

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE GASES DE PROTEÇÃO CONTENDO DIFERENTES TEORES DE O₂ E CO₂ NAS CARACTERÍSTICAS DE REVESTIMENTOS SOLDADOS EMPREGADOS EM ÁREAS CAVITADAS ¹

Alcindo Fernando Moreira ²

Juno Gallego ³

Ruis Camargo Tokimatsu ⁴

Vicente Afonso Ventrella ⁴

Resumo

O presente trabalho avaliou a influência de diferentes gases de proteção na soldagem de revestimento de chapas de aço carbono, simulando um reparo de áreas cavitadas. Foram avaliados aspectos micro e macroscópicos do cordão de solda, tais como: morfologia e fração volumétrica de ferrita delta, microdureza (medida desde o metal de solda até o metal de base), altura, largura e profundidade do cordão, além das taxas de diluição e deposição. Utilizou-se como gás de proteção Argônio puro, CO₂ puro, misturas binárias de Argônio/CO₂, Argônio/O₂ e uma mistura ternária Argônio/CO₂/O₂ (todos gases comerciais). O consumível empregado foi o arame tubular AWS E309LT-1 com 1,2 mm de diâmetro e depositado na forma "bead on plate". Os resultados do presente trabalho mostraram que adições de CO₂, O₂, ou ambos, na matriz de Argônio não alteram a taxa de deposição, mas resultam em alterações na geometria do cordão de solda. Adições de CO₂ na matriz de Argônio elevam os valores de largura e profundidade do cordão, mas reduzem sua altura. Adicionalmente, promovem um aumento da taxa de diluição, uma queda na fração volumétrica da ferrita delta e uma elevação no valor da dureza do metal de solda. A simples substituição de CO₂ por O₂ na matriz de Argônio, a mesmos percentuais, aumenta a taxa de diluição.

Palavras-chave: Gases de proteção; Aço inox austenítico; Arame tubular; Cavitação.

THE EFFECT OF CO₂ ADDITION ON THE WELD METAL FOR FLUX CORED ARC WELDING WITH AWS E309LT-1

Abstract

The present study is focused on the shielding gas composition used on structural steel weld metal simulating cavitation erosion. It was determined macro and microstructural aspects like weld metal morphology, delta ferrite volume fraction, microhardness and weld metal geometric aspects like weld metal width, height and depth, besides dilution and deposition rates. Pure Argon, pure Carbon Dioxide, Argon/CO₂, Argon/O₂ binary mixture and Argon/CO₂/O₂ ternary mixture (all commercial gases) was used. AWS E309LT-1 flux-cored wire with 1.2 mm diameter was used in the form of "bead on plate" deposition. The results of the present study showed that a CO₂ and O₂ additions in the shielding gas doesn't affect the deposition rate. Additions of CO₂ make changes in weld metal geometry were observed, like increasing in width and depth and, decreasing in height. So, additions of CO₂ in the shielding gas results in increasing of the dilution rate and micro hardness and, an decreasing of the delta ferrite volume fraction. Addition of O₂ in the shielding gas results in higher dilution rate than with CO₂, for equal contents in the mixture.

Key words: Shielding gases; Austenitic stainless steel; FCAW; Cavitation erosion.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Aluno do Curso de Mestrado do Depto de Eng. Mecânica da UNESP, Campus de Ilha Solteira.

³ Professor Doutor do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, Campus de Ilha Solteira.

⁴ Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, Campus de Ilha Solteira. ventrella@dem.feis.unesp.br

1 INTRODUÇÃO

Turbinas hidráulicas são fabricadas através de fundição e soldagem. No caso das turbinas de aço carbono, essas são revestidas com aço inoxidável austenítico. Devido às severas condições de funcionamento estas turbinas estão sujeitas ao aparecimento de trincas e ao fenômeno conhecido como cavitação. A recuperação das áreas erodidas por cavitação normalmente é realizada revestindo-se as áreas danificadas através de depósitos por soldagem a arco elétrico e, em razão disso, grande atenção vem sendo dada ao estudo destes processos de soldagem, cujo intuito seria o de conferir uma melhor qualidade e resistência à área recuperada, propiciando maiores intervalos de parada para manutenção e, conseqüentemente, um maior aproveitamento do potencial energético da máquina.

Pesquisas realizadas acerca do uso do processo SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) mostraram que o principal gás formado pela queima do fluxo era o CO₂. Assim, foram iniciados testes para a aplicação do CO₂ como gás de proteção gasosa, até que, na década de 1950, este tipo de atmosfera protetora passou a ser aceita comercialmente.⁽¹⁾

Em virtude da necessidade do aumento de produtividade dos processos de soldagem, devido à segunda guerra mundial, o processo SMAW foi cedendo espaço para outros tipos de processos que possibilitassem maior automação e produtividade. Entre eles se destacou aquele que combinava proteção gasosa a base de CO₂ com o uso de arames com fluxo interno. A primeira apresentação pública deste processo, denominado FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), se deu por volta de 1954.

Na soldagem FCAW os gases de proteção empregados podem ter tanto uma característica inerte, como no caso de misturas a base de Argônio ou Hélio, nas quais os elementos químicos presentes no gás de proteção não migram para o interior do metal de solda, quanto uma característica ativa, para o caso de misturas que utilizam proporções de CO₂ ou O₂, aonde os elementos presentes no gás de proteção tenderão a migrar para o interior do metal de solda, causando alterações no teor de carbono e na quantidade de óxidos.⁽²⁾

Em soldagem, os gases de proteção, segundo sua natureza e composição, têm uma influência preponderante nas características do arco, no tipo de transferência de metal do eletrodo à peça, na velocidade de soldagem, nas perdas por projeções, na penetração e na forma externa da solda. Além disto, o gás também tem influência nas perdas de elementos químicos, na temperatura da poça de fusão, na sensibilidade à fissuração e porosidade, bem como na facilidade da execução da soldagem em diversas posições. Gases nobres (Argônio ou Hélio) são preferidos por razões metalúrgicas, enquanto o CO₂ puro é preferido por razões econômicas. Uma mistura à base de Argônio contendo uma certa quantidade de gás oxidante (O₂ ou CO₂) é necessária para se obter um arco estável. Esta quantidade não deve ser muito alta, pois pode levar a uma grande formação de escória superficial e tornar impossível a obtenção de um arco spray, quando necessário.

Como já dito, o aumento da participação dos processos de soldagem FCAW e GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) em todo o mundo tem ocorrido às custas de um declínio do processo eletrodo revestido.⁽³⁾ Sendo assim, o presente trabalho tem o objetivo de verificar a influência da atmosfera protetora (Ar, CO₂ e O₂) sobre as características micro e macroestruturais do cordão de solda, tais como: morfologia e fração volumétrica de ferrita delta, microdureza, altura, largura e profundidade do cordão, além das taxas de deposição e diluição.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Como material de base foram utilizadas chapas de aço carbono ASTM A-36 cortadas nas dimensões 15 x 75 x 150 mm. A camada de carepa foi removida da superfície através de lixamento manual seguido de retificação. Antes do início da soldagem a superfície do corpo de prova foi limpa com acetona. As chapas foram pesadas em uma balança eletrônica com uma precisão de 10^{-3} gramas antes de serem efetuados os cordões de solda.

O processo de soldagem empregado para a realização dos experimentos foi o FCAW, mecanizado através de uma tartaruga de oxicorte, juntamente com uma fonte inversora de soldagem (Invertec V300I) e utilizando-se o método “bead on plate”. Como consumível foi empregado arame tubular do tipo AWS E309LT-1 com 1,2 mm de diâmetro. A Tabela 1 apresenta a composição química do metal base e do consumível.

Tabela 1. Composição química do metal base e do consumível (%peso).

Elementos	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni
ASTM A-36	0.25	0.80-1.20	0.15-0.40	0.05	0.04	0.2	-	-
AWS E309LT-1	0.02	1.43	0.20	0.024	0.017	0.25	24.8	13.7

Como gases de proteção foram utilizados: Argônio puro, CO₂ puro, misturas binárias Argônio/CO₂ e Argônio/O₂, além de uma mistura ternária Argônio/CO₂/O₂ (todos gases comerciais), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Matriz dos gases de proteção.

Nº do CDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Argônio (%)	100	98	96	92	85	80	75	-	98	90
CO ₂ (%)	-	2	4	8	15	20	25	100	-	8
O ₂ (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2

Após a soldagem os corpos de prova foram limpos de todos os salpicos e escória, e só então efetuada nova pesagem. Os parâmetros de soldagem empregados estão mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem.

Fonte de soldagem: INVERTEC V300I

Posição de soldagem: plana

Metal base: ASTM A-36

Consumível: AWS E309LT-1 (1,2 mm de diâmetro)

Gás de proteção: Ar, CO₂, Ar/CO₂, Ar/O₂ e Ar/CO₂/O₂.

Vazão do gás: 15 l/min

Velocidade de soldagem: 300 mm/min

Velocidade do arame: 6,35 m/min

Tensão de operação: 30V

Distância bico/peça: 20mm

O tempo de soldagem foi monitorado através de um osciloscópio para cada gás empregado. A Figura 1 mostra um esquema da seção transversal do cordão de solda (*bead on plate*) e a nomenclatura utilizada para a geometria do cordão de solda.

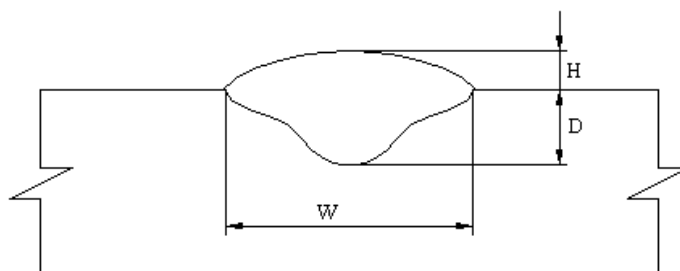


Figura 1. Representação esquemática da seção transversal do cordão *bead on plate*: Largura do cordão de solda (W), Profundidade do cordão (D) e Reforço do cordão (H).

A caracterização dos constituintes microestruturais via microscopia ótica foi obtida com auxílio de um banco metalográfico NEOPHOT-21. Posteriormente, foram realizadas medidas de microdureza empregando uma carga de 0,1kgf e percorrendo distâncias de, aproximadamente, 5mm desde o centro do metal de solda até o metal base.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta os valores da taxa de deposição, taxa de diluição, profundidade do cordão (D), altura do cordão (H) e largura do cordão (W), obtidos através da soldagem FCAW sob diferentes atmosferas protetoras.

Tabela 4. Valores da taxa de deposição, taxa de diluição e geometria do cordão.

CDP	Gás de proteção	Taxa de deposição [kg/h]	Taxa de diluição [%]	D [mm]	H [mm]	W [mm]
1	Argônio puro	2,56	11,06	0,67	3,91	5,54
2	98%Ar + 2% CO ₂	2,56	12,06	0,75	3,37	6,78
3	96%Ar + 4% CO ₂	2,54	17,50	0,91	2,82	7,92
4	92%Ar + 8% CO ₂	2,58	19,93	1,04	2,70	8,43
5	85%Ar + 15% CO ₂	2,52	21,50	1,12	2,41	9,30
6	80%Ar + 20% CO ₂	2,56	23,53	1,16	2,67	9,37
7	75%Ar + 25% CO ₂	2,53	24,14	1,15	2,49	9,86
8	CO ₂ puro	2,48	32,42	1,39	2,41	10,05
9	98%Ar + 2%O ₂	2,55	13,76	0,94	4,48	6,86
10	90%Ar+8%CO ₂ +2%O ₂	2,52	14,92	0,90	4,10	9,34

A Tabela 5 apresenta as características macrográficas do cordão para cada condição. Na Tabela 6 estão contidos tanto a micrografia representativa quanto a fração volumétrica de ferrita delta [δ].

Os perfis de microdureza para os diferentes tipos de misturas de proteção estão representados na Figura 2.

Tabela 5. Macrografia do cordão de solda, com destaque para aspectos geométricos. Processo de soldagem: FCAW. Consumível: AWS E309LT-1.

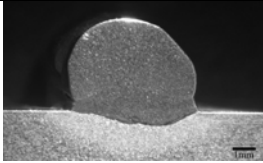


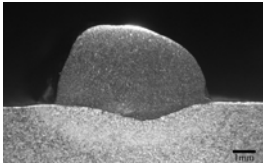


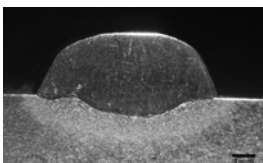


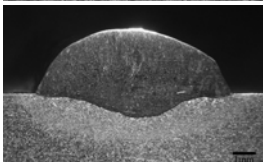


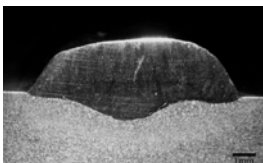





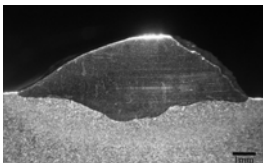


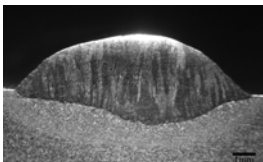


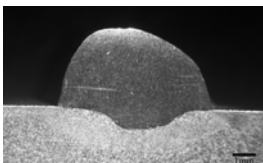


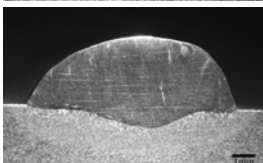


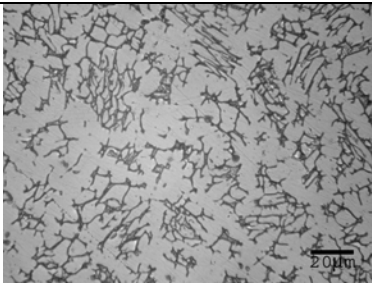
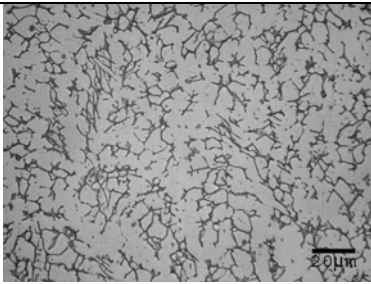
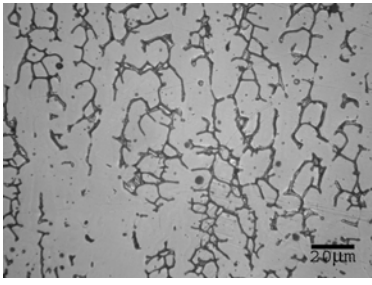
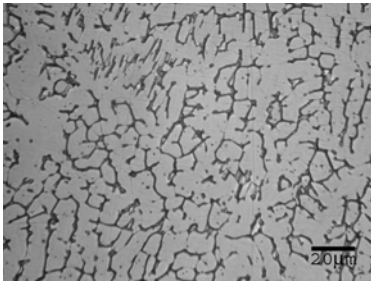
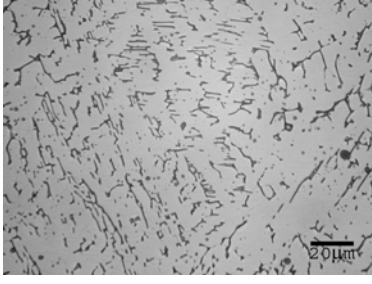
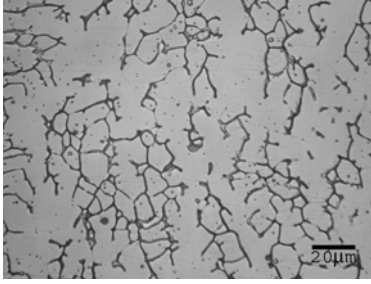
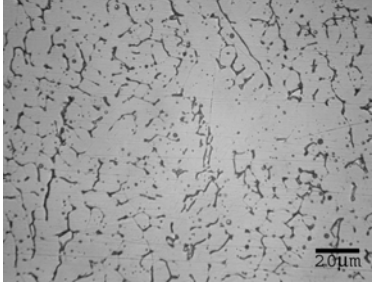
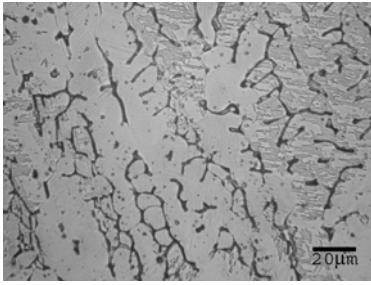
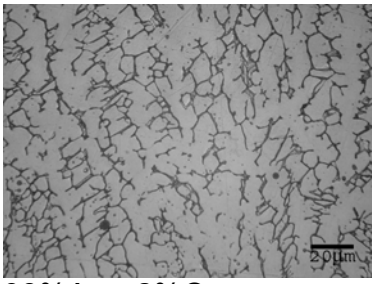
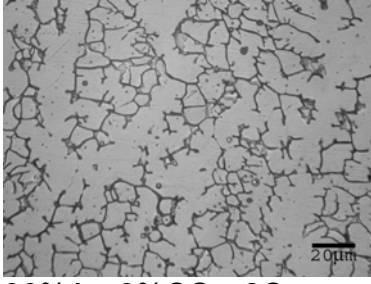
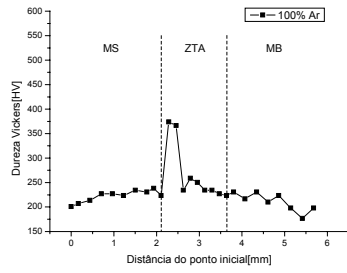
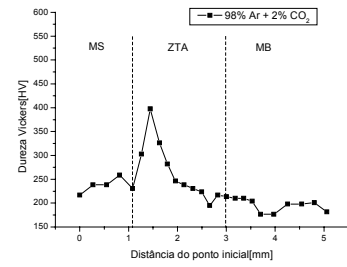
Mistura Gasosa	CDP	Macro	Cordão	Penetração
100% Ar	1			
98%Ar+2%CO ₂	2			
96%Ar+4%CO ₂	3			
92%Ar+8%CO ₂	4			
85%Ar+15%CO ₂	5			
80%Ar+20%CO ₂	6			
75%Ar+25%CO ₂	7			
100% CO ₂	8			
98%Ar + 2%O ₂	9			
90%Ar+8%CO ₂ +2O ₂	10			

Tabela 6. Micrografia do metal de solda e correspondentes fração volumétrica de ferrita delta [δ].
Ataque: Villela.

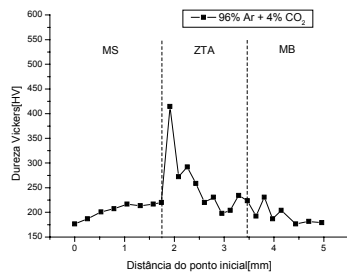
Micrografia	% δ	Micrografia	% δ
 100% Ar	24,2 ± 3,9	 98%Ar+2%CO ₂	32,4 ± 4,3
 96%Ar+4%CO ₂	18,8 ± 1,2	 92%Ar+8%CO ₂	24,2 ± 3,4
 85%Ar+15%CO ₂	21,5 ± 1,6	 80%Ar+20%CO ₂	16,8 ± 0,9
 75%Ar+25%CO ₂	17,9 ± 2,2	 100% CO ₂	17,4 ± 1,4
 98%Ar + 2%O ₂	19,3 ± 0,6	 90%Ar+8%CO ₂ +2O ₂	18,6 ± 1,8



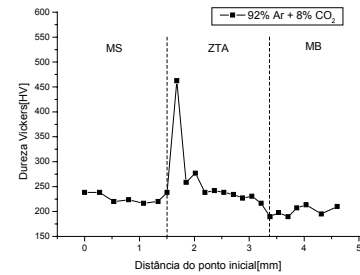
a)



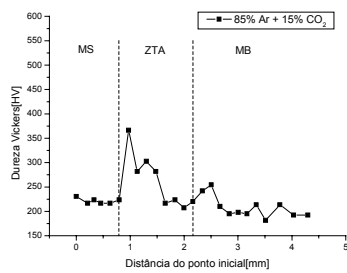
b)



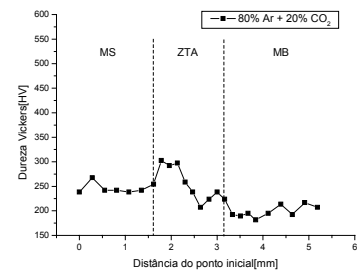
c)



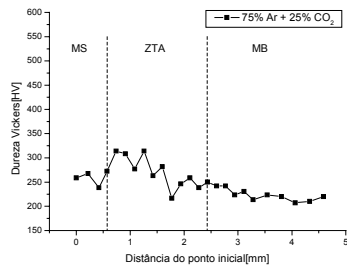
d)



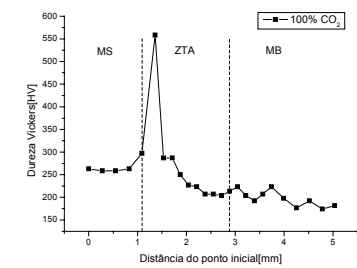
e)



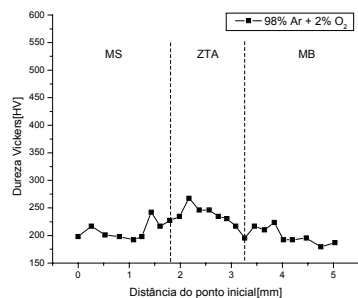
f)



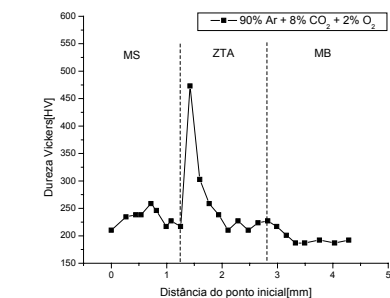
g)



h)



i)



j)

Figura 2. Perfis de microdureza: a) 100%Ar, b) 98%Ar+2%CO₂, c) 96%Ar+4%CO₂, d) 92%Ar+8%CO₂, e) 85%Ar+15%CO₂, f) 80%Ar+20%CO₂, g) 75%Ar+25%CO₂, h) 100%CO₂, i) 98%Ar + 2% O₂ e j) 90%Ar+8%CO₂+2%O₂.

Analisando-se a Tabela 4, relativa à taxa de deposição [kg/h] do arame AWS E309LT-1 em função da porcentagem de Argônio, CO₂ e O₂ no gás de proteção, pode-se perceber que a taxa de deposição apresentou uma variação percentual máxima em seus valores da ordem de 4%. Tal comportamento, de acordo com os ensaios realizados, indica que a taxa de deposição na soldagem FCAW não é significativamente afetada pelo tipo de gás de proteção. Resultados semelhantes também foram obtidos por Suban et al.,⁽⁴⁾ o qual estudou o efeito de gases de proteção contendo misturas de Ar/CO₂ e Ar/He/CO₂/O₂ sobre a taxa de deposição na soldagem FCAW, constatando que aumentos significativos nos valores da taxa de deposição estão mais intimamente ligados a variações na corrente de soldagem ou na distância bico de contato/peça do que ao tipo de gás de proteção utilizado. Resultados discordantes aos anteriores acerca do comportamento da taxa de deposição em relação ao tipo de gás de proteção foram conseguidos por Church et al.⁽⁵⁾ Segundo este autor, o tipo de gás de proteção tem uma grande influência sobre a taxa de deposição.

Ainda em relação à Tabela 4, mas com atenção voltada para a taxa de diluição [%], pode-se observar um aumento desta grandeza a medida que a porcentagem de CO₂ no gás de proteção se eleva, tanto para adições de CO₂ na matriz Argônio quanto para adições de CO₂ na matriz Argônio/O₂. Este fato pode ser melhor visualizado com auxílio da Figura 3, a qual representa o comportamento da taxa de diluição em função do percentual de CO₂ no gás de proteção.

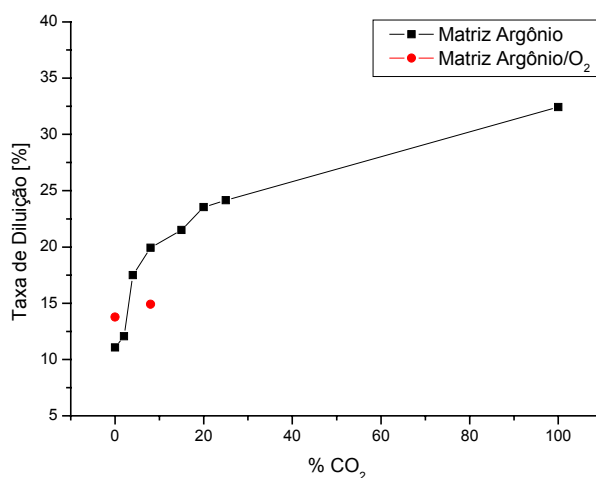


Figura 3. Taxa de diluição [%] em função do percentual de CO₂ no gás de proteção.

O aumento da taxa de diluição a medida que cresce o teor de CO₂ pode ser decorrente de um acréscimo na liberação de energia através da abertura do arco sob uma atmosfera com maior teor de oxigênio potencial, o que promove uma poça de fusão de temperatura mais elevada que aquela formada utilizando-se Argônio puro e, desse modo, facilitando a diluição do metal de adição no metal de solda.

Verificou-se também que adições de CO₂, tanto na matriz de Argônio quanto na de Argônio/O₂, promoveram um aumento na largura do cordão e uma diminuição do reforço em razão, provavelmente, de uma maior temperatura do arco, a qual faz com que o metal de adição se “espalhe” mais sobre a superfície do corpo de prova.

As maiores temperaturas do arco, causadas pelo aumento do percentual de CO₂ no gás de proteção, permitem entender o comportamento da profundidade do

cordão, que teve um aumento em seus valores a medida que crescia a porcentagem de CO₂ na matriz de Argônio. No caso da matriz Argônio/O₂ pode-se dizer que a profundidade do cordão manteve-se constante com o aumento de CO₂. Nesta matriz variações significativas foram somente observadas com respeito a altura e reforço do cordão.

Em relação à adição de O₂ na matriz de Argônio foi possível constatar que, quando comparado ao mesmo percentual de CO₂ nesta matriz, seu cordão apresentou um maior valor para a taxa de diluição. Tal fato leva a crer que, para mesmos percentuais na mistura, a energia liberada pela abertura do arco é maior no caso do O₂.⁽⁶⁾

Através da Tabela 5 foi possível constatar que houve uma tendência de diminuição da fração de ferrita delta com o aumento do teor de CO₂ tanto para a matriz de Argônio quanto para a de Argônio/O₂. Tal comportamento pode ser explicado pelo efeito gamagênico (estabilizador da austenita) desse gás, pois este contém carbono, que é um elemento fortemente austenitizante. Além disso, o aumento da taxa de diluição a medida que cresce o percentual de CO₂ leva a acreditar que maiores porcentagens de CO₂ geram um maior aquecimento da poça de fusão e, conseqüentemente, fazem com que o material se resfrie mais lentamente. Esse comportamento, conforme descrito por Modenesi,⁽⁷⁾ favorece a transformação da ferrita delta em austenita, já que esta necessita de um certo tempo de permanência a elevadas temperaturas para que possa se transformar em austenita. Dessa forma, maiores quantidades de CO₂ no gás de proteção aumentam a temperatura do material e promovem um resfriamento mais lento, gerando uma condição mais favorável para a transformação da ferrita delta em austenita, diminuindo o seu percentual na microestrutura.

Com relação aos perfis de microdureza contidos na Figura 2 foi possível observar que ocorreu um ligeiro aumento de dureza do MS (Metal de Solda) com o aumento do teor de CO₂ para ambas as matrizes (Argônio e Argônio/O₂). No caso da ZTA (Zona Termicamente Afetada) e do MB (Metal Base) não foi possível observar nenhuma relação bem definida entre seu perfil de dureza e a quantidade de CO₂ presente no gás de proteção.

4 CONCLUSÕES

De acordo com as condições que foram realizadas as soldagens, conclui-se que:

- A adição de teores crescentes de CO₂ no gás de proteção (matriz Argônio) não altera a taxa de deposição, por outro lado eleva consideravelmente a taxa de diluição.
- A adição de CO₂ no gás de proteção (matriz Argônio) altera a geometria do cordão de solda, elevando os valores de largura e profundidade, e reduzindo a altura.
- A adição de CO₂ no gás de proteção reduz a fração volumétrica da ferrita delta e eleva o valor da dureza do metal de solda.
- A adição de O₂ no gás de proteção desempenha papel semelhante ao CO₂ sobre a taxa de diluição, embora com maior intensidade.
- São recomendados ensaios complementares de resistência à cavitação para melhor compreender o efeito das misturas analisadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FUNDUNESP pelo apoio financeiro a este projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 AWS – American Welding Society, **Welding Handbook**, Miami. 1991.
- 2 WAINER, E.; BRANDI, Sérgio D.; MELLO, Fábio D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**, Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1992.
- 3 Mukhopadhyay, S. Effect of shielding gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux cored-wires, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 29, p. 262-268, 2006.
- 4 Suban, M.; Tušek, J. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 119, p. 185-192, 2001.
- 5 Church, J.G.; Imaizumi, H. T.I.M.E. Process, **IIW/IIS Doc. XII-1199-90**, 1990.
- 6 Jonsson, P.G.; Murphy, A.B.; Szekely, J. The influence of oxygen additions on argon shielding gas metal arc welding processes, **Welding Journal**, vol 74, N2, pp. 48s-58s, 1995.
- 7 Modenesi, P.J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. São Paulo, SENAI-SP, 2001. 100 p.