

ANÁLISE DO FENÔMENO DAS BOLHAS EM SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA COM ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO

Camilla Mara Mendonça

Universidade Federal de Minas Gerais –
Programa de Pós Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha 31270-901 -
Belo Horizonte, MG – Brasil

Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais –
Programa de Pós Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha 31270-901 -
Belo Horizonte, MG – Brasil

Douglas de Oliveira Santana

Universidade Federal de Minas Gerais –
Programa de Pós Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha 31270-901 -
Belo Horizonte, MG – Brasil

Marcelo Teodoro Assunção

Universidade Federal de Minas Gerais –
Programa de Pós Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha 31270-901 -
Belo Horizonte, MG – Brasil

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 consequentemente 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 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.

ABSTRACT: The bubble formation mechanism is strongly associated with variation in electrical signals and arc stability in flux cored underwater 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 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. 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.

KEYWORDS: Underwater welding, arc stability, bubble evolution mechanism.

1 | INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda de combustíveis fosseis, 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. Até então, a soldagem subaquática com eletrodo revestido tem sido a mais utilizada. Entretanto, reparos em águas mais profundas necessitam de sistemas automatizados de soldagem, no qual, a soldagem com arame tubular pode ser totalmente robotizada, aumentando a importância do 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 flutuação domina, as bolhas movem-se para a superfície onde entram em colapso. Depois que a bolha se torna instável uma nova bolha se forma dando continuidade ao ciclo (Pessoa, 2007).

O deslocamento das bolhas carrega consigo muito calor da superfície do metal causando o efeito de rápido resfriamento durante o processo. Com a elevada velocidade de resfriamento são impostas algumas características micro estruturais ao metal de solda e à zona termicamente afetada (ZTA). São geradas na ZTA microestruturas de elevada dureza, diminuindo a ductilidade e, conseqüentemente, a capacidade de deformação da solda (Oliveira et.al, 2013).

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. 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 de comprimento, 90 mm de largura e 19 mm de espessura. O consumível utilizado foi eletrodo tubular auto protegido AWS SFA 5.20 E71T-11 com 1,6 mm de diâmetro do arame, um eletrodo comercial da empresa ESAB-TUBROD 711OA. 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 tocha de soldagem utilizada para ambos os processos FCAW subaquática molhada (bico seco e molhado) foi desenvolvida no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS- UFMG, pelo mestre em Engenharia Mecânica Marcelo Teodoro Assunção e pelo professor PhD Alexandre Queiroz Bracarense. Esse dispositivo possui um sistema de vedação na saída do arame tubular que impede a entrada de água na região do bico de contato. A tocha também possibilita que o processo de soldagem seja realizado como na maneira convencional, mantendo o bico de contato na água quando os componentes do sistema de vedação são retirados (Assunção & Bracarense, 2017). Na Figura 1 é possível visualizar a tocha de soldagem com ambas as disposições:

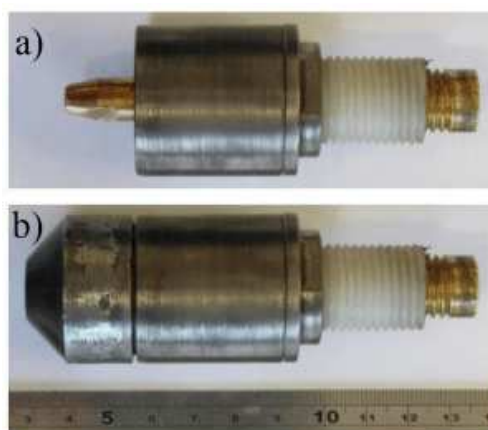


Figura 1. Tocha de Soldagem para FCAW subaquática. (a). Sem sistema de vedação (b). Com o sistema de vedação

Utilizou-se ainda uma câmera de alta velocidade no modelo PHANTO MIRO 110, com capacidade de gravação de 1600 quadros por segundo e as lentes Pentax ALBINAR ADG com auto zoom macro 80-200 mm f 4.5-4.6 e a lente Canon Zoom

Lens EF 90-300 mm f 4.5-5.6 USM- Objetiva. 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 V4.

Um sistema de deslocamento linear com um dispositivo de soldagem do tipo “tartaruga” foi utilizado fixado em um carrinho sobre um trilho, garantindo um deslocamento linear do corpo de prova com velocidade constante.

2.2 Procedimento experimental

A câmera foi posicionada próxima ao aquário, de modo a obter o melhor foco, e os parâmetros utilizados foram: resolução de 1024 x 768 pixels, taxa de amostragem de 1000 quadros por segundo. Com esses parâmetros, foi possível gravar 5 s de filmagem. As imagens obtidas foram analisadas pelo software Phantom CV 2.8.

As soldagens foram realizadas em um aquário com água doce, à temperatura ambiente, na profundidade de 0,30 m. A água era substituída a cada duas soldas. Os parâmetros de soldagem mantidos fixos podem ser vistos na Tab. 1:

Parâmetro	Valor
Ângulo de inclinação da tocha	0 graus
Velocidade de soldagem	450 mm/min
Stick Out	20 mm
Profundidade	0,3 m

Tabela 1. Valores para os parâmetros fixos de soldagem

Foram realizadas 8 soldas para a análise das imagens e sinais elétricos. Para cada solda foi estabelecido um parâmetro inicial distinto, afim de comparar a dinâmica da formação de bolhas com a variação dos parâmetros de soldagem. Na Tabela 2 estão evidentes os 8 parâmetros escolhidos:

Amostra	Condição	Tensão[V]	Vel. Arame [m/mim]
1	Bico seco	26	4
2	Bico seco	26	5
3	Bico seco	30	4
4	Bico seco	30	5
5	Bico molhado	26	4
6	Bico molhado	26	5
7	Bico molhado	30	4
8	Bico molhado	30	5

Tabela 2. Valores iniciais para os parâmetros variáveis de soldagem

Na condição de bico seco foi utilizada a tocha com o sistema de vedação para impedir a entrada de água no ponto de contato. Já o sistema com bico molhado,

utilizou-se a mesma tocha, sem o sistema de vedação.

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. 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. A montagem completa pode ser vista na Fig. (2):



Figura 2. Montagem do sistema de soldagem

O início da aquisição dos sinais elétrico e da gravação das filmagens foram acionados manualmente no mesmo instante, com intuito de sincronizar as medições.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos Sinais Elétricos e Velocidade de Alimentação do Arame

Os valores médios dos sinais de tensão, corrente e velocidade de arame com seus respectivos desvios padrões podem ser visualizados na Tab. 3:

Amostra	Condição	Tensão[V]	Desvio Padrão	Corrente [A]	Desvio Padrão	Vel. Arame [m/mim]	Desvio Padrão
1	Bico seco	24,56	2,27	262,48	37,72	3,91	0,14
2	Bico seco	23,8	2,42	300,06	39,58	5,21	0,15
3	Bico seco	30,47	3,32	269,43	55,06	3,8	0,14
4	Bico seco	30	3,7	297,72	93,85	4,72	1,19
5	Bico molhado	24,57	2,25	312,93	51,78	4,08	0,11
6	Bico molhado	23,97	2,7	334,75	61,29	5,14	0,16
7	Bico molhado	30,27	3,72	304,89	91,11	4,03	0,15
8	Bico molhado	29,66	3,87	337,9	87,03	5,28	0,14

Tabela 3. Valores médios para tensão, corrente e velocidade do arame

Por meio dos valores de desvio padrão da corrente e tensão 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, ou seja, amostra 1 com a 5, 2 com 6 e assim sucessivamente. Isso indica uma maior estabilidade do arco elétrico quando mantido o bico de contato seco. Apenas o valor para amostra 4 mostrou um desvio maior, devido a uma falha ocorrida na alimentação do arame.

É possível ainda analisar as variações dos sinais elétricos para as oito amostras utilizando oscilogramas, os quais podem ser vistos na Fig.3.

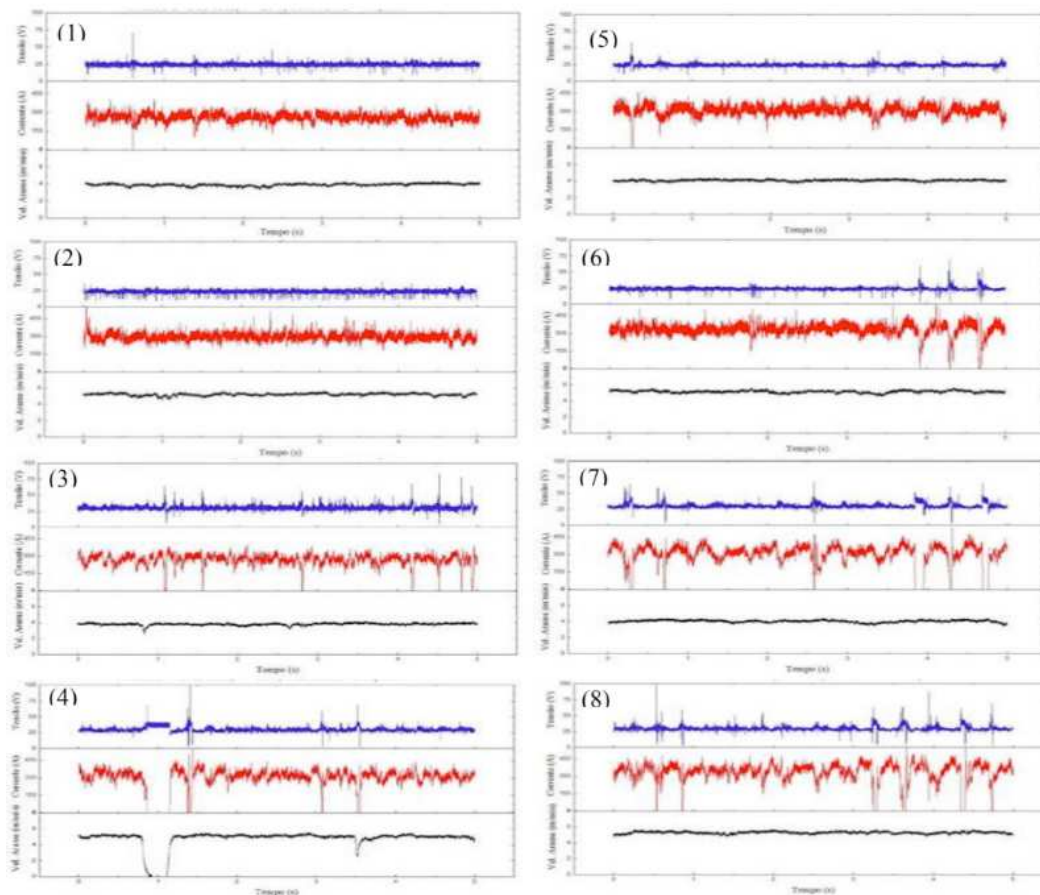


Figura 3. Valores dos sinais de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame para as amostras de bico seco (1 a 4) e bico molhado (5 a 8)

Analisando as amostras 1 e 2, verifica-se que ambas apresentaram velocidade de arame com baixa dispersão. No oscilograma de tensão houve uma distribuição pequena em relação à média e há a formação de curtos circuitos mais frequentes na amostra 2. Já a corrente apresenta um comportamento inverso ao de tensão, havendo um ponto de extinção do arco na amostra 1, no intervalo de 0 a 1 s.

A amostra 3 indica modo de transferência globular e há extinção do arco em vários pontos ao longo do tempo, sendo refletidos pelos picos de tensão. Já na amostra 4 houve um intervalo de interrupção da alimentação de arame, próximo ao tempo de 1 s, ocasionando um período mais longo de extinção do arco, levando a tensão do arco a permanecer próximo ao valor de 42 V (tensão em vazio da fonte). Houve mais 3 pontos de extinção do arco, entretanto não houve muita variação da tensão e da

corrente em torno dos seus valores médios.

As amostras 5 e 6 apresentaram a formação de curtos circuitos, sendo mais frequentes na 6, embora tenha havido pouca dispersão nos valores da tensão em relação à média. Em relação à corrente, a amostra 5 apresentou boa estabilidade do arco, tendo apenas um ponto de extinção próximo ao início da aquisição dos dados. Já a amostra 6, apesar de apresentar uma boa estabilidade ao longo do tempo, no final do processo indicou três pontos de extinção do arco elétrico. A velocidade o arame manteve com baixa dispersão para ambas as amostras.

As amostras 7 e 8 apresentaram comportamentos muito semelhantes. As velocidades de arame se mantiveram com baixas oscilações em relação à média, houve extinção do arco em ambas as amostras e houve a presença de tensão em vazio, também nas duas amostras

3.2 Análise das Filmagens

As imagens obtidas com as soldagens realizadas com o bico de contato seco podem ser vistas na Fig. 4, no entanto, não ficaram com uma boa qualidade, assim não foi possível observar a dinâmica de evolução das bolhas e o seu diâmetro máximo. Foi possível, entretanto, analisar as imagens quando as bolhas já estavam na fase de destacamento. À medida que foram aumentando os valores de tensão e corrente, pode-se observar que os volumes das bolhas também aumentaram.

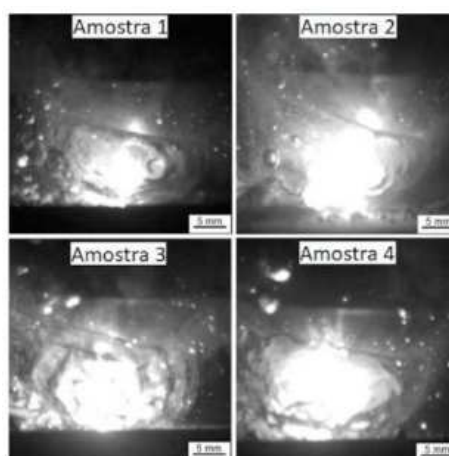


Figura 4. Formas típicas das bolhas com bico de contato seco para as amostras 1-4

O fenômeno de formação de bolhas não apresenta um padrão na forma e tamanho das bolhas formadas. Pode ser visto na Fig.5 a sequência de oito bolhas da amostra 5 quando estavam com seus diâmetros máximos.

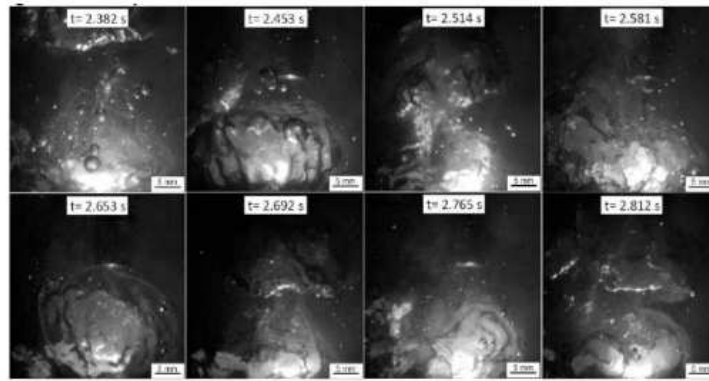


Figura 5. Sequência de bolhas da amostra 5 com diâmetro máximo

Com os valores de tensão e corrente menores, as bolhas geradas apresentaram diâmetros menores, com formatos irregulares e ondulatórios. À medida que uma bolha atingia um diâmetro maior, a bolha gerada seguinte já apresentava um menor diâmetro. A menor bolha apresentou um diâmetro máximo de 16 mm, a maior, 28 mm. A média aproximada foi de 23,5 mm. Os valores de tensão e corrente de soldagem apresentam pouca oscilação em torno do seu valor médio, não houve extinção do arco e o modo de transferência metálica foi possivelmente a globular.

Para a amostra 6 as imagens dos diâmetros máximos são apresentadas na Fig.6.

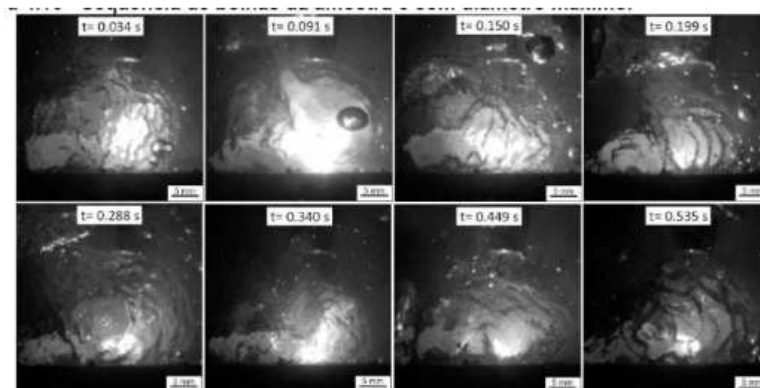


Figura 6. Sequência de bolhas da amostra 6 com diâmetro máximo

Com o aumento da velocidade de alimentação de arame, de 4 para 5 m/min, as bolhas passaram a ter um aumento no seu diâmetro máximo. Novamente as bolhas apresentaram formas irregulares e ondulatórias, não seguindo um padrão no seu formato. O mesmo comportamento observado com a amostra 5 se repetiu também com a amostra 6, quando é formada uma bolha de diâmetro maior, a próxima já é formada com o diâmetro menor. Este fenômeno pode ser explicado devido ao tempo no qual a bolha demora para atingir seu diâmetro máximo. Quanto mais tempo a primeira bolha leva para atingir esse diâmetro, a próxima bolha tem menos tempo para crescer, assim a nova bolha atinge seu diâmetro máximo com o tamanho reduzido se comparado a anterior. Por sua vez, os valores de tensão e corrente já começaram a apresentar maiores oscilações com a aumento da velocidade de alimentação de arame, e observa-se o início da formação de quedas na tensão, resultando numa

maior instabilidade do arco elétrico.

Com apenas o aumento no valor da tensão de 26 V para 30 V e mantendo a velocidade de alimentação de arame em 4 m/min as bolhas geradas pela amostra 7 são apresentadas na Fig.7.

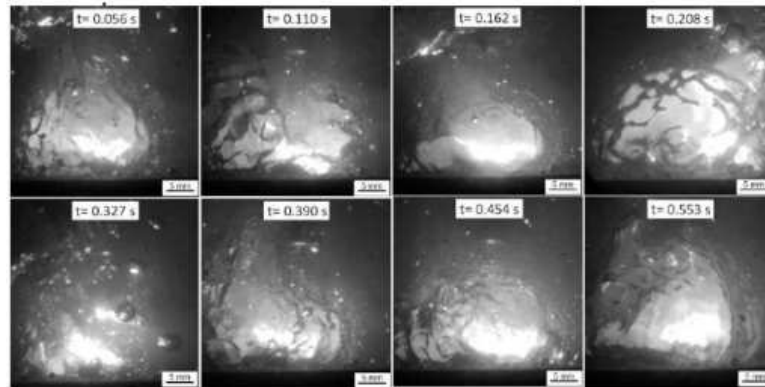


Figura 7. Sequência de bolhas da amostra 7 com diâmetro máximo

As bolhas da amostra 7 já apresentaram formas mais arredondadas e diâmetros máximos maiores se comparado as amostras 5 e 6. A média do diâmetro máximo das bolhas ficou em torno de 28,5 mm, maior que a média da amostra 6 que foi de 25 mm, desta forma o aumento no valor da tensão do arco contribui mais para o aumento do diâmetro máximo da bolha se comparada ao aumento no valor da velocidade de alimentação do arame. Em contrapartida há aumento das oscilações dos sinais elétricos em torno do valor médio. O aumento no valor da tensão acarretou na piora na estabilidade do arco elétrico, chegando a ocorrência de um período de extinção do arco, o que acarretou em uma queda no diâmetro máximo das duas bolhas formadas a partir do período de extinção.

Por fim, com todos os parâmetros maximizados as bolhas formadas com a amostra 8 são ilustradas na Fig. 8.

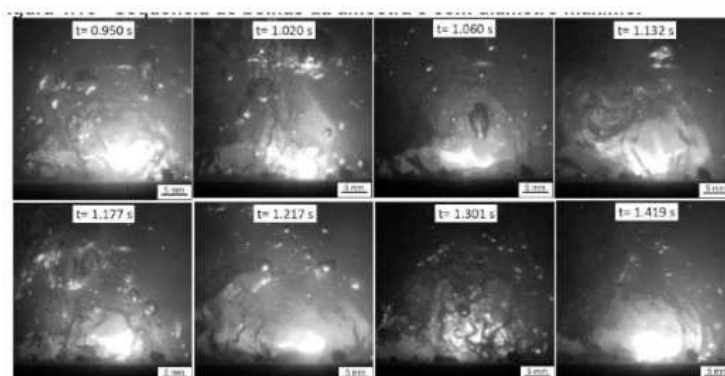


Figura 8. Sequência de bolhas da amostra 8 com diâmetro máximo

O diâmetro máximo das bolhas variou bastante ao longo do tempo, não seguindo um padrão. Houve a formação de bolha com diâmetro máximo acima de 32 mm e por outro lado, outras bolhas com diâmetro de 20 mm. A média das oito bolhas ficaram em

torno de 27,5 mm sendo a maior média entre as outras amostras. Devido à maximização dos parâmetros de soldagem dessa amostra em relação as demais, o trecho analisado apresentou picos de maior oscilação em torno da média. Houve algumas quedas e picos mais consideráveis nos valores de tensão e corrente.

3.3. 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 tensão do arco são suficientemente grandes para evitar a ocorrência desses dois primeiros modos (FENG et al, 2017). Entretanto observaram-se o terceiro e quarto modo de evolução de bolhas.

Terceiro modo

Por meio das filmagens foi possível identificar a ocorrência do terceiro modo de evolução de bolhas em todas as amostras com o bico de contato molhado. Entretanto não foi possível afirmar a ocorrência do terceiro modo nas amostras que usaram o bico de contato mantido seco devido à má qualidade da filmagem. Por outro lado, com a análise dos oscilogramas das amostras de bico de contato seco, provavelmente este modo deve estar ocorrendo também, pois nas amostras 1 e 2 além de não ocorrer extinção do arco, os valores de tensão e corrente oscilam em torno do seu valor médio, resultando em uma boa estabilidade que é uma característica do terceiro modo. Outro fator é a mudança nos parâmetros de soldagem. A amostra 2 em relação a amostra 1 obteve somente um aumento na velocidade de arame e com isso, não houve a ocorrência de extinção de arco. Entretanto as amostras 3 e 4 mesmo havendo pequenas ocorrências de extinção do arco, grande parte dos sinais se mostraram com poucas oscilações e boa estabilidade, assim pode estar prevalecendo a ocorrência do terceiro modo de evolução de bolhas. Na Figura 9 é possível verificar o comportamento dinâmico de bolhas e do arco de soldagem no terceiro modo.

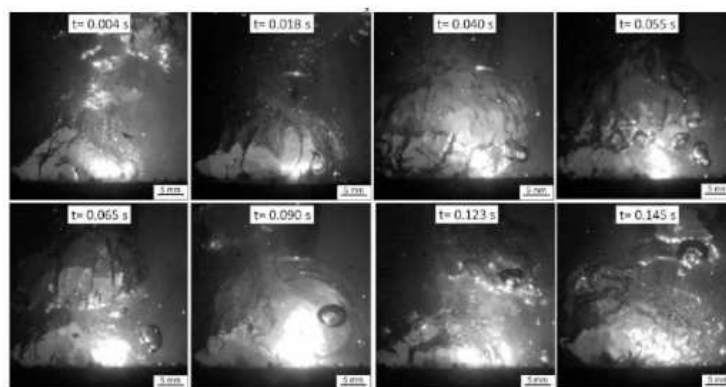


Figura 9. Comportamento dinâmico da bolha e do arco de soldagem no terceiro modo de evolução

No terceiro modo de evolução de bolhas o arco elétrico sempre é protegido

pela atmosfera gasosa, como se pode perceber em 0,004 s a bolha protegendo o arco elétrico. Em 0,055 s, uma nova bolha surge e gera uma grande área efetiva em contato com a bolha anterior, juntas elas cobrem a área de queima de arco e contribuem para o efeito protetor e a conservação dos valores dos sinais elétrico mais estáveis. Em 0,065 s a bolha anterior, agora com o formato mais alongado, continua com seu destacamento, enquanto a nova bolha continua a crescer e a proteger o arco, mantendo o arco elétrico estável. De 0,090 s a 0,145 s ocorre a repetição do comportamento dinâmico do terceiro modo de evolução. Percebe-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 de bolhas como ideal para manter o arco mais estável na soldagem subaquática molhada.

Quarto modo

O surgimento do quarto modo de evolução das bolhas é evidenciado com o aumento nos valores da tensão do arco. Nas amostras que foram usados o bico de contato seco, como relatado anteriormente, não foi possível afirmar a ocorrência do quarto modo pelas análises das imagens, entretanto com o auxílio do oscilograma, pôde-se perceber que as amostras 3 e 4 obtiveram um aumento no valor de tensão do arco, e assim começaram a ocorrência da extinção de arco e piora em sua estabilidade. Segundo Feng et al (2017), o principal fator para a ocorrência do quarto modo de evolução de bolhas é o aumento da tensão do arco. Na Figura 10 é possível perceber o comportamento dinâmico de bolhas no quarto modo.

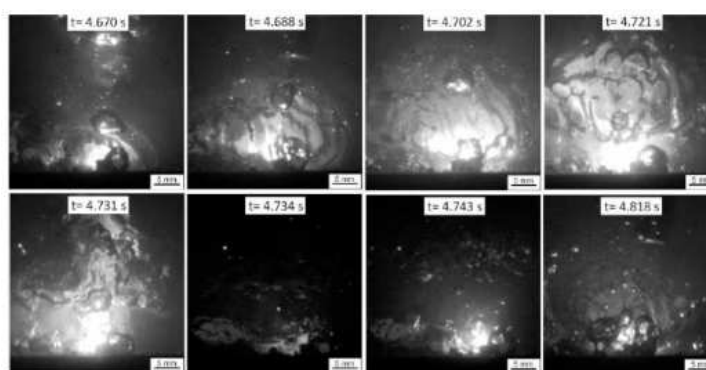


Figura 10. Comportamento dinâmico da bolha e do arco de soldagem no quarto modo de evolução

No quarto modo de evolução de bolhas há sempre a extinção do arco elétrico. De 4,670 s a 4,702 s a bolha cresce até atingir seu diâmetro máximo. Em 4,721 s devido ao grande tamanho da bolha e alta pressão dos gases, a bolha se torna tão densa que impede que uma nova bolha seja gerada. Em 4,731 s a bolha se destaca levando consigo toda a atmosfera protetora, assim o início da formação de uma nova bolha

ainda não é o suficiente para proteger o arco elétrico ocasionando a sua extinção, como visto em 4,734 s. De 4,743 s a 4,818 s o arco é novamente reestabelecido dando continuidade à dinâmica de formação de bolhas.

Devido à maior tensão do arco, neste modo de evolução, o diâmetro máximo da bolha tende a aumentar significativamente e mais gases dentro da bolha são gerados antes da bolha destacar da poça de fusão. Após o destacamento da bolha o valor de tensão do arco excede para 69 v e a corrente de soldagem reduz até se aproximar de 0 A, o que indica a extinção do arco. Após um pequeno intervalo de tempo a corrente de soldagem volta a aumentar dando início ao arco elétrico. Neste quarto modo de evolução de bolhas os sinais elétricos não são muitos estáveis, há a ocorrência de extinção de arco, caracterizando esse modo como inapropriado para a soldagem subaquática molhada com arame tubular.

3.4 Frequência de Destacamento das Bolhas

Com o aumento nos parâmetros de soldagem, os tamanhos do diâmetro máximo da bolha também aumentam, como relatado anteriormente. Por outro lado, quanto maior é esse diâmetro máximo, menor será a frequência de destacamento das bolhas, a qual pode ser vista na Tab. 4:

Amostra	Frequência [Hz]					
	0 a 1s	1 a 2 s	2 a 3 s	3 a 4 s	Média	Desvio Padrão
1	15	16	15	14	15	0,816
2	15	15	13	13	14	1,155
3	13	14	13	12	13	0,819
4	11	9	12	13	11	1,708
5	18	18	18	17	18	0,500
6	17	16	16	16	16	0,500
7	15	14	15	15	15	0,500
8	13	13	14	15	14	0,957

Tabela 4. Frequência de formação de bolhas ao longo do tempo.

Houve pouca variação no número de bolhas geradas ao longo do tempo para cada amostra. Para a mesma condição de bico de contato mantido seco ou molhado, à medida que os valores de tensão e velocidade de arame foram aumentando, a frequência de formação de bolhas diminui. Isso pode ser explicado de acordo com o tamanho das bolhas, pois as maiores levam mais tempo até atingirem o seu diâmetro máximo para depois se destacarem, diminuindo assim, o número de bolhas geradas. Quando a única diferença entre os parâmetros é o fator condição, as frequências de formação das bolhas foram menores para a condição de bico de contato seco em relação ao bico molhado. Segundo Wang et al (2018) isso pode ser explicado devido a pequena barreira mecânica do dispositivo de vedação, fazendo com que a bolha fique retida por mais tempo.

4 | CONCLUSÃO

A dinâmica de formação e destacamento das bolhas se mostrou um fenômeno muito complexo e aleatório. As bolhas geradas estão em constante mudança de tamanho e formato. A bolha possui um formato mais esférico no início de sua formação e quando está na fase de destacamento ela já assume a forma mais alongada.

De fato, 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 área do arco, ocorre a extinção do mesmo.

Com a mudança dos parâmetros de soldagem o diâmetro máximo e a frequência de formação de bolha também sofrem alterações. Quando se aumenta a tensão ou velocidade de arame o diâmetro máximo da bolha aumenta e a frequência de formação diminui.

Não foi possível analisar a dinâmica de formação de bolhas para a condição de bico de contato seco, devido à má qualidade das imagens. Entretanto, para a condição de bico de contato molhado foi possível identificar a ocorrência do terceiro e do quarto modo de evolução de bolhas. Em relação a estabilidade do arco para a condição de bico de contato molhado, a amostra 5 se mostrou mais estável, apresentando apenas o terceiro modo de evolução de bolha. Com o aumento, principalmente, no valor da tensão, a estabilidade do arco foi piorando, dando início a formação do quarto modo de evolução de bolha e desta forma a ocorrência de extinção do arco.

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 do que a condição de bico contato molhado. A condição de bico de contato seco apresentou uma frequência de formação de bolhas inferior quando comparado à condição de bico de contato molhado.

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.

5 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais pelo suporte laboratorial.

REFERÊNCIAS

Assunção, Marcelo Teodoro; Bracarense, Alexandre Queiroz. “Evaluation of the Effect of the Water in the Contact Tip on Arc Stability and Weld Bead Geometry in Underwater Wet FCAW”, Soldagem & Inspeção, v. 22, n. 4, p. 401-412, 2017.

Feng, J. et al. “Investigation on dynamic behaviors of bubble evolution in underwater wet flux-cored arc welding”, Journal of Manufacturing Processes, v. 28,p. 156-167, 2017.

Oliveira, F. R. Soares, W. R., Bracarense, A. Q. “Estudo sobre o correlacionamento do fenômeno das bolhas e sinais elétricos na soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos”, Soldagem & Inspeção, vol.18, no 02, São Paulo, 2013.

Pessoa, E. C. P., “Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas”, Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil, Tese, 2007.

Teichmann, E. W. “Contribuição ao desenvolvimento da soldagem molhada com arames tubulares”, Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil, Tese, 2000.

Wang, J. et al. “Characterization of the underwater welding arc bubble through a visual sensing method”, Journal of Materials Processing Technology, v. 251, p. 95-108, 2018.

6 | DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

7 | ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

- () Acústica, Vibrações e Dinâmica
- () Automação Industrial
- () Energia
- (X) Fabricação Mecânica e Materiais
- () Gestão de Manufatura
- () Mecânica Computacional
- () Mecânica dos Sólidos
- () Otimização e Análise
- () Projeto de Máquinas
- () Termociências e Mecânica dos Fluidos