

Influência da Polaridade Sobre a Estabilidade do Processo de Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Revestido

Andrés Mauricio Moreno Uribe¹, Alexandre Queiroz Bracarense¹, Ezequiel Caires Pereira Pessoa², Valter Rocha dos Santos³

¹ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – IFMG, Betim, MG, Brasil.

³ Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro – PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Recebido: 08 Nov., 2017

Aceito: 25 Jan., 2018

E-mail: andresmauriciomu@ufmg.br
(AMMU)

Resumo: Por sua grande versatilidade e baixo custo, SMAW é considerado o processo de maior uso na indústria naval e offshore. Porém, como resultado de ter o arco elétrico em contato direto com o meio aquoso, o emprego da técnica é exposto à pressão hidrostática agindo na coluna de arco e na poça de fusão, assim como também, à dinâmica de geração de bolhas e a decomposição da água. A combinação destes fatores influencia na estabilidade do processo, resultando em cordões de solda com grandes quantidades de defeitos. Neste ponto em particular, destaca-se que a definição de estabilidade em UWW encontra-se pouco compreendida, fato pelo qual existem diversas opiniões na indústria e na literatura, sem ter-se explicação do fenômeno. Assim, este estudo caracteriza a estabilidade em função de uma das características elétricas do arco: a polaridade. A configuração deste último fator define as características resultantes na junta; deste modo, os fenômenos de catodo e anodo que governam a geração de calor influenciam no formato do cordão ou na taxa de fusão do consumível. Nesta pesquisa, foram utilizados um eletrodo rutilico comercial e um consumível que apresenta resultados promissores em matéria de propriedades mecânicas e teor de Hidrogênio Difusível: WW70.

Palavras-chave: Polaridade; Estabilidade; Eletrodo revestido; Soldagem subaquática molhada.

Influence of Polarity On the Stability of Underwater Wet Welding Process with Coated Electrode

Abstract: Due to its great versatility and low cost, SMAW is considered the most used process in the naval and offshore industry. However, as a result of having the electric arc in direct contact with the aqueous medium, the use of the technique is affected by the hydrostatic pressure acting on both the arc column and melting pool, as well as the dynamics of bubble generation and water decomposition. The combination of the above factors influences the process stability, resulting in weld beads with large amounts of defects. In this particular point, it is emphasized that the definition of stability in UWW is poorly understood, a fact by which there are diverse opinions in industry and literature, without explanation of the phenomenon. Thus, this study characterizes the stability in function of one of the electric characteristics of the arc: the polarity. The configuration of this last factor defines the resulting characteristics in the joint; thus, the cathode and anode phenomena that govern the generation of heat influence the shape of the bead or the fusion rate of the consumable. In this research, it was used a commercial rutile electrode and a consumable that shows promising results in terms of mechanical properties and Diffusible Hydrogen content: WW70.

Key-words: Polarity; Stability; Coated electrode; Underwater wet welding.

1. Introdução

O grau de estabilidade pode definir desde as irregularidades no formato do cordão de solda até descontinuidades na deposição e o nível de respingos. Deste modo, acredita-se que num processo estável, tem-se o melhor desempenho do consumível e como resultado, juntas com mínima quantidade de defeitos. Deste modo, a “estabilidade” afetará o desempenho operacional do processo e por sua vez, será o resultado da configuração de parâmetros elétricos do arco (Tensão, Corrente e Polaridade), a composição química do eletrodo, a pressão atmosférica, o meio de proteção e a relação das anteriores características com



o ambiente [1]. Especificamente para um processo a arco elétrico imerso num meio aquoso, a decomposição da água, as altas taxas de resfriamento, a geração de bolhas e a pressão do local de trabalho tem efeito direto sob o desempenho da técnica de soldagem [2]. Assim, no caso da aplicação de eletrodo revestido, se devem considerar os aspectos anteriores para definir a estabilidade.

Na atualidade, a Soldagem Subaquática Molhada (UWW) com o uso de eletrodo revestido é a técnica mais utilizada no reparo e manutenção de navios e plataformas offshore [3]. Porém e como consequência da natureza da técnica, tem-se a degradação das propriedades mecânicas das juntas obtidas. Por esta razão, na tentativa de dar solução na problemática exposta, tem sido desenvolvido um consumível oxi-rutílico (WW70) o qual apresenta promissórios resultados, exibindo um menor teor de hidrogênio difusível e propriedades mecânicas fornecidas pelo metal de solda muito superiores em comparação com um eletrodo rutílico comercial [4]. Com base no acima exposto e com o objetivo de continuar analisando o desempenho deste eletrodo experimental, o estudo apresentado a continuação procura avaliar o efeito da polaridade na estabilidade do processo mediante o uso de critérios propostos na literatura.

Como conhecido, a polaridade da corrente define o consumo do eletrodo e a penetração. Na situação de soldas com processo SMAW no ar, é comum obter maior penetração na junta para a configuração em CCEP e uma menor taxa de fusão nesta polaridade [5]. Contrariamente, nas soldas feitas embaixo da água, foi relatado por Tsai e Masubuchi [6] que o comportamento é o oposto, obtendo-se maior penetração com o eletrodo ligado no polo negativo. Diante disso, conhecer o comportamento do WW70 em função da polaridade pretende caracterizar este consumível e fornecer informações técnicas na sua aplicação.

2. Materiais e Métodos

A técnica de cordão sobre chapa (Bead-on-plate) foi utilizada no desenvolvimento das deposições por meio de um sistema de soldagem por gravidade, o qual garante a repetitividade dos ensaios. As soldas foram feitas no ar (a pressão atmosférica) e dentro de uma Câmara Hiperbárica, simulando as profundidades de 5 e 10 m em água doce. Chapas de Aço ASTM A-36 foram utilizadas como metal base, junto com os eletrodos E6013 e WW70 de 3,25 mm de diâmetro nominal e 350 mm de comprimento. Os consumíveis foram cobertos com verniz vinílico, a fim de proteger os eletrodos da absorção de água dentro do interior do tanque. No caso específico, o consumível oxi-rutílico já possuía proteção feita pelo fabricante. Para cada combinação de condições (Consumível, Profundidade e Polaridade) foram feitos três testes. Os parâmetros utilizados no processo de soldagem são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para todas as profundidades e polaridades.

Consumível	Corrente (A)	Ângulo do sistema de gravidade	
		α	β
E6013	170	60	100
WW70	190	60	100

O ângulo α está relacionado à velocidade de soldagem e o ângulo β está relacionado à componente da força gravitacional atuando na garra de fixação do eletrodo [2].

Nesta pesquisa, foi utilizada uma fonte eletrônica tipo corrente contínua (CC) da IMC SOLDAGEM, modelo HipER-1, a qual fornece uma corrente máxima de 450 A e 80 V de Tensão em Vazio. Também, como apresentado na Tabela 2, foram mantidas as seguintes características de controle da fonte em todos os testes. Assim, o ajuste destes parâmetros visa obter o reconhecimento das extinções do arco; deste modo, se a tensão atinge um valor inferior que U_{cc} (situação que é considerada como o acontecimento de Curto-Circuito) por um tempo igual a t_m , será aplicada a corrente I_{cc} , restabelecendo o arco elétrico [7].

Além disso, foi utilizado o sistema de aquisição de dados de soldagem IMC SOLDAGEM, modelo SAP V4 (calibrado pelo fabricante), em conjunto com o software SapTiV4.37s da mesma marca, aplicado na visualização e coleta dos sinais durante o processo de soldagem e exportação dos dados para um arquivo tipo texto. Deste

Tabela 2. Configuração do equipamento.

I_{cc} – Corrente de Curto-Circuito	190 A
U_{cc} – Tensão abaixo da qual se considera Curto-Circuito	5 V
I_{ab} – Corrente de abertura de arco	450 A
t_m – Tempo morto	5,9 ms

modo, foram obtidos sinais com uma taxa de amostragem de 5 kHz. A Figura 1 apresenta o diagrama geral das conexões no arranjo do estudo.

Como pode ser observado na Figura 1, a medição da tensão do arco foi feita nos cabos de força (diferença de potencial entre o polo positivo e negativo), no ponto em que estes atravessam a parede do vaso. Além disso, a análise dos dados obtidos foi feita com o uso do Programa Sinal 2017, desenvolvido pelo LRSS/LabSEND – UFMG. Com isto, a tensão e a corrente média de soldagem junto com os seus respectivos desvios padrões foram calculados dos arquivos de dados para um tempo de 5 s: correspondente com a faixa de tempo do segundo 10 a 15, com o qual foi evitado o período transiente dos sinais de corrente e tensão no início do processo de soldagem.

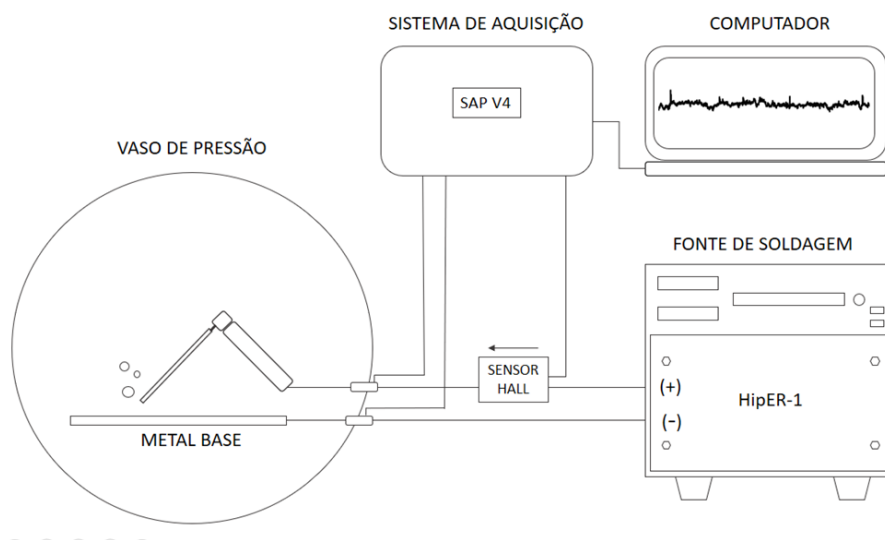


Figura 1. Diagrama geral para aquisição de dados.

Com o objetivo de avaliar a estabilidade do processo de soldagem, foi utilizado o Coeficiente de Variação (K_v), o qual de acordo com a literatura [8], mede a dispersão em termos relativos por meio da divisão do desvio padrão (σ) pelo valor médio da tensão (\bar{U}) (Equação 1). Não obstante, o desvio padrão (como medida de dispersão e fator determinante de K_v) é influenciado diretamente pela transferência metálica característica de um processo com eletrodo consumível, fato que resulta em sinais sujeitos a flutuações próprias da dinâmica de geração de gotas e a movimentação da poça de fusão. Dito isto, é bem conhecido [9] que a melhor forma de avaliar o arco elétrico em soldagem para uma fonte de características de corrente constante, é pelo controle do comprimento do arco. Deste modo, o sinal de tensão em um processo com eletrodo revestido deve ser filtrado com o fim de obter constância do sinal base em relação ao tempo, e assim atingir um parâmetro comparativo entre sinais sob diferentes condições. Em vista disto, com a aplicação de filtros digitais procura-se a avaliação do comportamento do arco elétrico sem a influência da transferência metálica, obtendo deste modo, uma dispersão menor em torno da média e assim, coeficientes de variação que expressam a estabilidade dos períodos de arco aberto e refletem o efeito das variáveis do processo sobre este último.

$$K_v = \left(\frac{\sigma}{\bar{U}} \right) \quad (1)$$

Como exemplo, no oscilograma mostrado na Figura 2, é possível observar uma quantidade destacável de Curtos-Circuitos (Valores de tensão que atingem o patamar de 5 V), com o qual tem-se uma grande dispersão em termos de desvio padrão. Não obstante, o uso do filtro Kalman “limpa” o sinal dos pontos que caracterizam a transferência metálica, obtendo-se as flutuações do arco em aberto e em consequência um menor desvio padrão. Conjuntamente, foi definido no programa de tratamento de dados o valor de 5 V como ponto de referência, abaixo do qual entendesse como um evento de Curto – Circuito (Figura 3). Assim, foi determinado o Número de Curtos-Circuitos (NCC), com o fim de caracterizar o tipo de transferência metálica em função da profundidade, polaridade e tipo de consumível, e a relação com a estabilidade do processo. Também foi aplicada a metodologia de Modenesi e Avelar [10], avaliando o período médio de transferência metálica (T) e a duração média do período de Curto-Circuito (t_{cc}), com o propósito de quantificar por meio de um índice (Equação 2) a presença de este tipo de transferência metálica durante a soldagem.

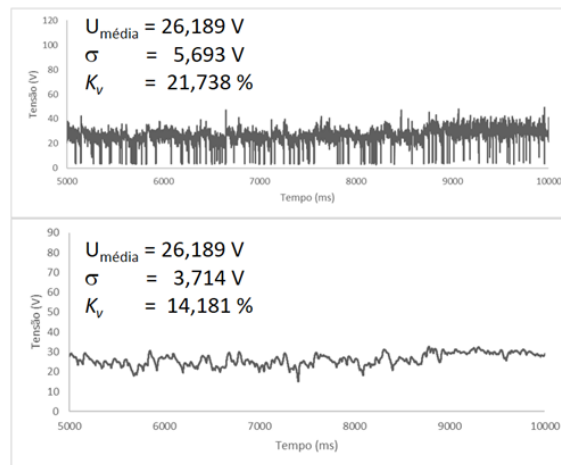


Figura 2. Superior: Oscilograma de tensão para processo de Soldagem Subaquática molhada com E6013, em polaridade direta e 10 m; Inferior: Oscilograma após filtragem. Tempo: 5 a 10 s.

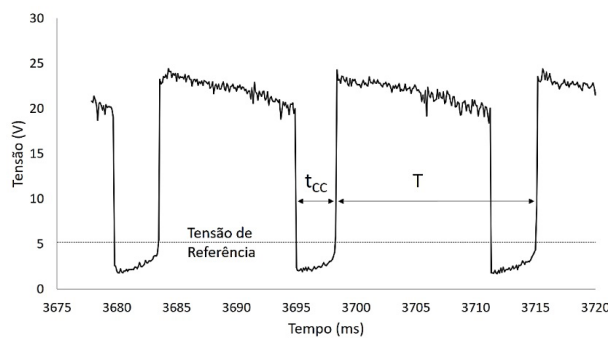


Figura 3. Metodologia de Definição do Período de Transferência Metálica (T), o Tempo de Curto-Circuito (t_{cc}) e a contagem do NCC. Adaptado de [10].

$$F_{CC} = \frac{t_{CC}}{T} \tag{2}$$

Também, foi utilizado o índice de Estabilidade de Madatov (S) (Equação 3). Esta razão entre a corrente máxima e mínima foi apresentado por Tsai e Masubuchi [6], e utilizado mais recentemente por Pessoa [11] e Santos et al. [4]. Assim, para o mesmo tempo de análises do coeficiente de variação (segundo 10 até o 15 da solda), foi identificada

a corrente máxima (I_{MAX}) e mínima (I_{MIN}) para cada um desses 5 segundos, para deste modo, fazer uma média aritmética desses valores.

$$S = \frac{I_{MAX}}{I_{MIN}} \tag{3}$$

Outra das técnicas utilizadas na avaliação do desempenho dos consumíveis em função dos parâmetros de soldagem, foi o uso de histogramas. Dutra [12] relatou que esta é uma ferramenta científica e matemática, a qual fornece informações sobre o caráter de repetitividade dos fenômenos de transferência metálica. Ademais, foi utilizado o Ciclograma, o qual é um recurso que fornece informação em relação à estabilidade e a transferência metálica.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 3 apresenta os valores de tensão e corrente média com os seus respectivos desvios padrões para cada conjunto de ensaios. Nota-se que para os dois consumíveis estudados, não é possível concluir estatisticamente que houve redução ou acréscimo da tensão e corrente com a profundidade, pelo fato que os valores médios ficaram dentro do erro estatístico (desvio padrão). Contudo, para o WW70, com a mudança da polaridade inversa (CCEP) para a polaridade direta (CCEN), tem-se uma diminuição no valor da tensão média para todas as profundidades (Figura 4). Com isto, este comportamento pode ser associado com a menor taxa de fusão exibida em polaridade direta com o uso deste eletrodo (Figura 5), o qual, é oposto ao relatado na literatura [13], onde para polaridade direta a taxa de fusão é maior em processos de soldagem com eletrodo consumível. Também, é interessante relatar que para as soldas feitas no vaso de pressão, a taxa de fusão manifesta-se como descrito por Tsai e Masubuchi [6]. No modelo propõe-se que o calor gerado pelo arco é dirigido para o eletrodo de modo que a alma funde rapidamente gerando um maior consumo deste em CCEP.

Tabela 3. Tensão e Corrente médias em função da Profundidade, Eletrodo e Polaridade.

Eletrodo	Polaridade	Profundidade											
		ar (0 m)				5 m				10 m			
		\bar{U} (V)	$\sigma\bar{U}$ (V)	\bar{I} (A)	$\sigma\bar{I}$ (A)	\bar{U} (V)	$\sigma\bar{U}$ (V)	\bar{I} (A)	$\sigma\bar{I}$ (A)	\bar{U} (V)	$\sigma\bar{U}$ (V)	\bar{I} (A)	$\sigma\bar{I}$ (A)
E6013	CCEP	24,44	0,22	171,49	0,05	27,49	1,77	171,75	0,40	27,34	0,22	171,64	0,23
	CCEN	28,76	1,18	170,21	0,13	26,03	1,02	170,87	0,39	25,16	2,62	171,15	0,22
WW70	CCEP	30,13	0,46	189,89	0,09	30,13	1,25	190,23	0,34	29,53	0,67	190,26	0,62
	CCEN	27,29	0,32	190	0,10	26,28	1,50	190,06	0,15	24,19	0,59	190,41	0,53

\bar{U} : tensão média, \bar{I} : corrente média, $\sigma\bar{X}$: Desvio padrão após filtragem.

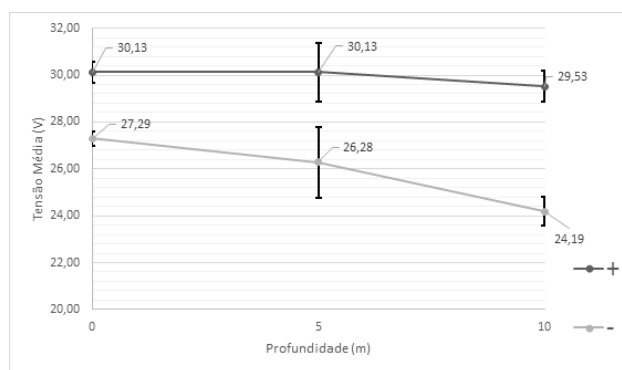


Figura 4. Tensão média em função da profundidade e polaridade para WW70. Nota: os símbolos “+” e “-” representam a polaridade inversa (CCEP) e direta (CCEN) respectivamente e daqui em diante.

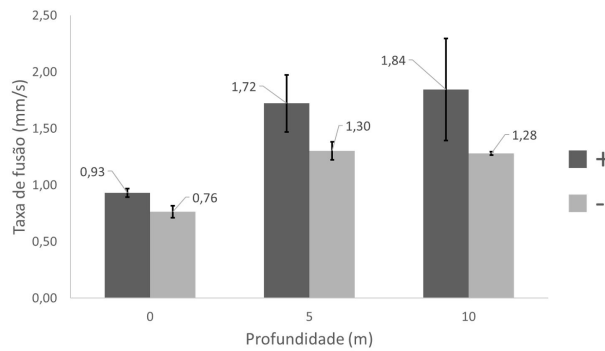


Figura 5. Taxa de Fusão em função da profundidade e polaridade para WW70. Nota: a taxa de fusão do eletrodo foi analisada através da relação do comprimento do eletrodo após a solda vezes o tempo total de soldagem.

No que concerne com a estabilidade do processo, o Coeficiente de Variação (K_v), que é uma conhecida ferramenta estatística utilizada na avaliação de sinais dinâmicos, representa as flutuações no comportamento do arco mediante a medição da dispersão em relação a tensão média. Deste modo, um sinal mais estável seria o resultado de um processo no qual as oscilações em torno da tensão de soldagem mantem-se pequenas, o qual geraria um melhor cordão de solda. Tendo em consideração o exposto anteriormente, para o consumível E6013 em polaridade direta e para as soldas feitas a 0 e 10 m, o processo apresenta-se mais instável (Figura 6). A Figura 7, mostra o comportamento deste critério em função da pressão hidrostática e a polaridade da corrente para o eletrodo oxi-rutílico. Desta forma, o processo aponta para uma maior estabilidade com o uso de polaridade inversa no ar (0 m) e depois, com o incremento da profundidade, o comportamento é invertido, denotando menor estabilidade nesta polaridade e para os 10 m.

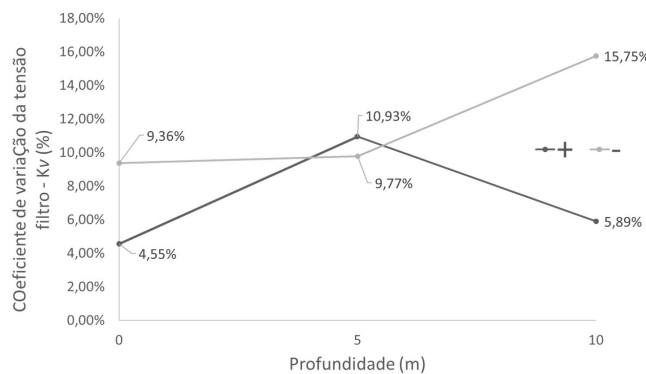


Figura 6. Coeficiente de Variação K_v em função da Profundidade e Polaridade para o eletrodo E6013.

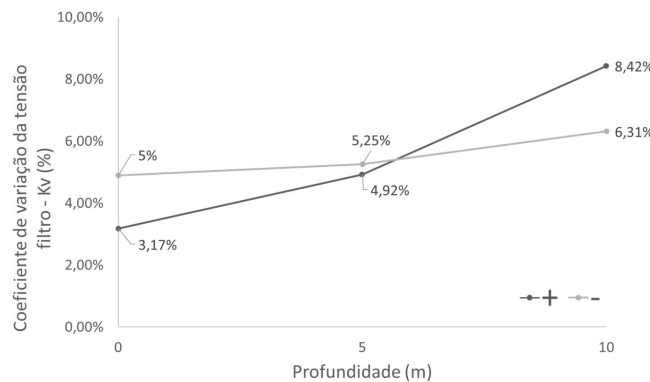


Figura 7. Coeficiente de Variação K_v em função da Profundidade e Polaridade para o eletrodo WW70.

No caso particular da profundidade simulada a 5 m, note-se que os valores do K_v são muito próximos, sem uma marcada diferença com a mudança da polaridade como nas outras condições. Neste ponto, pode-se tentar formular uma hipótese através das experiências obtidas pela experimentação. É bem sabido que o comportamento do arco elétrico em baixas profundidades apresenta o melhor desempenho na profundidade de 6 m [14]. Abaixo deste nível, foi comprovado a partir de relatos de soldador/mergulhador e a avaliação de oscilogramas e soldas, que o processo é significativamente menos estável. Efetivamente, para os dois consumíveis e ambas polaridades, o processo apresenta instabilidade em 5 m, por conseguinte, é provável que a baixa estabilidade característica do processo em baixas profundidades, disfarce o efeito dos fenômenos que governam a emissão de elétrons e a geração de calor no catodo e anodo, resultando numa região sem diferenciação.

Também, com o acréscimo da profundidade o processo torna-se mais instável (em termos gerais), porém, esse comportamento é o resultado de um arco elétrico constringido pela pressão hidrostática e influenciado pela dinâmica de formação das bolhas.

Fica em evidencia que o desvio padrão por si só não pode ser um critério para a avaliação da estabilidade, pelo fato de que a transferência metálica tem efeito direto sobre a flutuação do sinal. Deste modo, o coeficiente de variação apresenta-se mais indicado para a avaliação do arco em aberto. Não obstante, a forma na qual as gotas de metal fundido se transferem desde a ponta do eletrodo para a poça de fusão tem efeito em aspectos operacionais da soldagem, como a morfologia do cordão, a quantidade de respingos e até a estabilidade do processo. Por esta razão, a avaliação do tipo de transferência metálica em função das diferentes configurações do processo explica também a qualidade do metal de solda resultante. Como apresentado nas Figuras 8 e 9, o NCC varia em função da Profundidade, Polaridade e o tipo de consumível. Assim, para o tempo de amostragem total e com o uso do eletrodo E6013 em polaridade direta, o modo de transferência é por Curto-Circuito. Adicionalmente, pode ser evidenciado na Figura 8 que o NCC acrescenta com o aumento da profundidade para CCEN, refletindo deste modo o efeito que tem a pressão hidrostática sobre a transferência metálica. No entanto, com o uso de polaridade inversa, a transferência metálica é uma combinação entre os modos Globular/Curto-Circuito. Para o eletrodo Oxi-Rutílico, o modo de transferência em CCEP é totalmente globular. Já com a mudança de polaridade (CCEN), o processo apresenta quantidades insignificantes de Curtos, e estes aumentam com o acréscimo da profundidade. Por conseguinte, para o eletrodo WW70, o modo de transferência é tipicamente globular. Em relação com o F_{CC} , o comportamento deste índice tem correlação direta com o NCC, motivo pelo qual apresenta o mesmo desempenho.

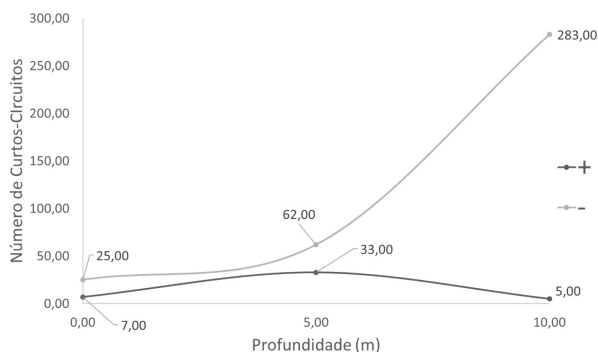


Figura 8. NCC em função da Profundidade e Polaridade para eletrodo E6013.

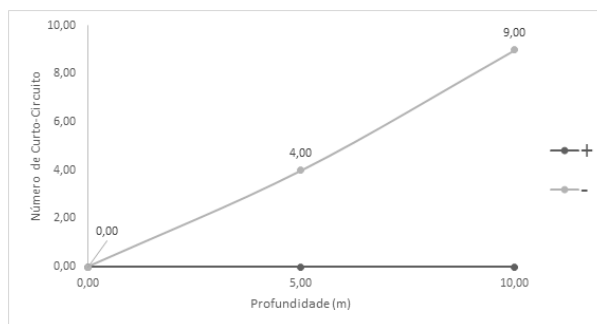


Figura 9. NCC em função da Profundidade e Polaridade para eletrodo WW70.

Da mesma forma, foi calculado o índice de Madatov (S). Para Soldagem de eletrodo revestido com o uso de CC, foi estabelecido que para valores deste fator próximos de 1, o arco elétrico é considerado estável. Pelo contrário, para valores $S > 1$, o arco é considerado instável [15]. No caso do E6013 e segundo este critério (Tabela 4), o processo exibe maior estabilidade com o uso de polaridade inversa. Portanto, é possível mostrar que o arco elétrico com consumível rutilico é mais sensível com as variações de pressão em CCEN. Note-se que para o WW70, CCEP é a configuração mais estável no ar (0 m) e depois, com o incremento da profundidade, a polaridade direta apresenta maior estabilidade. Portanto, pode-se relatar uma certa convergência na análise dos sinais de tensão e corrente mediante o uso do K_V e S . Por outro lado, tem-se que considerar que o índice de Madatov foi desenvolvido para aplicação em fontes do tipo gerador [6], as quais eram os equipamentos mais comuns na década de 60 e se caracterizam pela baixa velocidade de resposta e a ausência de controles nos fenômenos que ocorrem no arco e na transferência metálica. Por conseguinte, este fator não é válido para aplicação em fontes modernas de controle eletrônico, as quais garantem alta reprodutibilidade e resposta dinâmica. Além disso, constata-se que para a profundidade simulada de 5 m não se tem região de instabilidade, fato pelo qual pode-se considerar que o índice de Madatov está sujeito a uma limitada capacidade de avaliação.

Tabela 4. Índice de Madatov em função da Profundidade, Eletrodo e Polaridade.

Eletrodo	Polaridade	Profundidade		
		ar (0 m)	5 m	10 m
		S	S	S
E6013	CCEP	1,13	1,18	1,18
	CCEN	1,18	1,22	1,33
WW70	CCEP	1,04	1,08	1,09
	CCEN	1,06	1,06	1,07

A avaliação do processo com o uso de técnicas qualitativas revela também o comportamento apresentado pelo Coeficiente de Variação (K_V). A continuação, como exposto por Bauné et al. [16], é possível caracterizar um arco elétrico confiável pela análise da altura e largura dos Histogramas. Desse modo, um processo estável gera histogramas de pico alto e estreito. Adicionalmente e segundo Suban e Tušek [17], uma área menor representada nos gráficos de potência (Ciclogramas de Corrente vs Tensão) aponta para arcos estáveis. Assim, os principais aspectos para qualificar nas Figuras 10 e 11 são a área e a dispersão dos pontos Pessoa et al. [11].

A Figura 10 (a) representa o comportamento das soldas feitas com o eletrodo rutilico ao ar (0 m). Assim, o histograma revela a maior estabilidade do uso da polaridade inversa; igualmente, no Ciclograma é demonstrada uma menor área para CCEP. Como nas análises anteriores, para a profundidade simulada de 10 m (Figura 10 (c)), o eletrodo ligado ao polo positivo gera o processo mais estável. No entanto, com o uso da polaridade direta o histograma desloca para regiões de tensão menor, o que resulta num pico entre os 0 e 10 V e denota o acontecimento de Curtos-Circuitos.

Com o emprego do consumível oxi-rutilico, o eletrodo ligado no polo positivo gera o comportamento mais estável para as soldas feitas na pressão atmosférica (0 m) e evidencia-se que com polaridade direta a dispersão dos pontos que representam a tensão (mancha vertical) é superior (Figura 11 (a)). A mancha vertical representa maiores variações no comprimento do arco e diminuição da estabilidade. Finalmente e para a Figura 11 (c), constata-se que o processo para os 10 m se apresenta mais estável com o uso de CCEN, portanto pode-se inferir que este comportamento confirma os resultados obtidos pelo K_V . É evidente que para os ensaios feitos em 5 m (e para os dois consumíveis), não tem-se distinção do uso da polaridade e os níveis de instabilidade são semelhantes (Figura 10 (b) e Figura 11 (b)). Deste modo, como já discutido [18], nesta profundidade o arco elétrico sofre o efeito negativo do ambiente, independente da natureza química dos revestimentos. Também, como suportado pelo NCC, o tipo de transferência metálica com o uso do eletrodo WW70 é Globular; deste modo, a ausência de picos entre os 0 e 10 V nos Histogramas e Ciclogramas da Figura 11, pode ser resultado da maior corrente de operação para este consumível ou inerente ao tipo de revestimento.

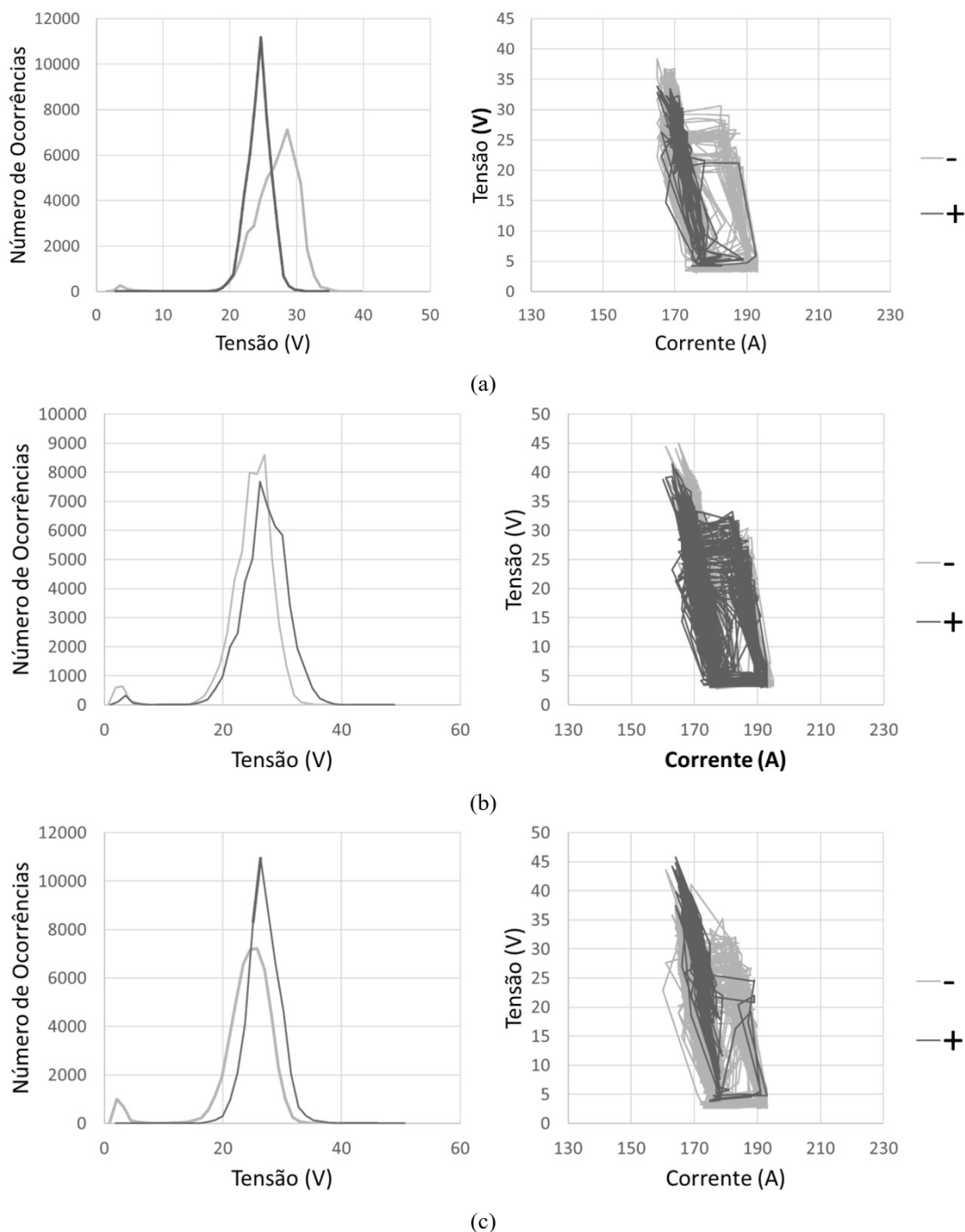


Figura 10. Histogramas e Ciclogramas que representam o comportamento do processo de soldagem subaquática molhada com eletrodo E6013 para (a) Cordões no ar (0 m), (b) 5 m e (c) 10 m.

Também, foi feita Inspeção Visual sobre as deposições resultantes do estudo, com o qual, procurou-se um indicativo da qualidade dos cordões por meio da observação de características ou defeitos superficiais. Com isto, para as soldas feitas com E6013 a pressão atmosférica (0 m) (Figura 12), é evidenciado claramente uma maior quantidade de mordeduras, respingos e um cordão maior em polaridade inversa (CCEP) que em polaridade direta (CCEN). Entretanto, com o incremento da profundidade (5 m) (Figura 13) se evidencia uma menor quantidade de

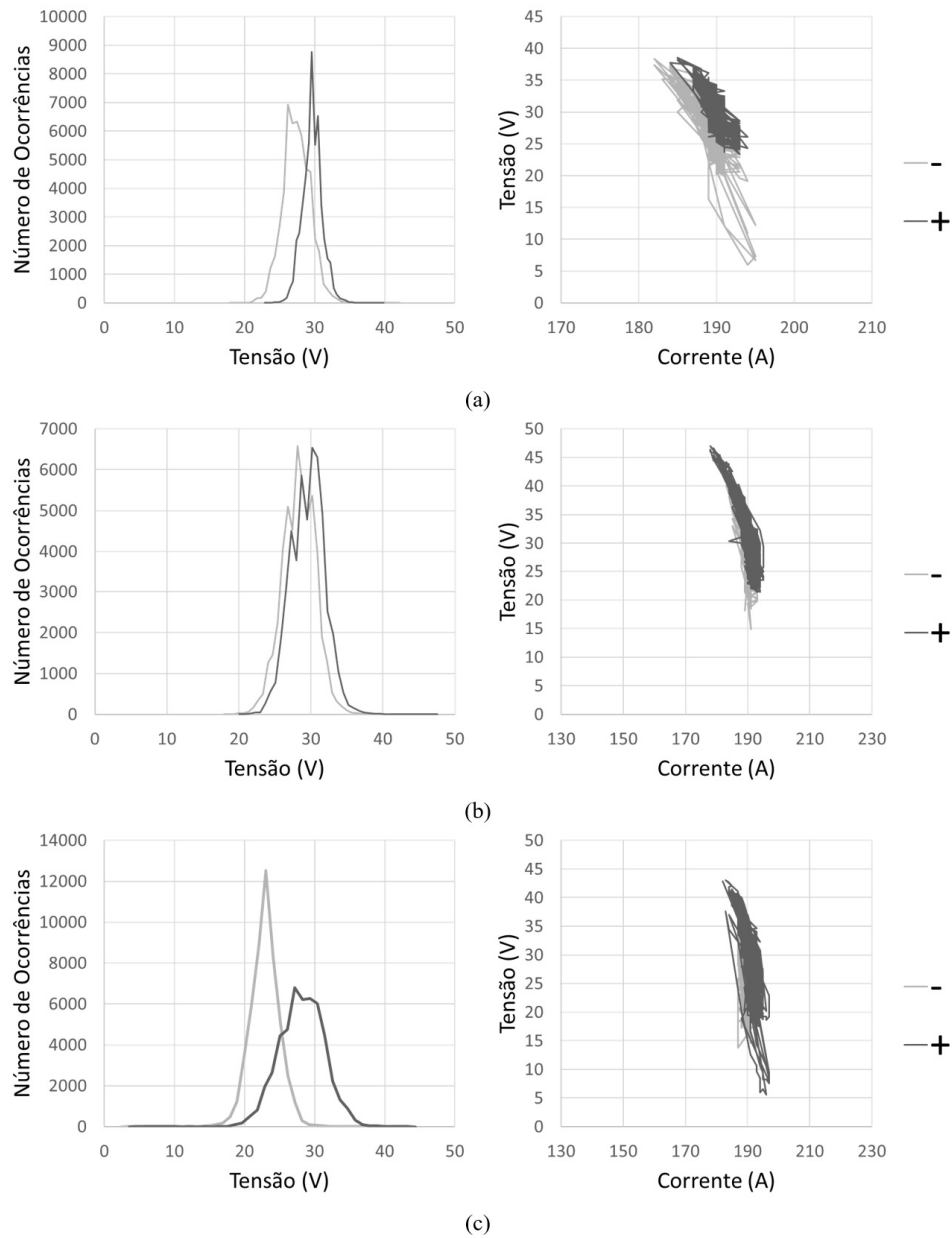


Figura 11. Histogramas e Ciclogramas que representam o comportamento do processo de soldagem subaquática molhada com eletrodo WW70 para (a) Cordões no ar (0 m), (b) 5 m e (c) 10 m.

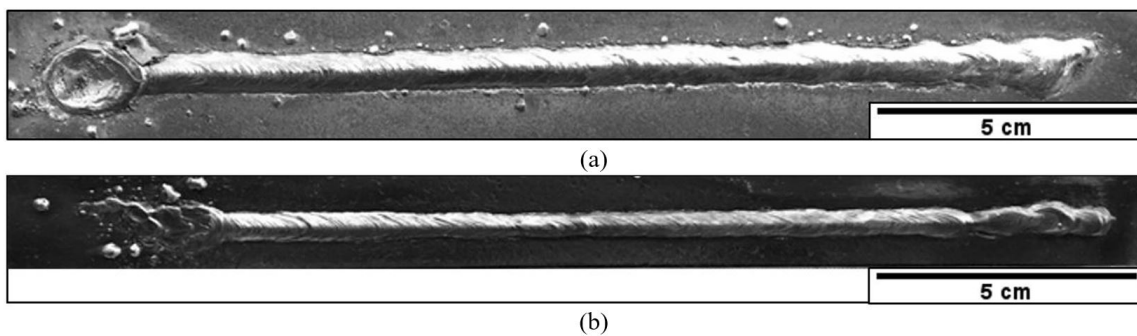


Figura 12. Cordões de solda feitos com eletrodo E6013 no ar (0 m) em CCEP (a) e CCEN (b).

defeitos, o que demonstra a influência da pressão hidrostática sobre a poça de fusão e conseqüentemente, sobre o formato resultante do cordão. A rugosidade do cordão acrescenta nas duas polaridades e também, as soldas em polaridade inversa continuam tendo uma maior largura e maior quantidade de respingos, porém, na polaridade direta tem-se inclusões e variação da largura do cordão. Por último, as soldas feitas dentro d'água, aquelas na profundidade de 10 m apresentam menor quantidade de defeitos (Figura 14). A altura do reforço é menor nas duas polaridades e em comparação com as outras configurações do ambiente. Aliás, não tem-se mordedura ou inclusões. Aparentemente a pressão hidrostática facilita a geometria do cordão de solda em profundidades maiores do que 5 m. Mais uma vez, em CCEP, tem-se maior quantidade de respingos sobre a chapa.

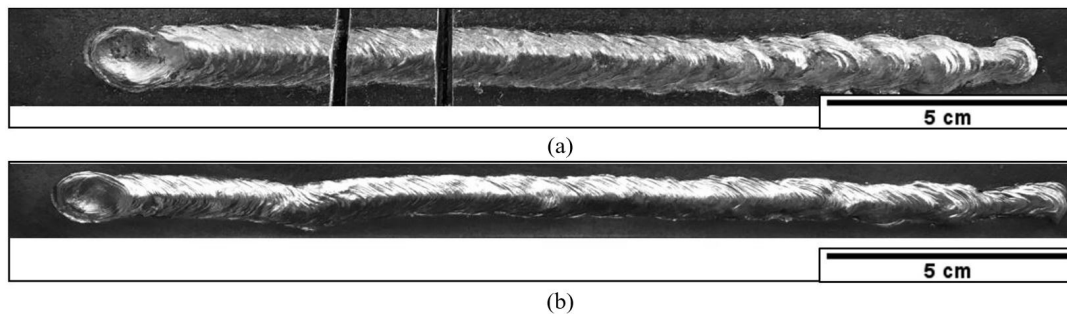


Figura 13. Cordões de solda feitos com eletrodo E6013 a 5 m de profundidade em CCEP (a) e CCEN (b).

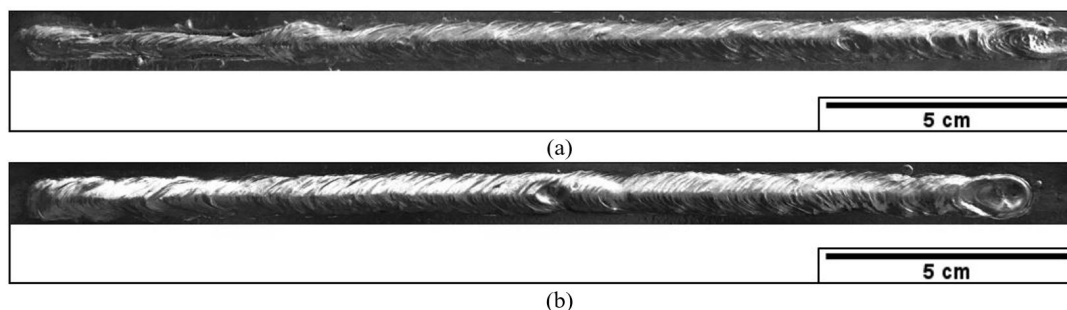


Figura 14. Cordões de solda feitos com eletrodo E6013 a 10 m de profundidade em CCEP (a) e CCEN (b).

Por sua parte, as soldas realizadas com WW70, foram as que apresentaram os piores resultados em término do aspecto visível da deposição. Os cordões feitos ao ar, apresentam porosidade e inclusão de escória nas duas configurações de polaridade (Figura 15). Para CCEN, é evidenciada variação na largura do cordão e mordedura. Contudo, as irregularidades superficiais nos testes com este eletrodo são evidentes, caracterizadas por uma morfologia indicativa de grande quantidade de poros e um reforço com muita rugosidade. É importante destacar que este consumível não foi desenvolvido para operações no ar, o que poderia explicar o notável acontecimento de defeitos, entre eles, a ocorrência de "Humping".

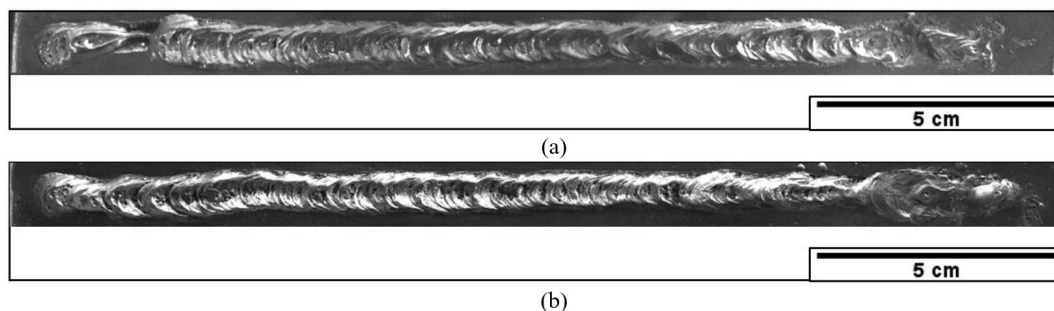


Figura 15. Cordões de solda feitos com eletrodo WW70 no ar (0 m) em CCEP (a) e CCEN (b).

Nas soldas feitas a 5 m, não tem-se uma diferenciação notável das deposições em função da polaridade (Figura 16), não obstante, os cordões feitos apresentam um formato com ondas mais regulares e menor porosidade em comparação com as soldas no ar. Por último, na maior profundidade (10 m), tem-se uma destacada melhora no aspecto visual do cordão (Figura 17), obtendo-se para CCEN o maior desempenho deste eletrodo. Deste modo e em concordância com estudos prévios, a polaridade direta resulta numa morfologia indicadora de menor presença de defeitos.

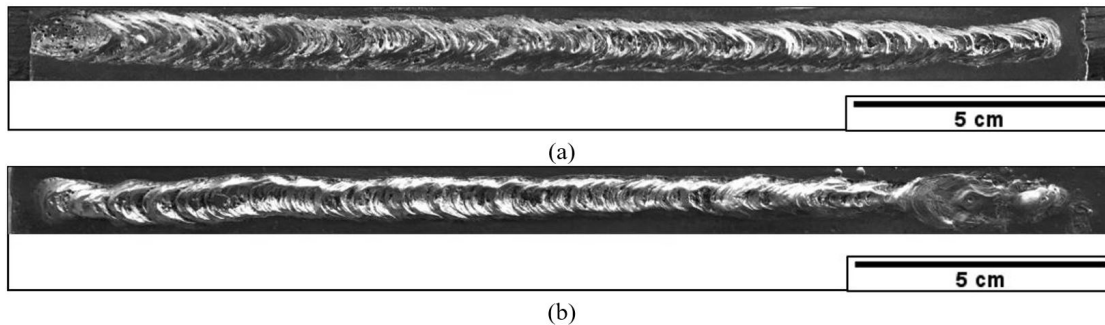


Figura 16. Cordões de solda feitos com eletrodo WW70 a 5 m de profundidade em CCEP (a) e CCEN (b).

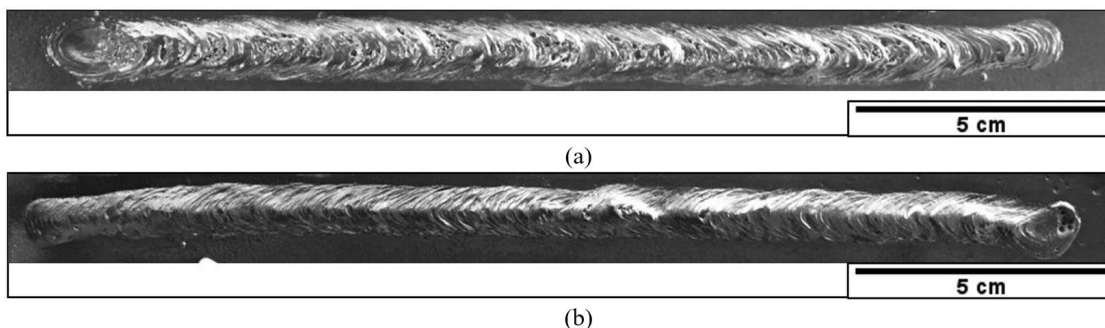


Figura 17. Cordões de solda feitos com eletrodo WW70 a 10 m de profundidade em CCEP (a) e CCEN (b).

4. Conclusões

- a) Os eletrodos tipo Oxi-rutílicos apresentam menores tensões de operação em polaridade direta. Isso pode ser consequência das menores taxas de deposição exibidas nesta configuração, as quais estão em consonância com o modelo exposto por Tsai e Masubuchi [6].
- b) A partir da avaliação de índices quantitativos e qualitativos, infere-se que com o uso do consumível rutilico, o processo apresenta-se mais estável em polaridade inversa e para as profundidades de 0 e 10 m. Também, nesta configuração, as deposições resultantes mostram uma maior quantidade de respingos. Porém, para aplicações específicas em UWW, a polaridade direta deriva em cordões com a melhor morfologia. Em relação com a transferência metálica, o E6013 exhibe Curtos-Circuitos, e estes acrescentam com o incremento da profundidade e mais notavelmente em CCEN. Por conseguinte, uma menor estabilidade e maior ocorrência de Curtos-Circuitos resultam em um cordão de solda com menores defeitos superficiais.
- c) Para o WW70, a configuração da corrente em polaridade direta e para os 10 m de profundidade resulta nos cordões com a melhor aparência superficial. Para este consumível, o efeito da pressão hidrostática sobre a poça de fusão é muito forte; o anterior pode ser evidenciado na avaliação dos cordões, onde revela-se a suavização das ondas e uma menor quantidade de defeitos em maiores profundidades. O tipo de transferência metálica predominante neste eletrodo é globular: porém, em CCEN, tem-se presença de alguns Curtos-Circuitos.

Em suma, o melhor desempenho do eletrodo oxi-rutílico para aplicações subaquáticas apresenta-se em polaridade direta, onde também é refletida uma maior estabilidade do processo.

- d) Para a profundidade simulada de 5 m e como relatado na literatura, o processo aponta para uma alta instabilidade sem diferenciação com a polaridade ou com a natureza química do revestimento.
- e) Considera-se que para o estudo em questão, a aplicação do índice de Madatov não é um critério válido na caracterização da estabilidade em soldagem subaquática molhada.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte na pesquisa recebido pelo Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS (UFMG). Também, reconhecem o apoio das instituições envolvidas no projeto (PUC -Rio, ESAB Ind. e PETROBRAS/CENPES). Além disso, se agradece o apoio financeiro da CAPES. Um dos autores (Andrés Moreno), expressa sua gratidão com o senhor Raúl Gohr da IMC SOLDAGEM e o professor Paulo Modenesi.

Referências

- [1] Modenesi PJ. Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. Soldagem I. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais; 2017.
- [2] Dias WC. Efeito da profundidade de soldagem sobre o hidrogênio difusível das soldas molhadas [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais; 2012.
- [3] Reppold R, Paes MTP, Pessoa ECP, Bracarense AQ, Santos VR, Assunção FCR, et al. Perspectivas e desafios para aplicação da soldagem subaquática molhada na petrobras. RIO Welding. 2014;1: 1-15.
- [4] Santos VR, Monteiro M, Rizzo F, Vieira LA. Development of an oxyrutile electrode for wet welding. Welding Journal. 2012;91:319-328.
- [5] Qites AM. Introdução à soldagem a arco voltaico. Florianópolis: Soldasoft; 2002. 352 p.
- [6] Tsai CL, Masubuchi K. Interpretive report on underwater welding. Ohio: WRC; 1977. 37 p. (Welding Research Council Bulletin; 224).
- [7] Gohr RJ. Assistência técnica fonte para soldagem submarina HipEr-1. Palhoça: IMC Soldagem; 2017.
- [8] Scotti A, Ponomarev V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: Artliber Editora; 2008. 284 p.
- [9] Leonello AL Fo. Análise da influência dos parâmetros do processo de soldagem com eletrodos revestidos na estabilidade do arco e características geométricas do cordão [dissertação de mestrado]. Itajubá: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá; 2005.
- [10] Modenesi PJ, Avelar RC. The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability. Journal of Materials Processing Technology. 1999;86(1-3):226-232. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00315-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00315-X).
- [11] Pessoa EC, Ribeiro LF, Bracarense AQ, Dias WC, Andrade LGD, Liu S, et al. Arc stability indexes evaluation on underwater wet welding. New York: ASME; 2010.
- [12] Dutra JC. MIG/MAG – transferência metálica por curto-circuito – fontes de soldagem versus gases do arco. Soldagem e Inspeção. 2008;13(1):19-24.
- [13] Marques P, Modenesi PJ, Bracarense A. Soldagem fundamentos e tecnologia. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2017. 370 p.
- [14] Nixon JH, Graham SRB. Arc instability in shallow water wet welding. New York: ASME; 1993.
- [15] Guerrero FP. Effect of nickel additions on rutile electrodes for underwater welding [dissertação de mestrado]. Golden, Colorado: Metallurgical and Materials Engineering Department, Colorado School of Mines; 2002.
- [16] Bauné E, Bonnet C, Liu S. Assessing metal transfer stability and spatter severity in flux cored arc welding. Science and Technology of Welding and Joining. 2001;6(3):139-148. <http://dx.doi.org/10.1179/136217101101538677>.
- [17] Suban M, Tušek J. Methods for the determination of arc stability. Journal of Materials Processing Technology. 2007;143-144:430-437.
- [18] Mazzaferro JA. Estudo da estabilidade do arco elétrico na soldagem subaquática com eletrodos revestidos [tese de doutorado]. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1998.