

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

MARIA EDUARDA ROSSETTO DA ROSA

INVESTIGAÇÃO DA SOLDAGEM SAW COM TECIMENTO TRANSVERSAL
ASSOCIADO AO AQUECIMENTO DE ARAME-ELETRODO POR INDUÇÃO
ELETROMAGNÉTICA



Documento assinado digitalmente

TIAGO VIEIRA DA CUNHA

Data: 12/12/2023 08:08:18-0300

CPF: ***.054.449-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Joinville

2023

MARIA EDUARDA ROSSETTO DA ROSA

INVESTIGAÇÃO DA SOLDAGEM SAW COM TECIMENTO TRANSVERSAL
ASSOCIADO AO AQUECIMENTO DE ARAME-ELETRODO POR INDUÇÃO
ELETROMAGNÉTICA

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Naval do Centro
Tecnológico de Joinville da Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha.

Joinville

2023

MARIA EDUARDA ROSSETTO DA ROSA

INVESTIGAÇÃO DA SOLDAGEM SAW COM TECIMENTO TRANSVERSAL
ASSOCIADO AO AQUECIMENTO DE ARAME-ELETRODO POR INDUÇÃO
ELETROMAGNÉTICA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 08 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

TIAGO VIEIRA DA CUNHA

Data: 12/12/2023 08:07:47-0300

CPF: ***.054.449-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha
Orientador
Presidente

Msc. Eng. Anna Louise Voigt
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Leandro João da Silva
Membro
Universidade Federal do Paraná

Dedico este trabalho aos meus pais, Fábio e Cleice.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela família que me presenteou.

Aos meus pais Fábio e Cleice, por todo amor e zelo. Agradeço por me proporcionarem, com todo seu trabalho, as melhores condições para que eu sempre tivesse as melhores oportunidades.

À minha irmã Maria Luíza, por me acompanhar neste último ano. Espero ser seu exemplo para que você trilhe caminhos ainda mais certos que os meus.

Aos meus avós Carlos, Ismael e Maria Rita, por zelarem por mim, mesmo que longe.

À minha avó Ivete por dedicar seus últimos anos a mim. Espero te deixar orgulhosa, onde quer que esteja.

Ao meu namorado Diego, por toda paciência e companheirismo. Agradeço por não me deixar desanimar nos momentos de incerteza e por ser minha melhor companhia.

Aos meus amigos Carol, Pedro, Patric, Rafael, Guilherme e Brian. Agradeço por toda a amizade e por me acompanharem durante estes anos.

Ao meu orientador Tiago, pela oportunidade de me tornar membro do LTS. Agradeço pelos conselhos, ensinamentos e por me preparar para vida profissional.

Ao LTS pelo ambiente de pesquisa e desenvolvimento de alta qualidade e por proporcionar os equipamentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do LTS, em especial à Anna, por todo auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho.

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei. Não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito”.

Chico Xavier

RESUMO

O processo de soldagem SAW se sobressai dentre os demais por apresentar elevada taxa de deposição de material e, por conseguinte, alta produtividade. A fim de alcançar ganhos operacionais, metalúrgicos e expandir o emprego dos processos de soldagem para diferentes aplicações é comum o estudo de diferentes técnicas. Neste contexto, destaca-se a oportunidade inédita de estudo da técnica de tecimento transversal aplicada à soldagem Arco Submerso em conjunto com a técnica de aquecimento do arame-eletrodo através de indução eletromagnética. Com esta investigação o presente trabalho espera obter progresso frente aos demais quanto à redução dos valores de penetração e diluição nos cordões de solda, permitindo sua aplicabilidade em revestimentos. Para tanto, o presente trabalho avaliou aspectos morfológicos de cordões de solda com simples tecimento e de tecimento composto com quatro diferentes níveis de corrente de indução 60 A, 90 A, 120 A e 150 A. A análise dos cordões de solda mostrou que o aquecimento imposto ao arame implicou na redução dos valores de diluição nestes, de forma que a redução mais expressiva é para a amostra com I_c de 150 A em relação a amostra de referência (59% para 49%) e que, embora ainda sejam valores altos para aplicações de revestimento, mostram-se promissores, levando em consideração a redução de 17% obtida com o emprego da técnica. A respeito dos valores de largura, as amostras apresentaram largura em média 6,9 mm maior que a largura de tecimento de entrada. Quanto aos valores de reforço, estes permaneceram inalterados para as amostras com mesma velocidade de alimentação do arame-eletrodo. Em se tratando de aspectos operacionais, a soldagem ocorreu livre de quaisquer inconvenientes ou mal funcionamento. Por fim, classifica-se a técnica de tecimento transversal aplicada à soldagem Arco Submerso em conjunto com a técnica de aquecimento do arame-eletrodo através de indução eletromagnética como perfeitamente viável uma vez que proporcionou cordões de solda livres de descontinuidades e sem qualquer inclusão de escória e não foram evidenciadas qualquer instabilidade nos oscilogramas de soldagem.

Palavras-chave: SAW. Tecimento transversal. Indução eletromagnética. Diluição.

ABSTRACT

The SAW (Submerged Arc Welding) process stands out among others for its high material deposition rate and consequently, high productivity. In order to achieve operational gains, metallurgists commonly study different techniques to expand the use of welding processes for various applications. In this context, the unprecedented opportunity to study the technique of transverse weaving applied to Submerged Arc Welding, combined with the technique of heating the electrode wire through electromagnetic induction, is noteworthy. With this investigation, the present work aims to make progress compared to others in reducing penetration and dilution values in weld beads, allowing their application in coatings. For this purpose, the present study evaluated morphological aspects of weld beads with simple weaving and composite weaving with four different levels of induction current: 60 A, 90 A, 120 A, and 150 A. The analysis of weld beads showed that the heating applied to the wire resulted in a reduction of dilution values, with the most significant reduction observed in the sample with a current of 150 A compared to the reference sample (from 59% to 49%). Although these values are still relatively high for coating applications, they are promising, considering the 17% reduction achieved with the technique. Regarding width values, the samples showed an average width of 6.9 mm greater than the input weaving width. As for reinforcement values, they remained unchanged for samples with the same electrode wire feed speed. In terms of operational aspects, welding occurred without any inconveniences or malfunctions. In conclusion, the technique of transverse weaving applied to Submerged Arc Welding, combined with the technique of heating the electrode wire through electromagnetic induction, is considered perfectly viable. This is because it resulted in weld beads free of discontinuities and without any inclusion of slag, and no instability of voltage and/or current was evidenced in the welding oscillograms.

Keywords: SAW. Weaving. Overlay. Electromagnetic Induction. Dilution.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Esquema de Soldagem a Arco Submerso. | 16 |
| Figura 2. Perfil Geométrico do Cordão de Solda. | 18 |
| Figura 3. Esquema de aumento da DBCP. | 20 |
| Figura 4. Cordões de solda e suas macrografias com baixos valores de diluição, obtidos através da inclinação do material. | 21 |
| Figura 5. Padrões de Tecimento. | 22 |
| Figura 6. Superfície e seção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 19 kJ/cm e amplitude de tecimento de (a) 0 mm – Linear; (b) 10 mm; (c) 20 mm; e (d) 30 mm. | 23 |
| Figura 7. Equacionamento que descreve a relação entre a velocidade de alimentação de arame Vs a amplitude de tecimento. | 24 |
| Figura 8. Seções transversais dos cordões de solda resultantes da variação de amplitude de tecimento variando a DBCP. | 26 |
| Figura 9. Cordões de solda com amplitude de tecimento de 35 mm, Va de 3,6 m/min e ângulos de ataque de 90° e 70°. | 27 |
| Figura 10. Diluição dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35 mm. | 28 |
| Figura 11. Conceito e dispositivo construído para aplicação da técnica IHW – TIG. | 29 |
| Figura 12. Macrografias dos cordões com <i>cold wire</i> (CW) e com o emprego das bobinas de uma e duas camadas na condição de 120A de corrente de indução. | 30 |
| Figura 13. (a) Projeto CAD da tocha SAW-IHW. (b) Protótipo da tocha SAW-IHW. | 31 |
| Figura 14. Mapeamento Sequência de Realização das Atividades. | 33 |
| Figura 15. Montagem bancada utilizada nos ensaios de soldagem. | 34 |
| Figura 16. Secagem do fluxo. Em a) Forno Mufla em b) Fluxo Aquecido. | 35 |
| Figura 17. Região de obtenção das amostras no cordão de solda. | 36 |
| Figura 18. Geometria do cordão. Em (P) Penetração; Em (L) Largura; Em (R) Reforço; Em (AZF) Área fundida do metal de base; Em (AR) Área do reforço. | 37 |
| Figura 19. Cordão de Referência com Va de 3,6 m/min. | 38 |
| Figura 20. Cordões de Referência. Em a) Va de 4,0 m/min em b) Va de 4,5 m/min. | 39 |
| Figura 21. Cordão de solda com Va de 4,5 m/min e corrente de indução de 60 A. | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 22. Cordão de solda de referência com V_a de 5,5 m/min. | 40 |
| Figura 23. Cordões com aquecimento do arame. Em a) V_a de 5,5 m/min e 150 A de indução; b) V_a de 5,5 m/min e 120 A de indução; e c) V_a de 5,5 m/min e 90 A de indução. | 41 |
| Figura 24. Equacionamento que descreve a relação entre a corrente média de soldagem obtida e a corrente de indução ajustada para V_a de 5,5 m/min. | 43 |
| Figura 25. Efeito da energia imposta e da sobreposição da poça sobre a penetração para velocidade de soldagem crescente. | 45 |
| Figura 26. Seções transversais dos cordões de solda. | 48 |
| Figura 27. Aquisição dos valores instantâneos de tensão de arco e corrente de soldagem para os cordões de solda com V_a 5,5 m/min. Em a) I_c 0 A; b) I_c 90 A; c) I_c 120 A; d) I_c 150 A. | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Matriz de ensaios. | 36 |
| Tabela 2. Parâmetros obtidos para os ensaios de soldagem. | 42 |
| Tabela 3. Medidas geométricas dos cordões de solda. | 44 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DBCP – Distância Bico de Contato Peça

LTS – Laboratório de Tecnologia da Soldagem

GMAW – Gas Metal Arc Welding

Ic – Corrente de Indução Eletromagnética

IHW – Induction Hot Wire

SAW – Submerged Arc Welding

TIG – Tungsten Inert Gas

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

Va – Velocidade de Alimentação do Arame-Eletrodo

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1. OBJETIVOS..... | 15 |
| 1.1.1. Objetivo Geral..... | 15 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos..... | 15 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 16 |
| 2.1. SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO..... | 16 |
| 2.2 REVESTIMENTO..... | 17 |
| 2.2.1 Revestimento por soldagem SAW..... | 19 |
| 2.3 TÉCNICA DE TECIMENTO..... | 22 |
| 2.4 TECIMENTO NA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO..... | 22 |
| 2.5 AQUECIMENTO DO ARAME POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA..... | 28 |
| 2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 32 |
| 3. DESENVOLVIMENTO..... | 33 |
| 3.1 BANCADA DE ENSAIOS..... | 33 |
| 3.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM..... | 34 |
| 3.3 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS..... | 36 |
| 3.4 METODOLOGIA DE ANÁLISE MACROESTRUTURAL DOS CORDÕES..... | 37 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 38 |
| 4.1 ANÁLISE DA MORFOLOGIA DOS CORDÕES DE SOLDA..... | 43 |
| 4.2 ANÁLISE DOS OSCIOGRAMAS DE SOLDAGEM..... | 50 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 52 |
| 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 53 |
| 7. REFERÊNCIAS..... | 54 |

1. INTRODUÇÃO

Ao ser introduzido como novo método de união para construção naval em meados da década de 30, o processo de soldagem substituiu a rebitagem na união de chapas e acelerou o tempo de fabricação de embarcações em aproximadamente três vezes (PILIPENKO, 2001). Entretanto, de acordo com PILIPENKO (2001) a soldagem ainda pode representar até 30% das horas de produção e 10% do custo final de uma embarcação. Neste contexto, Mickeviciene (2011) classifica a produtividade para a indústria naval como fator determinante para sua competitividade, sendo fortemente influenciada pela tecnologia empregada em seus processos de fabricação.

Quando realizada análise semelhante na indústria *offshore* percebe-se que a produtividade do processo pode impactar diretamente nos altos custos existentes em reparos de tubulações de petróleo. Sendo assim, sobressai-se neste cenário a aplicação de revestimento por processos de soldagem e, dentre eles, a soldagem SAW, por possuir como vantagens a sua elevada taxa de deposição e a sua mecanização e, conseqüentemente, a obtenção de um cordão de solda com maior probabilidade de homogeneidade, requisitos bastante desejados na soldagem, principalmente em soldagens de revestimento (SILVA, 2013). Para esta aplicação, busca-se maior largura e penetração reduzida associada a índices de reforço significativos, a fim de se obter menor diluição do metal de adição no metal de base através de um menor número de passes. Tais valores diferem dos resultados comumente obtidos com a soldagem a arco submerso, devido aos altos valores de correntes empregados no processo, que resultam em alta penetração e conseqüente alta diluição.

Neste cenário, Pessoa (2014) discorre sobre como o conhecimento e o estudo de novas tecnologias pode contribuir para o aumento da vida útil, maior disponibilidade dos equipamentos e aumento da segurança operacional nas indústrias de petrolíferas, resultando principalmente na redução dos custos de reparo, em especial por aplicações de revestimento por soldagem. Sendo assim, o presente trabalho surge através da oportunidade em aprofundar os conhecimentos sobre um tema que até então somente o Laboratório de Tecnologia da Soldagem, do qual a autora faz parte, vem estudando. A técnica de tecimento aplicada ao arco submerso se mostra expressiva e promove um campo extenso de estudos. Desta forma, combinou-se a ela neste estudo a técnica de aquecimento do arame por indução eletromagnética, também pouco estudada, o que faz deste trabalho inédito na literatura. Com isso espera-se contrapor os altos valores de penetração e diluição usualmente obtidos com a soldagem SAW

com alimentação de arame-eletrodo, tornando esse processo mais competitivo frente aos demais processos de soldagem para aplicações de revestimento.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo principal investigar a viabilidade da técnica de tecimento transversal associada com o aquecimento por indução eletromagnética do arame-eletrodo no processo de soldagem a arco submerso, em relação aos aspectos morfológicos do cordão de solda.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a viabilidade de ensaios de soldagem empregando a técnica de oscilação transversal da tocha em união ao aquecimento do arame-eletrodo por indução eletromagnética;
- Investigar os resultados obtidos com a aplicação do tecimento e do aquecimento do arame-eletrodo em relação aos aspectos visuais do cordão de solda;
- Investigar os resultados obtidos com a aplicação do tecimento e do aquecimento do arame-eletrodo em relação aos aspectos morfológicos do cordão de solda, buscando reduzir valores de penetração e diluição;
- Avaliar a técnica de tecimento transversal associada à indução eletromagnética quanto aos aspectos operacionais do processo de soldagem.

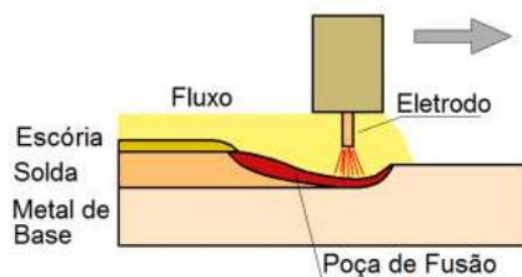
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo consiste na revisão de conceitos teóricos relevantes ao desenvolvimento da presente pesquisa. De tal modo, discute-se o processo de soldagem a arco submerso, processo de revestimento através da soldagem, a técnica de tecimento transversal e ela quando aplicada a soldagem SAW. Finalmente, discorre-se sobre o aquecimento de arame-eletrodo por indução eletromagnética.

2.1. SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

Houldcroft (1990) define o processo de arco submerso (SAW) como um método de soldagem bem estabelecido e extremamente versátil, comumente relacionado à soldagem de grandes espessuras. Neste, a união entre os metais ocorre através do aquecimento gerado pelo arco voltaico estabelecido entre o arame-eletrodo com alimentação contínua e a peça de trabalho, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1. Esquema de Soldagem a Arco Submerso.



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012).

Como já denominado, neste processo o arco voltaico encontra-se protegido da contaminação atmosférica através de uma camada de fluxo granular, depositado junto à alimentação do arame-eletrodo. Esta camada faz também com que o arco elétrico não seja visível e a soldagem ocorra livre de respingos. Além disto, o fluxo quando fundido forma uma camada protetiva denominada escória, que garante alta concentração de calor ao processo de soldagem ao funcionar como isolante térmico, retardando o resfriamento do cordão.

Segundo Machado (1996) a soldagem SAW emprega valores de corrente de até 2000 A em combinação a arames maciços com diâmetros entre 1,6 e 6,4mm, resultando em altas

densidades de corrente e conseqüente elevada taxa de deposição, de até 20 kg/h. Sendo assim, o processo mostra-se naturalmente vantajoso para aplicações que requerem maior índice de produtividade.

Neste contexto, O'Brien (1991) ressalta algumas das técnicas já estudadas quando aplicadas à soldagem SAW visando ganho ainda maior em produtividade com o processo, tais como a soldagem *tandem*, que emprega arames-eletrodos alinhados e conectados a fontes de energia individuais para alimentação de mesma poça de fusão, *twin arc* que também faz uso de arames paralelos conectados à mesma unidade de potência e *hot wire* correspondente ao uso de arame adicional aquecido. Além disto, quando utilizadas para aplicações de revestimento, tais técnicas podem ainda auxiliar na obtenção de menores penetrações.

Quando se tratando da soldagem a arco submerso para aplicações de revestimento, é comum a utilização da técnica *strip cladding*, ou soldagem por fita, que permite a produção de cordões de solda de grande largura, diminuindo a quantidade de passes para o revestimento de uma determinada área. Ademais, segundo Rocha (1987) nesta técnica o arco não compreende a área da fita em sua totalidade, mas sim oscila ao longo de sua largura, não permanecendo tempo suficiente para uma fusão profunda no local, evitando assim, valores altos de penetração. Nesse cenário, a fabricante ESAB (2008) explicita que através da técnica obtém-se valor médio para diluição de 18%. Já a fabricante Lincoln (2017) ao unir a soldagem SAW por fita à técnica *hot wire* mencionada acima, descreve que é possível obter taxa de deposição entre 28 e 40 kg/h e diluições menores que 9% com tal junção. Entretanto, apesar dos valores atrativos obtidos com a soldagem SAW por fita, essa se torna menos interessante para aplicações de revestimento à medida que necessita equipamentos específicos para alimentação tanto do material de adição, quanto do fluxo, o que eleva o custo do procedimento.

2.2. REVESTIMENTO

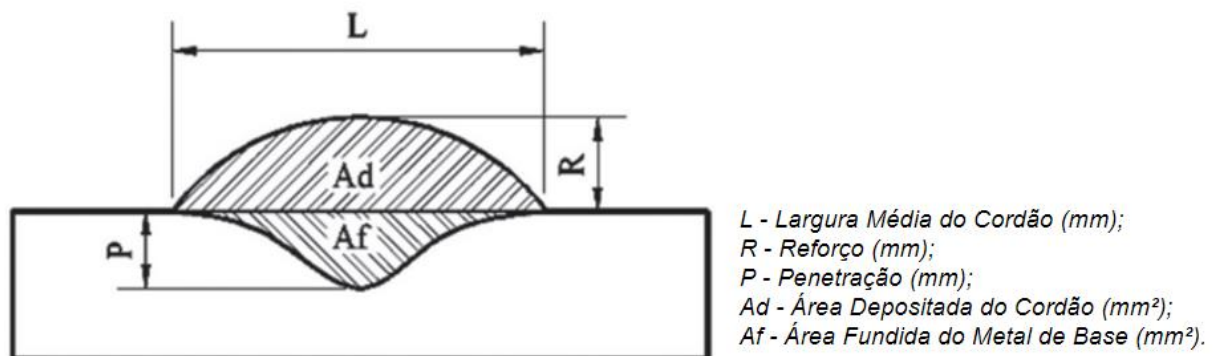
A AWS (1991) define o processo de revestimento por soldagem como a deposição de uma camada de material sobre determinada superfície a fim de se obter propriedades específicas, por exemplo, maior resistência ao desgaste sob abrasão, erosão e corrosão, ou até mesmo, o chamado revestimento duro, que busca o aumento de dureza e resistência do material.

O processo de revestimento difere-se das demais aplicações de soldagem, sobretudo em relação à geometria do cordão de solda. Enquanto para união de juntas deseja-se elevada

penetração, na soldagem de revestimento buscam-se nos cordões de solda maiores larguras e reforços, menores penetrações e baixos índices de diluição. Deste modo, o processo tende a recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando na economia de material e tempo.

Ao passo que esta aplicação visa à união de materiais dissimilares, a mistura entre estes deve ser evitada para que não haja comprometimento das características esperadas para o revestimento. Kannan e Murugan (2006) afirmam que para revestimento de aços carbono, por exemplo, o aumento da diluição reduz os elementos de liga e aumenta a concentração de carbono na camada de revestimento, diminuindo sua resistência e a tornando suscetível a outros problemas metalúrgicos. Sendo assim, a diluição se caracteriza como principal parâmetro a ser controlado em soldagens de revestimento, de forma que seu cálculo se dá através da Equação 1 e das dimensões do cordão, exemplificadas na Figura 2.

Figura 2. Perfil Geométrico do Cordão de Solda.



Fonte: Adaptado de Pessoa (2010).

Sendo:

$$D = \frac{A_f}{(A_d + A_f)} \times 100 \quad (1)$$

Autores como Murugan e Palmar (1997) sugerem que a diluição mínima deve permanecer entre 10% e 15%, para que a condição de coalescência entre o material de base e o material depositado seja satisfeita. Em suas pesquisas Abioye (2015) e Altoé (2015) sugerem que diluições abaixo de 5% acarretam o desprendimento do revestimento, e para valores maiores que 14% comprometem a resistência à corrosão para certas situações. Para aplicações

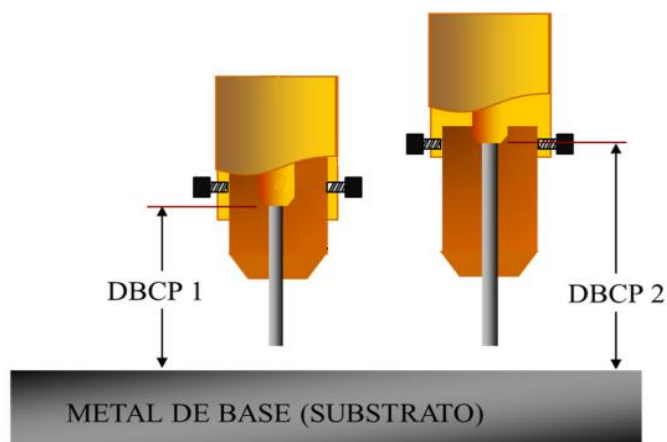
no setor de petróleo e gás natural, a ISO 10423 (2022) considera valores de diluição entre 5% e 8% como ideais para revestimento de proteção corrosiva em equipamentos metálicos.

2.2.1 Revestimento por soldagem SAW

Como já citado anteriormente, o processo de soldagem a arco submerso quando para aplicações de revestimento, faz uso principalmente de fitas devido à morfologia dos cordões de soldas obtidos com estas. Sendo assim, são existentes estudos de tecnologias que objetivam alcançar maiores índices de produção através da soldagem por fita, como a desenvolvida pela fabricante Lincoln (2017) citada anteriormente e o estudo de Rocha (1987) que discorreu sobre a variação da soldagem para dupla fita. Neste caso, atingiram-se valores de diluição entre 5 e 10% resultantes do aumento da altura de reforço, devido a formação de escória fluida entre as duas fitas, o que aumenta a fusão das fitas e reduz a energia de soldagem necessária e conseqüentemente a penetração. Entretanto, uma vez que o presente trabalho busca obter aspectos morfológicos necessários à soldagem para revestimento através do processo de soldagem SAW com arame-eletrodo, de forma a ser mais atrativo economicamente frente a soldagem por fita, procurou-se na literatura estudos que apliquem o material de adição também na forma de arame-eletrodo.

Neste contexto, Silva et al. (2016) exploraram a otimização de parâmetros da soldagem arco submerso. Para isto, utilizaram arame-eletrodo com 1,13 mm de diâmetro e variaram em três diferentes níveis os valores de tensão de soldagem (30, 35 e 40 U), velocidade de alimentação do arame-eletrodo (6, 6,5 e 7 m/min) e a distância bico de contato peça (20, 25 e 30 mm). Os ensaios resultaram em correntes de soldagem com valores entre 137 e 186 A e, ao analisarem os cordões de solda obtidos, os autores observaram taxa média de diluição de 11%, com valores entre 9 e 23%, de modo que o aumento da DBCP, conforme mostra a Figura 3, apresenta-se como a variável de maior influência sob os baixos valores obtidos, devido à conseqüente redução da corrente média de soldagem que esta acarreta.

Figura 3. Esquema de aumento da DBCP.



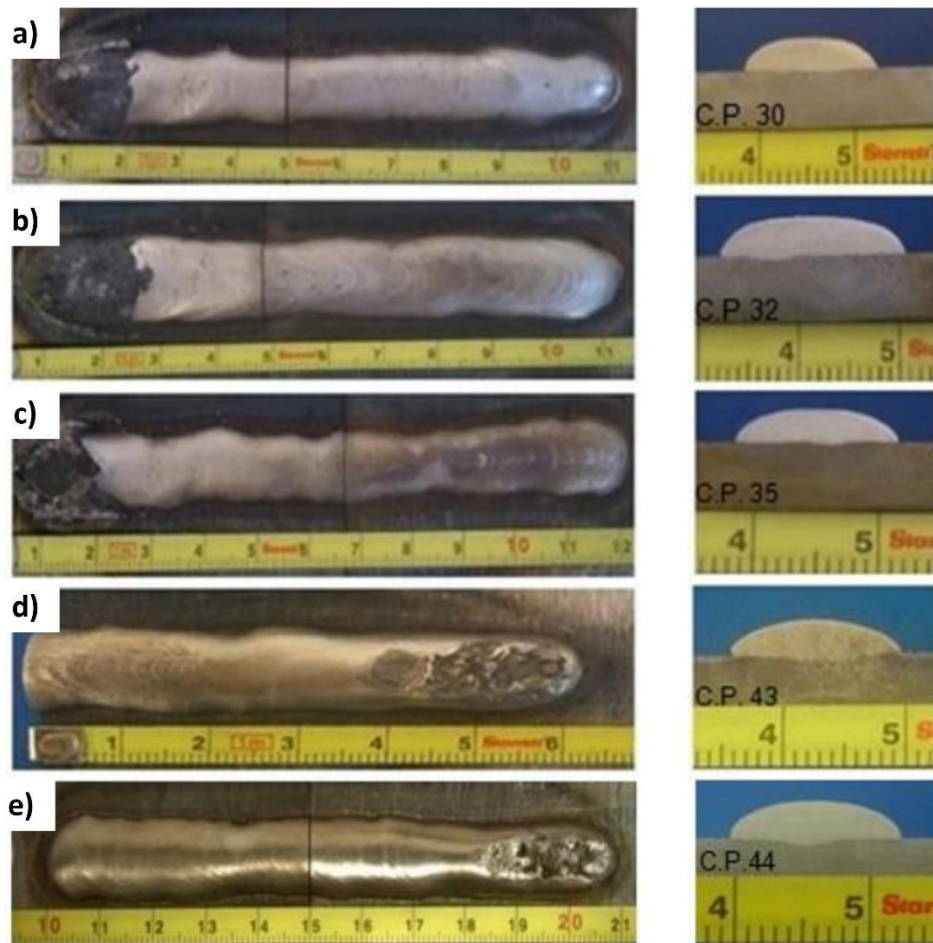
Fonte: Adaptado de Silva et al. (2016).

Embora Silva et al. (2016) tenham obtidos valores interessantes de diluição em seus ensaios, ressalta-se que estes são decorrentes da baixa corrente de soldagem obtida nos testes, frente às comumente encontradas para soldagem SAW. A corrente de soldagem, por sua vez é consequência não somente do aumento da DBCP, mas também do reduzido diâmetro do arame-eletrodo utilizado para os ensaios, que ao apresentar 1,13 mm de bitola proporciona ao processo taxa de deposição de material que podem ser alcançadas com soldagem GMAW, por exemplo.

Em contexto semelhante, Schaeffer (2017) buscou ao mesmo tempo aumentar a produtividade do processo de soldagem a arco submerso e obter cordões de solda com geometrias adequadas para aplicações de revestimento. Desta forma, Schaeffer (2017) propõe a inclinação da peça de trabalho dentro da faixa de $5^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ a fim de favorecer o deslocamento da poça de fusão e, com isso, reduzir a penetração e a diluição do cordão de solda. Para tanto, o autor utiliza em seus ensaios de soldagem arame-eletrodo Inconel 625 de 1,14 mm de diâmetro e fluxo básico ESAB 10.93. A partir destes materiais, o autor aplica tensão de 40 V, DBCP de 35 mm e velocidade de soldagem de 36 cm/min para a condição de inclinação de 10° e obtém corrente de soldagem média de 199 A. A Figura 4 apresenta os resultados obtidos por Schaeffer (2017) quando realizados ensaios de soldagem com os materiais, parâmetros e variáveis de soldagem descritos acima. O autor obteve resultados de diluição entre 1,59% (Figura 4 c) e 5,27% (Figura 4 e) para os cordões de solda exibidos, de modo este último apresentou melhor combinação entre os resultados de parâmetros morfológicos obtidos (diluição, reforço e largura) a uma elevada velocidade de alimentação do arame-eletrodo (14

m/min) conferindo maior taxa de fusão do arame em quilos por hora e maior produtividade em termos de área revestida por hora.

Figura 4. Cordões de solda e suas macrografias com baixos valores de diluição, obtidos através da inclinação do material.



Fonte: Adaptado de Schaeffer (2017).

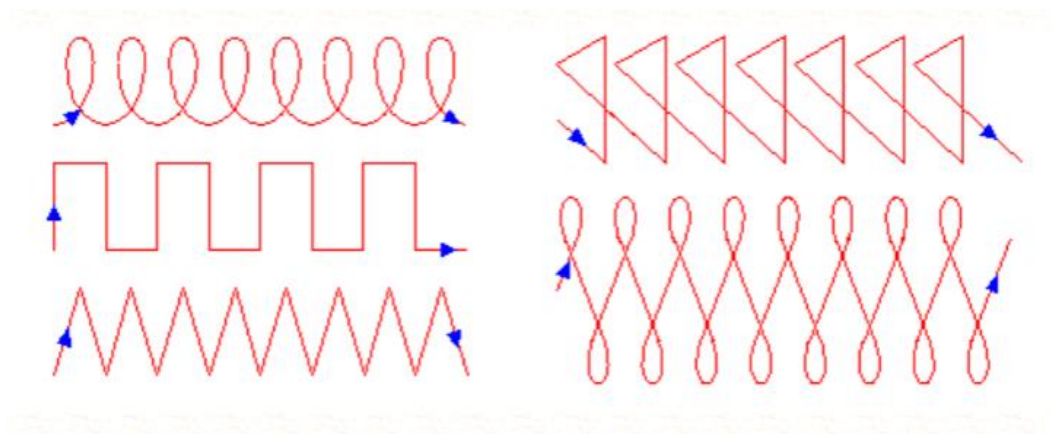
Embora Schaeffer (2017) tenha obtidos resultados desejáveis a aplicações de revestimento ao longo de seu trabalho, ressalta-se novamente a influência do reduzido diâmetro do arame-eletrodo utilizado, 1,14 mm, que confere aos ensaios baixo valor de corrente de soldagem média (199 A) e não proporciona aos ensaios as altas taxas de deposição que podem ser atingidas com processo SAW. Além disso, a técnica de posicionamento do material de base estudada pelo autor é de aplicação restrita, uma vez que nem sempre é plausível a inclinação da peça de trabalho.

2.3. TÉCNICA DE TECIMENTO

A técnica de tecimento consiste na associação de movimentos oscilatórios concomitantes ao movimento de translação de soldagem e se difundiu primordialmente em soldagens manuais com eletrodo revestido (TEICHMANN, 2016). Sua utilização está associada, principalmente, a necessidade no aumento da largura do cordão de solda, viabilizando menor número de passes. Entretanto, as diferentes geometrias aplicadas à técnica podem influenciar parâmetros como a fusão na parede de juntas, maior controle da poça de fusão fora da posição plana e aspectos geométricos como de penetração do cordão de solda (WHYTE, 2010).

De maneira semelhante, os mesmos benefícios obtidos para soldagem manual podem ser observados em aplicações automatizadas, o que faz com que a técnica seja empregada desde em soldagens a arco elétrico até soldagens laser. Alguns dos padrões possíveis de tecimento estão demonstrados na Figura 5.

Figura 5. Padrões de Tecimento.



Fonte: Siner (2013).

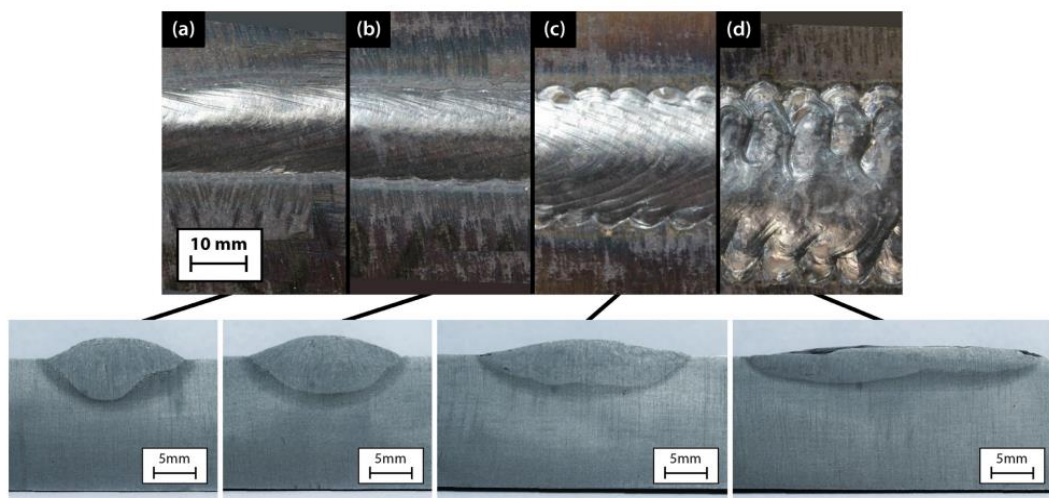
2.4. TECIMENTO NA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

Conforme mencionado anteriormente, pouco explorada é a aplicação da técnica de tecimento quando aplicada a soldagem a arco submerso, de modo que se encontram na literatura apenas três trabalhos referentes ao tema, todos eles desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do qual a autora é parte.

Ao notarem que apesar de muito comum em diversos processos de soldagem, não se encontrava na literatura qualquer referência ao uso do movimento de oscilação transversal do arame-eletrodo na soldagem a arco submerso, Cunha e Ribeiro (2018) propuseram-se a estudar a viabilidade técnica e os efeitos oriundos da aplicabilidade deste tipo de soldagem. Para tanto, utilizaram em seus ensaios arame-eletrodo EM12K com diâmetro de 2,4 mm, distância bico de contato peça de 20 mm, tensão de soldagem 30 V. Os valores de velocidade de alimentação do arame-eletrodo e da velocidade de soldagem foram alterados a fim de atingir energias de soldagem de 15, 19 e 25 kJ/cm durante os ensaios. Em relação aos parâmetros de tecimento, os autores empregaram amplitudes de tecimento de 0, 10, 20 e 30 mm e frequência de 1 Hz com padrão triangular, por envolver menor número de variáveis (amplitude e frequência de tecimento).

Para amplitudes de tecimento de 30 mm, Cunha e Ribeiro (2018) puderam perceber que os cordões de solda apresentaram falta de material de deposição e mordeduras para todas as energias estudadas, conforme se pode notar para energia de 19kJ/cm, através da Figura 6 (d). Tal fenômeno pôde ser atribuído a maior demanda por metal de adição para maiores amplitudes de tecimento, a fim de manter a distribuição de material homogênea ao longo do comprimento do cordão de solda.

Figura 6. Superfície e seção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 19 kJ/cm e amplitude de tecimento de (a) 0 mm – Linear; (b) 10 mm; (c) 20 mm; e (d) 30 mm.

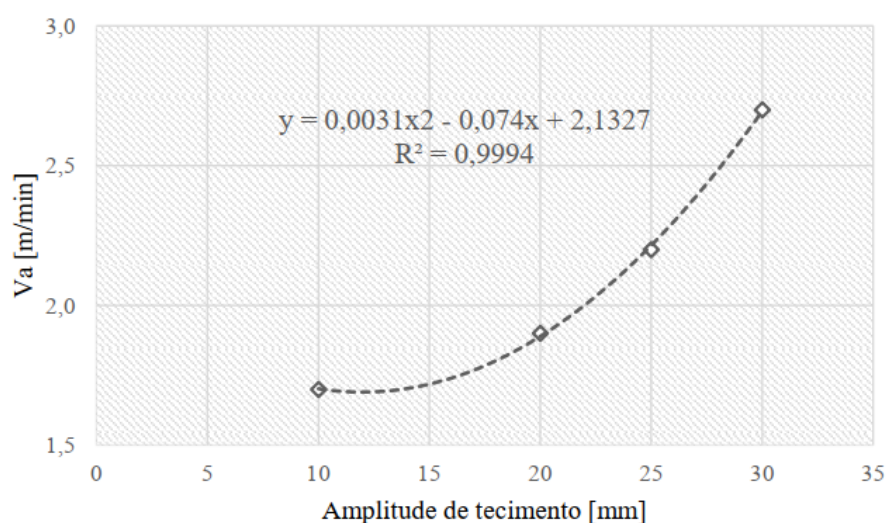


Fonte: Cunha e Ribeiro (2018).

Quando analisadas as amplitudes de tecimento de até 20 mm, os autores comprovaram que o aumento da amplitude de tecimento acarreta maiores larguras dos cordões, bem como a área fundida também aumenta significativamente, com ganhos de até 78% em relação aos cordões sem tecimento. Por fim, Cunha e Ribeiro (2018) caracterizam a técnica como perfeitamente viável, tanto por suas conclusões a respeito dos aspectos morfológicos dos cordões de solda obtidos, quanto pela não identificação de inclusão de escória e não alteração da estabilidade do processo.

Em continuidade aos estudos da aplicabilidade da técnica de tecimento na soldagem SAW, Rode (2020) desenvolveu o próprio cabeçote de soldagem, tal qual rotina de programação para realização de ensaios de soldagem com tecimento transversal. Com esse intuito, os primeiros testes realizados buscaram definir a velocidade de alimentação de arame mínima para obtenção de um cordão de solda adequado, quando sujeitos a amplitudes de oscilação de 0, 10, 20, 25 e 30 mm. Para estes testes foram mantidos fixos o valor da DBCP em 25 mm, a velocidade de soldagem de 30 cm/min, frequência de tecimento de 1 Hz e tensão de soldagem em 30 V. Em posse dos resultados, a autora pode elaborar a curva de velocidade de alimentação de arame-eletrodo requerida por amplitude de tecimento, conforme mostra a Figura 7. Desta forma, é possível a extrapolação da curva para diferentes amplitudes de tecimento à vista de se obter previamente a velocidade de arame necessária para os ensaios de soldagem.

Figura 7. Equacionamento que descreve a relação entre a velocidade de alimentação de arame Vs a amplitude de tecimento.








Fonte: Rode (2020).

Quando em relação aos aspectos geométricos obtidos, a autora discorre sobre a relação entre a energia de soldagem e os perfis de reforço, visto que para amplitudes de tecimento de até 25 mm, este diminui em relação ao cordão com soldagem linear. Tal fenômeno deve-se ao aumento na largura do cordão soldado juntamente a não alteração dos parâmetros de soldagem e a não ocorrência de mudanças significativas na energia de soldagem. Por outro lado, o aumento da velocidade de arame acarreta o acréscimo da energia de soldagem para os cordões com amplitudes de 30, 35 e 40 mm, levando a maiores valores de reforço nestes cordões. Dito isto, a autora nota que para 70% das amostras soldadas a razão R/L retorna valores abaixo de 10%, sugerindo possíveis aplicações de revestimento, o que não se confirma ao analisar os valores de diluição obtidos, que variam entre 50% e 70% para as diferentes amplitudes de tecimento.

Buscando compreender sobre a quantidade mínima de material depositado e a energia de soldagem precisa para isso, Rode (2020) realizou novos ensaios nos quais através da variação da DBCP atingiu a mesma corrente média de soldagem de 322 A para diferentes amplitudes de tecimento, mantendo a velocidade de alimentação de arame-eletrodo previamente determinada. Para tanto, realizou ensaios de soldagem para amplitudes de tecimento de 25 e 30 mm e variou os valores de DBCP entre 25 e 90 mm. Como resultado, a Figura 8 mostra que as amostras obtidas não apresentaram uniformidade no material depositado, inferindo que além de uma quantidade mínima de material, também é necessária mínima energia de soldagem para garantir a uniformidade na distribuição do material ao longo do cordão de solda.

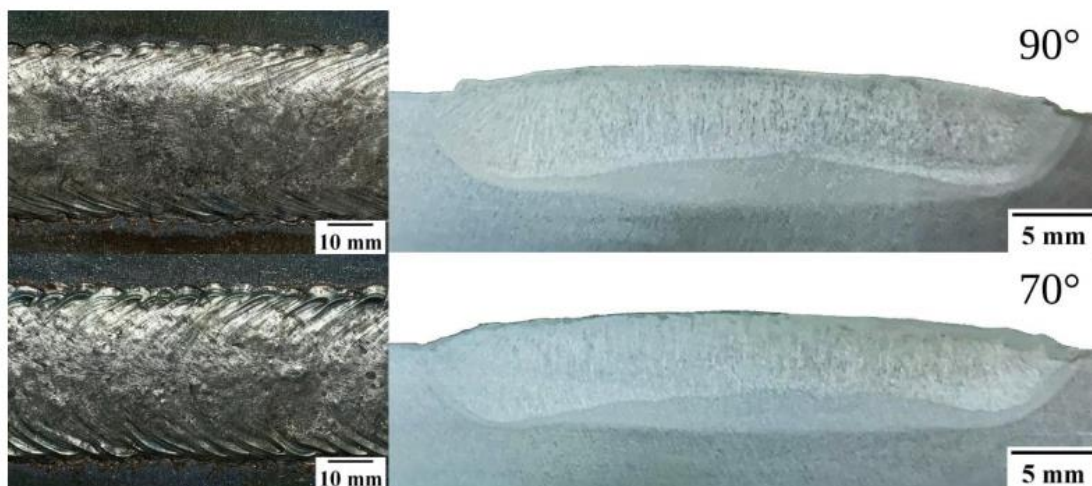
Figura 8. Seções transversais dos cordões de solda resultantes da variação de amplitude de tecimento variando a DBCP.

| Amplitude de tecimento [mm] | DBCP [mm] | Seção transversal |
|-----------------------------|-----------|--|
| 25 | 25 |  |
| 25 | 54 |  |
| 30 | 25 |  |
| 30 | 75 |  |
| 30 | 90 |  |

Fonte: Rode (2020).

Apesar dos altos valores de diluição encontrados por Rode (2020), visando a redução desses, Fantoni (2022) realizou a avaliação da técnica de tecimento na soldagem SAW objetivando seu uso para aplicações de revestimento. Com esse propósito, realizou ensaios de soldagem com tecimento associado ao ângulo de ataque nas posições perpendicular e empurrando com ângulo de 70° . Os resultados foram satisfatórios para amplitude de tecimento de 10 mm com velocidade de arame 1,5 m/min, mas ao utilizar mesma velocidade de arame para amplitude de 25 mm, notou assim como Cunha e Ribeiro (2018) e Rode (2020) a falta de deposição de material ao longo do cordão de solda, que foi suprimida através do aumento da velocidade de arame para 3,6 m/min. Com esta velocidade foi possível a obtenção de cordões de solda com amplitude de tecimento de 35 mm sem que o problema descrito anteriormente ocorresse, como mostra a Figura 9.

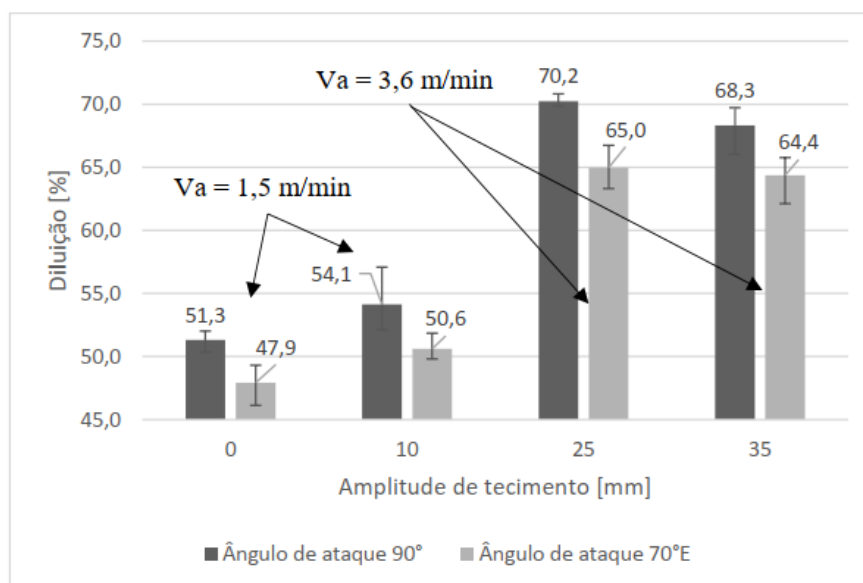
Figura 9. Cordões de solda com amplitude de tecimento de 35 mm, Va de 3,6 m/min e ângulos de ataque de 90° e 70°.



Fonte: Fantoni (2022).

Em posse das seções transversais das amostras, Fantoni (2022) pode então analisar aspectos geométricos do cordão, tais como: penetração, reforço e diluição. Em se tratando do primeiro, percebe-se sua diminuição através do efeito do ângulo de ataque aliado ao tecimento, com redução de 14% para amplitude de 35 mm. Os valores de reforço tornam-se menores com o aumento de amplitude de tecimento de 25 mm para 35 mm, por exemplo, o que já era esperado visto que se aumenta a amplitude, mas mantém-se velocidade de alimentação do arame-eletrodo para ambas as amostras. Por fim, ao analisar os resultados de diluição apresentados na Figura 10, o autor relata redução de cerca de 4% entre as amostras com amplitude de tecimento de 35 mm sem ângulo de ataque e com ângulo de ataque de 70° em relação ao material de base. Entretanto, os cordões com maiores amplitudes possuem elevada penetração em suas laterais devido à desaceleração da tocha de soldagem o que faz com que, de forma geral, os valores obtidos estejam acima de 60%, inviabilizando o uso da técnica para aplicações de revestimento.

Figura 10. Diluição dos cordões de solda em função do ângulo de ataque para amplitudes de tecimento de 0, 10, 25 e 35 mm.



Fonte: Fantoni (2022).

Apesar dos valores de diluição obtidos tanto por Rode (2020) quanto por Fantoni (2022) serem elevados para a aplicação desejada, acredita-se que a técnica de tecimento aliada ao aquecimento do arame-eletrodo, como propõe o presente trabalho, pode resultar na diminuição da energia de soldagem e consequente redução da diluição.

2.5. AQUECIMENTO DO ARAME POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A técnica de aquecimento do arame é utilizada para aplicações de soldagem que visam aumento de produtividade e, inclusive, para processos de revestimentos. Mesmo assim, dentre as diferentes formas para obtenção da técnica *hot wire*, pouco estudado é o aquecimento através de indução eletromagnética.

Segundo Halliday (2013) a indução eletromagnética é caracterizada pela geração de correntes elétricas na superfície de materiais condutores através da ação de campos magnéticos alternados. Tal fenômeno é regido pela Lei de Faraday e enuncia que quando houver variação do fluxo magnético através de um circuito, surgirá nele uma força eletromotriz induzida. Desta forma, a força eletromotriz aplicada à resistência elétrica do condutor resulta na circulação de correntes elétricas na superfície do material, que recebem o nome de correntes de Foucault. Estas, ao circularem no material promovem seu aquecimento através de efeito Joule.

À vista disto, Voigt (2019) e Voigt et al. (2020) propõem de maneira inovadora o uso de indução eletromagnética para aquecimento do arame no processo TIG *hot wire* visando eliminar o problema de sopro magnético existente neste processo, tendo em vista que as técnicas já existentes na literatura não o conseguem. Para tanto, os autores desenvolveram dispositivo composto por uma bobina de indução e material cerâmico em seu interior, a fim de isolar eletricamente o arame e direcioná-lo para o arco voltaico, cujo conceito pode ser observado na Figura 11.

Figura 11. Conceito e dispositivo construído para aplicação da técnica IHW – TIG.

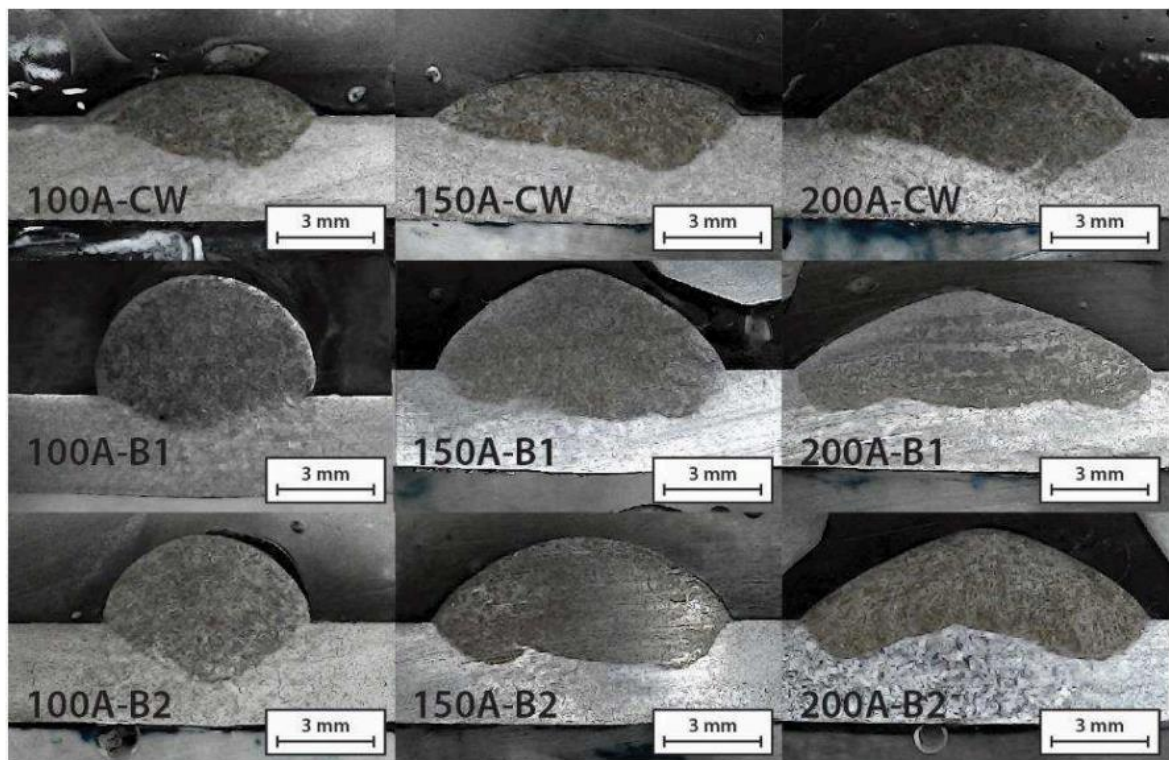


Fonte: Adaptado de Voigt (2019) e Voigt et al. (2020).

Através do dispositivo mostrado acima a autora pôde realizar ensaios com corrente de soldagem de 100, 150 e 200 A. Já a aplicação da corrente de indução eletromagnética deu-se pela variação de 20 a 120 A, com incrementos de 20 A e frequências de ressonâncias de 20 kHz

e 40 kHz para bobinas de camada única e com dupla camada. A variação das bobinas por meio do número de camadas buscou avaliar os efeitos das diferentes intensidades do campo eletromagnético. Assim, a Figura 12 traz a seção transversal das amostras obtidas como referência em técnica *cold wire*, além das amostras com aplicação de corrente de indução de 120 A para ambas as configurações de bobina, nas condições de corrente de soldagem descritas acima.

Figura 12. Macrografias dos cordões com *cold wire* (CW) e com o emprego das bobinas de uma e duas camadas na condição de 120A de corrente de indução.



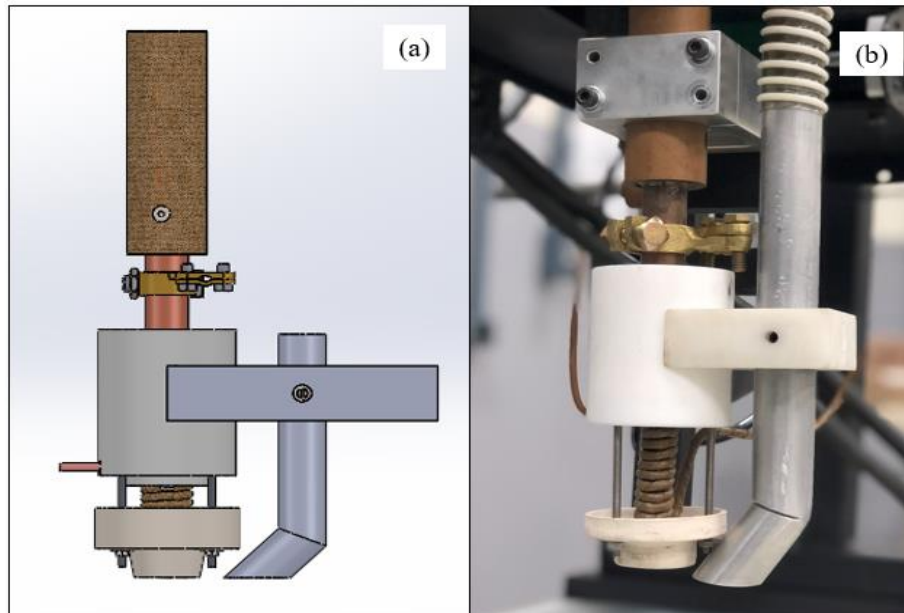
Fonte: Voigt (2019).

Por meio da análise dimensional dos cordões a autora relata que o aquecimento do arame promove incremento de 110 e 240% na área depositada em relação ao cordão obtido sem aquecimento do arame (para a bobina de duas camadas e uma camada, respectivamente). Os autores atribuem o resultado principalmente ao baixo aporte de energia e elevada taxa de deposição, visto que a velocidade de alimentação de arame atingiu valores de aproximadamente três vezes ao valor obtido sem aquecimento. É notável que ambas as configurações de bobinas resultam em maior resultado de deposição do que a amostra em técnica *cold wire*. Entretanto, Voigt (2019) conclui que somente se faz vantajosa a aplicação da bobina de dupla camada

quando para velocidades de alimentação do arame-eletrodo elevadas. Por fim, os resultados obtidos ressaltam o potencial da aplicação da técnica de pré-aquecimento do arame por indução eletromagnética nos processos de soldagem.

Neste contexto, Bahmad et al. (2023) propõem o desenvolvimento de tochas de soldagem para os processos de soldagem GMAW e SAW capazes de promover o pré-aquecimento do arame-eletrodo por indução eletromagnética ao longo do *stickout*. Para tanto, os autores desenvolveram estudo de *benchmarking* no qual analisaram aspectos relacionados a mínima quantidade de peças e a complexidade destas, além da disposição da alimentação do fluxo em função da presença da bobina posicionada após o bico de contato. A partir da análise de produtos disponíveis no mercado os autores puderam prosseguir com as etapas de desenvolvimento do projeto conceitual, projeto detalhado e em sequência com a fabricação da tocha protótipo. A respeito da tocha de soldagem SAW, seu protótipo, bem como seu projeto CAD podem ser visualizados na Figura 13. Ressalta-se que para o desenvolvimento da tocha protótipo os autores consideraram bobina de indução que parte dos mesmos parâmetros utilizados por Voigt (2019), sendo esta constituída de um tubo de cobre com diâmetro interno de 2mm e espessura de parede de aproximadamente 0,8mm.

Figura 13. (a) Projeto CAD da tocha SAW-IHW. (b) Protótipo da tocha SAW-IHW.



Fonte: Bahmad et al. (2023).

2.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

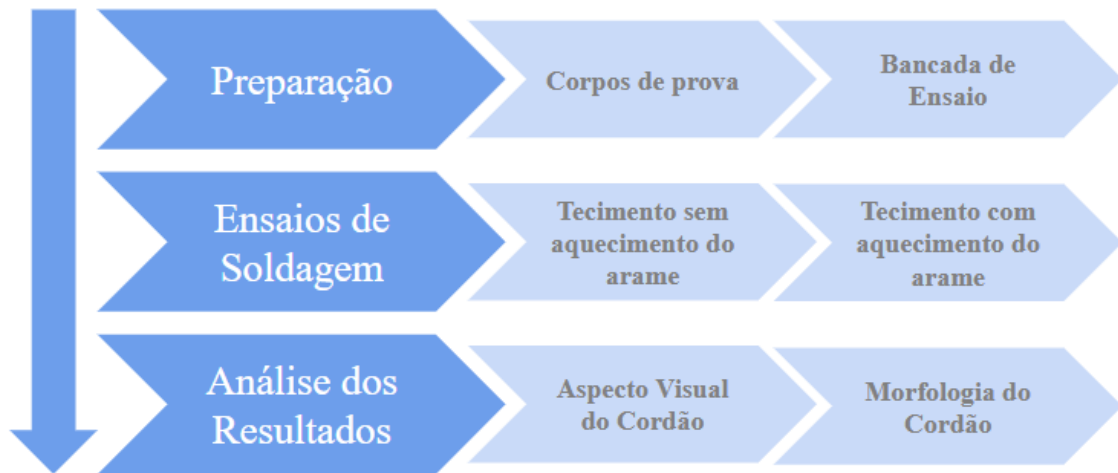
As informações coletadas na literatura indicam que:

- As geometrias adequadas para aplicações de revestimento obtidas através da soldagem SAW somente foram possíveis através da técnica de soldagem por fita, que implica alto custo ao processo, ou com a utilização de arame-eletrodo de baixo diâmetro, resultando em taxas de deposição que não justificam o emprego da soldagem arco submerso uma vez que são passíveis de serem obtidas com processos de soldagem mais simples, como GMAW;
- A soldagem SAW associada ao movimento de oscilação transversal da tocha apresenta-se perfeitamente viável, de forma que a utilização da técnica garante maior largura para os cordões de solda, sendo possível assim recobrir maior área em menor número de passes. Entretanto, os valores de diluição e penetração obtidos ainda se apresentam altos quando para aplicações de revestimento;
- A técnica de aquecimento do arame por indução eletromagnética para o processo TIG resulta na menor energia exigida do arco para fundir o material de adição, de modo é possível o aumento da velocidade de alimentação do arame, obtendo assim maior taxa de deposição. Para a soldagem SAW espera-se que o arame-eletrodo acarrete a redução da corrente de soldagem média do processo.

3. DESENVOLVIMENTO

A fim de mapear a sequência de realização das atividades propostas pelo trabalho, desenvolveu-se o fluxograma presente na Figura 14.

Figura 14. Mapeamento Sequência de Realização das Atividades.

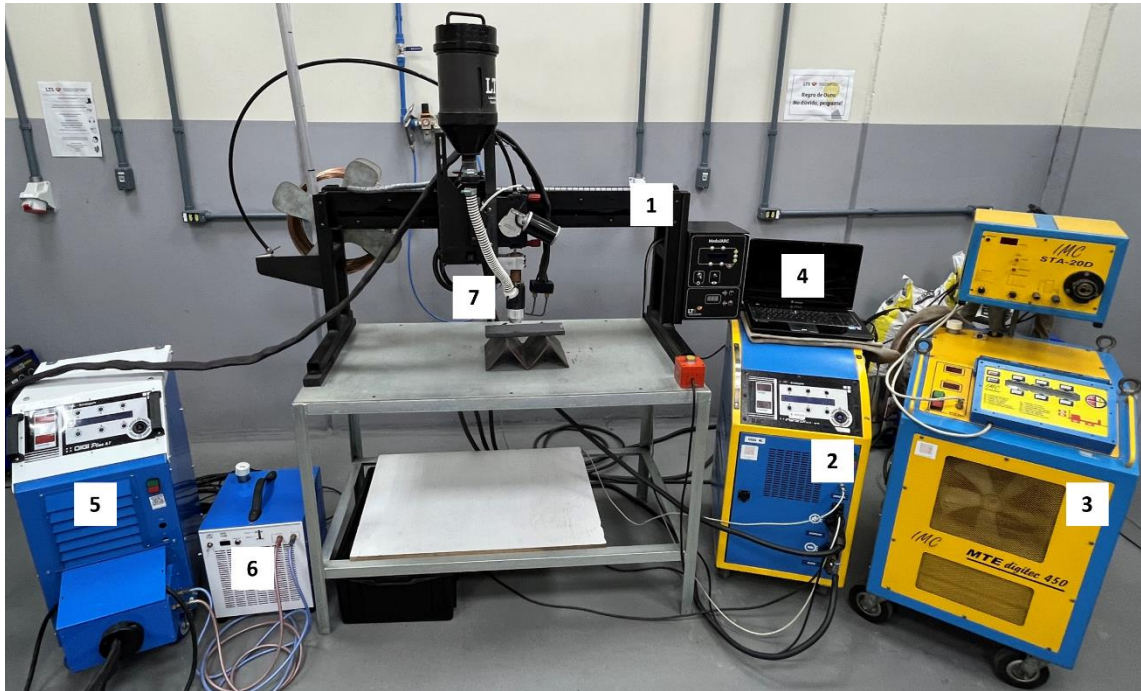


Fonte: Autora (2023).

3.1 BANCADA DE ENSAIOS

Para estruturação da bancada de ensaios, fez-se uso do dispositivo de deslocamento de tocha desenvolvido por Rode (2020). Este realiza o movimento em dois eixos a partir da escolha de parâmetros do processo, como a velocidade de soldagem, frequência e amplitude de tecimento, na interface do equipamento. Além do dispositivo de deslocamento (1), compõem a bancada de ensaios uma fonte de soldagem modelo DigiPlus A7 (2) conectada em paralelo a uma fonte modelo Digitec 450 (3), a fim de atingir maiores valores de correntes, necessários para o trabalho. A fonte DigiPlus conta com o sistema SAP de aquisição de dados (4) apto a registrar os valores de corrente de soldagem durante o processo. Com o intuito de realizar o aquecimento do arame de soldagem, uma fonte de indução eletromagnética modelo IndiPlusA7 (5) constitui a bancada. Esta, juntamente à unidade de refrigeração (6) está conectada a bobina de indução que se encontra na tocha protótipo IHW-SAW (7). A montagem final da bancada pode ser visualizada na Figura 15.

Figura 15. Montagem bancada utilizada nos ensaios de soldagem.



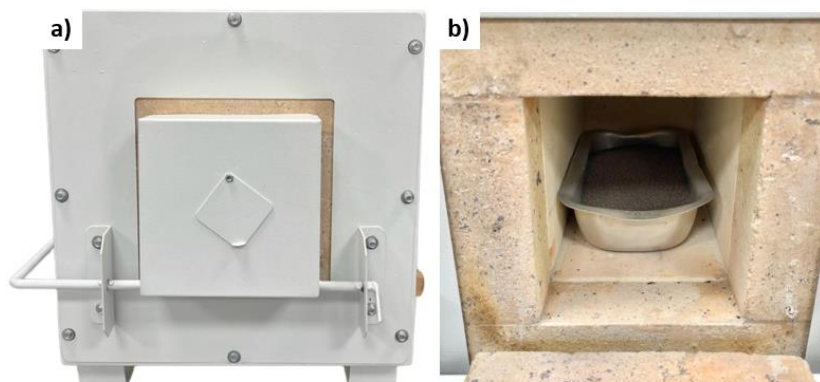
Fonte: Autora (2023).

Vale ressaltar que ao se tratar das condições de soldagem para arco submerso, em especial para o diâmetro de eletrodo utilizado no presente trabalho, demanda-se da fonte configuração em modo tensão constante. Deste modo, a taxa de alimentação do arame-eletrodo interfere na variação da corrente de soldagem, para que o auto ajuste da altura do arco (controle interno) e, conseqüentemente, da tensão, ocorra.

3.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM

Em posse da bancada, foi possível a execução dos ensaios de soldagem. Para isto, foram utilizados corpos de prova de dimensão 250 x 76 x 15,8 mm em aço ASTM A36, classe comumente utilizada em aplicações do setor naval. Os corpos de prova passaram por processo de limpeza e esmerilhamento para remoção da carepa e outras impurezas, garantindo assim a uniformidade do cordão de solda. Quanto ao material de adição, empregou-se o arame EM12K de 2,4 mm de diâmetro com conjunto arame-fluxo AWS F7A0-EM12K. Para realização dos ensaios, o fluxo utilizado passou por secagem durante uma hora e meia em forno a 300°C, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16. Secagem do fluxo. Em a) Forno Mufla em b) Fluxo Aquecido.



Fonte: Autora (2023).

Uma vez que o trabalho teve como objetivo principal analisar a influência do aquecimento de arame-eletrodo associado ao tecimento, desenvolveu-se a matriz de ensaios presente na Tabela 1. Assim, os ensaios realizados empregaram amplitude de tecimento de 35 mm, frequência de tecimento de 1,0 Hz, tensão de 30 V e velocidade de soldagem de 30 cm/min, além dos demais parâmetros descritos na tabela. Apesar de Rode (2020) e Fantoni (2022) utilizarem DBCP de 25 mm, o presente trabalho apresenta por limitação do processo DBCP de 55 mm, decorrente da inclusão da bobina de indução após o bico de contato na tocha de soldagem. Desta forma, a DBCP é a totalidade do comprimento da bobina de indução (30 mm), mais a distância entre a bobina de indução e a peça (25 mm).

Para o primeiro ensaio de soldagem não se empregou indução eletromagnética, haja vista que este teve por finalidade servir como cordão de referência frente aos resultados de aspectos morfológicos dos cordões com aquecimento do arame-eletrodo. Sendo assim, utilizou-se inicialmente para amplitude de tecimento de 35 mm a velocidade de alimentação igual a 3,6 m/min validada por Rode (2020), condição essa que garante a mínima quantidade de material necessária para conformidade do cordão de solda.

Posteriormente, executaram-se os ensaios com aquecimento do arame através do emprego de indução eletromagnética. Para tanto, foi utilizada a velocidade de alimentação pré-definida no ensaio de referência juntamente aos demais parâmetros supracitados. Em se tratando das características da fonte de indução, foram definidos quatro níveis de corrente: 60, 90, 120 e 150 A, a serem aplicados com frequência de indução de 125 kHz.

Tabela 1. Matriz de ensaios.

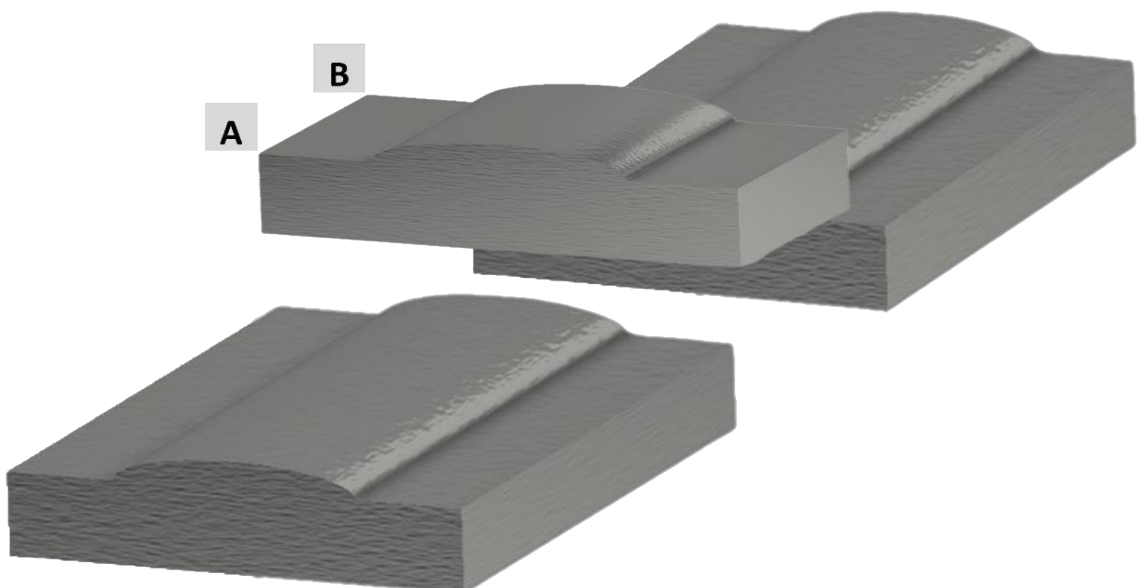
| Nomenclatura do ensaio | Amplitude de tecimento (mm) | Corrente de Indução (A) |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| A35-I0 | 35 | 0 |
| A35-I60 | 35 | 60 |
| A35-I90 | 35 | 90 |
| A35-I120 | 35 | 120 |
| A35-I150 | 35 | 150 |

Fonte: Autora (2023).

3.3 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

A fim de compreender os efeitos obtidos com o emprego do tecimento e do aquecimento do arame nos aspectos morfológicos dos cordões de solda, os corpos de prova foram submetidos ao procedimento de preparação metalográfica conforme norma ASTM E3-11 (2017). Dessa forma, através de uma serra de fita refrigerada modelo MR-123 realizou-se o corte em sentido transversal dos cordões de solda, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17. Região de obtenção das amostras no cordão de solda.



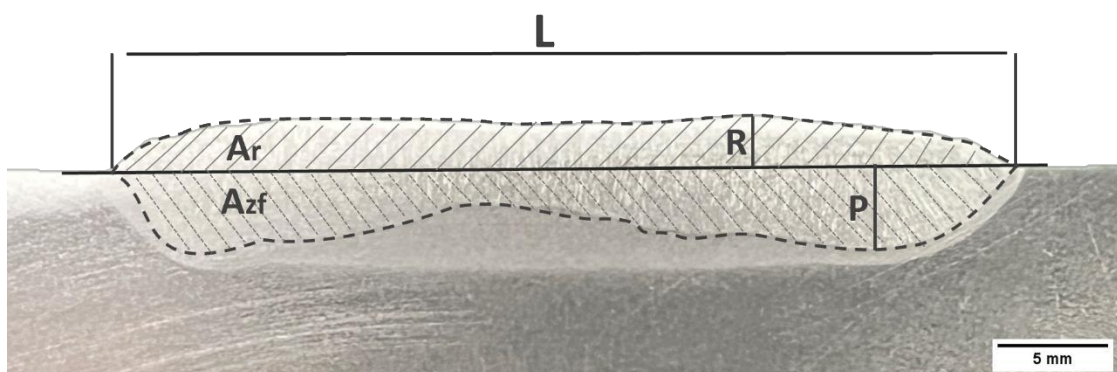
Fonte: Autora (2023).

Assim, a partir de cada corpo de prova foi retirada uma amostra com duas regiões de interesse (A e B), as quais foram sujeitadas à lixamento superficial com granulometrias de lixa 80, 180, 240, 320, 400, 600 e 1200 sequencialmente. Logo após, as amostras passaram por processo de ataque químico com Nital 4%, com intuito de revelar as macrorregiões do cordão. Com tal procedimento se fez possível a análise da morfologia dos cordões através de estereoscópio modelo DIGILAB-152T e do software de análise de imagens ImageJ. Os resultados quantitativos apresentados ao longo do trabalho correspondem à média simples entre valores das duas regiões de interesse demonstradas acima.

3.4 METODOLOGIA DE ANÁLISE MACROESTRUTURAL DOS CORDÕES

A respeito da morfologia do cordão de solda, fez-se necessário mensurar as principais dimensões da zona fundida: largura, penetração, reforço, área de reforço, área fundida e diluição, demonstradas na Figura 18. Como visto no item 2.2, a diluição deve ser calculada a partir da razão entre a área fundida do metal de base, Figura 18 (A_{zf}), e a soma desta mais a área do reforço, Figura 18 (A_r).

Figura 18. Geometria do cordão. Em (P) Penetração; Em (L) Largura; Em (R) Reforço; Em (A_{zf}) Área fundida do metal de base; Em (A_r) Área do reforço.



Fonte: Autora (2023).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme pode ser observado na Figura 19, ao se empregar velocidade de alimentação do arame de 3,6 m/min para a amostra de referência, obteve-se falta de deposição de material. Atribui-se tal resultado a uma quantidade de energia insuficiente ocasionada pelo aumento da DBCP, visto que a condição mínima de material de adição estabelecida no trabalho de Rode (2020) foi atendida. Enquanto Rode (2020) obteve corrente de soldagem média de 578 A para as mesmas condições de soldagem com DBCP de 25 mm, no ensaio supracitado obteve-se apenas 430 A devido a maior parcela do arame-eletrodo percorrida por corrente e aquecida por efeito Joule. Em seu trabalho, Rode (2020) relaciona as descontinuidades ao resultado do menor valor de corrente destinado a poça de fusão, o que faz com que esta seja menor e mais viscosa, levando o material à rápida solidificação e às consequentes desuniformidades no cordão. Por outro lado, com base nos cordões de solda obtidos no presente trabalho e em suas morfologias, levanta-se a hipótese de que o baixo valor de corrente obtido com a DBCP de 55 mm, aliado a maior velocidade de tecimento com que a tocha passa pelo centro do cordão em relação às bordas, resulta na frágil ou na não formação de uma poça de fusão na região central do cordão de solda, de modo que o material fundido tende, por tensão superficial, a se depositar nas bordas do cordão, onde devido a desaceleração do movimento de tecimento da tocha há formação de maior poça.

Figura 19. Cordão de Referência com V_a de 3,6 m/min.

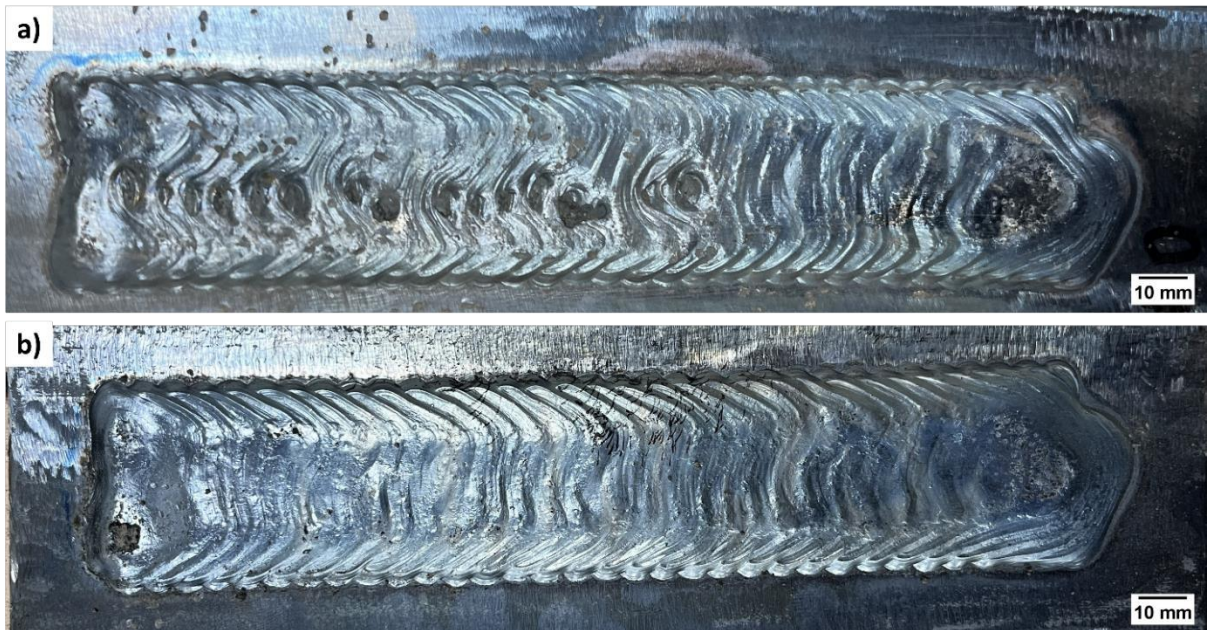


Fonte: Autora (2023).

Desta forma, fez-se necessário a realização de novos ensaios com maiores velocidades de alimentação do arame-eletrodo a fim de satisfazer a condição de energia de soldagem mínima

para obtenção de um cordão de solda livre de discontinuidades. A Figura 20 mostra o aspecto visual de deposição dos cordões quando com velocidades de alimentação de 4,0 m/min em “a” e 4,5 m/min em “b”.

Figura 20. Cordões de Referência. Em a) Va de 4,0 m/min em b) Va de 4,5 m/min.



Fonte: Autora (2023).

Quando utilizada velocidade de alimentação de 4,0 m/min, esta resultou em corrente média de 450 A para qual o cordão ainda apresenta irregularidade em seu comprimento. Já quando empregada velocidade de arame de 4,5 m/min a corrente resultante foi de 500 A, produzindo um cordão sem discontinuidades, mordeduras ou inclusão de escórias. Uma vez em posse do valor de velocidade de alimentação do arame-eletrodo mínima para obtenção de um cordão livre de defeitos, foi viável a realização dos ensaios de soldagem empregando aquecimento do arame-eletrodo por indução eletromagnética. A Figura 21 mostra o aspecto visual do cordão de solda com velocidade de arame de 4,5 m/min e 60 A de corrente de indução.

Figura 21. Cordão de solda com V_a de 4,5 m/min e corrente de indução de 60 A.



Fonte: Autora (2023).

Nota-se que ao acrescentar ao ensaio de referência com velocidade de arame de 4,5 m/min a menor corrente de indução proposta pelo trabalho (60 A), obtém-se discontinuidades na região central do cordão de solda, de forma que a corrente média obtida para os parâmetros supracitados foi de 475 A. Este resultado indica que a corrente de 500 A obtida no ensaio de referência encontra-se no limiar para a obtenção de um cordão de solda sem falhas, para quantidade de material depositada com V_a de 4,5 m/min, visto que o decréscimo de apenas 25 A torna o cordão obtido inaceitável.

Deste modo, realizou-se um terceiro ensaio com intuito de obter para a DBCP de 55 mm corrente de soldagem próxima a de 578 A encontrada por Rode (2020) em seu cordão de referência. Tal objetivo foi satisfeito ao empregar-se velocidade de alimentação do arame-eletrodo de 5,5 m/min, com a obtenção de corrente média de soldagem de 550 A, cujo cordão de solda pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 22. Cordão de solda de referência com V_a de 5,5 m/min.

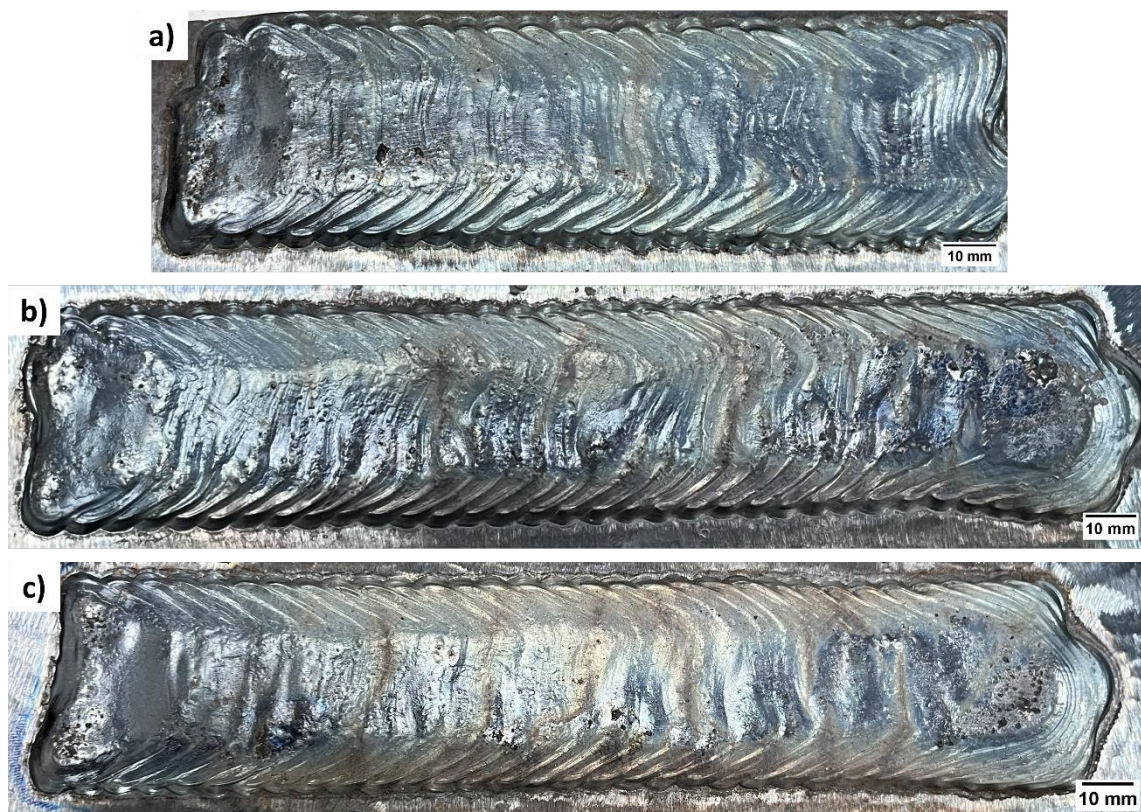


Fonte: Autora (2023).

Logo, em posse deste novo cordão de referência foi possível a realização dos ensaios de soldagem com a aplicação das correntes de indução propostas. A Figura 23 mostra o aspecto visual dos cordões obtidos com os parâmetros anteriormente citados. Destaca-se que os cordões

resultantes apresentaram aspectos similares de brilho, uniformidade de deposição superficial e facilidade da remoção da camada de escória, além da não existência de mordeduras ao longo de seus comprimentos.

Figura 23. Cordões com aquecimento do arame. Em a) V_a de 5,5 m/min e 150 A de indução; b) V_a de 5,5 m/min e 120 A de indução; e c) V_a de 5,5 m/min e 90 A de indução.



Fonte: Autora (2023).

A Tabela 2 exibe os resultados de corrente média de soldagem obtidos para os ensaios com e sem o aquecimento do arame-eletrodo. Como esperado, ao utilizar corrente de indução de 150 A com 5,5 m/min de alimentação de arame, obtém-se redução do valor de corrente média de soldagem mais expressiva do que aquelas obtidas para os demais ensaios com o emprego das correntes de indução de 60, 90 e 120 A, cerca de 14% de redução. De maneira interessante, ao aplicar para o ensaio de V_a 5,5 m/min a I_c de 150 A, é obtida mesma a corrente média que para o ensaio de 60 A de indução com V_a 4,5 m/min, 475 A. Entretanto, para esta nova configuração de parâmetros o cordão não apresentou discontinuidades, como pode ser visto na Figura 23. Uma possível explicação para os diferentes resultados obtidos, apesar da mesma corrente de soldagem, é a maior quantidade de material depositada durante o segundo ensaio.

Nesta hipótese, a maior taxa de deposição do material sobreporia o efeito da corrente de soldagem combinado à velocidade de tecimento, de forma que o material depositado, por possuir maior volume, resistiria a tensão superficial da poça de fusão nas bordas do cordão de solda, impedindo assim o rompimento da ponte metálica entre as extremidades do cordão, como ocorreu para a amostra com menor velocidade de alimentação do arame-eletrodo.

Tabela 2. Parâmetros obtidos para os ensaios de soldagem.

| Ensaio | Amplitude de Tecimento (mm) | Parâmetros | | | | |
|--------|-----------------------------|------------|------------|-------------|---------------|--------|
| | | U (V) | Va (m/min) | Vs (cm/min) | I Indução (A) | Im (A) |
| 1 | 35 | 30 | 4,0 | 30,0 | 0 | 450 |
| 2 | 35 | 30 | 4,5 | 30,0 | 0 | 500 |
| 3 | 35 | 30 | 4,5 | 30,0 | 60 | 475 |
| 4 | 35 | 30 | 5,5 | 30,0 | 90 | 525 |
| 5 | 35 | 30 | 5,5 | 30,0 | 120 | 500 |
| 6 | 35 | 30 | 5,5 | 30,0 | 150 | 475 |

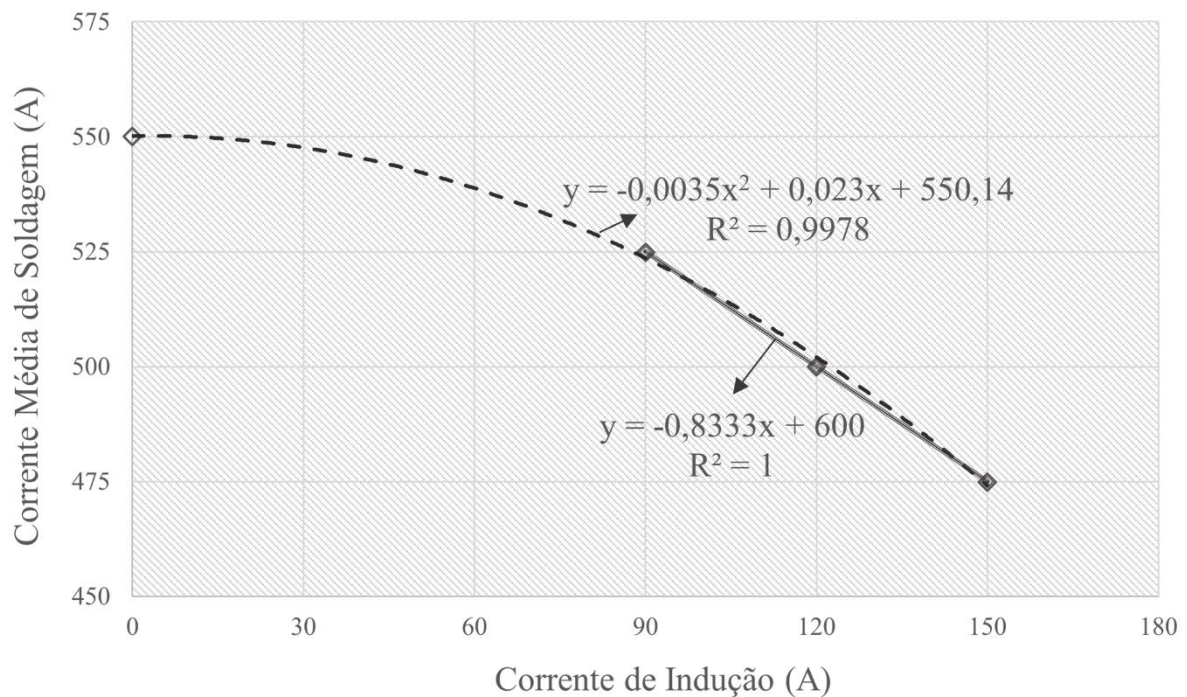
Fonte: Autora (2023).

Ao analisar a Tabela 2, conclui-se que para velocidade de alimentação de arame-eletrodo de 5,5 m/min com aplicação de corrente de indução de 90 A, obteve-se mesma ordem de redução na corrente média de soldagem do que quando imposta corrente de 60 A para velocidade de arame de 4,5 m/min, cerca de 5% de redução, demonstrando desta forma que o efeito da corrente de indução é inversamente proporcional a velocidade de arame utilizada, assim como descrito por Voigt (2019). A autora relata em seu estudo que o aquecimento do arame por indução está intimamente ligado ao tempo de exposição ao aquecimento, sendo este, consequente da velocidade de alimentação deste. Sendo assim, optou-se pela não realização do ensaio de 60 A de corrente de indução com Va de 5,5 m/min.

Contudo, os demais ensaios para velocidade de alimentação de 5,5 m/min possibilitaram o levantamento de duas curvas que podem descrever a relação entre a corrente média de soldagem e a corrente de indução ajustada (Figura 24). De fato, não se pode afirmar ao certo qual o comportamento exato da corrente de soldagem quando aplicados menores valores de corrente de indução, apenas comprova-se por ambas as regressões, linear e polinomial, que haveria pouca ou inexistente redução da corrente de soldagem média quando utilizada corrente de indução de 60 A. Todavia, a regressão polinomial parece ser mais consonante aos resultados

obtidos, uma vez que se aproxima gradualmente da condição de referência com a redução da corrente de indução, enquanto pela regressão linear seria possível até mesmo haver comportamento desconhecido de aumento da corrente de soldagem através do aquecimento do arame-eletrodo. Por outro lado, é notável que o aumento da corrente de indução tende a seguir o comportamento descrito por ambas as regressões, ao apresentarem valor de R^2 alto e próximos entre si, comprovando que o modelo gerado se ajusta bem aos dados.

Figura 24. Equacionamento que descreve a relação entre a corrente média de soldagem obtida e a corrente de indução ajustada para V_a de 5,5 m/min.



Fonte: Autora (2023).

4.1 ANÁLISE DA MORFOLOGIA DOS CORDÕES DE SOLDA

A partir da metodologia descrita no item 3.5, realizou-se a medição das principais dimensões da seção transversal dos cordões. Estas estão apresentadas na Tabela 3 permitindo assim a análise quantitativa dos dados.

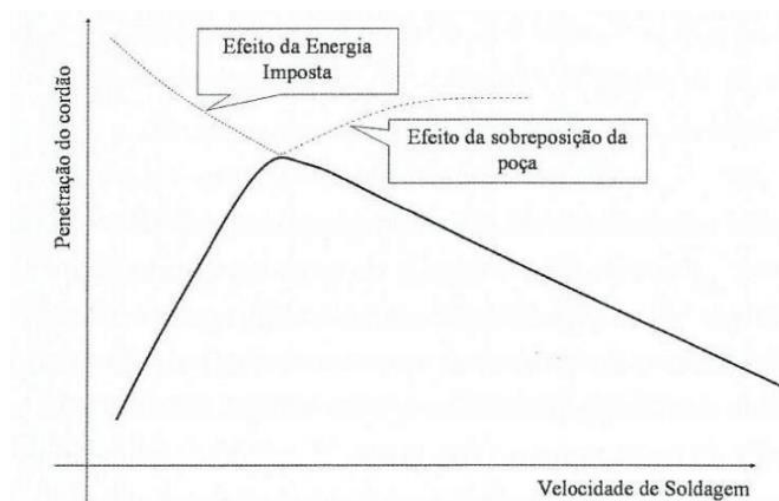
Tabela 3. Medidas geométricas dos cordões de solda.

| Amostra | Área Penetrada (mm²) | Área de Reforço (mm²) | Penetração (mm) | Reforço (mm) | Largura (mm) | Diluição (%) |
|----------------|--|---|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| REF Va 4,5 | 96,3 | 66,9 | 3,6 | 2,1 | 41,1 | 59,0 |
| 4,5 + 60 AI | 89,0 | 66,5 | 3,3 | 2,0 | 41,4 | 57,2 |
| REF Va 5,5 | 115,3 | 82,7 | 4,2 | 2,6 | 42,1 | 58,2 |
| 5,5 + 90 AI | 109,7 | 81,0 | 3,8 | 2,4 | 41,9 | 57,5 |
| 5,5 + 120 AI | 96,3 | 81,6 | 3,5 | 2,6 | 42,5 | 54,1 |
| 5,5 + 150 AI | 80,4 | 82,0 | 3,3 | 2,5 | 42,4 | 49,0 |

Fonte: Autora (2023).

Com base nos valores obtidos, percebe-se inicialmente a redução nos valores de diluição quando há a aplicação da indução eletromagnética, para ambas as velocidades de alimentação de arame. Ao atentar-se para os valores de diluição dos cordões de referência, nota-se pequena redução para o cordão com velocidade de alimentação 5,5 m/min em relação a velocidade de 4,5 m/min. Apesar da corrente média de soldagem tornar-se maior à medida que a velocidade de alimentação é elevada, aumenta-se também a quantidade de material depositado na poça de fusão que funciona como uma barreira para a transferência de calor do arco para o metal de base. Este efeito é descrito por Scotti e Ponomarev (2008) ao relacionarem o parâmetro de velocidade de soldagem linear e a penetração do cordão para a soldagem MIG/MAG. Os autores relatam que quanto maior o volume de material interposto entre o arco e o metal de base, mais difícil se torna a transferência de calor para o metal de base e menor se torna o rendimento de fusão, de modo que para baixas velocidades de soldagem o efeito de sobreposição da poça prevalece sobre a energia imposta, conforme se pode ver na Figura 25.

Figura 25. Efeito da energia imposta e da sobreposição da poça sobre a penetração para velocidade de soldagem crescente.



Fonte: Scotti e Ponomarev (2008).

Ainda que os autores descrevam a interposição como resultado da redução da velocidade de soldagem, acredita-se que de maneira similar, com o aumento da velocidade de alimentação, há um ponto para o qual tal parâmetro se sobrepõe ao efeito da energia imposta.

Quando analisados os valores obtidos para a amostra de referência com V_a de 4,5 m/min e a amostra com V_a de 5,5 m/min e I_c igual a 150 A, verifica-se redução de 59% para 49%, o que representa aproximadamente 17% de redução. Apesar de que possa haver sobre essa redução certa influência da hipótese de poça de fusão interposta, ao se replicar a análise para a amostra de referência com V_a de 5,5 m/min em relação a amostra com adição I_c de 150 A, encontra-se diminuição na casa de 15%, demonstrando o efeito preponderante do uso da corrente de indução. De mesma forma, realiza-se comparação para os níveis de diluição obtidos com a aplicação dos demais valores de corrente de indução eletromagnética propostas pelo trabalho. Constata-se que ao aplicar I_c de 90 A, obtém-se redução do valor de diluição em relação à amostra de referência de 58,2% para 57,5% resultando em apenas 1% de redução, valor que não se faz atrativo, principalmente frente aos valores mais expressivos obtidos com corrente de indução apenas 30 A mais alta. Para o caso de I_c 120 A, a diferença de 58,2% para 54,1%, correspondente a diminuição de 7% no valor de diluição.

Posto que existe redução significativa nos níveis de diluição do presente trabalho ao ser empregado o aquecimento do arame por indução, faz-se oportuna a comparação com os demais valores documentados pelos autores que já estudaram a técnica de tecimento transversal aplicada a soldagem arco submerso, a começar por Rode (2020). Em seus ensaios, o conjunto

de parâmetros de amplitude de tecimento 35 mm, velocidade de alimentação 3,6 m/min e DBCP de 25 mm resultou em corrente média de soldagem de 578 A com valor de diluição próximo a 69%. É fato que o presente trabalho apresenta uma DBCP de 55 mm, devido à inserção da bobina e que, como exposto anteriormente, implica na necessidade do aumento da velocidade de alimentação do arame para suprir a energia de soldagem necessária a um cordão de solda livre de defeitos. Assim, como resultado apenas disso, aumenta-se a quantidade de material na poça e diminui-se a corrente média de soldagem, promovendo taxa de diluição de 59% para a amostra de V_a igual à 4,5 m/min. Simplesmente com o aumento da DBCP já é possível observar redução da diluição de 69% para 59% acarretando diminuição de aproximadamente 15% quando em relação ao ensaio de Rode (2020). Todavia, este percentual se torna ainda maior quando há o emprego da técnica de aquecimento do arame, tornando-se cerca de 29% menor para V_a de 5,5 m/min e 150 A de corrente de indução.

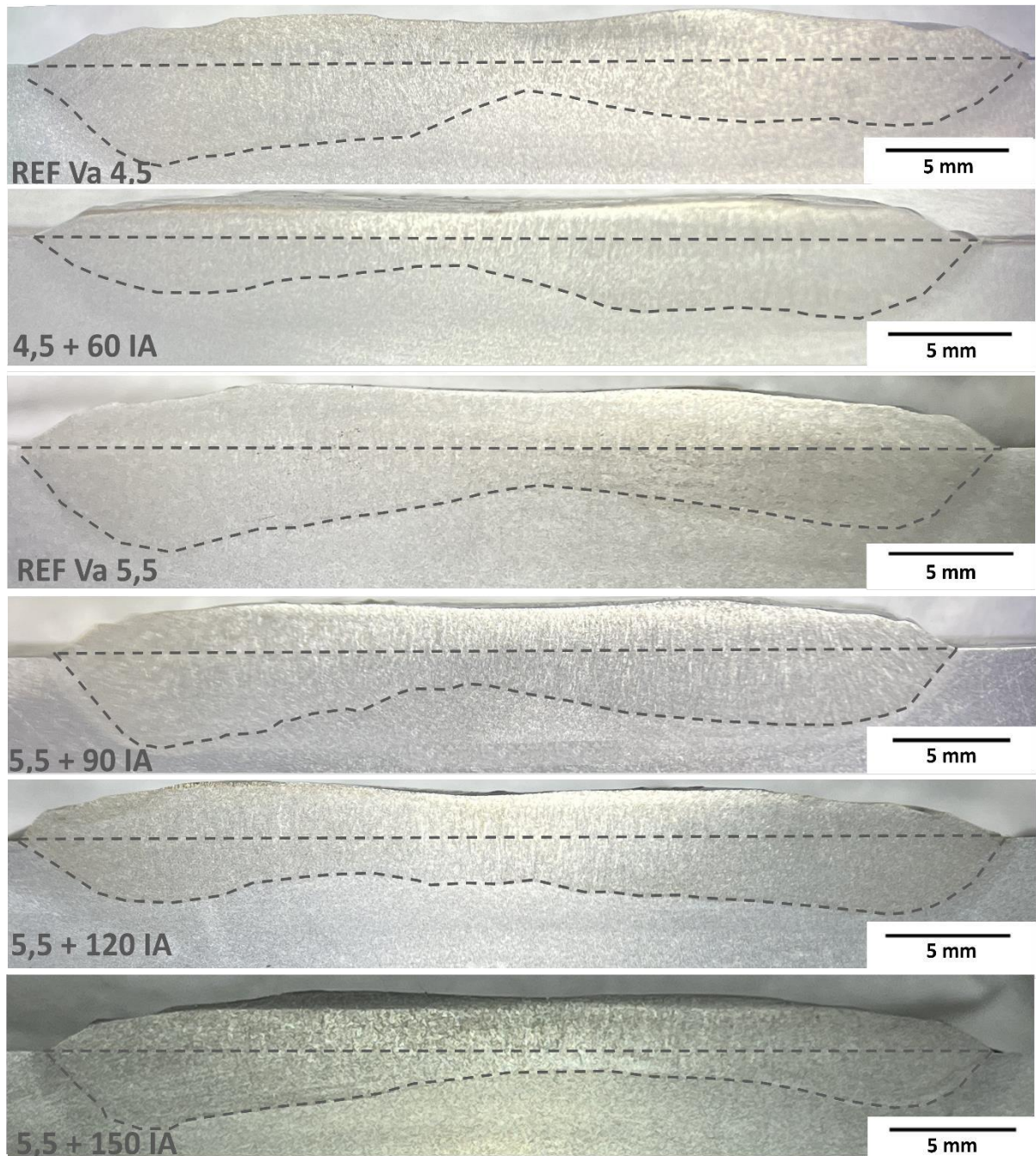
Da mesma maneira, realiza-se comparação com os valores obtidos por Fantoni (2022). Ao aplicar a técnica empurrando com ângulo de ataque de 70° entre a tocha e o metal de base, o autor encontra para os parâmetros de 35 mm de amplitude de tecimento, 25 mm de DBCP e velocidade de alimentação do arame-eletrodo de 3,6 m/min, diluição de 64%, enquanto para seu ensaio de referência à 90°, encontra como esperado, valor próximo ao de Rode (2020), 68%. Desta forma é nítido que a combinação entre as técnicas de aquecimento do arame por indução e tecimento é mais vantajosa em termos de redução da diluição do que a junção de tecimento e ângulo de ataque.

Com relação aos valores de reforço obtidos, estes encontram-se satisfatoriamente similares para as amostras com velocidade de alimentação do arame-eletrodo de 5,5 m/min, com resultados entre 2,4 e 2,6 mm. Para as amostras com V_a de 4,5 m/min, os valores obtidos foram mais baixos, entre 2 e 2,1 mm. Tal resultado é esperado, uma vez que ao manter-se os parâmetros de soldagem inalterados à medida que se eleva a velocidade de arame (e por consequência a corrente e a energia de soldagem), deposita-se maior quantidade de material para mesma distribuição. A respeito das larguras obtidas constata-se que ao definir a amplitude de tecimento de 35 mm, os cordões de solda obtidos apresentam largura em média 6,9 mm maiores que a amplitude de tecimento definida, devido à melhor distribuição do material de adição no cordão através da oscilação da tocha de soldagem, efeito primeiramente relatado por Cunha e Ribeiro (2018). Como esse resultado está atrelado a aplicação da técnica de tecimento, pode ser visualizado para ambos os cordões com e sem emprego de indução eletromagnética.

Quando analisados os valores de penetração, estes tendem a diminuir de maneira similar ao ocorrido para os valores de diluição, de forma que a redução para a amostra com I_c de 150 A é de quase 1 mm em relação a amostra que emprega somente a técnica de tecimento. Ademais, verifica-se que é possível obter valor de penetração semelhante (3,5 e 3,6 mm) para amostra com V_a de 5,5 m/min e I_c de 120 A e para a amostra com V_a de 4,5 m/min sem aplicação de indução eletromagnética. Tal resultado reforça a possibilidade de ao utilizar a técnica de indução eletromagnética ao arame-eletrodo, ser possível depositar maior quantidade de material e ainda assim alcançar parâmetros geométricos iguais aos obtidos com menor velocidade de alimentação do arame-eletrodo e, conseqüente menor energia de soldagem. Por fim, destaca-se que a área de reforço se mantém praticamente inalterada para mesma velocidade de alimentação de arame-eletrodo, assim como o valor de reforço, e que, a área penetrada reduz em conseqüência à redução dos valores de penetração. Desta forma, quando analisada a causa para a redução de 17% obtida nos valores de diluição entre a amostra com V_a 4,5 m/min e a amostra V_a 5,5 m/min e I_c de 150 A, constata-se que esta diminuição é decorrente tanto da redução da área penetrada quanto do aumento da área de reforço. Entretanto, para mesma análise entre os cordões de solda com V_a 5,5 m/min e V_a 5,5 m/min com I_c 150 A, verifica-se que a redução de 15% no nível de diluição é resultante neste caso, apenas da diminuição da área penetrada do material de base, uma vez que área de reforço permanece constante para tais amostras.

Realizou-se também a análise da morfologia das seções transversais dos cordões de solda obtidos, demonstradas na Figura 26.

Figura 26. Seções transversais dos cordões de solda.



Fonte: Autora (2023).

Através das macrografias da seção transversal pode-se notar assim como relatado por Rode (2020) e Fantoni (2022) a maior penetração nas extremidades dos cordões de solda. Fato este que se acredita ser devido a maior velocidade de tecimento com que a tocha passa pelo centro do cordão, uma vez que nas laterais há a desaceleração e inversão do sentido do movimento resultando na maior concentração de energia nesta região.

Através das imagens das seções transversais pode-se obter melhor esclarecimento sobre a hipótese levantada para os diferentes resultados obtidos com mesma corrente de soldagem média para as amostras de 4,5 m/min com I_c de 60 A e 5,5 m/min com I_c de 150 A. Ambas as seções transversais aparentam possuir valor semelhante de penetração para o centro do cordão. Entretanto, é visível que há maior quantidade de material depositado na região central do cordão com V_a de 5,5 m/min e I_c 150 A. O maior volume de material se sobrepõe ao efeito da tensão residual e permanece depositado na região central do cordão, inibindo a possibilidade de descontinuidades por falta de deposição ao longo do cordão.

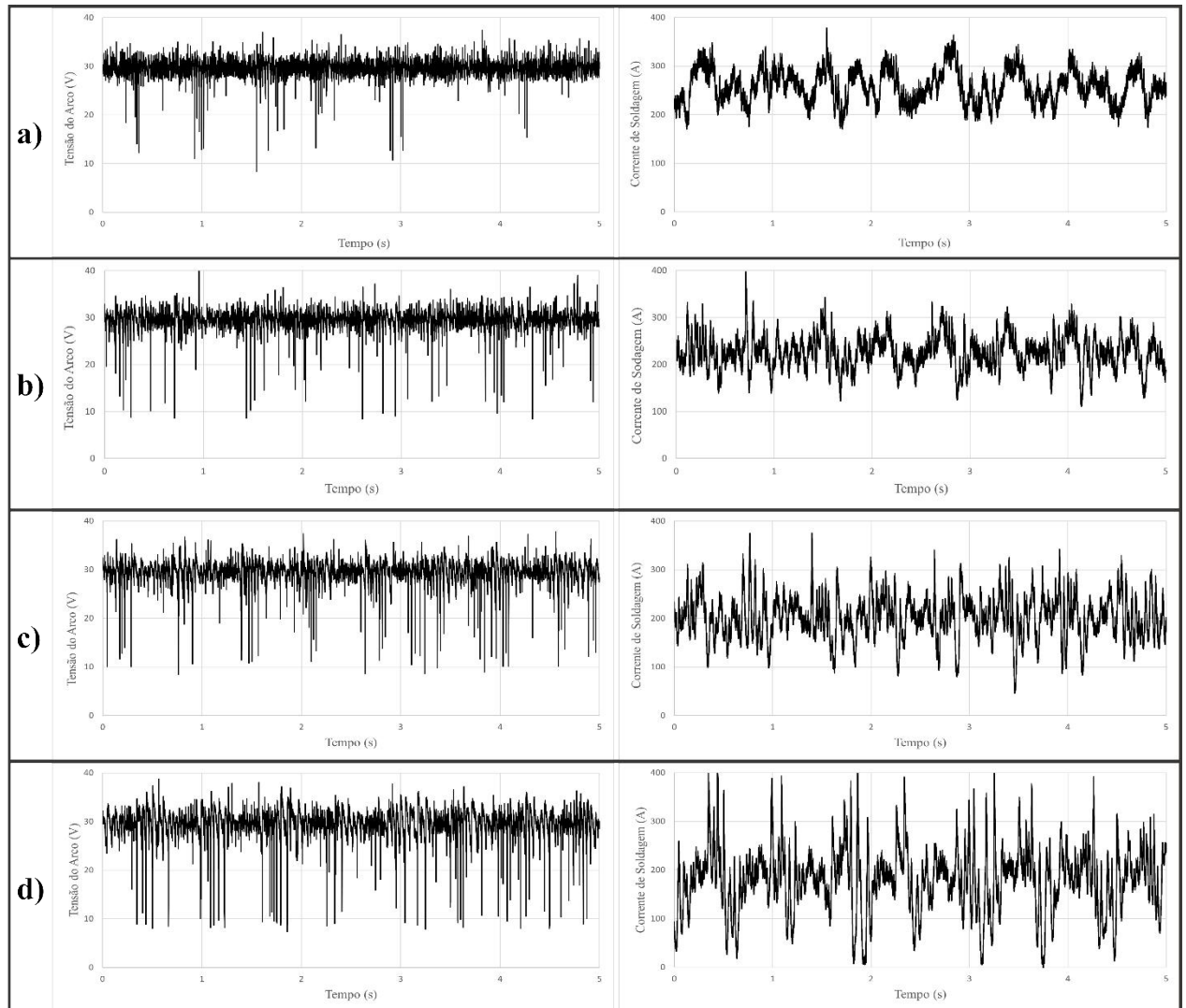
Outro ponto notável é de que, à medida que é aplicada indução eletromagnética aos ensaios de soldagem, há a redução de penetração nas regiões de borda dos cordões de solda, de forma que quanto maior a I_c aplicada menor o valor de penetração obtido. Uma hipótese é de que a menor velocidade de soldagem associada a maior quantidade de material de adição e menor energia imposta implica na interposição da poça de fusão entre o arco e o metal, reduzindo assim a penetração. Desta forma, obtém-se com a aplicação da técnica de aquecimento do arame-eletrodo por indução, a redução de penetração justamente na área de maior interesse em se tratando do complexo perfil de penetração obtido através da técnica de tecimento.

Postas as análises das seções transversais dos cordões, pode-se concluir que de maneira geral, ainda assim os valores obtidos são elevados para utilização imediata em aplicações de revestimentos. Entretanto, ressalta-se que o Laboratório de Tecnologia da Soldagem vem desenvolvendo desde 2018 pesquisas no âmbito da soldagem a arco submerso aliada à técnica de tecimento, para as quais já havia sido levantada a possibilidade da sua utilização em aplicações de revestimento e, dentre todos os trabalhos produzidos até aqui, este é o primeiro a atingir nível de diluição abaixo de 50%. Por fim, novamente enfatiza-se que este é apenas o trabalho inicial de uma técnica extremamente promissora frente aos altos resultados de redução na diluição obtidos e apresentados ao longo desta pesquisa.

4.2 ANÁLISE DOS OSCILOGRAMAS DE SOLDAGEM

Outro aspecto a ser considerado diz respeito à estabilidade do processo. Deste modo a Figura 27 traz os oscilogramas de corrente e tensão de soldagem resultantes dos ensaios com V_a de 5,5 m/min, para as correntes de indução 0, 90, 120 e 150 A. Conforme podem ser observadas através das aquisições, o movimento de tecimento associado à corrente de indução eletromagnética, não acarretou significativamente na alteração dos padrões de oscilação da corrente de soldagem. Nota-se que o oscilograma de corrente de soldagem para o ensaio com I_c de 150 A, em especial, apresenta picos de valores extremos por períodos muito curtos de tempo, indicando assim a existência de ruídos durante a leitura de corrente de soldagem, de forma que este foi possivelmente ocasionado pelo campo magnético gerado pelas correntes induzidas no sistema. Ademais, não se constata instabilidades no comportamento da corrente de soldagem, de modo que se pode afirmar que o movimento a aplicação de indução eletromagnética não comprometeu a estabilidade do processo.

Figura 27. Aquisição dos valores instantâneos de tensão de arco e corrente de soldagem para os cordões de solda com V_a 5,5 m/min. Em a) I_c 0 A; b) I_c 90 A; c) I_c 120 A; d) I_c 150 A.



Fonte: Autora (2023).

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados e discutidos no decorrer do estudo, pode-se concluir que o objetivo geral de analisar a técnica do tecimento transversal com arame aquecido através de indução eletromagnética visando aplicações de revestimento foi atendido e compreende-se a técnica como perfeitamente viável. Ademais, pode-se citar as seguintes conclusões:

- Os ensaios de soldagem se mostraram adequados quanto à viabilidade do aquecimento do arame junto a técnica de tecimento, pois não apresentaram problemas relacionados à inclusão ou retenção de escória, além de não apresentarem mordeduras ou descontinuidades para os parâmetros finais;
- As larguras obtidas para os cordões de solda encontradas são de aproximadamente 6,9 mm maior que a amplitude de tecimento ajustada, semelhantes aos demais estudos;
- Através do aumento da DBCP pode-se visualizar a necessidade de uma corrente média de soldagem mínima de 500 A para manutenção da poça de fusão, além da quantidade mínima de deposição de 3,6 m/min prevista por Rode (2020);
- Quando aplicada indução eletromagnética aos ensaios de soldagem, pode-se observar redução de 30% para o parâmetro de área penetrada, 21% para a penetração e 15% para a diluição em relação aos ensaios de referência com V_a de 5,5 m/min;
- Quando comparados os resultados obtidos com V_a 5,5 m/min e I_c 150 A em relação a amostra de referência com V_a 4,5 m/min, a diluição atingiu redução de cerca de 17%, chegando a taxa de 49%;
- A velocidade de alimentação de 5,5 m/min aliada ao aquecimento do arame com corrente de indução de 150 A faz-se mais interessante do que a de 4,5 m/min, uma vez que implica na maior deposição de material para mesma velocidade de soldagem (30 cm/min) e menor corrente de soldagem, 475 A, resultando em menor diluição;

- Nas condições empregadas no presente trabalho não foram evidenciadas qualquer instabilidade de tensão e/ou corrente nos oscilogramas de soldagem, que pudessem ser atribuídos à técnica de tecimento em combinação a técnica de aquecimento por indução eletromagnética.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o aumento da velocidade de oscilação transversal da tocha nas extremidades do cordão e a redução desta no centro a fim de obter um perfil de penetração mais constante;
- Avaliar a aplicabilidade da técnica de tecimento transversal em chanfros.

7. REFERÊNCIAS

ABIOYE, T.E., MCCARTNEY, D.G., CLARE, A.T. **Laser Cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection**. Journal of Materials Processing Technology. 217(2015) 232-240.

ALTOÉ, J. A. F., SILVA, J. P. C., MAZIERO, R. **Avaliação do Aço Inoxidável Superaustenítico de norma BS EN N° 14587 na Resistência à Corrosão por Pite**. 70º Congresso Anual da ABM – Internacional. Agosto/2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Bahmad, S. A.; Voigt, A. L.; Cunha, T.V. **Desenvolvimento de tocha para a soldagem SAW e GMAW capazes de realizar o pré-aquecimento do arame-eletrodo por indução eletromagnética**. 12 Congresso Brasileiro de Engenharia da Fabricação - COBEF. Brasília. 2023

CUNHA, T. V.; RIBEIRO, H. O. **Avaliação do Uso do Tecimento na Soldagem a Arco Submerso**. Soldagem & Inspeção, [s.l.], v. 23, n. 1, p.73-82, mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2301.08>.

ESAB. **Technical Handbook - Strip Cladding**. 2008. < http://www.ozmetalsan.com/images/catalog/55608ESAB_Strip_Cladding_El_Kitabi_-_EN.pdf>

FANTONI, L. F. **Estudo da soldagem SAW com tecimento transversal visando aplicações de revestimento**. 2022.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentals of Physics Extend**. 10 ed. EUA: Wiley, p. 1440, 2013.

HOULDCROFT, Peter Thomas. **Submerged-arc welding**. Woodhead publishing, 1990.

ISO 10423:2022. **Petroleum and natural gas industries. Drilling and production equipment Wellhead and tree equipment**. 2022.

KANNAN, T. e MURUGAN, N. **Prediction of ferrite number of duplex stainless steel-clad metals using RSM.** *Welding Journal*, v. 85, n. 5, p. 91s-100s, 2006.

MACHADO, I. G. **Soldagem & técnicas conexas: Processos.** Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477p

MICKEVICIENE, R. **Global shipbuilding competition: trends and challenges for Europe.** In: Piotr Pachura (ed.) *The Economics Geography of Globalization*, Intertechopen, 2011.

MIRANDA, et al. **Avaliação do Uso do tecimento sobre o nível de diluição e geometria do cordão de solda na soldagem TIG com alimentação automática de arame frio.** *Soldagem & Inspeção*, v. 20, p. 180-190, 2015.

MODENESI, P.J; MARQUES, P.V; SANTOS, D.B. **Introdução à metalurgia da soldagem.** 2012. 209f. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do estado de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012.

MURUGAN, N. e PARMAR, R. S. **Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding.** *Welding Journal*, v. 76, p. 391s-403s, 1997.

OBRIEN, R.L. **Welding processes. Welding handbook**, Vol. 2, 8th ed. Miami: American Welding Society, 1991.

PESSOA, A. R. P. et. al. **Seleção de Parâmetros Através do Método Taguchi para Soldagem de Revestimento com ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG.** *Soldagem & Inspeção*, v.15, n.4, p.317 - 324, 2010.

PESSOA, E. F. **Soldagem de revestimento com ligas de níquel empregando o processo mig/mag com duplo arame para aplicações em componentes do setor de petróleo e gás natural.** 2014. 217 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

PILIPENKO, A. **Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding.** Their mitigation techniques. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim. 2001.

ROCHA, A. S. **Novo Processo de Chapeamento por Solda. Soldagem com Fita em Arco Submerso.** Revista Tecnologia. 1987. Pag. 59 - 52

RODE, A. C. **Desenvolvimento e Avaliação da Soldagem a Arco Submerso com Tecimento Transversal.** 2020.

SCHAEFFER, Claudio Marques. **Adequação do procedimento de soldagem por arco submerso para o revestimento com arame inconel 625.** 2017.

SCOTTI A, e PONOMAREV V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo: Artliber; 2008.

SILVA, M. M. **Avaliação da compatibilidade metalúrgica e da resistência à corrosão de revestimentos da liga AWS ER NiCrMo-4 aplicados por soldagem SAW sobre o aço API 5L Gr B.** 2013. 202 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

SILVA, M.M. et al. **Otimização de parâmetros do processo de soldagem arco submerso para revestimentos anticorrosivos.** Soldagem & Inspeção, v. 21, p. 115-124, 2016.

SINER. **Procedimento Operacional: Processo de Solda.** 2013. Disponível em: <https://docplayer.com.br/39887394-Procedimento-operacional-n-do-procedimento-po-047.html>. Acesso em: 28 out. 2023

TEICHMANN, E. W. **Análise de variantes de processos de soldagem visando o revestimento com inconel 625 de tubos em aço API X46.** 213 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica., UFSC, Florianópolis, 2016.

VOIGT, A.L. **Desenvolvimento e avaliação de método de aquecimento por indução do arame para o processo de soldagem TIG “hot wire”**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

VOIGT, A. L.; CUNHA, T. V.; NIÑO, C. E. **Conception, implementation and evaluation of induction wire heating system applied to hot wire GTAW (IHW-GTAW)**. Journal of Materials Processing Technology, v. 281, p. 116615, 2020.