Rafael Albino Bernardi

INVESTIGAÇÕES DE ORDEM OPERACIONAL E IMPLEMENTAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA COM ELETRODOS REVESTIDOS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva
Coorientador: Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Bernardi, Rafael Albino
INVESTIGAÇÕES DE ORDEM OPERACIONAL E IMPLEMEN TAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA SOLDAGEM SUBAQUÁTI-CA MOLHADA COM ELETRODOS REVESTIDOS / Rafael Albino Bernardi ; orientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva, coorientador, Mateus Barancelli Schwedersky, 2018.
129 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. AVC. 3. Soldagem submarina molhada. 4. Automação. 5. Dinâmica das bolhas. I. Gonçalves e Silva, Régis Henrique. II. Schwedersky, Mateus Barancelli. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Rafael Albino Bernardi

INVESTIGAÇÕES DE ORDEM OPERACIONAL E IMPLEMENTAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA COM ELETRODOS REVESTIDOS

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de "Mestre em Engenharia Mecânica", e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 09 de março de 2018.

_____

Prof. Dr. Jonny Carlos da Silva
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

_____

Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky - Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

_____

Orestes Estevam Alarcon, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

_____

Alexandre Queiroz Bracarense, Dr.
Universidade Federal de Minas Gerais

_____

Ricardo Reppold Marinho, Me.
PETROBRAS

_____

Raul Gohr Jr, Dr.
IMC - Soldagem

Dedico este trabalho à minha família. Em especial aos meus pais Mario Fernando e Rosângela, à minha irmã Bruna e à minha namorada Clarissa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me sustentou ao longo destes anos, dando-me forças para perseverar. Aos meus familiares, em especial meus pais Mario Fernando e Rosângela, minha irmã Bruna e namorada Clarissa, por todo apoio, amor e carinho despendidos a mim.

Agradeço também a todos que participaram direta e indiretamente no desenvolvimento deste trabalho, essenciais para a construção do mesmo:

— Ao meu orientador Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva, pelo conhecimento e contribuições enriquecedoras para este trabalho e meu desenvolvimento.

— Ao Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky, pelas orientações a mim dadas ao longo do mestrado, tanto neste trabalho como em outros demais projetos.

— Aos meus amigos e colegas Kauê Riffel, Luciano Cirino, Cassiano Godinho, Luiz Eduardo, Cleber Guedes, Mateus Skowronski, Alberto Bonamigo, Francisco Sartori e Hellinton Direne, pelo convívio e conhecimentos adquiridos.

— À equipe de projetos do LABSOLDA, em especial a João Facco e Mário César, pelo convívio e grandes contribuições dadas a este trabalho.

— À equipe de eletrônica do LABSOLDA, em especial a Fernando Costenaro, Felippe Kalil, Gustavo Sousa, Eduardo Luz e Cleber Marques, pelo grande auxílio prestado durante minha formação.

— Aos demais integrantes e ex-integrantes do LABSOLDA, com quem tive o privilégio de trabalhar: Rafael Nunes, Renan Kindermann, Thaffarel Ribas, Ramon Meller, Marcelo Okuyama, Daniel Ferrari, Jônathas Alexandre, Fernando Lucas, Arthur Gondim, Rodrigo Machado, Isabel Mattos e demais membros.

— Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e CAPES.

— Às empresas parceiras ao LABSOLDA, como a IMC – Soldagem e SPS – Sistemas e Processos de Soldagem, pelos equipamentos e apoio técnico.

“Porque dEle e por Ele, e para Ele, são todas as coisas; glória, pois, a Ele eternamente. Amém. ”

Romanos 11:35

RESUMO

O processo de soldagem eletrodo revestido é largamente aplicado em operações subaquáticas em ambiente molhado, tendo em vista seu desempenho aceitável e baixo custo de implementação. No entanto, a realização deste processo manualmente apresenta inconvenientes e desafios operacionais intrínsecos, como risco ao soldador mergulhador, principalmente em profundidades superiores a 20 m, a partir da qual os efeitos nocivos da pressão, o desconforto da troca constante de eletrodos, a redução de visibilidade do arco e poça de fusão e oscilações mecânicas advindas de correntes de água e balanço da estrutura a ser soldada tornam-se mais significativos. Em decorrência destes últimos fatores, a manutenção dos parâmetros elétricos ao longo da junta é prejudicada, restringindo a operacionalidade do processo e qualidade da solda. A automação, aliada ao desenvolvimento de fontes de soldagem especiais, contribui para sanar tal problemática, além de largamente contribuir para a pesquisa e desenvolvimento de novas composições para os eletrodos, pela maior flexibilidade e capacidade de controle das condições de soldagem. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um sistema e base científica e tecnológica para a automatização da soldagem submarina molhada com eletrodos revestidos. Essencialmente, em termos de automação de processos de soldagem este trabalho apresenta as etapas de desenvolvimento de um subsistema AVC (*Arc Voltage Control*) especialmente dedicado para soldagem em ambiente subaquático com eletrodos revestidos, da atuação do sistema mecanizado e a fonte de soldagem microprocessada. Além disto, aborda o estudo do comportamento do processo em função dos parâmetros elétricos e funcionalidades da fonte de soldagem, incluindo investigações prévias sobre a aplicação de corrente pulsada e polaridades direta e inversa. A técnica de abertura do arco desenvolvida, agregando evoluções na fonte de soldagem e no AVC, permitiu maior precisão e repetibilidade, ao simular os movimentos do soldador com maior dinâmica e de maneira controlada. As investigações sobre o processo suportaram avanços de controle da fonte e do sistema AVC para maior estabilidade de alimentação do eletrodo. Foi possível melhoria da estabilidade do comprimento do arco elétrico por meio de análise e seleção de filtro de tensão adequado e implementação de controlador PI. Também foram desenvolvidas metodologias para a compensação da queda de tensão sobre eletrodo, que é mutante ao longo do consumo do mesmo, de maneira a regular e manter a continuidade e linearidade da taxa de alimentação (mergulho) da vareta. Ainda em relação ao estudo fenomeno-

lógico de comportamento do processo, filmagens em alta velocidade proporcionaram a quantificação do diâmetro das bolhas e respectivas frequências de destacamento em função da corrente e polaridade. Os dados obtidos foram correlacionados com a taxa de fusão dos eletrodos nas condições supracitadas. De maneira geral, os resultados elucidam a estreita relação entre o comportamento do sistema de mecanização, incluindo o AVC, e os parâmetros elétricos e funcionalidades da fonte de soldagem para o bom desempenho da automação do processo eletrodo revestido em ambiente molhado.

Palavras-chave: AVC; Soldagem submarina molhada; Automação; Dinâmica das bolhas.

ABSTRACT

The coated electrode welding process is widely applied in underwater operations in wet environment, considering its acceptable performance and low implementation cost. However, the execution of this process manually presents intrinsic operational disadvantages, such as risks to the diver welder, especially at depths exceeding 20m, from which the harmful effects of the pressure coupled with the discomfort of constant electrode exchange, the reduction of visibility of the arc and the melting pool and mechanical oscillations due to water currents and balance of the structure to be welded are more significant. As a result of these latter factors, the maintenance of the electrical parameters along the joint is impaired, restricting the process operability and weld quality. Automation, combined with the development of special welding sources, helps to solve such problems, as well as contributing to the research and development of new compositions for the electrodes due to the greater flexibility and ability to control the welding conditions. In this context, the present work has as main objective the development of a system and scientific and technological basis for the automation of underwater wet welding with coated electrodes. Essentially, in terms of automation of welding processes, this work presents the stages of development of an Arc Voltage Control (AVC) subsystem specially dedicated for underwater welding with coated electrodes, the actuation of the machined system and the microprocessed welding source. In addition, it deals with the study of the process' behavior in function of the electrical parameters and welding source functionalities, including previous investigations on the application of pulsed current and direct and reverse polarities. The developed arc opening technique, with evolutions in the welding power source and in the AVC allowed greater precision and repeatability, by simulating the movements of the welder with greater dynamics and in a controlled way. The investigations of the process supported advances of the source and the AVC control for greater stability of electrode's feeding. It was possible to improve the arc length stability by the analysis and selection of suitable voltage filter and PI controller implementation. In addition, methodologies were developed to compensate the voltage drop on the electrode, which is mutant along its consumption, in order to regulate and maintain the continuity and linearity of the feed rate of the rod. Still in relation to the phenomenological study of the process' behavior, high-speed filming provided quantification of the bubble diameter and the respective frequencies of detachment as a function of current and polarity. The data obtained were correlated with the fusion rate of the electrodes in the above-mentioned

conditions. In general, the results elucidate the close relationship between the behavior of the mechanization system, including the AVC, and the welding source's electrical parameters and functionalities for the good performance of the underwater wet welding with coated electrodes' automation.

Keywords: AVC; Underwater wet welding; Automation; Bubble dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquemático da soldagem subaquática seca. Fonte: [20].....27
Figura 2. Procedimento de soldagem em ambiente molhado com eletrodo revestido. Fonte: [19].....28
Figura 3. Faixas operacionais de tensão e corrente em função da pressão. Adaptado de [33]. 30
Figura 4. Influência do período de pulsação (T) e relação I_b/I_p nas características geométricas dos cordões. Adaptado de [16]. 32
Figura 5. Diâmetro máximo da bolha e frequência de flutuação em função da velocidade de alimentação. Adaptado de [38]. 34
Figura 6. Configuração recomendada para a execução de procedimentos de soldagem molhada. 36
Figura 7. Surtos de corrente provocados durante eventos de curto-circuito. Fonte [12]. 37
Figura 8. Tensão de arco em função da tensão de referência. 42
Figura 9. .....Aspecto visual dos cordões durante os estágios iniciais do estudo. 42
Figura 10. Eletrodos E6013 postos para secagem. Procedimento de impermeabilização. 45
Figura 11.....Tartílope V2 adaptado para a soldagem com eletrodos revestidos. 46
Figura 12. Transdutor de posição acoplado ao eixo Z do Tartílope V2.....47
Figura 13. Cuba d'água utilizada nos experimentos. 48
Figura 14..... Montagem da bancada para realização das filmagens em alta velocidade. 51
Figura 15. Modo de medição do diâmetro das bolhas. 52
Figura 16. Fluxograma contendo a lógica inicial do sistema, detalhando os comandos da fonte de soldagem e AVC. 57
Figura 17. Oscilograma de tensão durante os estágios iniciais do procedimento de soldagem. Ambiente seco. 58
Figura 18. Oscilograma de tensão durante os estágios iniciais do procedimento de soldagem. Ambiente molhado. 59
Figura 19. Oscilogramas de tensão e corrente durante abertura de arco. Ambiente molhado.....60
Figura 20. Tensão de arco (azul) e tensão após filtro do AVC (vermelho). 61
Figura 21. Fluxograma contendo a lógica final do sistema, detalhando os comandos da fonte de soldagem e AVC. 64
Figura 22..... Posição do eixo Z e tensão de arco ao longo do tempo. Ambiente seco. 65
Figura 23..... Posição do eixo Z e tensão de arco ao longo do tempo. Ambiente molhado. 66
Figura 24. Atuação da fonte durante a ocorrência de curto-circuito logo após a abertura de arco. Destaca-se em vermelho o momento do curto-circuito e atuação da fonte HipER-1.....67

Figura 25. Comparativo entre filtros de primeira e segunda ordem. 69
Figura 26. Tensão instantânea e filtrada pelo AVC. Alfa = 0,06. 70
Figura 27. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 1.....71
Figura 28. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 6,5.....72
Figura 29. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 30.....73
Figura 30. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 0,5 e Ki = 1...74
Figura 31. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 1 e Ki = 1.....75
Figura 32. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 6,5 e Ki = 1...76
Figura 33. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 6,5 e Ki = 6,5.77
Figura 34. Queda de tensão no eletrodo e arco elétrico no início e fim do processo de soldagem. 78
Figura 35. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V.....79
Figura 36. Metodologia inicial para ajuste do OFFSET.....81
Figura 37. Variação da tensão em ambiente seco. Uref = 23V e QT = 2V. 84
Figura 38. Variação da tensão em ambiente seco. Uref = 23V e QT = 4V. 84
Figura 39. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V e QT = 1V. 85
Figura 40. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V e QT = 1,5V. 86
Figura 41. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V e QT = 2V. 86
Figura 42. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V e QT = 4V. 87
Figura 43. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V e QT = 5V. 87
Figura 44. Oscilogramas de tensão para os níves de corrente de 75, 90, 110 e 130A. Polaridade Reversa. Eletrodos E6013. 89
Figura 45. Oscilogramas de tensão para os níveis de corrente de 75, 90, 110 e 130A. Polaridade Direta. Eletrodos E6013. 90
Figura 46. Oscilogramas de tensão para os níveis de corrente de 75, 90, 110 e 130A. Polaridade Reversa. Eletrodos E7018. 91
Figura 47. Oscilogramas de tensão para os níveis de corrente de 75, 90, 110 e 130A. Polaridade Direta. Eletrodos E7018. 91
Figura 48. Perturbações na tensão e corrente. Polaridade Reversa 75A. Eletrodo E6013.....92
Figura 49.. Evolução do rompimento da bolha. Polaridade Reversa 75A. Evento 1.....93
Figura 50.. Evolução do rompimento da bolha. Polaridade Reversa 75A. Evento 2.....94
Figura 51. Comparativo entre diâmetro de bolhas. Polaridade Reversa (cima) e Direta (baixo). 75A.....96
Figura 52. Comparativo entre diâmetro de bolhas. Polaridade Reversa (cima) e Direta (baixo). 90A.....97

Figura 53. Comparativo entre diâmetro de bolhas. Polaridade Reversa (cima) e Direta (baixo). 110A. 98
Figura 54. Frequência e diâmetro das bolhas em função da corrente. 99
Figura 55. Taxa de fusão em função da corrente e polaridade. 100
Figura 56. Oscilogramas de tensão para 35, 36, 37 e 38V. Polaridade Reversa 110A. Eletrodos E6013. 101
Figura 57. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 5Hz e Amplitude 30A. 103
Figura 58. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 20Hz e Amplitude 30A. 104
Figura 59. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 50Hz e Amplitude 30A. 105
Figura 60. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 5Hz e Amplitude 100A. 106
Figura 61. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 20Hz e Amplitude 100A. 107
Figura 62. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 50Hz e Amplitude 100A. 108
Figura 63. Taxa de fusão durante os ensaios para corrente pulsada. O ponto em vermelho representa a taxa de fusão na condição CC- I = 110A. 109
Figura 64. Aspecto visual dos cordões. Em (a): corrente pulsada; em (b): corrente contínua. Corrente média 110A e velocidade de soldagem 24 cm/min. 110
Figura 65. Macrografias dos ensaios realizados. Em (a): corrente contínua; em (b): corrente pulsada. Corrente média 110A e velocidade de soldagem 24 cm/min. 110
Figura 66. Sistema Modular de 2 eixos SMD2-500. 113
Figura 67. Alteração do ângulo de ataque. SM2-500. 114
Figura 68. Alteração do ângulo de trabalho. SM2-500. 115
Figura 69. Alteração da altura do eixo X. 115
Figura 70. Configurações possíveis para porta-eletrodos e tochas de soldagem. 116
Figura 71. Bancada final desenvolvida neste trabalho. 117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
TIG	*Tungsten Inert Gas*
MIG/MAG	*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*
FCAW	*Flux Cored Arc Welding*
CCC	Curto-Circuito Controlado
CMT	*Cold Metal Transfer*
AVC	*Arc Voltage Control*
Ip	Corrente de pulso
Ib	Corrente de base
IHM	Interface Homem-Máquina
P	Proporcional
PI	Proporcional-Integrador
PID	Proporcional-Integrador-Derivativo
Kp	Ganho proporcional
Ki	Ganho integrador
Kd	Ganho derivativo
vAx	Velocidade de aproximação eixo X
vAz	Velocidade de aproximação eixo Z
vRx	Velocidade de recuo eixo X
vRz	Velocidade de recuo eixo Z
Rec	Distância de recuo eixo Z
VzS	Velocidade de correção máxima
Uarco	Tensão de arco
Uref	Tensão de referência
Ui	Tensão inicial
Uf	Tensão final
$V_{filtrado}$	Tensão resultante do filtro
V_{atual}	Tensão instantânea
$V_{anterior}$	Tensão resultante anterior do filtro
α	Significância do filtro (0 a 1)
QT	Queda de tensão
Utotal	Tensão total (Arco + Eletrodo)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 23
1.1 Objetivos 25
1.1.1 Geral 25
1.1.2 Específicos 25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 27
2.1 Soldagem Submarina 27
2.1.1 Aspectos Gerais 27
2.1.2 O arco elétrico em ambiente subaquático 29
2.1.3 Dinâmica das bolhas 33
2.2 Automação da Soldagem Submarina 35
2.3 Fontes para Soldagem Submarina Molhada 36
2.4 Arc Voltage Control (AVC) 38
2.5 Estado da Arte na Soldagem Submarina Molhada com Eletrodos Revestidos 39
3 ESTUDOS PRELIMINARES 41
4 MATERIAIS E MÉTODOS 45
4.1 Considerações Iniciais 45
4.2 Abertura de Arco 48
4.3 Controle do Comprimento do Arco 49
4.4 Queda de Tensão nos Eletrodos 49
4.5 Estudo do Processo de Soldagem Submarina Molhada com Eletrodos Revestidos. 50
4.5.1 Efeito dos parâmetros elétricos no processo em ambiente molhado 50
4.5.2 Aplicabilidade da corrente pulsada em soldagem submarina molhada com eletrodos revestidos 52
5 DESENVOLVIMENTO DO AVC PARA SOLDAGEM SUBMARINA MOLHADA 55
5.1 Abertura de Arco 55
5.1.1 Lógica Inicial (I) 55
5.1.2 Lógica Final (II) 62
5.2 Controle do Comprimento do Arco (AVC) 68
5.2.1 Leitura e Filtro de Tensão 68
5.2.2 Ganho Proporcional (Kp) 70
5.2.3 Ganho Integrador (Ki) 73
5.3 Queda de Tensão nos Eletrodos 78
5.3.1 Ponderações e investigação iniciais 78
5.3.2 Lógica inicial (I) 79
5.3.3 Lógica final (II) 82

5.3.4 Validação da metodologia 83
6 ESTUDO DO PROCESSO DE SOLDAGEM SUBMARINA MOLHADA COM ELETRODOS REVESTIDOS 89
6.1.1 Efeito dos parâmetros elétricos no processo em ambiente molhado.....89
6.1.2 Aplicabilidade da corrente pulsada em soldagem submarina molhada com eletrodos revestidos 102
7 BANCADA E EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS 113
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 119
8.1 Conclusões.....119
8.2 Sugestões para trabalhos futuros.....120
9 REFERÊNCIAS.....123
APÊNDICE A.....129

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a exploração petrolífera tem crescido ano após ano, principalmente após a descoberta de grandes reservas na camada pré-sal, em 2006, o que registrou 1/3 das descobertas de petróleo e gás à nível mundial [1]. Além da estimativa de que o pré-sal possa duplicar as reservas de óleo do país para 31 bilhões de barris, acredita-se que existam cerca de 87 bilhões de barris ainda não descobertos, o que colocaria o Brasil em par com as reservas de óleo do Iraque [2].

O aumento da exploração do petróleo demanda esforços em diversas áreas. Segundo o Plano de Negócios e Gestão (2018-2022) da Petrobras, cerca de US$60,3 bilhões serão investidos na exploração e produção, sendo 12% destinados à Infraestrutura e P&D [3].

Dado a crescente demanda de instalações *offshore*, o aprimoramento das técnicas de manutenção desempenha um papel importante para o cumprimento dos objetivos do ramo energético. Nisto, a soldagem submarina molhada desempenha papel fundamental, sendo sinônimo de eficiência e baixo custo, tornando-se peça chave ao instrumental de manutenção de empresas como a Petrobras.

Após o aumento do preço do barril de petróleo, em 1973, as explorações foram expandidas para a costa marítima, o que alavancou a necessidades de reparos em estruturas submersas [4], semi-submersas e FPSOs (*Floating Production Storage and Offloading*). Isto fomentou a pesquisa e desenvolvimento no campo da soldagem molhada, resultando no desenvolvimento de equipamentos e consumíveis, além de aprimorar técnicas e processos de soldagem.

O Instituto de Soldagem e Mecatrônica – LABSOLDA, insere-se no contexto nacional de pesquisa e desenvolvimento de equipamentos e processos de soldagem, destacando-se como referência em inovação. Dentre a ampla gama de estudos destinados a melhorias aos diversos setores, pode-se destacar: o sensoriamento laser para união de tubos; desenvolvimento do processo curto-circuito controlado (CCC) [5][6] e aplicabilidade no passe de raiz [7]; discretização, desenvolvimento e melhoria das variantes avançadas dos processos MIG/MAG e TIG, como o CMT [8], TOPTIG [9] e TIPTIG [10].

Além do que foi tratado, o LABSOLDA tem dado enfoque em pesquisas concernentes à soldagem submarina. Um forte exemplo disto é a parceria entre o LABSOLDA-UFSC e a Petrobras, que em meados de 1997 deu início às pesquisas no campo da soldagem molhada, que culmi-

nou no desenvolvimento de fontes de soldagem especiais para tal aplicação: HipER-1 e HipER-2, para eletrodos revestidos e arame tubular, respectivamente. Como resultado final, os equipamentos e técnicas foram aplicados em reparos da plataforma P-27, na Bacia de Campos (RJ). Estudos quanto a soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular [11][12] e MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco [13] foram também realizados.

Atualmente, o projeto junto à CAPES (Edital nº 43/2013 CIÊNCIAS DO MAR 2) intitulado "Desenvolvimento de Tecnologia Para Suporte a Expedições Científicas em Ciências do Mar", tem como objetivo a formação de recursos humanos de alto nível na área naval e oceânica a partir de projetos focados no desenvolvimento de equipamentos submarinos para suporte às expedições científicas oceânicas. Nisto, inclui-se a pesquisa e desenvolvimentos de equipamentos destinados à soldagem subaquática.

O eletrodo revestido possui grande aplicação à soldagem submarina molhada, tendo em vista baixo custo, bom desempenho e ampla gama de consumíveis disponíveis. Entretanto, à parte dos problemas circundantes à soldagem em ambiente molhado, o eletrodo revestido possui complicações quanto a repetitividade e baixo controle das variáveis elétricas tendo em vista execução manual do procedimento. Além disto, o aumento da profundidade (e consequentemente da pressão) e tempo de mergulho possuem efeitos nocivos ao ser humano.

A automação de tal processo pode trazer benefícios à manutenção e robustez do arco elétrico, além de melhorias mecânica e metalúrgica do metal depositado. Embora a aplicação do eletrodo revestido automatizado em ambiente molhado aparenta ser nebulosa, o desenvolvimento tecnológico, principalmente com inovações na automatização e fontes de soldagem têm ampliado as possibilidades. Além disto, a automação pode contribuir principalmente para a pesquisa e desenvolvimento de novos consumíveis de soldagem, além de estudos mais aprofundados sobre os fenômenos circundantes ao processo em ambiente molhado.

Segundo a *McKinsey Global Institute* [14], acredita-se que a automação seja um fator importante para superar a capacidade humana, agregando maior produtividade e segurança, sendo peça chave para o crescimento econômico. A automação da soldagem submarina não está à parte disto, podendo contribuir para a indústria *offshore*, expedições marítimas e para a pesquisa e desenvolvimento de novos consumíveis.

Deste modo, cresce o interesse pelo aperfeiçoamento da soldagem submarina molhada com eletrodos revestidos, visando a melhoria dos

pontos deficitários e o aprofundamento nos fenômenos circundantes a tal processo, almejando o estado da arte da soldagem molhada.

Apesar dos benefícios da automação de tal aplicação, a abertura de arco é um desafio devido às peculiaridades do processo e o ambiente molhado. Deste modo, além de uma dinâmica de movimento adequada (realizada intuitivamente pelo soldador), deve haver dinâmica de corrente para robustez da abertura. Além disto, a alimentação de material deve ser concatenada com a taxa de fusão, o que torna o uso do AVC indispensável. Entretanto, dado as distinções físicas entre os processos TIG (para o qual o AVC foi originalmente desenvolvido) e o Eletrodo Revestido (agravado pelo ambiente molhado), adaptações de funcionamento e parametrização são exigidas.

A corrente pulsada apresenta impactos sobre o arco e a poça [15][16], efeitos sobre as características mecânica e metalúrgica [17][18] bem como transferência metálica, tornando válido estudar os efeitos para o Eletrodo Revestido em ambiente molhado, em busca de maior estabilidade, melhorias na geometria dos cordões e qualidade. Isto requer, primeiramente, a implementação da corrente pulsada na fonte de soldagem. Do mesmo modo, também a polaridade tem efeito notório sobre os processos, como a manipulação da geometria do cordão e taxa de fusão, o que pode trazer benefícios para a soldagem molhada.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de infraestrutura e base científica e tecnológica para soldagem submarina molhada com eletrodos revestidos de forma automática, dando subsídios para o avanço das pesquisas concernentes a este processo no LABSOLDA, buscando a viabilização prática do mesmo.

1.1.2 Específicos

Almejando atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Construção de uma bancada que possibilite a realização de ensaios em ambiente molhado, abarcando a possibilidade de executar filmagens em alta velocidade do processo;

- Desenvolvimento de um sistema AVC (*Arc Voltage Control*) e manipulador para soldagem com eletrodos revestidos, tendo em vista os requisitos técnicos de tal processo.

- Avaliação da fonte de soldagem HipER-1 quanto à intervenções e funcionalidades, buscando investigar qual o grau de contribuição da fonte de soldagem na automatização do processo;

- Realização de estudos concernentes aos fatores determinantes para a estabilidade do processo em ambiente molhado, avaliando níveis de corrente e tensão, polaridade e dinâmica das bolhas;

- Estudo inicial sobre os impactos sobre o desempenho e aplicabilidade da corrente pulsada com eletrodos revestidos em ambiente molhado, quanto à estabilidade do processo e geometria dos cordões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem Submarina

2.1.1 Aspectos Gerais

A soldagem subaquática tem elevada aplicabilidade no reparo de estruturas submersas. Segundo Oliveira [19], a exploração de petróleo *offshore*, e o consequente aumento da capacidade de exploração de petróleo, passa pela capacidade de executar reparos e manutenção das instalações produtivas, tanto em ambientes de pequena lâmina d'água quanto em águas profundas.

A soldagem subaquática pode ser subdividida, basicamente, em duas categorias: seca e molhada. A primeira é realizada à pressão ambiente em uma câmara na qual a água foi removida. Para isto, os processos mais utilizados são o TIG e o MIG/MAG. Na soldagem subaquática seca é possível realizar soldas de elevada qualidade, que cumprem os requerimentos de normas internacionais, tal como a AWS D3.6M, conferindo soldas semelhantes às realizadas na atmosfera convencional (classe A). O processo Eletrodo Revestido possui baixa aplicabilidade à esta modalidade devido à elevada formação de fumos durante a soldagem. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático da soldagem subaquática seca em câmara hiperbárica.

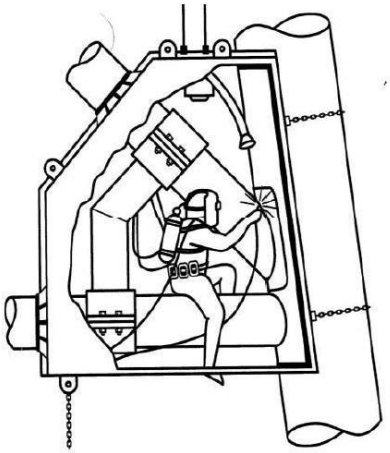

Figura 1. Esquemático da soldagem subaquática seca. Fonte: [20].

Na modalidade molhada a soldagem é realizada completamente exposta ao ambiente aquático. Isto implica em diversas vantagens, tais como a redução do número de equipamentos necessários (simplicidade) e facilidade no uso de diversas posições de soldagem [21].

Segundo Rowe e Liu [22] e Teichmann [12], processos como soldagem por fricção e a arco elétrico com arames tubulares (FCAW) dependem largamente da adaptação dos equipamentos ao ambiente aquático, como redução do tamanho dos equipamentos, impermeabilização dos componentes e outros, apresentando limitações para tais processos.

Assim, o principal processo aplicado em soldagem subaquática molhada é o eletrodo revestido. Suas diversas vantagens estão baseadas na simplicidade do equipamento, baixo custo, mobilidade e rapidez de reparo em locais de clima instável [23]. A Figura 2 apresenta a execução de um procedimento de soldagem subaquático.

Figura 2. Procedimento de soldagem em ambiente molhado com eletrodo revestido. Fonte: [19].

Embora mais simples e barato se comparado aos processos de soldagem subaquática secos, Masubuchi [24] afirma que soldas de menor qualidade são produzidas, voltando a aplicação deste processo à execução de reparos. O rápido resfriamento gerado pela água circundante e sua susceptibilidade à fragilização por hidrogênio, além de tenderem a ter uma menor ductilidade e resistência à tração se comparadas com soldas realizadas ao ar livre são problemas presentes no processo molhado [25].

No processo em questão, o arco elétrico é mantido em um plasma em alta temperatura, que está cercado por uma bolha gasosa. Tal plasma pode conter 90% de hidrogênio ionizado devido à abundância de H2O no meio, e a bolha quantidades variáveis de H2, O2, N2 e CO2, vapor e outros elementos principalmente provenientes da composição do revestimento do eletrodo. Embora diversas composições distintas sejam adotadas para soldagem submarina, pesquisas recentes indicam que a qualidade da solda apresenta melhorias com a adoção de eletrodos oxi-rutílicos [26].

Na soldagem subaquática com eletrodos revestidos, estes devem ser à prova d'água. Além disto, todas as conexões devem ser perfeitamente isoladas, evitando fugas de corrente para o meio e consequentemente reduzindo a corrente de arco e aumentando o risco ao soldador. Ainda, haverá rápida deterioração dos cabos de cobre no ponto de isolamento deficitário [27].

2.1.2 O arco elétrico em ambiente subaquático

Em soldagem submarina molhada, a inexistência de barreiras físicas entre a agua e o arco elétrico aliada à elevada pressão do ambiente no qual está inserido (em função da profundidade) tornam o arco instável [28][29].

Mazzaferro e Machado [30] constataram que à 5m de profundidade o arco é exposto a uma influência negativa do ambiente, conferindo um comportamento instável. No entanto, reporta-se que à 12,5m de profundidade, o aumento da pressão radial sobre o arco trouxe benefícios para a estabilidade. Porém, em tais condições, notou-se mudanças nas características da transferência metálica em alguns eletrodos de certas composições, onde a instabilidade pode ser uma das causas. Além disto, foi observada uma tendência à redução de defeitos em operações realizadas à 20m de profundidade, para todos os eletrodos estudados.

Nixon e Graham [31] demonstraram que procedimentos realizados em profundidades inferiores a 3m são significativamente mais instáveis aos realizados à 6m. Em seu estudo, avaliaram o desempenho do processo em 1,5, 3 e 6m de profundidade.

Embora o aumento da pressão possa surtir efeitos positivos sobre o processo, Wood e Bruce [32] reportam perda de estabilidade do arco em maiores profundidades. Tais pesquisadores avaliaram o desempenho do processo em profundidades próximas a 600 pés (183m).

Uma das causas para o aumento da instabilidade do arco devido à elevação da pressão hidrostática pode ser explicado devido ao alto potencial de ionização do hidrogênio que dificulta a sustentação do arco elétrico [20]. De acordo com Ibarra [33], o aumento da profundidade ou pressão requer fontes de energia mais potentes para a abertura e manutenção do arco elétrico, além de que a faixa tensão-corrente na qual se pode produzir soldas de boa qualidade diminui. A Figura 3 mostra essa relação.

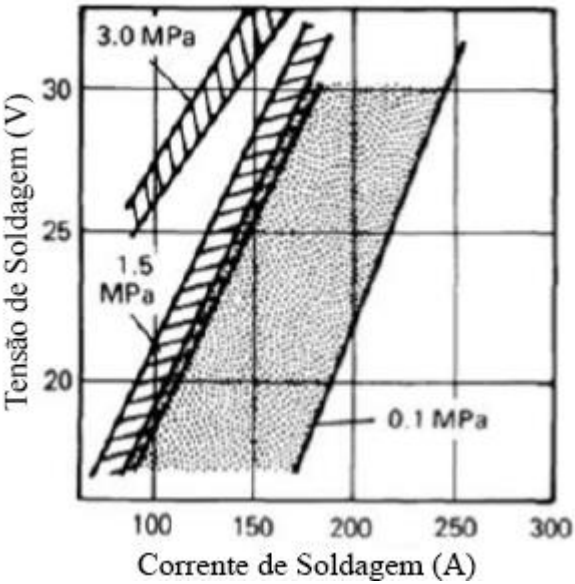

Figura 3. Faixas operacionais de tensão e corrente em função da pressão. Adaptado de [33].

Além disto, pesquisadores [34] relatam a ocorrência de uma constrição da coluna do arco com o aumento da pressão ambiente, associando tal fenômeno ao resfriamento das zonas mais externas do plasma, dado a maior densidade de partículas e átomos.

De fato, diversos são os fatores que influenciam a estabilidade do arco. Em geral, uma composição do eletrodo favorável, apropriados níveis de corrente e tensão, polaridade adequada e uma faixa de pressão/profundidade operacionável são preponderantes para a melhor manutenção do arco.

Estudos foram realizados visando a utilização da corrente pulsada em soldagem submarina molhada buscando melhorar a estabilidade do arco. Suga e Hasui [16] avaliaram como os parâmetros da onda quadrada

influenciam na transferência metálica e qualidade dos cordões, a uma profundidade de 10 cm de coluna d'água. Segundo tais pesquisadores, é possível obter um arco estável quando a corrente média de pulsação é igual à corrente constante ótima de operação e o ciclo de pulsação equipara-se ao da transferência metálica. A condição mais estável encontrada foi ao utilizar corrente de pulso I_p relativamente baixa, com corrente de base I_b similar à corrente constante ótima de operação, atingindo assim a transferência de uma gota por pulso. No entanto, sabe-se que o modo de transferência no processo eletrodo revestido não apresenta, em geral, estabilidade e/ou periodicidade como no MIG/MAG, dependendo de diversos fatores, como o tipo de revestimento, e o diâmetro do eletrodo, o que pode tornar difícil a observação da transferência por meio do oscilograma de tensão.

Quanto a geometria dos cordões, constatou-se que há o aumento da penetração ao elevar a corrente de pulso I_p e aumento da frequência de pulsação [16]. A Figura 4 mostra a influência do período de pulsação e relação Ib/Ip sobre a geometria dos cordões.

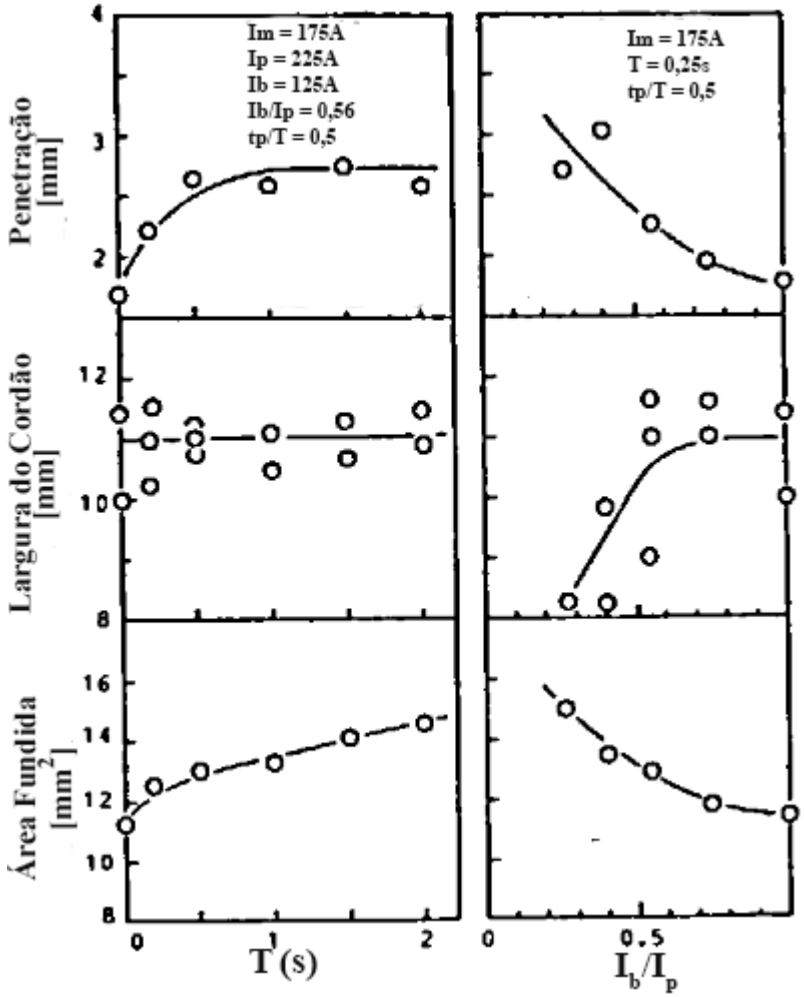

Figura 4. Influência do período de pulsação (T) e relação I_b/I_p nas características geométricas dos cordões. Adaptado de [16].

Childs [35] reporta que um dos pontos chave para a obtenção de soldas de qualidade com excelente aspecto visual, para eletrodos inoxidáveis 308L, foi a utilização da corrente pulsada.

2.1.3 Dinâmica das bolhas

Na soldagem molhada, bolhas circundantes ao arco elétrico são formadas continuamente, contendo átomos de hidrogênio e oxigênio dissociados [36] bem como gases provenientes da queima do eletrodo (vapor metálico e fluxo) [37]. A formação e rompimento das bolhas criam uma perturbação no arco elétrico.

O volume da bolha varia substancialmente com a profundidade, onde aquela diminui com o aumento da pressão. Para baixas pressões, o surgimento, crescimento e ascensão da bolha ocorrem com maior frequência do que em profundidades maiores. A presença da bolha pode reduzir a taxa de resfriamento do metal de solda, podendo trazer benefícios quanto a microestrutura do metal de solda e da zona termicamente afetada. A presença das bolhas pode afetar adversamente o processo em soldagem na posição sobre cabeça [20].

Além disto, outro fator que influencia o diâmetro da bolha é a corrente de soldagem. No processo arame tubular, Feng *et al.* [38] reportam que o aumento da velocidade de alimentação resultou em bolhas de maior diâmetro e menor frequência de destacamento, para toda a faixa estudada, entre 4,5 e 10,5 m/min. A Figura 5 apresenta o diâmetro máximo da bolha e frequência em função da velocidade de alimentação.

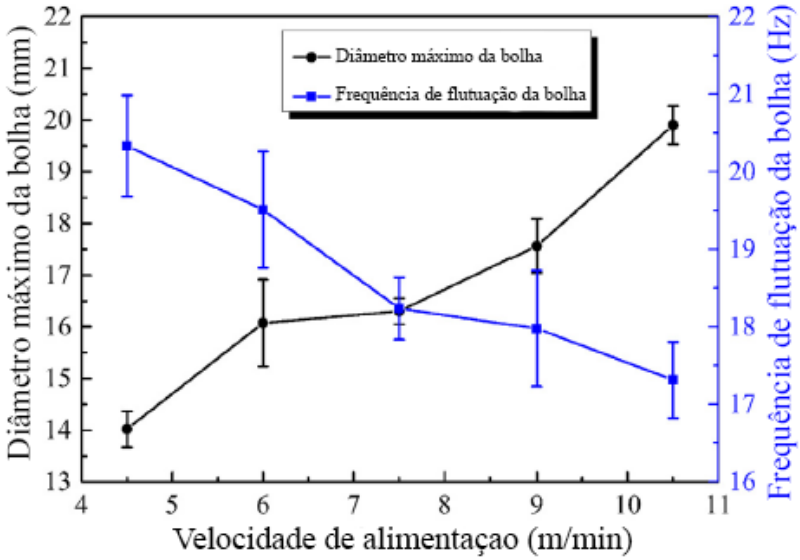

Figura 5. Diâmetro máximo da bolha e frequência de flutuação em função da velocidade de alimentação. Adaptado de [38].

Outra questão presente na soldagem subaquática molhada é a maior taxa de resfriamento quando comparada a procedimentos na superfície ou em ambiente seco. Segundo Rowe e Liu [22], o tempo de resfriamento na soldagem subaquática molhada para uma variação de 800°C para 500°C encontra-se entre 1 a 6 segundos, enquanto que na soldagem por eletrodo revestido seca, para a mesma faixa de temperatura, o tempo necessário é bem maior, de 8 a 16 segundos.

De acordo com Pope *et al* [39], na soldagem subaquática molhada, dois estágios de transferência de calor devem ser considerados. No primeiro estágio, a presença da bolha de vapor gera uma espécie de isolante térmico, onde a transferência de calor ocorre semelhantemente à realizada na atmosfera. No segundo estágio, à medida que o arco elétrico avança, a bolha de vapor não se encontra mais sobre o metal de solda, propiciando alta taxa de transferência de calor por convecção entre o metal de solda e o ambiente.

2.2 Automação da Soldagem Submarina

O grande crescimento da indústria *offshore* tem elevado a demanda do desenvolvimento e qualificação de consumíveis especiais para soldagem submarina molhada [40], além de fomentar a concepção de equipamentos capazes de realizar procedimentos em tal ambiente, reduzindo custos e riscos à saúde humana. Para isto, o desenvolvimento de sistemas automáticos e o uso de robôs torna-se relevante para atingir tais objetivos [41][42].

A soldagem semi-automática é capaz de realizar procedimentos até algumas dezenas de metros, estando, no entanto, dependentes de operadores na superfície para desempenharem tarefas chave no processo. A total automação da soldagem submarina molhada é um problema desafiador, mas superável [43].

Equipamentos comerciais foram desenvolvidos destinados à soldagem submarina semi-automática, podendo elencar o THOR (*Stolt Comex Seaway*, atual *Subsea 7*), PRS - Pipeline Repair System (*Norsk Hydro* e *Statoil*) e o GKSS Modular Orbital Welding System (*GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH*), desenvolvidos para a união de pipelines e realização de reparos. Utilizam os processos TIG, MIG/MAG e Arame Tubular semi-automatizado [43]. No entanto, tais equipamentos implicam na utilização de câmaras (habitats), não configurando, portanto, como soldagem molhada. Entretanto, o desenvolvimento de tais sistemas caracteriza-se por importantes avanços na automação do processo, principalmente no que tange a tecnologias de monitoramento do arco elétrico e poça de fusão. Em geral, tais sistemas contam com câmeras que permitem que o operador observe em tempo real o comportamento do processo [44].

O processo de soldagem eletrodo revestido é predominantemente realizado manualmente e oferece vantagens quando comparado aos demais processos, uma vez que é menos sensível a correntes de ar e é apropriado para a maioria dos metais e ligas utilizadas. Além disso é o mais recomendado para soldagem submarina molhada.

Em se tratando disso, é necessário que além de transladar o eletrodo ao longo da junta a ser soldada, o manipulador deve realizar o movimento de mergulho do eletrodo à medida que este é fundido. Entretanto, dependendo da corrente de soldagem e diâmetro do eletrodo, a taxa de fusão deste pode não ser constante, impossibilitando a adesão de uma velocidade de mergulho constante, podendo conferir características dimensionais heterogêneas ao cordão de solda [42]. Isto requer a utilização de

sistemas como o AVC (*Arc Voltage Control*) de modo a auxiliar na estabilidade do processo e qualidade do produto final.

2.3 Fontes para Soldagem Submarina Molhada

As fontes destinadas à soldagem submarina molhada requerem o cumprimento de especificações técnicas e operacionais. Isto é importante não apenas para a manutenção do processo de soldagem, mas também para a vida útil do equipamento e a segurança do soldador.

O isolamento dos componentes elétricos da fonte de soldagem é de extrema importância para a manutenção do equipamento e sua confiabilidade. Ainda, deve existir uma limitação da tensão em vazio da fonte, ou de apropriado controle desta, de modo a evitar ocorrências de choques elétricos. É importante também a adesão de chave-faca no cabo de força (cabo do porta-eletrodos), conforme apresentado na Figura 6.

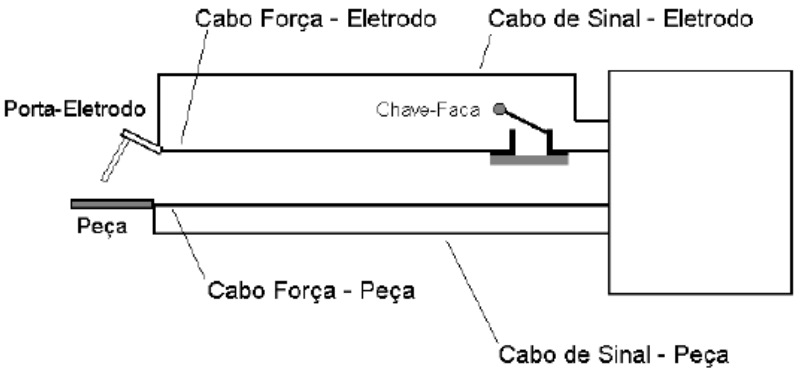

Figura 6. Configuração recomendada para a execução de procedimentos de soldagem molhada.

A tensão de circuito aberto da fonte de soldagem deve ser suficiente para prover a corrente apropriada ao arco elétrico, requerendo, portanto, maior potência para aplicações em ambiente molhado se comparado ao ambiente seco. Wood *et al*. [45] relata que a falta de potência da fonte é um dos fatores responsáveis pela diminuição da qualidade da solda com o aumento da profundidade. É possível que isto ocorra, principalmente, pela maior limitação da fonte em prover potência necessária ao arco elétrico.

Szelagowski [46] comparou duas fontes de soldagem: uma analógica transistorizada e uma fonte convencional com um sistema de estabilização do arco. Avaliando a aplicabilidade das fontes quanto a ignição e estabilidade do arco, constatou-se que a fonte analógica apresentou dificuldades na abertura de arco, dado a menor tensão em vazio da mesma (56V), enquanto a fonte convencional apresentou problemas durante os transientes de tensão e corrente, resultando em um processo instável. Relatou-se que a dinâmica de resposta da fonte analógica, juntamente com a característica estática de corrente constante explicam o melhor comportamento do processo.

Para a soldagem submarina molhada, relata-se a utilização de vários tipos de características estáticas. As pesquisas iniciais no LABSOLDA contaram com ensaios que, em sua maioria, foram realizados com fontes com característica estática de tensão constante [11].

Segundo [12], conversores rotativos, os quais apresentam comportamento estático de corrente constante, possuem vantagem quanto a manutenção do arco elétrico, a qual consiste na produção de picos de corrente durante os curtos-circuitos, conforme mostra a Figura 7.

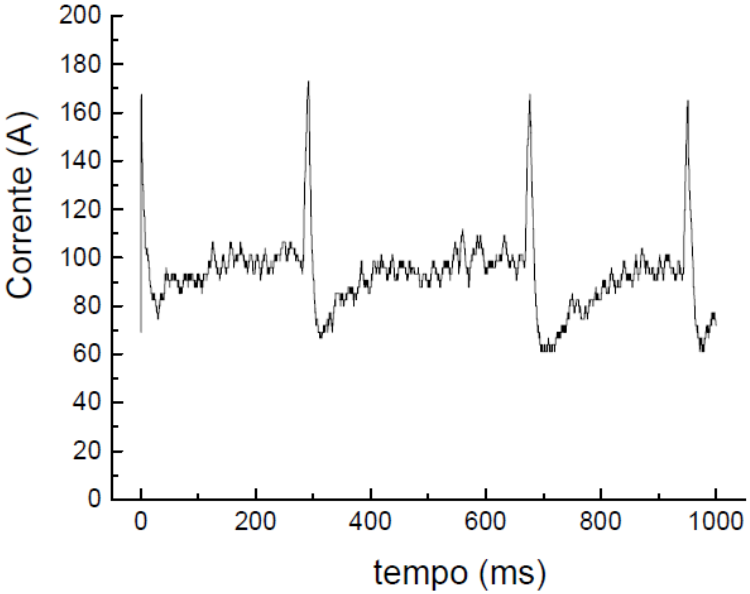

Figura 7. Surtos de corrente provocados durante eventos de curto-circuito. Fonte [12].

O avanço tecnológico, principalmente com o advento dos transistorizes, têm permitido o desenvolvimento de fontes de soldagem que abarcam tais funcionalidades, porém com maior controle das variáveis, como no caso da IMC HipER-1. Além disto, a possibilidade de utilizar corrente pulsada pode trazer benefícios para a robustez do processo e para as características metalúrgicas da junta soldada.

2.4 Arc Voltage Control (AVC)

Na soldagem manual, o comprimento do arco é controlado pelo soldador, ocorrendo naturalmente variações durante a execução do cordão. Embora tais flutuações da tensão não afetem grosseiramente a corrente imposta pela fonte, cuja característica estática é de corrente constante, um dos fatores críticos na obtenção de uma solda de qualidade é o controle do comprimento do arco.

O soldador é capaz de controlar a velocidade de alimentação através da observação visual do comprimento do arco e da audição do som emitido, apenas quando a solda é realizada em ambiente seco. Na soldagem subaquática, este controle se torna muito mais difícil [42].

Lima II e Bracarense [42] afirmam que a grande dificuldade de se aplicar o processo eletrodo revestido em robôs industriais é a impossibilidade de se programar diretamente a trajetória para soldagem, uma vez que o movimento de mergulho do eletrodo e, consequentemente, a trajetória do porta-eletrodos não são previamente conhecidos.

No processo TIG é comum a adoção do sistema AVC (do inglês, *Arc Voltage Control*), onde a partir de uma tensão de referência regulada, o controlador efetua constantes leituras da tensão do arco, e atua no eixo do manipulador perpendicular à peça, de modo a aproximar ou afastar o eletrodo da peça de modo a atingir a tensão de referência. Pigozzo [47] afirma que as técnicas de controle do sistema AVC são de fundamental importância para o bom desempenho do equipamento.

A adoção do sistema AVC e sua adaptação para o processo Eletrodo Revestido pode sanar os problemas oriundos das flutuações da tensão durante os processos, além de alavancar a qualidade e desempenho de soldas submarinas molhadas.

2.5 Estado da Arte na Soldagem Submarina Molhada com Eletrodos Revestidos

Atualmente, a melhoria dos processos destinados ao ambiente molhado ainda está em voga, demandando esforços e elencando instituições ao redor do mundo dedicadas a tal tarefa.

O *Institut für Werkstoffkunde* na Leibniz Universität Hannover (Alemanha) têm desenvolvido novos consumíveis para soldagem submarina molhada. Para a realização de estudos mais fidedignos, o instituto conta com uma infraestrutura que permite simular profundidades de até 300m, abarcando variáveis como salinidade e temperatura da água [48]. Para isto, contam com uma câmara hiperbárica e um sistema automatizado para soldagem submarina molhada com eletrodos revestidos, desenvolvido especialmente para esta aplicação.

O *State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining*, do Harbin Institute of Technology, na China, apresentou em 2017 artigos referentes ao estudo sobre a dinâmica das bolhas utilizando shadowgrafia e câmera de alta velocidade.

No Brasil, a Universidade Federal de Minas Gerais tem focado no desenvolvimento de eletrodos revestidos para soldagem em ambiente molhado. Um dos principais ganhos para a área é a investigação produção de eletrodos de composição oxi-rutílica [49]. Reporta-se que tais consumíveis promovem fácil abertura e boa estabilidade do arco (característica dos eletrodos rutílicos), com a redução de hidrogênio difusível (eletrodo oxidante), agregando também melhorias nas propriedades mecânicas do metal de solda, a partir da adição de elementos de liga como o níquel e molibdênio no revestimento do eletrodo [50].

O Laboratório de Soldagem e Mecatrónica – LABSOLDA, da Universidade Federal de Santa Catarina, tem desenvolvido em parceria com a Petrobrás e a IMC Soldagem fontes de alta tecnologia destinadas à execução de procedimentos subaquáticos, resultando nas fontes HipER-1 (eletrodo revestido) e HipER-2 (arame tubular). Além disto, tem dispendido esforços para a automatização e aprimoramento dos processos em ambiente molhado.

3 ESTUDOS PRELIMINARES

Inicialmente buscou-se constatar os pontos principais para a automatização do processo de soldagem com eletrodos revestidos. Conhecer as barreiras à automatização eletrodo revestido permite, portanto, estabelecer metodologias para contornar as dificuldades, de modo a garantir a execução do procedimento de maneira confiável.

O programa base utilizado para o desenvolvimento da lógica do manipulador foi o AVC do processo TIG desenvolvido pela SPS – Sistemas e Processos de Soldagem.

Sem quaisquer modificações do AVC e intervenções da fonte HipER-1, a abertura de arco em ambiente molhado ocorria com sucesso em torno de 20% das tentativas apenas, forçando a execução dos testes iniciais em ambiente seco. Tal abertura era realizada por toque, de modo que ao habilitar o processo o eixo Z aproximava o eletrodo da peça, até o toque (curto-circuito), retraindo-o em seguida. A corrente de soldagem era imposta a partir do toque entre o eletrodo e a peça.

Mesmo com a abertura do arco, a manutenção do mesmo foi deficiente, resultando em frequentes extinções em ambiente molhado. A tensão de referência selecionada na IHM para manter um comprimento de arco adequado (2 a 3 mm, visualmente) foi em torno de 12 a 15V, incompatíveis com a tensão de arco real do processo eletrodo revestido. A Figura 8 apresenta a tensão de arco em função da tensão de referência nos estágios iniciais do estudo, em ambiente seco.

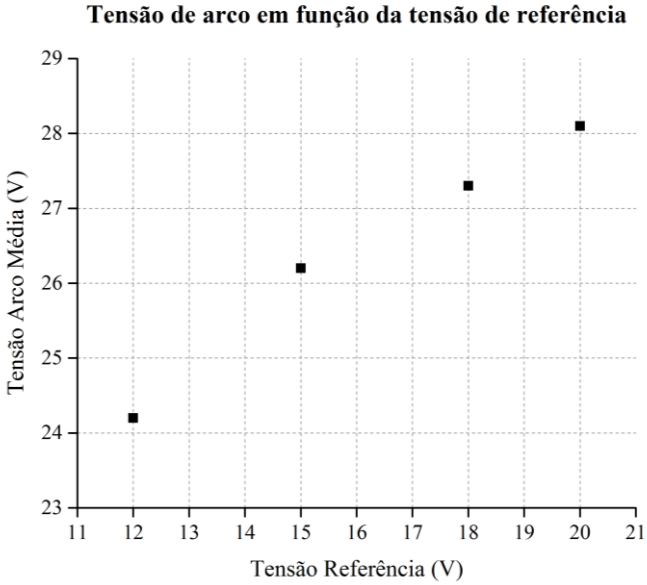

Figura 8. Tensão de arco em função da tensão de referência.

A variação do comprimento de arco ao longo do procedimento evidenciou que a queda de tensão nos eletrodos possui valor relevante e exerce influência sobre o processo, o que torna necessária realizar tal correção.

A Figura 9 apresenta cordões realizados nos estágios iniciais deste trabalho. Tais ensaios foram conduzidos em ambiente molhado.

Figura 9. Aspecto visual dos cordões durante os estágios iniciais do estudo.

Constatou-se, portanto, quatro barreiras iniciais à automatização do processo de soldagem com eletrodos revestidos, e que devem ser superadas para o avanço no desenvolvimento de sistemas automatizados. São estas:

1. Abertura de arco;
2. Controle do comprimento do arco com dinâmica adequada;
3. Compensação da queda de tensão nos eletrodos revestidos;
4. Seleção dos parâmetros elétricos adequados e manutenção do arco.

A seguir, são apresentadas as metodologias utilizadas para superar as barreiras supracitadas. Quanto a barreira de número quatro, a solução desta culminou primeiramente no estudo do processo em ambiente molhado para elencar os requisitos de um procedimento estável.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações Iniciais

Os eletrodos utilizados ao longo deste trabalho foram, predominantemente, o E6013 (rutílico) 2,5 mm de diâmetro impermeabilizados com resina acrílica. Eletrodos E7018 (básico) igualmente impermeabilizados também foram utilizados posteriormente. Tais eletrodos foram selecionados em detrimento de consumíveis próprios para tal aplicação devido a maior facilidade de obtenção e menor custo, tendo em vista a grande quantidade de ensaios necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

O processo de impermeabilização consistiu na imersão dos eletrodos na resina, colocando-os logo após para secar na posição vertical. Foram aplicadas duas camadas, com um período de 24 horas entre cada aplicação. A Figura 10 apresenta os eletrodos em processo de impermeabilização.

Figura 10. Eletrodos E6013 postos para secagem. Procedimento de impermeabilização.

Como substrato, utilizou-se em geral chapas de aço carbono 1020 de 1/4" (6,35 mm). Antes de cada procedimento, a camada de óxidos e

demais impurezas na superfície das chapas foi removida visando maior confiabilidade de repetitividade durante os ensaios de parametrização e desenvolvimento do sistema.

Os ensaios realizados compreenderam a utilização de um Tartílope V2 na posição horizontal, conforme apresentado pela Figura 11. Tal equipamento foi adaptado, de modo a utilizar o convencional eixo Y como o eixo Z (vertical), devido ao maior comprimento do mesmo, o que possibilitaria o consumo completo do eletrodo.

Figura 11. Tartílope V2 adaptado para a soldagem com eletrodos revestidos.

As aquisições dos sinais de tensão, corrente e posição do manipulador foram realizadas por meio do Sistema de Aquisição de dados Portátil (SAP) IMC, com um transdutor de deslocamento de 10 cm, que, quando utilizado, foi acoplado no eixo Z do manipulador, conforme a Figura 12.

Figura 12. Transdutor de posição acoplado ao eixo Z do Tartílope V2.

Para os ensaios em ambiente molhado, uma cuba d'água de dimensões 210 x 780 x 250 mm (comprimento x largura x altura) foi utilizada, totalizando volume máximo de 41 litros (usou-se geralmente 90% da capacidade da cuba d'água, ou seja, cerca de 37 litros). A altura da coluna d'agua foi de aproximadamente 220 mm (0,22 m). Tal recipiente possui um vidro que possibilita a observação do procedimento de soldagem. Utilizou-se água doce devido a maior disponibilidade. A Figura 13 apresenta a cuba utilizada.

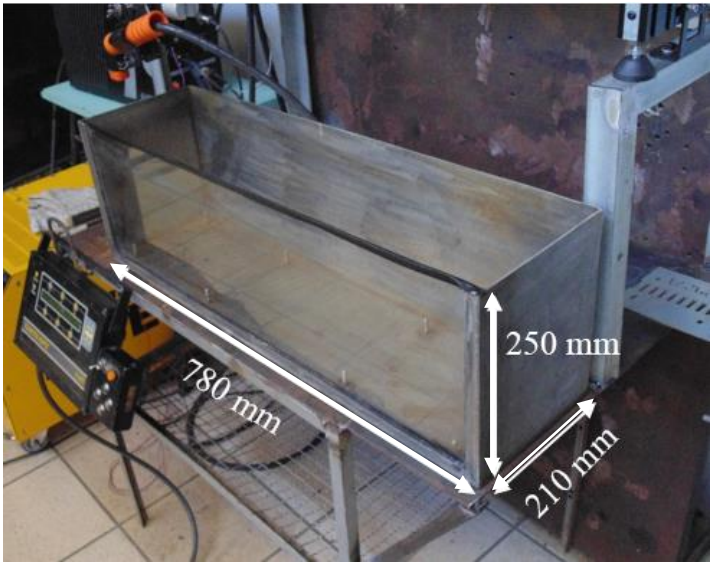

Figura 13. Cuba d'água utilizada nos experimentos.

4.2 Abertura de Arco

Dado que a abertura do arco elétrico é um fator preponderante na repetitividade e estabilidade do processo, métodos especiais devem ser desenvolvidos e avaliados de forma a buscar-se a melhor condição de operação possível.

Deste modo, aplicaram-se lógicas de controle de forma a conferir um comportamento do sistema semelhante ao executado pelo soldador, porém com um tempo de resposta menor, maior repetitividade e precisão dos movimentos iniciais concernentes à abertura do arco. Este comportamento almejado compreende em aliar as duas técnicas de abertura de arco predominantes: a primeira, em que consiste riscar a peça com o eletrodo e a segunda, baseada no toque do eletrodo na peça e sua rápida retração.

Diversos ensaios foram realizados alterando-se a lógica do controlador de acordo com as dificuldades encontradas, tanto em ambiente seco quanto molhado, de forma a adequar o sistema aos requisitos do processo durante seu estágio inicial.

As funcionalidades da fonte HipER-1 também foram avaliadas, dando enfoque principal à rotina de abertura de arco, neste caso.

O comportamento do manipulador foi observado utilizando-se o SAP com um apalpador de 100 mm (suficiente para obter os movimentos iniciais do Eixo Z).

Com base nos dados obtidos, parametrizou-se o sistema para ambos os ambientes seco e molhado.

4.3 Controle do Comprimento do Arco

Diferentemente do processo TIG, no qual o AVC é comumente aplicado, frequentes variações na tensão de soldagem ocorrem durante o processo eletrodo revestido devido às características da transferência metálica do processo. Eventos de curto-circuito resultam em uma queda na tensão do processo, seguida por um pico de tensão devido à reabertura do arco. O destacamento irregular de gotas em voo livre também possui contribuição significativa para oscilações da tensão de arco

Isto implica na necessidade da aplicação de filtros na leitura de tensão para o desenvolvimento de um sistema AVC para o processo eletrodo revestido, objetivando a atenuação dos ruídos e variações oriundas dos eventos que ocorrem no arco elétrico, buscando obter valores de tensão que melhor representam o comprimento do arco durante o processo.

Por meio de aquisições de dados do SAP, foi possível aplicar o filtro sobre os valores aquisitados de modo a observar o comportamento da tensão lida pelo AVC, e de que maneira ele veio a atuar.

Utilizou-se um controlador PID, avaliando-se a aplicabilidade de apenas um ganho proporcional (Kp), como no processo TIG, e a adesão do controle integrativo e derivativo (Ki e Kd, respectivamente).

4.4 Queda de Tensão nos Eletrodos

Sabe-se que como qualquer metal, a alma do eletrodo possui resistência à passagem de corrente elétrica. Embora tal resistência possua valores baixos (na ordem de centésimos de Ohm, em geral), os níveis de corrente utilizados na soldagem resultam em uma queda de tensão no eletrodo, que varia durante o processo devido à temperatura e consumo do mesmo.

Para avaliar a influência da variação da queda de tensão no eletrodo durante o processo, foram medidos os sinais de tensão ao longo da soldagem, permitindo avaliar se há uma tendência a reduzir a frequência de curtos-circuitos durante o procedimento (comprimento do arco aumentado durante o processo).

A partir da comprovação do que foi comentado, determinou-se metodologias de modo a compensar a queda de tensão no eletrodo e manter o comprimento do arco. A validação da metodologia baseou-se, mais uma vez, na observação da ocorrência dos curtos-circuitos durante o processo.

4.5 Estudo do Processo de Soldagem Submarina Molhada com Eletrodos Revestidos.

Nesta etapa é apresentada a metodologia utilizada com o intuito de estudar o comportamento do processo, analisando a influência da polaridade, corrente e tensão, dinâmica das bolhas e taxa de fusão, basicamente. Ainda, almeja-se investigar os fenômenos causadores de instabilidades no arco.

Questões como geometria e qualidade dos cordões não foram levadas em consideração nesta etapa, focando apenas no comportamento do processo.

4.5.1 Efeito dos parâmetros elétricos no processo em ambiente molhado

Ensaios realizados em ambiente seco apresentaram excelente desempenho e estabilidade, abarcando uma ampla gama de parâmetros (tensão e corrente) utilizáveis. No entanto, dificuldades foram encontradas ao realizar procedimentos em ambiente molhado. Isto tornou necessário o estudo dos fenômenos presentes no processo e seus efeitos sobre o arco elétrico. Deste modo, o estudo se concentrou no comportamento do processo, no que tange à dinâmica das bolhas e sua relação com a estabilidade do arco, efeito da polaridade, corrente e tensão.

Ensaios foram realizados variando-se os níveis de corrente em 75, 90, 110 e 130A para ambas as polaridades direta (CC-) e reversa (CC+), em ambiente molhado, obtendo-se sinais de corrente e tensão durante o procedimento. A tensão de referência foi ajustada para cada nível de corrente e polaridade, de forma a manter o comprimento de arco curto e semelhante entre os ensaios. O comprimento do arco foi ajustado visualmente.

Após a obtenção de uma condição estável de corrente e polaridade, realizou-se ensaios variando a tensão de referência do AVC (comprimento do arco), com o intuito de verificar se o comprimento do arco é um fator preponderante para a ocorrência de instabilidades em ambiente molhado.

Foi dada relevância aos instantes prévios à extinção do arco elétrico, bem como a investigação de possíveis indícios da futura ocorrência de tal efeito.

Para observar o comportamento das bolhas na região do arco elétrico, foram realizadas filmagens em alta velocidade. A Figura 14 apresenta o *setup* utilizado para as filmagens. A câmera foi posicionada perpendicularmente ao sentido de movimento do eletrodo, de modo a evitar a ocorrência de excessivas distorções na imagem devido a presença da água. Para melhor visualização, uma peça com secção branca foi posicionada atrás do eletrodo, estando este, portanto, entre a câmera e tal peça. Os ensaios foram realizados com água doce, a uma profundidade de aproximadamente 25 cm. As filmagens foram realizadas com a câmera IDT Motion PRO, contando com iluminação laser CAVILUX, à uma taxa de aquisição de imagens de 2000 quadros por segundo e de dados de corrente e tensão à 25kHz.

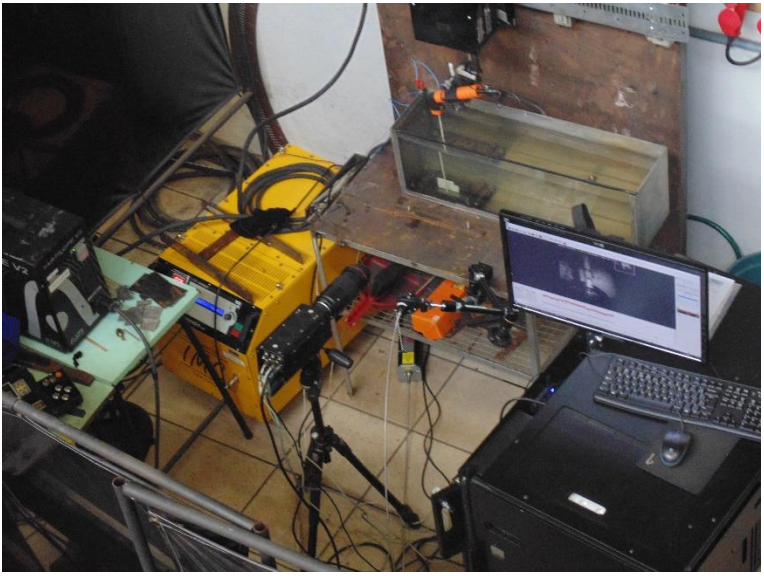

Figura 14. Montagem da bancada para realização das filmagens em alta velocidade.

As medições do tamanho das bolhas foram realizadas a partir da aplicação de um *grid* sobre a filmagem. Assumiu-se um formato esférico para as bolhas, de modo a simplificar as medições, atribuindo um caráter

principalmente qualitativo às análises. O diâmetro considerado, conforme apresentado pela Figura 15, é referente ao máximo comprimento “d” enquanto a bolha ainda estava na região do arco elétrico.

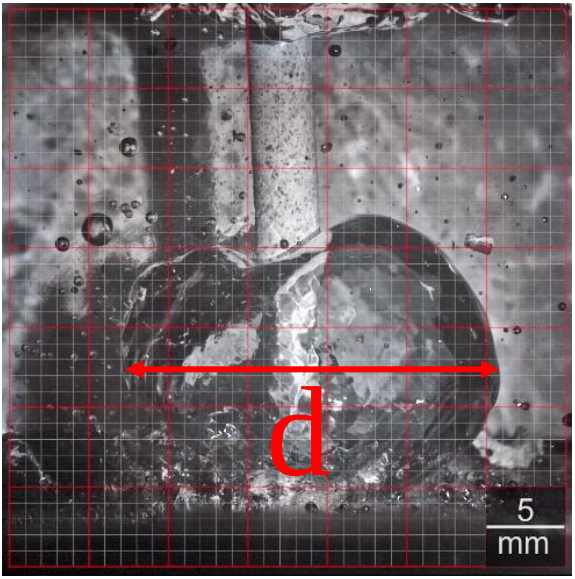

Figura 15. Modo de medição do diâmetro das bolhas.

Ensaios adicionais foram realizados com o intuito de obter a taxa de fusão dos eletrodos nas condições apresentadas anteriormente quanto aos níveis de corrente e polaridades em ambiente molhado, nas mesmas condições utilizadas para as filmagens. O objetivo foi observar se existe alguma relação da taxa de fusão (e, portanto, formação de fumos) com a dinâmica das bolhas. Foi obtida a taxa de consumo dos eletrodos por meio de um apalpador acoplado no braço do manipulador, que atuou a partir da região central do cordão, desconsiderando portanto o regime transiente no início do processo.

4.5.2 Aplicabilidade da corrente pulsada em soldagem submarina molhada com eletrodos revestidos

Para avaliar a aplicabilidade da corrente pulsada, tendo em vista observar se há aumento da rigidez do arco, além de seus efeitos sobre a geometria do cordão, correlacionando aos resultados obtidos nos ensaios tratados no subitem 4.5.1, ensaios foram conduzidos em ambiente

molhado, sob as mesmas condições anteriores, utilizando o modo corrente pulsada da fonte HipER-1.

O almejado por esta análise não é uma abrangente discretização da corrente pulsada em tal aplicação, uma vez que analisar uma gama ampla de frequências e amplitudes de pulsação da corrente, duty cycle e corrente média resultariam em uma matriz de ensaios muito grande.

A partir dos resultados obtidos no tópico anterior, optou-se por utilizar uma corrente média de 110A e polaridade direta para os ensaios com a corrente pulsada, tendo em vista o bom desempenho apresentado pelo mesmo. Para avaliar o efeito da frequência no processo, foram selecionados três valores: 5, 20 e 50 Hz. A justificativa para esta escolha é: primeiramente utilizar uma frequência baixa, semelhante a utilizada por Suga e Hasui [16], tendo reportado boa estabilidade do arco em soldagem molhada com eletrodos revestidos. As frequências maiores serviriam para avaliar se a redução do período e, portanto, o tempo de base, contribuiria para evitar instabilidades durante os instantes de nível de corrente mais baixo. Além disso, sabe-se o aumento da frequência de pulsação, no processo MIG/MAG, resulta em melhoria na rigidez do arco. É almejado observar se tal efeito também ocorre na soldagem molhada com eletrodos revestidos.

As amplitudes de pulsação selecionadas foram de 30 (Ip = 125A e Ib = 95A) e 100A (Ip = 160A e Ib = 60A). As justificativas para a escolha destes valores são, primeiramente: avaliar a utilização de corrente de base que esteja dentro de uma faixa de segurança, ou seja, em valores de corrente que não tenham apresentado demasiada instabilidade nos ensaios com corrente constante. Além disto, busca-se observar se uma amplitude elevada pode contribuir para a estabilidade do arco, ou se o patamar de corrente mais baixo será preponderante e causará instabilidades, mesmo com frequências maiores de pulsação.

Os ensaios foram conduzidos sob as mesmas condições aos realizados com corrente constante, utilizando eletrodos E6013 de 2,5 mm de diâmetro. A Tabela 1 apresenta a matriz de ensaios.

Tabela 1. Matriz de ensaios realizados.

		Amplitude (A)	
		30	100
Freq. (Hz)	5	Ensaio 5/30	Ensaio 5/100
	20	Ensaio 20/30	Ensaio 20/100
	50	Ensaio 50/30	Ensaio 50/100

Foram comparados os aspectos visuais e geométricos dos cordões com corrente pulsada e constante para as condições que demonstraram bom desempenho do processo. Além disto, a taxa de consumo dos eletrodos também foi obtida, com intuito de verificar a influência da pulsação sobre a fusão dos eletrodos.

5 DESENVOLVIMENTO DO AVC PARA SOLDAGEM SUBMARINA MOLHADA

Este capítulo trata sobre os resultados adquiridos durante o desenvolvimento do sistema AVC e suas funcionalidades para o processo de soldagem eletrodo revestido. Tendo em vista os diversos parâmetros adicionados na IHM durante o curso deste trabalho (discutidos neste capítulo), os valores recomendados podem ser consultados no **Apêndice A**.

5.1 Abertura de Arco

A abertura de arco, conforme mencionado anteriormente, busca simular os procedimentos realizados por um soldador, porém com maior robustez (maior repetitividade e controle das variáveis).

Basicamente, dois modos de abertura estão presentes nos processos de soldagem a arco: toque ou alta-frequência. Este, embora facilite a abertura, apresenta efeitos deletérios sobre os equipamentos do circuito elétrico e ao redor dos mesmos. Além disto, utilizar tensões muito elevadas, da ordem de milhares de Volts, para a abertura de arco em ambiente molhado poderia agravar tais problemas e alavancar os riscos para os operadores.

A abertura por toque, portanto, é a mais utilizada. Embora no processo TIG exista controvérsias para a sua utilização (como a contaminação na ponta do eletrodo), esta é a alternativa utilizada no processo Eletrodo Revestido, onde não há a necessidade da adesão de abertura por alta-frequência.

A automatização da abertura por toque é comum para o processo TIG. O AVC para tal processo desenvolvido no LABSOLDA atua avançando o eletrodo em direção à peça após o disparo do processo pelo operador até detectar o toque por meio da queda de tensão; o manipulador então recua o eletrodo e o AVC começa a atuar.

Aqui buscou-se, portanto, adequar a lógica de abertura para o eletrodo revestido, agregando as características individuais de tal processo de soldagem.

5.1.1 Lógica Inicial (I)

Ao habilitar o processo, a fonte libera a tensão em vazio, da ordem de 85 V. Ao detectar uma tensão acima da referência, o manipulador

move-se em ambos os eixos X e Z, a velocidades distintas “vAx” e “vAz”, (velocidade de aproximação em X e Z, respectivamente) selecionadas na IHM previamente. Quanto ao eixo Z (vertical), o manipulador realizará o movimento por uma distância máxima de 50 mm. Caso não seja identificado o contato elétrico, haverá o cancelamento do procedimento de abertura evitando que o eletrodo seja impelido contra a peça caso o contato não seja favorável (não ocorra o curto-circuito).

O AVC então detecta o contato elétrico quando a tensão lida é inferior à tensão de referência. Optou-se por configurar o sistema desta maneira pois dependendo da qualidade do contato elétrico entre o eletrodo e a peça, valores de tensão diferentes poderiam configurar o encontro entre as duas superfícies em situações distintas, o que não somente acarretaria no acréscimo de mais uma variável na IHM, como também maior dificuldade de parametrização. Um exemplo disso seria configurar o toque entre eletrodo e peça quando a tensão for inferior a 5 V. Em situações onde o contato elétrico é favorecido pela limpeza das superfícies, não haveriam problemas, entretanto, situações desfavoráveis (diversas impurezas nas superfícies) poderiam impedir que o AVC detectasse o toque.

Assim, após detectar o toque, o manipulador recua o eixo Z à uma distância “Rec” e velocidade “vRz” selecionadas previamente na IHM. É possível também selecionar uma velocidade de recuo para o eixo X “vRx”. A partir deste momento, o AVC passa a atuar. A seleção destes parâmetros deve buscar conferir ao sistema um tempo de resposta inferior ao ser humano, reduzindo assim a ocorrência de falhas na abertura do arco (colagem do eletrodo na peça, por exemplo). Em geral, valores entre 1 e 3 mm para “Prec” e velocidade “vRz” em torno de 10 mm/s apresentam bons resultados.

Nesta etapa, deve-se considerar que em ambiente molhado a tensão do arco será superior que em ambiente seco. Assim, é recomendável que se utilize distâncias (Rec) inferiores ou igual a 3 mm, de forma a garantir que: (1) não ocorra a extinção do arco no momento da abertura (Uarco superar tensão limite da fonte para dada corrente) e (2) o erro acumulado inicial não seja excessivo, o que pode, consequentemente, fazer com que o AVC projete o eletrodo contra a peça no início do processo – este efeito e sua solução será tratado à frente.

O fluxograma da Figura 16 apresenta a lógica utilizada pelo sistema até então.

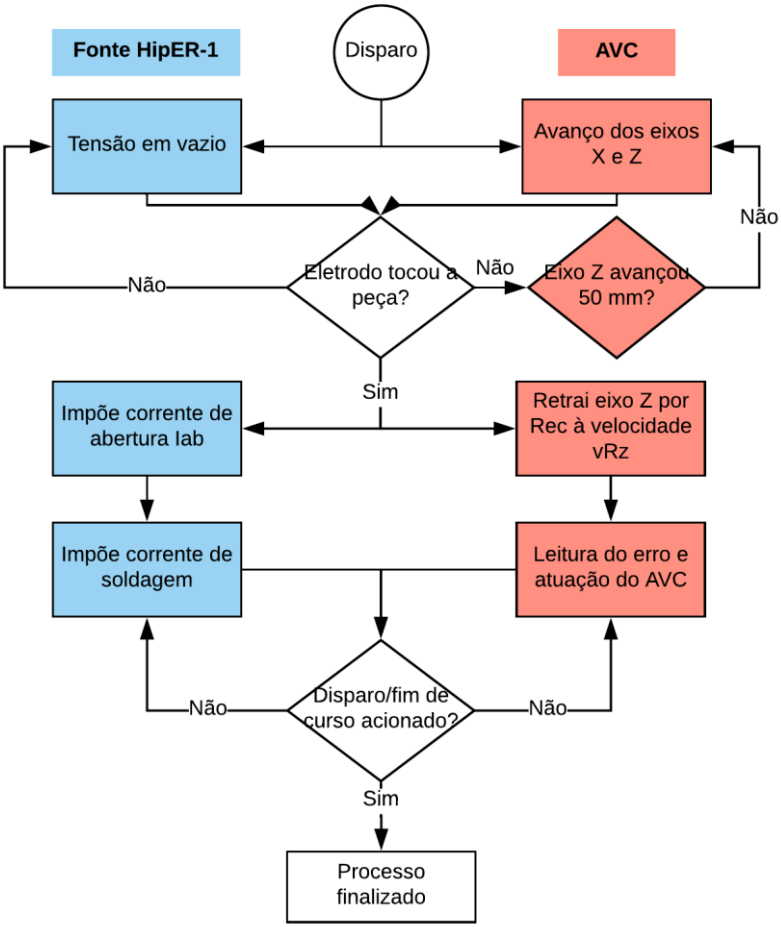

Figura 16. Fluxograma contendo a lógica inicial do sistema, detalhando os comandos da fonte de soldagem e AVC.

Em procedimentos realizados em ambiente seco, esta metodologia não apresentou problemas. A aquisição de dados mostrou que logo após a retração do eletrodo a tensão de arco apresentava-se superior à tensão de referência. Dado que nestas condições, tal erro não é grande o suficiente para desestabilizar o processo logo no início, optou-se por manter o sistema desta forma. A Figura 17 apresenta a variação da tensão média durante a abertura de arco em ambiente seco. O gráfico foi traçado a partir

da média dos valores de tensão a cada 0,1 segundos (para facilitar a visualização). A distância retraída foi de 3 mm.

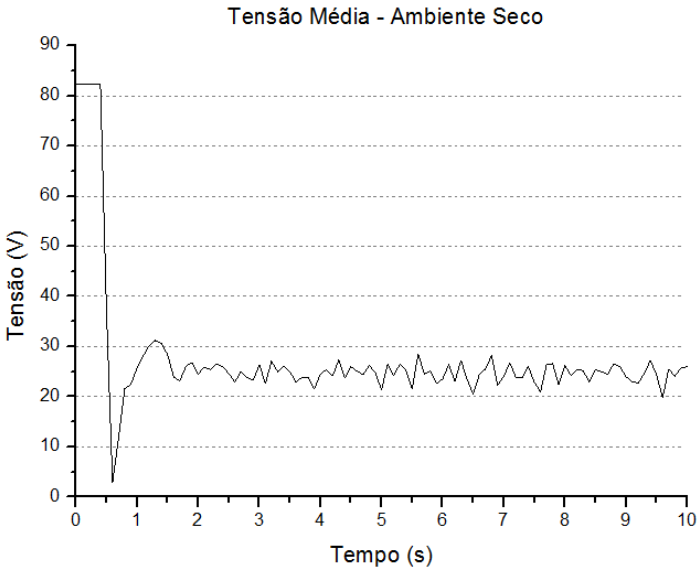

Figura 17. Oscilograma de tensão durante os estágios iniciais do procedimento de soldagem. Ambiente seco.

Nota-se que logo após o toque do eletrodo na peça (queda da tensão para um valor próximo a zero), a tensão passa a subir até a marca de 31 V. A partir disto, o AVC passa a atuar, reduzindo o comprimento do arco.

Ao dar início aos procedimentos subaquáticos, houveram diversos problemas durante e posterior à abertura do arco. As aquisições de dados evidenciaram que a retração do eletrodo resultava em uma tensão de arco muito elevada no início do processo (o que por vezes ocasionava na extinção do mesmo). Isto ocorre devido ao ambiente molhado, visto que a tensão de arco é maior em soldagem subaquática em comparação à soldagem a seco, para o mesmo comprimento de arco.

A Figura 18 apresenta a variação da tensão durante o procedimento de abertura, em ambiente molhado.

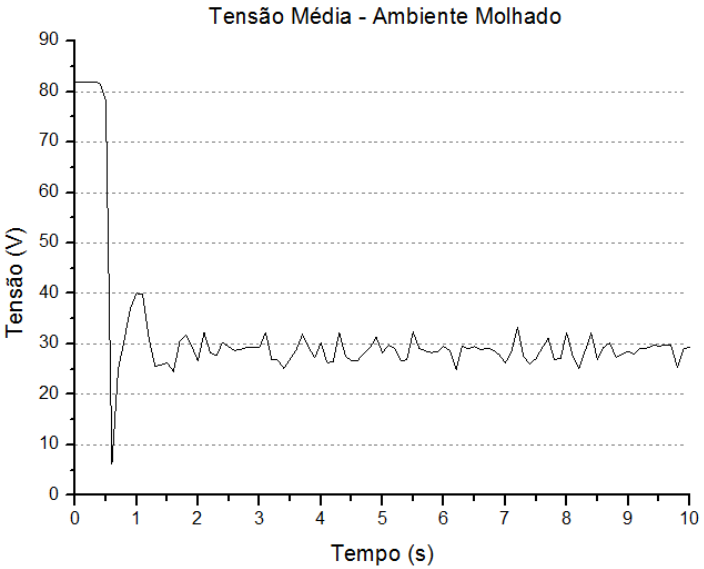

Figura 18. Oscilograma de tensão durante os estágios iniciais do procedimento de soldagem. Ambiente molhado.

Neste ensaio, a distância de retração foi de apenas 2 mm e a tensão de referência 27 V. Ainda assim, a maior tensão em ambiente molhado acarretou em uma tensão média de 40V durante a abertura. Dado o erro sobremodo elevado no início do processo, o AVC recorrentemente buscava corrigir bruscamente a altura do arco, o que ocasionava a projeção do eletrodo contra a peça, reduzindo a tensão média durante estes instantes. O AVC então, ao buscar estabelecer o comprimento de arco adequado, retrairia bruscamente o eletrodo, elevando mais uma vez o erro e conferindo, portanto, um caráter oscilatório para o comprimento do arco. Este efeito não ocorreu durante a realização do ensaio mostrado na Figura 18. Numerou-se esta problemática como a número 1.

Outro problema presente (número 2), embora pouco recorrente, era a não atuação do AVC no momento da abertura, o que indicava que em alguns casos o sistema era incapaz de detectar a abertura de arco.

Ao analisar os oscilogramas, constatou-se que a tensão no momento do toque entre eletrodo e peça não caía para os valores esperados (abaixo de 10V), mas que, quando utilizada alta corrente de abertura (da fonte HipER-1), a tensão era mantida em patamares elevados, em torno de 30V. É possível afirmar que em alguns casos a tensão no momento do toque manteve-se superior à tensão de referência, o que impossibilitaria a

identificação da abertura pelo sistema com a lógica atual. A Figura 19 apresenta o oscilograma de tensão e corrente no momento da abertura de arco, em ambiente molhado. O ensaio foi realizado utilizando corrente de abertura igual a 300A para forçar um nível de tensão maior durante a abertura de arco e elucidar o que aqui é tratado.

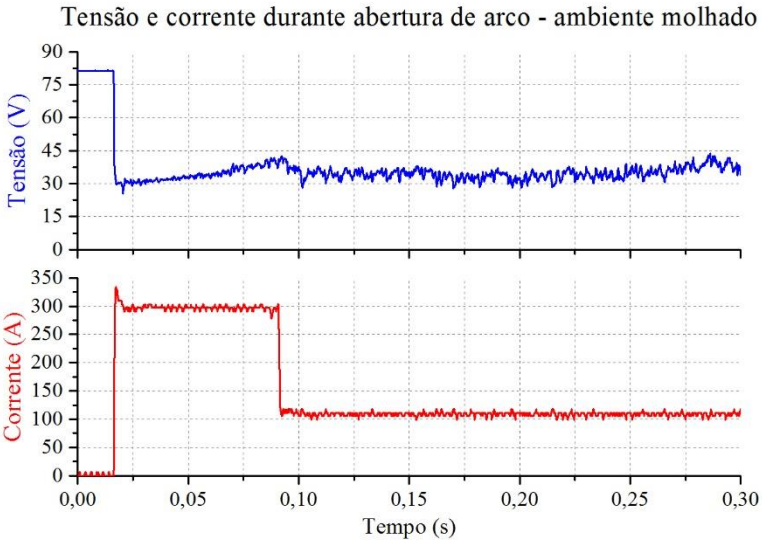

Figura 19. Oscilogramas de tensão e corrente durante abertura de arco. Ambiente molhado.

Em tal teste, a tensão de referência foi de 34V. Dado que a tensão caiu para aproximadamente 30V no momento do toque, o sistema executou a abertura do arco sem problemas. No entanto, a proximidade entre a tensão de abertura do arco e a tensão de referência mostra que é possível que em algumas ocasiões o sistema não detecte o toque do eletrodo na peça.

Uma vez que a utilização da corrente de abertura Iab apresentou melhoria considerável na abertura de arco, principalmente ao utilizar níveis iguais ou superiores a 200A, foi optado por mantê-la, buscando assim outra solução para a lógica de abertura.

Além disto, outro fator que exerce influência sobre a abertura do arco é o filtro de tensão do AVC (este será detalhado mais à frente). Caso

maior significância seja dada ao filtro, pode ocorrer um atraso entre a tensão real e a computada pelo AVC. Isto pode aumentar o tempo de resposta do sistema ao detectar o toque ou, em casos mais extremos (significância do filtro muito elevada) impossibilitar a detecção do mesmo.

Isto é ilustrado pela Figura 20. Extraiu-se o oscilograma de tensão nos instantes iniciais de um procedimento de soldagem e a partir de tais dados, aplicou-se um filtro com frequência de corte de 1 Hz, simulando o que seria observado pelo AVC.

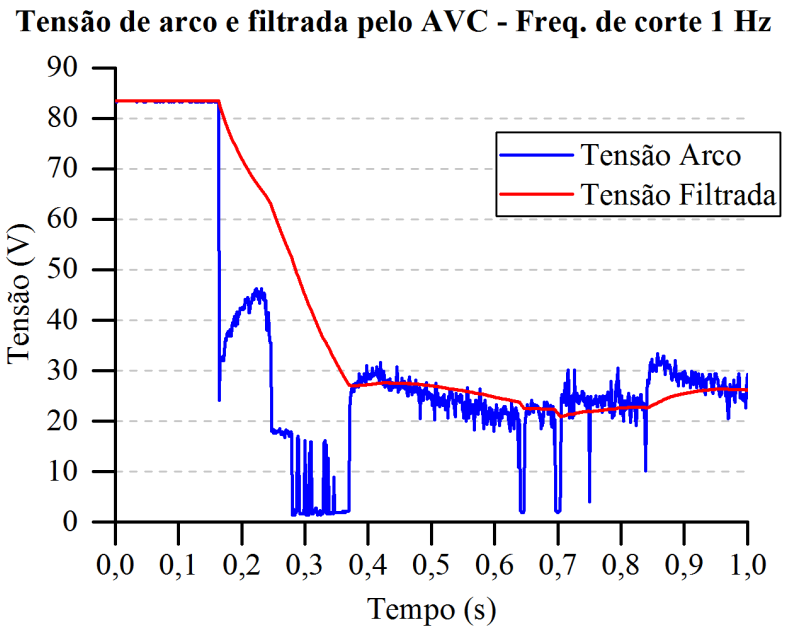

Figura 20. Tensão de arco (azul) e tensão após filtro do AVC (vermelho).

O pico de tensão logo após o toque entre o eletrodo e a peça (na marca de 0,15s aproximadamente) ocorreu devido a corrente de abertura. Após isto, estando ainda em condição de curto-circuito (queda da tensão para valores próximos a 0V), a fonte atuou aplicando a corrente de curto-circuito, o que permitiu realizar a abertura de arco. Observa-se no gráfico que estes eventos não seriam identificados pelo AVC caso o filtro em questão fosse utilizado. Considerou-se este como o problema número 3.

Portanto, em resumo:

- Problema 1: erro acumulado na abertura implica em uma brusca correção do comprimento do arco, projetando o eletrodo contra a peça impossibilitando a continuidade do procedimento;
- Problema 2: Corrente de abertura elevada faz com que, em alguns casos, a tensão não caia para valores inferiores à tensão de referência no momento do toque entre eletrodo e peça, impossibilitando a detecção do curto-circuito inicial.
- Problema 3: Caso um filtro de tensão com alta significância seja utilizado, é possível que o sistema não detecte a queda de tensão abaixo de valores previamente especificados (como abaixo da Uref, por exemplo), impossibilitando a detecção do curto-circuito inicial. Outro efeito é a presença de um atraso entre a tensão do processo e a lida pelo AVC.

Dado que este trabalho busca o desenvolvimento de um sistema robusto, os problemas relatados anteriormente deveriam ser solucionados. Seria, portanto, necessário garantir a detecção do toque e que no momento em que o AVC começar a computar erro e aplicar correções, a tensão de arco seja igual ou próxima o suficiente da tensão de referência, para que não ocorram bruscas oscilações durante o início do processo.

5.1.2 Lógica Final (II)

Para solucionar o problema 1, modificou-se o modo de atuação do AVC nos estágios iniciais:

I. Ao habilitar o processo, o manipulador aproxima o eletrodo da peça;
II. Ao detectar o toque, o eletrodo é retraído à uma velocidade e distância previamente selecionadas;
III. O AVC então verifica se a tensão de arco é ou não superior à tensão de referência (considerando-se a zona morta):
    - Caso Uarco ≤ Uref: sistema computa erro e atua sobre o processo.
    - Caso Uarco > Uref: sistema alimenta o eletrodo em malha aberta, até que Uarco ≤ Uref. Após esta condição ser atingida, o sistema computa erro e atua sobre o processo.

A velocidade de alimentação em malha aberta é igual à velocidade de correção máxima do sistema, que pode ser configurado na IHM. Em

geral, após alguns testes, manteve-se por padrão 15 mm/s, isto porquê ensaios apresentaram que a taxa de fusão dos eletrodos E6013 2,5mm diâmetro atinge até aproximadamente 10 mm/s com 130A e polaridade direta. Deste modo, deve-se garantir que a velocidade de correção em malha aberta será sempre superior à taxa de consumo dos eletrodos.

A Figura 21 apresenta o fluxograma da lógica do sistema após as modificações descritas anteriormente, destacando os blocos acrescentados.

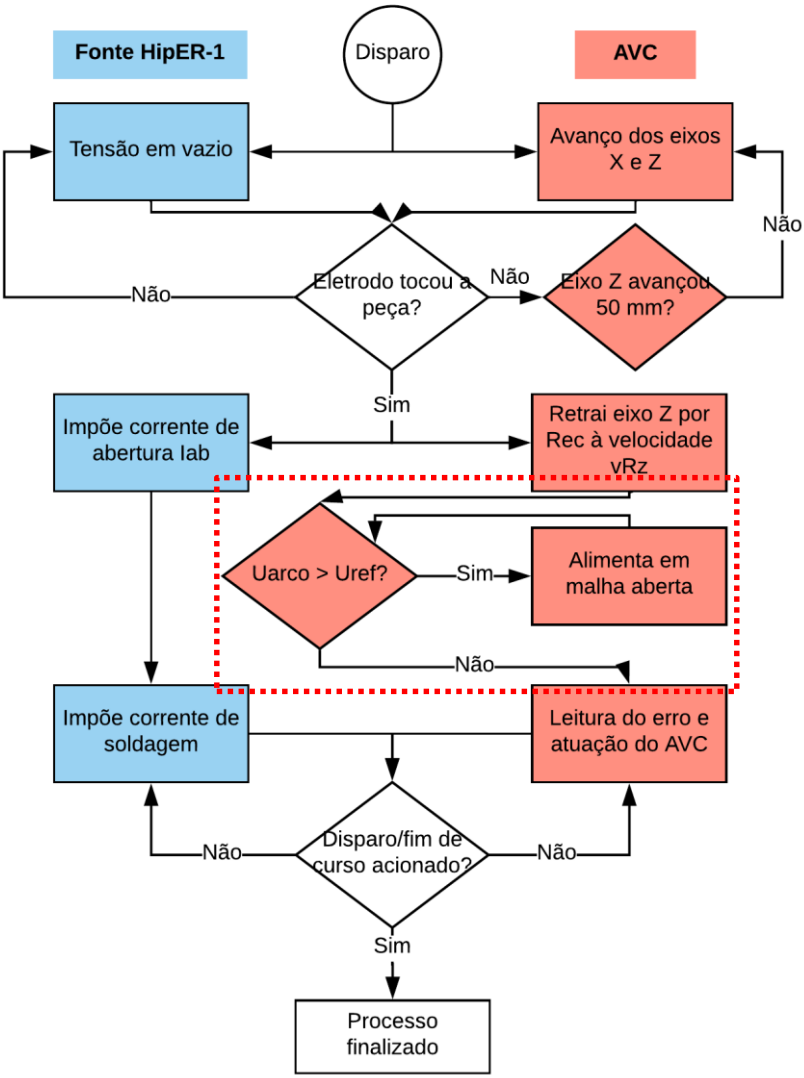

Figura 21. Fluxograma contendo a lógica final do sistema, detalhando os comandos da fonte de soldagem e AVC.

A Figura 22 apresenta o oscilograma contendo os valores de tensão e posição do eixo Z durante a abertura do arco em ambiente seco. Os

parâmetros utilizados foram: U_{ref} = 24V; Rec 10 mm; vRz 15mm/s; A velocidade de alimentação máxima (VzS) foi de 10 mm/s.

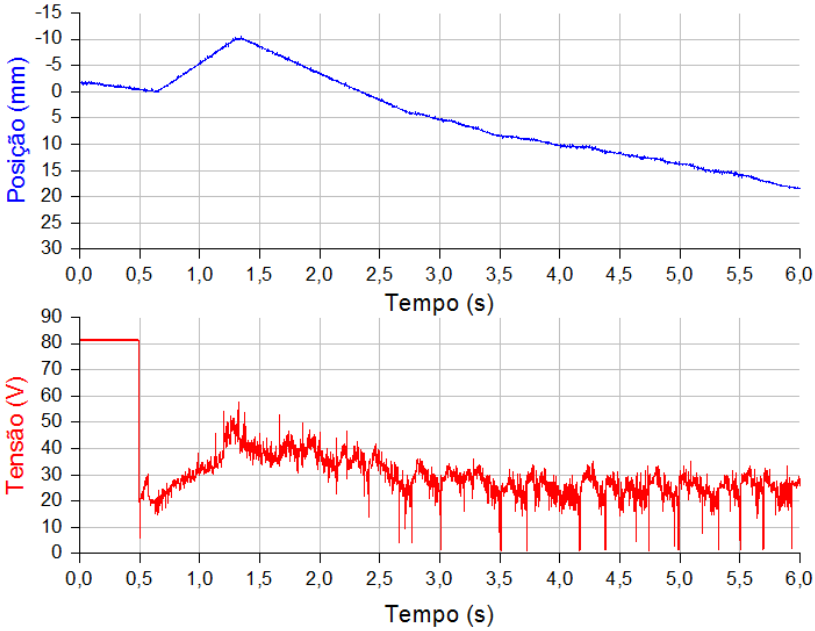

Figura 22. Posição do eixo Z e tensão de arco ao longo do tempo. Ambiente seco.

Nota-se que o sistema respeitou todos os parâmetros de entrada: ao detectar o toque, o eixo Z foi retraído por 10mm por 0,66s (15mm/s); após isto, dado que a tensão estava superior à Uref (na marca de aproximadamente 1,3s), deu-se início à alimentação em malha aberta (movimento linear). A variação da posição foi de 14 mm, durante 1,4 segundos, resultando em uma velocidade de 10 mm/s; após detectar Uarc ≤ Uref, o AVC começou a atuar (malha fechada).

O sistema apresentou comportamento semelhante em ambiente molhado, conforme mostra a Figura 23. Entretanto, para este caso, dado a maior sensibilidade em ambiente molhado, utilizou-se distância de retração igual a 4 mm. A tensão de referência foi 33 V. Os demais parâmetros foram mantidos.

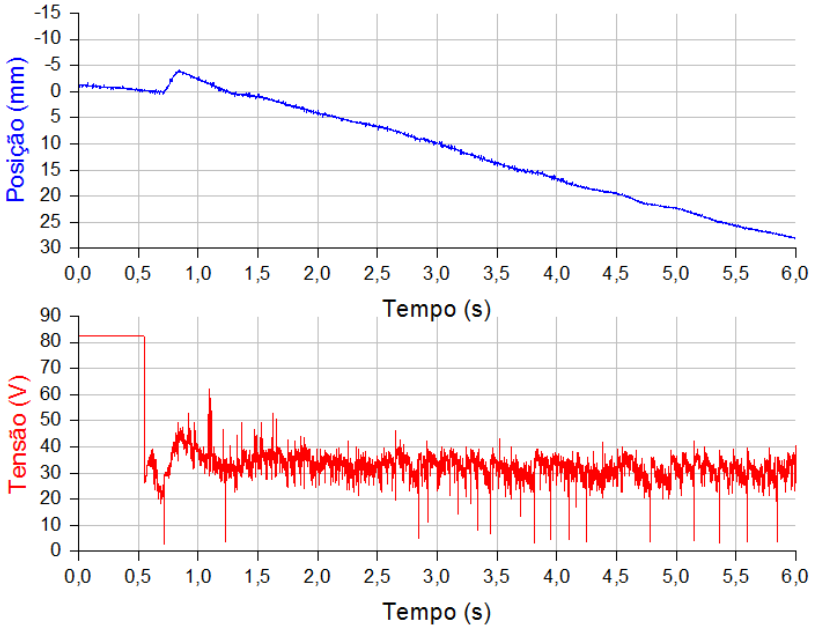

Figura 23. Posição do eixo Z e tensão de arco ao longo do tempo. Ambiente molhado.

A adesão desta metodologia eliminou os problemas apresentados anteriormente devido ao acúmulo de erro no início do processo. Isto trouxe melhorias significativas na operacionalidade do AVC.

Para que os problemas 2 e 3 pudessem ser solucionados, optou-se por adicionar um filtro de menor significância no início do processo (até a abertura de arco) e fixado um valor de tensão abaixo do qual o AVC detecta o curto-circuito inicial. Os benefícios disto são, basicamente:

- Garante-se que sempre que houver o toque inicial entre eletrodo e peça, resultando na queda da tensão em vazio da fonte, o sistema detectará;
- O filtro utilizado não influenciará a detecção ou não do toque entre eletrodo e peça, o que consequentemente torna esta etapa livre de atrasos entre a queda da tensão e a leitura de tal evento pelo AVC.

Além contribuir para a abertura do arco, conforme mencionado anteriormente, a fonte HipER-1 também exerce influência sobre os estágios

iniciais do processo, quando é utilizada outra funcionalidade: a corrente de curto-circuito Icc.

Ao observar a Figura 23, nota-se que há um atraso entre o toque eletrodo-peça ocorrido na marca de 0,5s e a reação do manipulador (retração), ocorrido na marca de aproximadamente 0,6s. Isto indica que momentaneamente pode haver a projeção do eletrodo contra a peça. A Figura 20 deste trabalho indica que ligeiramente após a abertura do arco, a condição de curto-circuito pode ocorrer. A Figura 24 apresenta o ocorrido durante a abertura de arco.

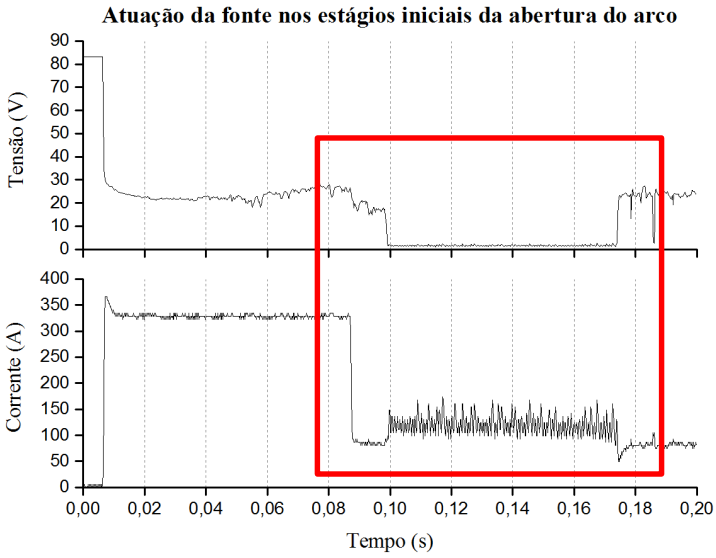

Figura 24. Atuação da fonte durante a ocorrência de curto-circuito logo após a abertura de arco. Destaca-se em vermelho o momento do curto-circuito e atuação da fonte HipER-1.

Após detectar o toque, a fonte aplicou a corrente de abertura Iab, durando cerca de 80ms. Logo após, a ocorrência do curto-circuito fez com que a fonte aplicasse pulsos de corrente, da ordem de aproximadamente 150A. O tempo no qual foram aplicados os pulsos assemelha-se ao tempo de atraso da leitura e atuação do AVC. O curto-circuito observado (queda de tensão próxima a 1V) implica na momentânea extinção do arco. Em ambiente molhado, isto pode resultar em um maior resfriamento da ponta

do eletrodo se comparado ao ambiente seco, contribuindo para a "colagem" do eletrodo na peça e dificultando a reabertura do arco.

Reporta-se, portanto, que a utilização da corrente de curto-circuito reduziu significativamente os problemas da abertura do arco, possivelmente incitando a reignição e/ou mantendo a ponta do eletrodo à elevada temperatura, impedindo a completa "colagem" do eletrodo à peça.

5.2 Controle do Comprimento do Arco (AVC)

5.2.1 Leitura e Filtro de Tensão

O filtro utilizado para a leitura da tensão foi *o Exponential Smooth* devido à simplicidade em sua implementação e sua comum utilização em processamento de sinais. Tal filtro age como um passa-baixa, removendo ruídos de alta frequência. É constituído, quando em primeira ordem, pela Equação 1:

$$V_{filtrado(1)} = (V_{atual} \cdot \propto) + (V_{anterior} \cdot (1 - \propto)) \qquad (1)$$

Em resumo, este filtro confere uma significância (α) menor para o valor atual de tensão. Como resultado, segue-se uma tendência a atenuar as variações bruscas da tensão quanto menor for a significância do valor atual. Para ilustrar, caso o resultado anterior da equação tenha sido 20V ($V_{anterior}$) e o valor atual lido pelo sistema seja 21V (V_{atual}), com uma significância de 0,1 (10%), têm-se o valor filtrado igual a 20,1V ($V_{filtrado}$).

Entretanto, o filtro utilizado foi de segunda ordem. Para isto, basta calcular novamente o $V_{filtrado}$ com base no resultado obtido do cálculo de primeira ordem. Tal filtro constitui-se a partir da Equação 2:

$$V_{filtrado(2)} = \left(V_{filtrado(1)} \cdot \alpha\right) + (V_{anterior} \cdot (1 - \alpha)) \qquad (2)$$

Embora os resultados apresentados pelo filtro de primeira e segunda ordem possam ser semelhantes, este tende a reduzir ainda mais os ruídos de alta frequência. A Figura 25 apresenta os sinais de tensão instantânea e para filtros de primeira e segunda ordem, ambos com α = 0,03.

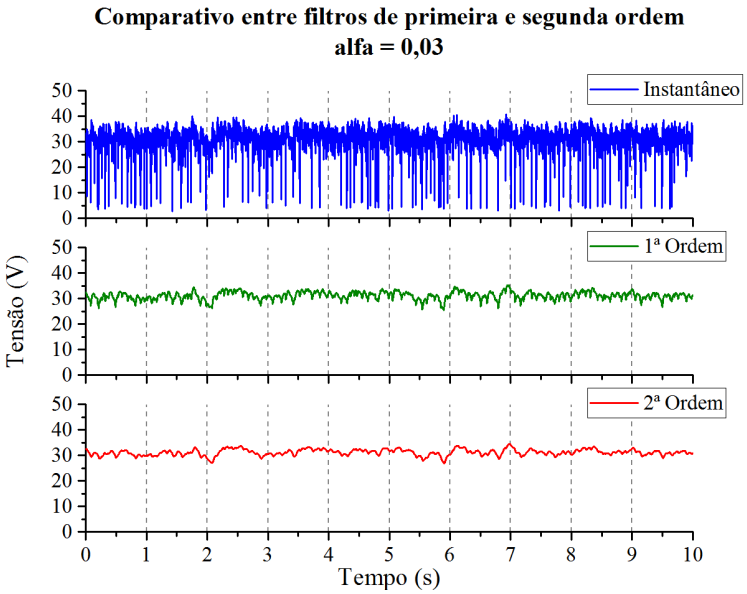

Figura 25. Comparativo entre filtros de primeira e segunda ordem.

O problema da utilização de filtros excessivos é o *delay* presente entre a entrada (o que ocorre de fato no arco elétrico) e a leitura da tensão (filtrada). Enquanto o processo estiver em regime e não houver irregularidades na junta, o *delay* gerado pelo filtro pode não exercer influência significativa sobre o processo. No entanto, em casos onde a geometria da junta é irregular, necessitando a rápida identificação de alterações bruscas na tensão de arco para uma correção mais eficiente do mesmo, o *delay* poderá prejudicar o ajuste do comprimento do arco. No subitem 5.1.1 deste trabalho foi abordado a problemática da adesão de um filtro com baixa significância durante a abertura de arco.

Durante a etapa de configuração do filtro do AVC, diversas significâncias foram utilizadas. Foi constatado que valores muito baixos poderiam trazer problemas para o processo, conforme comentado anteriormente. Ao utilizar significâncias maiores, ainda que não excluíssem totalmente a presença de curtos-circuitos na leitura da tensão, notou-se bom comportamento do sistema. A ocorrência dos curtos-circuitos (queda brusca da tensão) e demais perturbações não aparentam prejudicar o funcionamento do AVC, provavelmente devido ao tempo de resposta do motor do eixo Z ser consideravelmente elevado, se comparado com a taxa de aquisição de dados de 1 kHz por parte do sistema. É possível, portanto,

que embora o sistema observe grandes oscilações da tensão, o tempo de resposta geral é alto o suficiente para evitar que o sistema tente corrigir bruscamente o comprimento do arco. Um sistema com maior dinâmica pode requerer maior atenuação da leitura da tensão.

Deste modo, configurou-se como padrão uma significância de 0,06 para o filtro *Exponential Smooth* de segunda ordem. Este se mostrou suficiente para atenuar as quedas bruscas de tensão nos eventos de curto-circuito e ainda assim não apresentar *delay* considerável. A Figura 26 apresenta os oscilogramas de valores instantâneos e filtrados de tensão, com o filtro em questão. A tensão de referência em tal ensaio foi de 23V.

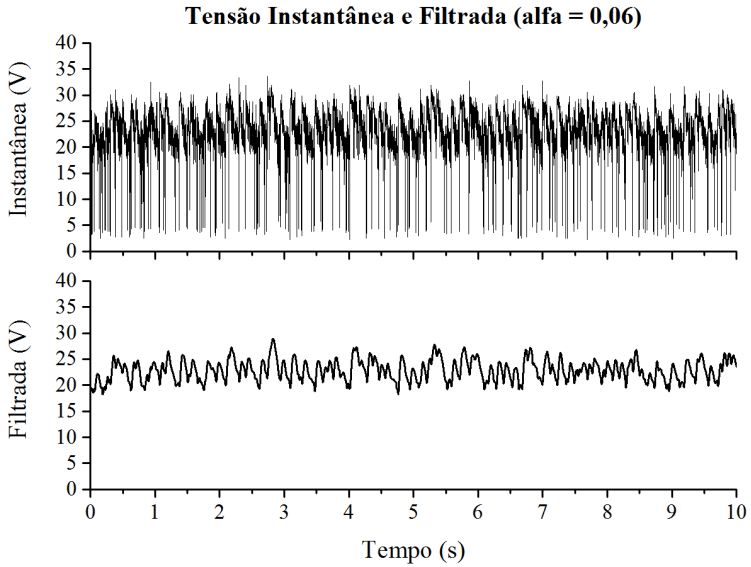

Figura 26. Tensão instantânea e filtrada pelo AVC. Alfa = 0,06.

Conforme comentado anteriormente, utiliza-se outra significância para a abertura de arco. Basicamente, aplica-se um multiplicador igual a 5x à significância do filtro até o momento em que a abertura de arco for detectada. Isto reduz drasticamente possíveis *delay* e atenuações demasiadas na leitura da tensão que dificultariam a abertura de arco.

5.2.2 Ganho Proporcional (Kp)

Os ensaios de avaliação do ganho proporcional (Kp) compreenderam valores entre 1 e 30. Aqui são apresentados os resultados obtidos nos testes para Kp igual a 1, 6,5 e 30. Estes três são suficientes para elucidar a influência do Kp no processo.

Ao utilizar-se o Kp igual a 1, notou-se a incapacidade do sistema em aproximar-se à tensão de referência, dado que tal valor conferia ainda pouca significância ao erro. Além disto, a alimentação do eletrodo não possuiu recorrente oscilações, mas manteve-se quase que constante ao longo do tempo. A Figura 27 apresenta o gráfico de deslocamento pelo tempo para o Kp = 1. Neste caso a tensão média resultante foi de 35,5 V.

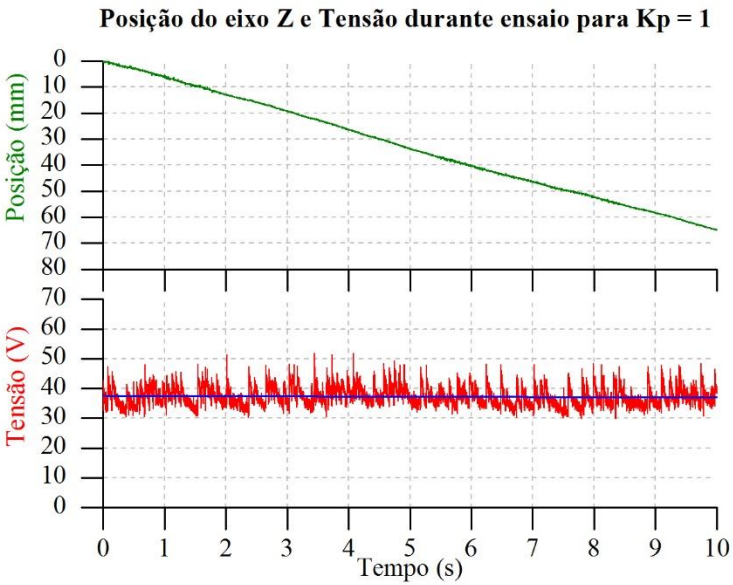

Figura 27. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 1

A Figura 28 apresenta o gráfico de tensão e deslocamento do eixo Z em função do tempo, para o ensaio Kp = 6,5.

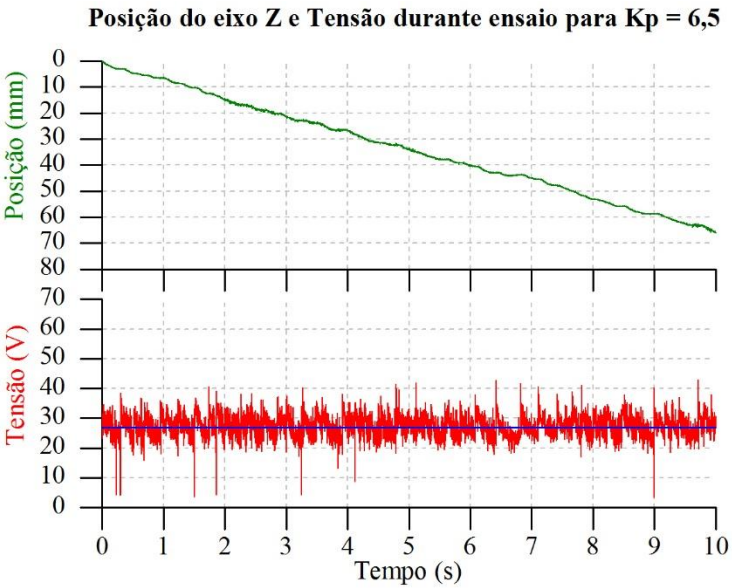

Figura 28. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 6,5.

Para Kp igual a 6,5 a tensão média entre os três ensaios foi de 26,9 V e o desvio padrão médio igual a 0,68 mm. Nota-se também, pelo gráfico da Figura 28, variações no deslocamento mais evidentes se comparados aos resultados obtidos com Kp 1.

Nota-se, entretanto, que embora tais variações aumentem, a tensão média do processo se aproxima gradualmente da tensão referência. É esperado que em determinado momento, o sistema oscile em torno da referência.

A Figura 29 apresenta o gráfico contendo os resultados da configuração Kp = 30.

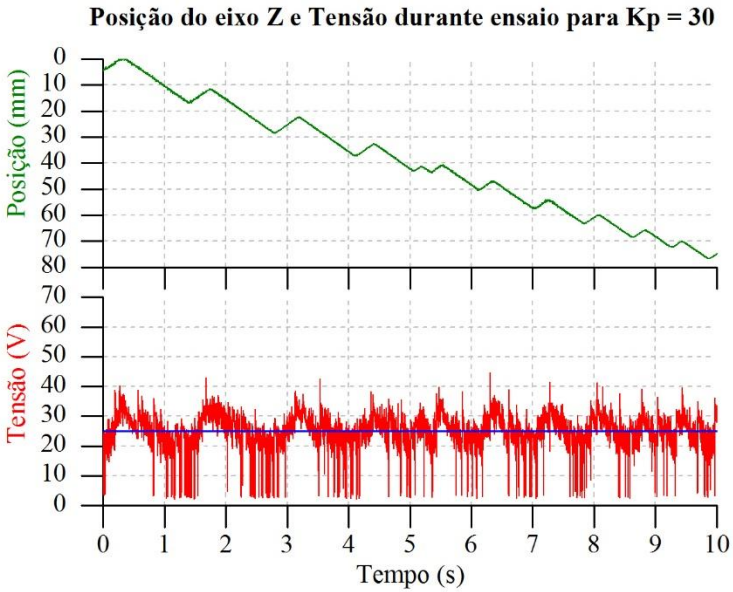

Figura 29. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 30.

Para Kp = 30, a tensão média de tal ensaio foi de 24,9 V, dentro da zona morta (1V) da tensão de referência. Entretanto, as elevadas oscilações, que geraram um desvio padrão de 2 mm, causam instabilidades no processo de soldagem.

Uma vez que nesta aplicação o controlador proporcional realize correções no comprimento do arco, há a cada incremento (ou passo) de tempo um novo erro (dado que o eletrodo é constantemente consumido), tornando a adesão apenas do controlador proporcional incapaz de manter o processo estável.

Tendo em vista tais resultados, nota-se que valores mais baixos de Kp não são suficientes para atingir a tensão de referência, enquanto que valores mais elevados causam grandes oscilações. Desta forma, optou-se por avaliar a adesão do controlador PI (Proporcional-integrador).

5.2.3 Ganho Integrador (Ki)

A adesão do controlador PI permitiu atenuar as oscilações do comprimento do arco, bem como a permitir o sistema atingir a tensão de referência, ainda que com valores de Kp baixos (em torno de 1, por exemplo).

Observou-se também que a utilização de Kp de maior significância implica em uma oscilação do comprimento do arco mesmo com o ganho integrador agindo sobre o sistema, enquanto que valores mais baixos tendem a manter o mesmo estável.

A seguir são apresentados os resultados dos testes quando ao deslocamento do eixo Z e a leitura de tensão com a implementação do ganho integrador, com as seguintes configurações: Kp = 0,5 e Ki = 1; Kp = 1 e Ki = 1; Kp = 6,5 e Ki = 1; Kp = 6,5 e Ki = 6,5.

A Figura 30 e Figura 31 contém o sinal de tensão e posição do eixo Z para os ensaios Kp = 0,5 Ki = 1 e Kp = 1 Ki = 1, respectivamente.

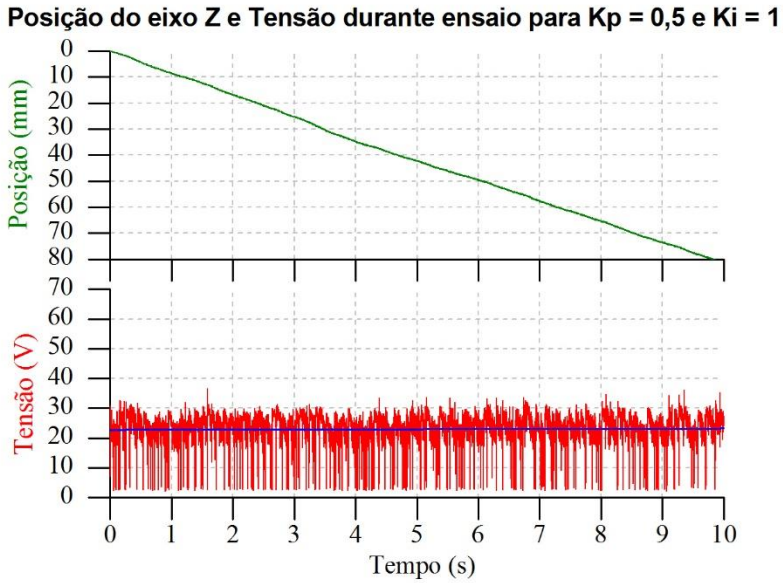

Figura 30. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 0,5 e Ki = 1.

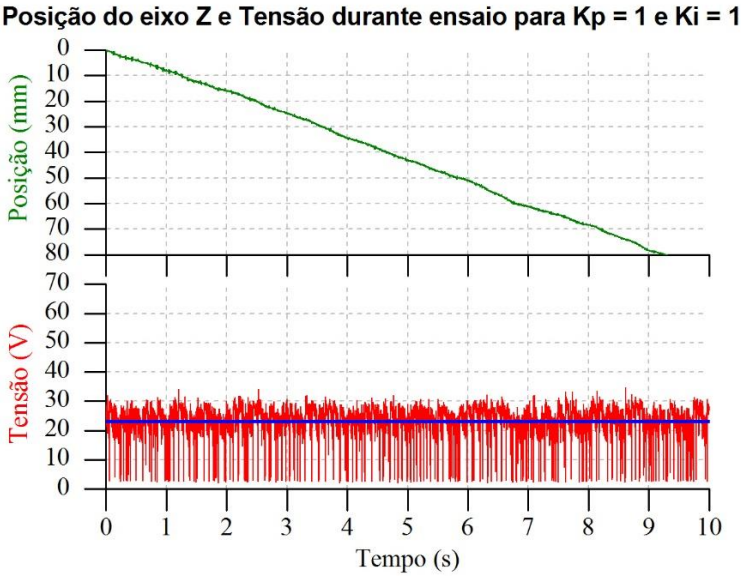

Figura 31. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 1 e Ki = 1.

Observa-se que para ambos Kp = 0,5 e 1, com a adesão do Ki, obteve-se um movimento praticamente contínuo do eixo Z, sem bruscas oscilações, principalmente para o valor de Kp = 0,5. A tensão média durante os 10 segundos apresentados foi de 23V para Kp = 0,5 e 23,1 para Kp = 1.

Entretanto, o aumento do ganho proporcional gerou elevada instabilidade no processo, conforme é apresentado pela Figura 32. A tensão média durante os 10 segundos apresentados foi de 23,3 V.

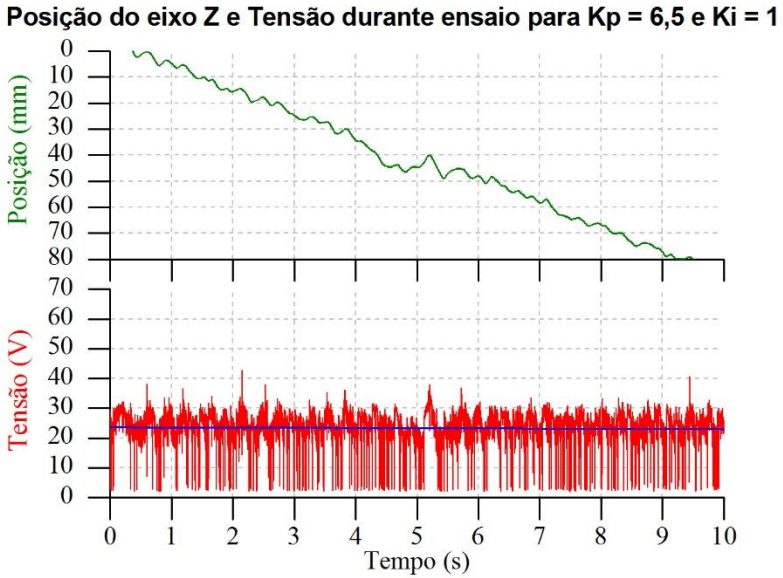

Figura 32. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 6,5 e Ki = 1.

Com o intuito de verificar se as oscilações reduziriam com o aumento do ganho integrador (Ki), este foi aumentado para 6,5. Entretanto, o sistema manteve o comportamento irregular (oscilatório) conforme visto anteriormente. A Figura 33 apresenta os resultados para a configuração (d): Kp = 6,5 e Ki = 6,5. A tensão média durante os 10 segundos apresentados foi de 23V.

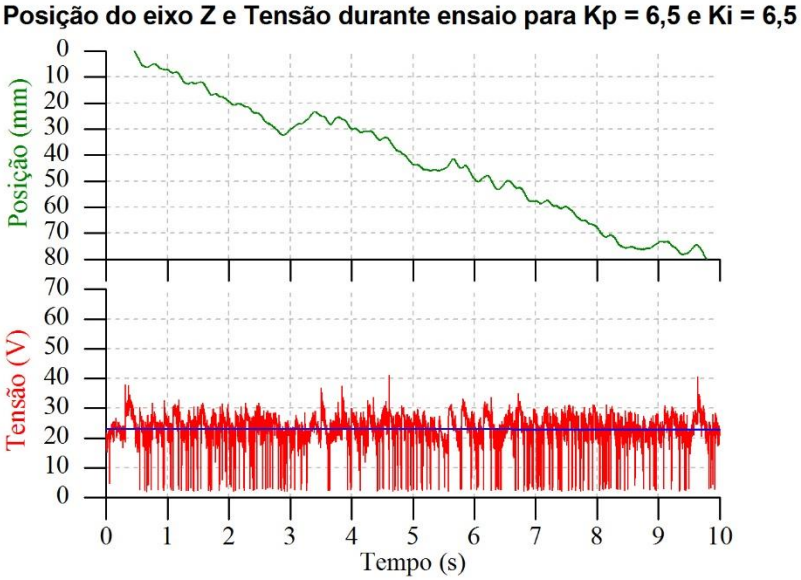

Figura 33. Posição do eixo Z e tensão durante ensaio. Kp = 6,5 e Ki = 6,5.

Tendo em vista o que foi observado, optou-se por adotar como valores padrão em 1 para o Ki e o Kp podendo variar entre 0,5 e 1.

A partir dos resultados, dado a boa dinâmica e capacidade do AVC em manter a tensão de referência, optou-se por manter o controlador PI apenas, não incorporando, portanto, o ganho derivativo. Testes foram realizados com ambos PI e PID, não resultando em diferenças significativas em procedimentos convencionais (soldagem em chapas planas, posição 1G). No entanto, a programação do sistema conta com o Kd, configurável na IHM do AVC. Desta forma, caso necessário, o operador pode facilmente incorporar o ganho derivativo, que, em teoria, deverá aumentar a dinâmica, reduzindo o tempo de resposta, em ocasiões onde ocorra a brusca alteração do comprimento do arco, como em uma geometria muito irregular, por exemplo. Entretanto, deve-se utilizar um filtro de tensão significativo, que atenue oscilações referentes à transferência metálica, caso contrário, ruídos excessivos seriam adicionados na ação de controle, tornando o procedimento instável.

5.3 Queda de Tensão nos Eletrodos

5.3.1 Ponderações e investigação iniciais

A alma do eletrodo possui resistência à passagem de corrente elétrica, embora tal resistência possua valores baixos (na ordem de centésimos de Ohm, em geral), os níveis de corrente utilizados na soldagem resultam em uma queda de tensão no eletrodo, que varia durante o processo devido à temperatura e consumo do mesmo.

Em operações manuais, esta queda de tensão não possui efeitos deletérios no processo, uma vez que o controle do comprimento do arco é realizado visualmente pelo soldador. Entretanto, na soldagem automatizada esta queda de tensão no eletrodo acarreta na variação do comprimento de arco para uma dada tensão de referência. Isto porquê o AVC lê a tensão entre o porta-eletrodos e a peça, englobando tanto a tensão no eletrodo quanto no arco. A Figura 34 apresenta a ilustração do fenômeno comentado.

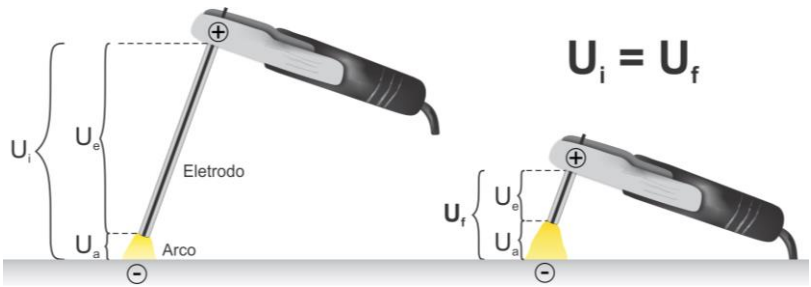

Figura 34. Queda de tensão no eletrodo e arco elétrico no início e fim do processo de soldagem.

Nota-se, portanto, que para uma dada tensão inicial (U_i), esta está dividida entre o arco e o eletrodo. Enquanto que este é consumido, o AVC busca manter a mesma tensão do circuito até o final do processo (U_f), o que acarreta no aumento do comprimento (e tensão) do arco. Isto indica fortemente que um sistema AVC que seja capaz de manter a tensão de referência constante não necessariamente garante homogeneidade nas características do arco elétrico ao longo do processo, acarretando em mudanças na energia de soldagem ao longo do tempo (variação da tensão de

arco) e podendo implicar em mudanças no comportamento da transferência metálica (redução da frequência de transferência por curto-circuito ao elevar o comprimento do arco), conforme mostra a Figura 35.

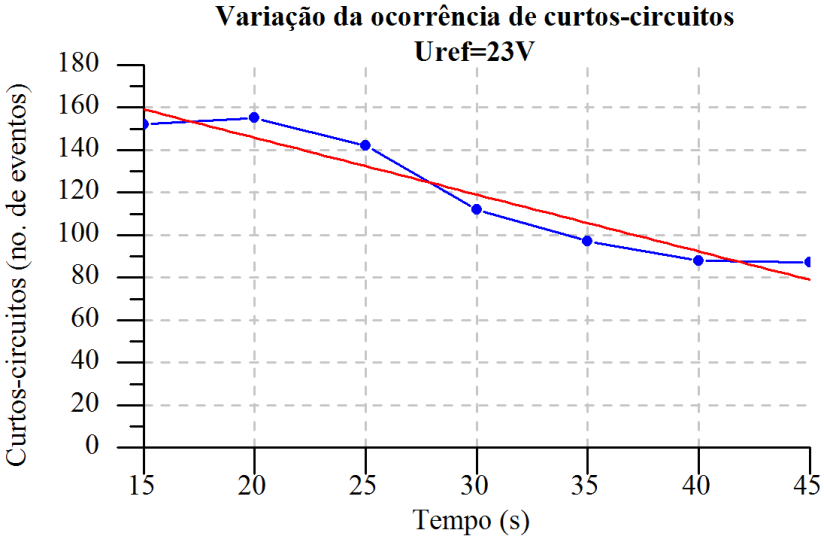

Figura 35. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V.

Os dados apresentados foram obtidos a partir de um ensaio com eletrodo revestido E6013 e tensão de referência igual a 23 V. O número de curtos-circuitos apresentados a cada 5 segundos trata-se do total de eventos dentro deste intervalo de tempo (por exemplo, o número de eventos registrados em 20 segundos compreende a somatória de curtos-circuitos ocorridos entre a marca de 15 e 20 segundos). Optou-se por realizar a análise desta maneira pois o objetivo é apenas demonstrar a tendência existente no processo à redução da frequência de curtos-circuitos à medida que a altura do arco aumenta.

5.3.2 Lógica inicial (I)

Deste modo, foi proposto uma metodologia tendo em vista executar a compensação da variação da tensão do eletrodo durante o processo de soldagem.

Sabe-se que o aquecimento do eletrodo é um fator que influencia no aumento de sua resistência elétrica, e que varia de acordo com a corrente de soldagem, alma e revestimento do eletrodo e o ambiente no qual está inserido (seco ou molhado). Assim, quantificar a queda de tensão real no eletrodo torna-se uma tarefa difícil.

Embora bons resultados tenham sido apresentados por Lima II e Bracarense [42][51] ao quantificar a queda de tensão no eletrodo em função da temperatura e consumo, a obtenção dos valores reais de temperatura durante o procedimento para cada aplicação (alma e revestimento do eletrodo, corrente, temperatura ambiente, etc) pode dificultar o refino do procedimento.

Optou-se por considerar, portanto, uma queda de tensão linear no eletrodo, ou seja, define-se um valor inicial que é gradualmente reduzido à medida que o eletrodo é consumido, estabelecendo uma relação de tensão por comprimento do eletrodo consumido (V/mm). Embora esta metodologia possivelmente não se caracterize como a mais precisa, espera-se bons resultados além de maior facilidade de parametrização.

Tal metodologia requer informar ao sistema: (1) qual a queda de tensão máxima no eletrodo (referente ao início do processo, com seu maior comprimento); (2) O comprimento útil do eletrodo; (3) posição inicial de soldagem.

A metodologia implantada consiste no seguinte:

1. No início do procedimento, o operador seleciona a tecla “HOME Z”, o que faz com que o manipulador recue o eixo Z até atingir a chave de fim de curso, e logo após, avançar 10 mm. Esta posição é registrada como ZERO (referência) pelo AVC;
2. Após isto, ao adentrar no Menu “Uarco”, seleciona-se o comprimento útil do eletrodo (que será depositado) e a queda de tensão total ao longo do mesmo;
3. Aproxima-se então o eletrodo da peça até realizar o toque entre ambos. O visor apresentará qual foi a distância movida, desde a posição ZERO até o toque. O operador então adiciona o valor desta distância à variável OFFSET. Esta trata-se basicamente da distância entre a posição da extremidade do eletrodo na posição ZERO e na condição de toque (onde se dará o início do processo com a abertura do arco);

A tensão de referência Uref passa então a indicar a tensão do arco desejada pelo operador. No início do processo, o AVC manterá a tensão de referência somado à queda de tensão do eletrodo, correspondente ao seu comprimento inicial. Por exemplo, para uma Uref de 23V e queda de

tensão total de 1V, o AVC manterá no início do processo 24V (23V arco e 1V no eletrodo), reduzindo gradativamente até 23V.

Além disto, esta metodologia permite que soldagens sucessivas possam ser feitas sem a alteração de parâmetros referentes a queda de tensão do eletrodo. Uma vez selecionado o OFFSET, comprimento útil do eletrodo e a queda de tensão, procedimentos sucessivos podem ser realizados, caso nenhuma das variáveis sejam alteradas. A Figura 36 ilustra o que é aqui tratado e logo abaixo é realizada a sua explanação.

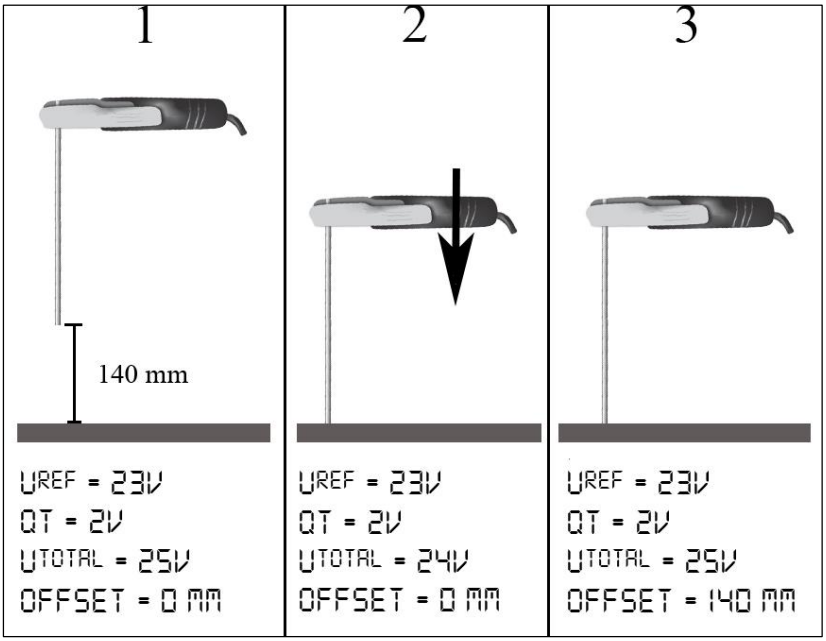

Figura 36. Metodologia inicial para ajuste do OFFSET.

A etapa 1 corresponde à situação onde a tecla HOME Z fora pressionada. O manipulador retraiu o eixo Z até a chave de fim de curso e então avançou 10 mm. O operador então regulou na IHM uma tensão de referência (Uref) de 23V e queda de tensão (QT) de 2V. A IHM informa que a tensão total (Utotal), ou a tensão a ser considerada no início do processo é igual a 25V (23V + 2V). O comprimento útil do eletrodo considerado é de 280 mm.

Na etapa 2, o operador aproxima o eletrodo à peça, onde será iniciado o procedimento de soldagem. No entanto, como a distância inicial entre a ponta do eletrodo até a chapa era de 140 mm (metade do

comprimento útil do eletrodo), o sistema interpreta que o eletrodo teve tal distância consumida, reduzindo proporcionalmente a tensão inicial (Utotal) para 24V.

Entretanto, quando configurado o OFFSET na IHM para 140 mm, o sistema registra a posição do toque como o ZERO, onde a tensão inicial (Utotal) é corretamente considerada como 25V, representado pela etapa 3. A partir daí, à medida que o eixo Z se move para baixo (eletrodo é consumido) a parcela referente à queda de tensão é subtraída da tensão total (Utotal).

Caso um eletrodo de menor comprimento seja utilizado, não serão necessárias quaisquer alterações dos parâmetros, salvo se possuir uma alma de material diferente. Para um eletrodo de mesmo material, porém com metade do comprimento, à medida que é aproximado da peça para dar início ao processo, o AVC já reduzirá a tensão de referência proporcionalmente. Neste caso, se a queda de tensão total para um eletrodo de 280 mm úteis for de 2 V, ao utilizar um eletrodo com metade do comprimento o AVC automaticamente configurará uma queda de 1V no início do processo.

5.3.3 Lógica final (II)

Uma das vantagens da lógica até então implementada é a de que é possível realizar ensaios sucessivos com eletrodos de diferentes comprimentos após o ajuste do OFFSET. Caso o arco apague durante o processo, é possível dar continuidade (após a reabertura do arco) excluindo a necessidade da reconfiguração do OFFSET ou da queda de tensão.

No entanto, procedimentos subaquáticos dificilmente serão realizados sob a mesma condição ou não tirarão proveito da vantagem citada:

- Peças a serem soldadas podem possuir geometria irregular, o que requer a reconfiguração do OFFSET antes de cada soldagem.
- Soldagem multipasses requereriam, também, a reconfiguração do OFFSET;
- Procedimentos de soldagem geralmente possuem EPS, o que especifica o tipo e comprimento dos eletrodos.
- O desenvolvimento deste trabalho visa gerar métodos que evitem a extinção do arco durante os procedimentos de soldagem, o que virtualmente exclui a utilização de eletrodos com comprimento menor (parcialmente consumido/reaproveitado).

Para eliminar a necessidade de configuração do OFFSET (aproximação do eletrodo da peça e imputação do valor de distância na IHM), optou-se por realizar esta etapa automaticamente, de modo que:

I. Os parâmetros referentes à queda de tensão são imputados na IHM: Queda de tensão e comprimento útil do eletrodo.
II. Habilita-se então o processo fazendo com que o eletrodo seja gradualmente aproximado à peça. No momento do toque (e abertura do arco), é salva a posição atual como ZERO.

O funcionamento do sistema, de modo geral, manteve-se o mesmo. No entanto, a redução de parâmetros da IHM não só tornou o artifício mais simples de ser utilizado como também contribui para maior agilidade na realização de soldas. Isto é um fator importante para o processo eletrodo revestido: dado que inerentemente possui baixa produtividade, deve-se levar em consideração a adesão de funcionalidades que contribuam para a manutenção do processo sem efeitos negativos sobre o rendimento.

5.3.4 Validação da metodologia

Ensaios em ambiente seco permitiram observar a variação da tensão eletrodo + arco durante o processo de soldagem. O ambiente seco foi escolhido para os testes devido a maiores robustez e gama de parâmetros (principalmente tensão), o que facilitaria a análise. Para melhor visualização do comportamento do sistema, foi selecionado uma queda de tensão de 2 e 4 V para 265 mm de comprimento de eletrodo. A tensão de referência utilizada foi 23V.

Espera-se, portanto, que no início do procedimento em ambiente seco, a tensão total seja de 25 V mantida pelo AVC, decrescendo continuamente até 23 V durante o consumo de 265 mm do eletrodo.

A Figura 37 e Figura 38 apresentam os oscilogramas de tensão para os ensaios em ambiente seco com queda de tensão de 2 e 4V, respectivamente. Foi aplicado um filtro sobre a leitura da tensão para melhor visualização.

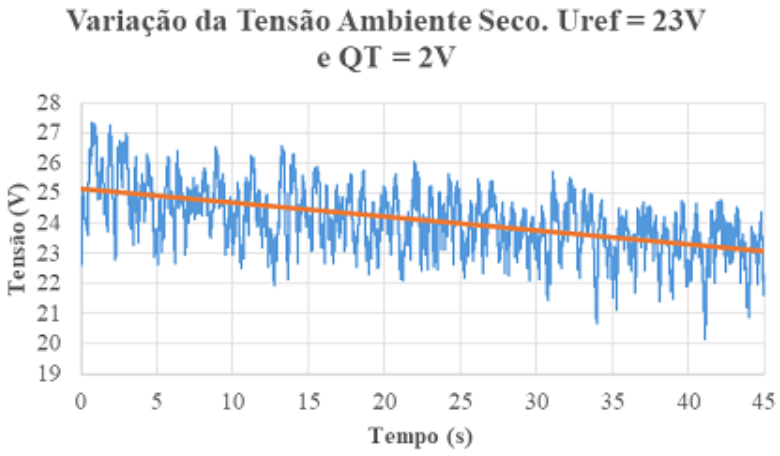

Figura 37. Variação da tensão em ambiente seco. Uref = 23V e QT = 2V.

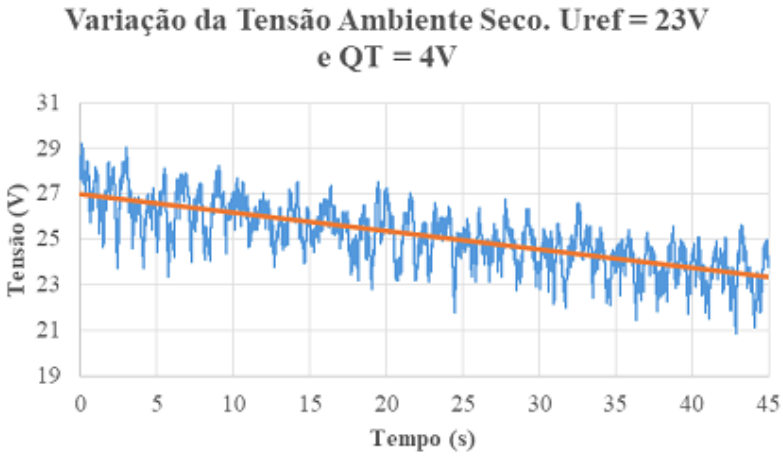

Figura 38. Variação da tensão em ambiente seco. Uref = 23V e QT = 4V.

Na Figura 37, a linha de tendência evidencia a tensão média de 25 V no início do processo, decrescendo gradualmente até 23 V, enquanto que a Figura 38 apresenta uma tensão média de 27V no início, decrescendo até 23V durante 45 segundos.

Tais resultados demonstram que a lógica do sistema implementada atua conforme o requerido. Assim, decidiu-se analisar qual o efeito sobre o processo a correção da queda de tensão poderia trazer.

Para uma tensão de referência de 23V, variou-se a queda de tensão, de 0 a 5V, observando a mudança na ocorrência de curtos-circuitos ao longo do processo.

A Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43 mostram a variação das ocorrências de curtos-circuitos para a utilização de queda de tensão igual a 1, 1.5, 2, 4 e 5V, respectivamente. Cada ponto apresentado nas imagens se refere ao somatório dos eventos de curtos-circuitos durante os últimos 5 segundos. Definiu-se curto-circuito os eventos nos quais a tensão foi inferior a 10V. Os resultados apresentados são de caráter qualitativo, e não quantitativo. Dado que a transferência metálica do processo eletrodo revestido não é regular, estes ensaios não objetivam quantificar a frequência de curtos-circuitos, mas apenas avaliar a tendência a ocorrer variações no número de eventos durante a soldagem.

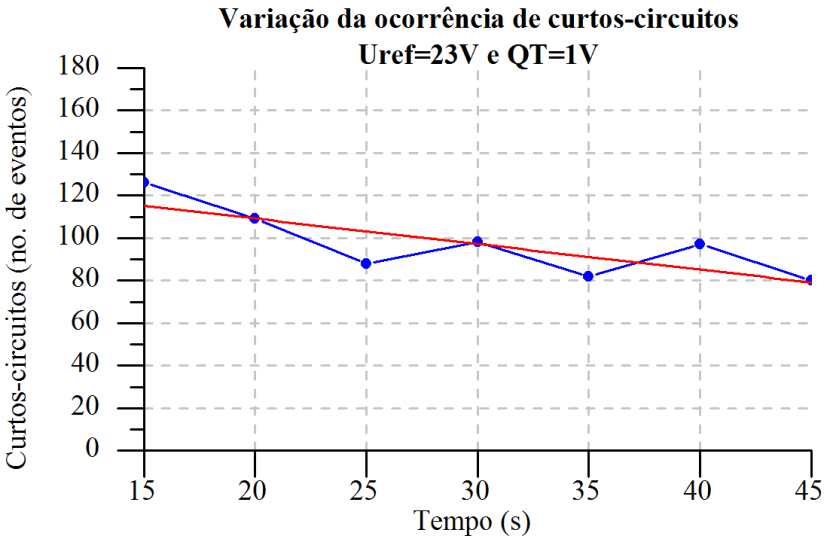

Figura 39. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V e QT = 1V.

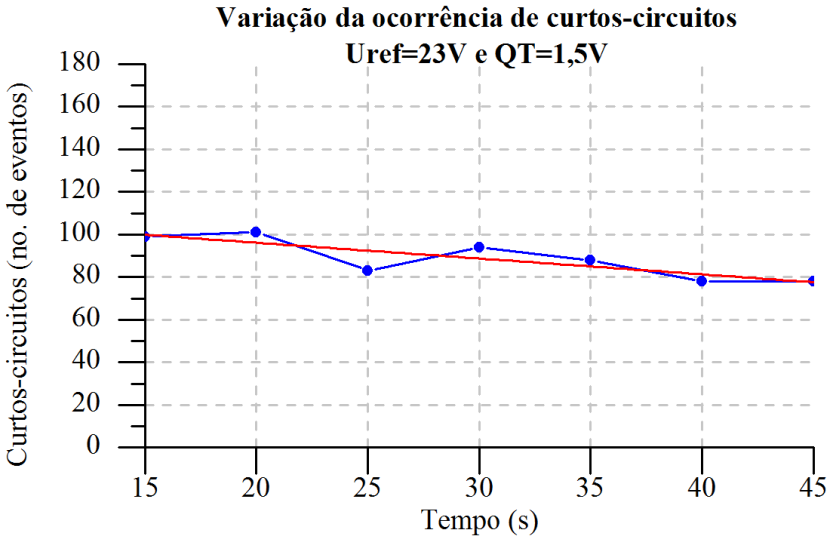

Figura 40. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V e QT = 1,5V.

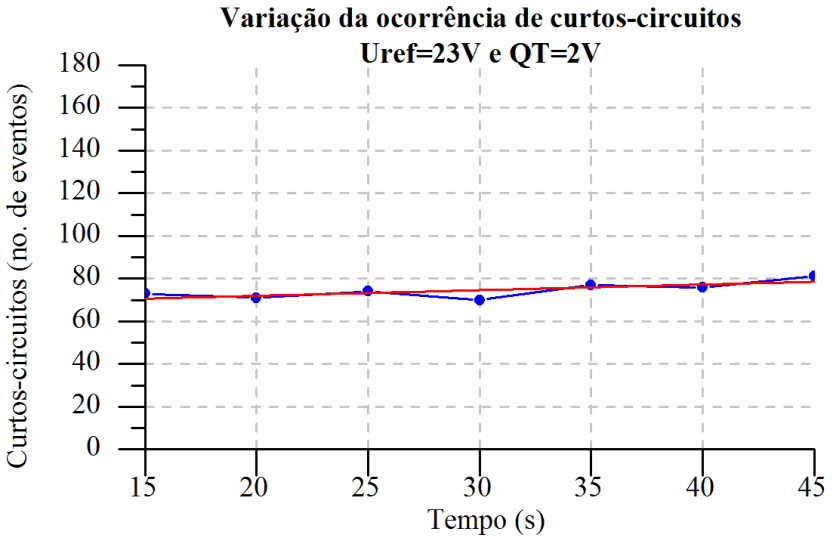

Figura 41. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V e QT = 2V.

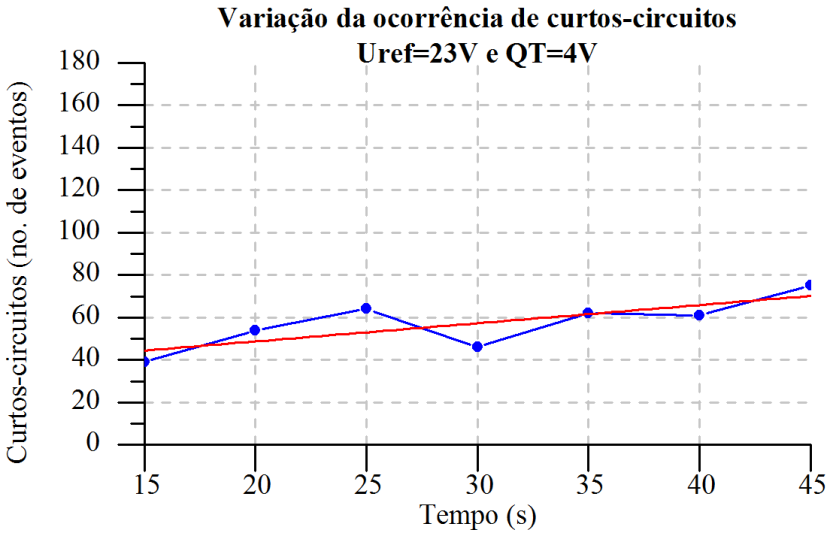

Figura 42. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V e QT = 4V.

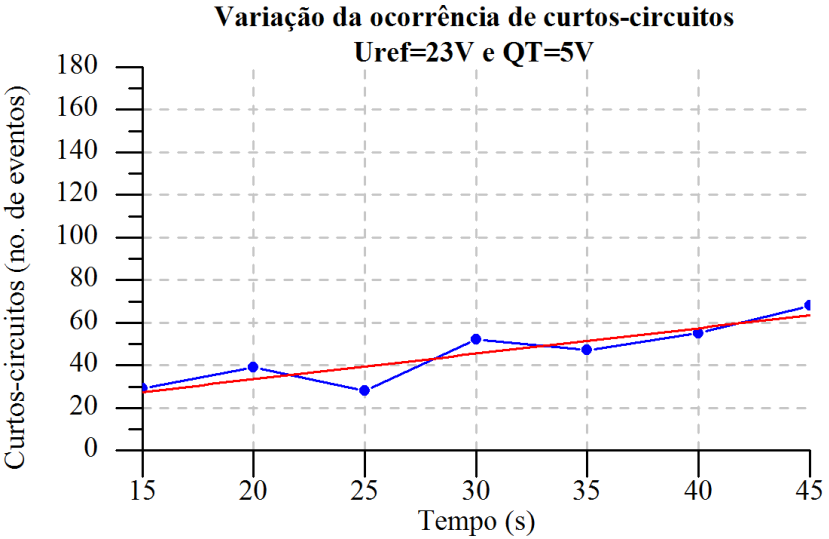

Figura 43. Variação da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do tempo. Uref = 23V e QT = 5V.

Observa-se que a variação da queda de tensão, altera a tendência a ocorrer mudanças no número de eventos de curtos-circuitos. Em valores

menores de QT, observa-se que ainda existe a redução das ocorrências de curtos-circuitos durante o procedimento e que com o gradual aumento da variável, o efeito se inverte, ocorrendo o gradual aumento do número de eventos.

Valores próximos de QT = 2V resultaram em menores mudanças no número de eventos de curto-circuito durante os experimentos, o que pode indicar melhor manutenção do comprimento do arco.

Embora variações pequenas no comprimento do arco no processo eletrodo revestido não seja um efeito muito agravante em ambiente seco, a maior sensibilidade do processo em ambiente molhado evidencia a necessidade de um controle mais preciso do comprimento do arco. O capítulo 6 "**Estudo do Processo de Soldagem Submarina Molhada com Eletrodos Revestidos**" relata a importância do controle da queda de tensão em ambiente molhado.

É esperado, de fato, que a queda de tensão no eletrodo em ambiente seco seja superior ao ambiente molhado, dado que naquele o aquecimento do eletrodo é mais intensivo que neste.

6 ESTUDO DO PROCESSO DE SOLDAGEM SUBMARINA MOLHADA COM ELETRODOS REVESTIDOS

6.1.1 Efeito dos parâmetros elétricos no processo em ambiente molhado

Durante a realização de experimentos, principalmente em valores inferiores de corrente de soldagem (menores que 90A) e polaridade reversa, ocorria a extinção do arco, mesmo mantendo-se o comprimento do mesmo reduzido. Os oscilogramas de tensão para a polaridade reversa são apresentados para 75, 90, 110 e 130A, respectivamente, na Figura 44.

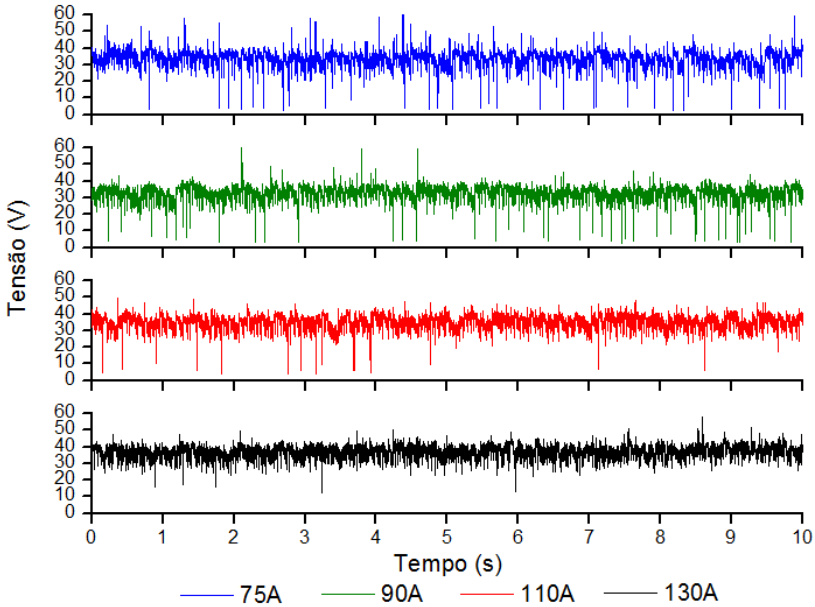

Figura 44. Oscilogramas de tensão para os níves de corrente de 75, 90, 110 e 130A. Polaridade Reversa. Eletrodos E6013.

Apresenta-se os oscilogramas de tensão para a polaridade direta, para 75, 90, 110 e 130A, respectivamente, na Figura 45.

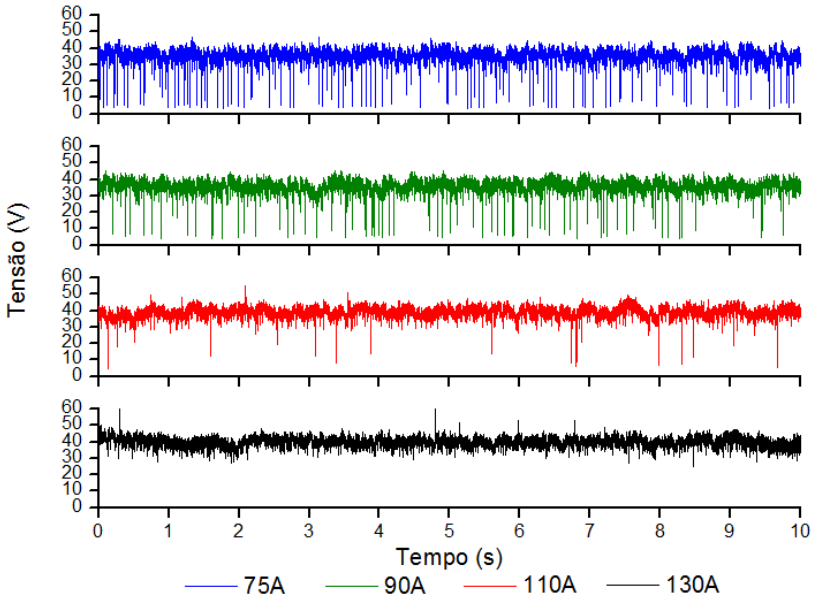

Figura 45. Oscilogramas de tensão para os níveis de corrente de 75, 90, 110 e 130A. Polaridade Direta. Eletrodos E6013.

É perceptível a ocorrência de picos de tensão com polaridade reversa e correntes de soldagem mais baixas (75 e 90A), e que estes eventos são reduzidos com o incremento da corrente. Tais picos de tensão observados não ocorrem necessariamente após eventos de curtos-circuitos (possível reignição do arco), o que pode apontar uma diferente causa para a ocorrência do aumento da tensão momentaneamente.

Os oscilogramas mostram que a utilização da polaridade direta com os eletrodos E6013 trouxe melhorias para a estabilidade do arco, principalmente para níveis de corrente mais baixos (75 e 90A).

Objetivando verificar se os picos de tensão são característicos do processo em certas condições e não é devido apenas à composição do revestimento, ensaios análogos foram realizados para eletrodos E7018 impermeabilizados de 2,5 mm de diâmetro. A Figura 46 e a Figura 47 apresentam os oscilogramas para a polaridade reversa e direta, respectivamente.

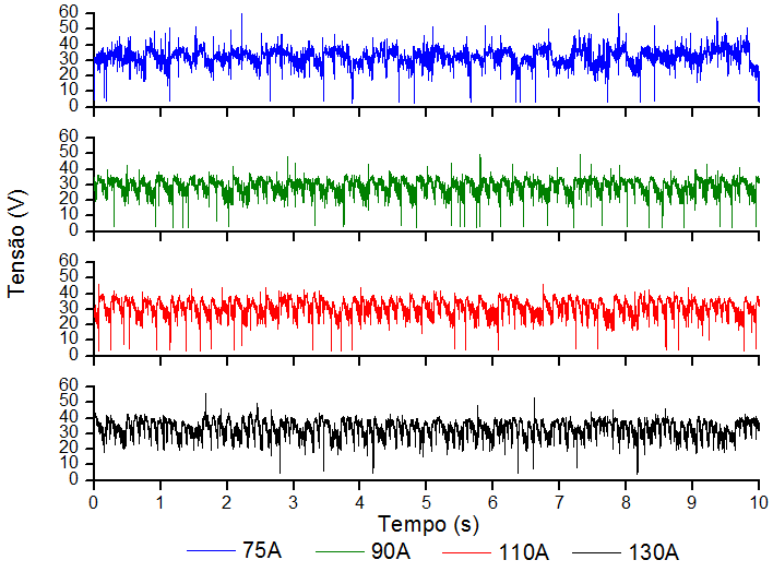

Figura 46. Oscilogramas de tensão para os níveis de corrente de 75, 90, 110 e 130A. Polaridade Reversa. Eletrodos E7018.

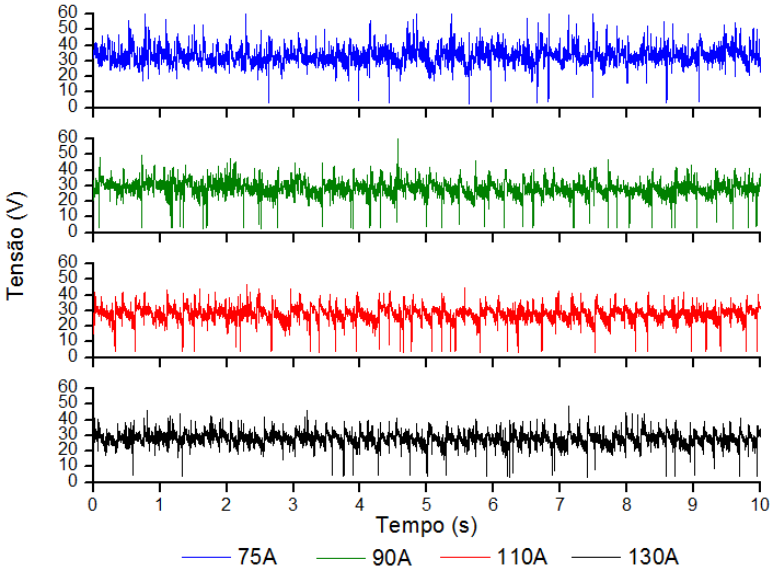

Figura 47. Oscilogramas de tensão para os níveis de corrente de 75, 90, 110 e 130A. Polaridade Direta. Eletrodos E7018.

Diferentemente do eletrodo rutílico, a polaridade direta não trouxe melhorias significativas para o eletrodo básico E7018. É evidente, entretanto, que independentemente da polaridade, baixos níveis de corrente geram instabilidades tais que resultam em picos acentuados de tensão durante o processo.

Para observar se as variações bruscas da tensão poderiam afetar a corrente, analisou-se detalhadamente os eventos ocorridos na soldagem com polaridade reversa com 75A e eletrodos E6013, mostrado na Figura 48.

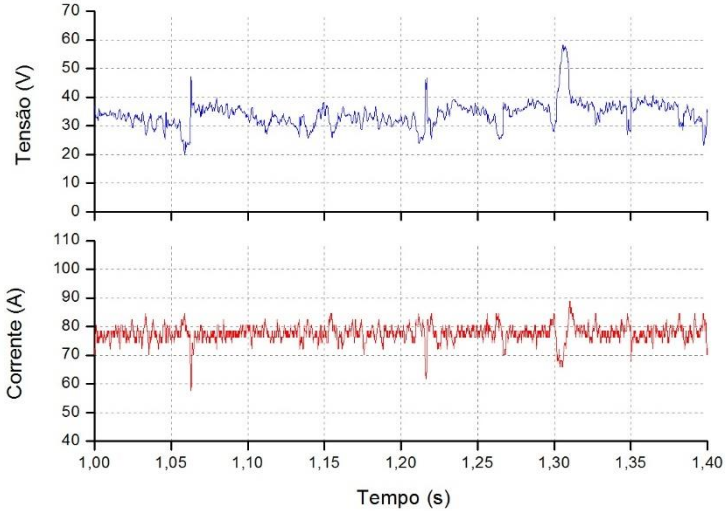

Figura 48. Perturbações na tensão e corrente. Polaridade Reversa 75A. Eletrodo E6013.

Durante o intervalo estudado, ocorreram três picos de tensão, da ordem de 45 a 60V aproximadamente. Conforme esperado e relatado na literatura [38], os picos de tensão causam demasiada instabilidade no arco, causando perturbações elevadas na corrente de soldagem. No trecho apresentado na Figura 48, a queda da corrente excedeu 15A em relação ao valor selecionado na fonte de soldagem (75A), na marca de 1,06s aproximadamente. Isto ocorreu devido à limitação da fonte em manter a potência de arco requerida naquele instante (devido ao aumento abrupto da tensão), resultando na queda momentânea da corrente.

Quanto as filmagens em alta velocidade, foi observado a ocorrência de instabilidades acentuadas durante o ensaio na polaridade reversa e

75A, condição esta que apresentou maiores perturbações da tensão durante a soldagem (mostrado pela Figura 44).

Durante tal ensaio, foi possível capturar um evento no qual ocorre a ruptura da bolha, ainda na região próxima ao arco elétrico. A aquisição simultânea da tensão e corrente mostra o reflexo da instabilidade ocorrida no arco. A Figura 49 apresenta a evolução do rompimento da bolha, durante a soldagem com 75A e polaridade reversa.

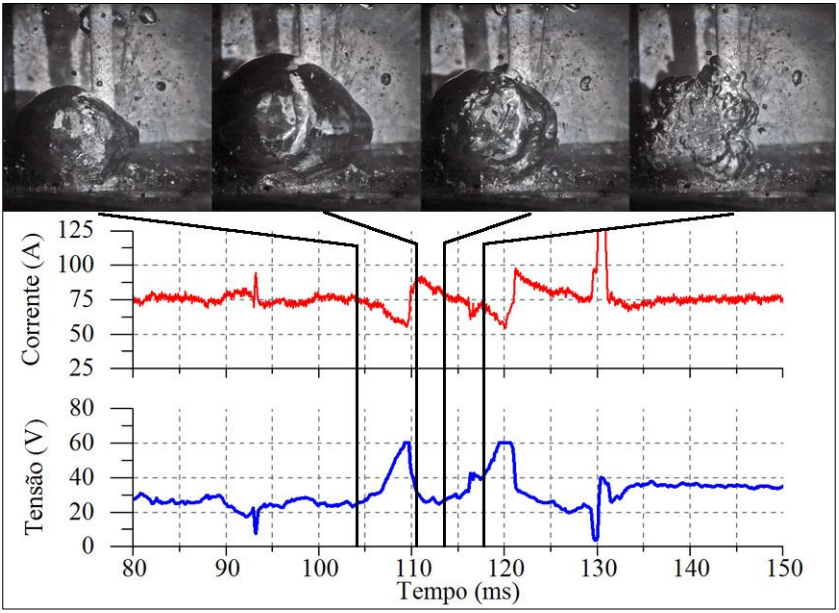

Figura 49. Evolução do rompimento da bolha. Polaridade Reversa 75A. Evento 1.

Na etapa 1 (104ms), observa-se que até o momento houve o crescimento regular da bolha, estando neste instante com um diâmetro de aproximadamente 22 mm. A bolha então cresce bruscamente durante 7 ms até a etapa 2, atingindo diâmetro máximo de aproximadamente 30 mm logo após o primeiro pico de tensão. Nota-se que a variação brusca e excessiva da tensão gerou perturbações na corrente de soldagem, reduzindo-a em mais de 20A momentaneamente.

A bolha então contrai-se, atingindo 23 mm de diâmetro, na marca dos 113 ms da filmagem, apresentado na etapa 3. Após isto, a bolha colapsa (etapa 4) e mantém uma característica pulsatória (levemente expandindo e contraindo) por alguns instantes.

A rápida expansão da bolha ocorreu juntamente com a elevação brusca da tensão, logo após a marca de 104 ms na filmagem, seguido pela sua contração e colapso. O período no qual o evento aconteceu foi de aproximadamente 13 ms.

O reflexo do rompimento da bolha nos sinais de tensão e corrente observados são fortes indícios de que é possível analisar a estabilidade do processo baseando-se na leitura dos mesmos, isto porquê momentos após o rompimento da bolha observado, outra evento ocorreu, na qual efeitos semelhantes na corrente e tensão do processo foram observados, conforme a Figura 50 ilustra.

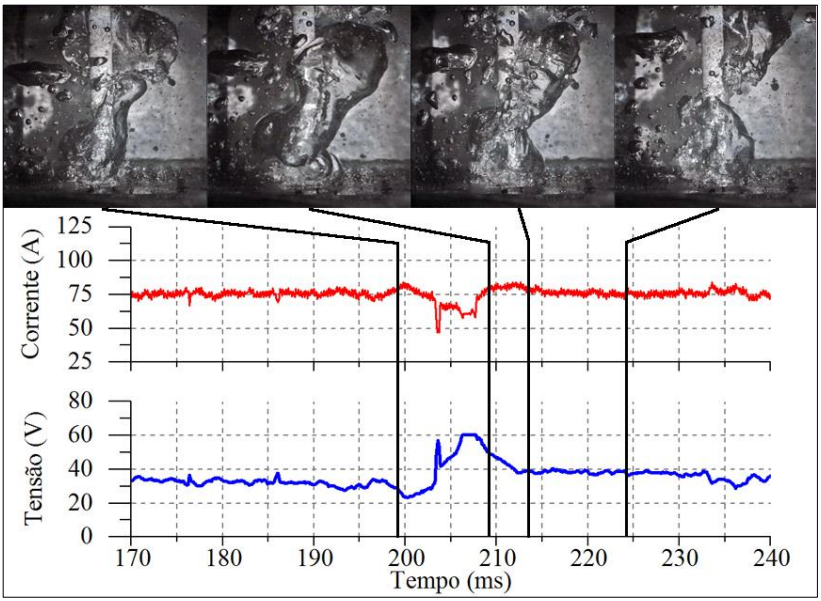

Figura 50. Evolução do rompimento da bolha. Polaridade Reversa 75A. Evento 2.

Na etapa 1 observa-se o crescimento regular da bolha. Esta expande-se durante o pico de tensão (momento no qual ocorre a queda da corrente) até a marca de 209 ms (etapa 2). A partir deste momento a bolha se contrai, atingindo seu menor diâmetro em 213 ms (etapa 3). Enquanto isto, outra bolha é continuamente formada, até o destacamento da bolha anterior (com a qual ocorreu o fenômeno), mostrado na etapa 4.

Os eventos aqui observados ocorreram próximos ou na região do arco elétrico. Segundo Feng *et al.* [38] relata-se que o rompimento das bolhas podem ocorrer durante o desprendimento ou após o afastamento

da região do arco. Neste caso, os fumos de dentro da bolha são dispersados no ambiente e o arco elétrico mantém-se ainda estável, com pouco ou nenhum efeito deletério sobre o mesmo.

Segundo Feng *et al.* [38], ao realizar ensaios com baixa velocidade de alimentação (e consequentemente, menor corrente de soldagem) para o processo arame tubular em ambiente molhado, a geração de bolhas de pequeno diâmetro ocasionava na frequente extinção do arco elétrico, o que caracteriza este modo de evolução da bolha como indesejado. A literatura mostra, portanto, que o fenômeno observado que culmina no rompimento da bolha não se restringe apenas ao processo eletrodo revestido, mas também para o arame tubular [38][52].

A hipótese principal para a dinâmica de rompimento da bolha é que os picos de tensão são um reflexo de uma momentânea (ou muito próxima) extinção do arco. O crescimento abrupto do diâmetro da bolha nos instantes prévios ao seu colapso pode ser explicado pela desionização do gás, o que resulta no aumento de seu volume. A queda de tensão indicaria a reignição do arco, consequentemente reionizando o gás e reduzindo o volume da bolha. Tais fenômenos resultam em forças transientes atuando sobre a bolha, podendo assim culminar em seu colapso. Isto aparenta ser plausível, tendo em vista o crescimento contínuo da bolha durante a subida da tensão (e alguns instantes depois) e que apenas durante a queda da tensão a bolha se contrai e colapsa.

Embora Feng *et al.* [38] tenha mencionado a ruptura de bolhas fora da região do arco, isto pode ocorrer devido a redução da pressão sobre a bolha à medida que ela chega à superfície. Isto resulta na expansão dos gases internos, podendo levar a sua ruptura/fragmentação. Neste caso, considera-se como um colapso natural da bolha que não produz efeitos sobre o processo de soldagem.

Quanto ao diâmetro das bolhas, a utilização da polaridade reversa e 75A resultou em média bolhas de pequeno diâmetro, da ordem de 21 mm, com uma elevada frequência de formação/destacamento de aproximadamente 20 Hz. Para a polaridade direta e mesmo nível de corrente, as filmagens apresentaram a formação de bolhas com diâmetro médio de 26 mm. A formação de bolhas de maior diâmetro pode ter sido o fator a garantir maior estabilidade para o processo. A Figura 51 apresenta três bolhas para a polaridade reversa e direta e seus respectivos diâmetros.

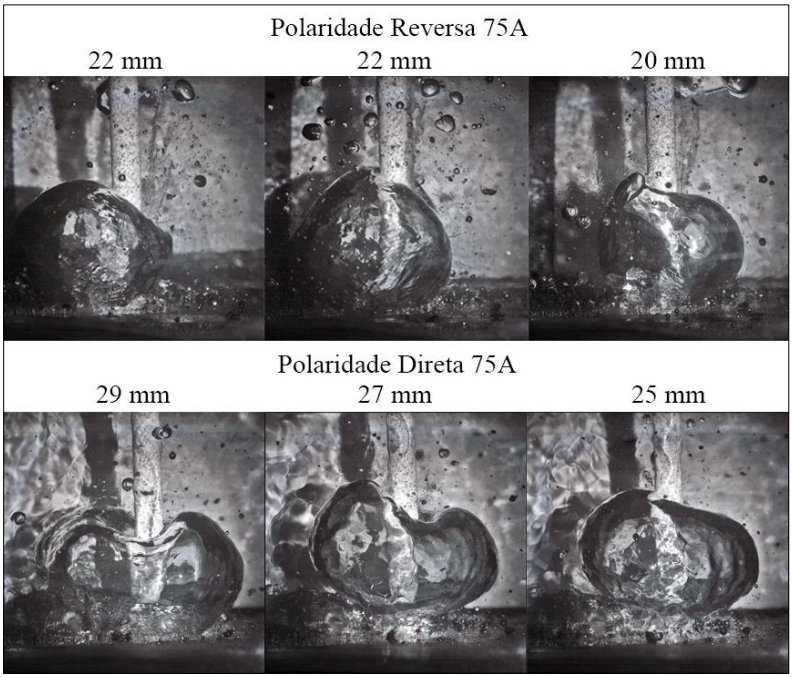

Figura 51. Comparativo entre diâmetro de bolhas. Polaridade Reversa (cima) e Direta (baixo). 75A.

O incremento da corrente para 90A acarretou no aumento do volume das bolhas, com uma média de 29 mm para a polaridade direta e 24 mm de diâmetro para a reversa. A Figura 52 apresenta três bolhas de cada polaridade, para corrente de soldagem igual a 90A. As bolhas selecionadas foram as que melhor representavam o processo.

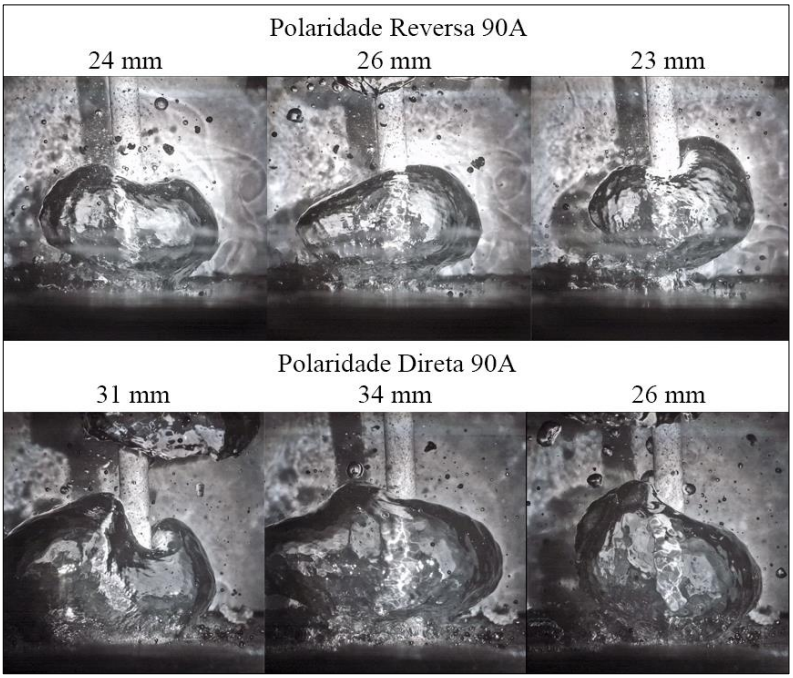

Figura 52. Comparativo entre diâmetro de bolhas. Polaridade Reversa (cima) e Direta (baixo). 90A.

Para 110A, a polaridade reversa gerou bolhas com diâmetro médio de 31 mm enquanto que a polaridade direta resultou em bolhas de diâmetro médio de 26 mm. A Figura 53 apresenta três bolhas de cada polaridade para 110A.

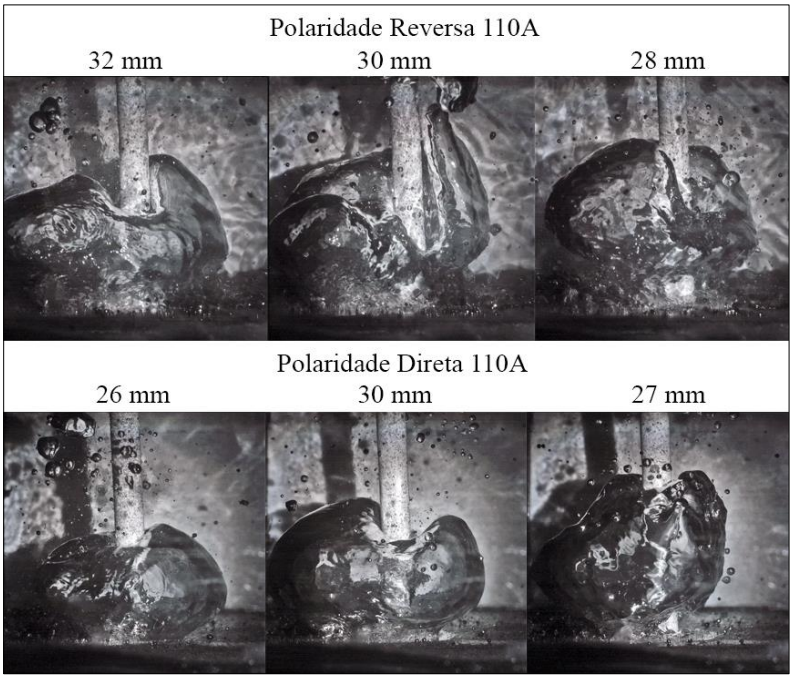

Figura 53. Comparativo entre diâmetro de bolhas. Polaridade Reversa (cima) e Direta (baixo). 110A.

Desta vez, o aumento da corrente resultou em bolhas maiores para a polaridade reversa, enquanto que reduziu levemente o diâmetro das bolhas na polaridade direta. A relação entre o diâmetro da bolha e a frequência de destacamento médios são apresentados nos gráficos da Figura 54, para as correntes de soldagem e ambas as polaridades empregadas nos ensaios.

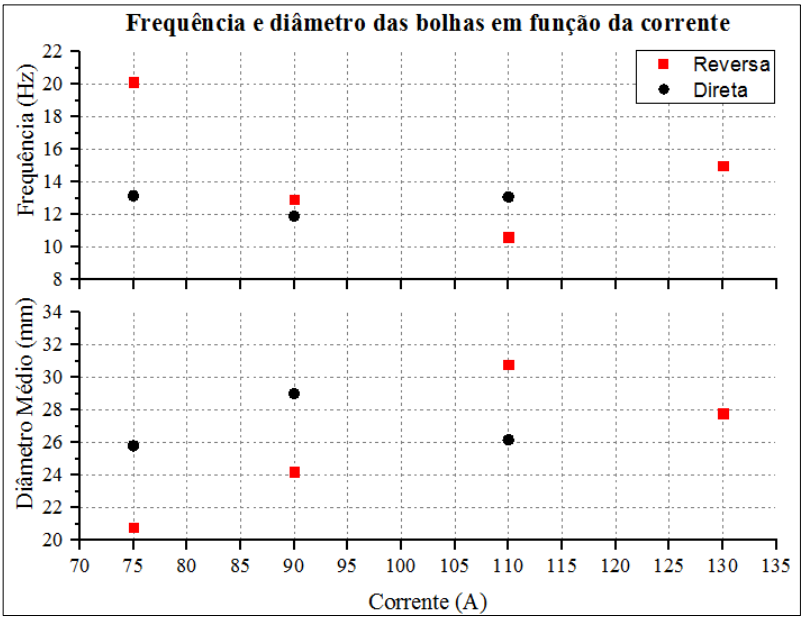

Figura 54. Frequência e diâmetro das bolhas em função da corrente.

Conforme esperado, a relação entre a frequência e diâmetro das bolhas é inversamente proporcional: quanto maior a bolha, menor é a frequência de emissão das mesmas e vice-versa.

Para ambas as polaridades, observa-se a existência de um ponto de inflexão, a partir de onde o aumento da corrente acarreta no aumento da frequência e redução no diâmetro das bolhas. Isto é de certa forma esperado, dado que as bolhas não cresceriam e a frequência reduziria indefinidamente com o aumento da corrente.

Isto corrobora com a hipótese levantada quanto ao rompimento das bolhas, onde acusa-se a perda de rigidez do arco como o causador primário. Feng *et al*. [38] aponta o pequeno diâmetro da bolha como possível fator causador do rompimento das mesmas, devido à uma proteção insuficiente da região do arco elétrico. No entanto, dada a existência do ponto de inflexão, certas condições como 130A e polaridade direta possivelmente atingem um diâmetro de bolha similar ao encontrado para 75 ou 90A em polaridade reversa (extrapolando o gráfico da Figura 54), sem comprometer a estabilidade do arco, como visto na Figura 45. Isto indica que embora o diâmetro da bolha tenha influência na proteção do arco e poça de fusão, não é necessariamente fator preponderante para a estabilidade do processo.

Os resultados dos ensaios referentes à taxa de fusão dos eletrodos são apresentados na Figura 55. Cada ponto representa a média de dois ensaios.

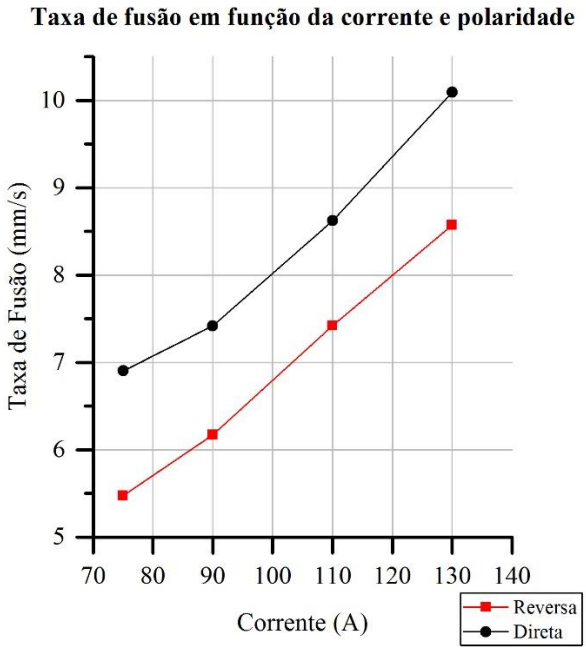

Figura 55. Taxa de fusão em função da corrente e polaridade.

Os resultados apresentados corroboram com a análise de frequência e diâmetro das bolhas. Na Figura 54, o ponto de inflexão para a polaridade direta foi em 90A, enquanto que para a polaridade reversa foi 110A. A Figura 55 mostra que em ambos os casos a taxa de fusão dos eletrodos foi aproximadamente a mesma, em torno de 7,4 mm/s.

Isto mostra que existe uma relação entre a taxa de fusão dos eletrodos e a dinâmica de formação das bolhas durante a soldagem, e que a polaridade é um dos fatores que influencia tal dinâmica.

Em geral, é incerto o comportamento do consumo em relação à polaridade em eletrodos revestidos, dado que isto é influenciado pela composição do revestimento [53] Isto pode explicar porque não houve diferença perceptível entre as polaridades direta e reversa, quanto aos oscilogramas de tensão, para os eletrodos básicos E7018.

Observou-se também a ocorrência de instabilidades ao utilizar comprimento de arco elevado (acima de 2-3 mm, visualmente) e principalmente durante a abertura de arco quando utilizada Rec (distância de recuo) em valores superiores a 3mm.

A Figura 56 apresenta os oscilogramas da tensão para 35, 36, 37 e 38V para eletrodos rutílicos, 110A e polaridade reversa (mais crítica) e queda de tensão de 1V. Este nível de corrente e polaridade foram escolhidos para ilustrar o efeito do comprimento do arco pois enquadra-se, quanto ao primeiro, em um parâmetro que confere estabilidade para o processo (conforme visto anteriormente quando avaliou-se quatro níveis distintos de corrente) e quanto ao segundo, por ser uma polaridade mais susceptível (ou sensível) à ocorrência dos fenômenos causadores das instabilidades. O objetivo aqui foi observar que mesmo utilizando um patamar de corrente suficiente para conferir estabilidade, deve haver uma concatenação com o valor da tensão/comprimento do arco.

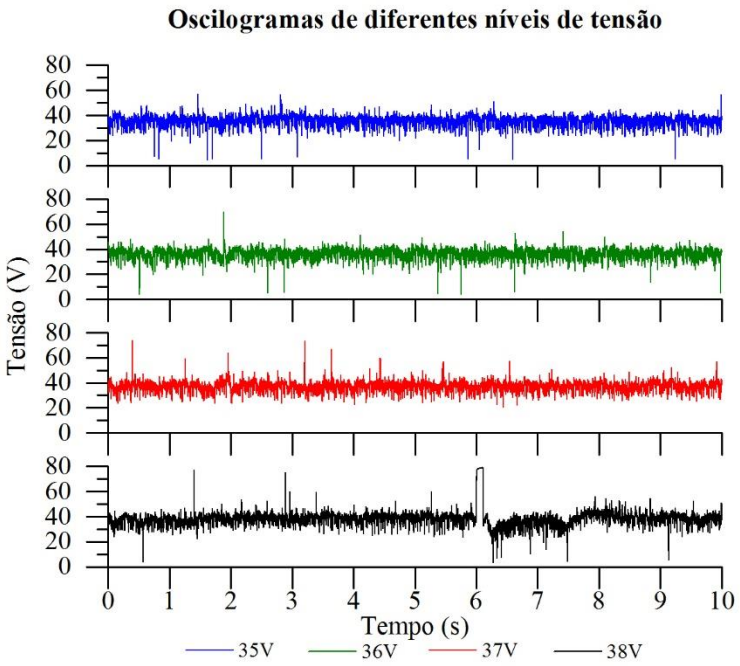

Figura 56. Oscilogramas de tensão para 35, 36, 37 e 38V. Polaridade Reversa 110A. Eletrodos E6013.

Em 35V, embora alguns picos de tensão estejam presentes no oscilograma, sua intensidade foi relativamente pequena quando comparado com os demais, da ordem de 50V aproximadamente. O incremento da tensão culminou no aumento da ocorrência e intensidade dos picos de tensão, aproximando-se de 80V e até levando à extinção do arco como registrado no ensaio com 38V.

Pode-se inferir que variações no comprimento do arco (principalmente no que tange ao aumento deste), torna o processo mais sensível e que isto é agravado em níveis de corrente menores, podendo estar relacionado à perda de rigidez do arco. Isto aponta que a compensação da queda de tensão nos eletrodos revestidos é de grande significância para operações em ambiente molhado, garantindo a constância no comprimento do arco durante a soldagem e evitando assim a desestabilização do processo.

Os resultados indicam que quando um conjunto de fatores está presente, a saber, baixos níveis de corrente, polaridade inadequada para o eletrodo/aplicação e bolhas de pequeno diâmetro e alta frequência de destacamento, o processo torna-se irregular e susceptível a interrupções (extinção do arco). A correta seleção dos parâmetros é, portanto, fator crucial para a execução do processo automatizado em ambiente molhado.

6.1.2 Aplicabilidade da corrente pulsada em soldagem submarina molhada com eletrodos revestidos

Os oscilogramas contendo os sinais de tensão e corrente concernentes aos ensaios de 5, 20 e 50Hz com amplitude de 30A, são apresentados na Figura 57, Figura 58 e Figura 59, respectivamente. Cada figura contém três gráficos: o superior é referente ao sinal da tensão durante 10s de processo. A região selecionada em vermelho é magnificada e detalhada nos gráficos central (tensão) e inferior (corrente). O período magnificado de cada sinal é referente a 10 pulsos de corrente. Isto foi realizado igualmente para a amplitude de 100A, apresentados posteriormente.

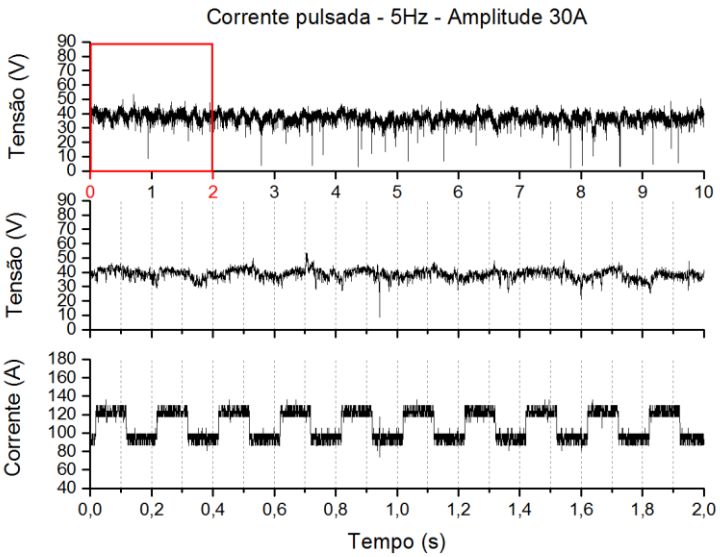

Figura 57. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 5Hz e Amplitude 30A.

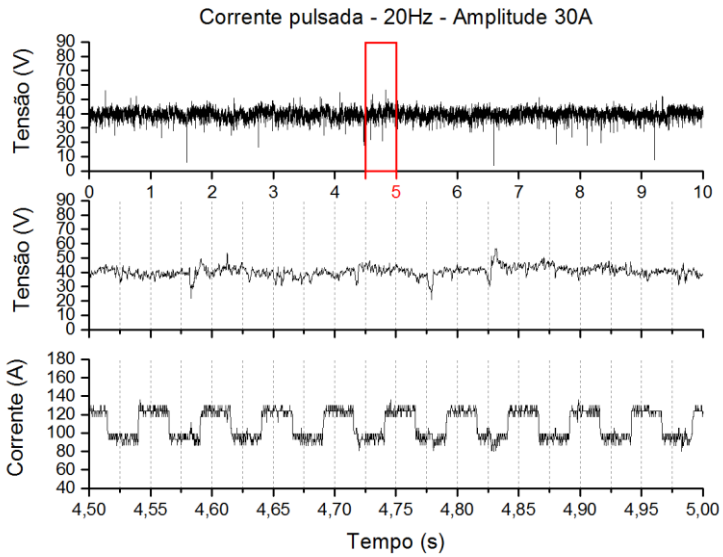

Figura 58. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 20Hz e Amplitude 30A.

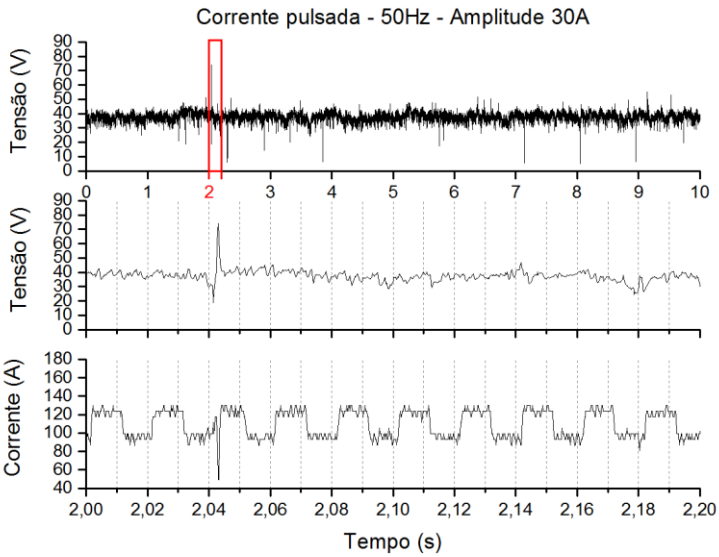

Figura 59. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 50Hz e Amplitude 30A.

As configurações utilizadas não resultaram em grandes perturbações do arco elétrico. Embora alguns picos de tensão tenham ocorrido, foram de baixa magnitude, com exceção do ensaio para 50Hz, onde um pico acentuado ocorreu durante a transição dos níveis de base/pulso de corrente.

Nota-se que a pulsação em baixa frequência (5Hz) foi refletida com maior clareza na tensão de arco do que em frequências maiores. É possível que o maior período de pulsação permita a formação de uma gota metálica maior na ponta do eletrodo, podendo representar a transferência metálica predominante.

Os resultados para amplitude igual a 100A são apresentados na Figura 60, Figura 61 e Figura 62, concernentes aos ensaios para 5, 20 e 50Hz, respectivamente.

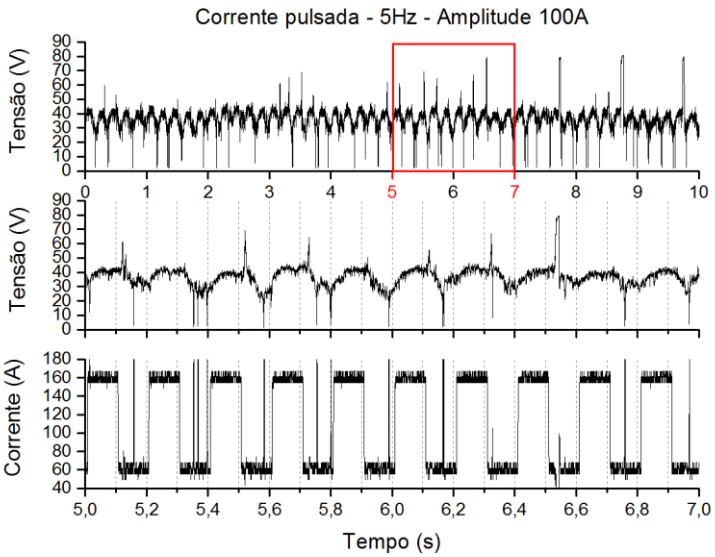

Figura 60. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 5Hz e Amplitude 100A.

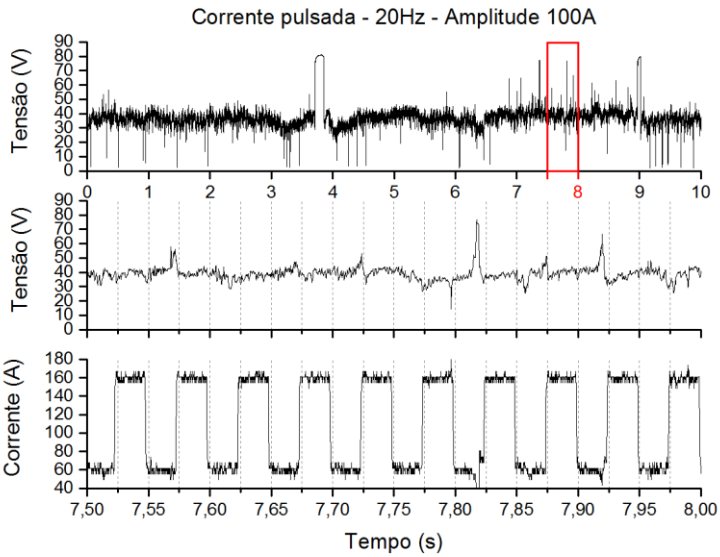

Figura 61. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 20Hz e Amplitude 100A.

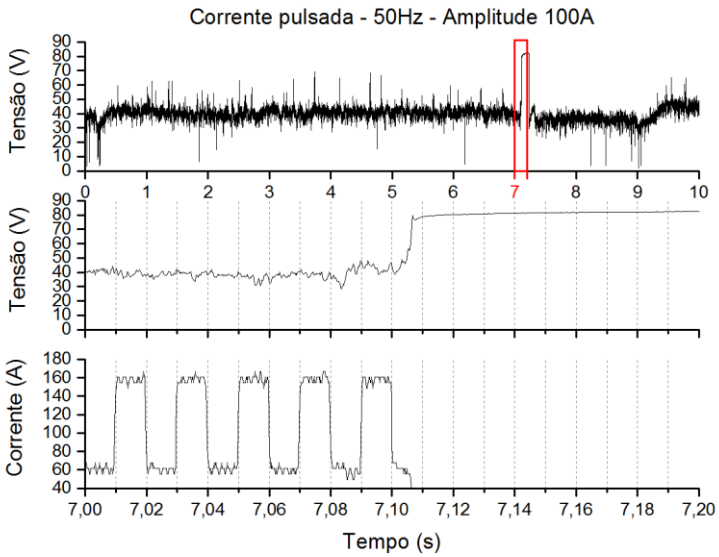

Figura 62. Oscilogramas de tensão e corrente. Corrente pulsada. 50Hz e Amplitude 100A.

O aumento da amplitude da onda para 100A evidenciou ainda mais o reflexo da pulsação na tensão em baixa frequência (5Hz), mais uma vez sugerindo uma influência na transferência metálica, o que corrobora com os resultados de Suga e Hasui [16]. Nota-se a ocorrência de curtos-circuitos durante o período de base apenas. Isto sugere que baixas frequências podem afetar também na dinâmica da poça neste processo, onde durante o pulso de corrente uma porção metálica é formada na ponta do eletrodo e a poça é projetada para baixo, e que durante a base de corrente a poça retorna e a gota é transferida.

A elevada amplitude da onda gerou instabilidades, mesmo utilizando frequências maiores. A Figura 62, que apresenta os sinais de tensão e corrente para 50Hz e amplitude 100A, detalha que a extinção do arco ocorreu durante a corrente de base. Isto sugere que a utilização de níveis de corrente baixos, mesmo que por um curto tempo, é capaz de desestabilizar o processo. É possível, no entanto, que frequências ainda maiores de pulsação possam solucionar tal problema.

Quanto a taxa de fusão, a Figura 63 apresenta os valores medidos para cada ensaio com corrente pulsada.

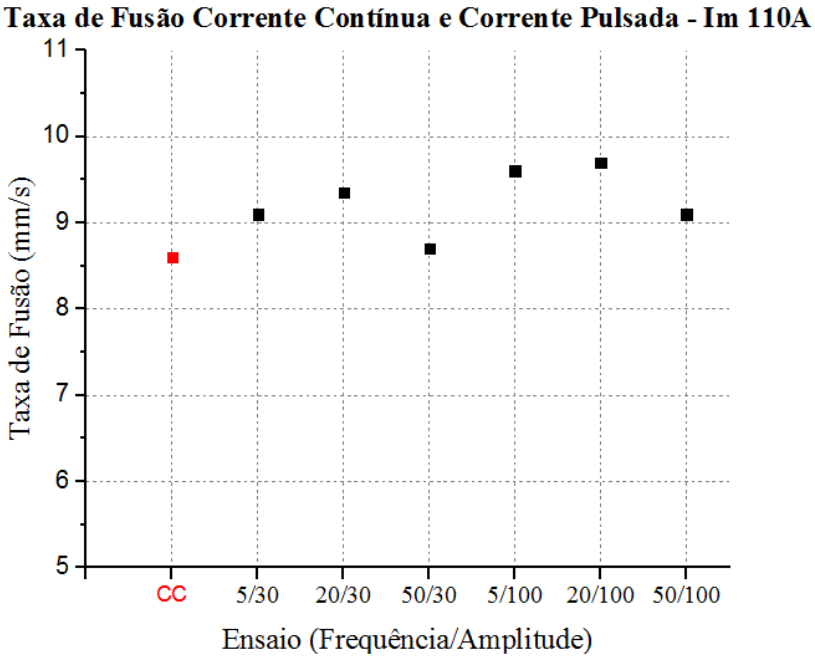

Figura 63. Taxa de fusão durante os ensaios para corrente pulsada. O ponto em vermelho representa a taxa de fusão na condição CC- I = 110A.

Conforme esperado, a corrente pulsada aumentou a taxa de fusão dos eletrodos em geral, devido à maior corrente eficaz (principalmente para 100A de amplitude de pulso) e possivelmente devido a influências na transferência metálica. O ensaio 50Hz – 30A amplitude (50/30) apresentou taxa de fusão semelhante ao ensaio com corrente constante. É possível que dinâmica de bolha semelhante esteve presente no processo.

A condição que resultou no melhor aspecto visual do cordão foi para 50Hz e amplitude 30A: a condição mais próxima à corrente constante. A Figura 64 apresenta um comparativo entre os cordões obtidos com tal configuração (corrente pulsada 50Hz e Amplitude 30A) e a corrente constante, corrente média 110A e velocidade de soldagem de 24 cm/min.

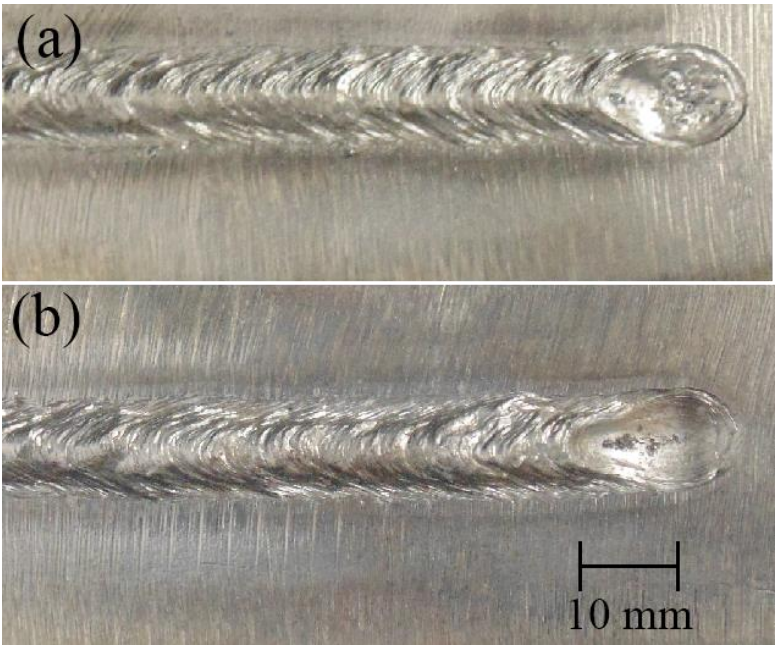

Figura 64. Aspecto visual dos cordões. Em (a): corrente pulsada; em (b): corrente contínua. Corrente média 110A e velocidade de soldagem 24 cm/min.

A Figura 65 apresenta as macrografias dos cordões apresentados. A Tabela 2 contém os dados referentes à altura do reforço, largura e penetração dos cordões.

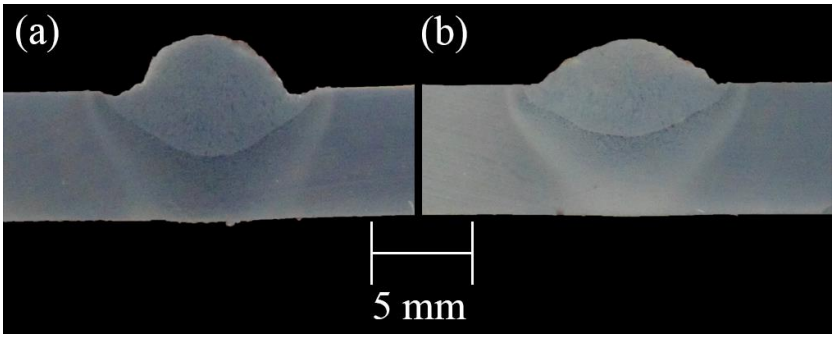

Figura 65. Macrografias dos ensaios realizados. Em (a): corrente contínua; em (b): corrente pulsada. Corrente média 110A e velocidade de soldagem 24 cm/min.

Tabela 2. Largura, reforço e penetração dos cordões para corrente contínua e pulsada.

	Corrente Contínua	Corrente Pulsada
Largura (mm)	8,3	9,3
Reforço (mm)	2,7	2,1
Penetração (mm)	3,2	2,5

A corrente pulsada apresentou melhorias nos aspectos geométricos do cordão, conferindo maior molhabilidade e reduzindo altura do reforço. Além disto, não apresentou mordeduras, diferentemente da corrente contínua, nas condições ensaiadas.

Observou-se, portanto, viabilidade na aplicação da corrente pulsada em ambiente molhado com eletrodos revestidos, apresentando bom potencial de refino do processo, como controle da transferência metálica, melhorias na geometria do cordão e possivelmente benefícios mecânico e metalúrgico.

7 BANCADA E EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS

Dado que este trabalho objetiva estabelecer uma infraestrutura inicial para a execução de pesquisas em soldagem submarina molhada com eletrodos revestidos de modo automatizado, foi desenvolvido um equipamento dedicado para o cumprimento de tal tarefa.

Intitulado SM2-500 (Sistema Modular de 2 Eixos – 500 mm de curso), o equipamento possui embarcado o AVC para os processos TIG, MIG Pulsado e Eletrodo Revestido (desenvolvido neste trabalho). O curso do eixo Z de 500 mm permite a utilização de eletrodos com comprimento máximo recomendado de 450 mm. A Figura 66 apresenta o sistema desenvolvido.

Figura 66. Sistema Modular de 2 eixos SMD2-500.

O sistema permite ainda a alteração do ângulo de ataque entre 0 e 45° por meio da regulagem mostrada na Figura 67.

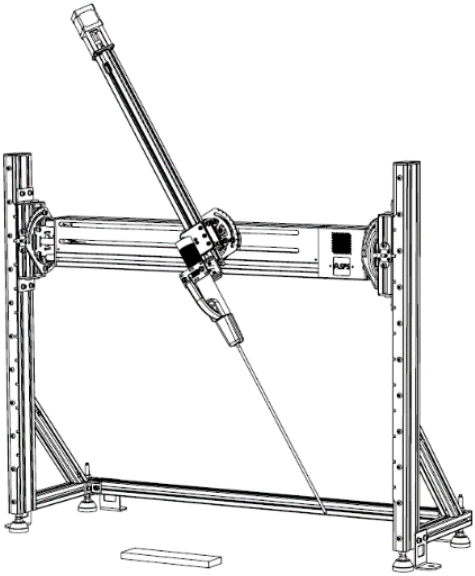

Figura 67. Alteração do ângulo de ataque. SM2-500.

O ângulo de trabalho pode ser ajustado por meio da regulagem mostrada na Figura 68. Isto é necessário para o processo eletrodo revestido caso a soldagem de filete deva ser realizada.

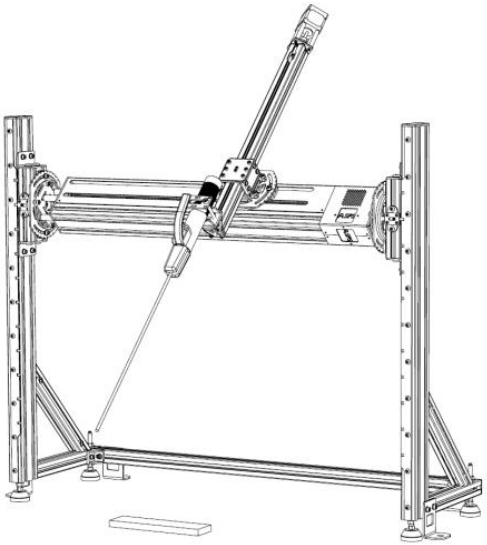

Figura 68. Alteração do ângulo de trabalho. SM2-500.

Para alternar entre os processos e conferir maior versatilidade ao equipamento, é possível alterar a altura do eixo X. A Figura 69 ilustra isto.

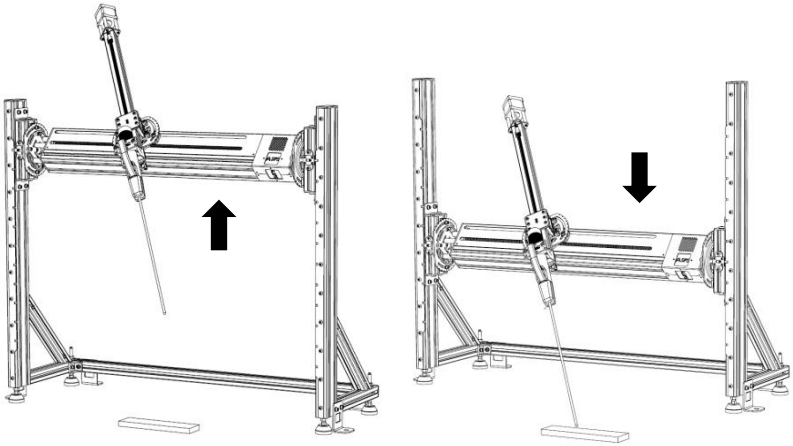

Figura 69. Alteração da altura do eixo X.

O suporte para o porta-eletrodos/tocha foi desenvolvido visando disponibilizar diversas configurações diferentes, tanto de tochas quanto ao ângulo empregado, conforme mostra a Figura 70.

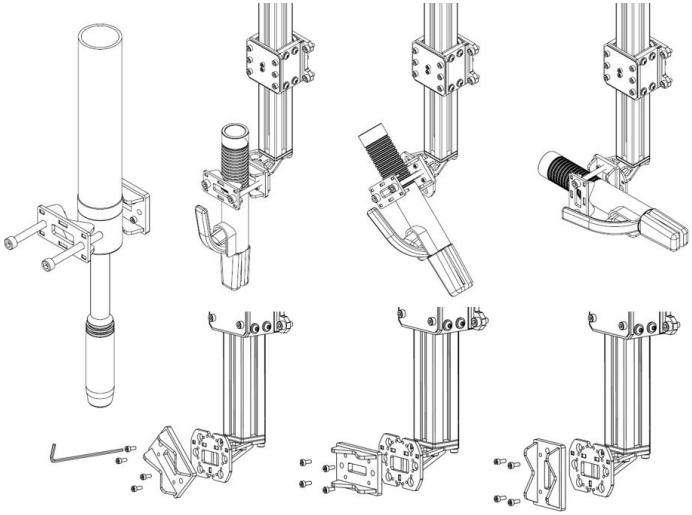

Figura 70. Configurações possíveis para porta-eletrodos e tochas de soldagem.

A bancada final é exibida na Figura 71.

Figura 71. Bancada final desenvolvida neste trabalho.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusões

O presente trabalho traduz-se em uma importante contribuição para a elaboração de infraestrutura necessária para os estudos em ambiente molhado com o processo eletrodo revestido, assim como um passo na trajetória para sua automação. Ademais, fundamenta as características principais de tal processo, viabilizando o avanço científico e tecnológico.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir:

- O desenvolvimento de um sistema e bancada para soldagem com eletrodos revestidos deve suprir as características do processo, permitindo o consumo completo do eletrodo, abarcando versatilidade na alteração dos ângulos de ataque e trabalho, caso seja necessário. A rigidez do manipulador é um importante fator, tendo em vista o relativo grande comprimento do eixo Z e eletrodos, devendo impedir ao máximo as vibrações devido a movimentação do equipamento. A utilização de um vidro convencional entre a câmera e o arco elétrico é suficiente para produzir filmagens em alta velocidade com ótima qualidade. Além disto, a câmera deve estar posicionada perpendicularmente ao trecho a ser filmado, de modo a reduzir as distorções nas imagens causadas pela água.

- O sistema AVC necessário para aplicações com o processo eletrodo revestido requer a adesão de um controlador PI, aliado a rotinas especiais concernentes a abertura e manutenção do arco.

- A compensação da queda de tensão no eletrodo é uma medida importante para a execução do processo em ambiente molhado, tendo em vista a maior sensibilidade do mesmo, o que requer um curto comprimento de arco.

- A utilização de fontes especiais para soldagem submarina molhada apresenta grande contribuição para a automatização da mesma. A utilização do pulso de corrente no toque inicial entre eletrodo e a peça reduz a ocorrência da colagem entre ambos. Além disto, a corrente de curto-circuito contribui para o aumento da robustez do procedimento

durante a abertura de arco, permitindo o início do processo mesmo com a ocorrência de atrasos na atuação do manipulador;

- Em ambiente molhado, o aumento dos níveis de corrente gera melhorias na estabilidade do arco, em ambas polaridades direta e reversa. Isto foi relacionado ao aumento da rigidez do arco e formação de bolhas maiores.

- A polaridade é um fator importante para a estabilidade do processo. Em geral, a polaridade escolhida dependerá do tipo de eletrodo (alma e revestimento). No entanto, a utilização da que conferir maior taxa de fusão (geração de bolhas maiores) pode trazer melhorias operacionais e maior repetitividade.

- A utilização da corrente pulsada pode trazer melhorias quanto aos aspectos geométricos dos cordões de solda, caso os parâmetros adequados sejam utilizados. Opta-se por utilizar baixas amplitudes de pulsação e frequências elevadas.

- A corrente pulsada em baixa frequência é capaz de contribuir para o controle da transferência metálica, podendo melhorar continuidade das características mecânica e metalúrgica ao longo do cordão.

- Amplitudes de pulsação elevadas, resultando em níveis de corrente baixos durante o período de base, implicam na desestabilização do processo, mesmo que frequências de pulsação de até 50Hz sejam adotadas.

8.2 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados apresentados neste trabalho culminaram em importantes conclusões, contribuindo para o avanço das pesquisas em soldagem molhada. Entretanto, estudos mais aprofundados devem ser almejados, buscando o aperfeiçoamento das técnicas e o constante desenvolvimento da tecnologia.

A seguir, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Verificar as possíveis vantagens da adesão do controle derivativo (PID completo) no AVC, identificando quais aplicações podem requerê-lo;

- Investigar a queda de tensão real nos eletrodos, em função da corrente e ambiente, além de estabelecer metodologias para tal compensação;

- Estudar a influência da profundidade (pressão) sobre a estabilidade do arco nas condições apresentadas neste trabalho;

- Estudar maior gama de parâmetros no modo corrente pulsada, abarcando maiores frequências, diferentes duty cycles e amplitudes de corrente. Além disto, investigar possíveis melhorias mecânicas e metalúrgicas nos cordões de solda.

- Realizar o estudo da dinâmica das bolhas em corrente pulsada, por meio de filmagens em alta velocidade, buscando observar se há a possibilidade de controle da emissão das bolhas (diâmetro e frequência).

- Investigar o comportamento da transferência metálica com corrente pulsada, além dos benefícios de seu controle sobre o processo em ambiente molhado.

9 REFERÊNCIAS

[1] BRAGA, B. **O mundo do petróleo e o petróleo do mundo**. *Macaé Offshore*, Macaé – RJ, v. 84, n. XIV, p. 14 a 16, 2015.

[2] MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. **Blessing or curse: Impacts of the Brazilian Pre-Salt oil exploration**. EconomiA, v. 15, Issue 3, p. 343-362, 2014.

[3] PETROBRAS. Planos de Negócios e Gestão [Internet]. 2016 [citado 10 Jan 2018]. Disponível em: http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategia/plano-de-negocios-e-gestao/

[4] FILHO, J. C. P; MELLO, R. T.; MEDEIROS, R. C.; PARANHOS, R. **História recente da soldagem subaquática molhada**. Infosolda. 2004.

[5] SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz**. 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

[6] DIRENE FILHO, Hellinton. **MIG/MAG CCC - Avanços na Tecnologia de Controle da Transferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz.** 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

[7] SARTORI, F. **Tecnologias e Técnicas Modernas do Processo MIG/MAG para o Passe de Raiz em Soldagem Orbital de Tubos**. 2016. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

[8] MARQUES, C. **Análise de Técnicas e Efeitos Físicos da Alimentação Dinâmica do Arame no Processo de Soldagem MIG/MAG com Vistas ao Desenvolvimento de um Sistema Flexível Nacional.** 2017. 210p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

[9] GODINHO, C. Soldagem TIG Orbital – **Avaliação Experimental do Processo de Soldagem TIG Automatizado Alimentado com**

Reduzidos Ângulos de Inserção de Arame em Relação ao Eletrodo. 2017. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

[10] SILVA, R. G. N. **Caracterização do Processo de Soldagem TIG com Alimentação de Arame Dinâmica em Alta Frequência. 2016. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso**. Curso de Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

[11] ANDRADE L. P. C. S. **Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular**. 1995. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

[12] TEICHMANN, E. W. **Contribuição ao Desenvolvimento da Soldagem Subaquática Molhada com Arames Tubulares**. 2000. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

[13] BAIXO, C. E. I. **Estudo da Soldagem MIG/MAG pela Técnica Hiperbárica a Seco**. 1999. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

[14] GLOBAL INSTITUTE M. **A future that works: automation, employment and productivity**. McKinsey Global Institute. 2017.

[15] DZELNITZKI, M. D. **TIG – Direct-Current Welding with High-Frequency Pulses, an Interesting Process Variant**. 2000 EWM HIGHTEC WELDING GmbH, 2000.

[16] SUGA, Y.; HASUI, A. **Underwater gravity pulsed arc welding**. Welding International. 2:9, 802-807. 1988.

[17] FIGUERÔA, D. W.; PIGOZZO, I. O.; SILVA, R. H. G.; SANTOS, T. F. A.; URTIGA FILHO, S. L. **Influência da posição e dos parâmetros de soldagem na soldagem TIG orbital aplicada a tubulações de aço baixo carbono**. Soldagem & Inspeção, v. 20, p. 446-455, 2015.

[18] GOOCH, T. G.; HONECOMBE, J. **Welding Variables and Micro-fissuring in Austenitic Stainless Steel Weld Metal**. AWS 61st Annual Meeting. Los Angeles, California. 1980.

[19] OLIVEIRA, F.R. **Estudo Sobre o Correlacionamento do Fenômeno das Bolhas, Sinais Elétricos e Metal de Solda na Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodos Revestidos**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, Dissertação, 118f, 2012.

[20] AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook, Materials and Applications – part I**. Volume III, Miami, EUA, 1996.

[21] OLIVEIRA, F. R. **Estudo sobre o correlacionamento do fenômeno das bolhas, sinais elétricos e metal de solda na soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos**. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Belo Horizonte. 2012.

[22] ROWE, M. D.; LIU, S. **Recent Development in Underwater Wet Welding.** Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 6, No. 6. pp 387-396, 2001.

[23] WERNICKE, R., POHL, R. **Underwater Wet Repair-Welding and Strength Testing on Pipe-Patch Joints.** 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE – 1998.

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

[25] TSAI, C. L. MASUBUCHI, K. **Interpretive Report on Underwater Welding**. Welding Research Council Bulletin, 224, February, 37pg, 1977.

[26] SANTOS, V. R. (2010). **Evaluation and development of electrodes for wet welding of structural ship steels**. Proceedings of the ASME 2010 29th International conference on ocean, offshore and artic engineering, (pp. 1-10). Shangai, China.

[27] JOSHI, A.M. **Underwater Welding.** Metal Web News. Disponível em: <http://www.metalwebnews.com/howto/underwater-welding/underwater-welding>. Acesso em 27 out. 2016, 00:23.

[28] GUO, N.; WANG, M.; DU, Y.; GUO, W.; FENG, J. **Metal transfer in underwater flux-cored wire wet welding at shallow water depth**. Materials Letters, v. 144, p. 90-92, 2015.

[29] SHI, Y.H.; ZHENG, Z.P.; HUANG, J. **Arc stability of shallow-wet and atmospheric in-air welding**. Journal of South China University Technology: Natural Science. 40(7), 67–72. 2012.

[30] MAZZAFERRO, J. A. E.; MACHADO, I. G. **Study of arc stability in underwater shielded metal arc welding at shallow depths**. Journal Mechanical Engineering Science. Vol. 223. 2009.

[31] NIXON, J. H.; GRAHAM, S. R. B. **Arc instability in shallow water wet welding**. In Proceedings of the OMAE. Glasgow, UK, vol. III-A, p. 129-132. 1993.

[32] WOOD, B. J.; BRUCE, W. A. **Underwater wet repair welding at depths approaching -600ft**. Proceedings International Conference on Underwater Welding. New Orleans, Louisiana. P. 5-28. March 20-21. 1991.

[33] IBARRA, S., GRUPPS, C. E., LIU, S. **State-of-the-Art and Practice of Underwater Wet Welding of Steel.** Proceedings: Internationaal Workshop on Underwater Welding of Marine Structures. New Orleans, Lousiana.pp 49-67, 1994.

[34] MATSUNAWA, A.; NISHIGUCHI, K. **Arc characteristics in high pressure argon atmospheres**. Arc Physics and Weld Pool Behavior, Ed. IIW, p. 123-134. 1979.

[35] CHILDS, W. **Underwater Welding for Pressure Vessel Repairs**. EPRI Journal. 12, 36-37. 1991.

[36] POKHONYA, I.; GORPENYUK, V.; KONONENKO, V.; PONOMAREV, V.; MAKSIMOV, S. **Some peculiarities of arc burning and metal transfer in wet underwater self-shielding fluxcored wire welding**. IIW Conference – Welding Under Extreme Conditions, p. 151-160. 1989.

[37] TSAI, C.; MASUBUSHI, K. **Mechanics of rapid cooling in underwater welding**. Applied Ocean Research, v. 2, n. 2, p. 99-110. 1979.

[38] FENG, J.; WANG, J.; SUN, Q.; ZHAO, Q.; WU, L.; XU, P. **Investigation on dynamic hehaviors of bubble evolution in underwater wet flux-cored arc welding**. Journal of Manufacturing Processes, vol. 28. P. 156-167. 2017.

[39] POPE, A. M.; MEDEIROS, R. C.; LIU, S. **Solidification of underwater wet welds**. Proceedings of the 14th International Conference

on Offshore Mechanics and Artic Engineering. Material Engineering. Vol. III, p. 54-63. 1995.

[40] HASSEL, T.; HECHT-LINOWITZKI, V.; KUSSIKE, S. M.; REHFELDT, D.; BACH, F.-W. **Systematic investigation into wet arc welding under water with covered stick electrodes**. Welding and Cutting, issue 1. 2015.

[41] SZELAGOWSKI, P. **13th International Welding Fair – Present situation and development trends (Underwater welding and cutting)**. Schweissen & Schneiden. Vol. 45 (12), p. E236-E237, 1993.

[42] LIMA II, E. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Robotizada com Eletrodo Revestido Utilizando Controle de Comprimento do Arco Elétrico com Compensação da Temperatura do Eletrodo**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, Vol. 4, pp. 33-38, 2007.

[43] RICHARDSON, I. M.; **Deepwater welding for installation and repair – A viable technology?** 12th International Offshore and Polar Engineering. Japan, 2002.

[44] DOS SANTOS, J. F. **Underwater welding processes, mechanized and automated systems**. International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures. New Orleans, Louisiana, USA. P. 361-420. December 7-9. 1994.

[45] WOOD, B. J., BRUCE, W. A., BOYLES, L. G.; Proc. Offshore Technology Conf. Houston, TX, p. 151-159. 1990.

[46] SZELAGOWSKI, P.; STÜHFF, H.; SCHAFSTALL, H. G. **Developments in manual wet SMA-welding**. Offshore Technology Conference. Houston, Texas. 1990.

[47] PIGOZZO, I. O.; **Soldagem TIG orbital: otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe de raiz**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC. 118p. Florianópolis. 2014.

[48] HECHT-LINOWITZKI, V.; KLETT, J.; HASSEL, T. **Automated underwater arc welding**. Proceeding of Symposium on Automated Systems and Technologies. 2016.

[49] SANTOS, V. R.; MONTEIRO, M. J.; RIZZO, F. C.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P.; MARINHO R. R.; VIEIRA, L. A. **Development of an oxyrutile electrode for wet welding**. Welding Journal 91, p. 319-328, 2012.

[50] SILVA, W. C. D. **Efeito da profundidade de soldagem sobre o hidrogênio difusível das soldas molhadas**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, Dissertação, 123p, 2012.

[51] LIMA II, E. J.; **Soldagem robotizada com eletrodo revestido**. Tese. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Belo Horizonte. 2006.

[52] WANG J.; SUN Q.; LAIJUN, W. **Characterization of the underwater welding arc bubble through a visual sensing method**. Journal of Materials Processing Technology. 251. p. 95-108. 2017.

[53] KOBAYASHI, Y. **Influência da composição do revestimento de eletrodos básicos sobre as características econômicas e operacionais**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis. 1987.

[54] JIA, C.; ZHANG, T.; MAKSIMOV, S. Y.; YUAN X. **Spectroscopic analysis of the arc plasma of underwater wet flux-cored arc welding**. Journal of Materials Processing Technology. Vol 213. p. 1370-1377. 2013.

APÊNDICE A

São apresentados os valores (ou a faixa dos mesmos) recomendados de cada parâmetro configurável na IHM do sistema desenvolvido para soldagem em ambiente seco e molhado, na Tabela 3.

Tabela 3. Valores recomendados dos parâmetros da IHM do sistema desenvolvido.

Abertura de arco		
Parâmetro	Ambiente Seco	Ambiente Molhado
vAx	0 a 5 mm/s	0 a 5 mm/s
vAz	1 a 3 mm/s	1 a 3 mm/s
vRx	0 a 5 mm/s	0 a 5 mm/s
vRz	15 mm/s	15 mm/s
Rec	1 a 5 mm	1 a 3 mm
Controle do Comprimento do Arco		
Parâmetro	Ambiente Seco	Ambiente Molhado
Kp	0,5 a 1	0,5 a 1
Ki	1	1
Kd	0 - Indefinido	0 - Indefinido
ZM (Zona Morta)	0 a 1V	0 a 1V
VzS (V corr. máx.)	30 mm/s	30 mm/s
Queda de Tensão nos Eletrodos (E6013 2,5mm – 350mm)		
Parâmetro	Ambiente Seco	Ambiente Molhado
QT	1,5 a 2V	0,8 a 1V
comp	280 mm	280 mm
V/mm	0,005 a 0,007	0,003 a 0,0036