



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

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

CAMILLA MARA MENDONÇA

Belo Horizonte, 31 de maio de 2019

Camilla Mara Mendonça

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: PhD Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019



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

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG
Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783
www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**“INVESTIGAÇÃO DO FENÔMENO DAS BOLHAS EM
SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA COM ARAME
TUBULAR AUTOPROTEGIDO”**

CAMILLA MARA MENDONÇA

Dissertação defendida e aprovada em 30 de Maio de 2019, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “**Mestre em Engenharia Mecânica**” na área de “**Engenharia de Manufatura e Materiais.**”

Por:

Prof. Alexandre Queiroz Bracarense
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

Prof.ª Ivanilza Felizardo
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Ariel Rodríguez Arias
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

Prof. Cicero Murta Diniz Starling
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil/ UFMG

À minha família, marido e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que esteve sempre iluminando minha mente e meus caminhos.

Á minha mãe e avó que sempre me incentivaram, dando todo apoio e carinho.

Ao meu marido que sempre apoiou minhas escolhas, e renúncias para me dedicar à minha vida acadêmica.

A todos familiares, amigos e colegas que estiveram presentes nessa fase da minha vida.

Ao professor Dr. Alexandre Queiroz Bracarense, pela oportunidade em me orientar, a toda paciência e sabedoria, possibilitando a execução deste trabalho.

Ao LRSS, em especial ao colega de laboratório Marcelo Teodoro, pela imensa colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores, amigos e colegas da pós graduação, importantes na minha vida acadêmica, pelo convívio diário, pela ajuda constante e por todos os ensinamentos transmitidos.

Meus sinceros agradecimentos.

“É muito melhor se lançar em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem a vitória, nem derrota.”

(Theodore Roosevelt)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	18
3.1	Soldagem Subaquática	19
3.1.1	Soldagem Subaquática Molhada	21
3.2	Processos de soldagem a arco elétrico utilizadas em soldagem subaquática.....	23
3.2.1	SMAW	23
3.2.2	GTAW.....	24
3.2.3	GMAW	25
3.2.4	FCAW	27
3.3	Influência dos parâmetros em FCAW.....	30
3.3.1	Corrente.....	30
3.3.2	Tensão	30
3.3.3	Velocidade de alimentação do arame	31
3.3.4	Velocidade de soldagem	33
3.3.5	Distância entre bico de contato e peça (DBCP)	34
3.4	Processo FCAW subaquático.....	36
3.5	Efeito da água no processo de soldagem subaquática	37
3.6	Dinâmica de formação das bolhas.....	40
3.7	Modo de evolução das bolhas.....	44
3.8	A estabilidade do arco elétrico na soldagem subaquática molhada.....	47
4.	METODOLOGIA	53
4.1	Materiais	53
4.1.1	Corpo de prova.....	53
4.1.2	Consumível	53
4.2	Equipamentos	54
4.2.1	Aquário de soldagem e sistema de movimentação linear.....	54
4.2.2	Tocha de soldagem.....	55
4.2.3	Câmera de alta velocidade	56
4.2.4	Fonte de soldagem	56
4.2.5	Sistema de aquisição de dados	57
4.3	Procedimento experimental.....	57
5.	RESULTADOS.....	61

5.1	Análise dos sinais elétricos.....	61
5.1.1	Oscilogramas dos Sinais de Tensão, Corrente e Velocidade de Alimentação do Arame.....	62
5.1.2	Estabilidade do Arco Elétrico	65
5.2	Análise das filmagens	69
5.3	Influência dos parâmetros de soldagem	73
5.3.1	Tensão de soldagem	73
5.3.2	Stick out	74
5.3.3	Velocidade do arame.....	75
5.4	Modo de Evolução das Bolhas	76
5.4.1	Terceiro Modo.....	76
5.4.2	Quarto Modo.....	78
5.5	Cordões de solda	80
6.	CONCLUSÕES	82
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
	ANEXO 1.....	88
	OSCILOGRAMAS DE TENSÃO, CORRENTE DE SOLDA E VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME	88
	ANEXO 2.....	91
	HISTOGRAMAS DA CORRENTE DE SOLDAGEM.....	91
	ANEXO 3.....	94
	CICLOGRAMAS TENSÃO X CORRENTE PARA OS ENSAIOS REALIZADOS	94

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Classificação dos Modos de Soldagem Subaquática	19
FIGURA 3.2 - Procedimento de Soldagem Subaquática Molhada para reparo.....	21
FIGURA 3.3 - Princípio do processo de soldagem GTAW.....	24
FIGURA 3.4 - Exemplo de esquema para soldagem subaquática GMAW.....	25
FIGURA 3.5 - Esquema de soldagem FCAW com arame tubular autoprotégido.....	26
FIGURA 3.6 - Influência da velocidade de alimentação do arame na corrente de soldagem.....	35
FIGURA 3.7 - Efeito da velocidade de soldagem na geometria do cordão.....	37
FIGURA 3.8 - Efeito da distância bico de contato peça na tensão e na corrente de soldagem.....	38
FIGURA 3.9 - Vista isométrica e dimensões principais da tocha.....	41
FIGURA 3.10 - Ciclogramas.Em (a), processo com bico de contato seco e em (b) processo com bico de contato molhado.....	42
FIGURA 3.11 - Formato da bolha na soldagem subaquática com arame tubular.....	43
FIGURA 3.12 - Efeito da velocidade de alimentação de arame no diâmetro máximo e na frequência de destacamento da bolha.....	44
FIGURA 3.13 - Efeito da velocidade da tensão no diâmetro máximo e na frequência de destacamento da bolha.....	45
FIGURA 3.14 - Comportamentos dinâmicos da bolha e do arco de solda no primeiro modo de evolução de bolha.....	46
FIGURA 3.15 - Comportamentos dinâmicos da bolha e do arco de solda no segundo modo de evolução de bolhas.....	47
FIGURA 3.16 - Comportamentos dinâmicos da bolha e do arco de solda no terceiro modo de evolução de bolhas.....	48
FIGURA 3.17 - Comportamentos dinâmicos da bolha e do arco de solda no quarto modo de evolução de bolhas.....	49
FIGURA 3.18 - Relação dos parâmetros corrente e tensão de soldagem com a profundidade.....	50
FIGURA 3.19 - Tocha desenvolvida com barreira mecânica para retenção das bolhas.....	51
FIGURA 3.20 - Características dinâmicas de tensão e corrente de soldagem para três condições: a) soldagem ao ar; b) soldagem subaquática convencional; c) soldagem subaquática com tocha especial.....	51
FIGURA 3.21 - Coeficientes de variação para soldas realizadas ao ar, na condição subaquática convencional e com o uso de barreira para as bolhas.....	53

FIGURA 3.22- Ciclogramas, indicando a ocorrência de curto-circuitos. Em (a), processo com tocha especial e (b) processo convencional.....	54
FIGURA 3.23 - Histogramas, indicando a ocorrência de curto-circuitos.Em (a), processo com tocha especial e em (b) processo convencional.....	54
FIGURA 4.1 - Aquário e sistema de deslocamento linear.....	57
FIGURA 4.2 - 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.....	58
FIGURA 4.3 - Fonte de soldagem e cabeçote de solda.....	59
FIGURA 4.4 - Configuração Experimental.....	60
FIGURA 5.1 - Oscilogramas das amostras 7,8, 15 e 16.....	65
FIGURA 5.2 - Oscilogramas das amostras 3,4,11 e 12.....	66
FIGURA 5.3 - Coeficiente de variação elétrica da soldagem.....	68
FIGURA 5.4 - Histogramas das amostras 7,8,15 e 16, em destaque as extinções do arco.....	69
FIGURA 5.5 - Ciclogramas das amostras 7,8,15 e 16, em destaque os curto circuitos.....	70
FIGURA 5.6 - Arco elétrico e bolha formados durante o processo de soldagem.....	71
FIGURA 5.7 - Comportamento dinâmico das bolhas. A seta destaca o arame autoprottegido.....	72
FIGURA 5.8 - Imagens das bolhas obtidas com bico de contato molhado e seco.....	74
FIGURA 5.9 - Relação dos diâmetros médios das bolhas para as amostras de bico seco e molhado.....	75
FIGURA 5.10 - Relação dos diâmetros médios das bolhas considerando variação na tensão de 26V para 30V.....	76
FIGURA 5.11 - Relação dos diâmetros médios das bolhas considerando variação no stick out.....	77
FIGURA 5.12 - Relação dos diâmetros médios das bolhas considerando variação no na velocidade de alimentação do arame.....	78
FIGURA 5.13 - Modo de evolução das bolhas para amostras ensaiadas com a tocha utilizando vedação. Em destaque, o arame autoprottegido.....	79
FIGURA 5.14 - Valores de tensão e corrente em função do tempo para o terceiro modo de evolução das bolhas.....	80
FIGURA 5.15 - Sequência de imagens para o quarto modo de evolução das bolhas c. Em destaque, o arame autoprottegido.....	81
FIGURA 5.16 - Valores de tensão e corrente em função do tempo para o quarto modo de evolução das bolhas.....	82
FIGURA 4.17 - Cordões de solda realizados. Em destaque, arame de solda preso ao cordão da amostra	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Efeito da DBCP sobre a corrente de soldagem e taxa de deposição.....	38
TABELA 4.1 - Propriedades Mecânicas, Composição Química, e Parâmetros de Soldagem para o arame ESAB – TUBROD 7110A.....	56
TABELA 4.2 - Parâmetros comuns as amostras 1020.....	60
TABELA 4.3 - Valores iniciais para os parâmetros variáveis de soldagem.....	61
TABELA 5.1 - Valores médios para corrente, desvio padrão e coeficiente de variação.....	63
TABELA 5.2 - Valores dos parâmetros utilizados para as amostras 7, 8, 15 e 16.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ar	Argônio
ASTM	Sociedade Americana para Materiais e Testes
AWS	American Welding Society
DBCP	Distância Bcico de Contato Peça
DCEN	Direct Current Electrode Negative
CC	Corrente Contínua
CC-	Corrente Contínua Eletrodo negativo
CC+	Corrente Contínua Eletrodo Positivo
DCEN	Direct Current Electrode Negative
DCEP	Direct Current Electrode Positive
Cv	Coeficiente de Variação
CO ₂	Gás Carbônico
FCAW	Flux Cored Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
LRSS	Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
mm	Milímetros
NBR	Norma Brasileira
O ₂	Oxigênio
SAW	Submerged Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas
ZTA	Zona Termicamente Afetada

NOMENCLATURAS

A	Amperes
I_s	Corrente de Soldagem
V	Volts
σ	Desvio Padrão
\bar{X}	Média Aritmética
H_D	Hidrogênio Difusível
t	Tempo

RESUMO

O fenômeno de formação de bolhas na soldagem subaquática molhada com arame tubular (FCAW) está fortemente ligado à variação dos sinais elétricos e à estabilidade do arco elétrico. 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 a análise de filmagens de soldas FCAW subaquáticas e a aquisição de sinais elétricos simultâneos, observou-se o comportamento dinâmico das bolhas formadas, e 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-Chaves: *Soldagem subaquática molhada, estabilidade do arco elétrico, formação de bolhas.*

ABSTRACT

The bubble formation mechanism of underwater wet flux cored arc welding (FCAW) is strongly associated with variation in electrical signals and arc stability. Good understanding of bubble formation mechanism can be helpful in achieving welding parameters that produce better weld beads. With the analysis of filmage of underwater FCAW welds and the acquisition of simultaneous electrical signals, this work investigated 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.

Keywords: *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 (Shielded Metal Arc Welding) – 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 – FCAW (Flux Cored Arc Welding) – 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. Além disso, a soldagem com arame tubular pode ser totalmente robotizada, aumentando a importância de seu estudo.

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 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, 2001, 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 et al, 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 pode extinguir e criar uma situação de instabilidade no processo de transferência (TEICHMANN, 2000).

Segundo FENG et al, 2017 os fenômenos de formação e evolução de bolhas na soldagem subaquática molhada com arame tubular são divididos em quatro modos. 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, permitindo que os gases dentro da bolha tenham mais tempo para serem produzidos, levando a um aumento no tamanho da bolha. Assim como no segundo modo a bolha cresce gradualmente e permanece na região do arco por um período maior 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 surja antes do destacamento da bolha anterior, retirando assim a camada de gás protetora do arco.

2. OBJETIVOS

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 alteração 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 modificação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Soldagem Subaquática

Até o surgimento de extração de petróleo no mar, a soldagem subaquática era somente usada em reparos de caráter emergencial em cascos de navio e estruturas portuárias submersas. O aumento no preço do barril de petróleo, ocorrido em 1973, fez com que a extração do petróleo, que se concentrava quase que totalmente em terra, se expandisse rapidamente para a costa marítima. Consequentemente, a necessidade de reparos de solda nessas estruturas estimulou a realização de muitos trabalhos de pesquisa nessa área. (FILHO et al., 2004).

A soldagem subaquática vem se tornando um grande aliado para reparos de instalações produtivas (plataformas, oleodutos, cais de atracação, embarcações), tanto em ambientes de pequena lâmina d'água (profundidades em torno de 35 metros), quanto em águas profundas e ultra profundas, o que demanda por sistemas automatizados de soldagem (TEICHMANN, 2000). Para atender a esta demanda esforços tem sido concentrados no desenvolvimento de tecnologias de soldagem para ambiente subaquático capazes de atender às exigências mecânicas requeridas das juntas. (OLIVEIRA, 2012).

A soldagem subaquática pode ser subdividida em duas categorias: soldagem subaquática seca e molhada. A soldagem subaquática seca, mais conhecida como hiperbárica é feita a pressão ambiente em uma câmara na qual a água foi removida. A soldagem subaquática molhada é realizada debaixo d'água diretamente exposta ao ambiente aquoso (WELDING HANDBOOK, 1996).

Existem cinco tipos de técnicas para essas categorias: soldagem seca localizada, soldagem em caixa seca, soldagem em câmara, soldagem em habitat e soldagem molhada (AWS, 2011). Essa classificação pode ser visualizada na FIG 3.1.

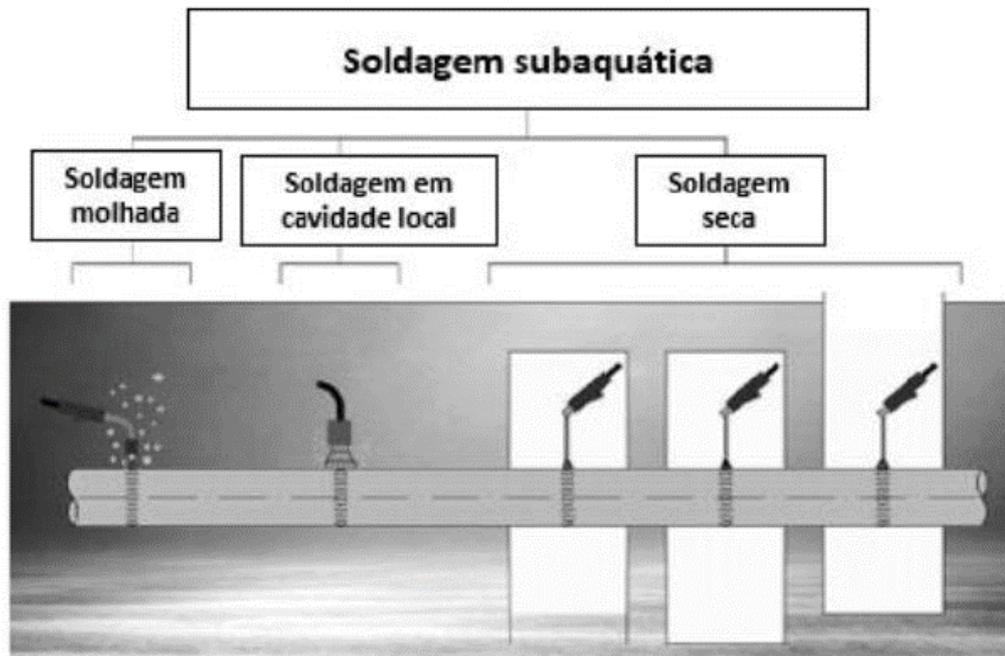


Figura 3.1: Classificação dos Modos de Soldagem Subaquática
 Fonte: ŁABANOWSKI et. al., 2018

Na soldagem seca localizada, o volume contendo o arco e a região a ser soldada, no todo ou em parte, é separado da água por meio de um pequeno envoltório com gás a pressão ambiente e com aberturas que permitem o acesso. Esta câmara proporciona uma região protegida entre a peça de trabalho e o ambiente úmido e possui espaço o suficiente para o eletrodo ou a tocha de soldagem (BRACARENSE, 2016).

A soldagem em caixa seca é realizada em uma câmara preenchida com um gás. Esta é grande o bastante para acomodar a área de trabalho e a parte superior do corpo do soldador/mergulhador, vestido em um traje de mergulho completo. A água é removida por uma mistura de gases pressurizados, porém o hidrogênio não é completamente removido por causa da excessiva umidade nestas câmaras. A alta temperatura e alta umidade presente na câmara fazem com que as condições de trabalho sejam péssimas, porém os problemas de visibilidade e estabilidade posicional são resolvidos (MARQUES et al, 2015).

A soldagem em câmara é realizada em uma câmara a pressão de 1atm montada ao redor do local onde deverão ser realizados os trabalhos. Nestas condições a soldagem praticamente não é afetada pelas propriedades da água ou pelos efeitos da profundidade. Processos de soldagem realizados em câmaras são capazes de produzir soldas de alta qualidade, porém são caros devido ao alto custo de se desenvolver projetos especiais para as câmaras (MASUBUCHI, 1981).

Na soldagem em habitat (ou câmara hiperbárica) a água é deslocada de uma grande câmara por meio da injeção de um gás em seu interior. A área de soldagem é completamente isolada da água, mas se encontra na pressão do local correspondente a altura da coluna de água a que está submetida. Os soldadores não utilizam trajes de mergulho nesta câmara e existe espaço suficiente para a realização dos preparativos para soldagem e posicionamento de equipamentos. (BRACARENSE, 2016)

As vantagens da soldagem subaquática seca residem no fato de que o ambiente seco promove melhorias na estabilidade do arco elétrico, reduz os problemas com hidrogênio no metal de solda, resulta em menor taxa de têmpera do metal de base, permite a restauração das propriedades da solda de ductilidade e tenacidade, que são os principais problemas das soldas produzidas em soldagem subaquática molhada. Como desvantagem, a soldagem seca exige um alto valor de investimento na câmara e aparatos para a retirada da água do ambiente, que em soldagem molhada não é necessário (AWS, 2011).

A soldagem subaquática molhada é produzida no ambiente subaquático, onde a peça de trabalho e o soldador estão submersos em água, sendo mais interessante, devido a funcionabilidade e apresentam uma série de desafios físicos, químicos, mecânicos e metalúrgicos.

3.1.1 Soldagem Subaquática Molhada

O termo “molhada” é usado para indicar que a soldagem é realizada completamente exposta ao ambiente aquático. A principal vantagem da soldagem subaquática molhada é sua simplicidade e facilidade de uso em diversas posições diferentes para produzir juntas incomuns e complexas (OLIVEIRA, 2012).

O processo de soldagem subaquática molhada geralmente é realizado em ambientes perigosos com visibilidade e mobilidade limitadas. Pode ser realizada em diferentes ambientes aquáticos constituídos basicamente por água salgada (navios ou estruturas offshore), água doce com ou sem poluição (represas, coletores, etc) e água desmineralizada (trocadores de calor em estações elétricas, componentes internos do vaso de pressão do reator em usinas nucleares, etc) (PESSOA, 2007). Um exemplo desse processo pode ser visto na FIG. 3.2.



Figura 3.2: Procedimento de Soldagem Subaquática Molhada para Reparo
Fonte: BRACARENSE, 2016.

O soldador/mergulhador utiliza eletrodos com recobrimentos a prova d'água e porta eletrodos, pistolas e tochas especialmente projetadas ou modificadas para serem utilizadas na soldagem subaquática úmida (BRACARENSE, 2016). Além disso, todas as conexões devem ser perfeitamente isoladas, evitando fugas de corrente para o meio e consequentemente reduzindo a corrente de arco e aumentando o risco ao soldador. Mesmo assim, ainda ocorre uma rápida deterioração dos cabos de cobre no ponto de isolamento deficitário (JOSHI, 2019)

Como a soldagem é realizada em meio aquoso, surgem alguns problemas nas propriedades mecânicas, relacionados à taxa de resfriamento elevada e a dissociação da água devido ao calor do arco elétrico. (SILVA et al, 2011). Segundo NIXON, (1987), a água promove rápido resfriamento do metal de solda e de base imediatamente após a extinção do arco voltaico. Altas taxas de resfriamento podem criar regiões endurecidas próximas ao cordão de solda, dependendo do teor de carbono equivalente do metal, as quais podem resultar em fraturas frágeis e, consequentemente, perigosas.

O hidrogênio e o oxigênio dissociados podem ser absorvidos pelo banho líquido de metal, devido à rápida solidificação da solda, e a junta soldada torna-se susceptível ao trincamento por hidrogênio (ROWE et al, 2001). Segundo Bailey (1991), outro problema que ocorre na soldagem molhada é a porosidade. O número de poros presentes no metal de solda aumenta com a profundidade, se tornando problema mais sério em profundidades entre 55 e 100 metros. A quantidade de poros determina se a solda produzida atinge aos critérios de classificação A, B e C estabelecidos pela AWS D3.6M: 1999.

A norma AWS D3.6M: 1999 especifica os testes que devem ser realizados para as determinações das propriedades mecânicas para cada tipo de solda. A solda molhada possui menor limite de resistência, o alongamento e a redução de área por tração, a ductilidade ao dobramento, a tenacidade ao impacto Charpy em comparação à soldagem realizada com o mesmo eletrodo, a seco. As discontinuidades das soldas, tais como inclusão de escória, falta de penetração, falta de fusão, mordedura e porosidade, podem se ampliar com o aumento da profundidade da solda (WASTON et al, 1994).

Pesquisas vêm sendo feitas com o objetivo de resolver os problemas inerentes da soldagem molhada, porosidade excessiva, propriedades mecânicas inferiores as soldas ao ar e grande quantidade de hidrogênio no metal de solda. Devido a essa evolução, a soldagem molhada tem sido aplicada com sucesso no reparo de plataformas no Golfo do México (PESSOA, 2007).

Dentre as técnicas operacionais usadas na soldagem subaquática, quatro processos de soldagem a arco têm sido mais empregados nas operações de manutenção e fabricação: GTAW, GMAW, SMAW e FCAW (ASSUNÇÃO, 2018). O processo SMAW é mais utilizado na soldagem subaquática molhada, principalmente nas operações de reparo devido a sua simplicidade (ROWE et al, 2001). As vantagens que justificam a preferência pelo processo SMAW são a simplicidade do equipamento (fonte de energia, cabos, porta-eletrodo e eletrodos impermeabilizados), baixo custo, mobilidade, fácil uso e rapidez de reparo que permitem sua aplicação em locais de clima instável (WERNICKE, 1998).

3.2 Processos de soldagem a arco elétrico utilizadas em soldagem subaquática

3.2.1 SMAW

A soldagem com eletrodo revestido (SMAW) é simples e bastante versátil. O arco elétrico estabelecido entre a ponta do eletrodo revestido e o metal de base produz calor suficiente para promover a fusão do consumível e de parte da junta soldada. As partes metálica e não metálica do eletrodo são transferidos no estado líquido na forma de gotas para o metal de base onde formam a poça de fusão. As interações que determinam a composição química final do metal de solda ocorrem durante a formação e transferência das gotas da ponta do eletrodo para a poça de fusão e também durante o resfriamento e solidificação da mesma. O processo é controlado por meio da seleção dos parâmetros de soldagem (corrente, velocidade de soldagem e ângulo do eletrodo), da composição

química do revestimento, da alma e do metal de base e da temperatura da peça antes, durante e após a soldagem (PESSOA, 2007).

Neste processo, o arco e o metal de solda são isolados do ambiente aquático por um envoltório gasoso ou por bolhas compostas de gases produzidos pela decomposição do revestimento do eletrodo mais oxigênio e hidrogênio dissociados da água (BRACARENSE, 2016)

De acordo com VERMA, 2012, na soldagem subaquática com eletrodos revestidos, os gases gerados pela queima do revestimento causam a formação de bolhas que deslocam a água do arco elétrico e de acordo com PESSOA, 2007, as bolhas atingem volumes críticos e quebram o equilíbrio de forças e em seguida, passam até a superfície onde entram em colapso. Então, uma nova bolha é formada após sua antecessora tornar-se instável, dando continuidade ao ciclo. O fenômeno de ebulição causado pela geração de bolhas neste processo de soldagem é o principal efeito do resfriamento rápido (TSAI et al, 1977).

Segundo BRACARENSE, 2000, a simplicidade do processo torna possível o soldador se deslocar rapidamente para o local de trabalho para um reparo de emergência, uma vez que os equipamentos de soldagem são mais simples. Além disso, pode ser utilizado em várias espessuras de metal base e áreas com acesso limitado. Outra vantagem é de que o metal de solda e os meios de proteção da solda são fornecidos pelo eletrodo revestido, não requerendo equipamento adicional.

3.2.2 GTAW

O processo de soldagem GTAW ou TIG promove a união das peças por arco elétrico entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem. Uma atmosfera gasosa composta de gás inerte, ou uma mistura de gases inertes, protege a poça de fusão e o arco da contaminação do ar atmosférico. A união das peças pode ser feita com ou sem metal de adição, quando usada, é feita diretamente na poça de fusão (MARQUES et al, 2015).

Para o emprego desse processo na soldagem subaquática, utilizam-se artefatos acoplados ao bocal da tocha para isolar o ambiente da água (TEICHMANN, 2000). De acordo com LI et al, 1991, seria possível aplicar o processo TIG com metal de adição pré-colocado e arco protegido por câmara seca, conforme visto na FIG. 3.3. Logo, com as restrições de uso de câmara seca, a qual limita a visibilidade

do soldador, esse processo é restrito a situações muito específicas e limitadas a uma geometria que se adeque a proteção necessária (TEICHMANN, 2000).

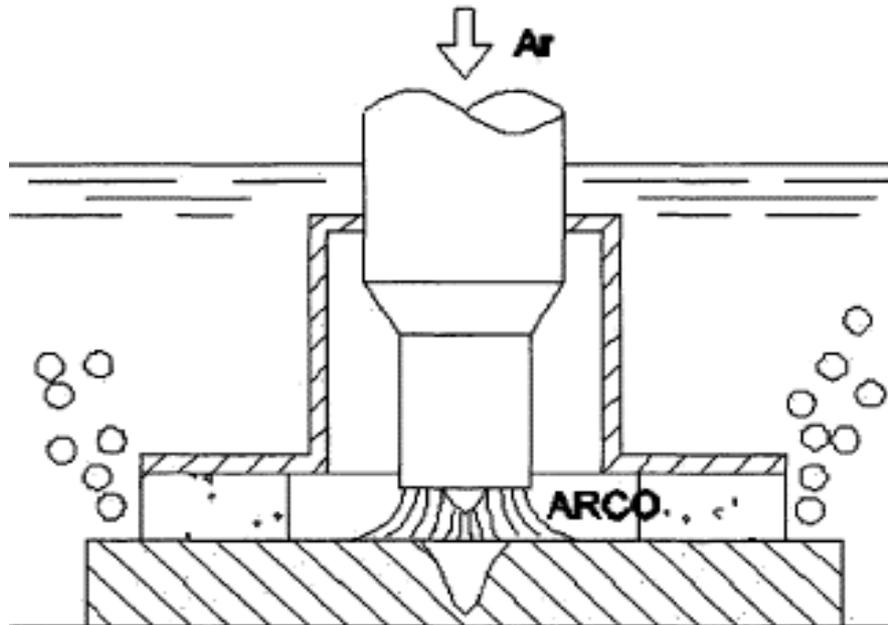


Figura 3.3: Princípio do processo de soldagem GTAW.
Fonte: TEICHMANN, 2000.

3.2.3 GMAW

No processo GMAW, também conhecido como MIG/MAG, a união das peças metálicas ocorre pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nú, consumível, e a peça de trabalho. O arco e a região da solda são protegidos contra contaminação da atmosfera por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes (MIG) ou ativos (MAG). O processo é semiautomático, em que o eletrodo metálico é alimentado mecanicamente de maneira contínua através de um alimentador motorizado (MARQUES et al, 2015).

Encontra-se na literatura algumas tentativas de utilizar o processo GMAW em soldagem subaquática, também utilizando-se das câmaras secas. Como exemplo, ALMEIDA, 1995, desenvolveu um bocal em que uma cortina d'água em alta velocidade isola o ambiente do arco do meio externo, conforme visto na FIG. 3.4. O jato gera uma região de baixa pressão no interior da tocha compensada pela vazão de gás de proteção, criando, assim, uma área seca na região do arco elétrico e da poça de fusão.

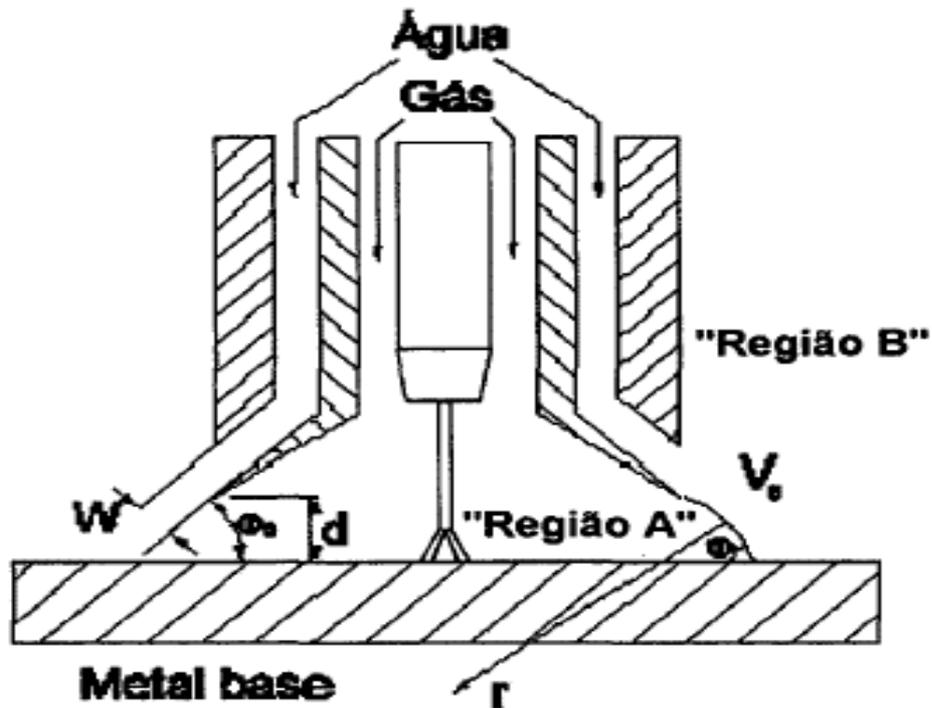


Figura 3.4: Exemplo de esquema para soldagem subaquática GMAW
 Fonte: ALMEIDA, 1995.

Com o aumento da profundidade, deve-se reduzir o diâmetro do eletrodo para aumentar a densidade de corrente e manter o arco estável. Para o processo usual, utilizando a polaridade positiva, ocorre um aumento da penetração, do respingo e maior geração de fumos para maiores profundidades, devido às maiores pressões. Dessa forma, para profundidades maiores do que 30 metros, devido a problemas com arame e grande quantidade de fumos, utiliza-se a polaridade inversa para aumentar a estabilidade do processo (ALMEIDA, 1995).

Nesse processo, as principais vantagens são: soldas de excelente qualidade, com baixo teor de hidrogênio, maior produtividade e velocidade de soldagem, devido alimentação contínua do arame, possibilidade de soldar em todas posições, exige menor habilidade do soldador, é possível obter maior penetração do que no processo SMAW quando utiliza-se da transferência em spray, além de ser facilmente robotizado (MARQUES et al, 2015).

Em relação as limitações desse processo, destacam-se o equipamento mais complexo e caro, se comparado ao processo SMAW, necessidade de vedações mais eficientes para uso em solda subaquática, maior sensibilidade a variações dos parâmetros de soldagem (MARQUES et al, 2015) (ALMEIDA,1995).

3.2.4 FCAW

A soldagem a arco com arame tubular, FCAW, é um processo que produz a coalescência de metais pelo aquecimento desses com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo tubular contínuo, consumível e a peça de trabalho. A proteção do arco e do cordão de solda é feita pela decomposição do fluxo contido dentro do eletrodo. Pode ou não haver suplementação de gases externamente. Além de proteção, o fluxo pode funcionar como desoxidante, refinar o metal de solda, adicionar elementos de liga e estabilizar o arco elétrico, conforme visto na FIG. 3.5 (MARQUES et al, 2015).

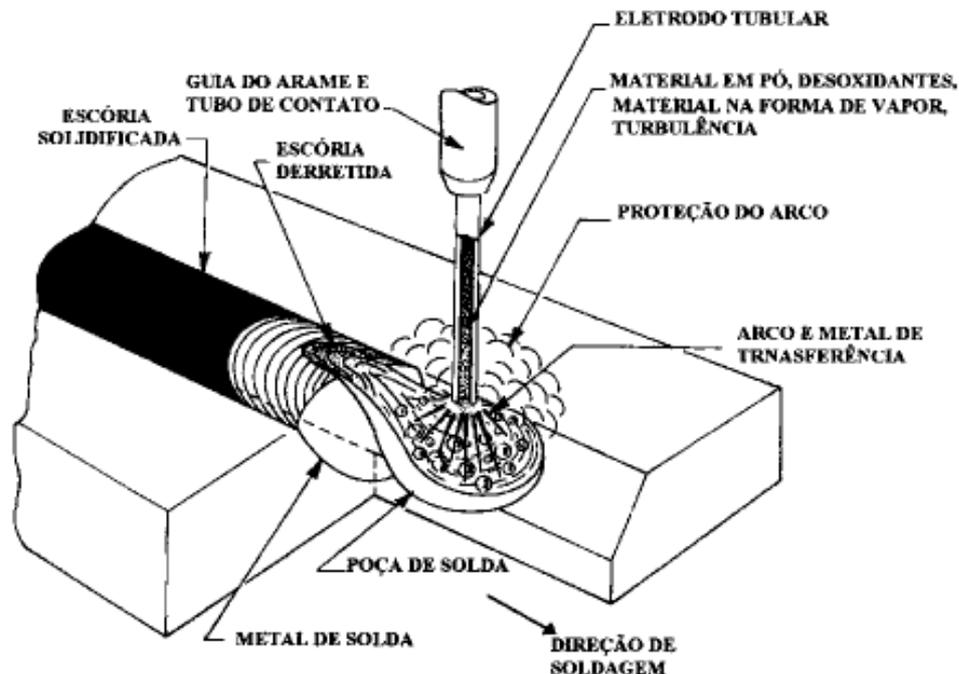


Figura 3.5: Esquema de soldagem FCAW com arame tubular autoprotetido.
Fonte: MARQUES et al, 2015.

Segundo MARQUES et al. 2015, Esse processo é semiautomático, muito semelhante ao GMAW, no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento. Por outro lado, o processo se assemelha metalurgicamente com a soldagem pelo processo SMAW. Dessa forma, o processo de arames tubulares agrega as principais vantagens do processo GMAW como simplicidade, alto teor de deposição, elevado rendimento, alto fator de trabalho do soldador, resultando em elevada produtividade. E apresenta vantagens de possuir o fluxo no interior do eletrodo, com funções semelhantes ao fluxo no processo de eletrodo revestido.

De acordo com TEICHMANN, (2000), o processo FCAW se divide em duas variantes:

- Com proteção adicional, onde um gás, normalmente CO₂, é adicionado pelo bocal da tocha com o objetivo de proteger a transferência e a poça metálica;
- Autoprottegido, onde o gás de proteção é gerado a partir da fusão dos constituintes do fluxo.

Uma vez que o espaço disponível para acomodar o fluxo é limitado, a opção por arames autoprottegidos ou com proteção está intimamente relacionada às propriedades metalúrgicas e mecânicas desejadas nos depósitos.

Para os arames com proteção, a composição do fluxo é direcionada, basicamente, para a obtenção de propriedades metalúrgicas e mecânicas. (TEICHMANN, 2000). Utiliza-se normalmente CO₂ puro, Ar + CO₂ ou Ar + O₂ e é preferível para soldas mais espessas e a escória criada pelo fluxo é facilmente removível. Contudo, em ambientes externos sujeitos a vento, pode-se perder a proteção gasosa e a solda fica com uma porosidade visível. A mistura mais usada no FCAW é 75% de Argônio e 25% de CO₂. O metal de solda depositado com esta mistura possui alto limite de escoamento e resistência a tração quando comparado com o metal depositado com 100% de proteção de CO₂ (BRACARENSE, 2016).

Por sua vez, nos arames autoprottegidos (*self-shielded wires*) são adicionados compostos como metais e materiais voláteis que se decompõem para produzir gases protetores da poça metálica e das gotas em transferência, e que auxiliam na estabilização do arco elétrico. (BRACARENSE, 2016; TEICHMANN, 2000).

Segundo FORTES (2004), as funções básicas dos componentes do fluxo são:

- Desoxidante e formador de nitretos - como o nitrogênio e o oxigênio podem causar porosidade e fragilidade, são adicionados desoxidantes como o manganês e o silício.
- Formadores de escória - compostos formadores de escória como óxidos de cálcio, potássio, silício, ou sódio, são adicionados para proteger a poça de fusão da atmosfera. A escória ajuda a melhorar o perfil do cordão de solda, e escórias de rápida solidificação ajudam a suportar a poça de fusão na soldagem fora de posição. A escória também reduz a taxa de resfriamento, ação especialmente importante quando se soldam aços de baixa liga;
- Estabilizadores do arco - elementos como o potássio e o sódio auxiliam na obtenção de um arco suave e reduzem a quantidade de respingos;
- Elementos de liga - elementos de liga como o molibdênio, cromo, carbono, manganês, níquel e vanádio são empregados para aumentar a resistência, a ductilidade, a dureza e a tenacidade do metal depositado;

- Geradores de gases - minerais como a fluorita e o calcário são normalmente usados para formar uma atmosfera protetora nos arames tubulares auto protegidos.

Os arames tubulares podem ser classificados como Rutílicos, Básicos, Metálicos e Auto-protegidos, dos quais destaca-se o último, utilizado em processos sem gás de proteção [FORTES, 2004]:

3.2.4.1 Arames Tubulares Autoprotégidos

Arames tubulares desenvolvidos para aplicação sem gás de proteção — arames tubulares autoprotégidos (*self-shielded wires*) — contêm outros constituintes para proteger o metal de solda da contaminação atmosférica. Esses constituintes incluem metais e minerais voláteis e materiais que se decompõem para produzir gases protetores, bem como desoxidantes e formadores de nitretos destinados a capturar o oxigênio e o nitrogênio (provenientes do gás atmosférico) que conseguem penetrar na atmosfera protetora (WIDGERY, 1994; FORTES, 2004).

Uso de eletrodos autoprotégidos elimina a necessidade do uso de aparelhos de gás além de ser mais tolerante para condições ao ar livre (FORTES, 2004). A tocha de soldagem utilizada no processo com arames auto protegidos pode ser mais simples, uma vez que não são necessários bocais e difusores de gás (MARQUES et al, 2015).

Sendo um processo de soldagem contínuo, os arames tubulares autoprotégidos são capazes de atingir maiores taxas de deposição que os eletrodos revestidos, e são desenvolvidos para aplicações de soldagem em geral e aplicações específicas como reparos, soldagem fora de posição e soldagem de alta deposição (FORTES, 2004).

Os arames autoprotégidos utilizam uma extensão do eletrodo maior que os arames tubulares com gás de proteção externo. Um comprimento maior de arame além do bico de contato faz a tensão do arco diminuir, já que o arame adicional atua como uma resistência. Isso faz com que o arame aqueça e a corrente diminua, resultando num cordão de solda estreito e raso, que não dilui muito material de base, permitindo que o processo seja aplicado na soldagem de materiais finos em peças de difícil ajuste (WIDGERY, 1994; FORTES, 2004).

Ao contrário dos arames sem proteção, a adição de elementos para produzir propriedades metalúrgicas na solda tem caráter secundário. Como consequência, via de regra, os arames autoprotégidos possuem propriedades mecânicas inferiores àquelas observadas em eletrodos com

proteção. A grande desvantagem do arame auto protegido é a emissão de fumos que são extremamente tóxicos, o que requer o uso de máscara seladora e ventilação adequada para o soldador. (BRACARENSE, 2006; TEICHMANN, 2000).

3.3 Influência dos parâmetros em FCAW

3.3.1 Corrente

De acordo com MARQUES, 2015, a corrente de soldagem é proporcional a velocidade de alimentação do arame para um determinado diâmetro, composição e extensão do eletrodo. Se as outras variáveis forem mantidas constantes, para um determinado diâmetro de eletrodo, o aumento da corrente de soldagem irá provocar aumento da taxa de deposição do eletrodo, aumento da penetração e um cordão de solda convexo com aparência ruim para aumentos excessivos a corrente. Para um valor muito baixo de corrente, o cordão apresenta porosidade e forma irregular.

As gotas de metal fundido são transferidas do eletrodo para a peça a elevadas temperaturas. O calor das gotas de metal contribuem para a fusão do metal de base. À medida que a corrente de soldagem aumenta, a temperatura das gotas de metal aumenta o que resulta em maior quantidade de calor sendo transferida para o metal de base, causando maior penetração do cordão de solda. O aumento na penetração à medida que a corrente aumenta também pode ser associado à maior força do arco elétrico e calor introduzido na poça de fusão, resultando em maior densidade de corrente que provoca a fusão de maior volume de metal de base e, conseqüentemente, maior penetração (MOSTAFA, et al, 2006).

A corrente de soldagem é aumentada ou diminuída através da variação da velocidade de alimentação do eletrodo. Para uma dada taxa de alimentação a corrente vai variar em função da extensão livre do eletrodo. Aumentado a extensão do eletrodo, a corrente de soldagem tende a diminuir e vice-versa MARQUES, 2015.

3.3.2 Tensão

A tensão de soldagem ou tensão do arco é uma variável significativa quanto à geometria da solda, a aparência e a penetração, pois afeta tanto o modo de transferência metálica como o comprimento do arco. A largura do cordão de solda é uma função da potência do arco. Para uma corrente de soldagem constante, o aumento da tensão resulta num aumento da largura do cordão de solda, (WAINER et al., 1992; MARQUES, 2015).

De acordo com BRACARENSE, 2000 e MARQUES *et al*, 2015, para altas tensões (comprimento de arco maior) podem ocorrer:

- Respingos excessivos e contorno irregular do cordão de solda;
- Em eletrodos autoprotetidos, o aumento da tensão pode provocar aumento na absorção de hidrogênio;
- Com eletrodo de aço baixo carbono podem causar porosidades;
- Em eletrodos de aço inoxidável podem originar trincas pela redução do teor de ferrita no metal depositado;
- Aumentam a tendência a formação de respingos e mordeduras;
- Extinção do arco elétrico (para valores excessivos).

Para tensões baixas (arco menor), podem acontecer:

- Uma superfície estreita;
- Excesso de respingos;
- Redução de penetração;
- Porosidade e sobreposição.

Dessa forma, é fundamental a escolha de uma faixa de tensão adequada para cada diâmetro de arame e corrente de soldagem de forma a produzir uma determinada taxa de deposição e penetração desejada. Essas informações são muitas vezes fornecidas pelo fabricante do arame tubular e variam ainda de acordo com a composição do fluxo (básico, rutílico, metálico, etc).

3.3.3 Velocidade de alimentação do arame

A velocidade de alimentação tem uma relação direta com a corrente de soldagem e inversa com o comprimento do arco, de forma a governar o fluxo de corrente, ou seja, quanto maior for a velocidade de alimentação, maior será a corrente fornecida pela fonte de modo a fundir o arame alimentado à poça de fusão (WAINER, et al., 1992).

Na FIGURA 3.6, é evidenciada a proporcionalidade direta da velocidade de alimentação do arame com a corrente, que é fornecida pela fonte para fundir o arame e alimentar a poça de fusão e a relação inversa ao comprimento do arco (WAINER *et al.*, 1992)

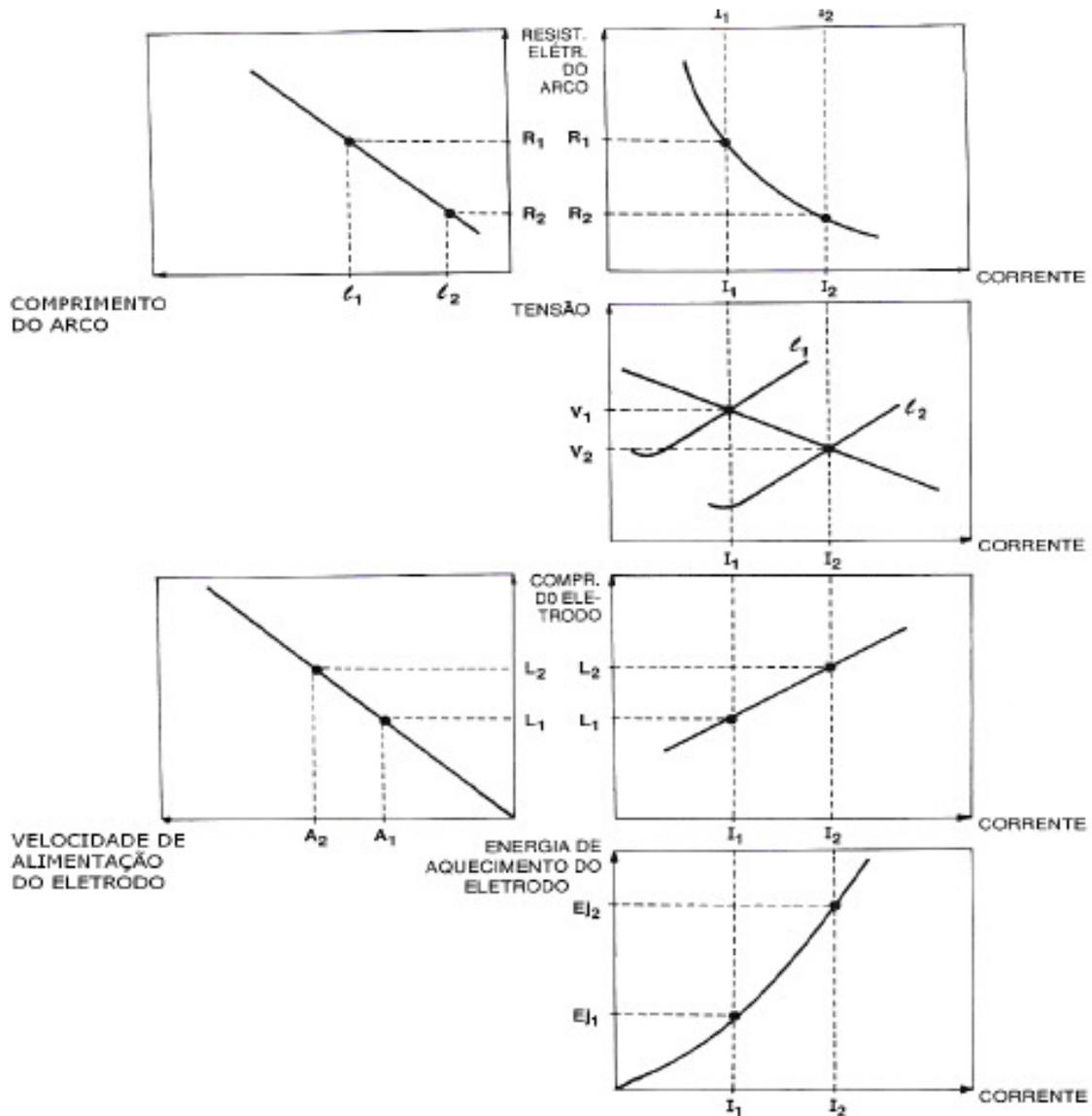


Figura 3.6: Influência da velocidade de alimentação do arame na corrente de soldagem. R =resistência elétrica do arco, l =comprimento do arco, v = tensão, L = comprimento do eletrodo, A = velocidade de alimentação do eletrodo, E_j = energia de aquecimento do eletrodo, I = corrente.

Fonte: WAINER *et al.*, 2011

Foi observado por STARLING et al, 2011, que um aumento da velocidade de alimentação do arame (associada a um aumento proporcional na velocidade de soldagem) eleva os valores médios de corrente e tensão de soldagem e tende a reduzir a estabilidade operacional com proteção de CO_2 puro e aumentá-la com proteção de $75\%Ar-25\%CO_2$. Não foram observadas variações significativas nas discontinuidades (porosidade, inclusões de escória e mordedura) e na microestrutura do cordão em função de variações na velocidade de alimentação do arame, embora tenham sido observadas reduções na dureza e variações no formato do cordão.

Elevados valores da velocidade de alimentação do arame geram altas intensidades de correntes, o que pode acarretar em mordeduras, ao passo que baixos valores podem gerar uma solda com falta de

penetração, falta de fusão e formato irregular, alterando com isso a morfologia do cordão de solda. Variações inesperadas ou controladas de forma inadequada da velocidade de alimentação do arame são causas frequentes de instabilidade do processo de soldagem. (RODRIGUES, 2010; WAINER, 1992).

3.3.4 Velocidade de soldagem

Velocidade de soldagem é a taxa linear na qual o arco se movimenta ao longo da junta. Quando todas as outras variáveis são mantidas constantes, penetração máxima do cordão de solda é obtida para uma velocidade de soldagem intermediária. Trata-se de um importante fator na produtividade do processo MARQUES, 2015.

Quando a velocidade de soldagem diminui, a quantidade de material depositado por unidade de comprimento aumenta. Com velocidade de soldagem muito baixa, o arco elétrico incide com maior intensidade sobre a poça de fusão do que sobre o metal de base, reduzindo assim a penetração efetiva do cordão de solda, resultando em um cordão mais largo. Velocidades de soldagem relativamente baixas permitem que gases escapem do metal líquido, devido ao maior tempo no estado fundido, o que reduz a porosidade, porém podem causar problemas metalúrgicos devido à quantidade de calor cedido à peça e elevar o custo da operação (MARQUES et al, 2015; OMANEJE et. al., 2014).

Um aumento na velocidade, mantendo os demais parâmetros constantes, resulta em menor distorção, zona termicamente afetada mais estreita e redução nas dimensões do cordão. Velocidade de soldagem excessiva tende a causar mordeduras, devido a deposições insuficientes de metal e trincas por solidificação MARQUES, 2015.

Em qualquer valor de corrente de soldagem, a largura do cordão é inversamente proporcional à velocidade de soldagem, como visto na FIG.3.7. Mantendo fixa a distância entre o bico de contato e a peça de trabalho, o aumento na velocidade de soldagem reduz a altura do reforço do cordão. A porcentagem de diluição do metal de base aumenta com o aumento da velocidade de soldagem, à medida que a quantidade de metal depositado diminui a área da seção transversal do cordão diminui (KANNAN et al, 2006).

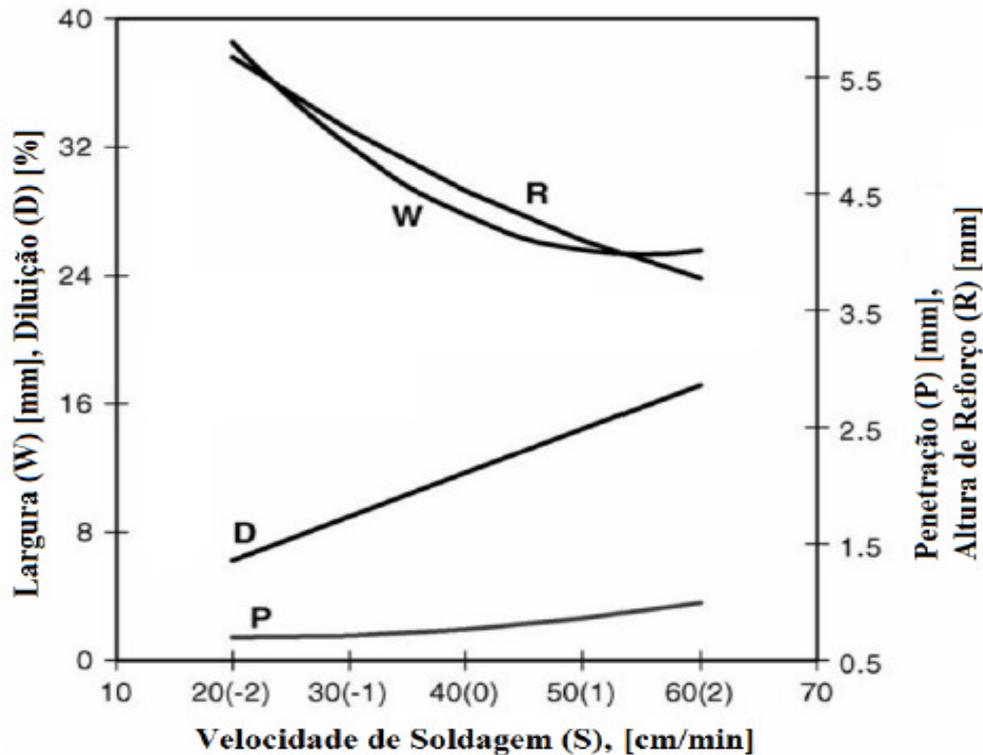


Figura 3.7: Efeito da velocidade de soldagem na geometria do cordão.
Fonte: KANNAN et al, 2006.

3.3.5 Distância entre bico de contato e peça (DBCP)

A distância entre bico de contato e peça, também conhecida como “Stick out” é o comprimento não fundido do eletrodo a partir do bico de contato até a peça. A DBCP é diretamente proporcional ao calor gerado por Efeito Joule ($R \cdot I^2$) e indiretamente proporcional a corrente de soldagem necessária para fundir o arame (BRACARENSE, 2000).

De acordo com WAINER, et al, 1992, a DBCP também é um parâmetro importante na energia de soldagem. Essa energia tem dois componentes, um decorrente do arco elétrico dado por $V \cdot I$, e outro que é a energia de aquecimento do arame tubular por efeito Joule, dado por $(R \cdot I^2)$. Como pode ser visto na FIG. 3.8, aumentando-se a distância entre bico de contato e peça (l_1 para l_2), há um aumento na tensão (V_s para V') e conseqüentemente, reduz-se a corrente de soldagem e a energia, para uma dada curva da fonte de soldagem.

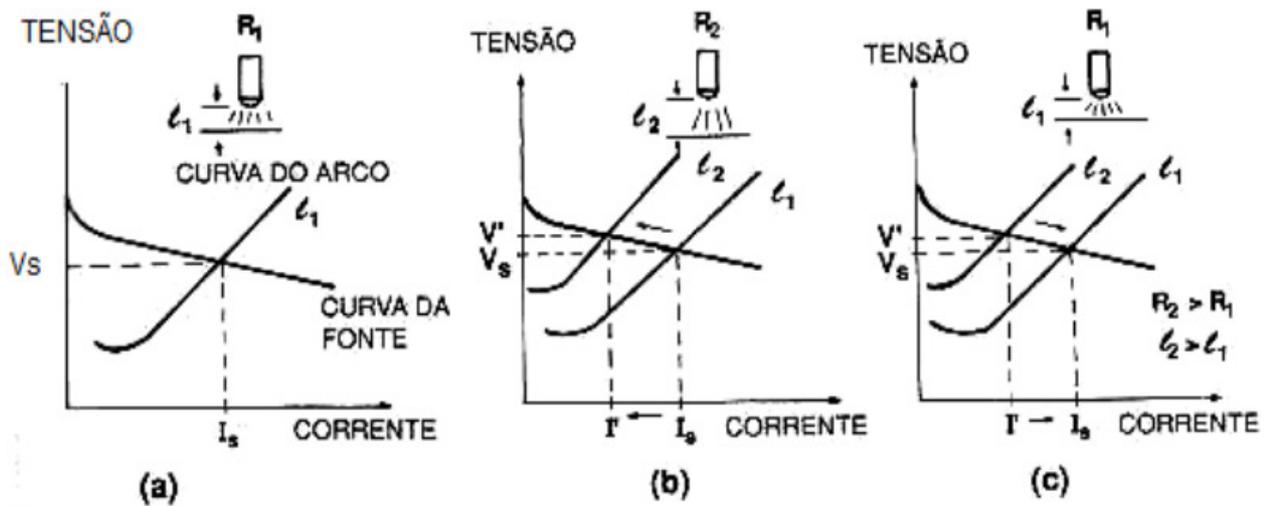


Figura 3.8: Efeito da distância bico de contato peça na tensão e na corrente de soldagem.
 Fonte: WAINER, *et al.*, 1992.

Outro fator influenciado pela DBCP é a taxa de deposição, pois dentro de certos limites, o aumento da DBCP pode ser utilizado para aumentar a taxa de deposição (MARQUES et al, 2015). Esses limites são mostrados TAB 3.1, na qual estão correlacionadas as variações de DBCP, corrente de soldagem e V de alimentação do arame com os resultados sobre a taxa de deposição.

Tabela 3.1: Efeito da DBCP sobre a corrente de soldagem e taxa de deposição.

Fonte: RODRIGUES, 2010.

Parâmetros de soldagem	Stickout					
	10	18	25	10	18	25
DBCP (mm)	10	18	25	10	18	25
I (A)	330	300	270	300	300	300
V_{alim} (m/min)	9,5	9,5	9,5	8,0	9,5	11,0
TD (kg/h)	5,0	5,0	5,0	4,2	5,0	5,8

3.4 Processo FCAW subaquático

No processo de soldagem por eletrodo revestido, ocorrem fortes mudanças de ciclos térmicos devido as constantes trocas de eletrodos, o que provoca uma série de defeitos e microestruturas desfavoráveis. Este fenômeno não ocorre na soldagem com eletrodo tubular, devido à alimentação contínua do arame. Além disso, é um processo mais produtivo e propicia maior conforto ao soldador (ANDRADE, 1995). Estes fatos tomam-se ainda mais importantes na soldagem subaquática molhada devido a reduzida capacidade de mergulho dos soldadores. Isto explica o grande número de pesquisas e, conseqüentemente, o desenvolvimento que o eletrodo tubular apresenta nos últimos anos

Devido ao ambiente aquoso, esse processo de soldagem é afetado pela profundidade (pressão), no qual tem um efeito significativo na soldagem subaquática. Os arcos são constrictos pela pressão hidrostática e a capacidade de resfriamento pelos grandes volumes de água é enorme. Isto resulta em temperaturas do arco maiores do que as alcançadas na superfície, um aumento na penetração e uma transferência de metal mais rápida. Com a constrição, o diâmetro do arco diminui e um aumento nos valores de corrente é necessário para restabelecer seu diâmetro. Esse aumento da corrente resulta também em diminuição da velocidade de resfriamento. O efeito da pressão também pode levar à decomposição de alguns gases e à perda de elementos químicos. Em segundo momento, os arcos tendem a ser mais suaves na água do mar do que em água doce, devido à ação estabilizadora dos íons salinos presentes na água do mar, que são dissociados pelo arco (MARQUES et al, 2015).

Nesse processo, o modo de transferência metálica se difere do processo realizado ao ar. GUO et. al., 2015, relata que à medida que a bolha de vapor cresce e destaca ela promove uma força de arrasto na direção contrária à transferência metálica. A gota de metal formada acima da poça de fusão sofre efeito da força de arrasto da bolha de vapor, diferente do que acontece no processo realizado ao ar. O modo de transferência metálica na água é, então, uma combinação do modo globular repelido com o curto-circuito. A gota de metal cresce na ponta do arame tubular, retida por forças eletromagnéticas e de tensão superficial, e é repelida por forças de repulsão. O modo de transferência por curto-circuito ocorre em uma frequência menor devido ao tempo de crescimento da gota.

A soldagem subaquática molhada com arame tubular sofre influencia pela profundidade de realização do processo e também por outros fatores, como corrente e tensão de soldagem, velocidade do arame e de soldagem e a distância entre bico de contato e peça. O entendimento de como esses parâmetros influenciam no processo subaquático FCAW é fundamental para otimização dos parâmetros de soldagem e obtenção dos melhores cordões de solda.

3.5 Efeito da água no processo de soldagem subaquática

Devido às diferenças das condições ambientes na soldagem subaquática FCAW em relação ao processo fora d'água a atmosfera do arco subaquático é consideravelmente diferente. A água circundante influencia significativamente no comportamento do arco, na transferência metálica e nas propriedades mecânicas e metalúrgicas da solda (JIA, 2013).

A água é a principal responsável pela má qualidade da solda em soldagem molhada, em relação as soldas produzidas ao ar, gerando porosidade elevada e baixa tenacidade (ISIKLAR et al, 2011). As taxas de resfriamento em soldas subaquáticas molhadas são de 10 a 15 vezes mais rápidas que as soldas feitas ao ar (GOOCH, 1983). No ambiente molhado a taxa de resfriamento varia entre 800 °C/s e 500°C/s, já no ambiente seco é comum uma taxa entre 415 °C/s e 55 °C/s (CHRISTENSEN, 1983). Em condições subaquáticas molhadas o resfriamento rápido do metal de solda é consequência das perdas de calor na superfície da solda por meio do arco elétrico. Maiores aportes térmicos devem ser requeridos com aumento da profundidade.

É comum o uso de correntes mais altas em soldagem subaquática molhada do que na soldagem convencional ao ar. Por exemplo, utilizando um eletrodo revestido rutílico de 3,25mm de diâmetro na posição plana, utilizam-se valores em torno de 160A para soldas molhadas e 110A para soldas ao ar (SILVA, 2012).

De acordo com BRACARENSE, 2017, em geral, a tensão necessária na soldagem subaquática é maior do que na soldagem na superfície. Isto é devido aos seguintes fatos:

- Com o aumento da profundidade (pressão), o diâmetro da coluna do arco diminui e como mais corrente estará disponível (densidade de corrente aumenta), a tensão tende a diminuir. Por outro lado para manter o mesmo aporte de calor durante a soldagem a tensão deve aumentar.
- Devido ao rápido resfriamento, uma maior quantidade de calor se dissipa para a água e um maior aporte de calor é necessário. Com isso, uma tensão maior é necessária.
- O alto hidrogênio presente na região do arco aumenta a resistência elétrica da região o que ocasiona uma maior tensão.

Em um estudo, IBARRA et al, 1989. Verificou a influência da corrente (I) e da tensão (V) sobre o percentual de hidrogênio difusível (H_D) introduzido no metal de solda, chegando à seguinte

conclusão: o aumento da tensão é prejudicial pois aumenta o teor de H_D , enquanto que o aumento da corrente reduz a quantidade de H_D .

Os principais problemas associados com a soldagem molhada são de ocorrência físicas e descontinuidades metalúrgicas como descritos por LIU et al, 1993:

No metal de solda:

- Perda de elementos de liga,
- Porosidade,
- Trincamento por solidificação.
- Trincamento por hidrogênio,

Na ZTA:

- Dureza excessiva
- Trincamento por hidrogênio

A densidade de corrente nas soldas subaquáticas chega a ser de 5 a 10 vezes maior do que as densidades de corrente das soldas feitas na superfície.

ANDRADE, 1995 relata que nas soldagens realizadas com FCAW ocorrem constantes problemas de interrupções de processos. Essas interrupções e sua influencia sobre o acabamento superficial dos primeiros testes deveram-se a problemática de transferência de corrente do bico de contato para o eletrodo. Verificou-se que na transferência de corrente, devido a presença de água, ocorrem faiscamentos que causam microfusões do arame-eletrodo no bico de contato interrompendo o processo. Este problema tem sido atacado de maneiras distintas: a) prolongamento do bico com material não condutor e injeção de gás sobre pressão no orifício de contato para expulsão da água da região de transferência, b) utilização de novos materiais para o bico de contato c) variação da indutância da fonte e d) aceleração do arame na abertura do arco pelo potenciômetro de acendimento do arco.

WANG, et al, 2018 investigaram o processo de soldagem FCAW realizado em três condições diferentes: subaquática molhada, subaquático com barreira mecânica para manter a bolha na região do ar e o processo tracional realizado ao ar. A restrição mecânica utilizada mantém as bolhas por mais tempo protegendo o arco elétrico e a poça de fusão. O efeito adverso da elevada taxa de resfriamento não é desprezível se comparado ao processo ao ar, no entanto, o dispositivo desempenha um importante papel na estabilização do arco e na qualidade da solda.

Em pesquisa recente, ASSUNÇÃO, 2018, desenvolveu uma tocha que possibilita o processo de soldagem com o bico de contato seco. Esse dispositivo possui um sistema de vedação removível na saída do arame tubular, que impede a entrada de água na região do bico de contato, de forma que o arco elétrico permaneça na água. A vista isométrica e principais medidas podem ser visualizadas na FIG.3.9. Além disso, o dispositivo de vedação fixado na capa frontal da tocha permite que o arame passe de forma suave, sem interrupções e sem promover esforços excessivos no mecanismo de alimentação. Os cordões de solda apresentam melhor aparência e forma mais regular, e o processo se manteve mais estável, com menores variações de tensão e corrente e apresentando menores interrupções devido a extinção do arco e curto circuitos.

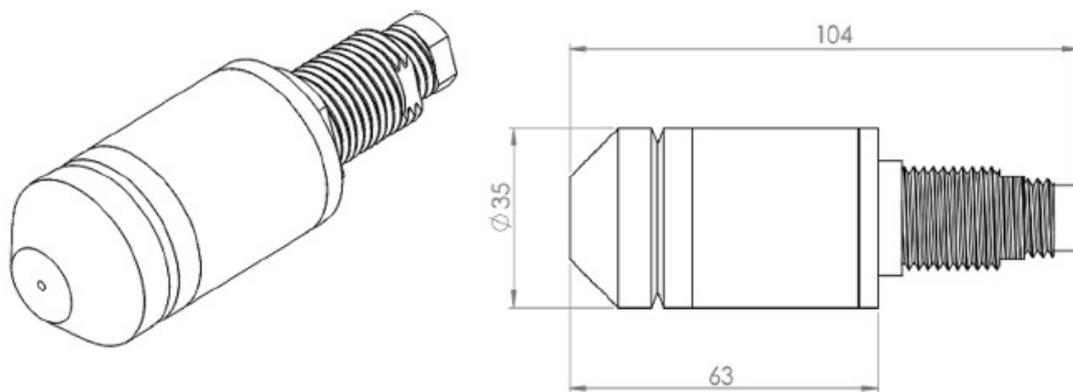


Figura 3.9: Vista isométrica e dimensões principais da tocha.
Fonte: ASSUNÇÃO, 2018.

ASSUNÇÃO, 2017 analisou o efeito da água no bico de contato e apresentou em forma de oscilogramas, comparando as duas situações, conforme FIG.3.10. Nos ensaios nos quais o bico de contato se manteve seco, observa-se uma maior uniformidade dos oscilograma de tensão e corrente de soldagem, com menores variações em torno do valor médio.

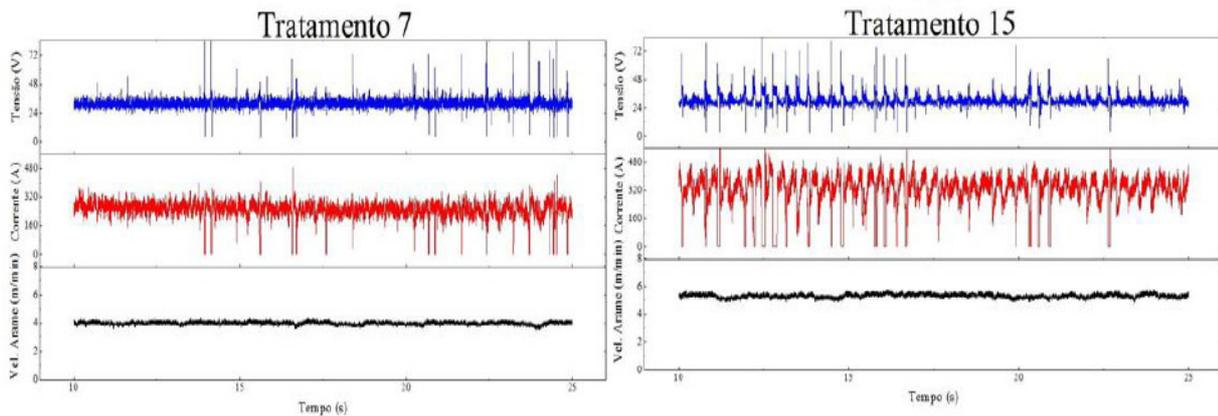


Figura 3.10: Ciclogramas. Em (a), processo com bico de contato seco e em (b) processo com bico de contato molhado. Fonte: ASSUNÇÃO, 2017.

3.6 Dinâmica de formação das bolhas

Há uma importante variável em soldagem subaquática molhada que está relacionada com as bolhas de gases que se deslocam do arco elétrico e da poça de fusão para a água. Essas bolhas, circundantes ao arco elétrico são formadas continuamente, contendo átomos de hidrogênio e oxigênio dissociados bem como gases provenientes da queima do eletrodo (vapor metálico e fluxo). Por se formar neste ambiente, a estabilidade do arco e do processo de transferência passa a ser diretamente influenciada 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 destacamento das bolhas, o arco extingue e cria uma situação de instabilidade no processo de transferência (TEICHMANN, 2000; TSAI et al, 1979).

WANG, 2018 apresentou o formato típico da bolha de soldagem subaquática com arame tubular flux cored, conforme visto na FIG. 3.11, onde é possível visualizar o surgimento de uma bolha que protege a poça de fusão e parte do arco elétrico, enquanto uma bolha formada anteriormente também contribui para a proteção do arco, em um processo contínuo.

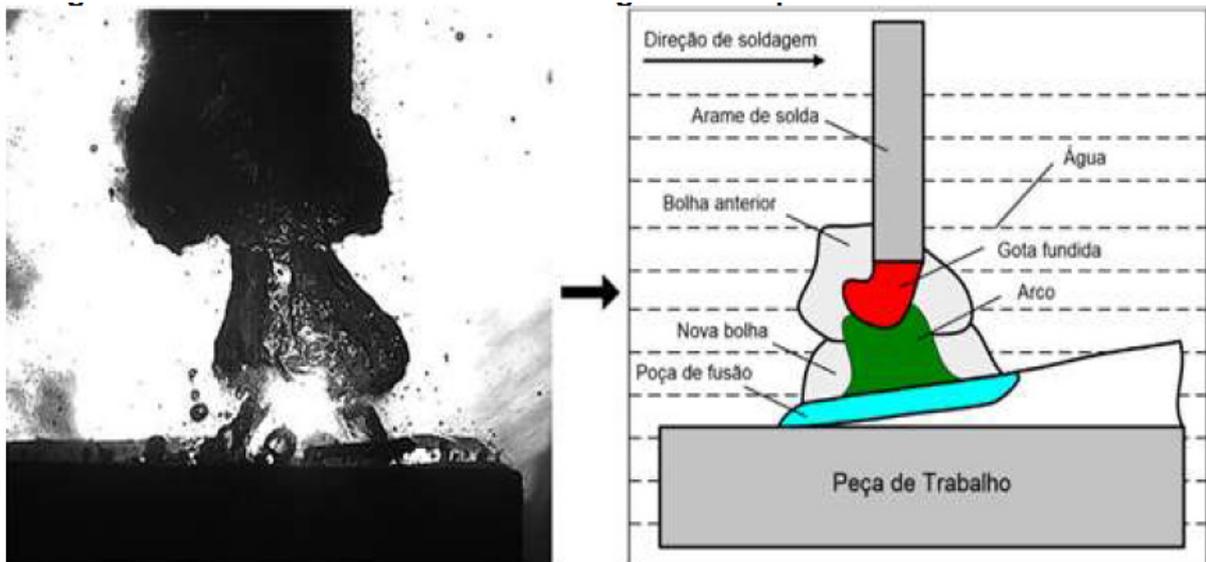


Figura 3.11: Formato da bolha na soldagem subaquática com arame tubular.
Fonte: FENG et al, 2017.

O volume da bolha e densidade dos gases varia substancialmente com a profundidade. De acordo com a Lei de Boyle, o volume da bolha diminui com o aumento da pressão. Em baixas pressões, o surgimento, crescimento e ascensão da bolha ocorrem em maior frequência do que em profundidades maiores. Deve-se ressaltar que a existência de bolha de vapor em soldagem subaquática pode ser benéfica ou prejudicial, dependendo da situação. De certa forma, a bolha de ar pode trabalhar como uma espécie de “colchão térmico”, diminuindo a taxa de resfriamento do metal de solda. Isto pode ser benéfico no que tange a microestrutura do metal de solda e zona termicamente afeta. As soluções para o problema da bolha a baixas pressões poderiam estar na reformulação do revestimento do eletrodo e inovação nos detalhes dos projetos das juntas soldadas (WELDING HANDBOOK, 1996).

Além disto, outro fator que influencia o diâmetro da bolha é a velocidade de alimentação. No processo com arame tubular flux-cored, FENG, et al, 2017 relata que o aumento da velocidade de alimentação resultou em bolhas de maior diâmetro e menor frequência de destacamento, para toda a faixa estudada, entre 4,5 e 10,5 m/min, conforme visto na FIG. 3.12. Verifica-se que há uma relação inversa entre o diâmetro máximo e a frequência de destacamento da bolha.

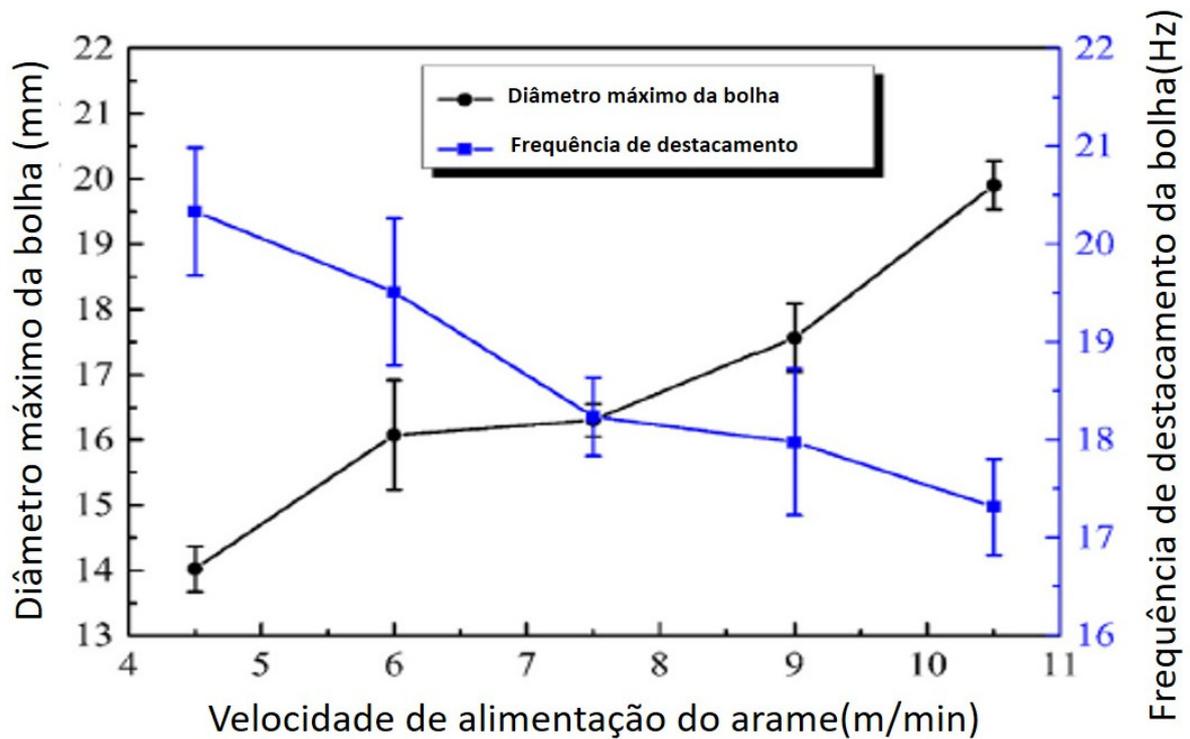


Figura 3.12: Efeito da velocidade de alimentação de arame no diâmetro máximo e na frequência de destacamento da bolha.

Fonte: FENG et al, 2017.

Ainda nesse estudo, FENG et al, 2017 relatou um aumento do diâmetro máximo das bolhas e redução da frequência de destacamento com o aumento da tensão, mantendo-se a velocidade de alimentação constante, conforme FIG. 3.13. GUO, et al, 2015 demonstrou que o comprimento do arco elétrico aumenta com o incremento da tensão do arco durante a soldagem subaquática, devido ao aumento da área efetiva de ação do arco.

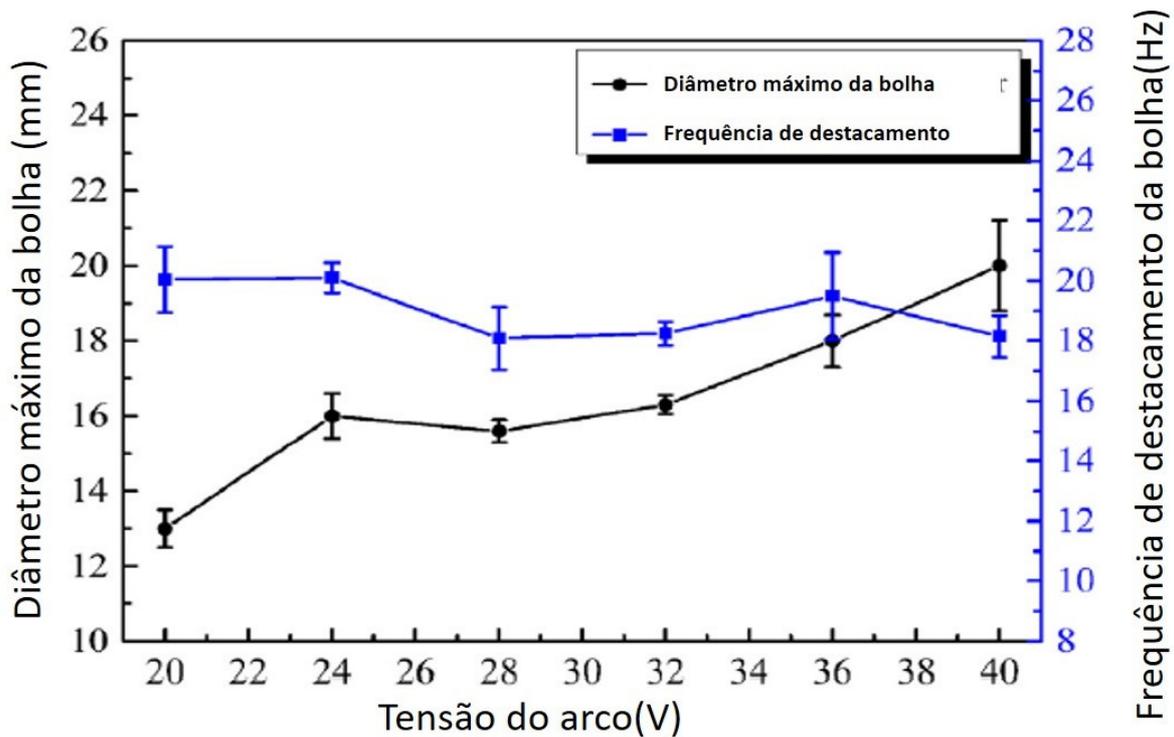


Figura 3.13: Efeito da velocidade da tensão no diâmetro máximo e na frequência de destacamento da bolha.
Fonte: FENG et al, 2017.

TSAI et al, 1977 encontraram valores para o raio máximo e frequência de destacamento das bolhas para os eletrodos E6013 e E7014 por meio de um modelo idealizado para o crescimento e formação das bolhas em um orifício em uma placa, que segundo observado era bastante semelhante ao ocorrido na soldagem. Para os valores de frequência de destacamento das bolhas chegaram a uma taxa de 15 bolhas/segundo para o eletrodo E6013 e 14 bolhas/segundo para o eletrodo E7014. Nesse mesmo trabalho, os autores também fizeram a análise da formação das bolhas através da filmagem em alta velocidade da soldagem, chegando a uma taxa de destacamento de 13 bolhas/segundo para ambos os eletrodos, valores bem próximos aos calculados pelo modelo matemático.

OLIVEIRA, 2012, realizou a soldagem subaquática molhada com os eletrodos E6013, E7024 e E7018, encontrando uma média de 10, 8 e 11 bolhas/segundo, respectivamente. Os valores divergiram do modelo matemático desenvolvido por TSAI et al, 1977 e evidenciaram uma possível relação do fenômeno de destacamento com o tipo de eletrodo utilizado, tendo em vista os diferentes valores encontrados.

O fenômeno das bolhas relaciona-se diretamente com os modos de transferência de calor. De acordo com Pope et al, 1995, na soldagem subaquática molhada, dois estágios de transferência de calor devem ser considerados. No primeiro estágio, a presença da bolha de vapor gera uma espécie de isolante térmico, onde a transferência de calor ocorre semelhantemente à realizada na atmosfera,

predominantemente por condução. No segundo estágio, à medida que o arco elétrico avança a bolha de vapor não se encontra mais sobre o metal de solda, propiciando alta taxa de transferência de calor por convecção entre o metal de solda e o ambiente. Assim, neste segundo estágio, a transferência de calor ocorre preferencialmente por convecção.

3.7 Modo de evolução das bolhas

Segundo FENG et al, 2017, após observações e análises realizadas com diferentes parâmetros de soldagem subaquática molhada, foi possível classificar os modos de evolução de bolhas em quatro modos.

O primeiro modo consiste na geração de bolhas com diâmetros menores, tendo como o principal fator o uso de baixa velocidade de alimentação do arame, conforme visto na FIG 3.14. Nesse modo de evolução da bolha, o colapso da bolha ocorre na área de queima de arco, deixando-a completamente exposta no ambiente da água, fazendo com que o arco de soldagem seja sempre extinto (FENG et al, 2017).

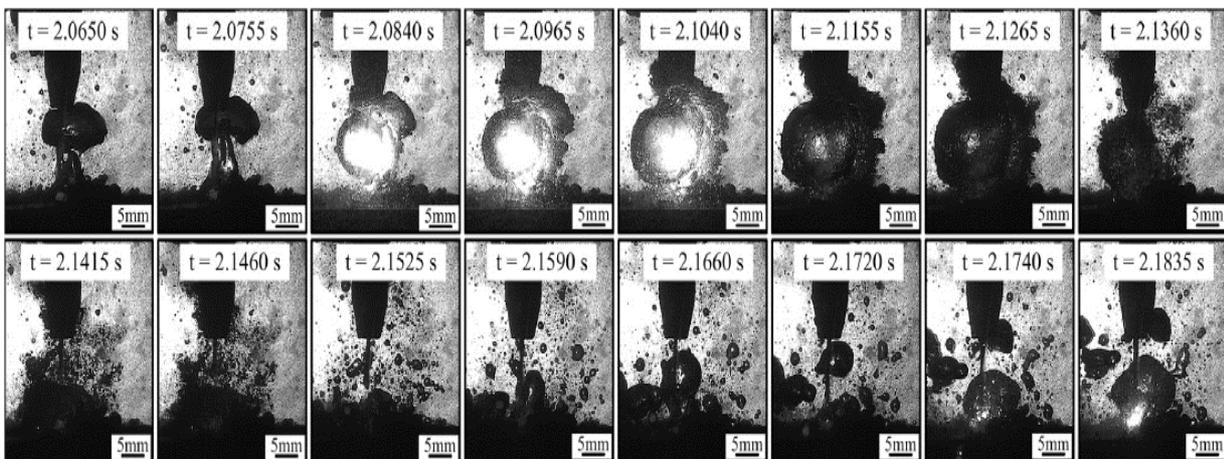


Figura 3.14: Comportamentos dinâmicos da bolha e do arco de solda no primeiro modo de evolução de bolhas. Fonte: FENG et al, 2017.

No início do processo de evolução, a bolha permanece na poça de fusão. Devido a baixa velocidade de alimentação, a bolha tende a ser bem pequena e seu volume não é possível de obter. Como a evolução da bolha ocorre no estágio de crescimento, o volume da bolha é muito pequeno para proteger de maneira efetiva a área de queima do arco, tornando possível que a bolha estoure junto a solda. Dessa forma, a área de queima do arco fica completamente desprotegida, e devido a exposição direta

à água, ocorre a extinção do arco, com a corrente de soldagem aproximando-se de zero. A tensão do arco entra em um estágio de “circuito aberto” caracterizado por alta tensão. Como a alimentação do arame é contínua, ele toca a chapa e reabre o arco, reiniciando o processo. Dessa forma, ocorre um fenômeno de extinção sucessiva do arco elétrico, indicando o colapso frequente das bolhas e uma baixa estabilidade do arco (FENG *et al*, 2017).

O segundo modo de evolução de bolhas é caracterizado por uma elevação da velocidade de alimentação do arame (de 4,5m/min para 6m/min) e o colapso da bolha não ocorre na região da solda, contribuindo para uma maior estabilidade do arco elétrico. Conforme visto na FIG.3.15, a bolha forma-se na poça de fusão, e cresce até que ocorra o surgimento de uma nova bolha que impele a bolha inicial para fora da região do arco e da solda. 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 (FENG *et al*, 2017).

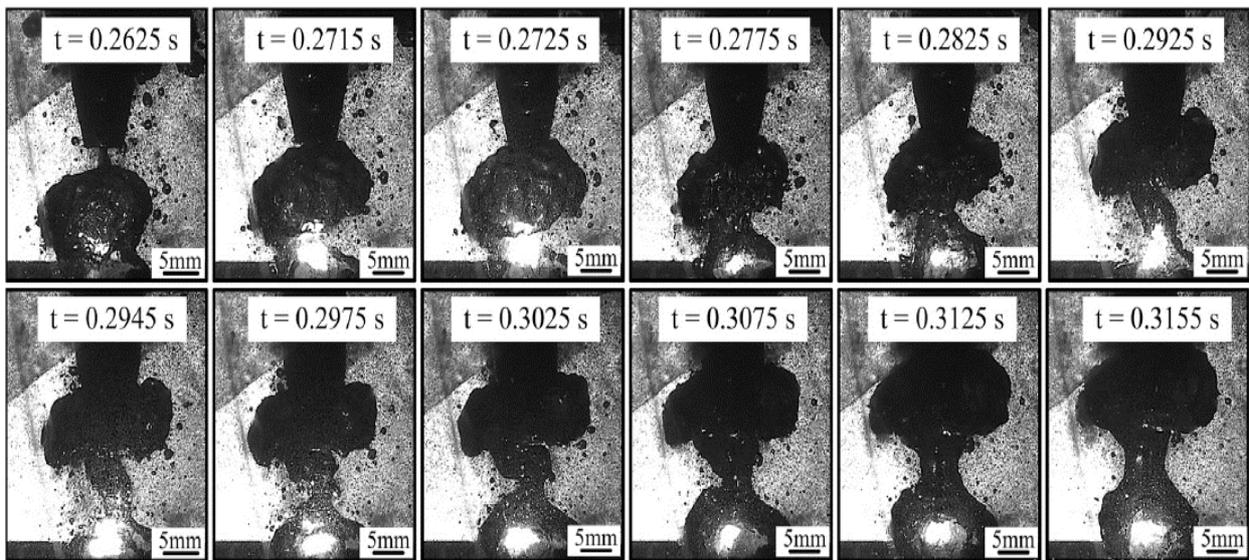


Figura 3.15: Comportamentos dinâmicas da bolha e do arco de solda no segundo modo de evolução de bolhas.
Fonte: FENG *et al*, 2017.

No terceiro modo, à medida que a velocidade de alimentação do arame continua aumentando, a frequência de formação da bolha diminui, de forma que mais gases sejam produzidos e absorvidos pela bolha, levando a um aumento em seu tamanho. Na FIG. 3.16 é possível ver o terceiro modo de evolução de bolhas. Assim como no segundo modo, a bolha cresce gradualmente e permanece na região do arco elétrico por um período de tempo, ocorre o surgimento de uma nova bolha e há uma enorme área efetiva em contato com a bolha anterior, com isso as duas bolhas juntas cobrem a área de queima de arco, consequentemente um melhor efeito protetor pode ser realizado sob ação

combinada das duas bolhas. Como a bolha anterior continua a flutuar na água, a bolha recém-formada é capaz de cobrir completamente a área de queima de arco e sua estabilidade é preservada. Esse modo de evolução da bolha é identificado como a evolução ideal para manter um processo de soldagem estável na soldagem subaquática molhada. (FENG *et al*, 2017)

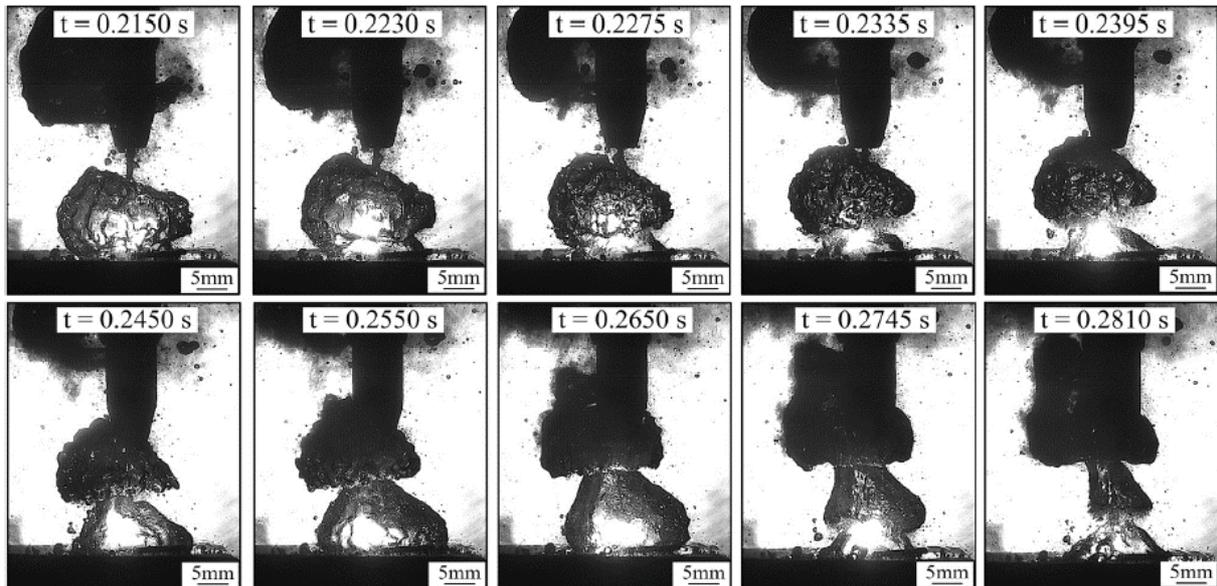


Figura 3.16: Comportamentos dinâmicas da bolha e do arco de solda no terceiro modo de evolução de bolhas. Fonte: FENG *et al*, 2017.

O quarto modo de evolução é observado quando há um aumento da tensão do arco, onde são formadas bolhas de grandes dimensões. Devido ao grande efeito de choque de bolha com maiores dimensões associado ao destacamento periódico das bolhas, a rigidez do arco induzida pela maior tensão do arco, há uma dificuldade em 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 surja antes do destacamento da bolha anterior, removendo assim a camada de gás protetora do arco. Conseqüentemente, o arco é reacendido e uma nova bolha se forma, fornecendo novamente uma atmosfera protetora. O comportamento dinâmico das bolhas nesse modo pode ser visualizado na FIG. 3.17. (FENG *et al*, 2017)

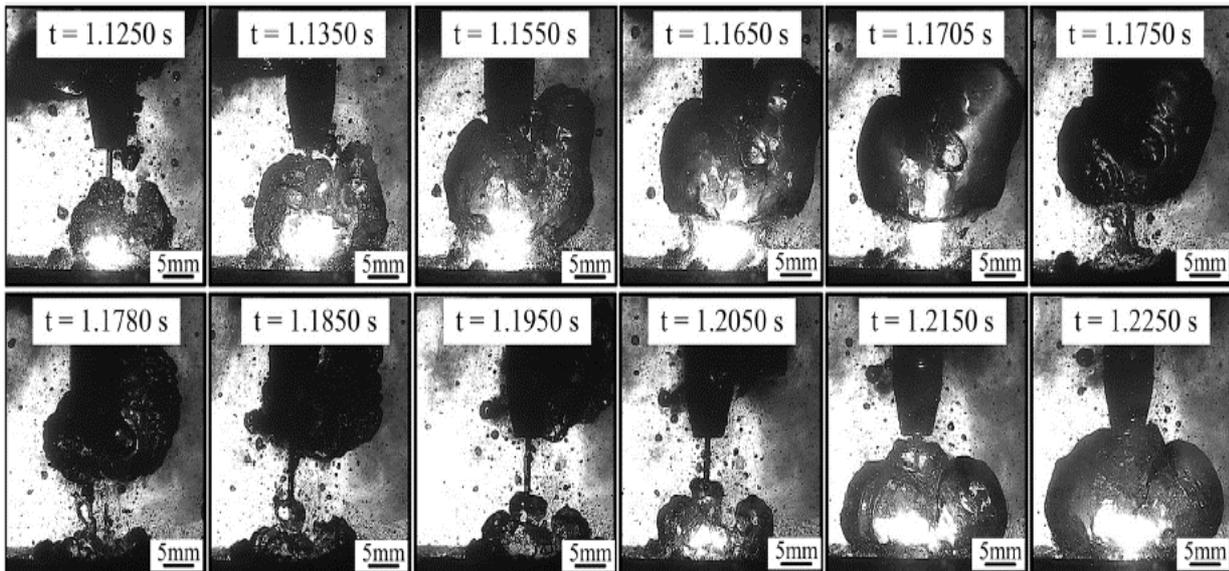


Figura 3.17: Comportamentos dinâmicos da bolha e do arco de solda no quarto modo de evolução de bolhas.
Fonte: FENG et al, 2017

3.8 A estabilidade do arco elétrico na soldagem subaquática molhada

Para a utilização adequada do arco elétrico em uma operação de soldagem é fundamental que esse apresente certo nível de "estabilidade". Extinções frequentes do arco, transferência de metal irregular ou para fora da poça de fusão, variações inesperadas do comprimento do arco ou da sua orientação são outros exemplos de condições associadas com um "arco instável". Como resultado desta condição, pode-se ter uma maior chance da formação de descontinuidades na solda, maior nível de respingos e irregularidades no formato do cordão (MODENESI, 2015).

Em soldagem subaquática molhada, o arco elétrico se torna mais instável com o aumento da pressão hidrostática, conforme pode ser observado na FIG. 3.18. Este comportamento pode ser explicado pelo alto potencial de ionização do hidrogênio que dificulta a sustentação do arco elétrico de soldagem (ASM Handbook, 1993). A faixa de parâmetros que mantém o processo de soldagem estável se torna estreita à medida que a profundidade aumenta (SHI et. al., 2012).

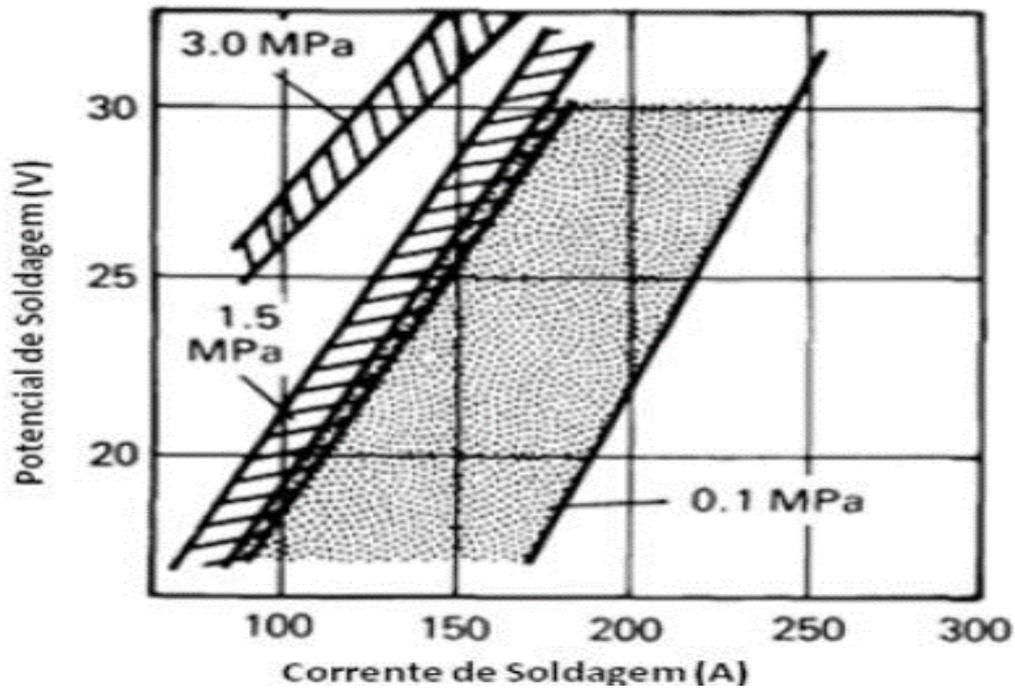


Figura 3.18: Relação dos parâmetros corrente e tensão de soldagem com a profundidade.
Fonte: IBARRA, et al, 1993.

A estabilidade do arco elétrico está diretamente relacionada ao fenômeno das bolhas descrito em tópico anterior deste texto. Segundo ASSUNÇÃO, 2018, o raio da coluna de plasma muda periodicamente acompanhando o movimento das bolhas, causando intensa flutuação nos sinais de corrente e tensão do arco.

Em profundidades maiores, o arco se torna mais instável devido à incapacidade da pressão dos gases gerados pelo calor do arco de equilibrar com a pressão do meio envolvente, levando à maior frequência de colapso das bolhas. Este fenômeno leva à ocorrência de curtos-circuitos anormais, que ocorrem devido ao desprendimento da bolha durante um período de arco estabelecido (TEICHMANN, 2000). POKHONYA et. al. 1989 apud TEICHMANN, 2000 identificaram dois tipos de curtos-circuitos na soldagem molhada com eletrodos tubulares. O primeiro denominado de curto-circuito normal, ocorre pelo contato da gota, ainda presa no eletrodo, na poça de fusão. O segundo tipo de curto-circuito, classificado como anormal, se dá a partir do desprendimento das bolhas de vapor em meio a um período de arco.

Para analisar o efeito da bolha na estabilidade do arco elétrico, WANG et al, 2018 desenvolveram um estudo comparando o processo de soldagem subaquática com eletrodos tubulares auto protegidos convencional com o processo usando uma tocha com uma barreira mecânica que retém a bolha na região do arco, como mostrado na Figura 3.19.

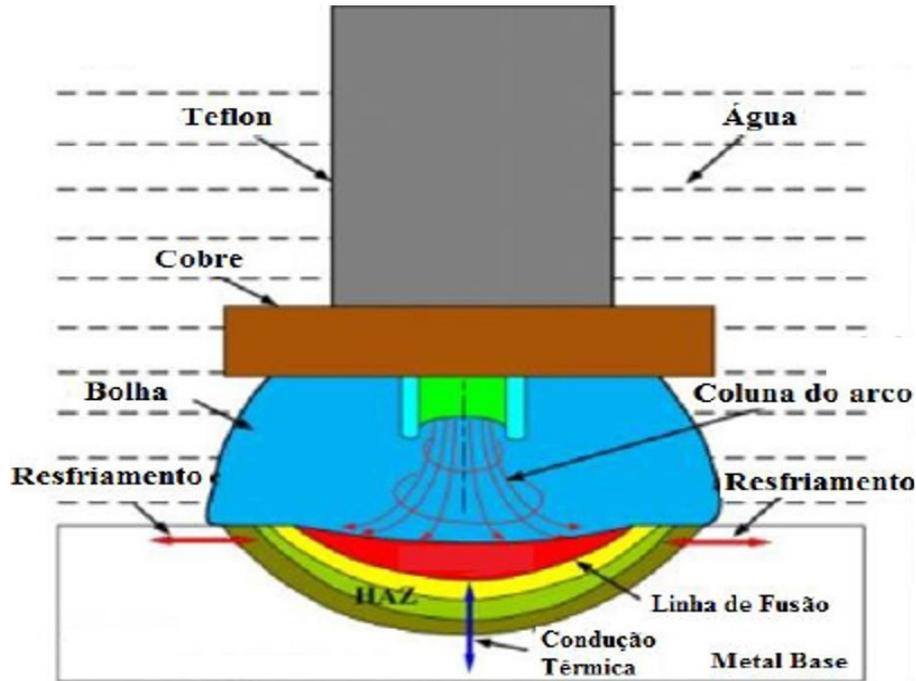


Figura 3.19: Tocha desenvolvida com barreira mecânica para retenção das bolhas.
Fonte: WANG, et al, 2018.

Wang et al. (2018) observaram que os valores de corrente e tensão apresentaram menor variação em torno da média quando a barreira mecânica foi usada na tocha, como mostra a Figura 3.20, quando comparada com o processo convencional subaquático, e maior variação, comparando-se a soldagem ao ar. Dessa forma, o uso da tocha especial promove uma condição intermediária entre a soldagem ao ar e a soldagem subaquática convencional.

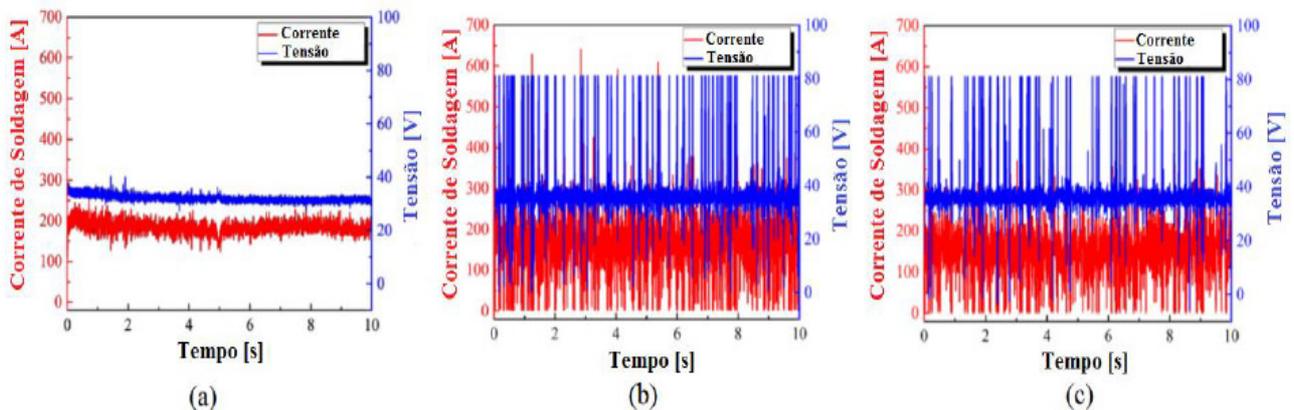


Figura 3.20: Características dinâmicas de tensão e corrente de soldagem para três condições: a) soldagem ao ar; b) soldagem subaquática convencional; c) soldagem subaquática com tocha especial.
Fonte: WANG, et al, 2018

Quando realizado com dispositivos mecanizados, a estabilidade do arco na soldagem pode ser avaliada por meio da análise dos oscilogramas de tensão e corrente. Estes expressam os valores desses parâmetros de soldagem em função do tempo, permitindo a análise do comportamento dos mesmos (OLIVEIRA, 2012).

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)

Um dos índices de estabilidade mais utilizados por pesquisadores de soldagem 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 3.1 e a dispersão é medida em termos relativos (SCOTTI et al, 2008).

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\% \quad (3.1)$$

Aonde

C.v. = Coeficiente de Variação;

σ = Desvio padrão;

\bar{X} = Média da grandeza.

WANG et. al. 2018 utilizaram os sinais apresentados na FIG.3.20 e calcularam o coeficiente de variação da corrente e da tensão como índice de estabilidade para comparar os processos de soldagem FCAW realizados ao ar, subaquática e subaquática com barreira mecânica, os quais podem ser visto na FIG.3.21. De acordo com os coeficientes obtidos, observa-se uma menor variação da corrente de soldagem para o processo realizado ao ar, seguido da soldagem subaquática realizada com a tocha especial, com barreira mecânica, e finalmente, o processo de soldagem subaquática convencional é o que apresenta maiores coeficientes de variação da corrente, indicando menor estabilidade do processo.

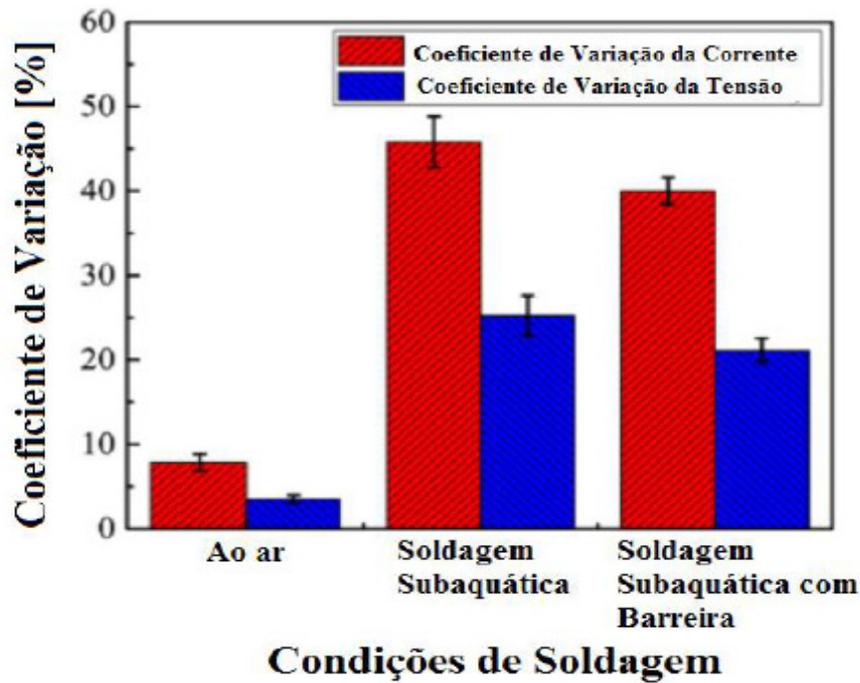


Figura 3.21: Coeficientes de variação para soldas realizadas ao ar, na condição subaquática convencional e com o uso de barreira para as bolhas.
Fonte: WANG et al. (2018)

O comportamento da tensão e corrente de soldagem também pode ser analisado por ciclogramas, ou gráficos de potência. Esses gráficos permitem fácil entendimento em relação à estabilidade do arco. De maneira geral, quanto menor a área formada pelos pontos, mais estável é o processo. Os gráficos de potência também permitem uma análise visual da frequência de ocorrência de curtos circuitos. A zona de arco aberto é identificada no ciclograma por alta tensão e baixa corrente de soldagem, e os pontos de curto circuito por baixa tensão e elevada corrente de soldagem. No estudo realizado por ASSUNÇÃO, 2017 ao comparar a soldagem subaquática molhada com processo FCAW tradicional ao processo utilizando a tocha especial para manter o bico seco, foi possível verificar uma maior ocorrência de curtos circuitos no processo sem o uso da tocha com vedação, conforme visto na FIG.3.22. Esses curtos circuitos são identificados pela linha inferior do gráfico, na faixa de tensão entre 0 e 10 V e valores de corrente acima de 400 A. O tratamento 7 se refere à condição realizada com a vedação e o tratamento 15 se refere ao processo sem vedação, com o bico de contato molhado.

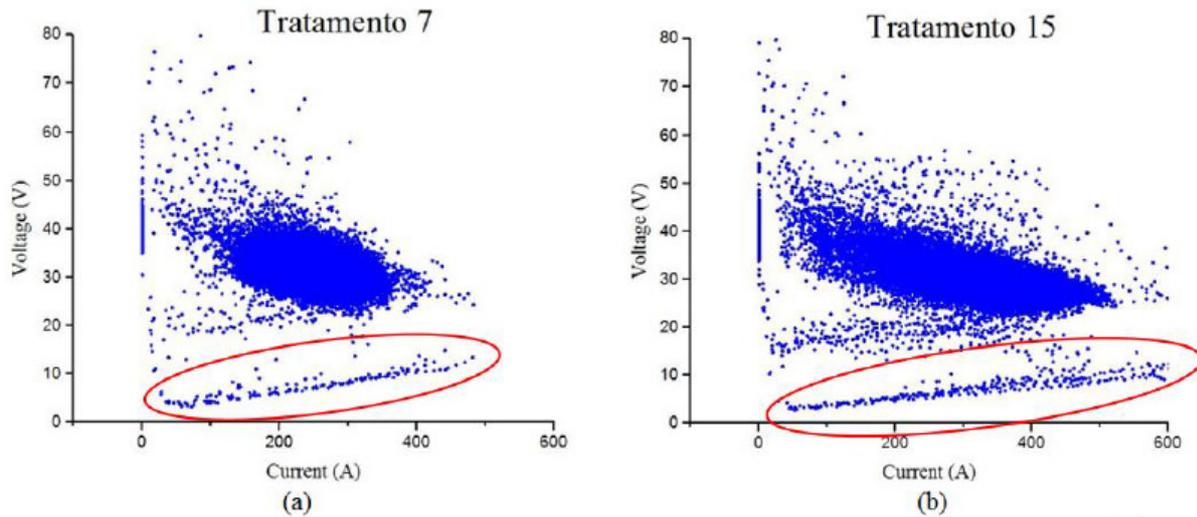


Figura 3.22: Ciclogramas, indicando a ocorrência de curto-circuitos. Em (a), processo com tocha especial e (b) processo convencional.

Fonte: ASSUNÇÃO, 2017.

Uma outra forma prática de analisar a frequência de acontecimento dos eventos é na forma de histogramas. Esses diagramas apresentam a distribuição de frequência completa de todo o período de aquisição de dados. O desvio de todos os dados em torno da média é facilmente identificado pela contagem dos acontecimentos (ASSUNÇÃO, 2017). Segundo BAUNÉ et al, 2000 a largura e altura do histograma são indicadores confiáveis da estabilidade do arco elétrico. Um processo que apresenta diagrama alto e estreito (FIG. 3.23 (a)) é mais estável que um processo que apresenta diagrama baixo e com ampla faixa de variação de valores (FIG.3.23 (b)). Ainda é possível verificar as extinções do arco elétrico, identificadas pelos valores de corrente nulos.

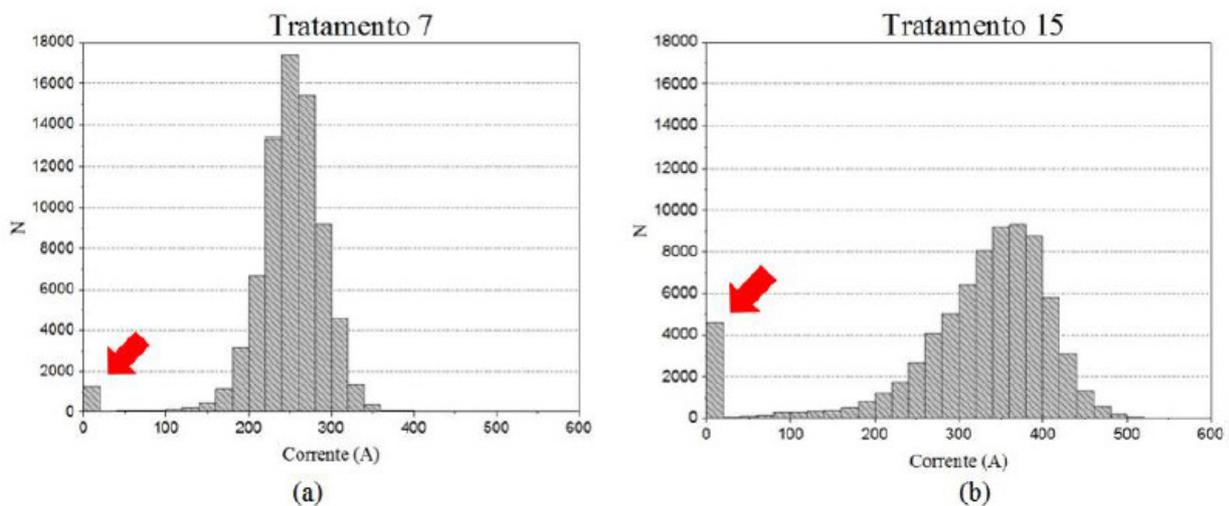


Figura 3.23: Histogramas, indicando a ocorrência de curto-circuitos. Em (a), processo com tocha especial e em (b) processo convencional.

Fonte: ASSUNÇÃO, 2017.

4. METODOLOGIA

Foram realizados ensaios variando-se os parâmetros de soldagem, monitorando e realizando filmagem com câmera de alta velocidade. Utilizou-se a tocha especial desenvolvida por ASSUNÇÃO, 2017, a qual mantém o bico de contato isolado da água durante a soldagem e compararam-se os resultados dessa com os de uma tocha comum, na qual o bico mantém contato com a água durante o processo.

O experimento foi realizado de tal maneira a comparar os diferentes parâmetros (velocidade do arame, tensão e stick out) para as duas condições de contato seco e molhado.

4.1 Materiais

4.1.1 Corpo de prova

Para realização dos ensaios, foram utilizadas chapas de aço SAE 1020, o qual apresentam uma composição de 0,17 a 0,23% de Carbono, além de elementos como Manganês, Fósforo e Enxofre

Os corpos de prova para realização dos cordões de solda possuíam as dimensões de 19 mm de espessura, 90 mm de largura e 200 mm de comprimento.

4.1.2 Consumível

O consumível utilizado foi o arame tubular do tipo autoprotetido AWS SFA 5.20 E71T-11 com diâmetro de 1,6 mm, sendo um eletrodo comercial fabricado pela ESAB – TUBROD 7110A. As especificações de propriedades mecânicas, composição química, e parâmetros de soldagem para o arame utilizado podem ser vistos na TAB.4.1:

TABELA 4.1

Propriedades Mecânicas, Composição Química, e Parâmetros de Soldagem para o arame ESAB – TUBROD 7110A

Propriedades Mecânicas			Composição Química			
Alongamento	Lim. escoamento	Resist. À Tração	Mn	C	Si	Al
23%	500MPa	630MPa	0,70	0,25	0,40	1,6

Parâmetros de Soldagem			
Corrente	Tipo de corrente	Taxa de Deposição	Tensão
160–275 A	DCEN	0,95-2,35kg/h	17-29V

FONTE: ESAB, Especificações, acesso em 2019.

4.2 Equipamentos

4.2.1 Aquário de soldagem e sistema de movimentação linear

Para a realização da soldagem subaquática molhada foi utilizado um aquário com as dimensões de 0,4 m de largura, 0,6m de altura e 0,8m de comprimento. Ele foi preenchido com água de torneira até cobrir em 0,50m a região de soldagem. A água encontrava-se à temperatura ambiente e foi substituída a cada 2 soldas. Para que o deslocamento do corpo de prova ocorresse de forma linear e com velocidade constante e ajustável, foi desenvolvido um sistema de movimentação adjacente ao aquário, do tipo “tartaruga”, no qual um carrinho desloca-se por um trilho. O sistema de fixação possibilitou controle da inclinação da tocha e da distância entre o bico de contato e a peça de trabalho (Stick Out). Na FIG. 4.1 é possível ver o aquário e o dispositivo de deslocamento.



Figura 4.1: Aquário e sistema de deslocamento linear

4.2.2 Tocha de soldagem

Para realizar as soldas com bico de contato seco foi utilizada uma tocha de soldagem para o processo FCAW 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. Esse dispositivo é removível, de forma que possibilita a realização do processo de soldagem de maneira convencional, mantendo o bico de contato na água. A tocha utilizada pode ser vista na FIG.4.2.

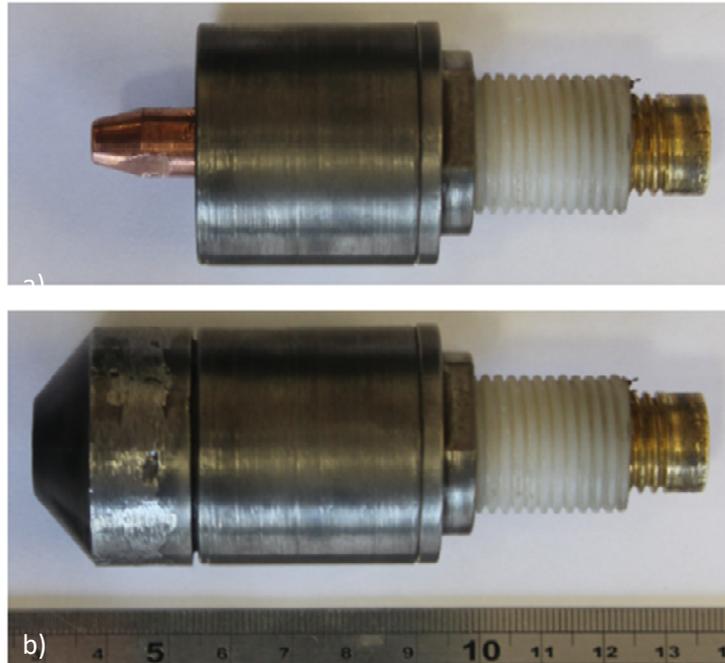


FIGURA 4.2: Tocha de Soldagem para FCAW subaquática que permite utilizar o bico de contato mantido seco e molhado. (a). Sem sistema de vedação (b). Com o sistema de vedação.

4.2.3 Câmera de alta velocidade

Utilizou-se ainda uma câmera de alta velocidade no modelo PHANTOM MIRO 110, com resolução de 1280 x 800 pixels, 1,6 Gpx/s, 2 μ s captura mínima e com velocidade de gravação de 1.600 fps (quadros por segundo). Foi utilizada a lente Pentax ALBINAR ADG com auto zoom macro 80-200 mm f 4.5 -4.6.

4.2.4 Fonte de soldagem

A fonte utilizada para soldagem foi um retificador de tensão constante, modelo Bambozzi TRR 3100S, para soldagem semiautomática. A máquina apresenta característica de tensão em vazio de 42 V. O cabeçote alimentador de arame utilizado foi o modelo Bambozzi SAG 1006, acoplado e conectado à fonte de soldagem, como pode ser vista na FIG. 4.3.



FIGURA 4.3: Fonte de soldagem e cabeçote de solda.

4.2.5 Sistema de aquisição de dados

Para aquisição dos sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação de arame durante o processo de soldagem subaquática molhada, foi utilizado o sistema de aquisição SAP V4. Com esse sistema é possível acompanhar e registrar os dados a uma taxa de aquisição de 5000 pontos por segundo.

4.3 Procedimento experimental

Foram realizadas filmagens em alta velocidade das soldagens subaquáticas molhadas dos cordões de solda por FCAW sobre a chapa utilizando-se diferentes parâmetros. Com os vídeos foi possível verificar a dinâmica das bolhas, bem como realizar a contagem de destacamento delas para cada ensaio. Utilizando-se os sinais elétricos adquiridos de tensão e corrente, pôde-se verificar o comportamento desses ao longo do processo.

A câmera foi posicionada próxima ao aquário conforme apresentado na FIG 4.4, de modo a obter o melhor foco. 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 segundos de filmagem. As imagens obtidas foram analisadas pelo software Phantom CV 2.8. A velocidade de soldagem foi de 7,4 mm/s.



FIGURA 4.4: Configuração Experimental

Foram realizadas 16 soldas para a análise das imagens e sinais elétricos. De acordo com a análise das referências bibliográficas e com práticas realizadas, foram determinados os parâmetros comuns e invariáveis a essas amostras, visualizadas na TABELA. 4.2

TABELA 4.2

Parâmetros comuns às amostras

Parâmetros de Soldagem	Valores
Ângulo de inclinação da tocha	0° (Graus)
Profundidade de água no tanque	0,5 m
Velocidade de Soldagem	7,5 mm/s

FONTE: Elaborado pela autora.

Foram estabelecidos parâmetros iniciais distintos para as amostras, variando-se: condição do bico de contato, molhado para o processo convencional e seco para o processo utilizando a tocha

desenvolvida com a vedação; stick out; tensão de soldagem e velocidade de alimentação do arame, conforme apresentado na TABELA 4.3.

TABELA 43

Valores iniciais para os parâmetros variáveis de soldagem

	Número da Amostra	Stick out [mm]	Tensão [V]	Vel. alimentação Arame [m/min]
Bico Molhado	1	15	26	4
	2	15	26	5
	3	15	30	4
	4	15	30	5
	5	20	26	4
	6	20	26	5
	7	20	30	4
	8	20	30	5
Bico Seco	9	15	26	4
	10	15	26	5
	11	15	30	4
	12	15	30	5
	13	20	26	4
	14	20	26	5
	15	20	30	4
	16	20	30	5

Para cada soldagem, o corpo de prova foi fixado ao carrinho e a tocha a um suporte. O polo positivo da fonte foi acoplado à 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.

O início da aquisição dos sinais elétricos e da gravação das filmagens foram acionados manualmente de maneira simultânea, com intuito de sincronizar as medições. Apesar desse método não ser muito preciso, pois o tempo está na escala de milésimos de segundos no sistema de aquisição, foi possível verificar uma sincronização satisfatória. Fato este constatado pela comparação do tempo de extinção

do arco visualizado nas filmagens com o intervalo no qual a corrente era nula no sistema de aquisição de dados.

Para realizar a medição do tamanho das bolhas, utilizou-se o software Image J, com o qual foi possível realizar as medidas dos diâmetros máximos das bolhas formadas de maneira qualitativa da seguinte forma: Inicialmente, utilizou-se a medida do diâmetro do arame tubular indicado na imagem da bolha e comparou-se com o seu valor já conhecido de 1,6 mm, estabelecendo-se assim uma escala. Para medição dos diâmetros das bolhas, foram traçadas retas passando pelo centro de cada bolha e retiradas suas médias, tendo em vista que as bolhas não formam circunferências perfeitas.

5. RESULTADOS

5.1 Análise dos sinais elétricos

As análises dos sinais de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame foram feitas para todos os cordões, sendo analisadas 5 segundos de soldagem à taxa de 5.000 Hz. Foram obtidos 25.000 pontos de cada parâmetro. Os valores médios dos sinais de corrente com seus respectivos desvios padrões podem ser visualizados na TAB. 5 1.

TABELA 5.1

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 TAB. 5.1, nota-se que os valores de corrente para as amostras com bico de contato molhado apresentaram-se ligeiramente superiores em relação as amostras com bico mantido seco.

De acordo com ASSUNÇÃO, 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 é refrigerada pela água, sendo necessária maior corrente de soldagem para elevar a temperatura do arame. Como o aquecimento do eletrodo é uma das parcelas do calor necessário para fundi-lo, segundo SCOTTI, et al, 2008, uma vez que o bico de contato e o arame são refrigerados pela água, maior corrente é necessária para promover a fusão do arame. Quando o bico de contato é mantido seco dentro da tocha, a ação de refrigeração da água ocorre apenas em um pequeno comprimento de arame energizado. Uma vez que o arame está em temperatura elevada, é necessária menor corrente de soldagem para fundi-lo,

5.1.1 Oscilogramas dos Sinais de Tensão, Corrente e Velocidade de Alimentação do Arame

Os oscilogramas obtidos para as amostras 1-16 podem ser encontrados no ANEXO 01, relacionados de forma a facilitar a comparação dos efeitos do bico de contato seco e molhado, para determinados parâmetros de tensão, stick out e velocidade de alimentação do arame. Na FIGURA 5.1 é possível analisar as variações dos sinais elétricos nos oscilograma das amostras 7 e 15, as quais possuem mesmas condições de tensão, stick out e velocidade do arame, distinguindo-se apenas pela vedação da tocha utilizada na amostra 15. De maneira semelhante, são vistas as amostras 8 e 16, que diferem entre si apenas pela vedação utilizada na tocha na amostra 16, conforme visto na TAB. 5.2.

TABELA 5.2

Valores dos parâmetros utilizados para as amostras 7, 8, 15 e 16.

Amostras	Stick out (mm)	Tensão (V)	Vel. Arame (m/min)
7 e 15	20	30	4
8 e 16	20	30	5

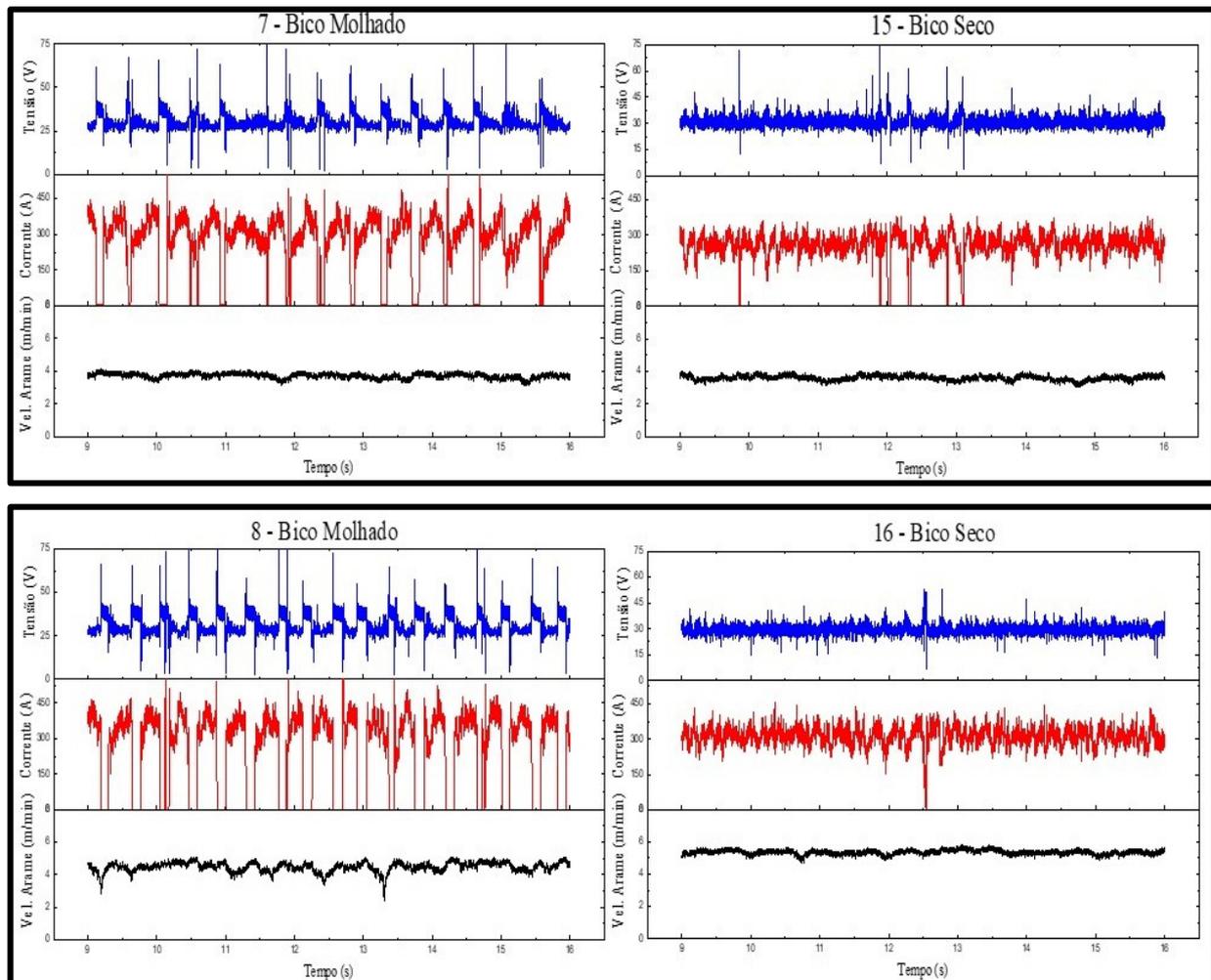


FIGURA 5.1 - Oscilogramas das amostras 7,8, 15 e 16.

Os oscilogramas encontrados apresentam-se em faixas de variações com padrões semelhantes aos encontrados por outros estudos de soldagem subaquática molhada (JIA et. al., 2013; FENG et. al., 2017; SHI et. al., 2012; ASSUNÇÃO,2018).

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. À medida que aumentam-se os valores dos parâmetros de soldagem (tensão, stick out e velocidade do arame), observa-se maior flutuação dos sinais de tensão e corrente e um maior período de extinção do arco elétrico, que de acordo com SCOTTI et al, 2008, é caracterizado por corrente nula e tensão em vazio da fonte, 42 V. De acordo com esses autores, este fenômeno ocorre devido à ponte metálica formada entre a poça de fusão e o eletrodo, que se torna um caminho preferencial para a passagem da corrente.

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, conforme encontrado também no estudo realizado por ASSUNÇÃO, 2018.

Analisando-se a velocidade de alimentação do arame, foi possível perceber que houve interrupção de alimentação do eletrodo nas amostras 3, 4, 11 e 12 conforme visto na FIG. 5.2.

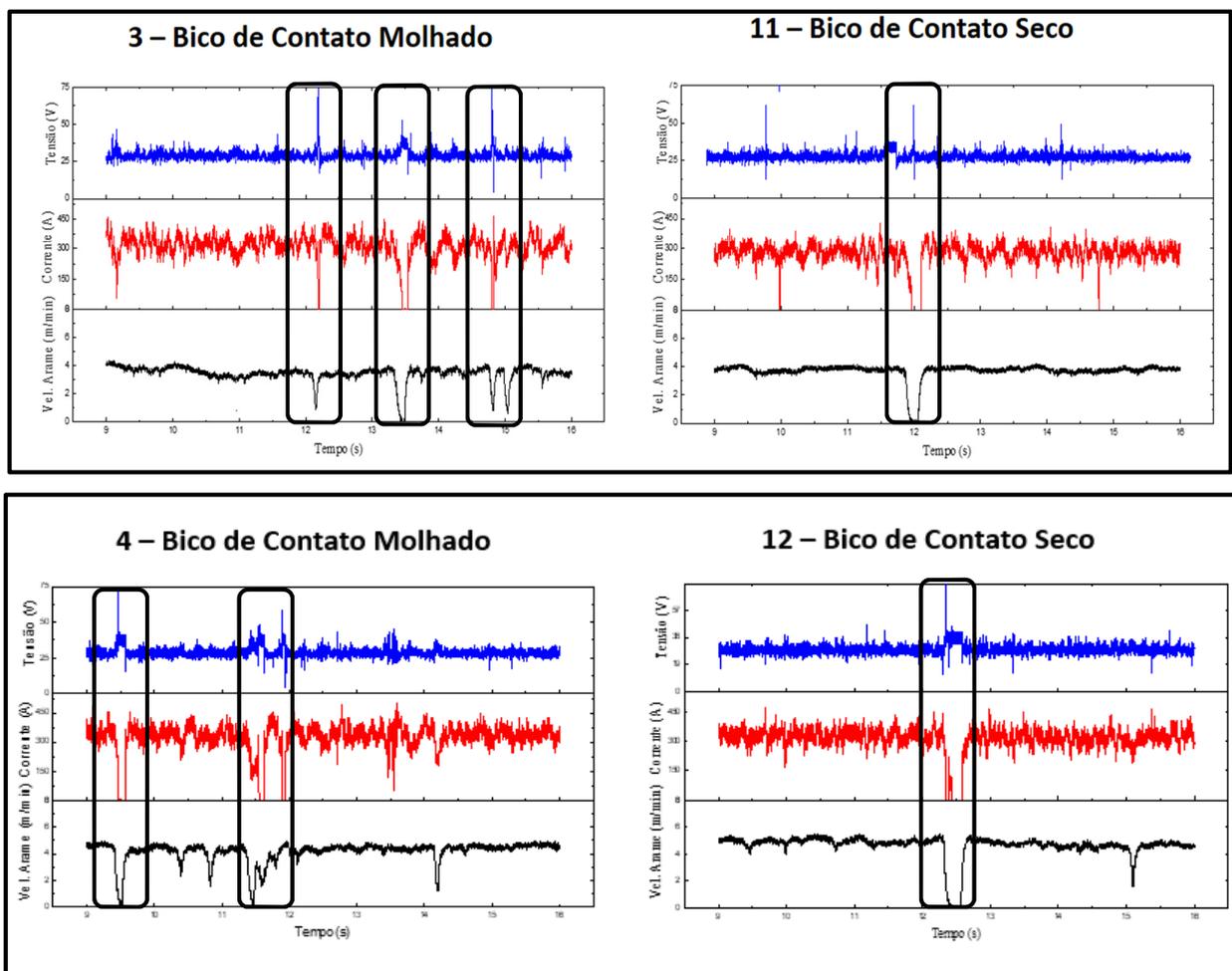


FIGURA 5.2 - Oscilogramas das amostras 3,4,11 e 12.

Observa-se na FIG. 5.2 que a interrupção da alimentação do arame associa-se a um pico de tensão e valor nulo de corrente. Isso ocorre pois na ausência de arame ocorre interrupção do processo de soldagem, com extinção do arco elétrico e tensão máxima ou tensão em vazio.

Esse fenômeno pode ser explicado pela ocorrência de microfusões entre o bico de contato e o arame, devido a transferência irregular de corrente (faiscamentos) conforme reportado por ANDRADE, et.al, 1993. Foram reportados ainda por TEICHMMAN, 2000, mais dois problemas associados à soldagem com arame tubular que relacionam-se a flutuações na velocidade de alimentação do arame: o primeiro refere-se a variações dimensionais localizadas em segmentos ao longo da extensão do arame, o que aumenta a força de atrito na passagem pelo bico, promovendo flutuações na velocidade do mesmo ou em situações mais críticas, a variação dimensional é tal que o tracionador não possui mais condições de empurrar o arame pelo bico, promovendo a extinção do arco ou a fusão do bico de contato; o segundo problema que promove instabilidade na transferência se relaciona com o deslizamento dos rolos tracionadores sobre a superfície do arame. Mesmo que não existam variações dimensionais na seção do arame, os eletrodos tubulares normalmente geram um atrito maior ao longo do tubo conduíte, em especial na região onde mangueira de condução do arame apresenta curvatura.

As extinções do arco elétrico registradas pelos sinais de corrente das demais amostras ocorreram sem que a velocidade do arame tubular fosse alterada, nestes casos o arco foi extinto e reestabelecido quando o eletrodo tocou o metal de base novamente. A transferência elétrica ocorreu de maneira regular e suave, ainda que nas condições com bico de contato molhado, o que se deve ao fato de ter sido usado um bico de contato comercial, com as devidas tolerâncias dimensionais entre o bico e o arame, conforme reportado também por ASSUNÇÃO, 2018.

5.1.2 Estabilidade do Arco Elétrico

A estabilidade do arco elétrico pode ser avaliada pelo coeficiente de variação da corrente, um índice que representa a dispersão dos valores pela relação entre o desvio padrão e o valor médio, em termos relativos. Quanto menor o valor, menor a flutuação do sinal, o que indica maior estabilidade do processo (SCOTTI et al, 2008; SHI et. al., 2012).

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 (9 a 16), se comparado as mesmas condições de bico de contato molhado (1 a 8). Isso pode indicar uma maior estabilidade do arco elétrico quando mantido o bico de contato seco. Na FIG. 5.3 é possível verificar os valores do Coeficiente de Variação da Corrente de acordo com os itens listados na TAB. 5.1. 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, stick-out e velocidade do arame) aumentam o que vai de acordo com ASSUNÇÃO, 2017.

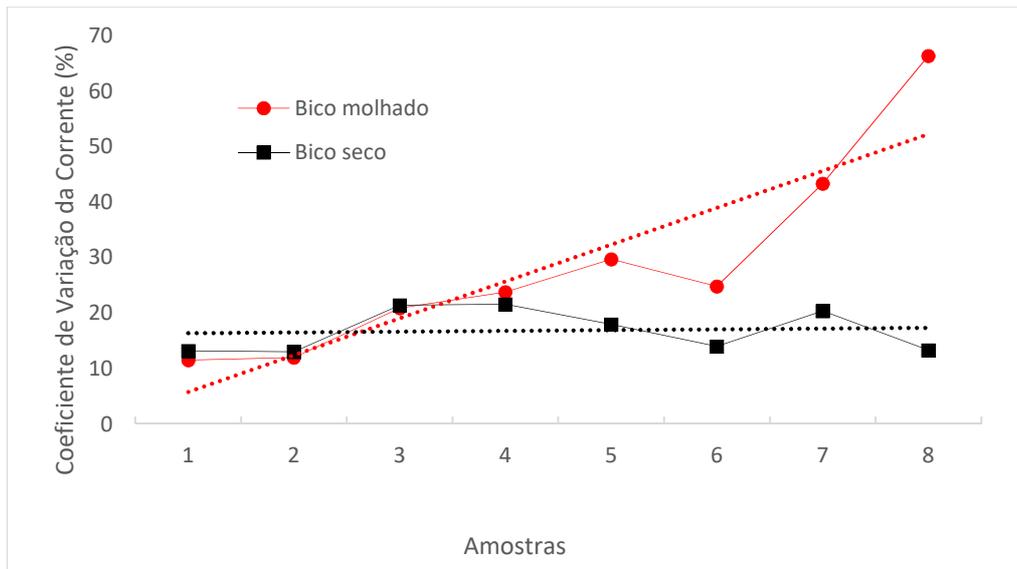


FIGURA 5.3 - Coeficiente de variação elétrica da soldagem.

Ainda para avaliar a estabilidade do arco elétrico, foram usados os histogramas, os quais evidenciam a variação dos sinais em torno da média dos valores durante o período de realização das soldas (BAUNE, et. al, 2001). Os histogramas das amostras 7, 8, 15 e 16 podem ser visualizados na FIG. 5.4. Os gráficos das demais amostras encontram-se no ANEXO 2. A organização foi feita de maneira semelhante ao dos oscilograma, de forma a facilitar a visualização e comparação das amostras.

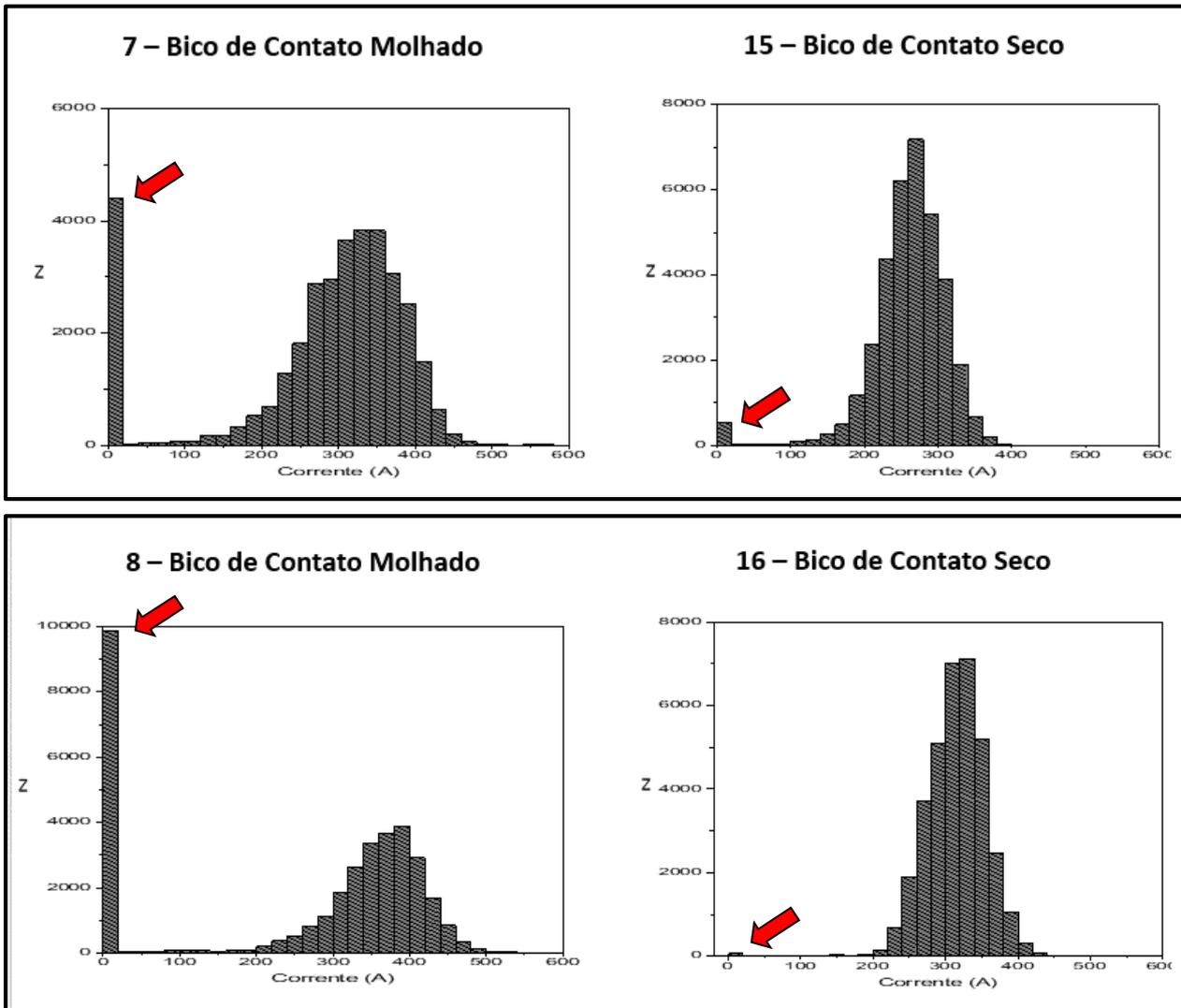


FIGURA 5.4 – Histogramas das amostras 7,8,15 e 16, em destaque as extinções do arco.

Conforme observado, as amostras realizadas com bico de contato molhado, 7 e 8 apresentaram um perfil com picos mais baixos, indicando valores mais dispersos da média, especialmente na solda 8, no qual os parâmetros apresentam mais elevados. Observa-se ainda a presença de picos de corrente nula, indicando extinções do arco, também em maior quantidade para a amostra 8. Nas amostras com bico de contato seco, observou-se um padrão vertical com perfil mais alto e com poucos picos de corrente nula, indicando uma maior estabilidade do arco e menor sensibilidade a variação dos parâmetros. Esses gráficos estão de acordo com os perfis encontrados por ASSUNÇÃO, 2018, onde relata a maior estabilidade do arco ao utilizar a tocha desenvolvida com vedação para manter o bico de contato isolado da água.

Outra maneira de avaliar a estabilidade do arco é utilizando os ciclogramas, que evidenciam a movimentação dinâmica do trabalho, numa relação entre corrente e tensão. A estabilidade é verificada pela área do gráfico, quanto menor a área do gráfico, mais estável o processo, ou seja, há menos

variações nos sinais de corrente e tensão (SUBAN & TUSEK, 2003). Deve-se considerar ainda a dispersão dos pontos, pois de acordo com SILVA et. al, 2011, um padrão mais vertical indica maior comprimento do arco e instabilidade, enquanto um padrão mais horizontal revela oscilações de corrente e na taxa de fusão do eletrodo.

Os ciclogramas das amostras 7, 8, 15 e 16 podem ser visualizados na FIG. 5.5. Os gráficos das demais amostras encontram-se no ANEXO 3. Novamente, os padrões encontrados estão de acordo com aqueles visualizados nos estudos realizados por ASSUNÇÃO, 2018.

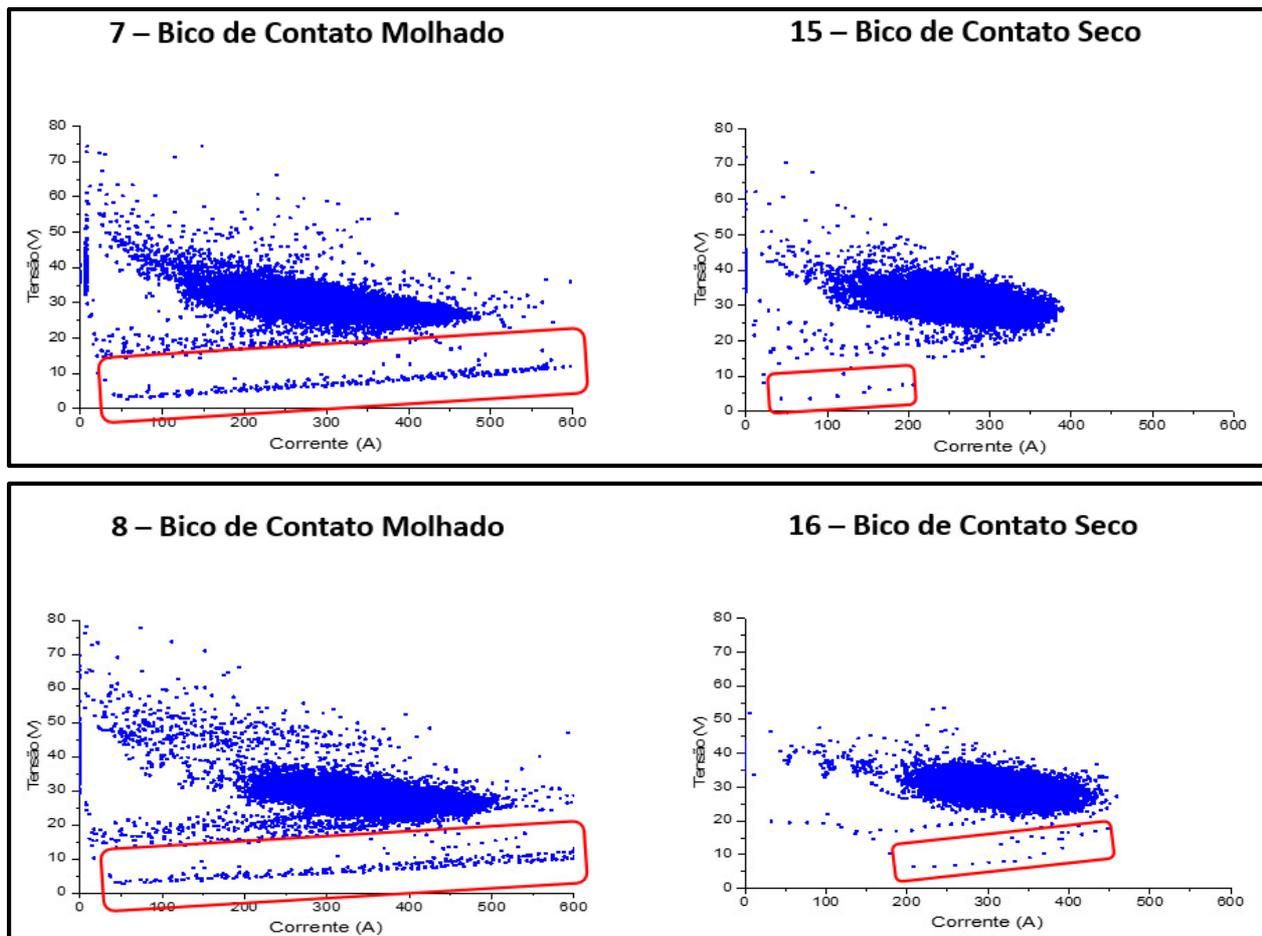


FIGURA 5.5 – Ciclogramas das amostras 7,8,15 e 16, em destaque os curto circuitos.

Nos ciclogramas apresentados é possível verificar uma maior dispersão dos pontos para os gráficos com bico de contato molhado, indicando uma maior instabilidade do arco elétrico. Além disso, há uma série de pontos na faixa entre 0 e 10 V, indicando a ocorrência de curto circuitos ao longo da coleta de dados.

5.2 Análise das filmagens

As bolhas formadas na soldagem subaquática molhada apresentam variações de tamanhos, formas e frequências de destacamento. Na FIGURA 5.6 é possível ver um exemplo de uma bolha típica formada durante o processo de soldagem.

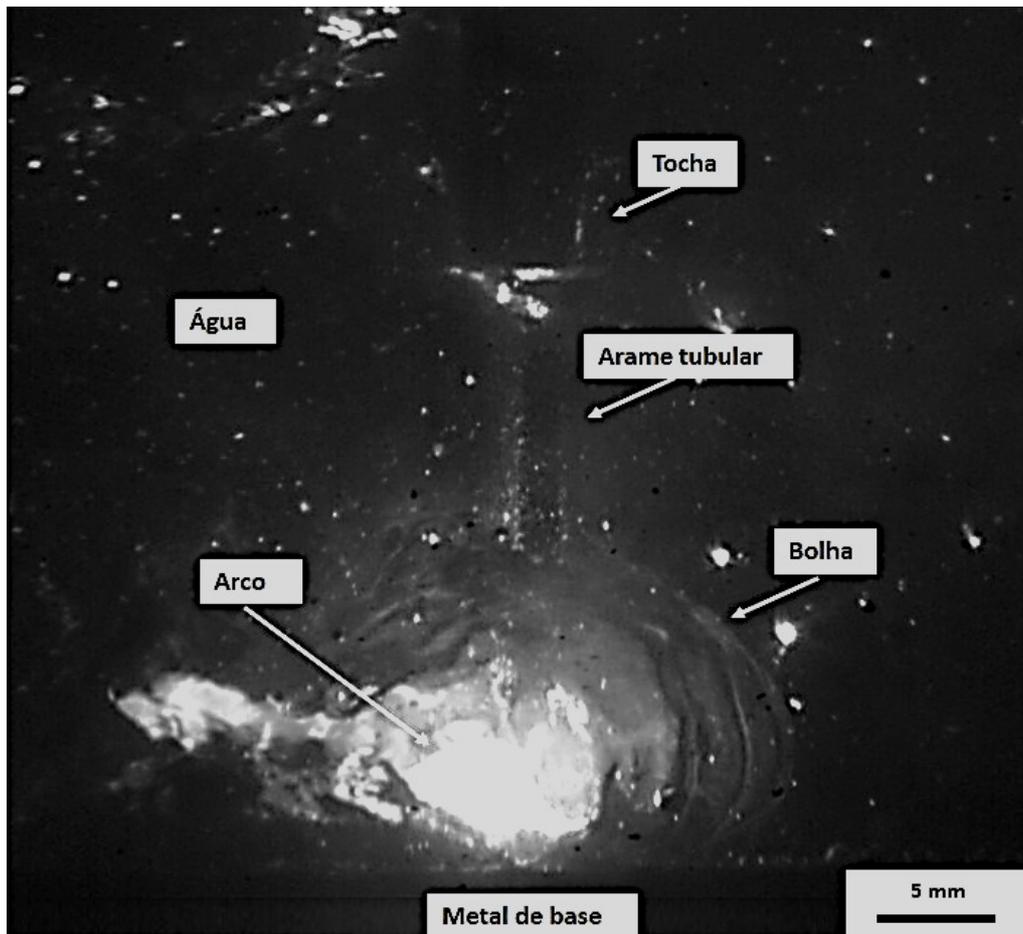


FIGURA 5.6 – Arco elétrico e bolha formados durante o processo de soldagem.

Com a abertura do arco elétrico, a formação das bolhas ocorre devido à 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 autoprotetido, 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 et al, 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 seu destacamento 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 FIG. 5.7.

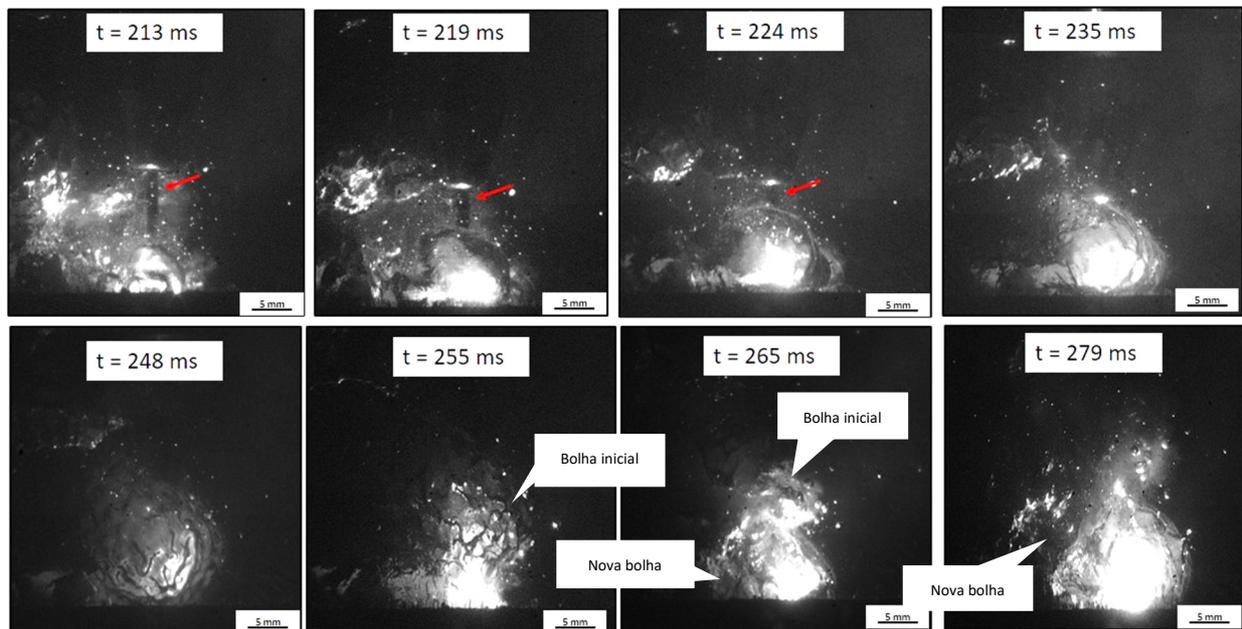


FIGURA 5.7 - Comportamento dinâmico das bolhas. A seta destaca o arame autoprotetido.

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 queima do fluxo e geração dos gases, até o momento de seu desprendimento (FIG. 5.7 em $t=248$ ms), quando inicia a redução da intensidade luminosa do arco elétrico e logo em seguida ocorre o desprendimento da bolha (FIG. 5.7, em $t=255$ ms). 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 (FIG. 5.7, 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 1.000 quadros por segundo. A contagem de bolhas foi feita por segundo para cada amostra e pode ser vista na TAB.5.3. Não foram observadas grandes variações na quantidade de bolhas das amostras de bico seco para bico molhado, sendo a média global de 11 bolhas para a primeira condição e de 12 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.

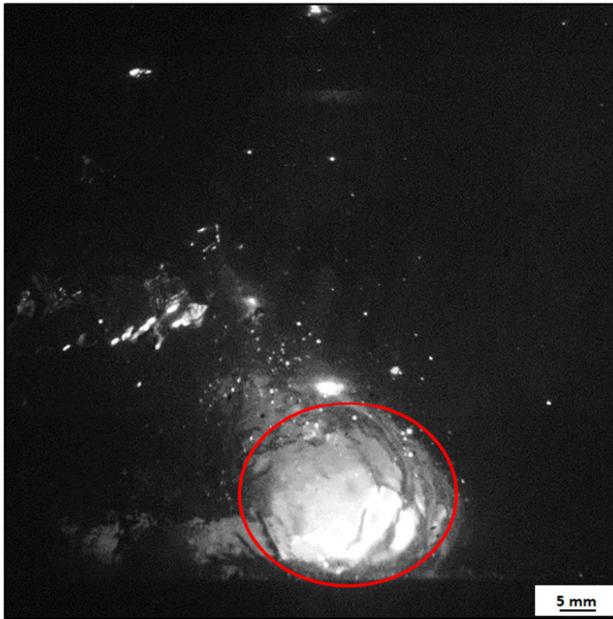
TABELA 5.3
Quantidade de bolhas destacadas

	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

O valor médio de 12 bolhas/segundo encontrado para a frequência de destacamento das bolhas para a condição de bico seco aproximou-se do encontrado para TSAI et al, 1977, que descreveram uma taxa de 13 bolhas/segundo para eletrodos rútflicos (E6013 e E7024) de acordo com as filmagens em alta velocidade. Já o valor médio de 11 bolhas/segundo encontrado para a condição de bico de contato molhado foi o mesmo encontrado por OLIVEIRA, 2012, para o destacamento de bolhas da soldagem realizada com o eletrodo E7018, também pela realização de filmagem em alta velocidade.

Na FIGURA 5.8 é possível ver as imagens de bolhas obtidas para o processo com bico de contato seco e molhado. Essas imagens foram obtidas imediatamente antes do destacamento das bolhas, de maneira a capturar os maiores diâmetros das bolhas durante o processo de evolução dessas.

Bico de Contato Molhado



Bico de Contato Seco

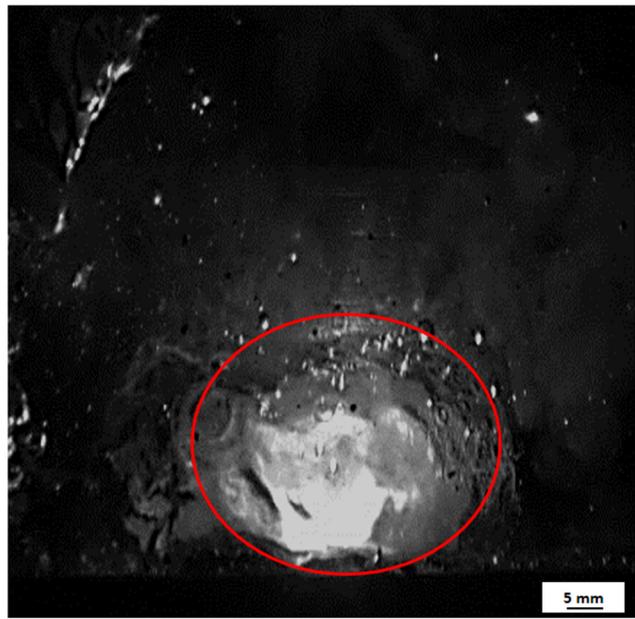


FIGURA 5.8 – Imagens das bolhas obtidas com bico de contato molhado e seco.

Utilizando o 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 um diâmetro médio de 31,9 mm contra 22,8 mm para o sistema sem vedação. A tendência do diâmetro médio das bolhas para as amostras de bico molhado e seco são vistas na FIG 5.9.

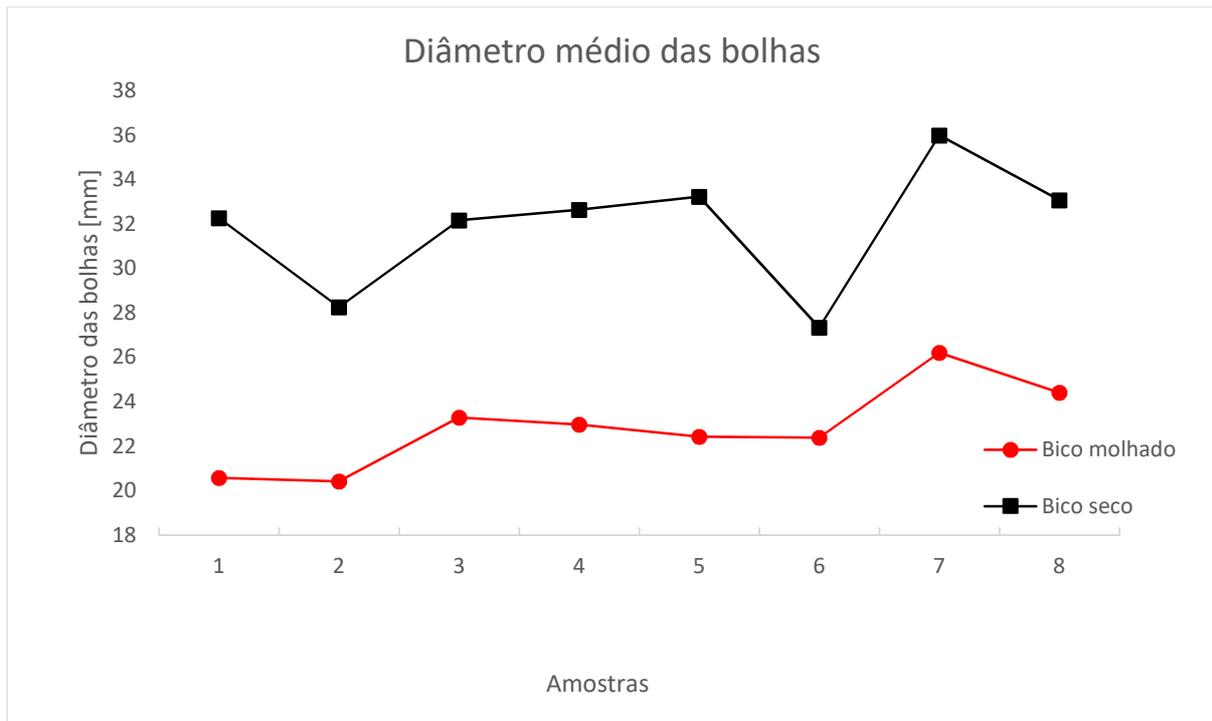


FIGURA 5.9 – Relação dos diâmetros médios das bolhas para as amostras de bico seco e molhado

Observa-se uma tendência de que as bolhas obtidas com bico de contato seco são maiores do que aquelas obtidas com bico de contato molhado. Esse fato também pode ser explicado pelo uso da tocha especial a qual mantém a bolha retida por um tempo maior, permitindo que ela absorva mais gases e conseqüentemente, cresça mais antes de colapsar.

5.3 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 do processo, que são eles: tensão de soldagem, velocidade do arame (corrente) e stick out.

5.3.1 Tensão de soldagem

Para analisar a influência da tensão de soldagem, tendo como base a TAB.4.4, consideraram-se 8 condições possíveis, comparando-se sempre amostras com a mesma condição para a tocha (bico seco ou molhado), stick out e velocidade do arame constantes. Por exemplo, a condição A trata-se de bico molhado, com 15mm de stick out, 4 m/min de velocidade do arame, e varia-se apenas a tensão entre

os valores de 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. Foi possível verificar com as amostras analisadas que a tendência é de que as bolhas formadas sejam maiores para a maior tensão. Na FIGURA 5.10 verifica-se essa relação.

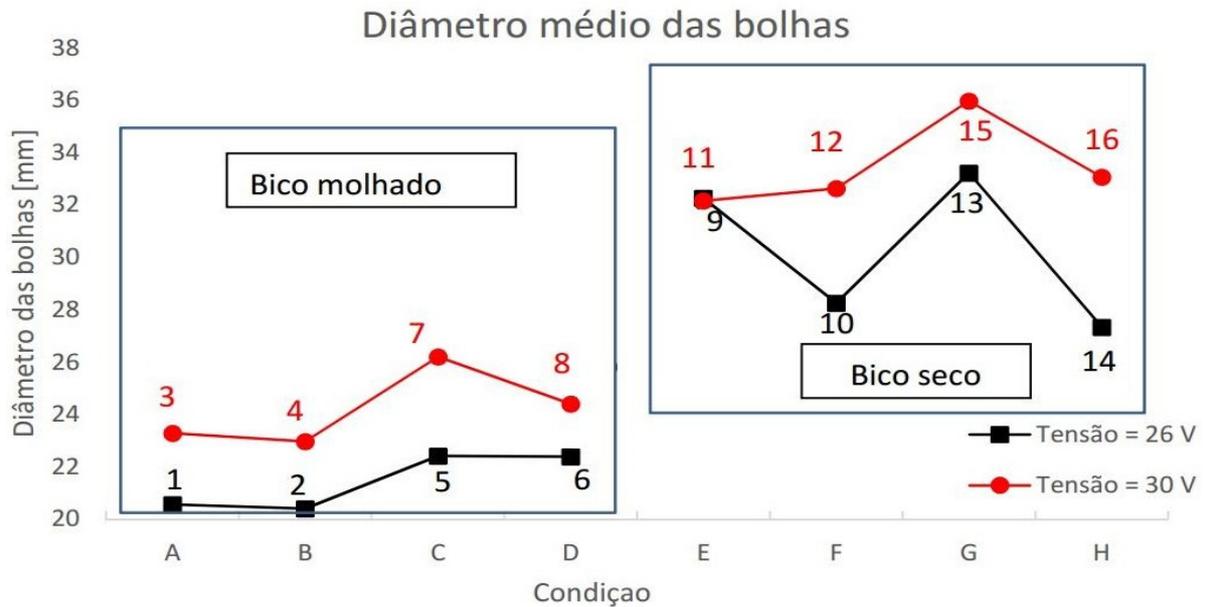


FIGURA 5.10 –Relação dos diâmetros médios das bolhas considerando variação na tensão de 26V para 30V.

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 da água. Como a temperatura de ebulição da água é de 100°C, muito abaixo da temperatura do arco elétrico, a água circundante pode facilmente ser evaporada e ionizada em hidrogênio e oxigênio nessas condições. Logo, mais gases podem ser substancialmente gerados na bolha, contribuindo para a formação de bolhas maiores.

5.3.2 Stick out

Adotando-se o mesmo procedimento de variar apenas o parâmetro que deseja-se analisar e manter fixos os demais, foi possível verificar a influência do stick out na formação das bolhas, conforme visto na FIG.5.11.

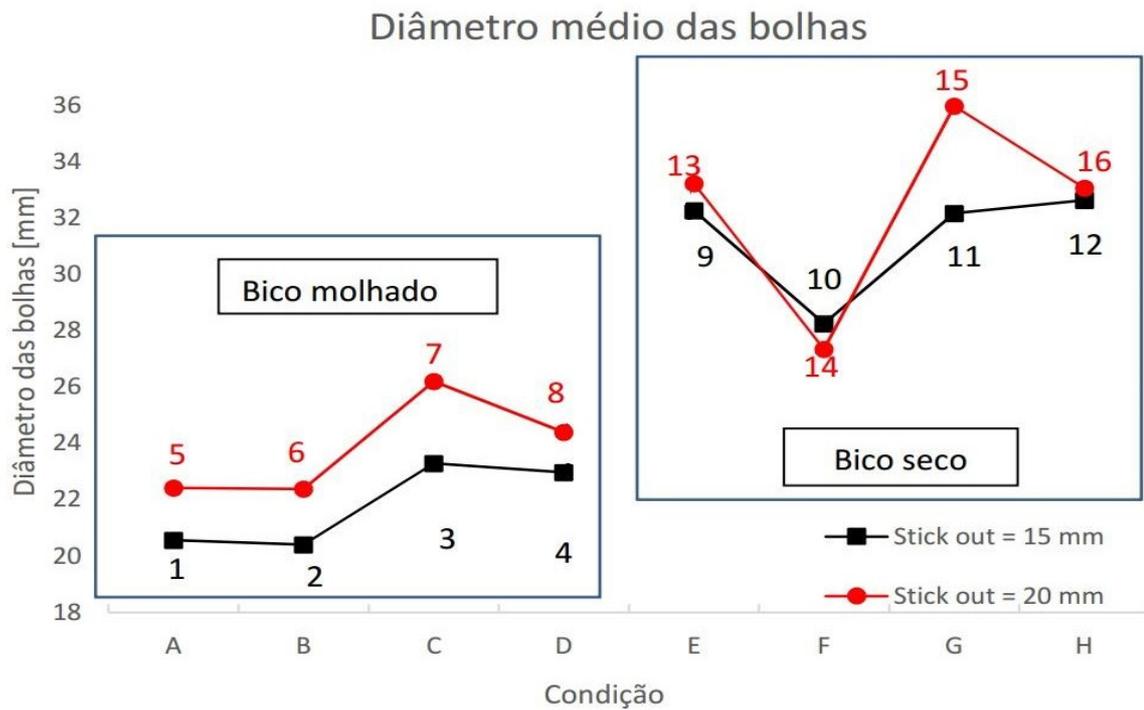


FIGURA 5.11 –Relação dos diâmetros médios das bolhas considerando variação no stick out..

Observou-se que para o stick out de 20 mm, a tendência foi de um aumento no tamanho médio das bolhas, em relação à distância de 15 mm. 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.

5.3.3 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 (MARQUES et al, 2015). Na FIG. 5.12 apresenta-se a relação do diâmetro das bolhas com a velocidade do arame.

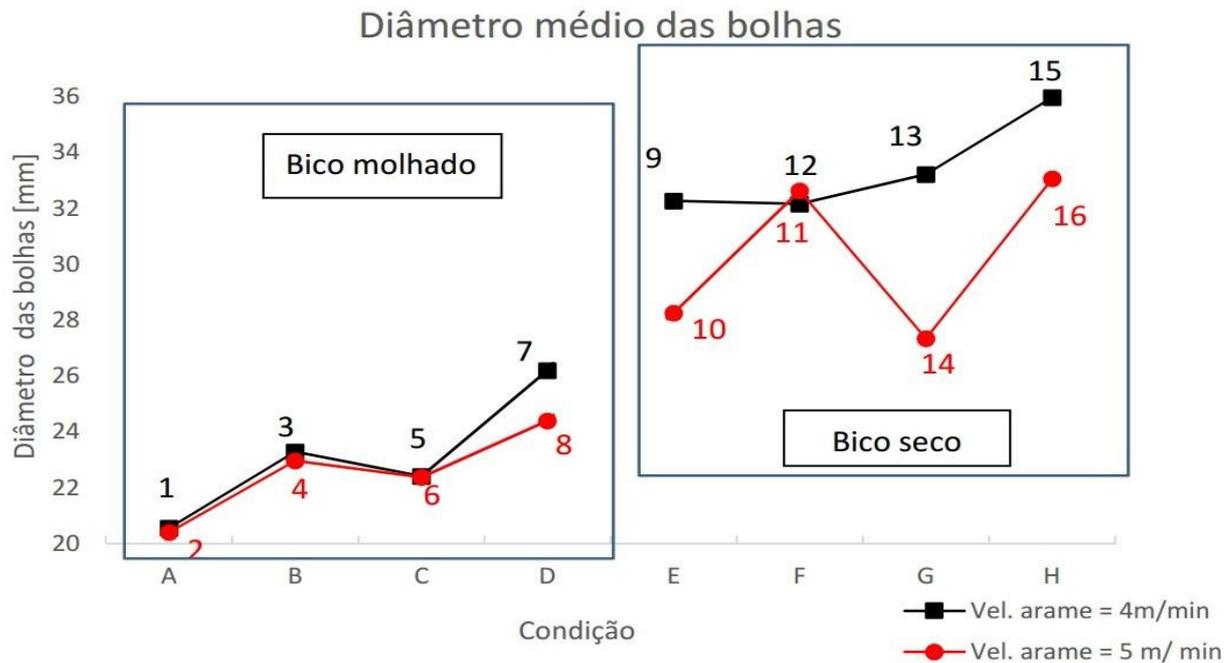


FIGURA 5.12 –Relação dos diâmetros médios das bolhas considerando variação no na velocidade de alimentação do arame.

De uma forma geral, verifica-se que o aumento da corrente elétrica ou a velocidade do arame leva a uma redução do tamanho das bolhas e aumento da frequência de destacamento. Verificou-se que para a velocidade do arame de 4 m/min, a corrente elétrica foi em média de 284,7 A, e para a velocidade de 5 m/min, encontrou-se o valor médio de 309,1 A. Dessa forma, verifica-se uma tendência de maiores tamanhos de bolhas para a velocidade de alimentação menor.

5.4 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 conforme proposto por Feng et al, 2017, pois os valores de velocidade de arame e os de tensão do arco são suficientemente grandes para evitar a ocorrência dos dois primeiros modos. Entretanto observaram-se o terceiro e quarto modo de evolução de bolhas.

5.4.1 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%, 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 as amostras, ocasionada, dentre outras causas por um possível travamento na movimentação do arame no alimentador ou no bico de contato, por exemplo.

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 5.13 é possível ver a sequência de quadros de uma amostra com bico de contato seco e o modo de evolução característico.

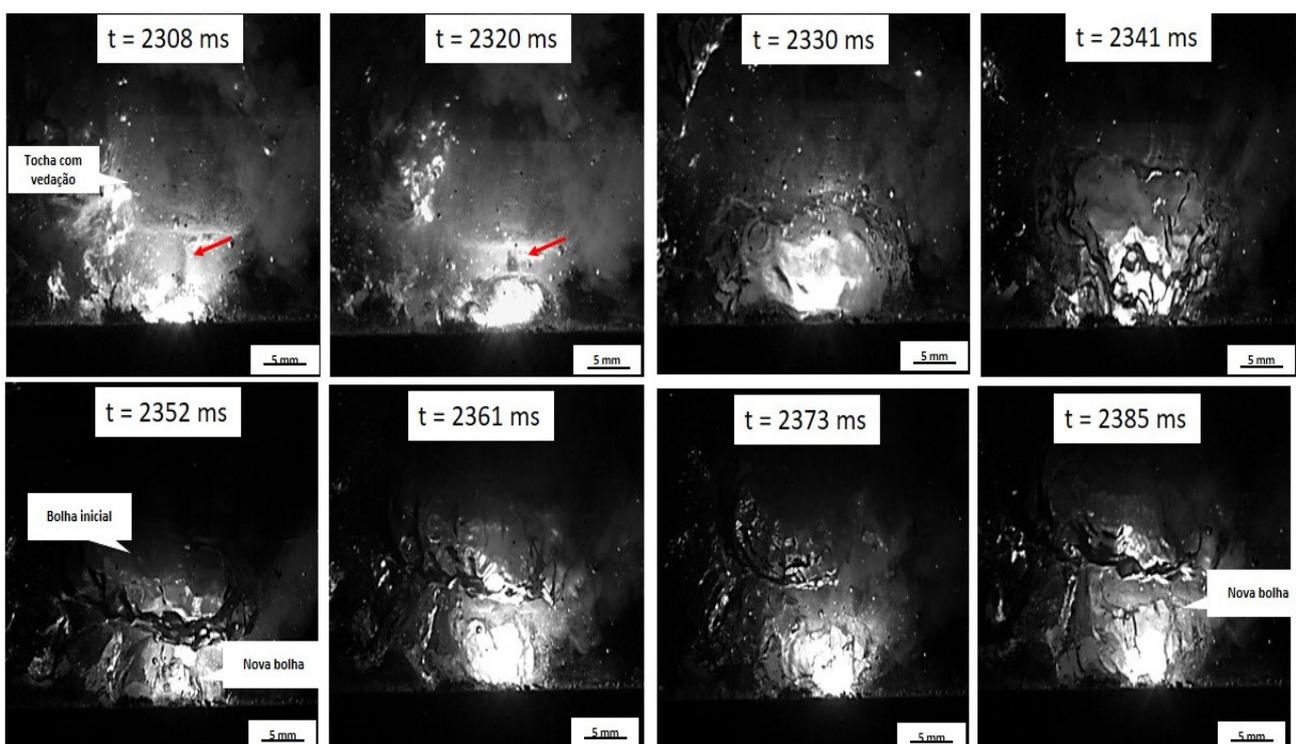


FIGURA 5.13 – Modo de evolução das bolhas para amostras ensaiadas com a tocha utilizando vedação. Em destaque, o arame autoprotetido.

Percebe-se que o arco elétrico está sempre protegido pela atmosfera gasosa. A bolha origina-se na poça de fusão, como observado no instante 2308 ms, e cresce à medida que os gases são desprendidos.

Quando ela atinge seu diâmetro máximo, em 2.341ms, ela destaca. Em 2.352ms, 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 5.14 são representadas as curvas que relacionam tensão e corrente de soldagem em função do tempo para os quadros observados na FIG. 5.12. 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.

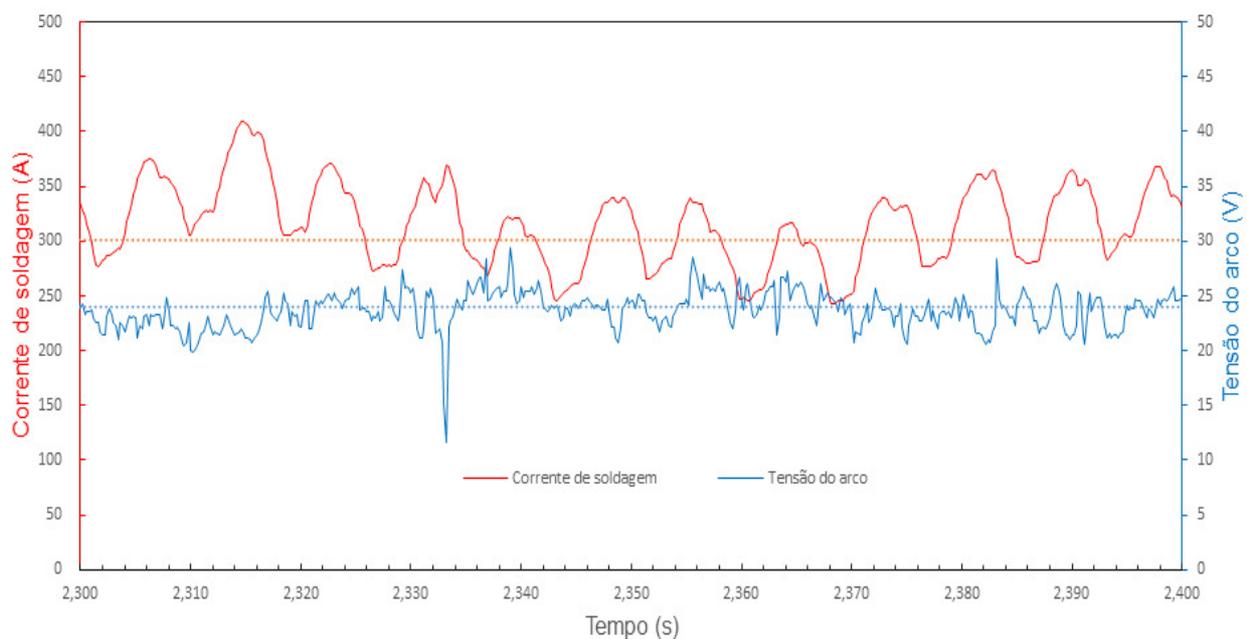


FIGURA 5.14 –Valores de tensão e corrente em função do tempo para o terceiro modo de evolução das bolhas.

FONTE: Elaborado pela autora.

5.4.2 Quarto Modo

O quarto modo de evolução pode ser visualizado na FIG 5.15. 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 de 30 V e stick out de 20 mm

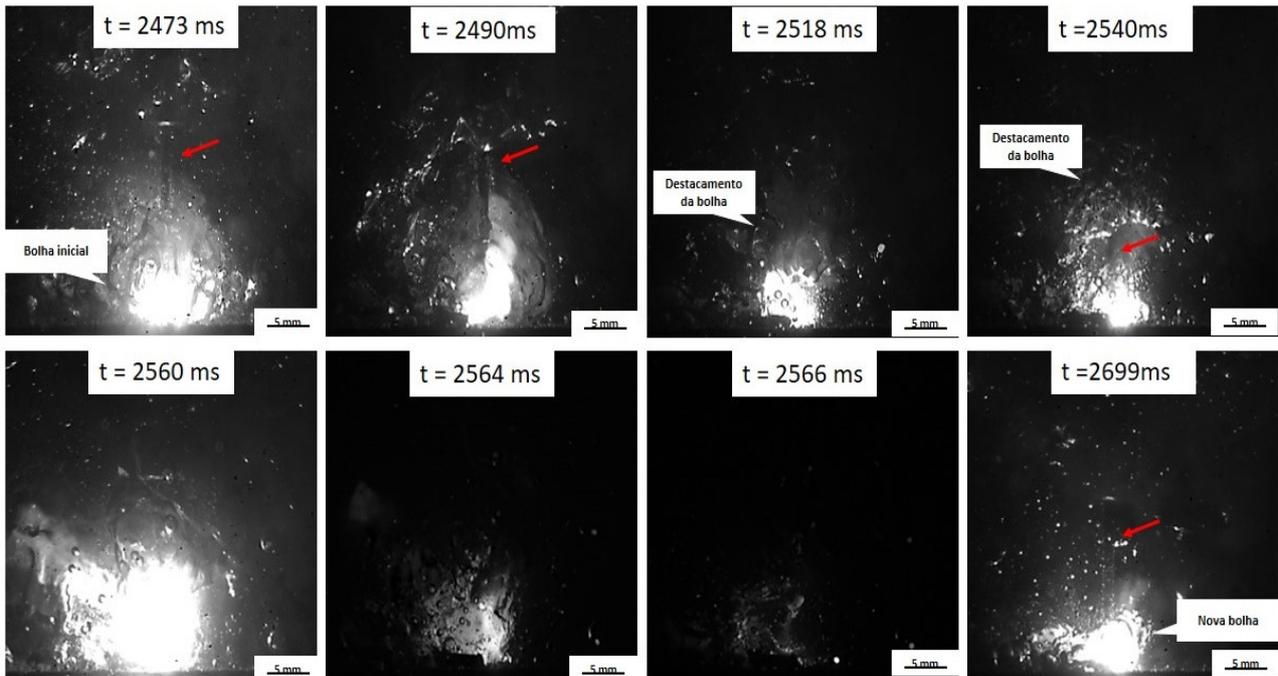


FIGURA 5.15 – Sequência de imagens para o quarto modo de evolução das bolhas. Em destaque, o arame autoprotetido.

Do instante 2473ms à 2490 ocorre o crescimento da bolha até atingir o diâmetro máximo. De 2518ms a 2540ms 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 o arco elétrico aumenta, evidenciado pelo pico de tensão no oscilograma e ele logo é extinto, como visto nos instantes 2564ms e 2566ms. 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.

Com o aumento dos valores de tensão e stick out, 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 das bolhas seguinte e ao destacar, levam consigo toda proteção do arco elétrico, provocando sua extinção. Dessa forma, é possível verificar pelo oscilograma representado na FIG. 5.16 que os sinais de corrente e tensão oscilam com grande frequência, indicando instabilidade do arco, evidência desse modo de evolução.

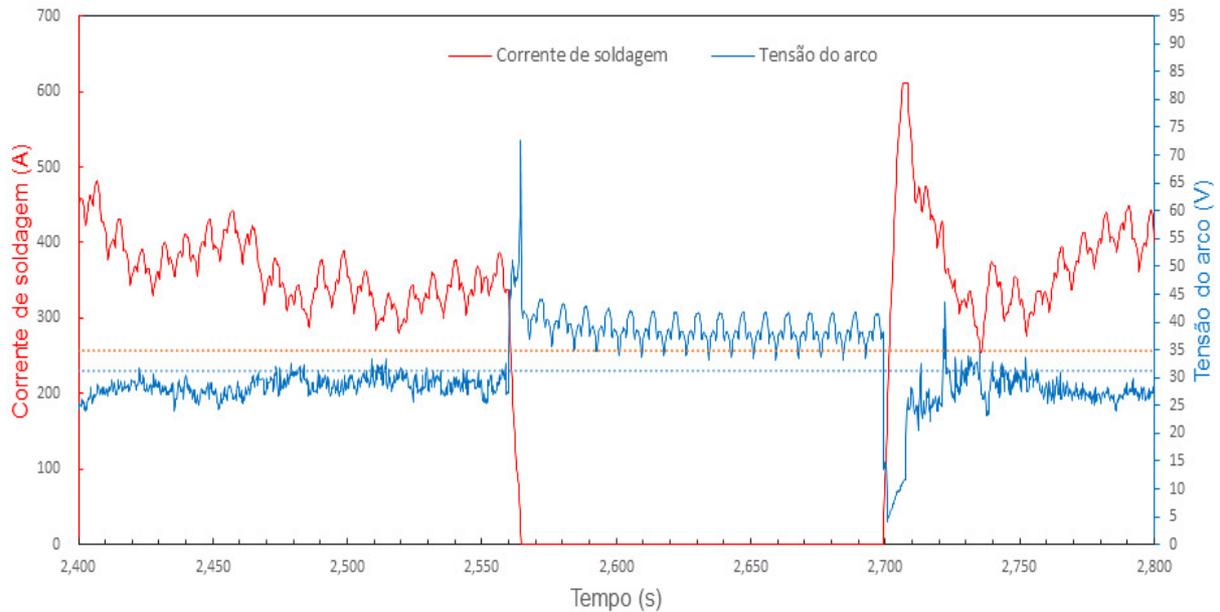


FIGURA 5.16 – Valores de tensão e corrente em função do tempo para o quarto modo de evolução das bolhas.
 FONTE: Elaborado pela autora.

Pela análise dos sinais, percebe-se que em $t = 2565$ a corrente de soldagem é nula e a tensão atinge o valor de $72,7$ V, nesse momento ocorre a extinção do arco, pois a bolha destacou-se e levou consigo a proteção gasosa. Após o intervalo de 135 ms, ocorre a reabertura do arco e crescimento de uma nova bolha, a corrente aumenta atingindo um valor máximo de 610 A e a tensão reduz, voltando ao seu valor médio de 30 V.

5.5 Cordões de solda

Os cordões de solda produzidos são apresentados na FIG. 5.16. As imagens foram obtidas de acordo com a sequência dos parâmetros indicados na TAB. 4.4. 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. Os cordões de solda produzidos apresentaram pouca escória e de fácil remoção.

Observa-se neste trabalho, melhor aparência visual dos cordões de solda realizados com contato seco, assim como encontrado por ASSUNÇÃO, 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 menor estabilidade do arco e dos sinais elétricos. Esse fato, conforme ASSUNÇÃO, 2018, ocorre devido a presença de água na região do contato elétrico, piorando a

transferência de corrente, e, conseqüentemente promovendo cordões mais irregulares. Observa-se nas amostras de bico de contato molhado, em especial na amostra 8, a qual apresenta os maiores valores dos parâmetros, constantes extinções do arco elétrico que levaram o arame tubular a fundir-se ao cordão de solda. Esses fragmentos de arame de solda podem ser visualizados em destaque na FIG 5.17. É possível verificar ainda que a medida que os parâmetros aumentam, a porosidade dos cordões é reduzida tanto para as amostras com contato seco como para o bico de contato molhado.

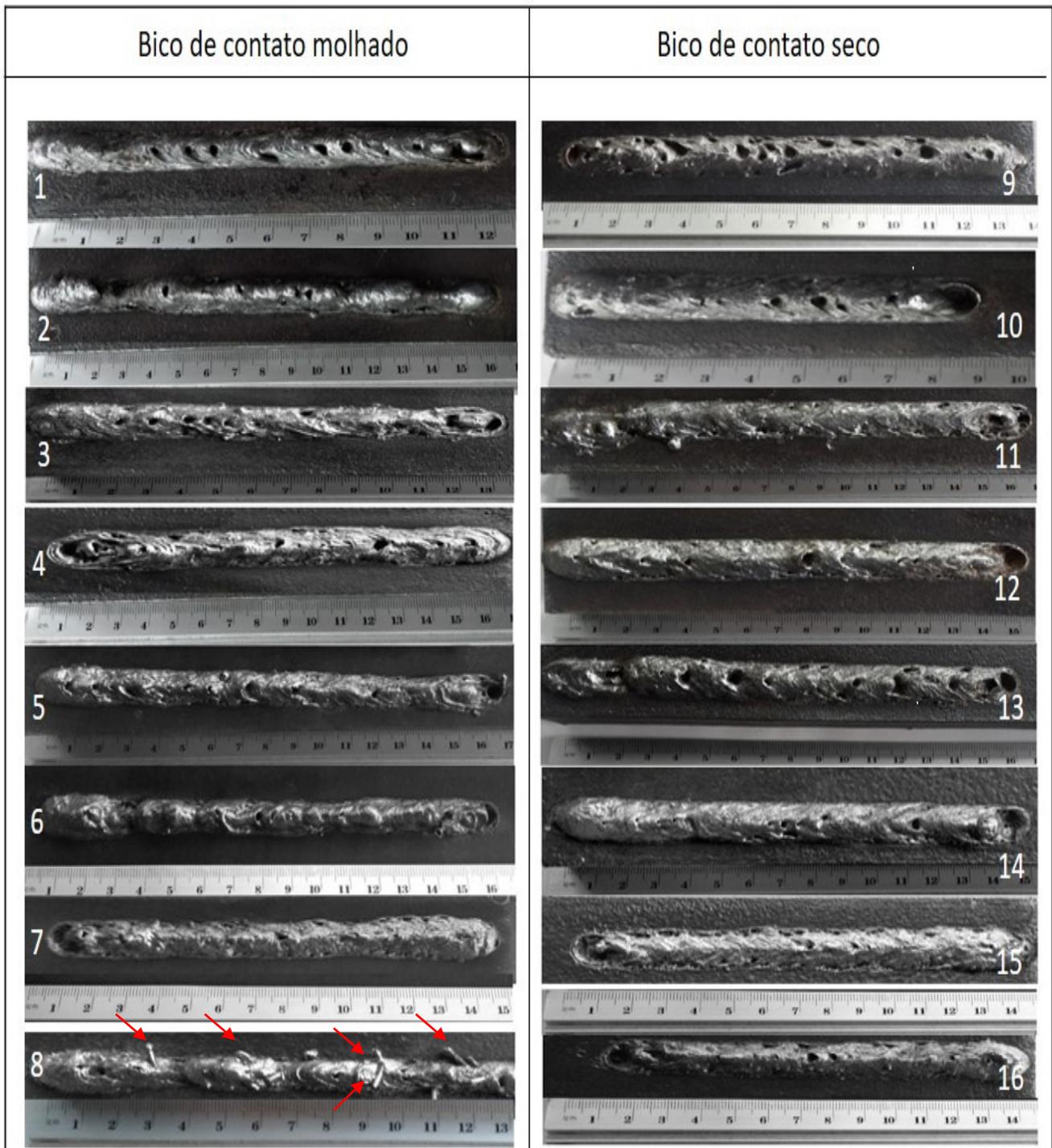


FIGURA 5.17 – Cordões de solda realizados. Em destaque, arame de solda preso ao cordão da amostra 8.

6. 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 o stick out, 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 de 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 stick out 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 stick out. Em relação à condição de bico seco, foi possível observar que as todas 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, com este trabalho, foi possível perceber 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.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se para trabalhos futuros:

1. Utilizar a tocha especial sem o vedante no bico, a fim de comparar o efeito da barreira mecânica imposta à restrição de crescimento da bolha, distinguindo-se assim, do efeito do bico de contato seco.
2. Avaliar a formação de poros e trincas de hidrogênio para as condições de “bico molhado” e “bico seco”.
3. Relacionar o nível de porosidade das soldas feitas com “bico molhado” e “bico seco” com a estabilidade do processo.
4. Avaliar o efeito do uso da tocha em diferentes tipos de eletrodos auto protegidos com diferentes formulações.
5. Desenvolver e aplicar um software de sincronismo para filmagem e aquisição dos sinais elétricos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, D. e MACHADO, I. G. - “Soldagem Subaquática Molhada com o Processo MIG”. Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Caxias do Sul - RS, pgs. 373 - 388. 1995.
- ARCELLOR Mittal. Catálogo Técnico- Soluções em aço para Construção Civil, Indústria e Agronegócio. Disponível em : <<http://longos.arcelormittal.com/produtos/catalogos/catalogo-tecnico>>. Acesso em Fev, 2019.
- ANDRADE, L. P. C. da Silva. “Soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular.” Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.
- ASM HANDBOOK: Welding, Brazing and Soldering, Volume VI, EUA, 1993;
- ASSUNÇÃO, M.T.; Bracarense, A. Q. “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.
- ASSUNÇÃO, M. T.. “Estudo sobre o efeito da água no bico de contato no processo de soldagem subaquática molhada com arame tubular do tipo autoprotetido”, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, Dissertação, 2018.
- AWS D3.6M: 1999: Specification for underwater welding, American Welding Society, Miami, USA 1999.
- BAILEY, N. “Welding under water – a metallurgical appraisal”. In: The First International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 1991.
- 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, v. 6, n. 3, p. 139-148, 2001.
- BRACARENSE, A.Q. Processos de Soldagem, Apostila. Universidade Federal De Minas Gerais, Brasil, 2016.
- BRACARENSE, A. Q.. Soldagem Subaquática. 3º Workshop Internacional de Manutenção Industrial. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- CHRISTENSEN N. “The Metallurgy of MMA Hyperbaric Welding”, SINTEF report N°. STF34 F83032, Trondheim, 1983.
- 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.
- FILHO, J. C. P; MELLO, R. T.; MEDEIROS, R. C.; PARANHOS, R. “História recente da soldagem subaquática molhada”. Infosolda. 2004.

FORTES, C. “Apostila Arames Tubulares”. ESAB BR, Maio 2004.

GOOCH, T. G. “Properties of Underwater Welds. Part 1. Procedures Trials”. Metal Construction, pp.164-167, vol.8, March, England, 1983

GUO, N.; Wang, M.; DU, Y.g; GUO, W.; FENG, J.. “Metal Transfer in Underwater Flux-Cored Wire Wet Welding at Shallow Water Depth”. Materials Letters, v. 144, p. 90-92, 2015.

IBARRA, S.; OLSON, D. L. and GRUBBS, C. E. - "Underwater Wet Welding of Higher Strength Offshore Steels". 21st Offshore Technology Conference, OTC 5889, pp. 67-76, Houston, Texas, 1989.

IBARRA, S. LIU, S.; OLSON, D. L.; Underwater welding. Welding, Brazing, and Soldering—ASM Handbook, v. 6, p. 1010-1015, 1993.

ISIKLAR, Y. V. e GIRGIN, I. “Numerical Modelling of Underwater Welding”. Journal of Naval Science and Engineering, vol. 7, n. 2, p. 11-29, 2011

JIA, C., et al. “Spectroscopic analysis of the arc plasma of underwater wet flux-cored arc welding”. Journal of Materials Processing Technology. 213 (2013) 1370– 1377

JOSHI, A.M. “Underwater Welding”. Metal Web News. Disponível em: <<https://metalwebnews.com/underwater-welding/underwater-welding.pdf>>. Acesso em 16 mar. 2019, 17:20.

KANNAN, T.; MURUGAN, N. Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality. Journal of Materials Processing Technology, v. 176, n. 1-3, p. 230-239, 2006.

ŁABANOWSKI, J.; FYDRYCH, D.; ROGALSKI, G. “Underwater Welding-a review”. Advances in Materials Sciences, v. 8, n. 3, p. 11-22, 2008.

LI, S., MEI, F., LI, Z. - “Study on Underwater GTA Welding”, International Conference on Underwater Welding, New Orleans, Louisiana - USA, pgs. 135 - 143, 1991.

MARQUES, P. V.; Modenesi, P. J.; Bracarense, A.Q.; “Soldagem - Fundamentos e Tecnologia”. Editora Elsevier, 2015.

MASUBUCHI, K. Review of underwater welding technology. Oceans 81. Boston – Ma – USA. p.649-651, 1981

MYRES, D. Metal Cored Wires: Advantages e Disadvantages, Welding Journal, v. 81, n. 9, pp.39 – 42, Sept. 2002 Disponível em : <<https://app.aws.org/wj/2002/09/feature3/>>.

MODENESI, Paulo J., “Introdução a Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais”. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2015.

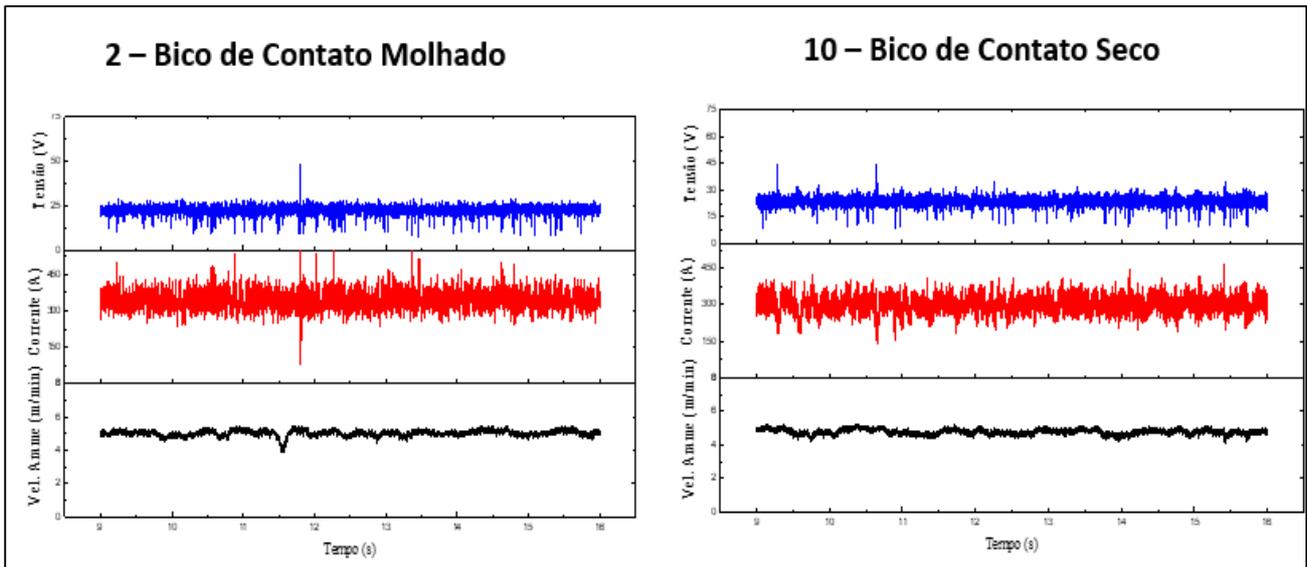
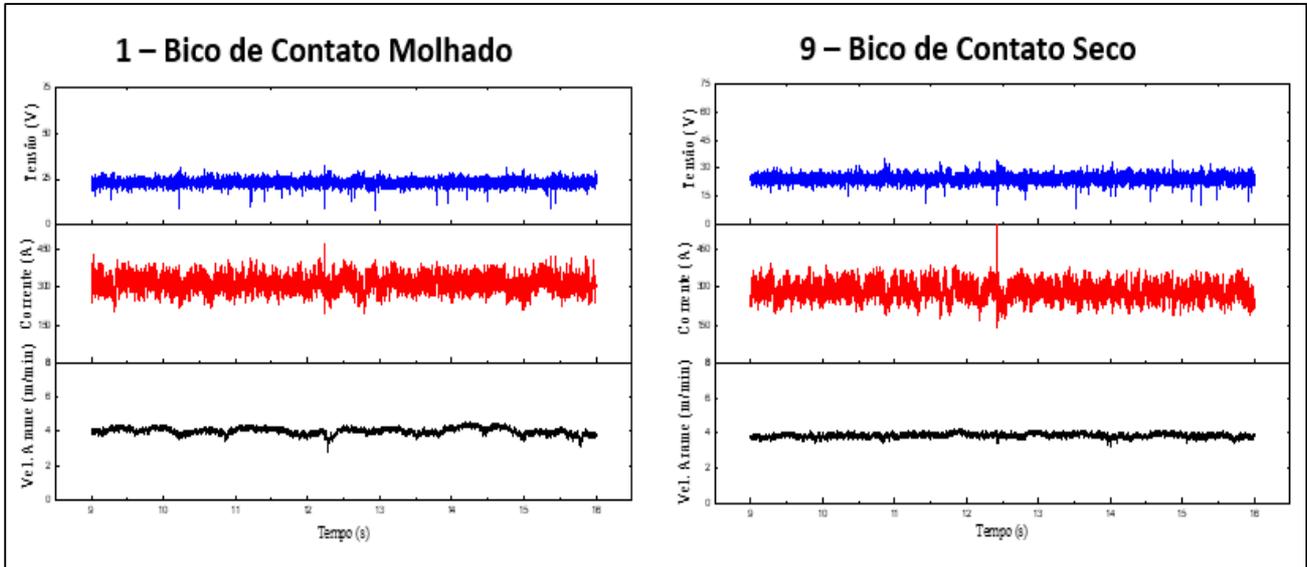
MOSTAFA, N. B.; KHAJAVI, M. N. “Optimization of welding parameters for weld penetration in FCAW”. Journal of achievements in materials and manufacturing engineering, v. 16, n. 1-2, p. 132-138, 2006.

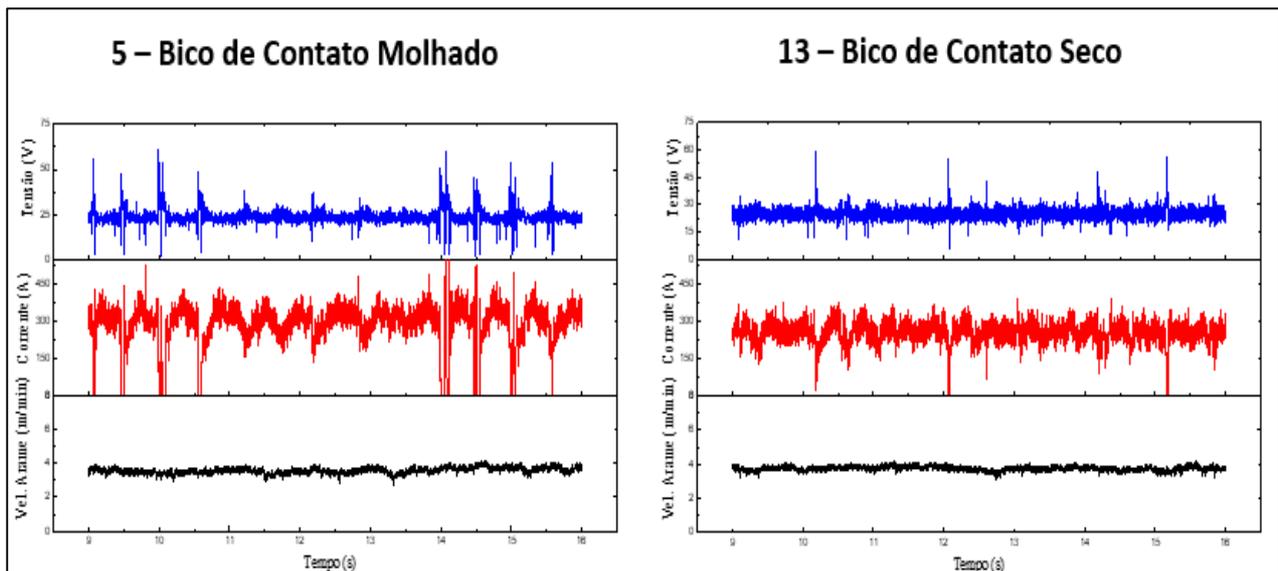
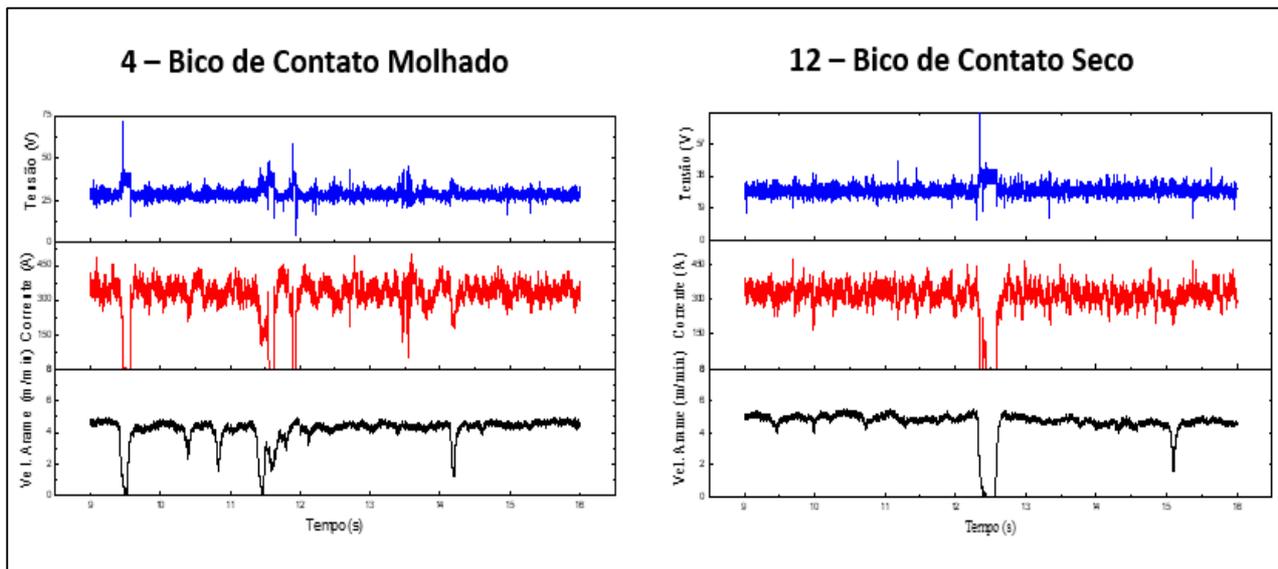
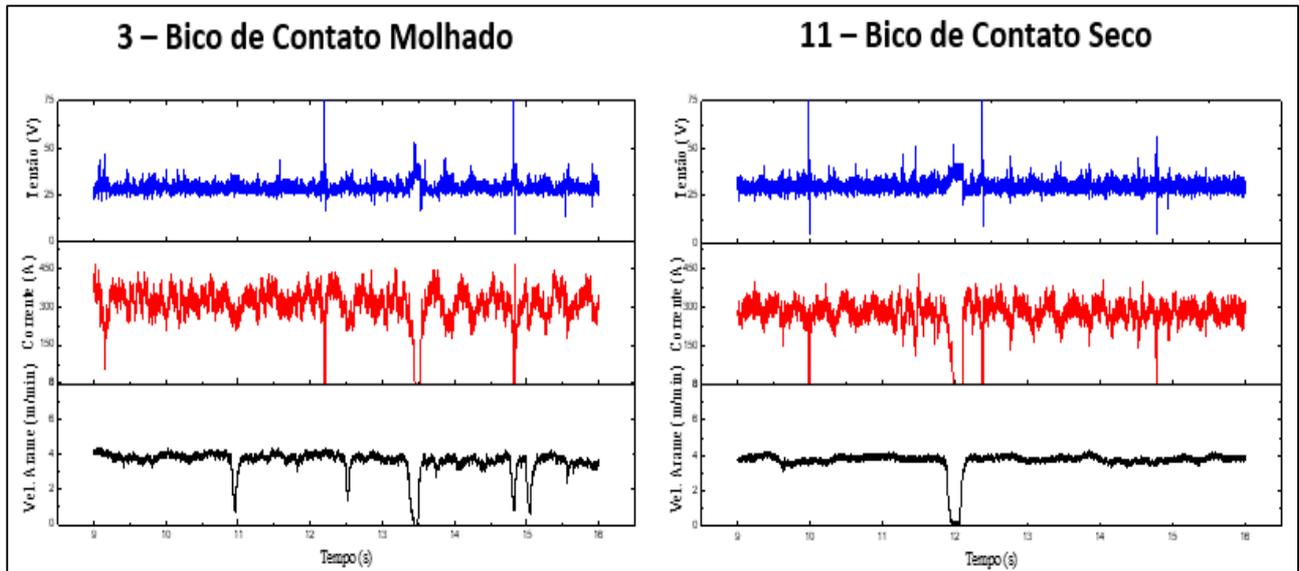
- NIXON, J.; BILLINGHAM, J. A survey of underwater welding techniques. *Endeavour*, v. 11, n. 3, p. 143-148, 1987.
- NIXON, J. H. BRYDON, A. M. An investigation into underwater wet welding using the flux cored arc welding process. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY (United States), 1995.
- OMANEJE, Joshua Emuejevoke; MARTIKAINEN, Jukka; KAH, Paul. Effect of welding parameters on weld bead shape for welds done underwater. *International journal of mechanical engineering and applications*, v. 2, n. 6, p. 128-134, 2014.
- OLIVEIRA, F. R.. “Estudo sobre o correlacionamento do fenômeno das bolhas, sinais elétricos e metal de solda na soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos”. Dissertação, Escola de Engenharia, UFMG, 2012.
- PEREZ-GUERRERO, F. “Effect of nickel additions on rutile electrodes for underwater welding”, Golden, Colorado, EUA, Colorado School of Mines, Dissertação, 84f , 2002.
- 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.
- POKHONYA, I.; GORPENYUK, V.; KONONENKO, V.; PONOMAREV, V.; MAKSIMOV, S. Some peculiarities of arc burning and metal transfer in wet underwater self-shielding fluxcored wire welding. *IIW Conference – Welding Under Ex-treme Conditions*, p. 151-160. 1989.
- POPE, A. M.; MEDEIROS, R. C.; LIU, S. Solidification of under-water wet welds. *Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Material Engineer-ing. Vol. III*, p. 54-63. 1995.
- RODRIGUES, E. R.. “Influência de parâmetros do processo FCAW-G nas características da solda do aço ASTM A-36”. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2010.
- ROWE, M.; LIU, S. “Recent developments in underwater wet welding”. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 6, n. 6, p. 387–396, 1 dez. 2001.
- SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.. “Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, Melhor desempenho”. *Artliber*, 2008.
- SHI, Y.; ZHENG, Z.; HUANG, J.. “Study on Arc Stability of Underwater Wet Flux - Cored Arc Welding”. *Proceedings of the 10th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing*, June 2012, Chongqing, China.
- SILVA, W.C.D; PESSOA, E.C.P.; BRACARENSE, A.Q.; RIBEIRO, L.F.; ÁVILA, T. “Diffusible Hydrogen on Underwater Wet Welds Produced With Tubular Shielded Electrodes Using Internal Gas Protection”, Natal, RN, Brazil, 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011.
- SILVA, W.C.D. “Efeito da profundidade de soldagem sobre o hidrogênio difusível nas soldas molhadas.” Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

- STARLING, C. M. D., MODENESI, P. J. e BORBA, T. M. D.. “Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular “Metal Cored””. Universidade Federal de Minas Gerais. Soldagem & Inspeção. São Paulo, Vol.16, No. 3, p.285-300, Jul/Set 2011
- TSAI, C. L.; Masubuchi, K. “Interpretive Report on Underwater Welding”, Welding Research Council Bulletin, 224, February, 37pg, 1977.
- TSAI, C.; MASUBUSHI, K. “Mechanics of rapid cooling in un-derwater welding”. Applied Ocean Research, v. 2, n. 2, p. 99-110. 1979.
- TEICHMANN, E. W.. “Contribuição ao desenvolvimento da soldagem molhada com arames tubulares”. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- VILARINHO, et al. “Initial trials of underwater wet welding using mechanized FCAW process”, Cobem 2019, 20th Congress of Mechanical Engineering, Gramado, Brazil, 2009.
- WAINER, E. et al., “Soldagem – Processos e metalurgia”, São Paulo. Ed. Edgard Blucher, Ltda, 1992.
- 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
- WASTON, P.D., TSAI C.L.; WOOD, B. “Fitness of service design application for underwater wet welds”; International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures - December 7-9, 1994, New Orleans, Louisiana, USA, American Bureau of Shipping, page 201-236
- WELDING HANDBOOK, Materials and Applications – part I. American Welding Society. Volume III, Miami, EUA, 1996.
- WERNICKE, R., POHL, R. “Underwater Wet Repair-Welding and Strength Testing on Pipe-Patch Joints”, 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE – 1998.
- WIDGERY, David. “Tubular wire welding”. Elsevier, 1994.
- VERMA, K.; GARG, H. K. “Underwater welding-Recent trends and future scope”. International Journal on Emerging Technologies, v. 3, n. 2, p. 115-120, 2012.

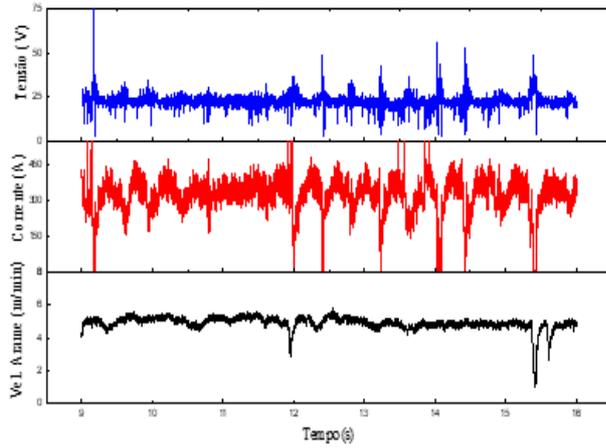
ANEXO 1

OSCILOGRAMAS DE TENSÃO, CORRENTE DE SOLDA E VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME

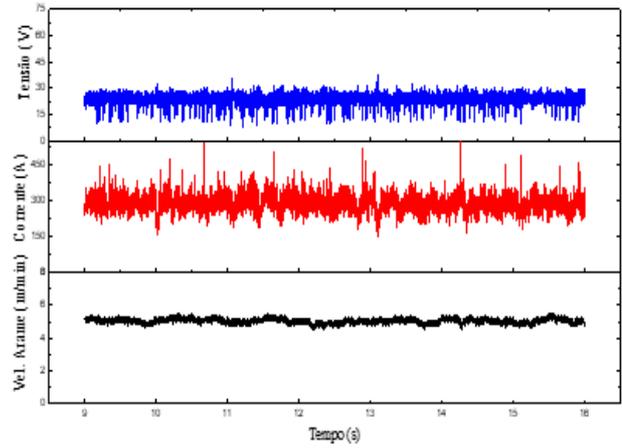




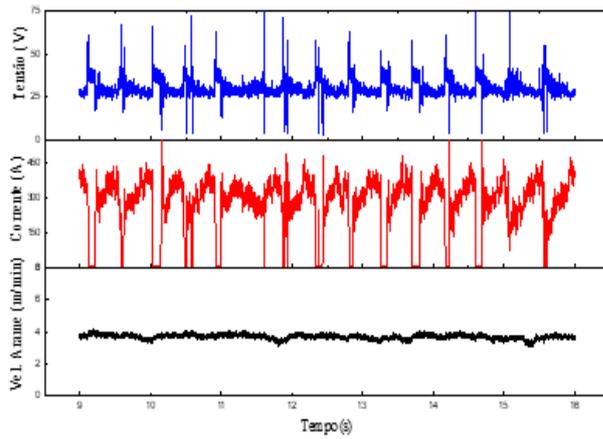
6 – Bico de Contato Molhado



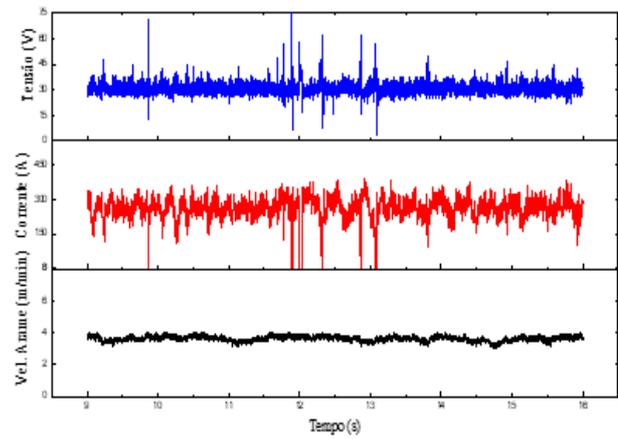
14 – Bico de Contato Seco



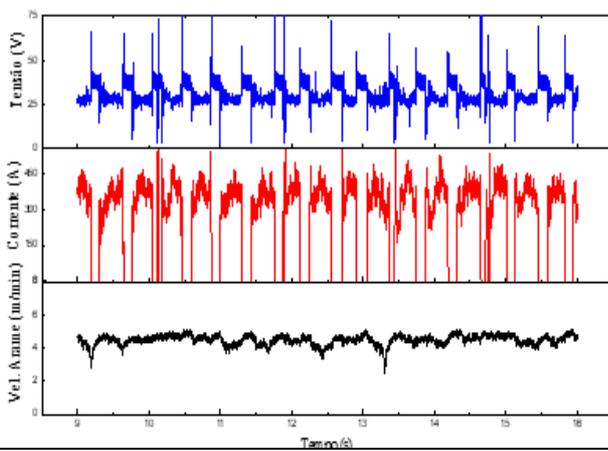
7 – Bico de Contato Molhado



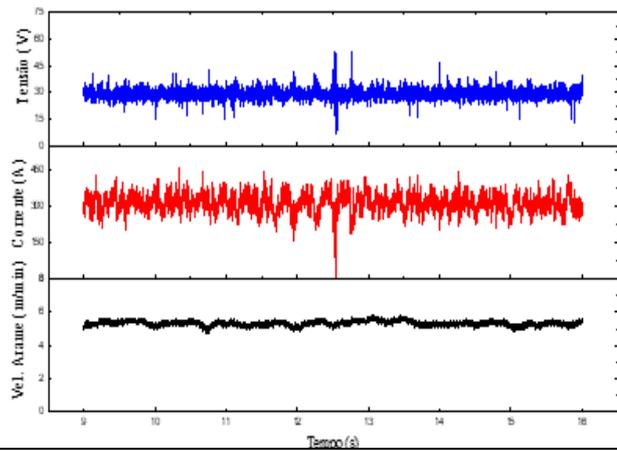
15 – Bico de Contato Seco



8 – Bico de Contato Molhado

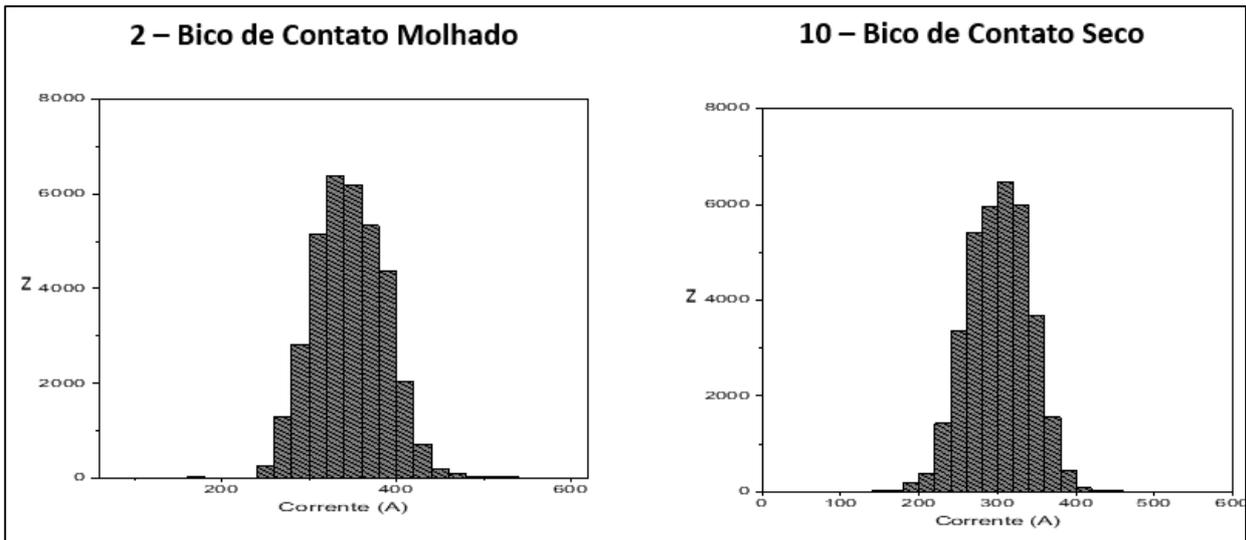
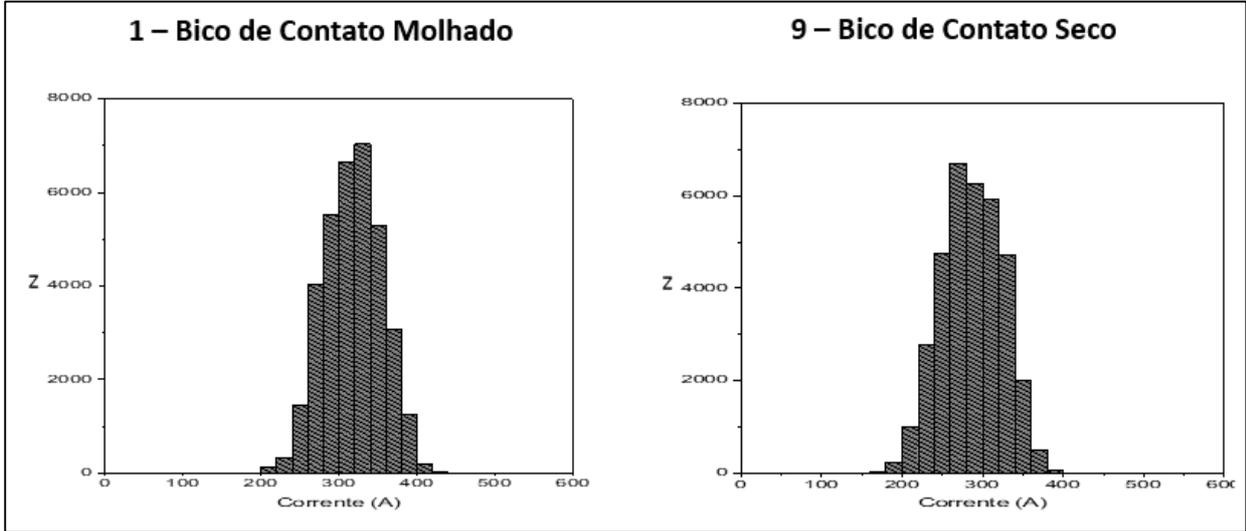


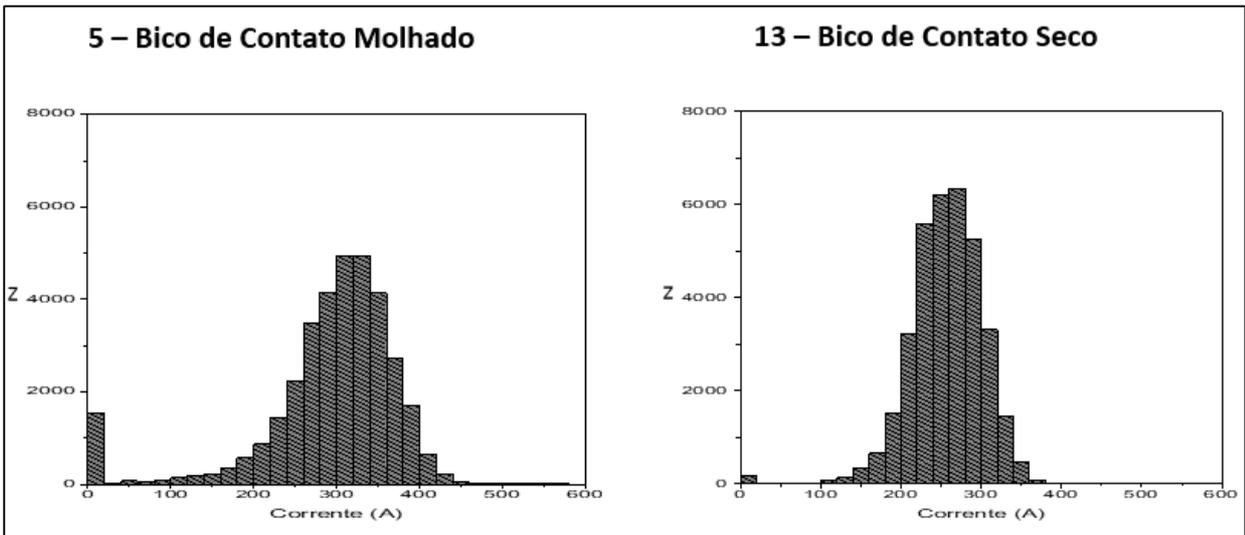
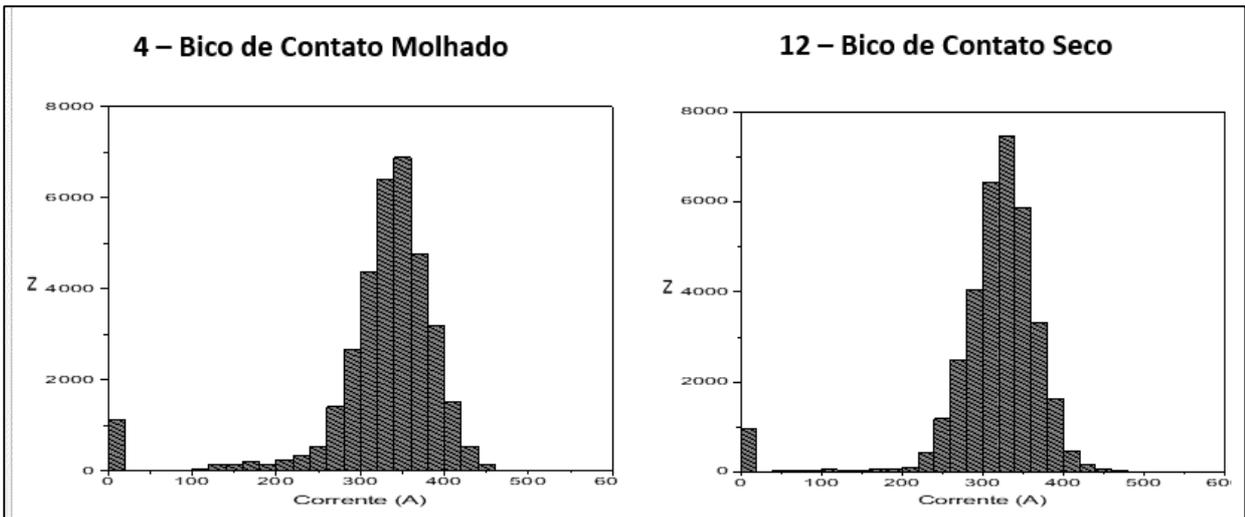
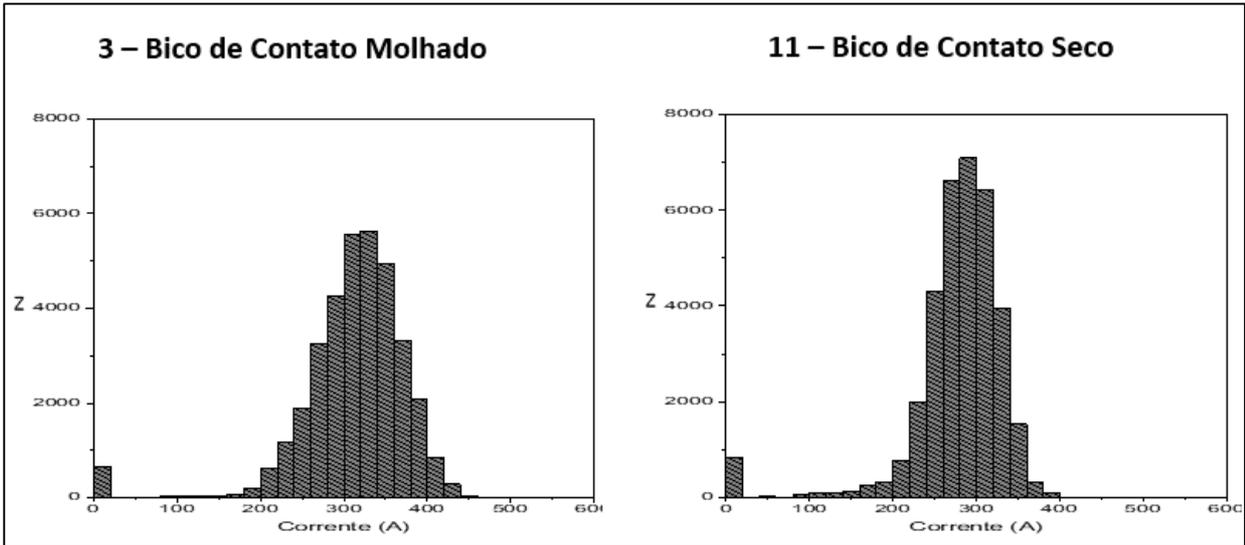
16 – Bico de Contato Seco

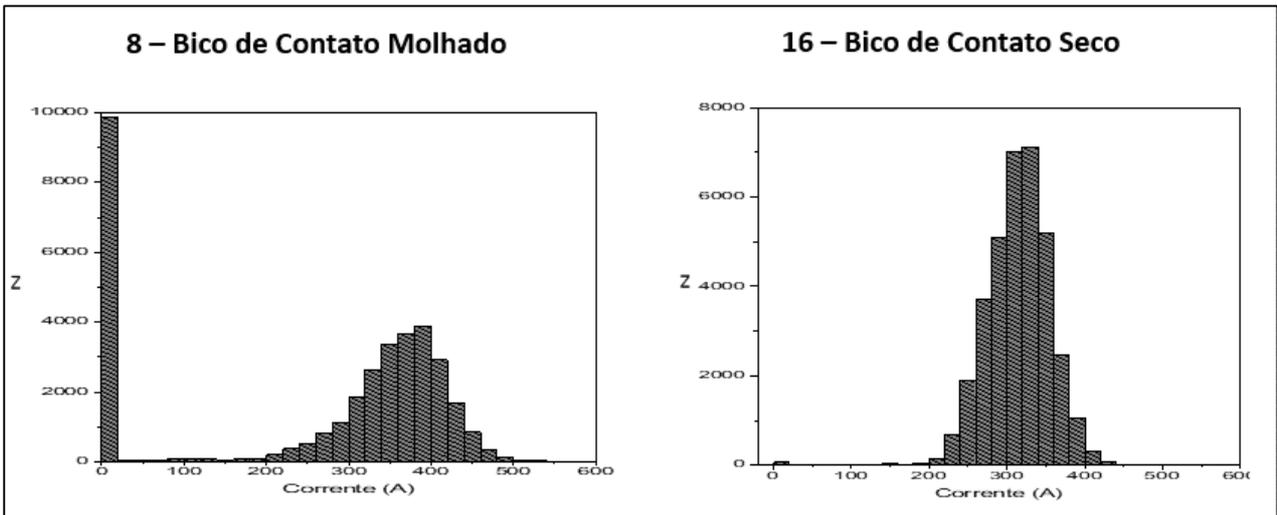
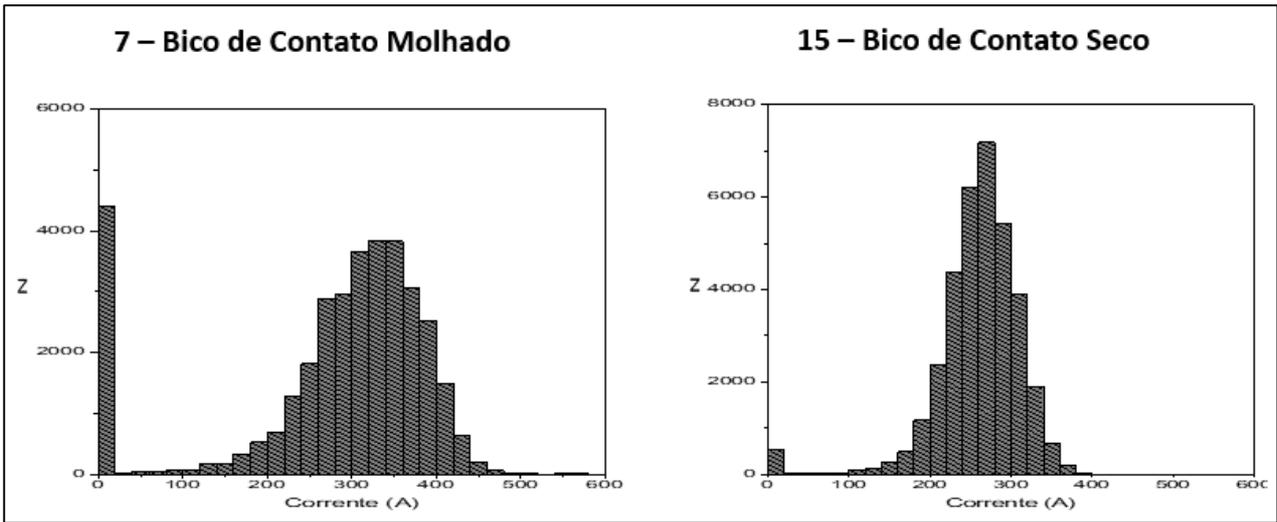
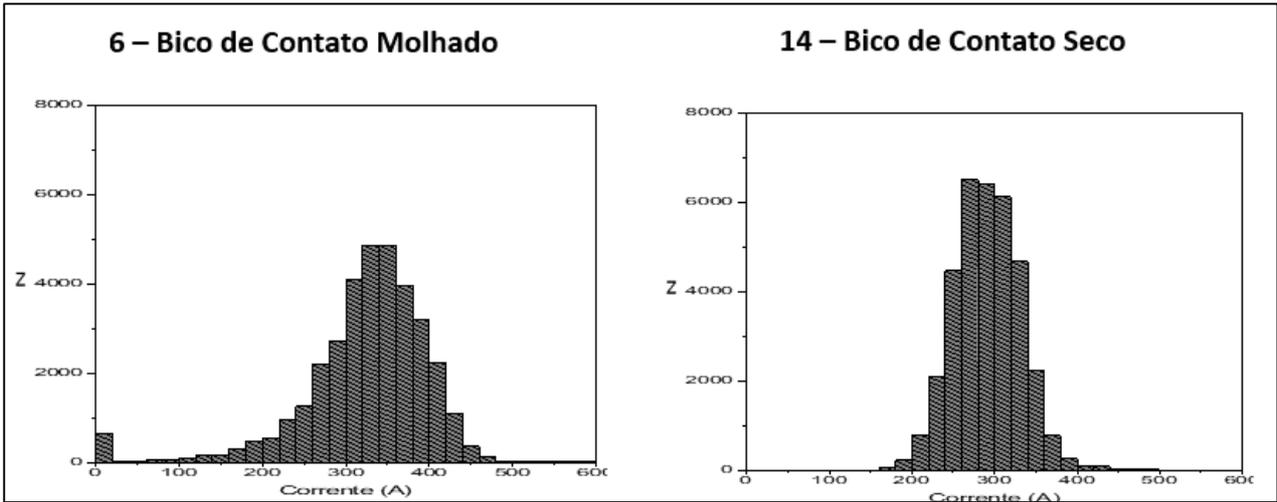


ANEXO 2

HISTOGRAMAS DA CORRENTE DE SOLDAGEM

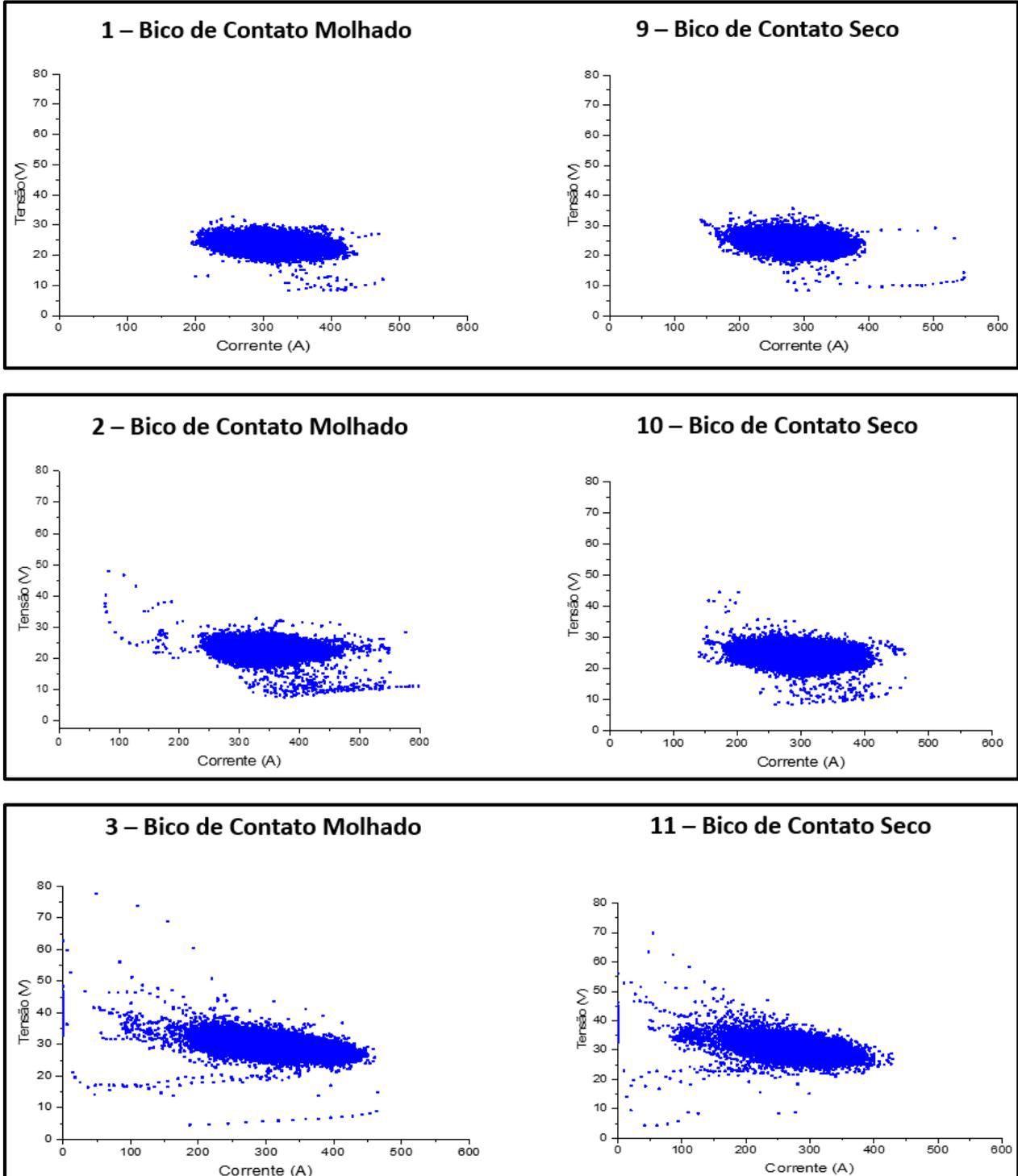


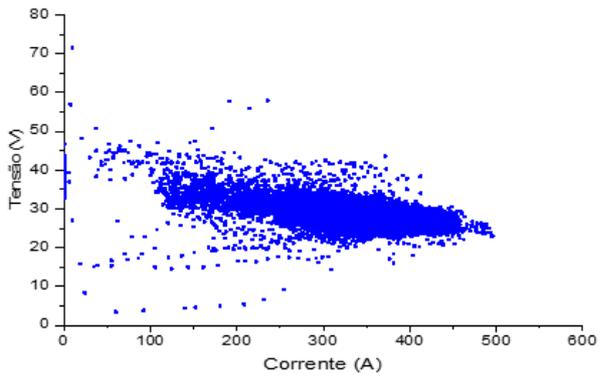
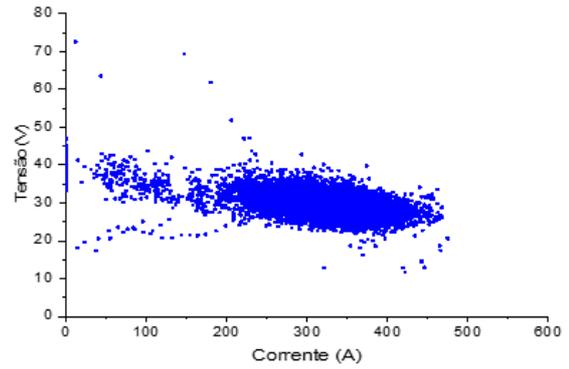
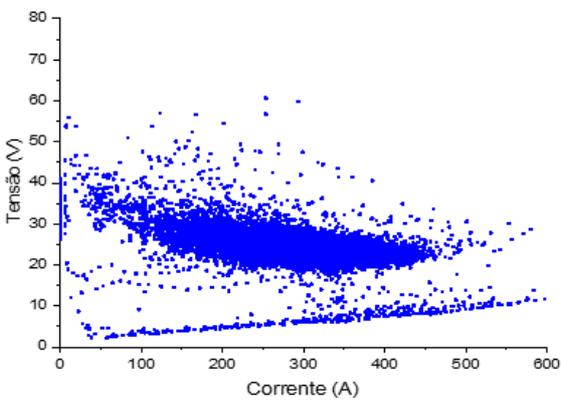
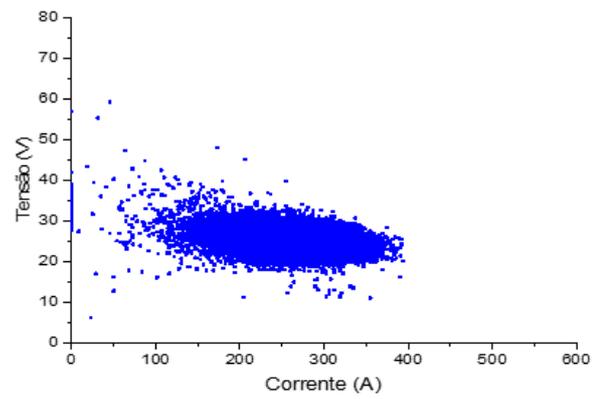
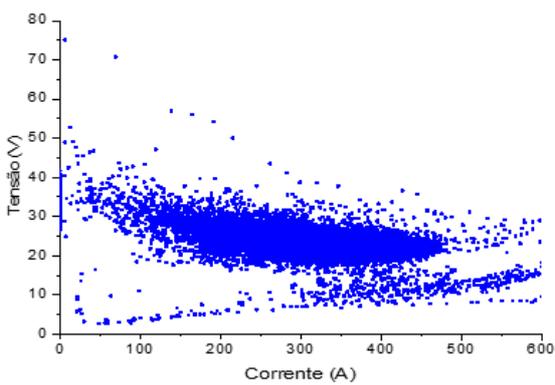
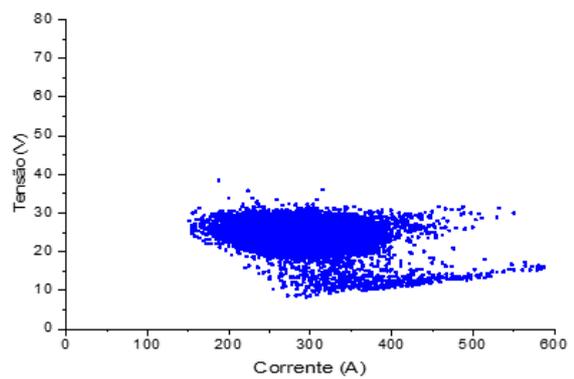


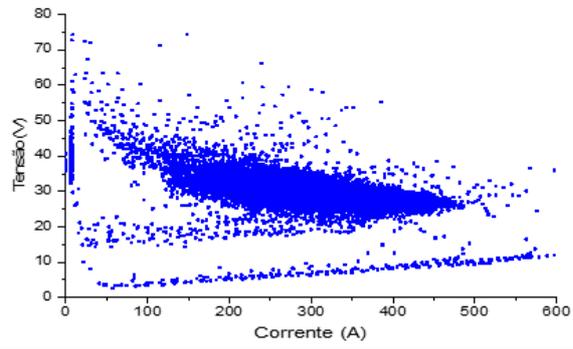
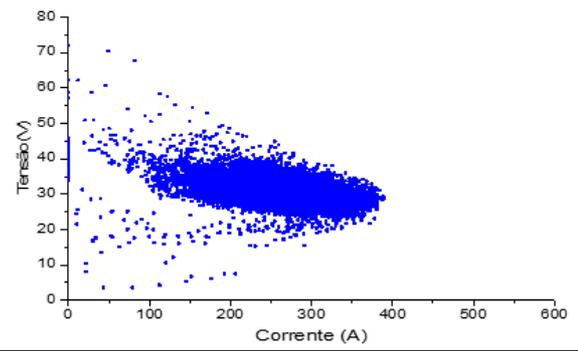
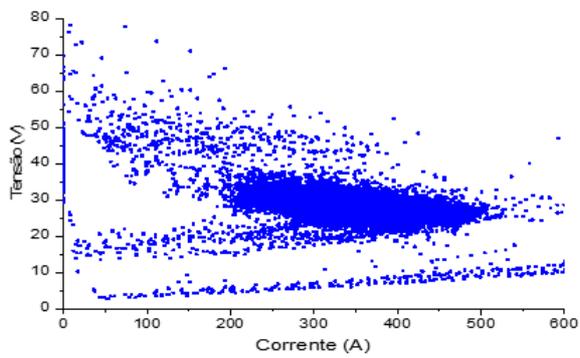


ANEXO 3

CICLOGRAMAS TENSÃO X CORRENTE PARA OS ENSAIOS REALIZADOS



4 – Bico de Contato Molhado**12 – Bico de Contato Seco****5 – Bico de Contato Molhado****13 – Bico de Contato Seco****6 – Bico de Contato Molhado****14 – Bico de Contato Seco**

7 – Bico de Contato Molhado**15 – Bico de Contato Seco****8 – Bico de Contato Molhado****16 – Bico de Contato Seco**