

Efeito da Adição de H₂ aos Gases de Proteção Convencionais na Soldagem GMAW do Aço C e Transferência por Curto-Circuito. Parte 1: Qualidade do Cordão e Estabilidade da Transferência

Luiz Claudio Soares Tatagiba¹, Renata Barbosa Gonçalves², Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos³

¹ Petrobras, Macaé, RJ, Brasil.

² Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PPGECM, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

³ Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Centro de Ciência e Tecnologia – CCT, Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

Recebido: 28 Jul., 2016

Aceito: 27 Out., 2017

E-mails: luiztatagiba@petrobras.com.br
(LCST), renatahaa@gmail.com (RBG),
paranhos@uenf.br (RPRP)

Resumo: Este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da adição de um gás redutor, no caso o H₂, nas misturas convencionais Ar, Ar+10%CO₂, Ar+25%CO₂ e CO₂ na soldagem do aço carbono pelo processo Gas Metal Arc Welding (GMAW) com transferência por curto-circuito. Foram avaliados o aspecto do cordão e a estabilidade da transferência. Cordões de solda foram produzidos com os gases convencionais e com a adição de 2%, 4% e 6% de H₂. As soldas foram do tipo cordão sobre a chapa, na posição plana e processo mecanizado, arame ER 70S-6 de 1,2 mm, Distância do Bico de Contato a Peça (DBCP) de 12 mm, ângulo da tocha de 90° em relação à face da solda, velocidade de soldagem de 300 mm/min e vazão do gás de proteção de 15 l/min. A velocidade de alimentação do arame foi regulada para as tensões dentro da faixa de 20 V a 23 V. As soldas foram avaliadas por inspeção visual, por líquido penetrante e por macrografias. Os sinais elétricos foram captados durante a soldagem e analisados por meio dos índices: Desvio padrão de picos de corrente (DPPC), desvio padrão do período de arco aberto (DPAA), desvio padrão do período de curto-circuito (DPCC) e índice Vilarinho de regularidade da transferência em curto-circuito (IVcc). Os resultados dos ensaios visual, líquido penetrante e macrografias indicaram a possibilidade de soldagem do aço carbono com Ar com até 4% H₂, Ar+10%CO₂ com até 4% H₂, Ar+25%CO₂ com até 2% H₂ e CO₂ puro com até 6% de H₂. Pelos índices de estabilidade da transferência DPPC, DPAA, DPCC e IVcc, a adição de H₂ nas misturas com maior potencial de oxidação produziram soldas com estabilidade igual ou melhor que para estes gases comerciais sem adição de H₂. Já para os gases com baixo potencial de oxidação, a adição de H₂ provocou instabilidade da transferência. As misturas Ar+25%CO₂, Ar+25%CO₂+2%H₂, CO₂ e CO₂+4%H₂ foram as que apresentaram melhor estabilidade da transferência.

Palavras chave: Soldagem GMAW; Estabilidade da transferência; Efeito do hidrogênio; Potencial de oxidação.

Effect of H₂ Addition to Conventional Shielding Gases for GMAW of C Steel with Short-Circuit Transfer. Part 1: Weld Bead Quality and Transfer Stability

Abstract: This work has the objective to evaluate the effect of the addition of a reducing gas, in this case H₂, in the conventional mixtures Ar, Ar+10%CO₂, Ar+25%CO₂ and CO₂ in the welding of carbon steel by the GMAW process using short circuit transfer. There were evaluated weld bead appearance and transfer stability. Weld beads were produced with the conventional gases and with the addition of 2%, 4% and 6% H₂. The welds were of the type bead on plate, in flat position and mechanized process, wire ER 70S-6 of 1.2 mm, distance from the nozzle to the workpiece was 12 mm, torch angle of 90° with the face of welding, welding speed of 300 mm/min and shielding gas flow rate of 15 l/min. The wire feed speed was set to voltages within the range of 20 V and 23 V. The welds were evaluated by visual inspection, dye penetrant and macrographs. The electrical signals were captured during welding and analyzed by means of the indexes: Standard Deviation of Current Peaks (SDCP), Standard Deviation of Open Arc Period (SDOP), Standard Deviation of Short-circuit Period (SDSP) and Vilarinho index regularity of the short-circuit transfer (IVcc). The results of visual tests, dye penetrant and macrographs indicated the possibility of welding carbon steel with Ar with up to 4%H₂, Ar+10%CO₂ with up to 4%H₂, Ar+25%CO₂ with up to 2%H₂ and CO₂ with up to 6%H₂. According to the transfer stability indexes SDCP, SDOP, SDSP and IVcc, the addition of H₂ in mixtures with a higher



oxidation potential produced welds with stability equal to or better than those for commercial shielding gases without the addition of H₂. Already for the shielding gases with low oxidation potential, the addition of H₂ promoted transfer instability. Mixtures Ar+25%CO₂, Ar+25%CO₂+2%H₂, CO₂ and CO₂+4%H₂ showed best transfer stability.

Key-words: GMAW; Transfer stability; Effect of hydrogen; Oxidation potential.

1. Introdução

O processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) possui grande aplicação na indústria, devido, entre outras, à capacidade de soldar distintos metais em ampla faixa de espessura e por sua produtividade quando comparada a processos de soldagem manual. A indústria automotiva, alimentícia, construção civil, fabricação de bens de consumo, estaleiros, caldeirarias, implementos agrícolas, botijões de gás, são usuários da soldagem GMAW [1].

Uma característica deste processo é a utilização de gás de proteção inerte, ativo ou mistura destes dois tipos, que de acordo com sua composição, afeta as características do arco, o tipo de transferência metálica, a velocidade de soldagem, a produção de respingos, a penetração, o formato do cordão de solda e o custo final da operação de soldagem. Outra influência do gás de proteção é na temperatura da poça de fusão, na sensibilidade à fissuração e porosidade, nas perdas de elementos químicos e na facilidade da execução da soldagem em diversas posições [2,3].

Misturas gasosas à base de Ar, He, CO₂ e O₂ foram as mais aplicadas nos últimos anos, ou seja, constata-se que houve pouca inovação no desenvolvimento de novas formulações dos gases de proteção. De fato, a inovação observada diz respeito aos equipamentos de soldagem no controle da transferência metálica, que tem como exemplos os processos GMAW Pulsado, GMAW Pulsado com Comando Sinérgico, GMAW com pulsação térmica ou GMAW Duplo Pulso, GMAW com corrente alternada e GMAW com curto-circuito controlado eletricamente e eletromecanicamente [3,4].

Uma maneira de avaliar a qualidade das soldas pelo processo GMAW por curto-circuito é pela estabilidade do processo de soldagem, que se traduz em níveis aceitáveis de respingos e fumos produzidos, isenção de descontinuidades e aspecto do cordão. A observação da estabilidade tem como finalidade a repetição de soldas com mesmos parâmetros e o seu acompanhamento para eventuais ajustes [3].

O objetivo principal deste trabalho foi verificar o efeito da adição de um gás redutor às misturas de proteção convencionais usadas na soldagem do aço carbono pelo processo GMAW e transferência por curto-circuito. É importante salientar que não foram encontradas referências na literatura para a adição de um gás redutor na soldagem GMAW do aço carbono, caracterizando uma inovação para esta pesquisa. Neste trabalho, o H₂ foi escolhido devido à facilidade de ser encontrado no mercado, e, principalmente, devido à disponibilidade de um misturador capaz de produzir misturas contendo este gás, que já encontra alguma utilização na soldagem dos aços inoxidáveis. Esta parte da pesquisa tem um caráter exploratório. Pretende avaliar o efeito da adição de H₂ às misturas convencionais usadas na soldagem GMAW quanto ao aspecto final do cordão de solda e à estabilidade da transferência.

Tenta-se responder a questões como: até que teor de H₂ é possível adicionar às misturas convencionais sem prejuízo da qualidade do cordão de solda, no que diz respeito ao formato do cordão e isenção de descontinuidades (poros, trincas, etc.); qual o efeito da adição de H₂ na estabilidade da transferência.

2. Materiais e Métodos

Os gases e misturas utilizados nas soldagens foram: Ar, Ar+10%CO₂, Ar+25%CO₂ e CO₂. Além desses gases/misturas, foram produzidas e testadas misturas com adições de 2%, 4% e 6% de H₂. Testes preliminares indicaram que com teor acima de 6% de H₂ as soldas apresentavam resultados insatisfatórios, com grande quantidade de poros superficiais. Para a preparação das misturas gasosas, foi utilizado um misturador com rotâmetros, de propriedade do Laboratório de Soldagem do Centro de Tecnologia Rio da White Martins, cuja margem de erro relativo na composição do componente com menor concentração é de no máximo 10% [5,6].

A soldagem foi feita pelo processo GMAW mecanizado, fonte de tensão constante, na posição plana (Figura 1), com cordão sobre a chapa de aço carbono A-36 com dimensões de 200 × 50 × 6,35 mm, arame ER 70S-6 de 1,2 mm, DBCP de 12 mm, ângulo da tocha de 90° em relação à face da solda, velocidade de soldagem de 300 mm/min e vazão do gás de proteção de 15 l/min. A velocidade de alimentação do arame foi regulada de acordo com a



Figura 1. Equipamento para mecanização da soldagem.

experiência do soldador para 2 valores de tensão dentro da faixa de 20 V a 23 V. Cada solda foi repetida uma vez a para mistura de gás utilizado e para cada valor de tensão utilizado. O Ar puro não foi testado, pois não é recomendado para soldagem GMAW do aço carbono. Considerando que foram usados 4 tipos de gases/misturas (Ar, Ar+10%CO₂, Ar+25%CO₂ e CO₂), com 4 teores de H₂ (0, 2, 4, 6%), com 2 valores de tensão dentro da faixa escolhida, que houve a replicação das soldas e que as soldas com Ar puro não foram realizadas, foram previstos 55 testes de solda do tipo cordão sobre a chapa.

Durante a soldagem, os parâmetros corrente e tensão foram monitorados e registrados pelo sistema de aquisição de dados SAP V4.0 do fabricante IMC Soldagem. Este equipamento possui sensores que medem os sinais de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão do gás de soldagem, cujos valores são tratados por um software para aquisição e tratamento destes sinais.

As seguintes avaliações foram realizadas nos cordões de solda produzidos e nos sinais captados durante a soldagem:

a) Análise qualitativa dos cordões de solda por inspeção visual (VS) e por líquido penetrante (LP): após o término de cada soldagem, foi observada visualmente a presença de discontinuidades grosseiras, o aspecto do cordão de solda e a geração de escória e respingos. A seguir foi executada limpeza com escova de aço sobre o cordão de solda e em cerca de 25 mm adjacentes às margens da solda, onde, a seguir, foi realizado ensaio de VS, de acordo com procedimento PR-050 [7] e por LP pelo procedimento PR-001 [8]. O objetivo do VS foi verificar a qualidade do acabamento do cordão de solda e a presença de discontinuidades superficiais grosseiras. O LP foi utilizado para investigação de pequenas discontinuidades superficiais, como por exemplo poros, trincas e mordeduras.

b) Avaliação por macrografias, que foram obtidas após corte transversal e no meio do cordão de solda, preparação destas superfícies por lixamento (lixa 220, 320, 400 e 600 mesh) e ataque com Nital 10%. Foi feita uma macrografia para cada cordão de solda, com o objetivo de verificar discontinuidades no interior do metal de solda (MS) e determinar, por meio de paquímetro, as dimensões de penetração, largura e reforço das soldas.

c) Avaliação da estabilidade da transferência através dos sinais elétricos obtidos durante a soldagem: a aquisição dos sinais gerados pelo arco, como tensão e corrente, é uma técnica relativamente simples para análise da

estabilidade do processo. Com os valores de tensão e corrente, é possível averiguar o modo de transferência metálica, neste caso a transferência por curto-circuito, que ocorre quando a gota de metal de adição entra em contato com a poça de fusão extinguindo momentaneamente o arco [3].

Uma importante ferramenta para avaliar a estabilidade da transferência é por meio da análise estatística dos dados coletados. Os índices estatísticos mais importantes e que são fornecidos pelo sistema SAP 4.0 são a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Os sinais elétricos foram adquiridos a cada 0,2 s, tempo adequado para visualização no oscilograma corrente e tensão dos sinais instantâneos para o modo de transferência por curto circuito. O período total de aquisição para cada solda foi de 20,0 s, tempo necessário para se obter uma quantidade significativa de eventos de picos de corrente e períodos de curtos circuitos e de arco aberto. A aquisição de dados foi iniciada aproximadamente após 5,0 s do início da soldagem. Os índices de estabilidade utilizados neste trabalho foram: desvio padrão dos picos de corrente (DPPC); desvio padrão do período de arco aberto (DPAA); desvio padrão do período de curto-circuito (DPCC) e índice Vilarinho de regularidade da transferência em curto-circuito (IVcc). O IVcc é calculado conforme a Equação 1 a seguir:

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{cc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma t_{ab}}{t_{ab}} \quad (1)$$

onde,

σ_{cc} = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito;

σt_{ab} = desvio padrão da média do tempo de arco aberto;

t_{cc} = média do tempo de curto-circuito;

t_{ab} = média do tempo de arco aberto.

Foram produzidos gráficos dos valores de DPPC, DPAA, DPCC e IVcc em função do teor de H₂ para cada uma das misturas gasosas, utilizando-se os experimentos realizados para o intervalo de tensão escolhido. Quanto menor o valor dos índices propostos melhor é a estabilidade da transferência.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 1 mostra os parâmetros médios de corrente e tensão registrados no SAP durante os experimentos. Também apresenta os valores dos parâmetros para avaliar a estabilidade do arco, quais sejam: DPPC, DPAA, DPCC e IVcc.

Tabela 1. Parâmetros médios de corrente e tensão de soldagem, índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IVcc das soldas com Ar com 2% a 6% H₂; Ar+10%CO₂ e com 2% a 6% H₂; Ar+25%CO₂ e com 2% a 6% H₂; CO₂ e com 2% a 6% H₂.

Mistura	Corrente média registrada no SAP (A)	Tensão média registrada no SAP (V)	DPPC registrada no SAP (A)	DPAA registrada no SAP (ms)	DPCC registrada no SAP (ms)	IVcc
Ar+2%H ₂	187,0	21,7	78,3	9,8	2,0	1,14
	182,0	21,6	81,6	10,0	2,1	1,14
	213,1	22,8	75,5	7,2	2,2	1,25
	212,5	22,7	77,2	7,5	2,1	1,22
Ar+4%H ₂	176,3	21,1	86,5	9,4	2,5	1,17
	179,3	21,6	88,2	9,7	2,3	1,10
	210,0	20,5	52,0	9,8	1,1	1,03
	215,2	23,0	79,4	7,5	2,4	1,23
Ar+6%H ₂	177,6	21,1	85,2	8,6	2,4	1,08
	184,7	21,5	84,7	8,9	2,2	1,06
	216,0	23,0	76,8	6,3	2,3	1,19
	215,2	22,7	82,8	7,2	2,6	1,23

Tabela 1. Continuação...

Mistura	Corrente média registrada no SAP (A)	Tensão média registrada no SAP (V)	DPPC registrada no SAP (A)	DPAA registrada no SAP (ms)	DPCC registrada no SAP (ms)	IVcc
Ar+10%CO ₂	198,9	21,0	56,0	6,8	1,5	1,40
	195,7	20,4	65,8	7,9	1,6	1,51
	249,0	22,0	52,0	4,1	1,2	1,36
	238,5	22,0	55,6	4,2	1,3	1,35
Ar+10%CO ₂ +2%H ₂	190,0	21,0	64,1	5,3	1,5	0,87
	189,3	21,2	76,2	6,4	1,8	0,98
	247,5	23,0	56,8	5,1	1,3	1,32
	231,8	21,5	76,1	4,3	2,2	1,25
Ar+10%CO ₂ +4%H ₂	188,7	21,2	79,4	6,2	1,8	0,90
	188,7	21,1	80,0	6,2	1,8	0,89
	239,9	22,1	55,8	4,1	1,4	1,25
	234,6	22,0	78,1	4,4	2,2	1,29
Ar+10%CO ₂ +6%H ₂	190,0	21,0	67,0	4,0	1,6	0,70
	190,6	21,2	85,3	5,1	1,9	0,77
	250,8	22,7	55,5	4,9	1,2	1,24
	226,7	21,7	82,7	4,5	2,6	1,17
Ar+25%CO ₂	199,1	21,0	45,5	3,9	1,3	1,15
	199,2	21,0	51,3	4,5	1,4	1,28
	248,9	23,1	54,2	3,9	1,2	1,34
	211,3	22,2	52,8	4,9	1,2	1,23
Ar+25%CO ₂ +2%H ₂	199,3	21,2	36,7	2,8	1,0	0,78
	189,3	20,6	39,6	2,8	1,1	0,84
	245,9	22,7	51,0	3,5	1,2	1,24
	228,9	21,5	54,0	3,5	1,3	1,27
Ar+25%CO ₂ +4%H ₂	193,8	21,0	40,1	2,5	1,1	0,68
	226,8	21,7	58,3	3,5	1,5	1,22
	219,5	23,1	51,0	2,9	1,3	0,96
	194,6	21,0	47,1	2,2	1,2	0,61
Ar+25%CO ₂ +6%H ₂	243,0	22,3	59,3	4,2	1,4	1,44
	227,8	21,8	58,7	3,3	1,6	1,11
	170,6	22,6	82,5	8,4	2,7	1,06
CO ₂	218,8	22,7	62,0	4,5	1,4	1,27
	196,8	21,1	56,4	3,8	1,6	1,07
CO ₂ +2%H ₂	228,8	22,6	62,8	4,2	1,6	1,21
	223,2	22,2	60,2	4,5	1,4	1,26
	198,7	21,1	53,9	3,7	1,7	1,08
CO ₂ +4%H ₂	197,4	21,0	54,4	3,6	1,5	1,05
	229,9	22,9	61,0	4,0	1,5	1,29
	231,1	22,7	62,0	3,9	1,6	1,20
	169,1	23,1	46,9	6,2	1,5	1,13
CO ₂ +6%H ₂	195,5	21,1	55,0	3,7	1,7	1,05
	246,5	22,6	64,7	3,7	1,7	1,13
	242,4	22,9	66,5	4,0	1,7	1,25

Das 55 soldas realizadas, 43 foram consideradas aprovadas pelo VS, LP e macrografias e 12 soldas foram reprovadas devido a excesso de porosidade superficial ou interna apresentada.

a) Inspeção visual e por líquido penetrante: a Figura 2 mostra alguns experimentos após soldagem, preparadas para ensaio VS e após ensaio por LP. As soldas com adição de 2 a 6% H₂ nos gases comerciais Ar, Ar+10%CO₂, Ar+25%CO₂ e CO₂ tiveram bons resultados, apesar de alguns cordões apresentarem poros isolados provavelmente devido ao excesso de H₂ no gás de proteção. As 9 soldas que apresentaram descontinuidades e foram reprovadas são:

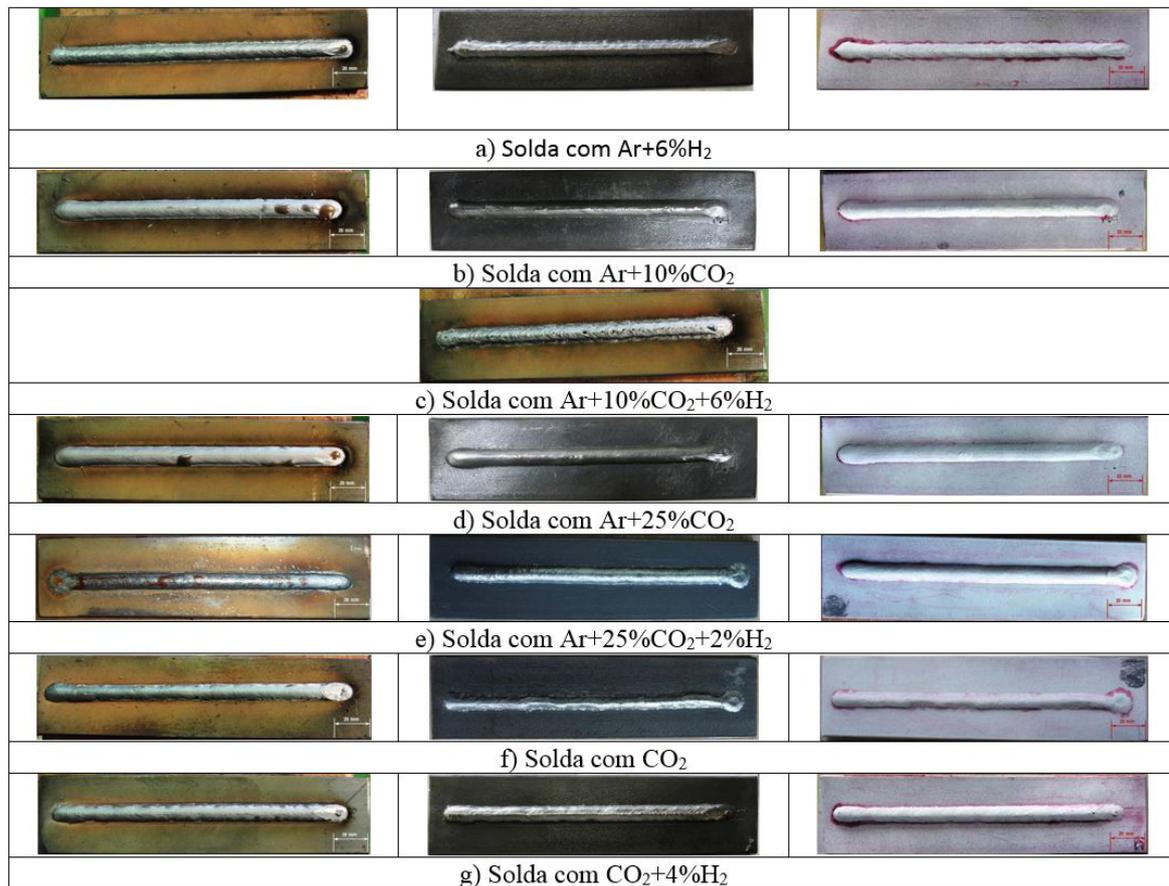


Figura 2. Alguns experimentos após soldagem, após preparação para ensaio VS e após ensaio por LP.

- Mistura Ar+10% CO_2 +6% H_2 duas soldas, Figura 3c;
- Mistura Ar+25% CO_2 +2% H_2 duas soldas;
- Mistura Ar+25% CO_2 +4% H_2 três soldas;
- Mistura Ar+25% CO_2 +6% H_2 duas soldas.

As soldas que foram consideradas aprovadas, tanto com os gases convencionais e estes com adição de H_2 , apresentaram superfícies claras, alguns respingos aderidos às chapas e regiões de escória ao longo do cordão. Não foram observadas descontinuidades como poros ou trincas. Os resultados mostram que a soldagem GMAW de aço carbono com teor de H_2 entre 2 e 6%, para a maioria das misturas, não alterou o aspecto e o formato do cordão e não produziu descontinuidades superficiais como trinca a frio, que é causada pela presença de H_2 na soldagem de aço carbono.

b) Macrografias: A Figura 3 mostra algumas macrografias com os respectivos gases de proteção utilizados na soldagem. As seguintes observações podem ser feitas:

- As soldas com Ar+2% H_2 e com Ar+4% H_2 não apresentaram descontinuidades nas macrografias. Já com a mistura Ar+6% H_2 as duas macrografias foram reprovadas por apresentaram poros internos;
- Das soldas com Ar+10% CO_2 , Ar+10% CO_2 +2% H_2 , Ar+10% CO_2 +4% H_2 e Ar+10% CO_2 +6% H_2 , apenas uma macrografia da solda com Ar+10% CO_2 +6% H_2 (Figura 4c) apresentou poros internos e foi reprovada. As demais macrografias não apresentaram descontinuidades;
- Das soldas com Ar+25% CO_2 , Ar+25% CO_2 +2% H_2 e Ar+25% CO_2 +6% H_2 , duas macrografias com Ar+25% CO_2 +2% H_2 mostraram poros próximos à superfície, que já havia sido detectada na inspeção visual. As demais macrografias

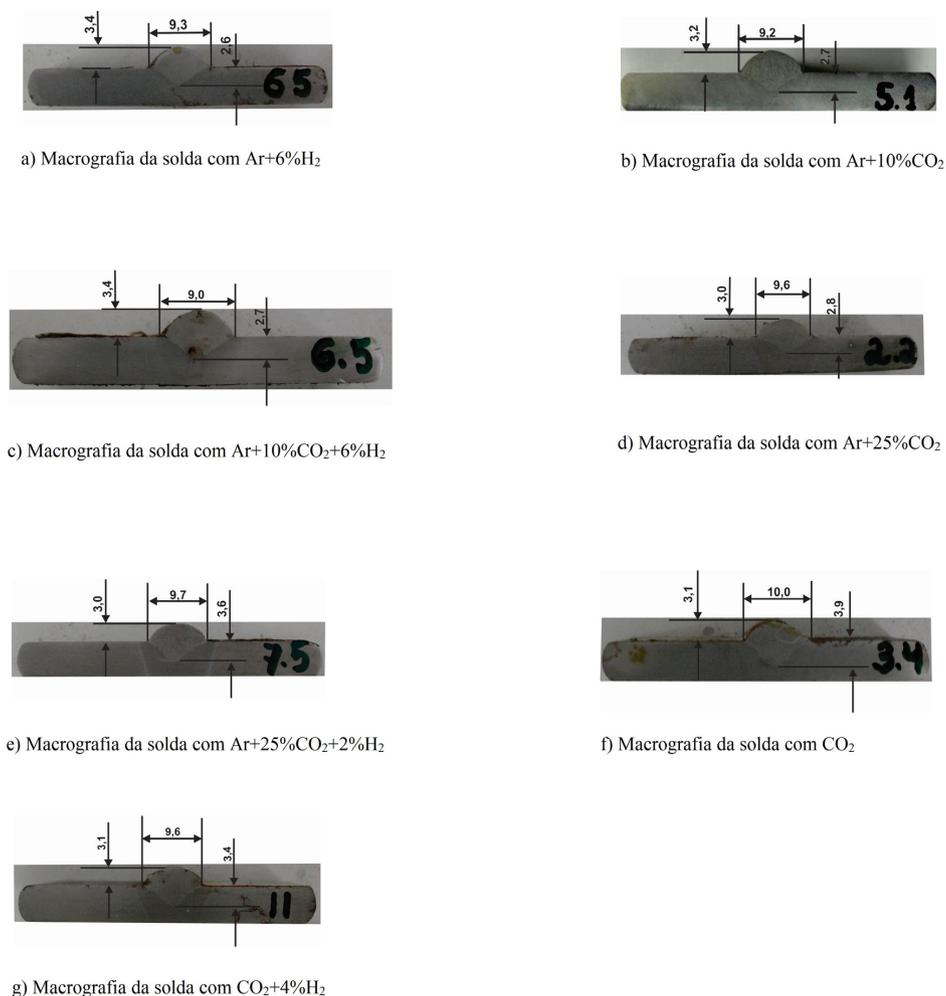


Figura 3. Macrografias selecionadas, indicando as misturas dos gases de proteção utilizados na soldagem e a penetração, reforço e largura do cordão.

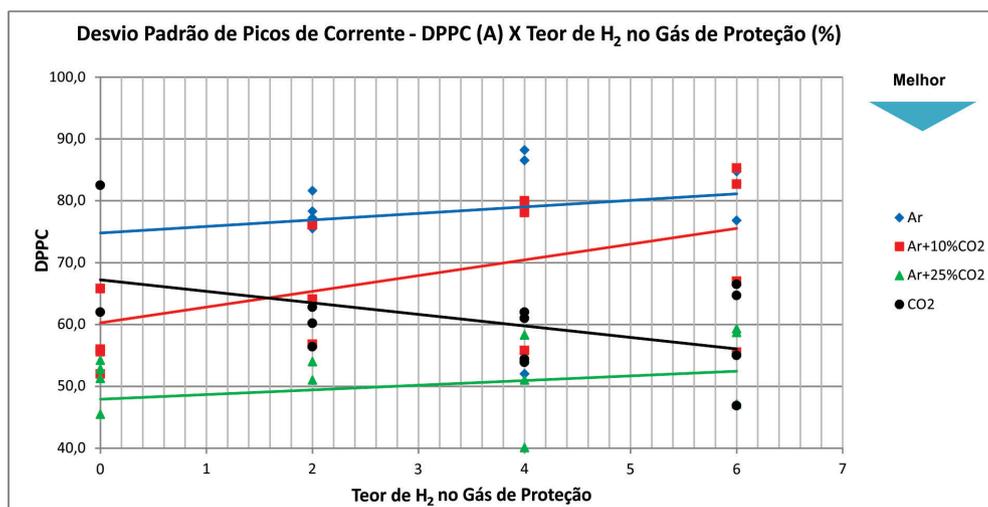


Figura 4. Gráfico DPPC × Teor de H₂ no Gás de Proteção.

não apresentaram descontinuidades. As soldas com o gás Ar+25%CO₂+4%H₂ não foram feitas macrografias, pois foram reprovadas no VS devido a porosidade externa;

- As soldas com CO₂, CO₂+2%H₂, CO₂+4%H₂ e CO₂+6%H₂, não apresentaram descontinuidades nas macrografias.

O resultado de VS, LP e macrografias, indica a possibilidade de se soldar o aço carbono pelo processo GMAW com os gases Ar com 2% a até 4%H₂, Ar+10%CO₂ com até 4%H₂, Ar+25%CO₂ com até 2%H₂ e CO₂ com até 6%H₂ na faixa de parâmetros de soldagem empregados.

c) Avaliação da estabilidade da transferência através dos sinais elétricos medidos durante a soldagem:

Para esta análise foram utilizados os resultados das 55 soldas executadas, incluindo as reprovadas na VS, LP e macrografias. As Figuras 4, 5, 6, e 7 mostram o gráfico DPCC × Teor de H₂, DPAA × Teor de H₂, DPCC × Teor de H₂ e IVcc × Teor de H₂, respectivamente, para os 4 gases de proteção convencionais e para os valores de tensão usados. Os valores destes parâmetros são os já mostrados na Tabela 1.

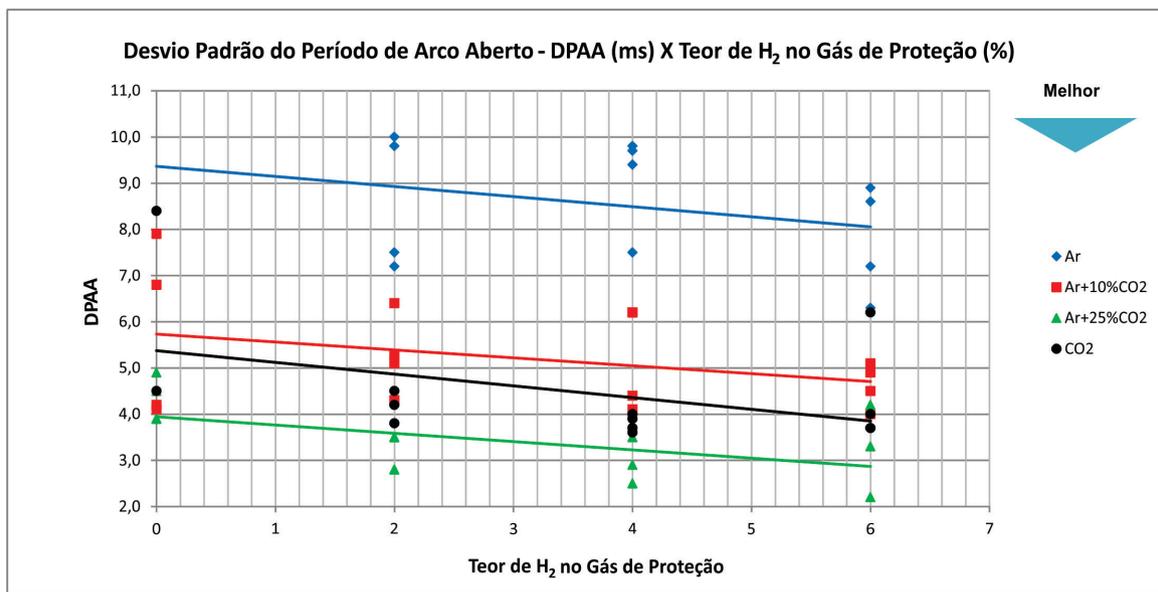


Figura 5. Gráfico DPAA × Teor de H₂ no Gás de Proteção.

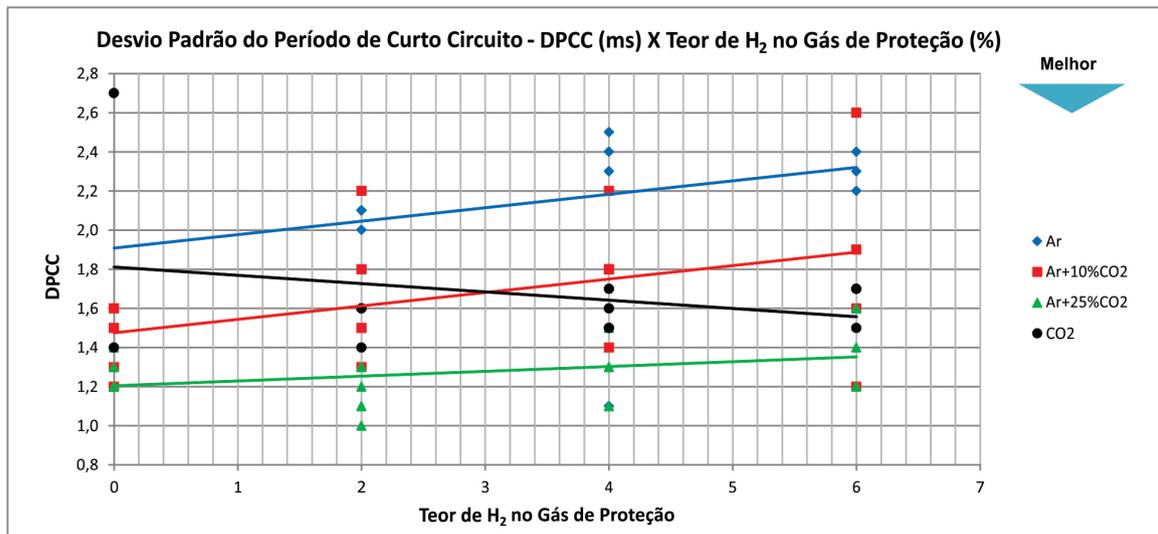


Figura 6. Gráfico DPCC × Teor de H₂ no Gás de Proteção.

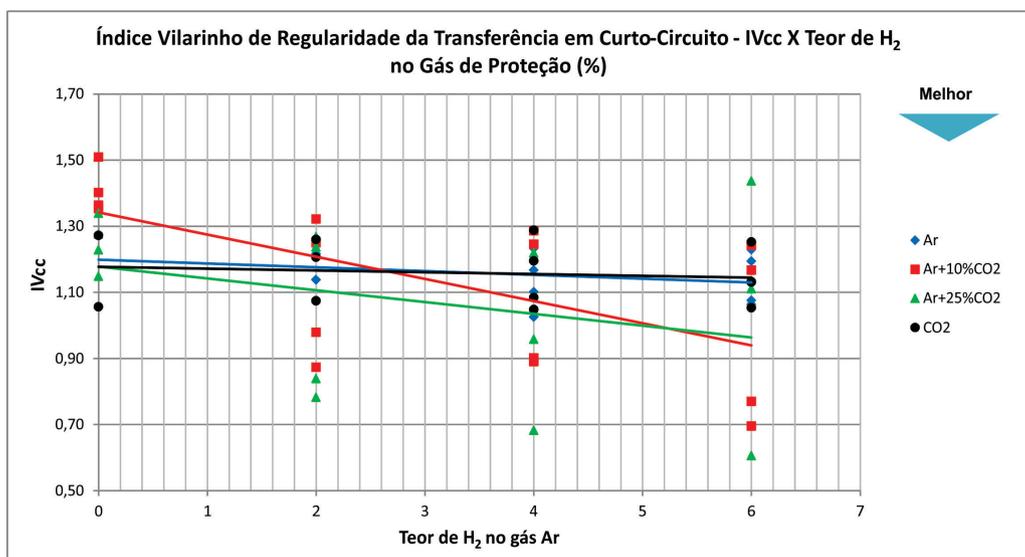


Figura 7. Gráfico IVcc \times Teor de H_2 no Gás de Proteção para todos os gases de proteção usados.

Em relação ao Desvio Padrão de Picos de Corrente (DPPC), Figura 4, os seguintes comportamentos foram observados:

- Dos gases convencionais, a solda com Ar+25%CO₂ foi a que apresentou o menor DPPC (transferência mais estável), seguido do gás Ar+10%CO₂ e CO₂. Com a adição de H_2 nestes gases, a transferência mais estável foi para as soldas com Ar+25%CO₂ seguido de CO₂, Ar+10%CO₂ e Ar, todos com 2 a 6% H_2 ;
- A adição de H_2 nos gases Ar, Ar+10%CO₂ e Ar+25%CO₂, piorou ligeiramente a estabilidade da transferência, pois aumentou o DPPC. Para o CO₂, a adição de H_2 reduziu o DPPC, ou seja, melhorou sensivelmente a estabilidade da transferência;
- As soldas com Ar+25%CO₂ e suas misturas com H_2 foram as que obtiveram menores valores de DPPC, ou seja, foram as mais estáveis de todas as soldas executadas.

Em relação ao Desvio Padrão do Período de Arco Aberto (DPAA), Figura 5, os seguintes comportamentos foram observados:

- As soldas com os gases convencionais, o Ar+25%CO₂ obteve menor DPAA (transferência mais estável), seguido dos gases CO₂ e Ar+10%CO₂;
- O DPAA diminuiu para todos os gases utilizados, com o acréscimo da adição de H_2 , indicando melhoria da estabilidade da transferência. A transferência mais estável foi obtida com as misturas Ar+25%CO₂+2% a 6% H_2 seguido de CO₂+2% a 6% H_2 , Ar+10%CO₂+2% a 6% H_2 e Ar+2% a 6% H_2 .

Em relação ao Desvio Padrão do Período de Curto-circuito (DPCC), Figura 6, os seguintes comportamentos foram observados:

- Para as soldas com os gases convencionais, o mais estável (menor DPCC) foi com Ar+25%CO₂, seguido de Ar+10%CO₂ e CO₂. Este comportamento foi também observado para o índice DPPC;
- Para todos os gases, exceto para o CO₂, o DPCC aumentou com o aumento de H_2 nas misturas, indicando que piorou a estabilidade da transferência. Já para o CO₂, a adição de H_2 melhorou sensivelmente a estabilidade da transferência.

Em relação ao Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc), Figura 7, os seguintes comportamentos foram observados:

- Para as soldas com os gases convencionais o Ar+25%CO₂ foi o mais estável (menor IVcc), seguido do CO₂ e Ar+10%CO₂;
- As soldas com o gás Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2% a 6%H₂ foram as que tiveram melhor estabilidade (menor IVcc), seguido de Ar+10%CO₂+4% a 6%H₂, Ar+4% a 6%H₂ e CO₂+4% a 6%H₂;
- De uma forma geral, observa-se que a adição de H₂ diminuiu o IVcc para todos os gases, ou seja, melhorou a estabilidade da transferência.

Os resultados acima mostram que a adição de H₂ nos gases Ar puro e Ar+10%CO₂ provocou instabilidade da transferência. Isto foi atribuído à dificuldade de emissão catódica necessária para a estabilidade do arco em soldagem GMAW, como descrito na literatura [3]. De fato, nestes gases, devido conterem pouco ou nenhum gás oxidante misturado a eles, a adição de H₂ reduziu ainda mais o potencial de oxidação resultante, que não foi suficiente para manter a emissão catódica, prejudicando a estabilidade. Para o Ar+25%CO₂, a adição de H₂ praticamente manteve a estabilidade, devido ao maior potencial de oxidação desta mistura. Já para o gás CO₂, a adição de H₂ reduziu o excesso do potencial de oxidação deste gás, melhorando substancialmente todos os índices de estabilidade utilizados.

O H₂ forma uma atmosfera protetora excelente, devido a sua capacidade de redução, e por isso tem aplicações em fornos para tratamento térmico e em operações de brasagem [9]. Entretanto, para a soldagem do aço carbono o H₂ é na maioria das vezes indesejável, pois aumenta consideravelmente os riscos de trincas a frio [9].

Este trabalho mostrou que é possível a soldagem de aço baixo carbono com os gases comerciais Ar, Ar+10%CO₂, Ar+10%CO₂ e CO₂ com pequenas adições do gás redutor H₂. Algumas destas misturas, particularmente aquelas contendo apenas CO₂ e adições de H₂ encontram potencial para aplicações industriais que utilizem aços de baixo carbono não susceptíveis a formação de microestrutura frágil, eliminando assim o risco de trincas a frio. Pode-se ter como vantagem, além de uma melhor estabilidade da transferência demonstrado neste trabalho, produzir uma solda com maior penetração e uma superfície mais limpa e com menos óxidos [9]. Espera-se também soldas com menor formação de respingos, reduzindo a necessidade de limpeza após soldagem, fato já reportado em outros trabalhos devido à adição de H₂ [3]. Estas vantagens podem contribuir para o aumento da produtividade da soldagem. Estes aspectos serão abordados em trabalho futuro a ser publicado pelos autores.

4. Conclusões

Em relação ao efeito da adição de H₂ aos gases e misturas de proteção convencionais usados na soldagem GMAW do aço C e transferência por curto-circuito, foi possível concluir que:

1. É possível a adição de até 4%H₂ ao gás Ar e de até 4% à mistura Ar+10%CO₂ sem prejuízo no aspecto do cordão de solda, porém a adição de H₂ a estes gases e misturas resulta em uma pior estabilidade do arco;
2. É possível a adição de até 2%H₂ à mistura Ar+25%CO₂ sem prejuízo no aspecto do cordão de solda, mantendo a estabilidade da transferência;
3. É possível a adição de até 6%H₂ ao gás CO₂ sem prejuízo no aspecto do cordão de solda e, ao mesmo tempo, proporcionando uma melhora significativa na estabilidade da transferência;
4. A adição de H₂ em gases e misturas com baixo potencial de oxidação provocou instabilidade da transferência. Já para gases com elevado potencial de oxidação, a adição de H₂ melhora significativamente a estabilidade da transferência;
5. As misturas Ar+25%CO₂, Ar+25%CO₂+2%H₂, CO₂+4%H₂ e CO₂ foram as que apresentaram melhor estabilidade da transferência.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelos apoios concedidos e à White Martins Gases Industriais Ltda pelo fornecimento das misturas gasosas e a realização das soldagens.

Referências

- [1] Tatagiba LCS. Formulação de gases de proteção com adições de gases redutores para a soldagem GMAW [tese de doutorado]. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; 2015.
- [2] Moreira AF, Gallego J, Tokimatsu RC, Yamakami WJ, Ventrella VA. Caracterização do metal de solda obtido com arame sólido AWS E70S-6 em função da adição de CO₂ no gás de proteção. In: Anais do 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais; 2006 November 15-19; Foz do Iguaçu. São Paulo: Metallum Congressos Técnicos e Científicos; 2006. p. 5518-5527.
- [3] Scotti A, Ponomarev V, Soldagem GMAW. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora; 2008. 284 p.
- [4] Tatagiba LCS, Gonçalves RB, Paranhos R. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem GMAW. Soldagem e Inspeção. 2012;17(3):218-228.
- [5] Lobato MM, Santiago NA No. Desenvolvimento de um misturador de gases de soldagem e do programa ROTO BR [monografia]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2003.
- [6] American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Code an International Code – SFA-A5.32/SFA-5.32M: specification for welding shielding gases. New York: ASME; 2013. 13 p.
- [7] Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. PR-050: ensaio visual e dimensional de soldas [on-line]. São Paulo: ABENDI; 2011 [acesso em 5 abr. 2013]. 9 p. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/>
- [8] Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. PR-001: líquido penetrante. São Paulo: ABENDI; 2008 [acesso em 5 abr. 2013]. 8 p. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/>
- [9] Suban M, Tusek J, Uran M. Use of hydrogen in welding engineering in former times and today. Journal of Materials Processing Technology [on-line]. 2001 [acesso em 10 mar. 2014];(119):193-198. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/>