

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

EUCLIDES ANTONIO CAGNINI NETO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MECANIZADO PARA SOLDAGEM DE
ELETRODO REVESTIDO

Joinville

2018

EUCLIDES ANTONIO CAGNINI NETO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MECANIZADO PARA SOLDAGEM DE
ELETRODO REVESTIDO

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Naval do Centro, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha.

Joinville

2018

EUCLIDES ANTONIO CAGNINI NETO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MECANIZADO PARA SOLDAGEM DE
ELETRODO REVESTIDO

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado e aprovado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 05 de Julho de 2018.

Dr. Luis Fernando Peres Calil
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Dr. Tiago Vieira da Cunha
Orientador

Dr. Carlos Mauricio Sacchelli
Membro

Dr. Gabriel Benedet Dutra
Membro

RESUMO

Os processos de soldagem a arco elétrico estão cada vez mais associados a sistemas automatizados. Estes sistemas buscam reproduzir as operações realizadas pelo ser humano nas situações de soldagens manuais. A automação nesta área tem buscado alcançar a sensibilidade humana, reproduzindo os movimentos realizados pelo soldador. Apesar de atualmente ser considerado improdutivo, o processo Eletrodo Revestido, ainda tem um grande campo de atuação, principalmente porque permite, através de seu revestimento, adicionar elementos de liga no cordão de solda, podendo alterar as características de resistência mecânica. Assim, neste sentido, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema mecanizado de soldagem a arco elétrico com movimento de tecimento por eletrodo revestido, com o objetivo de permitir soldas padronizadas aplicadas em pesquisas nesse processo. O sistema desenvolvido permite através de parâmetros de soldagem como velocidade de mergulho, velocidade de avanço e parâmetros de tecimento realizar cordões de solda e para tanto o software de controle foi programado. O sistema foi concebido para operar de forma similar ao praticado por soldadores, possibilitando a soldagem em diferentes ângulos. Como sistema motriz, motores da categoria NEMA 17 foram dimensionados e utilizados. Toda a parte mecânica do projeto desenvolvida em CAD, foi fabricada em chapas de aço 3 mm, visando a redução de custos. Um grande número de peças encontradas comercialmente foi empregado na construção do protótipo, como juntas, rolamentos e barras roscadas. A utilização destes elementos contribuiu para um projeto de custo reduzido. O resultado do presente projeto foi um sistema robusto, de alto desempenho, que além de executar as funcionalidades previstas nos objetivos, abriu um novo campo de pesquisas.

Palavras-chave: Soldagem. Automação. Eletrodo Revestido. Shielded Metal Arc Welding (SMAW).

ABSTRACT

The processes of arc welding are increasingly associated with automated systems. These systems seek to reproduce the operations performed by the human being in situations of manual welding. Automation in this area has sought to achieve human sensitivity, reproducing the movements performed by the welder. Although it is currently considered unproductive, the Coated Electrode process still has a large field of action, mainly because it allows, through its coating, to add alloying elements in the weld bead, which can alter the characteristics of mechanical resistance. Thus, in this sense, the present work presents the development of a mechanized electric arc welding system with oscillation movement by coated electrode, with the objective to allow standardized welds applied in researches in this process. The developed system allows through welding parameters such as speed of dive, speed of advance and parameters of fabrication to realize beads of weld and for so much the software of control was programmed. The system is designed to operate in a manner similar to that practiced by welders, allowing welding at different angles. As a driving system, motors of the NEMA 17 category were sized and used. The entire mechanical part of the CAD-developed design was made of 3 mm steel sheets, aimed at reducing costs. A large number of commercially found parts were employed in the construction of the prototype, such as joints, bearings and threaded rods. The use of these elements contributed to a low cost project. The result of this project was a robust, high performance system that, in addition to executing the functions provided in the objectives, opened a new field of research.

Keywords: Welding, Automation, Shielded Metal Arc Welding (SMAW).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.	15
Figura 2 – Movimentos do eletrodo durante o processo de soldagem.	16
Figura 3 – Movimento de tecimento.....	17
Figura 4 – Robô antropomórfico utilizado na soldagem SMAW.....	20
Figura 5 – Mecanismo de Soldagem por gravidade vertical.	21
Figura 6 - Mecanismo de Soldagem por gravidade horizontal.....	21
Figura 7 – SA - ER.....	22
Figura 8 – Foto esquemática, Mecanismo proposto por Lee et al. (2006).	23
Figura 9 – Figura Real, Mecanismo proposto por Lee et al. (2006).....	23
Figura 10 – Esquema do porta eletrodo utilizado no sistema SA-ER.....	30
Figura 11 – Porta eletrodo baseado em mandril.	30
Figura 12 – Vistas Isométrica Frontal e Traseira do mecanismo.	31
Figura 13 – Detalhamento superior do mecanismo.	32
Figura 14 – Reforçadores Traseiros.....	32
Figura 15 – Reforçador do eixo Y.....	33
Figura 16 – Detalhamento do espaço reservado para a parte eletrônica, parte traseira.....	33
Figura 17 - Detalhamento do espaço reservado para a parte eletrônica, parte frontal.	34
Figura 18 – Mordentes do porta eletrodo.	34
Figura 19 – Sistema de porta eletrodo completo.	35
Figura 20 – Espaço reservado para o motor, Eixo Z.....	36
Figura 21 – Espaço reservado para o motor do Eixo Y.....	36
Figura 22 – Sistema utilizado para substituir a porca de tração.	37
Figura 23 – Sistema de deslocamento.	38
Figura 24 - Ângulo do mecanismo.	41
Figura 25 – Ângulo de rosca do fuso.....	41
Figura 26 – Gráfico do motor escolhido, modelo 17PM-K442U.....	44
Figura 27 – Sistema de coordenadas para cálculo de tensões no fuso.....	47
Figura 28 – Ilustração do fenômeno Stick-Slip.....	49
Figura 29 – Gráfico Relação do fenômeno Stick-Slip.....	50
Figura 30 - Distâncias entre os rolamentos e fuso, Eixo Z.....	51

Figura 31 - Distâncias entre os rolamentos e fuso, Eixo Y.	51
Figura 32 – Sequência da interface para referenciamento.....	54
Figura 33 - Sequência da interface para posicionamento manual.	54
Figura 34- Sequência da interface para nova soldagem.	55
Figura 35 – Fluxograma da lógica do Software.	56
Figura 36 – Vistas Frontais do mecanismo real.	57
Figura 37 – Vista Lateral e Isométrica Traseira do mecanismo real.	58
Figura 38 - Detalhamento do sistema responsável pelo movimento de tecimento.	58
Figura 39 – Gravação de auxílio a regulagem dos ângulos de soldagem.....	59
Figura 40 – Cordão de solda realizado manualmente.....	60
Figura 41 – Cordão de solda obtido sem o movimento de tecimento.	61
Figura 42 - Cordão de solda obtido com o movimento de tecimento.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos Sistemas de soldagem a arco elétrico.	18
Tabela 2 – Dados das soldagens para aquisição de dados.	26
Tabela 3 – Comparação das características dos equipamentos similares.	28
Tabela 4 – Comparação de características de soluções para movimentos independentes.	28
Tabela 5 - Comparação de características de soluções do sistema de porta eletrodo.	29
Tabela 6 – Dados barra roscada M6.	42
Tabela 7 – Condições de operação para movimento de mergulho.	43
Tabela 8 - Condições de operação para movimento de tecimento.	45
Tabela 9 – Relação de peças encontradas comercialmente.	52
Tabela 10 – Parâmetros de Soldagem utilizados nos ensaios de validação.	60

LISTA DE SÍMBOLOS

n_t	Número de roscas engajadas
σ'	Tensão de Von Misses
σ_x	Tensão normal ao eixo x
σ_y	Tensão normal ao eixo y
σ_z	Tensão normal ao eixo z
τ_{max}	Máxima tensão de cisalhamento
τ_{xy}	Tensão cisalhante ao eixo xy
τ_{yz}	Tensão cisalhante ao eixo yz
τ_{zx}	Tensão cisalhante ao eixo zx
D	Diâmetro do fuso
dm	Diâmetro médio do fuso
Dr	Diâmetro menor do fuso
F	Força Total
f	Coefficiente de atrito entre o fuso e a porca
Fe	Força Externa
fg	Coefficiente de atrito entre a guia e o rolamento linear
FS	Fator de Segurança
g	Gravidade
i	Relação de redução
Jf	Momento de inércia do fuso
Jm	Momento de inércia da massa
Jmotor	Momento de inércia do motor
Jtotal	Momento de inercia devido a carga
L	Comprimento do fuso
m	Massa deslocada
P	Passo do fuso
T	Torque total requerido
Ta	Torque necessário devido à aceleração
ta	Tempo de aceleração
Tc	Torque necessário devido à carga
Vl	Velocidade linear
Vm	Velocidade requerida
α	Ângulo da rosca
θ	Ângulo do mecanismo
ρ	Densidade do material do fuso

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AWS -	American Welding Society
CAD -	Computer-aided design
CNC -	Computer Numeric Control
LTS -	Laboratório de Tecnologia da Soldagem
NEMA -	National Electrical Manufacturers Association
SA-ER -	Sistema Automático para Soldagem com Eletrodo Revestido
SMAW -	Shielded metal arc Welding

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODOS REVESTIDOS	15
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS NA SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO QUANTO AO NÍVEL DE AUTOMAÇÃO	17
2.3	SISTEMAS SIMILARES	19
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	25
3.1	REQUISITOS DE PROJETO	25
3.2	ANALISE DE BENCHMARK.....	27
3.3	DESENVOLVIMENTO DO MECANISMO DE SOLDAGEM DE ELETRODO REVESTIDO	31
3.4	DIMENSIONAMENTO DO MOTOR.....	38
3.5	FENÔMENO STICK-SLIP	49
3.6	AQUISIÇÃO DOS MATERIAIS E MONTAGEM	52
3.7	SOFTWARE DE CONTROLE	53
4	PROTÓTIPO	57
4.1	ENSAIOS DE VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO	59
5	CONCLUSÃO	63
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Soldagem é o processo de união de metais, considerado mais prático, confiável e eficiente, utilizado nos mais variados tipos de indústrias. O processo de solda consiste em fundir localmente o metal de base, formando uma poça de fusão. Geralmente junto à poça de fusão é adicionado mais material, que serve como preenchimento. Ao resfriar a poça de fusão, juntamente com o material de adição, forma-se uma única peça.

A indústria conta com vários processos de soldagem. Cada processo exhibe diferentes aplicações, vantagens e desvantagens. Dentro das várias opções, as mais comumente empregadas são as que utilizam arco voltaico como fonte de calor para a fusão dos materiais. O eletrodo revestido, que é tópico deste trabalho foi o primeiro processo a receber aprimoramentos tecnológicos, visando aumento de produtividade e qualidade (ESAB, 2005).

A técnica de soldagem conhecida como soldagem com eletrodo revestido, ou também por Shielded Metal Arc Welding (SMAW), é um método amplamente utilizado no processo de manufatura. Utiliza-se um eletrodo composto de uma alma de metal de adição revestido com fluxo. Esse revestimento serve para proteção da alma metálica, assim como para a poça de fusão e também, para sustentar e estabilizar o arco voltaico entre a peça de trabalho e o eletrodo. Esse revestimento também proporciona uma camada de proteção do cordão de solda, conhecida como escória.

Apesar de a técnica SMAW ser considerada como de baixa produtividade, seu uso é recorrente em indústrias como: a nuclear, aeroespacial, automotiva, naval, de transporte e off-Shore (RATHI; HUNNY, 2015). A grande versatilidade do eletrodo revestido faz com que ainda seja um grande competidor entre os variados tipos de soldagem. Visto que seu uso ainda é recorrente dentro de importantes ramos industriais. Com ele pode-se, através dos componentes de seu fluxo, adicionar elementos de liga no cordão de solda.

Este processo demanda pouquíssimo investimento inicial, pois seu equipamento é relativamente simples, barato e portátil. Por possuir um equipamento portátil, este processo pode ser empregado em operações de campo. A alternativa de utilizá-lo em campo possibilita soldas de manutenção e construção, tornando-o, assim, um processo, ainda competitivo.

A interação do soldador durante o processo de solda causa interferência nos resultados obtidos. Cada cordão de solda exibe diferentes padrões devidos aos diferentes fatores inerentes ao processo de solda. A reprodução de cordões de solda idênticos é impraticável, já que o melhor soldador, inclusive, não se mostra capaz de soldar com absoluta repetitividade o processo (LIMA II; BRACARENSE, 2011).

Portanto, a tentativa de mecanizar a técnica de soldagem SMAW se mostra necessária, para que posteriores estudos possam apresentar resultados válidos. Mecanizar um processo de solda significa tornar o equipamento capaz de iniciar, controlar e mover o arco de forma automática (JENNEY; O'BRIEN, 2001). Com a mecanização a função do soldador será apenas fazer observações visuais e ajustes ocasionais. Tornando, assim, um processo de solda passível de estudos, com garantia de resultados verdadeiros, devido à capacidade de repetitividade.

Para mecanizar de forma efetiva o processo SMAW, um projeto de desenvolvimento foi executado. Durante este processo, uma análise de benchmark foi realizada e os requisitos de projetos definidos. Por fim, com o auxílio de um software de desenho também conhecido como Computer-aided design (CAD), o projeto mecânico foi desenvolvido. Assim, possibilitando um projeto capaz de atender as necessidades e requisitos de um projeto para futuros estudos.

Com o desenvolvimento do projeto estruturado, os materiais e equipamentos foram adquiridos para montagem do sistema. Juntamente com a montagem mecânica, o projeto eletrônico e de software para controle do equipamento foram desenvolvidos. Os parâmetros de soldagem como velocidade de mergulho, velocidade de avanço e características do movimento de tecimento são dados de entrada para o funcionamento do equipamento, sendo esses fatores importantes para a avaliação do SMAW. Possibilitando assim, um controle eficiente para validação de dados e a garantia de maior veracidade de futuras pesquisas na área.

De forma geral, concluiu-se que o processo de soldagem SMAW, tornar-se-á um processo de alta repetitividade. Visto que através deste trabalho será desenvolvido um projeto para mecanização deste processo, capaz de reproduzir cordões de solda de forma consistente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Tem-se como objetivo geral deste trabalho o desenvolvimento de um equipamento para realização de soldagem SMAW mecanizada, capaz de soldar de forma consistente e com alta repetitividade.

1.1.2 Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo geral e o conhecimento que se espera adquirir com a realização deste trabalho, o seu objetivo geral desdobra-se nos seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma Análise de Benchmark
- Definir requisitos do projeto;
- Desenvolver um projeto mecânico em software CAD;
- Realizar a aquisição dos materiais e montagem do equipamento;
- Implementar o software de controle;
- Executar ensaios de validação quanto ao seu funcionamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No processo de soldagem de materiais metálicos por fusão, a fonte de calor mais empregada é o arco elétrico (MARQUES et al, 2005). O arco elétrico, também conhecido como arco voltaico no campo da soldagem, é o resultado de uma ruptura dielétrica de um meio normalmente isolante, como o ar, produzindo uma descarga de gás ionizado conhecido como plasma, resultando em um fluxo de corrente elétrica. Essa descarga elétrica produz energia térmica de fácil controle com dimensões reduzidas que permite a fusão de materiais em zonas restritamente determinadas. A fácil obtenção do arco voltaico através de equipamentos de custo relativamente baixos, o torna a fonte de calor mais amplamente utilizada na soldagem.

O arco elétrico foi um dos primeiros processos de soldagem utilizado para união de peças metálicas. Sua utilização data desde 1865 através de uma patente. Nesta patente, Wilde, de origem Britânica, obteve a união com sucesso de duas pequenas peças de ferro utilizando um fluxo de corrente elétrica que passava entre elas (ESAB, 2005), produzindo assim uma solda por fusão. A primeira patente de soldagem baseando-se em um arco elétrico estabelecido entre peça a ser soldada e um eletrodo data dos anos 1880. Onde um eletrodo de carvão era manipulado manualmente sobre o metal formando o cordão de solda. Posteriormente arames nus foram utilizados com o mesmo objetivo, estes eram consumidos na poça de fusão e tornavam-se parte do metal de solda.

A prática da utilização de eletrodos metálicos nus resultava em cordões de solda com baixa qualidade. Esta baixa qualidade era devido à formação de óxidos e nitretos que se formavam por causa da presença de nitrogênio e oxigênio na atmosfera. Logo, a proteção do arco contra os agentes atmosféricos foi concebida. Em 1904, com revestimento de material argiloso (cal), o primeiro eletrodo revestido foi desenvolvido e patenteado por Oscar Kjellberg (ESAB, 2005). A contínua busca pelo aumento da produtividade aliada a melhores propriedades de solda culminaram no desenvolvimento do eletrodo revestido que foi considerado um dos mais significativos avanços na soldagem por arco elétrico.

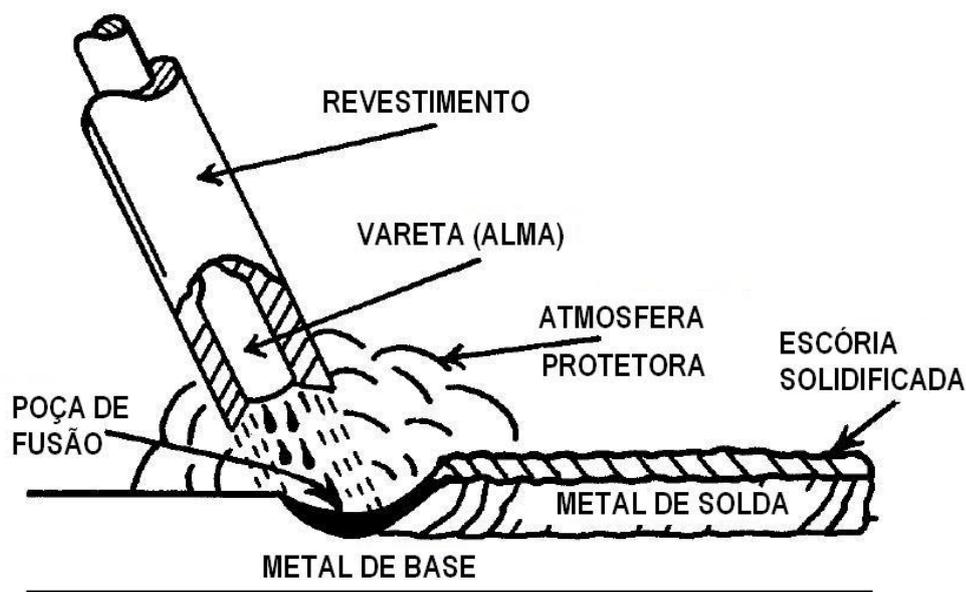
2.1 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODOS REVESTIDOS

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), a soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos SMAW é realizada através da fusão do material base, a alma do eletrodo e o seu revestimento. A fusão deve-se ao fato da alta temperatura e consequente condução de calor do arco elétrico formado entre o metal base e o eletrodo.

Durante este processo gotas do metal de adição são fundidas e depositadas na poça de fusão. Essas gotas são protegidas dos gases atmosféricos pelos gases produzidos com a decomposição do revestimento do eletrodo. A proteção do metal líquido se dá em razão de a escória líquida, também produzida através da decomposição do revestimento, flutuar sobre o metal fundido.

Esse esquema de soldagem pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.



Fonte: Adaptado de ESAB (2005).

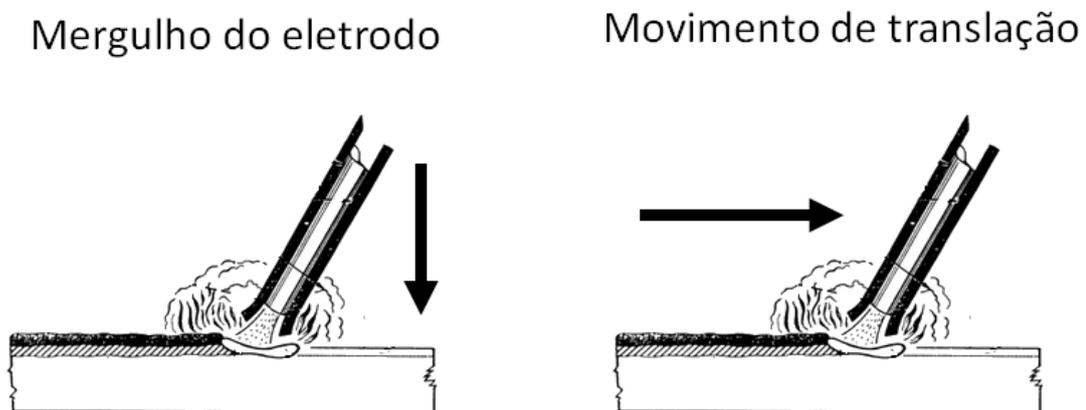
Na Figura 1 é possível observar que o revestimento possui papel indispensável para a soldagem. Uma de suas funções é a formação da escória. A escória tem como objetivo fornecer proteção contra os agentes atmosféricos na poça de fusão e metal de solda, reduzir a velocidade de resfriamento do cordão de solda e permitir a soldagem fora de posição devido as suas características de tensão superficial. A absorção de impurezas na superfície do banho metálico, além de permitir o escape dos gases são outras das suas funções.

O revestimento também tem a finalidade de estabilizar e direcionar o arco elétrico. Outra utilidade do revestimento é a capacidade de proporcionar ajuste da composição química do cordão. Estes ajustes são obtidos através da adição dos elementos de liga, que proporcionam propriedades mecânicas específicas e se mostram como uma das grandes vantagens da utilização do eletrodo revestido.

A grande versatilidade das ligas soldáveis, o equipamento simples e de baixo custo e a possibilidade de uso em locais abertos sujeitos as intemperes do ambiente e de difícil acesso, garantem ao eletrodo revestido um lugar de destaque nos processos de soldagem. Mesmo sua baixa produtividade, cuidados especiais no tratamento e manuseio dos eletrodos revestidos e grande volume de gases e fumos gerados durante a soldagem, não retiram o seu lugar de processo mais amplamente utilizado na fabricação e montagem de equipamentos em campo (ESAB, 2005).

Ainda sobre o processo de soldagem com eletrodo revestido, pode-se dividir a operação em três movimentos. O de mergulho do eletrodo, que tem a finalidade de manter constante o comprimento do arco. Este movimento é obtido ao se avançar o eletrodo em direção à poça de fusão. O segundo movimento é o movimento de translação, em que o eletrodo deve ser deslocado, geralmente tentando manter velocidade constante, com a função de conduzir o arco ao longo da junta a ser soldada. Os movimentos de mergulho e translação estão ilustrados na Figura 2.

Figura 2 – Movimentos do eletrodo durante o processo de soldagem.



Fonte: Autor (2018).

O terceiro movimento é o de oscilação do eletrodo, geralmente conhecido como movimento de tecimento. Este movimento nada mais é que a oscilação transversal do eletrodo, ele garante a fusão das paredes do chanfro da junta, controla a poça de fusão e garante a obtenção de formatos satisfatórios de cordão (MACHADO, 1980). Este movimento pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Movimento de tecimento.



Fonte: Adaptado de ESAB (2005).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS NA SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO QUANTO AO NÍVEL DE AUTOMAÇÃO

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2005), os processos de soldagem podem ser classificados quanto ao nível de controle e intervenção realizado pelo soldador, e são divididos em soldagem manual, semimecanizado, mecanizado e automático. A Tabela 1 exhibe as relações entre as atividades desempenhadas durante a soldagem e sua respectiva classificação.

Tabela 1 – Classificação dos Sistemas de soldagem a arco elétrico.

Atividades	Tipo de operação			
	Manual	Semimecanizado	Mecanizado	Automático
Abertura e manutenção do arco	Soldador	Máquina	Máquina	Máquina
Alimentação de material	Soldador	Máquina	Máquina	Máquina
Controle do calor e penetração	Soldador	Soldador	Máquina	Máquina
Deslocamento da tocha	Soldador	Soldador	Máquina	Máquina
Procura e seguimento de junta	Soldador	Soldador	Soldador	Máquina
Direcionamento da tocha e do arco	Soldador	Soldador	Soldador	Máquina
Correções e compensações	Soldador	Soldador	Soldador	Máquina (podendo ou não ocorrer)

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

Ainda de acordo com a classificação de Marques, Modenesi e Bracarense (2005) a técnica de soldagem do eletrodo revestido é um processo manual uma vez que todas as atividades são desempenhadas pelo soldador. Quando esta manipulação é feita através de um mecanismo mecânico capaz de deslocar o porta eletrodo ao longo da junta a ser soldada, o processo é classificado como mecanizado.

As características da soldagem automática são de um processo em que toda a sequência de passos da operação é executada de forma automática pelo equipamento, sem requerer ajustes do soldador. A função do soldador é apenas de dar início ao ciclo e ocasionalmente verificar o processo.

Para este trabalho, é importante compreender as diferenças entre os processos de soldagem mecanizado e automático. O dispositivo mecanizado é capaz de abrir e manter o arco, controlar o calor e a penetração, realizar a alimentação de material e deslocar a tocha de soldagem. A principal diferença é que quando o dispositivo é capaz de seguir juntas, alterar o direcionamento e realizar eventuais correções de forma automática, o processo é chamado de automático.

Sendo objeto deste trabalho, o projeto de um mecanismo para desempenhar as funções de manipulação do porta eletrodo. Sendo o posicionamento do dispositivo ao longo da junta e direcionamento do arco pré-soldagem operações realizadas pelo soldador, pode-se inferir que se trata de um sistema de solda mecanizado.

Motores e micro controladores desempenharão as funções básicas de manipulação e deslocamento no processo de soldagem com eletrodo revestido. Os microcontroladores serão programados previamente com informações dos parâmetros de soldagem, e esses converterão em sinais para os motores desempenharem as funções dos movimentos de mergulho, avanço e tecimento para a efetiva realização da solda. Inspeções e ajustes serão necessários durante o processo de soldagem para buscar a melhor qualidade da soldagem. Por necessitar da supervisão de um soldador para ajustes ocasionais nos parâmetros de soldagem, e posicionamento e direcionamento do arco ao longo da junta pode-se caracterizar o equipamento que será desenvolvido como um processo de soldagem mecanizado.

2.3 SISTEMAS SIMILARES

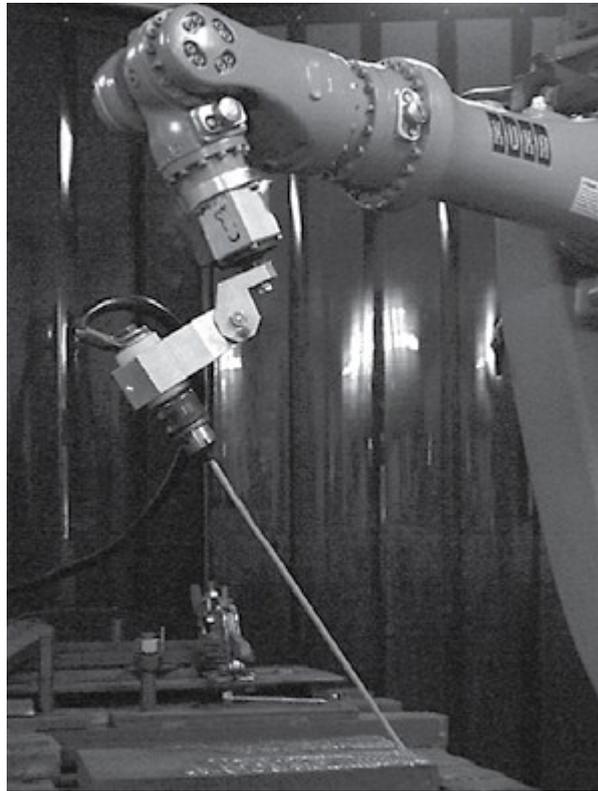
O processo de soldagem com eletrodo revestido, que por definição é caracterizado como sendo um processo manual, possui um problema que é a repetitividade. A qualidade da solda, relacionada à sua homogeneidade microestrutural e seu aspecto físico e dimensional, são alguns dos principais problemas encontrados. Estas dificuldades devem-se principalmente devido ao processo ser predominantemente manual, uma vez que mesmo os melhores soldadores são incapazes de soldar com absoluta repetitividade (LIMA II e BRACARENSE, 2011).

A automatização ou mecanização do processo já existe em algumas literaturas e provou ser um método capaz de replicar cordões de solda de maneira satisfatória. No entanto alguns destes métodos ou são muito complexos e de alto custo, ou demonstram limites quanto à geometria de cordão, devido a limitações mecânicas do equipamento. Algumas destas literaturas serão comentadas a seguir.

Um sistema que utiliza um robô antropomórfico (robô que dispõe de 6 graus de liberdade), para a realização do processo foi desenvolvido por Lima II e Bracarense (2011). Este processo demonstrou elevada capacidade de realizar soldas com as mais diversas geometrias e pode ser observado na Figura 4. No entanto a inerente forma que o processo de SMAW é desenvolvido o torna complexo. Uma vez que o eletrodo não possui comprimento

constante durante o processo de soldagem, a trajetória do robô deve ser atualizada constantemente. Tornando a geração da trajetória um problema de grande complexidade.

Figura 4 – Robô antropomórfico utilizado na soldagem SMAW

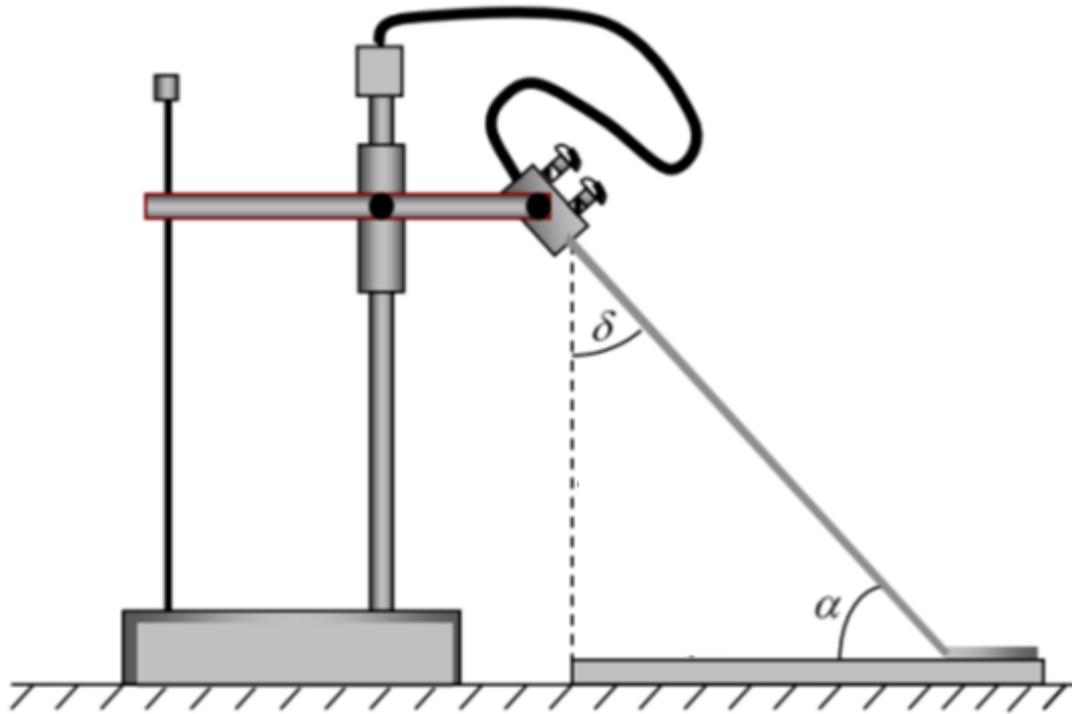


Fonte: Lima II; Bracarense (2011)

A utilização do robô antropomórfico exige treinamento especializado que geralmente é um treinamento de elevado custo. Em conjunto com os custos de treinamento existe também o intrínseco alto valor do próprio robô. Tornando esta, uma solução cara.

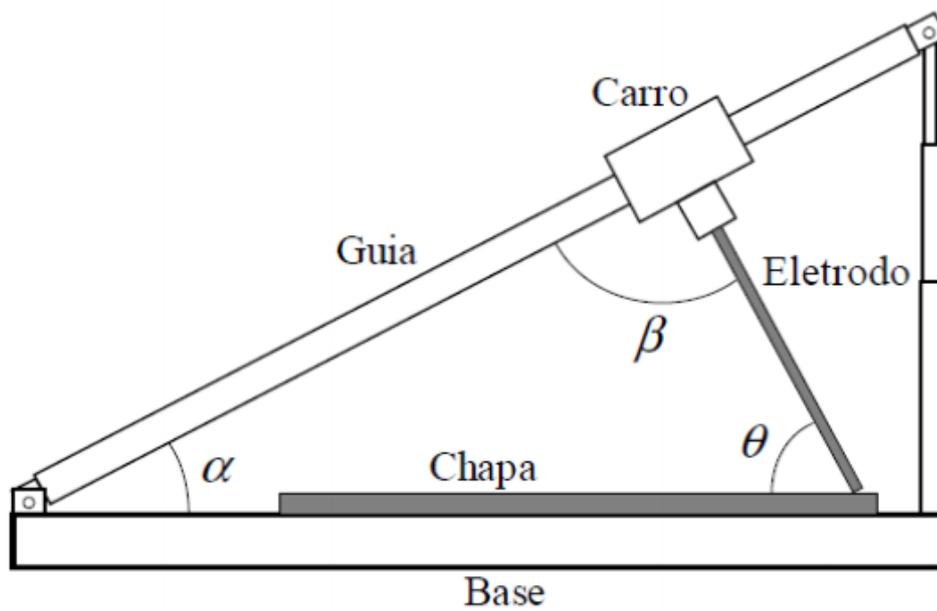
Alternativamente pode-se encontrar um mecanismo na literatura que consiste na soldagem por gravidade (CAVALCANTI, 2011). Este é um sistema mais simples, onde o eletrodo é preso a um componente móvel, que desliza por uma guia. Uma vez aberto o arco, o eletrodo vai sendo consumido e o movimento de mergulho é desenvolvido pelo componente móvel, que se desloca através de seu próprio peso através da guia. Existe diferentes configuração deste mesmo dispositivo. As mais comuns são a vertical e a inclinada. Nas Figuras 5 e 6 é possível observar as versões vertical e inclinada deste mecanismo.

Figura 5 – Mecanismo de Soldagem por gravidade vertical.



Fonte: Cavalcanti (2011).

Figura 6 - Mecanismo de Soldagem por gravidade horizontal.

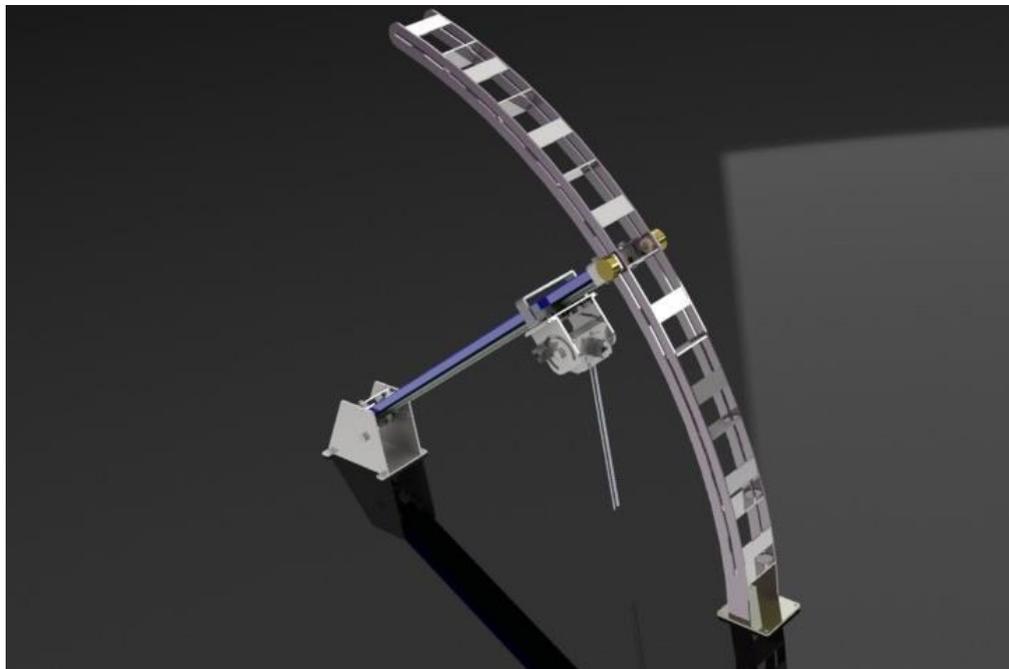


Fonte: Cavalcanti (2011).

É possível constatar, que o mecanismo inclinado (Figura 6) é o que proporciona a maior versatilidade quanto à geometria e parâmetros de soldagem. Isso se deve ao fato de poder ajustar os três ângulos, α , β e θ . Estes ângulos são responsáveis pelas componentes de velocidade da soldagem. O correto adequamento dos parâmetros de soldagem como tensão, corrente, tipo de eletrodo e suas características, em combinação com estes ângulos são responsáveis pela qualidade e estabilidade do processo de soldagem. No entanto, por tratar-se de um triângulo estes três ângulos não são independentes entre si. Tornando uma variável dependente da outra, fazendo deste processo limitado quanto à obtenção de cordões de soldas com variáveis distintas e independentes.

Outro mecanismo encontrado na literatura é o Sistema Automático para Soldagem com Eletrodo Revestido (SA-ER), desenvolvido por Silva (2015). Este mecanismo baseia-se no mecanismo de soldagem por gravidade. Esse, dispõe de um motor para acionamento e deslocamento do porta eletrodo. Sendo assim, é possível controlar mais eficientemente a velocidade de soldagem. Pode-se observar esse dispositivo na Figura 7.

Figura 7 – SA - ER

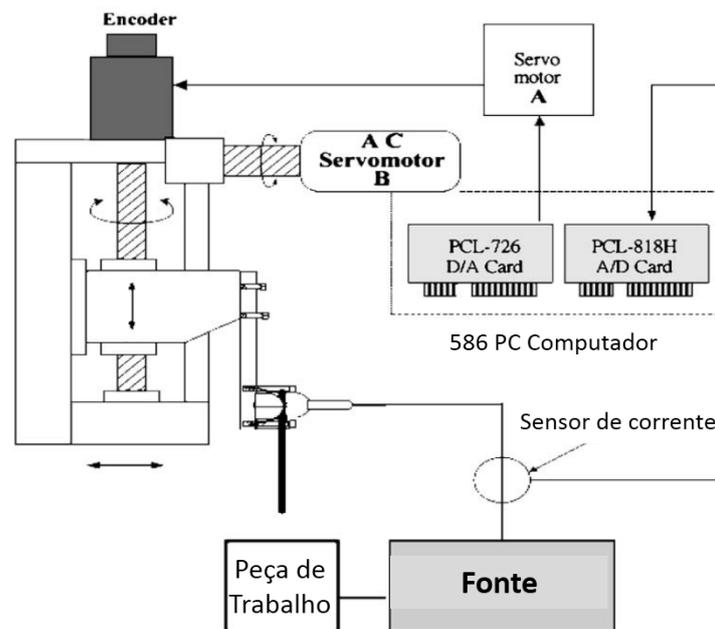


Fonte: Silva (2015).

No entanto devido sua construção semelhante ao dispositivo de soldagem por gravidade, encontra o mesmo problema de ser limitado no que diz respeito à independência das variáveis de soldagem.

Outro mecanismo encontrado é descrito por Lee et al. (2006). Este mecanismo consiste em um robô de solda conduzido por um servomotor de corrente contínua controlado por computador e uma fonte soldagem. Na Figura 8 é possível observar de forma esquemática este equipamento onde é possível observar que o equipamento dispõe de dois motores para realizar o processo de soldagem.

Figura 8 – Foto esquemática, Mecanismo proposto por Lee et al. (2006).



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

Figura 9 – Figura Real, Mecanismo proposto por Lee et al. (2006).



Fonte: Lee et al. (2006).

Ao observar a Figuras 9 que ilustra uma foto real do sistema, se pode perceber que este sistema possui movimento de mergulho e avanço independentes. Isto se deve ao fato de que é utilizado um motor para cada um destes movimentos. No entanto não dispõe de capacidade para realizar o movimento de tecimento.

Visto que em dispositivos similares não é possível realizar o movimento de oscilação do eletrodo. É proposto o desenvolvimento de um mecanismo que seja capaz de realizar movimentos de mergulho e avanço independentemente, diferente dos sistemas de menor complexidade. Além de dispor da possibilidade de realizar o movimento de tecimento, não presente nesses outros sistemas. Estes movimentos deverão ser obtidos de forma independente, ou seja, de forma que o mecanismo não venha a limitar algum destes movimentos em detrimento de outro.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Foi proposto para o desenvolvimento deste mecanismo, a utilização de um equipamento já disponível no Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS), situado no Campus da UFSC em Joinville. Este equipamento, conhecido como Tartilope V1 é um sistema de deslocamento automático de tocha, que permite a realização de soldas e cortes em qualquer posição.

De modo a desenvolver o projeto pretendido, foi observado os mecanismos já existentes tanto na literatura como comercialmente, a fim de realizar uma análise de Benchmark. As definições dos requisitos que o projeto deveria atender, juntamente com a análise de Benchmark, nortearam o processo de desenvolvimento do mecanismo.

Com base nestes requisitos foi possível dimensionar suas partes essenciais para o seu correto funcionamento. Com o auxílio de ferramenta CAD, foi desenvolvido um projeto de produto robusto e hábil a realizar o processo de soldagem com eletrodo revestido. Uma vez pronto o design, os materiais para fabricação foram adquiridos e montados. Juntamente com a montagem, um software de controle foi implementado para que através de parâmetros de soldagem como velocidade de mergulho e avanço e características do movimento de oscilação do eletrodo fosse possível executar soldas com o processo SMAW.

3.1 REQUISITOS DE PROJETO

A fim de se obter dados para definição dos requisitos de projeto foi realizado soldagens com eletrodo revestido de forma manual. Essas soldagens tiveram como objetivo a determinação das velocidades comuns que um soldador utiliza na soldagem com eletrodo revestido. Foram utilizadas diferentes bitolas de eletrodos a fim de se obter tempos para diferentes amostras. Todas as soldagens foram realizadas respeitando-se as recomendações de corrente e voltagem indicadas pelo fabricante. A Tabela 2 foi concebida através dos dados coletados durante estas soldagens.

Tabela 2 – Dados das soldagens para aquisição de dados.

Tipo	Tensão recomendada (V)	Corrente recomendada (A)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Tempo (s)	Tensão utilizada (V)	Corrente utilizada (A)
E7018	20-30V	70-105A	2,5	300	60	30V	90-105A
E7018	20-30V	70-105A	2,5	300	62	20V	90-105A
E6010	23-28V	100-185A	4	300	63	28V	110-125A
E6010	23-28V	100-185A	4	300	61	23V	105-120A
E6013	18-28V	50-70A	2	300	57	28V	60-70A
E6013	18-28V	50-70A	2	300	62	18V	50-60A

Fonte: Autor (2018).

O equipamento deveria ser capaz de realizar o movimento de mergulho de forma a garantir a permanência do arco aberto. Desta forma o mecanismo precisaria ser dimensionado a percorrer uma distância de 300 mm em menos de 1 minuto. Conseqüentemente define-se que o dimensionamento do motor deveria ser hábil a desenvolver uma velocidade de pelo menos 5 mm/s para o movimento de mergulho. No entanto para efeito de produtividade, este mesmo mecanismo deveria ser capaz de retornar a sua posição inicial para uma nova soldagem em um tempo menor que o próprio tempo da soldagem. Sendo assim, um tempo de 10 segundos foi estabelecida como máximo para o retorno do mecanismo a posição inicial. Portanto, o fator limitante no dimensionamento do motor não foi a velocidade de mergulho, e sim seu retorno a posição de origem, para efetuar nova soldagem.

Para o movimento de tecimento, uma amplitude mínima de 50 mm deveria ser atendida. Visto que raras as ocasiões em que um chanfro de junta é superior a 50 mm. A velocidade em que este movimento de tecimento deveria ser executado também deveria respeitar à velocidade mínima encontrada para o movimento de mergulho. Os dados de requisitos para o movimento de tecimento foram baseados nas experiências na área do Prof. Dr. Tiago Vieira Cunha, orientador deste trabalho.

Além de o mecanismo ter a capacidade de soldar com velocidades utilizadas na prática, também foi proposta a possibilidade de se soldar em diferentes ângulos e posições. Com o mecanismo tendo seus movimentos independentes e capaz de realizar os processos de soldagens com diferentes ângulos e posições, este seria um equipamento mais completo que alguns dos encontrados na literatura.

Foi proposta também desde trabalho, o projeto de um sistema robusto com custo reduzido. Sendo assim, o processo de design focou em desenvolver um equipamento com alta resistência mecânica visando atender ao requisito de um sistema robusto e de baixo peso. O maior número de peças possíveis já disponíveis comercialmente para a fabricação do mecanismo foi utilizado, buscando a redução do custo de fabricação.

3.2 ANÁLISE DE BENCHMARK

Uma pesquisa de equipamentos similares foi realizada. Esta pesquisa mostrou que já existem alguns mecanismos semelhantes. É possível citar entre eles o dispositivo de solda por gravidade, o SA-ER que é uma adaptação do equipamento de solda por gravidade, o equipamento que utiliza um robô antropomórfico e o sistema de solda automática que utiliza dois motores independentes para realizar a solda. Com base nestes sistemas pode-se realizar uma análise de Benchmark.

A proposta do benchmark é a análise de produtos semelhantes, onde uma comparação entre suas características norteia a melhor solução para problemas encontrados durante o processo de desenvolvimento de produto. Essa comparação geralmente é feita através de tabelas de comparação de características, onde a importância de cada uma das características é pontuada de 1 a 5 e a pontuação dos produtos similares também pontuadas de 1 a 5 em relação a característica analisada, sendo a pontuação máxima 5 para as melhores características. Posteriormente deve-se fazer a multiplicação da pontuação da importância com o valor definido para cada uma das características e então somado estes valores. O resultado com o maior valor nos mostra o produto com melhor desempenho e conseqüentemente, o mais indicado como solução para o desenvolvimento do produto. Esta análise foi realizada, e algumas características dos produtos semelhantes se mostraram interessantes. Sendo assim, é possível utilizar características adequadas de cada um deles para confecção de um projeto robusto e capaz de atender todos os requisitos do projeto.

Uma primeira comparação entre os sistemas similares pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação das características dos equipamentos similares.

Características	Importância	Robô Antropomórfico	Gravidade	SA-ER	Robô de solda proposto por Lee et al.
Custo	5	1	4	3	2
Dimensões	4	1	5	5	3
Peso	3	1	4	4	2
Velocidades controláveis	5	5	2	3	5
Movimentos independentes	5	5	1	1	5
Movimento de tecimento	5	–	–	–	–
Porta eletrodo	5	5	3	5	3
Total	Importância x Pontuação	87	82	92	102

Fonte: Autor (2018).

Pode-se observar na Tabela 3 que nenhum dos equipamentos similares dispõe de movimento de tecimento. E apenas o equipamento que utiliza robô antropomórfico e o robô de solda proposto por Lee et al. são hábeis a realizar o controle das velocidades de cada um dos movimentos independentemente.

Sendo proposta do trabalho, realizar movimentos independentes, ou seja, realizar os movimentos de mergulho, avanço e tecimento de forma que a velocidade de um não interfira na velocidade de outro como é observado no caso dos sistemas de soldagem por gravidade e SA-ER, uma tabela de comparação entre os dispositivos que possuem esta característica foi desenvolvida. Pode-se observar esta comparação na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação de características de soluções para movimentos independentes.

Características	Importância	Robô Antropomórfico	Motores Independentes
Custo	5	1	4
Dimensões	4	2	4
Peso	3	2	5
Total	Importância x Pontuação	19	51

Fonte: Autor (2018).

Pode-se observar que a obtenção de movimentos independentes utilizando motores independentes quando comparado com a solução utilizando um robô antropomórfico resulta em uma melhor solução para o projeto a ser desenvolvido neste trabalho. Deve-se empregar o conceito de utilizar motores independentes para cada um dos movimentos, uma vez que a solução com robô antropomórfico se mostra complexa e de alto custo. Em conjunto com o equipamento Tartilope V1 recomendado para este tipo de aplicações, será utilizado mais dois motores. Um para o movimento de mergulho e outro para o de tecimento.

Outro ponto do desenvolvimento em que o mecanismo se baseia em produtos similares é o porta eletrodo. Novamente, uma tabela de comparação de características foi desenvolvida comparando os sistemas que dispõem de pontuação máxima nesta característica. Verifica-se na Tabela 3 que os sistemas com a máxima pontuação nesta característica são o robô antropomórfico que utiliza um mandril para esta função e o SA-ER que utiliza um mordente. Esta comparação pode ser observada na Tabela 5.

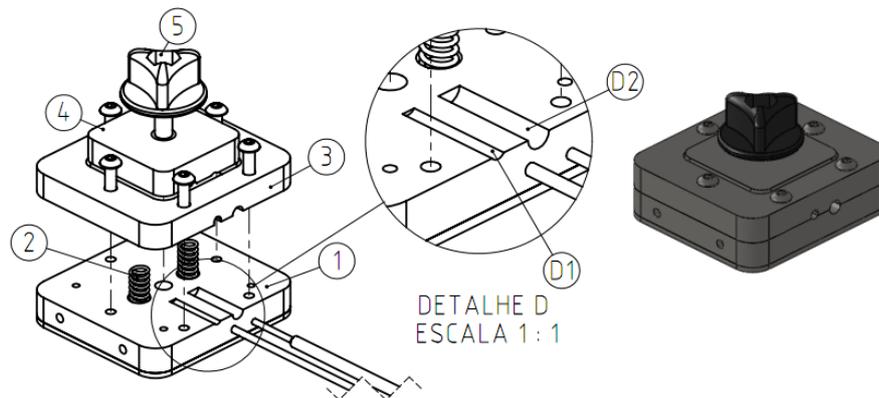
Tabela 5 - Comparação de características de soluções do sistema de porta eletrodo.

Características	Importância	Mandril	Mordente
Custo	5	4	4
Dimensões	4	1	5
Peso	3	2	5
Total	Importância x Pontuação	30	55

Fonte: Autor (2018).

Visando a redução de peso, o sistema do porta eletrodo foi baseado no mesmo sistema utilizado no SA-ER, visto que este possui uma pontuação total maior. O porta eletrodo utilizado no SA-ER utiliza dois mordentes para agarrar o eletrodo e para fixar, um manipulo é utilizado para dar força de aperto. Este sistema pode ser mais bem entendido observando a Figura 10.

Figura 10 – Esquema do porta eletrodo utilizado no sistema SA-ER

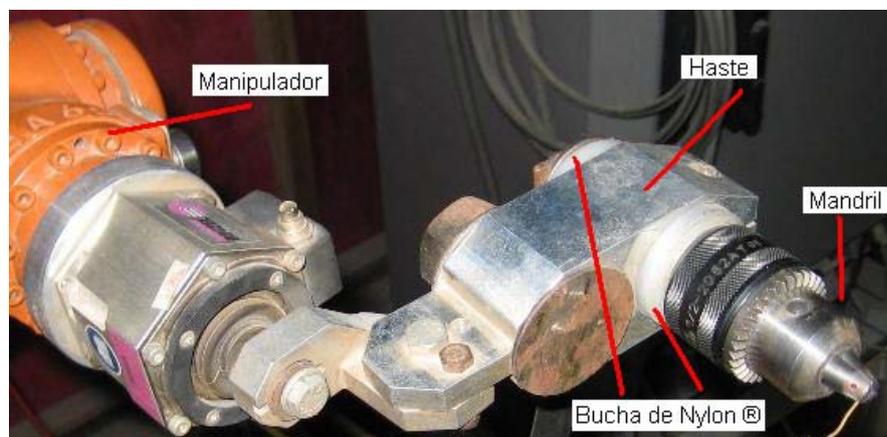


- | | |
|------------------------------------|----------------------|
| 1: Mordente inferior | 4: Mordente superior |
| 2: Mola de compressão | 5: Manípulo |
| 3: Envoltório do mordente superior | |

Fonte: Silva (2015).

Utilizando este conceito, pode-se projetar um sistema semelhante para executar a função de porta eletrodo em nosso projeto. Outra alternativa seria a utilização de um mandril, como descrito e utilizado no sistema com robô antropomórfico. Este esquema pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Porta eletrodo baseado em mandril.



Fonte: Lima II; Bracarense (2011).

É possível observar que o sistema com mandril, apesar de desempenhar excelentemente sua função, possui dimensões ligeiramente maiores dos que as esperadas para o sistema a ser projetado. Logo foi selecionada a primeira proposta por mostrar-se um sistema hábil a realizar a mesma função, com menores dimensões e peso. Tornando assim o produto final menor em dimensões gerais e mais leve.

Ao fim da análise de benchmark, foram definidas as características principais do mecanismo. O sistema de movimento independente, que seria conquistado através da utilização de um motor para cada um dos movimentos. E o porta eletrodo, utilizando um sistema de mordentes para efetiva manipulação e soldagem com o eletrodo revestido.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO MECANISMO DE SOLDAGEM DE ELETRODO REVESTIDO

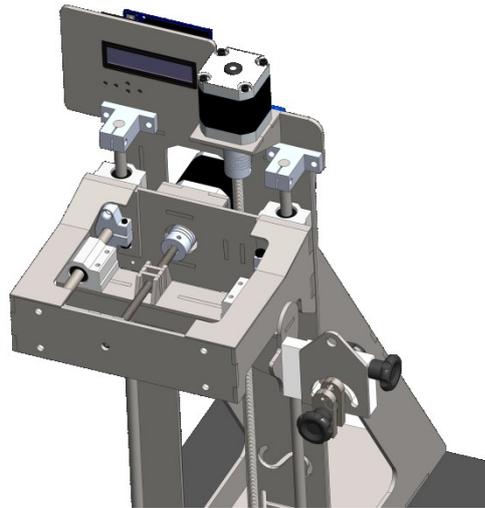
Com o auxílio do software SolidWorks, foi projetado um mecanismo para ser acoplado ao Tartilope V1, sistema de deslocamento de tocha de soldagem presente no laboratório. Este dispositivo é composto por uma estrutura, guias lineares para deslocamento, fusos de deslocamento, motores de passo, rolamentos lineares, sistema porta eletrodo e componentes eletrônicos para controle. As Figuras 12 e 13 apresentam o mecanismo projetado.

Figura 12 – Vistas Isométrica Frontal e Traseira do mecanismo.



Fonte: Autor (2018).

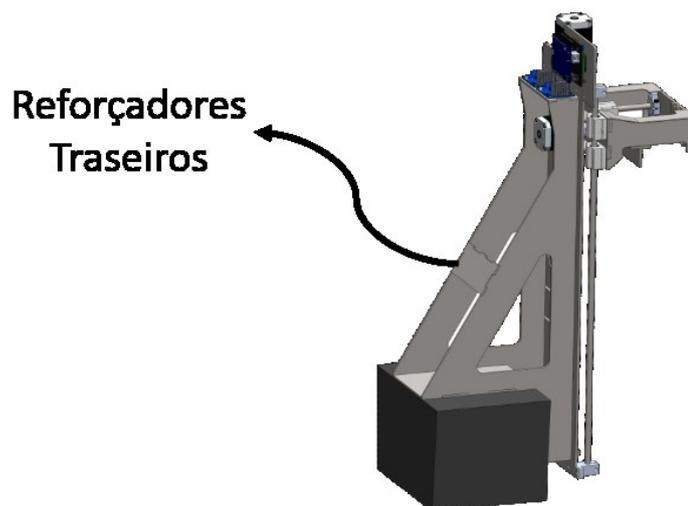
Figura 13 – Detalhamento superior do mecanismo.



Fonte: Autor (2018).

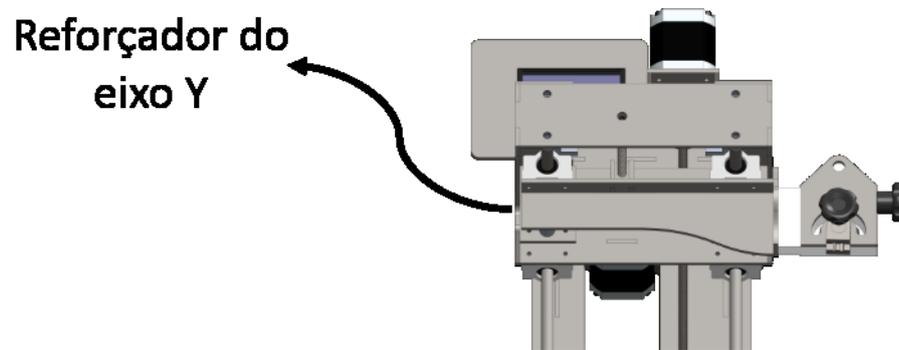
Pode-se observar que o sistema dispõe de recursos que garantem sua resistência mecânica. Estes recursos atuam como reforçadores, aumentando a rigidez estrutural. Para garantir a resistência mecânica e rigidez estrutural, foi definido a utilização de chapas de aço 1020 com 3 mm de espessura. Estas chapas foram utilizadas tanto para a estrutura como para os reforçadores. Estes reforçadores podem ser mais bem identificados nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Reforçadores Traseiros.



Fonte: Autor (2018).

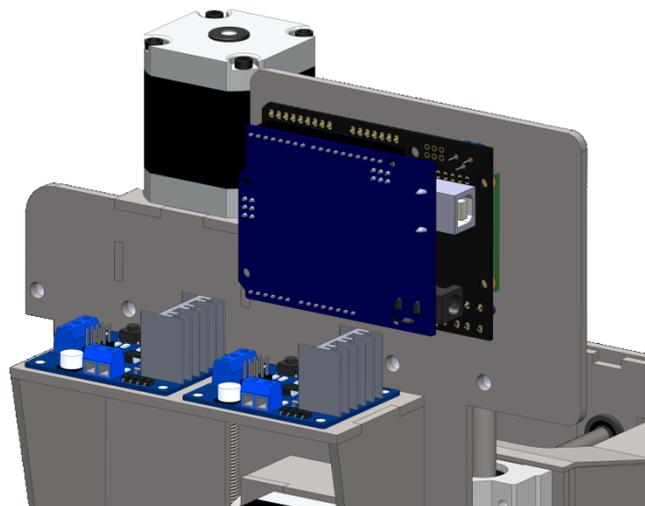
Figura 15 – Reforçador do eixo Y.



Fonte: Autor (2018).

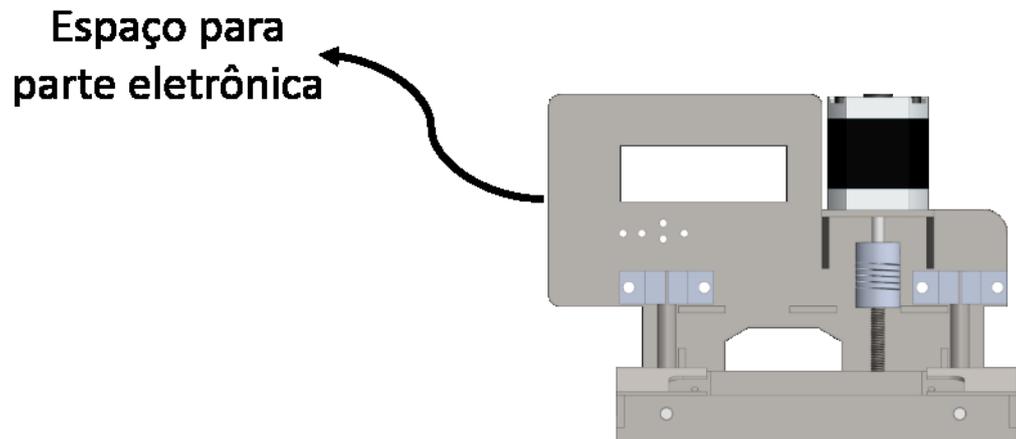
Além dos elementos estruturais, o projeto também contempla um espaço dedicado à fixação dos componentes eletrônicos de controle. Tendo em vista a redução de custo do equipamento, componentes geralmente utilizados neste tipo de equipamento e disponíveis comercialmente foram selecionados. Pode-se visualizar melhor o espaço reservado para a fixação destes elementos nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Detalhamento do espaço reservado para a parte eletrônica, parte traseira.



Fonte: Autor (2018).

Figura 17 - Detalhamento do espaço reservado para a parte eletrônica, parte frontal.

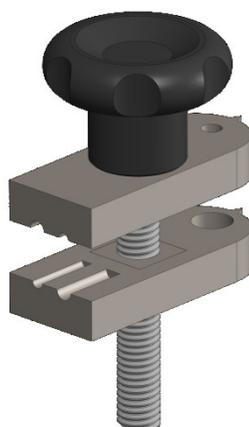


Fonte: Autor (2018).

Os componentes eletrônicos que serão utilizados no controle do mecanismo são o Arduino, LCD KeYPad Shield e drivers de motor de passo. Estes componentes são de fácil aquisição no mercado e com custo relativamente baixo. Todos eles possuem um local para posicionamento no mecanismo, conforme observado.

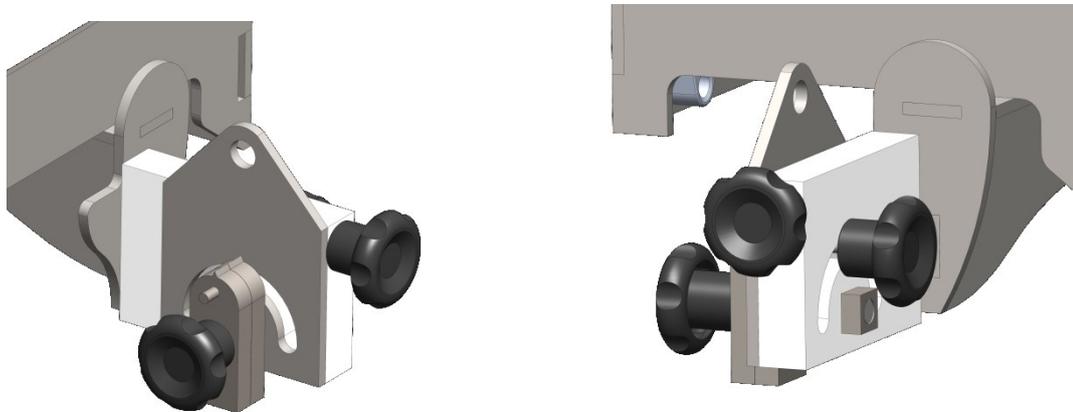
Visando atender a função de porta eletrodo, um mecanismo similar ao utilizado pelo equipamento SA-ER foi desenvolvido. Este consiste em um par de mordentes com furos de dois diferentes diâmetros, tendo em vista à utilização das mais diversas bitolas de eletrodos. Nas Figuras 18 e 19 é possível visualizar esta parte do mecanismo.

Figura 18 – Mordentes do porta eletrodo.



Fonte: Autor (2018).

Figura 19 – Sistema de porta eletrodo completo.



Fonte: Autor (2018).

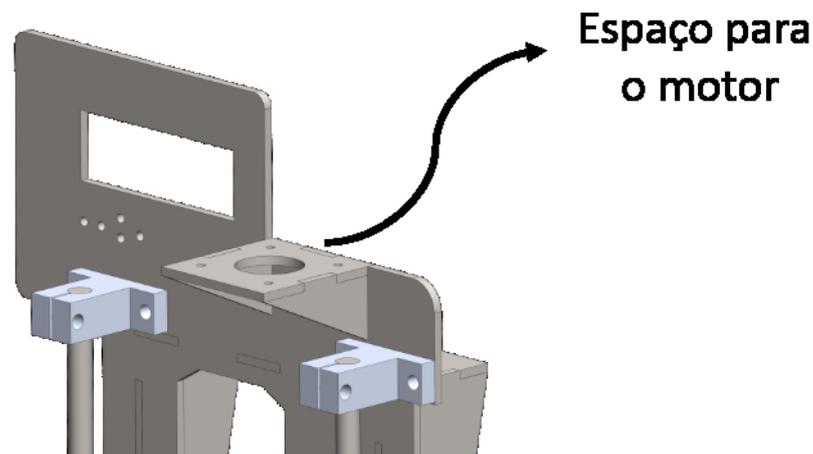
Uma vez introduzido o eletrodo no furo de diâmetro apropriado, o manipulador é utilizado para comprimir e assim prender o eletrodo entre os mordentes. É possível observar a presença de 3 manipuladores. Um deles, conforme descrito anteriormente serve para comprimir o eletrodo entre os mordentes, fixando assim a posição do eletrodo. Os outros dois manipuladores servem como apoio a seleção dos ângulos de soldagem.

A utilização do manipulador para fixar os mordentes em um ângulo específico, atende a um dos requisitos de projeto. Com o auxílio destes manipuladores é possível ajustar e fixar a posição e ângulo de cada uma das soldagens. Eles utilizam o mesmo conceito do manipulador que serve para fixar o eletrodo entre os mordentes. Quando utilizados, estes exercem uma força de compressão sobre as peças fazendo estas se fixarem e não permitir a rotação, mantendo assim um ângulo específico durante todo o processo de soldagem.

A fim de realizar o isolamento elétrico entre o mordente e eletrodo do restante das peças móveis durante a soldagem, uma peça de poliamida foi utilizada. Esta peça serve de suporte para o porta eletrodo. Assim, a corrente de soldagem fica isolada do restante do mecanismo. Esta mesma peça de nylon além de funcionar como isolante e suporte para o mordente, serve para o ajuste de um dos ângulos de soldagem previamente discutidos. Acoplada a esta peça de poliamida encontra-se a chapa em que a fonte de soldagem é ligada para fornecer corrente elétrica para a soldagem. Esta chapa, por ser de metal e estar em contato com o mordente, que por sua vez está em contato com o eletrodo serve como suporte para o cabo de energia.

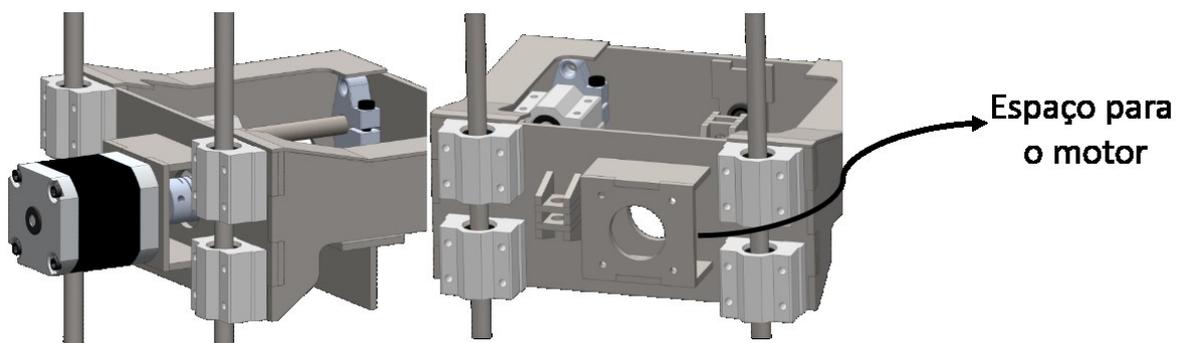
Uma vez que o dispositivo possui movimentos independentes e para tanto utiliza um motor para cada movimento, um espaço para suporte de cada um dos motores foi projetado. Estes espaços para fixação do motor são dedicados a motores da categoria NEMA. O motor NEMA foi escolhido, por ser de fácil obtenção no mercado a um custo relativamente baixo. Como motores NEMA, dispõem de variadas opções de torques (desde 1,1 Kgf.cm a mais de 52 Kgf.cm) foi estimado que seria possível encontrar um motor com torque necessário a atender os requisitos do projeto. Estes espaços reservados aos motores podem ser observados nas Figuras 20 e 21.

Figura 20 – Espaço reservado para o motor, Eixo Z



Fonte: Autor (2018).

Figura 21 – Espaço reservado para o motor do Eixo Y.



Fonte: Autor (2018).

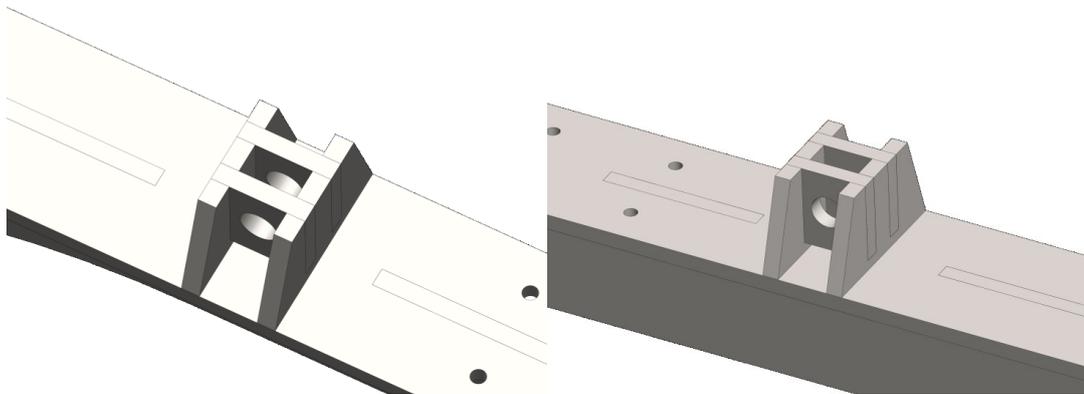
Na Figura 20, observa-se o espaço reservado para o motor responsável pelo movimento de mergulho. Já na Figura 21 é possível observar o espaço dedicado ao motor que é responsável pelo movimento de tecimento. Para transmissão do movimento, barras roscadas

M6 com passo de 1 mm foram escolhidas. Estas barras servem como fusos de potência. A escolha da barra M6 com passo 1 mm deve-se ao fato de que equipamentos similares a utilizam. A escolha deste fuso de potência ainda facilita a implementação do software, uma vez que possui um passo unitário. No entanto, durante o dimensionamento do torque requerido para o motor, será calculado as tensões presentes na barra e verificar se esta escolha é adequada.

Como opção de acoplamento entre fuso de potência e motor, o acoplamento flexível foi escolhido. Este tipo de acoplamento minimiza os efeitos de vibração e de esforços indesejáveis provocados pelo desalinhamento da união do eixo do motor e do fuso de potência. Este tipo de acoplamento é extensivamente utilizado em equipamentos CNC de baixo custo, fazendo dele uma opção viável economicamente.

Para efetivamente transmitir o movimento do motor ao equipamento, se faz necessário o uso de uma porca de tração. Comercialmente não é possível encontrar uma porca de tração para fuso M6. Logo foi necessário desenvolver algo similar a uma porca de tração para nossa aplicação. Podem-se observar melhor a solução encontrada na Figura 22.

Figura 22 – Sistema utilizado para substituir a porca de tração.

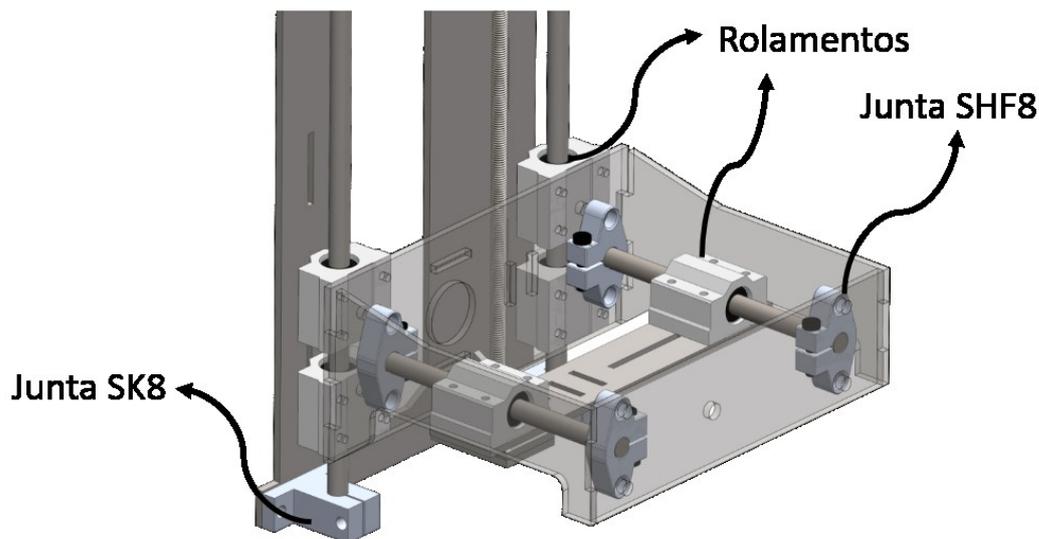


Fonte: Autor (2018).

Utilizou-se uma porca convencional entre dois batentes. Estes batentes servem tanto para fixar a porca no local, quanto para promover o deslocamento. Foi escolhido este design devido ao fato de poder ser fabricado com chapas, diminuindo assim o custo de fabricação. O posicionamento da porca entre os batentes deve ser justo para não permitir folgas no movimento. Esta mesma solução foi utilizada para ambos os movimentos.

Visando uma maior rigidez ao sistema de deslocamento, guias lineares foram utilizadas. Duas guias para cada um dos movimentos foram utilizadas, proporcionando uma capacidade de carga elevada com movimentos suaves. Em conjunto com os rolamentos lineares, este sistema garante a redução de folgas aumentando assim a precisão do mecanismo. Estas guias são fixas a estrutura através de juntas. Estas juntas podem ser encontradas comercialmente. Pode-se observar este conjunto na Figura 23.

Figura 23 – Sistema de deslocamento.



Fonte: Autor (2018).

Observa-se que há dois tipos de juntas que são utilizadas. Um tipo para cada um dos movimentos. A escolha do tipo de junta foi baseada no espaço disponível e posicionamento no equipamento. A junta utilizada no movimento de mergulho é a junta SK8. Já a junta utilizada no movimento de tecimento é a SHF8. Ambas as juntas utilizam uma guia linear de diâmetro de 8 mm.

3.4 DIMENSIONAMENTO DO MOTOR

Para o correto funcionamento do sistema é necessário um dimensionamento adequado dos motores. Desta forma é indispensável que as forças atuantes no sistema sejam corretamente calculadas. Segundo Budynas (2016), para que o motor execute sua função é

imprescindível que este supere a inercia da carga e proporcione o torque exigido pela mesma. Este requerimento pode ser observado através da seguinte formula:

$$T = (T_a + T_c) * FS$$

Onde:

- T, torque total requerido [*N.m*]
- T_a, torque necessário devido a aceleração [*N.m*]
- T_c, torque necessário devido a carga [*N.m*]
- FS, fator de segurança

Sendo assim, pode-se dividir o torque total necessário em duas partes. A primeira como sendo o torque necessário para superar a inercia inerente do sistema e a segunda parte como sendo o torque necessário devido à carga.

Para o cálculo do torque necessário devido à inercia pode-se utilizar a seguinte equação:

$$T_a = J_{motor} * i^2 + J_{total} * \frac{V_m * 2 * \frac{\pi}{60}}{t_a}$$

Onde:

- T_a, torque necessário devido a aceleração [*N.m*]
- J_{motor}, momento de inercia do motor [*kg.m²*]
- i, relação de redução
- J_{total}, momento total de inercia devido a carga [*kg.m²*]
- V_m, velocidade requerida [RPM]
- t_a, tempo de aceleração [s]

Sendo que J_{total} pode ser calculado como:

$$J_{total} = J_m + J_f$$

Em que:

- J_{total}, momento total de inercia devido a carga [*kg.m²*]
- J_m, momento de inercia da massa [*kg.m²*]
- J_f, momento de inercia do fuso [*kg.m²*]

Estes dois momentos de inércia sendo calculados como:

$$Jm = m * \frac{P * 10^{-3}}{(2 * \pi)^2}$$

$$Jf = \frac{\pi}{32} * \rho * (L * 10^{-3}) * (D * 10^{-3})^4$$

Em que:

- Jf, momento de inercia do fuso [$kg \cdot m^2$]
- Jm, momento de inercia da massa [$kg \cdot m^2$]
- m, massa deslocada [kg]
- P, passo do fuso [mm]
- ρ , densidade do material do fuso [kg/m^3]
- L, comprimento do fuso [mm]
- D, diâmetro do fuso [mm]

E a velocidade requerida, Vm pode ser obtida como:

$$Vm = Vl * \frac{60}{P}$$

Onde:

- Vm, velocidade média requerida [m/s]
- Vl, velocidade linear [mm/s]

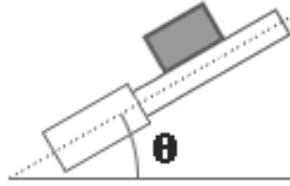
Já para o cálculo do torque necessário devido à carga, é necessário primeiramente que seja calculada a força envolvida no deslocamento. Esta pode ser obtida através da seguinte equação:

$$F = Fe + (m * g) * (\text{sen}(\theta) + fg * \text{cos}(\theta))$$

Onde:

- F, força total [N]
- Fe, força externa [N]
- g, gravidade [m/s^2]
- θ , ângulo do mecanismo, que se observa na Figura 24.
- fg, coeficiente de atrito entre a guia e o rolamento linear

Figura 24 - Ângulo do mecanismo.



Fonte: Adaptado de Budynas (2016).

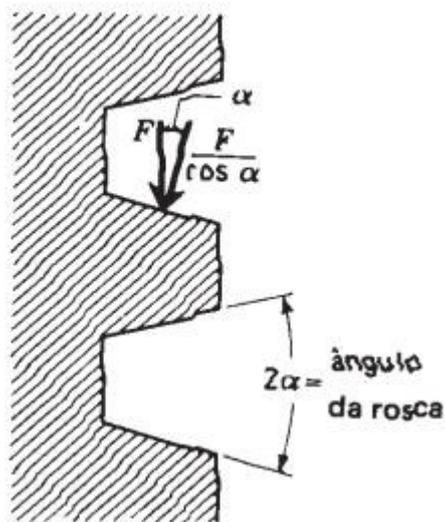
Uma vez tendo disponível a informação da força total é possível calcular o torque devido à carga, que segundo o modelo apresentado por Budynas é calculado como:

$$T_c = F * \frac{dm * 10^{-3}}{2} * \left(\frac{P + \pi * f * dm * \sec(\alpha)}{\pi * dm - f * P * \sec(\alpha)} \right)$$

Onde:

- T_c , torque necessário devido a carga [$N.m$]
- dm , diâmetro médio [mm]
- f , coeficiente de atrito entre o fuso e a porca
- α , ângulo da rosca [graus], que se observa na Figura 25.

Figura 25 – Ângulo de rosca do fuso.



Fonte: Adaptado de Budynas (2016).

É possível observar através das equações que para realizar tais cálculos necessita-se de alguns dados. Esses dados podem ser obtidos tanto em tabelas, no caso das informações relacionadas ao fuso escolhido, quanto estimados com a ajuda do design desenvolvido no SolidWorks, como é o caso da massa do sistema e comprimento do fuso.

Através do software SolidWorks foi possível estimar a massa de todos os componentes presentes no mecanismo. Sendo que o valor estimado para a massa total dos componentes foi de 5,4 kg. No entanto, para efeitos de cálculo deve-se utilizar apenas a massa dos componentes que serão propriamente movidos por cada um dos motores. Portanto a massa que será deslocada no movimento de mergulho foi estimada em 2,28 kg e para o movimento de tecimento 0,4 kg. Ainda utilizando o SolidWorks pode-se obter os dados de comprimento dos fusos. Sendo o comprimento da barra no movimento de mergulho 560 mm e para o movimento de tecimento 120 mm.

Como previamente o parafuso de potência a ser utilizado foi escolhido como sendo uma barra roscada M6 com passo de 1 mm, pode-se encontrar alguns dados essenciais para o cálculo. Estes dados podem ser encontrados nas tabelas dos fabricantes deste tipo de barra. Os dados necessários estão presentes na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados barra roscada M6.

Barra Roscada M6	
Tipo do fuso	ISO
Ângulo de Rosca	30 graus
Diâmetro	6 mm
Diâmetro médio	5,35 mm
Diâmetro menor	4,77 mm
Passo	1 mm
Densidade	7900 kg/m³
Atrito entre Fuso e Porca	0,17 (Aço-Aço, sem lubrificação)

Fonte: Autor (2018).

Assim como é necessário inicialmente estimar um fuso que possa atender aos requisitos, é necessário escolher previamente um motor, visto que para seu dimensionamento precisa-se de dados provenientes de um motor. Como é o caso do momento de inércia do

motor, que para motores da categoria NEMA 17 possuem em média uma inércia de $5,4 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$. Além disso, é possível observar que por questão do design desenvolvido, não é utilizado nenhum redutor, sendo acoplado o motor diretamente ao fuso, logo a relação de redução (i) é igual a 1.

Uma vez definidos os dados necessários, é possível realizar os cálculos para cada um dos motores separadamente. Para tanto, pode-se observar nas Tabelas 7 e 8 as condições de operações de cada um deles.

Tabela 7 – Condições de operação para movimento de mergulho.

Condições de operação para movimento de mergulho	
Força externa	0 N
Ângulo do mecanismo	90 graus
Velocidade Linear	30 mm/s
Tempo de aceleração	0,1 s
Massa total	2,28 kg
Momento de Inércia do motor	$5,4 * 10^{-6} \text{ kg.m}^2$
Comprimento do Fuso	560 mm
Relação de Redução	1
Coefficiente de atrito entre guia e rolamento linear	0,03
Fator de Segurança	2

Fonte: Autor (2018).

É possível observar também na Tabela 7 a presença do coeficiente de atrito entre guia e rolamento linear. Este dado pode ser obtido diretamente com o fabricante do rolamento. Como descrito anteriormente, o fator limitante no dimensionamento deste motor é o tempo de retorno à posição inicial. Como foi definido um tempo médio de 10 segundos para este movimento, e levando em consideração a utilização de um eletrodo com 300 mm de comprimento, pode-se estimar uma velocidade linear média de 30 mm/s. Para o caso da aceleração, foi estimado o tempo de 0,1 segundos, visando uma produtividade aumentada.

Com base nos dados das Tabelas 6 e 7 e utilizando as equações previamente apresentadas consegue-se estimar o torque requerido e a velocidade, como sendo:

$$T = 3,6360 * 10^{-2} [N.m]$$

$$Vm = 1800 [RPM]$$

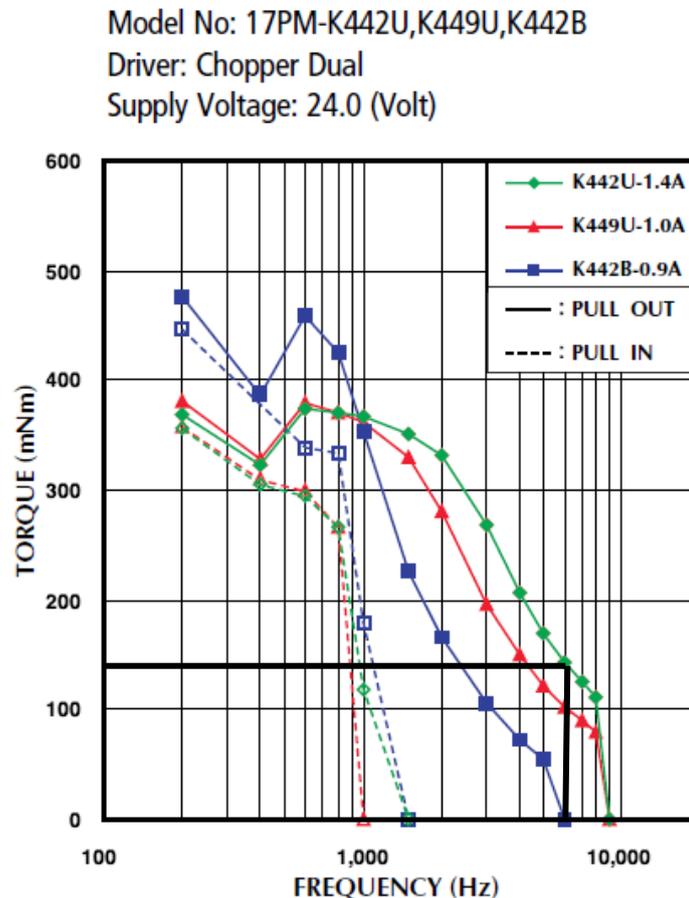
Por consequência, precisa-se encontrar um motor capaz de fornecer o torque requerido com esta velocidade. A seguir é possível observar o gráfico de desempenho do motor selecionado na Figura 26. Para efeito de melhor visualização deve-se converter os dados obtidos para unidades presentes no gráfico. Logo:

$$T = 3,6360 * 10^{-2} [N.m] = 36,360 [mN.m]$$

$$Vm = 1800 [RPM] = 6000 [Hz]$$

Para converter a velocidade de RPM para Hz, é necessário multiplicar a velocidade em RPM pelo número de pulsos por rotação do motor, que no caso do motor escolhido é 200.

Figura 26 – Gráfico do motor escolhido, modelo 17PM-K442U.



Fonte: Adaptado de Minebea (2017)

O motor escolhido é o modelo 17PM-K442U, e pode-se verificar no gráfico, que atende aos requisitos de velocidade e torque necessários. Este motor foi escolhido, pois além de possuir capacidade de atender os requisitos, ainda possui um valor comercial compatível com o projeto e é de fácil aquisição no mercado diferente do outro modelo que também atende aos requisitos que se pode observar também no mesmo gráfico de desempenho.

Uma vez definido o motor para o movimento de mergulho, pode-se então realizar os cálculos para o motor do movimento de tecimento. Os dados para este dimensionamento se encontram na Tabela 8.

Tabela 8 - Condições de operação para movimento de tecimento.

Condições de operação para movimento de tecimento	
Força externa	0 N
Ângulo do mecanismo	0 graus
Velocidade Linear	5 mm/s
Tempo de aceleração	0,1 s
Massa total	0,4 kg
Momento de Inercia do motor	$5,4 * 10^{-6} \text{ kg.m}^2$
Comprimento do Fuso	120 mm
Relação de Redução	1
Coefficiente de atrito entre guia e rolamento linear	0,03
Fator de Segurança	2

Fonte: Autor (2018)

No caso do movimento de tecimento, o requisito de velocidade linear estipulado foi de 5 mm/s, baseado no conhecimento e experiência técnica do Prof. Tiago Vieira Cunha, orientador deste trabalho.

Utilizando os dados da Tabela 8 e aplicando-os nas equações previamente descritas, obtém-se o torque e velocidades requeridas.

$$T = 2,6875 * 10^{-4} [N.m] = 0,2687 [mN.m]$$

$$Vm = 300 [RPM] = 600 [Hz]$$

Pode-se observar que os valores requeridos para o movimento de tecimento são menores que para o movimento de mergulho. Logo, pode-se utilizar o mesmo modelo de motor para ambos os movimentos. Esta escolha visa diminuir o número de peças diferentes presentes no projeto, prática extensivamente utilizada no projeto de mecanismos.

Ainda para efeito de validação do motor escolhido, deve-se calcular a Relação de Inercia entre a carga e o motor. Esta relação é calculada da seguinte forma:

$$\text{Relacao de Inercia} = \frac{J_{total}}{J_{motor}}$$

É indicado que para o correto funcionamento do motor este valor seja o menor possível. Sendo que para aplicações de baixa dinâmica não deve ultrapassar 50. Para movimentação de alta dinâmica o valor deve ficar o mais próximo de 1.

Para o caso do motor dedicado ao movimento de mergulho esta relação fica com o valor de 0,11 e para o movimento de tecimento obtém-se o valor de 0,03. Validando assim, mais uma vez a escolha do modelo do motor.

Uma vez definido os motores, deve-se verificar se a escolha da barra roscada M6 é adequada. Para tanto precisa-se calcular as tensões presentes e verificar se atende a critérios de falha. Ainda segundo Budynas (2016), estas tensões podem ser calculadas com base no sistema de coordenadas apresentado na Figura 27, como se segue:

$$\sigma_x = \frac{6F}{\pi * Dr * n_t * P} \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_y = 0 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_z = -\frac{4F}{\pi * Dr^2} \text{ [MPa]}$$

$$\tau_{xy} = 0 \text{ [MPa]}$$

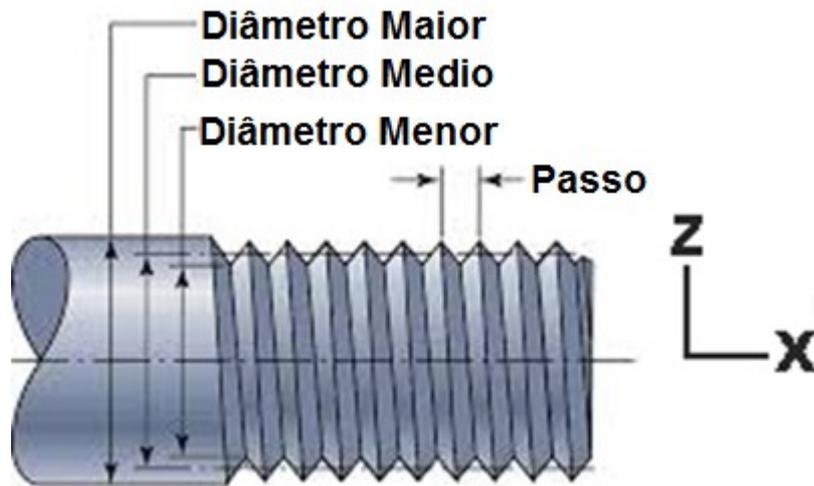
$$\tau_{yz} = \frac{16T}{\pi * Dr^3} \text{ [MPa]}$$

$$\tau_{zx} = 0 \text{ [MPa]}$$

Onde:

- F, força total [N]
- Dr, diâmetro menor do fuso [m]
- n_t , número de roscas engajadas
- T, torque máximo [N.m]

Figura 27 – Sistema de coordenadas para cálculo de tensões no fuso.



Fonte: Adaptado de Budynas (2016).

Segundo Budynas (2016)

As roscas engajadas não podem compartilhar a carga igualmente. Alguns experimentos mostram que a primeira rosca engajada conduz 38% da carga, a segunda 0,25 e a terceira 0,18, e a sétima está livre de carga. Ao estimar as tensões de rosca pelas equações, substituindo $0,38F$ por F e fazendo n_t igual a 1, resultara no nível mais alto de tensões na combinação rosca-porca. (p. 431).

Logo pode-se calcular o maior nível de tensão utilizando $0,38F$ ao invés de F quando faz-se n_t igual a 1. Sendo assim, consegue-se calcular as tensões utilizando as equações. Substituindo os valores calculados nas equações encontra-se os seguintes valores:

$$\sigma_x = 3,39 \text{ MPa}$$

$$\sigma_y = 0$$

$$\sigma_z = -0,474 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = 0$$

$$\tau_{yz} = 0,851 \text{ MPa}$$

$$\tau_{zx} = 0$$

Uma vez calculadas as tensões em cada uma das direções pode-se então calcular a tensão de Von Misses para verificar se atende a critérios de falha. A equação para tensão de Von Misses pode ser expressa como:

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2}$$

Substituindo-se os valores encontrados anteriormente na equação de Von Misses encontra-se:

$$\sigma' = 4,415 \text{ MPa}$$

Para verificar completamente os critérios de falha se faz necessário o cálculo da tensão de cisalhamento máxima, τ_{max} . Este pode ser calculado como:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Onde:

- $\sigma_1 = \sigma_x$
- $\sigma_3 = \frac{\sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z}{2}\right)^2 + (\tau_{yz})^2}$

Logo, substituindo-se os valores, encontra-se:

$$\tau_{max} = 2,537 \text{ MPa}$$

A escolha para fuso foi de uma barra roscada M6. Para efeitos de durabilidade do sistema, o material escolhido desta barra foi o aço inoxidável. Este material possui um limite de escoamento de 240 MPa. Comparando os resultados de tensões máximas verifica-se que estão muito abaixo do limite que poderiam alcançar. Sendo assim, a escolha da barra M6 é adequada para os níveis de tensões exigidos pelo mecanismo desenvolvido neste trabalho.

Uma vez que a força e torques totais são numericamente maiores no movimento de mergulho, é possível extrapolar o resultado para o movimento de tecimento. Fazendo assim, ser possível utilizar a mesma barra para ambos os movimentos.

Ainda é necessário verificar a condição de autobloqueio para o fuso escolhido. O autobloqueio se refere à condição na qual um parafuso sustenta a carga no lugar sem aplicação de qualquer torque. Esta condição se mostra necessária, uma vez que é desejável que durante o ajuste de eletrodo no porta eletrodo o mecanismo fique parado sem necessitar de acionamento do motor.

Para tal condição ser atendida, segundo Budynas (2016) é necessário que atenda a seguinte equação:

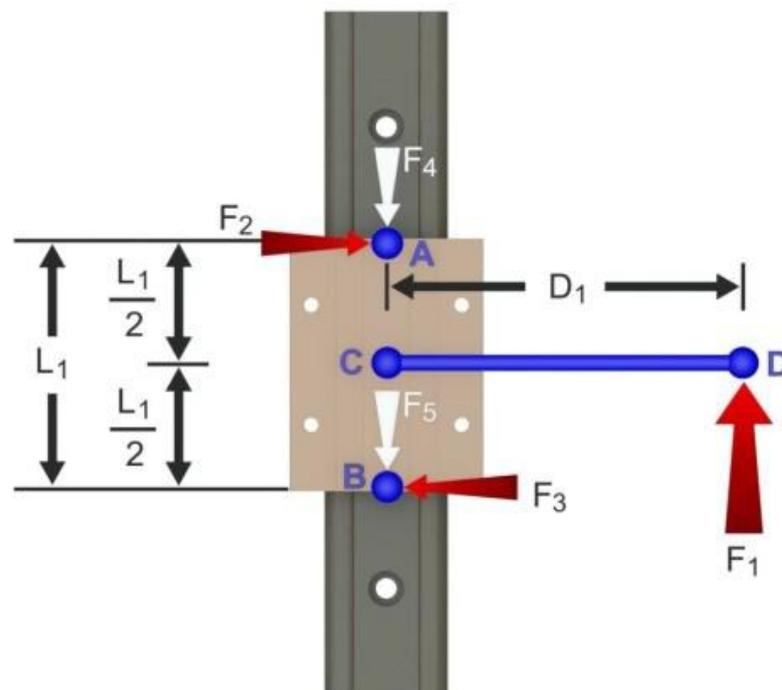
$$\pi * f * dm > P$$

Logo, para o fuso escolhido, tem-se: $2,85 > 1$. Portanto o fuso escolhido atende a condição de autobloqueio, validando novamente a escolha feita.

3.5 FENÔMENO STICK-SLIP

Um potencial problema de sistemas que utilizam guias com rolamentos lineares é o fenômeno conhecido como Stick-Slip (SCHROEDER, 2010). Este fenômeno é devido ao fato da geração de forças de atrito provenientes dos rolamentos. Estas forças são uma reação da força aplicada a linha do deslocamento. Pode-se entender melhor este fenômeno com a Figura 28.

Figura 28 – Ilustração do fenômeno Stick-Slip.

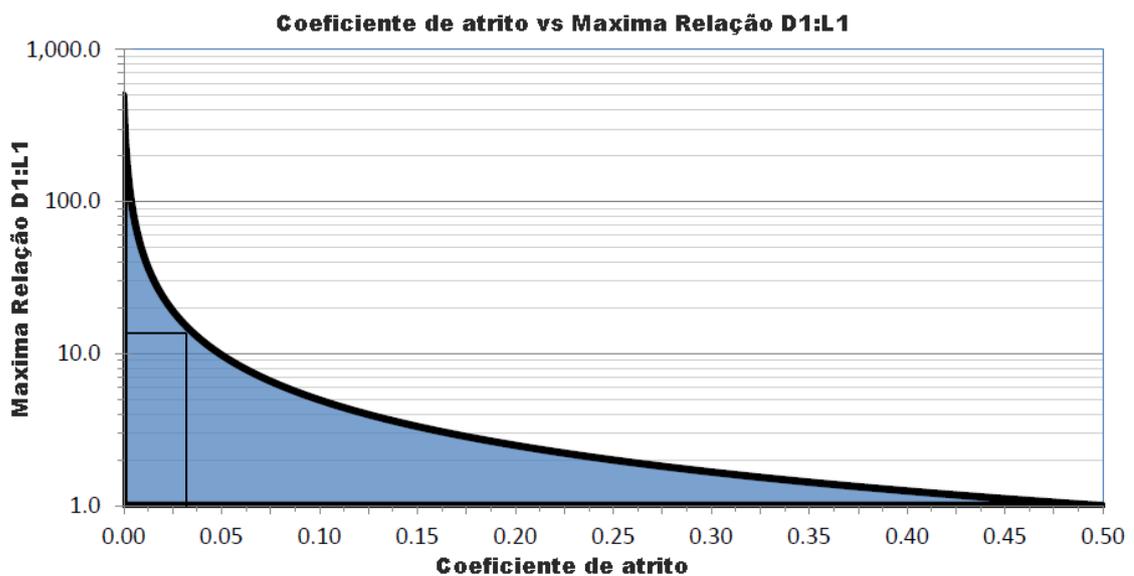


Fonte: Schroeder (2010)

É possível observar que quando uma força F_1 é aplicada a uma distância D_1 do rolamento, ela gera forças F_2 e F_3 a fim de equilibrar o sistema. Estas forças F_2 e F_3 são geradas nos pontos A e B, que são os pontos mais extremos do rolamento. Por sua vez estas forças acabam gerando as forças de atrito F_4 e F_5 que se opõem ao movimento.

Pode-se observar que a geração destas forças está intimamente ligada às distâncias D_1 e L_1 . A razão $D_1:L_1$ é amplamente utilizada para definição de design de mecanismos. Schroeder mostra que a razão máxima que pode ser utilizada depende do coeficiente de atrito entre as guias e os rolamentos. Na Figura 29, pode-se visualizar um gráfico que representa melhor esta relação.

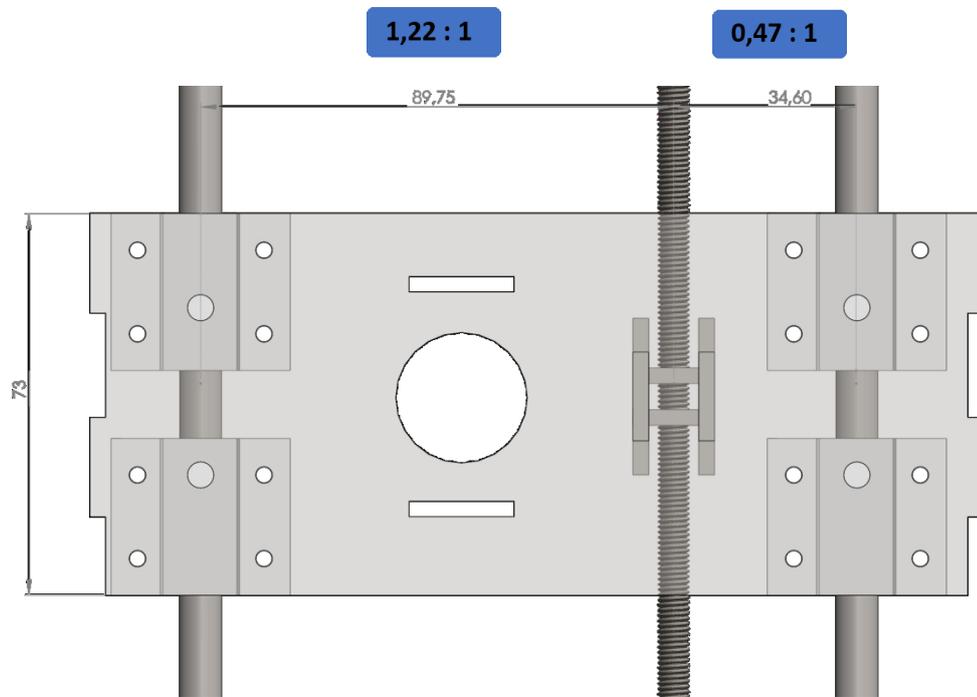
Figura 29 – Gráfico Relação do fenômeno Stick-Slip.



Fonte: Adaptado de Schroeder (2010).

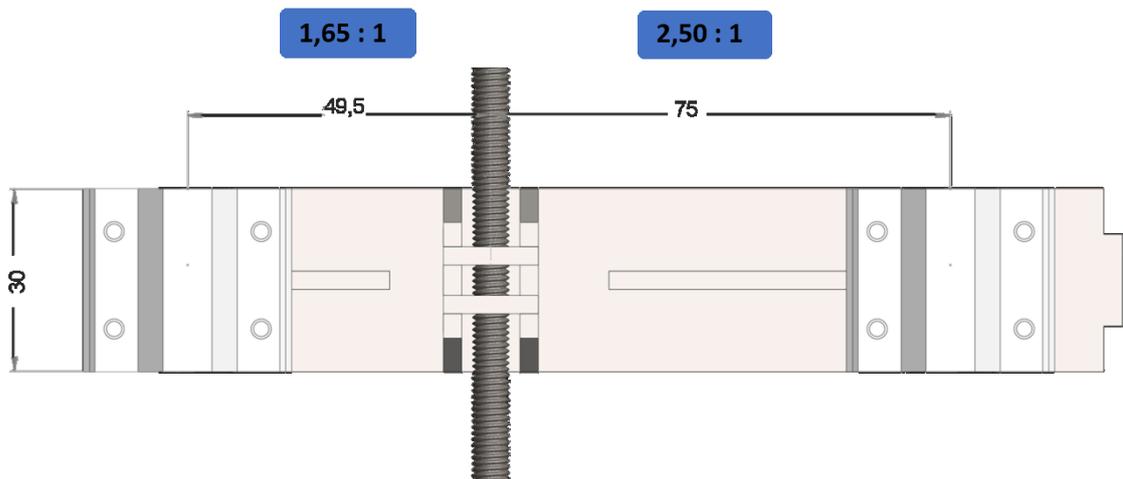
Os rolamentos escolhidos para nosso mecanismo possuem coeficiente de atrito de 0,03 segundo o fabricante. Logo, analisando o gráfico da Figura 29 pode-se ver que nosso mecanismo pode ter uma relação maior que 10:1. Utilizando o software Solidworks pode-se verificar que nosso sistema atende a esta condição. Visto que as relações que o mecanismo possui são: (1,22:1), (0,47:1) para o movimento de mergulho e (1,65:1), (2,5:1) para o movimento de tecimento, como pode ser observado nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 - Distâncias entre os rolamentos e fuso, Eixo Z.



Fonte: Autor (2018).

Figura 31 - Distâncias entre os rolamentos e fuso, Eixo Y.



Fonte: Autor (2018).

É possível observar nas Figuras 30 e 31, as distâncias entre o ponto de aplicação da força para o movimento e as distâncias entre os extremos dos rolamentos. No caso do movimento de mergulho é considerada a distância entre os extremos dos dois rolamentos que são utilizados.

3.6 AQUISIÇÃO DOS MATERIAIS E MONTAGEM

Uma vez finalizado projeto, passa-se a etapa de aquisição e montagem do equipamento. Para tanto, é possível dividir as peças em duas categorias. Peças que podem ser encontradas comercialmente e peças que devem ser fabricadas. Na Tabela 9 pode-se observar a lista de peças da parte mecânica necessárias à montagem do sistema mecanizado de soldagem que podem ser encontradas comercialmente.

Tabela 9 – Relação de peças encontradas comercialmente.

Relação de peças encontradas comercialmente	
Descrição do Item	Quantidade
Motor Nema 17	2
SK8 (Junta)	4
SHF8 (Junta)	4
Rolamento 624	2
SCS8UU (Rolamento Linear)	6
Acoplamento Flexível	2
Manipulo M6	3
Parafuso M6	24
Parafuso M3	24
Porca M6	18
Barra Linear Ø8mm x 568mm	2
Barra Linear Ø8mm x 160mm	2
Barra Roscada M6 x 560mm	1
Barra Roscada M6 x 118mm	1
Barra Roscada M6 x 90mm	1

Fonte: Autor (2018).

Todas as peças listadas na Tabela 8 podem ser facilmente encontradas e adquiridas no mercado. Por serem peças amplamente utilizadas em sistemas CNC, estas peças apresentam um baixo custo.

Como o projeto foi desenvolvido visando um baixo custo de fabricação, todo o restante das peças foi projetado buscando o menor número de operações de fabricação possível. Com exceção da peça utilizada como isolamento elétrico que é fabricada em poliamida, e os mordentes que são fabricados em Aço 1020 com 6 mm de espessura, todo o restante das peças são fabricadas com chapa de Aço 1020 com espessura de 3 mm.

Sendo as peças fabricadas a partir de chapas, o processo de corte a água foi escolhido para se obter as geometrias desejadas. Este processo foi escolhido devido ao baixo custo relativo, apresentando um custo-benefício atraente visto que empresas da região o utilizam amplamente. Isto se deve ao fato de as peças não precisarem de um pós-acabamento posteriormente ao corte. Após o processo de corte, as peças foram soldadas a fim de se obter a configuração final do equipamento.

Com exceção da peça de isolamento fabricada em poliamida e os mordentes do porta eletrodo, todas as peças necessitaram apenas do processo de corte e solda para a montagem final. No entanto no caso da peça de isolamento e os mordentes, devido a sua geometria, necessitavam de operações secundárias. Isso se deve ao fato de apresentarem furos ortogonais entre si. Desta forma, foi utilizado o processo de corte a água para se obter a geometria e o processo de usinagem para realização dos furos perpendiculares ao corte. Para o processo de usinagem foi utilizado uma fresadora para a obtenção de furos.

Desta forma foi possível obter todas as peças necessárias à fabricação. Sendo possível realizar a montagem do equipamento. Obtendo-se assim o sistema mecânico do equipamento desenvolvido para soldagem mecanizada de eletrodo revestido.

3.7 SOFTWARE DE CONTROLE

Como forma de se atingir o objetivo principal deste trabalho, que é conseguir realizar soldagens com eletrodo revestido de forma consistente e com repetitividade, se faz necessário além da parte mecânica do equipamento, o desenvolvimento de um software de controle. Este software deve ser capaz de a partir de parâmetros de soldagens desejados, realizar de forma mecanizada a soldagem. Para tanto, uma rotina foi desenvolvida a atender essa necessidade.

A rotina foi implementada de forma que através dos parâmetros de soldagens como: velocidade de mergulho, amplitude do movimento de oscilação do eletrodo e frequência deste movimento fosse possível acionar os motores de forma coordenada. Fazendo com que o sistema execute os movimentos atendendo aos parâmetros de soldagens desejados.

Além da função de acionamento coordenado dos motores, foi implementado a função de retorno à posição inicial. Esta função foi utilizada como forma de preparação para novas soldagens. Assim se faz com que após cada soldagem, seja possível o retorno do equipamento a posição inicial para início de uma nova soldagem.

Chaves fim de curso cessam o movimento do motor caso estes atinjam os limites de movimento. Estas chaves servem para tentar prevenir acidentes, aumentando assim a segurança do equipamento.

Como a parte eletrônica do equipamento utiliza Arduino, toda a programação foi realizada pelo autor na linguagem utilizada neste microprocessador. Como forma de interação homem-máquina, o LCD KeyPad Shield foi utilizado. Este recurso conta com um visor LCD e botões para selecionar as opções do software. Pode-se observar nas Figuras 32, 33 e 34 o processo de ajuste e entrada de dados no equipamento.

Figura 32 – Sequência da interface para referenciamento.



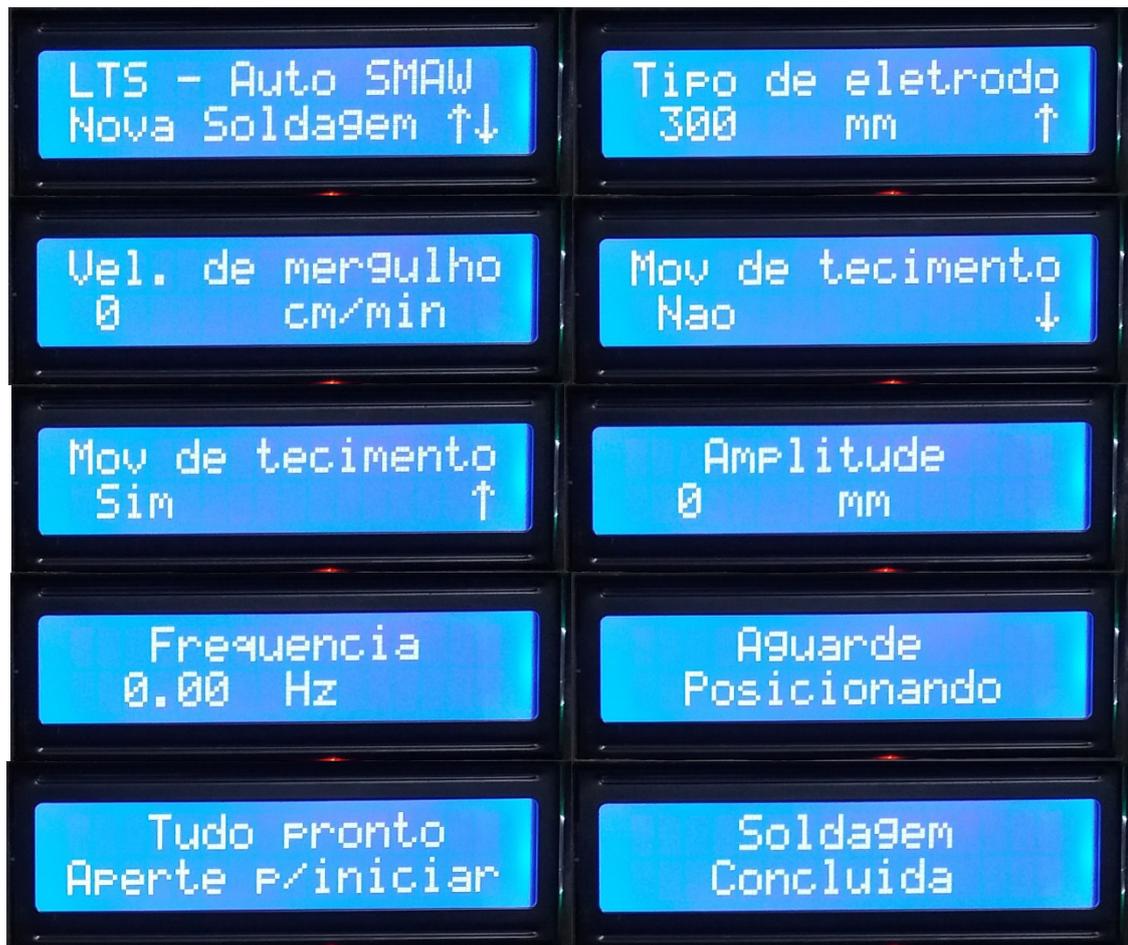
Fonte: Autor (2018).

Figura 33 - Sequência da interface para posicionamento manual.



Fonte: Autor (2018).

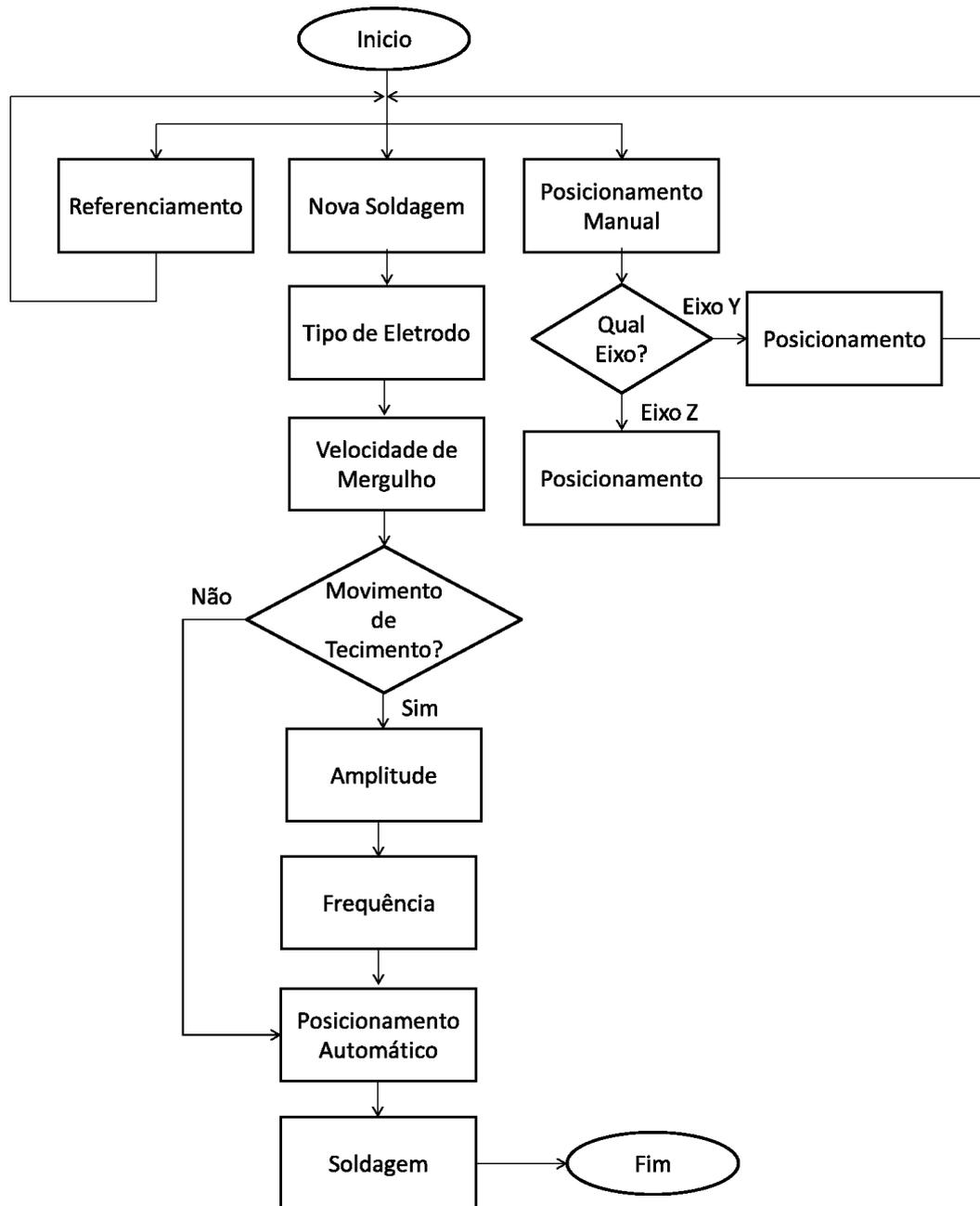
Figura 34- Sequência da interface para nova soldagem.



Fonte: Autor (2018).

Pode-se observar que através da sequência de Figuras, o processo de ajuste de uma nova soldagem consiste em: escolher o comprimento do eletrodo, definir a velocidade de mergulho, escolher se haverá ou não o movimento de tecimento e caso sim, definir a amplitude e a frequência deste movimento. Uma vez definidos os parâmetros de soldagem, o equipamento se posiciona e espera a confirmação para iniciar a soldagem. Este processo pode ser mais bem entendido através da Figura 35.

Figura 35 – Fluxograma da lógica do Software.



Fonte: Autor (2018).

Na Figura 35 pode-se observar um fluxograma que demonstra a lógica do processo de ajuste de uma nova soldagem no equipamento desenvolvido neste trabalho. Esta lógica foi desenvolvida e aplicada em forma de rotina em linguagem de programação utilizada pelo Arduino.

4 PROTÓTIPO

A fim de se atingir o objetivo proposto neste trabalho, um protótipo foi fabricado. Com a intenção de prolongar a vida útil do equipamento um tratamento de superfície foi realizado. O tratamento de superfície escolhido foi a galvanização preta, pois trata-se de um processo com baixo custo e amplamente realizado pelas empresas da região. Este protótipo já com o tratamento de superfície e montado pode ser visto nas Figuras 36, 37 e 38.

Figura 36 – Vistas Frontais do mecanismo real.



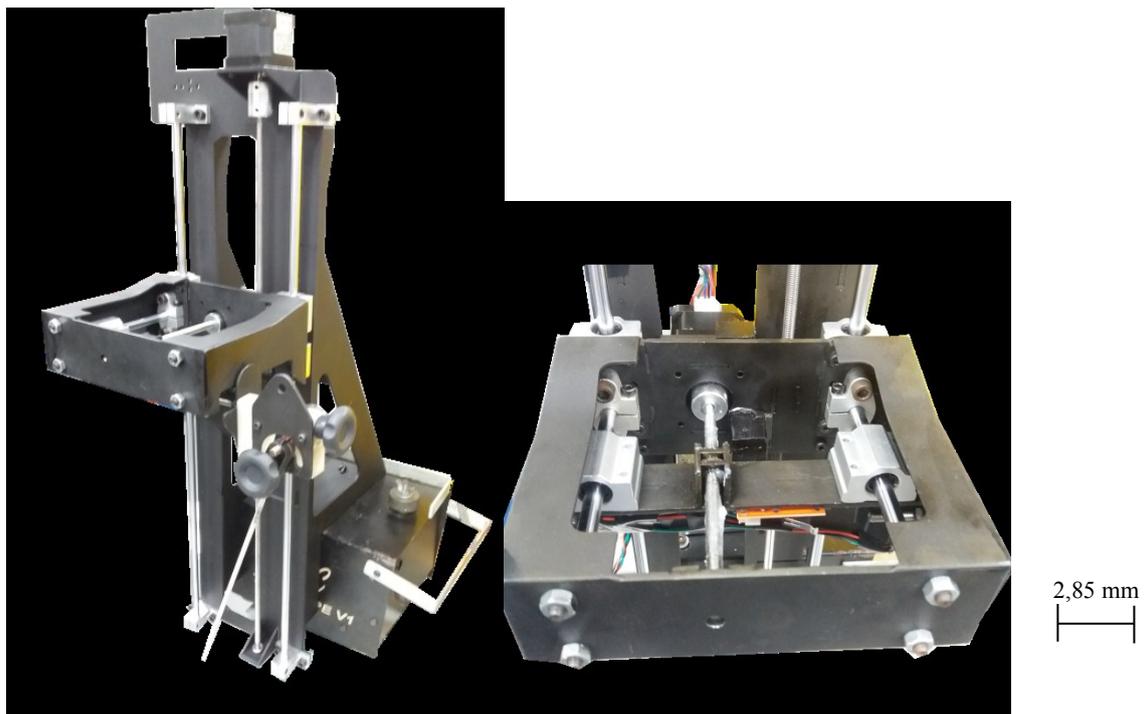
Fonte: Autor (2018).

Figura 37 – Vista Lateral e Isométrica Traseira do mecanismo real.



Fonte: Autor (2018).

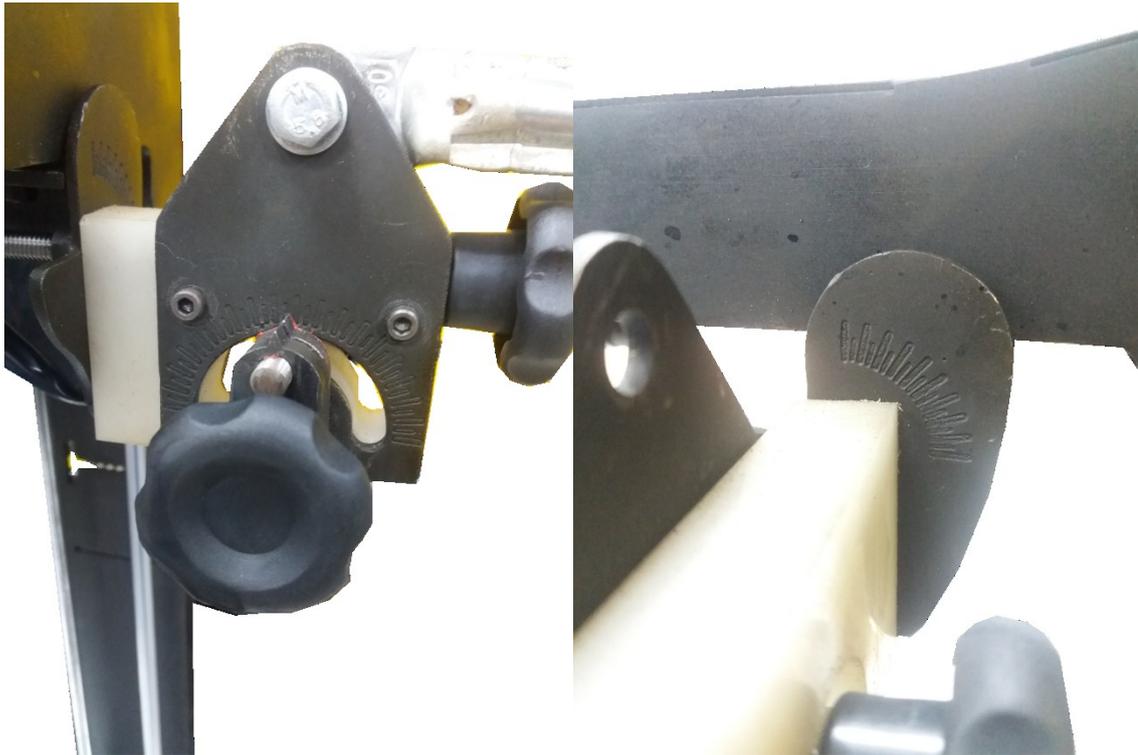
Figura 38 - Detalhamento do sistema responsável pelo movimento de tecimento.



Fonte: Autor (2018).

Com a intenção de facilitar o uso e aumentar a repetitividade da soldagem, marcações foram feitas nas peças. Elas podem ser melhores observadas na Figura 39.

Figura 39 – Gravação de auxílio a regulagem dos ângulos de soldagem.



Fonte: Autor (2018)

Estas marcações servem como indicações do ângulo sendo usado durante a soldagem. Elas servem como guias para posicionamento do eletrodo em relação à peça de trabalho. Tornando o equipamento capaz de realizar soldagens com maior repetitividade.

4.1 ENSAIOS DE VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Com a intenção de validação do projeto, ensaios com o equipamento foram realizados. Estes ensaios foram feitos de forma a testar a capacidade de soldagem do equipamento.

De forma a testar amplamente o equipamento, soldas com movimento de oscilação do eletrodo e sem este movimento foram desenvolvidas. Os parâmetros utilizados para a realização dos ensaios podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros de Soldagem utilizados nos ensaios de validação.

Parâmetro	Sem Tecimento	Com Tecimento
Tipo de Eletrodo	6013 – 300 mm	6013- 300 mm
Velocidade de Avanço	25 cm/min	18 cm/min
Velocidade de Mergulho	31 cm/min	31 cm/min
Amplitude da Oscilação	-	5 mm
Frequência da Oscilação	-	0,5 Hz
Tensão de Soldagem	80 V	80 V

Fonte: Autor (2018).

Ainda para efeito de comparação uma soldagem manual sem movimento de oscilação do eletrodo foi realiza. Pode-se observar o cordão resultante desta soldagem na Figura 40.

Figura 40 – Cordão de solda realizado manualmente.

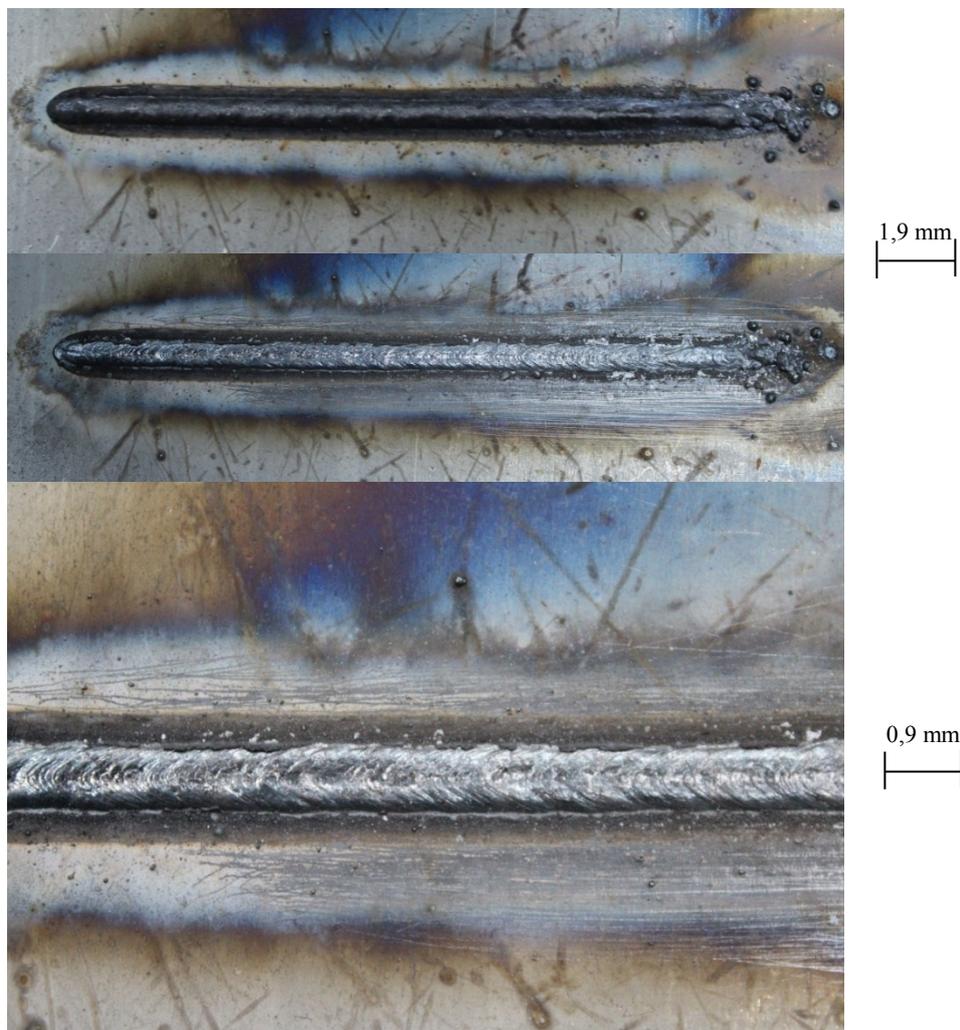


Fonte: Autor (2018).

Observa-se que mesmo tentando manter o cordão o mais linear possível isto não é possível. Ainda é possível observar que mesmo a tarefa mais simples, que é manter o arco aberto para realizar um único cordão contínuo se mostra de difícil obtenção. Isto deve-se ao fato de que é preciso realizar o movimento de mergulho para manter a altura de arco, muitas vezes isso acarreta na extinção precoce do arco. Resultando em descontinuidades do cordão.

Nas Figuras 41 e 42 pode-se observar o resultado da soldagem nos corpos de prova. Sendo a primeira imagem da sequência, o cordão com escória e as seguintes sem a escória.

Figura 41 – Cordão de solda obtido sem o movimento de tecimento.

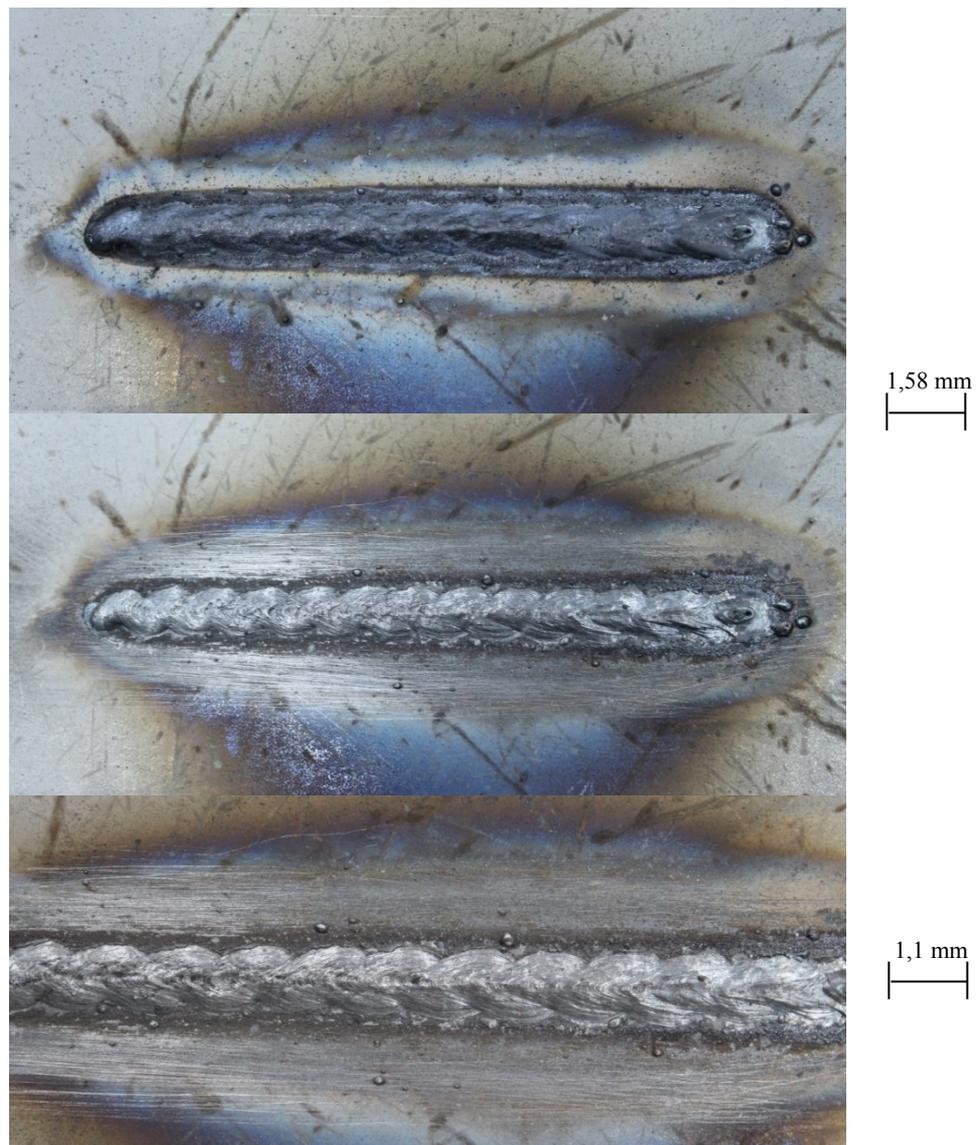


Fonte: Autor (2018).

A Figura 41 apresenta o cordão obtido sem o movimento de tecimento. A abertura do arco se deu início a esquerda na imagem. Pode-se observar que a solda se desenvolveu de maneira linear, ou seja, sem desvios de trajetória, diferente do cordão realizado de forma manual. Sendo o cordão estável durante maior parte de seu comprimento. A parte com menor estabilidade, que pode ser observada mais à direita na imagem, deve-se a extinção do arco. O

processo de extinção do arco utilizado pelo equipamento é a elevação do eletrodo em relação à peça. Esta elevação faz o comprimento do arco aumentar até auto extinguir-se. Essa variação na altura do arco causa a menor estabilidade. Este fato pode ser melhorado, fazendo o equipamento distanciar o eletrodo da peça de trabalho de maneira mais abrupta.

Figura 42 - Cordão de solda obtido com o movimento de tecimento.



Fonte: Autor (2018).

Já na Figura 42 observa-se o cordão obtido com o movimento de tecimento. Pode-se observar que o movimento de oscilação do eletrodo produz de forma estável o mesmo padrão. Isto demonstra que o equipamento é capaz de reproduzir cordões de solda com alta repetitividade. Sendo assim, o equipamento se mostra hábil a ser utilizado em futuras pesquisas relacionadas ao processo de soldagem SMAW.

5 CONCLUSÃO

A técnica de soldagem conhecida como SMAW, apesar de considerada de baixa produtividade ainda se mostra amplamente utilizada na indústria. Um dos motivos deve-se ao fato de este método proporcionar a possibilidade de adição de elementos de liga durante o processo de soldagem. Ainda, por possuir um equipamento relativamente barato e portátil, é um processo amplamente utilizado na indústria.

Seu estudo é de grande interesse, visto que este processo possui um lugar de destaque dentro da área da soldagem. No entanto para validação de resultados, é necessário que seja possível reproduzi-los. Sendo realizado de forma manual, o processo SMAW intrinsecamente possui baixa repetitividade. Uma vez que a interação humana durante o processo acarreta em desvios de conformidade. Portanto, tornar este processo capaz de reproduzir cordões de soldas, diminuindo a interação humana durante o processo de soldagem possui papel indispensável nas pesquisas da área.

Através da extensa lista de trabalhos já realizados na área de automatização do processo SMAW, pode se notar que há relevância o seu desenvolvimento. O estudo do processo visa melhor preparar e informar o soldador, sobre as melhores práticas a serem executadas durante o processo de soldagem, buscando as melhores características da solda.

Como o processo dentro da indústria de forma geral se dá de forma manual. É de interesse da indústria, obter resultados com os quais podem relacionar com sua realidade. Uma vasta quantidade de soldadores que utilizam o eletrodo revestido realiza o movimento de oscilação do eletrodo. Para melhor representar a situação encontrada dentro da indústria, deve-se durante a pesquisa procurar alcançar ao máximo, de maneira estável e com repetitividade, simular aquilo que acontece dentro da indústria.

Analisando as literaturas existentes pode-se observar os equipamentos mecanizados do processo SMAW não dispõe de um sistema capaz de realizar este movimento de oscilação, conhecido no ramo da soldagem como tecimento. Portanto, o desenvolvimento de um sistema capaz de reproduzir este movimento se mostrou importante.

Para tanto, utilizando os conceitos empregados em máquinas CNC, foi desenvolvido um sistema hábil a realizar todos os movimentos que são realizados pelo soldador de forma independente. Tentando ao máximo assimilar-se ao que acontece durante o processo manual.

Podendo assim, este sistema ser utilizado em pesquisas na área, sendo capaz de reproduzir resultados devido a sua alta repetitividade.

Através dos ensaios de validação do equipamento foi possível constatar que o objetivo foi alcançado. O equipamento produziu cordões de solda estáveis e com dimensões regulares. Sendo possível reproduzir estes cordões, através da utilização dos mesmos parâmetros de soldagens utilizados.

O equipamento atende aos requisitos de projeto, pois possui movimentos independentes, sendo possível através dos parâmetros de soldagens, realizar soldas de forma estável e com repetitividade. A possibilidade de se selecionar os ângulos de soldagens torna este equipamento ainda mais robusto.

Logo pode-se concluir que o sistema desenvolvido neste trabalho atende a uma necessidade existente na área da soldagem. Sendo esta necessidade aumentar a repetitividade do processo SMAW. Sendo capaz de realizar soldas com todos os 3 movimentos empregados durante a soldagem de maneira independente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo da obtenção de melhorias no equipamento desenvolvido e busca de maiores aplicações do mesmo, são realizadas algumas recomendações. Estas sugestões têm como objetivo dar sequência no desenvolvimento realizado neste trabalho. Também são sugestões, o uso do equipamento para realização de pesquisa no processo SMAW.

Por conseguinte, recomenda-se:

- Implementar um controle de ajuste de altura de arco, para correção adaptativa da corrente de soldagem;
- Analisar os impactos de um sistema com controle de ajuste de altura de arco, comparando com soldagens realizadas sem este ajuste;
- Implementar um sistema de aquisição de dados para coleta de temperatura do eletrodo durante a soldagem
- Realizar estudos do impacto da variação das velocidades dos movimentos de soldagens na qualidade das soldas;

REFERÊNCIAS

JENNEY, Cynthia L.; O'BRIEN, Annette (Ed.). **Welding handbook: welding science and technology**. 9. ed. Miami: AWS, 2001.

LIMA II, Eduardo Jose; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Arc Welding: Arc Welding Automation**. Intech, 2011. 320 p. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/arc-welding/arc-welding-automation>>. Acesso em: 02 maio 2017.

RATHI, Vijayesh; HUNNY. Analyzing the effect of parameters on SMAW process. **International Journal of Emerging Research in Management & Technology**. [Kanipla, India], p. 16-21. jun. 2015.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2005.

ESAB. **Apostila Eletrodos Revestidos**. 2005. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2018.

MACHADO, Ivan Guerra. **Trincas de solidificação em soldas num aço de construção naval**. 1980. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

CAVALCANTI, C. A. N. Comparação entre o comportamento de eletrodo revestidos utilizando dispositivos de soldagem por gravidade e com controle automático do comprimento do arco elétrico. Monografia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

SILVA, Kleber da. **Sistema Automático para Soldagem com Eletrodo Revestido**. 2015. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

LEE, Chien-yi et al. Development of an automatic arc welding system using a variable structure model reference scheme. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 35, n. 9-10, p.978-986, 18 nov. 2006. Springer Nature.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MINEBEA, M. Hybrid Stepper Motors DataSheet 17PM-k. Singapura: Minebea, 2017.

SCHROEDER, Jonathan R. **Demystifying the 2:1 Ratio and the Stick-Slip Phenomeno**. [s.l]: Pbc Linear, 2010. 11 p.