

EFEITO DA ADIÇÃO DE CO₂ NA ATMOSFERA PROTETORA EM PROCESSOS DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR AWS E309LT-1

Alcindo Fernando Moreira – afmoreira@aluno.feis.unesp.br

Juno Gallego – gallego@dem.feis.unesp.br

Ruis Camargo Tokimatsu – ruis@dem.feis.unesp.br

Wyser José Yamakami – wyser@dem.feis.unesp.br

Vicente Afonso Ventrella – ventrella@dem.feis.unesp.br

UNESP – Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Brasil Centro, 56 – 15.385-000 – Ilha Solteira – SP – Brasil. Tel.:(18)3743-1038; fax.:(18)3742-2992.

Resumo. Foi estudado o efeito do tipo de gás de proteção na soldagem de revestimento com aço inoxidável austenítico depositado pelo processo arame tubular sobre chapas de aço carbono estrutural ASTM A-36. Tal procedimento visa simular em laboratório a soldagem de revestimento realizada sobre turbinas hidráulicas tipo FRANCIS danificadas por erosão cavitacional. O propósito deste trabalho foi avaliar aspectos micro e macroscópicos do cordão de solda, tais como: variações na morfologia e fração volumétrica dos microconstituintes, particularmente a ferrita delta, variações na microdureza, a qual foi medida desde o metal de solda até o metal de base, bem como variações nos parâmetros geométricos do cordão de solda, tais como: altura, largura e profundidade do cordão, além das taxas de diluição e deposição. Utilizou-se como gás de proteção Argônio puro, CO₂ puro e misturas binárias de Argônio e CO₂ (98%Ar+2%CO₂, 96%Ar+4%CO₂, 92%Ar+8%CO₂, 85%Ar+15%CO₂, 80%Ar+20%CO₂ e 75%Ar+25%CO₂ - todos gases comerciais). O consumível utilizado foi arame tubular AWS E309LT-1 com 1,2 mm de diâmetro e depositado na forma “bead on plate”. Os resultados obtidos indicam que a adição de CO₂ no gás de proteção (Argônio) promove significativas alterações tanto na morfologia e fração volumétrica de ferrita delta quanto nos parâmetros geométricos, na microdureza e na taxa de diluição.

Palavras-chave: gases de proteção, aço inox austenítico, arame tubular, cavitação.

1. INTRODUÇÃO

Por volta de 1920 teve início o desenvolvimento de processos de soldagem que utilizavam proteção gasosa. Foi constatado, a partir de pesquisas realizadas, que a presença destes gases facilitava a abertura do arco, protegia o metal de solda da contaminação atmosférica e proporcionava a adição de elementos de liga desejáveis no interior do cordão. No entanto, o desenvolvimento do processo eletrodo revestido, ou SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), no final desta década reduziu o interesse por outros processos devido a sua simplicidade e baixo custo. Pesquisas realizadas acerca do uso do processo SMAW 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, em razão da segunda guerra mundial, o processo SMAW foi cedendo espaço para outros tipos de processos que possibilitassem maior automação e produtividade, como aquele no qual a combinação entre a proteção gasosa a base de CO₂ e o uso de arames com fluxo interno proporcionou um avanço ainda maior na qualidade do cordão de solda gerado. A primeira apresentação pública deste processo,

denominado FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), se deu por volta de 1954. Posteriormente, surgiram variações deste processo como, por exemplo, o que utiliza arames tubulares que não necessitam de gases de proteção (auto-protegidos) ou aquele que usa fluxo aglomerado para a proteção do cordão SAW (*Submerged Arc Welding*). Na soldagem FCAW os gases de proteção empregados podem ter tanto uma característica inerte, como no caso de misturas a base de Argônio ou Helio, 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⁾.

Desse modo, 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. Os gases nobres (Argônio ou Helio) 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 (Oxigênio 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 ⁽³⁾.

O aumento da participação dos processos de soldagem FCAW e GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) em todo o mundo tem ocorrido as custas de um declínio do processo eletrodo revestido. Isto vem ocorrendo porque os processos de soldagem a arco elétrico com atmosfera protetora (FCAW e GMAW) têm apresentado um contínuo desenvolvimento devido às suas boas flexibilidades e custos reduzidos, sendo esses processos os mais adequados à mecanização. Adicionalmente, tais processos de soldagem vêm apresentando ao longo dos anos contínuos desenvolvimentos através da introdução das tecnologias “inverter”, arco pulsado, alimentadores de arames mais confiáveis e a utilização de gases de proteção à base de Argônio.

Sendo assim, o presente trabalho tem o objetivo de verificar a influência da atmosfera protetora sobre características micro e macroestruturais do cordão de solda, tais como: variações na morfologia e fração de ferrita delta, no perfil de dureza, na altura, largura e profundidade do cordão, além de variações nas taxas de deposição e diluição do metal de solda, obtido através da soldagem FCAW com arame AWS E309LT-1.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Como material de base utilizou-se 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 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 segundo a classificação AWS A 5.22 do tipo 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 e misturas binárias Argônio/CO₂, 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
Argônio (%)	100	98	96	92	85	80	75	-
CO ₂ (%)	-	2	4	8	15	20	25	100

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 E309L-T1 (1,2 mm de diâmetro)
Gás de proteção: Ar, CO ₂ e mistura Ar/CO ₂ .
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 uma macrografia representativa da chapa soldada (“*bead on plate*”) e a nomenclatura utilizada para a geometria do cordão de solda.

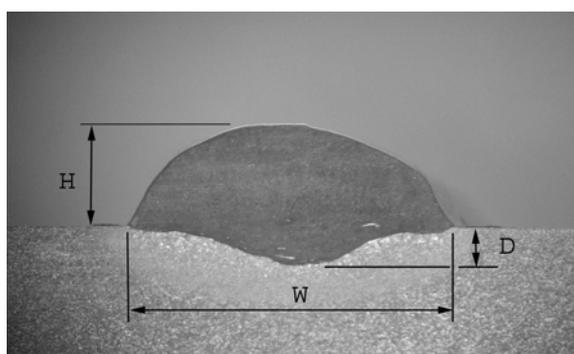


Figura 1. Macrografia representativa da soldagem “*bead on plate*”: Largura do cordão de solda (W), Profundidade do cordão (D) e Reforço do cordão (H).

Os valores de altura, largura e profundidade do cordão foram conseguidos através da utilização de um programa computacional para tratamento de imagens (Adobe Photoshop[®]). Valores de taxa de diluição e fração de ferrita delta também foram mensurados usando-se outro programa específico para o tratamento de imagens (Image Tool[®]).

A caracterização dos constituintes microestruturais via microscopia ótica foi obtida com auxílio de um banco metalográfico NEOPHOT-21 e utilizando aumentos de 500X. Posteriormente, foram realizadas medidas de microdureza empregando uma carga de 0,1kgf e percorrendo distâncias de, aproximadamente, 5mm desde o 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 e utilizando o consumível AWS E309LT-1.

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

Para uma melhor visualização dos resultados contidos na Tabela 4, estes foram transformados em gráficos e estão representados pelas Figuras 2, 3 e 4.

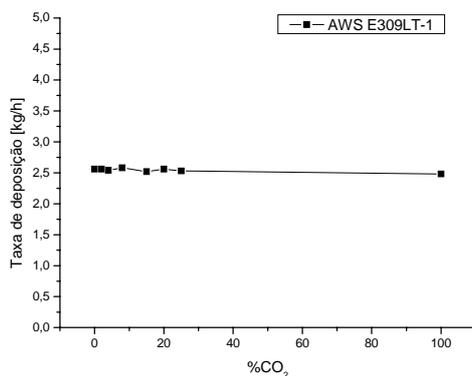


Figura 2. Taxa de deposição [kg/h] em função da porcentagem de CO₂ na mistura binária Argônio/CO₂.

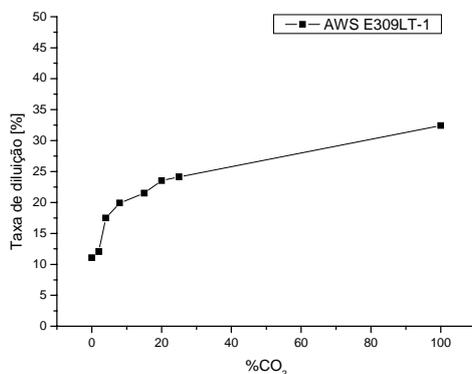
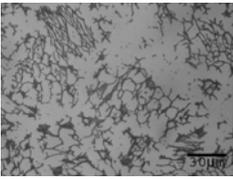
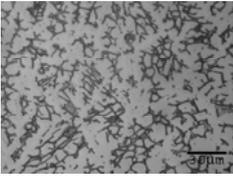
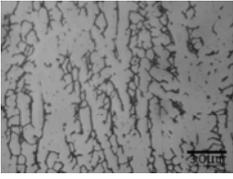
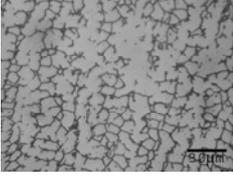
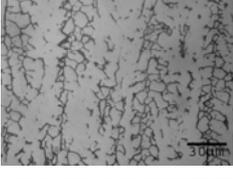
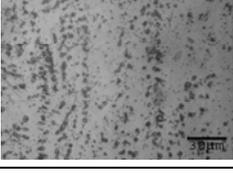


Figura 3. Taxa de diluição [%] em função da porcentagem de CO₂ na mistura binária Argônio/CO₂.

A Figura 5 representa graficamente os valores médios da fração de ferrita delta presente no metal de solda em função do tipo de gás de proteção utilizado.

A Tabela 5 contém, além das micrografias do metal de solda, os valores médios e correspondentes desvio-padrão da fração de ferrita delta para os vários corpos de prova em questão.

Tabela 5. Micrografia do metal de solda e correspondentes valores médios e desvio-padrão para a fração de ferrita delta. Ataque: Villela.

Gás de Proteção	CDP	MICRO	Fração de ferrita delta (%)
100% Ar	1		$24,2 \pm 3,9$
98% Ar+2% CO ₂	2		$32,4 \pm 4,3$
96% Ar+4% CO ₂	3		$18,8 \pm 1,2$
92% Ar+8% CO ₂	4		$24,2 \pm 3,4$
85% Ar+15% CO ₂	5		$21,5 \pm 1,6$
80% Ar+20% CO ₂	6		$16,8 \pm 0,9$
75% Ar+25% CO ₂	7		$17,9 \pm 2,2$
100% CO ₂	8		$17,4 \pm 1,4$

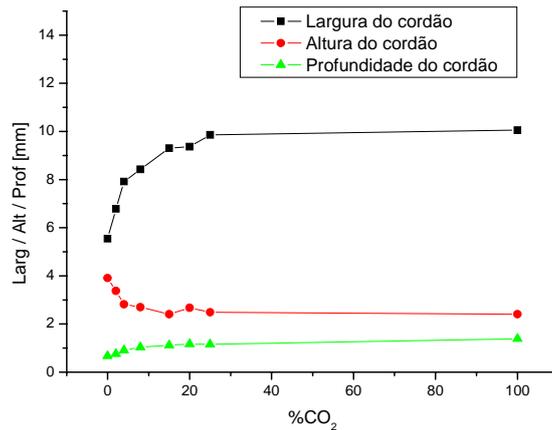


Figura 4. Profundidade (D), altura (H) e largura (W) do cordão de solda em função da porcentagem de CO₂ na mistura binária Argônio/CO₂.

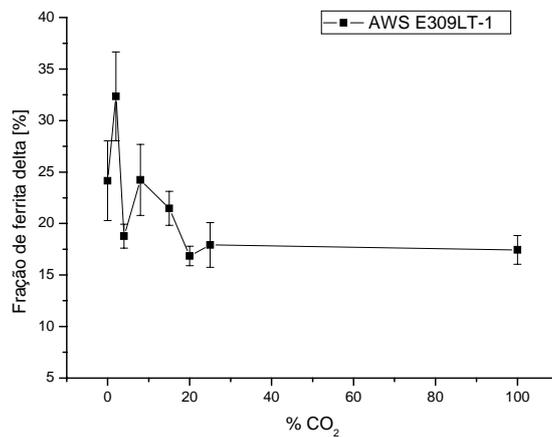
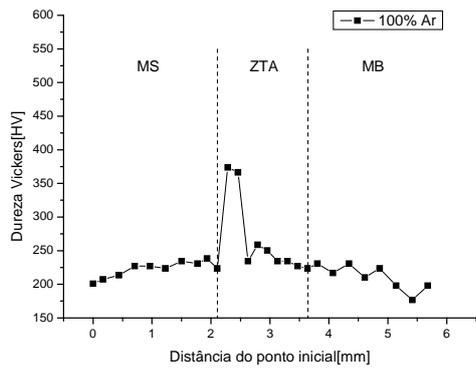


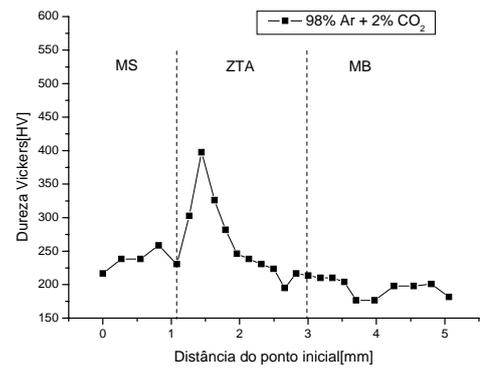
Figura 5. Valores médios da fração de ferrita delta encontrada no metal de solda em função do tipo de gás de proteção utilizado.

Analisando-se a Figura 2, relativa a taxa de deposição [kg/h] do arame AWS E309LT-1 em função da porcentagem de CO₂ na mistura binária Argônio/CO₂, pode-se perceber que a taxa de deposição apresentou uma variação percentual máxima em seus valores da ordem de 4%, com leve tendência de queda na faixa de variação da quantidade de CO₂ (0 a 100%) no gás de proteção. Tal comportamento, de acordo com os ensaios realizados, indica que a taxa de deposição na soldagem FCAW não é significativamente afetada pelo aumento da quantidade de CO₂ na mistura binária Argônio/CO₂. 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 diluição 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.

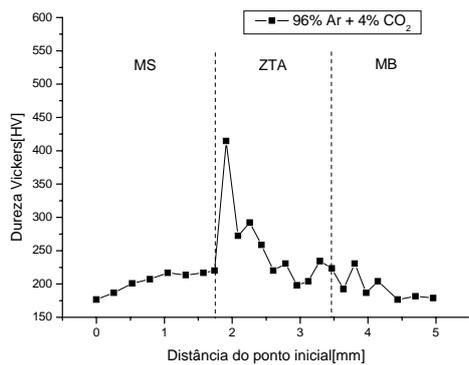
Os perfis de microdureza para os diferentes tipos de misturas de proteção estão representados na Figura 6.



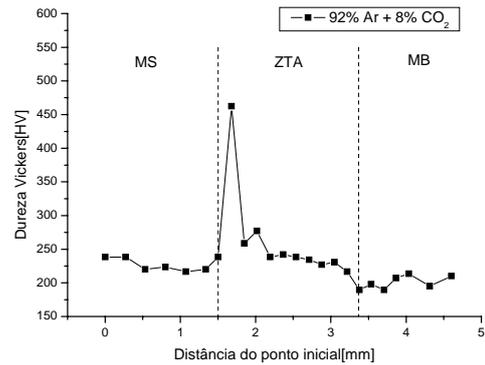
a)



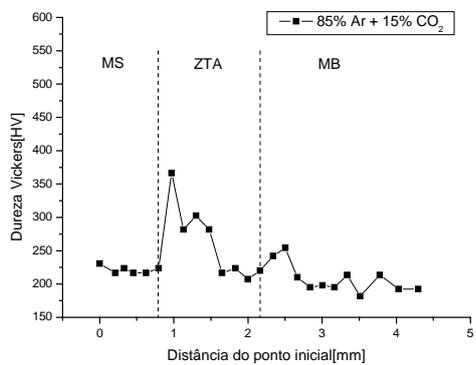
b)



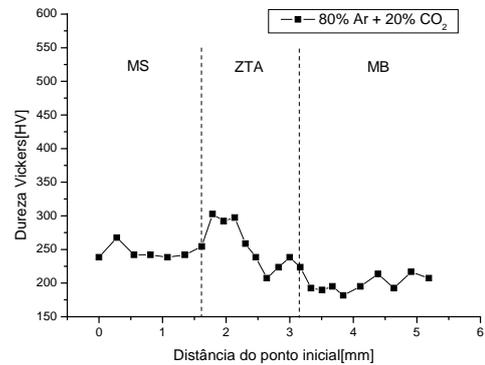
c)



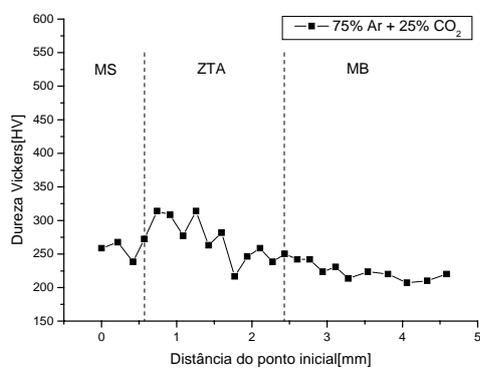
d)



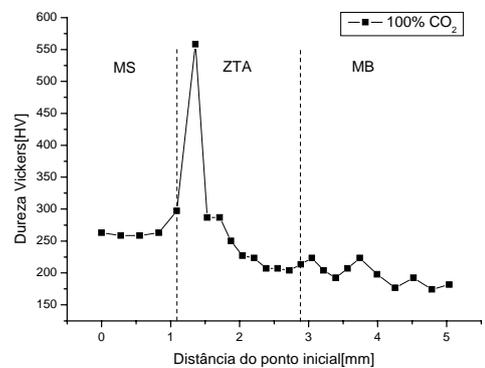
e)



f)



g)



h)

Figura 6. Perfis de microdureza para as diferentes misturas ensaiadas: 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.

Relativamente a Figura 3, que representa a taxa de diluição [%] do arame AWS E309LT-1 em função da porcentagem de CO₂ na mistura binária Argônio/CO₂, pode-se observar um aumento desta grandeza a medida que a porcentagem de CO₂ no gás de proteção se eleva. Tal comportamento pode ser decorrente do aumento do potencial de oxigênio da mistura, promovendo, assim, 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.

O efeito do aumento do potencial de oxigênio do gás de proteção, decorrente da introdução de uma maior porcentagem de CO₂ na mistura binária Argônio/CO₂, também pode ser observado ao se analisar a Figura 4. A partir desta figura, pode-se verificar um aumento na largura do cordão de solda 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. O aumento da largura do cordão, entretanto, é mais intenso até cerca de 25%CO₂, sendo que, a partir deste valor, a largura manteve-se praticamente constante.

Maiores temperaturas do arco, causadas pelo aumento de CO₂ no gás de proteção, também permitem entender o comportamento da altura e profundidade do cordão. No caso da altura do cordão houve uma diminuição em seus valores a medida que crescia a porcentagem de CO₂ na mistura binária Argônio/CO₂, simultaneamente, houve um aumento na profundidade do cordão para mesmos valores percentuais de CO₂. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento da taxa de diluição com a elevação da porcentagem de CO₂ na mistura, o que faz com que mais metal de adição penetre no metal base, aumentando a penetração e diminuindo o reforço do cordão.

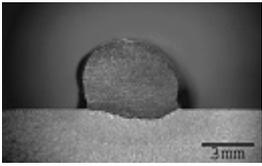
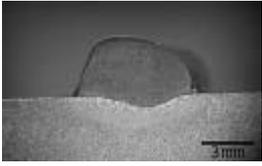
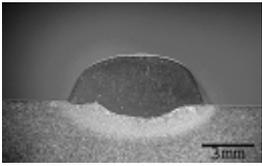
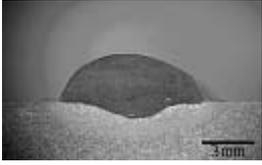
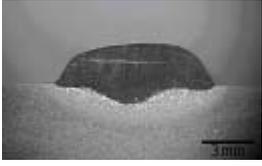
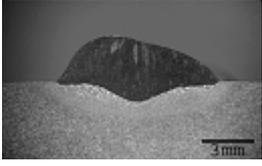
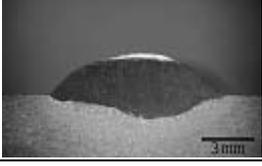
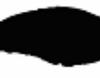
Substanciais aumentos de penetração e diminuições de altura do cordão também foram verificados até cerca de 25%CO₂ na mistura binária Argônio/CO₂, sendo que, para maiores percentuais deste gás, ambas, penetração e altura do cordão, mantiveram-se praticamente constantes.

Pela análise da Figura 5, foi possível constatar que houve uma tendência de diminuição da fração de ferrita delta com o aumento do teor de CO₂ no gás de proteção. 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 na mistura binária Argônio/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⁽⁶⁾, 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 e diminuindo o seu percentual na microestrutura.

Com relação aos perfis de microdureza contidos na Figura 6, foi possível observar que ocorreu um sensível aumento de dureza do MS(Metal de Solda) com o aumento do teor de CO₂ no gás de proteção. 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, sendo o comportamento da dureza para estas regiões mais dependente da taxa de resfriamento.

A Tabela 6 mostra a macrografia do cordão de solda, destacando os principais aspectos geométricos dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 6. Macrografia do cordão de solda, com destaque para aspectos geométricos. Processo de soldagem: FCAW. Consumível: AWS E309LT-1.

Gás de Proteção	CDP	MACRO	Cordão de Solda	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			

4. CONCLUSÕES

- A adição de CO₂ no gás de proteção não altera a taxa de deposição.
- A adição de CO₂ no gás de proteção 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 eleva a taxa de diluição.

- Misturas binárias Argônio/CO₂ com percentuais de CO₂ maiores que 25% praticamente não causaram alterações tanto na geometria do cordão de solda quanto nos valores da taxa de diluição.
- A adição de CO₂ no gás de proteção reduz a fração volumétrica da ferrita delta na microestrutura.
- A adição de CO₂ no gás de proteção eleva o valor da dureza do metal de solda.

5. AGRADECIMENTOS

Ao autores agradecem à FUNDUNESP pelo suporte financeiro ao projeto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, **IHW/IIS Doc. XII-1199-90**, 1990.
6. Modenesi, P.J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. São Paulo, SENAI-SP, 2001. 100 p.

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

Alcindo Fernando Moreira – afmoreira@aluno.feis.unesp.br

Juno Gallego – gallego@dem.feis.unesp.br

Ruis Camargo Tokimatsu – ruis@dem.feis.unesp.br

Wyser José Yamakami – wyser@dem.feis.unesp.br

Vicente Afonso Ventrella – ventrella@dem.feis.unesp.br

State University of São Paulo - UNESP, Department of Mechanical Engineering, Av. Brasil centro, 56 – 15.385-000 – Ilha Solteira – SP – Brazil. Tel.:(18)3743-1038; fax.:(18)3742-2992.

Abstract. *The present study is focused on ASTM A-36 structural steel weld metal characterization, welded by FCAW (Flux Cored Arc Welding) with different shielding gas composition, and applied on FRANCIS hydraulic machines with cavitation erosion. The objective of this work was to determine weld metal aspects like microconstituent morphology, delta ferrite volume fraction and microhardness. It was determined weld metal width, height and depth, dilution rate and deposition rate. Pure Argon, pure Carbon Dioxide and Argon/CO₂ binary mixture (98%Ar+2%CO₂, 96%Ar+4%CO₂, 92%Ar+8%CO₂, 85%Ar+15%CO₂ e 75%Ar+25%CO₂ – commercial gases) was used. AWS E309LT-1 flux-cored wire with 1.2 mm diameter was used. Weld metal geometry, dilution rate, microhardness, morphology and delta ferrite content, all with different addition of CO₂ on the shielding gas, showed important changes.*

Keywords. *Shielding gases, austenitic stainless steel, FCAW, cavitation erosion.*