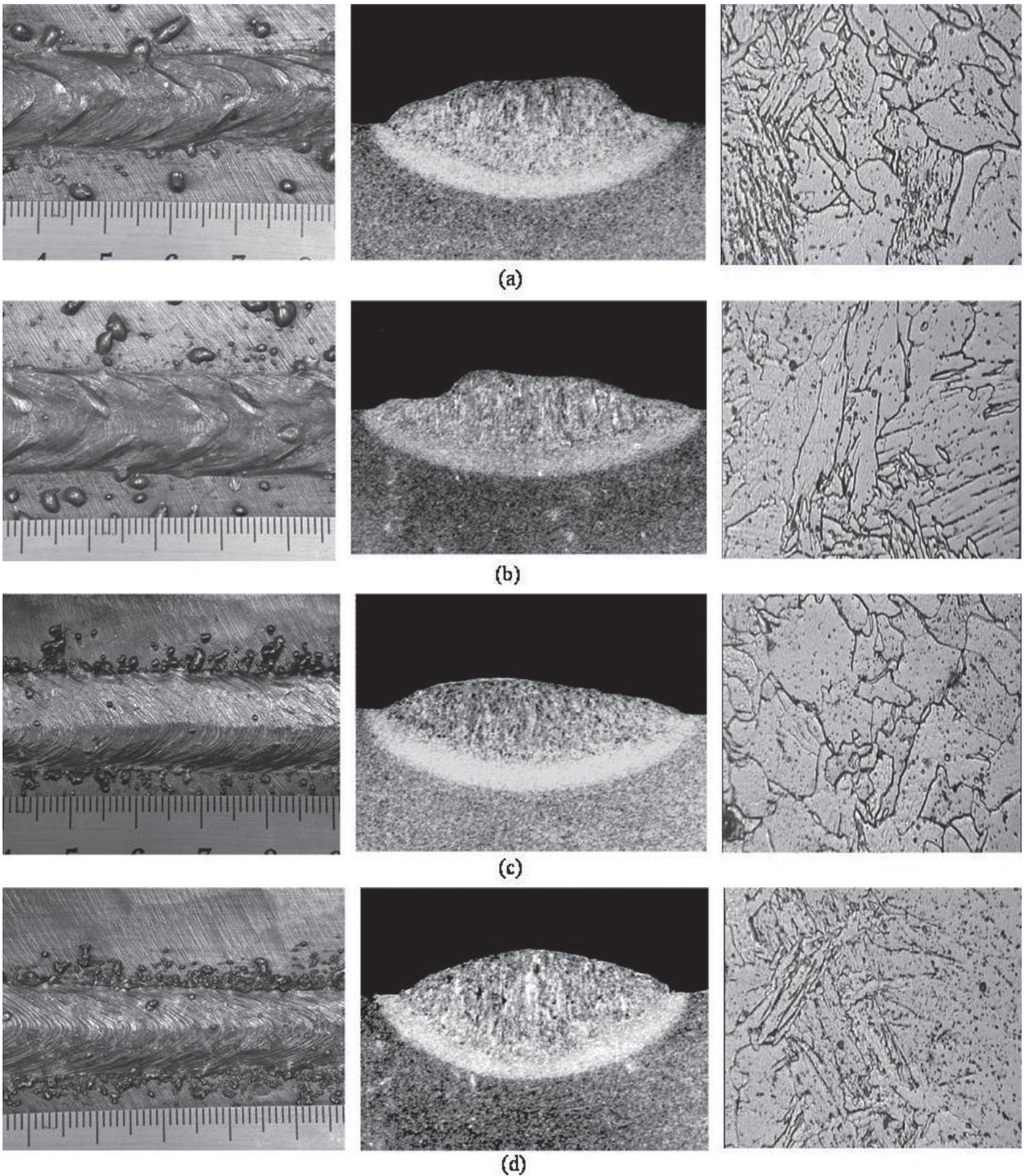


Figura 6. Cordões obtidos para as soldas do arame “metal cored” com 100%CO₂. Aspecto superficial (esquerda). Macrografia – Nital 10 % (centro). Micrografia – MO, aumento original 500 X, Nital 2 % (direita).

- (a) Polaridade positiva, velocidade de alimentação nominal de 7 m/min.
- (b) Polaridade positiva, velocidade de alimentação nominal de 9 m/min.
- (c) Polaridade negativa, velocidade de alimentação nominal de 7 m/min.
- (d) Polaridade negativa, velocidade de alimentação nominal de 9 m/min.

Tabela 1. Energia de soldagem (H), eficiência de deposição (ϕ_{tubular}) do arame (média avaliada em pelo menos duas soldas) e valor da taxa de deposição (TD_{tubular}). w – velocidade de alimentação nominal do arame.

Polaridade Eletrodo	Gás Proteção	w (m/min)	H (kJ/mm)	ϕ_{tubular} (%)	TD_{tubular} (kg/h)
Positiva	75%Ar-25%CO ₂	7	1,24	95	3,21
		9	1,31	96	4,18
	100%CO ₂	7	1,51	81	2,74
		9	1,49	80	3,48
Negativa	75%Ar-25%CO ₂	7	1,27	89	3,01
		9	1,25	97	4,22
	100%CO ₂	7	1,59	62	2,10
		9	1,61	59	2,57

Tabela 2. Parâmetros obtidos para os cordões de solda (média dos valores avaliados em duas macrografias). w – velocidade de alimentação nominal do arame, W – largura, h – reforço, P_{max} – penetração máxima, A_d – área depositada, A_p – área de penetração e δ – diluição.

Polaridade Eletrodo	Gás Proteção	w (m/min)	W (mm)	h (mm)	P_{max} (mm)	A_d (mm ²)	A_p (mm ²)	δ (%)
Positiva	75%Ar-25%CO ₂	7	12,3	3,3	2,3	28,9	12,6	30,8
		9	13,6	3,3	3,4	25,4	19,1	42,9
	100%CO ₂	7	15,4	2,3	2,7	21,2	25,0	54,1
		9	16,4	2,2	2,6	17,8	27,1	60,4
Negativa	75%Ar-25%CO ₂	7	11,8	3,0	1,5	22,5	12,5	35,7
		9	12,3	3,3	2,5	24,6	17,7	41,8
	100%CO ₂	7	16,0	1,8	2,8	16,3	32,1	66,3
		9	13,9	2,1	3,4	17,7	33,4	65,4

Tabela 3. Fração volumétrica dos microconstituintes presentes na zona fundida. Intervalo de confiança: 95 %.

Polaridade Eletrodo	Gás Proteção	w (m/min)	PF(G) (%)	PF(I) (%)	AF (%)	FS(NA) (%)	FS(A) (%)
Positiva	75%Ar-25%CO ₂	7	17,3±2,1	6,4±1,2	33,4±3,2	33,2±3,3	9,7±1,6
		9	17,1±1,9	5,5±1,2	30,5±3,3	35,6±3,1	11,3±1,9
	100%CO ₂	7	14,3±1,8	14,8±1,8	7,0±1,5	46,4±2,5	17,4±2,0
		9	11,3±1,5	13,6±1,5	8,3±1,3	47,2±2,3	19,6±2,3
Negativa	75%Ar-25%CO ₂	7	18,0±1,8	4,5±1,1	28,6±3,5	37,7±3,1	11,2±1,9
		9	16,5±2,0	5,0±1,1	33,1±3,5	33,8±3,4	11,6±1,9
	100%CO ₂	7	12,6±1,5	10,5±1,7	9,6±1,4	48,1±2,2	19,2±2,4
		9	15,4±1,8	12,1±1,9	7,7±1,6	47,5±2,4	17,3±2,5

PF(G) – ferrita primária de contorno de grão; PF(I) – ferrita primária intragranular; AF – ferrita acicular; FS(NA) e FS(A) – ferritas com segunda fase não alinhada e alinhada. w – velocidade de alimentação nominal.

Tabela 4. Dureza Vickers (HV) na zona fundida. Intervalo de confiança: 95 %. w – velocidade de alimentação nominal.

Polaridade Eletrodo	Gás Proteção	w (m/min)	HV (98,1 N)
Positiva	75%Ar-25%CO ₂	7	181 ± 6
		9	152 ± 4
	100%CO ₂	7	141 ± 2
		9	130 ± 7
Negativa	75%Ar-25%CO ₂	7	174 ± 3
		9	167 ± 3
	100%CO ₂	7	124 ± 2
		9	128 ± 3

A Tabela 2 e as macrografias das Figuras 5 e 6 indicam que um aumento na velocidade de alimentação do arame, para um mesmo tipo de gás de proteção e polaridade do eletrodo, afeta a geométrica do cordão. Esse aumento na velocidade de alimentação do arame resulta em uma tendência de aumentos (à exceção da solda com 100%CO₂ e polaridade negativa) da largura (variação máxima de 12,3 para 13,6 mm), aumentos (à exceção da solda com 100%CO₂ e polaridade positiva) da penetração máxima (variação máxima de 2,3 para 3,4 mm), aumentos da área de penetração (variação máxima de 12,6 para 19,1 mm²) e aumentos (à exceção da solda com 100%CO₂ e polaridade negativa) da diluição (variação máxima de 30,8 para 42,9 %). Entretanto, as variações do reforço e da área depositada com a velocidade de alimentação do arame parecem depender da polaridade do eletrodo. Para a polaridade negativa, nota-se uma tendência de aumentos do reforço (variação máxima de 3,0 para 3,3 mm) e da área depositada (variação máxima de 22,5 para 24,6 mm²) com o aumento da velocidade de alimentação do arame. Para a polaridade positiva, nota-se uma tendência de manutenção do reforço (variação máxima de 2,3 para 2,2 mm) e de redução da área depositada (variação máxima de 28,9 para 25,4 mm²) com o aumento da velocidade de alimentação do arame.

Como descrito na metodologia, um aumento da velocidade de alimentação (de 7 para 9 m/min) era acompanhado de um aumento proporcional da velocidade de soldagem (de 4,7 para 6 mm/s) de forma a se manter constante o volume da poça de fusão. Dessa forma, o aumento da velocidade de alimentação, apesar de resultar em um aumento nos valores médios da corrente de soldagem e da tensão do arco (Figuras 3 e 4), não resultava em variações significativas na energia de soldagem para um mesmo gás de proteção e polaridade do eletrodo (variação máxima de 1,24 para 1,31 kJ/mm, Tabela 1). Assim, como o comprimento do arco também foi mantido constante (3,5 mm), acredita-se que a variação observada na geometria do cordão quando se aumenta a velocidade de alimentação do arame decorra principalmente dos efeitos concorrentes da corrente de soldagem e da velocidade de soldagem. Com o aumento da corrente, uma maior quantidade de calor é transferida para a peça pelas regiões de queda catódica (na soldagem com o eletrodo positivo) ou de queda anódica (na soldagem com o eletrodo negativo)[18]. Dessa forma, na faixa operacional avaliada no presente trabalho, o efeito do aumento da corrente foi preponderante na determinação das tendências de aumentos observados na largura (à exceção da solda com 100%CO₂ e polaridade negativa), na penetração máxima (à exceção da solda 100%CO₂ e polaridade positiva) e na área de penetração. Por outro lado, um aumento da velocidade de soldagem implica em uma redução da quantidade de calor fornecido à junta por unidade de comprimento desta, sendo preponderante na determinação das tendências de reduções observadas na largura (para a solda com 100%CO₂ e polaridade negativa) e na penetração máxima (para a solda com 100%CO₂ e polaridade positiva). Apesar da manutenção da proporção entre a velocidade de alimentação do arame e da velocidade de soldagem, percebeu-se uma tendência de aumento (na soldagem com polaridade negativa) e de redução (na soldagem com polaridade positiva) da área depositada com o aumento da velocidade de

alimentação. Entretanto, de acordo com a Tabela 1, somente foi observado uma variação mais substancial (aumento) da eficiência de deposição com o aumento da velocidade de alimentação na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ e polaridade negativa. Dessa forma, acredita-se esta variação na área depositada, além das incertezas associadas à sua medida, também decorra de erros experimentais nos ajustes das velocidades de alimentação e de soldagem. A tendência de aumento da diluição com o aumento da velocidade de alimentação é decorrente de um maior acréscimo da área de penetração em relação às variações resultantes na área total do cordão (área de penetração mais área depositada).

Observando-se as microestruturas das Figuras 5 e 6 e os resultados da metalografia quantitativa apresentados na Tabela 3, percebe-se que um aumento na velocidade de alimentação do arame, para um mesmo tipo de gás de proteção e polaridade do eletrodo, não afetou fortemente a microestrutura da zona fundida. Isto é consistente com o fato da energia de soldagem não ter variado significativamente com o aumento da velocidade de alimentação (Tabela 1), resultando em pequenas variações na velocidade de resfriamento das soldas. Entretanto, de acordo com a Tabela 2, para um mesmo gás de proteção e polaridade do eletrodo, percebe-se a tendência de algum aumento da diluição (variação máxima de 30,8 para 42,9 %) com o aumento da velocidade de alimentação devendo, assim, resultar em alguma variação na composição química da zona fundida. Os resultados indicam que esta variação na composição química também não deve ter sido forte o suficiente para resultar em maiores alterações microestruturais. Entretanto, a variação na composição química pode ter contribuído para a tendência de redução da dureza com o aumento da velocidade de alimentação do arame (variação máxima de 181 para 152 HV), à exceção da soldagem com 100%CO₂ e polaridade negativa, como observado na Tabela 4.

3.2 Efeito do Gás de Proteção

Pelas Figuras 3 e 4 observa-se também que, para uma mesma polaridade do eletrodo e velocidade de alimentação do arame, um aumento do teor de CO₂ no gás de proteção (soldagem com 100%CO₂ em relação à soldagem com 75%Ar-25%CO₂) resulta em uma pequena redução na corrente média de soldagem (variação máxima de 270 para 261 A) e em um aumento na tensão média do arco (variação máxima de 28,1 para 37,3 V). Este aumento da tensão do arco pode estar associado à maior condutividade térmica do gás constituído por CO₂ puro[19]. A condutividade térmica do gás afeta fortemente o fluxo de elétrons na coluna do arco. Gases de alta condutividade térmica devem aumentar a resistividade do arco e podem exigir, para corrente de soldagem e comprimento de arco equivalentes, um aumento na tensão do arco. Ainda de acordo com as Figuras 3 e 4, percebe-se que um aumento do teor de CO₂ no gás de proteção (para uma mesma velocidade de alimentação do arame e polaridade do eletrodo) também resulta em uma maior flutuação nos valores de corrente de soldagem e de tensão do arco. Dessa forma, o aumento do teor de CO₂ sugere uma redução da estabilidade operacional do processo FCAW de forma similar ao que ocorre no processo GMAW. No estudo sobre transferência metálica do mesmo arame tubular “metal cored” utilizado no presente

trabalho, Starling e Modenesi[4] também perceberam que, na polaridade avaliada (positiva) e em um mesmo nível de corrente, a transferência metálica ocorre com um maior tamanho das gotas de metal na soldagem com 100%CO₂ e com uma maior frequência de destacamento das gotas na soldagem com 75%Ar-25%CO₂. Isto indicaria uma tendência de maiores variações no comprimento efetivo do arco na soldagem com 100%CO₂ e, assim, nas maiores flutuações dos valores de corrente de soldagem e tensão do arco observadas no presente trabalho para o mesmo gás de proteção.

De acordo com a Tabela 1, nota-se que, para uma mesma polaridade do eletrodo e velocidade de alimentação do arame, um aumento do teor de CO₂ no gás de proteção resulta em reduções na eficiência de deposição (variação máxima de 97 para 59 %). Pelas Figuras 5 e 6 também se percebe que um aumento do teor de CO₂, para uma mesma polaridade do eletrodo e velocidade de alimentação do arame, também resulta em um aumento do nível de respingos e em cordões com algumas irregularidades superficiais. Estes efeitos também são evidências da redução da estabilidade operacional quando se aumenta o teor de CO₂ no gás de proteção na soldagem com o arame tubular “metal cored”. Também se percebe que os respingos formados nas soldas com 100% CO₂ são mais grosseiros do que aqueles formados nas soldas com 75%Ar-25%CO₂ indicando para o primeiro gás a tendência de formação de gotas de metal mais grosseiras durante a transferência metálica.

A Tabela 2 e as macrografias das Figuras 5 e 6 indicam que um aumento do teor de CO₂ no gás de proteção (para uma mesma velocidade de alimentação do arame e polaridade do eletrodo) afeta as características geométricas do cordão, resultando em aumentos da largura (variação máxima de 11,8 para 16,0 mm), área de penetração (variação máxima de 12,5 para 32,1 mm), diluição (variação máxima de 35,7 para 66,3 mm) e (à exceção da solda com velocidade de alimentação de 9 mm/min e polaridade positiva) da penetração máxima (variação máxima de 1,5 para 2,8 mm). Entretanto, percebem-se reduções no reforço (variação máxima de 3,3 para 2,1 mm) e na área depositada (variação máxima de 25,4 para 17,8 mm²) com o aumento do teor de CO₂ no gás de proteção. É sabido que o aumento do teor de CO₂ no gás de proteção aumenta a condutividade térmica da coluna de plasma, promovendo uma maior transferência de calor para a peça. Como discutido, o aumento da condutividade térmica também se reflete em um aumento na tensão média do arco, resultando em um aumento da energia de soldagem com o aumento do teor de CO₂ no gás de proteção (variação máxima de 1,25 para 1,61 kJ/mm, Tabela 1), podendo, assim, também resultar em um aumento no calor imposto à peça. Estes fatores justificariam os aumentos da largura, penetração máxima (à exceção da solda com velocidade de alimentação de 9 mm/min e polaridade positiva) e área de penetração com o aumento do teor de CO₂ observados no presente trabalho, da mesma forma como ocorre na soldagem com arames maciços. A redução na eficiência de deposição com o aumento do teor de CO₂ no gás de proteção (Tabela 1) justificaria a redução observada da área depositada com o aumento do teor de CO₂, mesmo com a manutenção da razão entre as velocidades de alimentação e de soldagem. A redução da área depositada, associada aos

aumentos da área de penetração e da largura, também justificaria o aumento da diluição e a redução do reforço observados no presente trabalho com o aumento do teor de CO₂.

Observando-se as microestruturas das Figuras 5 e 6 e os resultados da metalografia quantitativa apresentados na Tabela 3, percebe-se que um aumento do teor de CO₂ no gás de proteção afeta a microestrutura da zona fundida. De uma forma geral, um aumento do teor de CO₂ (mantendo uma mesma velocidade de alimentação do arame e polaridade do eletrodo) resulta principalmente em aumentos nas frações de ferrita primária intragranular (PF(I), variação máxima de 6,4 para 14,8 %), ferrita com segunda fase não alinhada (FA(NA), variação máxima de 33,8 para 47,5 %) e ferrita com segunda fase alinhada (FS(A), variação máxima de 11,3 para 19,6 %) às custas das reduções das frações de ferrita primária de contorno de grão (PG(G), variação máxima de 17,1 para 11,3 %) e ferrita acicular (AF, variação máxima de 33,4 para 7,0 %). Da mesma forma, percebe-se que a microestrutura resultante das soldas com 100%CO₂ (Figura 6) é mais grosseira que a resultante das soldas com 75%Ar-25%CO₂ (Figura 5). Nota-se também que um aumento do teor de CO₂ (mantendo uma mesma velocidade de alimentação do arame e polaridade do eletrodo) também resulta em uma tendência de redução da dureza da zona fundida (variação máxima de 174 para 124 HV, Tabela 4). Como discutido, um aumento no teor de CO₂ no gás de proteção (mantendo uma mesma velocidade de alimentação do arame e polaridade do eletrodo) resulta em um aumento da energia de soldagem (Tabela 1) e, assim, em uma redução da velocidade de resfriamento das soldas. Um aumento no teor de CO₂ (devido ao seu caráter oxidante) também altera a composição química do depósito devido às perdas por oxidação de elementos de liga e, assim, reduz a temperabilidade da zona fundida. Como consequência, é de se esperar o aumento observado em microconstituintes de mais alta temperatura de transformação (PF(I) e FS(A) - provavelmente ferrita de placas laterais) e a redução de microconstituintes de mais baixa temperatura de transformação (no caso AF), associado à redução na dureza da zona fundida. Por outro lado, a redução observada na fração de PF(G) (microconstituinte de alta temperatura de transformação) poderia ser justificada por grãos austeníticos prévios mais grosseiros, o que dificultaria a formação do mesmo e favoreceria a formação de outros microconstituintes, inclusive de baixa temperatura de transformação como a FS(NA). Da mesma forma, os aumentos da diluição com o aumento do teor de CO₂ no gás de proteção também podem resultar em variações na composição química da zona fundida e, assim, também contribuir para as alterações microestruturais e de dureza observadas.

3.3 Efeito da Polaridade do Eletrodo

Pelas Figuras 3 e 4, observa-se que uma mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa (para um mesmo tipo de gás de proteção) resulta em pequenos aumentos na corrente média na soldagem com velocidade de alimentação do arame de 7m/min (variação máxima de 221 para 223 A) e em pequenas reduções na corrente média na soldagem com velocidade de alimentação do arame de 9m/min (variação máxima de 270 para 266 A).

Ainda, observa-se que, para um mesmo tipo de gás de proteção e uma mesma velocidade de alimentação do arame, uma mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa resulta em uma tendência de pequeno aumento na tensão média do arco (variação máxima de 34,2 para 37,3 V). Entretanto, na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ e velocidade de alimentação de 9m/min, observou-se uma pequena redução na tensão média do arco (variação de 29,0 para 28,1 V) com a mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa. Segundo Lancaster[18], é de se esperar na soldagem com eletrodos consumíveis maciços e polaridade negativa uma maior geração de calor na região do eletrodo, resultando em uma redução da corrente necessária para fundir o arame em relação à soldagem com polaridade positiva. Entretanto, para o arame tubular “metal cored”, esta tendência não foi observada na soldagem com a velocidade de alimentação do arame de 7 m/min e, na soldagem com 9 m/min, a redução da corrente média com a mudança da polaridade de positiva para negativa foi insignificante. Esperam-se também diferenças nos mecanismos responsáveis pela emissão a frio (não termiônica) de elétrons quando o cátodo é constituído pelo arame (polaridade do eletrodo negativa) ou pela peça a ser soldada (polaridade do eletrodo positiva). Estes mecanismos podem ser baseados principalmente na existência de camadas de óxidos na superfície do cátodo e, eventualmente, na formação de vapores metálicos em cátodos sem filme de óxidos [18,20]. Estas mudanças nos mecanismos de emissão a frio de elétrons podem resultar em alguma alteração no valor médio da tensão do arco, mesmo quando o comprimento do arco é mantido constante. De acordo com as Figuras 3 e 4, percebe-se que uma mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa na soldagem com velocidade de alimentação do arame de 7 m/min (para um mesmo gás de proteção) resulta em uma menor flutuação nos valores de corrente de soldagem e de tensão do arco, indicando um aumento da estabilidade operacional do processo. Entretanto, para a velocidade de alimentação do arame de 9m/min, percebe-se que a mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa resulta em uma menor flutuação nos valores de corrente de soldagem e de tensão do arco (na soldagem com 100%CO₂, indicando um aumento da estabilidade operacional do processo) e uma maior flutuação nos valores de corrente de soldagem e de tensão do arco (na soldagem com 75%Ar-25%CO₂, indicando uma redução da estabilidade operacional do processo). Portanto, a polaridade do eletrodo deve interferir de forma distinta nos parâmetros da transferência metálica do arame tubular “metal cored” dependendo do tipo de gás de proteção e/ou do nível de corrente de soldagem.

De acordo com a Tabela 1, nota-se que, para um mesmo tipo de gás de proteção e velocidade de alimentação do arame, uma mudança na polaridade do eletrodo de positiva para negativa resulta em uma tendência de redução na eficiência de deposição, sendo esta redução mais significativa na soldagem com 100%CO₂ (variação máxima de 80 para 59 %). Entretanto, na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ e velocidade de alimentação do arame de 9 m/min, a eficiência de deposição tendeu a se manter com a mudança na polaridade do eletrodo. Pelas Figuras 5 e 6 também se percebe que a polaridade negativa, para um mesmo gás de proteção e velocidade de alimentação do arame, resulta

em um aumento do nível de respingos em relação à soldagem com polaridade positiva. Esses efeitos são evidências da redução da estabilidade operacional quando se utiliza a polaridade do eletrodo negativa na soldagem com o arame tubular “metal cored”. A mudança na polaridade do eletrodo de positiva para negativa (para uma mesma velocidade de alimentação do arame) não afeta o aspecto superficial regular do cordão na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ (Figura 5), entretanto, torna o aspecto superficial do cordão menos irregular na soldagem com 100%CO₂ (Figura 6). Na soldagem com 100%CO₂ e uma mesma velocidade de alimentação do arame (Figura 6), os respingos formados com a polaridade negativa são mais finos em relação aos formados com a polaridade positiva, indicando para a polaridade negativa a tendência de formação de gotas de metal mais finas durante a transferência metálica. Estes efeitos também sugerem que a polaridade do eletrodo deve interferir de forma distinta nos parâmetros da transferência metálica do arame tubular “metal cored” dependendo do tipo de gás de proteção.

A Tabela 2 e as macrografias das Figuras 5 e 6 indicam que uma mudança na polaridade do eletrodo de positiva para negativa (para um mesmo gás de proteção e uma mesma velocidade de alimentação do arame) afeta as características geométricas do cordão. Essa mudança na polaridade resulta em tendências de reduções (à exceção da solda com 100%CO₂ e velocidade de alimentação do arame de 7 m/min) da largura (variação máxima de 16,4 para 13,9 mm), reduções (à exceção da solda com 75%Ar-25%CO₂ e velocidade de alimentação do arame de 9 m/min) do reforço (variação máxima de 2,3 para 1,8 mm), reduções da área depositada (variação máxima de 28,9 para 22,5 mm²) e aumentos (à exceção da solda com 75%Ar-25%CO₂ e velocidade de alimentação do arame de 9 m/min) da diluição (variação máxima de 54,1 para 66,3 %). Entretanto, as variações da penetração máxima e da área de penetração com a mudança na polaridade do eletrodo de positiva para negativa parecem depender do gás de proteção utilizado. Para as soldas com 100%CO₂, nota-se uma tendência de aumentos da penetração máxima (variação máxima de 2,6 para 3,4 mm) e da área de penetração (variação máxima de 25,0 para 32,1 mm²) com a mudança na polaridade do eletrodo de positiva para negativa. Para as soldas com 75%Ar-25%CO₂, nota-se uma tendência de reduções da penetração máxima (variação máxima de 3,4 para 2,5 mm²) e da área de penetração (variação máxima de 19,1 para 17,7 mm²) com a mudança na polaridade do eletrodo de positiva para negativa. Como relatado, a mudança na polaridade do eletrodo de positiva para negativa não resultou em maiores variações na corrente média de soldagem e na tensão média do arco (Figuras 3 e 4) e, assim, não implicou em maiores alterações na energia de soldagem (variação máxima de 1,49 para 1,61 kJ/mm, Tabela 1). Entretanto, segundo Lancaster[18], é de se esperar na soldagem com eletrodos consumíveis maciços e polaridade negativa uma menor geração de calor na região da peça o que tenderia a reduzir a largura e a penetração do cordão. Assim, as reduções observadas da largura (à exceção da solda com 100%CO₂ e velocidade de alimentação do arame de 7 m/min), da penetração máxima (para as soldas com 75%Ar-25%CO₂) e da área de penetração (para as soldas com 75%Ar-

25%CO₂) com a mudança na polaridade do eletrodo de positiva para negativa revelam um comportamento do arame tubular “metal cored” similar aos arames maciços. Entretanto, para as soldas com 100%CO₂, os aumentos observados da penetração máxima e da área de penetração com a mudança na polaridade do eletrodo de positiva para negativa indicam que o arame tubular “metal cored” apresenta um comportamento distinto de arames maciços. A tendência de redução na eficiência de deposição com a mudança na polaridade do eletrodo de positiva para negativa (Tabela 1), associada a possíveis erros experimentais nos ajustes das velocidades de alimentação e de soldagem e a incertezas nas medições das áreas, justificaria a redução observada da área depositada com a referida mudança na polaridade, mesmo com a manutenção da razão entre as velocidades de alimentação do arame e de soldagem. Na soldagem com 100%CO₂, a tendência de aumento da diluição com a mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa é consistente com o aumento da área de penetração e com a redução da área depositada associadas à referida mudança da polaridade. Na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ e velocidade de alimentação do arame de 7m/min, o aumento da diluição com a mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa é decorrente de uma menor redução da área de penetração em relação à redução da área total do cordão (área de penetração mais área depositada) com a referida mudança da polaridade. Inversamente, na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ e velocidade de alimentação do arame de 9 m/min, a redução da diluição com a mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa é decorrente de uma maior redução da área de penetração em relação à redução da área total do cordão. Dessa forma, ao contrário da soldagem com arames maciços, na soldagem com o arame tubular “metal cored” o efeito da mudança de polaridade positiva para negativa na diluição parece depender da combinação entre o gás de proteção e a velocidade de alimentação do arame. Como discutido anteriormente, a mudança na polaridade do eletrodo interfere de forma distinta na eficiência de deposição e nos parâmetros da transferência metálica do arame tubular “metal cored” dependendo do tipo de gás de proteção e da velocidade de alimentação do arame, o que pode resultar em diferentes tendências de variações nas áreas depositada e de penetração e, conseqüentemente, na diluição.

Observando-se as microestruturas das Figuras 5 e 6 e os resultados da metalografia quantitativa apresentados na Tabela 3, percebe-se que a mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa, para um mesmo do tipo de gás de proteção e velocidade de alimentação do arame, não afetou fortemente a microestrutura da zona fundida. Como discutido, a mudança da polaridade do eletrodo de positiva para a negativa tendeu a promover alguma alteração na diluição (variação máxima de 54,1 para 66,3 %, Tabela 2) e, assim, deve resultar em alguma variação na composição química da zona fundida. Da mesma forma, apesar da energia de soldagem não ter variado significativamente com a mudança da polaridade (variação máxima de 1,49 para 1,61 kJ/mm, Tabela 1), é de se esperar que ocorra alguma variação no rendimento térmico do processo com a mudança da polaridade resultando, assim, em alguma variação na velocidade de resfriamento das soldas. Os resultados indicam que estas eventuais variações na composição química

e na velocidade de resfriamento com a mudança na polaridade do eletrodo não devem ter sido fortes o suficiente para resultar em maiores alterações microestruturais da zona fundida. Entretanto, como observado na Tabela 4, estas variações podem ter contribuído para as tendências de aumento (na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ e velocidade de alimentação do arame de 9 m/min) e de redução (na soldagem com 100%CO₂ e velocidade de alimentação do arame de 7m/min) da dureza da zona fundida com a mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa.

3.4 Condições Operacionais Otimizadas

Em princípio, deseja-se na soldagem de chapas grossas de aços estruturais com o arame tubular “metal cored” condições de boa estabilidade operacional e de maior produtividade (maior taxa de deposição). É desejável que essas condições sejam associadas a um cordão com boa aparência superficial, boa penetração e ausência de descontinuidades. Também se almeja uma microestrutura com predominância de microconstituintes capazes de favorecer uma maior resistência mecânica, aliada a uma boa tenacidade e ductilidade da solda (por exemplo, com teores mais altos de ferrita acicular e mais baixos de ferrita primária de contorno de grão).

De acordo com as macrografias das Figuras 5 e 6, percebe-se que todas as condições operacionais avaliadas resultaram em cordões com aparentemente os mesmos níveis de porosidades e inclusões de escória e sem a presença de mordeduras. De acordo com a Tabela 1, as maiores taxas de deposição ocorreram na soldagem com a maior velocidade de alimentação do arame (principalmente na soldagem com 75%Ar-25%CO₂). As melhores estabilidades operacionais e que também resultaram em cordões com boa aparência superficial ocorreram na soldagem por 75%Ar-25%CO₂ (principalmente com a polaridade do eletrodo positiva). De acordo com a Tabela 4, as microestruturas com maior dureza (capazes de favorecer uma maior resistência mecânica) ocorreram na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ (principalmente para a menor velocidade de alimentação do arame). De acordo com a Tabela 3, o teor de ferrita primária de contorno de grão não variou apreciavelmente entre as condições avaliadas, entretanto, os maiores teores de ferrita acicular (capazes de favorecer uma melhor tenacidade) ocorreram nas soldas com 75%Ar-25%CO₂. Entretanto, de acordo com a Tabela 2, as maiores penetrações ocorreram na soldagem com 100%CO₂ (principalmente para a polaridade do eletrodo negativa).

Assim, caso uma boa taxa de deposição, associada a uma boa estabilidade operacional, a uma boa aparência superficial do cordão e a propriedades mecânicas adequadas da solda sejam os requisitos principais, as condições de soldagem mais adequadas envolveriam a utilização da maior velocidade de alimentação do arame (9 m/min) com proteção por 75%Ar-25%CO₂ e operação com polaridade do eletrodo positiva. Alternativamente, caso uma boa taxa de deposição, associada a uma boa penetração sejam os requisitos fundamentais, as condições de soldagem mais adequadas envolveriam a utilização da maior velocidade de alimentação do arame (9 m/min) com proteção por 100%CO₂

e operação com polaridade do eletrodo negativa.

4. Conclusões

Para as condições avaliadas na soldagem sobre chapa em posição plana com o arame tubular “metal cored”, variando-se isoladamente a composição do gás de proteção, a polaridade do eletrodo e a velocidade de alimentação do arame:

- Um aumento da velocidade de alimentação do arame (associada a um aumento proporcional na velocidade de soldagem) eleva os valores médios de corrente e tensão de soldagem e tende a reduzir a estabilidade operacional com proteção de CO₂ puro (medida pelas oscilações de corrente e tensão, eficiência de deposição e níveis de respingos) e aumentá-la com proteção de 75%Ar-25%CO₂ (medida pelas oscilações de corrente e tensão na soldagem com polaridade positiva, eficiência de deposição e nível de respingos). Não foram observadas variações significativas nas descontinuidades (porosidade, inclusões de escória e mordedura) e na microestrutura do cordão em função de variações na velocidade de alimentação do arame, embora tenham sido observadas reduções na dureza e variações no formato do cordão.
- Um aumento do teor de CO₂ no gás de proteção resulta em uma pequena variação no valor médio da corrente de soldagem e em um aumento no valor médio da tensão de soldagem e tende a reduzir a estabilidade operacional (medida pelas oscilações de corrente e tensão, eficiência de deposição e níveis de respingos e de irregularidades superficiais do cordão). O aumento do teor de CO₂ resultou em variações no formato do cordão com formação de uma microestrutura mais grosseira e de menor dureza (com menores teores de ferrita acicular e de ferrita primária de contorno de grão) e com manutenção do nível de descontinuidades (porosidade, inclusões de escória e mordedura).
- Uma mudança da polaridade do eletrodo de positiva para negativa resulta em pequenas variações nos valores médios de corrente e tensão de soldagem e tende a aumentar a estabilidade operacional (medida pelo nível de irregularidades superficiais do cordão na soldagem com CO₂ puro) ou diminuir a estabilidade operacional (medida pela eficiência de deposição principalmente na soldagem com CO₂ puro e nível de respingos). Não foram observadas variações significativas nas descontinuidades (porosidades, inclusões de escória e mordeduras) e na microestrutura do cordão em função de mudança da polaridade, entretanto, observaram-se variações na dureza e no formato do cordão.
- As condições de soldagem mais adequadas envolveriam a utilização da maior velocidade de alimentação do arame (9 m/min) com proteção por 75%Ar-25%CO₂ e polaridade positiva (para uma boa taxa de deposição, associadas à adequadas estabilidade operacional, aparência superficial do cordão e propriedades mecânicas da solda) ou com proteção por 100%CO₂ e polaridade negativa (para uma boa taxa de deposição, associada a uma boa penetração).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Em particular à FAPEMIG pelo apoio financeiro (concessão de bolsa de iniciação científica e contratação do Projeto de Pesquisa TEC 423/06) e à ESAB pelo fornecimento dos arames tubulares.

6. Referências Bibliográficas

- [1] MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. Soldagem Mig/Mag e com Arame Tubular. In: MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 1a. ed., Belo Horizonte: UFMG, 2005. p.233-261.
- [2] AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Process. In: AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook, v.2, 8th ed., Miami: AWS, 1991. p.158-190.
- [3] STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J. Proposição de Modelo para a Fusão de Arames Tubulares, Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.12, n.3, p.168-178, 2007.
- [4] STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J. Avaliação da Transferência de Metal de Arames Tubulares, Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.11, n.3, p.147-155, 2006.
- [5] STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J. Avaliação da Velocidade de Fusão do Arame na Soldagem FCAW com Eletrodo Negativo, Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.10, n.1, p.31-37, 2005.
- [6] STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J. Efeito da Polaridade do Eletrodo na Velocidade de Fusão de Arames Tubulares, Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.10, n.3, p.101-108, 2005.
- [7] STARLING, C.M.D. et al. Avaliação da Velocidade de Fusão de Arames Tubulares, Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.9, n.1, p.31-37, 2004.
- [8] OLIVEIRA, J.E.M.; BRACARENSE, A.Q. Estudo da Morfologia do Cordão de Solda Obtido com o Processo Arame Tubular em Diferentes Posições de Soldagem. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 29, 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2003, 12p.
- [9] ARAÚJO, W.R. Comparação entre a Soldagem Robotizada com Arame Sólido e “Metal Cored” - A ocorrência do “Finger”: 2004. 79p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [10] BRAGA, E.M.; MOTA, C.A.M.; FARIAS, J.P. Uma Contribuição ao Estudo da Soldagem a Arame Tubular Autoprotégido em Corrente Pulsada. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 24, 1998, Fortaleza. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1998. 10p.
- [11] BLACKMAN, S. et al. Pulsed MIG Welding with Gás-Shielded Flux Cored Wires - MIG Synergic Update, Welding & Metal Fabrication - Special Supplement, p.12-14, abril 1998.
- [12] SVOBODA, H. et al. Efecto de los Parámetros de Soldadura sobre las Propiedades de los Depósitos Ferríticos Aleados al C-Mn-Ni Obtenidos con Alambres Tubulares de Relleno Rutilíco y Metálico. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM,

29, 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2003. 12p.

[13] VENTRELLA, V.A. Microestrutura e Tenacidade do Aço API 5LX – Grau 70 Soldado com Arame Tubular AWS E-81T1-Ni1 e Eletrodo Revestido AWS E-8010-G. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 26, 2004, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2004. 15p.

[14] SANTOS NETO, N.F.; TREVISAN, R.E. Caracterização de Juntas de Aço API 5L X-70 Soldadas pelo Processo de Soldagem a Arco com Arame Tubular Autoprotégido. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 30, 2004, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2004. 8p.

[15] FALS, H.C.; TREVISAN, R.E. Características do Trincamento Assistido pelo Hidrogênio de um Aço Microligado Soldado pelo Processo FCAW. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 24, 1998, Fortaleza. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1998. 10p.

[16] INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING. IIW Doc. n. IX-1533-88; Guide to the Light Microscope Examination of Ferritic Steel Weld Metals. 1988. 20p.

[17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM E562-89; Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count. Philadelphia, 1989. Annual Book of ASTM Standards, p. 502-507.

[18] LANCASTER, J.F. The Physics of Welding. 2.ed. Pergamon Press & International Institute of Welding, 1986. 340p.

[19] TUSEK, J.; SUBAN, M. Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel, International Journal of Hydrogen Energy, Slovenia, v.25, n.25, p.369-376, 2000.

[20] GUILÉ, A.E.; JUTTNER, B. Basic erosion processes of oxidized and clean metal cathodes by electric arcs, IEEE trans. Plasma Sci, n.8 p.259-69, sept. 1980.