

Comparação do Desempenho Operacional e das Características do Cordão na Soldagem com Diferentes Arames Tubulares

(Comparison of Operational Performance and Bead Characteristics when Welding with Different Tubular Wires)

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

³Universidade Federal de Minas Gerais, Engenheiro Metalurgista, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, tadeumborba@yahoo.com.br

Resumo

Este trabalho objetivou o estudo comparativo das características do cordão produzido por arames tubulares nacionais dos tipos rutilico (ASME SFA-5.20: E71T-1/E71T-9/E71T-9M), básico (ASME SFA-5.20: E71T-5/E71T-5M) e “metal cored” (ASME SFA-5.18: E70C-3M) com 1,2 mm, destinados à soldagem de aços 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 carbono comum 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, na soldagem com cada tipo de arame tubular; a composição do gás de proteção (75%Ar-25%CO₂ e 100%CO₂) e a velocidade de alimentação do arame (7 e 9 m/min). Os demais parâmetros foram mantidos fixos, incluindo-se a polaridade do eletrodo (CC+) e os comprimentos energizado do eletrodo (16 mm) e do arco (3,5 mm). Para os diferentes arames tubulares, avaliaram-se comparativamente as 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 as condições operacionais associadas a um cordão com características adequadas à soldagem de chapas grossas de aços estruturais.

Palavras-chave: Processo FCAW; Arame Tubular; Formato do Cordão; Microestrutura.

Abstract: This paper compares the bead characteristics of welds deposited of carbon steel tubular wires. Three tubular wires of 1.2 mm produced in Brazil were used: rutilic (ASME SFA-5.20: E71T-1/E71T-9/E71T-9M), basic (ASME SFA-5.20: E71T-5/E71T-5M) and metal cored (ASME SFA-5.18: E70C-3M). Welding trials were performed in downhand position on thick (12 mm) low-carbon steel plates using a constant voltage power supply. Welding current and voltage, and wire feed rate were monitored in all trials. For each tubular wire type, the shielding gas composition (75%Ar-25%CO₂ and 100%CO₂) and wire feed rate (7 and 9 m/min) were changed, and other process variables, including electrode polarity (CC+), 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, fusion zone microstructure and hardness were measured and compared for the different tubular wires. Operational conditions that yielded weld bead characteristics favored for the welding of thick plates of structural steels were determined.

Key-words: FCAW Process; 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

(Recebido em 17/08/2008; Texto Final em 07/11/2008).

(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 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, 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].

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 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. Em estudos anteriores, os autores do presente trabalho avaliaram os efeitos da velocidade de alimentação do arame, do gás de proteção e da polaridade do eletrodo nas características do cordão produzido por arames tubulares nacionais dos tipos básico (ASME SFA-5.20: E71T-5/E71T-5M)[16], rutilico (ASME SFA-5.20: E71T-1/E71T-9/E71T-9M)[17] e “metal cored” (ASME SFA-5.18: E70C-3M) [18]. No presente trabalho, será realizado um estudo comparativo das características do cordão produzido pelos mesmos tipos de arames tubulares na soldagem com polaridade positiva, controlando-se a velocidade de alimentação do arame e o tipo de gás de proteção. Espera-se que os resultados gerados para

esses arames tubulares possam contribuir para a otimização de condições operacionais 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 arames tubulares comerciais de fabricação nacional (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), possuindo diâmetro nominal de 1,2 mm. Os testes de soldagem foram realizados na posição plana sobre chapas de aço carbono comum (ABNT 1010, com 50x250x12mm) utilizando-se uma fonte de soldagem operando no modo “tensão constante” com a polaridade do eletrodo positiva (inversa, CC+). Para cada tipo de arame tubular, variou-se a velocidade de alimentação (fusão) do arame (7 e 9 m/min) e o gás de proteção (75%Ar-25%CO₂ e 100%CO₂), totalizando 12 condições distintas avaliadas. Realizaram-se duas ou mais soldas para cada condição avaliada. No início de cada teste, o valor desejado da velocidade de alimentação do arame era ajustado 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 (La) ao valor pretendido (3,5 mm). Para que a projeção do arco não se movê-se 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:

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

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 ótico 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.

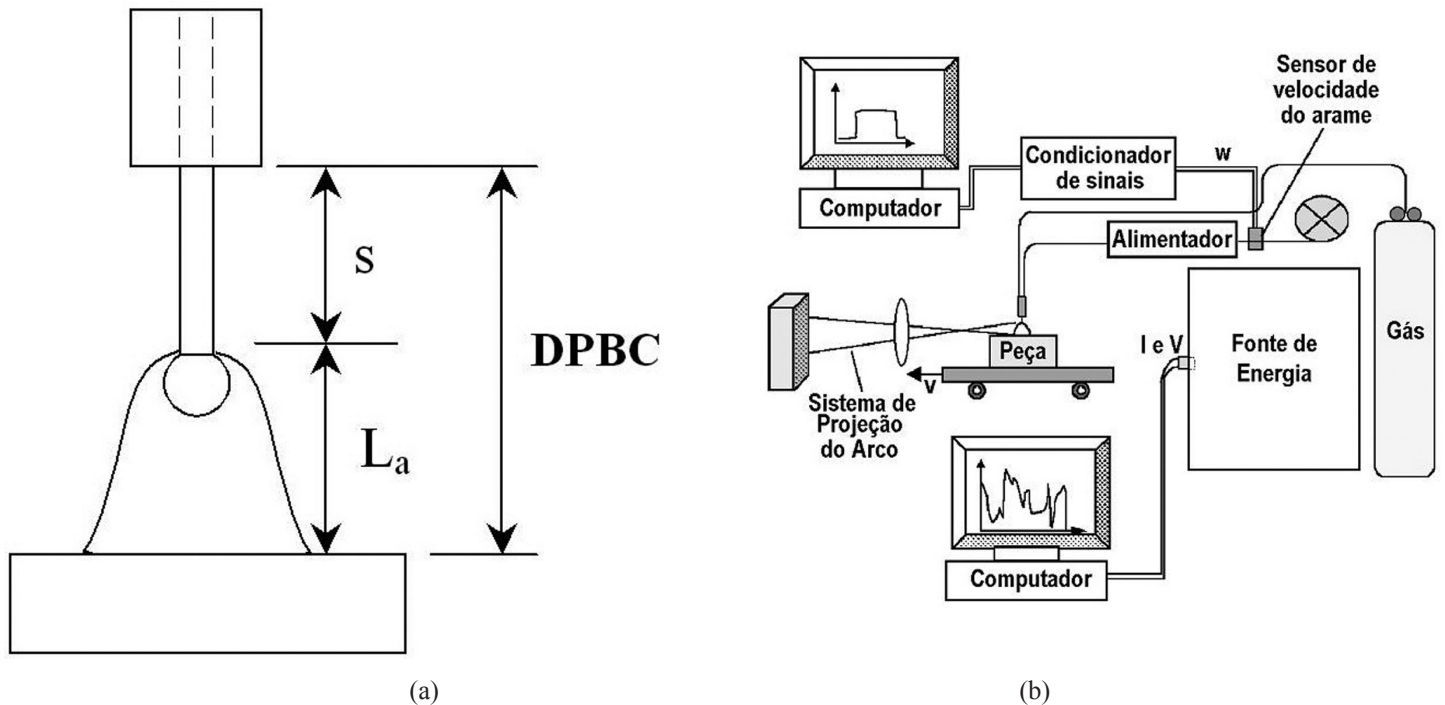


Figura 1. (a) Representação da distância entre a peça e o bico de contato (DBPC) e os comprimentos do arco (L_a) e energizado do eletrodo (s). (b) Representação esquemática da montagem experimental.

A caracterização de cada condição operacional avaliada 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 (φ_{tubular}) dos arames tubulares avaliados, 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 dos arames tubulares rutilico (6,93 g/m), básico (6,95 g/m) e “metal cored” (8,05 g/m) para, 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}) dos arames tubulares depende da eficiência de deposição (φ_{tubular}) e da velocidade de alimentação (w), sendo dada por:

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

Para TD_{tubular} (kg/h) e w (m/min). Nesta equação, A_{tubular} se refere à área total da seção transversal do arame rutilico (1,0679 mm²), básico (1,0520 mm²) ou “metal cored” (1,0740 mm²). Ainda, ρ_{tubular} se refere à densidade volumétrica do arame rutilico (6,48 g/cm³), básico (6,61 g/cm³) e “metal cored” (7,50 g/cm³). Tanto A_{tubular} como ρ_{tubular} foram calculadas conforme procedimento descrito por Starling e Modenesi[3].

Prepararam-se 2 macrografias e 1 micrografia para cada uma das 12 condições distintas 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 macrofotografia digital.

A partir das macrografias produzidas e, também, através do exame do aspecto superficial do cordão foi verificada a presença de eventuais discontinuidades (por exemplo, aspecto irregular do cordão, porosidades, mordeduras e inclusão de escória). As

macrofotografias produzidas foram observadas 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 12 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 %.

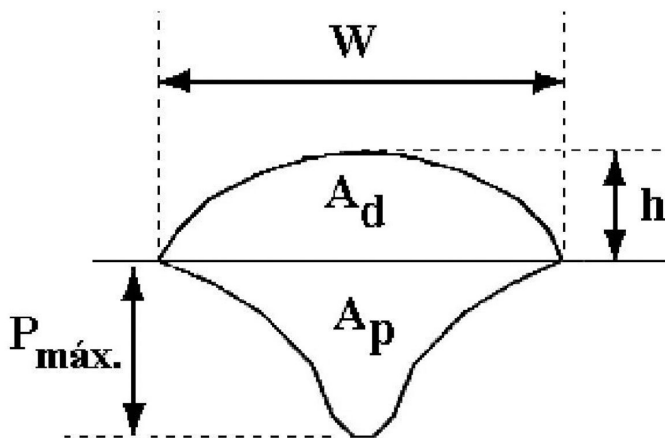


Figura 2. Representação esquemática das características geométricas do cordão. W – largura, h – reforço, $P_{\text{máx}}$ – penetração máxima, A_d – área depositada e A_p – área de penetração.

A caracterização microestrutural foi realizada através de exames ao microscópio ótico 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[19]. As frações volumétricas dos microconstituintes foram medidas pelo método de contagem manual de pontos, segundo a norma ASTM E 562-89[20]. Utilizou-se uma malha de 25 pontos a qual foi colocada na tela de um monitor de alta resolução acoplado a um microscópio ótico. As contagens foram realizadas para um aumento fixo de 500 X (arames rutilico e básico, em função de uma microestrutura mais refinada) ou 200 X (arame “metal cored”, em função de uma microestrutura mais grosseira) no microscópio, o qual resultava em um aumento de, respectivamente, 1.200 ou 480 X no monitor. Calculou-se um intervalo de confiança de 95 % para os valores da fração volumétrica de cada microconstituente. Para cada amostra, foram realizadas 100 aplicações da malha de forma a cobrir todas as regiões da zona fundida. Resultou-se, assim, na contagem de 2.500 pontos por amostra e, considerando-se as 12 condições distintas avaliadas, 30.000 pontos no total.

3. Resultados e Discussão

As Figuras 3 a 5 mostram os oscilogramas obtidos, respectivamente, para as soldas com os arames tubulares rutilico, básico e “metal cored”. 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). As Figuras 6 a 8 mostram o aspecto superficial dos cordões e as macrografias e micrografias obtidas de suas seções transversais para as soldas produzidas, respectivamente, com os arames rutilicos, básico e “metal cored”. A Tabela 1 indica, para os arames tubulares avaliados, os valores do aporte térmico, da eficiência de deposição e da taxa correspondente de deposição. 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 dos arames tubulares e a dureza dessa região, considerando-se o intervalo de confiança de 95 %. Nessas tabelas e figuras, os resultados são apresentados para os diferentes gases de proteção e velocidades de alimentação do arame avaliados.

3.1 Avaliação Comparativa da Corrente de Soldagem e da Tensão do Arco

Starling e Modenesi[3] realizaram, através do dispositivo EDS (espectômetro de energia dispersiva), uma análise química semi-quantitativa na região do fluxo dos mesmos arames tubulares avaliados no presente trabalho. De acordo com os autores, o arame rutilico é constituído predominantemente por Ti, Mn, Si, Fe e Al. Dessa forma, devem existir no fluxo deste arame grandes proporções de TiO_2 , além de outros óxidos em menores quantidades como SiO_2 , MnO e Al_2O_3 . O arame básico é constituído predominantemente por Ca, Fe Mn e Si. Assim, devem existir no fluxo deste arame grandes quantidades de carbonatos ou CaO, além de outros óxidos em menores quantidades como SiO_2 e MnO. Para os arames rutilico e básico, é possível que o Fe, Mn e Si também estejam presentes no fluxo na forma Fe-Mn, Fe-Si e pó de ferro. Por outro lado, segundo os autores, o arame “metal cored” é constituído predominante por Fe, Mn e Si. Dessa forma, o seu fluxo é predominantemente metálico, devendo ser constituído por grandes quantidades de Fe-Mn, Fe-Si e pó de ferro.

Starling e Modenesi[3] também promoveram uma caracterização geométrica dos mesmos arames tubulares avaliados no presente trabalho. Segundo os autores, a área da fita metálica corresponde a frações diferentes da área total da seção transversal dos arames, sendo a maior proporção correspondente ao arame “metal cored” (78 %) e a menor ao arame rutilico (69 %). Em função da presença de diferentes tipos de óxidos, as densidades volumétricas dos fluxos contidos no arame rutilico ($3,38 \text{ g/cm}^3$) e no arame básico ($3,06 \text{ g/cm}^3$) são menores do que a do fluxo contido no arame “metal cored” ($6,27 \text{ g/cm}^3$) o qual é constituído basicamente por partículas metálicas. Pelo mesmo

motivo, as densidades volumétricas dos arames tubulares rutilico (6,48 g/cm³) e básico (6,61 g/cm³) mostraram-se inferiores à de arames maciços de aço carbono (7,85 g/cm³). Entretanto, o arame “metal cored” resultou em uma densidade volumétrica muito próxima (7,50 g/cm³).

Adicionalmente, Starling e Modenesi[3] determinaram a resistividade elétrica dos mesmos arames tubulares avaliados no presente trabalho às temperaturas ambiente e de fusão. Como era de se esperar, os autores verificaram que para os três arames tubulares, a resistividade elétrica à temperatura de fusão é maior do que aquela obtida à temperatura ambiente. Os autores também verificaram que, às temperaturas ambiente e de fusão, as resistividades dos arames básico e rutilico (obtidas a partir da área da fita metálica, considerando que os óxidos do fluxo não são bons condutores elétricos) são menores do que a resistividade do arame “metal cored” (obtida a partir da área total da seção transversal, considerando que os pós metálicos do fluxo também são bons condutores elétricos). Observaram também que, para as duas temperaturas, as resistividades dos arames tubulares básico e rutilico são próximas.

Lesnewish[21] mostrou que, no processo GMAW, a fusão do eletrodo é controlada principalmente pelo calor transferido do arco para a ponta do eletrodo e pelo calor gerado por efeito Joule ao longo do eletrodo e propôs a seguinte equação empírica para a taxa de fusão de arame:

$$w = \alpha I + \beta s I^2 \quad (3)$$

onde α e β são, respectivamente, coeficientes indicativos da contribuição do arco e do efeito Joule para a fusão do eletrodo, s é o comprimento energizado do eletrodo e I é a corrente de soldagem. Starling e Modenesi[5-6] e Starling et. al.[7] avaliaram a velocidade de fusão dos mesmos arames tubulares estudados no presente trabalho (utilizando uma fonte do tipo “tensão constante” e condições de soldagem essencialmente sem a ocorrência de curtos circuitos) em função de diferentes parâmetros operacionais, como a corrente de soldagem e o gás de proteção. De uma forma geral, os autores verificaram que, nas mesmas condições operacionais avaliadas no presente trabalho, a Equação (3) também pode descrever satisfatoriamente a fusão de arames tubulares.

Através de um balanço térmico na ponta do eletrodo similar ao desenvolvido para arames maciços[22], Starling e Modenesi[3] propuseram um modelo para os coeficientes indicativos da contribuição do arco (α) e do efeito Joule (β) para a fusão dos arames tubulares rutilico, básico e “metal cored” estudados no presente trabalho. Segundo o modelo, os coeficientes α e β dependem de propriedades tanto da fita metálica como do fluxo do arame, como densidade, área da seção transversal e quantidade de calor necessária para aquecer, fundir e vaporizar uma pequena parte do material. Os coeficientes α e β também dependem, respectivamente, da contribuição do arco para o aquecimento do arame e da resistividade do arame.

Assim, os coeficientes α e β podem assumir diferentes valores dependendo das características particulares de cada arame tubular (por exemplo, geometria, composição química da fita e do fluxo) e também, em maior ou menor grau, das condições operacionais (por exemplo, composição do gás de proteção).

Dessa forma, para uma mesma velocidade de alimentação do arame (mantendo-se fixas as demais condições operacionais) é de se esperar que a soldagem com os diferentes arames tubulares avaliados resulte, por exemplo, em diferentes correntes de soldagem. Em função das variações na corrente média de soldagem, como o comprimento do arco foi mantido constante, também se espera variações na tensão média do arco. Da mesma forma, em função das diferentes composições químicas do fluxo, é possível que (para um mesmo gás de proteção) a soldagem com os diferentes arames tubulares avaliados resulte em alterações no arco elétrico (por exemplo, no potencial de ionização) e, assim, na tensão média do arco. Ainda, em função das diferentes resistividades dos arames tubulares, como o comprimento energizado do eletrodo foi mantido constante, é possível que (para um mesmo gás de proteção) haja uma tendência adicional de alteração na tensão média do arco. Nesse sentido, a análise dos resultados indica algumas tendências. De acordo com as Figuras 3 a 5, observa-se que, para um mesmo gás de proteção e uma mesma velocidade de alimentação do arame, o valor médio da corrente é maior na soldagem com o arame “metal cored” e menor na soldagem com o arame básico e, ainda, o valor da tensão média do arco é menor na soldagem com o arame rutilico. Entretanto, para uma mesma velocidade de alimentação do arame, a tensão média do arco é maior na soldagem com o arame “metal cored” (para proteção por 75%Ar-25%CO₂) ou na soldagem com o arame básico (para proteção por 100%CO₂).

3.2 Avaliação Comparativa da Estabilidade Operacional

Starling e Modenesi[4] também estudaram, pela técnica de perfilografia (shadowgrafia), a transferência metálica dos mesmos arames tubulares avaliados 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. Os autores verificaram que para o arame rutilico na soldagem com os dois gases e em diferentes níveis de corrente, a transferência metálica é do tipo globular com a formação de uma coluna de fluxo projetada em direção à poça. Para o arame básico na soldagem com os dois gases também se nota a formação de uma coluna de fluxo projetada em direção à poça. Nesse arame, a transferência metálica é do tipo globular repulsiva para menores níveis de corrente e, para maiores níveis de corrente, a transferência de metal passa a ser globular na soldagem do arame básico com 75%Ar-25%CO₂ e se mantém globular repulsiva na soldagem com 100%CO₂. Para o arame “metal cored”, os autores verificaram que na soldagem com 100%CO₂ a transferência é do tipo globular repulsiva em diferentes níveis de corrente. Na soldagem do arame “metal cored” com 75%Ar-25%CO₂ a transferência é do tipo globular para valores mais baixos de corrente e, para valores mais altos de

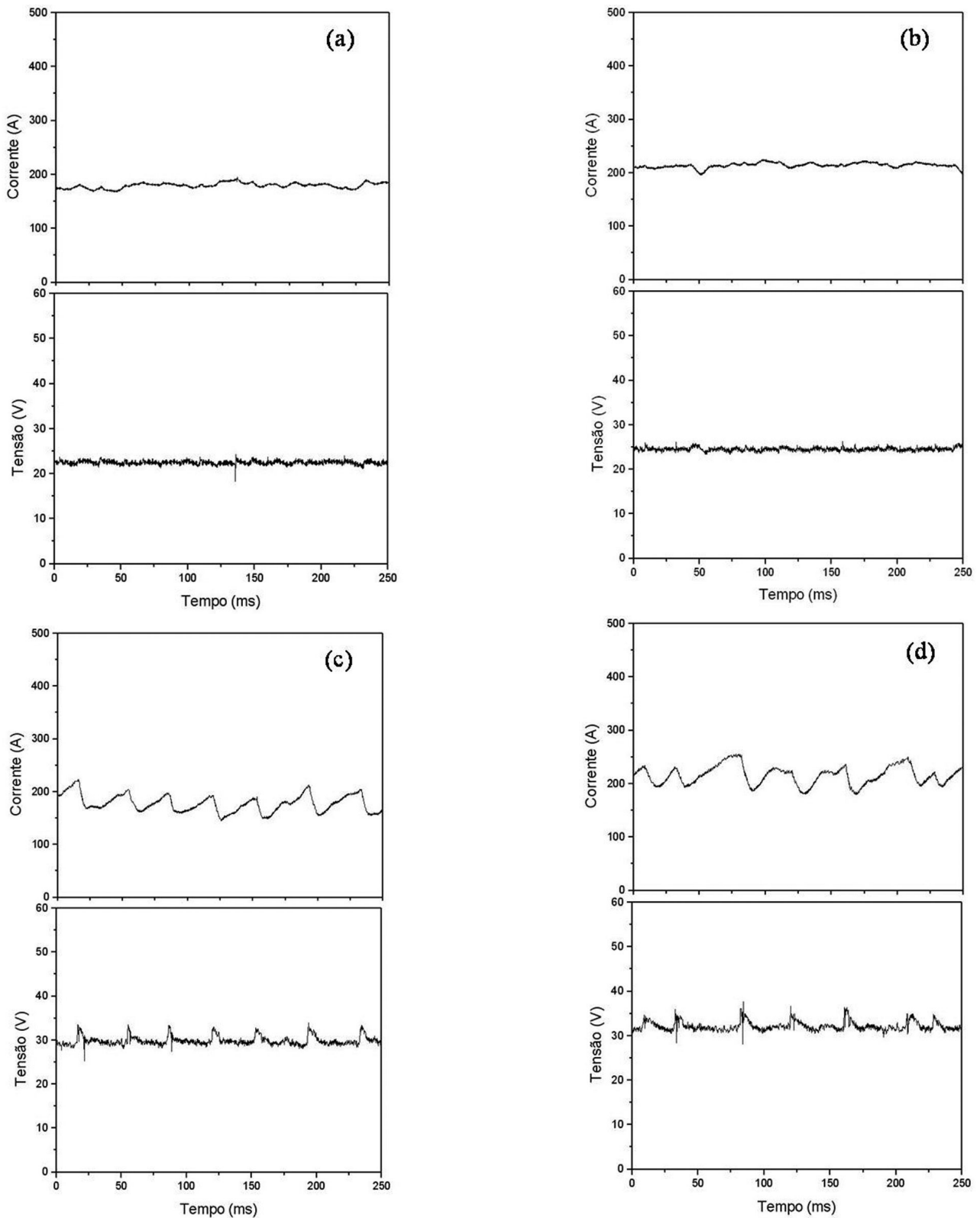
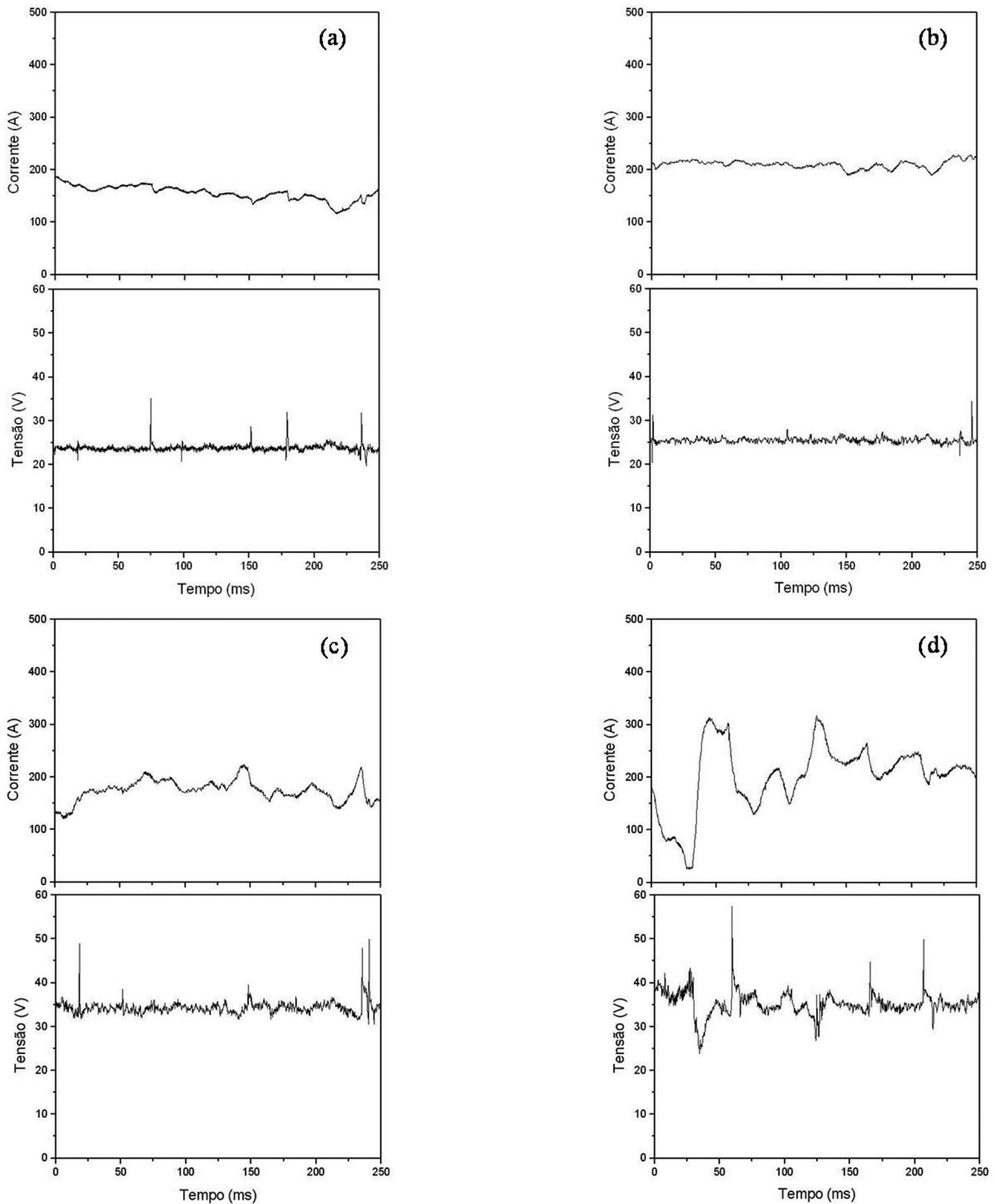


Figura 3. Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos para o arame tubular rutilico. (a) 75%Ar-25%CO₂, w = 7,05±0,03 m/min, I = 177±6 A (3,5 %) e V = 22,5±0,7 V (3,2 %). (b) 75%Ar-25%CO₂, w = 9,03±0,03 m/min, I = 215±6 A (3,0 %) e V = 24,5±0,5 V (1,9 %). (c) 100%CO₂, w = 7,07±0,04 m/min, I = 180±16 A (8,9 %) e V = 29,8±1,0 V (3,3 %). (d) 100%CO₂, w = 9,05±0,06 m/min, I = 213±20 A (9,5 %) e V = 32,2±1,2 V (3,7 %). w, I e V se referem, respectivamente, à “média ± desvio padrão” da velocidade de alimentação do arame, corrente e tensão de soldagem. Os valores entre parênteses são os coeficientes de variação dos valores anteriores.



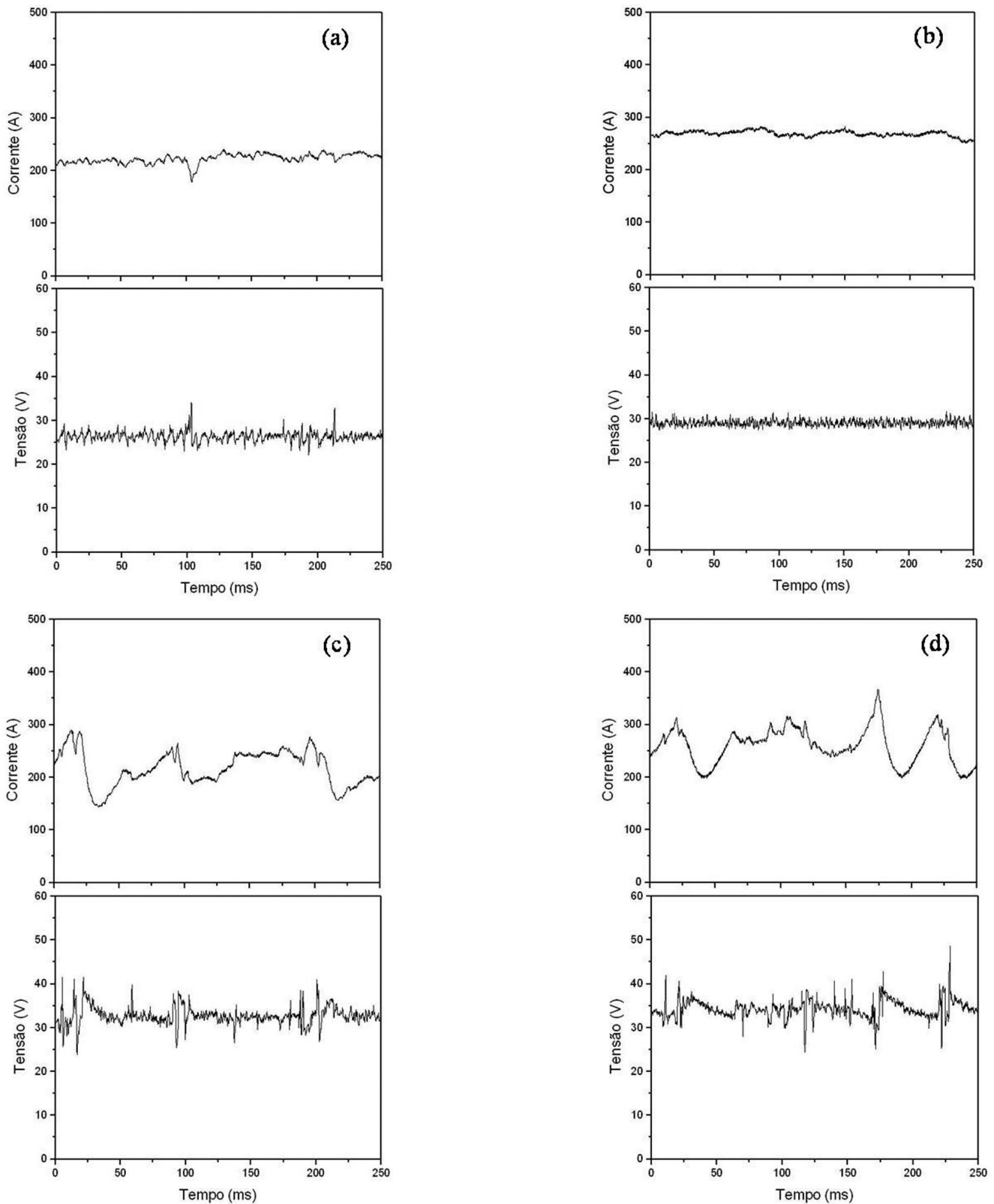


Figura 5. Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos para o arame tubular “metal cored”. (a) 75%Ar-25%CO₂, w = 7,10±0,03 m/min, I = 221±8 A (3,7 %) e V = 26,4±1,1 V (4,1 %). (b) 75%Ar-25%CO₂, w = 9,07±0,03 m/min, I = 270±6 A (2,2 %) e V = 29,0±0,7 V (2,3 %). (c) 100%CO₂, w = 7,02±0,03 m/min, I = 217±34 A (15,4 %) e V = 32,6±2,2 V (6,7 %). (d) 100%CO₂, w = 8,94±0,02 m/min, I = 261±43 A (16,5 %) e V = 34,2±2,4 V (7,0 %). w, I e V se referem, respectivamente, à “média ± desvio padrão” dos valores de velocidade de alimentação do arame, corrente e tensão de soldagem. Os valores entre parênteses são os coeficientes de variação dos valores anteriores.

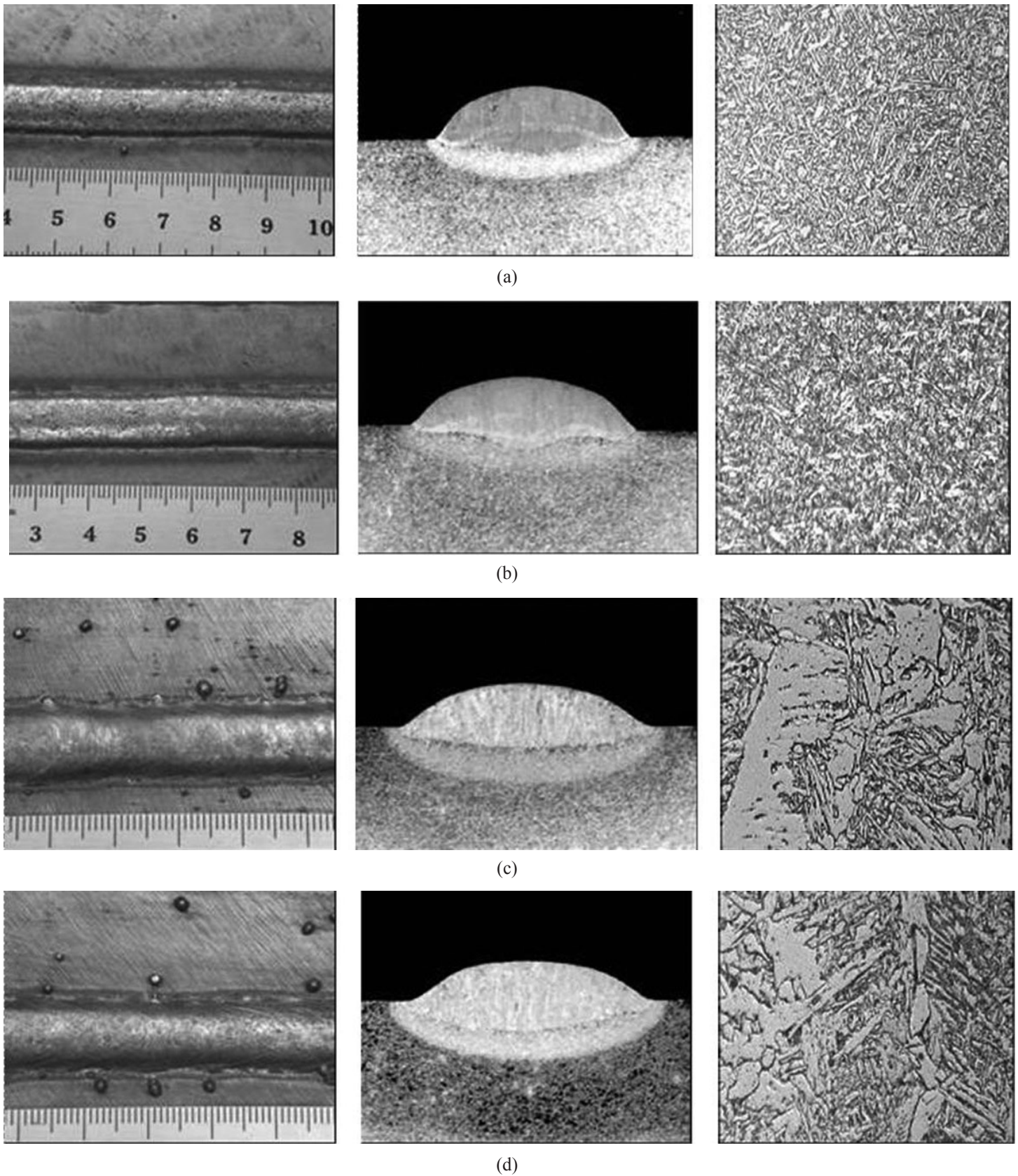


Figura 6. Cordões obtidos para as soldas do arame tubular rutilico. Aspecto superficial (esquerda). Macrografia – Nital 10 % (centro). Micrografia – MO, 500 X, Nital 2 % (direita). Proteção por 75%Ar-25%CO₂ e velocidades de alimentação nominais de (a) 7 e (b) 9 m/min. Proteção por 100%CO₂ e velocidades de alimentação nominais de (c) 7 e (d) 9 m/min.

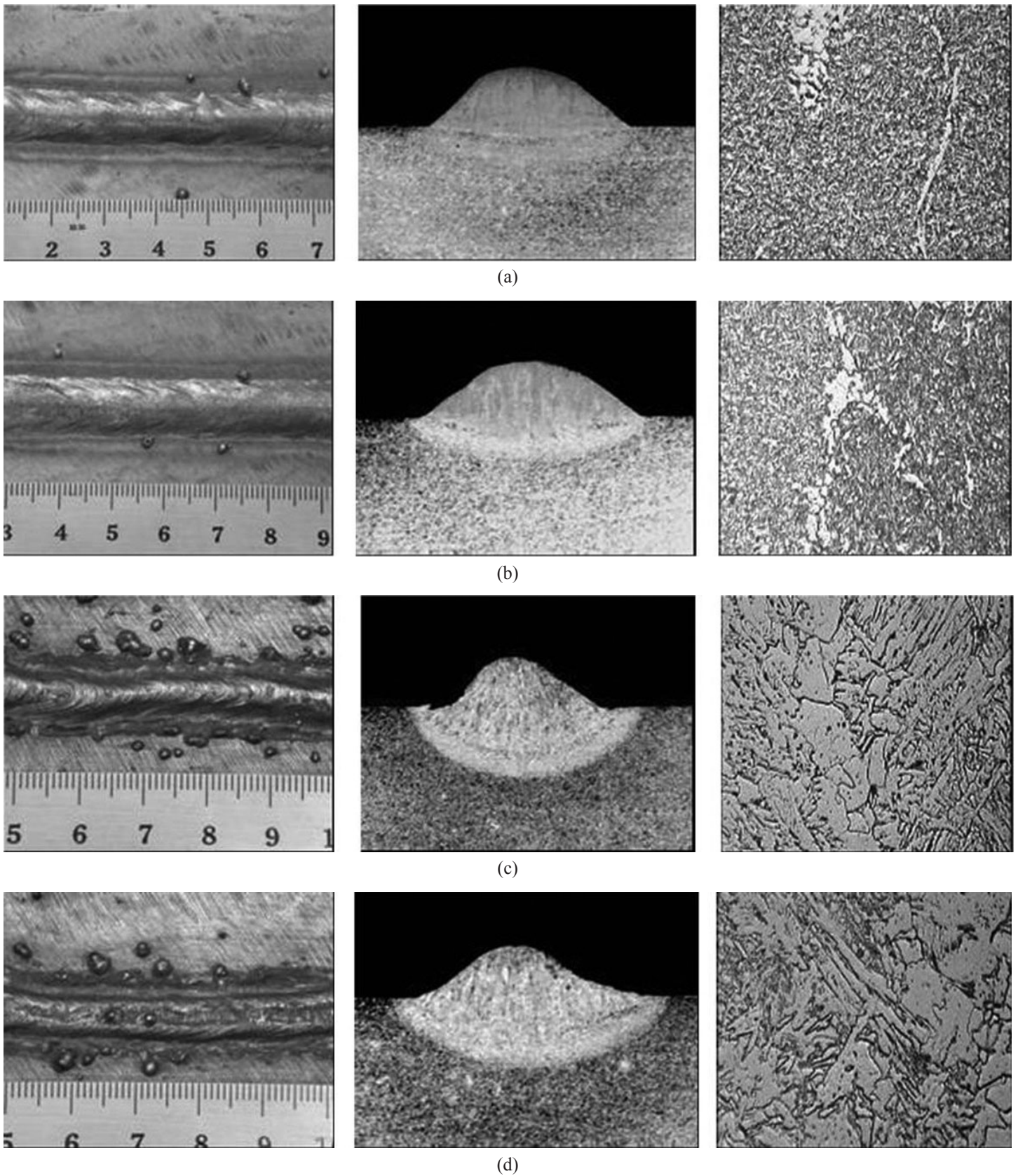


Figura 7. Cordões obtidos para as soldas do arame tubular básico. Aspecto superficial (esquerda). Macrografia – Nital 10 % (centro). Micrografia – MO, 500 X, Nital 2 % (direita). Proteção por 75%Ar-25%CO₂ e velocidades de alimentação nominais de (a) 7 e (b) 9 m/min. Proteção por 100%CO₂ e velocidades de alimentação nominais de (c) 7 e (d) 9 m/min.

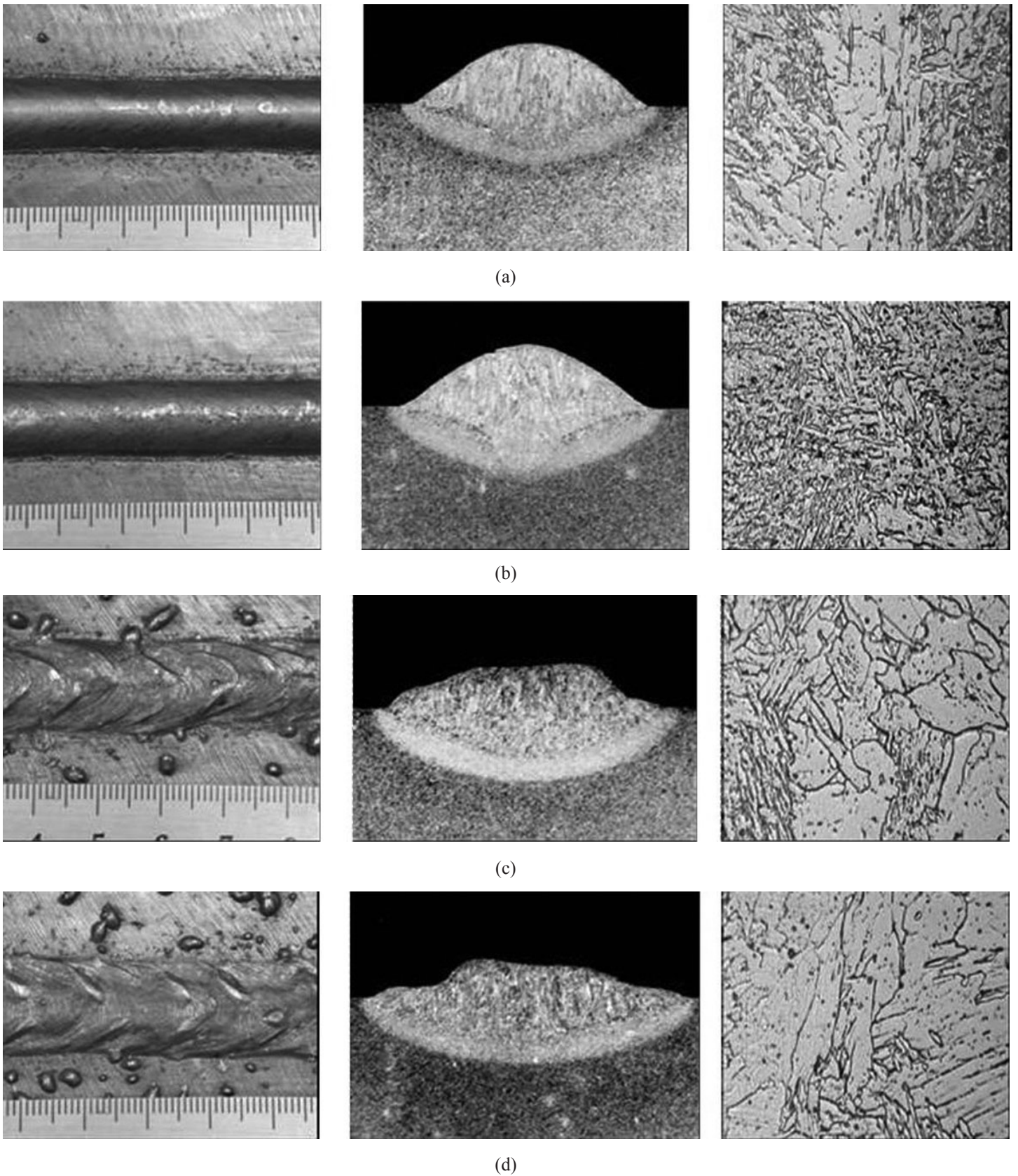


Figura 8. Cordões obtidos para as soldas do arame tubular “metal cored”. Aspecto superficial (esquerda). Macrografia – Nital 10 % (centro). Micrografia – MO, 500 X, Nital 2 % (direita). Proteção por 75%Ar-25%CO₂ e velocidades de alimentação nominais de (a) 7 e (b) 9 m/min. Proteção por 100%CO₂ e velocidades de alimentação nominais de (c) 7 e (d) 9 m/min.

Tabela 1. Aporte térmico (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.

Arame Tubular	Gás Proteção	w (m/min)	H (kJ/mm)	ϕ_{tubular} (%)	TD_{tubular} (kg/h)
Rutilico	75%Ar-25%CO ₂	7	0,85	89	2,59
		9	0,88	88	3,29
	100%CO ₂	7	1,14	85	2,47
		9	1,14	81	3,03
Básico	75%Ar-25%CO ₂	7	0,85	90	2,63
		9	0,89	85	3,19
	100%CO ₂	7	1,29	65	1,90
		9	1,24	70	2,63
“Metal Cored”	75%Ar-25%CO ₂	7	1,25	95	3,21
		9	1,30	96	4,18
	100%CO ₂	7	1,52	81	2,74
		9	1,49	80	3,48

Tabela 2. Parâmetros obtidos para os cordões de solda (média dos valores avaliados em duas macrograficas). 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.

Arame Tubular	Gás Proteção	w (m/min)	W (mm)	h (mm)	P_{max} (mm)	A_d (mm ²)	A_p (mm ²)	δ (%)
Rutilico	75%Ar-25%CO ₂	7	9,95	2,71	0,90	18,18	5,17	22,20
		9	11,32	2,49	1,14	19,10	7,04	26,95
	100%CO ₂	7	12,25	2,10	1,23	16,40	11,54	41,55
		9	12,77	2,12	2,07	17,19	18,92	52,40
Básico	75%Ar-25%CO ₂	7	10,37	2,99	0,53	19,51	5,24	21,15
		9	11,06	2,92	1,12	20,21	7,07	25,90
	100%CO ₂	7	10,33	2,77	2,54	14,66	19,63	57,65
		9	11,28	2,61	2,82	14,60	21,42	59,40
“Metal Cored”	75%Ar-25%CO ₂	7	12,33	3,28	2,28	28,91	12,64	30,75
		9	13,55	3,26	3,42	25,38	19,09	42,90
	100%CO ₂	7	15,43	2,33	2,68	21,20	24,99	54,05
		9	16,38	2,16	2,64	17,83	27,11	60,35

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

Arame Tubular	Gás Proteção	w (m/min)	PF(G) (%)	PF(I) (%)	AF (%)	FS(NA) (%)	FS(A) (%)
Rutilico	75%Ar-25%CO ₂	7	2,7±0,7	0,2±0,2	25,2±1,8	67,1±2,0	4,8±1,0
		9	2,6±0,7	0,3±0,2	31,5±2,1	57,2±2,2	8,3±1,4
	100%CO ₂	7	25,8±2,4	6,9±1,2	29,1±2,9	23,0±2,4	15,1±1,9
		9	26,8±2,9	6,7±1,2	30,3±2,8	22,5±2,8	13,8±1,9
Básico	75%Ar-25%CO ₂	7	13,9±2,0	3,8±1,4	36,6±2,2	40,3±2,9	5,5±1,2
		9	10,1±1,8	1,3±0,5	35,0±2,2	48,8±2,2	4,8±1,0
	100%CO ₂	7	19,0±2,6	5,7±1,2	14,9±2,2	38,9±3,1	21,4±2,5
		9	21,7±2,9	3,8±1,0	11,5±1,9	40,7±3,2	22,3±2,6
“Metal Cored”	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

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.

Arame Tubular	Gás Proteção	w (m/min)	HV (98,1 N)
Rutílico	75%Ar-25%CO ₂	7	278 ± 7
		9	203 ± 37
	100%CO ₂	7	184 ± 4
		9	181 ± 6
Básico	75%Ar-25%CO ₂	7	240 ± 11
		9	205 ± 11
	100%CO ₂	7	161 ± 4
		9	165 ± 4
“Metal Cored”	75%Ar-25%CO ₂	7	181 ± 6
		9	152 ± 4
	100%CO ₂	7	141 ± 2
		9	130 ± 7

corrente, a transferência é similar à spray projetado. Dessa forma, para uma mesma condição operacional (mesma velocidade de alimentação do arame e mesmo gás de proteção), a soldagem com os diferentes arames tubulares pode resultar em diferentes modos de transferência metálica e, assim, resultar em diferenças na estabilidade operacional do processo. Nesse sentido, a análise dos resultados indica algumas tendências.

De acordo com as Figuras 3 a 5, verifica-se na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame) as maiores flutuações nos valores de corrente de soldagem e de tensão do arco (maior relação entre o desvio padrão e a média destes parâmetros) ocorreram para o arame básico, indicando as menores estabilidades operacionais na soldagem com o mesmo. Na soldagem com 100%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame), as menores flutuações nos valores de corrente de soldagem e tensão do arco ocorreram para o arame rutílico, indicando as maiores estabilidades operacionais na soldagem com o mesmo.

De acordo com a Tabela 1, nota-se que na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame) as maiores eficiências de deposição ocorreram para o arame “metal cored”, indicando as maiores estabilidades operacionais na soldagem com o mesmo. Na soldagem com 100%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame), as maiores eficiências de deposição ocorreram para o arame rutílico e as menores para o arame básico, indicando, respectivamente, maiores e menores estabilidades operacionais.

De acordo com as Figuras 6 a 8, na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame) os cordões mais regulares superficialmente e com menores níveis de respingos ocorreram para os arames “metal cored” e rutílico, indicando maiores estabilidades operacionais. Entretanto, na soldagem com 100%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame) os cordões mais regulares superficialmente e com menores níveis de respingos ocorreram somente para o arame rutílico, indicando maiores estabilidades operacionais.

Em função das diferenças relatadas na eficiência de deposição (Tabela 1) e, segundo Starling e Modenesi[3], das diferenças na área da seção transversal e na densidade volumétrica dos arames, de acordo com a Equação (2), é de se esperar diferenças nos valores de taxa de deposição resultantes da soldagem com diferentes arames tubulares para uma mesma velocidade de alimentação do arame. De acordo com a Tabela 1, para um mesmo gás de proteção e uma mesma velocidade de alimentação do arame, os maiores valores de taxa de deposição ocorreram para o arame “metal cored”. Ainda segundo a Tabela 1, na soldagem com 100%CO₂, os menores valores de taxa de deposição ocorreram para o arame básico.

3.3 Avaliação Comparativa da Geometria, Microestrutura e Dureza do Cordão

Em função das variações relatadas na corrente média de soldagem e na tensão média do arco resultantes da soldagem com diferentes arames tubulares para uma mesma condição operacional (Figuras 3 a 5), é de se esperar variações no aporte térmico. De acordo com a Tabela 1, verifica-se que, para um mesmo gás de proteção e uma mesma velocidade de alimentação do arame, os maiores valores de aporte térmico ocorreram para o arame “metal cored”, enquanto os menores valores de aporte térmico ocorreram para o arame rutílico. Assim, essas variações no aporte térmico podem resultar em variações na geometria do cordão de solda e na diluição. Adicionalmente, mesmo com a manutenção das velocidades de soldagem e de alimentação do arame, a soldagem com diferentes arames tubulares (para um gás de proteção) também pode resultar em variações na área depositada em função das variações relatadas na eficiência de deposição (Tabela 1). Nesse sentido, a análise dos resultados indica algumas tendências.

A Tabela 2 e as macrografias das Figuras 6 a 8 indicam que na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ (para as duas velocidades de

alimentação do arame) os maiores valores de largura, reforço, penetração máxima, área depositada, área de penetração e diluição ocorreram para o arame “metal cored”. Nessas condições, os menores valores de reforço, área depositada e área de penetração ocorreram para o arame rutilico, enquanto os menores valores de penetração máxima e diluição ocorreram para o arame básico. Na soldagem com 100%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame) os maiores valores de largura, área depositada e área de penetração ocorreram para o arame “metal cored”, enquanto os maiores valores de reforço ocorreram para o arame básico. Nessas condições, os menores valores de largura e área depositada ocorreram para o arame básico, enquanto os menores valores de reforço, penetração máxima, área de penetração e diluição ocorreram para o arame rutilico.

Em função das diferenças na composição química dos fluxos dos arames tubulares avaliados no presente trabalho que foram relatadas por Starling e Modenesi[3], é de se esperar que, para um mesmo gás de proteção e uma mesma velocidade de alimentação do arame, ocorram variações na composição química da zona fundida devido à variações nos níveis de elementos de liga fornecidos à poça de fusão e/ou perdidos por oxidação. Ainda, as variações relatadas na diluição (Tabela 2) e no aporte térmico (Tabela 1) observadas na soldagem com diferentes arames tubulares (para um mesmo gás e proteção e uma mesma velocidade de alimentação do arame) também podem contribuir para variações na composição química da zona fundida e na velocidade de resfriamento das soldas. Dessa forma, para uma mesma velocidade de alimentação do arame e um mesmo gás de proteção, a soldagem com os diferentes arames tubulares pode resultar em diferentes microestruturas e durezas na zona fundida. Nesse sentido, a análise dos resultados indica algumas tendências.

Observando-se as microestruturas das Figuras 6 a 8 e os resultados da metalografia quantitativa apresentados na Tabela 3, percebe-se que na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame) as maiores frações de ferrita primária de contorno de grão (PF(G)) e de ferrita primária intragranular (PF(I)) ocorreram para o arame “metal cored”, enquanto as menores frações desses microconstituintes ocorreram para o arame rutilico. Ainda na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame), as maiores frações de ferrita com segunda fase não alinhada (FS(NA)) ocorreram para o arame rutilico, enquanto as menores ocorreram para o arame “metal cored”. Na soldagem com 100%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame), as maiores frações de ferrita primária de contorno de grão (PF(G)) e de ferrita acicular (AF) ocorreram para o arame rutilico, enquanto as menores frações desses microconstituintes ocorreram para o arame “metal cored”. Ainda na soldagem com 100%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame), as maiores frações de ferrita com segunda fase não alinhada (FS(NA)) e de ferrita primária intragranular (PF(I)) ocorreram para o arame “metal cored”, enquanto as menores frações de FS(NA) ocorreram para o arame rutilico. Nota-se também que (para os dois gases de proteção e para as duas velocidades de

alimentação do arame), a zona fundida com microestrutura mais grosseira ocorre para o arame “metal cored”, enquanto aquelas resultantes dos arames rutilico e básico são igualmente refinadas. De acordo com a Tabela 4, para um mesmo gás de proteção e uma mesma velocidade de alimentação do arame, os maiores valores de dureza ocorreram para o arame rutilico, enquanto que os menores valores ocorreram para o arame “metal cored”.

3.4 Condições Operacionais Otimizadas

Em princípio, desejam-se na soldagem de chapas grossas de aço estruturais com os arames tubulares 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 a 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 6 a 8, percebe-se que todas as condições operacionais avaliadas com os arames tubulares rutilico, básico e “metal cored” resultaram em cordões com aparentemente os mesmos níveis de porosidades e inclusões de escória. Entretanto, percebe-se a presença de mordeduras na soldagem do arame básico com 100%CO₂, ilustrada na Figura 7, na macrografia relativa à soldagem com a menor velocidade de alimentação do arame. Da mesma forma, percebe-se a formação de um reforço irregular na soldagem do arame “metal cored” com 100%CO₂ para as duas velocidades de alimentação do arame. De acordo com a Tabela 1, para uma mesma velocidade de alimentação do arame, os maiores valores de taxa de deposição ocorreram para o arame “metal cored” (principalmente na soldagem com 75%Ar-25%CO₂). As melhores estabilidades operacionais e que também resultaram em cordões com boa aparência superficial e com pequeno nível de respingos ocorreram para os arames rutilico e “metal cored” na soldagem com 75%Ar-25%CO₂. De acordo com a Tabela 4, para uma mesma velocidade de alimentação do arame, as microestruturas da zona fundida com maior dureza (capazes de favorecer a resistência mecânica) ocorreram para o arame rutilico (principalmente na soldagem com 75%Ar-25%CO₂). De acordo com a Tabela 3, os maiores teores de ferrita acicular associados aos menores teores de ferrita primária de contorno de grão (capazes de favorecer a tenacidade da zona fundida) ocorreram para o arame rutilico na soldagem com 75%Ar-25%CO₂. Entretanto, de acordo com a Tabela 2, as maiores penetrações tenderam a ocorrer para o arame “metal cored” (principalmente na soldagem com 100%CO₂).

Assim, para uma mesma velocidade de alimentação do arame, caso uma alta taxa de deposição, associada a uma boa estabilidade operacional, a uma boa aparência superficial do cordão, a pequenos níveis de respingos e a uma boa penetração sejam os requisitos principais, as condições operacionais mais adequadas envolveriam a utilização do arame “metal cored” na soldagem com 75%Ar-25%CO₂. Alternativamente, para uma

mesma velocidade de alimentação do arame, caso as propriedades mecânicas adequadas da zona fundida (altas resistência mecânica e tenacidade), associadas a uma boa estabilidade operacional, a uma boa aparência superficial do cordão e a pequenos níveis de respingos sejam os requisitos principais, as condições operacionais mais adequadas envolveriam a utilização do arame “rutílico” na soldagem com 75%Ar-25%CO₂.

4. Conclusões

O presente trabalho compara as características do cordão produzido por arames tubulares dos tipos rutílico, básico e “metal cored” na soldagem sobre chapa com polaridade positiva e em posição plana.

(a) Para um mesmo gás de proteção (75%Ar-25%CO₂ ou 100%CO₂) e uma mesma velocidade de alimentação do arame (7 ou 9 m/min), verificam-se as seguintes tendências:

- O valor médio da corrente é maior na soldagem com o arame “metal cored” e menor na soldagem com o arame básico.
- O valor da tensão média do arco é menor na soldagem com o arame rutílico.
- Os maiores valores de taxa de deposição ocorrem para o arame “metal cored”.
- A zona fundida com microestrutura mais grosseira ocorre para o arame “metal cored”, enquanto aquelas resultantes dos arames rutílico e básico são igualmente refinadas.
- Os maiores valores de dureza ocorrem para o arame rutílico, enquanto que os menores valores ocorrem para o arame “metal cored”.

(b) Na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ para uma mesma velocidade de alimentação do arame (7 ou 9 m/min), verificam-se as seguintes tendências:

- A tensão média do arco é maior na soldagem com o arame “metal cored”.
- As maiores flutuações nos valores de corrente de soldagem e de tensão do arco ocorrem para o arame básico, indicando as menores estabilidades operacionais com o mesmo.
- As maiores eficiências de deposição ocorrem para o arame “metal cored”, indicando as maiores estabilidades operacionais com o mesmo.
- Os cordões mais regulares superficialmente e com os menores níveis de respingos ocorrem para os arames “metal cored” e rutílico, indicando maiores estabilidades operacionais com os mesmos.
- Os maiores valores de largura, reforço, penetração máxima, área depositada, área de penetração e diluição ocorrem para o arame “metal cored”.
- Os menores valores de reforço, área depositada e área de penetração ocorrem para o arame rutílico.
- Os menores valores de penetração máxima e diluição ocorrem para o arame básico.
- As maiores frações de ferrita primária de contorno de grão e de ferrita primária intragranular ocorrem para o arame “metal cored”, enquanto as menores frações desses microconstituintes ocorrem para o arame rutílico.

- As maiores frações de ferrita com segunda fase não alinhada ocorrem para o arame rutílico, enquanto as menores ocorrem para o arame “metal cored”.

(c) Na soldagem com 100%CO₂ para uma mesma velocidade de alimentação do arame (7 ou 9 m/min), verificam-se as seguintes tendências:

- A tensão média do arco é maior na soldagem com o arame o arame básico.
- As menores flutuações nos valores de corrente de soldagem e tensão do arco ocorrem para o arame rutílico, indicando as maiores estabilidades operacionais com o mesmo.
- As maiores eficiências de deposição ocorrem para o arame rutílico e as menores para o arame básico, indicando, respectivamente, maiores e menores estabilidades operacionais com os mesmos.
- Os cordões mais regulares superficialmente e com os menores níveis de respingos ocorrem para o arame rutílico, indicando maiores estabilidades operacionais com o mesmo.
- Os menores valores de taxa de deposição ocorrem para o arame básico.
- Os maiores valores de largura, área depositada e área de penetração ocorrem para o arame “metal cored”.
- Os maiores valores de reforço ocorrem para o arame básico.
- Os menores valores de largura e área depositada ocorrem para o arame básico.
- Os menores valores de reforço, penetração máxima, área de penetração e diluição ocorrem para o arame rutílico.
- As maiores frações de ferrita primária de contorno de grão e de ferrita acicular ocorrem para o arame rutílico, enquanto as menores frações desses microconstituintes ocorrem para o arame “metal cored”.
- As maiores frações de ferrita com segunda fase não alinhada e de ferrita primária intragranular ocorrem para o arame “metal cored”.
- As menores frações de ferrita com segunda fase não alinhada ocorrem para o arame rutílico.

(d) Para uma mesma velocidade de alimentação do arame (7 ou 9 m/min), as condições de soldagem mais adequadas envolveriam:

- A utilização do arame “metal cored” na soldagem com 75%Ar-25%CO₂, caso uma alta taxa de deposição, associada a uma boa estabilidade operacional, a uma boa aparência superficial do cordão, a pequenos níveis de respingos e a uma boa penetração sejam os requisitos principais.
- A utilização do arame “rutílico” na soldagem com 75%Ar-25%CO₂, caso as propriedades mecânicas adequadas da zona fundida (altas resistência mecânica e tenacidade), associadas a uma boa estabilidade operacional, a uma boa aparência superficial do cordão e a pequenos níveis de respingos sejam os requisitos principais.

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 Autoprotetido 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 Gas-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 Rutilico 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 Autoprotetido. 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] STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J.; BORBA, T.M.D. Estudo das Características do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular Básico. In: CONSOLDA - CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 33, 2007, Caxias do Sul. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2007, 16p.
- [17] STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J.; BORBA, T.M.D. Estudo das Características do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular Rutilico. In: CONSOLDA - CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 33, 2007, Caxias do Sul. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2007, 15p.
- [18] STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J.; BORBA, T.M.D. Desempenho Operacional e Características do Cordão na Soldagem com um Arame Tubular “Metal Cored”. In: IIW INTERNATIONAL CONGRESS-LATIN AMERICAN WELDING CONGRESS, 2, CONSOLDA - CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 34, 2008, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2008, 17p.
- [19] INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING. IIW Doc. n. IX-1533-88; Guide to the Light Microscope Examination of Ferritic Steel Weld Metals. 1988. 20p.
- [20] 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.
- [21] LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer - Part I, Welding Journal, Miami, n.8, p.343s-353s, 1958.
- [22] LANCASTER, J.F. The Physics of Welding. 2.ed. Pergamon Press & International Institute of Welding, 1986. 340p.