



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Ana Clara Rode

Desenvolvimento e avaliação da soldagem a arco submerso com tecimento transversal

Joinville

2020

Ana Clara Rode

Desenvolvimento e avaliação da soldagem a arco submerso com tecimento transversal

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em engenharia e ciências mecânicas
Orientador: Prof. Tiago Vieira da Cunha, Dr. Eng.

Joinville

2020

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

Rode, Ana Clara

Desenvolvimento e avaliação da soldagem a arco submerso
com tecimento transversal / Ana Clara Rode ; orientador,
Tiago Vieira da Cunha, 2020.
102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. SAW. 3. Tecimento
Transversal . 4. Morfologia dos cordões de solda. I.
Cunha, Tiago Vieira da. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências
Mecânicas. III. Título.

Ana Clara Rode

Desenvolvimento e avaliação da soldagem a arco submerso com tecimento transversal

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Hélio Ormeu Ribeiro, Dr. Eng
Instituto Federal de Santa Catarina

Raul Gohr Junior, Dr. Eng
IMC- Engenharia de Soldagem I. A. Ltda.

Prof.: Kleber Vieira de Paiva, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Pedro Paulo de Andrade Junior, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em engenharia e ciências mecânicas.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Tiago Vieira da Cunha, Dr. Eng.
Orientador

Joinville, 2020.

Este trabalho é dedicado a Luis Rode, meu amado pai.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter permitido eu concluir mais essa etapa.

Aos meus pais Luis e Lilian Rode pelo amor e por serem meu suporte em todo tempo. Também a minha irmã Debora por sua paciência e carinho.

Ao meu orientador Tiago Vieira da Cunha por cumprir seu papel de formador de conhecimento e marcar minha vida.

Ao Laboratório da Tecnologia da Soldagem e ao Laboratório de Física e Química por permitirem a realização deste trabalho.

A IMC e a Schulz pelo auxílio na realização deste trabalho.

Aos membros do Laboratório da Tecnologia da Soldagem que contribuíram para minha formação e desenvolvimento pessoal.

A Universidade Federal de Santa Catarina pelo ensino público e de qualidade e FAPESC pela bolsa de estudos.

Só há dois tipos de pessoas no fim – as que dizem a Deus: “seja feita a tua vontade” e aquelas a quem Deus diz, no final: “Seja feita a *tua* vontade” (LEWIS, 1945)

RESUMO

O emprego do processo de soldagem a arco submerso (SAW) na construção pesada é algo recorrente. Pois tal processo proporciona elevadas taxas de deposição, muitas vezes não encontradas em outros processos de soldagem. Não obstante, é periódico o desenvolvimento de técnicas de soldagem com o intuito de aprimorar este processo a fim de atingir o máximo de desempenho. Neste contexto, é possível encontrar na literatura trabalhos que abordam o emprego de diversas técnicas de soldagem aplicadas ao processo SAW, a saber: múltiplos arames, longa extensão do eletrodo, adição de arame, entre outros. Entretanto, técnicas de soldagem difundidas em alguns processos de soldagem, como a soldagem com proteção gasosa (GMAW - MIG/MAG) e eletrodos não consumíveis de tungstênio (GTAW - TIG), pouco são encontradas sendo aplicadas no SAW. É o caso da oscilação transversal do eletrodo. Desta forma, a presente pesquisa busca propor e avaliar a aplicação do tecimento no processo SAW. Dado que não existem disponíveis no mercado equipamentos de soldagem SAW que permitam a aplicação da citada técnica, neste trabalho, inicialmente foi desenvolvido um cabeçote de arco submerso capaz de realizar o movimento oscilatório da tocha. De posse deste, realizou-se um estudo acerca da aplicação da técnica do tecimento transversal no processo SAW. Deste modo, realizaram-se ensaios de soldagem com os objetivos de avaliar os efeitos da oscilação da tocha em relação a diluição e perfil de penetração dos cordões de solda, inclusão de escória, uma vez que o processo ocorre sob uma camada de fluxo de soldagem e, sobretudo, a taxa de deposição de material. Para tal avaliação ocorreram três conjuntos de ensaios, os quais variaram independentemente: amplitude de tecimento e frequência de tecimento. Sendo assim, com este trabalho foram alcançadas amplitude de tecimento de até 40mm, permitindo identificar o valor de 0,9g/mm² como quantidade mínima de material a ser depositado por unidade de área de cordão de solda para que seja obtido um cordão de solda livre de defeitos. Para as condições de soldagem ensaiadas, tem-se um ganho na área fundida de aproximadamente 340% quando comparado um cordão de solda resultante da técnica de tecimento, para a amplitude de 40mm, com um cordão de solda linear. Além disso, se fez possível variar a frequência de tecimento em uma faixa de 0,6 a 1,6Hz, possibilitando, assim, concluir que o aumento da frequência de tecimento atua na melhor distribuição superficial de material depositado. Contudo, ao elevar a frequência de tecimento de 0,6Hz para 1,6Hz observa-se a redução da penetração em 22%, resultados semelhantes são obtidos para o reforço, área fundida e área de reforço.

Palavras-chave: SAW. Oscilação transversal. Morfologia dos cordões de solda.

ABSTRACT

The application of submerged arc welding process in heavy construction such as in shipyards, mining companies, steel mills, factories of profiles and metallic structures has been something recurrent. On this account, this process provides high deposition rates which sometimes it is not found in other welding processes. Despite this fact it is recurrent the development of welding techniques in order to improve this process to achieve maximum performance. In this context, it is possible to find in the literature studies approaching the use of various welding techniques in SAW process, such as: multiple wires, long stickout, filler wire, among others. However, welding techniques diffused in some welding processes, such as Gas Metal Arc Welding (GMAW) and Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), little are found being applied to SAW. Electrode weave is an example. That is why, this research aims to propose and evaluate the application of weave in SAW process. Considering there is no SAW welding equipment available on the market which allows the application of this technique, in this study, initially a submerged arc head will be developed which is capable of performing the oscillatory movement of the torch. With that, the study was in a second phase, where a study will be carried out on the application of the weaving technique in SAW process. For this reason, welding tests were performed with the objective of evaluating the effects of the torch oscillation related to the dilution and penetration profile of the weld beads, including slag, once the process occurs under a layer of welding flux and, above all, the rate of material deposition. For this evaluation there were three sets of tests, which varied independently: amplitude of weave and frequency of weave. Thus, with this work, a fabric width of up to 40mm was achieved, allowing the value of $0.9\text{g} / \text{mm}^2$ to be identified as the minimum amount of material to be deposited per unit of weld bead area. For the welding conditions tested, there is a gain in the molten area of approximately 340% when comparing a weld bead resulting from the weaving technique, for the amplitude of 40mm, with a linear weld bead. In addition, it was possible to vary the frequency of weaving in a range from 0.6 to 1.6 Hz, thus making it possible to conclude that the increase in the frequency of weaving acts on the best surface distribution of deposited material. However, by raising the weave frequency from 0.6Hz to 1.6Hz, a 22% reduction in penetration is observed, similar results are obtained for reinforcement, cast area and reinforcement area.

Keywords: Submerged Arc Welding. Transverse weave. Weld bead morphology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Técnica <i>twin-wire</i> aplicada ao processo SAW	18
Figura 2 - Representação esquemática da técnica <i>twin-wire</i> com a) um único arco e corrente somente no fio esquerdo, b) apenas um arco e corrente somente no fio do meio; c) apenas um arco e corrente somente no fio direito, d) dois arcos e corrente em dois fios	19
Figura 3 - Técnica <i>twin-wire</i> combinada com a adição de pó metálico aplicado a) a frente dos eletrodos b) concêntrico aos eletrodos.....	20
Figura 4 - Técnica <i>tandem-arc</i> aplicada por Srikarun e Muangjunburee (2018) ao processo SAW	21
Figura 5 - Técnica <i>tandem-arc</i> combinada com adição de arame frio aplicada ao processo SAW	23
Figura 6 - Técnica <i>hot-wire</i> aplicada ao processo SAW	24
Figura 7 - Técnica de tecimento transversal aplicada ao processo SAW em uma soldagem vertical	26
Figura 8 - Superfície e secção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 15 kJ/cm e amplitude de tecimento de a) 0 mm - Linear, b) 10 mm, c) 20 mm e d) 30 mm.....	27
Figura 9 - Principais componentes do eixo longitudinal do dispositivo	36
Figura 10 - Componentes do sistema de acoplamento	37
Figura 11 - Procedimento de encaixe do sistema de acoplamento	38
Figura 12 - Esquema de ajuste de rodas. Rodas posicionadas no limite de ajuste a) superior e b) inferior. Rodas c) acopladas e d) desacopladas dos trilhos	39
Figura 13 - Dispositivo para regulagem de DBCP	40
Figura 14 - Projeto CAD do módulo oscilador.....	41
Figura 15 - Posicionamentos do módulo oscilador através de a) abas de fixação para soldagem com a técnica de tecimento b) transversal c) longitudinal.....	42
Figura 16 - Posicionamentos do módulo oscilador para soldagem a) convencional b) aplicando a técnica puxando e empurrando	42
Figura 17 - Projeto CAD da base estrutural do dispositivo	43
Figura 18 - Dispositivo de deslocamento de tocha posicionado para soldagem com tecimento transversal.....	44
Figura 19 - Organograma de funcionamento do dispositivo de deslocamento de tocha.....	45
Figura 20 - Diagrama de blocos do sistema de <i>hardware</i> do dispositivo de deslocamento.....	46

Figura 21 - Rotina principal do programa de controle do dispositivo.....	48
Figura 22 - Fluxograma de funcionamento para acesso a menus e variáveis	49
Figura 23 - Fluxograma de acionamento dos motores	50
Figura 24 - Trajetórias do movimento a) sem deriva b) ângulo com deriva	52
Figura 25 - Trajetória do movimento de tecimento	53
Figura 26 - Bancada de ensaios para a realização dos ensaios de soldagem.....	55
Figura 27 - Esquema simplificado da matriz de ensaios de soldagem para o processo SAW com tecimento	56
Figura 28 - Equacionamento que descreve a relação entre a velocidade de alimentação de arame Vs a amplitude de tecimento	64
Figura 29 - Taxa de deposição de material em função da amplitude de tecimento.....	69
Figura 30 - Padrão de solidificação apresentados pelos cordões de solda com as amplitudes de tecimento de a) 20mm, b) 30mm e c) 40mm.....	69
Figura 31 - Largura dos cordões de solda obtidos para amplitudes de tecimento de a) 0mm, b) 10mm, c) 20mm, d) 25mm, e) 30mm, f) 35mm e g) 40mm.	71
Figura 32 - Relação entre a amplitude de tecimento e a largura medida.....	71
Figura 33 - Relação da medida de reforço dos cordões de solda em função da amplitude energia de soldagem	72
Figura 34 - Avaliação de parâmetros para soldagem de revestimento	74
Figura 35 - Avaliação da penetração em função da amplitude de tecimento e energia de soldagem.....	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Representação gráfica da frequência de operação Vs. amplitude de tecimento.....	63
Quadro 2 - Cordões de solda resultantes da variação da amplitude de tecimento mantendo fixa a DBCP.....	67
Quadro 3 - Seções transversais dos cordões de solda resultantes da variação de amplitude de tecimento mantendo fixa a DBCP	70
Quadro 4 - Cordões de solda resultantes da variação da amplitude de tecimento variando a DBCP.....	78
Quadro 5 - Seções transversais dos cordões de solda resultantes da variação de amplitude de tecimento variando a DBCP	79
Quadro 6 - Cordões de solda resultantes da variação da frequência de tecimento.....	81
Quadro 7 - Seções transversais dos cordões de solda resultantes da variação da frequência de tecimento	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escopo de projeto	33
Tabela 2 - Componentes do conjunto de transmissão de movimento	36
Tabela 3 - Medidas de deslocamento linear obtidas para o eixo longitudinal.....	59
Tabela 4 - Medidas de velocidade de soldagem	60
Tabela 5 - Avaliação das medidas de amplitude de tecimento.....	61
Tabela 6 - Medidas de frequência de tecimento	61
Tabela 7 - Relação da frequência máxima de operação Vs. amplitude de tecimento	62
Tabela 8 - Parâmetros de soldagem para variação da amplitude mantendo fixa a DBCP	65
Tabela 9 - Medidas geométricas dos cordões de solda e parâmetros de soldagem obtidos com a variação da amplitude de tecimento	70
Tabela 10 - Parâmetros de ensaios fixando a corrente de soldagem	77
Tabela 11 - Medidas geométricas dos cordões de solda e parâmetros de soldagem obtidos com a variação do DBCP	79
Tabela 12 - Medidas geométricas dos cordões de solda e parâmetros de soldagem obtidos com a variação da frequência de tecimento.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Amplitude de tecimento [mm]

AF – Área de fusão [mm²]

AR – Área de reforço [mm²]

ASTM - American Society for Testing and Material

DBCP – Distância bico de contato peça [mm]

Es – Energia de soldagem [kJ/cm]

F – Frequência de tecimento [Hz]

GMAW – Gas Metal Arc Welding (MIG/MAG: MIG - Metal Inert Gas e MAG – Metal Active Gas)

GTAW – Gas Shielded Tungsten Arc Welding (TIG - Tungsten Inert Gas)

HSLA – High strength low alloy (Baixa liga de alta resistência)

IHM – Interface homem máquina

Is – Corrente de soldagem [A]

LCD – Liquid Crystal Display (tela de cristal líquido)

LTS – Laboratório da tecnologia da soldagem

SAW – Submerged Arc Welding (Soldagem a arco submerso)

Va – Velocidade de alimentação de arame [m/min]

Vs – Velocidade linear de soldagem [cm/min]

ZTA – Zona termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

T_d – Taxa de deposição [kg/h]

T_f – Taxa de fusão [cm/min]

l – Largura do cordão de solda [mm]

V_x – Velocidade de soldagem [cm/min]

d – Diâmetro do eletrodo [mm]

v_a – Velocidade de alimentação de arame [m/min]

T – Período de oscilação [s]

f – Frequência de oscilação [Hz]

x – Distância linear horizontal no tecimento [mm]

y – Distância linear vertical no tecimento [mm]

ρ – Densidade do arame de soldagem [kg/m³]

μ – Incerteza de medição

σ – Média de medição

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
3	DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO DE DESLOCAMENTO DE	
TOCHA		33
3.1	ESCOPO DE PROJETO	33
3.2	PROJETO MECÂNICO DO DISPOSITIVO	35
3.3	<i>HARDWARE</i> DO DISPOSITIVO	44
3.4	<i>SOFTWARE</i> DE CONTROLE	47
4	METODOLOGIA.....	51
4.1	METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO DE DESLOCAMENTO DE TOCHA	51
4.2	BANCADA DE ENSAIOS	54
4.3	METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	55
4.4	CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE MACROESTRUTURAL DOS CORDÕES DE SOLDA	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
5.1	VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO	59
5.2	ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	63
5.2.1	Análise da amplitude de tecimento mantendo fixa a DBCP.....	63
5.2.2	Análise da amplitude de tecimento mantendo fixa a corrente média de soldagem	76
5.2.3	Análise de amplitude de tecimento variando a frequência de tecimento	80
6	CONCLUSÕES.....	85
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS.....	91

APÊNDICE A – Cordões de solda obtidos para o levantamento da curva experimental entre a relação de velocidade de alimentação de arame e a amplitude de tecimento	95
APÊNDICE B – Medidas coletadas provenientes das análises das seções transversais para três faces de cada amostra.....	97

1 INTRODUÇÃO

A soldagem a arco submerso (*submerged arc welding* – SAW) tem seu uso difundido nos processos de construção de peças com grandes espessuras devida a sua capacidade em atender as necessidades desta aplicação. É considerado, dos processos aplicados, o mais produtivo pois há pouca perda de calor para o meio externo e, tampouco, vê-se presença de respingos. Dessa forma, seu emprego está associado a estaleiros, mineradoras, siderúrgicas, fábricas de perfis e estruturas metálicas pois nesse tipo de construção pesada é comum a soldagem de peças com grandes espessuras e processos que requerem elevada qualidade.

Muito tem-se feito em busca da melhoria contínua dos índices de produtividade e qualidade de cordões de solda produzidos, resultando em diversas técnicas aplicáveis ao processo SAW. Dessa forma é possível destacar algumas técnicas como a *twin-wire*, *tandem-arc*, *fita e 49 wires*, as quais fazem o uso de múltiplos arames, buscando o aumento da taxa de deposição e a diminuição dos custos do processo de soldagem. Outras técnicas que também visam o acréscimo da taxa de deposição são aquelas que adicionam material a poça de fusão, como arame frio, arame quente, ou pó metálico. Tais técnicas, por vezes, tem sua utilização em situações nas quais são almejadas mudanças nas propriedades mecânicas do cordão de solda. Contudo, pouco pode-se encontrar na literatura especializada sobre o emprego da oscilação transversal do arco no processo de soldagem a arco submerso. Logo, buscando preencher essa lacuna existente, a presente pesquisa se propõe a desenvolver um sistema de deslocamento de tocha que permite a realização de oscilações transversais e longitudinais para o processo SAW, para que em um segundo momento, se avalie os efeitos da soldagem com a oscilação transversal do arco.

A motivação de desenvolver um dispositivo de deslocamento de tocha, se dá pela presente ausência no mercado de cabeçotes de soldagem a arco submerso, que permitam a aplicação da técnica de tecimento transversal. Deste modo, esta pesquisa pretende realizar os projetos mecânicos, de hardware e software para a obtenção de um dispositivo robusto, capaz de aplicar as técnicas de tecimento transversais e longitudinais, e puxando e empurrando para o processo SAW.

A segunda etapa desta pesquisa tem em vista melhor compreender os efeitos dos movimentos oscilatórios sobre o cordão de solda. Assim, é proposta a variação de alguns parâmetros como a frequência e amplitude de oscilação, assim como a energia de soldagem. De posse dos cordões de solda, será possível avaliar o perfil geométrico do cordão de solda,

quantificando aspecto de diluição e penetração, largura, reforço, quantidade de material depositado e possíveis inclusões de escória.

Com a avaliação da tecnologia desenvolvida para SAW com tecimento, pretende-se contribuir com o polo industrial brasileiro. Uma vez que não existem dispositivos que realizem tais técnicas, a presente pesquisa objetiva ampliar as possibilidades para a aplicação do SAW em nível industrial. Com os ensaios a serem desenvolvidos, objetiva-se agregar novos conhecimentos ao processo SAW, conferindo cordões de solda com qualidade e altos índices de produtividade, bem como ampliar os conhecimentos da ciência da soldagem.

1.1 OBJETIVOS

Com o propósito de realizar um estudo sobre a técnica de tecimento transversal aplicada ao processo SAW, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo principal avaliar os efeitos da aplicação da técnica de tecimento quanto aos aspectos operacionais do processo e geométricos dos cordões de solda.

1.1.2 Objetivos Específicos

Com base no objetivo geral proposto, são colocados os seguintes objetivos específicos:

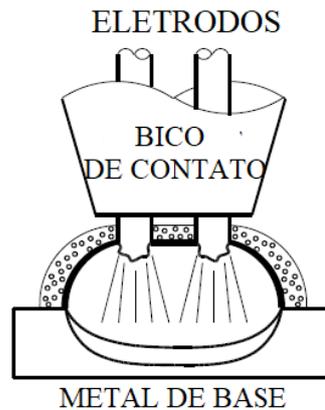
- Conceber o projeto conceitual de um sistema de deslocamento de tocha capaz de realizar a oscilação transversal e longitudinal do arco/tocha de soldagem;
- Conceber uma bancada para experimentos de soldagem;
- Realizar ensaios de soldagem SAW com oscilação transversal da tocha;
- Caracterizar os cordões de solda quanto aos aspectos macroestruturais;
- Avaliar a aplicabilidade da tecnologia desenvolvida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O SAW é um processo de simples operação, automático, de alto calor imposto e que não afeta o meio com os efeitos da radiação do arco voltaico (SRIKARUN E MUANGJUNBUREE, 2018). Esse é um dos mais produtivos processos de soldagem aplicado na união de peças de grandes espessuras. Sua produtividade é um reflexo do seu elevado rendimento, que por sua vez alcança valores próximos ou superiores a 100% justificado pela ausência de respingos, pouca perda de calor para o meio, ou adição de material (além do eletrodo) junto a poça de fusão. Isso é possível, pois na aplicação do SAW, o arco é estabelecido entre a peça de trabalho e um eletrodo consumível e tanto o arco quanto a poça de fusão são cobertos pelo fluxo, material granular que além de atuar na estabilidade do arco, serve de barreira física entre a poça de fusão e o meio externo.

Além do fluxo, outra característica do processo é o emprego de altos valores de corrente e, conseqüentemente, densidade de corrente. Assim, promovendo elevado calor imposto e a combinação dessas resulta em elevados valores de taxa de fusão de material e de deposição. Tais aspectos são marcantes nesse processo de soldagem, contudo, a indústria tem procurado meios de desenvolver soluções que resultem maiores taxas de deposição durante os processos de fabricação. Dessa forma, surgiram variantes do processo de arco submerso que utilizam múltiplos arames, como nos casos de *twin-wire*, *tanden-arc* e *49-fios*. No primeiro caso, para múltiplos arames, a técnica *twin-wire* consiste em dois arames paralelos com uma única fonte de energia, em um mesmo bico de contato, conforme Figura 1.

Figura 1- Técnica *twin-wire* aplicada ao processo SAW



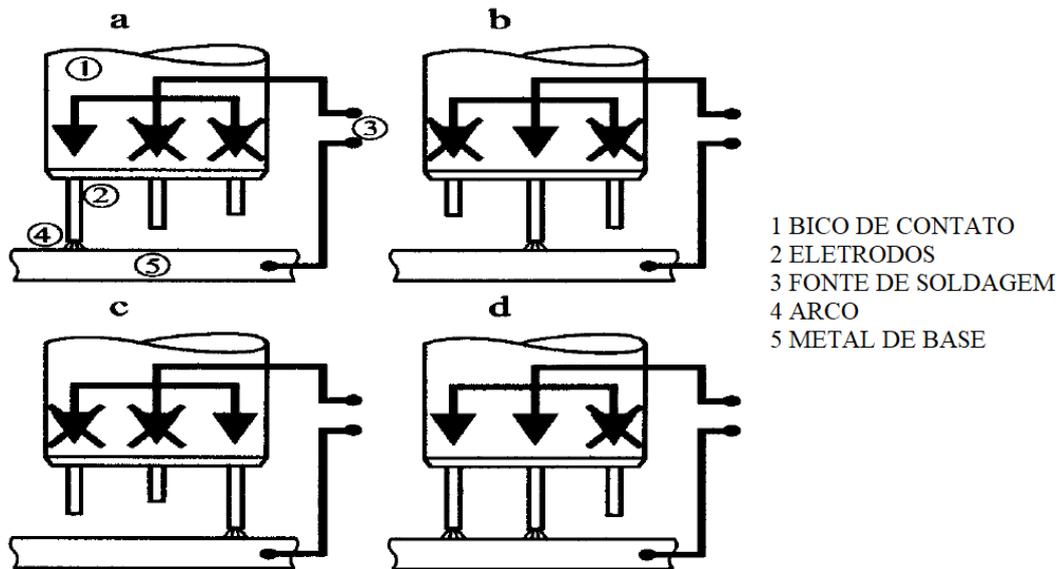
Fonte: Adaptado de Tus̃ek e Subanb (2003)

A técnica resulta no aumento da deposição sem que haja o aumento significativo do calor imposto. Hinkel e Forsthoefel (1976), confirmaram o pressuposto ao obter aumento de 30 a 50% na taxa de deposição, justificado pelo aumento da densidade de corrente para cada eletrodo. Sustentando essa hipótese, Sharma et al (2009) obtiveram maiores taxas de deposição para a menor configuração de diâmetros de eletrodos ao aplicarem a técnica *twin-wire*, ao avaliarem o uso da técnica para uma faixa de corrente de soldagem de 300 a 900A, com as seguintes configurações de arame: 2,0-2,0mm, 3,2-2,0mm e 3,2-3,2mm. Os autores fundamentam o resultado no fato de que quanto menor a bitola do arame, maior a densidade de corrente e maior a resistência elétrica acarretando em maior aquecimento por efeito Joule.

Tusek et al. (2005) também compararam os efeitos obtidos com a técnica *twin-wire* para 2 e 3 eletrodos em relação ao processo convencional. Através de seus experimentos puderam concluir que a distribuição da energia total em múltiplos arames gera uma poça de fusão com formato de círculo distorcido, influenciando favoravelmente sobre a eficiência energética do processo, velocidade de soldagem, a deformação plástica da peça de trabalho e a zona termicamente afetada (ZTA). Tais pontos são consequência do desempenho e eficiência energética do *twin-wire*, o que basicamente pode ser explicado pelos autores por dois fatores. O primeiro se dá pela não uniformidade de passagem de corrente em cada um dos arames. Segundo os autores, em dado momento pode não haver corrente percorrendo dois arames, enquanto a corrente total circula no terceiro arame (Figura 2). Ocorrendo o aquecimento do arame de forma rápida, tal processo faz com que a resistência elétrica nesse mesmo arame também seja rapidamente elevada, permitindo a volta da passagem de corrente através dos

outros arames. Enquanto o segundo ponto é a energia térmica entre os arcos. Os pontos descritos, somados a característica do SAW de perder pouco calor para o meio, contribuem para um cordão com menor tensão residual e menor deformação da chapa.

Figura 2 - Representação esquemática da técnica *twin-wire* com a) um único arco e corrente somente no fio esquerdo, b) apenas um arco e corrente somente no fio do meio; c) apenas um arco e corrente somente no fio direito, d) dois arcos e corrente em dois fios



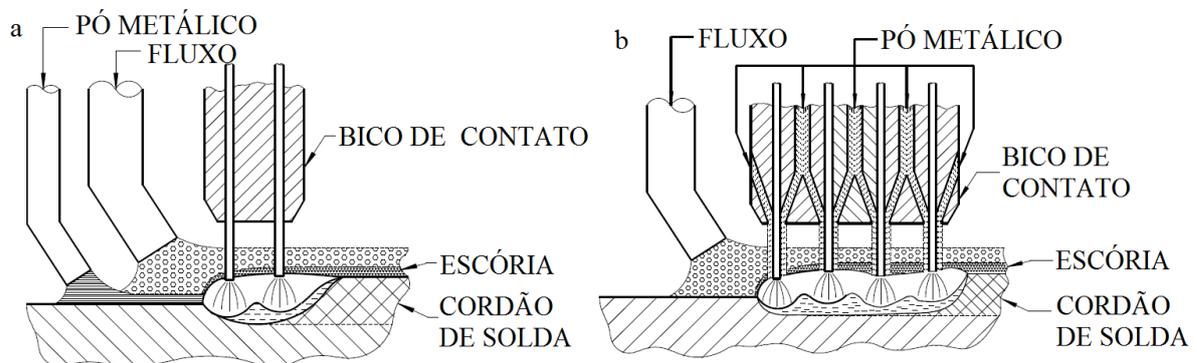
Fonte: Tusek et al.(2005)

Tusek et al. (2005) corroboram com a afirmativa de que a taxa de deposição aumenta proporcionalmente com o aumento de número de eletrodos. Os autores realizaram ensaios com eletrodos de 2mm de diâmetro, tensão de soldagem de 32V, distância entre eletrodos de 10mm e as seguintes faixas de corrente, a saber: um eletrodo de 200 a 400A, dois eletrodos 300 a 1400A e para três eletrodos 400 a 2000A. E através de um comparativo com o SAW convencional, esses autores obtiveram acréscimo de 3,5 vezes na taxa de material depositado com o uso de três eletrodos na polaridade negativa. Os autores destacam que o consumo de fluxo é aproximadamente 30 a 40% menor para três eletrodos, dessa forma o custo total para realizar o processo SAW com múltiplos arames se torna inferior ao processo SAW convencional, sendo este representado por 78% do custo total da operação convencional para dois arames e 68% para três arames.

Ainda comparando o SAW convencional, e a técnica com dois e três arames, Tusek e Suban (2003), mostram que para uma faixa de corrente de 200 a 1200A, com a tensão de 31 V, para um eletrodo de diâmetro de 2 mm, e espaçamento de 7mm entre eletrodos, a taxa de

deposição aumenta exponencialmente com o aumento da corrente de soldagem, que por sua vez aumenta exponencialmente com o aumento do número de eletrodos. Resultados ainda melhores da taxa de deposição, segundo Tusek e Suban (2003), podem ser obtidos com a adição de pó metálico (a frente ou entre os eletrodos conforme Figura 3), gerando ganho de 15% na eficiência de fusão do material de adição ao realizar ensaios para as seguintes condições de soldagem: corrente de soldagem de 400A, tensão de 30 V, velocidade de arame de 4m/min, para o diâmetro de arame de 1,6mm. Os autores complementam seus experimentos com a análise de consumo de fluxo, que por sua vez apresenta-se menor com a adição de pó metálico. Para o valor de tensão de 31V e arames com diâmetro de 3mm, resultados experimentais mostram que a energia do arco voltaico é usada com maior intensidade para consumir o material de adição (eletrodo e pó metálico) ao invés do fluxo, fazendo com que o consumo do fluxo seja menor em 15 a 25% para o arame duplo e de 12 a 25% para o arame triplo.

Figura 3 - Técnica *twin-wire* combinada com a adição de pó metálico aplicado a) a frente dos eletrodos b) concêntrico aos eletrodos



Fonte: Adaptado de Tus̃ek e Suban (2003)

Partindo do conceito de que a diluição na soldagem é um fator relevante, pois essa afeta as propriedades mecânicas do cordão de solda produzido, Srikarun e Muangjunburee (2018) avaliaram a adição do pó metálico a fim de compreender seu efeito sobre a diluição. A investigação se deu em 5 combinações, a saber:

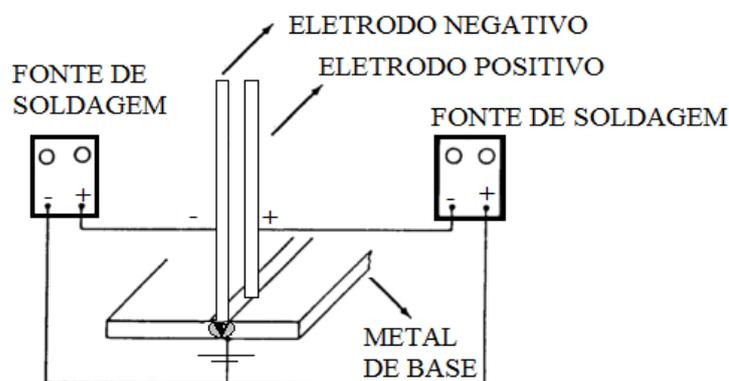
- 1- Arame de aço martensítico de 2,4mm sem adição de pó metálico;
- 2 - Arame de aço baixo carbono de 2,4mm sem adição de pó metálico;
- 3 - Arame de aço baixo carbono de 2,4mm com adição de pó de ferro-carbono;

- 4 - Arame de aço baixo carbono de 2,4mm com adição de pó de ferro-cromo;
- 5 - Arame de aço baixo carbono de 2,4mm com adição de pó ferro-carbono com ferro-cromo.

Dada a condição de soldagem para a tensão de 30V e corrente de 600A, em polaridade positiva, os resultados obtidos por Srikarun e Muangjunburee (2018) confirmando que a adição de pó metálico aumenta a taxa de deposição do metal de adição. Com relação a diluição, os autores concluíram que o calor do arco sofre maior dissipação térmica através do pó metálico, fazendo com que o pó metálico seja fundido, e conseqüentemente, reduzindo a penetração. Fazendo a correlação de áreas de reforço e penetração para obter a taxa de diluição, os autores obtiveram os seguintes resultados conforme as configurações: 1)55,35%; 2)62,02%; 3) 31,56%; 4)43,02% e 5)7,79%.

Além de utilizar múltiplos eletrodos com uma única fonte de energia e adicionar pó metálico, existe uma terceira opção de múltiplos arames na qual há uma fonte de energia para cada eletrodo, aumentando, assim, o controle sobre a imposição de calor, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Técnica *tandem-arc* aplicada por Srikarun e Muangjunburee (2018) ao processo SAW



Fonte: Autora (2020)

Kiran et al. (2012) explicam que ao aplicar essa técnica, usualmente o eletrodo que vem a frente é conectado a uma fonte de energia DC, enquanto o segundo eletrodo a uma fonte AC. Tal configuração atua sobre o cordão de solda garantindo que a penetração seja influenciada pela corrente do primeiro arco voltaico, enquanto as características de largura e

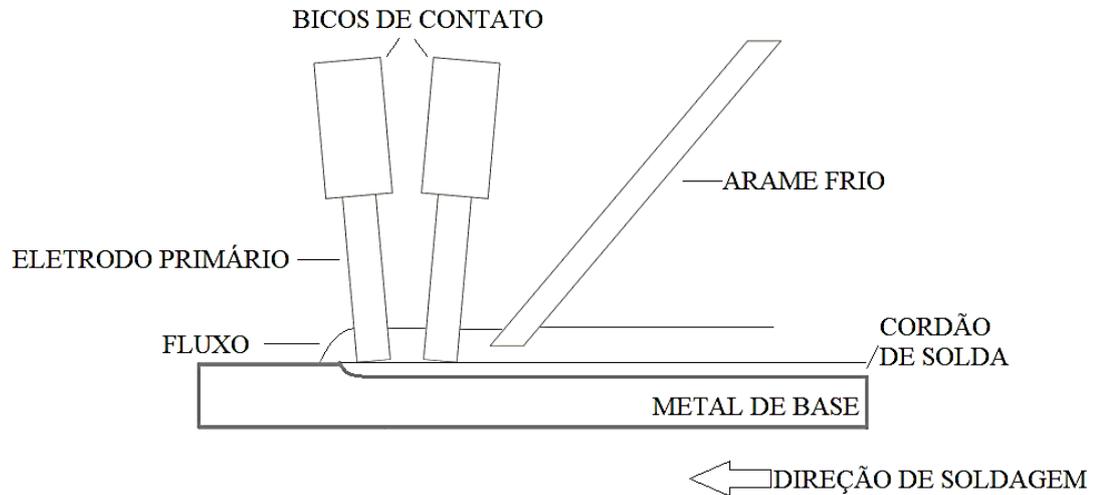
reforço sejam função da corrente do segundo eletrodo. Kiran et al. (2012) em experimentos com aço HSLA de 12mm de espessura, analisaram a corrente do arco primário (a frente), e a corrente do arco secundário (através dos tempos da corrente para cada polaridade) e a velocidade de soldagem e concluíram que quanto maior a magnitude e menor o tempo de atuação dos picos negativos, maior é o volume da poça de fusão e menor a taxa de resfriamento, resultando na inibição da formação da ferrita acicular.

Kiran et al. (2014) complementaram a pesquisa anterior, caracterizando as fases metalúrgicas e a microdureza através da soldagem do aço HSLA de 17,5mm de espessura através do processo SAW *tandem*. Para isso optaram por impor o calor de 2,5 kJ/mm em todos os ensaios. Dessa forma, os autores concluíram que ao aumentar a corrente do arco primário e simultaneamente a velocidade de soldagem, resulta no aumento da zona de fusão e a diminuição da ZTA. Os ensaios realizados pelos autores variaram as correntes entre 400 e 1000A, porém mantendo a premissa do calor imposto, seus resultados apresentaram variações insignificativas nos valores de dureza. Sendo essa de 212VHN para a configuração de 400A para o arco primário e secundário, e 230VHN para 1000A para os dois arcos. Os autores atribuem tais resultados ao aumento da fração volumétrica de ferrita acicular no cordão de solda em função do aumento da corrente de soldagem. Contudo, os autores sugerem que a configuração de 1000A (arco primário e secundário) e a velocidade de soldagem de 26,8 mm/s reflete nas melhores condições para alta produtividade, taxa de fusão e dimensões do cordão.

Contribuindo com os trabalhos sobre *tandem-arc*, Yan et al. (2013) dedicaram-se no estudo da influência da distância entre arames e na velocidade de soldagem sobre a qualidade resultante dos cordões de solda deste processo de soldagem. Ensaio de soldagem em aço HSLA de 20mm de espessura com chanfro em V foram realizados e Yan et al. (2013) concluíram que a distância ideal para arcos deve ser de 55 a 80mm, pois as distâncias inferiores e superiores apresentam instabilidade do processo, assim como cordões de aparência indesejável

Mohammadijoo et al. (2017) investigaram as influências da adição de um arame frio sobre os parâmetros de soldagem, a configuração de posicionamento é mostrada na Figura 5. Em seus estudos, os autores notaram que as principais mudanças provenientes da adição de um arame frio são a geometria do cordão e a diluição do mesmo. Quando comparadas as técnicas *tandem* convencional e *tandem* com adição de arame frio, a técnica com adição de arame apresenta redução de 14% na diluição. A penetração também é afetada, sendo reduzida em cerca de 10mm². Para a dureza houve alteração de 136HV (técnica *tandem*) para 222HV (técnica com adição de arame frio), o que segundo os autores é devido a redução do calor imposto.

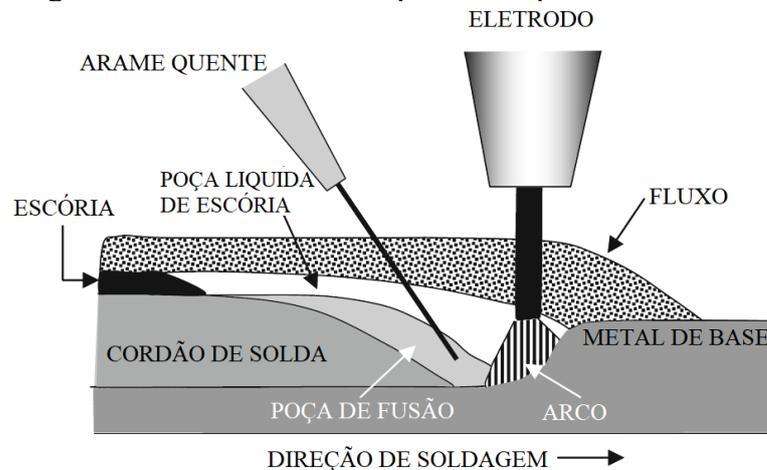
Figura 5 - Técnica *tandem-arc* combinada com adição de arame frio aplicada ao processo SAW



Fonte: Autora (2020)

Uma investigação sobre aumento da taxa de deposição, foi realizada por Tsuyama et al. (2014). Esses autores empregaram a técnica de *hot-wire* conforme, Figura 6, na soldagem de chapas com 16mm de espessura. Os autores impuseram 290A de corrente de soldagem em um arame a frente da poça de fusão e fizeram análises comparativas com o SAW em um único passe e dois passes. A técnica proposta apresentou acréscimo de 90% em sua taxa de deposição quando comparada ao SAW de um único passe. Tsuyama et al. (2014) também relatam a elevação da resistência a tração de 551MPa para o processo SAW em único passe, para 491 e 529 MPa para SAW em dois passes e SAW *hot-wire* respectivamente. Quando comparado o SAW *hot-wire* com SAW em um único passe também pode-se observar a alteração na absorção de energia, através do ensaio de impacto Charpy, de 24J para 36J. Devido ao menor calor imposto na técnica *hot-wire* sendo de 5,7kJ/mm contra 8,9kJ/mm para o processo convencional em um único passe.

Figura 6 - Técnica *hot-wire* aplicada ao processo SAW



Fonte: Adaptado de Tsuyama et al. (2014)

Outra opção para aumento da produtividade é mostrada por Chandel et al. (1997) que com a corrente de 400A e um eletrodo com bitola de 3,2mm obtiveram ganhos de 18,8% na taxa de fusão quando a extensão do eletrodo mudou de 25,4 para 50mm. Os autores mostram que a relação entre a corrente que passa pelo eletrodo e sua extensão é linear, não obstante, na corrente de 400A, os autores observaram que o aumento no *stickout* promoveu um incremento de 23% no reforço, acompanhado de uma leve redução na largura e aumento de 7% na penetração do cordão de solda. Resultados que concordam com os de Chandel et al. (1987), onde também obtiveram maiores taxa de deposição para a soldagem do aço STM A36 com eletrodo de 3,2 mm para a faixa de corrente de soldagem de 300 a 700A e *stickouts* de 10 a 50mm.

Uma outra possibilidade de também aumentar a produtividade é fazer o uso de fitas para o SAW. Essa técnica comumente aplicada ao SAW para operações de revestimento, permite a produção de cordões de solda mais largos, diminuindo a necessidade de número de passes (SCHAEFFER, 2017). Em geral, as fitas variam de 30 a 100mm de largura, segundo o fabricante ESAB (2008) uma fita de 60mm de largura (para esta largura de fita é esperado que o cordão de solda resultante tenha 65mm de largura) pode depositar até 14Kg/h para a densidade de corrente de 25A/mm². Além de possibilitar depositar mais material, aproximadamente cinco vezes mais que a técnica tradicional. O que se destaca na utilização de fita no SAW é a diluição de aproximadamente 18%, número bastante inferior a faixa de 50 a 60% atingido com o SAW convencional. Deste modo, justificasse a utilização de SAW com fita para aplicações de revestimento.

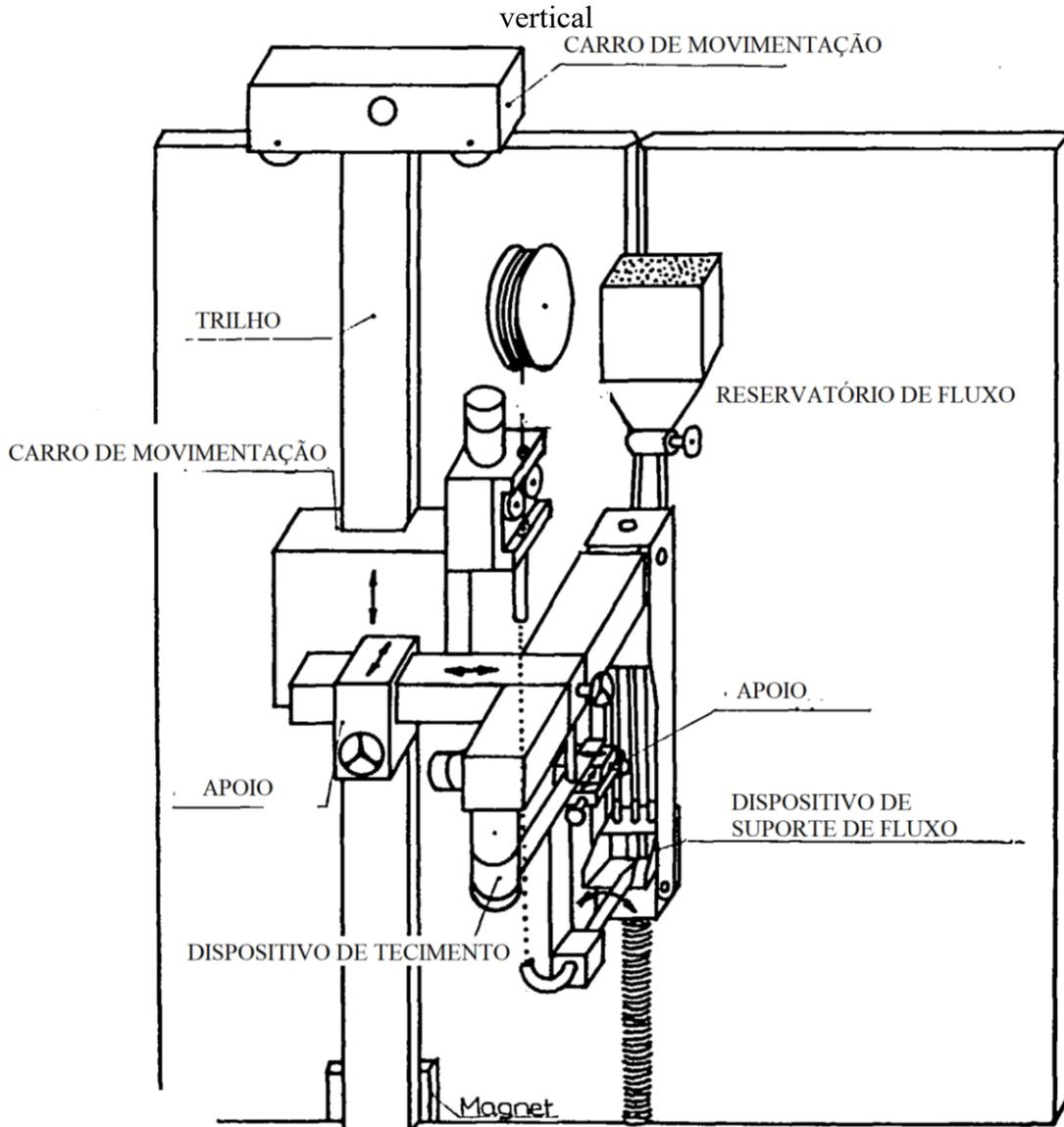
Como visto há possibilidade de encontrar inúmeras técnicas aplicadas à soldagem SAW na literatura, que buscam o aumento da produtividade redução dos custos do processo de soldagem, ou melhorias nas propriedades mecânicas do cordão de solda. Em sua maioria, são técnicas muito bem conhecidas e fundamentadas, entretanto, pouco se encontra sobre a técnica de tecimento em arco submerso.

Foram feitas buscas através das palavras chave: *oscillation*, *oscillation torch*, *weave*, *weaving*, combinadas a palavra-chave *SAW*, sem restrição de ano e país, mas com restrição de língua apenas inglesa. Estas buscas foram realizadas através das bases de dados: SciELO, Elsevier e Scopus. Deste modo, foi possível encontrar na literatura apenas três trabalhos que fazem referência ao emprego do tecimento na soldagem a arco submerso.

O primeiro relato sobre a aplicação dessa técnica data de 1971, com Arold Weisselberg, ao propor um estudo sobre os princípios da soldagem rápida com arco submerso. O autor sugere ter realizado o tecimento a fim de obter maiores velocidades de soldagem, o que pode levar o aumento da produtividade. Contudo, devido ao acesso restrito, a coleta de informações se tornou dificultada, fazendo com que este artigo não componha as referências para deste trabalho.

Em seguida encontra-se outro trabalho de Weisselberg (1989), onde ensaios de soldagem SAW são realizados em juntas em V e X, na posição vertical ascendente em chapas de 8 a 25mm de espessura, conforme a Figura 7. Nestes ensaios o autor empregou arames de 1,6mm de diâmetro, tensão de arco de cerca de 25V, corrente de soldagem variando de 120-200A e, adicionalmente, oscilação do arame. Devido às condições impostas pela posição de soldagem, Weisselberg (1989) relata a necessidade de emprego de uma série de recursos não convencionais à soldagem SAW, como forma de viabilizar o emprego deste processo nesta posição de soldagem. Neste sentido, o autor fez uso de uma sapata, semelhante ao que é utilizado no processo de soldagem eletroescória e a utilização de baixos valores de corrente e tensão de soldagem, fazendo com que a poça de fusão se solidifique rapidamente e então os gases fiquem retidos no cordão de solda. Além disso, Weisselberg (1989) insere gás de proteção CO₂, semelhante ao que ocorre no processo de soldagem eletrogás. Assim, o autor descreve a combinação do fluxo com o gás de proteção como uma solução viável a fim de evitar a formação de porosidades.

Figura 7 - Técnica de tecimento transversal aplicada ao processo SAW em uma soldagem vertical



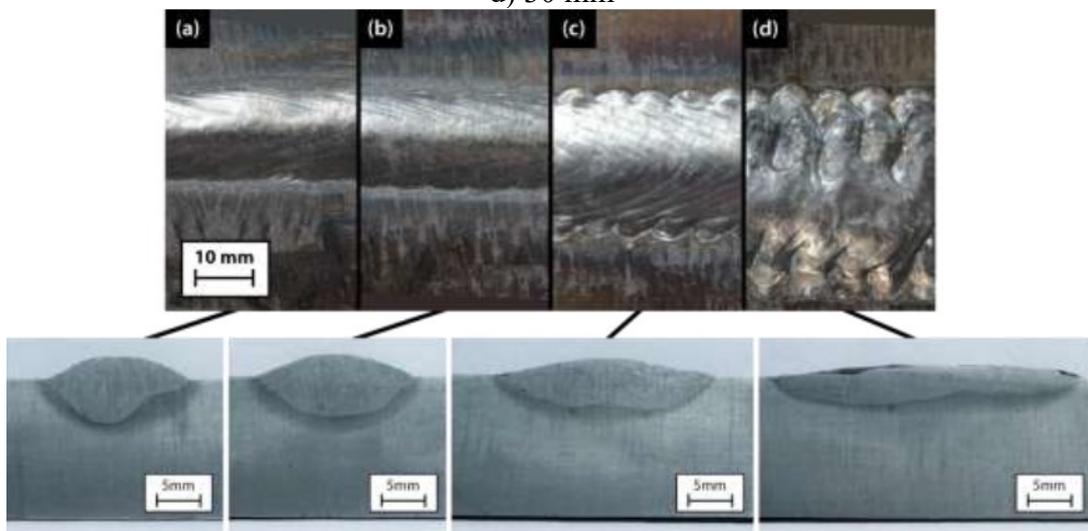
Fonte: Adaptado de Weisselberg (1989)

Conforme pode ser visto, as condições e os meios de aplicação do processo empregado por Weisselberg (1989) são muito particulares, tornando difícil a extrapolação dos seus resultados para as condições de soldagem tipicamente encontradas no processo SAW. Contudo, embora o autor tenha empregado amplitudes de oscilação do arame a partir de 4mm (cerca de 10 vezes menor do que a amplitude almejada com este trabalho), alguns pontos interessantes podem ser extraídos do artigo de Weisselberg (1989). O qual ressalta a importância de configurar de forma adequada as frequências de tecimento, pois esta, sendo muito elevada ou baixa gera a formação de reforço irregular. Outra consideração, diz respeito a necessidade de incrementar a amplitude de movimento a cada passe de soldagem a fim de garantir a deposição

adequada, uma vez que a soldagem ocorreu em chanfros X e V. Weisselberg (1989) relata em seus experimentos que a amplitude inicial foi de 4mm, aumentando a cada passe, e com frequência de 1Hz no centro e 0,5Hz nas laterais. No último passe, as frequências se dão de forma invertida, sendo: 0,5Hz no centro e 1Hz nas laterais justamente para garantir a deposição do metal de adição.

Recentemente, no Laboratório da Tecnologia da Soldagem (LTS), uma pesquisa inicial realizada por Cunha e Ribeiro (2018) avaliou a aplicação do movimento oscilatório no processo SAW. Para isso foram avaliadas as amplitudes de tecimento de 0, 10, 20, e 30mm e as energias de soldagem de 15, 20 e 25 kJ/cm. Em uma análise prévia os autores notam que a amplitude de 30mm se manifesta irregular, para qualquer energia de soldagem empregada, o que é evidenciado pelo excesso de mordeduras e falta de fusão. Na Figura 8 são apresentados os cordões de solda para cada uma das amplitudes de tecimento, obtidos para a energia de 15kJ/cm.

Figura 8 - Superfície e secção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 15 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)

Cunha e Ribeiro (2018) afirmam que resultados esperados como o aumento da largura do cordão, para maiores amplitudes de tecimento sob uma mesma energia de soldagem foram obtidos. Os mesmos, destacam o acréscimo da área fundida quando comparado ao processo sem tecimento. Para o caso com amplitude de 20mm existem relatos de até 78% de ganho na taxa de fusão. Além de aspectos de produtividade, houve a avaliação morfológica dos cordões

de solda. Segundo Cunha e Ribeiro (2018), a partir de 10mm de amplitude de oscilação já é possível obter um novo formato de cordão, totalmente regular e simétrico, com menor penetração.

Quando se estende as buscas na literatura especializada para a língua portuguesa, pode-se encontrar mais um quarto trabalho que executa a técnica de tecimento no SAW. Teichmann (2016), busca uma alternativa semelhante ao SAW com fita, e então executa SAW com tecimento transversal a fim de avaliar a aplicabilidade da técnica como revestimento. O autor realiza SAW com tecimento com fluxo ESAB 429 neutro, na posição plana, e o arame AWS ER NiCrMo-3 com 1,14mm de diâmetro, com tensão de 34V, corrente de soldagem de 111A em polaridade positiva, DBCP de 20mm e amplitude de tecimento de 24mm, em um corpo de prova ABNT 1020 de 6,35mm.

Teichmann (2016), atinge com seu estudo a taxa de diluição de 25%, e amplitude máxima de tecimento de 24mm. O autor acredita que a tensão superficial da poça de fusão seja um limitante para o espalhamento do material, fazendo com que a amplitude de tecimento seja reduzida. E deste modo, Teichmann (2016) conclui que há uma energia mínima de soldagem, para que seja estabelecido um arco estável, que garanta a fusão do fluxo e a fluidez da escória e do metal líquido.

Embora sejam encontrados trabalhos no âmbito do tecimento no SAW, pode-se considerar pouco conteúdo e, dessa forma, a revisão da literatura prosseguiu a fim de melhor compreender o que se deve esperar de um cordão de solda realizado com a técnica de tecimento. Para tanto, foi considerado o processo GMAW, por se tratar de um processo de soldagem também de eletrodo consumível e que apresenta condições mais próximas as que serão executadas posteriormente neste trabalho.

Assim como Weissberg (1989) realizou a soldagem vertical com SAW, Xu et al. (2017) se dedicaram a soldagem vertical ascendente com GMAW. Neste caso com um chanfro estreito, em uma chapa de aço baixo carbono com 25mm de espessura e fazendo uso de um arame de 1,2mm de diâmetro. Seus ensaios ocorreram de forma comparativa entre a aplicação ou não do tecimento, assim como a variação do ângulo da tocha e a frequência do movimento. Tais experimentos permitiram os autores concluir que o processo utilizando multipasses pode apresentar defeitos, uma vez que há a falta de fusão das camadas intermediárias. Xu et al. (2017) sugerem que além da diminuição do formato convexo do cordão, o movimento de oscilação garante maiores penetrações. Seus resultados indicam que o tecimento do arco consegue manter estável a formação da poça de fusão e garante a penetração desejável nas

paredes laterais. Em contraste, quando não há a oscilação da tocha, ocorre o escoamento do metal líquido, resultando num cordão de geometria indesejável. Para os autores tal ponto pode ser justificado através da tensão de interface entre a poça de fusão e as paredes laterais da junta, que diminuem a ação da gravidade uma vez que a oscilação do arco promove maior taxa de fusão nas laterais da junta. Segundo os autores, o principal papel da oscilação é promover a diminuição do tempo que a poça permanece em elevadas temperaturas.

Nesse sentido de melhor compreender a influência da frequência de tecimento sobre o campo de temperatura, Chen et al. (2014) efetuaram ensaios experimentais e numéricos para chapas de aço baixo carbono com espessura de 6mm e metal de adição de 1,2mm de diâmetro. Para isso fixaram a velocidade de soldagem em 1mm/s (6cm/min), a corrente de soldagem em 175A e a tensão em 22V, enquanto a frequência de tecimento foi variada na faixa de 0.25 a 2Hz, e a amplitude de 2 a 8mm, com incrementos de 2mm. Os testes incluíram dois termopares afastados 10 e 20mm da linha central do cordão de solda, permitindo indicar que quanto maior a frequência de tecimento menores são os picos de temperatura, os autores relatam o caso para 2Hz que apresentou um pico de 1.666,15°C contra 1.793,72°C para a frequência de 0,25Hz. Resultado pouco expressivo, uma vez que a frequência de oscilação não representa interferência significativa na densidade de energia.

Chen et al. (2014) acrescentam que os picos de temperatura próximos ao centro da poça de fusão aumentam com a diminuição da amplitude do movimento de tecimento. Para a situação de 2mm foi obtido 1.885,28°C, 123,83°C a mais que na condição de 8mm de amplitude. Os autores explicam que ao manter a frequência de tecimento, e diminuir a amplitude do mesmo, a velocidade linear de soldagem é diminuída. O que por consequência resulta em uma maior densidade de energia fazendo com que o pico de temperatura ocorra.

Coraini et al. (2011) em estudos sobre a influência do tipo de chanfro, e oscilação da tocha na distorção de chapas de alumínio, concluíram que a técnica do tecimento não é uma variável representativa. Estatisticamente, não obtiveram resultados que salientasse a influência dos parâmetros de oscilação de tocha sobre a distorção angular das chapas. Logo, os autores destacam que a aplicação da técnica em processos automáticos, ou semiautomáticos não acarreta em problemas de qualidade dimensional.

Outra análise quanto ao emprego da oscilação da tocha de soldagem, consiste na avaliação de seus efeitos sobre a diluição. Tasalloti e Martikainen (2013) promoveram a soldagem dissimilar de aço inoxidável AISI 304L e aço carbono estrutural S355MC com o processo GMAW, empregando tecimento com frequência de 3Hz e amplitude de 1,5mm.

Segundo os autores, obteve-se o resultado esperado de diminuição de diluição quando aplicada a técnica de tecimento. A aplicação do tecimento acarretou em uma distribuição de dureza com menor variação entre as regiões de metal de base, ZTA e metal de solda, fato justificado por Tasalloti e Martikainen (2013) como resultado de uma possível homogeneidade do cordão de solda com a aplicação do tecimento.

Corroborando com o resultado de menor diluição Siewert et al (1986) também convergem para tal efeito em seus ensaios de soldagem. Os autores destacam que não houve diferença no tamanho da ZTA para os processos de soldagem com e sem tecimento. Para a realização de seus ensaios de soldagem, Siewert et al (1986) aplicaram 4 condições, a saber:

- 1- Soldagem linear através de um mecanismo simples de deslocamento de tocha;
- 2- Soldagem com tecimento com amplitude de 10mm através de um mecanismo simples deslocamento de tocha;
- 3- Soldagem com tecimento com ajuste de oscilação para alcançar as laterais da junta
- 4- Soldagem com tecimento através de um sistema automatizado que faz a leitura da junta a ser soldada baseando-se na diferença de tensão do arco.

Como resultado Siewert et al (1986) afirmam ter obtido acréscimo na resistência a tração de 626 para 686MPa. Enquanto a tenacidade diminuiu de 143 para 110J. Segundo os autores, isto se deve ao aumento do carbono equivalente, que sofre incremento com a elevação da penetração. Contudo, seus estudos salientam que a variação da tenacidade não é significativa. Concluindo que o principal efeito da oscilação do arco se dá sobre a forma da superfície do cordão de solda.

Guzman-Flores et al. (2017) analisaram os formatos do tecimento e aplicaram as trajetórias: linear, triangular, senoidal e circular durante a soldagem do aço ASTM36 com espessura de 9,5mm e eletrodo de 1,2mm. Fundamentando a qualidade de uma junta soldada como a menor largura média de ZTA, raiz sem excesso de material depositado, assim como a uniformidade da face, reforço mínimo, ausência de poros e falta de penetração e fusão, os autores elegeram o cordão de solda resultante do movimento triangular como o de maior qualidade para a condição de 201A de corrente, 27V de tensão e a velocidade de soldagem de 38,5cm/min. Enquanto, para as mesmas condições o cordão de solda obtido do movimento circular apresentou menor qualidade, seguida da solda senoidal e linear.

Quando analisada o comprimento da ZTA, a solda do movimento triangular resultou em 1,42mm de comprimento, já para as condições de oscilação circular, senoidal e linear foram apresentados acréscimos na largura de 14, 24, e 30% respectivamente, em relação ao valor de 1,42mm, resultado explicado pela capacidade de dissipar calor mais rapidamente presente na trajetória triangular. Resultados semelhantes foram obtidos na medição do reforço, sendo o cordão de solda resultante do movimento triangular com melhores características de reforço, com 1,749mm e 2,712mm para a condição senoidal, essa apresentando reforço excessivo. Os autores expõem na análise microestrutural, que as soldagens linear, com padrão de tecimento senoidal e circular apresentaram refino de grão de ferrita colunar e formação de agulhas de ferrita acicular na ZTA. Enquanto a soldagem com tecimento triangular apresentou alongamento de grãos na solda, e na ZTA ocorreu a formação de ferrita de grão grosseiro.

Espera-se que a mudança de fases afete a dureza, logo Guzman-Flores et al. (2017) realizaram ensaios de microdureza para cada cordão de solda realizados nas condições de movimento descritos previamente. E observaram que os cordões de solda com tecimento triangular apresentaram menor microdureza, dessa forma, fizeram um comparativo das soldas resultantes dos outros movimentos com relação a esse. O cordão de solda realizado com movimento circular apresentou maior acréscimo, de 16% no cordão e 14% para a ZTA. Seguido da solda proveniente do movimento linear que apresentou semelhança ao sofrer incremento de 11% e 8% para metal de solda e ZTA respectivamente. Já o cordão de solda o qual utilizou-se a trajetória senoidal apresentou acréscimo na microdureza de 9% para a ZTA e apenas 3% no cordão de solda. Completando a caracterização mecânica os autores ainda se dedicaram a ensaios de tração e impacto. E concluíram que o melhor ganho para a tensão máxima se dá na configuração circular, enquanto para os valores de deformação não existem variâncias significativas entre os processos. Em relação ao ensaio Charpy, as soldas com as trajetórias triangular e circular tem maior capacidade de absorver impacto. Para os autores, com todos esses pontos elencados, é recomendável usar o processo de soldagem com a técnica de tecimento triangular.

3 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO DE DESLOCAMENTO DE TOCHA

Uma vez que não são encontrados no mercado, cabeçotes de soldagem que realizem a movimentação da tocha de soldagem para SAW com a técnica de tecimento. E que cabeçotes de soldagem para MIG/MAG presentes no LTS não atendiam as necessidades deste projeto de pesquisa. Então, optou-se pela construção de um dispositivo de deslocamento de tocha para que além de possibilitar a realização de SAW com tecimento transversal, também possibilitasse a liberdade de escolha de variáveis para outras técnicas como *switch back*, e puxando-empurrando. Outro ponto favorável, é o controle sobre o programa de comando e possível alteração do software conforme as necessidades futuras.

Deste modo, tendo em vista o desenvolvimento de um dispositivo de deslocamento de tocha para o processo SAW com dois graus de liberdade, são apresentados os projetos mecânico, de hardware e software.

3.1 ESCOPO DE PROJETO

Buscou-se desenvolver o conceito do dispositivo de deslocamento de tocha capaz de realizar o movimento de tecimento, para isso foi necessário compreender o que é esperado do produto e quais as soluções que poderiam ser aplicadas. Para que isso aconteça, o primeiro passo foi listar todas as necessidades do projeto, assim como na fase informacional em projeto e desenvolvimento de produtos. Com a inicialização deste ciclo foram levantadas as necessidades do projeto de pesquisa, essas foram transformadas em requisitos de projeto no desenvolvimento do produto, e então criadas metas quantitativas. Na Tabela 1 são apresentadas as necessidades expressas, assim como os requisitos e metas delineadas para este projeto.

Tabela 1 - Escopo de projeto

Necessidades do projeto de pesquisa	Requisitos de projeto	Especificações -metas
Baixo custo	Poucas horas de usinagem	Max 2h
Robustez	Torque nos motores	Min 30kgf
Grandes amplitudes de tecimento	Comprimento efetivo do eixo oscilador	70mm
continua		

Necessidades do projeto de pesquisa	Requisitos de projeto	Especificações -metas
Grandes deslocamentos	Comprimento efetivo do eixo longitudinal	1m
Compacto	Dimensão do módulo oscilados	Max 400x400x400mm
	Dimensão da carcaça do motor e fuso do eixo longitudinal	Max 100x100x1200mm
Rodas ajustáveis	Excentricidade na fixação	4mm
DBCP ajustável	Manípulo	80mm
Capaz de realizar movimento transversal e longitudinal	Modularização	2 formas de fixar o módulo oscilador (eixo y)
Armazenar fluxo	Capacidade do reservatório	3 l

Fonte: Autora (2020)

Como pode-se perceber não houve grande número de exigências quantitativas, porém, ao decorrer do texto serão incluídas algumas premissas qualitativas de projeto que surgiram no decorrer do desenvolvimento do trabalho. Nessa etapa de projeto informacional é usual que se empregue a matriz de qualidade, para que sejam mensuradas as influências e importâncias de cada um dos requisitos, resultando em uma lista de ataque. Com base nessa lista, elenca-se uma sequência a partir do item prioritário e que deve ser atendido primeiramente até aquele que, por alguma hipótese, poderia ser descartado. Contudo, compreende-se que as necessidades exigidas neste caso são independentes entre si e que todas elas podem ser alcançadas, desta forma, optou-se por não realizar essa análise.

Avançando na etapa de projeto conceitual e motivado pela intenção de cumprir cada um dos requisitos foi aplicada a técnica de brainstorming. Com essa estratégia de projeto e desenvolvimento do dispositivo foi possível gerar os princípios de solução para cada função que o equipamento deve apresentar. No entanto, destaca-se que o objetivo desta dissertação não está focado somente no desenvolvimento do produto em questão, mas, utilizando tal ferramenta a fim de permitir a análise dos resultados obtidos com a aplicação da técnica de

tecimento. Desta forma não será explicitado detalhadamente cada princípio de solução, nem mesmo a matriz de decisão, fazendo com que sejam diretamente apresentadas as soluções empregadas já inseridas no contexto do projeto preliminar.

3.2 PROJETO MECÂNICO DO DISPOSITIVO

Nesta etapa objetivou-se a obtenção do projeto CAD do dispositivo de deslocamento de tocha com dois graus de liberdade para compor, posteriormente, a bancada de ensaios de soldagem. Para a melhor compreensão do processo de desenvolvimento, pode-se realizar a divisão do projeto em quatro macro conjuntos, sendo chamadas de: eixo longitudinal, responsável pelo primeiro grau de liberdade, o movimento linear; eixo oscilador (também chamado de módulo oscilador), caracterizando o segundo grau de liberdade, responsável pelo movimento de tecimento; o gabinete, item aonde encontra-se o sistema embarcado do dispositivo; e por fim a base estrutural, responsável pela sustentação de todo o conjunto.

O processo de projeto iniciou com a seleção dos itens de transmissão de movimento tanto para o eixo longitudinal quanto para o oscilador. Preferiu-se pelo uso de motores de passo já que contam com facilidade de uso, operação simples e baixo custo quando comparado às outras opções do mercado. Entretanto, sua escolha se deu principalmente pela precisão de movimento característica associada ao produto, os quais são indicados para o controle de ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronismo. Ainda para o eixo longitudinal selecionou-se um fuso de esfera recirculante, por apresentar menor desgaste, temperatura de operação, além do menor ruído. Cabe salientar que fusos de esferas recirculantes também são dispositivos desenvolvidos para situações de alta precisão e que o sistema recirculante faz com que o torque exigido seja reduzido em até três vezes quando comparado ao fuso simples, justificando assim seu uso. Enquanto para o eixo oscilador por motivos de restrição de posição e fixação, elegeu-se um sistema de pinhão cremalheira, sabendo que não haveria problemas provenientes da vibração uma vez que o deslocamento pode ser considerado pequeno. A Tabela 2 resume os itens escolhidos para o projeto.

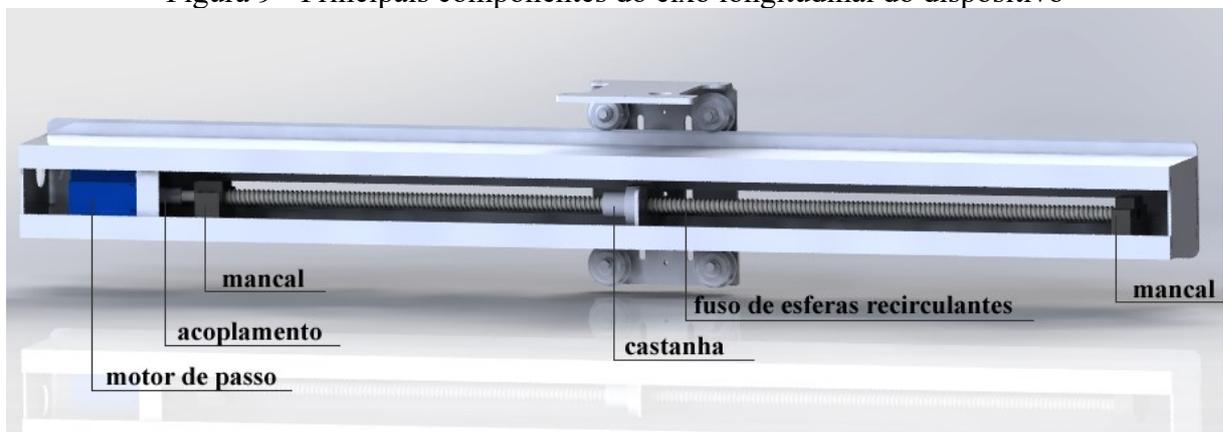
Tabela 2 - Componentes do conjunto de transmissão de movimento

Conjunto de transmissão	
	1 Motor de Passo NEMA 23
Eixo longitudinal	1 Fuso De Esferas Recirculantes
	1 Par de mancais
	1 Acoplamento
Eixo oscilador	1 Motor de Passo NEMA 23
	1 Engrenagem
	1 Cremalheira
	4 Suportes para eixo/guia linear
	4 <i>Pillow Block</i> em alumínio
	2 Eixos Lineares

Fonte: Autora (2020)

Durante o desenvolvimento do conjunto eixo longitudinal avaliou-se que para alcançar a premissa de um equipamento compacto, seria construída uma base que se adequasse as dimensões máximas dos mancais, motor e do fuso. Dessa forma propôs-se o uso de dois perfis U para a parte inferior e superior. Para as laterais, foram desenhadas chapas que possuem a funcionalidade de trilhos. As chapas trilho foram projetadas com furos oblongos para garantir os ajustes necessários durante a montagem das mesmas nos perfis U com parafusos telleps. Na Figura 9 é exposta a disposição dos principais componentes do conjunto eixo longitudinal.

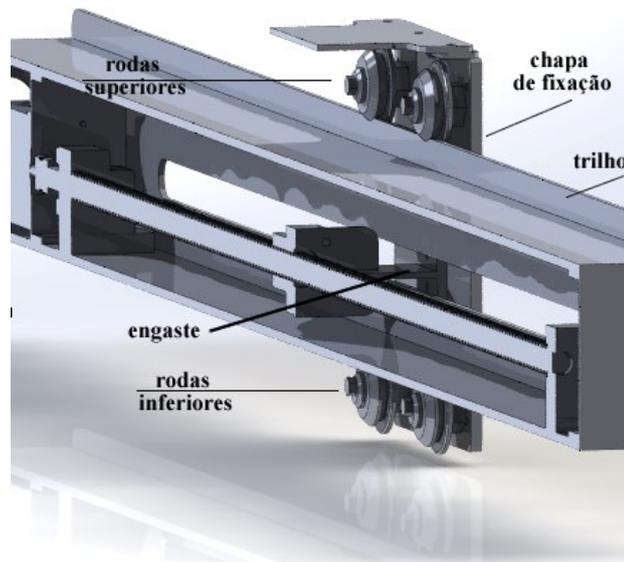
Figura 9 - Principais componentes do eixo longitudinal do dispositivo



Fonte: Autora (2020)

Na sequência partiu-se para o desenvolvimento das rodas, as quais fazem parte do sistema de acoplamento do carrinho com o trilho. O sistema de acoplamento conta com três itens, o primeiro deles é uma chapa de fixação para rodas, engaste e cubo oscilador, o segundo é o conjunto de rodas e, por fim, o último item é um engaste entre chapa de fixação e castanha do fuso de esferas recirculantes (Figura 10). O principal requisito desse sistema é garantir que o carro de movimentação possa acoplar ao trilho de forma simples, rápida e sem intervenções de montagem e desmontagem. Então para que essa premissa seja executada, a estratégia adotada prevê que o sistema de acoplamento seja ajustável.

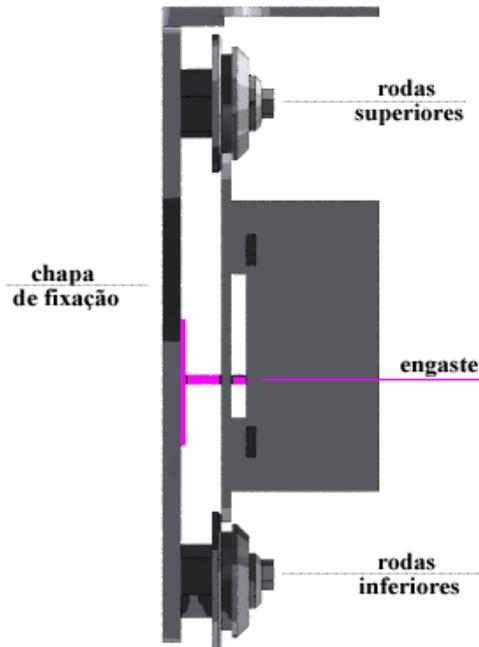
Figura 10 - Componentes do sistema de acoplamento



Fonte: Autora (2020)

Para tanto, o conjunto de rodas (composto por duas rodas superiores e duas inferiores, podendo trabalhar com apenas uma inferior) realizou tal tarefa. Então, conceitualmente o conjunto superior deve primeiramente ser encaixado sobre trilho superior, em seguida o engaste é acoplado a castanha e o conjunto inferior de rodas passa livremente por debaixo do trilho inferior, conforme pode ser observado na Figura 11.

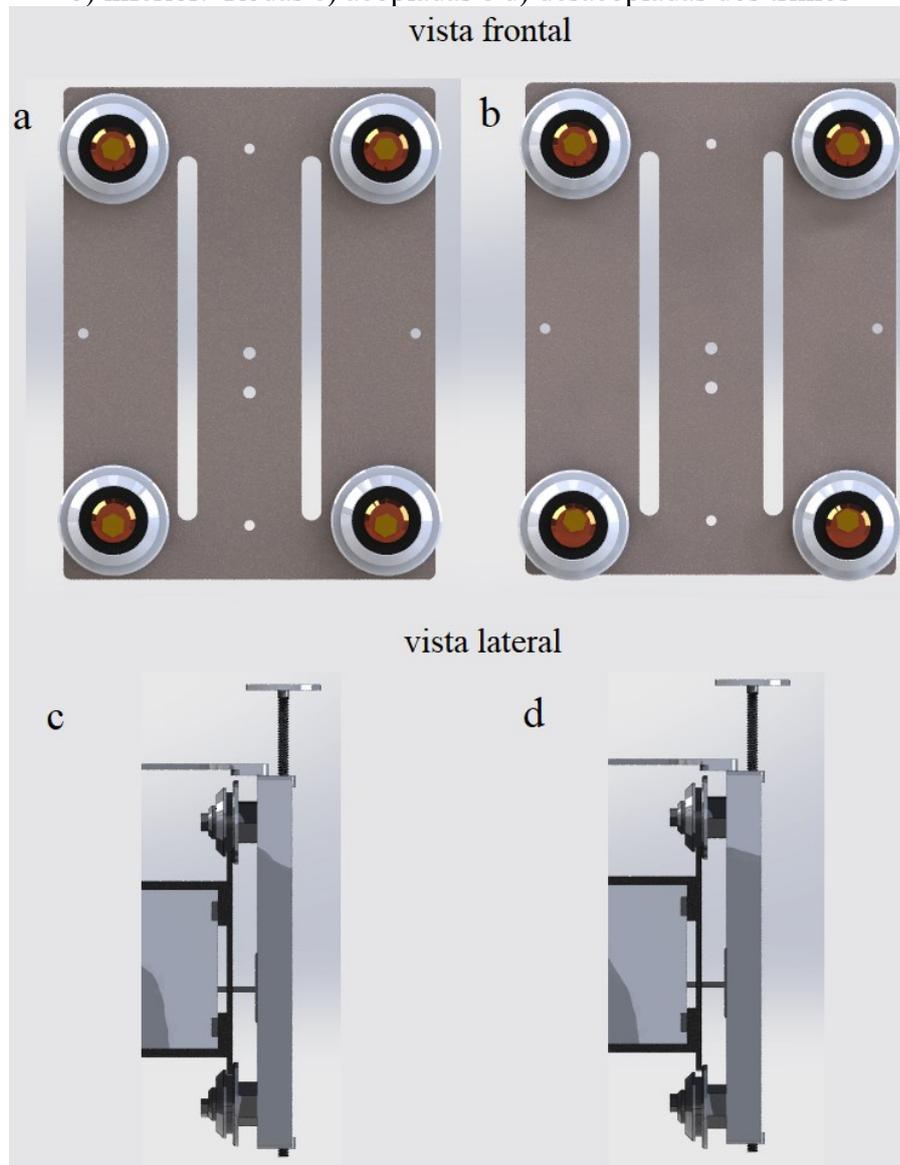
Figura 11 - Procedimento de encaixe do sistema de acoplamento



Fonte: Autora (2020)

Para que isso seja possível, relata-se a obrigatoriedade de regulagem de deslocamento das rodas inferiores (Figura 12). Optou-se por aplicar uma excentricidade no projeto das mesmas, conseqüentemente, ao mover o ponto de fixação em 4mm do centro, obteve-se um curso de deslocamento de 8mm, dimensão necessária para passar livremente a roda sem tocar nos trilhos. Posteriormente, encaixando o conjunto superior de rodas e o engaste é possível utilizar uma chave movimentando a roda inferior de sua posição desacoplada, até o instante em que ela acople ao trilho, e com o auxílio de um parafuso fixar a roda em sua posição de operação.

Figura 12 - Esquema de ajuste de rodas. Rodas posicionadas no limite de ajuste a) superior e b) inferior. Rodas c) acopladas e d) desacopladas dos trilhos

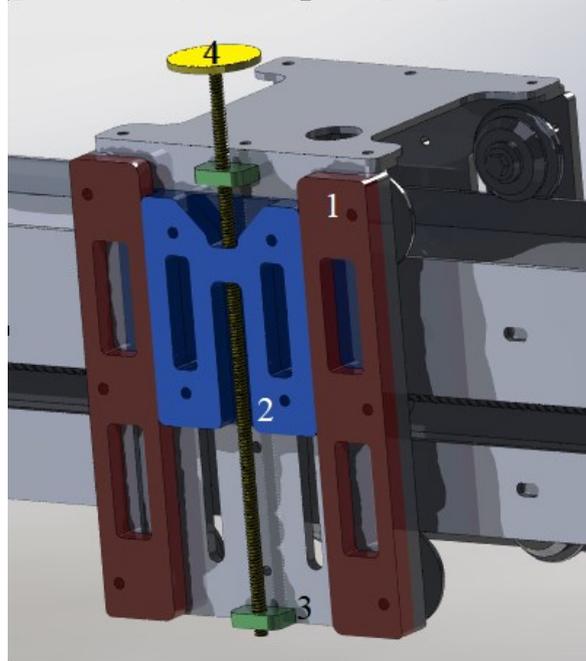


Fonte: Autora (2020)

Previendo que o usuário precisará fazer a regulação do DBCP antes de realizar a soldagem, foi adicionado um sistema de manípulo na parte frontal do carro de movimentação (Figura 13). A fim de implementar uma solução mais simples e de baixo custo, mas que atendesse às necessidades da pesquisa, elaborou-se um sistema de escorregamento de chapa sobre chapa, que podem ser controladas por uma barra roscada. Como pode ser visto na Figura 13, as barras laterais destacadas pela cor vermelha (1) atuam como guias fixas, para que o conjunto móvel em azul (2) deslize entre as mesmas. O controle do movimento se dá por uma

barra roscada M6 em amarelo (4), tendo essa o movimento limitado por batentes em verde (3). Dessa forma, é possível alterar a altura da tocha em até 80mm.

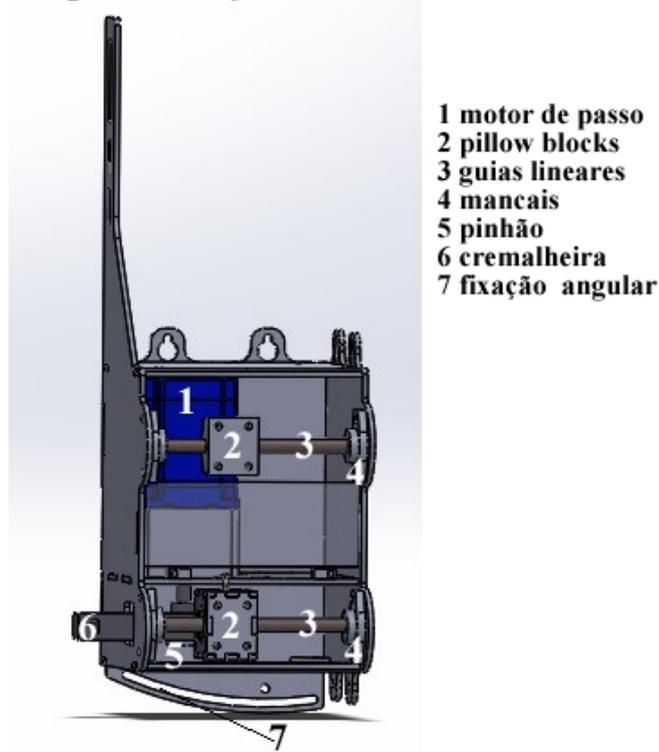
Figura 13 - Dispositivo para regulagem de DBCP



Fonte: Autora (2020)

Outro ponto de destaque para o projeto do dispositivo, visando a construção com o menor custo possível, é a não utilização de usinagem em nenhum item além das rodas. Sob esse mesmo critério de custo, em determinadas situações evitou-se contratar serviços de dobramento, ao planejar encaixes das peças através do corte e posterior soldagem em lugares estratégicos, tal técnica fica evidente no projeto do módulo oscilador. Para este conjunto de peças também houve a preocupação com as dimensões máximas, no caso obteve-se 140x180x120mm. Medida capaz de comportar o motor (1) e parte da cremalheira, pois entende-se que não há prejuízo de funcionamento com parte dessa exposta, ao ser projetada para fora pelo recorte apresentado (6), conforme é apresentado na Figura 14 .

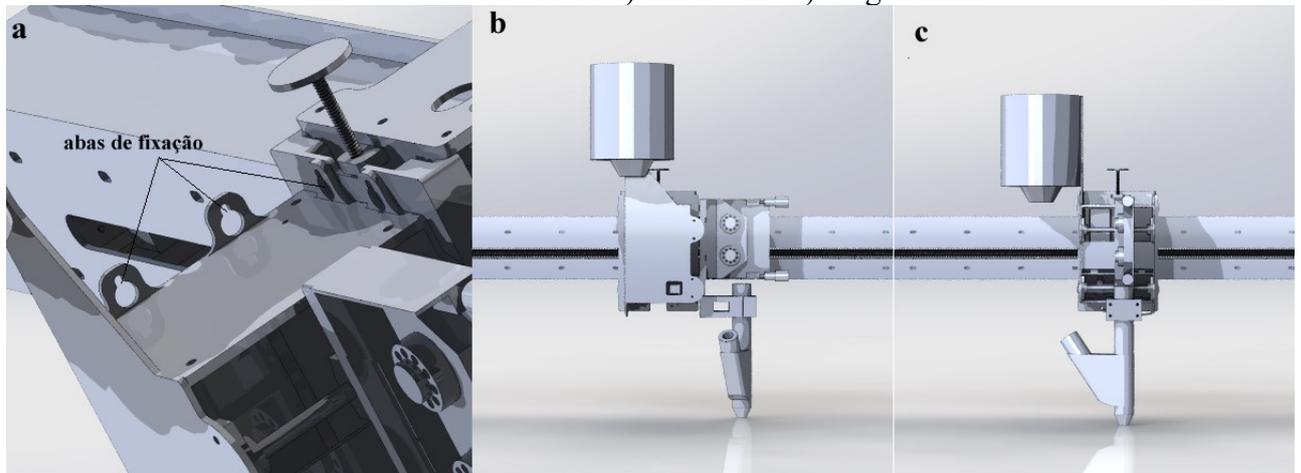
Figura 14 - Projeto CAD do módulo oscilador



Fonte: Autora (2020)

Partindo da premissa de que o eixo oscilador deve ser capaz de realizar movimentos longitudinais e transversais, optou-se pelo uso de um motor de passo (1), conforme Figura 14 A. O motor está acoplado por um conjunto de pinhão/cremalheira ao *pillow block* inferior. Para seu funcionamento fez-se uso de um conjunto de mancais (4), eixos lineares (3) e *pillow blocks* (2) apresentados na Figura 14. Então, para atingir tal requisito de oscilação transversal e longitudinal, o eixo oscilador foi projetado como um módulo. Esse módulo possibilita ser encaixado e desencaixado em posições diferentes, conforme mostrada na Figura 15, isso só é possível tendo em vista que o módulo oscilador possui dois pontos superiores de fixação, conforme destacado na Figura 15a.

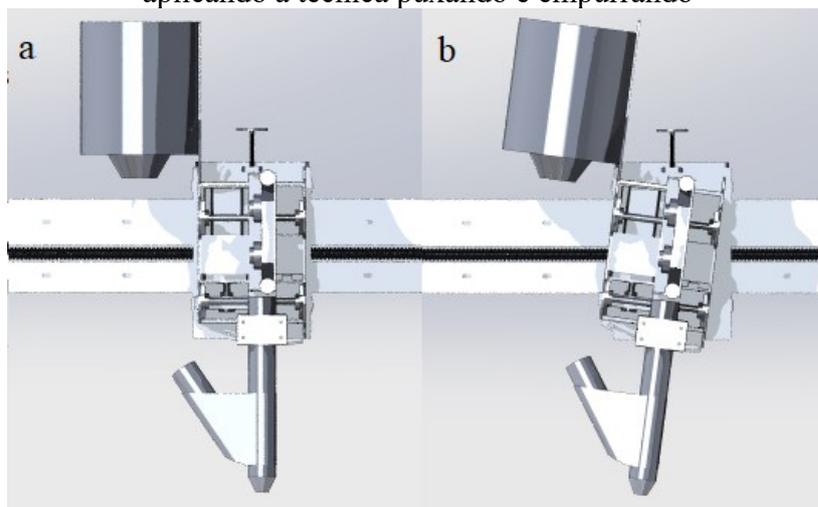
Figura 15 - Posicionamentos do módulo oscilador através de a) abas de fixação para soldagem com a técnica de tecimento b) transversal c) longitudinal



Fonte: Autora (2020)

Tendo em vista completar a modularização deste item, foi adicionado um terceiro modo de fixação no módulo oscilador, conforme mostrado no item 7 da Figura 14. Então, através de um furo oblongo curvado inserido na base do módulo é possível atribuir diferentes ângulo de ataque a tocha de soldagem. Assim sendo, o eixo oscilador permite realizar soldagens na posição convencional, com a tocha perpendicular ao metal de base (Figura 16a) e também realizar soldagens através da técnica puxando e empurrando (Figura 16b).

Figura 16 - Posicionamentos do módulo oscilador para soldagem a) convencional b) aplicando a técnica puxando e empurrando

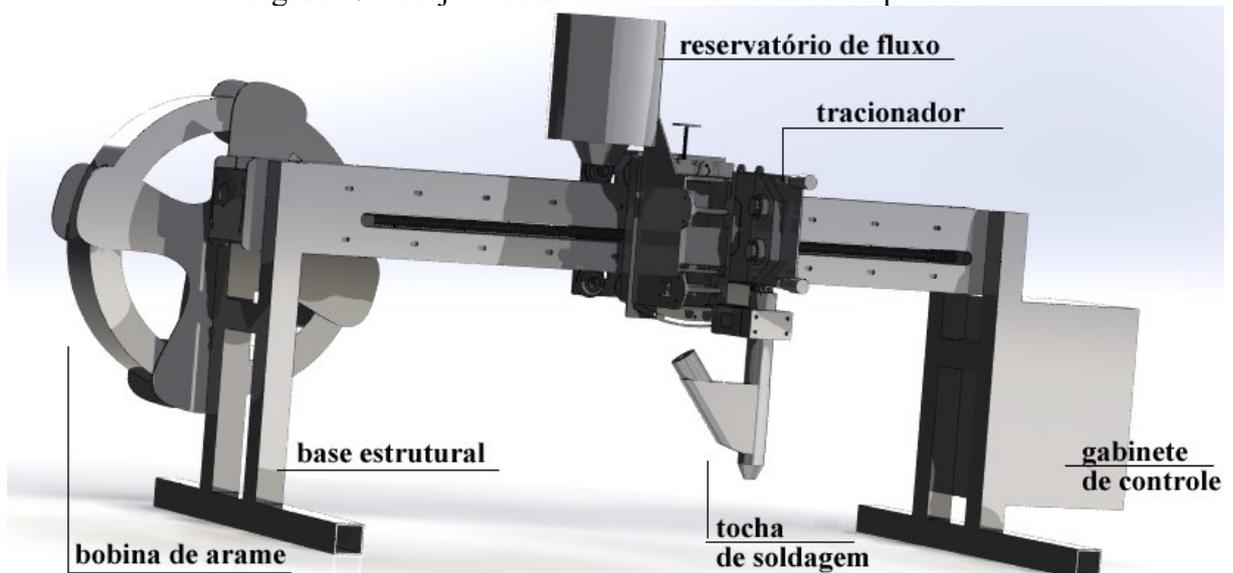


Fonte: Autora (2020)

Solidário ao módulo oscilador encontra-se o reservatório de fluxo, mostrado na Figura 17. Isto se deve a necessidade do comprimento da mangueira, que conecta o reservatório à tocha, não ser alterada independente da regulagem de altura ou inclinação da tocha, nem tampouco em função do movimento de tecimento.

Prosseguindo com o projeto CAD, buscou-se soluções para a estrutura da base que fosse capaz de suportar o que fora desenvolvido anteriormente (Figura 17). As medidas da mesma foram dimensionadas combinando a largura total da mesa de soldagem, do dispositivo, e a altura necessária para a fixação da tocha há uma distância de 100mm da bancada. A base conta com um suporte isolado eletricamente para a bobina de arame, e fixo à base também se encontra o gabinete no qual comporta todo o sistema de controle (*hardware e software*).

Figura 17 - Projeto CAD da base estrutural do dispositivo



Fonte: Autora (2020)

Decorrente das etapas anteriores é possível obter o projeto CAD finalizado. Por fim, com o projeto CAD concluído, foi possível realizar a montagem do dispositivo conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Dispositivo de deslocamento de tocha posicionado para soldagem com tecimento transversal

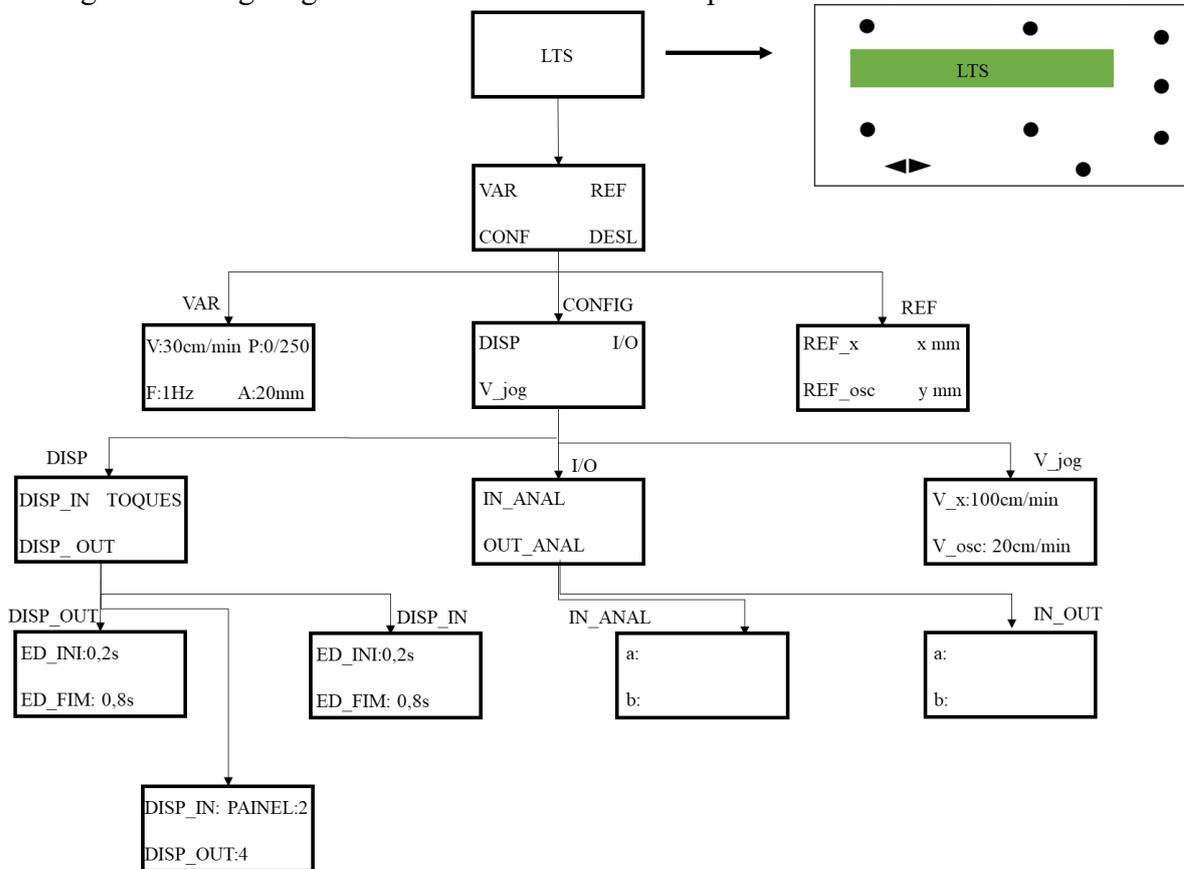


Fonte: Autora (2020)

3.3 HARDWARE DO DISPOSITIVO

Visando a obtenção do sistema de *hardware* para o acionamento do dispositivo, se fez necessário o desenvolvimento da concepção inicial do princípio de funcionamento do sistema de controle. Esta concepção rege os conceitos elementares tanto do sistema de *hardware* quanto *software*, pois o mesmo prevê todas as funções que são requeridas para a execução do projeto. Estabeleceu-se uma interface homem-máquina dotada de um visor LCD de 16 colunas x 2 linhas, onde são apresentados os menus para configuração, conforme exposto na Figura 19. Dessa forma, toda a lógica de programação para a construção dos menus, assim como todos os seus botões e funções, somados ao organograma apresentado é de suma importância para que sejam delineadas as funções esperadas para o dispositivo. A seleção das variáveis expostas nos menus é realizada através de chaves presentes no painel de controle do dispositivo. Durante o processo de posicionamento e escolhas das chaves foi analisado a melhor forma a fim de facilitar a interação do usuário com o equipamento e respeitando as questões ergonômicas.

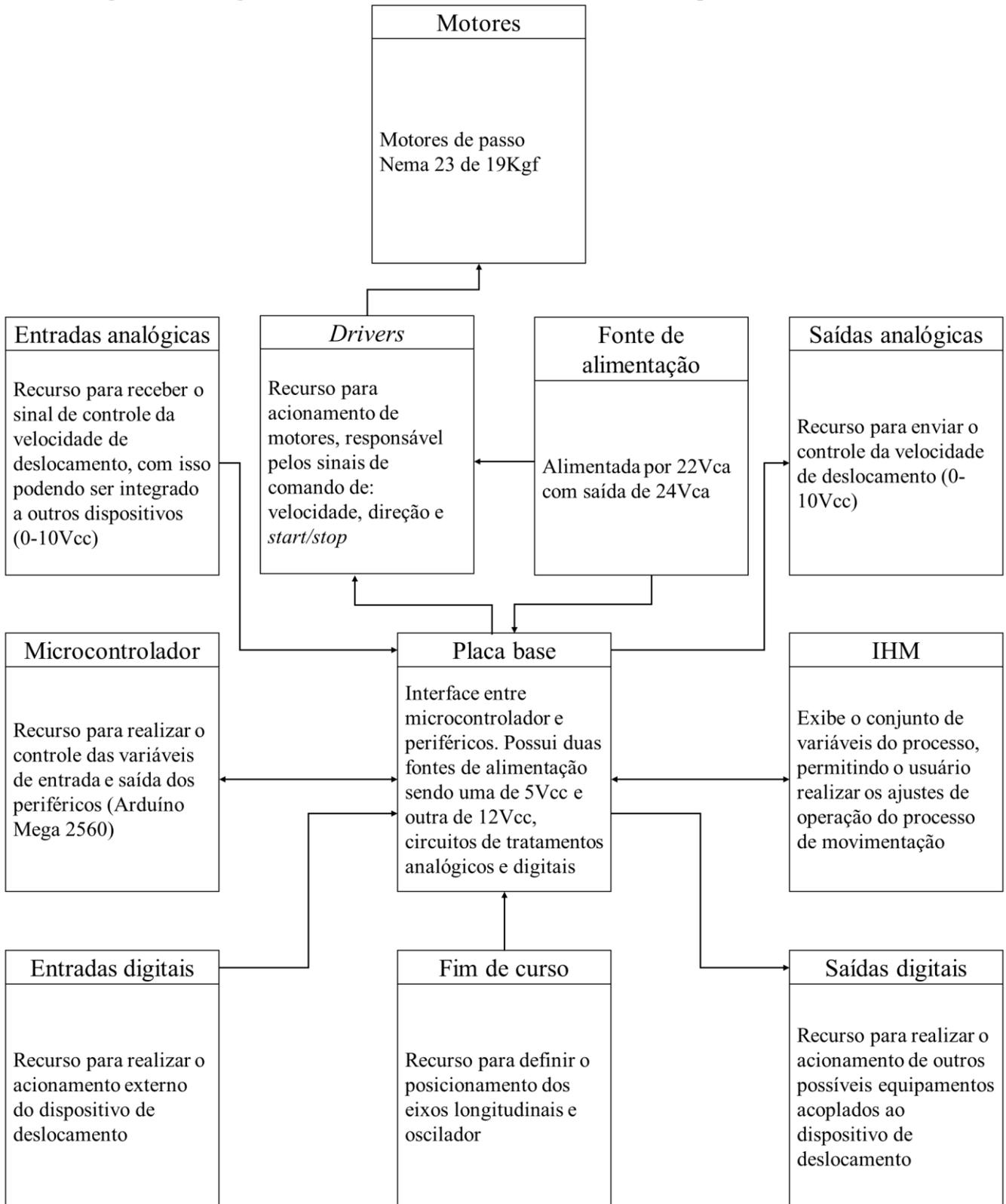
Figura 19 - Organograma de funcionamento do dispositivo de deslocamento de tocha



Fonte: Autora (2020)

As entradas analógicas presentes no dispositivo visam um controle externo de velocidade de deslocamento do dispositivo no eixo longitudinal, sendo esse circuito de entrada, operante na faixa de 0 a 10Vcc. Com o intuito de monitorar a velocidade de deslocamento do dispositivo ao longo do eixo longitudinal, há também uma saída analógica, atuante na mesma faixa de tensão de 0 a 10Vcc. Além das entradas e saídas analógicas, o dispositivo possui também entradas e saídas digitais, visando a possibilidade de o equipamento realizar a comunicação com outros equipamentos externos. Afim de executar o referenciamento inicial e proteções contra choques mecânicos, o sistema de *hardware* controla 4 chaves fim de curso acopladas ao dispositivo, sendo duas no eixo longitudinal e as outras duas no eixo oscilador. Com relação ao sistema de motorização, foram selecionados dois motores de passo os quais são controlados por drivers individuais, dessa forma cada driver tem seu acionamento realizado por sinais digitais. A Figura 20 representa através de um diagrama de blocos o princípio de funcionamento do sistema de hardware do dispositivo.

Figura 20 - Diagrama de blocos do sistema de *hardware* do dispositivo de deslocamento



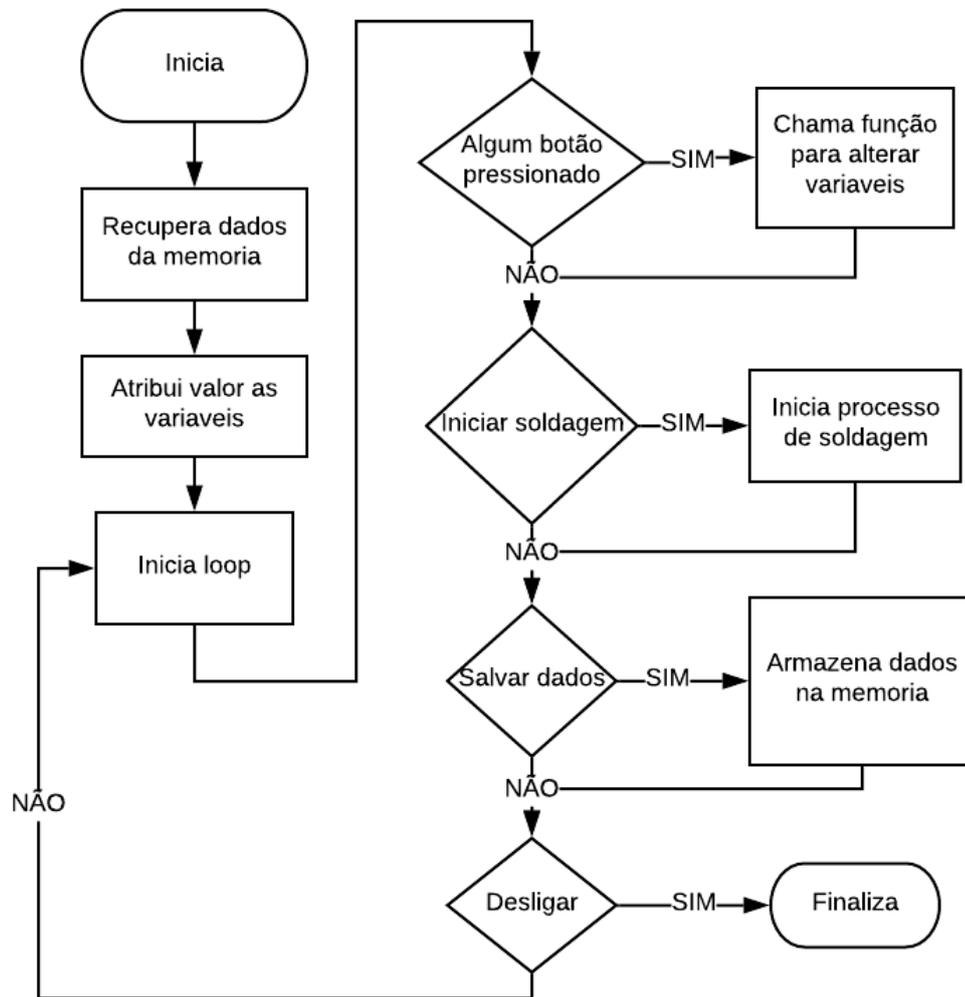
Fonte: Autora (2020)

3.4 SOFTWARE DE CONTROLE

O desenvolvimento do *software* neste projeto teve como principal objetivo tornar possível o controle e operação dos motores para a realização do deslocamento durante a soldagem. Para isso, o programa possibilita ao usuário alterar velocidade linear de soldagem, fazer o referenciamento de posição, além de poder ser definido previamente o comprimento do cordão de solda a ser realizado. Obviamente, além desses recursos o usuário pode escolher entre realizar ou não o tecimento, caso o usuário opte pelo movimento de oscilação transversal da tocha, o programa permite definir a frequência e a amplitude de tecimento. Todas essas funções permanecem disponíveis a todo instante, a fim de realizar a variação de parâmetros durante a execução do processo de soldagem.

A estrutura de linhas de código fora definida de modo que o mesmo inicia com a recuperação dos dados, caso tenha sido salvo algum valor para as variáveis na última utilização do equipamento. Caso contrário, se nenhum novo valor foi salvo, as variáveis inicializam com um valor pré-definido *default* do *software*. Inicializado o programa, posteriormente pode ser realizada a configuração dos parâmetros de deslocamento. Feito isso, o programa entra na rotina principal. Primeiro é verificado se algum botão foi pressionado e, na sequência, analisa se o processo de soldagem foi iniciado ou não. Na sequência, ocorre a verificação se é necessário salvar ou não os dados na memória e, por fim, verifica o comando desligar. Em caso negativo, a rotina é mantida até que o dispositivo seja desligado. A representação gráfica de tal processo encontra-se na Figura 21.

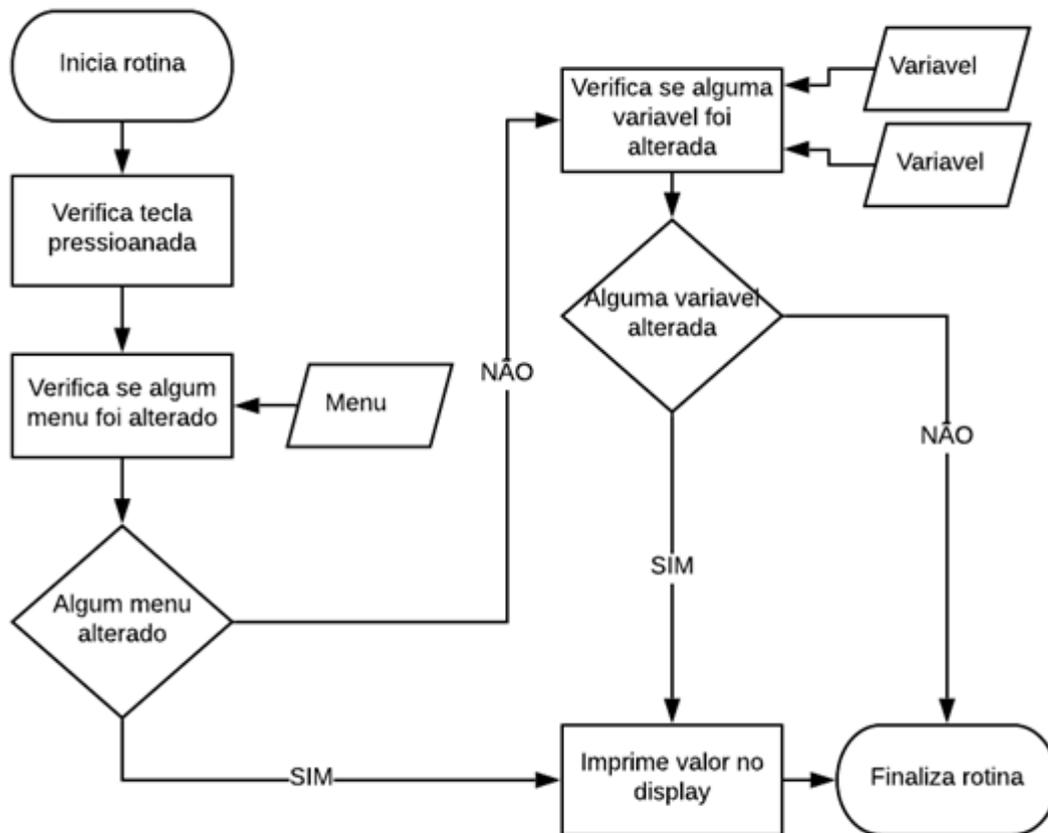
Figura 21 - Rotina principal do programa de controle do dispositivo



Fonte: Rode et al (2019)

Caso alguma tecla seja pressionada, são chamadas duas funções: uma para fazer a seleção e alteração das variáveis, e outra para a impressão no *display*. Projetado para otimizar o uso do dispositivo, foi adotado um sistema de camadas para fazer a navegação pela IHM, utilizando estas duas funções. Deste modo, sempre que houver a alteração do valor de alguma variável pode-se realizar a impressão no *display*. De forma semelhante, as variáveis também foram projetadas para serem divididas basicamente em dois tipos. Existem aquelas variáveis que armazenam os valores utilizados como parâmetros e as variáveis que armazenam os endereços de camada. Os endereços de cada uma das camadas definem qual menu será apresentado na tela. A ordem de execução é apresentada no fluxograma da Figura 22.

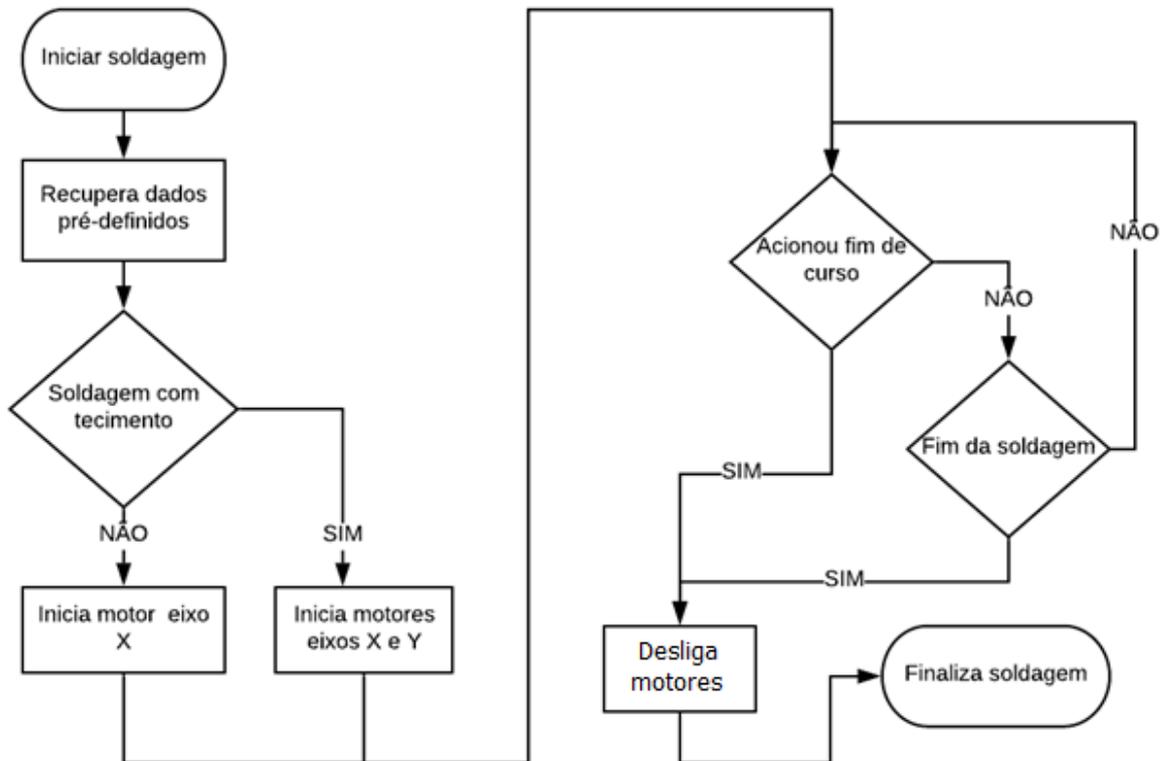
Figura 22 - Fluxograma de funcionamento para acesso a menus e variáveis



Fonte: Rode et al (2019)

Ao fim do processo de configuração de variáveis pelo usuário, pode-se iniciar o processo de soldagem. Ao pressionar o botão de início de soldagem, ocorre a verificação da técnica de soldagem: com tecimento ou sem tecimento. Ao longo de toda a execução da soldagem é realizada a verificação das chaves fim de curso por questões de segurança (Figura 23). Além disso, o dispositivo conta também com mais uma medida de segurança pré-estabelecida via programação. Esta diz respeito à implementação de distâncias limites, as quais impedem o usuário de configurar deslocamentos lineares maiores do que o estabelecido. O mesmo foi empregado para o eixo oscilador, restringindo a amplitude de oscilação configurada pelo operador do equipamento em até 40 mm. Este sistema em redundância se faz presente para que caso ocorra falhas elétricas ou mecânicas durante o processo de soldagem, tanto os motores quanto os outros componentes do dispositivo estejam protegidos.

Figura 23 - Fluxograma de acionamento dos motores



Fonte: Rode et al (2019)

A fim de executar o referenciamento dos eixos linear e oscilador, outras duas funções de grande importância foram implementadas no programa. Este procedimento se faz necessário para que haja a realização da calibração dos motores evitando assim, que os mesmos ultrapassem os limites de curso impostos. As funções de referenciamento atuam de forma diferente para cada um dos eixos em questão. Para o eixo linear, o motor é acionado e movimenta-se até atingir uma chave fim de curso, alcançando tal limite o programa identifica aquele ponto como o ponto referencial inicial. Semelhantemente, inicia-se o processo para o eixo oscilador, porém quando ocorre o acionamento da chave de fim de curso, o motor continua a movimentação até se posicionar ao centro do eixo. Esta diferença se dá justamente para permitir o movimento oscilatório durante o processo de soldagem.

4 METODOLOGIA

Vislumbrando a aplicação da técnica de tecimento transversal ao processo de SAW e posterior análise dos cordões de solda é apresentada a metodologia aplicada a este trabalho.

4.1 METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO DE DESLOCAMENTO DE TOCHA

Foram elencados uma série de ensaios com o intuito de avaliar e identificar possíveis elementos de correção para garantir o funcionamento adequado do dispositivo. Entre os ensaios executados encontram-se:

- ensaio de deslocamento linear;
- ensaio de velocidade de soldagem;
- ensaio de deriva de curso e
- ensaio amplitude de oscilação e frequência de oscilação.

Os ensaios de equipamento iniciaram com o acoplamento de uma caneta de ponta extrafina na tocha de soldagem. Abaixo da tocha, fixado a mesa encontrava-se um papel milimetrado em que a caneta delineava a trajetória executada. A partir desse momento se fez possível realizar as medições necessárias com o auxílio de um paquímetro. O primeiro teste realizado contemplou a avaliação do deslocamento linear (eixo longitudinal), para tanto foram definidas diferentes distâncias compreendidas entre os limites de operação do fuso de esferas recirculantes e, então, conferidas com um paquímetro.

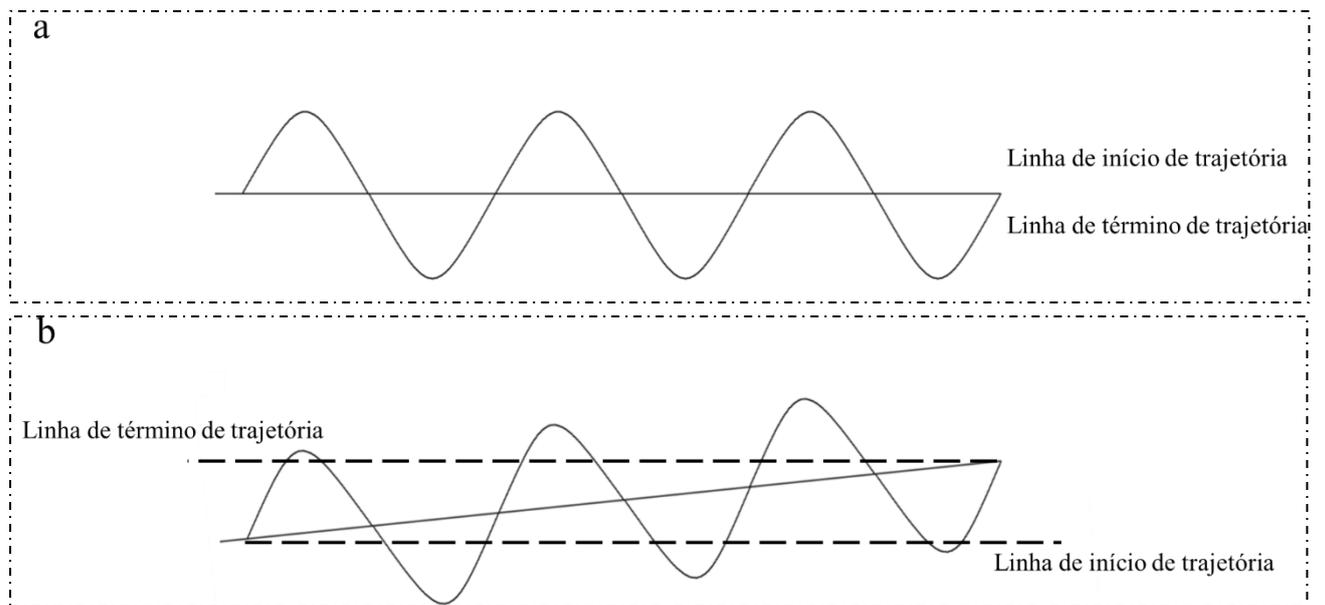
Na sequência, ainda na validação do deslocamento linear, realizou-se a verificação da velocidade de soldagem para o eixo longitudinal. Para tal teste, o usuário informou o comprimento a ser deslocado e em qual velocidade o procedimento deveria ocorrer, nesta etapa também se fez uso de um cronometro. Enquanto ocorria a movimentação, o operador com um cronometro em mãos realizava a aquisição do tempo total do percurso. Então, sabendo que a velocidade pode ser descrita como a razão entre o deslocamento e o tempo percorrido, calculou-se a velocidade real para cada um dos ensaios e a incerteza associada ao processo.

Para a avaliação completa do dispositivo de deslocamento, a segunda etapa consistiu na validação do módulo oscilador, através dos ensaios de amplitude de oscilação, frequência de oscilação e deriva de movimento. O teste de deriva tem por finalidade assegurar que, ao realizar

o tecimento, o motor do eixo oscilador não sofra escorregamento durante o movimento e, assim, termine de realizar o movimento com um deslocamento indesejado.

Para tal, o teste foi realizado traçando uma linha horizontal delineando o início da trajetória, e em seguida realizado o movimento oscilador sobre a mesma. Ao final do movimento de tecimento é desejável que o ponto de início do movimento (central) esteja sobre a linha previamente desenhada, assim como o ponto final (também central), conforme visto em Figura 24a. Caso ocorra algum tipo de escorregamento durante o movimento, as linhas das trajetórias inicial e final não serão coincidentes, fazendo com que o movimento se torne inclinado em relação ao eixo horizontal (Figura 24b), este ângulo é conhecido como ângulo de deriva. Cabe ressaltar que o ângulo de deriva não afeta a amplitude de movimento, ou seja, a amplitude se mantém constante e há apenas a inclinação da trajetória. Destaca-se, também, que não foram presenciados estes problemas neste dispositivo de deslocamento.

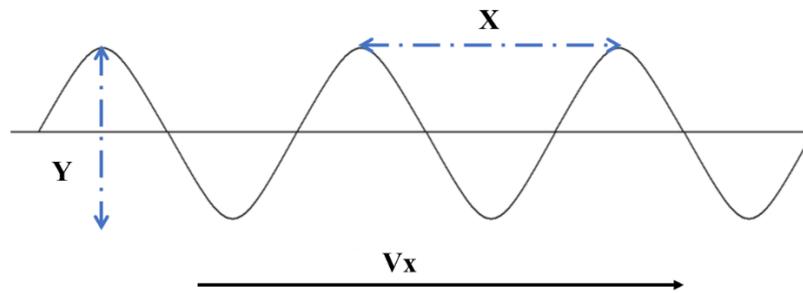
Figura 24 - Trajetórias do movimento a) sem deriva b) ângulo com deriva



Fonte: Autora (2020)

No processo de avaliação da amplitude de oscilação, representada por Y na Figura 25, foram realizados ensaios para os valores de 5 até 40mm de movimentação, com incrementos de 5mm, conforme a faixa de operação para o eixo do módulo oscilador. Todos eles foram medidos com o auxílio de um paquímetro e então conferidas as variações associados ao processo.

Figura 25 - Trajetória do movimento de tecimento



Fonte: Autora (2020)

Finalizando a avaliação do conjunto de tecimento, aferiu-se a frequência do movimento de oscilação. Para a realização deste teste foi necessário configurar no gabinete de controle informações de velocidade de soldagem, amplitude e frequência de tecimento. Durante a verificação da frequência medida foi necessário coletar as distâncias entre dois picos do movimento, representadas na Figura 25 como a distância X. Através dessa medida foi possível fazer uma correlação com a velocidade de soldagem (cabe salientar que este procedimento de conferência de dados só pôde acontecer uma vez que a velocidade de soldagem já se fazia calibrada), e o período de tempo T conforme a Equação 1. Sabendo que a frequência é o inverso do período, pode-se substituir T por $1/f$ (Equação 2) e, por fim, isolando-se f, obtém-se a frequência de tecimento em função de (Equação 3).

$$x = V_s T \quad (1)$$

$$x = \frac{V_s}{f} \quad (2)$$

$$f = \frac{V_s}{x} \quad (3)$$

Segundo o Inmetro (2008) a incerteza de medição tipo B, aplicada a este trabalho, pode ser calculada sem a presença de análise estatística, baseando-se apenas nas incertezas descritas pelo fabricante. Deste modo, para o cálculo de incertezas, considerou-se que um paquímetro nonio de resolução de 0,1mm, com incerteza de 0,05mm (μp). Enquanto a incerteza associada ao traço da caneta é espessura de sua própria ponta de 0,6mm (μc). A incerteza do acionamento do cronometro pelo operador foi estimado em 0,1s (μc).

Então, para o cálculo da incerteza associada a medidas independentes, como no caso da leitura de deslocamento e amplitude de tecimento, basicamente pode ser descrito com a Equação (4). Onde ocorre o somatório dos quadrados de cada incerteza, a raiz quadrada deste

resultado, nos retorna a incerteza total do item verificado. Diferentemente, para as medidas que são regidas por uma fórmula matemática, como a velocidade linear de soldagem e a frequência de tecimento, é necessário realizar o equacionamento de propagação de incertezas, conforme Equação (5). Deste modo é realizada a derivada parcial em função de cada uma das variáveis substituir pelas medidas coletadas, e então combinadas com as incertezas oferecidas pelos fabricantes.

$$\mu_t = \sqrt{\sum_1^n \mu_1^2 + \mu_2^2 + \dots + \mu_n^2} \quad (4)$$

$$\mu_t = \sqrt{\sum_1^n \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \mu^2(x_n)} \quad (5)$$

Posteriormente, os resultados das medições serão apresentados conforme norma, onde são apresentadas a média e a incerteza de medição. Ressalta-se que foram realizadas 3 medidas de cada variável e então representado conforme Equação 6.

$$\text{Valor medido} = \sigma \pm \mu_t \quad (6)$$

4.2 BANCADA DE ENSAIOS

A bancada de ensaios é mostrada na Figura 26. A mesma é composta pelo dispositivo de deslocamento de tocha desenvolvido (3), uma fonte de soldagem multiprocessos, modelo DigiPLUS A7 (1) e acoplada paralelamente a ela uma fonte modelo Digitec 450 (2), com o intuito de alcançar valores de corrente de até 900A. A bancada também conta com um sistema de aquisição de dados SAP V4 (5), o qual é capaz de registrar os valores de tensão e corrente de soldagem, além da velocidade de arame durante o processo.

Figura 26 - Bancada de ensaios para a realização dos ensaios de soldagem



Fonte: Autora (2020)

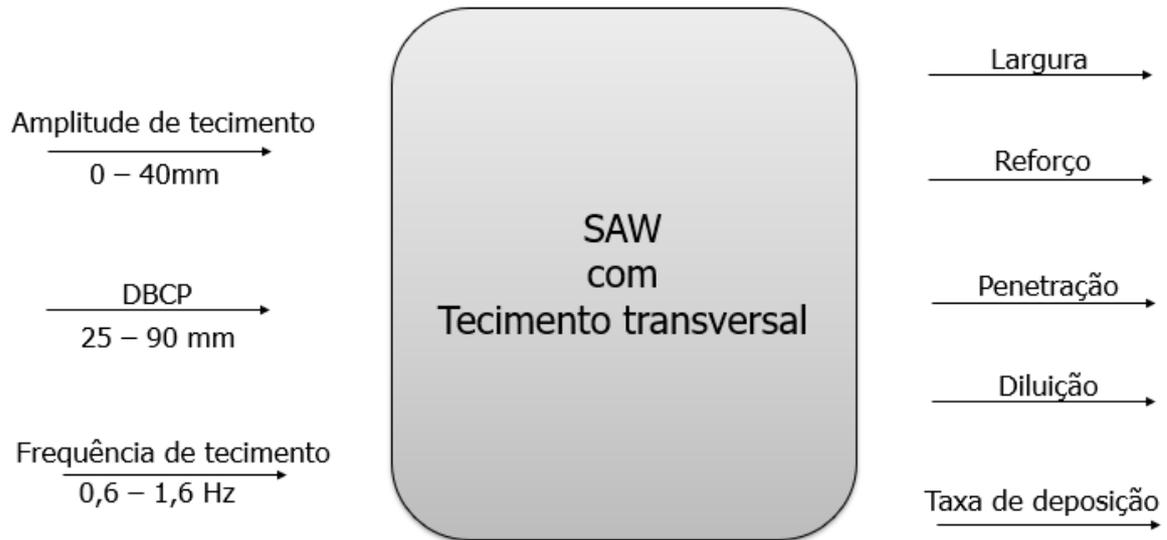
4.3 METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE SOLDAGEM

Com a bancada de soldagem concebida foi possível realizar os ensaios de soldagem com o processo SAW empregando a oscilação transversal da tocha. Foram realizados ensaios de simples deposição sobre chapa (*bead-on-plate*) em corpos de prova de aço carbono ASTM A36 com dimensões de 250x76x15,8mm. Todos os ensaios de soldagem ocorreram com o uso do eletrodo EM12K segundo a AWS 5.17 de bitola de 2,4mm, o conjunto arame-fluxo utilizado nos ensaios foi o AWS F48A2-EM12K e a velocidade de soldagem de 30cm/min.

Durante os ensaios os valores de corrente de soldagem e tensão de arco foram aquisitados. Já a velocidade de arame, não foi aquisitada durante os ensaios devido a problemas de acoplamento do respectivo sensor, mas, houve uma pré-calibração a fim de garantir que tal velocidade correspondesse a definida pelo usuário. Fixou-se a tensão de soldagem em 30V e realizou-se ensaios de soldagem empregando diferentes valores de energia de soldagem, amplitude e frequência de tecimento com o intuito de avaliar seus efeitos sobre os cordões de solda. A matriz de ensaios pode ser observado em síntese na Figura 27, onde a esquerda

encontram-se os parâmetros de entrada, para a aplicação do tecimento no SAW, e a direita os itens que serão analisados posteriormente à realização dos ensaios de soldagem.

Figura 27 - Esquema simplificado da matriz de ensaios de soldagem para o processo SAW com tecimento



Fonte: Autora (2020)

Inicialmente cabe destacar que para a presente pesquisa, nos pontos de análise de energia de soldagem seguiu-se o equacionamento tradicional, onde a energia de soldagem pode ser descrita através da razão entre o produto tensão vs corrente, dividido pela velocidade linear de soldagem. Nesta pesquisa foram descartados inicialmente os efeitos da amplitude e frequência de tecimento conhecidos sobre a energia de soldagem, assim como Cunha e Ribeiro (2018).

Os ensaios relativos à caracterização do efeito do tecimento sobre o cordão de solda iniciaram com a variação da amplitude de oscilação, almejando atingir amplitudes de tecimento de até 40mm. Nesses ensaios de soldagem manteve-se fixo o valor da DBCP em 25mm, a velocidade de soldagem de 30cm/min, a frequência de tecimento de 1Hz e tensão de soldagem em 30V. O processo de levantamento de dados começou pelo cordão linear, encontrou-se experimentalmente a velocidade de alimentação de arame mínima adequada, pertencente ao limite inferior de corrente de operação de arame estabelecido pelo fabricante. Na sequência, partiu-se para a realização dos ensaios com tecimento, tendo como ponto de partida os parâmetros empregados no cordão linear. A partir desse dado inicial, os outros ensaios para as amplitudes de movimento de 10, 20, 25 e 30mm ocorreram, buscando-se a menor velocidade

de alimentação de arame possível para uma solda adequada. Os cordões de solda com tecimento foram obtidos variando a velocidade de alimentação de arame até que fosse encontrada a condição de menor energia/corrente média de soldagem para obtenção de um cordão de geometria superficial adequada, sendo esse uniforme, sem mordeduras, inclusão superficial de escória, ou falta de deposição.

Sabendo que SAW é um processo de soldagem usualmente de tensão constante para esse diâmetro de arame, ao alterar velocidade de alimentação de arame, e manter as outras variáveis fixas, obrigatoriamente altera-se a energia de soldagem atrelada ao processo. Contudo, buscando poder inferir algum dado entre a correlação da quantidade mínima de material depositado com a quantidade de energia de soldagem associada ao processo, planejou-se uma série de experimentos para isolar os efeitos da energia de soldagem. Para que isso fosse possível, ocorreram ensaios de soldagem com as velocidades de alimentação de arame previamente encontradas para suas respectivas amplitudes de tecimento, contudo, diferentemente do grupo de ensaios anterior, neste houve a variação da DBCP.

Para tanto, inicialmente, escolheu-se um cordão de solda para que a corrente média de soldagem fosse utilizada como referência. Na sequência, foram realizados ensaios de caracterização para descrever a relação entre a DBCP e a corrente de soldagem. De posse dessa curva, foi possível aplicar diferentes valores de DBCP, garantindo, assim, que a corrente média de soldagem estivesse fixada no mesmo valor da corrente de referência, quando aplicadas as velocidades de alimentação de arame já utilizadas.

Tendo conhecimento dos valores de velocidade de alimentação de arame para cada uma das amplitudes de tecimento empregadas, iniciou-se uma nova fase de investigação da técnica, em função da frequência dos movimentos oscilatórios. Deste modo, ensaios preliminares com as frequências de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0Hz foram realizados. Contudo, verificou-se que o incremento de 0,5Hz acarretou em mudanças drásticas nos cordões de solda obtidos, deste modo, para melhor compreensão e uma análise mais detalhada dos efeitos da frequência de tecimento sobre a solda, ensaios com frequências de 0,6 a 1,6Hz com acréscimos de 0,2Hz foram realizados, mantendo fixo a DBCP em 25mm. Assim como nos dois conjuntos de ensaios de soldagens anteriores, para a avaliação da frequência de tecimento manteve-se a velocidade de soldagem de 30cm/min e a tensão de soldagem em 30V.

4.4 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE MACROESTRUTURAL DOS CORDÕES DE SOLDA

Buscando identificar os efeitos do tecimento nos aspectos morfológicos dos cordões de solda, aplicou-se o procedimento de preparação metalográfica conforme a ASTM E3-11 (2017). Dessa forma, obteve-se três amostra de cada corpo de prova (com o corte no sentido transversal dos cordões). Em cada seção (amostra) realizou-se o embutimento em resina e posteriormente preparação para análise metalográfica, através de lixamento (lixas com granulometria de 80 a 600). Sequencialmente, cada amostra passou pelo processo de ataque químico com nital 4%, para revelar as macrorregiões da solda. Com tal procedimento se fez possível, portanto, realizar a caracterização do cordão de solda, através das medidas das dimensões de penetração, largura, reforço, diluição, área fundida e misturada por meio do programa ImageJ. Ao decorrer do trabalho são expostos os valores médios para cada análise, mas todos os pontos coletados podem ser encontrados no Apêndice B.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados os resultados e as discussões do processo de validação do dispositivo de deslocamento e do processo de ensaios de soldagem.

5.1 VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

Conforme apresentada na metodologia 4.1 a série de ensaios para aferir e identificar possíveis parâmetros de correção do dispositivo, visaram garantir o funcionamento apropriado do dispositivo. Entre os ensaios executados encontram-se:

- ensaio de deslocamento linear;
- ensaio de velocidade de soldagem;
- ensaio de deriva de curso e
- ensaio amplitude de oscilação e frequência de oscilação.

O primeiro ensaio realizado verificou a precisão do dispositivo quanto o deslocamento linear. Deste modo, são apresentados na Tabela 3 estão os valores de deslocamento impostos, configurados através do dispositivo, os valores medidos em bancada e os erros percentuais para cada uma das análises realizadas.

Tabela 3 - Medidas de deslocamento linear obtidas para o eixo longitudinal

Deslocamento imposto [mm]	Deslocamento medido [mm]	Δ Deslocamento [mm]
5,0	5,0±0,602	0,0
10,0	10,0±0,602	0,0
15,0	15,0±0,602	0,0
20,0	20,0±0,602	0,0
50,0	50,0±0,602	0,0
100,0	100,0±0,602	0,0
150,0	150,0 ±0,602	0,0
200,0	200,1±0,602	0,1
250,0	250,1±0,602	0,1

Continua

Deslocamento imposto [mm]	Deslocamento medido [mm]	Δ Deslocamento [mm]
300,0	300,1 \pm 0,602	0,1
400,0	400,1 \pm 0,602	0,1
500,0	500,2 \pm 0,602	0,2
800,0	800,2 \pm 0,602	0,2

Fonte: Autora (2020)

Na sequência, ainda na validação do deslocamento linear, realizou-se a verificação da velocidade de soldagem para o eixo longitudinal. Conforme Tabela 4. Nota-se o uso de um motor de passo acoplado a um fuso de esferas recirculantes, confere precisão tanto de deslocamento como de velocidade ao dispositivo.

Tabela 4 - Medidas de velocidade de soldagem

Deslocamento [cm]	Vs imposta [cm/min]	Tempo [min]	Vs medida [cm/min]	Δ Vs [cm/min]
5	10,0	0,50	10,0 \pm 0,223	0,0
10	10,0	1,00	10,0 \pm 0,111	0,0
20	10,0	2,00	10,0 \pm 0,055	0,0
15	30,0	0,50	30,0 \pm 0,608	0,0
30	30,0	1,00	30,0 \pm 0,304	0,0
60	30,0	2,01	30,0 \pm 0,150	0,5
50	100,0	0,50	100,0 \pm 2,002	0,0
100	100,0	1,01	99,0 \pm 0,981	1,0
200	100,0	2,01	99,5 \pm 0,495	0,5

Fonte: Autora (2020)

Para completar a avaliação do dispositivo de deslocamento, a segunda fase consistiu na validação do módulo oscilador. O teste de deriva verificou que, para este dispositivo de deslocamento de tocha, não há a presença de escorregamento ao realizar o tecimento. O que era desejável.

A etapa seguinte foi o processo de avaliação da amplitude de oscilação, representada por Y na Figura 25. Conforme mencionado na metodologia 4.1 foram realizados ensaios para os valores de 5 até 40mm de movimentação, com incrementos de 5mm, tais resultados são encontrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Avaliação das medidas de amplitude de tecimento

Amplitude imposta [mm]	Amplitude medida [mm]	Δ Amplitude [mm]
5,0	5,0 \pm 0,602	0,0
10,0	10,0 \pm 0,602	0,0
15,0	15,0 \pm 0,602	0,0
20,0	20,0 \pm 0,602	0,0
25,0	25,0 \pm 0,602	0,0
30,0	30,0 \pm 0,602	0,0
35,0	35,1 \pm 0,602	0,1
40,0	40,1 \pm 0,602	0,1

Fonte: Autora (2020)

Finalizando a avaliação do conjunto de tecimento, aferiu-se a frequência do movimento de oscilação. Os resultados obtidos para a frequência imposta, a frequência calculada e o erro percentual associado, são representados através da Tabela 6.

Tabela 6 - Medidas de frequência de tecimento

Amplitude [mm]	Frequência imposta [Hz]	X [mm]	Vs [cm/min]	Frequência calculada [Hz]	Δ Frequência [Hz]
5	1,0	5,0	30,0	1,0 \pm 0,014	0,0
5	2,0	2,4	30,0	2,1 \pm 0,309	0,1
5	4,0	1,2	30,0	4,2 \pm 0,061	0,2
10	0,5	10,5	30,0	0,5 \pm 0,007	5,0
10	1,0	5,0	30,0	1,0 \pm 0,014	0,0
10	2,0	2,5	30,0	2,0 \pm 0,029	0,0
10	3,0	1,6	30,0	3,1 \pm 0,046	0,1
10	4,0	1,2	30,0	4,2 \pm 0,061	0,2
20	0,5	10,5	30,0	0,5 \pm 0,007	0,0
20	1,0	5,2	30,0	1,0 \pm 0,014	0,0
20	2,0	2,5	30,0	2,0 \pm 0,029	0,0
20	3,0	1,6	30,0	3,1 \pm 0,046	0,1

Continua

Amplitude [mm]	Frequência imposta [Hz]	X [mm]	Vs [cm/min]	Frequência calculada [Hz]	Δ Frequência [Hz]
20	3,5	1,4	30,0	3,6±0,052	0,1
30	0,5	11,0	30,0	0,5±0,006	0,0
30	1,0	5,0	30,0	1,0±0,014	0,0
30	2,0	2,5	30,0	2,0±0,029	0,0
30	2,5	2,0	30,0	2,5±0,037	0,0
40	0,5	10,5	30,0	0,5±0,007	0,0
40	1,0	5,1	30,0	1,0±0,014	0,0
40	2,0	2,2	30,0	2,3±0,033	0,3
40	2,5	2,0	30,0	2,5±0,037	0,0

Fonte: Autora (2020)

Cabe salientar que pequenas diferenças de medições na distância entre picos, X, resultam nos erros apresentados na Tabela 6, contudo, avaliando o sistema de medição utilizado e os dados coletados pode-se concluir que o dispositivo de deslocamento é confiável.

Por fim, um último teste foi realizado a fim de garantir a operação do dispositivo de deslocamento de tocha com segurança. Para isso, foram realizados ensaios de carga para variadas amplitudes e frequências, em que basicamente buscou-se encontrar os limites de operação do dispositivo. É previsível que o motor não atenda a todas as condições de forma homogênea, uma vez que condições de amplitude e frequência de oscilação exigem condições diferentes de aceleração do motor do eixo de tecimento. Dessa forma, mostra-se o padrão de operação deste dispositivo na Tabela 7.

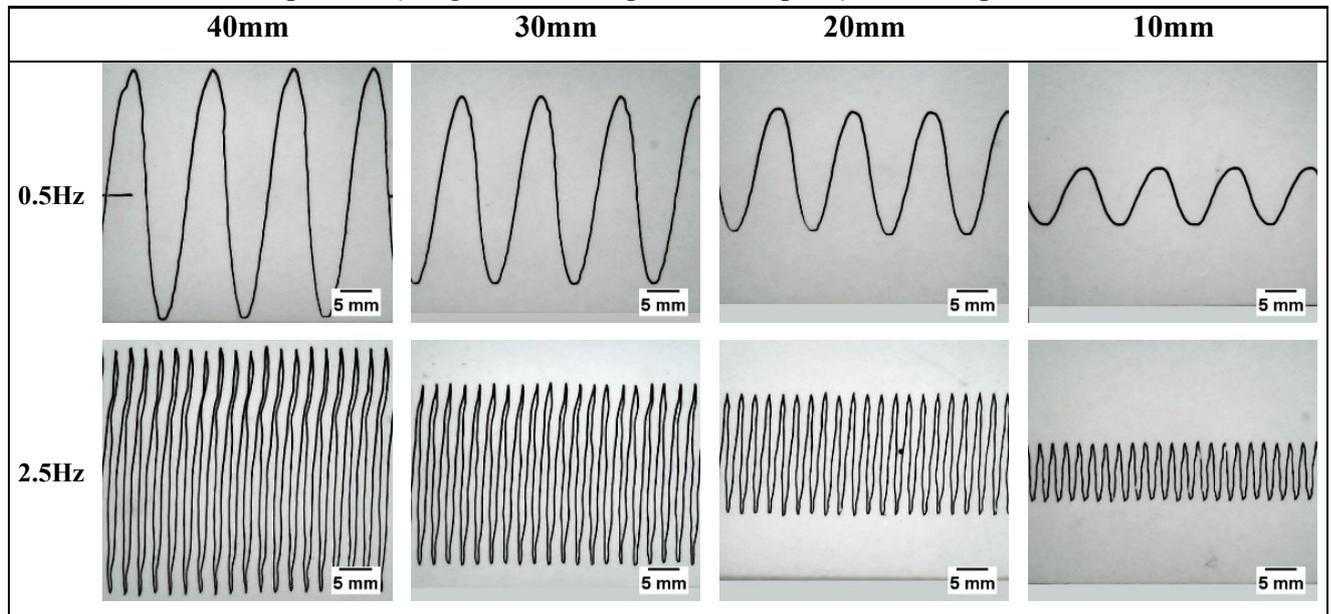
Tabela 7 - Relação da frequência máxima de operação Vs. amplitude de tecimento

Amplitude de tecimento	Frequência máxima de operação
05 mm	5,0 Hz
10 mm	5,0 Hz
20 mm	3,5 Hz
30 mm	2,5 Hz
40 mm	2,5 Hz

Fonte: Autora (2020)

Como resultado final do processo de validação de equipamento pode-se apresentar o Quadro 1, o qual resume os regimes de operação deste dispositivo de deslocamento de tocha com tecimento transversal, para as frequências mínimas e máximas de operação.

Quadro 1 - Representação gráfica da frequência de operação Vs. amplitude de tecimento



Fonte: Autora (2020)

5.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM

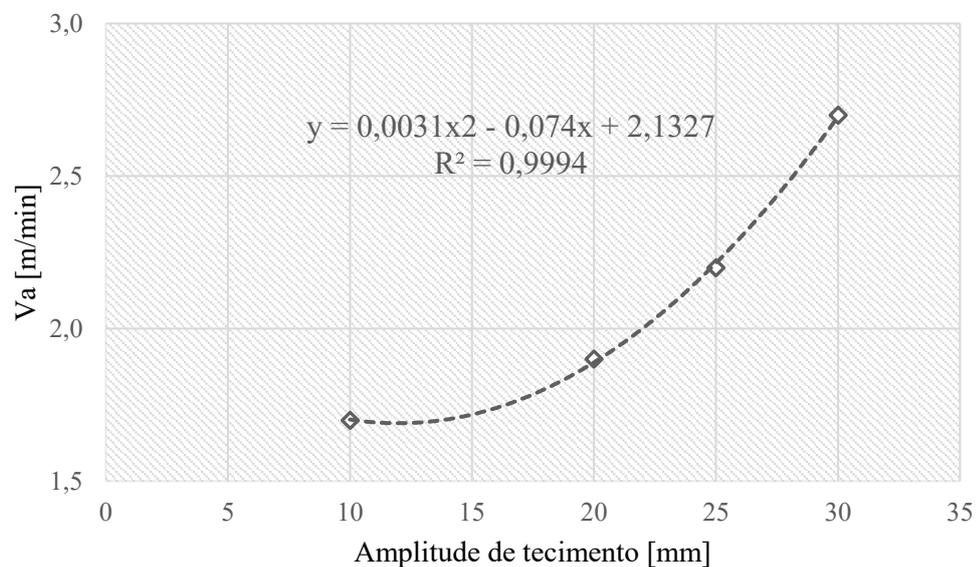
Visando complementar o estudo realizado com este trabalho, são apresentados os resultados e discussões referentes aos ensaios de soldagem.

5.2.1 Análise da amplitude de tecimento mantendo fixa a DBCP

Conforme a metodologia aplicada em 4.2, inicialmente foram realizados ensaios de soldagem com deslocamento linear da tocha, os quais permitiram concluir que a velocidade de alimentação mínima para este caso é de 1,7m/min. A partir destes parâmetros, foram realizados cordões de solda com amplitudes de tecimento de 10, 20, 25 e 30mm e frequência de tecimento de 1Hz e DBCP de 25mm. Como resultado, foram obtidos cordões de solda com velocidade de alimentação de arame de 1,7 m/min, 1,9m/min, 2,2m/min e 2,7m/min respectivamente.

Com o intuito de compreender o comportamento da técnica, levantou-se a curva de velocidade de alimentação de arame requerida por amplitude de tecimento com os dados anteriormente coletados (Figura 28). E afim de validar tal experimento, fez-se uma extrapolação para dois novos pontos. Conceitualmente, ao obter a equação de uma curva é possível calcular novos valores para o eixo das ordenadas, fornecendo valores para o eixo das abcissas, e semelhantemente aplicou-se esse recurso.

Figura 28 - Equacionamento que descreve a relação entre a velocidade de alimentação de arame Vs a amplitude de tecimento



Fonte: Autora (2020)

Para o valor de 35mm de amplitude foi possível encontrar de forma direta o valor de velocidade de alimentação de arame a ser usada (3,6m/min). Contudo, a equação para o valor de 40mm de amplitude retornava em um valor de velocidade de alimentação de arame (4,6m/min) impossível ser aplicado com as fontes de soldagem disponíveis, uma vez que esta velocidade de alimentação de arame implicaria em uma corrente de soldagem de aproximadamente 710A, exigindo mais que a potência entregue pelas fontes de soldagem.

Então fez-se uso de outro recurso matemático. Sabendo que a velocidade de alimentação de arame acarreta em um determinado valor de taxa de deposição, foi possível replicar cada um dos dados em função de unidade de massa por unidade de comprimento. Para tanto, aqui, evidencia-se que para o processo SAW pode-se considerar que a taxa de fusão e taxa de deposição apresentam os mesmos valores, uma vez que não há a presença de respingos.

Dessa forma, descreve-se a taxa de deposição na Equação 4, onde d é o diâmetro do arame, V_a a velocidade de alimentação do arame e ρ a densidade do mesmo.

$$T_f = T_d = \frac{\pi d^2}{4} V_a \rho \quad \left[\frac{g}{min} \right] \quad (7)$$

O resultado deste equacionamento pode ser correlacionado com a velocidade de deslocamento de tocha, o que matematicamente representa a quantidade de material disposta em função do comprimento do cordão de solda. A partir desse ponto, tem-se então um valor-meta a ser alcançado, sabendo que número não pode ser obtido via velocidade de alimentação de arame, é possível então atuar em velocidade de soldagem. Para aplicar esse procedimento, escolheu-se a velocidade de alimentação de arame usado para a amplitude de 35mm e calculou-se a taxa de deposição em unidade de massa por tempo. Correlacionando esse resultado com o valor almejado em unidade de massa por unidade de comprimento, foi encontrada uma nova velocidade de soldagem, conforme o equacionamento:

$$T_x = \frac{T_d}{V_x} \quad \left[\frac{g \text{ cm}}{min^2} \right] \quad (8)$$

$$V_{x \text{ nova}} = \frac{T_d}{T_x} \quad \left[\frac{cm}{min} \right] \quad (9)$$

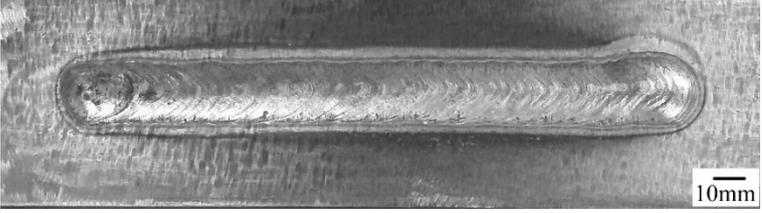
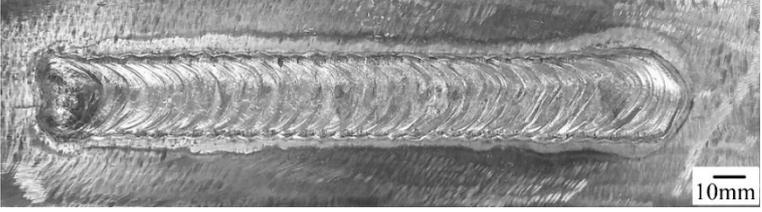
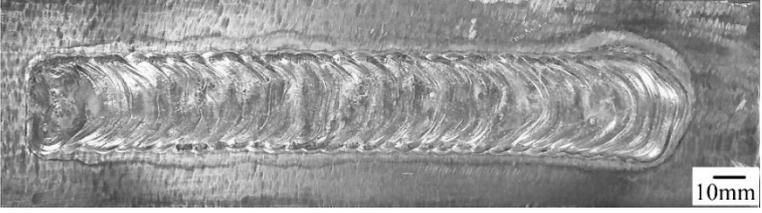
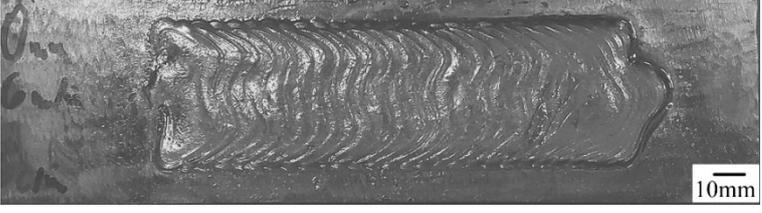
Os resultados de velocidade de alimentação de arame obtidos para a aplicação do tecimento em função da amplitude são mostradas na Tabela 8, para as condições de DBCP de 25mm, frequência de tecimento 1Hz, tensão de soldagem 30V e diâmetro de arame de 2,4mm.

Tabela 8 - Parâmetros de soldagem para variação da amplitude mantendo fixa a DBCP

Amplitude de tecimento [mm]	Velocidade de alimentação de arame [m/min]	Velocidade de soldagem [cm/min]
0 (linear)	1,7	30
10	1,7	30
20	1,9	30
25	2,2	30
30	2,7	30
35	3,6	30
40	3,6	26

Os cordões de solda resultantes desse processo apresentaram (Quadro 2) resultados semelhantes quanto aos aspectos de brilho, uniformidade de deposição superficial e facilidade da remoção da camada de escória. Também se evidencia a presença de um efeito escamado nas margens do cordão de solda a partir da amplitude de 20mm, contudo ressalta-se a ausência de mordeduras, é um indicativo positivo sobre a deposição de material. Cabe salientar que todos os cordões de solda acima de 25mm que não foram aceitos apresentaram falta de deposição na região central do cordão de solda como defeito típico, conforme pode ser visto no Apêndice A. Sugerindo que em tais casos, a quantidade de material de adição e/ou a energia não foram o suficiente para a manutenção da poça líquida, afim de realizar a ponte metálica entre as duas laterais do cordão de solda. Já para os cordões de 20 e 25mm, onde não foram relatados problemas com a falta de deposição, o critério de seleção de resultados necessitou ser um pouco mais minucioso, sendo assim, a presença de mordeduras e/ou inclusão de escória foram pontos determinantes na avaliação. De semelhante modo, o cordão linear e de 10mm de amplitude de tecimento não apresentaram defeitos, porém, destaca-se que não se pôde encontrar os valores mínimos de quantidade de material depositados, uma vez que tal busca foi restrita a corrente mínima de operação do arame indicado pelo fabricante.

Quadro 2 - Cordões de solda resultantes da variação da amplitude de tecimento mantendo fixa a DBCP

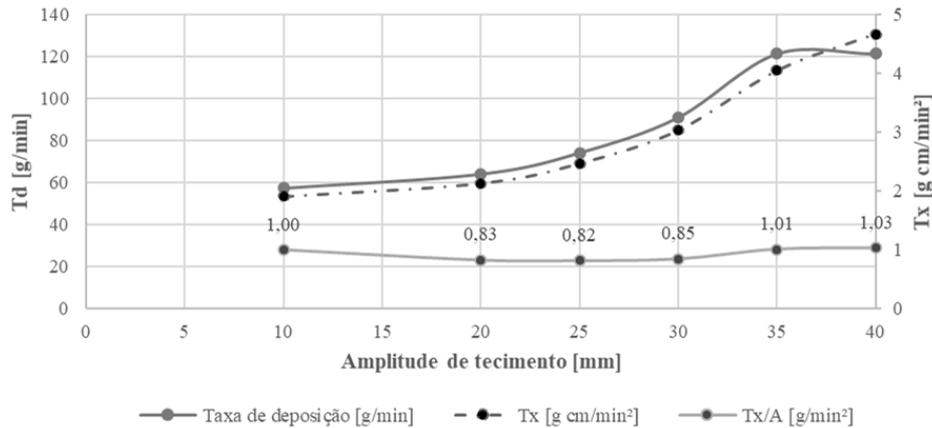
Amplitude de tecimento [mm]	Cordões de solda
0	 A smooth, elongated weld bead with a uniform surface texture. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner.
10	 A weld bead showing slight ripples along its length. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner.
20	 A weld bead with more pronounced ripples. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner.
25	 A weld bead with distinct, regular ripples. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner.
30	 A weld bead with larger, more irregular ripples. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner.
35	 A weld bead with very large, irregular ripples and a rougher surface. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner.
40	 A weld bead with extremely large, irregular ripples and a very rough, textured surface. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner.

Fonte: Autora (2020)

Então, diante dos resultados, buscou-se melhor compreender a técnica de tecimento realizando também a análise da taxa de deposição. Sabendo que essa é dada em unidades de massa por tempo e está exclusivamente relacionada a velocidade de alimentação de arame (uma vez que está fixo a tensão e a velocidade linear de soldagem), é esperado que a mesma tenha aumento ao incrementar velocidade de alimentação de arame. O que pôde ser observado neste estudo, porém, ressalta-se que ao tentar aumentar a amplitude de tecimento por vezes não se atingiu um cordão de solda de aparência superficial desejado, por presenciarse a falta de deposição na região central dos cordões de solda, conforme mencionado anteriormente. Então, supõe-se que haja uma quantidade mínima de material necessária para cobrir uma área qualquer de cordão de solda. Quando comparado a literatura, nota-se que Cunha e Ribeiro (2018) apresentam problemas semelhantes, destacando que ao fixar a energia de soldagem e aumentarem a amplitude de tecimento, perceberam uma geometria irregular do cordão. Não obstante, os autores também notaram que todos os cordões de 20mm de amplitude apresentaram mordeduras, as quais diminuía com o aumento da energia de soldagem. Nessas duas situações, os autores atribuíram a falta de deposição de material como motivo das descontinuidades. Outro ponto que apoia tal hipótese, pode ser evidenciado quando Cunha e Ribeiro (2018) aumentaram a energia de soldagem (através da diminuição da velocidade de soldagem linear) e não obtiveram um cordão de geometria satisfatória, uma vez que não houve a quantidade mínima de material depositado.

Dessa forma, a presente análise da taxa de deposição tem como objetivo mensurar tal quantidade de material depositado para cada amplitude de tecimento avaliada. Então, foi correlacionada a taxa de deposição com a velocidade de soldagem (Td/Vs), tal medida, revela a quantidade de material depositado por unidade de comprimento do cordão. De mesmo modo, ao dividir esse valor pela largura medida do cordão de solda, tem-se a quantidade de material depositado por unidade de área (Tx/A). Ao realizar essa análise percebe-se que a medida em que a amplitude de tecimento foi incrementada, aumentou-se a velocidade de arame a fim de identificar o valor mínimo que resultasse em cordões de solda livre de descontinuidades superficiais, como falta de deposição. O que, de fato, pôde ser descrito matematicamente pela quantidade mínima de material de $0,90 \text{ g/min}^2$, com um erro associado de 9%. Valor resultante da média dos valores de material depositado por amplitude de tecimento realizado, conforme mostrada na Figura 29. Ressalta-se que esta quantidade mínima de material é representativa para as condições de análise e podem variar de acordo com o metal de base, densidade de arame, e outros parâmetros de soldagem.

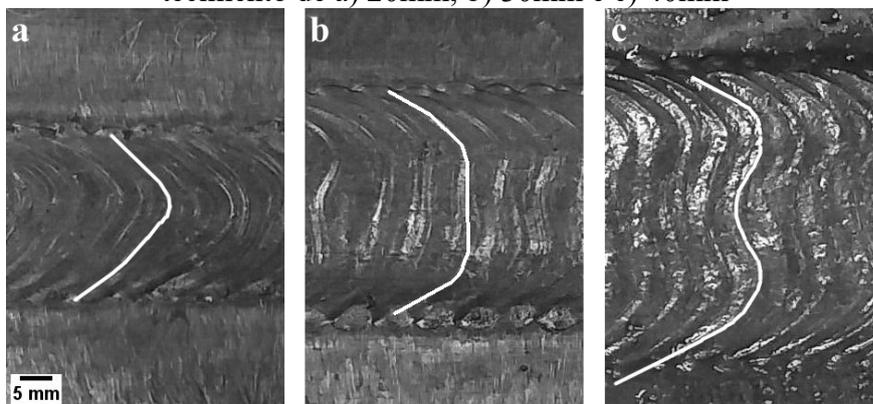
Figura 29 - Taxa de deposição de material em função da amplitude de tecimento



Fonte: Autora (2020)

Ainda com relação ao aspecto superficial dos cordões de solda, destaca-se também a presença do mesmo padrão de solidificação em cordões de solda com até 25mm de amplitude de tecimento. Estes são caracterizados por uma curva parabólica com a concavidade na região central do cordão de solda (Figura 30a). Diferentemente, os cordões de solda realizados com amplitudes de 35 e 40mm exibem um padrão de solidificação duplo parabólico, com picos nas laterais e vale da região central da solda (Figura 30c). Este resultado sugere um comportamento semelhante a criação de duas poças de fusão, com leve sobreposição. Por outro lado, o cordão de solda produzido com 30mm de amplitude de tecimento aparenta ser um ponto de transição, uma vez que em sua região central as marcas de solidificação mostram-se perpendiculares à margem do cordão (Figura 30b).

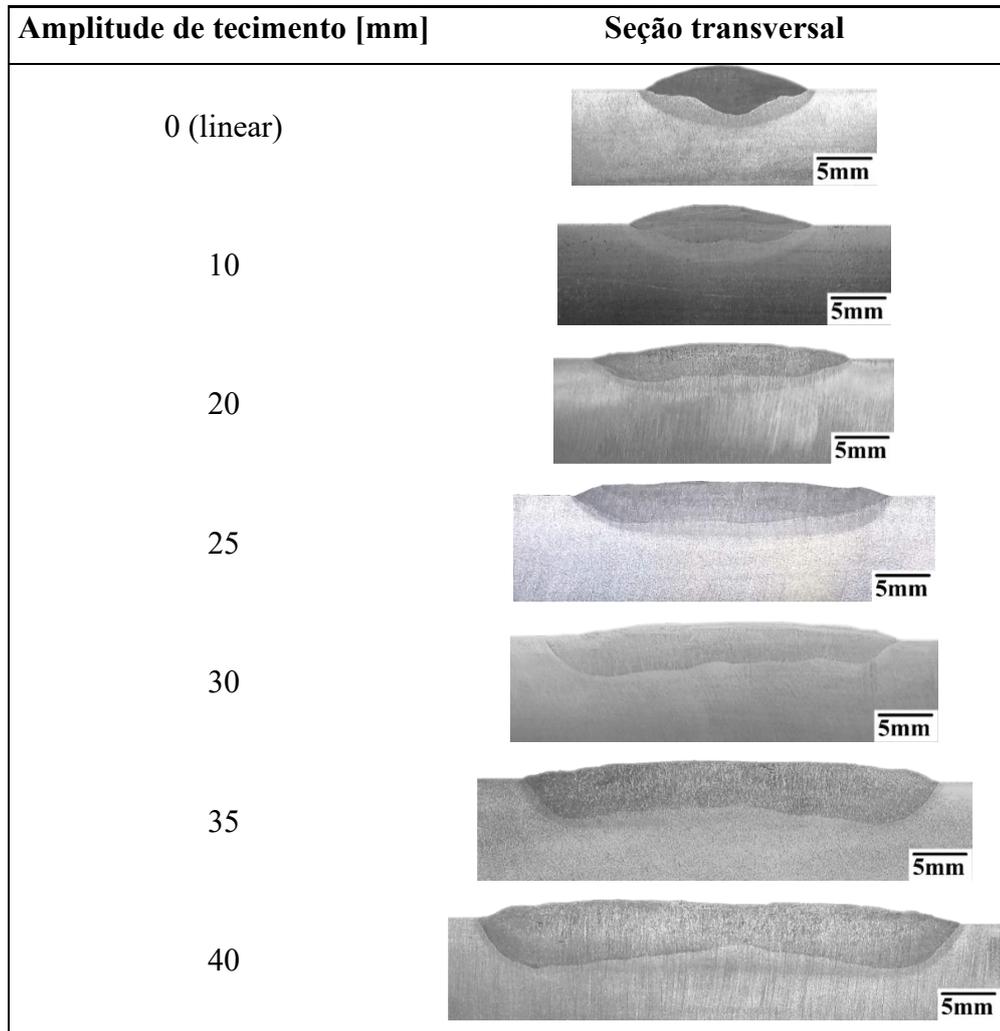
Figura 30 - Padrão de solidificação apresentados pelos cordões de solda com as amplitudes de tecimento de a) 20mm, b) 30mm e c) 40mm



Fonte: Autora (2020)

Na sequência foi realizada a análise da seção transversal dos cordões de solda. O resultado é apresentado no Quadro 3 e Tabela 9.

Quadro 3 - Seções transversais dos cordões de solda resultantes da variação de amplitude de tecimento mantendo fixa a DBCP



Fonte: Autora (2020)

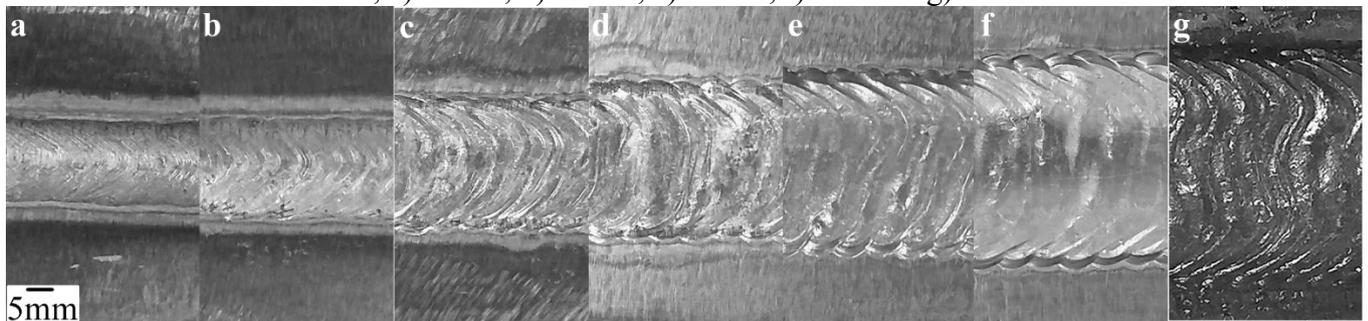
Tabela 9 - Medidas geométricas dos cordões de solda e parâmetros de soldagem obtidos com a variação da amplitude de tecimento

Amplitude [mm]	Área Fundida [mm ²]	Área de Reforço [mm ²]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Largura [mm]	Corrente [A]	Tensão [V]	Energia [kJ/cm]
0	50,8	27,6	2,6	2,5	16,0	298	29,7	17,70
10	54,1	26,4	1,9	2,0	19,1	300	29,6	17,76
20	74,9	30,2	2,2	1,6	25,6	322	29,6	19,06
25	85,5	31,7	2,4	1,3	30,0	391	28,1	21,97
30	134,4	40,1	3,5	1,7	35,6	457	29,6	27,05
35	183,9	56,7	4,3	1,8	40,0	578	29,2	33,76
40	223,3	75,9	5,0	2,0	45,3	588	29,3	39,76

Fonte: Autora (2020)

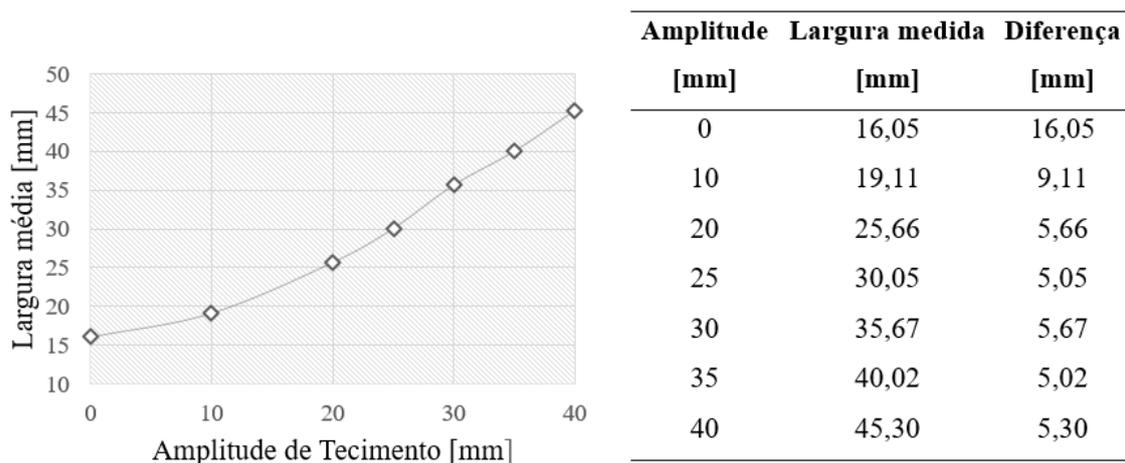
Em uma análise preliminar percebe-se um aumento linear da largura dos cordões de solda em função das amplitudes de tecimento (Figura 31). Conforme esperado, este resultado é compatível com os de Cunha e Ribeiro (2018). Pois a oscilação da tocha de soldagem, resulta em uma melhor distribuição do material de adição no cordão de solda aumentando, assim, sua largura. Com o intuito de melhor compreender o comportamento da largura nas aplicações de tecimento, relacionou-se as larguras medidas com a amplitude de movimentação da tocha (Figura 32).

Figura 31 - Largura dos cordões de solda obtidos para amplitudes de tecimento de a) 0mm, b) 10mm, c) 20mm, d) 25mm, e) 30mm, f) 35mm e g) 40mm.



Fonte: Autora (2020)

Figura 32 - Relação entre a amplitude de tecimento e a largura medida

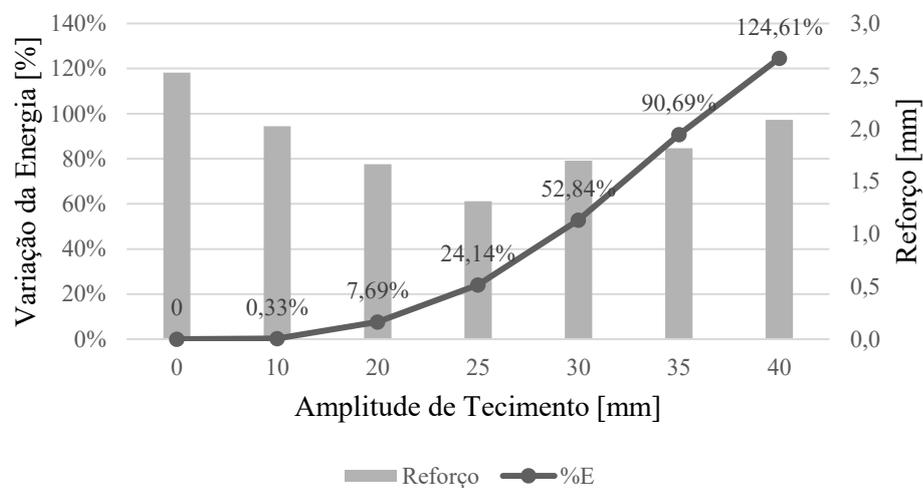


Fonte: Autora (2020)

Percebe-se que a diferença entre largura medida e amplitude é flutuante em $5,34 \pm 0,28\text{mm}$ a partir do cordão de solda com amplitude de tecimento de 20mm. Isto sugere que

para as condições em que são empregados valores mínimos de taxa de deposição, a largura real do cordão pode ser previamente determinada, o que de fato pode ser útil em projetos de juntas. Diferentemente da largura, o reforço apresentou um comportamento peculiar. Conforme pode ser observado na Figura 33, os valores de reforço decrescem a partir do cordão linear até o de 25mm de amplitude, ponto o qual altera seu comportamento, fazendo com que o reforço sofra acréscimos posteriormente.

Figura 33 - Relação da medida de reforço dos cordões de solda em função da amplitude energia de soldagem



Fonte: Autora (2020)

Ao executar soldagens com tecimento e manter o nível de energia de soldagem constante, espera-se que a largura da solda irá aumentar e, por consequência, o reforço irá diminuir quando comparada a soldagem linear. Pois, ambos cordões terão a mesma quantidade de material depositado, porém, distribuídos de formas diferentes. Por outro lado, quando se mantém os parâmetros e apenas eleva-se a velocidade de arame (aumentando assim a corrente e a energia de soldagem), é esperado que haja o aumento do reforço. Tais hipóteses podem ser reforçadas ao comparar os dados de Cunha e Ribeiro (2018), para uma mesma energia de soldagem (mesma velocidade de arame) os autores relatam o decréscimo do reforço. Para a energia de soldagem de 20kJ/cm, os autores descrevem as seguintes medidas de reforço:

- cordão linear – 2,6mm;
- 10mm de amplitude – 2,4mm;
- 20mm de amplitude – 1,9mm.

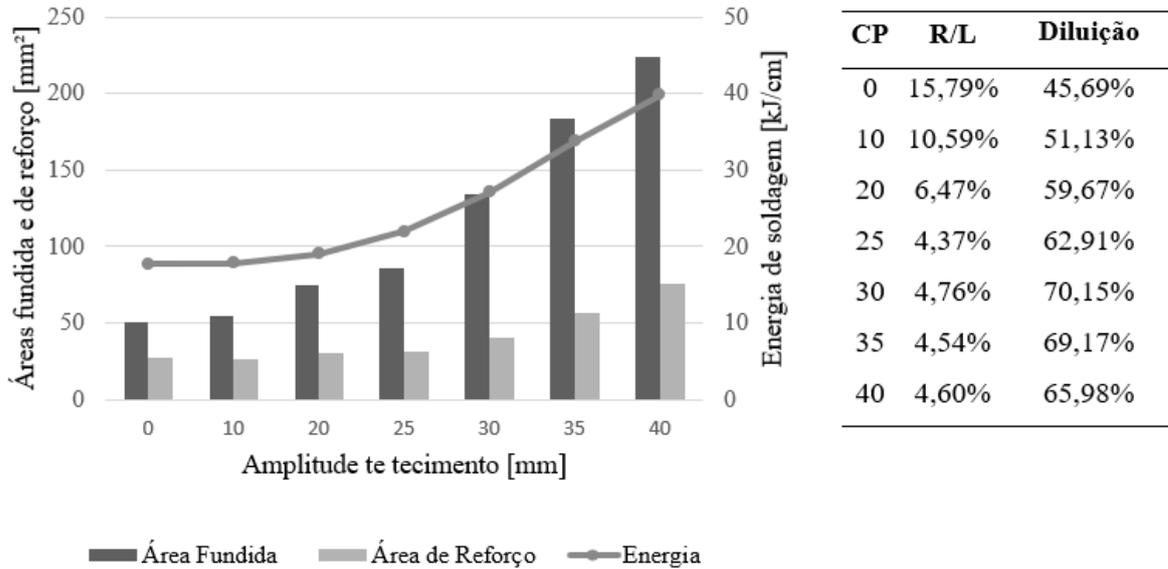
Completando a avaliação, comparou-se os resultados de Cunha e Ribeiro (2018) fixando a análise na amplitude de tecimento de 10mm e percebe-se que ao aumentar a energia de soldagem, de fato, houve o aumento do reforço, conforme pode ser visto:

- energia 15kJ/cm – 2,2mm;
- energia 20kJ/cm – 2,4mm;
- energia 25kJ/cm – 2,6mm.

Tendo conhecimento desses dois argumentos, avaliou-se o perfil de reforço dos cordões de solda obtidos. E nota-se que quando o perfil de reforço é avaliado em função do aumento percentual de energia (em relação ao cordão linear), percebe-se que até 25mm de amplitude de tecimento (ponto de inflexão da curva - Figura 33) as variações de energia foram inferiores a 25%, dessa forma, pode-se inferir que o efeito do movimento se torna mandatório, pois ocorre o aumento da largura e a diminuição do reforço. Diferentemente dos cordões de solda de 30, 35 e 40mm, em que a variação de energia de soldagem sofreu significativo incremento, dessa forma o efeito da energia acarreta num acréscimo de reforço nos cordões de solda.

Correlacionando as medidas de largura e reforço, é possível verificar que a razão R/L apresenta-se consideravelmente baixa, sendo essa inferior a 10% em cerca de 70% dos cordões de solda estudados conforme mostra a Figura 34. Isto poderia sugerir uma aplicação de soldagem de revestimento para a prorrogação da vida útil de peças, ou então a recuperação de elementos afetadas pelo desgaste ou corrosão, tendo em vista que usualmente a razão R/L deve ser inferior a 50% em tais aplicações. A razão R/L é um parâmetro importante, uma vez que indica a convexidade do cordão de solda, quanto menor a razão R/L, menor é o grau de convexidade do cordão de solda. O que, de fato, auxilia a sobreposição dos passes de soldagem, pois essa ocorre de forma mais homogênea, evitando possível falta de fusão entre os passes. Contudo, destaca-se que a largura de tecimento atingida com esse trabalho é considerada não usual, favorecendo tal parâmetro de R/L. Logo, para uma avaliação precisa da aplicação da técnica de tecimento para o revestimento se fez necessário a averiguação da diluição dos cordões de solda. Ao realizar tal análise, nota-se que as medidas apresentadas na Figura 34 para diluição revelam que quantidade de área de reforço em relação a área fundida não é adequada para tal aplicação de revestimento. Usualmente espera-se que em soldagens de revestimento a diluição seja igual ou inferior a 10%.

Figura 34 - Avaliação de parâmetros para soldagem de revestimento



Fonte: Autora (2020)

Investigando mais detalhadamente o comportamento da área de reforço (AR) e a área fundida (AF) observa-se que a taxa com que cresce a área fundida é maior do que a área de reforço (Figura 34). Fixando o cordão de solda linear como referência e calculando o percentual de variação das áreas em relação a esse ponto, tem-se que área fundida cresceu aproximadamente 340% contra 175% de área de reforço (Figura 34). O fato do crescimento significativo de área fundida provavelmente está relacionado ao aumento da largura dos cordões de solda, uma vez que tal variação foi maior que a variação do reforço, com o aumento da velocidade de alimentação de arame.

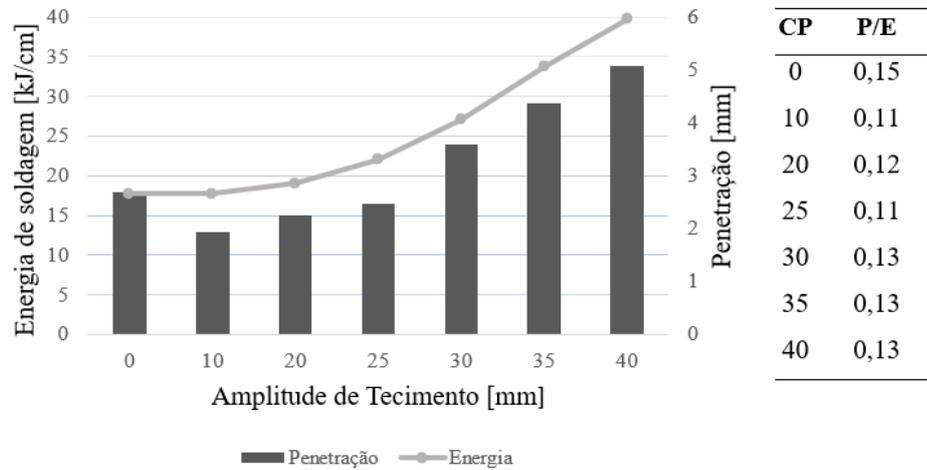
Outro ponto de destaque é que quando correlaciona-se as variações percentuais de área de reforço e área fundida com a energia de soldagem para cada cordão de solda, percebe-se que a área de reforço é incrementada nas mesmas proporções com que a energia de soldagem cresce, contudo nota-se que a área de fusão apresenta significativo incremento, aproximadamente 340% enquanto a energia aumenta apenas 125%. Ao se calcular a razão entre a área fundida e a energia de soldagem para cada amplitude avaliada evidencia-se que a área de fusão aumenta aproximadamente 5,6 vezes a mais que a energia de soldagem. A combinação desses resultados, sugere a hipótese que ao realizar o tecimento na soldagem a arco submerso, aumenta-se a eficiência do processo, uma vez que aumenta-se a quantidade de material depositado de forma mais significativa do que a energia necessária para realizar o tecimento. Resultados semelhantes foram obtidos por Cunha e Riberio (2018), onde observa-se o aumento da área fundida com

uma mesma energia de soldagem, exclusivamente variando a amplitude de tecimento. Assim Cunha e Ribeiro (2018) sugerem o aumento da eficiência do processo de soldagem, no entanto, destacam que tal fato se deu unicamente pelo aumento da largura do cordão.

Inicialmente os resultados de penetração apresentados na Tabela 9 sugerem discordar da literatura, a qual afirma que em técnicas onde ocorre a oscilação da tocha de soldagem é possível aquecer mais as laterais da junta, aumentando a capacidade de molhamento da poça no metal de base, reduzindo a penetração (SCOTTI e PONOMAREV 2008). O resultado de decremento na penetração presente na literatura, também foi apresentado por Cunha e Ribeiro (2018), para uma mesma energia de soldagem. Entretanto, destaca-se que o aumento da penetração, com o aumento da largura, observados nos cordões de solda obtidos no presente trabalho é um reflexo direto do acréscimo da energia de soldagem. Ao incrementar os valores de alimentação de arame, é inerente do processo o aumento da corrente de soldagem, implicando no aumento de energia de soldagem. Logo, o aumento da penetração observado é totalmente natural.

Por outro lado, em uma análise mais detalhada percebe-se através da Figura 35, que a relação entre os valores de penetração e a energia de soldagem utilizada para cada amplitude de tecimento realizado (P/E), se mantém num valor médio de cerca de 0,13 com desvio padrão de $\pm 0,01$. Como pode ser visto na Figura 35, o cordão de solda resultante do movimento linear pode ser entendido como um dado discrepante da curva. Todavia, isto pode ser justificado pelo fato de ao não realizar o tecimento, o arco voltaico permanece numa mesma posição central em relação ao metal de base durante toda a soldagem. Dessa forma, o calor se faz mais concentrado permitindo, assim, ser alcançados maiores valores de penetração e conferindo ao cordão de solda o perfil conhecido como *fingershape*. Caso este dado seja eliminado das análises, a relação P/E cai para 0,12 e o desvio padrão para $\pm 0,008$. Tais resultados sugerem que, caso seja possível, aumentar a velocidade de alimentação de arame e manter a energia de soldagem constante (atuando na velocidade de soldagem, por exemplo), provavelmente o valor de penetração será mantida constante, independente da amplitude de tecimento. Dessa forma é possível inferir que, o valor da área depositada sofrerá aumento pois essa é relacionada unicamente com a velocidade de alimentação, o que, por consequência, sugere o aumento da área de reforço. Logo, com a manutenção da penetração e o aumento da área de reforço espera-se que a diluição diminua proporcionando melhores condições para aplicações de revestimento.

Figura 35 - Avaliação da penetração em função da amplitude de tecimento e energia de soldagem



Fonte: Autora (2020)

5.2.2 Análise da amplitude de tecimento mantendo fixa a corrente média de soldagem

Até o momento, no presente trabalho foram realizadas análises buscando identificar a quantidade mínima de material depositado requerida por amplitude (variou-se a velocidade de alimentação de arame e, por consequência, a energia de soldagem). Então, buscando compreender de forma mais clara a técnica de tecimento transversal para o processo SAW, foram realizados ensaios de soldagem mantendo fixos os valores médios de corrente e energia de soldagem, com o objetivo de concluir sobre a interdependência entre quantidade mínima de material depositado e energia de soldagem.

Portanto, primeiramente se fez necessário a escolha de uma amostra de referência. Para tal processo optou-se pela amostra de 20mm de amplitude de tecimento com 25mm de DBCP, a qual apresentou 322A de corrente média. Esta seleção ocorreu pelo fato do cordão de solda representar a primeira amostra coletada com a certeza de se ter a quantidade mínima de material depositado, sem ter restrições quanto a corrente de operação indicada pelo fabricante, como o caso do cordão de solda com amplitude de 10mm. Deste modo, o cordão de solda com 20mm de amplitude de tecimento delimita a menor corrente média de soldagem a ser obtida como parâmetro.

Na sequência, foram selecionados valores de amplitudes de tecimento para que fossem replicadas, mantendo a velocidade de alimentação de arame previamente determinada e com a

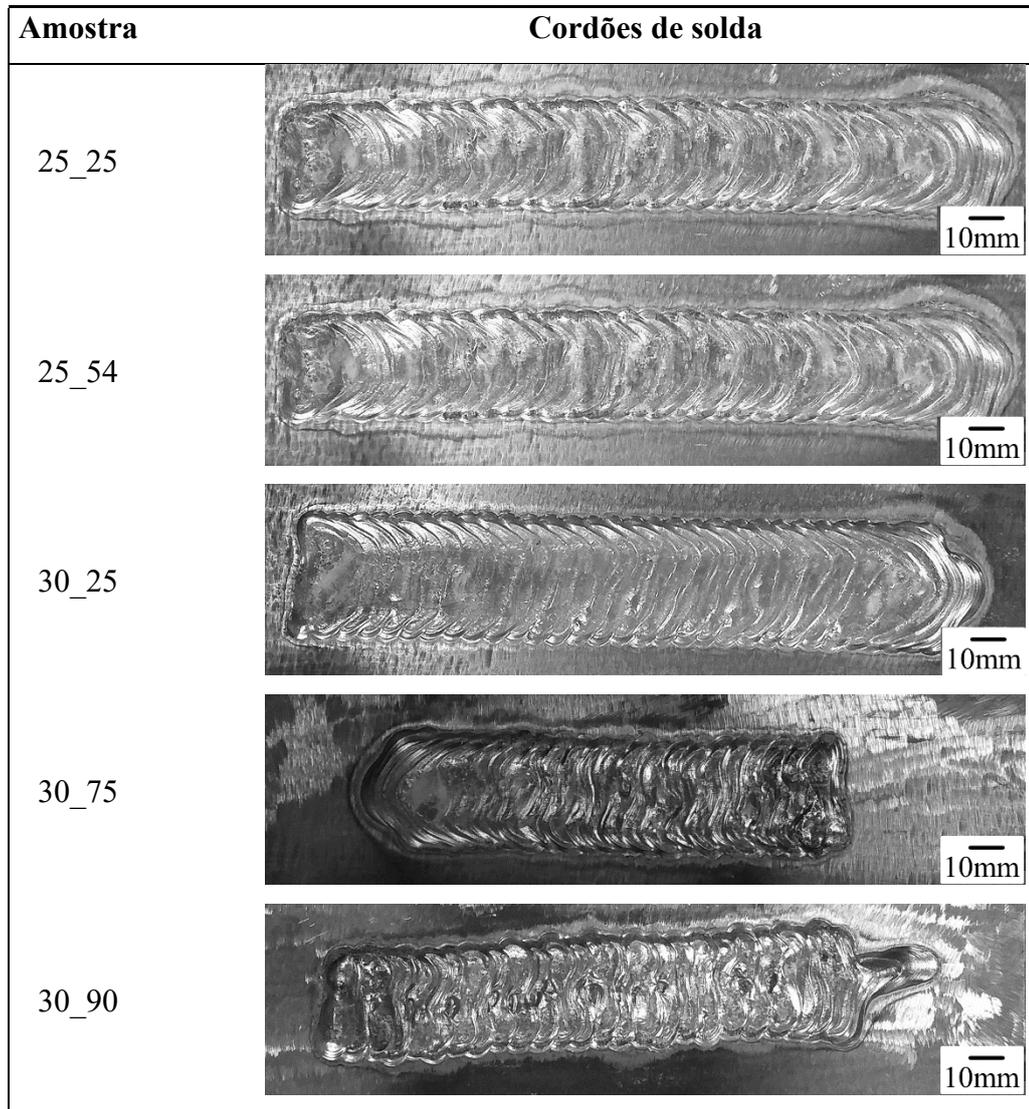
mesma corrente média de soldagem de 322A. Em vista disso, as amplitudes de 25 e 30mm foram selecionadas para a realização dos ensaios de soldagem, por serem dados conhecidos e que permitiam a variação do DBCP em uma faixa possível de ser aplicada. Como esperado, para que fosse possível realizar a soldagem fixando o valor de corrente de soldagem em 322A e mantendo as velocidades de alimentação de arame já encontradas anteriormente, se fez necessário aumentar o valor de DBCP. Contudo relata-se que ao encontrar a relação entre DBCP e corrente média de soldagem, evidencia-se valores superiores a 90mm de DBCP, o que se torna impraticável, uma vez que o arame de soldagem perde sua direcionabilidade e toca no prolongador do bocal. Deste modo, ensaios de soldagem para as amostras com 35 e 40mm de amplitude foram descartados. Os parâmetros de soldagem para este conjunto de ensaios de soldagem são apresentados na Tabela 10, e o resultado do aspecto superficial de cada cordão de solda obtido está no Quadro 4.

Tabela 10 - Parâmetros de ensaios fixando a corrente de soldagem

Amostra	Amplitude [mm]	Frequência [Hz]	Va [m/min]	DBCP [mm]
25_25	25	1	2,2	25
25_54	25	1	2,2	54
30_25	30	1	2,7	25
30_75	30	1	2,7	75
30_90	30	1	2,7	90

Fonte: Autora (2020)

Quadro 4 - Cordões de solda resultantes da variação da amplitude de tecimento variando a DBCP



Fonte: Autora (2020)

Após serem realizados os ensaios de soldagem buscando depositar a mesma quantidade de material e manter a corrente média de soldagem fixa no valor de 322A (valor de referência, correspondente ao cordão de solda com amplitude de 20mm), notou-se a redução da energia de soldagem durante o processo. E como pode ser visualizado na Tabela 11, com a redução da energia de soldagem obteve-se a redução nos valores de todos os parâmetros geométricos estudados. Porém, a mudança significativa encontra-se no aspecto superficial e no perfil de penetração conforme apresentado no Quadro 5.

Tabela 11 - Medidas geométricas dos cordões de solda e parâmetros de soldagem obtidos com a variação do DBCP

Amplitude de tecimento [mm]	DBCP [mm]	Área Fundida [mm²]	Área de Reforço [mm²]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Largura [mm]	Corrente [A]	Tensão [V]	Energia [kJ/cm]
25	25	85,5	31,7	2,4	1,3	30,0	391	28,1	21,97
25	54	60,2	30,0	1,9	1,2	28,7	322	29,2	18,80
30	25	134,4	40,1	3,5	1,7	35,6	457	29,6	27,05
30	75	83,7	40,1	2,2	1,7	33,5	349	29,5	20,59
30	90	78,8	37,0	2,0	1,6	32,9	324	29,0	18,79

Fonte: Autora (2020)

Quadro 5 - 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: Autora (2020)

Ao avaliar as amostras, percebe-se que a disposição superficial com que o material se encontra depositado não se faz uniforme, indicando uma possível falta de energia de soldagem para a manutenção da poça líquida durante a técnica de tecimento transversal. Quando aumenta-se a DBCP, o processo de soldagem exige maior energia para consumir e depositar o material, logo espera-se que uma parcela de energia de soldagem que seria entregue à poça de fusão, seja utilizada para a fusão do eletrodo. Por tanto, supõe-se que com o aumento do DBCP, haja a formação de uma poça de fusão menor e mais viscosa, permitindo, assim, que o material seja solidificado mais rapidamente, acarretando em tal não uniformidade. Outro possível resultado

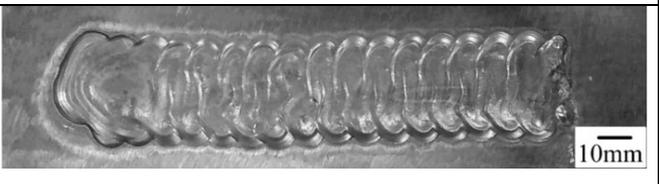
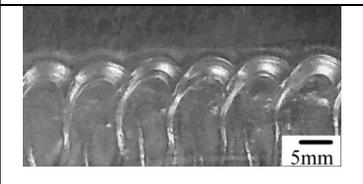
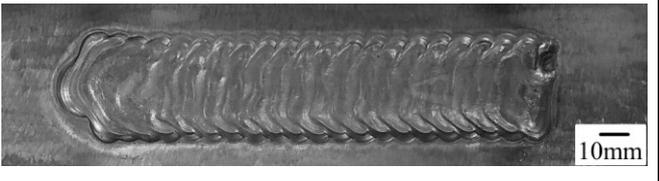
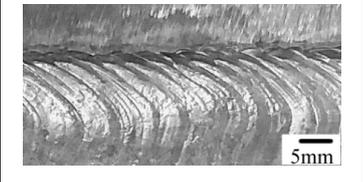
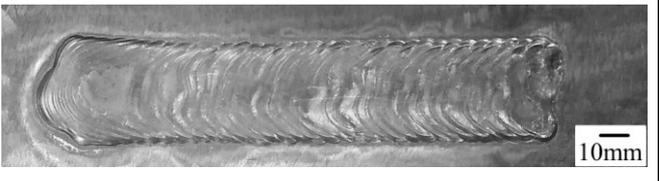
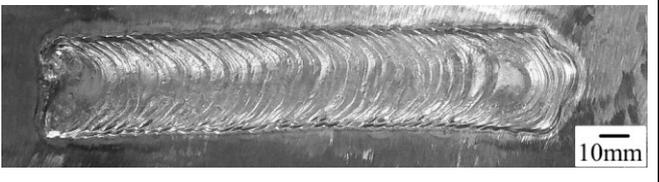
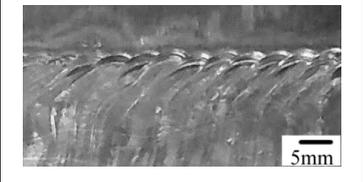
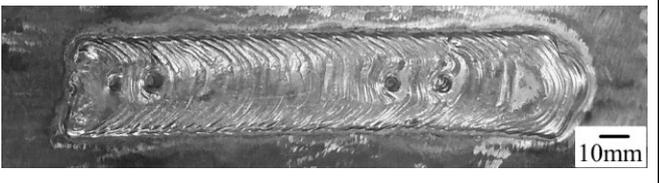
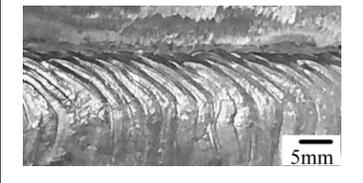
proveniente de uma poça de fusão menor é a redução da penetração, conforme presenciado. Destaca-se também que a penetração foi afetada, alterando seu perfil constante para um perfil com duas regiões mais profundas nas laterais, o que pode ser justificado através do movimento de tecimento. Ao realizar o tecimento, a tocha de soldagem passa duas vezes pela mesma região lateral e apenas uma vez pela região central, permitindo que as laterais sejam mais aquecidas que a região central do cordão. Então, com uma poça de fusão menor espera-se que a transferência de calor entre as regiões da poça de fusão seja menor, fazendo com que sejam visíveis as mudanças provocadas com a movimentação da tocha de soldagem. Posto isso, é possível inferir que além de uma quantidade mínima de material, também é necessária uma energia mínima de soldagem para garantir a uniformidade na distribuição do material ao longo da largura da solda, corroborando com os resultados de Teichmann (2016).

Apesar de não fazer parte do escopo desse trabalho, por se tratar de uma forma complexa de tecimento, tendo em vista a problemática anteriormente apresentada, uma futura discussão a ser realizada diz respeito sobre os efeitos da variação da velocidade de tecimento, sobre o processo de formação e manutenção da poça de fusão. Isto, fazendo com que a tocha de soldagem passe mais lentamente pela região central do cordão do que nas laterais. Com isso, é esperada a manutenção da poça líquida, realizando a ponte metálica entre laterais e região central do cordão de solda. Como resultado, estima-se que isso irá conferir ao cordão de solda perfis de reforço e penetração mais uniformes, especificamente para a penetração espera-se obter novamente o perfil plano encontrado, ou então atuar no formato necessário conforme aplicação.

5.2.3 Análise de amplitude de tecimento variando a frequência de tecimento

Após compreendido que há uma quantidade mínima de material a ser depositado e uma energia mínima de soldagem a ser fornecida para a obtenção de um cordão de solda com a técnica de tecimento transversal, no presente trabalho iniciou-se uma nova investigação, buscando inferir sobre as influências da frequência de tecimento sobre os cordões de solda. Para tal, foram realizados ensaios de soldagem com amplitude de 30mm, DBCP fixo de 25mm e frequências de oscilação de 0,6Hz até 1,6Hz, com incrementos de 0,2Hz, resultando nos cordões de solda apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Cordões de solda resultantes da variação da frequência de tecimento

Frequência de tecimento [Hz]	Cordões de solda	Margem do cordão de solda
0,6		
0,8		
1,0		
1,2		
1,4		
1,6		

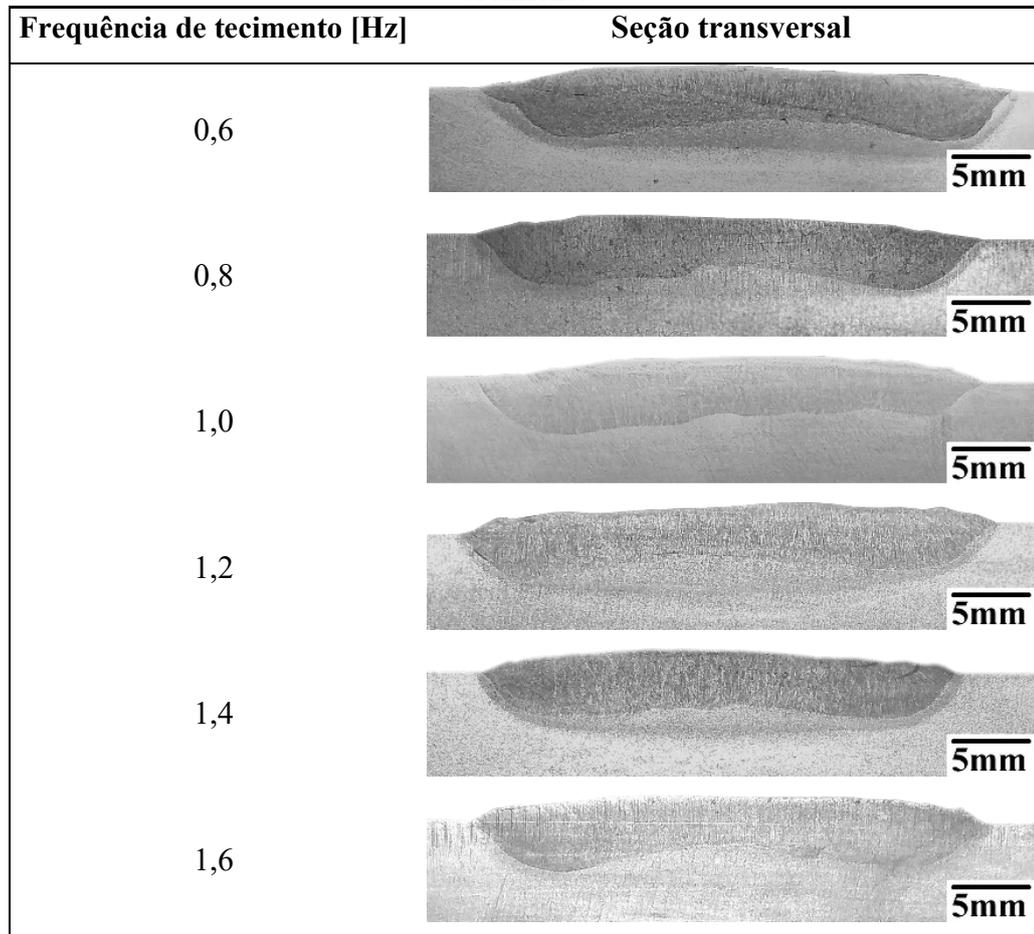
Fonte: Autora (2020)

Ao analisar o Quadro 6 observa-se uma nítida alteração na margem dos cordões. Esta alteração diz respeito à redução do efeito escamado com o aumento da frequência de tecimento.

Outro ponto de discussão diz respeito aos resultados obtidos nos ensaios com frequências de 0,6Hz e 1,6Hz. Na condição de 0,6Hz é possível observar uma linha de refusão na área fundida (Quadro 7). Isto sugere que o movimento para a frequência de tecimento de 0,6Hz foi suficientemente lento ao ponto de a poça de fusão sofrer solidificação, e quando a tocha retornou para a lateral, ocorreu novamente a fusão do material. Naturalmente, uma análise mais criteriosa deve ser realizada afim de verificar as influências desse resultado sobre as propriedades mecânicas do cordão de solda, o que foge do escopo do presente trabalho. No

entanto, cabe salientar que independente da área fundida ter sofrido refusão, em nenhuma amostra foi encontrada inclusões de escória.

Quadro 7 - Seções transversais dos cordões de solda resultantes da variação da frequência de tecimento



Fonte: Autora (2020)

Já para a condição de maior frequência de oscilação, 1,6Hz, observa-se a falta de deposição de material na região central do cordão de solda (Quadro 6Quadro 7). Com o aumento da velocidade de oscilação em função do aumento frequência de tecimento, provavelmente o arco voltaico tenha se deslocado mais rapidamente que a capacidade da manutenção da ponte metálica entre as laterais. Além disso, quando analisada a área fundida através da seção transversal para esse caso (Tabela 12), nota-se que o cordão de solda resultante apresenta o menor valor da análise, sugerindo que com essa frequência de tecimento a dissipação do calor através das laterais do cordão é menor, reduzindo assim a capacidade de fusão. Na são apresentadas os dados obtidos com a variação da frequência de tecimento de 0,6 a 1,6Hz, com incrementos de 0,2Hz para os seguintes parâmetros fixos: tensão de soldagem 30x, velocidade

linear de soldagem: 30cm/min, amplitude de tecimento: 30mm, velocidade de alimentação de arame de 2,7m/min, sendo esse arame de 2,4mm de diâmetro.

Tabela 12 - Medidas geométricas dos cordões de solda e parâmetros de soldagem obtidos com a variação da frequência de tecimento

Frequência [Hz]	Área Fundida [mm ²]	Área de Reforço [mm ²]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Largura [mm]	Corrente [A]	Tensão [V]	Energia [kJ/cm]
0,6	128,3	41,2	3,7	1,5	35,6	460	27,9	25,67
0,8	126,1	41,7	3,3	1,5	34,6	467	27,2	25,40
1,0	134,4	40,1	3,5	1,7	35,6	457	29,6	27,05
1,2	122,1	42,7	3,0	1,5	34,6	462	28,1	25,96
1,4	117,1	40,2	2,9	1,5	33,1	460	27,9	25,67
1,6	111,3	42,6	2,9	1,5	33,5	455	28,0	25,48

Fonte: Autora (2020)

Ao analisar os dados presentes na Tabela 12, percebe-se que os valores de reforço e área de reforço não sofrem mudanças significativas. Já por outro lado, a área fundida apresenta uma clara tendência de redução com o aumento da frequência de oscilação. Este resultado, associado à uma leve redução da largura do cordão de solda, sugere que ao aumentar a frequência de oscilação, o arco voltaico permanece por menos tempo em um mesmo ponto sobre a peça de trabalho/poça de fusão. Isto faz com que o calor seja melhor distribuído entre as regiões laterais e centrais. Outro ponto que corrobora com esse efeito é a redução da penetração com o aumento da frequência de tecimento. Para o caso da frequência de tecimento de 1,6Hz tem-se a diminuição do valor da penetração em 22%, quando comparado ao caso da frequência de tecimento de 0,6Hz. Por outro lado, tomando como referência o ensaio realizado com a frequência de tecimento de 1Hz, tem-se o aumento da penetração em 5,5% com a aplicação da frequência de tecimento de 0,6Hz e, em contra partida, a redução em 18% para o emprego da frequência de tecimento de 1,6hz.

Deste modo destaca-se que para as condições de análise, de DBCP de 25mm, diâmetro de eletrodo de 2,4mm e a combinação de eletrodo, fluxo e metal de base, existe uma faixa de operação de frequência de oscilação a ser seguida.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver a tecnologia necessária capaz de realizar a oscilação da tocha de soldagem de arco submerso para, assim, avaliar os efeitos da aplicação da técnica de tecimento transversal quanto aos aspectos geométricos dos cordões de solda. Os principais resultados obtidos com a realização deste trabalho são:

- Quanto a idealização do projeto conceitual da bancada de ensaios, pode-se concluir que a atividade foi realizada de forma completa, uma vez que se atingiu o objetivo de desenvolver um dispositivo de deslocamento modular, o qual permite trabalhar três técnicas de soldagem: puxando-empurrado, *Switch Back* e tecimento transversal;
- Conclui-se que se obteve um dispositivo de deslocamento compatível com as necessidades de aplicação. Com capacidade de movimentação linear, apresentando velocidade de soldagem de até 120cm/min, amplitudes de tecimento de até 40mm e frequências de tecimento que variam de 2,5Hz para 40mm de amplitude até 10Hz para 10mm de amplitude;
- Pode-se concluir que a bancada experimental para os ensaios de soldagem concebida atendeu as expectativas do trabalho, permitindo a execução do processo SAW com tecimento transversal;
- Foi possível caracterizar a relação entre a velocidade de alimentação de arame e a amplitude de tecimento, a qual apresenta comportamento quadrático. Deste modo, se fez possível definir previamente a velocidade de alimentação de arame adequada para diferentes amplitudes de tecimento;
- Como esperado, o aumento da amplitude de tecimento acarreta no aumento da largura dos cordões de solda, sendo que a relação entre a amplitude de tecimento e a largura medida apresenta comportamento linear, facilitando o projeto de juntas. Para as condições de ensaio foram encontradas que a largura do cordão de solda é

aproximadamente 5mm maior que a amplitude de tecimento, semelhante a resultados com a técnica de fita aplicada ao SAW;

- Para realizar o tecimento transversal, nas condições estudadas neste trabalho, é necessário depositar uma quantidade mínima de material para a obtenção de um cordão de solda livre de descontinuidades. Tal valor, independe da amplitude de tecimento e pode ser descrito em função de sua unidade de área. O qual pode ser apresentado como aproximadamente $0,9 \text{ g/mm}^2$;
- Foi verificado que para a manutenção adequada da poça de fusão com a técnica de tecimento é necessária uma quantidade mínima de energia de soldagem, conferindo ao cordão perfis de penetração e reforço regulares;
- Aumentar a energia de soldagem para atingir maiores amplitudes de tecimento, implica no aumento da área fundida, área de reforço e penetração. Contudo, ao normalizar os valores de penetração em função da energia de soldagem verifica-se que o perfil de penetração tende a um comportamento constante;
- Ao aplicar diferentes frequências de tecimento verifica-se a existência de um limite operacional. Para as condições avaliadas neste trabalho o valor encontra-se entre 0,6 e 1,4Hz.
- Com a variação da frequência de oscilação verifica-se uma mudança na distribuição superficial do material depositado. O aumento da frequência de tecimento resulta na diminuição do efeito escamado sobre o cordão de solda, o que pode ser evidenciado nas margens dos mesmos;
- O aumento da frequência de tecimento atua no decréscimo dos valores de penetração, largura e área fundida do cordão de solda, uma vez que o arco voltaico permanece menos tempo sobre uma mesma região da poça de fusão/metal de base;
- Nas condições empregadas no presente trabalho não foram encontradas inclusões de escória nos cordões de solda realizados com a técnica de tecimento.

- 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.
- Durante o processo SAW com tecimento também não foram noticiadas dificuldades de escape dos gases provenientes do fluxo, deste modo, obteve-se um cordão livre de porosidades. Destaca-se também a ausência de tricas e outros eventuais problemas que poderiam surgir com a técnica de tecimento transversal. Diante disso, avalia-se que a técnica de tecimento transversal no processo SAW é perfeitamente aplicável.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados obtidos com este trabalho e as conclusões apresentadas, sugere-se como tema para futuros trabalhos:

- Verificar a influência do movimento de tecimento sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas dos cordões de solda;
- Executar ensaios de soldagem com a técnica de tecimento transversal em chanfros;
- Aplicar o tecimento triangular com variação de velocidade entre as regiões centrais e laterais do movimento, para conferir ao cordão de solda diferentes perfis de penetração e reforço;
- Utilizar a técnica de oscilação transversal com diferentes formas de onda;
- Realizar ensaios de soldagem com o uso do tecimento sincronizado;
- Avaliar a distribuição de calor promovida com a técnica de tecimento no processo SAW;
- Utilizar as tendências obtidas de perfis de penetração, reforço e largura para realizar a previsibilidade das características geométricas do cordão solda, sendo possível assim a modelagem prévia do cordão de solda antes da execução da soldagem;
- Realizar a análise quantitativa dos aumentos dos custos do processo de soldagem com a técnica de tecimento transversal e comparar com os ganhos no aumento da produtividade, aqui representados com o aumento da taxa de deposição;
- Fazer uso do dispositivo de deslocamento de tocha para realizar estudos acerca da técnica de tecimento longitudinal, conhecida como *Switch Back*, no processo SAW;

- Empregar o recurso de ângulo de ataque, desenvolvido no dispositivo de deslocamento, para avaliar as influências da técnica “puxando / empurrando” sobre o processo SAW.

REFERÊNCIAS

- ANG, Zhidong et al. A study on the mechanisms of the CWW SAW process. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 94, n. 1-4, p.1161-1169, 24 ago. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0967-9>.
- ASTM A36 Steel. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 22, n. 1, p.72-86, mar. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2201.08>
- CHANDEL, R. S.; SEOW, H. P.; CHEONG, F. L. Effect of increasing deposition rate on the bead geometry of submerged arc welds. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 72, n. 1, p. 124-128, 1997
- CHANDEL, R. S. Mathematical modeling of melting rates for submerged arc welding. **Welding Journal**, v. 66, n. 5, p. 135, 1987.
- CHANDEL, R. S. The Effect of Process Variables on the Flux Consumption in Submerged Arc Welding. **Materials And Manufacturing Processes**, [s.l.], v. 13, n. 2, p.181-188, mar. 1998. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10426919808935234>.
- CHEN, Yuxi et al. Effect of weave frequency and amplitude on temperature field in weaving welding process. **Int J Adv Manuf Technol**, London, v. 75 p.803-813, ago. 2014.
- CORAINI R. , Kobayashi Y., Gonçalves G. Influência do Tipo de Chanfro, Tecimento e Sentido de Laminação na Distorção Angular em Soldagem GMAW-P Robotizada de Alumínio. **Soldagem e Inspeção**. São Paulo, Vol.16, No. 2, p.123-136, Abr/Jun 2011
- CUNHA, T. V. da; 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>

GUZMAN-FLORES, Isidro et al. Effect of Torch Weaving on the Microstructure, Tensile and Impact Resistances, and Fracture of the HAZ and Weld Bead by Robotic GMAW Process on

HINKEL, J. E.; FORSTHOEFEL, F. W. High current density submerged arc welding with twin electrodes. **Welding Journal**, v. 55, n. 3, 1976.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição** 2008 <http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf>

KIRAN, D. V. B. B. & D. A. Influence of process variables on weld bead quality in two wire tandem submerged arc welding of HSLA steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 10, p. 2041-2050, 2012.

KIRAN, D. V, et al A study on the quality of two-wire tandem submerged arc welds under iso-heat input conditions. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 78, n. 1-4, p.53-62, 4 dez. 2014. Springer Nature.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6644-3>.

MOHAMMADIJOO, M. et al. Influence of cold-wire tandem submerged arc welding parameters on weld geometry and microhardness of microalloyed pipeline steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 88, n. 5-8, p. 2249-2263, 2017.

NUGENT, RM, DYBAS, RJ, HUNT, JF, MEYER D (2009) Submerged arc welding. **AWS Welding Handbook**, 8th ed. Am. Weld. Soc., Miami

RODE, A C; CUNHA T V; FERREIRA, G S; CAMPAGNI R. Projeto, Desenvolvimento e Construção de uma Bancada para o Processo SAW com Tecimento. **XLV CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem**. Camboriú-SC, Brasil, 2019

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

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

SHARMA, A.; ARORA, N.; MISHRA, B. K. Statistical modeling of deposition rate in twin-wire submerged arc welding. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 223, n. 7, p. 851-863, 2009.

SRIKARUN, B; MUANGJUNBUREE, P. The Comparison of Weld Metal with and without Additional Powder Using Submerged Arc Welding. **5 th International Conference On Business And Industrial Research ICBIR**, Bangkok, Thailand, p.242-247, 2018

SIEWERT, T. A., TREVISAN R. E., PURTSCHER P. T. The Effect of Electrode Weave Procedure on HY-80 GMA Welds Although the weld interface area displays a lower toughness than the base material or weld center, the fractures exhibit acceptable ductility - Fracture and Deformation Division, National Bureau of Standards, **Welding research supplement** Nova York p. 203 -209-s, 1987.

TASALLOTI, H.; KAH, P.; MARTIKAINEN, J.. Effects of welding wire and torch weaving on GMAW of S355MC and AISI 304L dissimilar welds. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 71, n. 1-4, p.197-205, 22 nov. 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5484-x>.

EICHMANN, 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. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/172363/343422.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

TSUYAMA, T.; NAKAI, K.; TSUJI, T. Development of submerged arc welding method using hot wire. **Welding in the World**, v. 58, n. 5, p. 713-718, 2014.

TUŠEK, J ; SUBAN, M; High-productivity multiple-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition **Journal of Materials Processing Technology** v.133, p. 207–213, 2003

TUŠEK, J.; UMEK, I.; BAJCER, B. Weld-cost saving accomplished by replacing single-wire submerged arc welding with triple-wire welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 10, n. 1, p. 15-22, 2005

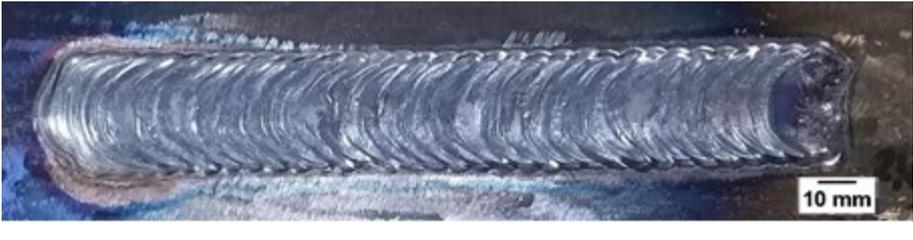
WEISSELBERG, A. Principles of rapid submerged arc welding, (Grundlagen der UP-Schnellschweissung) **ZIS (Zentralinst SchweissTech DDR) Mitt** v. 13, n. 8, ago, p 1095-1104, 1971

WEISSELBERG, A. Vertical submerged-arc butt welds. **Welding International**, [s.l.], v. 3, n. 11, p.997-1002, jan. 1989. Informa UK Limited.
<http://dx.doi.org/10.1080/09507118909449069>.

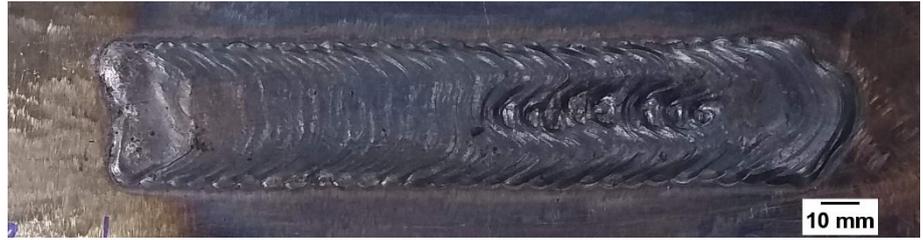
XU, W. H. et al. Characteristics and mechanisms of weld formation during oscillating arc narrow gap vertical up GMA welding. **Welding In The World**, [s.l.], v. 61, n. 2, p.241-248, 23 jan. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-017-0425-1>.

YAN, Chunyan et al. Influence of welding parameters on weld appearance and mechanical properties in twin-wire tandem submerged arc welding of HSLA steel. **Advanced Materials Research**, Switzerland, v. 753-755, p.338--62, ago. 2013

APÊNDICE A – Cordões de solda obtidos para o levantamento da curva experimental entre a relação de velocidade de alimentação de arame e a amplitude de tecimento

A	Va	Cordões de solda
0mm	1,7 m/min	
10mm	1,7 m/min	
20mm	1,7m/min – 2,0m/min	
20mm	1,8m/min – 1,9m/min	
25mm	2,0 m/min – 2,1m/min	
25mm	2,2m/min	

30mm 2,5m/min -
2,8m/min



30mm 2,6m/min-
2,7m/min



35mm 3,4m/min -
3,6m/min



40mm 3,6m/min



**APÊNDICE B – Medidas coletadas provenientes das análises das seções transversais
para três faces de cada amostra**

Análise	Amostra	Face	Área de fusão [mm²]	Área de reforço [mm²]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Largura [mm]	
DBCP	25_25	0	91,3	31,3	2,5	1,3	30,0	
		1	80,5	30,6	2,5	1,3	30,0	
		2	84,9	33,3	2,5	1,4	30,2	
	25_54	0	61,1	29,0	1,7	1,1	28,6	
		1	58,7	31,0	2,0	1,3	29,0	
		2	60,9	30,0	2,1	1,3	28,7	
	30_25	0	126,5	39,9	3,8	1,7	34,1	
		1	135,3	39,2	3,5	1,7	36,1	
		2	141,5	41,3	3,4	1,7	36,8	
	30_75	0	78,0	37,9	2,5	1,8	32,9	
		1	79,8	42,1	1,7	1,8	33,9	
		2	93,5	40,5	2,5	1,7	33,8	
	30_90	0	72,3	35,1	1,9	1,5	32,9	
		1	85,8	40,0	2,2	1,6	33,1	
		2	78,4	35,9	2,1	1,7	32,7	
	FREQUENCIA	0,6	0	123,4	39,4	3,0	1,6	35,6
			1	119,7	41,0	4,2	1,5	34,5
			2	142,1	43,5	4,1	1,6	36,9
0,8		0	129,8	44,7	3,3	1,7	34,9	
		1	116,8	39,1	3,3	1,6	34,3	
		2	131,9	41,4	3,3	1,2	34,8	
1,0		0	126,5	39,9	3,8	1,7	34,1	
		1	135,3	39,2	3,5	1,7	36,1	
		2	141,5	41,3	3,4	1,7	36,8	
1,2		0	118,2	41,4	3,1	1,5	35,0	

	1	120,6	42,8	3,2	1,5	34,7
	2	127,8	44,0	2,9	1,6	34,2
	0	120,9	41,6	2,9	1,6	32,5
1,4	1	120,2	41,9	3,0	1,5	33,8
	2	110,4	37,2	3,0	1,6	33,1
	0	110,6	39,9	2,6	1,4	33,4
1,6	1	102,3	37,7	3,0	1,5	33,7
	2	121,1	50,3	3,2	1,6	33,5
	0	44,8	25,3	2,5	2,4	15,9
0	1	55,6	29,1	3,0	2,6	16,0
	2	52,2	28,5	2,6	2,6	16,2
	0	49,1	24,8	1,9	2,0	18,5
10	1	59,1	27,7	1,9	2,0	19,9
	2	54,3	27,0	2,0	2,1	18,9
	0	69,1	28,2	2,2	1,5	25,3
20	1	83,0	32,6	2,2	1,9	26,0
	2	72,7	29,9	2,4	1,6	25,7
	0	91,3	31,3	2,5	1,3	30,0
VA	25	80,5	30,6	2,5	1,3	30,0
	2	84,9	33,3	2,5	1,4	30,2
	0	126,5	39,9	3,8	1,7	34,1
30	1	135,3	39,2	3,5	1,7	36,1
	2	141,5	41,3	3,4	1,7	36,8
	0	179,9	61,1	4,0	1,9	39,9
35	1	199,4	54,9	4,7	1,8	41,2
	2	172,6	54,1	4,4	1,8	39,0
	0	220,2	71,0	4,9	1,7	44,3
40	1	220,7	74,6	5,1	2,2	45,6
	2	229,3	82,4	5,2	2,4	46,1