



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

Marcelo Teodoro Assunção

INFLUÊNCIA DO AMBIENTE DO BICO-DE-CONTATO NA SOLDAGEM FCAW
SUBAQUÁTICA MOLHADA COM TOCHA ESPECIAL

Belo Horizonte

2023

Marcelo Teodoro Assunção

**INFLUÊNCIA DO AMBIENTE DO BICO-DE-CONTATO NA SOLDAGEM FCAW
SUBAQUÁTICA MOLHADA COM TOCHA ESPECIAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção de título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: PhD Alexandre Queiroz Bracarense

Belo Horizonte

2023

A851i

Assunção, Marcelo Teodoro.

Influência do ambiente do bico-de-contato na soldagem FCAW subaquática molhada com tocha especial [recurso eletrônico] / Marcelo Teodoro Assunção. - 2023.

1 recurso online (124 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: 112-124.

Bibliografia: f. 22-63.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3. Soldagem subaquática - Teses. 4. Solda e soldagem - Teses. 5. Processos de fabricação - Teses. I. Bracarense, Alexandre Queiroz. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

“INFLUÊNCIA DO AMBIENTE DO BICO-DE-CONTATO NA SOLDAGEM FCAW SUBAQUÁTICA MOLHADA COM TOCHA ESPECIAL”

MARCELO TEODORO ASSUNÇÃO

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Alexandre Queiroz Bracarense (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Ariel Rodriguez Arias (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Ezequiel Caires Pereira Pessoa (Departamento de Soldagem/Engenharia de Materiais/LeTourneau University in Texas), Dr. Louriel Oliveira Vilarinho (Departamento de Engenharia Mecânica/UFU) e Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva (Departamento de Engenharia Mecânica/UFSC), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Engenharia de Manufatura e Materiais**".

Tese aprovada no dia 10 de novembro de 2023.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Queiroz Bracarense, Membro**, em 18/12/2023, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ariel Rodriguez Arias, Chefe de departamento**, em 18/12/2023, às 17:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Regis Henrique Goncalves e Silva, Usuário Externo**, em 20/12/2023, às 14:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Usuário Externo**, em 22/12/2023, às 07:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ezequiel Caires Pereira Pessoa, Usuário Externo**, em 10/01/2024, às 10:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2912290** e o código CRC **39462D16**.

À minha família

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força e saúde física e mental.

À minha esposa, Kathlin, pelo apoio, carinho, compreensão, conselhos e pelo sorriso.

Aos meus pais, José Maria e Dalva, e à minha irmã, Marina, pelo apoio, carinho e atenção compartilhados durante toda a minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, por ter me orientado ao longo da jornada, pelos ensinamentos e pela paciência.

Ao Sr. Waldyr, D. Efigênia, Kimberlin e Kelvin pela amizade, carinho e por me acolherem em sua família.

A todos os meus amigos e familiares, por sempre me motivarem e darem força nas minhas realizações.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Avançado Arcos, pela concessão da licença para capacitação e pelo suporte laboratorial.

Aos amigos do LRSS, por todos os ensinamentos, tempo disponibilizado para ajuda, conselhos e esclarecimento de dúvidas. Agradeço especialmente ao Prof. Ariel, Andrés, Gabriel, Gedael, Diogo, Pedro, Carol, Diego, Luciano, Mateuzão, Fagner, Miguel, Rogério, Eduardo e Maurício.

Aos irmãos da República Batcaverna, pelo ontem, hoje e amanhã de amizade eterna, pela vida em família e por sempre ter um lugar para voltar e chamar de casa.

Ao Sr. Anderson Perpétuo de Souza, da Oficina Mecânica do Departamento de Química – UFMG, pela usinagem das peças componentes da tocha de soldagem.

Ao departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, pela estrutura e financiamento, em especial à Marina por toda ajuda e empenho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A todos, meus sinceros agradecimentos!

"Son, your life's an open book
Don't close it 'fore it's done"
(Mama Said – Metallica)

RESUMO

O processo de soldagem subaquática molhada com arames tubulares tem sido investigado em várias pesquisas devido às suas características operacionais. O processo é uma alternativa viável ao processo com eletrodos revestidos por apresentar maior produtividade e permitir variações na composição do fluxo do arame. Em comparação à soldagem ao ar livre, a soldagem FCAW subaquática convencional é caracterizada pelo contato da água com as partes elétricas da tocha, com o arame tubular, com a poça de fusão e a peça de trabalho. A estabilidade do arco é menor devido às perturbações causadas pela água, pela dinâmica de evolução das bolhas e pela pressão da coluna d'água, em soldas em grande profundidade. No presente trabalho, soldas subaquáticas com arame tubular foram realizadas com uma tocha que mantém o bico de contato seco, e também da forma convencional. Cordões sobre chapa foram depositados em profundidades simuladas de 0,3 m, 10 m e 30 m usando uma câmara hiperbárica. Os sinais elétricos de corrente e tensão e os dados de temperatura do bico de contato foram registrados e processados para avaliação das características operacionais do processo. Os resultados mostraram que o valor médio da corrente de soldagem foi menor nas soldas realizadas com o bico de contato seco. A presença de água na região do bico de contato interfere no coeficiente de troca de calor e, conseqüentemente, na temperatura do bico de contato e do arame-eletrodo. Devido às maiores temperaturas atingidas pelo bico de contato e pelo arame-eletrodo, menor corrente de soldagem foi requisitada da fonte, resultando em maior eficiência de fusão nas soldas depositadas usando a tocha que mantém o bico de contato seco. Essa condição apresentou, também, menores variações nos parâmetros geométricos dos cordões nas diferentes profundidades investigadas. Maior estabilidade do arco foi alcançada, em consequência das menores variações registradas nos sinais elétricos e menor quantidade de eventos de extinção do arco, em comparação às soldas convencionais. A combinação da maior estabilidade do arco com a menor quantidade de eventos de curto-circuito contribuiu para a redução na porosidade do cordão e menor variação do reforço ao longo do cordão de solda.

Palavras-chave: tocha para soldagem subaquática; temperatura do bico de contato; estabilidade do arco; eficiência de fusão.

ABSTRACT

Underwater flux-cored arc welding has been investigated in many researches due to its operational characteristics. The process is a feasible alternative to shielded metal electrodes once it provides higher deposition rates and makes possible to change the flux composition. When compared to open air welding, the conventional method of underwater flux-cored arc welding (UWW-FCAW) is characterized by water around the welding torch's electric parts, the tubular wire, the molten pool and the workpiece. Current and voltage electric signal show worse stability due to the water environment, to bubble evolution and detachment phenomenon and also to the water pressure in higher depths. In the present work, underwater FCAW was performed by keeping the contact tip dry, inside a specially developed torch, and as in conventional underwater welding. The welds were carried out in a flat position at simulated depths of 0.3 m, 10 m and 30 m using a hyperbaric chamber. Welding electrical signals of voltage, current and contact tip temperature were acquired and processed to determine process behavior. As a result, the welding current was reduced when the contact tip was kept dry inside the torch because of the higher temperature achieved by resistance heating when it was insulated from the water. The ambient surrounding the contact tip interfered with the coefficient of heat transfer and, consequently, with its temperature. Welds performed with the dry contact tip also presented slight variations in bead shape parameters in different water depths. Higher arc stability was achieved by welding with the contact tip inside the air chamber, as minor variations of electric signals and fewer arc extinction events were observed compared to conventional underwater welds. The combination of improved arc stability with higher electrode temperature may also have contributed to minor porosity and smaller variation of the reinforcement along the weld bead.

Keywords: underwater welding torch; contact tip temperature; arc stability; melting efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação dos métodos de soldagem subaquática.	23
Figura 2: Tocha para Soldagem Subaquática com Proteção Gasosa – Patente Número US4029930.	24
Figura 3: Dispositivo para Soldagem Subaquática – Patente Número 4172974.	25
Figura 4: Taxas de deposição de eletrodos revestidos e arames tubulares.	26
Figura 5: Soldagem subaquática com arame tubular auto protegido.	27
Figura 6: Imagem em raios-x do bico de contato e arame tubular.	28
Figura 7: Ponto de transmissão forçado no bico de contato, (a) na entrada, (b) no meio e (c) na saída.	29
Figura 8: Fontes de calor que afetam a temperatura do bico de contato e mecanismos de transferência de calor.	31
Figura 9: Representação do modelo desenvolvido por Modenesi & Reis (2007).	32
Figura 10: Distribuição estimada de temperatura ao longo de um arame maciço de 1,0 mm em três níveis de corrente no processo GMAW.	33
Figura 11: Bico de contato convencional e bico de contato combinado.	33
Figura 12: Análise por método de elementos finitos: (a) densidade de corrente no arame e (b) densidade de corrente no bico de contato.	34
Figura 13: Efeito da profundidade na estabilidade do arco elétrico no processo SMAW.	35
Figura 14: Efeito da pressão da água na aparência do cordão e porosidade.	36
Figura 15: Oscilogramas de tensão e corrente indicando aumento da ocorrência de curtos-circuitos anormais com a elevação da profundidade – Processo FCAW subaquática.	36
Figura 16: Efeito da pressão na faixa de parâmetros de soldagem aceitáveis.	37
Figura 17: Coeficiente de variação da tensão de soldagem em diferentes profundidades.	38
Figura 18: Desenho esquemático indicando as trocas de calor: (a) soldagem ao ar e (b) soldagem subaquática.	39
Figura 19: Comparação entre os formatos da poça de fusão de soldas feitas ao ar e na condição subaquática.	40

Figura 20: Comportamento do arco elétrico durante o estágio de destacamento da bolha.	41
Figura 21: Comportamento dinâmico da bolha no terceiro modo de evolução.	42
Figura 22: Variação dos valores de tensão e corrente de soldagem no terceiro modo de evolução das bolhas.....	42
Figura 23: Coeficiente de variação dos sinais elétricos para os quatro modos de evolução das bolhas. Fonte: Adaptado de Feng et al. (2017).	43
Figura 24: Força de arrasto da bolha de vapor agindo sobre a gota de metal fundido.	43
Figura 25: Variação no diâmetro e velocidade de ascensão das bolhas em diferentes profundidades de soldagem.	44
Figura 26: Variação da frequência de destacamento das bolhas em função da velocidade de soldagem.....	46
Figura 27: Distribuição dos modos mistos de transferência metálica em função dos valores de tensão e corrente: A- Transferência globular repelida e tensão superficial; B- Transferência globular repelida, tensão superficial e arco submerso na poça de fusão; C- Arco submerso na poça de fusão; D- Tensão superficial e arco submerso na poça de fusão; E- Fora da faixa operacional.....	48
Figura 28: Efeito da variação da corrente de soldagem (a) nos valores de penetração e largura do cordão SMAW subaquática, (b) na velocidade de soldagem.	49
Figura 29: Oscilograma de corrente e de velocidade de alimentação de arame nas condições (a) ao ar e (b) subaquática.	50
Figura 30: Relação entre o número de poros e o calor cedido à peça.....	51
Figura 31: Geração e saída de gases da gota de metal fundido.....	52
Figura 32: Esquema e montagem da tocha com barreira mecânica para soldagem subaquática.....	53
Figura 33: Efeito da velocidade de soldagem no coeficiente de variação da corrente e tensão em soldas realizadas ao ar e em soldas subaquáticas com e sem o uso da barreira mecânica.....	54
Figura 34: Esquema da soldagem subaquática a arco submerso.....	55
Figura 35: Oscilogramas dos sinais de tensão e corrente: (a) Soldagem FCAW subaquática e (b) soldagem subaquática a arco submerso.	55

Figura 36: Vista superior e seções transversais de cordões depositados em diferentes condições: (a,d) soldagem subaquática convencional com arames tubulares; (b,e) Arco submerso em fluxo contendo silicato de sódio; (c,f) Arco submerso em fluxo contendo resina epóxi.	56
Figura 37: Esquema da estrutura da escória produzida nas três condições de soldagem: (a) soldagem convencional, (b) soldagem com fluxo contendo silicato de sódio e (c) soldagem com fluxo contendo resina epóxi.	57
Figura 38: Esquema de montagem dos equipamentos utilizando a bobina de indução.	57
Figura 39: Esquema representativo da soldagem FCAW subaquática com uso de ondas em alta frequência.	59
Figura 40: Esquema de montagem do cabeçote de ondas ultrassônicas inclinado em relação à tocha de soldagem.	60
Figura 41: Efeito das ondas ultrassônicas na transferência metálica.	60
Figura 42: (a) Coeficiente de variação da corrente de soldagem; (b) histograma – tratamento 7; (c) histograma – tratamento 15; (d) ciclograma – tratamento 7 e (e) ciclograma – tratamento 15.	63
Figura 43: Tocha para soldagem subaquática com arame tubular do tipo autoprotetido: (a) com os componentes de vedação e (b) sem os componentes de vedação.	64
Figura 44: Comprimento mínimo de arame mantido seco e dimensões da tocha de soldagem.	65
Figura 45: (a) Câmara hiperbárica, (b) projeto tridimensional da máquina de soldagem, (c) vista lateral da máquina e (d) vista frontal da máquina dentro do tanque.	66
Figura 46: Painel de controle externo.	66
Figura 47: Condições de soldagem.	68
Figura 48: Ligação dos termopares. (a) Esquema de ligação no bico de contato, (b) furos usinados e (c) bico de contato com os termopares.	70
Figura 49: Pontos para medição do reforço.	72
Figura 50: Seção longitudinal indicando os poros e área da seção.	72
Figura 51: Imagens dos cordões de solda produzidos em cada condição.	75
Figura 52: Variação da geometria dos cordões. (a) 0,3m; (b) 10m e (c) 30m.	76
Figura 53: Seções transversais dos cordões de solda.	76

Figura 54: Valores médios e desvio padrão da corrente de soldagem e tensão do arco. (a) 0,3m, (b) 10m e (c) 30m.....	78
Figura 55: Resultados da análise de variância.....	79
Figura 56: Variação típica da temperatura do bico de contato ao longo do processo.	81
Figura 57: Variação da temperatura durante o processo de soldagem. (a) Condição 1 – 0,3m; (b) condição 1 – 10m; (c) condição 1 – 30m; (d) condição 2 – 0,3m; (e) condição 2 – 10m; (f) condição 2 – 30m; (g) condição 3 – 0,3m; (h) condição 3 – 10m; (i) condição 3 – 30m.....	82
Figura 58: Temperatura máxima do bico de contato e tempo de resfriamento até 50°C.	83
Figura 59: Balanço de energia, condição 1. A) Arame tubular, B) bico de contato, C) volume de ar enclausurado na tocha, D) capa frontal, E) água e F) componente de vedação.....	87
Figura 60: Balanço de energia, (a) condição 2 e (b) condição 3: A) Arame tubular, B) bico de contato, C) água, D) capa frontal, E) água.	88
Figura 61: Eficiência de fusão.	91
Figura 62: Oscilogramas dos sinais de corrente e tensão, (a) condição 1 – 0,3 m, (b) condição 2 – 0,3 m, (c) condição 3 – 0,3 m, (d) condição 1 – 10 m, (e) condição 2 – 10 m, (f) condição 3 – 10 m, (g) condição 1 – 30 m, (h) condição 2 – 30 m, (l) condição 3 – 30 m.	94
Figura 63: Ciclogramas, (a) condição 1 – 0,3 m, (b) condição 2 – 0,3 m, (c) condição 3 – 0,3 m, (d) condição 1 – 10 m, (e) condição 2 – 10 m, (f) condição 3 – 10 m, (g) condição 1 – 30 m, (h) condição 2 – 30 m, (l) condição 3 – 30 m.....	97
Figura 64: Índice de extinção do arco.	98
Figura 65: Variação do reforço – 0,3 m.	99
Figura 66: Variação do reforço – 10 m.	99
Figura 67: Variação do reforço – 30 m.	100
Figura 68: Cortes longitudinais dos cordões. (a) Condição 1 – 0,3 m; (b) condição 2 – 0,3 m; (c) condição 3 – 0,3 m; (d) condição 1 – 30 m; (e) condição 2 – 30 m; (f) condição 3 – 30 m.	101
Figura 69: Porosidade do metal de solda.....	103

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Resultados dos ensaios com variação no ponto de transmissão.	30
Tabela 2: Níveis inferior e superior dos parâmetros de entrada.....	61
Tabela 3: Matriz experimental utilizada por Assunção (2018).	62
Tabela 4: Composição química e propriedades mecânicas do metal depositado – Eletrodo tubular TUBROD 7110A.....	67
Tabela 5: Parâmetros variáveis.....	68
Tabela 6: Parâmetros constantes.....	69
Tabela 7: Matriz experimental.	69
Tabela 8: Valores constantes utilizados no cálculo do coef. de convecção.	85
Tabela 9: Coeficientes de troca de calor.	86
Tabela 10: Valores de tensão do motor tracionador, velocidade de alimentação de arame e taxa de fusão.....	89
Tabela 11: Resultados da soldagem ao ar.	90
Tabela 12: Valores e desvio padrão da corrente e tensão.	95

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A_{LW}	Área longitudinal do cordão de solda
A_P	Área total dos poros
A_s	Área superficial
A_W	Área da seção transversal do metal de solda
c_p	Calor específico
DBCP	Distância entre o bico de contato e a peça
$\dot{E}_{Acumulada}$	Energia acumulada no bico de contato
\dot{E}_{Sai}	Energia perdida para o meio
FCAW	Flux cored arc welding
GMAW	Gas metal arc welding
GTAW	Gas tungsten arc welding
h	Coeficiente de troca de calor por convecção
H	Energia de soldagem
m	Massa
N_{10}	Número de pontos com corrente < 10A
N_T	Número total de pontos
\dot{q}_{ct}	Calor gerado no bico de contato devido à passagem de corrente elétrica
q_W	Parcela de calor gerada no arame que é transferida ao bico de contato
q_m	Calor pedido do bico de contato para o meio
Q	Entalpia de fusão do aço
T	Temperatura
t	Tempo
U	Tensão do arco
v	Velocidade de soldagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivo geral	20
1.2 Objetivos específicos.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Soldagem subaquática.....	22
2.2 Soldagem subaquática molhada com arame tubular auto protegido	27
2.3 Interação entre o bico de contato e o arame tubular	28
2.3 Temperatura do arame e do bico de contato durante o processo de soldagem	30
2.4 Fatores que afetam a estabilidade do processo e qualidade das soldas subaquáticas.....	34
2.4.1 Pressão hidrostática da coluna d'água.....	34
2.4.2 Dinâmica de formação e destacamento das bolhas	38
2.4.3 Variação nos parâmetros de entrada	44
2.4.4 Presença de água na região do bico de contato	49
2.5 Porosidade em soldas subaquáticas.....	50
2.6 Projetos que buscam a melhoria na estabilidade do arco e na qualidade das soldas.....	52
2.6.1 Tocha com barreira mecânica para reduzir a frequência de destacamento das bolhas	52
2.6.2 Método de soldagem subaquática a arco submerso	54
2.6.3 Aquecimento por indução da chapa de metal de base	57
2.6.4 Auxílio de ondas sonoras em alta frequência durante o processo de soldagem.....	58
2.6.5 Tocha com sistema de vedação que impede a entrada de água no bico de contato.....	61
3. METODOLOGIA	64

3.1 Equipamentos	64
3.2 Metal base e eletrodo tubular.....	67
3.3 Procedimento experimental	67
3.4 Aquisição dos sinais de corrente, tensão, velocidade de alimentação de arame e temperatura do bico de contato	69
3.5 Avaliação da morfologia, porosidade e eficiência de fusão.....	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1 Morfologia dos cordões de solda	74
4.1.1 Inspeção visual.....	74
4.2 Características operacionais.....	77
4.3 Temperatura do bico de contato	80
4.4 Determinação do coeficiente de transferência de calor	83
4.5 Avaliação da velocidade de alimentação de arame e taxa de fusão.....	88
4.6 Comparação com a soldagem realizada ao ar livre em pressão atmosférica .	89
4.7 Avaliação da eficiência de fusão.....	91
4.8 Avaliação da estabilidade do processo	92
4.9 Avaliação da variação do reforço e da porosidade ao longo do cordão de solda	98
5. CONCLUSÃO	104
6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
APÊNDICE A – Projeto da máquina utilizada para soldagem com arame tubular dentro da câmara hiperbárica	113
APÊNDICE B – Procedimento de calibração da velocidade de alimentação de arame tubular e determinação da velocidade de alimentação a partir da medição da tensão do motor tracionador.....	121

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, várias estruturas e plataformas oceânicas foram construídas para abrigar máquinas e trabalhadores empregados nas atividades de perfuração de poços para exploração de petróleo no leito dos oceanos. Uma vez que estas plataformas têm seus componentes estruturais fabricados em aço, a soldagem subaquática é necessária para reparo e manutenção destes componentes (Rowe & Liu, 2001; Verma & Garg, 2012).

A soldagem subaquática pode ser realizada com todos os equipamentos em contato direto com a água, denominada soldagem molhada, ou com o uso de câmaras hiperbáricas. Uma situação intermediária, na qual uma câmara local é utilizada, é caracterizada pela remoção da água somente da região a ser soldada. Dentre essas possibilidades, a soldagem molhada convencional é realizada de forma mais rápida e com menor custo, pois é necessária menor quantidade de equipamentos. (Shi et al., 2013; Uribe et al., 2017; Amaral, Uribe & Bracarense 2021).

As características do processo de soldagem desempenham papel importante na produtividade e eficácia da operação. A soldagem feita com eletrodos que possam ser continuamente alimentados promove ganhos na produtividade em termos de taxa de deposição de metal (Widgery, 1994). Adicionalmente, o uso de arames tubulares auto protegidos possibilitam o uso do processo FCAW em operações subaquáticas sem a necessidade de uso de gases de proteção.

Devido ao ambiente aquático, as soldas molhadas são realizadas com menor estabilidade do que as soldas ao ar. Como a pressão hidrostática varia diretamente com a profundidade de soldagem, a pressão exercida pela coluna d'água comprime e desestabiliza o arco elétrico (Nixon & Graham, 1993; Uribe, Bracarense & Pessoa, 2017). A faixa de valores dos parâmetros de corrente e tensão que produzem arco estável é reduzida em grandes profundidades, uma vez que mais energia é necessária para gerar a coluna plasma com maior pressão, para compensar a pressão do meio e manter o arco estável (Shi et al., 2012; Chen, Tan & Feng, 2016). A soldagem subaquática molhada também é afetada pela dinâmica de evolução das bolhas de vapor geradas pelo calor do arco e da poça de fusão. (Teichmann, 2000; Feng et al., 2017; Yang et al., 2020). A porosidade é outro problema comum observado em soldas subaquáticas. De acordo com Costa et al. (2022), o fenômeno ocorre devido à

dissociação da molécula da água pelo calor do arco. Esta reação libera átomos de oxigênio e hidrogênio que são conduzidos à poça de fusão, dando origem às bolhas que se tornam poros quando o metal se solidifica.

Na soldagem subaquática molhada com alimentação contínua de arame, a interação entre o bico de contato e o arame-eletrodo interfere nas características do processo e estabilidade. O arame tubular é armazenado em forma de bobinas, fazendo com que este apresente um raio de curvatura ao ser desenrolado da bobina. Ao passar pelo cabo da tocha e, principalmente, pelo furo do bico de contato, o arame sofre deformação elástica no sentido de aumentar o raio de curvatura. Devido a isso, o contato elétrico é feito em vários pontos ao longo do comprimento do furo do bico de contato. Porém, 70% da corrente é transferida no último ponto de contato, na parte final do bico de contato (Shimizu et al., 2006). O fluxo de corrente que passa pelo bico de contato promove seu aquecimento por efeito Joule. De acordo com Pavlov et al. (2015) e Shlyakhova et al. (2015), a temperatura do bico de contato é afetada pelas características da corrente de soldagem, pelo nível dos parâmetros de entrada, propriedades do material do bico de contato e do arame-eletrodo, propriedades da superfície do arame-eletrodo e detalhes geométricos do bico de contato e da tocha. Kolmogorov et al. (2018), investigaram as fontes de aquecimento do bico de contato durante o processo. Os autores relataram que a corrente de soldagem está diretamente relacionada à temperatura do bico de contato. Modenesi & Reis (2007) desenvolveram um modelo matemático para estimar a temperatura do arame-eletrodo ao longo da distância entre o bico de contato e o arco. Os autores observaram que maiores correntes aumentam a temperatura do eletrodo por efeito Joule, contribuindo para sua fusão. Han et al. (2017) investigaram o efeito do material do bico de contato no fluxo de corrente e na temperatura do bico de contato. Através da modificação de parte do bico de contato para aço inoxidável, os autores observaram que a densidade de corrente no arame é maior que com o uso de um bico de contato convencional. Esta alteração promoveu maior aquecimento do eletrodo e, também, em maior temperatura do bico de contato. A maior quantidade de calor gerada no eletrodo promoveu redução no valor de corrente e melhorou a eficiência de fusão. Entretanto, todas as informações disponíveis na literatura sobre a temperatura do arame e do bico de contato se referem à soldagem ao ar livre em pressão atmosférica. Na soldagem subaquática, é esperado que o ambiente aquático no qual o bico de contato é inserido

interfira nas trocas térmicas e na temperatura do bico de contato e do arame tubular, alterando os parâmetros de saída do processo.

Alguns dispositivos e procedimentos, cujo objetivo é melhorar a estabilidade e a qualidade das soldas subaquáticas, são relatados na literatura. As tochas desenvolvidas por Sagara et al. (1977) e Stingelin et al. (1979) se caracterizam por remover a água da região a ser soldada, de forma que o arco elétrico seja estabelecido em ambiente seco. Andrade e Dutra (1993) propuseram o uso de bicos de contato fabricados em grafite o uso de gás CO₂ a alta velocidade para expulsar a água do furo por onde desliza o arame. Wang et al. (2018) utilizaram uma tocha contendo um disco de latão fixado acima do bico de contato para manter a bolha gasosa ao redor do arco por maior intervalo de tempo. Han et al. (2020) e Zhang et al. (2021) investigaram processos de soldagem a arco submerso subaquático. Bracarense & Assunção (2019) desenvolveram uma tocha que utiliza componentes de vedação na capa frontal para manter somente a região do bico de contato seca durante o processo. Em soldas realizadas em profundidade de 0,4 m, foram observadas melhorias na estabilidade do arco elétrico.

Como a soldagem subaquática com arame tubular realizada com o bico de contato seco foi investigada somente em profundidade de 0,4 m, este trabalho tem o objetivo de investigar a estabilidade e qualidade das soldas realizadas em maiores profundidades. A temperatura do bico de contato foi medida e os resultados foram associados com os valores de corrente, eficiência de fusão do eletrodo e características do processo.

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da presença de água na região do bico de contato nos aspectos operacionais da soldagem subaquática molhada com arame tubular do tipo auto protegido, avaliar as alterações na temperatura do bico de contato, eficiência de fusão e porosidade em soldas depositadas nas profundidades de 0,3 m, 10 m e 30 m.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar cordões de solda sobre chapa em profundidades simuladas de 0,3 m, 10 m e 30 m, nas condições de bico de contato seco, bico de contato na água e com a tocha de soldagem sem os elementos de vedação;
- Analisar comparativamente a estabilidade dos sinais de corrente e tensão em cada condição de soldagem via oscilogramas, ciclogramas e índice de extinção do arco;
- Analisar as variações de temperatura do bico de contato em cada condição de soldagem, considerando os regimes de temperatura estável e de resfriamento, e as variações na eficiência de fusão;
- Analisar comparativamente o coeficiente de transferência de calor que atua no bico de contato em cada condição de soldagem e relacioná-lo com as características operacionais;
- Analisar a porosidade do cordão e a variação longitudinal do reforço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem subaquática

Os primeiros experimentos de soldagem subaquática foram desenvolvidos pelo engenheiro soviético Konstantin Khrenov, no início do século XX. Os primeiros testes em campo, realizados pelo grupo liderado pelo pesquisador, foram realizados no Mar Negro, em 1932. Embora as primeiras soldas realizadas fossem de baixa qualidade, em comparação com operações realizadas ao ar livre, o processo começou a ser difundido durante a Segunda Guerra Mundial. Neste período, devido à escassez de matéria prima e a necessidade de rápido reparo, embarcações danificadas eram submetidas ao processo de soldagem subaquática (Fulton, 1986; Kasat et al, 2018).

Atualmente, operações de soldagem subaquática são realizadas em estruturas e plataformas marítimas que abrigam trabalhadores e equipamentos utilizados para extração de petróleo no leito do oceano, e também são aplicadas em operações *onshore*, como em represas de hidrelétricas. Devido ao menor tempo de execução e ao fator econômico, as operações de reparo são conduzidas abaixo da linha da água, com o equipamento *in loco* (Ibarra, 1989; Verma, 2012).

O processo de soldagem subaquática pode ser realizado por três diferentes técnicas operacionais: a soldagem seca, soldagem em cavidade local e soldagem molhada (Fydrych et al., 2014). Esta classificação é ilustrada na Figura 1.

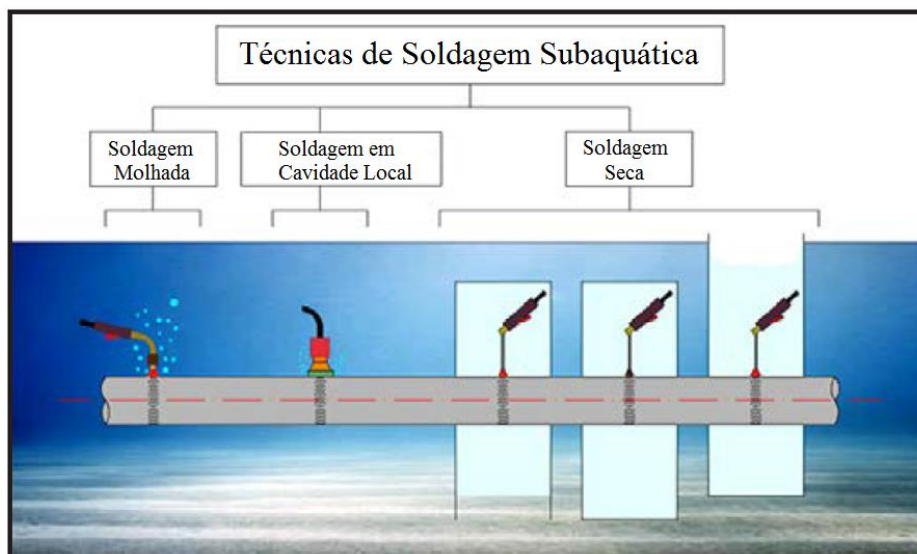


Figura 1: Classificação dos métodos de soldagem subaquática.

Fonte: Fydrych et al., 2014.

Nos processos de soldagem subaquática seca, o arco elétrico é estabelecido sem a presença de água, o que confere características operacionais semelhantes à soldagem ao ar livre em pressão atmosférica. Câmaras são montadas e a água pode ser removida por injeção de ar comprimido até que a região do metal a ser soldada seja exposta. O uso deste tipo de equipamento é limitado por fatores econômicos e maior tempo necessário à operação. Como o sistema deve ser montado ao redor da estrutura, existe certa inflexibilidade geométrica e imobilidade que dificultam a realização da operação em outros locais (Fulton 1986; Nixon, 1987).

Nas operações de soldagem em cavidade local, é utilizado um bocal externo, ou mesmo uma capa elástica na tocha, de onde a água é removida pela injeção de gás pressurizado. Assim, é formada uma pequena região seca onde o arco elétrico é estabelecido. As condições operacionais são intermediárias entre a soldagem molhada e seca (Fydrych et al., 2014).

A remoção da água da região a ser soldada pode ser feita pela injeção do próprio gás de proteção usado nos processos GMAW ou FCAW com proteção gasosa externa, por exemplo. Assim, o arco elétrico é estabelecido em ambiente gasoso, que protege também a parte livre do eletrodo e a poça de fusão. Alguns dispositivos foram desenvolvidos para esta finalidade.

Sagara et al. (1977) patentearam uma tocha para soldagem subaquática que possibilita que a solda seja feita em cavidade local usando os processos de alimentação contínua de arame. A tocha, cujo projeto é mostrado na Figura 2, possui

uma abertura extra no bocal que permite a passagem de um jato d'água em alta velocidade. Esse jato é direcionado de forma oblíqua à peça de trabalho, formando uma cortina d'água alargada. O gás de proteção é injetado no volume limitado pela cortina para criar a atmosfera protetora.

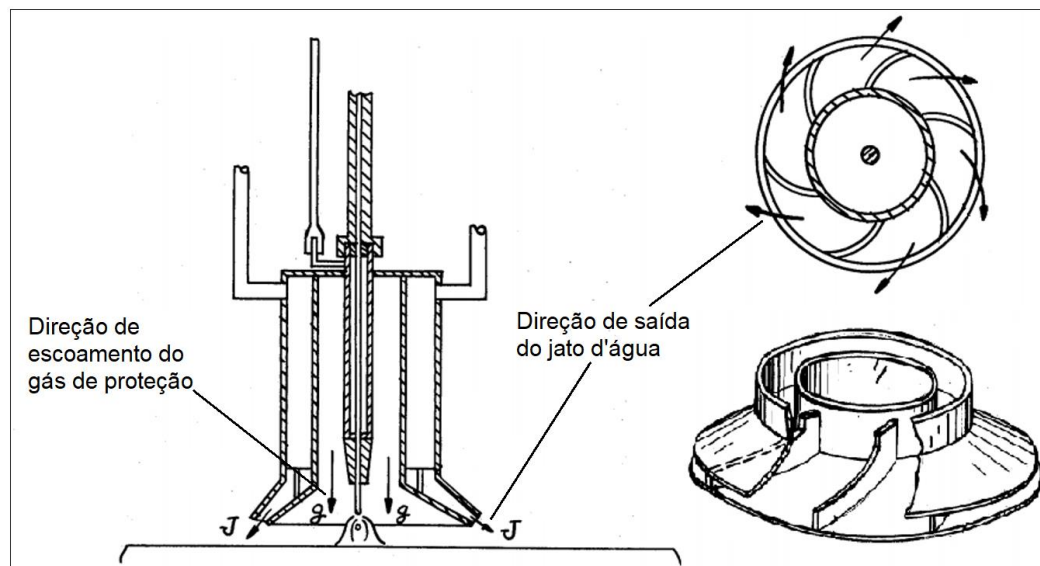


Figura 2: Tocha para Soldagem Subaquática com Proteção Gasosa – Patente Número US4029930.

Fonte: Adaptado de Sagara et al., 1977.

O dispositivo para soldagem subaquática em cavidade local desenvolvida por Stingelin (1979) consiste de uma peça em forma de sino, fixada ao redor do bocal de gás de proteção. Água a alta pressão é direcionada por essa peça por meio de pás que guiam o fluido. As pás são posicionadas na superfície interna do sino de forma que o fluxo de água produza um vórtex ao redor do bocal. De acordo com os autores, as forças centrífugas resultantes dessa configuração impedem a entrada de água na região do eletrodo, onde a atmosfera gasosa protetora é mantida e o arco é estabelecido. A tocha, ilustrada na Figura 3, permite que a soldagem seja feita pelos processos de alimentação contínua de arame e pelo processo GTAW.

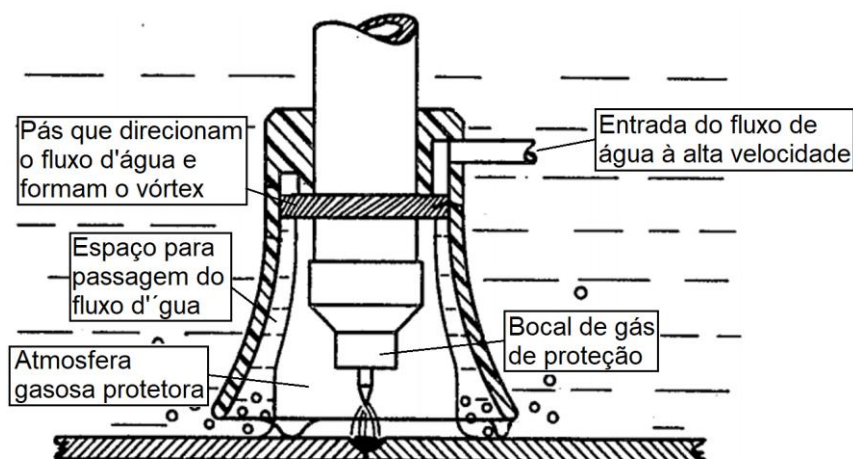


Figura 3: Dispositivo para Soldagem Subaquática – Patente Número 4172974.

Fonte: Adaptado de Stingelin, 1979.

Nos processos de soldagem subaquática molhada, tanto as peças a serem soldadas quanto o eletrodo utilizado são expostos ao ambiente aquático. O arco elétrico é estabelecido diretamente na água. Em comparação aos outros dois métodos ilustrados na Figura 1, a soldagem molhada é mais versátil, pois existe maior grau de liberdade devido ao menor número de equipamentos necessários. Assim, estruturas simples, ou que sejam geometricamente complexas, podem ser reparadas por esta técnica (Verma, 2012).

Apesar do menor tempo de reparo e de a operação ser mais econômica, a soldagem subaquática molhada apresenta certas características que devem ser devidamente observadas, pois podem comprometer a qualidade e confiabilidade da solda se não forem devidamente direcionadas. A presença de água promove rápido resfriamento do metal de solda e de base, podendo criar estruturas endurecidas em aços com alto carbono equivalente (Nixon, 1987; Fydrych et al., 2014). A dissociação da molécula da água, causada pelo calor do arco elétrico, libera átomos de hidrogênio, que podem se difundir no metal de solda e fragilizar o material. A ação combinada do efeito do hidrogênio e das elevadas taxas de resfriamento nos aços utilizados em estruturas marítimas criam condições que podem causar trincamentos e fraturas, se tornando uma limitação para o processo (Cochrane, 1986). Bailey (1991), relata que outro problema normalmente observado em soldas subaquáticas é a porosidade. A quantidade de poros presente no metal de solda aumenta com o aumento da profundidade de soldagem, tornando-se um fator agravante em profundidades entre 55 e 100 m.

O primeiro processo de soldagem empregado nas operações subaquáticas foi o processo com eletrodos revestidos. Devido à menor complexidade do processo, o soldador e os equipamentos podem ser deslocados em menor tempo para o local de trabalho em caso de reparo de emergência. Uma vez que a tocha para soldagem é mais simples, composta nesse caso por um porta-eletrodo, a quantidade de equipamentos é reduzida (Nixon, 1987).

Embora grande quantidade de pesquisas tenha se concentrado no desenvolvimento de eletrodos revestidos, o processo ainda apresenta baixa taxa de deposição de metal, em comparação aos processos de soldagem com arame tubular. A busca por maior produtividade e redução de custos foi a principal motivação do desenvolvimento de arames tubulares por fabricantes. Segundo Widgery (1994), a possibilidade de soldar continuamente, sem interrupções periódicas para substituir eletrodos, provocou a expansão do uso do processo em vários setores industriais.

Em comparação ao processo de soldagem com eletrodos revestidos, o uso de arames tubulares possibilita maior produtividade. Mesmo operando em condições nas quais a taxa de deposição de metal seja igual, o processo de soldagem com arame tubular possibilita maior densidade de corrente. Esta comparação é ilustrada no gráfico da Figura 4. Observa-se que o arame tubular rutilico permite o uso de maiores correntes de soldagem, aumentando significativamente a taxa de deposição de metal.

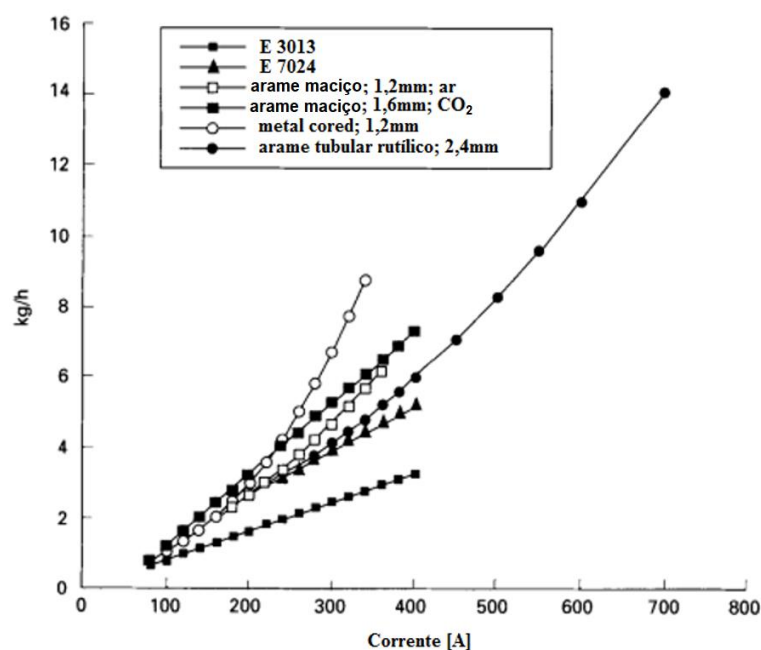


Figura 4: Taxas de deposição de eletrodos revestidos e arames tubulares.

Fonte: Adaptado de Widgery, 1994.

2.2 Soldagem subaquática molhada com arame tubular auto protegido

A soldagem subaquática molhada com arame tubular auto protegido é executada de maneira mais simples do que com o uso de gás de proteção, em tochas de soldagem seca localizada, pois não são utilizados equipamentos para remoção da água da região do arco. As peças de trabalho e a tocha de soldagem ficam em contato direto com a água. Segundo Feng (2017), ocorre a formação de bolhas que circundam o arco elétrico. Estas bolhas são formadas devido às altas temperaturas do arco e são compostas por vapor d'água e pelos gases gerados pela queima do fluxo contido no interior do arame. O processo é ilustrado na Figura 5. Os componentes da tocha, a extensão livre do eletrodo e o metal de base são refrigerados pela água.

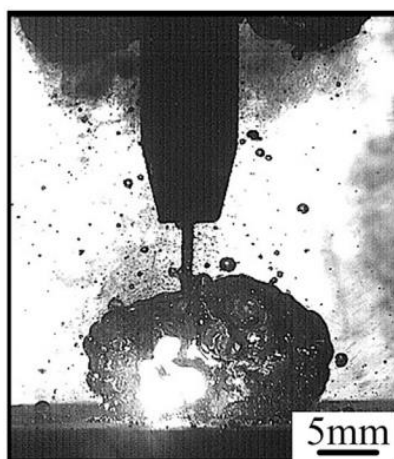


Figura 5: Soldagem subaquática com arame tubular auto protegido.

Fonte: Feng, 2017.

Em comparação com soldas realizadas ao ar livre em pressão atmosférica, na água o arco possui comprimento menor e é mais estreito. Segundo Yang et al. (2020), a constrição do arco é consequência da maior troca de calor que acontece com o meio aquoso. De acordo com o princípio da tensão mínima, a coluna do arco se comprime para reduzir a perda de calor. A constrição, causada também pela pressão da água, faz com que a densidade de energia seja maior, causando maior penetração e menor largura dos cordões. A maior taxa de resfriamento causa, também, redução na extensão da zona termicamente afetada.

2.3 Interação entre o bico de contato e o arame tubular

Nos processos de soldagem com alimentação contínua de arame eletrodo, a corrente elétrica fornecida pela fonte é transferida ao arame consumível através do bico de contato. O bico de contato é, normalmente, uma peça cilíndrica fixada na tocha que promove o contato elétrico deslizante com o arame eletrodo. Processos que ocorrem entre o bico de contato e o arame tubular podem afetar significativamente a estabilidade do processo de soldagem, a velocidade de desgaste do bico de contato e a qualidade final da solda (Lenivkin et al., 1990).

A corrente de soldagem flui através do eletrodo desde os pontos de contato com o bico de contato até o ponto de início do arco voltaico. Segundo Shimizu et al. (2006), o contato elétrico acontece em vários pontos ao longo da extensão do furo interno do bico de contato, devido à curvatura do arame. Entretanto, 70% da corrente é transferida ao arame a partir do último ponto de contato, ilustrado na Figura 6. Como o arame se deforma elasticamente, maior pressão é causada na ponta final do bico de contato, acentuando o desgaste do material após longo período de uso.

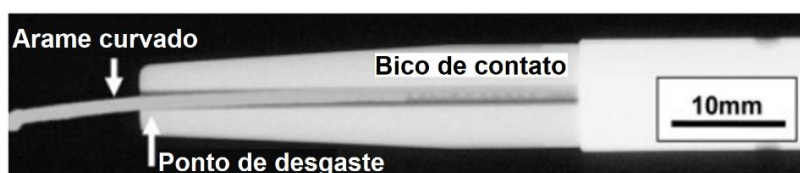


Figura 6: Imagem em raios-x do bico de contato e arame tubular.

Fonte: Adaptado de Shimizu et al. (2006).

De acordo com Han et al. (2017), a extensão de arame energizada é composta por duas seções. A primeira é caracterizada pela região livre do eletrodo, através da qual toda a corrente de soldagem flui. A segunda seção corresponde à extensão de arame energizado dentro do furo do bico de contato. A quantidade de corrente que flui pelo arame na segunda seção é menor em relação à corrente que flui na extensão livre do eletrodo. Isso acontece devido à resistividade do bico de contato, que faz com que a maior parte da corrente flua pela liga de cobre até a ponta do bico de contato.

No estudo desenvolvido por Fischer (2011), foi investigado o ponto de transmissão de corrente entre o arame-eletrodo e o bico de contato no processo GMAW. O autor utilizou bicos de contatos preparados para provocar a transmissão da

corrente em um ponto previamente definido. Os bicos de contato foram furados e tubos de cerâmica foram inseridos conforme ilustra a Figura 7. Um bico de contato novo, sem preparação, foi utilizado para comparação.

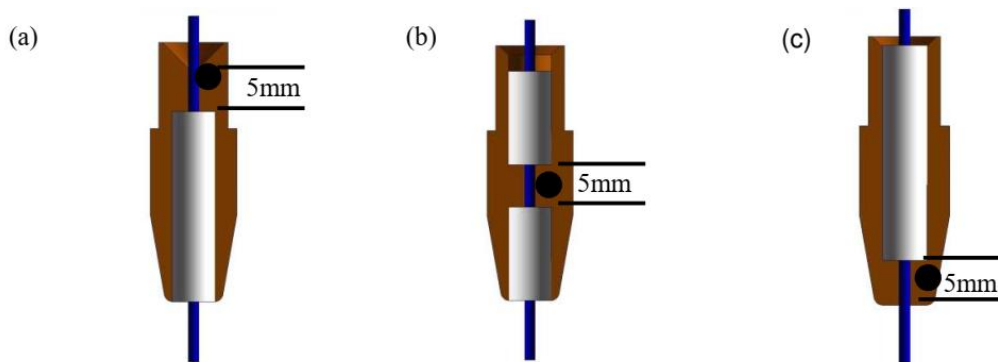


Figura 7: Ponto de transmissão forçado no bico de contato, (a) na entrada, (b) no meio e (c) na saída.

Fonte: Fischer, 2011.

Fischer (2011) realizou experimentos monitorando os parâmetros de tensão e corrente de soldagem, mantendo os mesmos valores para a velocidade de alimentação, velocidade de soldagem, vazão de gás de proteção, DBCP e tensão regulada na fonte. Foi utilizada uma fonte convencional para soldagem GMAW, sem sistema de regulação do comprimento do arco. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 1. Com a variação do ponto de transmissão, da entrada até a saída do bico de contato, foi observado um aumento na corrente e redução na tensão. A mudança no ponto de transmissão equivale à mudança no comprimento energizado do arame. Na comparação dos resultados, o ponto de transmissão de um bico de contato novo é localizado na última parte desse. Em caso de desgaste, o ponto de transmissão muda para cima e provoca alteração nos resultados. A partir dos resultados obtidos por Fischer (2011) observa-se que os valores de tensão e corrente medidos para um bico de contato novo são semelhantes aos obtidos para o bico de contato que força o ponto de contato na saída do bico, reforçando a afirmação de Shimizu et al. (2006) de que maior parte da corrente é transferida no último ponto de contato.

Tabela 1: Resultados dos ensaios com variação no ponto de transmissão.

Designação do ponto de transmissão	Tensão	Corrente	Aporte térmico	Varição do aporte térmico em comparação com bico novo
Entrada/ Início	19,7 V	82 A	1943 J/cm	24,9%
Meio	19,2 V	97 A	2237 J/cm	8,49%
Saida/ Final	18,9 V	114 A	2586 J/cm	-6,14%
Novo Bico	18,8 V	107 A	2427 J/cm	0

Fonte: Fischer, 2011.

2.3 Temperatura do arame e do bico de contato durante o processo de soldagem

Durante o processo de soldagem, a passagem de corrente elétrica pelo corpo do bico de contato promove seu aquecimento por efeito Joule. Ao ser transferida para o arame, a corrente elétrica também promove o aquecimento do eletrodo devido a sua resistência elétrica. Como a densidade de corrente no arame é maior, este sofre maior aquecimento e contribui também para a elevação da temperatura do bico de contato, através de condução nos pontos de contato. Segundo Pavlov et al. (2015) e Shlyakhova et al. (2015), na soldagem ao ar, alguns fatores afetam a temperatura do bico de contato, sendo eles:

- Características da corrente utilizada no processo de soldagem (corrente constante ou variante no tempo);
- Valores dos parâmetros do processo (corrente, tensão, vazão de fluxo de gás de proteção, quanto utilizado);
- Propriedades do material do bico de contato (normalmente, ligas de cobre ou compósitos a base de cobre);
- Propriedades físicas do material do arame;
- Características geométricas do bico de contato (diâmetro e comprimento);
- Características da tocha de soldagem.

Kolmogorov et al. (2018) investigaram as diferentes fontes e trocas de calor que afetam a temperatura do bico de contato durante os processos de soldagem ao ar. As principais partes envolvidas e a identificação das trocas de calor é apresentada na Figura 8. Através da resolução das equações relacionadas à cada parcela de troca de calor, os autores quantificaram que o aumento da corrente de soldagem provoca elevação na temperatura do bico de contato.

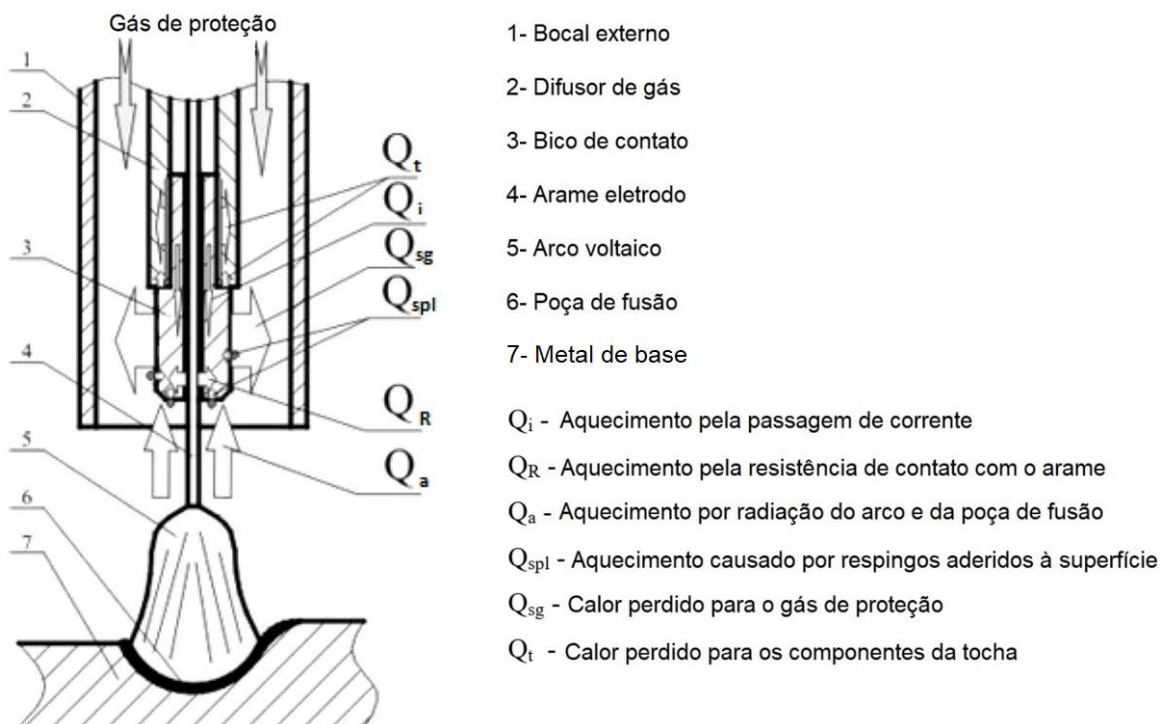


Figura 8: Fontes de calor que afetam a temperatura do bico de contato e mecanismos de transferência de calor.

Fonte: Adaptado de Kolmogorov et al., 2018.

Modenesi & Reis (2007) desenvolveram um modelo matemático que estima a temperatura do arame maciço ao longo do stick out no processo GMAW. O modelo considera a temperatura constante ao longo da seção transversal do arame, o aquecimento do arame por efeito Joule, o aquecimento devido ao calor do arco elétrico, que é transferido por condução a partir da ponta do arame e é afetado pela transferência de massa (alimentação de arame). Também foram consideradas as propriedades físicas do material do arame, que variam em função da temperatura. A representação do modelo é ilustrada na Figura 9. Os autores consideraram a temperatura do bico de contato constante ($T_c = 100^\circ\text{C}$) e a temperatura no ponto de contato do arame com o arco (T_m) igual a temperatura de fusão do eletrodo.

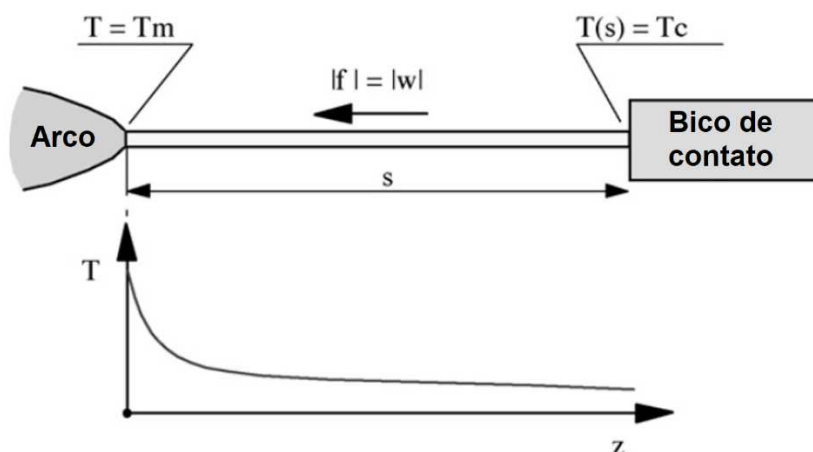


Figura 9: Representação do modelo desenvolvido por Modenesi & Reis (2007).

Fonte: Adaptado de Modenesi & Reis (2007).

As distribuições de temperatura estimadas pelo modelo desenvolvido por Modenesi & Reis (2007), para três níveis distintos de corrente de soldagem ao longo de um arame maciço de 1,0 mm de diâmetro são apresentadas no gráfico da Figura 10. A distância entre o bico de contato e o ancoramento anódico (ponto de estabelecimento do arco no arame) é de 13 mm. O perfil de temperatura ao longo do eletrodo foi caracterizado pelos autores em duas regiões distintas. Uma região de aquecimento por efeito Joule, que corresponde à maior parcela da extensão do arame no stick out, e uma região de aquecimento pelo calor do arco elétrico, caracterizada pela região de grande inclinação da curva de temperatura. Segundo os autores, os resultados mostrados na Figura 10 sugerem que maiores correntes de soldagem resultam em maior contribuição do aquecimento por efeito Joule para a fusão do eletrodo. Os autores relatam também que a temperatura no ponto de transição entre a região de aquecimento por efeito Joule e a região de aquecimento pelo calor do arco é incrementada em aproximadamente 500 °C quando a corrente de soldagem varia de 140 A para 335 A.

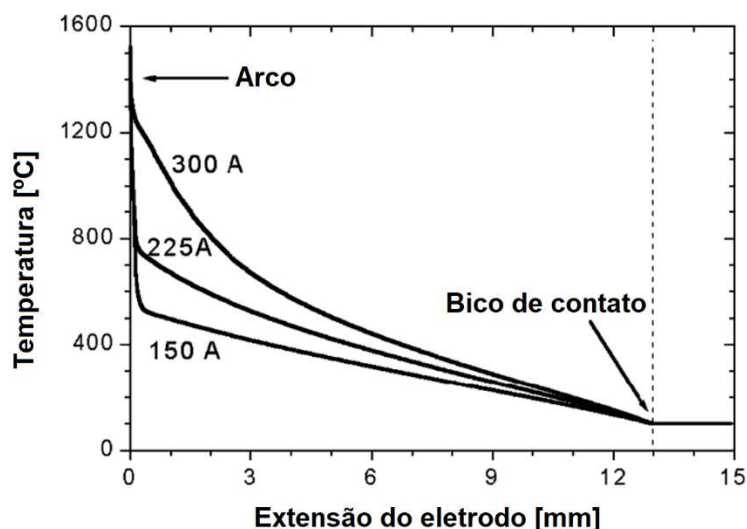


Figura 10: Distribuição estimada de temperatura ao longo de um arame maciço de 1,0 mm em três níveis de corrente no processo GMAW.

Fonte: Adaptado de Modenesi & Reis (2007).

No trabalho desenvolvido por Han et al. (2017), os autores investigaram o efeito do material do bico de contato na densidade de corrente no bico de contato e no arame energizado, e conseqüentemente na temperatura do arame. Foi utilizado um bico de contato convencional e um fabricado em dois materiais, a ponta em liga de cobre e a maior parte do corpo em aço inoxidável, conforme ilustra a Figura 11. Segundo os autores, o objetivo foi utilizar um material que possua maior resistividade elétrica. Assim, considerando múltiplos pontos de contato dentro do bico, maior corrente fluiria pelo arame desde os primeiros pontos de contato, na entrada do bico de contato, ao invés de fluir pelo aço inoxidável.

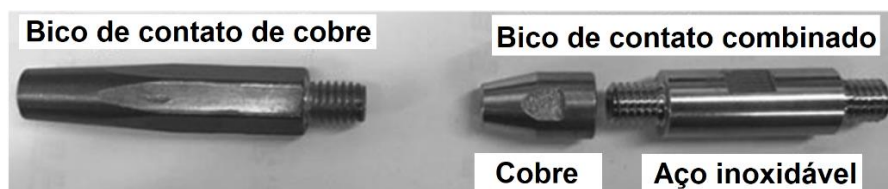


Figura 11: Bico de contato convencional e bico de contato combinado.

Fonte: Adaptado de Han et al. (2017).

Através de análises por método de elementos finitos, apresentadas na Figura 12, Han et al. (2017) observaram aumento na densidade de corrente que flui pelo arame com o uso do bico de contato combinado. Medições de temperatura indicaram maior aquecimento do bico de contato combinado, devido ao maior aquecimento do

arame, resultando em redução na corrente de soldagem. Os autores concluíram que melhorias na taxa de fusão foram alcançadas através da substituição do material do bico de contato convencional pelo bico combinado.

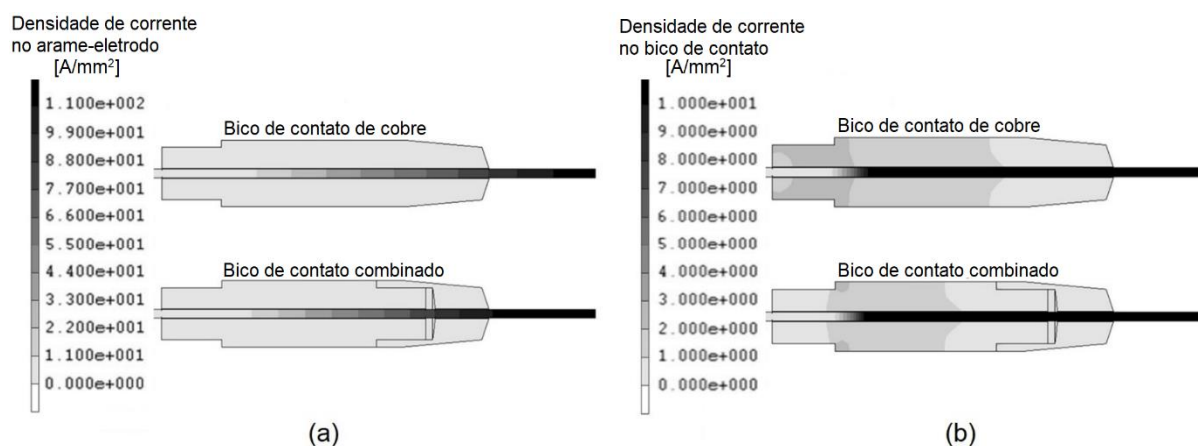


Figura 12: Análise por método de elementos finitos: (a) densidade de corrente no arame e (b) densidade de corrente no bico de contato.

Fonte: Adaptado de Han et al. (2017).

2.4 Fatores que afetam a estabilidade do processo e qualidade das soldas subaquáticas

2.4.1 Pressão hidrostática da coluna d'água

O arco elétrico estabelecido entre o eletrodo tubular e as peças de trabalho consiste de uma descarga elétrica sustentada através de uma coluna plasma. Essa descarga elétrica possui grande densidade de corrente, produzindo calor e luz. O calor produzido pelo arco promove a fusão localizada das peças a serem unidas e do metal do eletrodo (Villani et al., 2011).

Quando o arco elétrico é estabelecido diretamente na água, o processo apresenta maior instabilidade em comparação com soldas produzidas ao ar livre em pressão atmosférica, devido à pressão exercida pela água. Uma vez que a pressão varia diretamente com a profundidade na qual a operação é realizada, o arco apresenta diferentes características quando a profundidade em que é estabelecido varia (Omajene et al., 2014).

A influência da profundidade de operação na estabilidade do arco elétrico em soldas molhadas foi investigada no estudo conduzido por Nixom e Graham (1993). Os autores utilizaram eletrodos revestidos com diâmetros de 3,2 e 4 mm, em profundidades de 1,5 m, 3 m e 6 m. Como o eletrodo de 3,2 mm apresenta maior densidade de corrente para uma mesma corrente de soldagem, em comparação aos outros eletrodos, melhores resultados foram produzidos. A corrente elétrica concentrada na menor área da seção transversal do eletrodo de 3,2 mm produz maior aquecimento e promove a fusão do eletrodo mais facilmente. A resposta analisada foi o desvio padrão da tensão de soldagem. A Figura 13 mostra os resultados obtidos em diferentes profundidades de soldagem. Observa-se que as soldas produzidas a 6m apresentaram menor variação na tensão do arco.

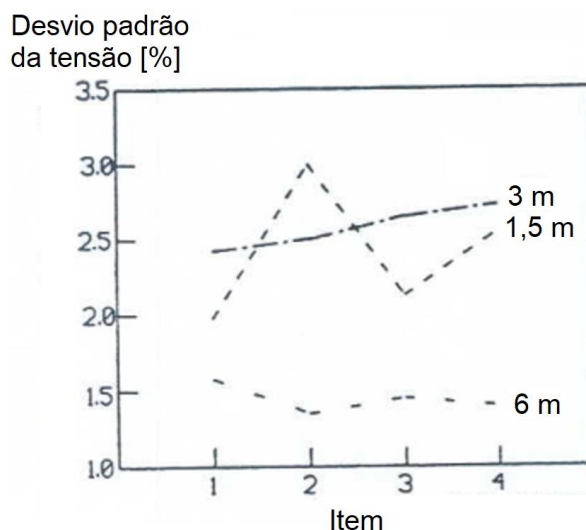


Figura 13: Efeito da profundidade na estabilidade do arco elétrico no processo SMAW.

Fonte: Nixom e Graham, 1993.

A maior estabilidade do arco observada nas soldas realizadas por Nixom & Graham (1993) a 6 m de profundidade é consequência dos parâmetros do processo. O valor da tensão do arco faz com que a pressão da coluna de plasma seja equivalente à pressão do meio, apresentando maior estabilidade a 6 m, nesse caso. Porém, à medida em que a profundidade aumenta, os autores observaram maior instabilidade do arco. Segundo Omajene et al. (2014), a constrição provocada pela elevada pressão do meio diminui a estabilidade do arco. Pessoa et al. (2010) relata que o efeito causado pela dinâmica de formação e destacamento das bolhas ao redor

do arco contribui para a maior instabilidade. A Figura 14 mostra o efeito do aumento da pressão da água na aparência do cordão e na formação de poros.

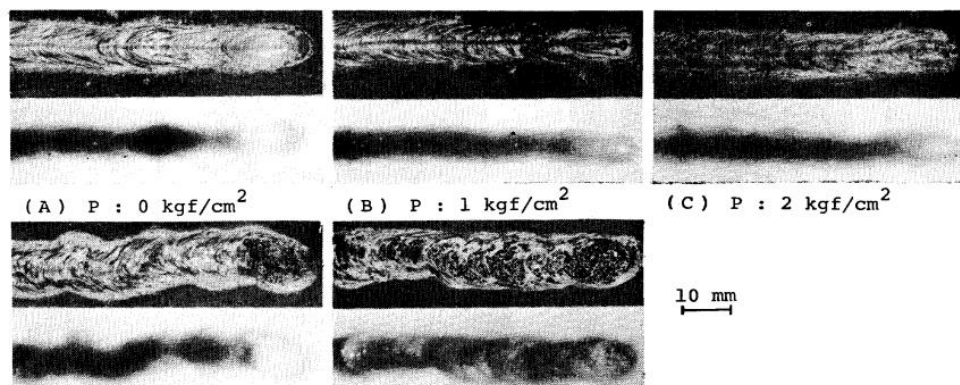


Figura 14: Efeito da pressão da água na aparência do cordão e porosidade.

Fonte: Suga & Hashui, 1986.

Segundo Pokhonya et al. (1989) *apud* Teichmann (2000), a pressão hidrostática influencia na capacidade dos gases em compensar a altura de coluna d'água. Em grandes profundidades, a instabilidade do arco está associada à incapacidade da pressão dos gases em equilibrar com a pressão do meio envolvente, levando à maior frequência de colapso das bolhas. Esse fenômeno leva à maior perturbação do arco, causado pelo choque da água, reduzindo a estabilidade dos sinais elétricos. A variação dos sinais em função da profundidade é mostrada na Figura 15.

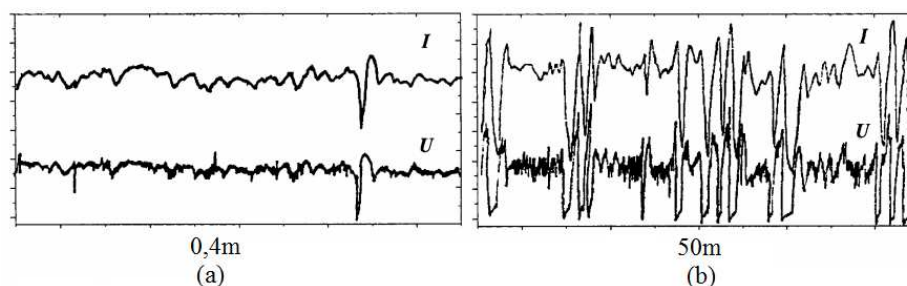


Figura 15: Oscilogramas de tensão e corrente indicando aumento da ocorrência de curtos-circuitos anormais com a elevação da profundidade – Processo FCAW subaquática.

Fonte: Pokhonya et al. (1989) *apud* Teichmann (2000).

O aumento da pressão hidrostática torna necessário um campo elétrico de maior intensidade para que o arco voltaico seja estabelecido. Como mostrado no gráfico da Figura 16, com o aumento da pressão, a faixa de parâmetros que mantêm

o processo estável se torna mais estreita, uma vez que maior energia é necessária para manter a estabilidade do arco (Rowe & Liu, 2001; Shi et al., 2012; Chen, Tan & Feng, 2016). A redução na faixa operacional dos valores de tensão e corrente de soldagem é associada por Liu & Olson (1993) ao potencial de ionização do hidrogênio, que dificulta a sustentação do arco em grandes profundidades.

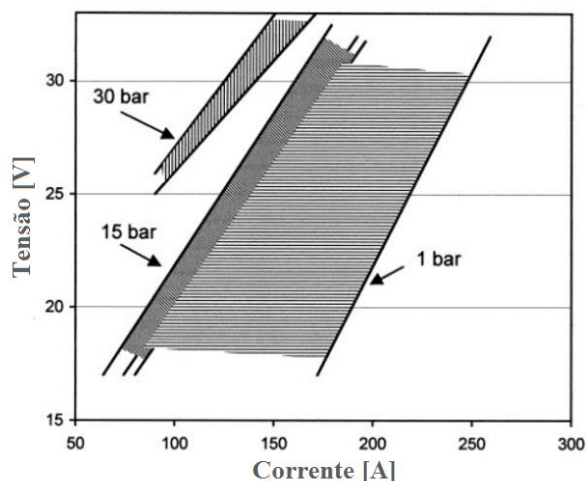


Figura 16: Efeito da pressão na faixa de parâmetros de soldagem aceitáveis.

Fonte: Shi et al., 2012.

Chen et al. (2018a) conduziram estudo utilizando elevado valor da tensão do arco. Os autores depositaram cordões de solda em profundidades variando de 0,5 m à 90 m, utilizando arame tubular rutilico de 1,6 mm com 45 V de tensão. A tensão mais alta é necessária para compensar a constrição do arco causada pela pressão hidrostática. Os autores afirmam também que maior calor é retirado do arco na soldagem subaquática a alta pressão. Como o ponto de ebulição da água aumenta com o aumento da pressão, maior tensão é necessária para compensar a perda de calor do arco.

A Figura 17 mostra o coeficiente de variação da tensão obtida nos experimentos conduzidos por Chen et al. (2018a). Como a tensão do arco teve seu valor elevado, os experimentos conduzidos a 0,5 m apresentaram comportamento mais instável. Foi observado pelos autores maior estabilidade nas soldas a 30 m, com maior variação no sinal à medida em que a profundidade aumenta.

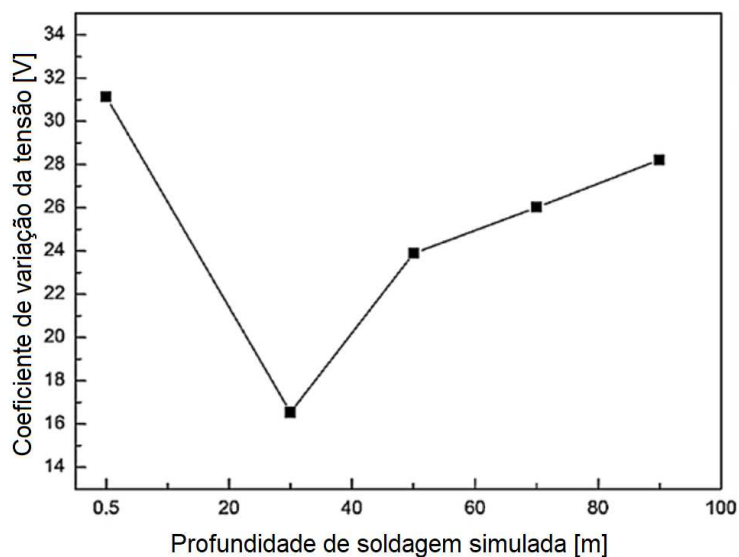


Figura 17: Coeficiente de variação da tensão de soldagem em diferentes profundidades.

Fonte: Adaptado de Chen et al. (2018a).

2.4.2 Dinâmica de formação e destacamento das bolhas

Na soldagem subaquática molhada, o arco elétrico se forma em meio a bolhas de vapor. Como a temperatura de vaporização da água é muito menor que a temperatura de solidificação do metal da poça de fusão, o arco elétrico e a poça de fusão estão sempre circundados por bolhas de vapor (Pope, Medeiros & Liu; 1995). Estas bolhas são compostas por vapor d'água produzido pelo calor do arco, átomos de hidrogênio e oxigênio dissociados e gases provenientes da queima do fluxo do arame. Como estes fenômenos acontecem de forma constante, a bolha cresce continuamente e destaca-se periodicamente à medida em que uma nova bolha se forma. Por ser estabelecido neste ambiente, a estabilidade do arco e o processo de transferência metálica passam a ser diretamente influenciadas pela dinâmica de formação e destacamento das bolhas (Teichmann, 2000; Yang et al., 2020). O raio da coluna de plasma muda periodicamente acompanhando o movimento das bolhas, causando intensa flutuação nos sinais de corrente e tensão do arco.

Uma comparação entre a soldagem ao ar e a soldagem subaquática feita por Pope, Medeiros & Liu (1995) é apresentada esquematicamente na Figura 18. Segundo os autores, na soldagem ao ar a maior parte do calor é dissipada por condução através do material de base. Apenas uma pequena parcela do calor cedido à peça é transferida por radiação e convecção natural. Na soldagem subaquática, a poça de fusão é constantemente submetida ao ambiente aquático, perdendo grande

quantidade de calor à medida em que o arco elétrico se move para frente. Conseqüentemente, menor quantidade de calor é transferida por condução através do material sólido.

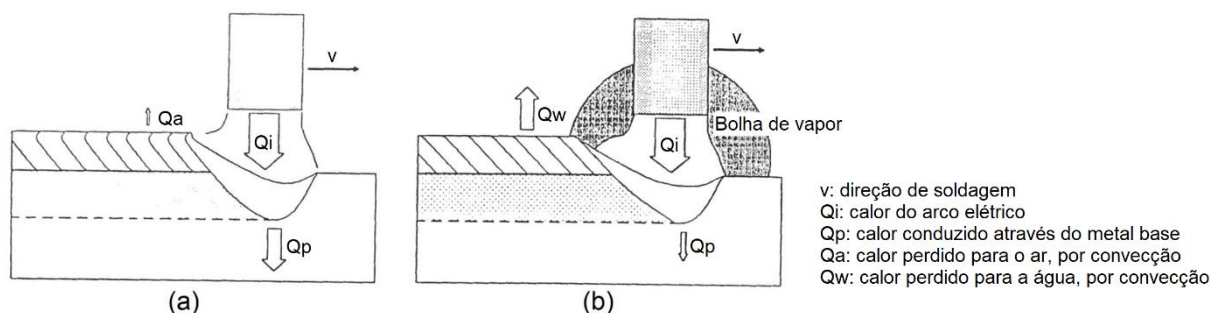


Figura 18: Desenho esquemático indicando as trocas de calor: (a) soldagem ao ar e (b) soldagem subaquática.

Fonte: Adaptado de Pope, Medeiros & Liu; 1995.

As diferenças nas condições de troca de calor entre os dois ambientes resultam em diferenças no formato da poça de fusão, apresentado esquematicamente na Figura 19. Segundo Pope, Medeiros & Liu (1995), na soldagem ao ar, a poça de fusão tende a apresentar formato elíptico. Uma vez que menos calor é perdido para o ar, maior quantidade de calor é conduzido à poça de fusão, fazendo com que seu tamanho seja maior e esta demore maior período de tempo para solidificar à medida em que o eletrodo é deslocado na direção de soldagem. Na soldagem subaquática, como a poça de fusão perde mais calor para o ambiente aquático, menos calor é conduzido ao metal de base, fazendo com que a poça de fusão se solidifique em menor período de tempo à medida em que o eletrodo é deslocado na direção de soldagem. Assim, a solidificação é mais rápida na parte final da poça de fusão, causando o afinamento na direção longitudinal, fazendo com que a poça tenha formato de gota.

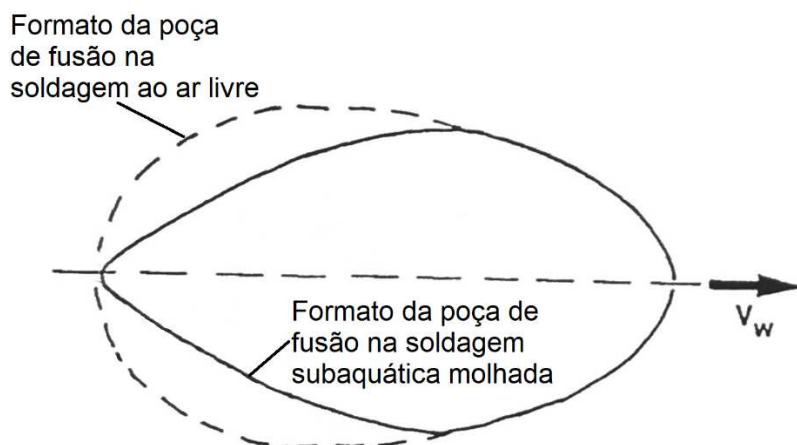


Figura 19: Comparação entre os formatos da poça de fusão de soldas feitas ao ar e na condição subaquática.

Fonte: Adaptado de Pope, Medeiros & Liu; 1995.

Yang et al. (2020) investigaram o comportamento e características do arco elétrico na soldagem subaquática molhada com arame tubular. Segundo os autores, as bolhas se formam desde o momento de abertura do arco elétrico e possuem características de isolar o arco da água e evitar a interrupção enquanto forem mantidas ao redor do arco.

Durante a etapa de crescimento, as bolhas têm efeito positivo no arco elétrico, isolando-o da água e permitindo que a transferência metálica ocorra dentro da bolha, conforme mostrado nos quadros de 0,5918 s e 0,6071 s da Figura 20. No estágio de destacamento (0,6312 s), a bolha de vapor se move para cima, devido à diferença de densidade entre os gases e a água, sendo ainda conectada por um estreito canal cilíndrico à nova bolha que se forma abaixo. Uma grande quantidade de gases passa por esse canal para a bolha de cima. Como a passagem é estreita, o fluxo gasoso tem velocidade elevada e causa maior impacto no arco elétrico e na gota metálica sendo transferida (Yang et al., 2020). A Figura 20 mostra o processo de crescimento e destacamento da bolha com os respectivos sinais de corrente e tensão.

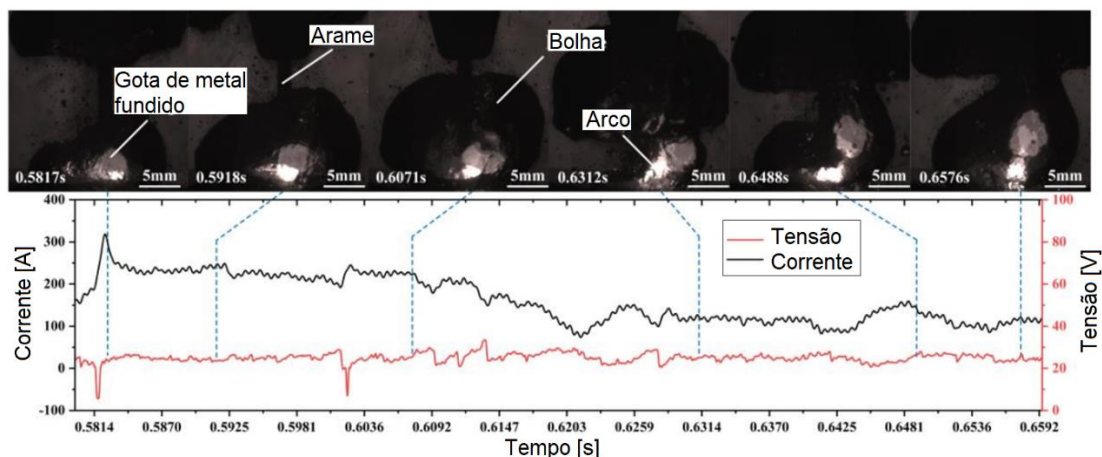


Figura 20: Comportamento do arco elétrico durante o estágio de destacamento da bolha.

Fonte: Adaptado de Yang et al. (2020).

Feng et al. (2017) conduziram um estudo no qual foi investigado o fenômeno de formação e evolução das bolhas e a influência dos parâmetros de soldagem neste fenômeno. Segundo os autores, a evolução das bolhas pode ser classificada em quatro modos distintos, em função do valor de corrente de soldagem. No primeiro modo, observado em baixas correntes, as bolhas formadas são pequenas e não promovem a proteção do arco, tornando o processo instável. No segundo e terceiro modo de evolução, observados para maiores correntes de soldagem, as bolhas formadas são de maior diâmetro e apresentam menor frequência de destacamento. A combinação do diâmetro com a baixa frequência de destacamento faz com que a bolha cresça sem se destacar, protegendo o arco elétrico e a poça de fusão do ambiente aquático. No terceiro modo, especificamente, quando uma nova bolha se forma, esta entra em contato com a bolha formada anteriormente, formando maior área de proteção ao redor do arco. Devido à ação combinada das duas bolhas, este modo de evolução é o que apresenta maior estabilidade do arco elétrico. A Figura 21 mostra a sequência do terceiro modo de evolução observada pelos autores. Os quadros de 0,2150 s e 0,2230 s mostram o processo de crescimento da bolha, ao redor do arco elétrico. Os quadros de 0,2335 s e 0,2395 s mostram a bolha a primeira bolha em processo de ascensão à superfície enquanto uma nova bolha se forma ao redor do arco. No quadro de 0,2450 s, as bolhas se conectam, aumentando a área de proteção ao redor do arco. O processo mostrado na sequência de imagens da Figura 21 acontece de 0,2150 s a 0,2810 s. A oscilação dos sinais de corrente e tensão nesse intervalo é mostrado na Figura 22.

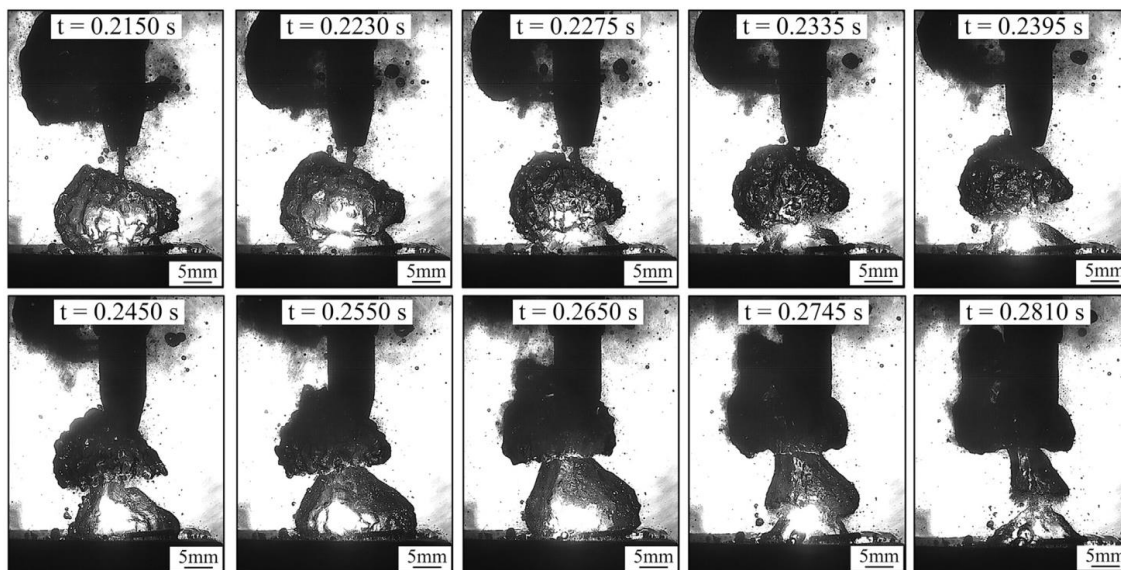


Figura 21: Comportamento dinâmico da bolha no terceiro modo de evolução.

Fonte: Feng et al. (2017).

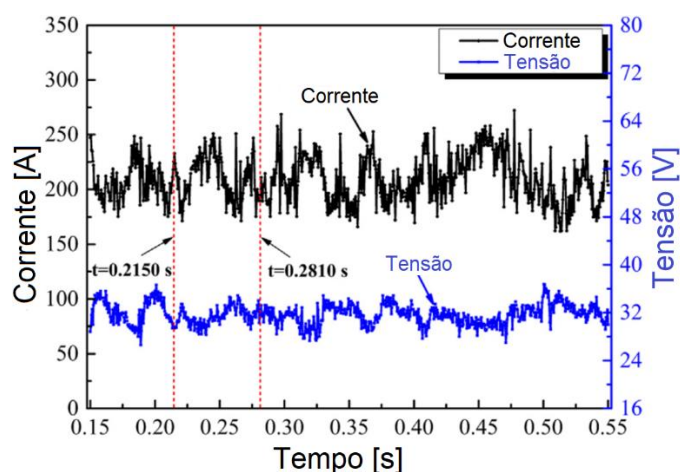


Figura 22: Variação dos valores de tensão e corrente de soldagem no terceiro modo de evolução das bolhas.

Fonte: Adaptado de Feng et al. (2017).

O quarto modo de evolução observado por Feng et al. (2017) acontece quando ocorrem elevados valores de corrente e tensão. Segundo os autores, devido à grande energia do arco, a bolha formada neste modo cresce rapidamente até atingir um diâmetro máximo, se destaca e sobe para a superfície. O arco elétrico fica suscetível a maior choque causado pela água, provocando oscilação nos sinais de corrente e tensão.

Dentre os quatro modos de evolução das bolhas observados por Feng et al. (2017), foi observado que o terceiro modo apresenta menor coeficiente de variação

dos sinais de tensão e corrente, como mostra o gráfico da Figura 23. O coeficiente de variação é calculado pela relação entre o desvio padrão e o valor médio da grandeza analisada, a dispersão é medida em termos relativos. Do ponto de vista estatístico, quanto menor este valor, menor é a variação do sinal medido, o que indica que o processo é mais estável (Shi et al., 2012).

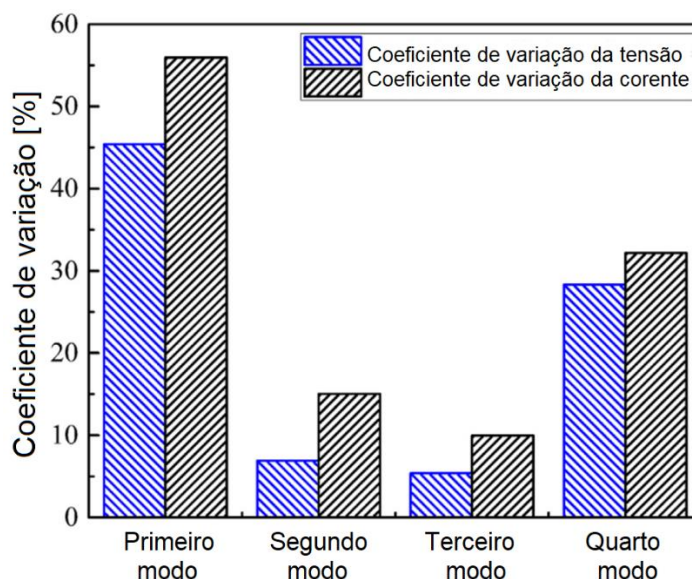


Figura 23: Coeficiente de variação dos sinais elétricos para os quatro modos de evolução das bolhas.

Fonte: Adaptado de Feng et al. (2017).

Chen et al. (2020) investigaram a relação entre o fenômeno de destacamento das bolhas e a transferência da gota de metal fundido para a poça de fusão. Segundo os autores, a força de arrasto da bolha, durante seu movimento ascendente, provoca a repulsão da gota de metal, que se solidifica durante o maior trajeto e se torna um respingo. A Figura 24 mostra uma sequência de imagens, obtidas por filmagem a alta velocidade combinado com a técnica de raios-x, que ilustram a movimentação da bolha de vapor e seu efeito na transferência da gota de metal fundido.

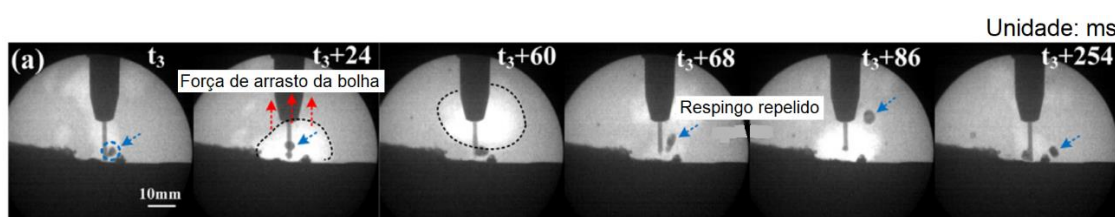


Figura 24: Força de arrasto da bolha de vapor agindo sobre a gota de metal fundido.

Fonte: Adaptado de Chen et al. (2020).

Chen et al. (2018b) observaram que o fluxo d'água tem efeito sobre as bolhas de vapor. Com o aumento da intensidade da força lateral causada pela corrente de água, a bolha é removida da região do arco. Maiores perturbações são causadas no arco elétrico pela água e a estabilidade do processo diminui.

A pressão hidrostática exercida pela água em diferentes profundidades tem influência no comportamento das bolhas e, conseqüentemente, na estabilidade do processo. Chen et al. (2018a) observaram que à medida em que a profundidade de soldagem aumenta, o diâmetro das bolhas tende a diminuir, conforme ilustra o gráfico da Figura 25. Segundo os autores, a redução no diâmetro das bolhas é causada pela elevação na pressão hidrostática da câmara de soldagem. A pressão interna da bolha deve exceder a pressão externa para que a bolha cresça. Considerando que a massa de gases gerados no processo seja constante nos mesmos parâmetros de soldagem, maior pressão faz com que a bolha tenha volume cada vez menor, segundo o comportamento dos gases.

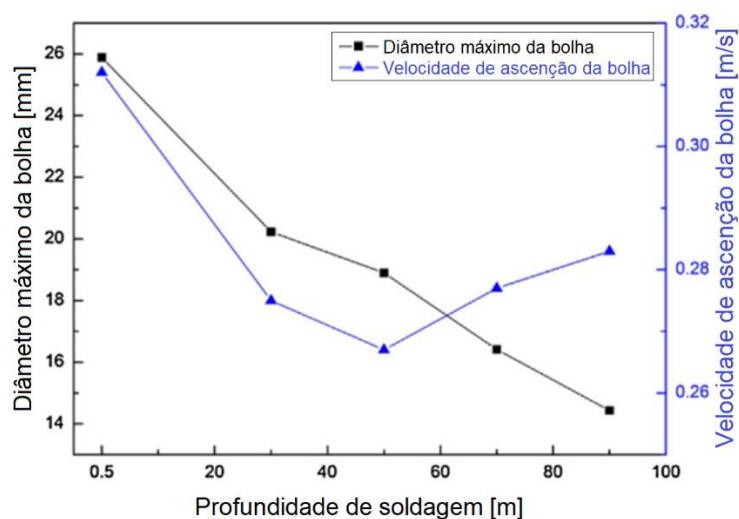


Figura 25: Variação no diâmetro e velocidade de ascensão das bolhas em diferentes profundidades de soldagem.

Fonte: Adaptado de Chen et al. (2018a).

2.4.3 Variação nos parâmetros de entrada

A estabilidade do processo de soldagem é também dependente da variação dos parâmetros de entrada. Os valores de velocidade de soldagem, tensão do arco, corrente de soldagem e distância entre o bico de contato e a peça estão relacionados

à quantidade de calor cedido à peça, interferindo no modo de transferência e na qualidade das soldas.

A energia do processo é calculada através dos valores de tensão do arco, corrente de soldagem e velocidade de soldagem. O cálculo relaciona a potência da fonte de calor com a velocidade de deslocamento (AWS, 2001).

$$H = \frac{V \cdot I}{v} \quad (1)$$

Em que H é a energia de soldagem, V é a tensão do arco, I é a corrente de soldagem e v é a velocidade de soldagem.

Guo et al. (2017) investigaram o efeito da variação da velocidade de soldagem, em diferentes valores de tensão, e a relação com os modos de transferência metálica na soldagem subaquática molhada com arame tubular. Os autores observaram que à medida em que a velocidade de soldagem aumenta, a proporção dos modos de transferência por tensão superficial e curto-circuito explosivo diminuem significativamente, enquanto que a proporção do modo de transferência globular repelido de ângulo aberto aumenta constantemente até que apenas esse modo de transferência seja observado para velocidades superiores à 8 mm/s. O modo de transferência globular repelido de ângulo fechado, no qual a gota de metal é direcionada à poça de fusão, é observado até velocidades intermediárias. Para maiores valores de tensão de soldagem, devido ao maior comprimento do arco, o efeito da variação da velocidade de soldagem é ainda mais perceptível.

Essa observação foi associada com a variação das forças que atuam na gota metálica durante a transferência. Em maiores velocidades de soldagem, a menor quantidade de metal líquido na poça de fusão e as forças repulsivas atuantes na gota metálica aumentam a distância entre a gota de metal e a poça de fusão. Devido à maior dificuldade da gota em tocar a poça de metal líquido, as proporções dos modos de transferência por curto-circuito explosivo e tensão superficial diminuem consideravelmente.

O estudo conduzido por Chen, Tan e Feng (2016) investigou a variação isolada dos parâmetros dentro da faixa operacional na soldagem subaquática molhada. Os autores observaram que a velocidade de soldagem influencia diretamente a estabilidade do processo, sendo que velocidades maiores produzem soldas com

menor variação nos sinais elétricos. Xu et al. (2020a) investigaram o efeito da velocidade de soldagem no comportamento dinâmico da poça de fusão e no teor de hidrogênio difusível. Os autores observaram que em maiores velocidades de soldagem a poça de fusão apresenta menor oscilação devido ao menor reforço e ao maior comprimento. Maior teor de hidrogênio difusível foi observado em soldas realizadas com maior velocidade de soldagem. Os autores associaram a elevação no teor de hidrogênio com o menor tempo de solidificação da poça, que aprisiona os gases antes que possam sair do metal líquido.

Wang et al. (2019) investigaram o efeito da velocidade de soldagem na dinâmica de formação e destacamento das bolhas e, conseqüentemente, o efeito na estabilidade do processo FCAW subaquática. Os autores observaram que a frequência de destacamento das bolhas aumenta com o aumento da velocidade de soldagem, conforme mostra o gráfico da Figura 26. Essa observação foi associada ao tamanho da poça de fusão. Velocidades mais baixas tendem a formar poças de fusão maiores, devido ao maior aporte térmico, que contribui para a formação de maiores bolhas que levam mais tempo para se destacar. Velocidade maiores diminuem o aporte térmico e, conseqüentemente, reduzem o tamanho da poça de fusão, aumentando a frequência de destacamento das bolhas.

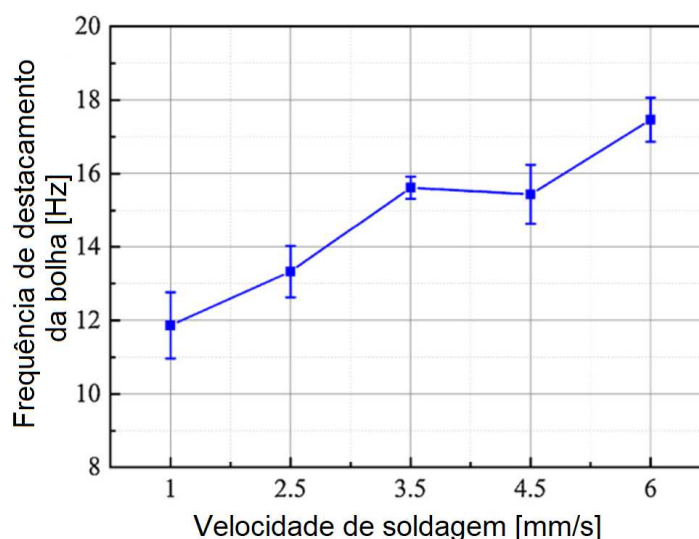


Figura 26: Variação da frequência de destacamento das bolhas em função da velocidade de soldagem.

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2019).

Em relação à tensão do arco, Chen, Tan e Feng (2016) observaram que a tensão é o parâmetro de entrada de maior influência na estabilidade do processo. Mantendo os níveis dos demais parâmetros constantes, o arco se apresentou mais estável nos experimentos em que o valor da tensão era maior. Chen et al. (2018a) realizaram experimentos com tensão do arco em 45 V para realização de soldas até 90 m de profundidade.

Guo et al. (2016) observaram que os valores de tensão e corrente elétrica têm influência direta no modo de transferência metálica, e, conseqüentemente, na estabilidade e qualidade do processo. O diagrama apresentado na Figura 27 apresenta as regiões nas quais diferentes modos de transferência metálica são observados, em função dos valores de tensão e corrente.

Os modos de transferência metálica não acontecem isoladamente, mas sim, de forma mista em função dos valores de tensão e corrente (Guo et al., 2016). Para elevados valores de tensão e baixa corrente (região A na Figura 27), a gota metálica tem tempo suficiente para crescer na ponta do arame e se destacar antes de tocar a poça, assim a transferência ocorre majoritariamente pelo modo globular repelido. Ocorre também a transferência por curto-circuito, quando o arame toca a poça de fusão antes da gota metálica se desprender. Os autores definiram este modo como “tensão superficial”. Com a redução na tensão e incremento na corrente, a gota metálica toca a poça de fusão mais rapidamente. Assim, a proporção do modo de transferência por tensão superficial (curto-circuito) aumenta e a globular repelida diminui. Para maiores valores de corrente (região B na Figura 27), devido à maior velocidade de alimentação de arame, os três modos fundamentais de transferência são observados (globular repelido, tensão superficial e arco submerso na poça de fusão). Segundo Guo et al. (2016), no modo de transferência denominado “arco submerso na poça de fusão”, devido à força de empuxo do arco atuando sobre a poça de fusão, o metal líquido é deslocado para a lateral, formando uma cavidade no centro da poça de fusão. Quando o comprimento do arco é reduzido, a ponta do arame entra completamente dentro desta cavidade, não sendo possível observar claramente a transferência metálica. Em elevadas correntes de soldagem, região C na Figura 27, apenas o modo de transferência com arco submerso na poça de fusão é observado. Na região D, devido à baixa tensão do arco, os modos observados são tensão superficial e arco submerso na poça de fusão. A região E não produziu soldas

aceitáveis devido à tensão muito baixa e corrente muito elevada, fora da faixa operacional dos parâmetros.

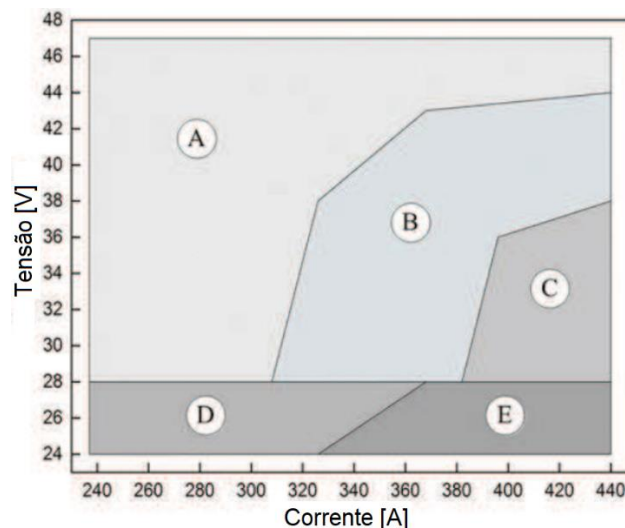


Figura 27: Distribuição dos modos mistos de transferência metálica em função dos valores de tensão e corrente: A- Transferência globular repelida e tensão superficial; B- Transferência globular repelida, tensão superficial e arco submerso na poça de fusão; C- Arco submerso na poça de fusão; D- Tensão superficial e arco submerso na poça de fusão; E- Fora da faixa operacional.

Fonte: Adaptado de Guo et al. (2016).

O estudo conduzido por Al-Abbas et al. (2011) consistiu na deposição de cordões de soldas subaquáticas usando o processo SMAW. Os autores observaram que o aumento na corrente de soldagem exerce influência sobre os parâmetros geométricos do cordão de solda. Conforme apresentado no gráfico da Figura 28-a, o aumento na corrente de 110 A para 140 A produziu variações perceptíveis na geometria do cordão, aumentando o valor da penetração e reduzindo o valor da largura. Segundo os autores, as alterações geométricas estão relacionadas ao maior aporte térmico, causado pelo aumento da corrente, que produz elevação no valor da penetração devido à maior quantidade de calor cedida à peça. Os autores relatam também que a maior corrente de soldagem promove aumento na taxa de fusão do eletrodo e, nesse processo, aumenta a velocidade de soldagem, conforme mostra o gráfico da Figura 28-b. O aumento na velocidade de soldagem promove redução na largura dos cordões de solda.

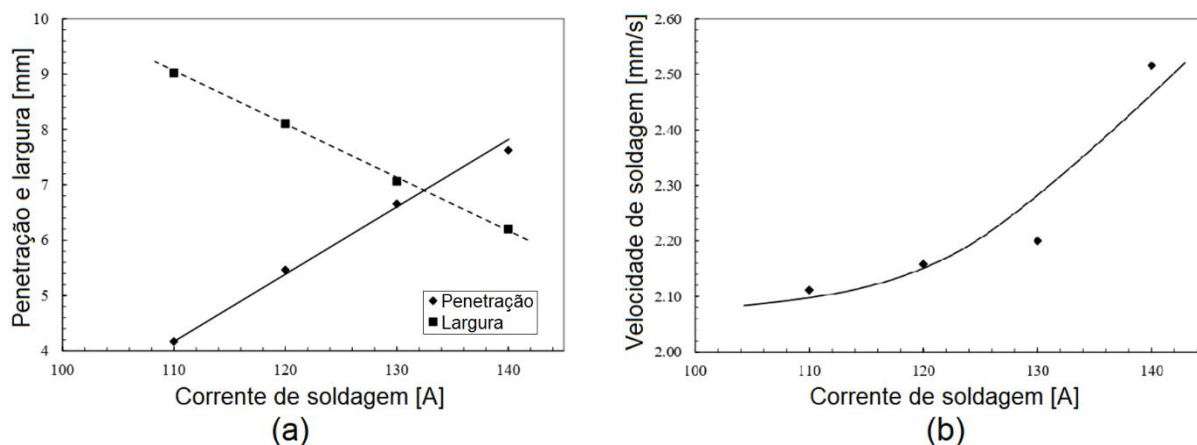


Figura 28: Efeito da variação da corrente de soldagem (a) nos valores de penetração e largura do cordão SMAW subaquática, (b) na velocidade de soldagem.

Fonte: Adaptado de Al-Abbas et al., 2011.

2.4.4 Presença de água na região do bico de contato

No processo de soldagem com alimentação contínua de arame, o bico de contato tem papel importante na transferência da corrente de soldagem. O arame utilizado é alimentado desde a bobina até a tocha por meio de um conduíte. Esse arame recebe a corrente de soldagem ao deslizar por dentro do furo do bico de contato fixado na tocha. Por se tratar de um contato elétrico deslizante, a diferença de diâmetro entre o furo do bico de contato e o arame eletrodo utilizado deve ser mínima o possível de forma a promover um bom contato elétrico sem travamentos. No processo de soldagem subaquática com arames tubulares, a água entra no espaço existente entre o arame tubular e o bico de contato e interfere na transferência elétrica entre os componentes.

Andrade et al. (1993) observaram interrupções na alimentação do arame em soldas subaquáticas molhadas com arame tubular. Segundo os autores, tais interrupções foram causadas por micro fusões do arame dentro do bico devido à transferência irregular de corrente. O gráfico da Figura 29 mostra a variação no sinal de corrente de soldagem e na velocidade de alimentação de arame para soldas realizadas ao ar e soldas realizadas na água. De acordo com os autores, para o mesmo nível de corrente utilizado, as soldas realizadas ao ar apresentam maior estabilidade, enquanto que na soldagem subaquática, várias interrupções do arco foram observadas. Os autores afirmam que a variação na velocidade de alimentação

de arame observada nas soldas realizadas na água ocorreu devido às interrupções do eletrodo no bico de contato.

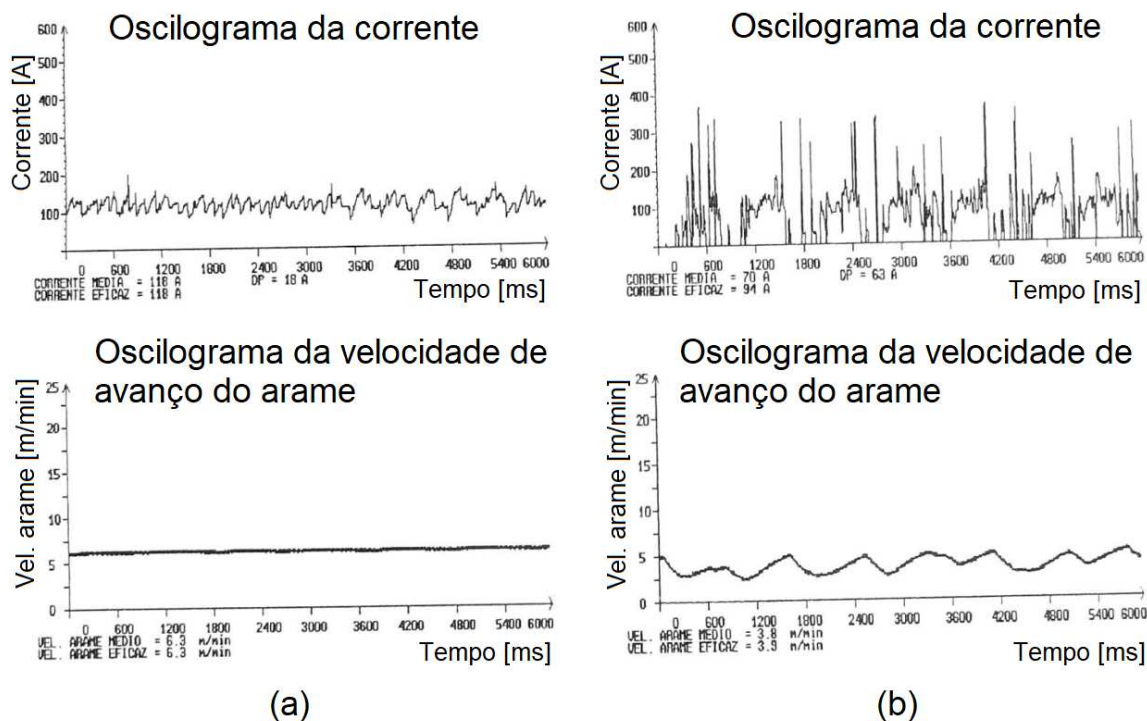


Figura 29: Oscilograma de corrente e de velocidade de alimentação de arame nas condições (a) ao ar e (b) subaquática.

Fonte: Adaptado de Andrade et al. (1993).

2.5 Porosidade em soldas subaquáticas

A presença de poros superficiais e internos no metal de solda é comumente observada em cordões depositados em condição subaquática. De acordo com Costa et al. (2022), os poros podem causar alterações nas propriedades mecânicas das soldas e são causados pela dissociação da molécula da água provocada pelo calor do arco elétrico. Os átomos de oxigênio e hidrogênio são conduzidos à poça de fusão, aumentando a quantidade de poros quando o metal se solidifica. Este efeito é também influenciado pelos parâmetros do processo que influenciam a estabilidade do arco elétrico.

O gráfico da Figura 30 mostra a relação da quantidade de poros com a energia de soldagem observada por Costa et al. (2022). Segundo os autores, a redução quantidade de poros com o aumento da energia de soldagem está relacionada à

menor taxa de resfriamento da poça de fusão, permitindo maior tempo para que os gases escapem do metal líquido antes da solidificação. Na soldagem subaquática, a rápida solidificação do metal resulta em aprisionamento dos gases, originando os poros.

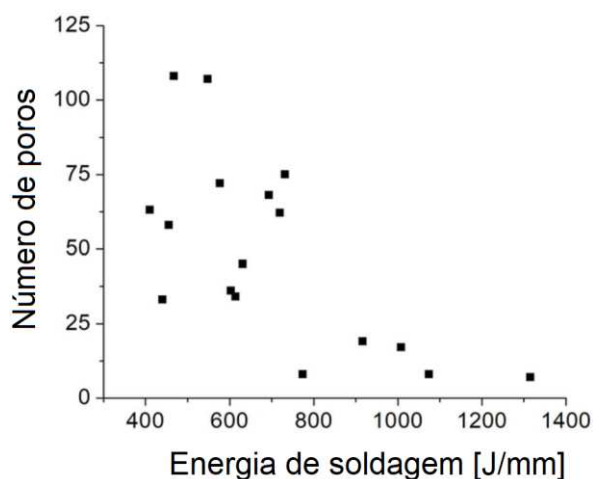


Figura 30: Relação entre o número de poros e o calor cedido à peça.

Fonte: Adaptado de Costa et al. (2022).

A gota de metal fundido, que se forma na ponta do arame e é transferida para a poça de fusão, também é responsável por características da solda, incluindo a porosidade. Observações feitas por Guerrero & Liu (2007), Chen et al. (2018a), Xu et al. (2020) e mostraram que bolhas de vapor se formam dentro da gota de metal enquanto esta cresce e é transferida à poça de fusão. A Figura 31 apresenta a sequência de imagens obtidas por raios-X que mostram as bolhas de vapor dentro da gota de metal sendo transferida. Segundo os autores, várias bolhas pequenas se formam e se combinam em uma bolha maior. Se a pressão dessa bolha exceder a pressão externa, ocorre o escapamento e ascensão. As bolhas geradas posteriormente serão levadas à poça de fusão pela gota de metal líquido. Caso essas bolhas não consigam sair da poça de fusão, estas serão aprisionadas pela solidificação e darão origem aos poros no metal de solda. Este fenômeno tem maior efeito em elevada pressão, dando origem à maior quantidade de poros em maiores profundidades.

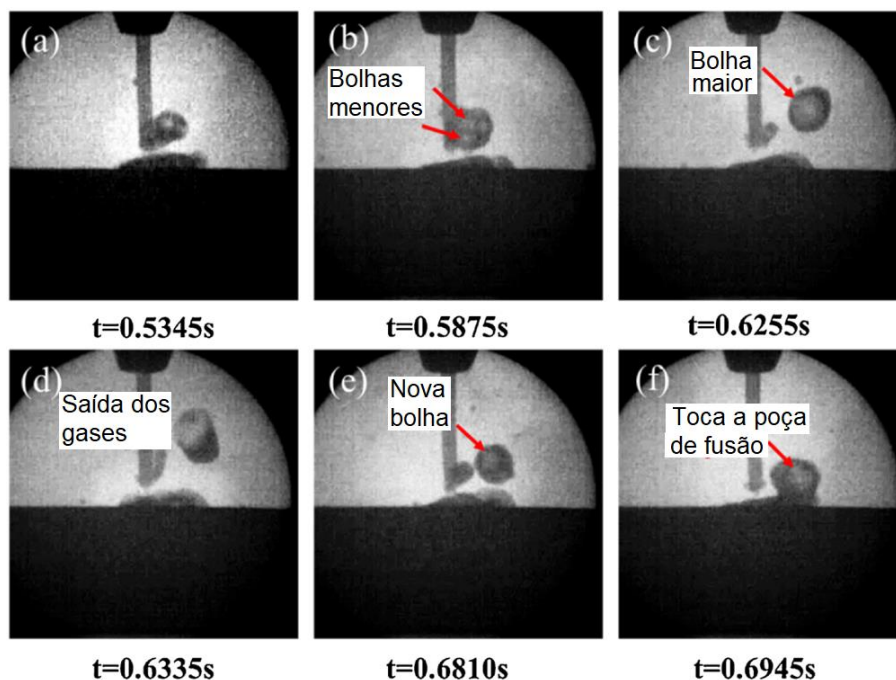


Figura 31: Geração e saída de gases da gota de metal fundido.

Fonte: Adaptado de Chen et al. (2018a).

2.6 Projetos que buscam a melhoria na estabilidade do arco e na qualidade das soldas

2.6.1 Tocha com barreira mecânica para reduzir a frequência de destacamento das bolhas

Wang et al. (2018) desenvolveram uma tocha para soldagem subaquática com arame tubular que conta com um disco fixado acima do bico de contato. O objetivo é que o disco atue como uma barreira mecânica e constrinja a bolha, mantendo-a ao redor do arco por um maior período de tempo. No trabalho, os autores variaram o diâmetro do disco (30 a 60 mm), a altura do disco em relação à peça (8, 12, 16 e 20 mm) e a tensão de soldagem. A Figura 32 apresenta uma comparação entre o processo convencional e com o uso da barreira mecânica.

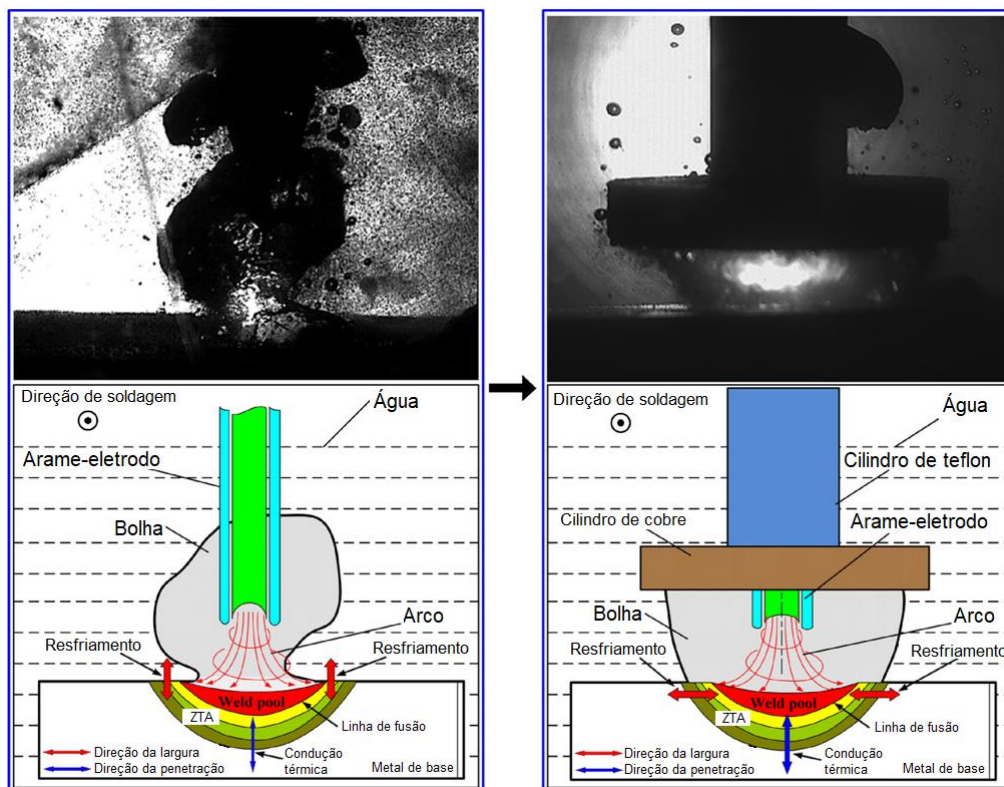


Figura 32: Esquema e montagem da tocha com barreira mecânica para soldagem subaquática.

Fonte: Adaptado de Wang et al., 2018.

Segundo os autores, maior estabilidade dos sinais elétricos e melhor aparência dos cordões foram obtidos quando o disco fixado na tocha possui diâmetro de 60 mm e altura de 8 mm em relação à superfície da peça de trabalho (respectivamente, maior valor de diâmetro e menor distância em relação à peça de trabalho). Essa configuração possibilita que a bolha cresça no sentido lateral, evitando o contato da água com o arco elétrico. A comparação dos sinais elétricos apresentou menor variação da tensão do arco e da corrente de soldagem em relação ao processo de soldagem molhada convencional, o que melhorou a estabilidade do processo, mais ainda não se aproxima da estabilidade com a qual o arco é estabelecido na soldagem em cavidade seca localizada. Por outro lado, segundo os autores, quanto menor o diâmetro do disco (30 mm) e quanto maior a distância para a peça de trabalho (20 mm), o efeito de constrição da bolha era reduzido ao ponto de não ser observada diferença em relação à soldagem FCAW subaquática convencional.

Wang et al. (2019) investigaram o efeito da velocidade de soldagem na dinâmica de formação das bolhas com o uso do disco na tocha de soldagem. Os autores observaram que, mesmo variando a velocidade de soldagem de 1 a 6 mm/s,

o efeito causado pela constrição mecânica foi o mesmo. A bolha tem seu movimento vertical impedido pelo disco de latão e cresce na direção radial, isolando o arco elétrico da água, em todas as velocidades de soldagem observadas. Segundo os autores, o fluxo de água promovido nas maiores velocidades não removeu a bolha da região do arco, aumentando a estabilidade do processo e a qualidade dos cordões de solda. A Figura 33 apresenta os valores de coeficiente de variação da tensão e corrente em soldas realizadas ao ar e em soldas subaquáticas com e sem o uso da barreira mecânica.

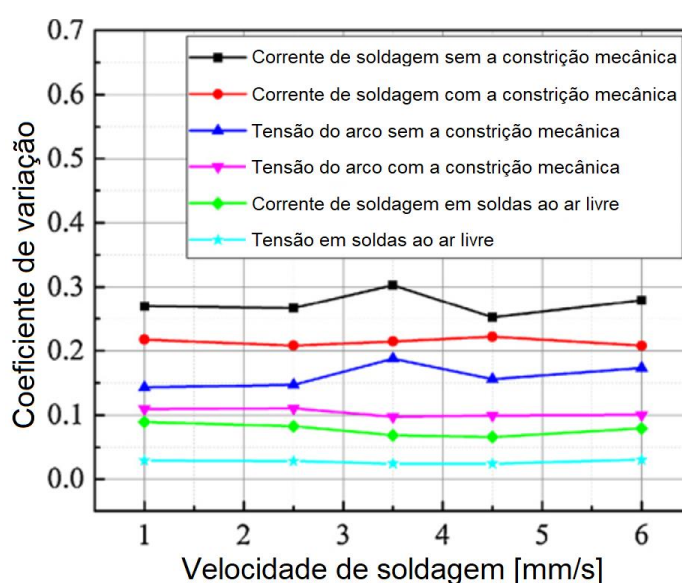


Figura 33: Efeito da velocidade de soldagem no coeficiente de variação da corrente e tensão em soldas realizadas ao ar e em soldas subaquáticas com e sem o uso da barreira mecânica.

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2019).

2.6.2 Método de soldagem subaquática a arco submerso

Han et al. (2020) conduziram experimentos adicionando uma camada de fluxo na região a ser soldada, segundo o mesmo princípio da soldagem a arco submerso. O arame tubular utilizado foi do tipo rutílico, com diâmetro de 1,6 mm. O fluxo utilizado, consistindo de resina epóxi misturada com fluxo para soldagem a arco submerso HJ350, tem o objetivo de minimizar o impacto causado pela água e pelas bolhas no arco elétrico e na poça de fusão. O processo é ilustrado na Figura 34.

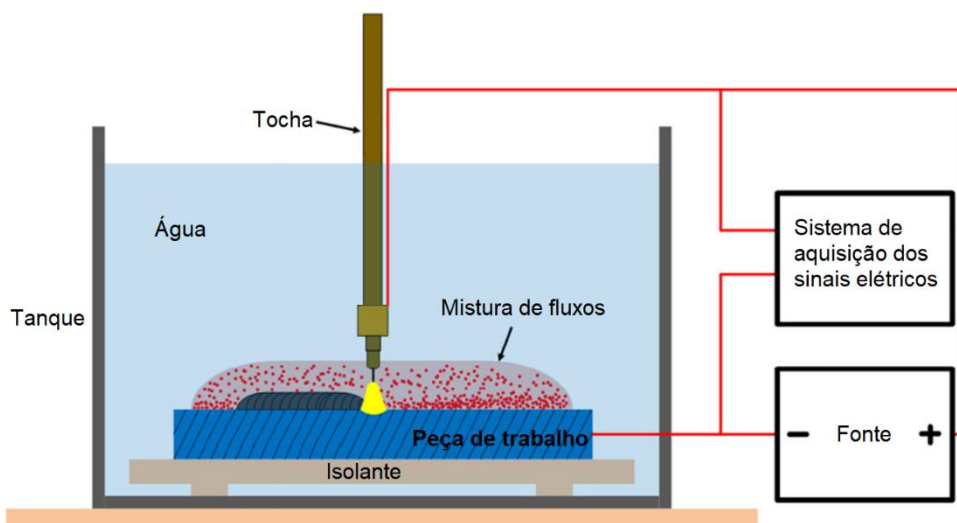


Figura 34: Esquema da soldagem subaquática a arco submerso.

Fonte: Adaptado de Han et al. (2020).

Segundo os autores, o método utilizado apresentou vantagens em relação ao processo de soldagem subaquática convencional. O processo foi realizado com maior estabilidade, apresentando flutuação significativamente menor dos sinais de tensão e corrente, como mostrado nos gráficos da Figura 35. Em relação à soldagem convencional, o uso do fluxo protege e isola a região de queima do arco, eliminando as extinções do arco e curtos-circuitos causados pela dinâmica de evolução e destacamento das bolhas.

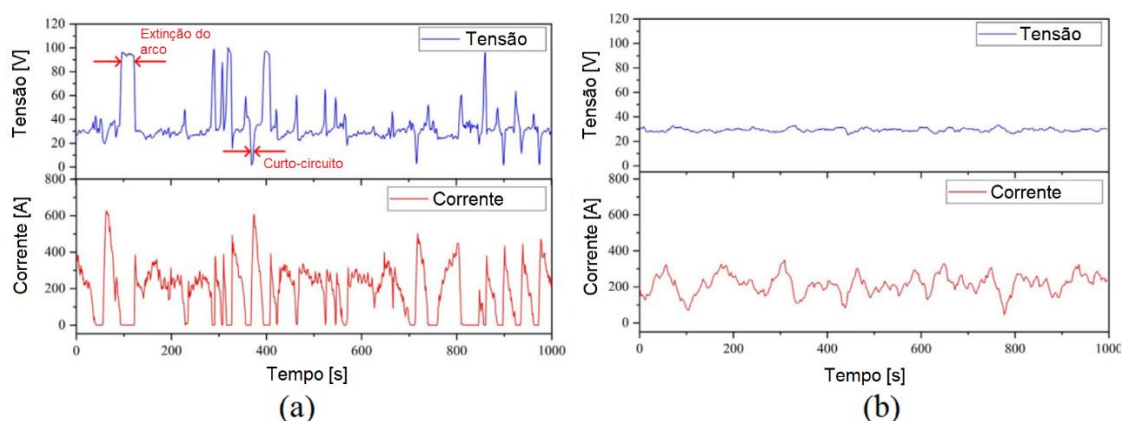


Figura 35: Oscilogramas dos sinais de tensão e corrente: (a) Soldagem FCAW subaquática e (b) soldagem subaquática a arco submerso.

Fonte: Adaptado de Han et al. (2020).

O estudo realizado por Zhang et al. (2021) consistiu de uma comparação entre o processo de soldagem subaquática a arco submerso e o processo convencional.

Foram analisadas três condições distintas: o processo convencional e o processo a arco submerso com duas composições diferentes de fluxo. A primeira consistiu de uma mistura de 40 %p. de silicato de sódio e 60 %p. de fluxo HJ350. A segunda mistura utilizada é composta de 40 %p. de resina epóxi (bisfenol-A) e 60 %p. de fluxo HJ350. Os autores realizaram experimentos nas três condições utilizando como eletrodo um arame tubular rutilico de 1,6 mm de diâmetro.

Segundo Zhang et al. (2021) o processo de soldagem subaquática a arco submerso evita que os fenômenos relacionados às bolhas causem interferência no arco elétrico, melhorando a estabilidade e a qualidade das soldas. A Figura 36 apresenta imagens dos cordões com as respectivas macrografias das seções transversais. Os autores afirmam a melhor aparência das soldas realizadas com fluxo contendo resina epóxi é consequência da melhor estabilidade do processo, uma vez que raramente foram observadas extinções do arco e curtos-circuitos.



Figura 36: Vista superior e seções transversais de cordões depositados em diferentes condições: (a,d) soldagem subaquática convencional com arames tubulares; (b,e) Arco submerso em fluxo contendo silicato de sódio; (c,f) Arco submerso em fluxo contendo resina epóxi.

Fonte: Zhang et al. (2021).

Segundo Zhang et al. (2021), a mistura contendo silicato de sódio possibilitou melhorias em menor escala ao processo devido à solubilidade do composto em água. A resina epóxi não é solúvel e permitiu a queima do arco em ambiente onde não ocorre o fenômeno de formação das bolhas. Os autores observaram também melhores propriedades mecânicas do metal depositado. Em análise da microestrutura, foi observada maior quantidade de ferrita acicular no metal de solda dos cordões cujo fluxo continha resina epóxi. Essa característica foi associada às propriedades da

escória. Conforme esquematizado na Figura 37, não foram detectadas trincas na escória da terceira condição, possibilitando menor taxa de resfriamento do metal e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas.

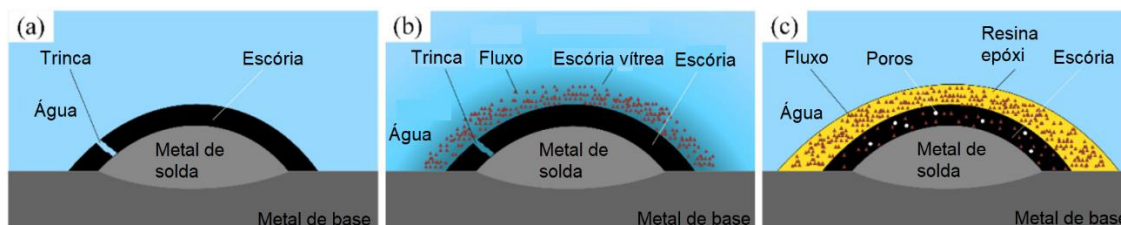


Figura 37: Esquema da estrutura da escória produzida nas três condições de soldagem: (a) soldagem convencional, (b) soldagem com fluxo contendo silicato de sódio e (c) soldagem com fluxo contendo resina epóxi.

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2021).

2.6.3 Aquecimento por indução da chapa de metal de base

Zhang et al. (2015) conduziram experimentos de soldagem realizando o aquecimento da chapa de metal de base por indução. Os autores utilizaram uma bobina com 60 mm de diâmetro localizada abaixo da chapa para promover seu aquecimento. A bobina foi fixada junto com a tocha de soldagem, se movendo à mesma velocidade de soldagem. A Figura 38 apresenta o esquema de montagem dos equipamentos.

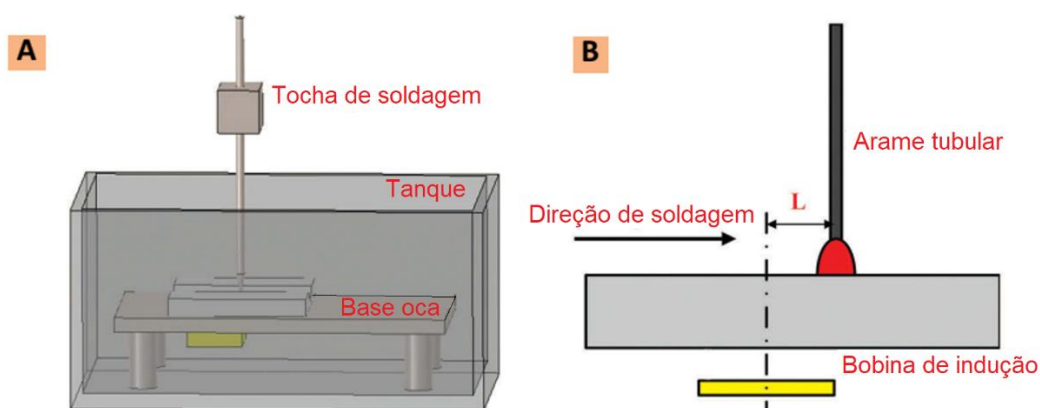


Figura 38: Esquema de montagem dos equipamentos utilizando a bobina de indução.

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2015).

Os autores observaram que nos experimentos nos quais a bobina não foi utilizada o arco elétrico se comportou de maneira estável. Porém, a estabilidade do processo foi reduzida quando o aquecimento por indução foi utilizado. Zhang et al. (2015) observaram que a distância L (distância horizontal entre a tocha e a bobina, mostrada na Figura 38) tem influência direta na estabilidade do arco, devido ao efeito do campo eletromagnético. Quanto maior a distância L, menor era o efeito da indução sobre arco e maior sua estabilidade. Maior estabilidade foi observada para $L \geq 20$ mm.

O valor da tensão aplicada na bobina de indução apresentou efeito direto na extensão da ZTA e na penetração. Segundo Zhang et al. (2015), a quantidade de calor cedida à peça foi o equivalente à soma do calor proveniente do processo de soldagem (definido pelos valores de tensão, corrente e velocidade do arco) com o calor proveniente da indução eletromagnética. Quanto maior a tensão na bobina, mais calor foi gerado na chapa por indução eletromagnética. Também foi observado menor quantidade de martensita e bainita superior, e maior quantidade de ferrita proeutetoide e ferrita acicular, melhorando as propriedades mecânicas do metal de solda.

2.6.4 Auxílio de ondas sonoras em alta frequência durante o processo de soldagem

Sun et al. (2016) realizou experimentos de soldagem FCAW subaquática utilizando um cabeçote gerador de ondas sonoras a 15 kHz acoplado à tocha de soldagem. Segundo os autores, o método apresenta vantagens ao processo quando realizado em soldas ao ar. Devido à maior densidade da água, as ondas sonoras à alta frequência terão maior efeito de propagação e maior interferência no processo. O esquema da montagem dos equipamentos é apresentado na Figura 39. O cabeçote, composto pelo transdutor e radiador ultrassônico, foi fixado acima da tocha de soldagem. A distância H equivale à distância entre a parte inferior do cabeçote e a peça de trabalho.

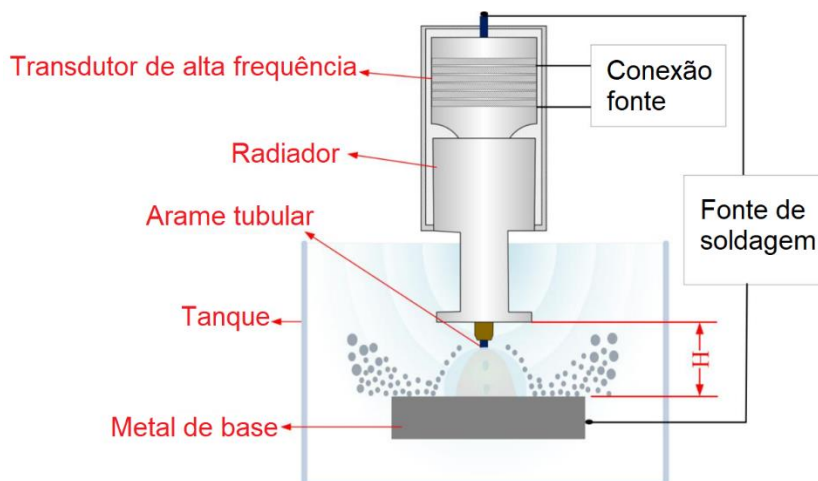


Figura 39: Esquema representativo da soldagem FCAW subaquática com uso de ondas em alta frequência.

Fonte: Adaptado de Sun et al. (2016).

Os autores observaram maior estabilidade do arco quando as ondas foram utilizadas na configuração em que a distância $H \leq 70$ mm. Como relatado, no processo de soldagem subaquática, o arco elétrico queima dentro de bolhas de vapor. Com o auxílio das ondas sonoras nesta configuração, uma força adicional vertical para baixo age sobre as bolhas de vapor, mantendo-a ao redor do arco por maior período de tempo e reduzindo a taxa de destacamento. Assim, a bolha permanece ao redor do arco isolando-o da água, promovendo também a redução na quantidade de interrupções que ocorrem durante o destacamento das bolhas.

Sun et al. (2016) também observaram redução nos teores das fases bainita e martensita e aumento de ferrita acicular com o auxílio das ondas sonoras a alta frequência. Esta observação foi associada também à redução de extinções do arco elétrico, que reduz a taxa de resfriamento da poça de fusão e, conseqüentemente, a formação de fases que se formam em resfriamento rápido. Houve melhoras nas propriedades mecânicas de resistência à tração e propriedades de dobramento.

Chen et al. (2020) utilizaram um cabeçote gerador de ondas ultrassônicas posicionado a 30° de inclinação em relação à tocha de soldagem, como ilustra a Figura 40. Ondas ultrassônicas a 28 kHz foram direcionadas ao arco elétrico. Segundo os autores, o feixe ultrassônico suprime a força de arrasto das bolhas sobre a gota de metal, promovendo a transferência metálica.

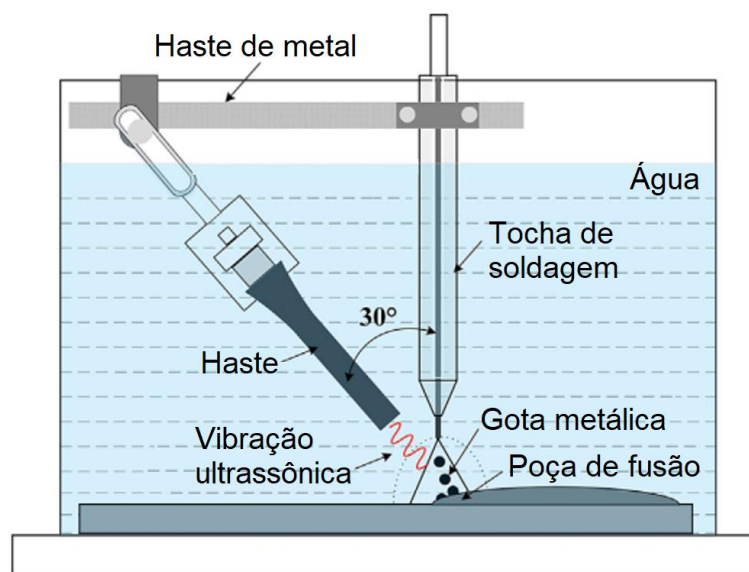


Figura 40: Esquema de montagem do cabeçote de ondas ultrassônicas inclinado em relação à tocha de soldagem.

Fonte: Adaptado de Chen et al. (2020).

A Figura 41 apresenta imagens da transferência metálica com o uso do sistema desenvolvido por Chen et al. (2020). O fluxo de ondas ultrassônicas restringe o comportamento da bolha de vapor e dificulta sua ascensão. A bolha inicial é dividida em várias bolhas de pequeno diâmetro que são afastadas da região do arame tubular. Assim, a gota de metal fundido cresce até tocar a poça de fusão. Neste momento, a transferência ocorre por tensão superficial. Segundo os autores, a proporção do modo de transferência globular repelida reduziu de 64 % para 41 % com o uso do cabeçote ultrassônico, enquanto que a proporção do modo de transferência por tensão superficial aumentou de 27 % para 54 %.

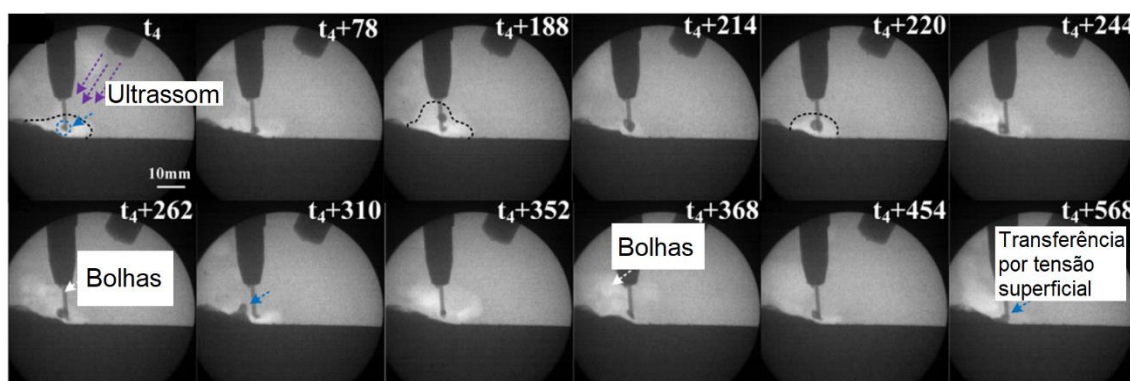


Figura 41: Efeito das ondas ultrassônicas na transferência metálica.

Fonte: Adaptado de Chen et al. (2020).

2.6.5 Tocha com sistema de vedação que impede a entrada de água no bico de contato

O protótipo desenvolvido e patenteado por Bracarense & Assunção (2019) consiste de uma tocha para soldagem subaquática com arame tubular que contém um dispositivo fixado na ponta da tocha. Esse dispositivo contém elementos de vedação que evitam a entrada de água na região do bico de contato.

Para avaliar a estabilidade do processo de soldagem subaquática utilizando a tocha, cordões de solda sobre chapa foram depositados utilizando arame tubular rutilico auto protegido com diâmetro de 1,6 mm, à profundidade de 0,4 m. Foi investigado, também, o efeito da variação dos parâmetros de soldagem utilizando os componentes de vedação da tocha. Foram definidos um valor mínimo e um valor máximo, dentro da faixa operacional, para a distância entre o bico de contato e a peça de trabalho, a tensão de soldagem regulada na fonte e a velocidade de alimentação de arame, que interfere diretamente na corrente de soldagem. Os níveis inferior e superior dos parâmetros de entrada adotados por Assunção (2018) são mostrados na Tabela 2. A Tabela 3 mostra a matriz experimental.

Tabela 2: Níveis inferior e superior dos parâmetros de entrada.

Fator	Nome	Nível Inferior (-)	Nível Superior (+)	Unidade
A	Condição	Bico de Contato Seco	Bico de Contato na Água	-
B	Distância Bico de Contato - Peça	15	20	mm
C	Tensão	26	30	V
D	Vel. de Alimentação de Arame	4	5	m/min

Fonte: Assunção, 2018.

Tabela 3: Matriz experimental utilizada por Assunção (2018).

# Cordão	Fator			
	A	B	C	D
1	-	-	-	-
2	-	-	-	+
3	-	-	+	-
4	-	-	+	+
5	-	+	-	-
6	-	+	-	+
7	-	+	+	-
8	-	+	+	+
9	+	-	-	-
10	+	-	-	+
11	+	-	+	-
12	+	-	+	+
13	+	+	-	-
14	+	+	-	+
15	+	+	+	-
16	+	+	+	+

Assunção (2018) observou que nos experimentos nos quais o bico de contato foi mantido na água, a variação dos sinais de corrente e tensão aumenta para maiores valores dos parâmetros de entrada. Quando o bico de contato foi mantido seco, a variação foi menor e apresentou tendência a se manter constante, mesmo variando os parâmetros de entrada, conforme ilustra o gráfico apresentado na Figura 42-a. O valor médio da corrente foi 13,2 % menor nas soldas com o bico de contato seco. Os resultados mostraram que a presença de água interfere na transferência de corrente do bico de contato para o arame-eletrodo, reduzindo a estabilidade do processo. Ainda, à medida em que os valores dos parâmetros de entrada aumentam, aumentando a energia de soldagem, a transferência de corrente se torna ainda mais instável.

As Figuras 42-b e 42-d apresentam, respectivamente, o histograma e o ciclograma para um dos tratamentos no qual o bico de contato foi mantido seco. As Figuras 42-c e 42-e apresentam os gráficos para um tratamento no qual o bico de contato foi mantido na água. A partir da matriz experimental adotada por Assunção (2018), a única diferença entre os dois tratamentos é a condição do bico de contato. Observa-se que o tratamento com o bico de contato seco apresenta maior estabilidade do arco elétrico, uma vez que o histograma (Figura 42-b) apresenta pico mais elevado e com menor variação em torno da média. O ciclograma (Figura 42-d) apresenta menor área formada pelos pontos e menor quantidade de eventos de curto-circuito (região circulada em vermelho). Os histogramas também mostram a quantidade de pontos com valor nulo de corrente (indicados pelas setas vermelhas), que indica as interrupções do arco elétrico.

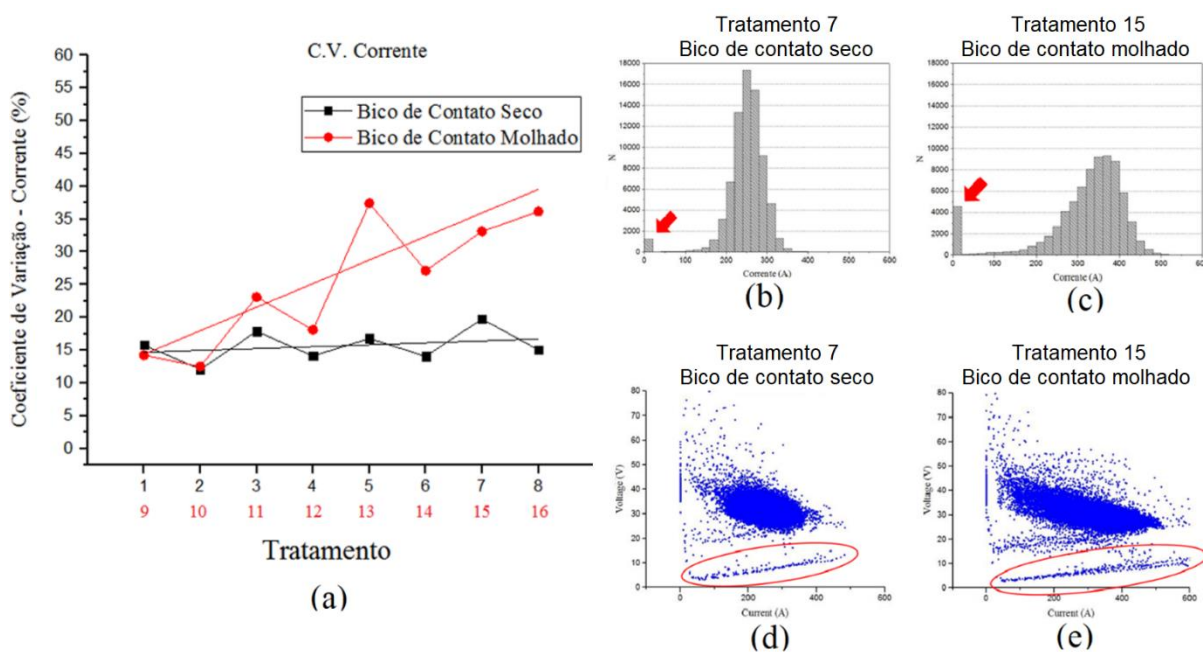


Figura 42: (a) Coeficiente de variação da corrente de soldagem; (b) histograma – tratamento 7; (c) histograma – tratamento 15; (d) ciclograma – tratamento 7 e (e) ciclograma – tratamento 15.

Fonte: Adaptado de Assunção, 2018.

3. METODOLOGIA

3.1 Equipamentos

Para realização dos experimentos de soldagem FCAW subaquática, foi utilizada a tocha desenvolvida por Bracarense & Assunção (2019) (Patente número BR 102017023415-0 A2). A montagem da tocha com a capa frontal é apresentada na Figura 43-a. A Figura 43-b mostra a tocha sem a capa frontal, que é a configuração utilizada na soldagem subaquática convencional com arame tubular, na qual o bico de contato e toda a extensão do arame-eletrodo ficam em contato com a água.

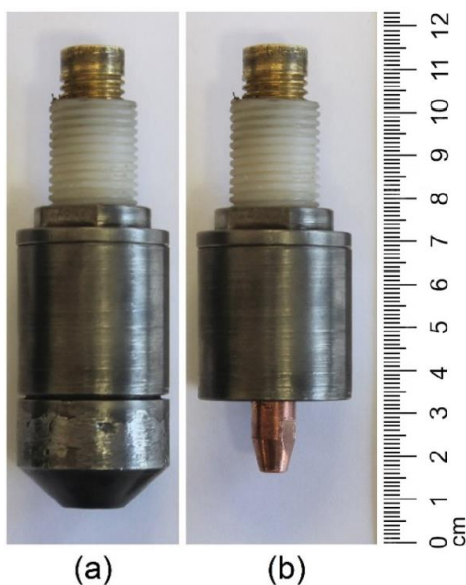


Figura 43: Tocha para soldagem subaquática com arame tubular do tipo autoprotégido: (a) com os componentes de vedação e (b) sem os componentes de vedação.

Quando os componentes de vedação são utilizados, além do bico de contato, uma pequena fração da extensão livre do eletrodo também é mantida isolada da água. Devido à espessura da capa e da camada do material de vedação, o comprimento de arame mantido seco dentro da tocha é de aproximadamente 7 mm, conforme ilustra o desenho apresentado na Figura 44.

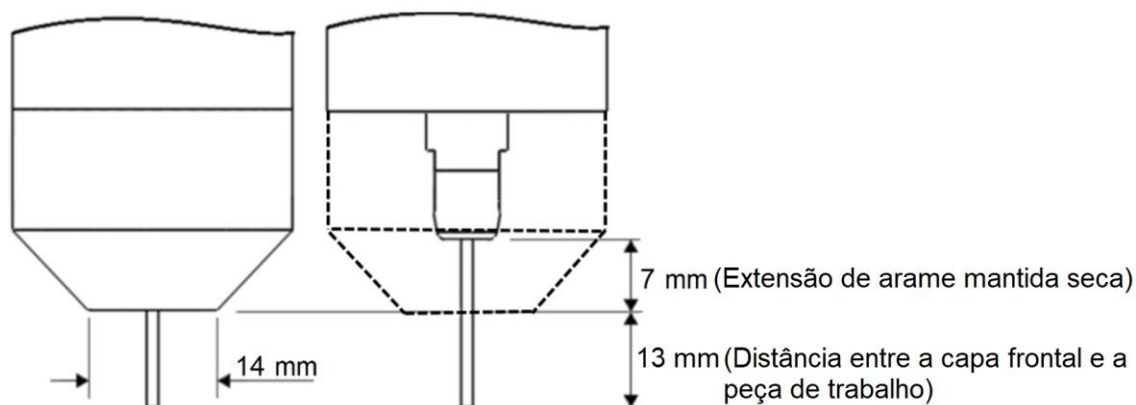


Figura 44: Comprimento mínimo de arame mantido seco e dimensões da tocha de soldagem.

Os cordões de solda foram depositados dentro de um tanque para soldagem subaquática, mostrado na Figura 45-a. O tanque dispõe de uma porta frontal, através da qual os equipamentos são inseridos na parte interior. Para simular profundidade, o tanque é conectado a uma linha de ar comprimido que permite aumentar sua pressão interna. O controle da pressão, e consequentemente da profundidade simulada, é feita através da leitura de um manômetro fixado na parte superior. No cálculo de pressão causada por altura de coluna d'água, cada 1 bar de acréscimo na pressão equivale a um ganho de 10 m de profundidade.

Para realização dos experimentos, a tocha de soldagem e a bobina de arame tubular devem ser posicionadas dentro da câmara hiperbárica, logo, foi identificada a necessidade de realizar o processo de forma mecanizada. Foi necessário, então, desenvolver uma estrutura para posicionar o sistema alimentador de arame e o sistema de deslocamento da chapa de metal de base dentro da câmara hiperbárica. A estrutura metálica foi projetada e construída em partes para ser montada e desmontada dentro do tanque, devido à dimensão da porta frontal. O projeto 3D computacional da estrutura e seu posicionamento dentro do tanque são mostrados na Figura 45-b. As Figuras 45-c e d mostram a vista lateral esquerda e frontal da estrutura com a identificação do posicionamento dos principais componentes. Um painel de controle externo, mostrado na Figura 46, foi adaptado para fazer o controle do acionamento do comando da fonte, controlar a alimentação de arame e a movimentação da chapa de metal de base durante o processo. É importante destacar que para realizar o processo água foi adicionada até metade da capacidade do tanque, assim, a tocha e a chapa de metal de base foram submersas enquanto o motor tracionador de arame e o motor responsável por movimentar chapa de metal de base

foram mantidos acima da superfície da água. Os detalhes do projeto e dimensionamento da máquina são apresentados no Anexo A.

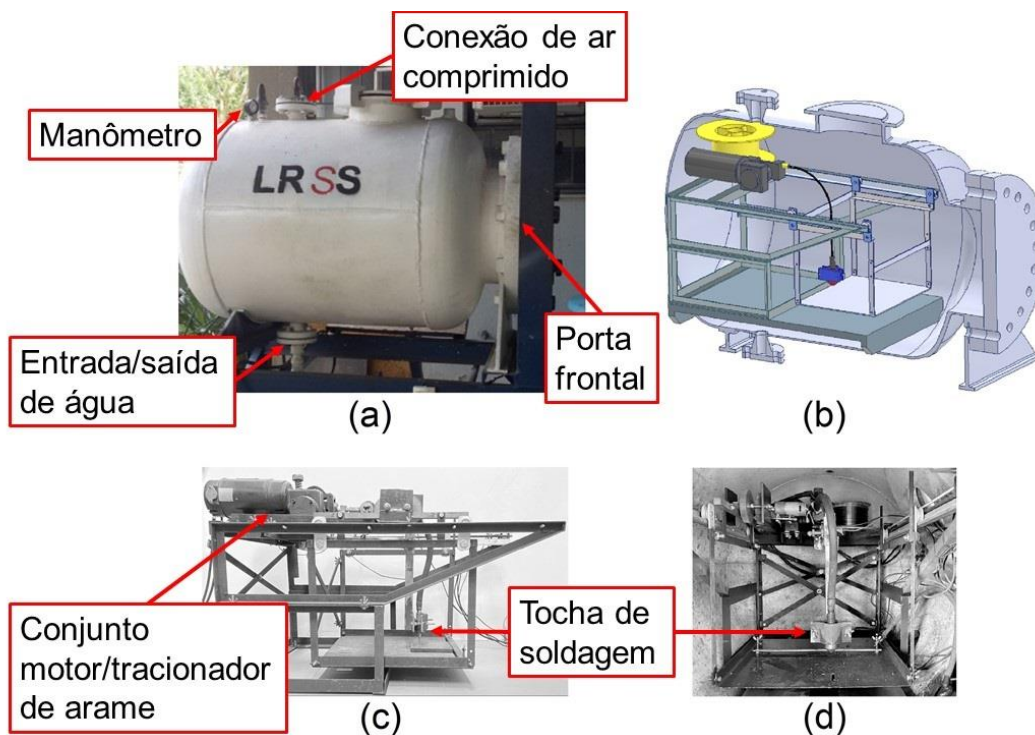


Figura 45: (a) Câmara hiperbárica, (b) projeto tridimensional da máquina de soldagem, (c) vista lateral da máquina e (d) vista frontal da máquina dentro do tanque.



Figura 46: Painel de controle externo.

3.2 Metal base e eletrodo tubular

Cordões lineares foram depositados em chapas de aço A36 com dimensões de 100 mm x 200 mm e espessura de 12,7 mm. Foi utilizado um eletrodo tubular comercial rutilico do tipo auto protegido, modelo ESAB TUBROD 7110A, com diâmetro de 1,6 mm. Este eletrodo é especificado para soldagem ao ar em todas as posições e é fabricado conforme a classificação AWS SFA 5.20 E71T-11. A composição química e as propriedades mecânicas do metal depositado são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Composição química e propriedades mecânicas do metal depositado – Eletrodo tubular TUBROD 7110A.

Composição Química				Propriedades Mecânicas		
C	Si	Mn	Al	Lim. Resistência	Lim. Escoamento	Alongamento
0,25	0,4	0,7	1,6	630 MPa	500 MPa	23 %

Fonte: Esab, acesso em 2022.

3.3 Procedimento experimental

Para comparar as soldas realizadas com o bico de contato seco com as soldas nas quais o bico de contato estava em contato com a água, um parâmetro foi criado e intitulado “condição”. Como mostrado na Tabela 5 e ilustrado na Figura 47, na condição 1, o bico de contato é mantido seco dentro da tocha. Nesta condição, foi utilizada a tocha com o sistema de vedação, desenvolvida por Bracarense & Assunção (2019). A configuração convencional, na qual não existe nenhuma barreira entre o bico de contato e a água, foi denominada condição 3. Uma condição intermediária, na qual a capa frontal da tocha foi utilizada, mas sem os componentes de vedação, de forma que a água entrasse dentro da tocha, foi denominada condição 2. O objetivo dos experimentos realizados na condição 2 foi o de investigar, através da comparação com a condição 3, se a capa frontal da tocha exerce influência sobre as bolhas geradas no processo, e, conseqüentemente, afeta a estabilidade e qualidade da solda. Os experimentos foram realizados em profundidades de 0,3 m, 10 m e 30 m. As soldas

depositadas a 0,3 m foram feitas com a porta superior da câmara hiperbárica aberta, à pressão ambiente. A profundidade de 0,3 m equivale à profundidade da tocha nessa condição. As profundidades de soldagem de 10 m e 30 m foram simuladas por meio de pressurização da câmara hiperbárica e identificação da pressão através do manômetro digital mostrado na Figura 45-a.

No presente trabalho, os únicos parâmetros variáveis investigados foram a condição do bico de contato e a profundidade de soldagem. Todos os outros parâmetros de entrada foram mantidos constantes. Os valores foram selecionados após testes preliminares e são apresentados na Tabela 6.

Tabela 5: Parâmetros variáveis.

Parâmetros variáveis	
Condição	1 – Bico de contato seco
	2- Tocha sem vedação
	3- Bico de contato na água
Profundidade	0,3 m
	10 m
	30 m

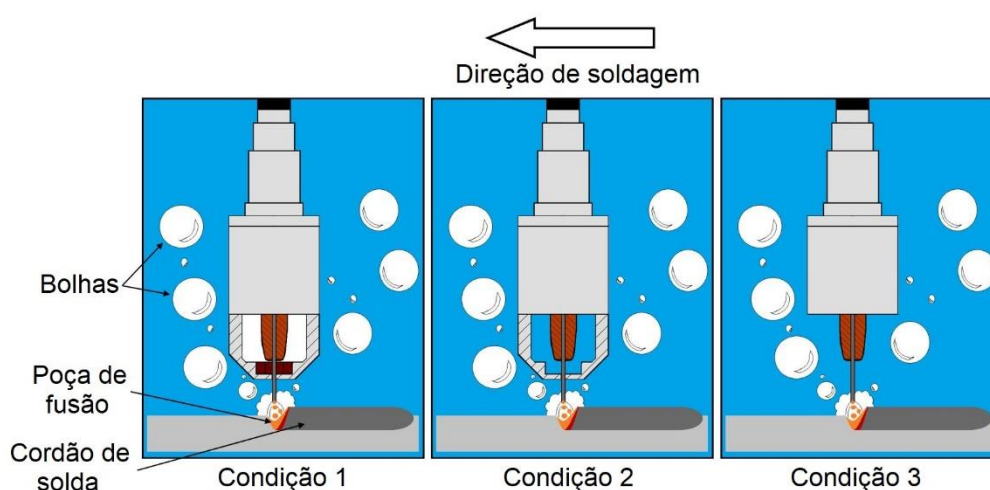


Figura 47: Condições de soldagem.

Tabela 6: Parâmetros constantes.

Parâmetro	Valor
DBCP [mm]	20
Ângulo de soldagem [°]	0
Velocidade de soldagem [mm/s]	4,167
Vel. de alimentação de arame tubular [m/min]	4,5
Tensão [V]	30
Polaridade	DCEN

A matriz experimental completa é apresentada na Tabela 7. Todas as três condições foram investigadas nas três profundidades selecionadas. Foram realizados 5 experimentos para cada combinação de parâmetros, resultando em um total de 45 cordões depositados.

Tabela 7: Matriz experimental.

#	Condition	Depth
1		0,3 m
2	1	10 m
3		30 m
4		0,3 m
5	2	10 m
6		30 m
7		0,3 m
8	3	10 m
9		30 m

3.4 Aquisição dos sinais de corrente, tensão, velocidade de alimentação de arame e temperatura do bico de contato

A aquisição dos sinais de corrente, tensão e temperatura do bico de contato foi feita pelo sistema SAP V4TI – IMC Welding Company. O sistema monitora e armazena os dados a uma taxa de amostragem de 5 kHz.

Para medição do sinal de corrente, um sensor hall foi posicionado na saída do terminal positivo da fonte de soldagem. Os terminais do sensor de medição da tensão foram conectados aos terminais da fonte conectados à tocha de soldagem e à peça de trabalho.

A velocidade de alimentação de arame tubular foi calculada a partir do valor da tensão do motor tracionador de arame durante o processo. Como o processo de soldagem foi realizado dentro da câmara hiperbárica, a tensão de alimentação do motor, controlada pelo painel conectado à fonte de soldagem, foi medida a partir dos terminais de alimentação, do lado externo do tanque. O procedimento desenvolvido para calibração da velocidade de alimentação de arame é descrito no Anexo B.

A medição da temperatura do bico de contato foi feita com dois termopares tipo K fixados em furos de 1 mm de diâmetro e 1 mm de profundidade usinados na lateral do corpo do bico de contato. Os furos são separados entre si por uma distância longitudinal de 10 mm, conforme ilustra a Figura 48.

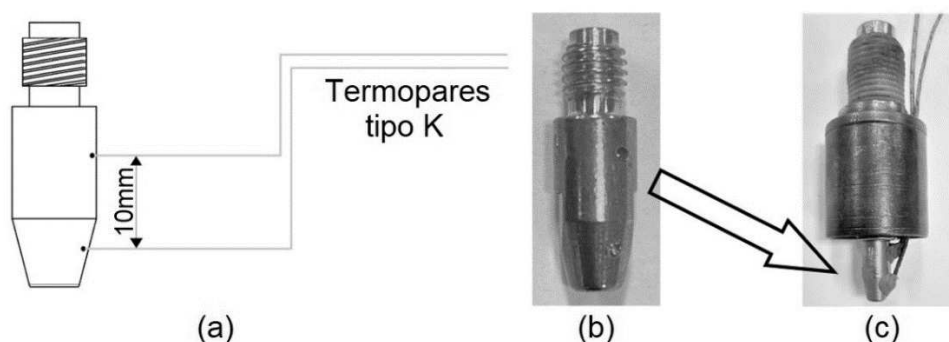


Figura 48: Ligação dos termopares. (a) Esquema de ligação no bico de contato, (b) furos usinados e (c) bico de contato com os termopares.

3.5 Avaliação da morfologia, porosidade e eficiência de fusão

A medição dos parâmetros geométricos de largura, reforço e penetração foram feitos a partir de cortes transversais dos cordões de solda. Cortes longitudinais foram utilizados para avaliação da porosidade e da variação do reforço ao longo da direção de soldagem. A preparação macrográfica foi feita por lixamento até granulometria 600, seguida de ataque com Nital 10 %. Para medição dos parâmetros geométricos foi utilizado o software livre ImageJ. Foram preparadas 3 amostras de cada condição experimental.

As medições da área da seção transversal dos cordões de solda foram utilizadas para calcular a eficiência térmica do processo. A eficiência térmica é uma característica da fonte de calor e do processo de transferência de calor entre os materiais a serem unidos. Para avaliar a eficiência térmica, são necessárias informações sobre a área da seção transversal da solda, sobre as propriedades metalúrgicas do metal de base e metal de adição e sobre o aporte térmico (AWS, 2001). A Equação 2 foi utilizada para calcular a eficiência térmica. Esta equação relaciona a quantidade de calor necessária para fundir o metal depositado por unidade de comprimento, dividido pela potência fornecida (AWS, 2001, apud Hackenhaar et al., 2018).

$$\eta = \frac{Q \cdot A_w \cdot v}{U \cdot I} \quad (2)$$

Em que η representa a eficiência de fusão, Q é a entalpia de fusão do aço [J/mm^3], A_w representa o valor da área total da seção transversal do metal de solda [mm^2], v representa a velocidade de soldagem [mm/s], U é a tensão do arco [V], I representa a corrente de soldagem [A].

A estabilidade do arco foi avaliada através da comparação dos sinais elétricos de corrente e tensão das soldas produzidas em cada combinação listada na Tabela 7. Foram plotados os gráficos de tensão e corrente em função do tempo e feita a comparação da variação dos sinais em cada condição. Adicionalmente, a estabilidade foi avaliada por meio de gráficos de tensão *versus* corrente de soldagem. Estes gráficos permitem a identificação dos eventos de curto-circuito, extinção do arco e da região de arco estável. Com o objetivo de comparar o tempo de extinção do arco em cada condição, foi calculado o índice de extinção do arco. Amaral, Uribe & Bracarense (2022) definem o índice de extinção do arco como a porcentagem do tempo operacional na qual o arco permaneceu interrompido. O índice é calculado pela razão entre o número de pontos de medição nos quais a corrente foi inferior a 10A (N_{10}) com o número total de pontos de medição armazenados durante a deposição do cordão de solda (N_T), de acordo com a Equação 3.

$$\text{Índice de extinção do arco} = \frac{N_{10}}{N_T} \times 100 \quad (3)$$

Na soldagem subaquática, a poça de fusão é submetida a maiores taxas de resfriamento, resultando em rápida solidificação do metal líquido. Interrupções do arco elétrico combinadas com o movimento ascendente das bolhas permitem que a água entre em contato direto com o metal da poça de fusão (Wang et al., 2019). O calor perdido para a água faz com que a temperatura de solidificação seja atingida rapidamente. A solidificação se inicia na parte superior e avança em direção ao fundo da poça de fusão, fazendo que o reforço seja não uniforme em caso de instabilidade do arco. Assim, no presente trabalho, como forma adicional de investigar a estabilidade do processo, medições do reforço foram feitas para avaliação do perfil longitudinal e para calcular o desvio padrão e o coeficiente de variação do parâmetro geométrico. Conforme ilustrado na Figura 49, as medições foram feitas em um intervalo de 60mm de comprimento no centro do corte longitudinal, com passo de 1mm entre os pontos de medição.

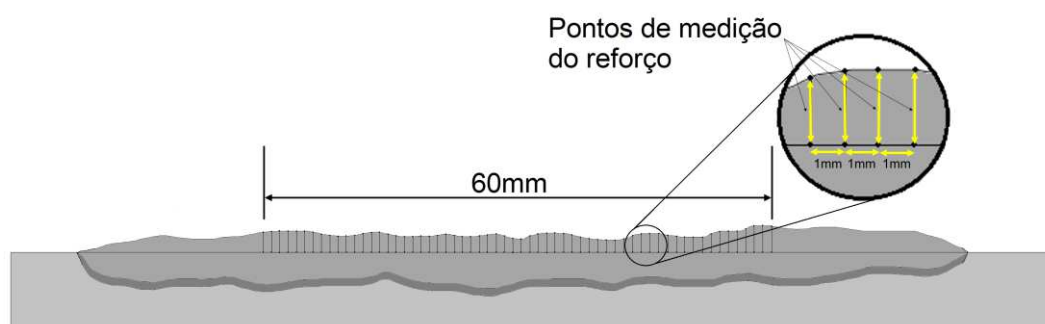


Figura 49: Pontos para medição do reforço.

As amostras seccionadas longitudinalmente também foram utilizadas para avaliação da porosidade do metal de solda. A porosidade foi calculada pela relação entre a área total dos poros $[A_P]$ com a área total da seção longitudinal do cordão $[A_{LW}]$, conforme ilustra o esquema apresentado na Figura 50. Em termos relativos, a porosidade foi calculada pela Equação 4.

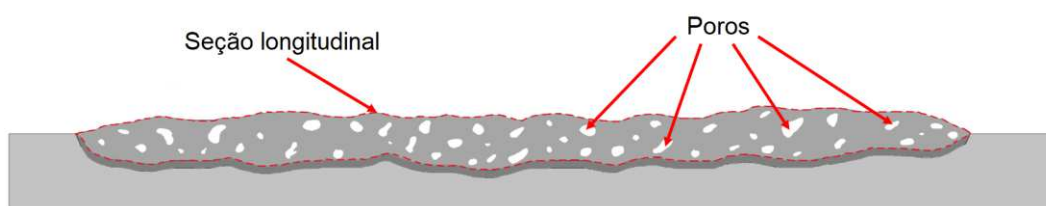


Figura 50: Seção longitudinal indicando os poros e área da seção.

$$Porosidade [\%] = \frac{A_P}{A_{LW}} \times 100 \quad (4)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Morfologia dos cordões de solda

4.1.1 Inspeção visual

A inspeção visual dos cordões de solda foi realizada com o objetivo de comparar o aspecto visual, a uniformidade lateral ao longo do cordão, presença de poros e trincas na superfície, bem como mordeduras e respingos. Os cordões produzidos a 0,3 m, 10 m e 30 m nas três condições analisadas são apresentados na Figura 51.

Observa-se que os cordões com melhor aspecto visual foram produzidos em profundidade de 0,3 m, apresentando maior uniformidade superficial e lateral em comparação às profundidades de 10 e 30 m. À medida em que a profundidade aumenta, os cordões apresentam maior irregularidade superficial. Esta observação pode ser associada ao menor efeito de proteção do arco elétrico e da poça de fusão causado pelas bolhas de menor diâmetro geradas em maiores profundidades. Conforme observações experimentais feitas por Chen et al. (2018), maior pressão na câmara de soldagem reduz o diâmetro das bolhas, segundo o comportamento dos gases. Este fenômeno reduz o efeito protetivo das bolhas ao redor do arco elétrico e da poça de fusão, prejudicando a estabilidade do arco e a qualidade superficial do cordão de solda. Os cordões produzidos nas profundidades de 10 e 30 m apresentam maior irregularidade, com regiões de estreitamento e não linearidade do cordão e maior quantidade de poros superficiais. O cordão produzido com o bico de contato seco em 0,3 m apresenta melhor aspecto visual, com menor quantidade de poros superficiais.

Na Figura 51 também é possível observar que as soldas produzidas na condição 1 apresentam melhor aspecto superficial e uniformidades do que as soldas produzidas com o bico de contato na água. A 0,3 m e 10 m, é notada menor quantidade de poros superficiais e maior uniformidade superficial dos cordões da condição 1, indicando melhor estabilidade do arco. Adicionalmente, não foram observados poros nas crateras das soldas produzidas com o bico de contato seco a 0,3 m e 10 m. As soldas das condições 2 e 3 a 10 m apresentam grandes poros superficiais e maior

irregularidade lateral do cordão. A 30 m, todas as soldas têm a superfície irregular, como resultado da instabilidade do arco causada pela elevada pressão da água.

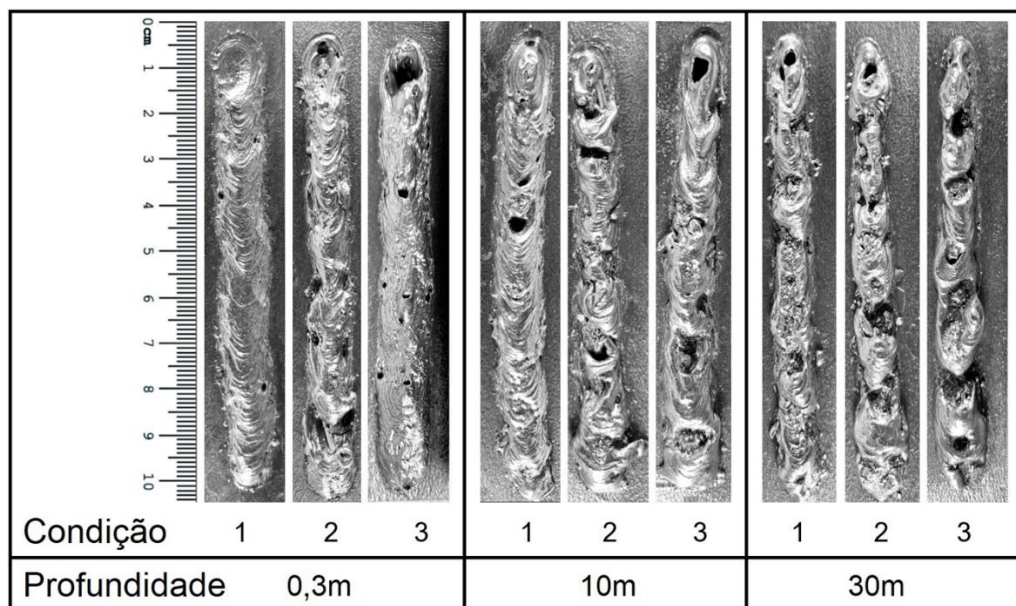


Figura 51: Imagens dos cordões de solda produzidos em cada condição.

Os dados geométricos dos cordões de solda (largura, reforço e penetração) foram medidos. Os resultados, para cada profundidade de soldagem, são apresentados na Figura 52. Observa-se que ocorrem pequenas variações na geometria do cordão para as três condições de soldagem a 0,3 m. Os três cordões apresentam relação largura/penetração semelhante e a forma da seção transversal não muda significativamente. À medida em que a profundidade aumenta, os valores de largura diminuem e os valores de penetração de soldagem aumentam. De acordo com Yang et al. (2020), na soldagem subaquática, o arco elétrico é comprimido pela pressão da coluna d'água, reduzindo a área de efeito do arco sobre a chapa de metal base. A maior densidade de energia promove aumento na penetração e redução na largura do cordão de solda. A Figura 53 mostra as diferenças observadas nas seções transversais das soldas. Observa-se que o aumento na penetração e a redução na largura do cordão é maior nas soldas produzidas com o bico de contato na água, em comparação à condição 1 (bico de contato seco).

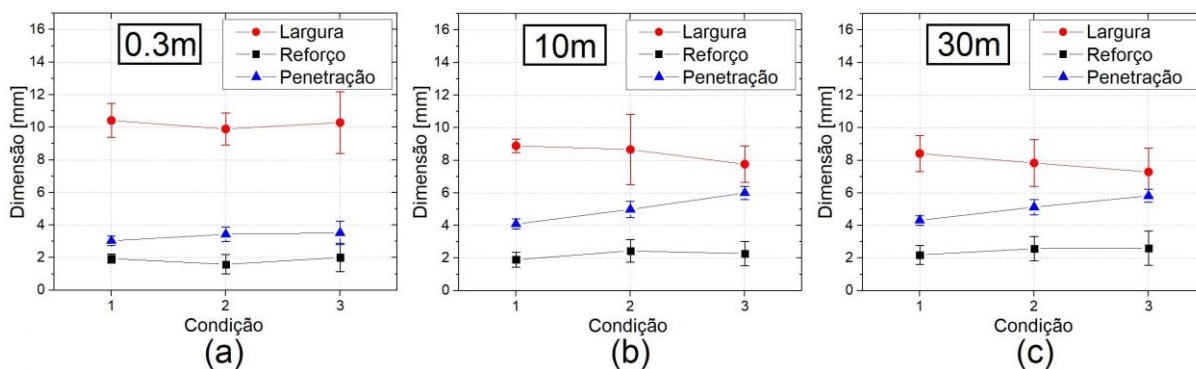


Figura 52: Variação da geometria dos cordões. (a) 0,3m; (b) 10m e (c) 30m.

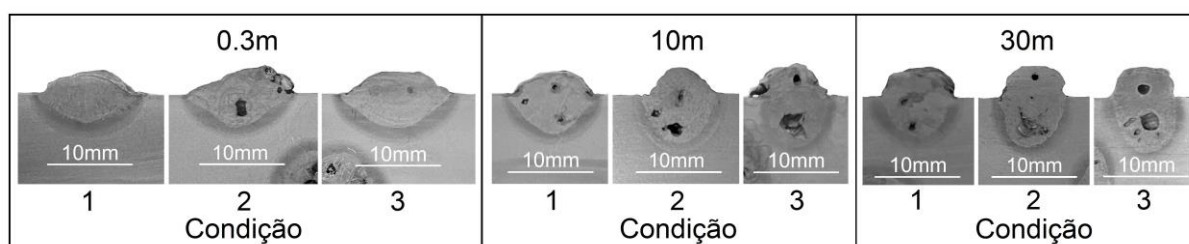


Figura 53: Seções transversais dos cordões de solda.

No processo de soldagem subaquática com arame tubular, autores observaram aumento na penetração em função da variação dos parâmetros do processo. Dentre as variáveis de entrada, a corrente de soldagem tem relação direta com a penetração do cordão de solda.

O estudo conduzido por Shi et al. (2013) consistiu em um modelo sensitivo para a geometria do cordão a partir dos parâmetros de entrada. Os autores observaram que a corrente de soldagem exerce influência mais forte sobre a penetração do que nos outros parâmetros geométricos do cordão. Também foi notado que o efeito aumenta para maiores valores de corrente.

No estudo desenvolvido por Hernández et al. (2022), foram depositados cordões sobre chapa variando os parâmetros de entrada do processo. Os autores observaram aumento significativo na penetração da solda ao aumentar a corrente de soldagem, mantendo os demais parâmetros constantes.

Al-Abbas et al. (2011) observaram aumento de 50 % na penetração de soldas subaquáticas com eletrodos revestidos causado pelo aumento na corrente de soldagem de 110 A para 140 A.

Li et al. (2018) conduziram estudo investigando o efeito da variação da energia de soldagem nos parâmetros geométricos do cordão. Os autores observaram que os valores da penetração variam diretamente com o aporte térmico.

Em relação ao efeito da profundidade de soldagem na penetração do cordão, Omajene et al. (2014) afirmam que o aumento na pressão hidrostática causa maior constrição do arco, resultando em aumento na penetração de soldagem. Segundo os autores, esse efeito é bastante significativo em profundidade de até 30 m, tornando-se menos relevante em profundidades superiores a 50 m. Esta observação também foi feita por Shi et al. (2013).

Porém, nos estudos analisados, a variação na corrente de soldagem foi provocada por variação na velocidade de alimentação de arame eletrodo. As fontes de soldagem do tipo tensão constante possuem a característica de regular o valor da corrente em função da velocidade com que o eletrodo é alimentado, para regular a taxa de fusão do arame e manter o comprimento e estabilidade do arco. No presente trabalho, diferentes valores de penetração foram observados mantendo a velocidade de alimentação de arame constante. Nas próximas seções, serão investigados e discutidos os resultados observando variações na corrente de soldagem e na velocidade de alimentação de arame.

4.2 Características operacionais

Os valores médios e o desvio padrão dos sinais de corrente e tensão das soldas produzidas nas três profundidades e nas três condições investigadas são mostrados nos gráficos da Figura 54. Nas três profundidades de soldagem foi observado que os valores médios de corrente foram menores nas soldas produzidas com o bico de contato seco. Os valores de tensão não apresentaram grande variação, uma vez que uma fonte do tipo tensão constante foi utilizada.

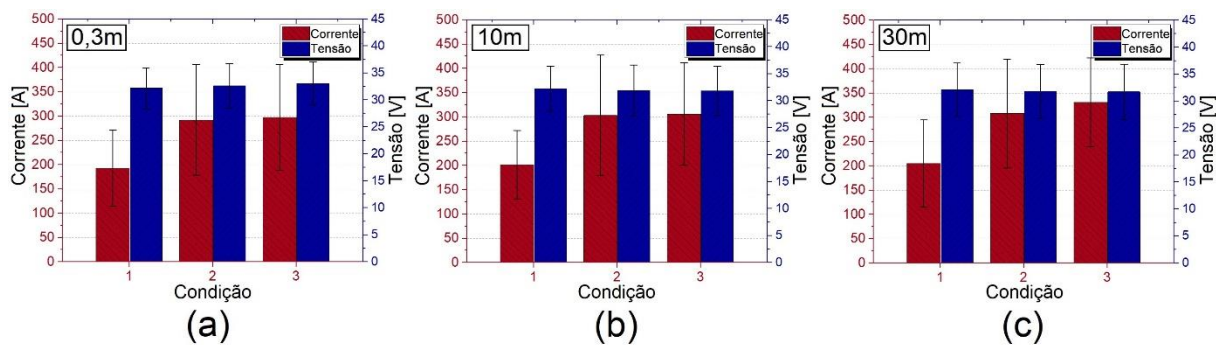


Figura 54: Valores médios e desvio padrão da corrente de soldagem e tensão do arco. (a) 0,3m, (b) 10m e (c) 30m.

A partir da Figura 54 também é possível observar que os valores de corrente das soldas produzidas nas condições 2 e 3 foram próximos. É importante enfatizar que a única diferença entre as três condições de soldagem é a presença de água ao redor do bico de contato, e que nas condições 2 e 3 o bico permanece em contato com a água, seja sem a capa frontal (condição 3) ou com a capa sem os elementos de vedação (condição 2). Assim, com o objetivo de se comparar os resultados dessas três condições, uma análise de variância (ANOVA) foi realizada. O fator analisado foi a condição do bico de contato e o resultado foi o valor médio da corrente para cada experimento.

Os resultados da análise de variância, separados em três partes (a, b e c), são apresentados na Figura 55. A primeira parte (a) mostra que o *p-value* associado à análise foi 0,000. Uma vez que o intervalo de confiança selecionado foi de 95%, este resultado indica que a hipótese nula (que as médias de todas as condições são iguais) deve ser rejeitada, e que a hipótese alternativa (que pelo menos a média de uma das condições é diferente) deve ser considerada (Montgomery, 2008).

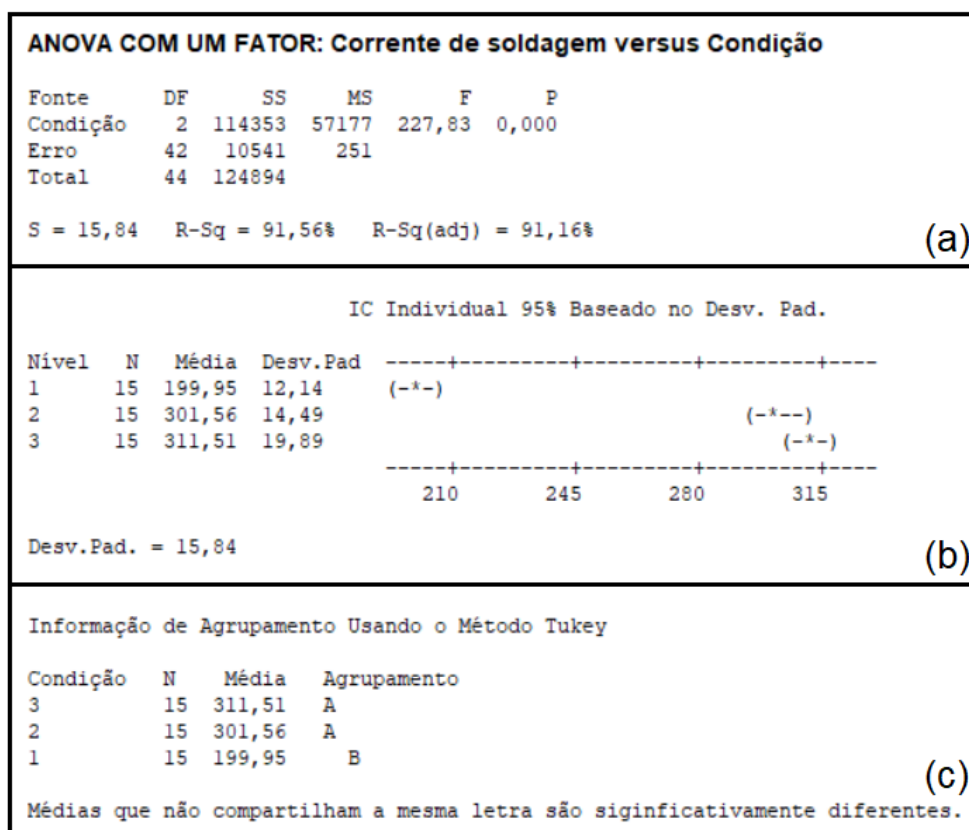


Figura 55: Resultados da análise de variância.

A segunda parte (b) dos resultados da ANOVA mostra os intervalos de confiança individuais ao nível de 95 % para as médias de cada condição. O intervalo de confiança dos valores da condição 1 está localizado à esquerda e à maior distância dos intervalos das condições 2 e 3. É possível também observar que os valores das condições 2 e 3 se sobrepõem em aproximadamente metade do comprimento dos intervalos. A terceira parte da ANOVA (c) mostra as informações das análises de agrupamento usando o método Tukey. Nesta análise, os grupos que possuem valores estatisticamente próximos são rotulados com a mesma letra. Como pode ser observado, as condições 2 e 3 foram rotuladas como Grupo A, enquanto a condição 1 foi rotulada como Grupo B. Considerando o intervalo de confiança, esta observação indica que as médias dos grupos A e B diferem entre si. Estas duas observações reforçam os resultados de que os valores de corrente obtidos na soldagem com o bico de contato seco são significativamente diferentes dos valores obtidos com o bico de contato na água. Também é seguro afirmar que as condições 2 e 3 não apresentaram diferenças ao nível de 95% de confiança. Portanto, soldas produzidas com o bico de contato na água, seja na forma convencional ou usando a capa frontal da tocha sem

os elementos de vedação, não resultaram em valores de corrente estatisticamente diferentes.

4.3 Temperatura do bico de contato

Durante a realização do processo de soldagem, à medida em que a corrente elétrica passa pelo bico de contato e é transferida ao arame tubular, o bico de contato é aquecido devido ao efeito Joule. Adicionalmente, parte do calor gerado pela resistência elétrica do arame tubular é transferida ao bico de contato (Kolmogorov et al., 2018). Como o material do bico de contato (liga de cobre) possui menor resistividade elétrica que o material do arame (aço carbono) e devido à maior densidade de corrente no arame tubular, é considerado que grande quantidade de calor é gerada no arame e parte desta energia contribui para o aquecimento do bico de contato (Han et al., 2017).

Os estudos desenvolvidos por Kolomogov et al. (2018) e Modenesi & Reis (2007) mostraram como o aquecimento resistivo do bico de contato e do arame aumenta com o aumento da corrente de soldagem. No presente trabalho, devido às dificuldades associadas à medição da temperatura do arame durante o processo FCAW subaquático, a temperatura do bico de contato foi medida com dois termopares.

A variação típica da temperatura do bico de contato ao longo do processo é apresentada na Figura 56. Devido às variações de temperatura em função do tempo, o gráfico foi dividido em três regiões distintas. A região de aquecimento do bico de contato, a região na qual a temperatura se estabiliza e a região de resfriamento, que acontece após o encerramento do processo de soldagem.

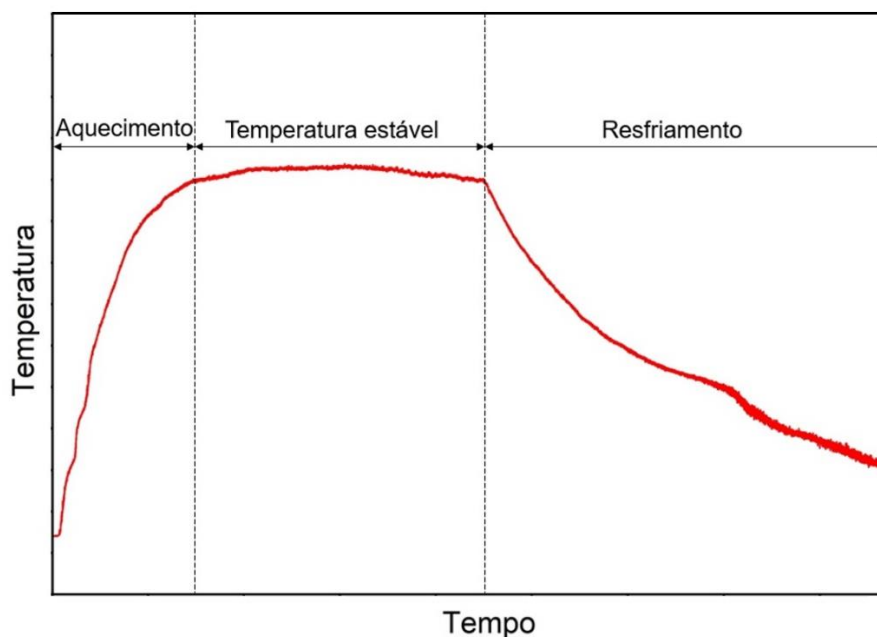


Figura 56: Variação típica da temperatura do bico de contato ao longo do processo.

Ao iniciar o processo de soldagem o bico de contato começa a aquecer a partir da temperatura ambiente até um valor máximo no qual a temperatura se estabiliza. Esta primeira região foi definida como região de aquecimento. Nesse intervalo de tempo, o bico de contato sofre aquecimento resistivo, devido à passagem da corrente elétrica e recebe também grande quantidade de calor conduzida a partir do arame tubular.

A segunda região observada no gráfico da Figura 56 é caracterizada pela estabilidade da temperatura. Atinge-se o regime estacionário e a temperatura do bico de contato se mantém constante, em seu valor máximo. O comportamento da variação de temperatura observado nas duas primeiras regiões é similar aos resultados obtidos experimentalmente por Kolmogorov et al (2018) e Han et al. (2017).

A terceira região representa o resfriamento do bico de contato. Ao interromper o processo de soldagem, o sistema de aquisição foi mantido ligado e continuou registrando os valores de temperatura do bico de contato durante o resfriamento. O objetivo desta medição foi o de obter dados para o cálculo do coeficiente de transferência de calor que age no bico de contato e no arame tubular durante o processo.

Os gráficos da variação da temperatura durante o tempo para as três condições nas três profundidades de soldagem são apresentados na Figura 57. Os valores medidos de temperatura máxima e tempo de resfriamento do bico de contato até 50°C

são apresentados na Figura 58. Observa-se que para os experimentos da condição 1 (bico de contato seco), a temperatura medida foi superior a 150°C . Nos experimentos das condições 2 e 3, nos quais o bico de contato estava em contato com a água, os valores de temperatura ficaram em torno de 90°C . Esse comportamento foi observado nos três grupos experimentais.

Em relação ao tempo de resfriamento, os resultados indicaram menor taxa de resfriamento na condição 1. Foi necessário tempo superior a 85s para o bico de contato atingir 50°C . Nas soldas realizadas a 30m, o tempo de resfriamento foi superior a 95s. Nas medições da condição 2, o tempo medido foi de aproximadamente 15s. Nas medições da condição 3, o tempo foi inferior a 5s.

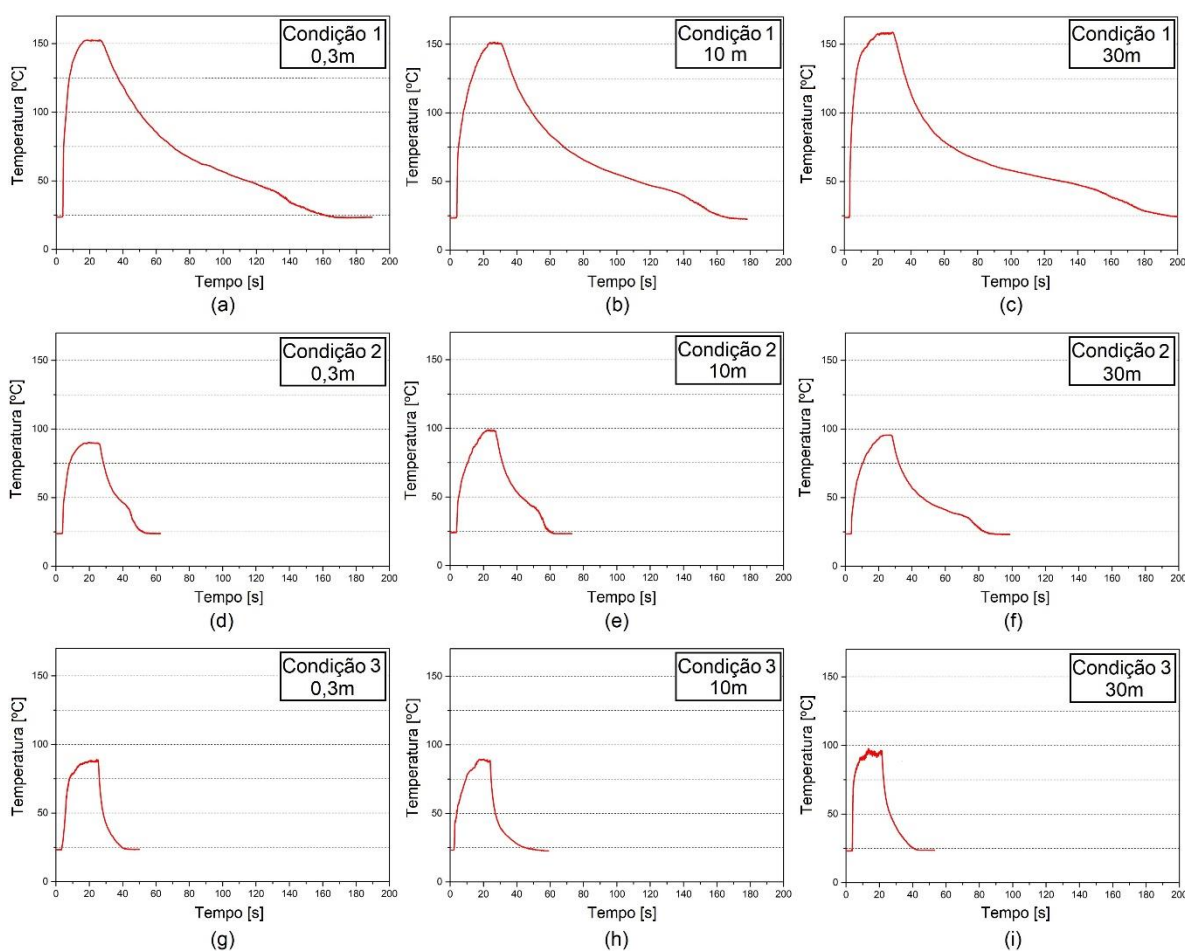


Figura 57: Variação da temperatura durante o processo de soldagem. (a) Condição 1 – 0,3m; (b) condição 1 – 10m; (c) condição 1 – 30m; (d) condição 2 – 0,3m; (e) condição 2 – 10m; (f) condição 2 – 30m; (g) condição 3 – 0,3m; (h) condição 3 – 10m; (i) condição 3 – 30m.

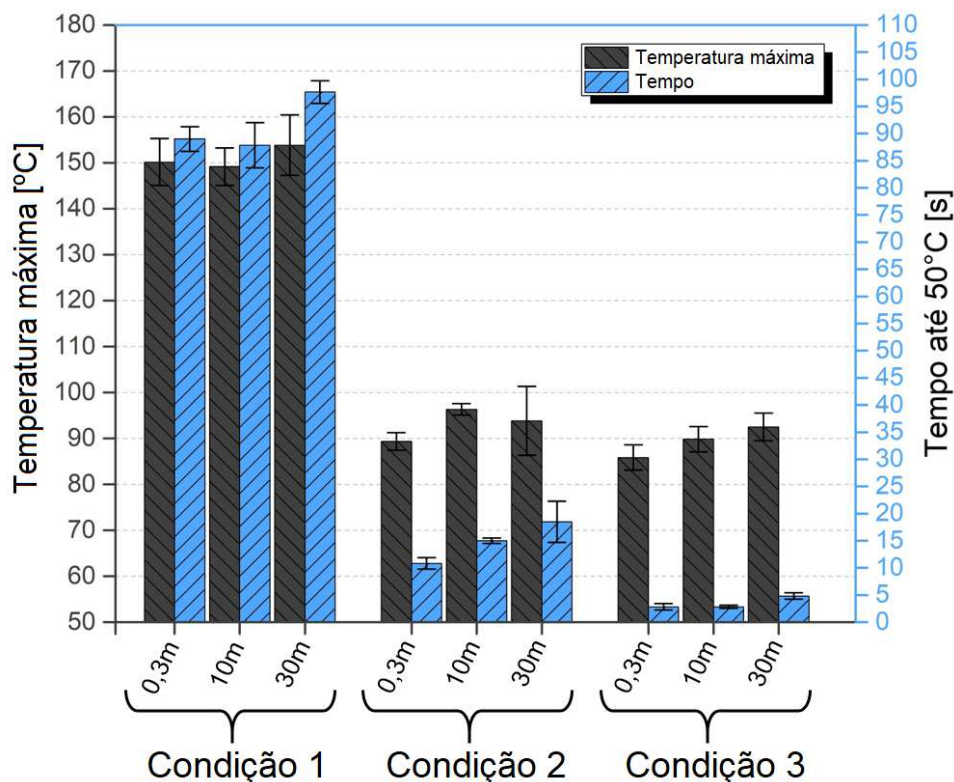


Figura 58: Temperatura máxima do bico de contato e tempo de resfriamento até 50°C.

4.4 Determinação do coeficiente de transferência de calor

Os valores experimentais de temperatura do bico de contato e tempo de resfriamento até 50°C foram utilizados para determinar o coeficiente de troca de calor que age sobre o bico de contato e o arame tubular em cada condição de soldagem. O valor de temperatura considerado foi o valor máximo, que se mantém constante até o término do processo de soldagem. O tempo de resfriamento foi medido até a temperatura de 50°C, porque termopares tipo K tendem a apresentar maior ruído no sinal para baixas temperaturas.

Para a determinação do coeficiente de troca de calor, foi considerado que a temperatura ao longo do corpo do bico de contato é uniforme durante todo o processo transiente. Esta consideração faz com que gradientes de temperatura no material sólido do bico de contato sejam desconsiderados, assim, o método da capacitância global pode ser aplicado (Machado et al., 2018).

Uma vez que a distribuição de temperatura no bico de contato é considerada uniforme, o problema de troca de calor transiente pode ser analisado por um balanço de energia (Incropera & De Witt, 2003). Como mostrado no gráfico da Figura 56, no

final do processo o bico de contato se encontra em seu valor máximo de temperatura. Ao interromper o processo de soldagem, o bico de contato, que se encontra a uma temperatura T_i , perde calor até atingir a temperatura do meio, considerada como $T_\infty=25^\circ\text{C}$. O balanço de energia, que relaciona a variação da energia interna com o calor perdido para o meio através da superfície do sólido, é dada pela Equação 5.

$$\dot{E}_{Acumulada} = \dot{E}_{Sai} \quad (5)$$

Como resultado dessa relação, a taxa de perda de calor do bico de contato para o meio equivale à taxa de variação de sua energia interna. Considerando que o bico de contato perde calor por convecção para o meio (ar na condição 1 e água nas condições 2 e 3) e desprezando as perdas de calor por condução através dos conectores da tocha e por radiação na condição 1, tem-se:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = -h \cdot A_s \cdot (T_i - T_\infty) \quad (6)$$

Em que:

m : massa [kg]

c_p : calor específico [J/kg.K]

h : coeficiente de troca de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$]

A_s : área superficial [m^2]

T_i : temperatura do bico de contato imediatamente após a realização da solda [$^\circ\text{C}$]

T_∞ : temperatura do fluido [$^\circ\text{C}$]

t : tempo [s]

Definindo a variação de temperatura e considerando T_∞ como constante:

$$\theta = T - T_\infty \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

Substituindo a equação 6:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{d\theta}{dt} = -h \cdot A_s \cdot (T_i - T_\infty) \quad (9)$$

Aplicando a integral em ambos os lados da equação e separando as variáveis:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T_f - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp \left[- \left(\frac{h \cdot A_s}{m \cdot c_p} \right) \cdot t \right] \quad (10)$$

Em que:

T_s : Temperatura do bico de contato após o resfriamento (50°C);

Rearranjando os termos da equação, obtêm-se a equação para determinação do coeficiente de troca de calor por convecção:

$$h_{exp} = - \left(\frac{m \cdot c_p}{t \cdot A_s} \right) \cdot \ln \left(\frac{T_f - T_\infty}{T_i - T_\infty} \right) \quad (11)$$

Os valores constantes adotados nos cálculos são apresentados na Tabela 8. A massa do bico de contato (m) foi calculada a partir de 10 medições de 3 bicos utilizados nos experimentos. O valor do calor específico utilizado foi selecionado de tabelas de propriedades termofísicas na literatura. A área superficial do bico de contato foi calculada a partir de medições do diâmetro e comprimento.

Tabela 8: Valores constantes utilizados no cálculo do coef. de convecção.

Constantes utilizadas no cálculo do coef. convecção	
Massa - m	13,26 ± 0,22 g
Calor específico - c_p	0,385 J/kg.K
Área superficial - A_s	6,28x10 ⁻⁴ m ²
Temperatura da água - T_∞	25°C

Os valores calculados do coeficiente de troca de calor, para as três condições de soldagem são apresentados na Tabela 9. Os experimentos da condição 1 apresentaram coeficiente de troca de calor significativamente menor que as outras

condições de soldagem. Na condição 3, o coeficiente calculado foi muito superior ao da condição 1. A razão entre os coeficientes das condições 3 e 1 é de 14,7.

Tabela 9: Coeficientes de troca de calor.

Coeficientes de troca de calor por convecção	
Condição 1	$h_1=149,30 \text{ W/m.K}$
Condição 2	$h_2=585,80 \text{ W/m.K}$
Condição 3	$h_3=2196,88 \text{ W/m.K}$

As diferenças observadas na temperatura do bico de contato podem ser explicadas a partir de um balanço térmico. Considerando o intervalo de tempo no qual a temperatura do bico de contato se mantém constante (segunda região identificada no gráfico da Figura 56), a quantidade de calor gerada no bico de contato (\dot{q}_b) somada à quantidade de calor que o bico recebe do arame tubular (q_a) iguala com a perda de calor que o bico de contato sofre para o meio (q_{meio}), conforme expressado pela Equação 12.

$$\dot{q}_{ct} + q_W - q_m = 0 \quad (12)$$

Em que:

\dot{q}_{ct} : calor gerado no bico de contato devido à passagem de corrente elétrica;

q_W : parcela de calor gerada no arame que é transferida ao bico de contato;

q_m : calor pedido do bico de contato para o meio.

O fluido que circunda o bico de contato interfere no coeficiente de troca de calor, resultando em variações na temperatura. Na condição 1, conforme ilustra a Figura 59, o bico de contato é circundado por um volume de ar enclausurado na tocha de soldagem. Nessa condição, o calor que o bico de contato perde para o meio, q_{meio} , é transferido por convecção e radiação até a parede da capa frontal da tocha, por condução através desta parede, e por convecção para a água do tanque. Todas estas resistências térmicas combinadas, sendo a resistência de convecção com o ar a maior, resultam em um menor valor de coeficiente de troca de calor. Uma vez que o valor do coeficiente de troca de calor da condição 1 é menor que o das condições 2 e 3, menor quantidade de calor será perdida pelo arame e pelo bico de contato,

resultando em maior temperatura durante o processo de soldagem. A corrente elétrica fornecida pela fonte aquece o arame até que este seja fundido pelo arco e seu metal transferido para a poça de fusão. Como o arame encontra-se em uma maior temperatura, a maior resistência elétrica resultou em menor corrente na condição 1. A maior temperatura resulta também em menor corrente necessária para aquecer e fundir o arame. Mesmo que a extensão de arame fora da capa frontal da tocha esteja sujeita à maior troca de calor com a água, sua temperatura elevada contribui para a redução na corrente demandada da fonte de soldagem.

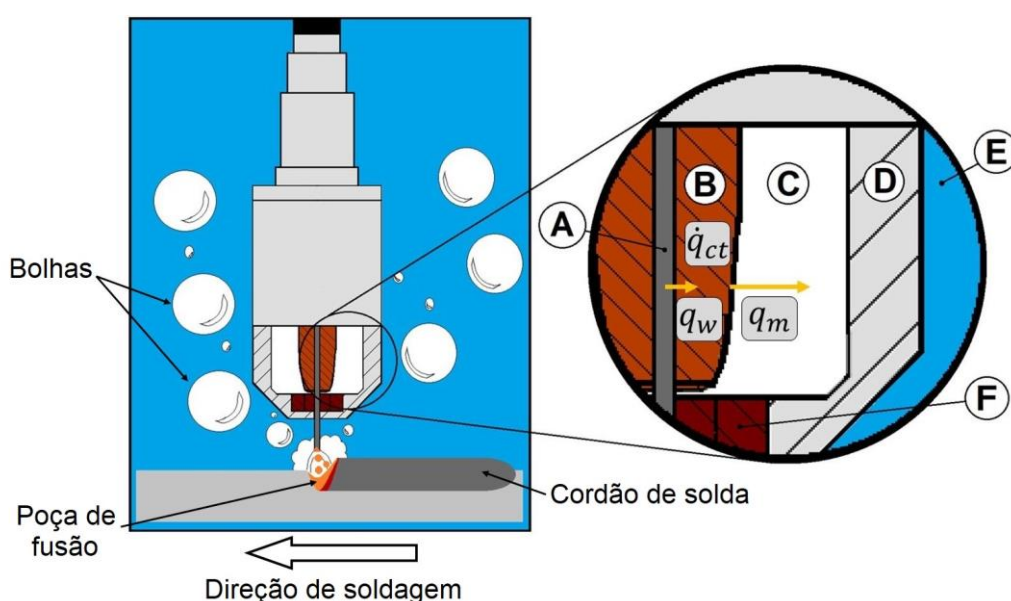


Figura 59: Balanço de energia, condição 1. A) Arame tubular, B) bico de contato, C) volume de ar enclausurado na tocha, D) capa frontal, E) água e F) componente de vedação.

Nas condições 2 e 3, mostradas na Figura 60, o bico de contato e o arame tubular são circundados por água, o que resulta em valores maiores de coeficiente de troca de calor. A maior perda de calor que ocorre nestas duas condições pode também ser verificada pelo menor tempo necessário para o resfriamento do bico de contato até 50°C, mostrado no gráfico da Figura 58. Na condição 2, como um pequeno volume de água permanece dentro da tocha, o tempo de resfriamento foi maior que o observado na condição 3. Uma vez que este volume de água é aquecido pelo bico de contato durante o processo, maior tempo será necessário para que o calor seja transferido para a água do tanque, considerando que a capa frontal da tocha atua como uma resistência condutiva. Na condição 3, como não existe nenhuma barreira entre a água do tanque e o bico de contato, o tempo de resfriamento foi menor. Nestas

duas condições, a corrente requisitada da fonte de soldagem foi maior que na condição 1. Como toda a extensão de arame energizado está sujeito à troca de calor com a água, maior energia é demandada da fonte de soldagem.

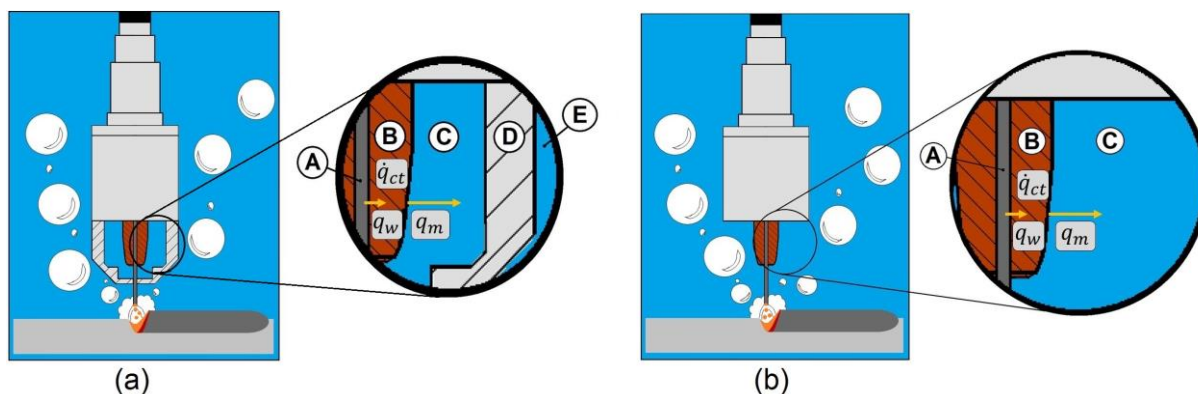


Figura 60: Balanço de energia, (a) condição 2 e (b) condição 3: A) Arame tubular, B) bico de contato, C) água, D) capa frontal, E) água.

4.5 Avaliação da velocidade de alimentação de arame e taxa de fusão

A Tabela 10 apresenta os valores médios e respectivos desvio padrão da medição da tensão do motor tracionador de arame, da velocidade de arame calculada a partir da Equação B-1, descrita no Anexo B, e da taxa de fusão do arame, em kg/h. Observa-se que nas soldas produzidas com o bico de contato na água, houve uma pequena redução da tensão do motor tracionador, que, por sua vez, resultou em redução no valor da velocidade de alimentação de arame e na taxa de fusão. A redução observada na tensão do motor tracionador é uma resposta do sistema (composto pela fonte + cabeçote) para compensar as variações no comprimento do arco em função das diferentes temperaturas do arame registradas em cada condição de soldagem. Como a temperatura do arame é menor nas condições 2 e 3, a velocidade de alimentação é levemente reduzida, devido à maior dificuldade em aquecer e fundir o arame. A presença de água na interface de contato do arame com o bico de contato também pode interferir nas condições de atrito no contato deslizante. Como na condição 1 o contato elétrico acontece com as superfícies secas, o atrito pode ser ligeiramente superior, provocando uma pequena elevação na tensão do motor para compensar essa resistência encontrada na alimentação de arame.

Tabela 10: Valores de tensão do motor tracionador, velocidade de alimentação de arame e taxa de fusão.

Condição	Profundidade	Tensão do motor alimentador [V]	Vel. Arame calculada [m/min]	Taxa de fusão [kg/h]
1	0,3	24,223 ± 1,186	4,467 ± 0,261	3,346
	10	24,428 ± 0,532	4,512 ± 0,117	3,380
	30	24,504 ± 0,467	4,529 ± 0,103	3,393
2	0,3	22,801 ± 0,067	4,154 ± 0,015	3,112
	10	23,483 ± 0,963	4,304 ± 0,212	3,224
	30	23,547 ± 0,816	4,318 ± 0,179	3,235
3	0,3	22,679 ± 2,613	4,127 ± 0,575	3,092
	10	23,398 ± 0,063	4,286 ± 0,014	3,210
	30	23,663 ± 0,238	4,344 ± 0,052	3,254

4.6 Comparação com a soldagem realizada ao ar livre em pressão atmosférica

Para comparar os resultados das soldas produzidas na condição subaquática com soldas produzidas ao ar, um set de três experimentos de soldagem ao ar livre em pressão atmosférica foi conduzido com os mesmos parâmetros de entrada utilizados na condição subaquática. Estes experimentos foram realizados com a tocha sem a capa frontal. Os resultados das medições da temperatura máxima do bico de contato ao longo do processo e do tempo de resfriamento até 50°C foram utilizados para a determinação do coeficiente de troca de calor. Os resultados são sumarizados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados da soldagem ao ar.

Parâmetro	Valor
Corrente [A]	168,7 ± 18,3
Tensão [V]	34,1 ± 1,9
Temperatura máxima do bico de contato [°C]	317,3 ± 13,1
Tempo de resfriamento até 50°C [s]	304,0 ± 28,6
Coeficiente de troca de calor [W/m ² .K]	67,2

Os resultados da corrente de soldagem das soldas produzidas ao ar livre em pressão atmosférica foram consideravelmente menores que os valores obtidos nas soldas subaquáticas. Como reportado na literatura, maiores valores de corrente são necessários nas soldas subaquáticas devido à energia perdida para o meio e mais energia é necessária para sustentar a coluna de plasma no ambiente aquático em alta pressão (Jia et al., 2013; Yang et al., 2020; Shi et al., 2012; Chen et al., 2018).

A partir dos dados apresentados na Tabela 11 também é possível observar que os valores de temperatura do bico de contato e tempo de resfriamento foram maiores na soldagem ao ar. Nesta condição, a tocha de soldagem, o arame tubular, a poça de fusão e a peça de trabalho são circundados por ar, o que resulta em menor quantidade de calor perdida para o meio, em comparação às condições subaquáticas. O coeficiente de troca de calor foi significativamente menor nesta condição. Também é importante destacar que na soldagem ao ar, o bico de contato está sujeito à transferência de calor por radiação com o arco elétrico e com a poça de fusão, resultando em maior aquecimento e maior temperatura durante o processo, como descrito por Kolmogorov et al. (2018).

A comparação dos valores de temperatura e coeficiente de troca de calor das soldas realizadas ao ar livre e na água indica que a condição 1 ocupa uma posição intermediária entre as soldas ao ar e soldas subaquáticas convencionais. Como o bico de contato e uma fração da extensão do arame energizado são mantidos secos, o aumento da temperatura faz com que a corrente requisitada da fonte seja menor, mesmo que o arco elétrico seja estabelecido na água.

4.7 Avaliação da eficiência de fusão

A eficiência de fusão foi calculada a partir da Equação 2 (página 68). Os resultados dos cálculos de eficiência de fusão são apresentados na Figura 61. Os cálculos consideram a área total da seção transversal dos cordões (área fundida no metal de base somado ao reforço), os dados de tensão, corrente e velocidade de soldagem. Entre as soldas depositadas na água, os experimentos da condição 1 apresentaram maior eficiência em relação às condições 2 e 3, em todas as profundidades investigadas. Estes resultados suportam as observações feitas sobre a temperatura do bico de contato e o coeficiente de troca de calor. Como o arame encontra-se em maior temperatura na condição 1, por perder menos calor para o meio, menor corrente é necessária para aquecê-lo e fundi-lo. As soldas realizadas ao ar claramente apresentam maior eficiência de fusão. Como descrito anteriormente, nesta condição, menor quantidade de calor é perdida para o meio, resultado em melhor aproveitamento da energia para fundir o arame e o metal de base.

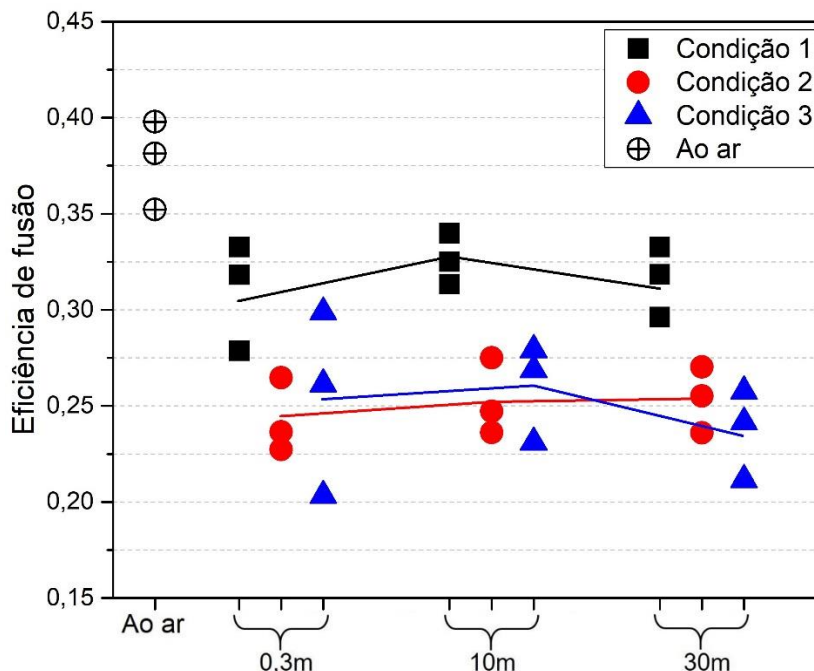


Figura 61: Eficiência de fusão.

Os resultados do cálculo da eficiência de fusão estão relacionados à temperatura do bico de contato e ao coeficiente de troca de calor. Han et al. (2017) relatou que o aumento na densidade de corrente no arame-eletrodo, provocada pelo

uso do bico de contato combinado, que tem parte do seu comprimento fabricado em aço inoxidável, resultou em aumento na temperatura do arame. Como o arame é aquecido ao longo do stick-out, maior temperatura implica em menor corrente requisitada da fonte de soldagem, devido às alterações na impedância do circuito. Adicionalmente, foi observada melhoria na eficiência de fusão. No presente trabalho, como o bico de contato e uma parcela da extensão do arame são mantidos secos, menor energia é necessária para aquecer e fundir o arame, resultando em maior eficiência de fusão.

Os resultados das soldas realizadas ao ar claramente indicam melhor eficiência de fusão que nas soldas subaquáticas. Neste caso, o bico de contato, arame tubular, arco elétrico e a poça de fusão estão em ambiente seco, ao ar, sendo submetidos à menor coeficiente de troca de calor. Como maiores temperaturas ocorrem no bico de contato e no arame-eletrodo, menor corrente é necessária para promover o aquecimento e fusão do arame, tornando o processo mais eficiente. Na solda subaquática, mesmo estando dentro da tocha isolado da água, na condição 1 a perda de calor do bico de contato e do arame-eletrodo é significativamente maior que nas soldas ao ar.

4.8 Avaliação da estabilidade do processo

A avaliação da estabilidade do arco foi feita através da análise dos oscilogramas dos sinais de corrente e tensão, dos ciclogramas e do índice de extinção do arco. A Figura 62 apresenta a variação dos sinais de corrente e tensão ao longo do tempo para todas as combinações experimentais. Os valores médios e desvio padrão da corrente e tensão são apresentados na Tabela 12. Nas soldas realizadas em lâmina d'água, nota-se que a condição 1 apresenta menor amplitude de oscilação dos sinais. O menor valor de corrente de soldagem oscila com menor amplitude do que as soldas realizadas com o bico de contato na água. Adicionalmente, o período no qual o arco foi extinto (corrente inferior a 10 A) é menor na condição 1. Nas soldas realizadas a 10 m, observa-se que a corrente de soldagem tende a apresentar maior oscilação ao redor da média, indicando menor estabilidade do arco com o aumento da pressão. Nas soldas depositadas a 30 m, a instabilidade do arco se torna ainda mais notável à medida em que grande variação dos sinais é observada.

Adicionalmente, as soldas realizadas com o bico de contato na água apresentam mais pontos de interrupção do arco do que as soldas da condição 1. Os gráficos indicam que as soldas depositadas com o bico de contato seco são realizadas com maior estabilidade do arco nas três profundidades analisadas. Como mencionado anteriormente e discutido nos resultados da ANOVA, os resultados das condições 2 e 3 são similares, indicando não haver diferenças significativas entre as duas condições nas quais o bico de contato está na água.

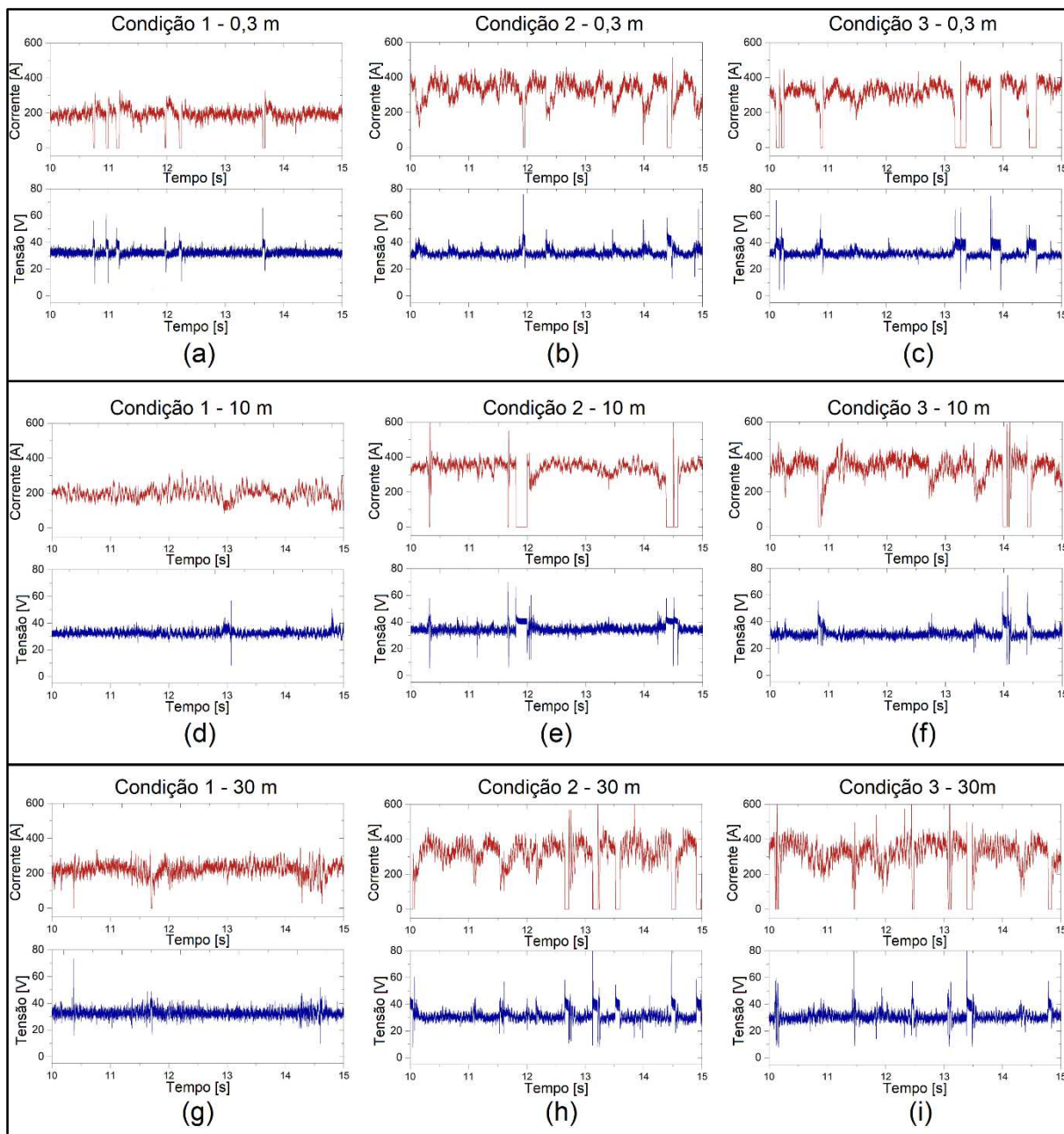


Figura 62: Oscilogramas dos sinais de corrente e tensão, (a) condição 1 – 0,3 m, (b) condição 2 – 0,3 m, (c) condição 3 – 0,3 m, (d) condição 1 – 10 m, (e) condição 2 – 10 m, (f) condição 3 – 10 m, (g) condição 1 – 30 m, (h) condição 2 – 30 m, (i) condição 3 – 30 m.

Tabela 12: Valores e desvio padrão da corrente e tensão.

		Corrente [A]	Desv. Pad. Corrente [A]	Tensão do arco [V]	Desv. Pad. Tensão [V]
Condição 1	0,3m	189,54	86,23	32,72	4,42
		202,83	70,76	32,28	3,77
		200,70	58,89	33,07	3,18
	10m	196,72	100,87	32,66	3,31
		212,71	67,47	31,99	3,64
		198,52	82,24	33,62	4,89
	30m	209,80	78,91	31,75	3,46
		195,77	100,85	32,67	3,84
		191,94	98,66	34,27	1,99
Condição 2	0,3m	290,34	121,66	33,53	4,52
		311,76	99,34	32,49	3,86
		305,53	107,13	33,63	3,97
	10m	286,49	127,37	32,23	4,95
		293,12	139,00	32,85	5,17
		303,82	108,50	33,66	4,10
	30m	287,74	120,47	32,04	4,74
		297,12	130,01	32,78	5,44
		295,57	102,19	33,67	4,63
Condição 3	0,3m	283,99	113,99	32,17	4,31
		298,71	113,46	32,41	4,31
		289,62	91,09	31,93	3,43
	10m	303,29	116,87	31,84	5,52
		311,92	109,91	31,51	4,23
		305,97	95,98	31,54	3,56
	30m	327,90	78,98	30,72	4,82
		350,19	97,03	33,37	5,55
		333,01	88,04	31,09	5,93

A partir dos gráficos apresentados na Figura 62 e dos valores médios apresentados na Tabela 12, é possível fazer uma análise comparativa da influência da capa frontal da tocha sobre os resultados de corrente e tensão. Como apresentado na Figura 44, a capa frontal possui diâmetro de 14 mm e está localizada 13 mm acima da peça de trabalho. As condições 2 e 3 diferem entre si pelo uso da capa frontal na condição 2, mas que em ambas as condições o bico de contato está na água. Em relação às dimensões da tocha e o posicionamento em relação à peça de trabalho, no presente trabalho, foi notado que o diâmetro da capa frontal da tocha é relativamente menor que o cilindro utilizado por Wang et al. (2018) e que esta foi posicionada à maior distância da peça de trabalho. Comparando os resultados de corrente de soldagem das condições 2 e 3, pode-se afirmar com segurança que não foi notado ganho na estabilidade do arco através do uso da capa na condição 2, uma vez que a capa não possui dimensões suficientes para atuar como uma barreira e manter as bolhas ao redor do arco.

Os ciclogramas são apresentados na Figura 63. Estes gráficos mostram os valores da tensão em função da corrente de soldagem. A estabilidade do processo é analisada através da comparação das áreas formadas pelas nuvens de pontos em cada gráfico. A área I indica a região de estabilidade do arco. Quanto menor esta área, menor variação foi registrada nos valores de tensão e corrente, o que indica maior estabilidade do processo (Suban & Tusek, 2003; Pessoa et al., 2010). A área II indica a região de ocorrência de curtos-circuitos (tensão inferior a 15 V) e a área III indica a região de extinção do arco (tensão entre 35 e 55 V e corrente inferior a 10 A) (Li et al., 2021).

Observa-se, pela análise geral dos oscilogramas, que as soldas realizadas com o bico de contato seco apresentam menor área formada pelos pontos. Além disso, os pontos estão mais concentrados à esquerda do gráfico, indicando maior estabilidade do arco e menor valor médio da corrente de soldagem, conforme discutido anteriormente. A 0,3 m e 10 m, maior quantidade de pontos são observadas nas regiões de curto-circuito das soldas das condições 2 e 3. A 30 m, todas as três condições experimentais apresentam mais pontos na região de curto-circuito e a área formada pelos pontos na região I é mais dispersa, indicando menor estabilidade do arco em grandes profundidades. Como descrito por Omajene et al (2014), a pressão da água comprime a coluna de plasma, reduzindo a estabilidade do arco.

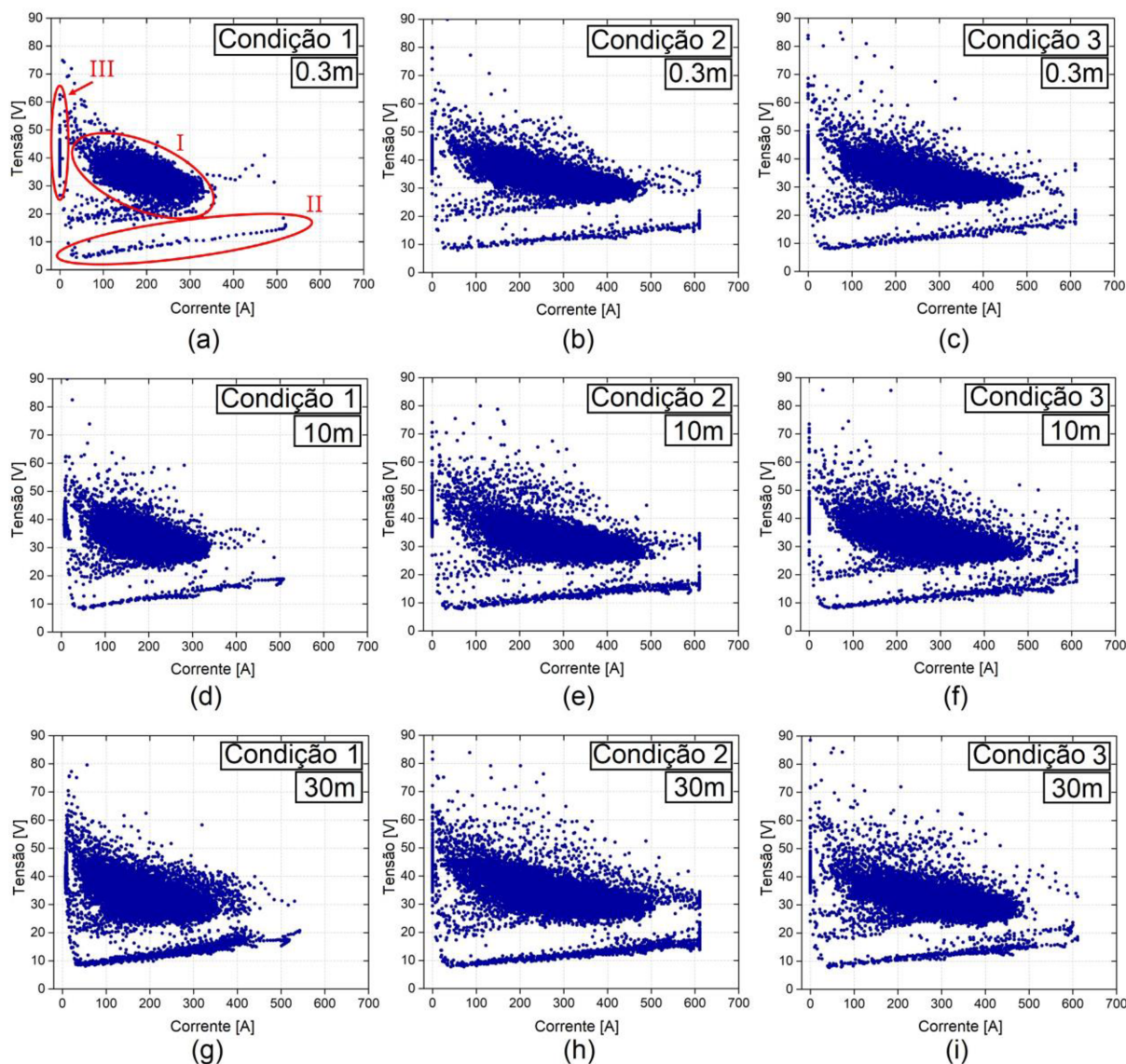


Figura 63: Ciclogramas, (a) condição 1 – 0,3 m, (b) condição 2 – 0,3 m, (c) condição 3 – 0,3 m, (d) condição 1 – 10 m, (e) condição 2 – 10 m, (f) condição 3 – 10 m, (g) condição 1 – 30 m, (h) condição 2 – 30 m, (i) condição 3 – 30 m.

A área III observada nos gráficos da Figura 63 indicam que todos os experimentos apresentam eventos de extinção do arco. Quando o arco é interrompido, a corrente de soldagem se torna nula até que o arame eletrodo toque a peça e o arco seja novamente estabelecido. Com o objetivo de realizar uma análise quantitativa, o índice de extinção do arco foi calculado e os resultados são apresentados na Figura 64. Observa-se que eventos de extinção do arco foram registrados em todas as condições, porém, soldas depositadas com o bico de contato seco apresentam menos pontos de extinção do arco. Adicionalmente, à medida em que a profundidade

aumenta, a porcentagem de extinção do arco aumenta, porém, esse efeito é mais pronunciado nas condições 2 e 3.

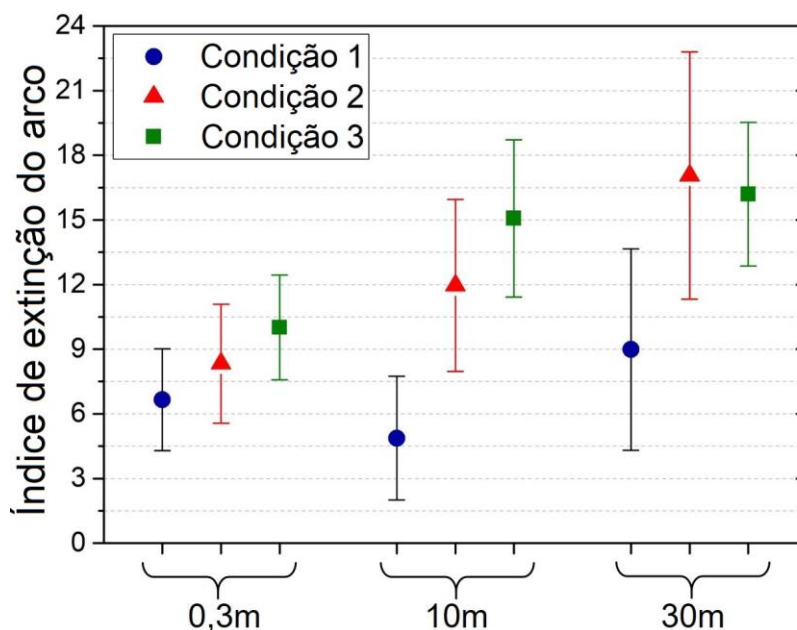


Figura 64: Índice de extinção do arco.

4.9 Avaliação da variação do reforço e da porosidade ao longo do cordão de solda

Na soldagem subaquática, a poça de fusão está em contato direto com a água. De acordo com Pope et al. (1995), o resfriamento das soldas subaquáticas pode ser classificado em dois regimes: o resfriamento lento a alta temperatura, que ocorre sob o efeito protetivo da bolha gasosa, e o resfriamento rápido em menores temperaturas, que ocorre após o colapso da bolha quando o metal fica sujeito ao elevado coeficiente de troca de calor da água. Devido a isso, pequenas interrupções do arco elétrico são suficientes para que o metal na parte superior da poça de fusão se solidifique. Assim, no presente trabalho, como forma adicional de avaliar a estabilidade do processo, foi feita a medição do reforço ao longo do cordão de solda. O perfil dos cordões de solda, plotados a partir das medições feitas conforme indicado na Figura 49, são apresentados nas Figuras 63, 64 e 65. Os valores do desvio padrão e coeficiente de variação do reforço são indicados nos gráficos. A 0,3 m nota-se que as soldas depositadas com o bico de contato na água apresentam maior variação do reforço que a solda da condição 1, indicada também pelos valores de desvio padrão e coeficiente

de variação do reforço. A 10 m, todas as soldas apresentam maior variação do reforço que a 0,3 m, entretanto, os valores de desvio padrão e coeficiente de variação da condição 1 indicam maior estabilidade dos valores do reforço. Estas observações podem estar relacionadas à melhor estabilidade do processo observada na condição 1 e indicam que soldas produzidas com o bico de contato seco apresentam superfície com maior regularidade e menor variação. Como o arco é mais estável e apresenta menos interrupções, o metal é depositado de forma mais suave. A 30 m todas as soldas apresentam maior variação do reforço, indicando baixa estabilidade do arco nesta profundidade.

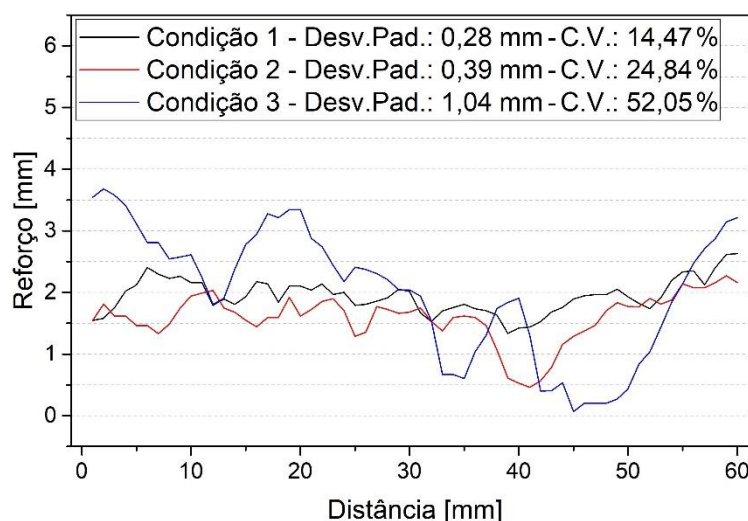


Figura 65: Variação do reforço – 0,3 m.

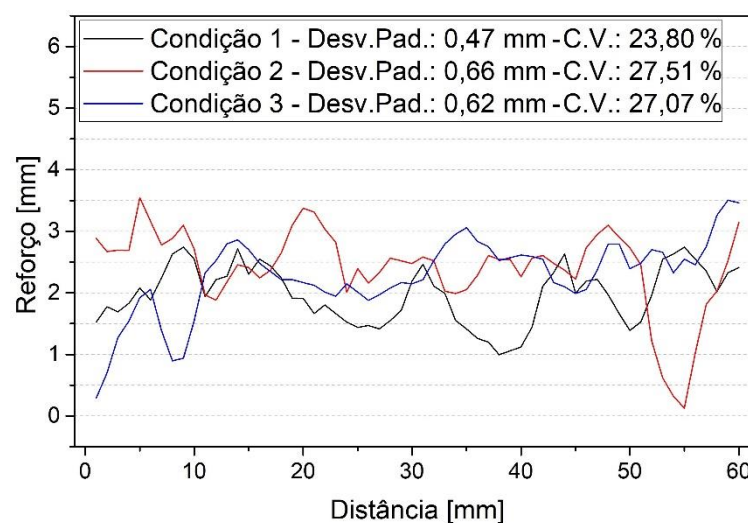


Figura 66: Variação do reforço – 10 m.

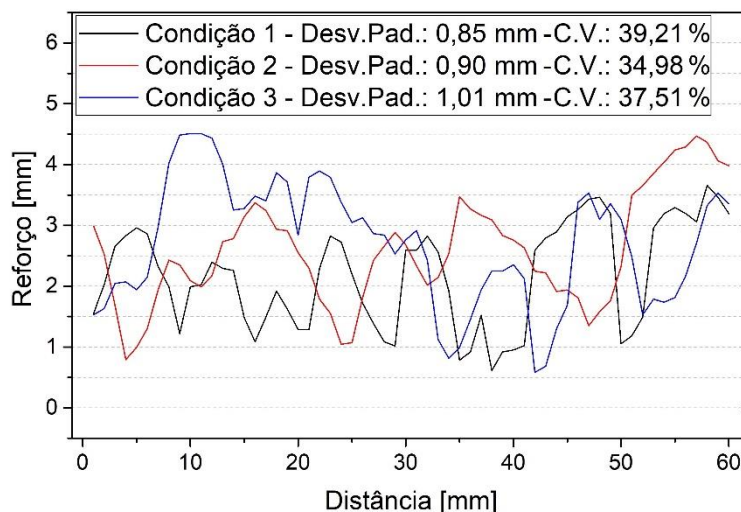


Figura 67: Variação do reforço – 30 m.

As seções longitudinais das soldas depositadas a 0,3 m e 30 m são apresentadas na Figura 68. Nota-se a presença de poros em todos os cordões de solda, porém, as soldas depositadas a 30 m apresentam porosidade significativamente maior. Como reportado por Ibarra, Liu & Olson (1995), a porosidade aumenta com o aumento da profundidade. De acordo com Costa et al. (2022), a porosidade observada nas soldas subaquáticas é causada pela dissociação da molécula da água pelo arco elétrico. Esta reação libera oxigênio na poça de fusão, criando bolhas no metal líquido que acabam aprisionadas em caso de solidificação rápida, dando origem aos poros. Chen et al. (2018) observou que as gotas de metal fundido que são transferidas do arame à poça de fusão também apresentam bolhas internas que são conduzidas à poça de fusão. Paundra et al. (2021) reportou que o aumento da porosidade com o aumento da profundidade de soldagem é causado pela menor proteção do arco pelas bolhas. Como as bolhas são menores e sobem mais rapidamente à superfície, o efeito de proteção das bolhas ao redor do arco é prejudicado, resultando em maiores interrupções do arco, permitindo que o metal da poça de fusão se solidifique mais rapidamente.

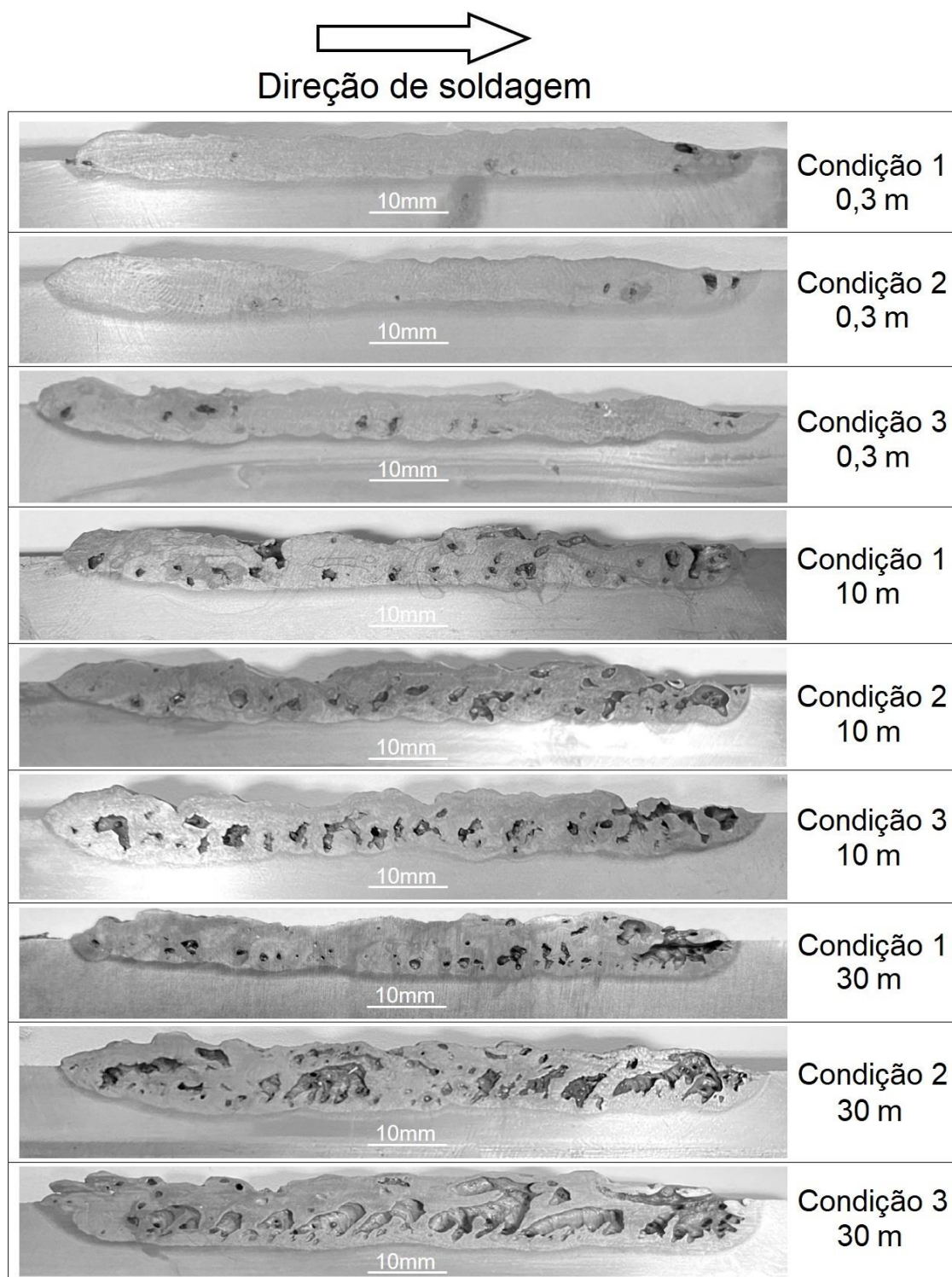


Figura 68: Cortes longitudinais dos cordões. (a) Condição 1 – 0,3 m; (b) condição 2 – 0,3 m; (c) condição 3 – 0,3 m; (d) condição 1 – 30 m; (e) condição 2 – 30 m; (f) condição 3 – 30 m.

Na Figura 68, nota-se que as soldas produzidas à 30 m apresentam maior quantidade de poros. Os cordões produzidos nas condições 2 e 3 à 30 m apresentam porosidade maior que a solda produzida na condição 1 à 30 m.

Os valores de porosidade são apresentados no gráfico da Figura 69. Considerando a observação feita por Pope et al. (1995), que relaciona o resfriamento acelerado da poça de fusão com eventos de extinção do arco na soldagem subaquática, pode-se afirmar que a maior porosidade observada nas condições 2 e 3 é consequência da menor estabilidade do processo quando o bico de contato está em ambiente aquático. Eventos de extinção do arco promovem o desprendimento da bolha de vapor, que circunda o arco e a poça de fusão, deixando a superfície da poça de fusão suscetível ao resfriamento acelerado causado pela água, aprisionando as bolhas de gases e dando origem aos poros. Conforme observado na análise de estabilidade do arco pelos ciclogramas e pelo índice de extinção do arco, maior instabilidade é observada nas soldas das condições 2 e 3, promovendo maior porosidade desses cordões. Como menos eventos de extinção do arco ocorreram nas soldas da condição 1, neste caso, os gases têm tempo suficiente para emergir na poça de fusão e escapar antes que o metal se solidifique.

Segundo Chen et al. (2018a), as bolhas de gases que se formam na gota de metal fundido que se forma na ponta do arame antes de ser transferida à poça de fusão também influenciam na porosidade da solda, uma vez que os gases são conduzidos à poça de fusão. A ocorrência de curtos-circuitos promove a transferência destes gases diretamente à poça de fusão. Nos experimentos das condições 2 e 3, foram registradas maiores ocorrência de curtos-circuitos, conforme indicam os gráficos da Figura 63. A menor quantidade de curtos-circuitos observada nos gráficos da condição 1 indicam que a ponta do arame toca a poça de fusão menor quantidade de vezes, permitindo mais tempo para que as bolhas de gases escapem da gota de metal fundido antes que ocorra a transferência metálica, conforme descrito por Chen et al. (2018a).

Adicionalmente, como reportado por Guerrero & Liu (2007), a porosidade tende a ser maior em soldas produzidas em maiores profundidades. Como a pressão do arco deve ser maior ou igual a pressão da água para que o arco seja estabelecido, em maiores profundidades a pressão do arco dificulta a saída dos gases da poça de fusão antes da solidificação.

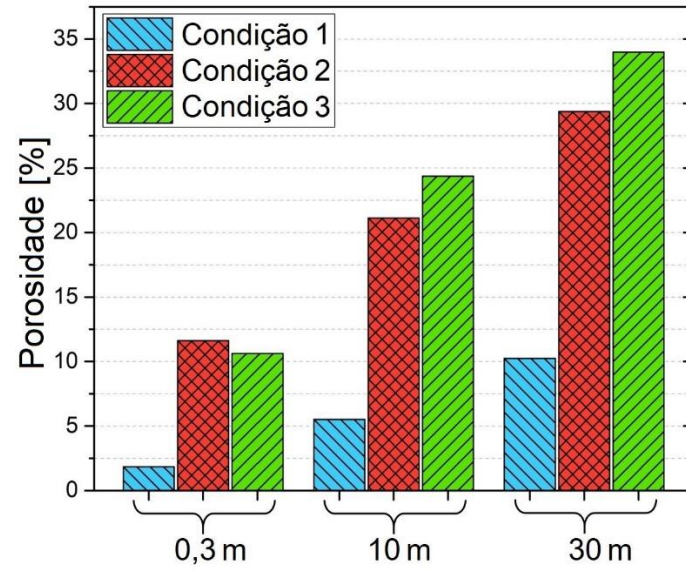


Figura 69: Porosidade do metal de solda.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, soldas subaquáticas foram desenvolvidas em profundidades simuladas de 0,3 m, 10 m e 30 m com uma tocha especialmente desenvolvida que mantém o bico de contato seco. Após a realização dos experimentos e análise dos resultados das soldas produzidas com o bico de contato seco (condição 1), tocha sem os componentes de vedação (condição 2) e da forma convencional de soldas subaquáticas (condição 3), as principais conclusões deste trabalho são:

- As soldas subaquáticas molhadas realizadas com o bico de contato seco produziram cordões com menores variações nos parâmetros geométricos em todas as três profundidades investigadas. As soldas subaquáticas molhadas produzidas da forma convencional resultaram em cordões com maior penetração em maiores profundidades de soldagem.
- Os valores de temperatura do bico de contato foram maiores nas soldas produzidas na condição 1. Uma vez que o bico de contato é circundado por ar, um menor coeficiente de transferência de calor age sobre sua superfície dentro da tocha. A maior temperatura resultou em menor corrente de soldagem demandada da fonte para aquecer e fundir o arame. Este efeito também contribuiu para elevar a eficiência de fusão do eletrodo para um valor mais próximo dos valores observados para soldas ao ar.
- A análise de variância não mostrou diferença, ao nível de confiança de 95%, entre os valores de corrente de soldagem produzidos nas condições 2 e 3. Os resultados indicaram que a capa frontal da tocha não exerce influência no comportamento do processo e estabilidade dos sinais quando o bico de contato está em contato com a água.
- As soldas produzidas nas condições 2 e 3 apresentaram menor estabilidade do arco, com maiores variações nos sinais de corrente e tensão. As soldas produzidas na condição 1 resultaram em menos interrupções do arco. A melhor estabilidade observada na condição 1 resultou em cordões com menores variações no reforço, resultando em metal de solda com superfície mais suave.
- Os cortes longitudinais revelaram maior porosidade nas soldas das condições 2 e 3. Nestas condições, como o processo é realizado com menor estabilidade

do arco, maior o volume de gás que fica aprisionado no metal, gerando os poros.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a influência dos parâmetros do processo por varredura, variando os parâmetros de entrada em passos menores (tensão, vel. soldagem, vel. arame, DBCP);
- Avaliar a porosidade dos cordões por outros métodos, por exemplo, o método de Arquimedes;
- Correlacionar o perfil das soldas com os oscilogramas de tensão e corrente, para relacionar eventos do arco com variações geométricas do cordão;
- Determinar e caracterizar a influência e regulagem da corrente através da variação na proporção de arame que permanece seca dentro da tocha;
- Investigar o efeito de diferentes tipos de corrente de soldagem, por exemplo pulsada, com o bico de contato seco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ABBAS, F. M.; AL-GHAMDI, T. A.; LIU, S. Comparison of solidification behavior between underwater wet welding and dry welding. In: **International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. 2011. p. 285-296.

AMARAL, E., URIBE, A., & BRACARENSE, A. **Effects of PTFE on operational characteristics and diffusible H and O contents of weld metal in underwater wet welding**. Journal of Manufacturing Processes, 61, 270-279. 2021.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding handbook. Welding science and technology. 9th ed. Vol 1. 2001.

ANDRADE, L. P.; DUTRA, J. C.; SANTOS, V. R.; TEIXEIRA, J. C. **Alternativas para Melhorar a Estabilidade do Arco na Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular**. Anais do XIX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, ABS, Águas de São Pedro-SP, v. 2, p. 493-508, 1993.

ASSUNÇÃO, M. T. **Estudo sobre o Efeito da Água no Bico de Contato no Processo de Soldagem Subaquática Molhada com Arame Tubular do Tipo Auto Protegido**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFMG. Belo Horizonte. 140p. 2018.

ASSUNÇÃO, M.; BRACARENSE, A. **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, p. 401-412, 2017.

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.

BRACARENSE, A. Q.; ASSUNÇÃO, M. T. **Tocha com Dispositivo de Vedação para Soldagem Subaquática com Arame Tubular do Tipo Auto Protegido**. Patente BR 102017023415-0 A2. 04 jun. 2019.

BRACARENSE, A. Q.; ASSUNÇÃO, M. T. **Tocha com Dispositivo de Vedação para Soldagem Subaquática com Arame Tubular do Tipo Auto Protegido**. Patente BR 102017023415-0 A2. 04 jun. 2019.

CARVALHO, J.; ASSIS, P.; CAMILO, R.; FIGUEIRA, R.; CAMPOS, V. **Dados termodinâmicos para metalurgistas**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, UFMG, 1977.

CHEN, B.; TAN, C.; FENG, J. A study on the arc characteristics of underwater wet welding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 1, p. 557-564, 2016.

CHEN, H.; GUO, N.; SHI, X.; DU, Y.; FENG, J.; WANG, G. **Effect of hydrostatic pressure on protective bubble characteristic and weld quality in underwater flux-**

cored wire wet welding. Journal of Materials Processing Technology, v. 259, p. 159-168, 2018.

CHEN, H.; GUO, N.; SHI, X.; DU, Y.; FENG, J.; WANG, G. **Effect of hydrostatic pressure on protective bubble characteristic and weld quality in underwater flux-cored wire wet welding.** Journal of Materials Processing Technology, v. 259, p. 159-168, 2018a.

CHEN, H.; GUO, N.; SHI, X.; DU, Y.; FENG, J.; WANG, G. **Effect of water flow on the arc stability and metal transfer in underwater flux-cored wet welding.** Journal of Manufacturing Processes, v. 31, p. 103-115, 2018b.

CHEN, H.; GUO, N.; ZHANG, Z.; LIU, C.; ZHOU, L.; WANG, G. **A novel strategy for metal transfer controlling in underwater wet welding using ultrasonic-assisted method.** Materials Letters, v. 270, 127692, 2020.

COCHRANE, D. J.; SWETNAM, D. **Wet welding** – a viable technique? Metal Construction. Vol.10, No 8, October 1986.

COSTA, P.; GURRERO, G.; PALACIOS, R.; FLORES, E.; HERNÁNDEZ, L.; LUNA, L. **Optimization of welding parameters in underwater wet FCAW on a structural steel using support vector regression and sequential quadratic programming.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 121, n. 5-6, p. 4225-4236, 2022.

FENG, J.; WANG, J.; SUN, Q.; ZHAO, H.; WU, L.; XU, P. **Investigation on dynamic behaviors of bubble evolution in underwater wet flux-cored arc welding.** Journal of Manufacturing Processes, v. 28, p. 156-167, 2017.

FISCHER, A. **Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW - Arco Pulsado.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFMG. Belo Horizonte. 172p. 2011.

FULTON, R. **Advances in Underwater Welding.** In: OCEANS'86. IEEE, 1986. p. 121-126.

FYDRYCH, D.; ROGALSKI, G.; ŁABANOWSKI, J. **Problems of underwater welding of higher-strength low alloy steels.** Institute of Welding Bulletin. v. 5, p. 187-195, 2014.

GUERRERO, F.; LIU, S. **Explaining porosity formation in underwater wet welds.** In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2007. p. 249-257.

GUO, N.; FU, Y.; FENG, J.; DU, Y.; DENG, Z.; WANG M.; TANG, D. **Classification of metal transfer mode in underwater wet welding.** Welding Journal, v. 95, n. 4, p. 133S-140S, 2016.

GUO, N.; FU, Y.; WANG, Y.; DU, Y.; FENG, J.; DENG, Z. **Effects of welding velocity on metal transfer mode and weld morphology in underwater flux-cored wire welding**. Journal of Materials Processing Technology, v. 239, p. 103-112, 2017.

HACKENHAAR, W.; GONZALEZ, A.; MACHADO, I.; MAZZAFERRO, J. **Welding parameters effect in GMAW fusion efficiency evaluation**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 94, p. 497-507, 2018.

HAN, J.; LEE, J.; KIM, S.; YUN, J. **A study on the improvement of a contact tip for the wire melting rate enhancement**. Welding in the World, v. 61, p. 1181-1187, 2017.

HAN, Y.; DONG, S.; ZHANG, M.; JIA, C.; ZHANG, M.; WU, C. **A novel underwater submerged-arc welding acquires sound quality joints for high strength marine steel**. Materials Letters, v. 261, p. 127075, 2020.

HERNÁNDEZ, L.; COSTA, P.; GUERRERO, G.; PALACIOS, R.; LUNA, L.; CARRILLO, A.; JIMÉNEZ, I. **Effect of input parameters on bead geometry and penetration in underwater wet welding using FCAW-S process**. MRS Advances, p. 1-4, 2022.

IBARRA, S. OLSON, D. L.; GRUBBS, E. **Underwater wet welding of higher strength offshore steels**. In: Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, 1989.

IBARRA, S., LIU S. AND OLSON, D. L. **Underwater Wet Welding of Steel**. WRC Bulletin, no. 401, pp 1-39, 1995.

INCROPERA, F.; DEWITT, D. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC–Livros Técnicos e Científicos, 2003.

JIA, C.; ZHANG, T.; MAKSIMOV, S.; XIN, Y. **Spectroscopic analysis of the arc plasma of underwater wet flux-cored arc welding**. Journal of Materials Processing Technology, v. 213, n. 8, p. 1370-1377, 2013.

KASAT, P.; HONGERKAR, O.; GAUR K.; GODSE O.; NAIK I. **Study of Developments in Underwater Welding**. International Journal for Research in Engineering Application & Management, p. 131-135, Special Issue – AMET, 2018.

KOLMOGOROV, D.; SOLODSKY, S.; GIL, L.; BERG, V. **Effect of various heat sources on heating of contact tip during MIG/MAG welding**. In: Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2018. p. 106-111.

LENIVKIN, V.A.; KLENOV, G.G. **Distribution of current and contact resistance in the contact tip**, Welding. 9 (1990) 27-29.

LI, H.; LIU, D.; YAN, Y.; GUO, N.; LIU, Y.; FENG, J. **Effects of heat input on arc stability and weld quality in underwater wet flux-cored arc welding of E40 steel**. Journal of Manufacturing Processes, v. 31, p. 833-843, 2018.

LI, H.; LIU, S.; MA, Q.; WANG, P.; LIU, D.; ZHU, Q. **Investigation of process stability and weld quality of underwater wet flux-cored arc welding of low-alloy high-strength steel with oxy-rutile wire**. Polish Maritime Research, v. 28, n. 3, p. 100-109, 2021.

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

MACHADO, F.; CAMPOS T.; DUARTE T.; ARRIETA, F.; JÚNIO P. **Experimental determination of the convective coefficient of heat transfer using the global capacitance method**. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, v. 5, n. 6, p. 264174. 2018.

MODENESI, P.; REIS, R. **A model for melting rate phenomena in GMA welding**. Journal of Materials Processing Technology, v. 189, n. 1-3, p. 199-205, 2007.

MONTGOMERY, D. **Design and analysis of experiments**. 7th ed. 2008. Arizona: John Willey & Sons.

NIXON, J. H.; GRAHAM, S. R. B. **Arc instability in shallow water wet welding**. In: Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 1993. p. 129-129.

NIXON, J.; BILLINGHAM, J. **A survey of underwater welding techniques**. Endeavour, v. 11, n. 3, p. 143-148, 1987.

OMAJENE, J. E.; MARTIKAINEN, J.; KAH, P. **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.

PAUNDRA, F.; JUAN, A.; TRIYONO; ELMIAWAN, P.; YUNESTI, P. **The Penetration Depth of Weld Metal in Underwater Welding with Variations in Water Depth and Water Flow Velocity**. Journal Mechanical, v. 12, n. 1, 2021.

PAVLOV, N.V.; KRYUKOV, A.V.; ZERNIN, E.A.; GRITSENKO, V.V. **Influence of Protective Gas Content on Quality of Welded Joint while Welding with Impulse Supply of Electrode Wire**, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 91(1) (2015) art. no. 012012.

PESSOA, E. C.; RIBEIRO, L. F.; BRACARENSE, A. Q.; DIAS, W. ANDRADE, L. G.; LIU, S.; SANTOS, V. R.; MONTEIRO, M. J. **Arc stability indexes evaluation on underwater wet welding**. OMAE proceedings of the ASME 2010 29th international conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering, 2010.

POPE, A. M.; DE MEDEIROS, R. C.; LIU, S. **Solidification of underwater wet welds**. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY (United States), 1995.

ROWE, M.; LIU, S. **Recent developments in underwater wet welding**. Science and Technology of welding and Joining, v. 6, n. 6, p. 387-396, 2001.

SAGARA, H.; NISHIO, Y.; WADA, H.; HIROMOTO, Y.; **Welding torch for underwater welding**. U.S. Patent n. 4,029,930, 14 jun. 1977.

SHI, Y.; ZHENG, Z.; HUANG, J. **Sensitivity model for prediction of bead geometry in underwater wet flux cored arc welding**. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 23, n. 7, p. 1977-1984, 2013.

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.

SHIMIZU, H.; YOKOTA, Y.; MIZUNO, M.; KUROKAWA, T.; Wear mechanism in contact tube. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 11, n. 1, p. 94-105, 2006.

SHLYAKHOVA, G.; DANILOV, V.; KUZNETSOV, M.; ZERNIN, E.; KARTASHOV, E. **The distinctive feature of weld joints structure by adding nano-modifiers to the weld pool**, AIP Conference Proceedings. 1683 (2015) art. no. 020210.

STINGELIN, V.; VANDOEUVRES; BUDLIGER, J.; KATZARKOFF, J.; WALT, G.; ROGGEN, R. **Underwater welding apparatus**. U.S. Patent n. 4,172,974, 30 out. 1979.

SUBAN, M.; TUŠEK, J. **Methods for the determination of arc stability**. Journal of Materials Processing Technology, v. 143, p. 430-437, 2003.

SUN, Q. J.; CHENG W. Q.; LIU Y. B.; WANG J. F.; CAI C. W.; FENG J. C. **Microstructure and mechanical properties of ultrasonic assisted underwater wet welding joints**. Materials & Design, v. 103, p. 63-70, 2016.

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

URIBE, A., BRACARENSE, A., & PESSOA, E. C. **The effect of polarity and hydrostatic pressure on operational characteristics of rutile electrode in underwater welding**. Materials, 13(21), 5001. 2020.

URIBE, A., BRACARENSE, A., PESSOA, E. P., & SANTOS, V. R. D. **Influência da polaridade sobre a estabilidade do processo de soldagem subaquática molhada com eletrodo revestido**. Soldagem & Inspeção, 22, 429-441. 2017.

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.

VILLANI, P. M.; BRACARENSE, A. Q.; MODENESI, P. J. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. 3^a edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

WANG, J.; SUN, Q.; JIANG, Y.; ZHANG, T; MA, J.; FENG, J. **Analysis and improvement of underwater wet welding process stability with static mechanical constraint support**. Journal of Manufacturing Processes, v. 34, p. 238-250, 2018.

WANG, J.; SUN, Q.; PAN, Z.; YANG, J.; FENG, J. **Effects of welding speed on bubble dynamics and process stability in mechanical constraint-assisted underwater wet welding of steel sheets**. Journal of Materials Processing Technology, v. 264, p. 389-401, 2019.

WIDGERY, D. **Tubular wire welding**. Elsevier, 1994.

XU, C.; GUO, N.; ZHANG, X.; CHEN, H.; FU, Y.; ZHOU, L. **Internal characteristic of droplet and its influence on the underwater wet welding process stability**. Journal of Materials Processing Technology, v. 280, p. 116593, 2020.

XU, C.; GUO, N.; ZHANG, X.; JIANG, H.; TAN, Y.; ZHOU, L. **Influence of welding speed on weld pool dynamics and welding quality in underwater wet FCAW**. Journal of Manufacturing Processes, v. 55, p. 381-388, 2020a.

YANG, Q.; HAN, Y.; CHEN, J.; DONG, S.; WU, C.; JIA, C. **Visual investigation on the arc burning behaviors and features in underwater wet FCAW**. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, v. 142, n. 4, 2020.

ZHANG, H. T.; DAI, X. Y.; FENG J. C.; HU, L. L. **Preliminary investigation on real-time induction heating-assisted underwater wet welding**. Welding Journal, v. 1, p. 8-15, 2015.

ZHANG, Y.; JIA, C.; ZHAO, B.; HU, J.; WU, C. **Heat input and metal transfer influences on the weld geometry and microstructure during underwater wet FCAW**. Journal of Materials Processing Technology, v. 238, p. 373-382, 2016.

ZHANG, M; HAN, Y.; JIA, C.; DONG, S.; MAKSIMOV, S.; WU, C. **Process Stability, Microstructure and Mechanical Properties of Underwater Submerged-Arc Welded Steel**. Metals, v. 11, n. 8, p. 1249, 2021.

APÊNDICE A – Projeto da máquina utilizada para soldagem com arame tubular dentro da câmara hiperbárica

A máquina desenvolvida para soldagem com arame tubular dentro da câmara hiperbárica é composta pelos seguintes sistemas:

- Sistema de deslocamento linear da chapa de metal de base;
- Sistema de ajuste da posição da tocha de soldagem;
- Sistema de alimentação de arame tubular;
- Painel de controle externo;

Para realizar os experimentos, houve a necessidade de posicionar os sistemas componentes da máquina dentro da câmara, sendo controlados pelo painel externo. Uma estrutura metálica foi projetada para dar sustentação aos componentes em seu devido posicionamento. Devido às dimensões da câmara hiperbárica, a estrutura foi projetada de forma a manter a chapa de metal de base e a tocha mais próximas da porta frontal, para facilitar a montagem e posicionamento para cada cordão de solda. A bobina de arame e o conjunto motor-tracionador foram posicionados na parte posterior do tanque.

A primeira etapa do projeto constituiu da criação do modelo 3d computacional da máquina com as dimensões adequadas para melhor aproveitamento do espaço interno da câmara de soldagem. O modelo computacional adaptado às dimensões do tanque é apresentado na Figura A-1.

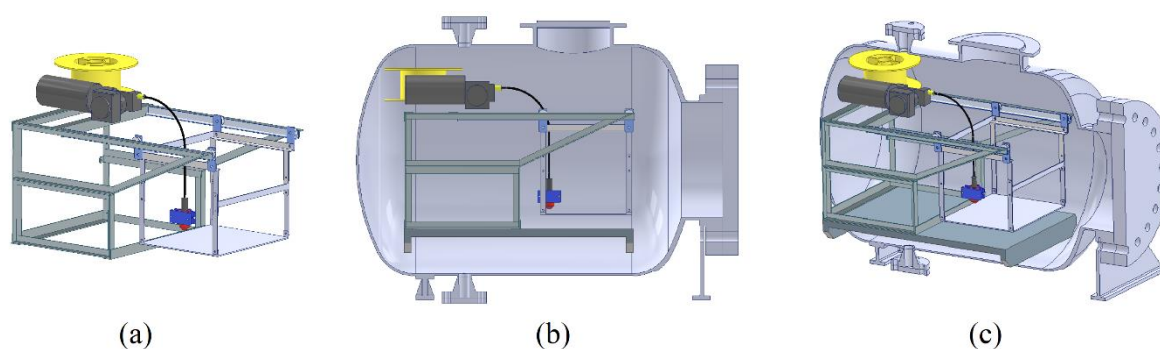


Figura A-1: Modelo 3d computacional da máquina de soldagem. (a) Modelo da máquina, (b) vista lateral esquerda da máquina posicionada dentro da câmara, (c) vista isométrica da máquina dentro da câmara.

Sistema de deslocamento linear da chapa de metal de base

Para a realização de cordões de solda lineares, foi utilizada uma estrutura suspensa que se move por meio de 4 roldanas apoiadas em 2 trilhos paralelos longitudinais fixados nas laterais da estrutura principal. O detalhe das roldanas e dos trilhos é apresentado na Figura A-2. Devido às dimensões internas do tanque, o deslocamento máximo da estrutura suspensa, que limita o comprimento dos cordões de solda, foi de 250 mm.

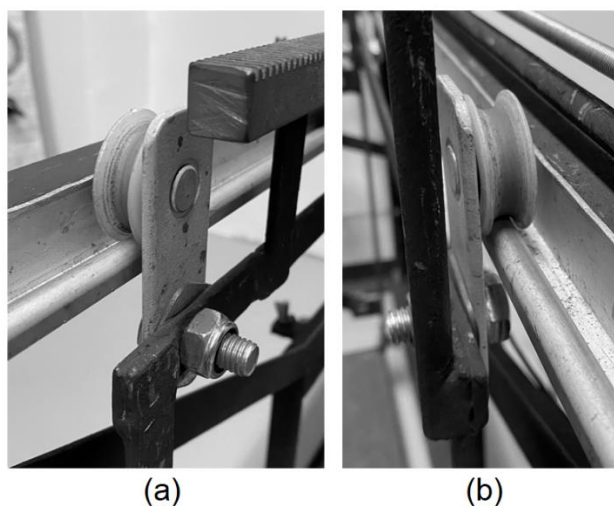


Figura A-2: Roldanas utilizadas para deslocamento da chapa de metal de base. (a) Roldana frontal lado esquerdo, (b) roldana frontal lado direito.

Para realizar a movimentação da estrutura, foi utilizado um motor de corrente contínua acoplado a um redutor. Uma cremalheira foi utilizada para converter a rotação da última engrenagem do redutor em movimento linear. A especificação do motor e o dimensionamento do redutor foram feitos de forma a atender à faixa de velocidades de soldagem adotada na literatura. Os valores máximos adotados em trabalhos de soldagem subaquática com arames tubulares, utilizados como referência, são listados na Tabela A-1. Para o arame tubular utilizado, o valor máximo foi limitado a 500 mm/min. Este valor é superior ao adotado nas referências e também aos valores verificados em testes preliminares, o que possibilita o uso da máquina para trabalhos utilizando outros consumíveis ou outros valores de parâmetros.

Tabela A-1: Valores máximos de referência para a velocidade de soldagem.

Autores	Velocidade máxima de soldagem
Chen, Tan e Feng (2016)	360 mm/min
Wang et. al. (2018)	150 mm/min
Li et. al. (2018)	140 mm/min
Xu et. al. (2020)	180 mm/min
Zhang et. al. (2016)	240 mm/min

O sistema foi dimensionado de forma a permitir que a chapa de metal de base se mova em qualquer valor de velocidade até a velocidade máxima. Dois sensores do tipo “fim de curso” foram posicionados na estrutura e ligados ao sistema elétrico para que o processo seja interrompido quando a estrutura móvel atingir o limite de deslocamento nos dois sentidos de avanço.

O dimensionamento do conjunto motor-redutor se iniciou com a seleção do motor a ser utilizado, seguindo do dimensionamento do redutor para atingir a velocidade máxima selecionada. O motor utilizado foi um motor de corrente contínua da marca AKIYAMA CORPORATION, modelo AK555/11.1PF12R83CE-SG, 671.XUL.19. Este motor tem rotação máxima de 83 rpm, tensão de alimentação de 12 V, potência de 5 W. Para construção do redutor, devido à baixa carga de movimentação da estrutura, foram utilizadas engrenagens de módulo 1, fabricadas em aço SAE 1045. A Figura A-3 mostra o posicionamento das engrenagens no redutor e o número de dentes de cada uma. A relação de redução do sistema é de 1 para 0,109. Assim, com o motor em sua rotação máxima (83 rpm), a última engrenagem gira a 9,05 rpm. Fazendo com que a estrutura onde se apoia a chapa de metal base tenha uma velocidade máxima igual a 511 mm/min.

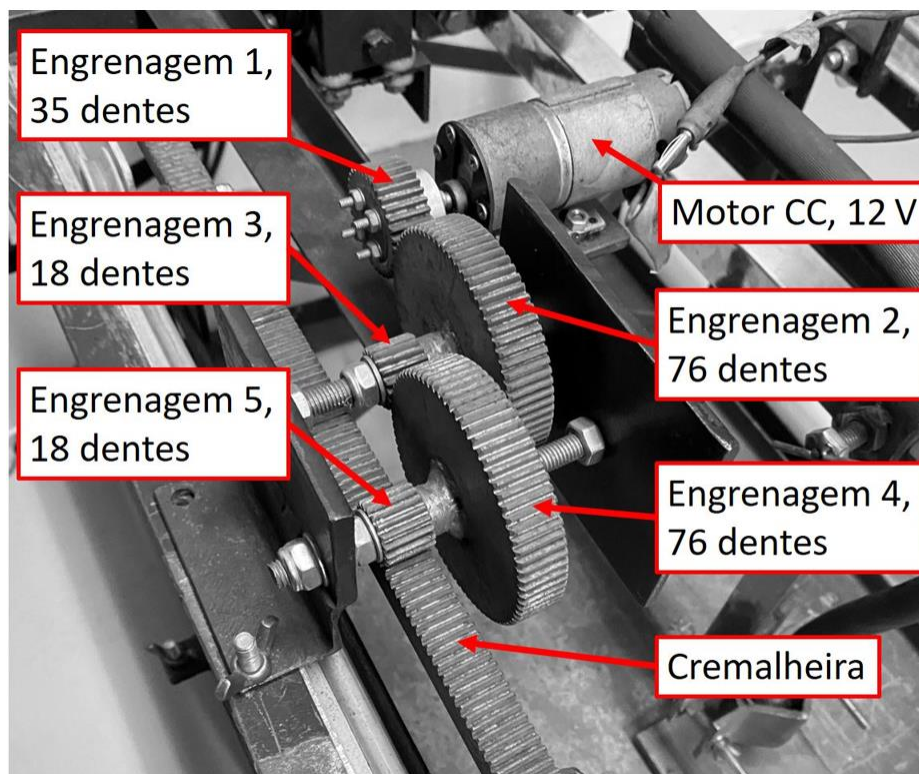


Figura A-3: Identificação das engrenagens do redutor.

Para controlar a velocidade de rotação do motor, e, conseqüentemente, a velocidade de deslocamento da chapa de metal base, foi utilizado um potenciômetro linear posicionado no painel de controle externo. Para controlar o sentido de rotação do motor, foi utilizada uma chave alavanca de 3 posições e 6 pinos ligada em um esquema elétrico que inverte a tensão nos bornes do motor nas duas posições extremas da chave. A velocidade de deslocamento da chapa foi calibrada e a marcação em escala feita no painel para seleção da velocidade desejada.

Sistema de ajuste da posição da tocha de soldagem

A tocha de soldagem é posicionada por meio de uma haste com regulagem de altura, que permite regulagem da distância entre o bico de contato e a peça de trabalho. A tocha é fixada à haste por meio de uma peça fabricada a partir de uma chapa dobrada em V, que faz com que a tocha seja sempre fixada perpendicularmente à peça de trabalho, conforme ilustra a Figura A-4. A regulagem da posição da haste é feita por meio de dois parafusos superiores, que fazem o travamento na altura desejada.

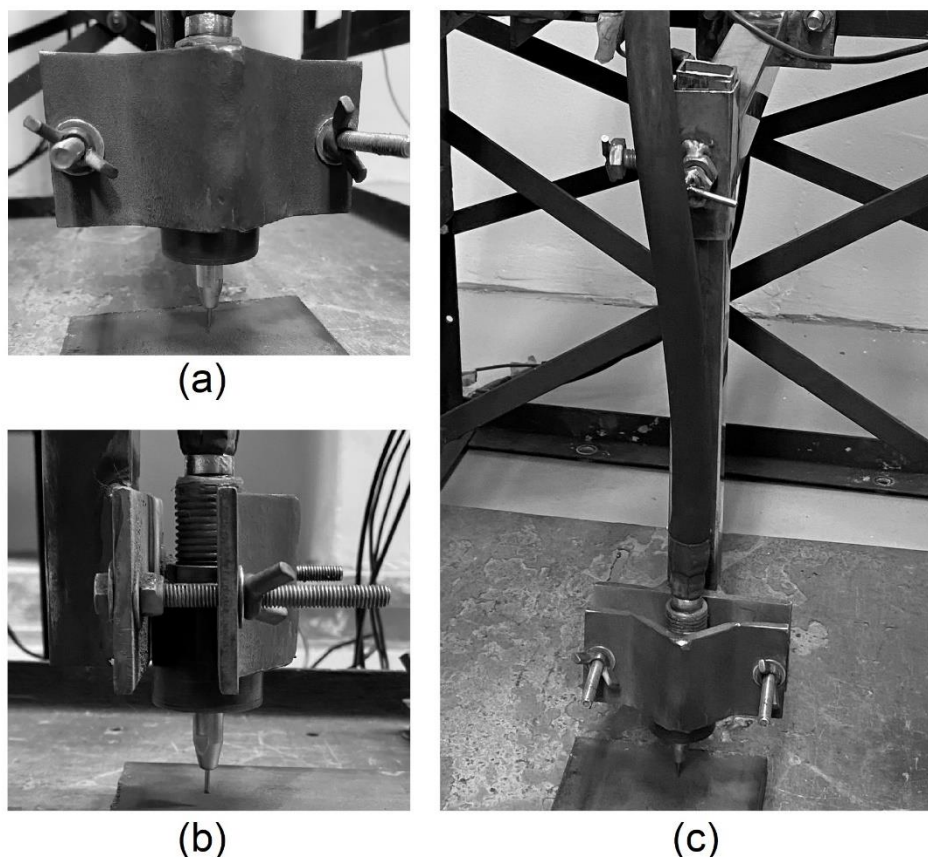


Figura A-4: Sistema de fixação da tocha de soldagem. (a) Vista frontal, (b) vista lateral esquerda, (c) alavanca completa.

Sistema de alimentação de arame tubular

O sistema de alimentação de arame tubular é composto pela bobina de arame, pelo conjunto motor-tracionador e pelo cabo de soldagem (conduíte e condutor de corrente).

Para realização das soldas, água é adicionada até a metade da capacidade do tanque. Assim, o sistema de alimentação de arame tubular foi posicionado na parte superior da estrutura, como pôde ser observado na Figura A-1, para ficar em ambiente seco.

Os detalhes do sistema são apresentados na Figura A-5. A bobina de arame é fixada em um eixo parafusado na estrutura metálica, de forma que seja permitido seu movimento de rotação. Uma mola posicionada coaxialmente ao eixo apresenta uma leve resistência à rotação da bobina, evitando que esta gire livremente quando o sistema não estiver sendo utilizado. Um conjunto motor-redutor foi utilizado para movimentar as roldanas de tração, que forçam a passagem do arame pelo cabo até a

tocha de soldagem. A Figura A-5-b mostra os detalhes das roldanas de tração. O acionamento e controle do motor é feito pelo painel de controle externo. A conexão dos cabos é feita através da passagem de condutores existentes na lateral do tanque.

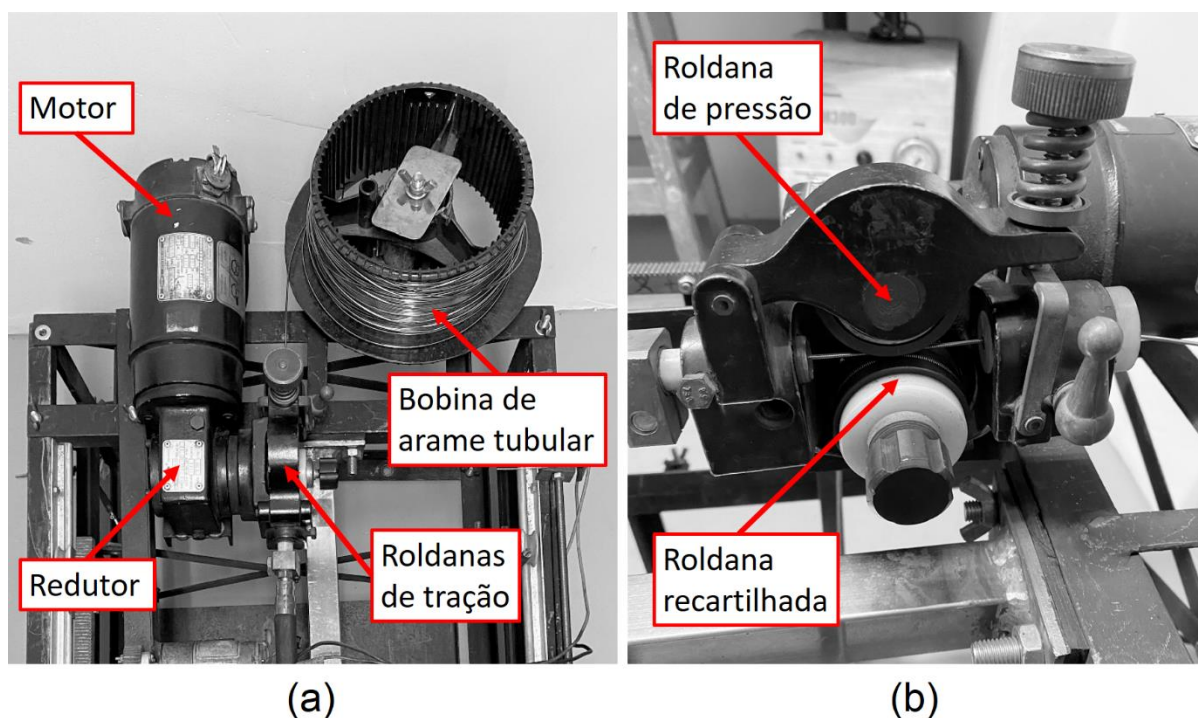


Figura A-5: (a) Vista superior do sistema de alimentação de arame tubular, (b) detalhe das roldanas de tração.

Painel de controle externo

A conexão entre a fonte de soldagem e os sistemas componentes da máquina de soldagem é feita através de um painel de controle externo. O painel permite o acionamento da fonte, iniciando e encerrando o processo de soldagem de forma simultânea ao deslocamento da chapa de metal de base. O painel permite o controle das seguintes variáveis do processo:

- Controle do início e fim do processo de soldagem;
- Controle do sentido de avanço linear da chapa de metal de base;
- Controle da velocidade de avanço da chapa de metal de base (velocidade de soldagem);
- Controle da velocidade de alimentação de arame tubular;

O painel desenvolvido consiste na adaptação de um cabeçote de soldagem para funcionamento com a máquina desenvolvida. O painel é mostrado na Figura A-6. O cabeçote já possuía a chave potenciômetro para regulação da velocidade de alimentação de arame eletrodo, posicionada na parte superior.



Figura A-6: Painel de controle externo.

Foi desenvolvido o painel inferior, com as seguintes características:

- Chave geral: liga e desliga o cabeçote, controlando a conexão entre a fonte de soldagem e o conjunto motor-tracionador;
- Chave potenciômetro para controle da velocidade de soldagem: esta chave controla a tensão de alimentação do motor responsável pelo deslocamento linear da chapa de metal de base;
- Interruptor “gatilho”: aciona o comando da fonte, energizando os terminais positivo e negativo;
- Chave seletora do sentido de soldagem: chave seletora que inverte a polaridade da tensão de alimentação do motor responsável pelo deslocamento linear da chapa de metal de base, invertendo a direção de avanço da chapa;

- Interruptor “comando”: aciona o conjunto motor-tracionador, alimentando arame de soldagem;
- Interruptor “ESAB MEA 33”: liga e desliga o cabeçote ESAB;
- Botão “carro”: Permite o retorno da estrutura que move a chapa de metal base quando esta aciona os sensores fim de curso.

A partir do painel de controle (Figura A-6) é possível iniciar o processo de soldagem, de forma semelhante a se utilizar uma tocha manual convencional, isto é, com os interruptores na posição correta, ao pressionar o gatilho a fonte energiza os terminais, e os motores de alimentação de arame e deslocamento da chapa são acionados. Também é possível o acionamento individual dos motores, sem energizar os terminais, para fins de posicionamento e regulagem.

A Figura A-7 apresenta um QR Code que direciona para um vídeo demonstrativo sobre a montagem da máquina de soldagem com arames tubulares dentro da câmara hiperbárica. O vídeo foi elaborado pelo autor e disponibilizado na plataforma YouTube.



Figura A-7: QR Code – direcionamento para vídeo sobre a montagem da máquina de soldagem subaquática com arames tubulares.

**APÊNDICE B – Procedimento de calibração da velocidade de
alimentação de arame tubular e determinação da velocidade de alimentação
a partir da medição da tensão do motor tracionador**

A determinação da velocidade de alimentação de arame tubular a partir dos valores de tensão do motor tracionador foi feita em duas etapas:

- Calibração da velocidade real;
- Determinação da velocidade de alimentação a partir da tensão do motor tracionador;

Calibração da velocidade real

A calibração da velocidade real de alimentação de arame tubular foi realizada para se identificar os valores na escala no painel. Esta etapa foi realizada com auxílio do medidor de velocidade de arame, componente do sistema SAP V4, com a estrutura montada fora do tanque.

Para cada valor selecionado de velocidade de alimentação, foram feitas três medições. Os valores são apresentados na Tabela B-1. Os valores de repetitividade foram calculados multiplicando-se o desvio padrão das medições pelo coeficiente *t-student* (igual a 4,303; 95 % de confiabilidade e 3 amostras). Assim, foram obtidos os valores de Td+Re e Td-Re, que indicam a variação máxima da velocidade de alimentação em relação ao valor selecionado no painel. Observa-se que a maior variação foi de 0,313 m/min, para a velocidade de 5,50 m/min.

Tabela B-1: Dados de calibração da velocidade de alimentação de arame tubular.

Velocidade de calibração (VVC)	Velocidade medida					Desvio Padrão Amostral (S)	Tendência (Td=MI-VVC)	Repetitividade 95% (Re=t.S)	Td+Re	Td-Re
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Média (MI)						
3,00	2,97	3,01	2,98	2,987	0,021	-0,013	0,090	0,076	-0,103	
4,00	3,93	3,98	4,08	3,997	0,076	-0,003	0,329	0,325	-0,332	
4,50	4,58	4,49	4,50	4,523	0,049	0,023	0,212	0,236	-0,189	
5,00	5,00	5,05	5,07	5,040	0,036	0,040	0,155	0,195	-0,115	
5,50	5,50	5,57	5,62	5,563	0,060	0,063	0,259	0,323	-0,196	
6,00	5,99	6,11	6,01	6,037	0,064	0,037	0,277	0,313	-0,240	
7,00	6,90	7,02	6,95	6,957	0,060	-0,043	0,259	0,216	-0,303	
8,00	8,06	8,08	8,00	8,047	0,042	0,047	0,179	0,226	-0,132	
10,00	10,08	10,12	10,05	10,083	0,035	0,083	0,151	0,234	-0,068	
12,00	12,11	12,05	12,03	12,063	0,042	0,063	0,179	0,242	-0,116	
14,00	14,07	14,04	13,96	14,023	0,057	0,023	0,245	0,268	-0,221	

Determinação da velocidade de alimentação a partir os valores de tensão do motor tracionador

Durante o processo de soldagem, devido à necessidade de manter a porta superior do tanque fechada para pressurização, não é possível utilizar o medidor de velocidade de arame. Assim, foram feitas medições da tensão do motor alimentador e estabelecida a relação entre a tensão do motor e a velocidade de alimentação.

Para estabelecer esta relação, foram feitas medições da tensão do motor em valores pré-determinados de velocidade de alimentação de arame, medidos com auxílio do medidor componente do sistema SAP V4. A faixa de valores de velocidade de alimentação foi de 2,5 à 14 m/min. A relação entre os parâmetros é apresentada na Figura B-1.

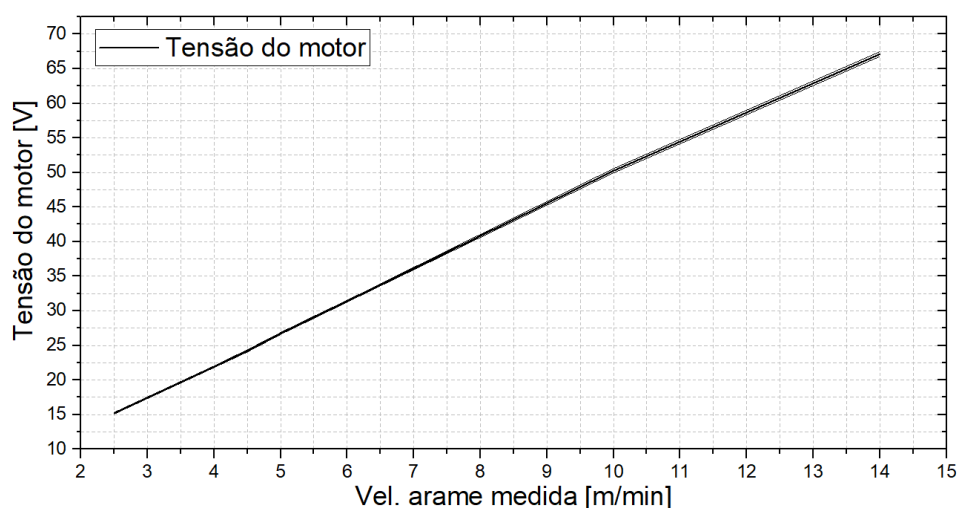


Figura A-1: Relação entre a velocidade de arame a tensão do motor tracionador.

Como o potenciômetro utilizado no painel é do tipo linear, a relação entre a tensão do motor e a velocidade selecionada (através da posição do borne do potenciômetro) é, também, linear. Assim, através da regressão linear, foi obtida a Equação B-1, utilizada para se determinar a velocidade de alimentação de arame a partir do valor de tensão do motor.

$$Vel. \text{ arame} = -0,862 + 0,22 * Tensão \text{ do motor} \quad B-1$$

O gráfico apresentado na Figura B-2 apresenta a comparação entre a velocidade de arame medida e a velocidade de arame calculada pela Equação B-1 a partir dos valores medidos da tensão do motor tracionador.

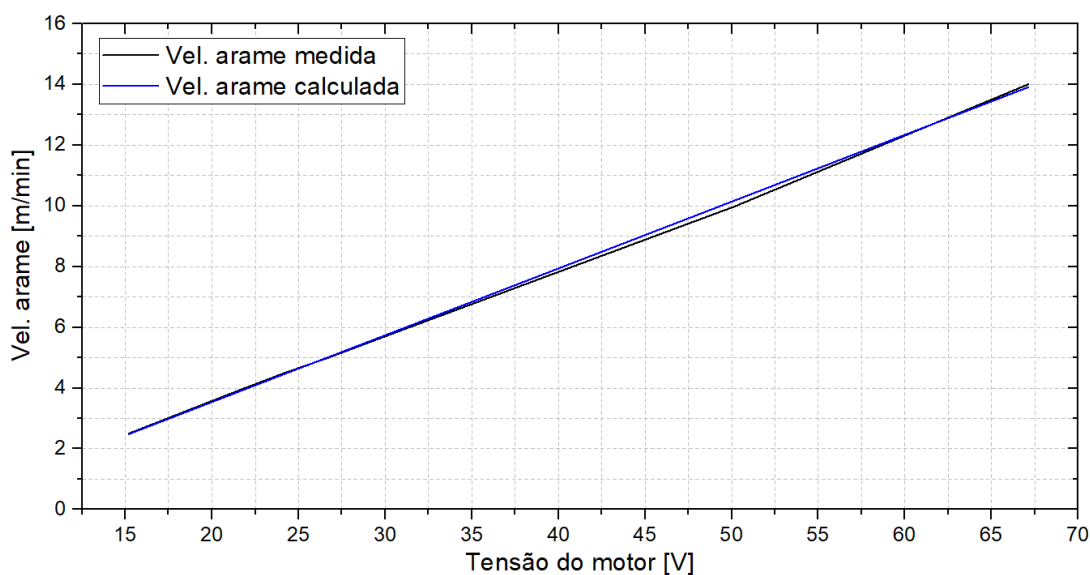


Figura B-2: Comparação entre a velocidade de arame medida e a velocidade de arame calculada pela equação obtida por regressão linear.

Medições da densidade linear do arame tubular

A densidade linear do arame tubular utilizado foi calculada para se determinar a taxa de fusão a partir da velocidade de alimentação de arame. Para medição, foram cortadas 10 amostras do arame, com 10 cm de comprimento cada. A massa de cada amostra foi medida 3 vezes com auxílio de uma balança de precisão. Os valores das medições e o valor médio, com o respectivo desvio padrão, são apresentados na

Tabela B-2, juntamente com os valores calculados da densidade linear do arame, em kg/m.

Tabela B-2: Dados das medições da massa do arame tubular.

#	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Densidade linear
1	1,2521	1,2535	1,2533	1,2530	0,01253
2	1,2302	1,2307	1,2305	1,2305	0,012305
3	1,2469	1,2486	1,2469	1,2475	0,012475
4	1,2487	1,2479	1,248	1,2482	0,012482
5	1,2495	1,2486	1,2485	1,2489	0,012489
6	1,2457	1,2469	1,2453	1,2460	0,012460
7	1,2482	1,2463	1,2483	1,2476	0,012476
8	1,262	1,2609	1,2612	1,2614	0,012614
9	1,2464	1,2461	1,2466	1,2464	0,012464
10	1,2558	1,2565	1,2557	1,2560	0,01256
				$1,2485 \pm 0,0078$	$0,012485 \pm 7,8 \times 10^{-6}$
				[g – 10 cm]	[kg/m]