

# *Estudo da Estabilidade do Arco Elétrico em Soldagem Subaquática Molhada*

---

**José Antônio Esmerio Mazzaferro** ✓

Eng<sup>o</sup> Mecânico; M.Sc.; Quando da realização deste trabalho, doutorando no LS&TC

E-mail: mazza@vortex.ufrgs.br

**Ivan Guerra Machado** ✓

Eng<sup>o</sup> Metalúrgico; Ph.D.; Coordenador do LS&TC

E-mail: welder@vortex.ufrgs.br

---

## **Resumo**

*Este trabalho tem por objetivo principal o estudo do comportamento do arco elétrico a partir da compreensão dos fenômenos físicos envolvidos na soldagem molhada com eletrodos revestidos, relacionados ao aumento de pressão hidrostática e pequenas variações na composição química dos consumíveis.*

*Utilizando uma câmara para soldagem subaquática, foram simuladas soldagens a diferentes profundidades (5,0; 12,5 e 20,0 metros) e, tendo como referência um eletrodo desenvolvido no LS&TC, variados os teores de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{TiO}_2$ , também, adicionando-se alumínio ao revestimento. As soldas foram executadas empregando-se um dispositivo automático de soldagem e utilizando os mesmos parâmetros (corrente, tensão e velocidade).*

*Todos os eletrodos testados se mostraram mais estáveis com o aumento da profundidade de soldagem. Os eletrodos com maiores teores de  $\text{CaCO}_3$  foram os que apresentaram maior estabilidade do arco, principalmente a mais baixas profundidades.*

## **Abstract**

*The main objective of this work is to study the electric arc behaviour in underwater wet welding with covered electrodes, related to the increase in depth and small changes in chemical composition of these electrodes.*

*Using an hyperbaric chamber, welding operations were simulated at three different depths (5.0; 12.5 and 20.0 m). Using as a reference a covered electrode developed in this W&RTL, the relative amounts of  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  and aluminum were changed to evaluate their effects on the final welding quality. The welds were performed using an automatic device and using the same welding parameters (arc current and tension, and travel speed).*

*All the electrodes have shown increase in arc stability with welding depth. The best results were observed for those with greater amounts of  $\text{CaCO}_3$ , specially at shallow depths.*

## SUPLEMENTO TÉCNICO

## Introdução

Este trabalho segue uma linha de pesquisa desenvolvida no LS&TC, dedicada ao estudo da soldagem subaquática molhada (SSM). Inicialmente, foram desenvolvidos eletrodos especiais para este tipo de soldagem, os quais proporcionaram metal de solda com boa qualidade.

Nesta nova etapa, pretende-se estudar o comportamento destes eletrodos com relação aos fenômenos que ocorrem neste tipo especial de aplicação, relacionando aumento da pressão hidrostática e pequenas alterações na composição química do revestimento com a estabilidade do arco elétrico. Para isto, realizaram-se operações de soldagem a diferentes profundidades e foram alterados os teores de alguns compostos presentes no revestimento considerados estabilizantes do arco na soldagem convencional em ambiente seco ( $\text{CaCO}_3$  e  $\text{TiO}_2$ )<sup>[1,2]</sup> e molhado (Al)<sup>[3]</sup>.

A avaliação da estabilidade do arco foi feita com base na variação dos sinais elétricos durante a execução das operações de soldagem. Com os resultados obtidos, pretende-se estabelecer um método de avaliação

destes eletrodos, que possa ser empregado para definir a composição química mais adequada e, conseqüentemente, melhorar a qualidade final das juntas soldadas.

## Procedimento Experimental

Os eletrodos revestidos utilizados neste trabalho, foram fabricados a partir de uma composição base rutilica, testada para SSM com bons resultados. A partir desta mistura, designada "base", variou-se os teores de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) e introduziu-se pequenas quantidades de alumínio. A composição de cada uma das sete misturas resultantes pode ser vista na Tab. 1.

Após um período de testes para a definição de parâmetros ótimos de soldagem, considerando o tipo e diâmetro do eletrodo adotado como base, as soldas foram realizadas, totalizando 84 diferentes experimentos. Foram executados 4 cordões de solda para cada condição de soldagem (ou seja, para um determinado eletrodo e profundidade), sendo dois dos quais sobre juntas em ângulo (ângulo de 120°) e dois por simples deposição sobre a chapa. Durante cada operação, ten-

são e corrente instantâneos de soldagem foram adquiridos a uma taxa de 5 kHz (cada sinal) durante 6 s, totalizando 24 s de aquisição para cada situação (eletrodo/profundidade)<sup>[4]</sup>.

A simulação das operações de SSM foi realizada em uma câmara hiperbárica, através de dispositivo mecanizado para soldagem com eletrodos revestidos. Desta forma, todas as soldas foram realizadas em condições idênticas, excluindo da análise o fator habilidade do soldador. Os testes foram feitos em 3 diferentes profundidades de soldagem (5, 12,5 e 20 m), com cada um dos eletrodos revestidos descritos acima, sendo que as soldas foram executadas em um único passe com os seguintes parâmetros de soldagem: corrente média entre 160 e 170 A e velocidade de soldagem entre 2,5 e 3,0 mm/s. A velocidade de descida do eletrodo foi controlada através do valor da tensão instantânea de soldagem, ajustada para 25 V. Sempre que a tensão instantânea superava este valor, o motor responsável pela descida do eletrodo era acionado, com o objetivo de manter o comprimento do arco constante. Diferentemente das juntas realizadas na superfície, na soldagem subaquá-

Tabela 1 - Composição Química do Revestimento dos Eletrodos

Mistura	Compostos (% em massa)									
	Al	Argila	CaCO <sub>3</sub>	CMC(*)	Fe-Mn	Fe-Si	Mica	Mg	P de Fe	TiO <sub>2</sub>
Base	0	5	5	1	10	5	4	3	37	30
Al01	2	5	5	1	10	5	4	3	37	30
Al02	5	5	5	1	10	5	4	3	37	30
Ca01	0	5	11	1	10	5	4	3	37	30
Ca02	0	5	16	1	10	5	4	3	37	30
Ti01	0	5	5	1	10	5	4	3	37	40
Ti02	0	5	5	1	10	5	4	3	37	50

Nota: (\*) Carbox-Metil-Celulose

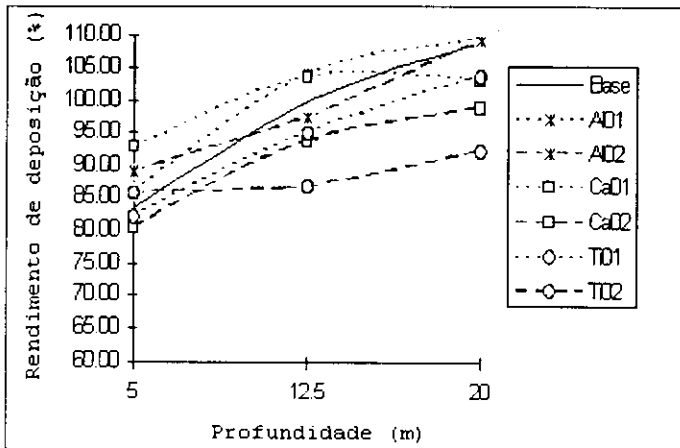


Figura 1 - Rendimento de deposição em função da profundidade.

tica o intervalo de tensão admissível é bastante estreito, não permitindo grandes alterações na regulagem, que resultariam em extinção do arco ou na "solda" do eletrodo na peça, arruinando o cordão.

O efeito das alterações de condições de soldagem e composição química dos eletrodos foi avaliado através da análise dos oscilogramas de tensão e corrente registrados durante a solda. A qualidade da junta foi inferida com base no exame visual e na contagem dos poros presentes no metal de solda, e utilizada como complemento à análise dos parâmetros instantâneos de soldagem.

## Resultados

Para cada uma das soldas realizadas, foram calculados rendimento (massa do metal de solda depositado/massa da alma do eletrodo consumida) e taxa de deposição (massa do metal de adição depositada por unidade de tempo) do eletrodo. A análise destes dados mostra que, para todas as composições testadas, há aumento nestes índices com o aumento da profundidade de soldagem. Isso comprova o efeito da pressão ambiente sobre as características do arco elétrico em soldagem subaquática, já

conseqüente aumento de densidade de corrente, o que resulta em maior taxa de transferência de metal. Os resultados demonstram que, mesmo para as relativamente pequenas diferenças e magnitudes de profundidade abrangidas por este trabalho, o efeito da pressão ambiente é bastante sensível. As Figs. 1 e 2 mostram o aumento de rendimento e taxa de deposição, em função da profundidade para cada uma das misturas estudadas.

Por sua vez, as Figs. 3 e 4 mostram os inversos dos desvios padrão relativos de corrente e tensão instantâneos de soldagem ( $e$ ). Pode-se notar que os eletrodos Ca01 e Ca02 apresentam comportamento mais regular que os demais, na profundidade de 5 m.

descrita por outros pesquisadores<sup>15, 61</sup>. Com o aumento da profundidade, aumentam a condutividade térmica dos gases e a constrição do arco devida à pressão hidrostática radial sobre a coluna do arco, com

O número de curtos-circuitos observados ( $N_{cc}$ ) diminui consideravelmente, para todas as composições estudadas, quando se passa de 5 para 12,5 m de profundidade e a 20 m para alguns eletrodos este número continua a cair (base; Al02 e Ti01), enquanto nos outros há uma pequena elevação (Al01, Ca01, Ca02 e Ti02), como pode ser observado na Fig. 5. Este comportamento indica uma provável mudança no modo de transferência de curtos-circuitos para globular ocorrendo nesta profundidade.

Neste caso, nota-se também um comportamento diferenciado provocado pela variação na composição química dos eletrodos. Em relação à composição base, os eletrodos com adição de  $CaCO_3$  foram aqueles nos quais resultaram as menores quanti-

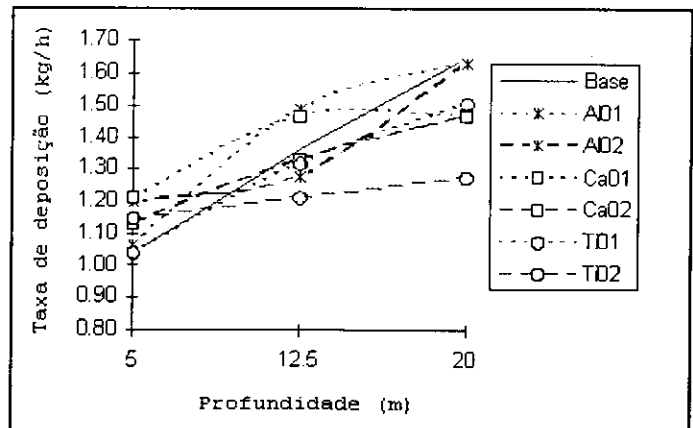


Figura 2 - Taxa de deposição em função da profundidade.

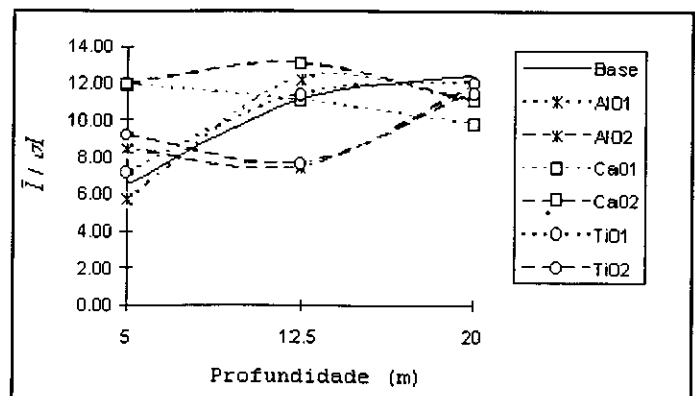


Figura 3 - Inverso do desvio padrão da corrente,  $1/\sigma_i$ , em função da profundidade.

dades de curtos-circuitos, principalmente nas menores profundidades, não se observando diferenças sensíveis entre as duas composições. O aumento nos teores de Al e  $TiO_2$ , por sua vez, acarretaram um maior número de curtos-circuitos, notavelmente a 5 e 20 m.

O tempo médio de duração dos curtos-circuitos ( $t_{cc}$ ) também diminui com o aumento da profundidade, como pode ser visto na Fig. 6. Porém, neste caso a tendência de redução com o aumento de profundidade mantém-se constante.

A Fig. 7 apresenta a porcentagem de poros presentes no metal de solda em função da profundidade. O resultado é semelhante ao apresentado em trabalho anterior,<sup>[7]</sup> embora no mesmo tenham sido mostrados dados referentes às medições feitas em apenas um cordão de solda para cada situação (junta em ângulo). A porosidade verificada nas soldas é resultado da combinação de dois efeitos contraditórios. Inicialmente, em baixas profundidades, o efeito da pressão pode ser considerado desprezível, verificando-se apenas o efeito nocivo do ambiente molhado sobre a quantidade de poros presentes no metal de solda<sup>[8]</sup>. A 5 m o arco elétrico é bastante instável. A 12,5 m o comportamento do arco se

mostra mais estável, porém o efeito da pressão sobre a poça de fusão também aumenta. O aumento de porosidade verificado em alguns eletrodos, a esta profundidade, também está provavelmente associado a uma zona de transição no modo de transferência destes eletrodos. A 20 m o arco elétrico, para todos os eletrodos estudados, se mostrou bastante estável, contrabalançando o efeito indesejável da pressão hidrostática, verificando-se inclusive, em alguns casos, redução do número de poros.

A partir dos oscilogramas de tensão instantânea de soldagem, foram traçados histogramas e feita uma análise da composição de frequências presentes através de transformadas de Fourier (FFT)<sup>[9]</sup>. Estes dois métodos gráficos permitem a visualização do comportamento do eletrodo durante a soldagem e fácil comparação entre duas soldas.

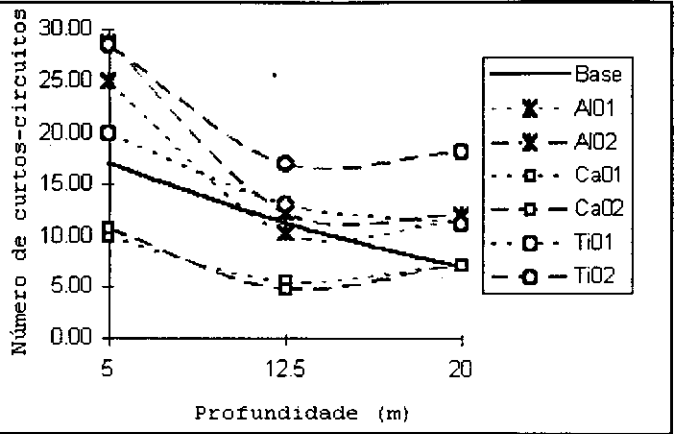


Figura 5 - Número de curtos-circuitos ocorridos em função da profundidade.

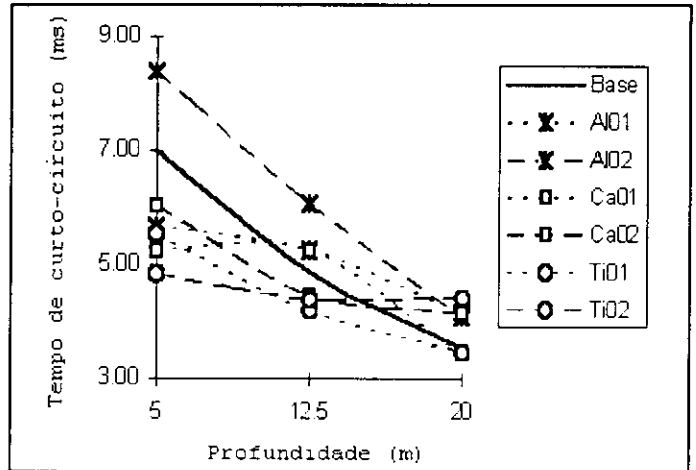


Figura 6 - Tempo médio dos curtos-circuitos em função da profundidade.

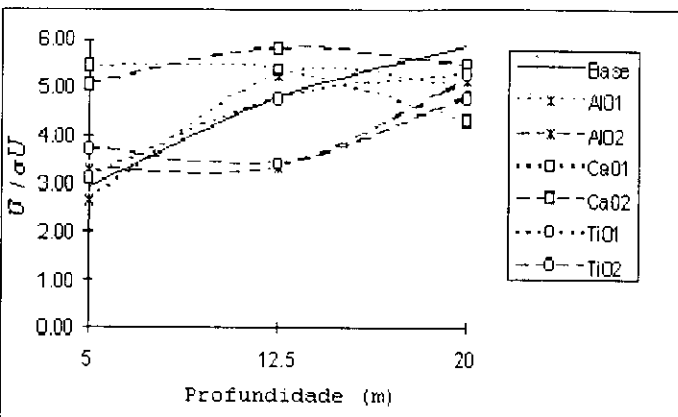


Figura 4 - Inverso do desvio padrão da tensão,  $U/\sigma U$ , em função da pro-

e 9 mostram os histogramas de tensão de duas juntas soldadas a 5 m de profundidade com os eletrodos AlO1 e CaO1. O histograma da solda, executada com o eletrodo AlO1, apresenta três regiões distintas. A primeira delas é um pico situado à tensão de aproximadamente 5 V, indicando a ocorrência de curtos-circuitos. Um pico maior situado na região dos 25 V apresenta grande largura e formato indefinido, características de uma solda irregular. Existe ainda uma região com atividade acima de 80 V, que acusa a ocorrência de interrupção do arco durante a soldagem. A Fig. 9, por sua vez, mostra pequena atividade na região dos 5 V, atestando a pequena ocorrência de curtos-circuitos e um pico maior situado próximo aos

As Figs. 8

25 V, de formato simétrico, altura maior e largura menor que o da Fig. 8, características de um arco mais estável.

### Conclusões

O efeito da pressão sobre a coluna do arco ocorre no sentido de aumentar a densidade de corrente e, conseqüentemente, facilitar a transferência de metal do eletrodo para a peça (dentro do intervalo de pressões observado neste estudo, aumentos maiores de pressão reduzirão muito esta seção transversal, causando instabilidade). O aumento na taxa de deposição dos eletrodos, com redução simultânea no número de ocorrências e tempo médio dos curtos-circuitos, indica

transferência de metal mais fácil e eficiente, além de, possivelmente, mudança do modo de transferência. Por outro lado, este aumento de pressão sobre a poça de fusão agita o metal líquido e dificulta a ação protetora por parte dos gases gerados pela queima do revestimento, causando entrada de água e aumento da porosidade.

Quanto ao efeito da composição química do eletrodo sobre o arco elétrico em ambiente molhado, os eletrodos com  $\text{CaCO}_3$  se mostraram mais

estáveis. Dentre as misturas testadas, apresentaram maior estabilidade aquelas que contém maiores teores deste composto, particularmente na profundidade de 5 m, na qual os outros eletrodos exibiram um comportamento marcadamente mais instável.

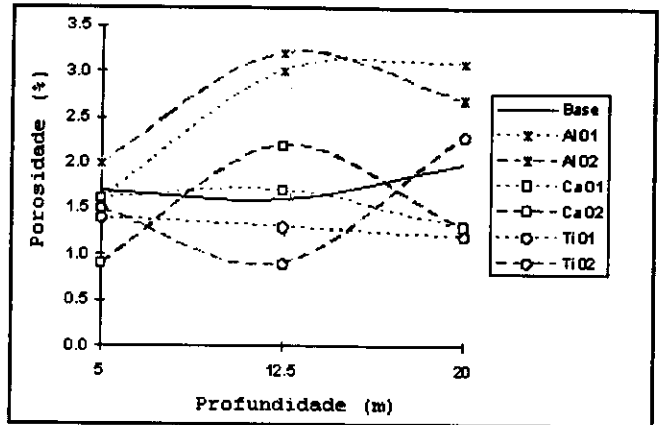


Figura 7 - Variação da porosidade em função da profundidade

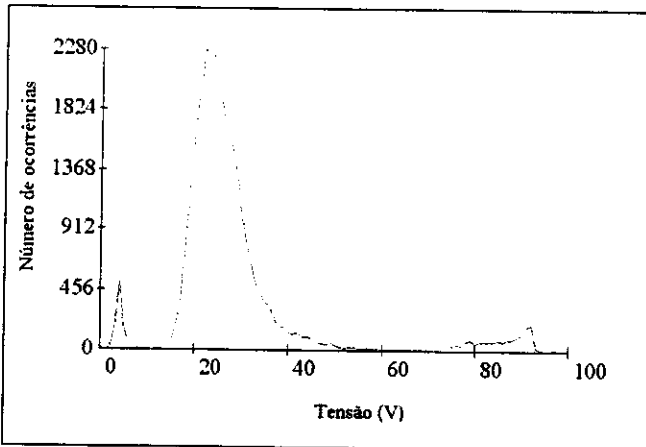


Figura 8 - Histograma de tensão instantânea de soldagem obtido com o eletrodo AlO1 a 5 m.

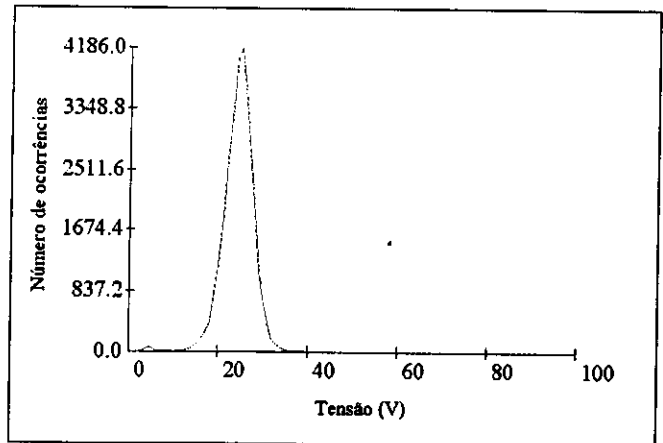


Figura 9 - Histograma de tensão instantânea de soldagem obtido com o eletrodo CaO1 a 5 m.

## B i b l i o g r a f i a

- [1] POKHODNYA, J.K.; et al: "Research into the Special features of Metal Transfer and Arc Running Stability". Automatic Welding, (4), 3-6, 1984.
- [2] SANCHEZ-OSIO, A.; LIU, S.; OLSON, D.L.; IBARRA, S.; "Underwater Wet Welding Consumables for Offshore Applications". Proceedings OMAE. Vol III-A, pg. 119-128, 1993.
- [3] ANDERSEN, L.; "Aluminum Powder Helps Covered Electrode Stay Dry". Welding Journal, November, 60-62, 1990.
- [4] MAZZAFERRO, J.A.E "Estudo da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem Molhada com Eletrodos Revestidos". Tese de doutorado PPGEM / UFRGS, julho, 1998.
- [5] TSAI, C.L.; OZAKI, H.; MOORE, A.P.; ZANCA, L. M.; PRASAD, S.; MASUBUCHI, K.; "Development of New Improved Techniques for Underwater Welding". MIT Sea Grant Program, Report Nº MITSG 77-9, 1977.
- [6] MADATOV, N.M.; "Shape Relations for Underwater Welding". Welding Production, 16 (3): 18-23, March, 1961.
- [7] MAZZAFERRO, J.A.E e MACHADO, I. G. "Estudo Preliminar sobre a Qualidade das Juntas em Soldagem Subaquática Molhada". XXIII ENTS, São Paulo 1997, pg. 77-85.
- [8] NIXON, J.H. and GRAHAM, S.R.B.; "Arc Instability in Shallow Water Wet Welding". International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 1993, 129-132.
- [9] PISTORIUS, P.G.H; LIU, S; "Changes in Metal Transfer Behaviour during Shielded Metal Arc Welding". Welding Journal, August, 1997. WRS pg. 305-s - 315-s