



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE SOLDAGEM ORBITAL TIG PARA SOLDAGEM AUTÓGENA

Jonas Gabriel Ramos da Silva Ataliba, jonas.ataliba@ifrj.edu.br¹
Matheus Batista de Oliveira, matheus.batista@ifrj.edu.br¹
Ivan de Carvalho Cairrão, ivan.cairrao@ifrj.edu.br²
André Rocha Pimenta, andre.pimenta@ifrj.edu.br¹

¹Laboratório de Instrumentação e Simulação Computacional – LISCOMP, Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ, Rua Sebastião Lacerda, s/nº, centro, Paracambi - RJ, Brasil

²Departamento de Mecânica, Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ, Rua Sebastião Lacerda, s/nº, centro, Paracambi - RJ, Brasil

Resumo. Os aços inoxidáveis duplex são uma classe de aços muito utilizados na indústria petroquímica, desde que começou a ser usado em larga escala - por conta de suas propriedades mecânicas e corrosivas ótimas sob tensão e em ambientes agressivos - muitos cientistas se debruçaram na missão para caracterizar e validar as características desta liga, assim como, desenvolver métodos para fabricação e manutenção. Dentre os processos de fabricação mais comuns se encontra a soldagem TIG. O trabalho teve como objetivo principal desenvolver um dispositivo para soldagem orbital TIG de baixo custo, com a finalidade de intensificar os estudos dos efeitos da soldagem TIG nesta liga em instituições de ensino e pesquisa, que em geral não possuem um sistema de soldagem orbital. Para tal os autores utilizaram uma frota de impressoras 3D de deposição de filamento fundido aplicando técnicas de prototipagem rápida difundidas no mercado. O projeto foi construído com sucesso, com o novo sistema os autores têm o objetivo de investigar as propriedades mecânicas e caracterizar a junta soldada dos aços inoxidável duplex.

Palavras chave: metalurgia física; engenharia mecânica; impressão 3D; manufatura aditiva; desenvolvimento de produto.

Abstract Duplex stainless steels are a class of steels widely used in the petrochemical industry, since they began to be used on a large scale - due to their excellent mechanical and corrosive properties under stress and in aggressive environments - many scientists have dedicated themselves to the mission to characterize and validate the characteristics of this alloy, as well as develop methods for manufacturing and maintenance. One of the most common manufacturing processes is TIG welding. The main objective of the work was to develop a low-cost TIG orbital welding device, with the aim of intensifying studies of the effects of TIG welding on this alloy in teaching and research institutions, which generally do not have an orbital welding system. To this end, the authors used a fleet of fused filament deposition 3D printers applying rapid prototyping techniques widespread on the market. The project was successfully built, with the new system the authors aim to investigate the mechanical properties and characterize the welded joint of duplex stainless steels.

Keywords: physical metallurgy; mechanical engineering; 3D printing; additive manufacturing; product development.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são um grupo de ligas de ferro com teor superior a 12% de cromo, sendo classificados de acordo com sua estrutura cristalina em ferríticos, austeníticos e martensíticos (Souza et al, 2015). Robert N Gunn (1997) define os aços inoxidáveis duplex como “uma liga em que ambas as fases, ferrítica (δ) e austenítica (γ), estão presentes em quantidades significativas.” Mais especificamente aços inoxidáveis duplex são uma liga ferrítica austenítica de Fe-Cr-Ni que contém entre 30% a 70% de ferrita. O mercado de transporte de óleo e gás tem se beneficiado dessas ligas de aço pois são a escolha ótima ao combinar resistência mecânica acima da média com resistência à corrosão.

A crescente indústria de extração de óleo e gás utiliza os aços duplex na forma de fitas metálicas para confecção de tubos flexíveis. Devido à alta demanda desta liga pelo setor petroquímico, também foram desenvolvidos métodos de união das fitas metálicas por soldagem autógena pelo processo de TIG (Tungsten Inert Gas) para tubulações de diâmetro reduzido (Hosseini et al, 2016).

Soldagem TIG consiste no uso de um eletrodo não consumível de tungstênio com a finalidade de abrir e manter o arco elétrico promovendo a fusão do metal de base, um escudo de proteção gasoso é emitido pela tocha em que o eletrodo está

alojado evitando reação da poça de fusão com o oxigênio. Antes de serem aplicadas nos tubos para formar a carcaça interna, as fitas de aço duplex são soldadas pelo método TIG (Tavares et al, 2021). Essa liga também é muito utilizada nos elementos estruturais utilizados largamente na construção de plataformas em alto-mar (Souza et al, 2015).

O processo de soldagem de aços inoxidáveis duplex é uma operação delicada levando em consideração que a elevada temperatura do processo promove mudança na microestrutura do material, de modo que é possível ocorrer um desbalanceamento nas frações volumétricas de ferrita e austenita em um processo semelhante ao que ocorre durante os tratamentos térmicos em aços duplex (Souza et al, 2015). As elevadas temperaturas promovem uma maior concentração de ferrita, devido à temperatura de estabilização da fase δ , promovendo a precipitação de nitretos de cromo entre 700°C - 900°C (Tavares et al, 2023) que levam o material a ter um baixo desempenho contra o meio corrosivo perdendo assim suas propriedades mecânicas podendo levar à falha por conta da formação de nitretos. Devido a importância dos aços inoxidáveis do grupo duplex, diversos autores se debruçaram sobre o tema com o propósito e investigar suas propriedades mecânicas e características microestruturais (Alves et al, 2023).

A instabilidade termodinâmica da ferrita na faixa de trabalho entre 300°C e 1000° mobilizou diversos autores a estudarem o comportamento dos aços inoxidáveis duplex (Voronenko, 1997). O processo de soldagem, como mencionado em parágrafos anteriores, principalmente na zona termicamente afetada, eleva a temperatura do material para sua faixa de instabilidade, podendo acarretar a precipitação de nitrogênio na forma de nitreto de cromo na ferrita (Pecly et al, 2023). O trabalho de Corolleur et al (2015) estudou a influência dos parâmetros de soldagem na fração volumétrica de ferrita na junta soldada, evidenciando a relação entre a fase δ e a velocidade de resfriamento da junta soldada em que quanto mais lento maior será a porcentagem de austenita.

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de soldagem orbital que torne possível a preparação de corpos de provas, amostras, de pequenos tubos de aço inoxidável duplex a fim de fortalecer as linhas de pesquisas em metalurgia física e métodos experimentais em mecânica dos sólidos no IFRJ Campus Paracambi. Dos processos de soldagem, o processo TIG é um dos que oferecem melhor desempenho mecânico das juntas soldadas (Sathiya et al, 2009). A solda autógena pela metodologia TIG dispensa o uso de metal de adição ao fundir o próprio metal base para constituir o cordão de solda, estudar os efeitos dessa modalidade de soldagem para tubos de diâmetros até 2" (duas polegadas) se faz necessário para entender as influências das variáveis sobre as propriedades mecânicas do aço duplex.

2. METODOLOGIA

2.1 Conceito

A ideia principal do projeto é um equipamento de soldagem orbital, onde irá se manter a tocha de soldagem TIG fixa e girar o tubo até que sua seção circular tenha sido soldada. Alguns pontos que devem ser considerados são: necessidade de variar o diâmetro do tubo a ser soldado entre 1" e 3"; variação da velocidade de soldagem que deveria ser feita modificando a rotação do tubo; regulagem da altura da tocha, permitindo ajustar a distância eletrodo x peça. Com ideia preliminar estruturou-se um projeto similar a um torno mecânico onde o tubo a ser soldado é fixado na placa de castanhas, e a tocha de soldagem no porta ferramenta.

O projeto mecânico do equipamento se deu pelo uso de softwares Computer Aided Design (CAD) comerciais, AutoCAD e SolidWorks, disponibilizados pela instituição de ensino nativa dos autores. O projeto do sistema de soldagem orbital tem como proposta construir uma tecnologia nativa e de baixo custo para pesquisas na área de aços duplex.

A equipe tem à sua disposição três máquinas de impressão 3D por deposição de filamento fundido, da companhia Creality, modelos Ender-3, Ender-2 Pro, e Ender-3 S1 a fim de manufaturar in loco o maior número possível de partes. O custo de fabricação tende a ser reduzido quanto menos partes metálicas o conjunto possuir. As partes comerciais a serem compradas devem ser apenas aquelas que extrapolam os limites das características mecânicas das impressões 3D em PLA.

2.2 Fluxo de Trabalho

O primeiro passo em um projeto mecânico é o estudo do caso, após revisão e extensa pesquisa no processo de soldagem TIG e ideação do mecanismo. Essa etapa foi marcada por consulta à profissionais do ramo de soldagem. Tomadas de decisão são essenciais durante os projetos de máquinas variadas, a fim de acelerar a visualização do projeto o primeiro modelo descrito na Figura 1 teve como principais componentes partes estruturais metálicas. O equipamento foi dividido em três subconjuntos: Sistema de rotação da peça (Item A - Fig.1); Base (item B - Fig.1); e Suporte da tocha de soldagem (item não ilustrado na Fig.1).

Após condução de um estudo para compreensão do limite de acabamento, tolerância dimensional e geométrica fornecidas pelas impressoras 3D disponíveis no laboratório, identificou-se que quatro componentes não poderiam ser impressos: Motor; redutor; base do equipamento; placa de castanhas. O sistema de motor redutor é responsável por rotacionar a amostra durante o processo de soldagem, a complexidade dos mecanismos, bem como a necessidade de acionamentos eletrônicos não permitiu a impressão, sendo utilizado um servo motor modelo ES-M32320 da fabricante

Leadshine e um redutor de velocidade 20:1 modelo Geremia Weg Cestari GSA28 fabricado pela WEG. Também se optou por não imprimir a base do equipamento, visto que não seria possível assegurar as tolerâncias dimensionais e geométricas necessárias para garantir o alinhamento do sistema. Por fim, a placa de castanhas, que faz parte do subconjunto “sistema de rotação da peça”, sendo responsável por fixar o tubo a ser soldado também não foi impressa por questão de tolerâncias, sendo adotado uma placa comercial de abertura 80mm da fabricante CHAMPIONTOOLS.

Os próximos passos tiveram como objetivo entender os limites da impressão 3D quando o assunto é ser solicitado como componente estrutural. Isto é, uma vez que o processo de fabricação por deposição de filamento fundido sofre processos físicos diferentes do que o de aço como evidenciado na literatura (Medellin-Castillo, H. I. e Zaragoza-Siqueiros, 2019), os autores tiveram de entender o processo e se tornarem capazes de parametrizar as melhores condições de impressão para a aplicação (Velocidade, Temperatura do Bico, Temperatura da Cama, Temperatura Ambiente, Velocidade da Ventoinha, Nivelamento, etc).

2.2.1 Subconjunto Base

O conjunto de movimento linear, trilho e patins, foi o primeiro a ser testado como uma possibilidade de peças a serem produzidas por impressão. O conjunto original era composto de perfil de alumínio, patins e guia linear, vide Figura 1(a). Os perfis de alumínio (item A - Fig.1(a)) foram substituídos por uma base retangular de alumínio. Já o patins (item C - Fig.1(b)) e o trilho (item B - Fig.1(b)) foram remodelados para permitir a utilização da impressão 3D, o novo conjunto tinha como objetivo proporcionar o movimento linear preciso com o melhor ajuste possível utilizando os equipamentos disponíveis em laboratório. Para conseguir obter um sistema de deslizamento com a menor folga possível, muitos testes foram realizados a fim de esgotar as possibilidades do ajuste, a Figura 2(a) representa o teste de ajustes variando as medidas externas e internas de um sistema eixo x furo. Usando como referência os ajustes mecânicos já difundidos na área técnica para as peças móveis, o objetivo foi um ajuste deslizante. O projeto do conjunto impresso, Figura 2(b), imita as funcionalidades do projeto da fase de ideação descrito na Figura 1(b).

Pode ser observada na Figura 2(b) (indicada por uma seta vermelha) a placa impressa em PLA, na posição entre o motor redutor e a chapa metálica. Essa placa foi projetada especificamente para aumentar a altura do centro de gravidade do conjunto de modo que a castanha possa trabalhar com o diâmetro máximo de 3” (três polegadas) de tubo sem tocar na base ou trilho.

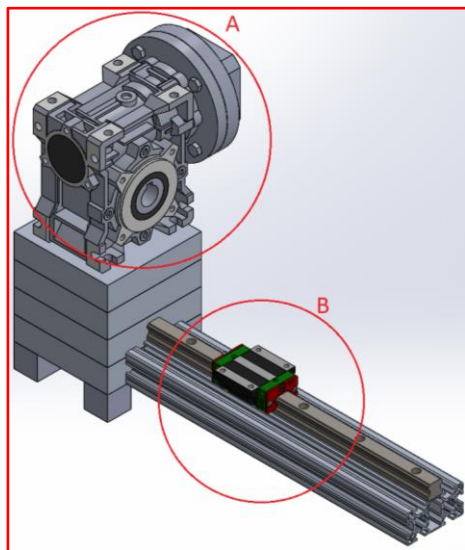


Figura 1(a). Modelagem no processo de ideação.

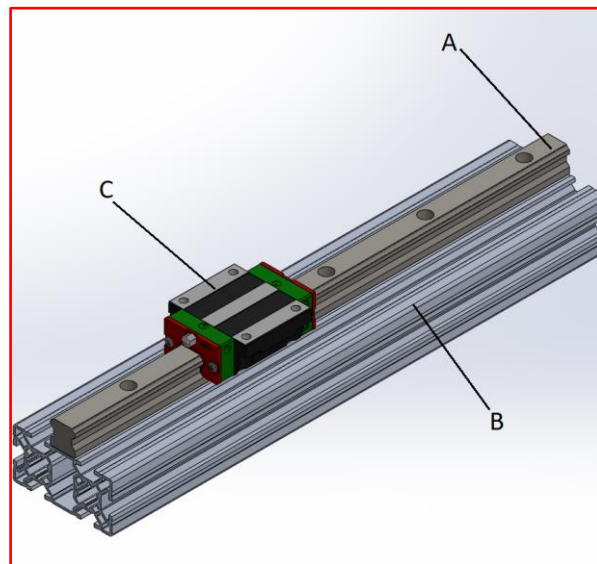


Figura 1(b). Subconjunto Base.



Figura 2(a). Peças impressas 3D para realizar testes de ajuste eixo-furo.

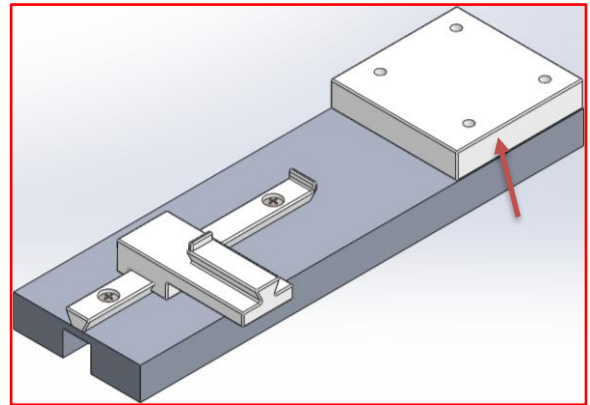


Figura 2(b). Projeto final do subconjunto Base.

2.2.2 Subconjunto sistema de rotação da peça

Em um segundo momento, o dispositivo de fixação do tubo (mandril ou castanha) deveria ser acoplado ao motor redutor. Para solucionar esse problema foi utilizado um eixo também impresso em 3D (item B - Fig. 3). Esse eixo passou por inúmeras versões, projetos, desenhos e métodos de fabricação nas impressoras por conta de sua importância na estabilidade, além da necessidade de suportar o peso da placa de castanhas. Durante as impressões do eixo foram testados diversos tipos de padrão de preenchimento, até mesmo preenchimento de 100%.

O eixo-acoplamento (conforme Figura 4(a)) precisa de um preenchimento modelado, projetado, para suportar carga. A figura 4(b) apresenta o componente durante o processo de preparação para impressão 3D no software CURA, um software fatiador que transforma os dados do modelo 3D em caminhos para a deposição de plástico por camadas. Na imagem é possível observar a tentativa de aplicar elementos estruturais, no interior do flangeado. Mesmo tendo sucesso na modelagem, a versão final escolhida foi um corpo com 100% de preenchimento e suportes na conexão entre flange-eixo como versão ótima - a grande diferença se deu na espessura do flange e no ajuste entre o eixo e o redutor.

Na Fig.3 é apresentado o conjunto responsável pela motorização da placa de castanhas onde a peça a ser soldada ficará presa, que é formado pelo servomotor (item D) acoplado a um redutor de velocidade (item C). O servomotor é controlado por um sistema desenvolvido no laboratório com a utilização de um Arduino, dispositivo altamente flexível e programável de aplicação consolidada na academia por sua versatilidade e possibilidade de integração com sistemas mais complexos e comerciais. O software de controle é executado através da comunicação entre o Arduino e um módulo (conhecido como Shield) que traduz a linguagem de programação C para G-Code, tornando possível o controle de rpm e sentido da rotação.

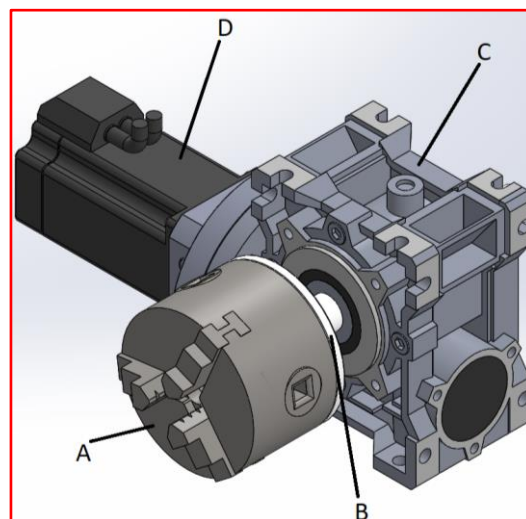


Figura 3. Projeto Subconjunto sistema de rotação da peça.

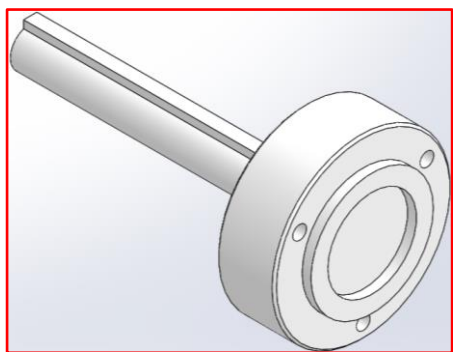


Figura 4(a). Projeto Subconjunto sistema de rotação da peça.

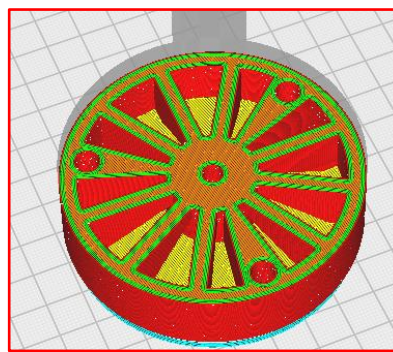


Figura 4(b). Modelagem do reforço interno do acoplamento.

2.2.3 Subconjunto fixação da tocha TIG

A Figura 5 é o projeto do dispositivo responsável pela fixação da tocha TIG. Dentro do processo de engenharia de projeto existe o conceito de reutilização de conhecimento, esse conceito foi empregado durante essa etapa. A experiência acumulada nas tentativas anteriores de criar um sistema de guias lineares deu suporte ao desenvolvimento do dispositivo de ajuste da altura da tocha. A metodologia descrita por Baxter et al (2007) em termos de parametrização e gerenciamento dos conhecimentos de projeto foi largamente utilizada a partir dessa fase. Esse dispositivo também deve permitir abertura do arco elétrico, o acionamento da tocha foi solucionado ao posicionar um sistema de molas abaixo do cabo da tocha, que permitirá que esta seja pressionada para baixo, realizando a abertura do arco.

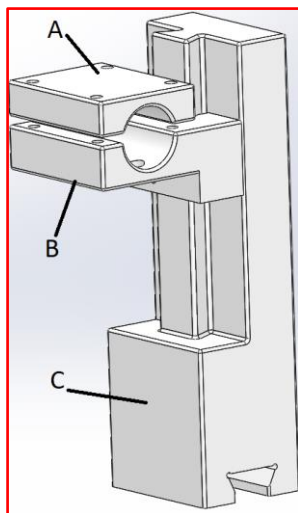


Figura 5. Subconjunto fixação da tocha TIG.

A tocha TIG deve ser posicionada entre os itens A e B da figura 5, no fundo do raio do item B são posicionadas duas molas de alturas diferentes que permite a abertura rápida do arco elétrico. O item C por sua vez tem como objetivo encaixar na guia linear (Figura 2(b)) e se mover no eixo Y, enquanto o item B desliza no trilho acoplado ao item C no eixo Z.

Após os testes individuais por meio de prototipagem rápida e modelagem dos subconjuntos, a montagem pode ser observada na Figura 6, apresentando uma versão final - até o momento - do projeto que estará sujeito a testes futuros.

O software de fatiamento escolhido foi o open-source Ultimaker Cura 5.4, a Figura 4(b) é uma imagem do modelo 3D sendo fatiado. O software de fatiamento converte um objeto sólido 3D em camadas no eixo X-Y que se empilham no eixo Z com o objetivo de formar um volume. Todo projeto 3D é convertido do formato nativo para a extensão .stl que consiste em uma lista finita de triângulos que define uma peça tridimensional, o fatiador por sua vez “corta” o modelo na horizontal gerando camadas e os caminhos da ferramenta em G-CODE.

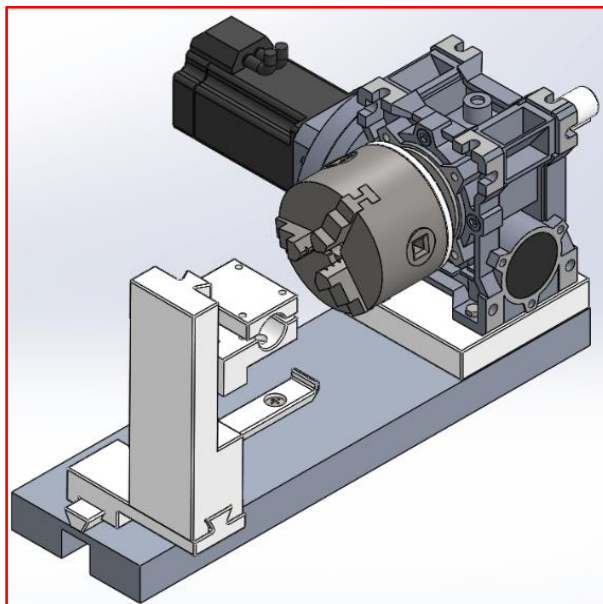


Figura 6. Projeto do dispositivo.

2.3 Fabricação

A montagem do sistema com as peças impressas durante a fase de projetos pode ser observada na Figura 7, durante todo o processo os projetos foram impressos e testados até que a melhor geometria fosse encontrada. Unindo os subconjuntos, o movimento do sistema foi testado ao posicionar um relógio comparador para medir a coaxialidade do movimento circular. Uma vez que a variação deste impacta diretamente na qualidade da soldagem.

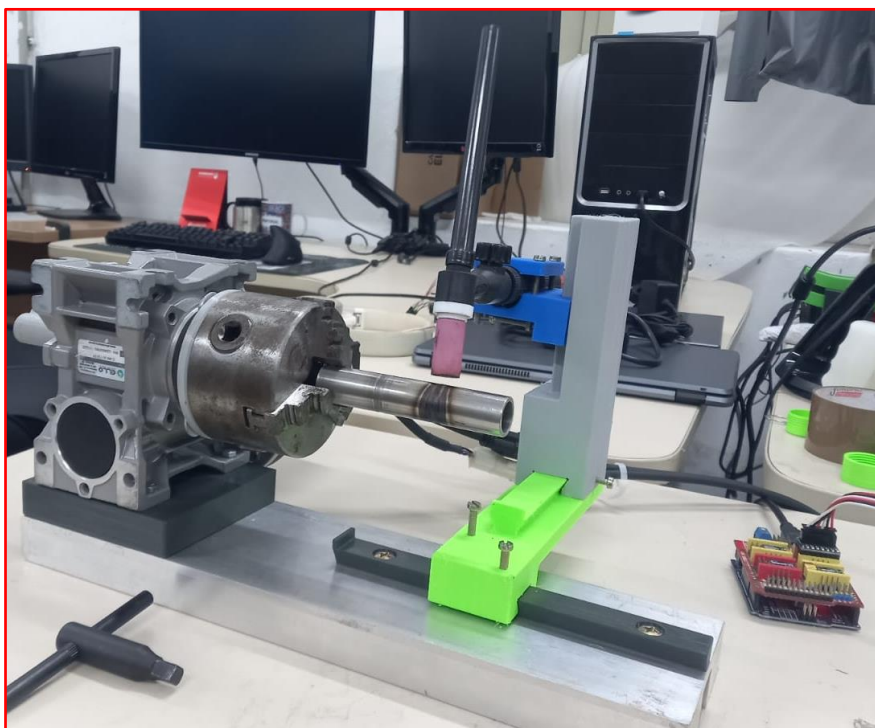


Figura 7. Sistema montado.

3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Tanto o projeto quanto a fabricação do dispositivo foram concluídos com sucesso. Uma forma de avaliar as etapas que o projeto se encontra é através da metodologia de Technology Readiness Levels (Mankins, 1995) empregada na

classificação de maturidade da tecnologia desenvolvida. O projeto atualmente se encontra na terceira fase, TRL 3, que é descrita como sendo a prova de conceito de uma tecnologia ou processo. Os testes de concentricidade realizado posteriormente à montagem evidenciaram desvio de 0,12mm na concentricidade do movimento.

O próximo passo do trabalho será validar se o conjunto irá manter sua estabilidade enquanto é sujeito ao processo de soldagem autógena. Um dos objetivos do trabalho é ser capaz de, após testes em operação, publicar o projeto e orientações de montagem juntamente com software de controle sob licença do tipo General Public License a fim de motivar a confecção de dispositivos como este em instituições de ensino para dar suporte às pesquisas em metalurgia e metalografia de materiais.

4. REFERÊNCIAS

- Alves, N., Paiva, B. S., Diniz, M. G. e Pimenta, A.R., 2023. “Parâmetros de soldagem em aços inoxidáveis duplex pelo processo TIG orbital”. In Proceedings of the 29th National Congress of Mechanical Engineering Students - CREEM2023, Goiânia, Brazil.
- Baxter, D., Gao, J., Case, K., Harding, J., Young, B., Cochrane, S. e Dani, S., 2007. “An engineering design knowledge reuse methodology using process modelling”. *Research in Engineering Design*, v. 18, p. 37-48.
- Souza, G. C., Pardal, J. M., Tavares, S. S. M., Fonseca, M. P. C. F., Martins, J. L. F., Moura, E. P. e Filho, I. C., 2015. “Evaluation of proportion of phases in joints welded from duplex stainless steel pipes by means of non-destructive testing”. *Welding International*, v. 29, p. 762–770.
- Corolleur, A., Fanica, A. e Passot, G., 2015. “Ferrite Content in the Heat Affected Zone of Duplex Stainless Steels”. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, v. 160, p. 413–418.
- Gunn, R. N., 1997. *Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications*. Woodhead Publishing, Abington, 1ª edição.
- Hosseini, V.A., Valiente Bermejo, M.A. e Gårdstam, J., 2016. “Influence of multiple thermal cycles on microstructure of heat-affected zone in TIG-welded super duplex stainless steel”. *Weld World*, v. 60, p. 233–245.
- Mankins, J. C., 1995. *Technology Readiness Levels*. A White Paper, NASA, Washington, DC.
- Medellin-Castillo, H. I. e Zaragoza-Siqueiros, J., 2019. “Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review”. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, v. 32, 53.
- Pecly, P. H. R., Almeida, B. B., Pimenta, A. R. e Tavares, S. S. M., 2023. “Microstructure, Corrosion Resistance, and Hardness of Simulated Heat-Affected Zone of Duplex UNS S32205 and Superduplex UNS S32750 Stainless Steels”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 32, p. 9019–9028.
- Sathiya, P., Aravindan, S., Soundararajan, R. e Noorul Haq, A., 2009. “Effect of shielding gases on mechanical and metallurgical properties of duplex stainless-steel welds”. *Journal of Materials Science*, v. 44, p. 114–121.
- Tavares, S. S. M., Pimenta, A. R., Loureiro, R. C. P., Dille, J. e Malet, L., 2023. “Investigation of Chromium Nitride Precipitation in UNS S39274 Stainless Steel”. *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- Tavares, S. S. M., Pardal, J. M., Noris, L.F. e Diniz, M. G., 2021. “Microstructural characterization and non-destructive testing and of welded joints of duplex stainless steel in flexible pipes.” *Journal of Materials Research and Technology*, v. 15, p. 3399–3408.
- Voronenko, B. I., 1997. “Austenitic-ferritic stainless steels: A state-of-the-art review”. *Metal Science and Heat Treatment*, v. 39, p. 428–437.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.