

Investigação do Fenômeno das Bolhas em Soldagem Subaquática Molhada com Arame Tubular Autoprottegido

Camilla Mara Mendonça¹, Alexandre Queiroz Bracarense² 

¹ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Laboratório de Robótica, Simulação e Soldagem – LRSS, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Como citar: Mendonça CM, Bracarense AQ. Investigação do fenômeno das bolhas em soldagem subaquática molhada com arame tubular autoprottegido. *Soldagem & Inspeção*. 2019;24:e2416. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.16>

Resumo: O fenômeno de formação de bolhas está fortemente ligado a variação dos sinais elétricos e estabilização do arco de solda na soldagem subaquática molhada com arame tubular (FCAW). O bom entendimento desses fenômenos pode ser usado para uma melhor otimização dos parâmetros de soldagem e conseqüentemente uma melhoria na qualidade final da solda. Com este trabalho observou-se o comportamento dinâmico das bolhas formadas, uma possível relação de mudança de frequência e do tamanho das bolhas geradas com a mudança dos parâmetros de soldagem. Analisou-se ainda a ocorrência dos modos de evolução de bolhas e sua correlação com os valores dos sinais elétricos, e a comparação da formação de bolhas com um diferente tipo de tocha com a qual é possível utilizar bico de contato mantido seco e molhado. A formação de bolhas se mostrou um fenômeno instável e a geometria da bolha está em constante mudança. Assim, por meio do controle dos parâmetros de soldagem percebeu-se que é possível otimizar um tamanho de bolha ideal para melhorar a proteção do arco elétrico e evitar a sua extinção.

Palavras-chave: Soldagem subaquática; Estabilidade do arco; Formação de bolhas.

Investigation of Bubbles Phenomenon in Underwater Wet Welding with Self-Protected Tubular Wire

Abstract: The bubble formation mechanism is strongly associated with variation in electrical signals and arc stability in underwater wet flux cored arc welding (FCAW). Good understanding of bubble formation mechanism can be helpful in achieving welding parameters that produce better weld beads. This work aims to investigate the dynamic behavior of bubbles formed in underwater wet welding, searching for a relation between frequency of formation and size of formed bubbles associated with changes in welding parameters. Verify the bubble evolution modes related to electrical signals and compare bubble formation in two different conditions, welding with the contact tip immersed in water and with the contact tip dry inside a welding torch that isolates it from the water environment were achieved. The bubble formation mechanism was an unstable phenomenon and bubble geometry is constantly changing. Thus, it was possible to conclude that controlling the welding parameters is possible to optimize bubble diameter and, so, improve arc protection avoiding its extinction.

Key-words: Underwater welding; ARC stability; Bubble evolution mechanism.

1. Introdução

Com o aumento da demanda de combustíveis fósseis, as instalações offshore precisam cada vez mais aumentar a produção de petróleo e gás natural. Haverá sempre a necessidade de se fazer reparos em embarcações, oleodutos e até mesmo nas próprias plataformas. O processo de soldagem com eletrodo revestido – SMAW – é o mais empregado em operações de soldagem subaquática molhada devido ao baixo custo dos equipamentos e versatilidade na execução da soldagem. Contudo, o uso de arames tubulares oferece alta produtividade, uma vez que não são necessárias interrupções constantes para substituir o eletrodo. O uso de arames auto protegidos possibilita redução nos custos do processo e no tempo de execução do reparo, pois não é necessário o fornecimento de gás de proteção (Vilarinho et al., 2009). Além disso, a soldagem com arame tubular pode ser totalmente robotizada, aumentando a importância de seu estudo (Teichmann, 2000).

Como a soldagem é realizada no ambiente aquoso, o principal obstáculo encontrado é a presença da água no processo. Quando comparada com outros óxidos e ingredientes presentes no fluxo do arame, a água é termodinamicamente instável e se decompõe facilmente em contato com o arco elétrico produzindo hidrogênio e oxigênio. Esses átomos ou gases em conjunto com os gases provenientes da decomposição do fluxo, formam bolhas que protegem o arco. As bolhas crescem até atingir o volume crítico, depois do qual o equilíbrio de forças é quebrado. Quando a força de empuxo domina, as bolhas movem-se para

Recebido: 22 Fev., 2019. Aceito: 27 Jun., 2019.

E-mails: camillammendonca@yahoo.com.br (CMM), bracarense@ufmg.br (AQB)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença [Creative Commons Attribution Non-Commercial](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais e que o trabalho original seja corretamente citado.

a superfície onde entram em colapso. Depois que a bolha se torna instável uma nova bolha se forma dando continuidade ao ciclo (Perez-Guerrero, 2002).

O deslocamento das bolhas carrega consigo muito calor da superfície do metal causando o efeito de rápido resfriamento durante o processo. Segundo Pope et al. (1995), são dois regimes de resfriamentos: um lento em elevadas temperaturas, durante a proteção pela bolha gasosa e o rápido resfriamento em baixas temperaturas, após destacamento da bolha. O tempo que ocorre o resfriamento lento é muito curto, uma vez que a bolha acompanha o arco elétrico que se move na velocidade de soldagem, expondo o metal semi-resfriado à água (Rowe, 2002 apud Pessoa, 2007). A dinâmica das bolhas e a exposição do metal de solda à água são responsáveis pelas altas taxas de resfriamento observadas na soldagem molhada (Tsai e Masubuchi, 1977).

Por se formar neste ambiente, a estabilidade do arco e do processo de transferência passam a ser diretamente influenciadas pela dinâmica de formação e destacamento destas bolhas. Se durante a soldagem as bolhas se mantiverem envolvendo o arco, o processo de transferência tende a se manter estável. Entretanto, se ocorrer o desprendimento das bolhas, o arco extingue e cria uma situação de instabilidade no processo de transferência (Teichmann, 2000). Vários critérios para caracterização da estabilidade do arco em corrente constante têm sido propostos. Esses critérios estabelecem índices de aferição da estabilidade baseados na avaliação dos valores instantâneos dos parâmetros de soldagem, (Mazzaferro, 1998 apud Pessoa, 2007). Dentre esses métodos, um dos mais utilizados é o coeficiente de variação da corrente de soldagem (C.v.) ou da tensão do arco. O coeficiente de variação é calculado pela relação entre o desvio padrão e o valor médio da grandeza, conforme Equação 1 e a dispersão é medida em termos relativos (Scotti e Ponomarev, 2008).

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\% \quad (1)$$

onde: Cv = Coeficiente de Variação; σ = Desvio padrão; \bar{X} = Média da grandeza.

Segundo Feng et al. (2017) os fenômenos de formação de bolhas na soldagem subaquática molhada com arame tubular são divididos em quatro modos de evolução das bolhas. O primeiro modo consiste na geração de bolhas com diâmetros menores, que colapsam na região do arco, deixando-o completamente exposto no ambiente da água, ocasionando a sua extinção. No segundo modo o colapso das bolhas não ocorre na área de soldagem, contribuindo para a formação de bolhas com comportamentos mais estáveis, a bolha cresce na poça de fusão sem destacar e parte dos seus gases são transferidos para a nova bolha que começou a se formar. Entretanto o volume da nova bolha não é grande o suficiente para cobrir completamente a área de queima de arco e uma bolha maior poderia ser mais eficaz para a estabilidade do arco elétrico.

No terceiro modo, a frequência de formação da bolha diminui, o que permite que os gases dentro da bolha tenham mais tempo para produzir, levando a um aumento maior no tamanho da bolha. Assim como no segundo modo a bolha cresce gradualmente e permanece na região do arco por um período de tempo, uma nova bolha surge e gera uma enorme área efetiva em contato com a bolha anterior, com isso as duas bolhas juntas cobrem a área de queima de arco, conseqüentemente um melhor efeito protetor pode ser realizado sob ação combinada das duas bolhas. O quarto modo é observado quando se tem um aumento na tensão do arco, onde são formadas bolhas de grandes dimensões, devido ao grande efeito de choque dessas bolhas e ao destacamento periódico das bolhas, a rigidez do arco induzida pela maior tensão do arco é difícil para resistir a este efeito adverso e um fenômeno de extinção de arco surge ocasionalmente durante este modo de evolução. O tamanho da bolha se torna tão grande que impede que uma nova bolha surge antes do destacamento da bolha anterior, retirando assim a camada de gás protetora do arco.

O objetivo deste trabalho é observar o comportamento dinâmico das bolhas formadas, o modo predominante de evolução das bolhas, uma possível relação de mudança no tamanho e frequência de formação das bolhas geradas com a mudança de parâmetros de soldagem e com a mudança do uso do bico de contato seco e molhado utilizando uma tocha especialmente desenvolvida que permite esta mudança. O uso dos arames tubulares possui um grande potencial para a aplicação na soldagem subaquática molhada e o fenômeno das bolhas no processo de soldagem subaquática está intimamente relacionado a estabilidade do arco elétrico. Desta forma, o bom entendimento deste fenômeno pode propiciar soldas de melhor qualidade.

2. Metodologia

2.1. Materiais

Para realização das soldas foram utilizadas chapas de aço SAE 1020 com dimensões de 200 × 90 mm × 19 mm. O consumível utilizado foi eletrodo tubular auto protegido AWS SFA 5.20 E71T-11 com 1,6 mm de diâmetro, um eletrodo comercial da empresa ESAB-TUBROD 7110A. Todas as soldagens foram realizadas em um aquário com água doce na profundidade de 0,30 m de coluna d'água e em temperatura ambiente. A montagem dos equipamentos está representada na Figura 1.

A tocha de soldagem utilizada foi desenvolvida no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS- UFMG (Pedido de Patente: BR 10 2017 023415 0). Essa tocha possui um sistema de vedação na saída do arame tubular que impede a entrada de água na região do bico de contato. Desta forma possibilita que o processo de soldagem seja realizado na maneira

convencional, mantendo o bico de contato na água quando os componentes do sistema de vedação são retirados (Assunção e Bracarense, 2017). A tocha utilizada pode ser vista na Figura 2.



Figura 1. Configuração experimental.

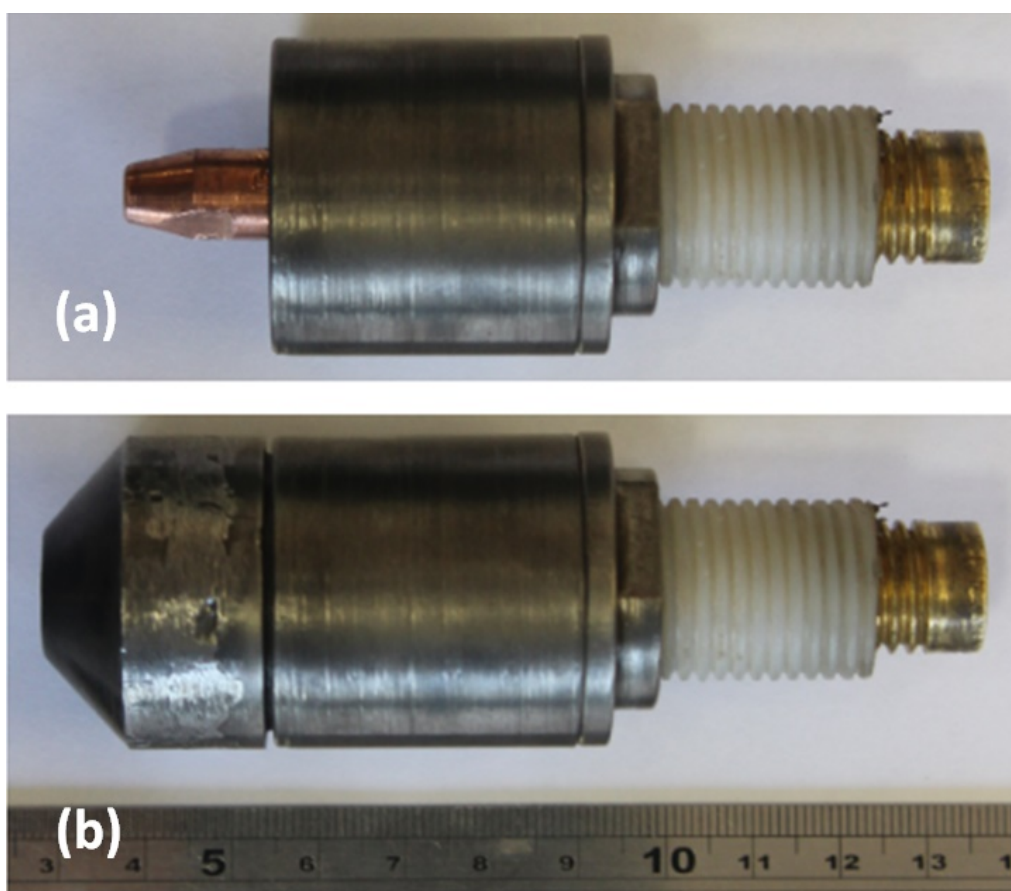


Figura 2. Tocha de Soldagem para FCAW subaquática que permite utilizar o bico de contato mantido seco e molhado. (a) Sem sistema de vedação; (b) Com o sistema de vedação.

Utilizou-se ainda uma câmera de alta velocidade no modelo PHANTOM MIRO 110, com resolução de 1280×800 , $1,6 \text{ Gpx/s}$, $2 \mu\text{s}$ captura mínima e com velocidade de gravação de 1.600 quadros por segundo. A fonte de soldagem utilizada foi um retificador de tensão constante, modelo Bambozzi TRR 3100 S. Para a aquisição dos sinais de tensão, corrente e velocidade do arame, fez-se o uso do sistema SAP Ti V4.

2.2. Procedimento

A câmera foi posicionada próxima ao aquário conforme apresentado na Figura 1, de modo a obter o melhor foco, e os parâmetros utilizados foram: resolução de 1024×768 pixels, taxa de amostragem de 1000 quadros por segundo. Com esses parâmetros, foi possível gravar 5 segundos de filmagem. As imagens obtidas foram analisadas pelo software Phantom CV 2.8. A velocidade de soldagem foi de 450 mm/min .

Foram realizadas 16 soldas para a análise das imagens e sinais elétricos. Para cada solda foi estabelecido um parâmetro inicial distinto, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Valores iniciais para os parâmetros variáveis de soldagem.

	Número da Amostra	Distância bico de contato à peça (DBCP) [mm]	Tensão [V]	Vel. Arame [m/min]
Bico Molhado	1	15	26	4,0
	2	15	26	5,0
	3	15	30	4,0
	4	15	30	5,0
	5	20	26	4,0
	6	20	26	5,0
	7	20	30	4,0
	8	20	30	5,0
Bico Seco	9	15	26	4,0
	10	15	26	5,0
	11	15	30	4,0
	12	15	30	5,0
	13	20	26	4,0
	14	20	26	5,0
	15	20	30	4,0
	16	20	30	5,0

Para cada soldagem, o corpo de prova foi fixado ao carrinho e a tocha a um suporte. O polo positivo da fonte foi acoplado na chapa e o negativo ao alimentador de arame (polaridade direta). Conforme Assunção (2018), a polaridade negativa foi usada em conformidade com os parâmetros indicados para este consumível e por produzir cordões de melhor aparência e com arco elétrico mais estável nos testes preliminares de parametrização.

A medição da corrente elétrica foi realizada com um sensor Hall posicionado na saída do terminal positivo da fonte de soldagem. A velocidade de alimentação do arame foi medida com o sensor posicionado entre a bobina e o motor do alimentador. Por fim, para medição da tensão, os terminais do sensor foram conectados à tocha e à chapa de soldagem.

Com a finalidade de sincronizar o início da aquisição dos sinais elétricos e da gravação da solda, o comando para iniciar ambos processos foi feito pela mesma pessoa, de forma manual e simultânea.

3. Resultados e Discussões

3.1. Análise dos sinais elétricos

Os valores médios dos sinais corrente com seus respectivos desvios padrões podem ser visualizados na Tabela 2.

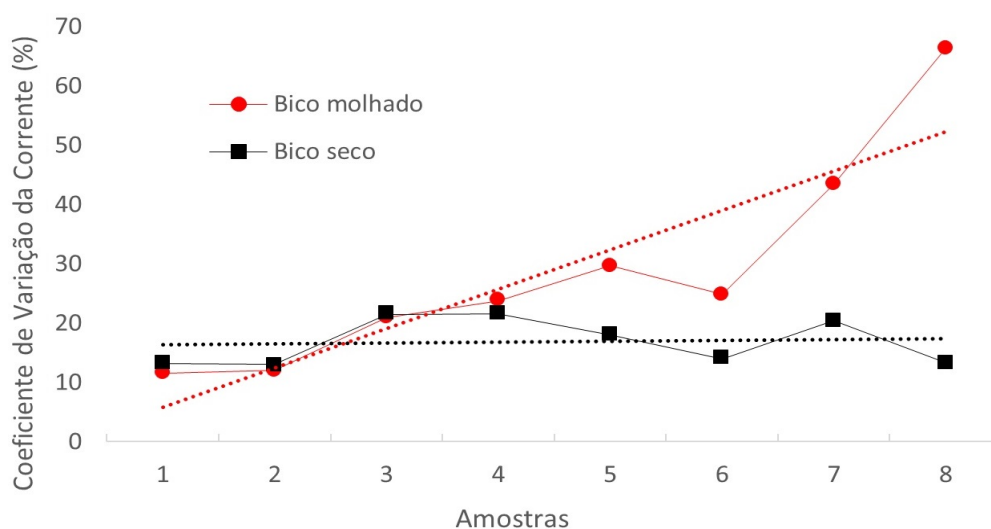
Tabela 2. Valores médios para corrente, desvio padrão e coeficiente de variação.

	Amostra	Corrente [A]	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação da corrente [%]
Bico Molhado	1	317,5	36,7	11,6
	2	346,2	41,6	12,0
	3	311,4	65,2	20,9
	4	324,9	77,3	23,8
	5	291,8	86,7	29,7
	6	324,6	80,6	24,8
	7	277,5	120,4	43,4
	8	257,0	170,5	66,4
Bico Seco	9	286,5	37,8	13,2
	10	301,1	39,2	13,0
	11	277,1	59,4	21,4
	12	313,6	67,8	21,6
	13	255,9	46,0	18,0
	14	291,4	40,9	14,0
	15	259,7	53,0	20,4
	16	314,0	41,7	13,3

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, nota-se que os valores de corrente para as amostras com bico de contato molhado são 6% maiores do que as amostras com bico mantido seco.

De acordo com Assunção e Bracarense (2017), esse fato é associado às mudanças de temperatura no arame. Quando não existe nenhuma barreira mecânica entre a água e o bico de contato, toda a superfície externa do bico de contato e do comprimento do arame energizado são refrigerados pela água, sendo necessária maior corrente de soldagem para elevar a temperatura do arame, devido ao Efeito Joule.

Por meio dos valores de desvio padrão da corrente é notório que houve pouca dispersão em relação à média, com valores de desvio menores para o bico de contato seco, se comparado as mesmas condições. Isso pode indicar uma maior estabilidade do arco elétrico quando mantido o bico de contato seco. Na Figura 3 é possível verificar os valores do Coeficiente de Variação da Corrente de acordo com os itens listados na Tabela 2. Observa-se que nas soldas realizadas com o bico de contato seco, o arco elétrico apresenta maior estabilidade, mesmo quando os níveis dos parâmetros de soldagem (tensão, distância do bico de contato à peça e velocidade do arame) aumentam o que vai de acordo com Assunção e Bracarense (2017).

**Figura 3.** Coeficiente de variação elétrica da soldagem.

Na Figura 4 é possível ainda analisar as variações dos sinais elétricos em oscilogramas, comparando as amostras 7 e 15, as quais possuem mesmas condições de tensão, distância do bico de contato à peça (DBCP) e velocidade do arame, distinguindo-se apenas pela vedação da tocha utilizada na solda 15. De maneira semelhante, são vistas as amostras 8 e 16, que diferem entre si apenas pela vedação utilizada na tocha na amostra 16.

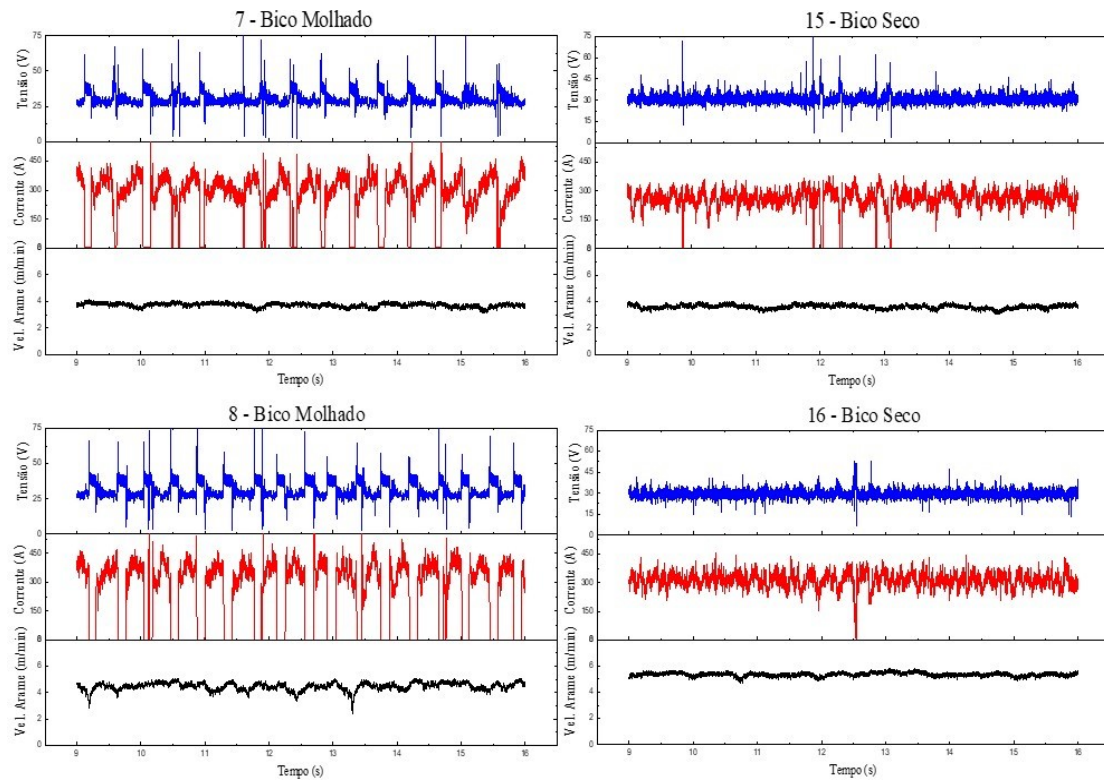


Figura 4. Oscilogramas das amostras 7, 8, 15 e 16.

Observa-se que nos ensaios com o bico de contato molhado a extinção do arco ocorre com uma frequência maior se comparada ao bico seco. A medida que aumentam-se os valores dos parâmetros de soldagem (tensão, DBCP e velocidade do arame), observa-se maior flutuação dos sinais de tensão e corrente e um maior período de extinção do arco elétrico, caracterizado por corrente nula e tensão em vazio da fonte, 42 V.

A grande variação dos sinais de tensão e corrente podem ser relacionados à formação e destacamento das bolhas. As bolhas protegem o arco elétrico durante seu crescimento, mantendo sua estabilidade, no entanto, ao desprenderem-se, permitem que o arco fique suscetível à ação da água circundante provocando a sua extinção.

Observa-se que nos ensaios com o bico de contato seco, os oscilogramas são uniformes para os sinais de tensão e corrente de soldagem, com um padrão regular e pouca variação em torno de um valor médio. Mesmo com o aumento dos valores dos parâmetros de soldagem, não observa-se maior variação nos sinais, indicativo de que a água atrapalha a transferência de corrente entre o bico de contato e o arame.

3.2. Análise das filmagens

As bolhas formadas na soldagem subaquática molhada apresentam variações de tamanhos, formas e frequências de destacamento. Na Figura 5 é possível ver um exemplo de uma bolha típica formada durante o processo de soldagem.

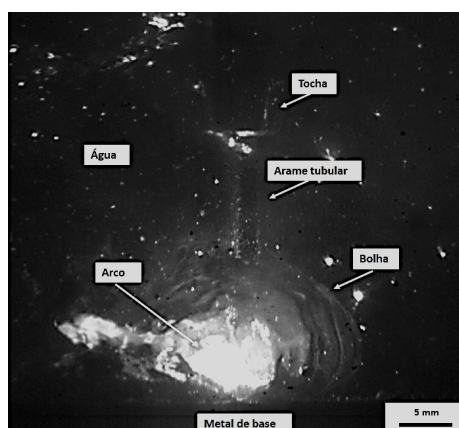


Figura 5. Arco elétrico e bolha formados durante o processo de soldagem.

Com a abertura do arco elétrico, a formação das bolhas ocorre devido a vaporização da água e dos gases de decomposição do arame. As bolhas originam-se na superfície da poça de fusão e protegem o arco do contato com a água e a própria poça.

A medida que os gases são desprendidos, pela queima do fluxo do arame autoprotégido, as bolhas crescem. De acordo com Wang et al. (2018), a força de retenção na bolha é maior do que a força de destacamento e o volume da bolha é drasticamente aumentado, enquanto ela está retida na superfície da poça de fusão.

De acordo com Tsai e Masubuchi (1977), a bolha cresce continuamente até que seu raio torne-se tangente ao vazio inicial que lhe gerou. Nesse momento, ocorre o colapso da bolha e ela se destaca, ao mesmo tempo em que outra bolha já foi originada e começa a crescer. O fenômeno das bolhas pode ser visto na sequência de quadro em diferentes tempos na Figura 6.

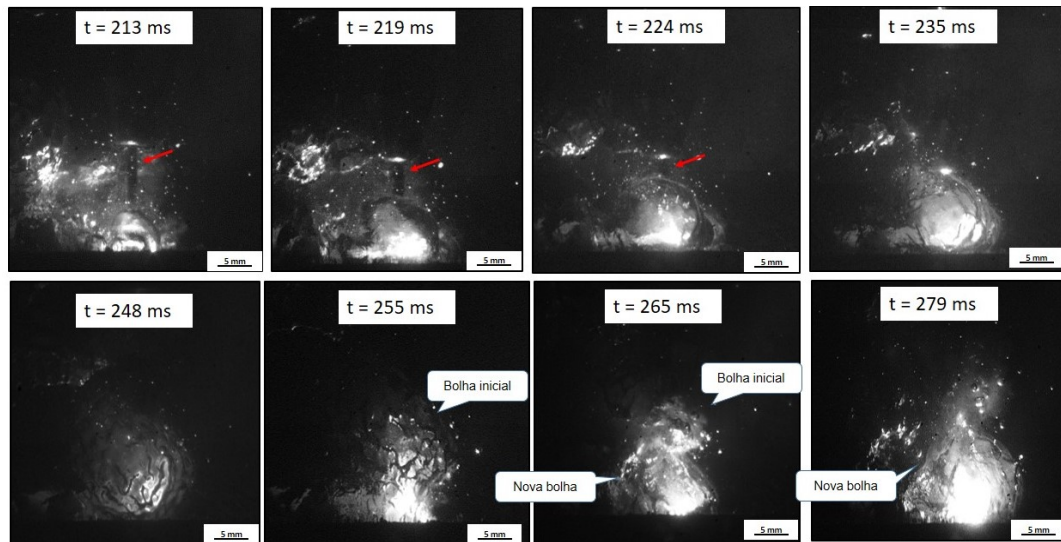


Figura 6. Comportamento dinâmico das bolhas. A seta destaca o arame autoprotégido.

Por meio da análise das filmagens, o fenômeno das bolhas pode ser descrito da seguinte maneira: Com a abertura do arco elétrico, inicia-se a formação da bolha. A bolha cresce continuamente com a formação dos gases, até o momento de seu desprendimento (Figura 6 em t=248 ms), quando inicia a redução da intensidade luminosa do arco elétrico e logo em seguida ocorre o desprendimento da bolha (Figura 6, em t=260ms). Como a soldagem foi realizada na posição plana a bolha então se desloca no sentido ascendente. Simultaneamente ao início do desprendimento da bolha inicial, outra bolha começa a se formar, crescer (Figura 6, em t = 265 ms) e o processo se reinicia com o aumento da luminosidade do arco.

Foram analisados 5 segundos de soldagem, em um total de 1000 quadros por segundo. A contagem de bolhas foi feita por segundo para cada amostra e pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3. Número de bolhas destacadas.

	Amostra	0-1 s	1-2 s	2-3 s	3-4 s	4-5 s	Média	Desvio Padrão
Bico Molhado	1	13	13	13	14	12	13	0,70
	2	12	11	11	11	11	11	0,54
	3	11	10	12	12	10	11	1,15
	4	10	11	10	12	11	11	0,79
	5	15	14	14	14	15	14	0,76
	6	14	12	14	15	14	14	1,27
	7	12	13	12	10	13	12	1,24
	8	11	9	9	13	11	10	1,44
Bico Seco	9	12	12	13	15	14	13	1,06
	10	10	12	12	11	12	11	0,89
	11	12	11	10	10	11	11	0,84
	12	11	11	12	12	13	12	0,97
	13	14	14	10	10	11	12	2,05
	14	11	10	11	12	10	11	0,65
	15	11	10	11	10	11	11	0,50
	16	12	12	11	12	12	12	0,45

Não foram observadas grandes variações na quantidade de bolhas das amostras de bico seco para bico molhado, sendo a média global de 12 bolhas para a primeira condição e de 11 para a segunda. A redução do número de bolhas com o bico de contato seco pode ser explicada como a formação de uma barreira mecânica devido ao dispositivo de vedação, retendo a bolha por mais tempo. Quando mantida a condição da tocha constante, seja bico seco ou molhado, e promovendo a variação dos parâmetros de soldagem, não foi perceptível um padrão de destacamento. Ainda que as bolhas formadas com o bico molhado tenham sido menores e pudesse esperar que a quantidade formada e destacada fosse maior, houve uma instabilidade muito maior do arco elétrico para essa condição. Dessa forma, a extinção do arco interrompia o fenômeno de formação, crescimento e destacamento das bolhas.

Utilizando os software Image J para fazer as medições qualitativas dos diâmetros máximos das bolhas formadas, foi possível verificar que as bolhas formadas com o sistema de vedação foram maiores, com uma média de 31,86 mm contra a média de 22,83 mm, para o sistema sem vedação. Esse fato também pode ser explicado pelo uso da vedação, o arame sofre uma certa restrição, e conseqüentemente a bolha também é contida por um tempo maior, permitindo que ela absorva mais gases e conseqüentemente, cresça mais antes de colapsar. A relação do diâmetro médio das bolhas para as amostras são vistas na Figura 7.

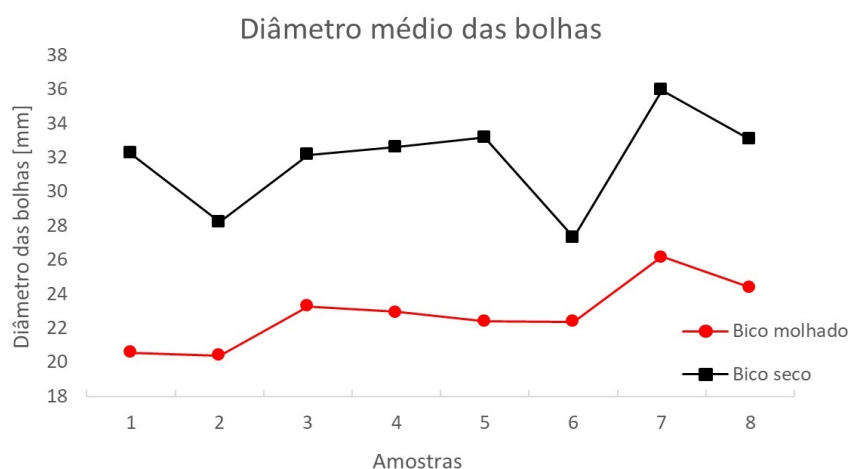


Figura 7. Relação dos diâmetros médios das bolhas para as amostras de bico seco e molhado.

3.3. Influência dos parâmetros de soldagem

A compreensão do mecanismo de destacamento das bolhas e sua relação com os parâmetros é muito importante para o desenvolvimento tecnológico da soldagem subaquática. Para isso, os ensaios foram realizados variando parâmetros fundamentais para o processo, que são eles: tensão de soldagem, velocidade do arame (corrente) e distância do bico de contato à peça.

3.3.1. Tensão de soldagem

Mantendo-se os parâmetros velocidade do arame, DBCP e condição do bico constantes, e variando apenas a tensão entre 26 V e 30 V, foi possível verificar que a tendência é de que as bolhas formadas sejam maiores para a maior tensão. Segundo Guo et al. (2015), o comprimento do arco aumenta com o aumento da tensão para o processo de soldagem subaquática molhada. Esse aumento do arco implica em uma maior área efetiva de ação do arco, e a água ao redor facilmente evapora e ioniza gerando hidrogênio e oxigênio, com a temperatura local. Dessa forma, a geração de mais gases contribui para formação de bolhas maiores.

Na Figura 8 verifica-se essa relação. Consideraram-se que são 8 condições possíveis, comparando-se sempre amostras com os parâmetros vedação (bico seco ou molhado), DBCP e velocidade do arame constantes. Por exemplo, a condição A trata-se de bico molhado, com 15mm de DBCP, 4 m/min de velocidade do arame, variando-se a tensão entre 26 e 30 V, dessa forma, são comparadas as amostras 1 e 3. As demais condições foram feitas da mesma maneira para realizar a comparação desejada.

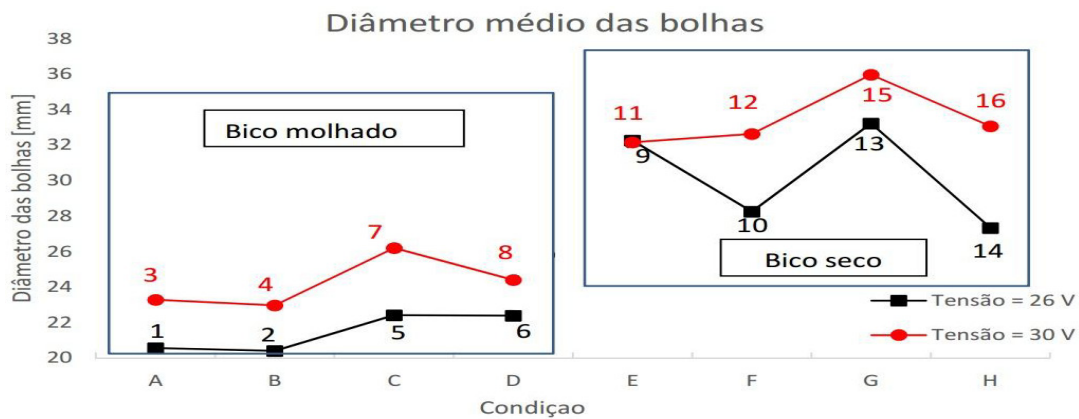


Figura 8. Relação dos diâmetros médios das bolhas considerando variação na tensão de 26V para 30V.

3.3.2. Distância entre Bico de Contato e a Peça (DBCP)

Adotando-se o mesmo procedimento de variar apenas o parâmetro que deseja-se analisar e manter fixos os demais, foi possível verificar a influência da DBCP na formação das bolhas. Observou-se que para a DBCP de 20 mm, a tendência foi de um aumento no tamanho médio das bolhas, em relação à distância de 15 mm, conforme visto na Figura 9. Com uma distância maior entre o bico de contato e a peça, a extensão livre do arame é maior, conseqüentemente, há maior desprendimento de calor por efeito Joule. Mais uma vez o aumento da quantidade de calor pode levar a maior ionização da água, formação de gases, e conseqüentemente, o maior tamanho das bolhas, semelhante ao ocorrido com aumento da tensão.

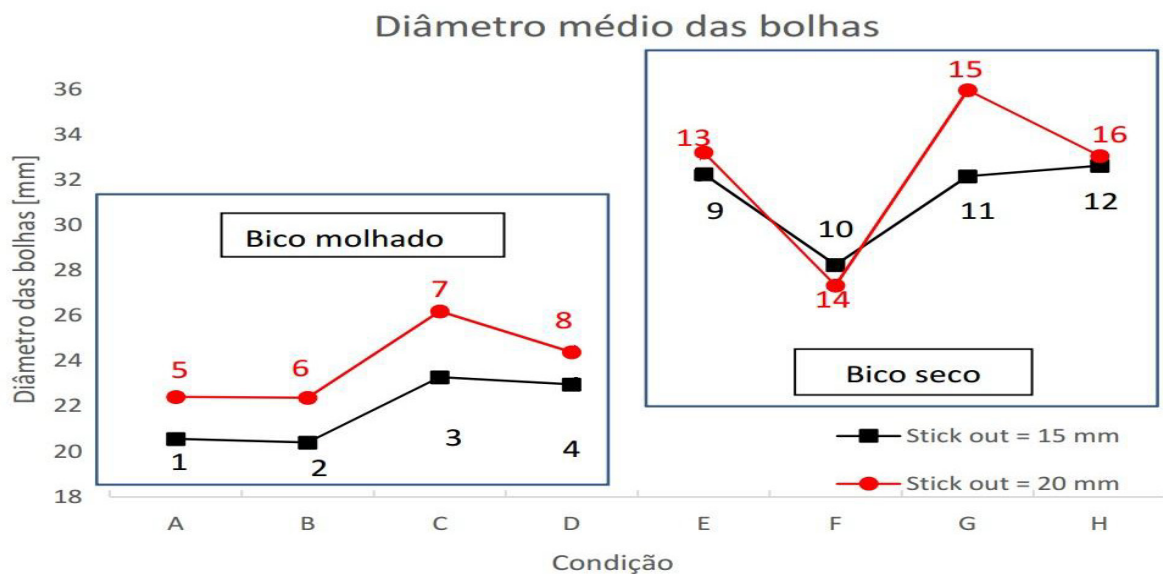


Figura 9. Relação dos diâmetros médios das bolhas considerando variação na DBCP.

3.3.3. Velocidade do arame

Sabe-se que a corrente de soldagem é proporcional a velocidade do arame, para um determinado diâmetro, composição e extensão do eletrodo, conforme Marques et al. (2015). De uma forma geral, verifica-se que o aumento da corrente elétrica leva a uma redução do tamanho das bolhas e aumento da frequência de destacamento. Logo, a velocidade do arame influencia o tamanho das bolhas. Verificou-se que para a velocidade do arame de 4 m/min, a corrente elétrica foi em média 284,7 A, e para a velocidade de 5 m/min, encontrou-se o valor médio de 309,1 A. Conforme visto na Figura 10, o aumento da velocidade do arame implica em uma redução no tamanho médio das bolhas.

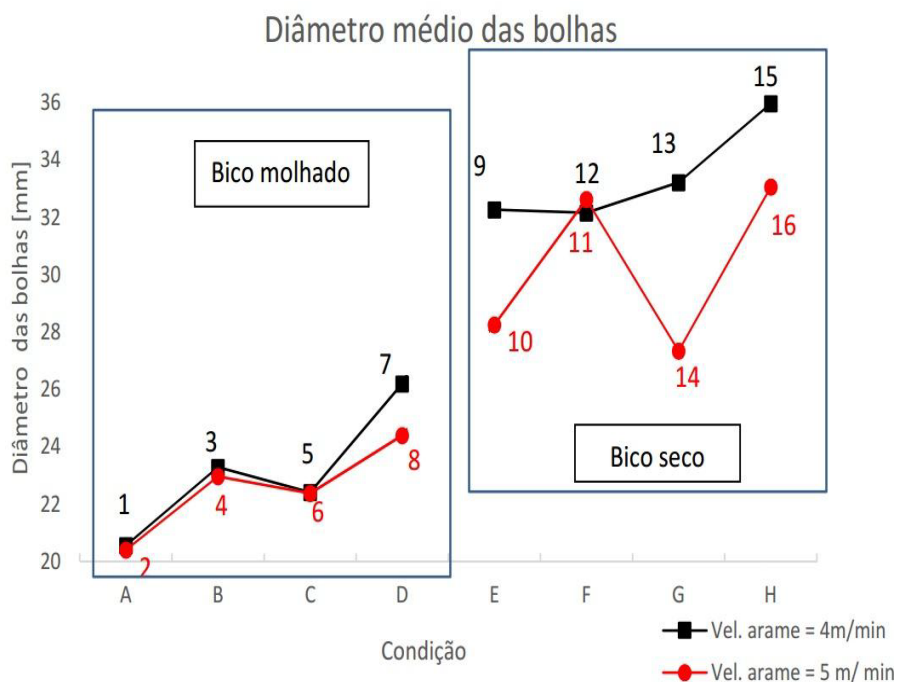


Figura 10. Relação dos diâmetros médios das bolhas considerando variação no na velocidade de alimentação do arame.

3.4. Modo de evolução das bolhas

No presente trabalho não foi observado a ocorrência do primeiro e do segundo modo de evolução de bolha com os parâmetros utilizados, pois os valores de velocidade de arame e os de tensão do arco são suficientemente grandes para evitar a ocorrência dos dois primeiros modos conforme proposto por Feng et al. (2017). Entretanto observaram-se o terceiro e quarto modo de evolução de bolhas.

3.4.1. Terceiro modo

Por meio das filmagens realizadas, foi possível perceber o terceiro modo de evolução de bolhas como predominante nas amostras 1,2,3 e 4 (bico de contato molhado) e para todas as amostras com bico de contato seco. Apesar da ocorrência de alguns eventos de extinção do arco nas amostras 3 e 4, foi possível perceber pelos oscilogramas que os sinais de corrente mostraram-se com poucas oscilações em torno do valor médio, resultando em uma boa estabilidade, indicativos desse modo de evolução.

As amostras 1 e 2 não apresentaram extinção do arco e seu coeficiente de variação de corrente foi de 12%, valor próximo à média de 10% encontrada por Feng et al. (2017) para o 3º modo de evolução de bolhas em soldagem subaquática com arame tubular. Já as amostras 3 e 4, devido às extinções ocorridas no arco, tiveram uma média de 22% de variação de corrente. Fato este que pode ser atribuído às variações na velocidade de alimentação do arame para ambas amostras, ocasionada, dentre outras causas por um possível travamento na movimentação do arame no alimentador ou no bico, por exemplo.

Por outro lado, ao utilizar-se a tocha com vedação, foi possível perceber o terceiro modo de evolução para todas as amostras, com maior estabilidade dos sinais elétricos e uma média de 17% de variação da corrente. Na Figura 11 é possível ver a sequência de quadros de uma amostra com bico de contato seco e o modo de evolução característico.

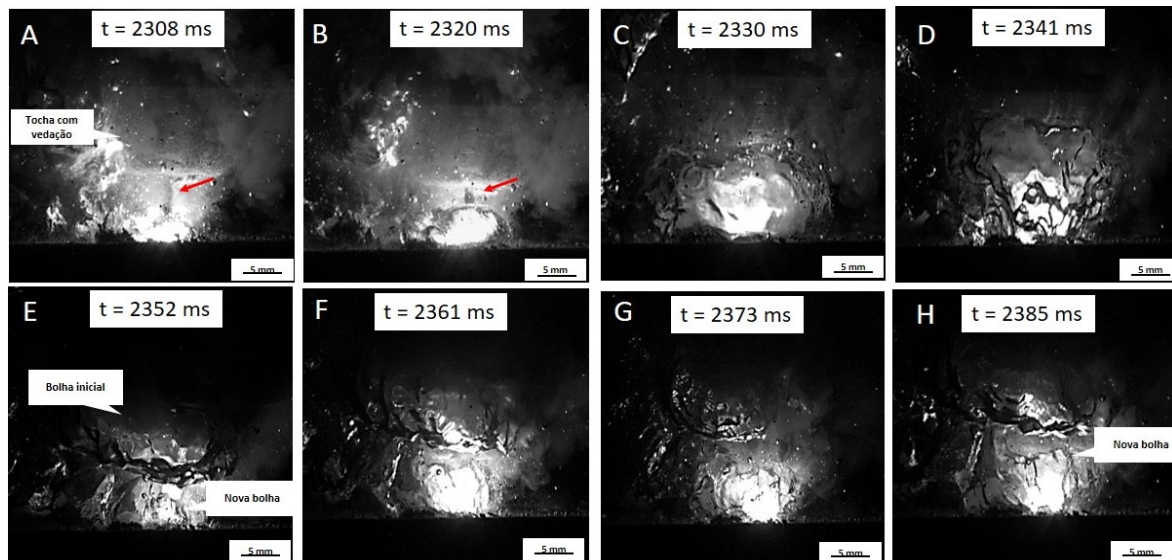


Figura 11. Modo de evolução das bolhas para amostras ensaiadas com a tocha utilizando vedação. Em destaque, o arame autoprotetido.

Percebe-se que o arco elétrico está sempre protegido pela atmosfera gasosa. A bolha origina-se na poça de fusão, como visto no instante 2308 ms (A), e cresce à medida que os gases são desprendidos. Quando ela atinge seu diâmetro máximo, em 2341ms (D), ela destaca-se. Em 2352ms (E), é vista uma nova bolha surgindo e juntas as duas bolhas cobrem a área de queima do arco, contribuindo para o efeito protetor e a estabilidade dos sinais elétricos.

Na Figura 12 são representadas as curvas que relacionam tensão e corrente de soldagem em função do tempo para os quadros observados na Figura 11.

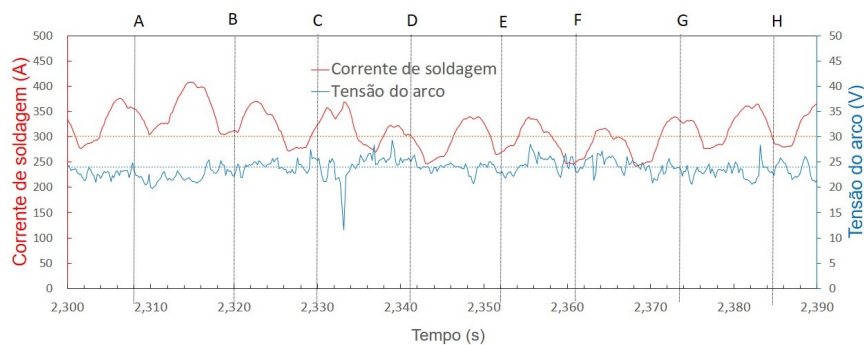


Figura 12. Valores de tensão e corrente em função do tempo para o terceiro modo de evolução das bolhas.

Observa-se que os valores de tensão do arco e corrente de soldagem oscilam em torno do seu valor médio, há uma flutuação uniforme dos sinais, evidenciando uma boa estabilidade do arco elétrico. Não há ocorrência de extinção do arco, pois as bolhas geradas sempre estão criando uma atmosfera protetora, caracterizando o terceiro modo de evolução.

3.4.2. Quarto modo

Observou-se o quarto modo de evolução de bolhas presente nas amostras 5, 6, 7 e 8. Nas duas primeiras, houve uma transição do modo de evolução entre o terceiro e o quarto, evidenciado pelas filmagens e pelo coeficiente de variação da corrente, 27%, tendo em vista o valor médio de 33% encontrado por Feng et al. (2017). Já as amostras 7 e 8 apresentaram predominantemente o quarto modo de evolução, cujo valor de variação da corrente foi o mais elevado dentre as amostras analisadas, 55%, evidenciando a maior instabilidade do arco quando os parâmetros são os mais extremos: tensão 30 V e DBCP 20 mm. O quarto modo de evolução pode ser visualizado na Figura 13.

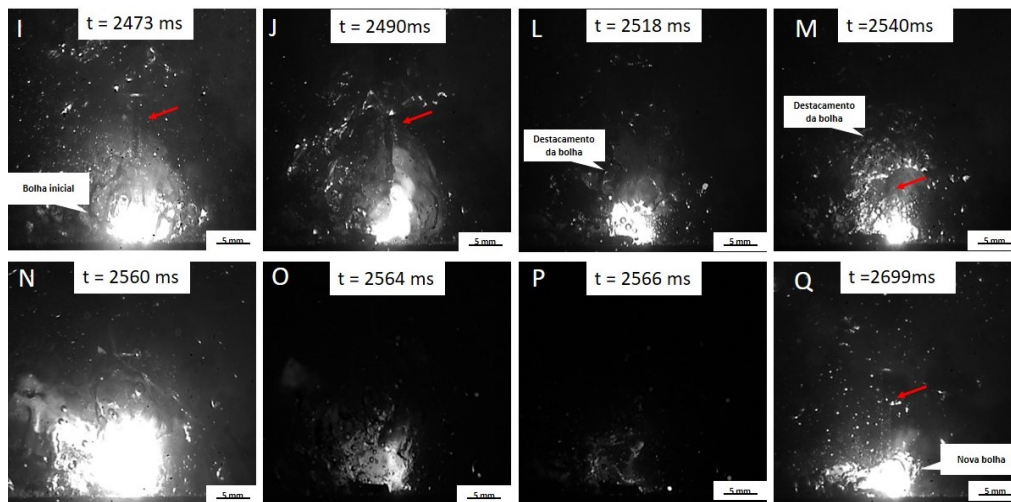


Figura 13. Sequência de imagens para o quarto modo de evolução das bolhas c. Em destaque, o arame autoprotégido.

Do instante 2473ms (I) à 2490ms (J) ocorre o crescimento da bolha até atingir o diâmetro máximo. De 2518ms (L) a 2540ms (M) ocorre o destacamento da bolha, a qual, devido ao grande tamanho e elevada pressão dos gases, se torna tão densa que impede o surgimento de uma nova bolha. Dessa forma, não há uma atmosfera gasosa protetora do arco elétrico e sua extinção ocorre. Em 2560ms (N) o arco elétrico aumenta, evidenciado pelo pico de tensão no oscilograma e ele logo é extinto, como visto nos instantes 2564ms (O) e 2566ms (P). Com a continuidade do movimento do arame em direção à peça, ao reestabelecer o contato, o arco elétrico é reaberto e uma nova bolha começa a se formar, como pode ser visto no instante de 2699ms (Q).

Com o aumento dos valores de tensão e DBCP, como visto anteriormente, ocorre crescimento do tamanho das bolhas e aumento da pressão dos gases, e como elas se tornam muito grandes e densas, impedem o crescimento da bolhas seguinte e ao destacar, levam consigo toda proteção do arco elétrico, provocando sua extinção. Dessa forma, é possível verificar pelo oscilograma representado na Figura 14 que os sinais de corrente e tensão oscilam com grande frequência, indicando instabilidade do arco, evidência desse modo de evolução.

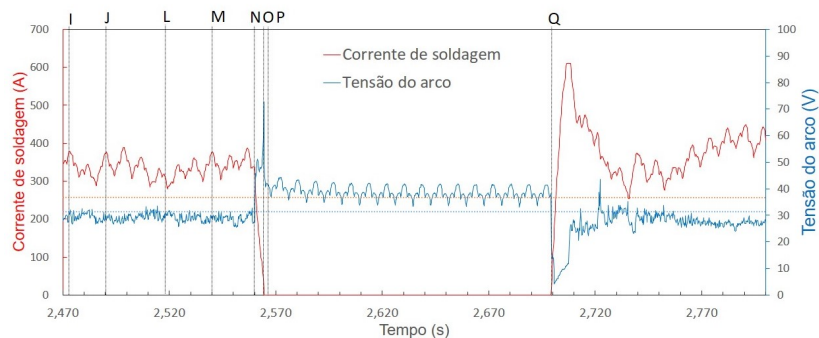


Figura 14. Valores de tensão e corrente em função do tempo para o quarto modo de evolução das bolhas.

Pela análise dos sinais, percebe-se que em $t = 2564\text{ms}$ (O) a corrente de soldagem é nula e a tensão atinge o pico com 49,5V, nesse momento ocorre a extinção do arco, pois a bolha destacou-se e levou consigo a proteção gasosa. Após o intervalo de 135ms, ocorre a reabertura do arco e crescimento de uma nova bolha, a corrente aumenta atingindo um valor máximo de 610A e a tensão reduz, voltando ao seu valor médio de 30V.

3.5. Cordões de solda

Os cordões de solda produzidos são apresentados na Figura 15. As imagens foram obtidas de acordo com a sequência dos parâmetros indicados na Tabela 1. Os itens de 1 a 8 correspondem à condição do bico de contato molhado e de 9 a 16 são as soldas realizadas com a tocha especial com material vedante, portanto, com bico de contato seco.

Observa-se neste trabalho, melhor aparência visual dos cordões de solda realizados com contato seco, assim como encontrado por Assunção e Bracarense, 2018. A medida que os parâmetros são aumentados, observa-se em especial nas soldas realizadas com contato na água uma maior irregularidade dos contornos, indicativo de uma menos estabilidade do arco e dos

sinais elétricos. Esse fato, conforme Assunção e Bracarense, 2017, ocorre devido à presença de água na região do contato elétrico, piorando a transferência de corrente, e, conseqüentemente promovendo cordões mais irregulares.

É possível verificar ainda que a medida que os parâmetros aumentam, a porosidade dos cordões é reduzida.

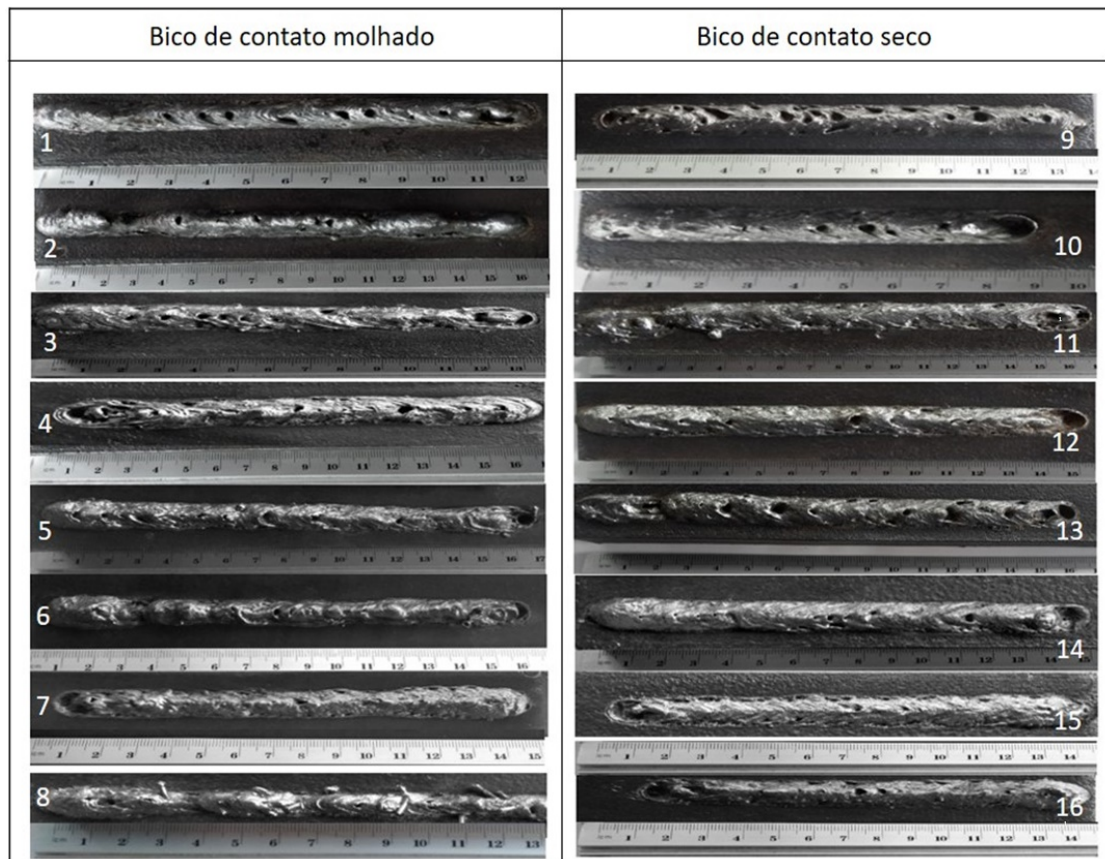


Figura 15. Cordões de solda realizados.

4. Conclusões

A partir dos experimentos realizados, nas condições as quais foram realizados, pôde-se concluir que:

- 1) A estabilidade do arco elétrico está relacionada ao fenômeno de formação de bolhas. A bolha cria uma atmosfera protetora impedindo que o arco entre em contato direto com a água. Quando essa atmosfera protetora deixa de existir, ou seja, a bolha não mais está cobrindo a região do arco, ocorre a extinção do mesmo. Quando se aumenta a tensão e a distância bico de contato peça, o diâmetro máximo da bolha aumenta e a frequência de formação diminui. Quando se aumenta a corrente de soldagem, ocorre o efeito oposto, o diâmetro máximo diminui e a frequência aumenta;
- 2) A estabilidade do arco elétrico se mostrou melhor para a condição de bico de contato seco quando comparado a condição de bico de contato molhado. Com o aumento nos parâmetros de soldagem a condição de bico contato seco se mostrou menos sensível para a instabilidade do arco. A condição de bico de contato seco apresentou uma frequência de formação de bolhas inferior quando comparado à condição de bico de contato molhado;
- 3) Foi possível identificar a ocorrência do terceiro e do quarto modo de evolução de bolhas nas condições de bico de contato seco e molhado. Em relação a estabilidade do arco para a condição de bico de contato molhado, as amostras de menor distância do bico de contato à peça se mostraram mais estáveis, apresentando apenas o terceiro modo de evolução de bolha. Com o aumento no valor da tensão, a estabilidade do arco reduz, dando início a formação do quarto modo de evolução de bolha e desta forma a ocorrência de extinção do arco, conforme amostras de maior distância entre bico e peça. Em relação à condição de bico seco, foi possível observar que as todas as amostras apresentaram maior estabilidade do arco, com o terceiro modo de evolução de bolhas, evidenciando a eficiência da tocha utilizada em realizar a vedação do bico de contato;
- 4) Os cordões de solda realizados com bico de contato seco apresentaram-se mais regulares e com melhor aparência, se comparados com aqueles realizados com contato molhado;

- 5) Finalmente, este trabalho evidencia que o bom entendimento da dinâmica de formação de bolhas no processo de soldagem subaquática molhada com arame tubular é de fundamental importância para haver melhorias na estabilidade do arco elétrico. Ajustando os parâmetros de soldagem é possível otimizar um tamanho máximo de diâmetro de bolha e de frequência de formação de modo a obter arcos elétricos mais estáveis durante o processo de soldagem.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao LRSS (Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação) da UFMG, pelo apoio e investimento à pesquisa.

Referências

- Assunção MT, Bracarense AQ. Evaluation of the effect of the water in the contact tip on arc stability and weld bead geometry in underwater wet FCAW. *Soldagem e Inspeção*. 2017;22(4):401-412. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2204.11>.
- Assunção MT. Estudo sobre o efeito da água no bico de contato no processo de soldagem subaquática molhada com arame tubular do tipo autoprotégido [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2018.
- Feng J, Wang J, Sun Q, Zhao H, Wu L, Xu P. Investigation on dynamic behaviors of bubble evolution in underwater wet flux-cored arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;28:156-167. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.06.003>.
- Guo N, Wang M, Du Y, Guo W, Feng J. Metal transfer in underwater flux-cored wire wet welding at shallow water depth. *Materials Letters*. 2015;144:90-92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2015.01.033>.
- Marques PV, Modenesi PJ, Bracarense AQ. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. Editora Elsevier; 2015.
- Perez-Guerrero F. Effect of nickel additions on rutile electrodes for underwater welding [master dissertation]. Golden: Colorado School of Mines; 2002.
- Pessoa ECP. Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas [tese de doutorado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2007.
- Pope AM, Medeiros RC, Liu S. Solidification of underwater wet welds. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering Material Engineer*; 1995; Copenhagen, Denmark. Vol. 3. New York: American Society of Mechanical Engineers; 1995. p. 54-63.
- Scotti A, Ponomarev V. *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. São Paulo: Artliber; 2008.
- Teichmann EW. Contribuição ao desenvolvimento da soldagem molhada com arames tubulares [dissertação de mestrado]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2000.
- Tsai CL, Masubuchi K. Interpretive report on underwater welding. New York: Welding Research Council; 1977. (*Welding Research Council Bulletin*; 224).
- Vilarinho LO, Lucas B, Raghunathan S. Initial trials of underwater wet welding using mechanized FCAW process. In: *Proceedings of the 20th Congress of Mechanical Engineering*; 2009 Nov 15-20; Gramado, Brazil. Rio de Janeiro: COBEM; 2009.
- Wang J, Sun Q, Zhang S, Wang C, Wu L, Feng J. Characterization of the underwater welding arc bubble through a visual sensing method. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;251:95-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.019>.