



ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR NA QUANTIDADE DE HIDROGÊNIO DIFUSÍVEL NO METAL DE SOLDA

Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica

Avenida Presidente Antônio Carlos 6627 – Campus Universitário, 31270-901

Belo Horizonte, MG, Brasil

FAX: (031)443-3783

e-mail: queiroz@vesper.demec.ufmg.br

***Resumo.** Neste trabalho foi estudada a influência da corrente de soldagem com arame tubular sobre o teor de hidrogênio difusível no metal de solda. O teor de hidrogênio difusível foi determinado experimentalmente para vários corpos de prova utilizando o método de cromatografia gasosa. A análise dos resultados permitiu concluir a existência de uma relação linear entre a corrente de soldagem e o teor de hidrogênio difusível no metal de solda. Para os teste realizados, a variação do teor de hidrogênio com a corrente ocorreu numa taxa de aproximadamente 70%, ou seja, a cada aumento de 100% na corrente, ocorrerá um aumento de 70% no teor de hidrogênio difusível.*

***Palavras-chave:** Arame tubular, FCAW, Hidrogênio difusível, Corrente de soldagem.*

1. INTRODUÇÃO

A soldagem tem recebido nos últimos anos grande interesse devido a sua versatilidade, sendo considerada atualmente o método mais importante de união de metais na construção de peças e estruturas.

Estudos sobre os processos de soldagem existentes mostram que o processo de soldagem com arame tubular (FCAW- Flux Cored Arc Welding) reúne várias das necessidades atuais com respeito a alta produtividade, boa qualidade e baixo custo. Trata-se de um processo que consiste em alimentar continuamente o arame para a poça de fusão, sendo este protegido pela decomposição dos ingredientes do fluxo interno e pelo gás externo [AWS, 1991]. É um processo semi-mecanizado e propicia a automação.

Relatos citam entretanto, que a quantidade de hidrogênio difusível encontrado no metal de solda é relativamente alta se comparando, por exemplo com soldas depositadas com eletrodo revestido e com o arame sólido [Meyer, 1993]. O hidrogênio no metal de solda é classificado como um dos mais graves problemas, pois é o agente responsável pelo trincamento a frio. Na maioria dos casos, as trincas induzidas pelo hidrogênio podem ocorrer

até 48 horas após a soldagem e dificilmente poderão ser reparadas, ocasionando perda total do conjunto soldado [Mishler, 1976]. Por isso, é muito importante avaliar as formas de controlar o teor de hidrogênio no metal de solda no processo de soldagem com arame tubular. Existe um consenso com relação as principais fontes de hidrogênio, que são [Boniszewski, 1992]: umidade e compostos hidrogenados presentes no fluxo, presença de resíduos lubrificantes na superfície do arame, condições atmosféricas durante a soldagem, teor de umidade no gás de proteção.

Uma das possíveis formas de avaliar a quantidade de hidrogênio difusível no metal de solda é através da monitoração, em tempo real, de alguns parâmetros de soldagem. Particularmente, a corrente e a tensão de soldagem, por estarem relacionados com a transferência do metal fundido da ponta do arame para a poça de fusão. Monitorando-se estes parâmetros, é possível avaliar a quantidade de hidrogênio que está sendo transportada pela gota e, a partir daí, controlá-la.

Para melhorar a compreensão deste fenômeno, este trabalho teve como objetivo *estudar a influência da corrente de soldagem com arame tubular na quantidade de hidrogênio difusível no metal de solda*. Este estudo foi baseado na *monitoração da transferência metálica por métodos elétricos (tensão e corrente)*. Espera-se que, com os resultados obtidos neste estudo, seja possível desenvolver sistemas de controle que permitam a minimização do hidrogênio no cordão de solda através de alterações das condições de soldagem em tempo real.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Equipamentos

Para realização dos experimentos, que consistiram em depositar cordões de solda com diferentes correntes sobre corpos de prova com dimensões padronizadas e realizar medição de hidrogênio, foram utilizados:

- Fonte da marca PRODELEC, modelo super AC300 com uma faixa operativa de corrente de soldagem de 30 a 300 A, tensão em vazio de 75 V;
- Forno elétrico tipo mufla Quimis, modelo Q.318D24, com programador/controlador de temperatura, dotado de um sensor (termopar) do tipo K, podendo operar até 1200°C;
- Balança analítica da marca CG Libror, modelo BE280, com precisão de até 1 mg;
- Mesa de soldagem semi-mecanizada equipada com controlador de velocidade, *Stick-Out* ajustável e um gabarito de cobre refrigerado a água que mantém os corpos de prova fixos e alinhados;
- Sistema de aquisição de dados computadorizados, utilizando uma placa do tipo STD;
- Cromatógrafo da marca OERLIKON YANACO, modelo G 1006 H_{DM}.

2.2. Consumíveis para a soldagem

Quanto a realização dos testes, foi utilizado o arame tubular da classe ASME SFA 5.20/95 E71T-1, com diâmetro de 1,2 mm. Com o intuito de evitar a absorção de umidade, utilizou-se apenas uma bobina de arame, sendo esta mantida em uma câmara aquecida por meio de lâmpadas quando não em uso. Para proteção gasosa externa foi utilizado o gás C25 (25% de CO₂ e 75% de argônio).

2.3. Preparação dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova varia de acordo com diferentes normas bem como o tipo de aparelhagem usada para dosagem de hidrogênio. Neste trabalho foram adotadas as recomendações do International Institute of Welding [IIW Doc. II-A-561-82].

Seguindo as recomendações do IIW, o material de base utilizado para a confecção dos corpos de prova foi o aço ASTM A36, cuja a composição química é mostrada na tabela 1. As dimensões dos corpos de prova foram as seguintes: 10 x 15 x 30 mm \pm 0,25 para o corpo de prova central e 10 x 15 x 45 mm \pm 0,25 para as peças de auxílio para abertura e extinção do arco de soldagem, conforme mostrado na figura 1.

Tabela 1. Composição química do aço ASTM A36

C	Si	Mn	P	S
0,15	0,24	0,84	0,020	0,015

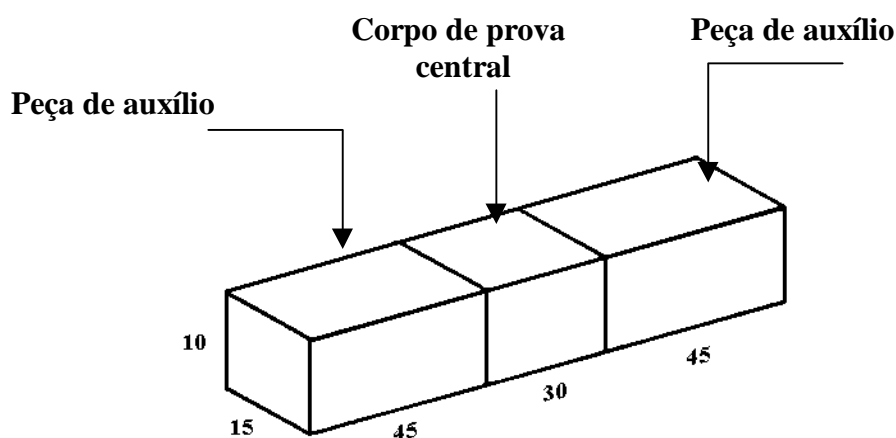


Figura 1 - Dimensões (em milímetros) dos corpos de prova para o método da cromatografia gasosa

Uma vez preparados os corpos de prova nas devidas dimensões, estes foram levados ao forno à uma temperatura de 600°C, por um período de 1 hora, com o objetivo de remover qualquer hidrogênio residual presente. Passado o período de 1 hora, os corpos de prova foram resfriados ao ar, e a “carepa” superficial formada foi removida com o auxílio de uma escova de aço rotativa. Após esta fase, os corpos de prova foram numerados e pesados em uma balança analítica com precisão de 1mg e os valores anotados. Feito isto, os corpos de prova que não foram utilizados imediatamente após sua preparação, foram estocados em um dissecador para evitar oxidação.

2.4. Definição dos parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem iniciais foram definidos dentro da faixa recomendada pelo fabricante. Para a definição exata dos parâmetros utilizados no procedimento experimental, foram feitos testes preliminares de modo a obter um cordão de solda com um bom aspecto visual. A tabela 2 mostra os parâmetros de soldagem que foram adotados, sendo que a corrente não faz parte desta tabela pelo fato de ser o parâmetro que foi alterado durante os testes.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem mantidos constante durante o procedimento experimental

Parâmetros	Valor
Tensão em vazio	27.8 V
<i>Stick-Out</i>	15 mm
Velocidade de soldagem	9 cm/min
Vazão do gás	12 l/min
Indutância	5

2.5 Metodologia

2.5.1. Execução das soldas

Na realização das soldas foi utilizado um sistema semi-mecanizado de soldagem. Este sistema permitiu evitar variações no “*Stick-Out*” e na velocidade de soldagem, as quais poderiam ocorrer se as soldas fossem realizadas manualmente.

Os corpos de prova foram fixados em um gabarito de cobre, refrigerado a água. A solda foi realizada deixando cerca de 10mm de comprimento em cada extremidade dos corpos de prova para manter um padrão do comprimento do cordão.

Após a extinção do arco de soldagem, o corpo de prova foi rapidamente retirado do gabarito e resfriado em água com gelo. O corpo de prova foi agitado vigorosamente nesse meio por um período de 20 à 30 segundos. Após o resfriamento, foram retiradas as peças de auxílio e foi feita a remoção da escória e limpeza geral.

Deve-se ressaltar que os corpos de prova foram sempre manuseados com a utilização de luvas e pinça para que não houvesse contaminação. Além disso, não foi ultrapassado o tempo recomendado de no máximo 2 minutos antes que fossem colocados na aparelhagem apropriada para a coleta do hidrogênio difusível.

Para cada corrente foram utilizadas 4 amostras, sendo que o teste foi realizado em uma amostra de cada vez. As amostras que foram feitas primeiro, permaneceram em uma cápsula hermeticamente fechada, com a purga já realizada e à temperatura ambiente, até que terminassem os testes das amostras restantes.

2.5.2. Realização da dosagem do teor de hidrogênio difusível no metal de solda

Conforme citado no item 2.1, para a dosagem do teor de hidrogênio difusível no metal de solda, foi utilizado um cromatógrafo seguindo as recomendações de aferição do fabricante.

Após a limpeza dos corpos de prova, os mesmos foram colocados em uma cápsula hermeticamente fechada do porta-amostras e realizada purga com argônio durante 30 segundos em cada cápsula. Somente após terminada a purga, as cápsulas com as amostras foram colocadas na estufa, onde permaneceram por 72 horas a uma temperatura de 45 °C.

Passado o período de 72 horas, o porta-amostra foi resfriado por um período de 30 minutos ao ar, e logo em seguida conectado ao cromatógrafo, já calibrado, realizando então a leitura.

Depois de realizar a leitura do volume de hidrogênio difusível, os corpos de prova foram pesados, para obter o volume de hidrogênio difusível em ml/100gr de metal depositado, usando a seguinte expressão:

$$H_D = \frac{y \cdot 100}{(P_f - P_i)} \quad (1)$$

Onde, H_D é o teor de hidrogênio difusível no metal de Solda (ml/100g de metal depositado), y o volume do hidrogênio obtido (ml), P_f o peso final (g), P_i o peso inicial (g)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a determinação experimental do teor de hidrogênio difusível foram realizados 32 experimentos (soldas) divididos em 8 grupos de 4 amostras. Cada grupo correspondeu a um valor diferente da corrente de soldagem e, dentro de um mesmo grupo, cada amostra correspondeu a uma repetição do experimento (executados com os mesmos parâmetros de soldagem).

Em cada experimento foram extraídas as curvas de tensão e intensidade de corrente através da monitoração em tempo real utilizando o sistema de aquisição de dados referido no item 2.1. Cada monitoração teve a duração de 4,09659 segundos, fornecendo 10.000 valores para a corrente e 10.000 valores para a tensão, num intervalo de medida de aproximadamente 0,0004 segundos.

Observando os oscilogramas de corrente e tensão, pôde-se constatar que, com o aumento da corrente de soldagem, ocorre uma diminuição do diâmetro das gotas de metal de solda transferidas, além de uma diminuição do tempo de destacamento das mesmas. Pôde-se notar também que, embora se desejasse manter a tensão constante, houve uma certa flutuação da mesma. Trata-se de uma flutuação difícil de ser evitada em virtude de oscilações da resistência global do circuito elétrico provocadas pela variação da corrente, uma vez que a fonte de tensão não é completamente ideal.

Também, em cada experimento, adotou-se como valor médio para a corrente de soldagem e tensão, a média aritmética dos 10.000 valores monitorados. Como valor médio global para cada grupo de 4 amostras, tanto para a corrente quanto para a tensão, adotou-se a média aritmética dos valores médios obtidos para cada amostra. Similarmente para cada grupo de 4 amostras, o teor de hidrogênio difusível foi adotado como a média aritmética dos valores obtidos nas quatro amostras.

A figura 2 apresenta os valores médios globais das tensões em função dos valores médios globais das correntes. Considerando as 4 amostras para cada ponto, o erro padrão foi insignificante, não sendo colocado no gráfico. A figura 4 mostra, ainda, a reta correspondente a regressão linear dos valores, a qual fornece a inclinação de 0.02 V/A, e o valor médio (20,57 V) das médias globais da tensão nos oito experimentos realizados.

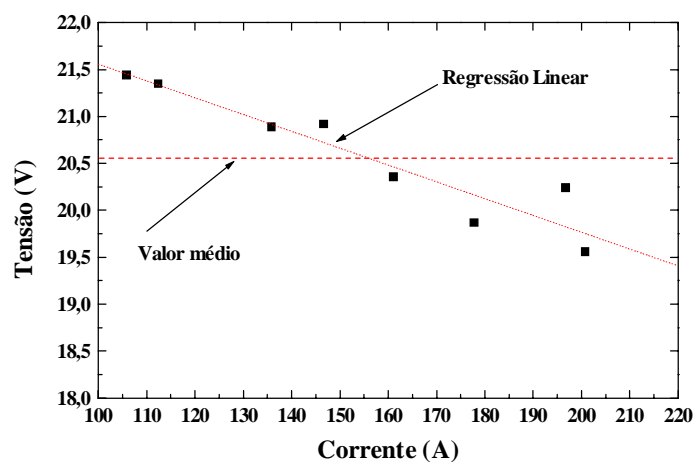


Figura 2 - Valores médios globais das tensões em função dos valores médios globais das correntes

Nota-se que houve uma variação máxima de aproximadamente 5% dos valores das médias globais da tensão em relação ao valor médio de 20,57 V. Para a análise do teor de hidrogênio difusível como função da corrente foi adotado para a tensão esse valor médio, ou seja, 20,57 V.

A tabela 3 sintetiza os valores obtidos nos testes de teor de hidrogênio difusível no metal de solda depositado em função da variação da corrente de soldagem. Os valores apresentados na tabela 3 para a corrente e tensão de soldagem, correspondem aos respectivos valores médios globais. Já os valores apresentados para o teor de hidrogênio difusível correspondem apenas aos valores médios em cada grupo de 4 amostras.

Tabela 3. Teor de hidrogênio difusível no metal de solda

Número do Teste	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]	Teor de H ₂ Difusível Médio [ml H ₂ /100g]
01	105,83	21,44	3,8780
02	112,33	21,35	4,7175
03	135,80	20,89	4,9440
04	146,65	20,92	5,1894
05	161,10	20,36	5,4598
06	177,77	19,87	6,4697
07	196,70	20,24	6,5730
08	200,75	19,56	6,7934

Os valores da tabela 3 estão colocados graficamente na figura 3, onde indica-se o teor médio de hidrogênio (5,5031 ml H₂/100g), obtido como a média aritmética dos oito valores médios mostrados na tabela 3.

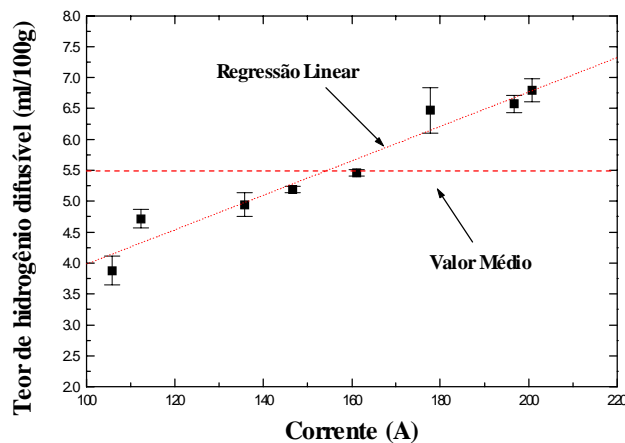


Figura 3 - Valor do teor de hidrogênio em função da corrente

Observa-se que o valor médio está indicado na forma de uma função constante, que representa a forma mais simples de interpolação possível. Foram feitas também as regressões linear, quadrática e cúbica, para se verificar a tendência geral. As quatro curvas apresentaram regressões do tipo mínimos quadrados, ou seja, todas, para o grau de polinômio correspondente, minimizam a função:

$$d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2}{N}} \quad (2)$$

sendo: d é o desvio médio quadrático, y_i a i -ésima ordenada obtida experimentalmente, $f(x_i)$ o valor da função interpolante para a i -ésima abscissa, N o número de pontos obtidos experimentalmente

A tabela 4, por sua vez, apresenta as equações para as aproximações constante, linear, quadrática e cúbica, com os respectivos desvios médios quadráticos, calculados conforme a equação (2).

Tabela 4. Equações das aproximações constante, linear, quadrática e cúbica

Curva	Equações representativas	Desvio médio quadrático
Constante	$Y = 5,50310$	0,9627
Regressão Linear	$Y = 1,2011 + 0,02782 x$	0,2232
Regressão Quadrática	$Y = 1,3441908 + 0,025870316x + 6,3475902 \times 10^{-6} x^2$	0,2231
Regressão Cúbica	$Y = 2,49470205 + 0,0020643962x + 1,6583978 \times 10^{-4} x^2 - 3,4674265 \times 10^{-7} x^3$	0,2230

Nota-se que os desvios das aproximações linear, quadrática e cúbica são muito próximos entre si e muito inferiores ao da aproximação constante. Em outras palavras, enquanto a aproximação linear melhora muito a aproximação constante, as aproximações quadrática e cúbica acrescentam muito pouco à aproximação linear. Isto confirma o que a inspeção visual das regressões sugeriu, ou seja, *o fenômeno do aumento do teor de hidrogênio difusível com o aumento da corrente no processo de soldagem com arame tubular é linear*. No caso da regressão linear mostrada na figura.3, a taxa de crescimento do teor de hidrogênio difusível com a corrente é de aproximadamente 70 % .

4. CONCLUSÕES

1. Conforme previsto na teoria, foi verificado que, quanto maior a corrente de soldagem, maior o teor de hidrogênio difusível no metal de solda depositado com arame tubular.
2. A influência da corrente de soldagem no teor de hidrogênio difusível ocorreu de uma forma linear.
3. Nos experimentos realizados, a influência da corrente de soldagem no teor de hidrogênio difusível no metal de solda ocorreu numa taxa de aproximadamente 70%, ou seja, cada aumento de 100% na corrente de soldagem acarretou um aumento em torno de 70% no teor de hidrogênio difusível.
4. Em princípio, através do controle da corrente, pode-se minimizar o efeito prejudicial do hidrogênio difusível na soldagem com arame tubular.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Em particular ao Prof. Paulo J. Modenesi pela colaboração nos testes experimentais e ao Prof. Ricardo Utsch pela análise de linearidade, à CAPES pelo auxílio financeiro recebido e a ESAB pelo fornecimento do arame.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWS Welding Handbook, 1991, Flux Cored Arc Welding. 8th ed. Miami. American Welding Society, v.2, p.158.

- BONISZEWSKI, T.**, 1992, Self-Shielded Arc Welding. Cambridge England: Woodhead Publishinh Ltd in Association With The Welding Institute.
- IIW** - International Institute of Welding, 1981, The Determination of the Hydrogen Content of Ferritic arc Weld Metal, Documento II-1002-83 – Revision of II-959-81.
- MEYER, D.W.**, 1993, Flux-Cored Arc Welding. The Esab Group, Inc- P.188,.
- MISHLER, H.W.**, 1976, Preventing Delayed Craks in Ship Welds, U.S. Coost Guard Headquarters, Washington, p70,.

STUDY OF THE INFLUENCE OF CURRENT ON THE DIFFUSIVE HYDROGEN LEVEL IN THE FLUX CORED ARC WELD METAL

***Abstract.** This work intended to study the influence of current flux cored arc welding on the weld metal diffusive hydrogen level. The level of diffusive hydrogen was determined experimentally in several specimens by gas chromatography method. An analysis of the results allowed to conclude that the current has linear influence on the hydrogen level. For the tests, the variation of the hydrogen level with the current happened in a rate of approximately 70%, or, to each increase of 100% in the current, an increase of 70% in the hydrogen diffusive level occur.*

***Key Words:** Flux cored arc welding, FCAW, Diffusive hydrogen, Welding current.*