

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO OPERACIONAL E DAS CARACTERÍSTICAS DO CORDÃO NA SOLDAGEM COM DIFERENTES ARAMES TUBULARES EM POLARIDADE NEGATIVA

Cícero Murta Diniz Starling – Prof. Associado, cicerostarling@ufmg.br¹

Paulo José Modenesi – Prof. Associado, modenesi@demet.ufmg.br²

Tadeu Messias Donizete Borba – Eng. Metalurgista, tadeumborba@yahoo.com.br³

¹Depto. de Eng. de Materiais e Construção da UFMG, Rua Espírito Santo, 35, Belo Horizonte-MG, Cep. 30.160-030

²Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais da UFMG, Rua Espírito Santo, 35, Belo Horizonte-MG, Cep. 30.160-030

³Gerdau Açominas, Rodovia MG, 443 km 07, Ouro Branco-MG, Cep. 36.420-000

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 com o eletrodo na polaridade negativa (CC-), 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, além da polaridade negativa do eletrodo, 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 com a polaridade do eletrodo negativa.*

Palavras-chave: *processo FCAW, arame tubular, formato do cordão, microestrutura, polaridade negativa*

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 (Marques, Modenesi e Bracarense, 2005; AWS, 1991). 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.

Em trabalhos anteriores (Starling e Modenesi, 2007; Starling e Modenesi, 2006; Starling e Modenesi, 2005a; Starling e Modenesi, 2005b e Starling et. al., 2004), os autores do presente trabalho estudaram as características e os fatores determinantes da fusão e da transferência metálica 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 1,2mm diâmetro, utilizando uma fonte do tipo “tensão constante” e condições de soldagem com ausência ou pequena ocorrência de curtos-circuitos. Esses 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 (Oliveira e Bracarense, 2003; Araújo, 2004; Braga, Mota e Farias, 1998; Blackman, et al., 1998; Svoboda, 2003; Ventrella, 2004; Santos Neto e Trevisan, 2004 e Fals e Trevisan, 1998). 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) (Starling, Modenesi e Borba, 2007a), rutílico (ASME SFA-5.20: E71T-1/E71T-9/E71T-9M) (Starling, Modenesi e Borba, 2007b) e “metal cored” (ASME SFA-5.18: E70C-3M) (Starling, Modenesi e Borba, 2008a). Os autores também realizaram um estudo comparativo das características operacionais do processo e do cordão resultantes dos 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 (Starling, Modenesi e Borba, 2008b) e, no presente trabalho, será realizado um estudo comparativo similar na soldagem com polaridade negativa. 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), rutílico (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 50x250x12 mm) utilizando-se uma fonte de soldagem operando no modo “tensão constante” com a polaridade do eletrodo negativa (direta, 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 (3,5 mm, medido através de um sistema de projeção da sua imagem) pela variação da tensão fornecida pela fonte de soldagem. Previamente, a distância entre a peça e o bico de contato era fixada em 19,5 mm resultando, após o ajuste do comprimento do arco, em um comprimento energizado do eletrodo 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), sendo a primeira mantida 25 vezes menor do que a segunda. 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 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, 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 rutílico (6,93 g/m), básico (6,95 g/m) e “metal cored” (8,05 g/m), calculadas conforme procedimento descrito por Starling e Modenesi (2007), 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), Eq. (1):

$$TD_{\text{tubular}} = 0,06 \cdot \varphi_{\text{tubular}} \cdot (A_{\text{tubular}} \cdot \rho_{\text{tubular}} \cdot w) \quad (1)$$

Para TD_{tubular} (kg/h) e w (m/min). Nesta equação, A_{tubular} se refere à área total da seção transversal do arame rutílico (1,0679 mm²), básico (1,0520 mm²) ou “metal cored” (1,0740 mm²). Ainda, ρ_{tubular} se refere à densidade volumétrica do arame rutílico (6,48 g/cm³), básico (6,61 g/cm³) ou “metal cored” (7,50 g/cm³). Tanto A_{tubular} como ρ_{tubular} foram calculadas conforme procedimento descrito por Starling e Modenesi (2007).

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 descontinuidades (por exemplo, aspecto irregular do cordão, porosidades, mordeduras e inclusão de escória). As macrofotografias foram observadas em um projetor de perfil para a identificação dos contornos da zona fundida e medição de alguns parâmetros geométricos (largura, penetração máxima e reforço) e, com o auxílio de um programa de computador, determinação de parâmetros complementares (áreas depositada e de penetração e diluição), ilustrados na Fig. (1). 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 %.

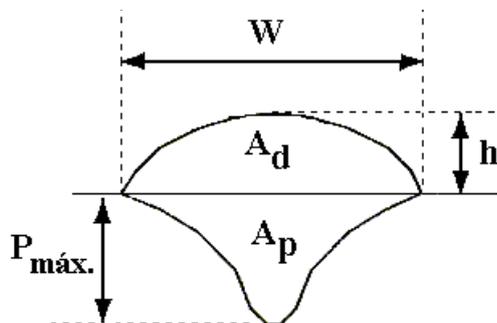


Figura 1. Representação esquemática das características geométricas do cordão. W – largura, h – reforço, $P_{\text{máx}}$ – penetração máxima, A_d – área depositada e A_p – área de penetração.

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 (IIW, 1988). As frações volumétricas dos microconstituintes foram medidas pelo método de contagem manual de pontos, segundo a norma ASTM E 562-89 (ASTM, 1989). 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 rutílico 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

A Figura (2) mostra alguns exemplos de oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos para as soldas com os arames tubulares. Nas legendas são indicados a média e o desvio padrão dos valores coletados da velocidade de alimentação do arame (w), da corrente de soldagem (I) e da tensão do arco (V) e, entre parênteses, a flutuação dos valores de corrente e tensão (relação entre o desvio padrão e a média correspondente). A Figura (3) mostra alguns exemplos do aspecto superficial dos cordões e das macrografias e micrografias obtidas. Os resultados de todas as 12 condições operacionais avaliadas não foram apresentados nessas figuras por falta de espaço, entretanto, serão considerados na discussão dos resultados.

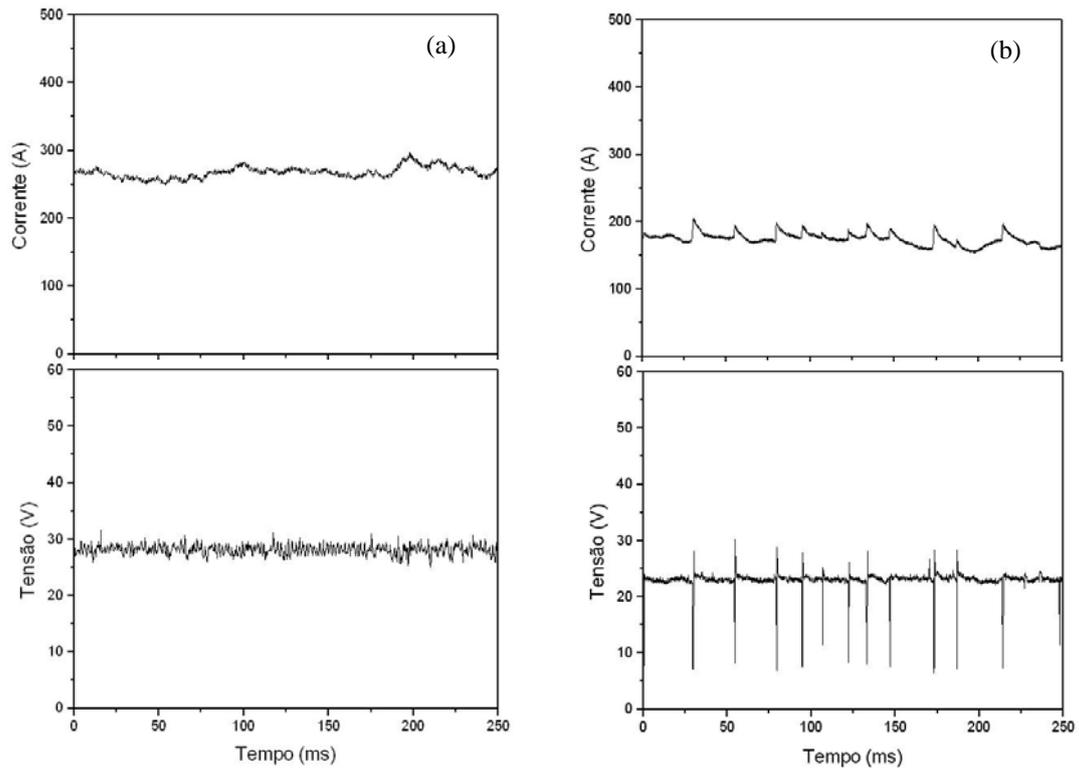


Figura 2. Exemplos de oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco.

- (a) “Metal cored”, 75%Ar-25%CO₂, w = 8,94±0,03 m/min, I = 266,38±7,35 A (2,8 %) e V = 28,14±0,86 V (3,1 %).
 (b) Rutílico, 75%Ar-25%CO₂, w = 7,09±0,03 m/min, I = 172,04±8,95 A (5,2 %) e V = 22,98±2,12 V (9,2 %).

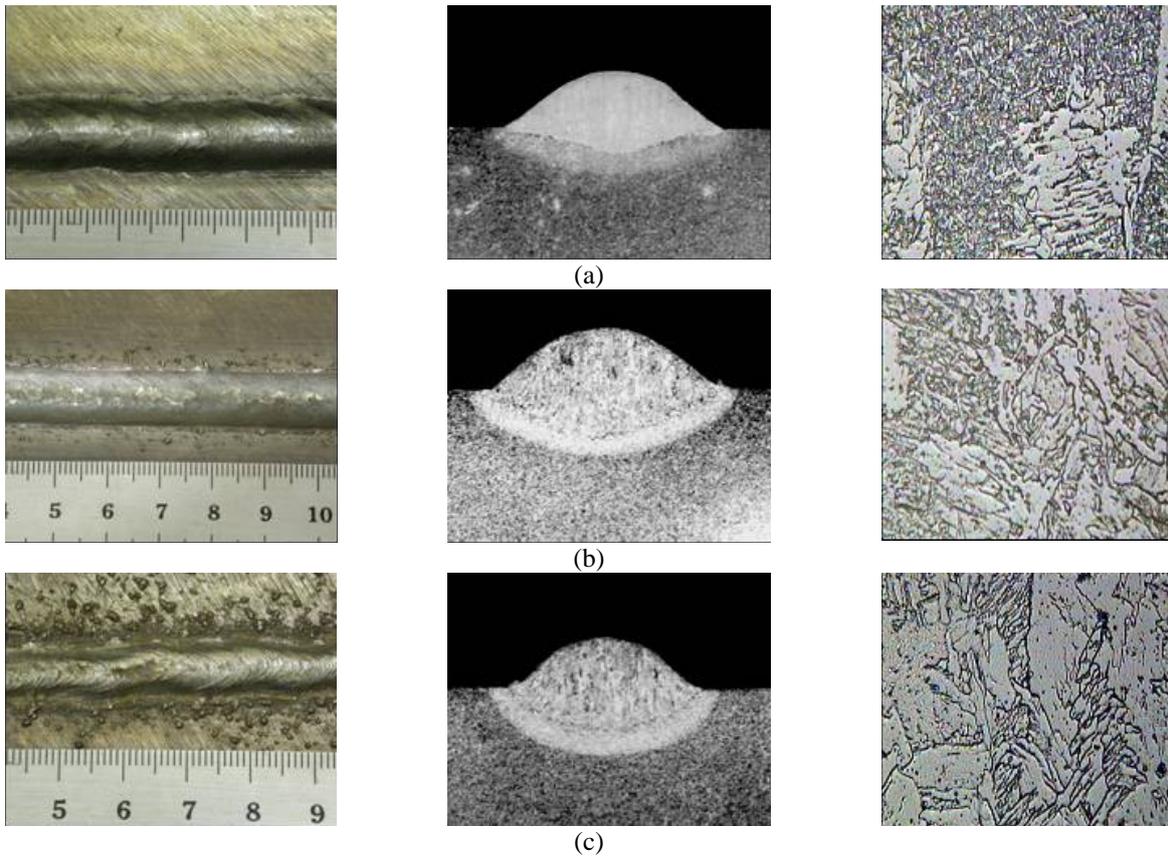


Figura 3. Exemplos de cordões obtidos para as soldas produzidas. Aspecto superficial (esquerda). Macrografia – Nital 10 % (centro). Micrografia – MO, 500 X, Nital 2 % (direita).

- (a) Básico, 75%Ar-25%CO₂, velocidade de alimentação nominal de 9 m/min.
 (b) “Metal cored”, 75%Ar-25%CO₂, velocidade de alimentação nominal de 9 m/min.
 (c) Básico, 100%CO₂, velocidade de alimentação nominal de 7 m/min.

A Tabela (1) indica, para os arames avaliados, os valores do aporte térmico, eficiência de deposição, taxa de deposição e dureza na zona fundida das soldas. A Tabela (2) mostra os parâmetros geométricos e a diluição obtidos para os cordões de solda. A Tabela (3) indica a fração volumétrica dos microconstituintes presentes na zona fundida.

**Tabela 1. Aporte térmico (H), eficiência de deposição (ϕ_{tubular}) (média avaliada em pelo menos duas soldas), taxa de deposição (TD_{tubular}) e dureza Vickers (HV) na zona fundida (intervalo de confiança: 95 %).
w – velocidade de alimentação nominal do arame.**

Arame Tubular	Gás Proteção	w (m/min)	H (kJ/mm)	ϕ_{tubular} (%)	TD_{tubular} (kg/h)	HV (98,1 N)
Rutílico	75% Ar-25% CO ₂	7	0,84	84	2,44	259 ± 16
		9	0,84	87	3,25	235 ± 9
Rutílico	100% CO ₂	7	1,11	72	2,09	179 ± 4
		9	1,12	64	2,39	182 ± 5
Básico	75% Ar-25% CO ₂	7	0,90	91	2,66	227 ± 8
		9	0,97	90	3,38	207 ± 6
Básico	100% CO ₂	7	1,33	69	2,02	150 ± 7
		9	1,43	67	2,52	163 ± 2
“Metal Cored”	75% Ar-25% CO ₂	7	1,27	89	3,01	174 ± 3
		9	1,25	97	4,22	167 ± 3
“Metal Cored”	100% CO ₂	7	1,59	62	2,10	124 ± 2
		9	1,61	59	2,57	128 ± 3

**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.**

Arame Tubular	Gás Proteção	w (m/min)	W (mm)	h (mm)	P _{max} (mm)	A _d (mm ²)	A _p (mm ²)	δ (%)
Rutílico	75% Ar-25% CO ₂	7	9,25	2,70	0,59	18,00	3,54	16,40
		9	10,08	2,88	0,96	20,23	4,59	18,60
Rutílico	100% CO ₂	7	11,33	2,35	1,60	16,31	12,09	42,50
		9	12,08	2,41	1,73	16,54	16,65	50,15
Básico	75% Ar-25% CO ₂	7	10,60	3,08	0,97	21,01	6,01	22,25
		9	11,73	2,99	1,30	20,44	8,95	30,45
Básico	100% CO ₂	7	10,39	2,75	2,55	16,43	15,73	48,85
		9	10,76	2,24	2,90	13,48	23,06	63,05
“Metal Cored”	75% Ar-25% CO ₂	7	11,78	2,96	1,53	22,48	12,48	35,70
		9	12,33	3,34	2,47	24,64	17,66	41,80
“Metal Cored”	100% CO ₂	7	16,00	1,81	2,78	16,28	32,05	66,30
		9	13,85	2,08	3,39	17,67	33,38	65,35

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) (%)
Rutílico	75% Ar-25% CO ₂	7	2,18±0,61	0,16±0,16	32,78±2,28	58,02±2,46	6,86±1,23
		9	4,48±0,98	0,14±0,14	27,60±2,27	61,46±2,57	6,72±1,15
Rutílico	100% CO ₂	7	26,72±2,56	6,66±1,23	28,56±2,64	24,82±2,72	13,24±1,92
		9	25,34±2,25	6,50±1,12	30,04±2,85	23,52±2,27	14,60±2,05
Básico	75% Ar-25% CO ₂	7	12,70±1,70	2,56±0,74	27,64±1,85	48,60±2,52	8,46±1,40
		9	14,52±2,20	1,80±0,67	25,90±2,27	50,58±2,75	7,20±1,11
Básico	100% CO ₂	7	20,90±2,62	5,10±1,11	13,48±2,23	40,36±2,80	20,16±2,66
		9	20,74±2,74	3,86±0,99	12,62±2,01	41,30±3,06	21,48±2,69
“Metal ...Cored”	75% Ar-25% CO ₂	7	18,03±1,84	4,52±1,13	28,60±3,52	37,72±3,13	11,16±1,88
		9	16,46±1,99	5,00±1,12	33,08±3,48	33,84±3,41	11,62±1,85
“Metal ...Cored”	100% CO ₂	7	12,60±1,52	10,54±1,71	9,60±1,41	48,08±2,19	19,18±2,41
		9	15,35±1,79	12,06±1,92	7,72±1,63	47,48±2,35	17,32±2,47

PF(G) e PF (I) – ferritas primária de contorno de grão e intragranular; AF – ferrita acicular;

FS(NA) e FS(A) – ferritas com segunda fase não alinhada e alinhada. w – velocidade de alimentação nominal.

3.1. Avaliação Comparativa da Corrente e da Tensão do Arco

Lesnewish (1958) 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, Eq. (2):

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

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 (2005a e 2005b) e Starling et. al. (2004) 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, o gás de proteção e a polaridade do eletrodo. De uma forma geral, os autores verificaram que, nas mesmas condições operacionais avaliadas no presente trabalho, a Eq. (2) também pode descrever satisfatoriamente a fusão de arames tubulares.

Através de um balanço térmico na ponta do eletrodo similar ao desenvolvido para arames maciços (Lancaster, 1986), Starling e Modenesi (2007) 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). Em relação às características dos arames tubulares avaliados no presente trabalho, Starling e Modenesi (2007) verificaram, por exemplo, diferenças em suas características geométricas, densidades, resistividades elétricas e na composição química dos seus fluxos.

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. 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 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) e, ainda, o valor médio da corrente é menor na soldagem com o arame rutilico (para proteção por 100%CO₂).

3.2. Avaliação Comparativa da Estabilidade Operacional

Da mesma forma como observado por Starling e Modenesi (2006) na soldagem em polaridade positiva, para uma mesma condição operacional (mesma velocidade de alimentação do arame e mesmo gás de proteção), a soldagem em polaridade negativa com os diferentes arames tubulares pode resultar em diferentes modos de transferência metálica e, assim, em diferenças na estabilidade operacional do processo. Nesse sentido, a análise dos resultados indica algumas tendências.

Verifica-se que, para uma mesma velocidade de alimentação do arame, as menores flutuações na corrente de soldagem (menor relação entre o desvio padrão e a média deste parâmetro) ocorreram para o arame “metal cored” (para proteção pelos dois gases), indicando maiores estabilidades operacionais na soldagem com o mesmo, entretanto, as menores flutuações na tensão do arco ocorreram para o arame rutilico (com proteção por 100%CO₂) ou para o arame básico (com proteção por 75%Ar-25%CO₂). Para uma mesma velocidade de alimentação do arame, as maiores flutuações na corrente de soldagem ocorreram para o arame básico (para proteção por 100%CO₂) e as maiores flutuações na tensão do arco ocorreram para o arame rutilico (para proteção por 75%Ar-25%CO₂), indicando menores estabilidades operacionais na soldagem com os mesmos.

De acordo com a Tab. (1), nota-se que, para uma mesma velocidade de alimentação do arame, as menores eficiências de deposição ocorreram para o arame rutilico (na soldagem com 75%Ar-25%CO₂) ou para o arame “metal cored” (na soldagem com 100%CO₂), indicando as menores estabilidades operacionais na soldagem com os mesmos.

Na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame) os cordões isentos de respingos e com boa regularidade superficial ocorreram para o arame básico, indicando maiores estabilidades operacionais. Na soldagem com 100%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame), os cordões com os menores níveis de respingos e mais regulares superficialmente ocorreram para o arame rutilico, indicando maiores estabilidades operacionais.

Em função das diferenças relatadas na eficiência de deposição, Tab. (1), e, segundo Starling e Modenesi (2007), das diferenças na área da seção transversal e na densidade volumétrica dos arames, de acordo com a Eq. (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 Tab. (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 Tab. (1), na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ para uma mesma velocidade de alimentação do arame, os menores valores de taxa de deposição ocorreram para o arame rutilico.

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, é de se esperar variações no aporte térmico. De acordo com a Tab. (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 rutilico. 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, Tab. (1). Nesse sentido, a análise dos resultados indica algumas tendências.

A Tabela (2) indica que na soldagem com 75%Ar-25%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame) os maiores valores de largura, penetração máxima, área depositada, área de penetração e diluição ocorreram para o arame “metal cored”. Nessas condições, os menores valores de largura, reforço, penetração máxima, área depositada, área de penetração e diluição ocorreram para o arame rutilico. Na soldagem com 100%CO₂ (para as duas velocidades de alimentação do arame) os maiores valores de largura, penetração máxima, área de penetração e diluição ocorreram para o arame “metal cored”. Nessas condições, os menores valores de largura e reforço ocorreram, respectivamente, para os arames básico e “metal cored”, enquanto os menores valores de 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 relatadas por Starling e Modenesi (2007), 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, Tab. (2), e no aporte térmico, Tab. (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 os resultados da metalografia quantitativa apresentados na Tab. (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 intragranular (PF(I)) e de ferrita com segunda não alinhada (FS(NA)) ocorreram, respectivamente, para os arames “metal cored” e rutilico. Nessa condições, as menores frações de ferrita primária de contorno de grão ((PF(G)) e de ferrita primária intragranular (PF(I)) ocorreram para o arame rutilico, enquanto as menores frações de ferrita com segunda fase não alinhada (FS(NA)) 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 intragranular (PF(I)) e ferrita com segunda fase não alinhada (FS(NA)) ocorreram para o arame “metal cored”, enquanto as maiores frações de ferrita acicular (AF) ocorreram para o rutilico. Nessas condições, as menores frações de ferrita primária de contorno de grão (PF(G)) e de ferrita acicular (AF) ocorreram para o arame “metal cored”, enquanto as menores frações de ferrita com segunda não alinhada (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 Tab. (1), 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 aços 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).

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 e sem a presença de mordeduras. De acordo com a Tab. (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 isenção de respingos ocorreram para o arame básico na soldagem com 75%Ar-25%CO₂. De acordo com a Tab. (1), 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, seguido pelo arame básico (em ambos, principalmente na soldagem com 75%Ar-25%CO₂). De acordo com a Tab. (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 Tab. (2), as maiores penetrações tenderam a ocorrer para o arame “metal cored”, seguido pelo arame básico (em ambos, 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 penetração sejam os requisitos principais, as condições operacionais mais adequadas envolveriam a utilização do arame “metal cored” na soldagem com 75%Ar-25%CO₂. A Figura (2b) ilustra o cordão resultante para a velocidade de alimentação do arame de 9 m/min.

Para uma mesma velocidade de alimentação do arame, caso as propriedades mecânicas adequadas da zona fundida (altas resistência mecânica e tenacidade) sejam os requisitos principais, as condições operacionais mais adequadas envolveriam a utilização do arame “rutilico” na soldagem com 75%Ar-25%CO₂.

Alternativamente, para uma mesma velocidade de alimentação do arame, uma boa aparência superficial do cordão, associada a uma isenção de respingos e a valores intermediários de propriedades mecânicas e penetração, podem ser obtidos com a utilização do arame básico na soldagem com 75%Ar-25%CO₂. A Figura (2a) ilustra o cordão resultante para a velocidade de alimentação do arame de 9 m/min.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho, realizou-se um estudo comparativo das características operacionais do processo e do cordão resultantes da utilização de arames tubulares dos tipos rutilico, básico e “metal cored” na soldagem sobre chapa com polaridade negativa e em posição plana, variando-se o tipo de gás de proteção (75%Ar-25%CO₂ e 100%CO₂) e a velocidade de alimentação do arame (7 e 9 m/min).

- O valor médio da corrente é maior na soldagem com o arame “metal cored” e o valor médio da tensão do arco é menor na soldagem com o arame rutilico. Entretanto, os arames tubulares associados com os maiores valores médios da tensão do arco ou com os menores valores médios da corrente dependem do tipo de gás de proteção.
- As menores flutuações na corrente de soldagem ocorreram para o arame “metal cored”, indicando maiores estabilidades operacionais na soldagem com o mesmo, entretanto, as menores flutuações na tensão do arco não foram observadas para esse arame.
- As maiores flutuações na corrente de soldagem ocorreram para o arame básico (para proteção por 100%CO₂) e as maiores flutuações na tensão do arco ocorreram para o arame rutilico (para proteção por 75%Ar-25%CO₂), indicando menores estabilidades operacionais na soldagem com os mesmos.
- As menores eficiências de deposição ocorreram para o arame rutilico (na soldagem com 75%Ar-25%CO₂) ou para o arame “metal cored” (na soldagem com 100%CO₂), indicando as menores estabilidades operacionais na soldagem com os mesmos.
- Na soldagem com 75%Ar-25%CO₂, os cordões isentos de respingos e com boa regularidade superficial ocorreram para o arame básico, indicando maiores estabilidades operacionais.
- Na soldagem com 100%CO₂, os cordões com os menores níveis de respingos e mais regulares superficialmente ocorreram para o arame rutilico, indicando maiores estabilidades operacionais.
- Os maiores valores de taxa de deposição ocorreram para o arame “metal cored”. Na soldagem com 75%Ar-25%CO₂, os menores valores de taxa de deposição ocorreram para o arame rutilico.
- Na soldagem com 75%Ar-25%CO₂, os maiores valores de largura, penetração máxima, área depositada, área de penetração e diluição ocorreram para o arame “metal cored”. Nessa condição, os menores valores de largura, reforço, penetração máxima, área depositada, área de penetração e diluição ocorreram para o arame rutilico.
- Na soldagem com 100%CO₂, os maiores valores de largura, penetração máxima, área de penetração e diluição ocorreram para o arame “metal cored”. Nessa condição, os menores valores de largura e reforço ocorreram, respectivamente, para os arames básico e “metal cored”, enquanto os menores valores de penetração máxima, área de penetração e diluição ocorreram para o arame rutilico.
- Na soldagem com 75%Ar-25%CO₂, as maiores frações de ferrita primária intragranular e de ferrita com segunda não alinhada ocorreram, respectivamente, para os arames “metal cored” e rutilico. Nessa condição, as menores frações de ferrita primária de contorno de grão e de ferrita primária intragranular ocorreram para o arame

rútilico, enquanto as menores frações de ferrita com segunda fase não alinhada ocorreram para o arame “metal cored”.

- Na soldagem com 100%CO₂, as maiores frações de ferrita primária intragranular e ferrita com segunda fase não alinhada ocorreram para o arame “metal cored”, enquanto as maiores frações de ferrita acicular ocorreram para o rútilico. Nessa condição, as menores frações de ferrita primária de contorno de grão e de ferrita acicular ocorreram para o arame “metal cored”, enquanto as menores frações de ferrita com segunda não alinhada ocorreram para o arame rútilico.
- A zona fundida com microestrutura mais grosseira ocorre para o arame “metal cored”, enquanto aquelas resultantes dos arames rútilico e básico são igualmente refinadas.
- Os maiores valores de dureza ocorreram para o arame rútilico, enquanto que os menores valores ocorreram para o arame “metal cored”.
- Caso uma alta taxa de deposição associada 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.
- Caso as propriedades mecânicas adequadas da zona fundida (altas resistência mecânica e tenacidade) sejam os requisitos principais, as condições operacionais mais adequadas envolveriam a utilização do arame “rútilico” na soldagem com 75%Ar-25%CO₂.
- Uma boa aparência superficial do cordão, associada a uma isenção de respingos e a valores intermediários de propriedades mecânicas e penetração, podem ser obtidos com a utilização do arame básico na soldagem com 75%Ar-25%CO₂.

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

- Araújo, W.R., 2004, “Comparação entre a Soldagem Robotizada com Arame Sólido e Metal Cored - A ocorrência do Finger”, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 79 p.
- ASTM - American Society for Testing and Materials, 1989, “ASTM E562 - Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count”, Annual Book of ASTM Standards, pp. 502-507.
- AWS - American Welding Society, 1991, “Welding Process”. In: American Welding Society, “Welding Handbook”, Vol. 2, 8th ed., Ed. AWS, USA, p. 158-190.
- Blackman, S. et al., 1998, “Pulsed MIG Welding with Gás-Shielded Flux Cored Wires - MIG Synergic Update”, Welding & Metal Fabrication - Special Supplement, April, pp. 12-14.
- Braga, E.M., Mota, C.A.M. e FARIAS, J.P., 1998, “Uma Contribuição ao Estudo da Soldagem a Arame Tubular Autoprottegido em Corrente Pulsada”, Anais do XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, Fortaleza, Brasil, 10 p.
- Fals, H.C. e Trevisan, R.E., 1998, “Características do Trincamento Assistido pelo Hidrogênio de um Aço Microligado Soldado pelo Processo FCAW”, Anais do XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, Fortaleza, Brasil, 10 p.
- IIW - International Institute of Welding, 1988, “Guide to the Light Microscope Examination of Ferritic Steel Weld Metals”, IIW Doc. No. IX-1533, 20 p.
- Lancaster, J.F., 1986, “The Physics of Welding”, 2.ed., Ed. Pergamon Press & International Institute of Welding, 340 p.
- Lesnewich, A., 1958, “Control of Melting Rate and Metal Transfer - Part I”, Welding Journal, No. 8, pp. 343s-353s.
- Marques, P.V., Modenesi, P.J. e Bracarense, A.Q., 2005, “Soldagem Mig/Mag e com Arame Tubular”. In: Marques, P.V., Modenesi, P.J. e Bracarense, A.Q., “Soldagem: Fundamentos e Tecnologia”, 1a. ed., Ed. UFMG, BRASIL, p. 233-261.
- Oliveira, J.E.M. e Bracarense, A.Q., 2003, “Estudo da Morfologia do Cordão de Solda Obtido com o Processo Arame Tubular em Diferentes Posições de Soldagem”, Anais do XXIX Congresso Nacional de Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, São Paulo, Brasil, 12 p.
- Santos Neto, N.F. e TREVISAN, R.E., 2004, “Caracterização de Juntas de Aço API 5L X-70 Soldadas pelo Processo de Soldagem a Arco com Arame Tubular Autoprottegido”, Anais do XXX Congresso Nacional de Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, Rio de Janeiro, Brasil, 8 p.
- Starling, C.M.D., Modenesi, P.J. e Borba, T.M.D., 2008, “Desempenho Operacional e Características do Cordão na Soldagem com um Arame Tubular Metal Cored”, Anais do IIW International Congress - II Latin American Welding Congress & XXXIV Congresso Nacional de Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, São Paulo, Brasil, 17 p.
- Starling, C.M.D. e Modenesi, P.J., 2007, “Proposição de Modelo para a Fusão de Arames Tubulares”, Soldagem & Inspeção, Vol. 12, No. 3, pp. 168-178.

- Starling, C.M.D., Modenesi, P.J. e Borba, T.M.D., 2007a, “Estudo das Características do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular Básico”, Anais do XXXIII Congresso Nacional de Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, Caxias do Sul, Brasil, 16 p.
- Starling, C.M.D., Modenesi, P.J. e Borba, T.M.D., 2007b, “Estudo das Características do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular Rutilico”, Anais do XXXIII Congresso Nacional de Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, Caxias do Sul, Brasil, 15 p.
- Starling, C.M.D. e Modenesi, P.J., 2006, “Avaliação da Transferência de Metal de Arames Tubulares”, Soldagem & Inspeção, Vol. 11, No. 3, pp. 147-155.
- Starling, C.M.D. e Modenesi, P.J., 2005a, “Avaliação da Velocidade de Fusão do Arame na Soldagem FCAW com Eletrodo Negativo”, Soldagem & Inspeção, Vol. 10, No. 1, pp. 31-37.
- Starling, C.M.D. e Modenesi, P.J., 2005b, “Efeito da Polaridade do Eletrodo na Velocidade de Fusão de Arames Tubulares”, Soldagem & Inspeção, Vol. 10, No. 3, pp.101-108.
- Starling, C.M.D. et al., 2004, “Avaliação da Velocidade de Fusão de Arames Tubulares”, Soldagem & Inspeção, Vol. 9, No. 1, pp. 31-37.
- Svoboda, H. et al., 2003, “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”, Anais do XXIX Congresso Nacional de Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, São Paulo, Brasil, 12 p.
- Ventrella, V.A., 2004, “Microestrutura e Tenacidade do Aço API 5LX – Grau 70 Soldado com Arame Tubular AWS E-81T1-Ni1 e Eletrodo Revestido AWS E-8010-G”, Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, Porto Alegre, Brasil, 15 p.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

COMPARATIVE STUDY OF OPERATIONAL PERFORMANCE AND BEAD CHARACTERISTICS WHEN WELDING WITH DIFFERENT TUBULAR WIRES IN NEGATIVE POLARITY

Cícero Murta Diniz Starling – Associate Professor, cicero.starling@ufmg.br¹

Paulo José Modenesi – Associate Professor, modenesi@demet.ufmg.br²

Tadeu Messias Donizete Borba – Metallurgic Engineering, tadeumborba@yahoo.com.br³

¹Department of Materials Engineering and Construction - Federal University of Minas Gerais, Rua Espírito Santo, 35, Belo Horizonte-MG, Brazil, Cep. 30.160-030

²Department of Materials Engineering and Construction - Federal University of Minas Gerais, Rua Espírito Santo, 35, Belo Horizonte-MG, Brazil, Cep. 30.160-030

³Gerdau Açominas, Rodovia MG, 443 km 07, Ouro Branco-MG, Brazil, Cep. 36.420-000

Abstract. *This paper compares the bead characteristics of welds deposited of carbon steel tubular wires. Three tubular wires of 1.2mm 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 in negative wire polarity(CC-). 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 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 on negative wire polarity were determined.*

Keywords: FCAW process, tubular wire, weld bead shape, microstructure, negative polarity