

Alberto Bonamigo Viviani

**INTEGRAÇÃO DE UM SENSOR A LASER A UM  
MANIPULADOR CARTESIANO DE SOLDAGEM PARA O  
SEGUIMENTO AUTOMÁTICO DE JUNTAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng.

Florianópolis  
2015

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

Viviani, Alberto Bonamigo

Integração de um sensor a laser a um manipulador cartesiano de soldagem para o seguimento automático de juntas / Alberto Bonamigo Viviani ; orientador, Jair Carlos Dutra ; coorientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva ; coorientador Nelso Guaze Bonacorso. - Florianópolis, SC, 2015.

99 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem automática. 3. Seguimento de junta. 4. Sensor óptico a laser. I. Dutra, Jair Carlos. II. Gonçalves e Silva, Régis Henrique. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Alberto Bonamigo Viviani

**INTEGRAÇÃO DE UM SENSOR A LASER A UM  
MANIPULADOR CARTESIANO DE SOLDAGEM PARA O  
SEGUIMENTO AUTOMÁTICO DE JUNTAS**

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

Florianópolis, 14 de Julho de 2015.

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. – Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng. – Coorientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. – Coorientador  
Instituto Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. – Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Raul Gohr Júnior, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Norton Zanette Kejelin, Dr. Eng.  
PETROBRAS / CENPES / PDEP / TMEC

Dedico este trabalho a minha família:  
em especial a meu pai Carlos, minha  
mãe Márcia, meu irmão Henrique e a  
minha namorada Thalita, que mesmo  
longe permanecem sempre comigo.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a todos que me apoiaram nessa árdua e prazerosa jornada, em especial:

- Professor Jair Carlos Dutra, pela oportunidade de realização deste trabalho, apoio e conhecimentos transmitidos;
- Professores Nelso Gauze Bonacorso e Régis Henrique Gonçalves, pela coorientação e suporte nos desenvolvimentos;
- Doutor Raul Gohr Junior, pelo conhecimento transmitido e disposição ímpar para questionamentos;
- Mestres Cleber Marques, Fernando Costenaro, Felipe Kalil Mendonça e Eduardo Bidese Puhl, pela grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho;
- Demais membros do LABSOLDA, colegas de profissão que tanto estimo: Adrian Savaris, Bruna Martinello Savi; Cleber Guedes, Daniel Cristiano Ferrari, Daniel Wallerstein; Danilo Varasquim Ribeiro, Diego Costa Correia Silva, Diego Erdmann dos Santos, Erick Gonzalez Olivares, Everton Werlang, Flávio Goulart Berka, Francisco Sartori, Gean Gustavo Brum, Guilherme de Santana Weizenmann, Hellinton Direne Filho, Ivan Olszanski Pigozzo, Jônathas Alexandre Alves, João Facco de Andrade, Júlia Dorneles, Luciano Machado Cirino, Luiz Eduardo dos Santos Paes, Marcelo Pompermaier Okuyama, Márcia Paula Thiel, Mário Cesar do Nascimento Junior, Marcus Barnetche, Mateus Barancelli Schwerdersky, Natália Wendt Dreveck, Rafael Costa Barbosa, Rafael Gomes Nunes Silva, Ramon Natal Meller, Renan Kindermann, Renon Steinbach Carvalho, meu grande amigo Ricardo Campagnin e a dupla dinâmica Rodrigo da Silva Machado e Víctor Pascuo Celva;
- Professores: Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Cleide Maria Marqueze e Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto;
- Minha família;
- Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica;
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, pelo apoio financeiro.



*A preguiça anda tão devagar que a pobreza facilmente a alcança.*

(Confúcio)



## RESUMO

O presente trabalho aborda a integração de um sensor óptico a laser a um robô para automação da soldagem. O sensor é fabricado por uma empresa estrangeira, a Meta Vision Systems. O manipulador robótico faz parte da família TARTILOPES, desenvolvido pelo Laboratório de Soldagem da UFSC, LABSOLDA. Esse sensor é capaz de reconhecer e medir o perfil da junta de soldagem durante a execução da união, disponibilizando informações em tempo real sobre o posicionamento da tocha de soldagem ao longo da junta soldada. A utilização destes dados torna possível a realização do seguimento de junta, situação em que o manipulador é comandado para manter sempre o mesmo posicionamento em relação ao centro da junta. O sistema desenvolvido neste trabalho demandou a aplicação de um protocolo de comunicação entre o *software* para seguimento de junta e o controlador do robô. Os algoritmos de correção de trajetória foram criados contemplando duas situações distintas, de movimentação com e sem oscilação da tocha de soldagem. Os dois algoritmos foram testados em quatro ensaios diferentes. Nos ensaios foram abordados desde a calibração destes até a comparação do sistema desenvolvido com um manipulador comercial para seguimento de junta. Os corpos de prova projetados para ensaio dos algoritmos contemplaram diversas variações geométricas acentuadas, impondo ao sistema a necessidade de contínua correção da trajetória de soldagem. Ao final dos ensaios, o sistema desenvolvido neste trabalho se mostrou capaz de realizar o seguimento de junta em situações de extrema solitação.

**Palavras-chave:** Mecanização da soldagem. Correção de trajetória. Sensor óptico.



## ABSTRACT

This work discusses the integration of an optical laser sensor to a robot for welding automation. The sensor is manufactured by a foreign company, Meta Vision Systems. The robotic manipulator is part of the TARTILOPES family, developed by Welding Laboratory of UFSC, LABSOLDA. This sensor is able to recognize and measure the profile of the weld joint while the union is made, providing real-time information about the positioning of the welding torch along the weld joint. Using such data makes it possible to have the seam tracking, in which the manipulator is operated to always maintain the same relative position to the joint center. The system developed in this study required the implementation of a communication protocol between the software for seam tracking and the robot controller. The trajectory correction algorithms were created considering two distinct situations, handling with and without oscillation of the welding torch. Both algorithms were tested in four different experiments. The tests included from the calibration of these algorithms to the comparison with a commercial system designed for seam tracking. The specimens designed to test the algorithms included several sharp geometric variations, demanding the system the need for continuous adjustment of the welding trajectory. At the end of the tests, the system developed in this paper proved to be able to perform the seam-tracking request in extreme situations.

**Keywords:** Welding mechanization. Trajectory correction. Optical sensor.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação da corrente de soldagem durante o movimento oscilatório. Mendonça (2013).....	29
Figura 2 – Sensor óptico, representação da triangulação com laser.....	30
Figura 3 – Exemplos de perfis de junta pré programados no sensor <i>SLS-050 VI</i> . .....	32
Figura 4 – (A) Imagem captada pela câmera e (B) Detalhe de “Topo – frontal”. Adaptado de Chongjian et al. (2007).....	33
Figura 5 – Sensor de seguimento de junta por triangulação passiva.....	33
Figura 6 – (A) Sensor óptico <i>SLS-050 VI</i> e (B) Sistema <i>Smart Laser Probe</i> . ....	36
Figura 7 – Captura de tela do <i>software Smart Laser Tools</i> sobre junta “V”. ....	36
Figura 8 – Tomografia de um sensor a laser comercial: (A) Componentes do sensor, (B) e (C) Representações do plano de corte da vista A.....	38
Figura 9 – <i>Tartilope V4</i> : (A) Manipulador, (B) Gabinete de controle, (C) Interface homem-máquina, (D) Controle para correção manual e (E) Representação dos eixos do robô. ....	39
Figura 10 – (A) Acoplamento do sensor à tocha de soldagem e (B) Esquema de montagem do sistema de seguimento de junta no manipulador. ....	40
Figura 11 – Componentes do sistema para seguimento de junta. ....	41
Figura 12 – Tela principal do <i>software</i> de seguimento de junta: (A) Abas, (B) Comandos de algoritmos, (C) <i>Joystick</i> , (D) Apoio, (E) Ajustes, (F) Botões, (G) Informações, (H) Indicador de qualidade e (I) Temperaturas. ....	42
Figura 13 – Aba “Chanfro”: (A) Chanfro selecionado, (B) Barra de seleção e (C) Miniaturas dos chanfros pré-programados no sensor. ....	43
Figura 14 – Aba “Laser”: (A) Botões, (B) Representação do perfil de junta filtrado pelo sensor, (C) Informações de conexão via Ethernet, (D) Imagem disponível no sensor de imagem da unidade e (E) Comandos do sensor. ....	44
Figura 15 – Aba “Comunicação”: (A) Conexão com o controlador do manipulador robótico e (B) Conexão com o sensor de deslocamento linear. ....	45
Figura 16 – Aba “Gráfico”: (A) Gráficos do perfil virtual da junta e (B) Comandos para expedição de relatório de soldagem. ....	46
Figura 17 – Aba “Adaptativo”: (A) Seleção de conjunto de parâmetros e (B) Parâmetros para soldagem adaptativa. ....	47
Figura 18 – Gráficos das leituras recebida e filtrada no comprimento da junta. ....	51
Figura 19 – Fluxograma da rotina inicial do <i>software</i> desenvolvido. ....	53
Figura 20 – Captura do perfil da junta: (A) Posição de início da soldagem, (B) Retorno inicial, (C) Início da medição e (D) Leitura do perfil da junta. ....	54
Figura 21 – Seguimento de junta em movimento linear: (A) Início da soldagem e (B) Região de interesse e correção de trajetória. ....	55
Figura 22 – Fluxograma do seguimento de junta sem oscilação da tocha. ....	56
Figura 23 – Gráficos da leitura filtrada e linha central calculada no comprimento da junta. ....	59
Figura 24 – Fluxograma do seguimento de junta com movimento oscilatório. ....	59

Figura 25 – Sensor de deslocamento linear 8712-100, detalhe para a montagem do mesmo sobre o robô (toca o eixo Y).....	61
Figura 26 – Corpos de prova. ....	63
Figura 27 – Sensor a laser posicionado sobre um corpo de prova do tipo C. ....	63
Figura 28 – Sistema <i>MotoEye Lt.</i> para seguimento de junta.....	65
Figura 29 – Bancada de ensaios: (A) Filtros, (B) Fonte de soldagem, (C) Cabeçote alimentador, (D) Robô, tocha, sensor ótico e peça, (E) Trocador de calor, (F) Cilindro de gás, (G) Computador e (H) Controlador do robô e IHM. ....	66
Figura 30 – Diagrama de comunicação entre os componentes do sistema. ....	68
Figura 31 – Peças do tipo A, ensaios de calibração: (1) Junta, CP-A1; (2) CP-A1, área de interesse de 5 mm; (3) CP-A2, 1 mm e (4) CP-A3, 15 mm. ....	73
Figura 32 – Macrografias das peças do tipo A. ....	74
Figura 33 – CP-A1, gráficos do ensaio <i>off-line</i> . ....	75
Figura 34 – Ensaios <i>off-line</i> de calibração, gráficos: (1) Leituras do sensor de deslocamento linear e (2) Linhas centrais.....	77
Figura 35 – Peças do tipo B, ensaios de repetibilidade: (1) Junta, CP-B1; (2) CP-B1; (3) CP-B2; (4) CP-B3; (5) CP-B4 e (6) CP-B5.....	79
Figura 36 – Ensaios <i>on-line</i> de repetibilidade, gráficos: (1) Linhas centrais e (2) Desvio padrão no eixo Y entre as linhas centrais medidas. ....	81
Figura 37 – Peças do tipo C, resultado do passe de união: (1) Junta, CP-C1; (2) CP-C1; (3) CP-C2 e (4) CP-C3.....	83
Figura 38 – Peças do tipo C, ensaios com movimento oscilatório da tocha: (1) Junta, CP-C1; (2) CP-C1; (3) CP-C2 e (4) CP-C3.....	85
Figura 39 – Gráficos das leituras e linha central do CP-C1, ensaio <i>on-line</i> .....	86
Figura 40 – Gráficos das leituras e linha central do CP-C2, ensaio <i>on-line</i> .....	86
Figura 41 – Gráficos das leituras e linha central do CP-C2, ensaio <i>on-line</i> .....	87
Figura 42 – CP-C4, ensaios com o algoritmo corrigido: (1) Junta; (2) Passe de união; (3) Junta oposta e (4) Passe de revestimento. ....	89
Figura 43 – Gráficos das leituras e linha central do CP-C4, ensaio <i>on-line</i> .....	90
Figura 44 – Ensaios de comparação entre sistemas: (1) Junta CP-D1; (2) CP-D1; (3) CP-D2; (4) CP-D3; (5) CP-D4 e (6) CP-D5. ....	91

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Parâmetros dos ensaios sem oscilação da tocha.....	70
Tabela 2: Parâmetros dos ensaios com movimento oscilatório da tocha .....	71



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D – Analógico/Digital

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*

CMOS – *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*

CP – Corpo de Prova

DBCP – Distância Bico de Contato – Peça; menor distância entre a face do bico de contato e a superfície da peça soldada

Eixo X – Eixo que está contido na superfície da peça soldada e representa a direção de soldagem

Eixo Y – Eixo que está contido na superfície da peça soldada e é perpendicular à direção de soldagem

Eixo Z – Eixo normal à superfície da peça soldada

FPGA – *Field Programmable Gate Array*

IHM – Interface Homem Máquina

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – estrangeirismo também aceito na grafia laser

MAG – *Metal Active Gas*

MIG – *Metal Inert Gas*

MVS – Meta Vision Systems Inc.

TCP – *Tool Center Point*; centro da ponta do eletrodo de soldagem

TIG – *Tungsten Inert Gas*



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1 OBJETIVOS .....	24
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	25
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>27</b>
2.1 SENSORES PARA SEGUIMENTO DE JUNTA .....	27
2.1.1 Sensoriamento por variáveis elétricas .....	28
2.1.2 Sensoriamento por triangulação óptica .....	29
2.2 TECNOLOGIAS EXISTENTES .....	31
<b>3 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>35</b>
3.1 SENSOR ÓPTICO A LASER.....	35
3.2 MANIPULADOR ROBÓTICO .....	38
3.3 SISTEMA DE SEGUIMENTO DE JUNTA.....	40
3.4 <i>SOFTWARE</i> DE SEGUIMENTO DE JUNTA.....	41
3.4.1 Comunicação serial entre <i>software</i> e manipulador .....	48
3.4.2 Tratamento das leituras de erro .....	50
3.4.3 Algoritmo de correção de trajetória linear .....	51
3.4.4 Algoritmo de correção de trajetória com oscilação da tocha .....	57
3.5 MATERIAIS E MÉTODOS .....	60
3.5.1 Sensor de deslocamento linear .....	61
3.5.2 Corpos de prova .....	62
3.5.3 Bancada de ensaios .....	66
3.5.4 Metodologia para ensaios com movimento linear .....	68
3.5.5 Metodologia para ensaios com movimento oscilatório .....	70
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>73</b>
4.1 ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA .....	73
4.2 ENSAIOS DE REPETIBILIDADE .....	78
4.3 ENSAIOS COM MOVIMENTO OSCILATÓRIO.....	82
4.4 ENSAIOS DE COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS.....	90
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>93</b>

<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>95</b>
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>97</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Está na saga humana a busca por objetos facilitadores para o seu cotidiano. A produção de objetos cortantes a partir de fragmentos de rocha foi fundamental para o ser humano subir na cadeia alimentar, a comer mais carne e o tutano dos ossos dos animais. Isto já era uma forma de automatização, que teve na invenção da roda o grande impulso para o que há atualmente. Portanto, argumentar contra a automatização é negar a nossa própria história evolutiva. Infelizmente há os que o fazem baseados em um obscurantismo autoimposto.

O problema de emprego nunca esteve na automatização por si mesma, mas como se a pratica. Assim como o homem primitivo ficou feliz em poder comer mais carne e sacar o tutano de ossos, é natural que também tivesse ficado mais feliz em utilizar a roda e uma alavanca. A questão é que aquele objeto cortante, a roda ou a alavanca não poderia pertencer a uma outra tribo. Teria de ser algo inerente àquele grupo de indivíduos. Então, quanto mais os instrumentos de automatização estiverem sendo desenvolvidos dentro do grupo de indivíduos, eles só podem ser veículos de satisfação e prazer. Portanto, um grupo de indivíduos pode até adquirir de outros, determinados instrumentos, mas isto não pode ser a regra porque pode haver a reação inversa pela chegada da insatisfação e do desprazer.

O equilíbrio entre a quantidade de artefatos que uma sociedade compra e o que ela produz a fim de lhe dar a citada satisfação e prazer é parte fundamental de uma adequada política organizacional. A Universidade deveria, neste sentido, exercer o seu papel, sendo um agente fomentador da criação de bens e não um simples agente incentivador de compras a sociedades estrangeiras.

O LABSOLDA, como parte da universidade, tenta em sua missão de influir na melhoria da satisfação e prazer de nossa sociedade, dar continuidade à saga humana em criar novos artefatos. Todavia, assim como o homem primata que tinha à sua disposição uma pedra bruta e a lapidou para produzir um elemento cortante, o trabalho que ora é apresentado, é baseado na disponibilidade de um artefato produzido por outra sociedade, mas que será aqui estudado e lapidado. Trata-se de um sensor óptico a laser para leitura da geometria de juntas de soldagem e seu posicionamento relativo. É um artefato que cativa a quem sabe da problemática que se enfrenta na automatização de processos de soldagem por fusão. Ao se excluir o ser humano da frente de ação, abdica-se de sua visão, audição e tato, elementos vitais em suas realizações. O sistema sensorial produz estímulos para reações em tempos reais. Isto significa

dizer que o ser humano é o robô no caminho da perfeição, mas que sempre necessita ser treinado para produzir tantas obras primas que se está acostumado a ver. Assim, é o objetivo dos sensores de juntas de soldagem e, no presente caso, substituindo apenas um dos sentidos do ser humano, a visão.

A busca por tais soluções remonta há várias décadas, mas aplicações práticas efetivas não têm sido fáceis de serem encontradas. Talvez este não seja bem o caso nos países tecnologicamente bem desenvolvidos, mas no Brasil a aplicação ainda beira o futurismo. Uma das razões para a dificuldade aplicativa é a falta de facilidades para o usuário no tocante a ter de depender de dois fornecedores para um único sistema de soldagem. Um fornecedor é do dispositivo automático de soldagem, costumeiramente um robô, e o outro fornecedor é do sensor a laser.

O agravante disto é que o sensor possui um custo tão elevado quanto o do robô. Além disso, não basta o usuário possuir um robô e um sensor a laser; ele tem de possuir as tecnologias de aplicação e isto ainda depende de um terceiro equipamento que é a fonte de energia para soldagem. Sendo assim, se soma ao problema um agravante de fundamental relevância, que é a indispensável integração entre estes componentes do sistema. Muitas vezes, mesmo em posse do robô, do sensor e da fonte, a falha intercomunicação entre os mesmos impede o sucesso aplicativo. A consistente implementação de um sistema deste tipo não é trivial e exige profundo conhecimento tecnológico em cada um dos componentes, figurando como objeto deste trabalho.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral a integração de um sensor óptico a laser, fornecido por uma empresa estrangeira, a um robô para automação da soldagem, desenvolvido pelo laboratório de soldagem da UFSC, LABSOLDA. Como meta inicial na trajetória ao objetivo geral, é necessário o estudo da bibliografia fornecida e contatos com o fornecedor para o entendimento do *software* básico que acompanhou o equipamento fornecido. A partir deste conhecimento, se seguem as metas de criação de um protocolo de comunicação para a integração do sensor ao sistema automático de soldagem, denominado TARTILOPE, e dos algoritmos de correção de trajetória para duas situações distintas, de movimentação com e sem oscilação da tocha de soldagem. Em sequência, se visa a calibração e avaliação dos algoritmos em testes em vazio e em soldagem, que subsidiarão a validação do sistema e determinação da

capacidade de correção do sistema. Busca-se, também, consolidar fundamentos para a integração futura destes sensores a outros tipos de robôs (antropomórficos de sete eixos, por exemplo), e para o desenvolvimento e construção de um sensor a laser próprio.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 contém a fundamentação teórica do trabalho. Neste capítulo são expostos os tipos mais comuns de sensores de seguimento de junta disponíveis para soldagem. Os sensores a arco e ópticos são explorados com mais profundidade. Além disso, são expostos os trabalhos já executados na área do seguimento de junta.

O capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do trabalho. Nessa seção do trabalho são expostos todos os componentes do sistema: sensor óptico a laser, manipulador cartesiano, software desenvolvido para seguimento de junta, bancada de ensaios, fonte de soldagem e sensor de deslocamento linear. Este capítulo também traz informações sobre os algoritmos desenvolvidos para seguimento de junta e a metodologia proposta para os ensaios.

O capítulo 4 contém os resultados deste trabalho. As soldagens realizadas para calibração e testes dos algoritmos de correção estão retratadas nesta seção. Além disso, estão relatados os resultados da comparação entre o sistema desenvolvido e um sistema comercial de seguimento de junta.

O capítulo 5 contém as conclusões deste trabalho.

No capítulo 6 estão descritas as sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, o capítulo 7 contém as referências às publicações citadas no presente trabalho.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O primeiro passo para realização do seguimento de junta é conseguir medir a mesma, seja antes ou durante a soldagem. Para detecção dos parâmetros da junta, há diversos sensores disponíveis no mercado que atendem uma gama variada de aplicações e necessidades. Os tipos mais interessantes de sensores para a soldagem automática são os de seguimento de junta, que propiciam a obtenção de informações do chanfro durante a soldagem, uma vez que este tem suas dimensões muitas vezes significativamente alteradas durante o processo de união.

### 2.1 SENSORES PARA SEGUIMENTO DE JUNTA

Segundo Malin (1988 apud Costa (2003)), para ser considerado um sensor de seguimento de junta, o sistema necessita de uma realimentação de variáveis do processo (malha fechada) que atuem sobre os parâmetros programados da junta. Sendo assim, um sistema que apenas faz o levantamento do perfil da junta e executa a soldagem com base nesses dados recuperados não é um sistema de seguimento de junta propriamente dito.

Dentre os sistemas de seguimento de junta, há diferentes tipos de sensores, com vários níveis de precisão e diferentes escalas de medição, destacando-se também no tempo de resposta, versatilidade e função, porém a separação básica feita com estes sensores geralmente é entre sensores de contato e sem contato, segundo Miguel; Abackerli (1997 apud Bonacorso (2004)).

Os sensores de contato são sensores geralmente simples em construção e operação, porém sua característica fundamental de funcionamento (contato com a superfície a ser medida) acaba por dificultar sua utilização para seguimento de junta.

Durante a operação de soldagem, para que a correção seja bem executada, é interessante que o sensoriamento seja o mais próximo possível da região da poça de soldagem e que este obtenha informações condizentes com a característica geométrica do chanfro nesta região.

A soldagem, por ser um processo que impõe grande quantidade de energia ao material de base, expõe os sensores de contato a temperaturas elevadas, o que pode prejudicar o funcionamento dos mesmos. O ambiente agressivo da soldagem representa riscos inclusive à integridade destes sensores e possível contaminação da solda pelo material do sensor. Além disso, segundo Bonacorso (2004), há também a

desvantagem da baixa velocidade do processo de aquisição dos pontos da superfície, o que pode afetar significativamente o seguimento de junta.

Os tipos mais interessantes de sensores para correção de trajetória na soldagem automática são então os de seguimento de junta sem contato. Estes sensores propiciam a obtenção de informações sem estarem em contato direto com a superfície do metal de base. A ausência de contato minimiza o risco de contaminação da peça e da solda pelo sensor e do dano ao sensor pelo calor do arco. Dentre os sensores para seguimento de junta sem contato, é interessante destacar os dois tipos mais comuns: elétricos e ópticos.

### 2.1.1 Sensoriamento por variáveis elétricas

O sensoriamento por parâmetros elétricos, bastante consolidado no universo da soldagem, é o que usa o próprio arco elétrico como sensor. Este tipo de sensor já é utilizado há mais de 30 anos, segundo XiaoQi et al. (2002).

O uso dos sensores denominados “Sensores de Arco” baseia-se na relação existente entre as variáveis elétricas do processo de soldagem e a Distância Bico de Contato Peça (DBCP), segundo Costa (2003). A DBCP é a distância medida entre a face do bico de contato e a superfície da peça.

O princípio do seguimento de junta utilizando o arco elétrico como sensor se fundamenta na variação da corrente de soldagem. Esta variação surge durante o movimento de oscilação da tocha ao longo da seção transversal da junta. A variação da corrente depende também de a fonte de soldagem ser comandada em tensão. Este arranjo de comando em tensão garante maior sensibilidade ao sistema.

O sistema faz a comparação dos valores medidos de corrente nos dois extremos da junta. Esta comparação demonstra se a linha central virtual do movimento oscilatório da tocha coincide com a linha central real da junta. Quando o valor de corrente é igual nas duas extremidades do movimento, a linha central virtual da oscilação combina com a linha central real da junta, segundo Costa (2003).

A Figura 1 explicita que a variação da corrente ao percorrer a junta se dá por uma combinação da variação da DBCP com a variação da velocidade relativa da tocha em relação à peça, segundo Mendonça (2013). Na Figura 1,  $V_{ap}$  é a velocidade do arame-eletrodo em relação à peça e  $V_a$  é a velocidade de alimentação deste.

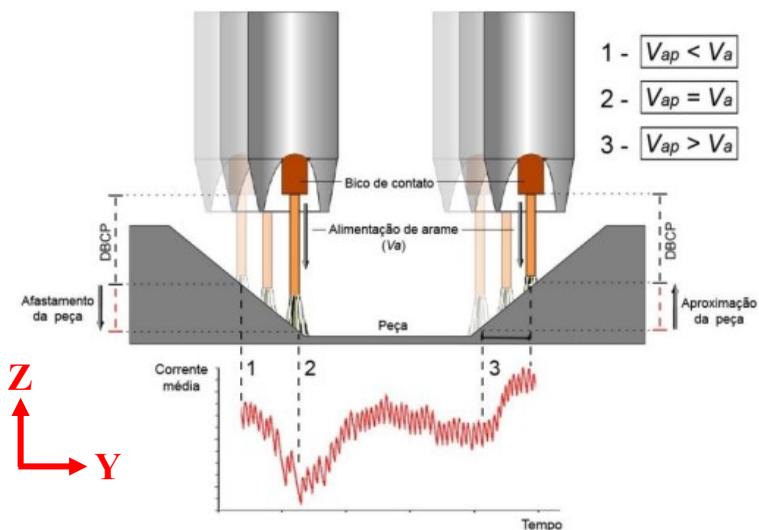


Figura 1 – Variação da corrente de soldagem durante o movimento oscilatório.  
 Mendonça (2013)

As principais desvantagens dos sensores a arco, segundo Mendonça (2013), são a necessidade da filtragem do sinal pela presença de ruídos inerentes ao processo de soldagem e da obrigatoriedade na utilização do movimento oscilatório da tocha de soldagem. Além disso, a sensibilidade desse sensor fica menor quando a fonte atua em comando de corrente e a tensão é a variável de referência para o posicionamento. A necessidade de um perfil adequado de chanfro e da atuação somente região chanfrada são outras desvantagens desse tipo de sistema.

### 2.1.2 Sensoriamento por triangulação óptica

Além dos sensores a arco, os sensores ópticos são muito utilizados no seguimento de junta. São sensores que em sua maioria utilizam o princípio da triangulação para interpretar o perfil do chanfro e relacionar este à posição do sensor, localizando espacialmente a junta.

O princípio de funcionamento destes sensores recebe este nome já que os elementos envolvidos na medição são três (câmera, laser e peça ou duas câmeras e peça, por exemplo), formando um triângulo e utilizando da trigonometria para seu equacionamento. Esses sensores são divididos em duas categorias básicas: com triangulação passiva ou com triangulação ativa. Quando os vértices do triângulo são a fonte de luz, a

junta e a câmera, a triangulação é referida como ativa, pois a fonte de luz (um laser ou um projetor) adiciona informação à cena. Se ao invés da fonte de luz houver outra câmera formando o 3° vértice, por exemplo, então trata-se de uma triangulação passiva, segundo XiaoQi et al. (2002).

Os processos de triangulação passiva podem ser a base da fotogrametria ou medições realizadas em função de algum parâmetro como foco, movimento, sombreamento, silhueta ou textura, segundo Yoshizawa (2009). Esses processos não são tão interessantes para aplicações em soldagem devido à necessidade de captação de mais de uma imagem e processamento destas para realizar a parametrização da junta. Além disso, são geralmente pouco robustos frente à interferência do arco elétrico e dos respingos em seu funcionamento, segundo Shen et al. (2007).

A Figura 2 ilustra um sensor óptico que utiliza a triangulação ativa como método para parametrização da junta medida. A superfície do sensor CMOS bidimensional recebe, sobre o ponto  $B$ , a luz da fonte laser que foi refletida sobre a peça, no ponto  $A$ . O deslocamento do objeto de  $dA$  para  $dA'$  implica no deslocamento de  $B$  para  $B'$  da imagem sobre o sensor. A representação unidimensional do sensor de imagem na Figura 2 é válida para ambos os eixos do bidimensional; a composição dos deslocamentos permite a medição do perfil da junta em duas dimensões.

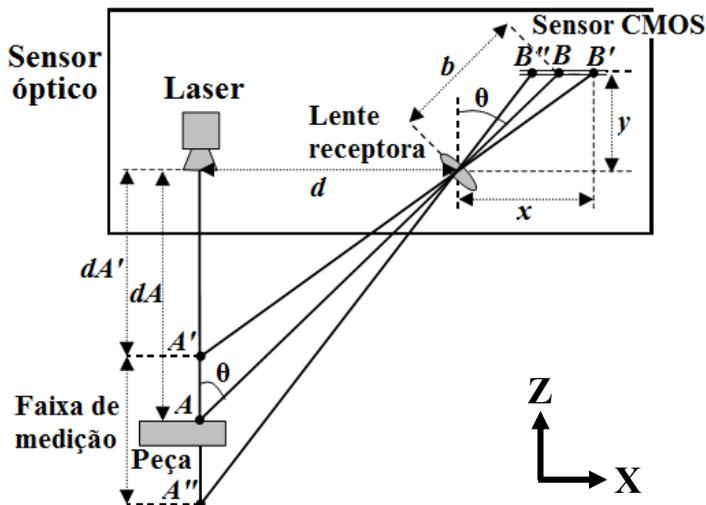


Figura 2 – Sensor óptico, representação da triangulação com laser.  
Adaptado de Bonacorso (2004).

As Equações 1 e 2, de acordo com Bonacorso (2004), demonstram como são determinadas as distâncias  $x$  e  $y$  (do centro da lente ao ponto  $B'$ ). Segundo o mesmo autor, através das propriedades da semelhança de triângulos, é possível obter a Equação 3.

$$x = \overline{BB'} + b * \text{sen}(\theta) \quad (1)$$

$$y = b * \text{cos}(\theta) \quad (2)$$

$$dA' = \frac{b*d*\text{cos}(\theta)}{\overline{BB'}+b*\text{sen}(\theta)} \quad (2)$$

Onde:

$dA'$ : distância do ponto  $A'$  em relação ao laser (mm);

$b$ : distância entre a lente e o elemento fotossensível (mm);

$d$ : distância entre a lente o laser (mm);

$\overline{BB'}$ : deslocamento do ponto laser sobre o sensor (mm);

O ângulo de triangulação  $\theta$  é um parâmetro, assim como as constantes  $b$  e  $d$ , determinadas no projeto do conjunto, que garantem a faixa de medição do sensor. A peça deve estar localizada dentro desta faixa, senão o reflexo da linha laser não incidirá sobre o sensor de imagem.

A distância entre o ponto laser sobre a peça e a fonte luminosa depende do valor do deslocamento  $\overline{BB'}$ , que é informado pelo sensor a laser. O sensor de imagem é um plano constituído de várias fileiras e colunas de elementos fotossensíveis. Dessa forma, é possível obter informações em duas dimensões sobre o perfil da junta. O sensor a laser já identifica, nesse perfil, a posição dos pontos de interesse. O ponto talvez mais importante destes é o *tracking point*  $\theta$ . Este ponto geralmente é a referência do centro da junta.

## 2.2 TECNOLOGIAS EXISTENTES

No mercado atual da soldagem, há soluções para seguimento de junta já disponíveis. O sistema *Smart Laser Probe* por exemplo, equipado com o sensor *SLS-050 VI* (ambos comercializados pela empresa Meta Vision Inc., MVS) é capaz de trabalhar com os perfis de junta detalhados na Figura 3. O fabricante do equipamento presta serviço também na

customização do sistema para atender a chanfros especiais, como uniões tubo-membrana, sensoriamento em aplicações de revestimento, entre outros.

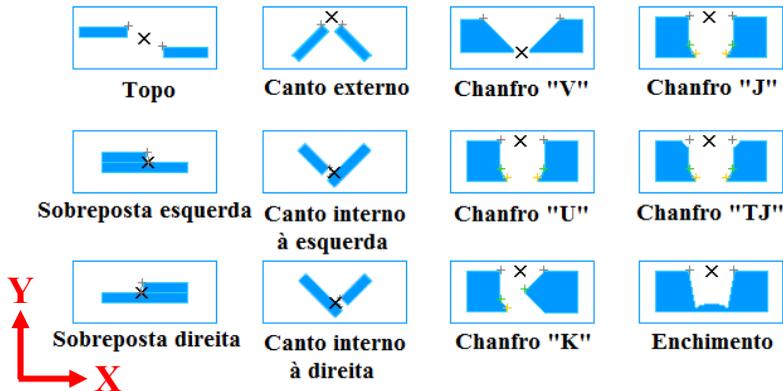


Figura 3 – Exemplos de perfis de junta pré programados no sensor *SLS-050 VI*.

Além da MVS, há outros fornecedores com soluções bastante avançadas para a indústria que também utilizam o sensoriamento por triangulação ativa. O sistema *TH6D* do grupo Abicor Binzel é um exemplo de sistema comercial com liberdade de integração com qualquer robô de soldagem, de acordo com o anúncio do próprio grupo. Além disso, fabricantes de manipuladores para soldagem, como MOTOMAN e FANUC, disponibilizam soluções prontas para seguimento de junta, denominadas *MotoSense* e *Arc Mate*, respectivamente, desenvolvidas para atender os fabricantes de sensores, como MVS e SERVO-ROBOT.

Estes sistemas estão na vanguarda da tecnologia de soldagem automática com seguimento de junta, possibilitando uma excelente repetibilidade por parte dos manipuladores, porém não são as únicas linhas de pesquisa no assunto.

Sensores de triangulação passiva já são consolidados na indústria em diversas aplicações. Esses sensores também têm representatividade para o seguimento de junta. O sensor desenvolvido por Chongjian et al. (2007) utiliza uma combinação de espelhos e filtros, conforme a Figura 4, para captar três perspectivas diferentes da mesma cena sobre um único sensor de imagem. O trabalho inicial destes autores não contempla a triangulação passiva, porém mesmo com a análise de uma única imagem para identificação do centro da junta (utilizando técnicas como a

transformada de Hough), são capazes de determinar com bastante clareza a linha central que a solda deve seguir.

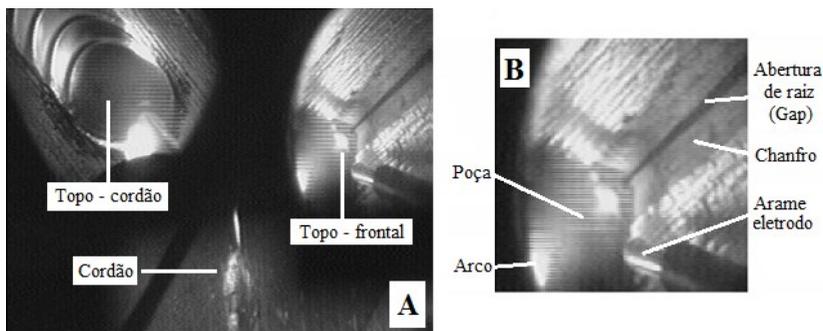


Figura 4 – (A) Imagem captada pela câmera e (B) Detalhe de “Topo – frontal”.  
Adaptado de Chongjian et al. (2007)

Um exemplo de sensor de triangulação passiva aplicado à soldagem pode ser encontrado no trabalho de Ma et al. (2009). A Figura 5 demonstra o protótipo utilizado para validação do controle do sistema de seguimento de junta desenvolvido pelos autores. O resultado obtido no trabalho é satisfatório para as juntas de topo ensaiadas. Aplicações que requeiram mais informação acerca do perfil da junta, como a soldagem adaptativa, não podem ser realizadas apenas com um sensor deste tipo.

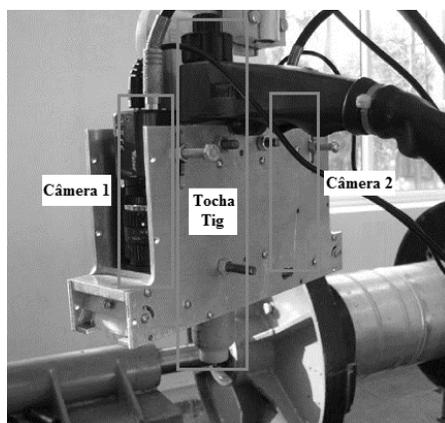


Figura 5 – Sensor de seguimento de junta por triangulação passiva.  
Adaptado de Ma et al. (2009)

Dentre os sistemas para seguimento de junta por triangulação ativa, utilizando sensoriamento a laser, já há trabalhos publicados. Haug; Pritschow (1998) desenvolveram um sistema de seguimento de junta robusto para aplicação com soldagem por arco submerso. Neste processo, o arco fica encoberto por uma camada de fluxo, que bloqueia a maior parte da luminosidade do arco, praticamente isentando a captura de imagens de ruídos provenientes do arco e facilitando o processamento das imagens adquiridas pelo sensor.

Os autores Kim et al. (1995) trabalharam com um sensor composto por laser e câmera, integrado a um manipulador para soldagem pelo processo MIG/MAG, expondo o sensor ao ambiente hostil da soldagem. A utilização de modelagem dos perfis de junta para interpretação das imagens adquiridas pelo sensor garantiu bons resultados a este trabalho.

Matsui; Goktug (2002) realizaram experimentos mais complexos, em que o sistema atuava em mais variáveis de soldagem além da trajetória. O sistema desenvolvido por estes autores atuava também na corrente e tensão de soldagem, na velocidade de soldagem e no tipo de movimento de condução da tocha (linear ou com oscilação, inclusive atuando na frequência e amplitude do movimento oscilatório), configurando um controle adaptativo da soldagem. Os autores relatam bons resultados, mesmo em situações de abertura de raiz (*gap*) variável.

Muitos dos primeiros trabalhos desenvolvidos nesta temática utilizavam a movimentação da peça para realização dos ensaios, deixando a tocha e o sistema de medição estáticos. Esta técnica facilita muito o trabalho de focalização e disposição dos componentes, porém limita muito a mobilidade e versatilidade do sistema desenvolvido. O presente trabalho prevê a fixação do sensor diretamente à tocha, sendo que esta realiza a translação sobre a peça estacionária. Essa configuração atende uma diversidade maior de aplicações.

Um exemplo de aplicação do sensor fixado à tocha de soldagem, inclusive com utilização de robô cartesiano dedicado à soldagem, foi realizada por Kindermann (2013). O autor utilizou um conjunto do fabricante SERVO-ROBOT acoplado à uma fonte do fabricante CLOSS para realização de soldagem adaptativa de juntas com abertura de raiz variável, obtendo bons resultados.

### 3 DESENVOLVIMENTO

O principal componente que possibilita ao sistema de seguimento de junta realizar tal atividade é o cabeçote de medição a laser. A versatilidade e riqueza de informações disponibilizadas pelos sensores ópticos a laser (triangulação ativa) foram as principais razões para a escolha deste tipo de sensoriamento como componente do sistema proposto neste trabalho.

#### 3.1 SENSOR ÓPTICO A LASER

O sensor escolhido para o desenvolvimento do presente trabalho é o *SLS-050 VI* da empresa MVS. Este sensor utiliza um laser diodo de 30 mW de potência, emissor de luz com comprimento de onda próximo a 685 nm (classe 3B), associado a um sensor de imagem bidimensional de tecnologia CMOS, com taxa de aquisição de 25 Hz (máxima de 80 Hz, porém com menor área medida) e incerteza de medição de  $\pm 0,1$  mm tanto para o eixo vertical quanto para o horizontal do sensor, de acordo com MVS (2009). O sensor de imagem tem resolução de 1280 pixels na direção do eixo Y e de 1024 pixels na direção do eixo Z.

Este sensor projeta uma linha laser, ou um plano de luz (por isso o nome plano de luz ou “folha de luz”), que denuncia o perfil da junta, o qual é lido por um sensor de imagem, possibilitando a identificação chanfro e medição deste. Esse modelo possui um campo de visão de 50 mm (ou largura de visão) e profundidade de campo de 80 mm, adequado à maioria das aplicações de pequeno e médio portes em soldagem. A Figura 6-A retrata este sensor em funcionamento sobre uma junta sobreposta. A Figura 6-B mostra o sistema completo para sensoriamento a laser comercializado pela mesma fabricante do sensor em questão.

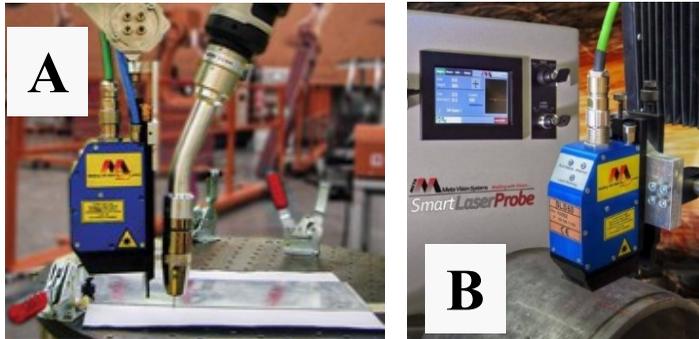


Figura 6 – (A) Sensor óptico *SLS-050 VI* e (B) Sistema *Smart Laser Probe*.  
Meta Vision Systems (2009)

O sensor se comunica com os outros componentes do sistema de soldagem através de uma *breakout board*, uma placa que disponibiliza a comunicação no padrão *Ethernet* (IEEE 802.3). O fabricante fornece um *software*, denominado *Smart Laser Tools* (Figura 7). Este possibilita a calibração dos perfis de junta pré programados no aparelho. Essa rotina garante o melhor arranjo dos pontos de interesse para a situação real de cada junta. Os pontos de interesse são as setas sobre a linha laser mostradas na Figura 7; o “x” que flutua sobre a junta é o *tracking point 0*, referência do centro da junta.

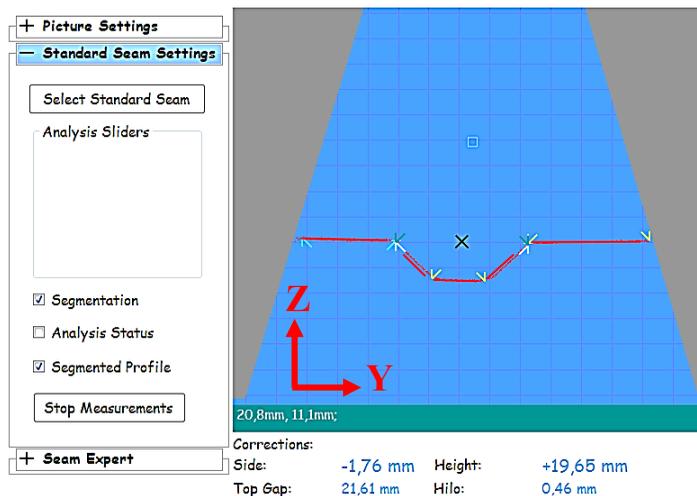


Figura 7 – Captura de tela do *software Smart Laser Tools* sobre junta “V”.

O fabricante, no entanto, normalmente comercializa a solução completa para seguimento de junta via sensoriamento laser, através do produto denominado *Smart Laser Probe* (Figura 6-B). O problema da aquisição de um sistema desse tipo é a total dependência para com o fabricante, onerando qualquer modificação ou adequação, mesmo que simplória, no sistema de medição. A integração com um manipulador no qual se tem acesso ao código fonte, através de um *software* de desenvolvimento próprio, possibilita a liberdade da livre escolha no método e dinâmica de correção. O sistema comercial, independentemente de qualquer restrição que ofereça ao usuário, é uma boa fonte de estudos para a concepção e calibração do sistema proposto nesse trabalho.

O início do presente trabalho contemplou o estudo do funcionamento e construção do sensor em questão, de modo a obter familiarização com o sistema. No trabalho de Viviani (2014), foram realizados experimentos com o sensor, inclusive com desenvolvimento de um *software* para medição do volume de chanfros com e sem preenchimento. No mesmo trabalho também foram realizadas medições de forma a calcular a incerteza de medição do sensor e foi comprovada sua capacidade metrológica para utilização no seguimento de junta ou mesmo na soldagem adaptativa (com realimentação inclusive dos parâmetros da fonte de soldagem).

Além da aferição da incerteza de medição do sensor, foram realizados vários testes simulando situações passíveis de serem enfrentadas pelo sistema durante sua utilização, como juntas com preparação superficial pífia ou de material altamente reflexivo (alumínio), a fim de entender quais situações limitam a utilização do sensor. Outro ensaio realizado foi a tomografia do sensor óptico, possibilitando melhor entendimento de sua construção e funcionamento, conforme detalhado na Figura 8. A indicação da FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) na Figura 8-A demonstra apenas o local de instalação desta placa, uma vez que está localizada em um plano diferente do utilizado para o corte.

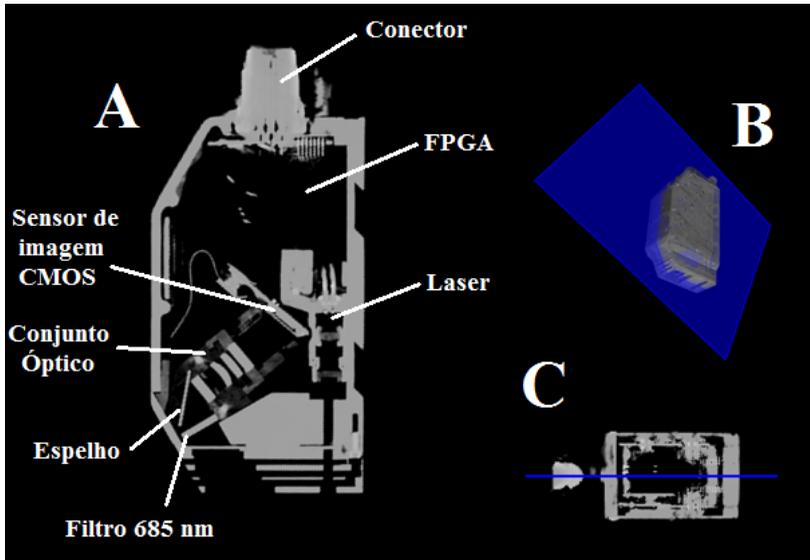


Figura 8 – Tomografia de um sensor a laser comercial: (A) Componentes do sensor, (B) e (C) Representações do plano de corte da vista A.

### 3.2 MANIPULADOR ROBÓTICO

O segundo componente principal do sistema para seguimento de junta é o manipulador da tocha de soldagem, responsável pela condução da tocha durante todo o processo de união e peça fundamental na soldagem automática.

O manipulador selecionado para desenvolvimento do trabalho é o *TARTÍLOPE V4*, do fabricante SPS, pela robustez e facilidade de adaptação do código fonte do mesmo, que foi disponibilizado pelo fabricante. Este manipulador (Figura 9) é um robô cartesiano de 3 eixos, com um quarto eixo rotacional opcional, passível de instalação na ponta do manipulador. Disposto de seus 4 graus de liberdade, este robô é capaz de executar soldagens posicionando a tocha no espaço cartesiano XYZ e orientando a mesma em torno de X ou Y, dependendo da configuração de montagem do quarto eixo.

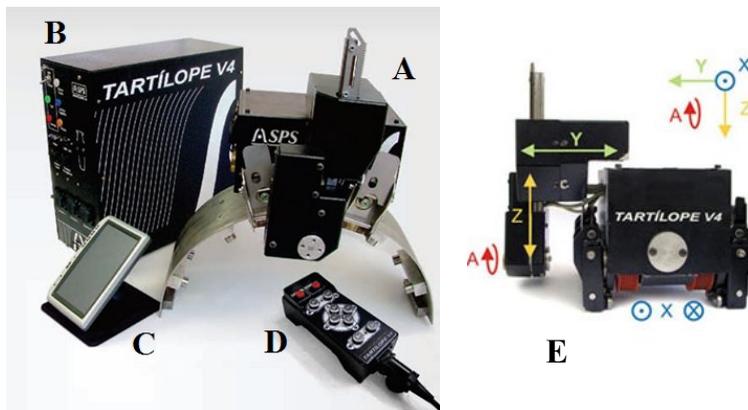


Figura 9 – *Tartilope V4*: (A) Manipulador, (B) Gabinete de controle, (C) Interface homem-máquina, (D) Controle para correção manual e (E) Representação dos eixos do robô.  
SPS (2013)

O eixo X do manipulador é composto por um trilho sobre o qual ele se movimenta (geralmente este é paralelo à direção da junta de soldagem). Os eixos Y e Z são montados com conjuntos de guias lineares e cremalheira, sendo normalmente responsáveis pelo posicionamento e oscilação transversais e normais à linha central da junta, respectivamente.

Neste trabalho não foi utilizado o quarto eixo do robô, uma vez que a mudança no ângulo de trabalho ou de deslocamento não altera a percepção do sensor em relação à junta caso o mesmo seja calibrado para esta nova configuração. Caso alguma aplicação futura do sistema requeira a utilização do eixo rotacional, há necessidade de atualização apenas da rotina de reconhecimento da junta.

O acoplamento mecânico do sensor com o manipulador foi projetado de acordo com as seguintes considerações: promover a segurança do sensor durante a operação de soldagem, já que este fica próximo da peça e do arco; garantir a rigidez do acoplamento mecânico entre o cabeçote de medição, tocha de soldagem e manipulador; reduzir a massa do conjunto para não gerar carga extra ao manipulador e consequentes problemas durante a operação do mesmo.

A Figura 10-A ilustra o suporte desenvolvido para integração mecânica do sensor ao manipulador, acoplando-o diretamente à tocha de soldagem. A Figura 10-B esquematiza a montagem do sistema de medição, com a peça a ser inspecionada posicionada paralela ao trilho do manipulador (eixo X).

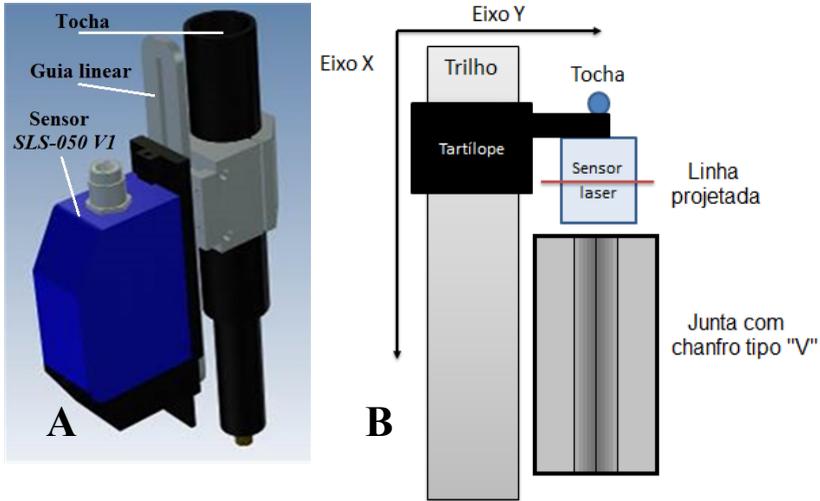


Figura 10 – (A) Acoplamento do sensor à tocha de soldagem e (B) Esquema de montagem do sistema de seguimento de junta no manipulador.

### 3.3 SISTEMA DE SEGUIMENTO DE JUNTA

A arquitetura proposta para o sistema de seguimento de junta desenvolvido neste trabalho foi pensada de forma a não onerar o manipulador robótico no processamento dos dados da correção, além de possibilitar fácil integração com diversos tipos de robôs de soldagem em desenvolvimentos futuros.

Na concepção utilizada para o sistema, o computador que executa o *software* de seguimento de junta (também desenvolvido neste trabalho) é a peça central do conjunto, concatenando todas as informações que são trocadas indiretamente entre manipulador de soldagem e sensor óptico.

A Figura 11 demonstra quais são e com quem se comunicam os componentes do sistema para seguimento de junta. A solução para comunicação com o sensor laser foi implementada segundo exemplo fornecido pelo desenvolvedor do mesmo, sendo necessária a familiarização com a linguagem prioritária do sistema da MVS. A comunicação do computador com o controlador do robô foi desenvolvida em conjunto com o fabricante do mesmo, sendo uma inovação para o produto.

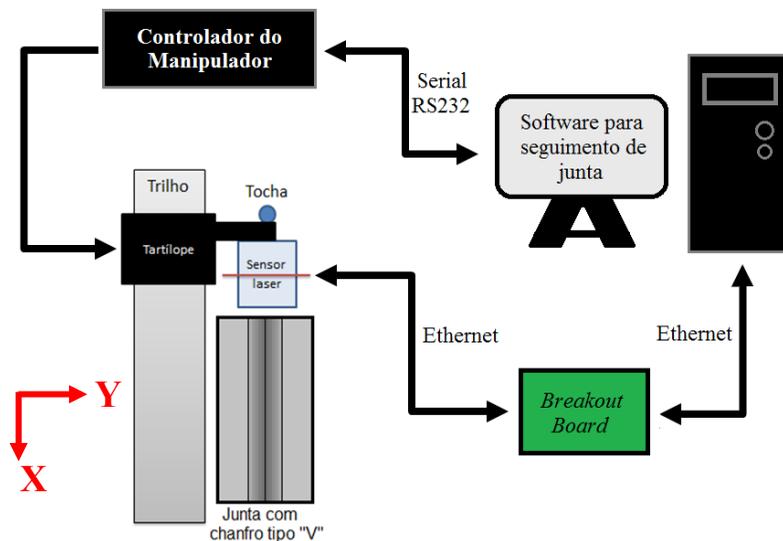


Figura 11 – Componentes do sistema para seguimento de junta.

O desenvolvimento do *software* para seguimento de junta teve início nos estudos preliminares do funcionamento do sensor a laser. As primeiras rotinas implementadas visavam a avaliação da quantidade e qualidade das informações fornecidas pelo conjunto sensor-manipulador, testando sua capacidade em identificar a junta em todo seu comprimento. Essas informações foram úteis para definição de alguns parâmetros necessários aos componentes do sistema de medição, como o padrão e taxa de comunicação entre computador e controlador do manipulador, por exemplo. Optou-se pela comunicação serial no padrão *RS232* pela pronta disponibilidade no controlador do robô e capacidade suficiente para atender ao sistema proposto.

### 3.4 SOFTWARE DE SEGUIMENTO DE JUNTA

As rotinas para comunicação com os componentes do sistema de seguimento de junta, associadas aos algoritmos de correção diferencial desenvolvidos, são as principais funcionalidades do *software* proposto, porém não as únicas. As operações de soldagem são complexas e envolvem diversas variáveis, as quais o operador necessita acompanhar.

Uma vez que o *software* desenvolvido é voltado para a utilização a nível acadêmico, há informações em sobejo que são desnecessárias na

utilização a nível industrial, como por exemplo os gráficos representando o perfil virtual da junta. A reformulação da IHM para atendimento à utilização a nível industrial é possível, bastando ao desenvolvedor ocultar as informações sobressalentes no compilador.

A Figura 12 contém a tela principal do *software* de seguimento de junta desenvolvido neste trabalho, estando destacadas as principais regiões da mesma. Todos os comandos e informações disponíveis nesta tela e na aba “Início” foram consideradas fundamentais para a operação do *software*.

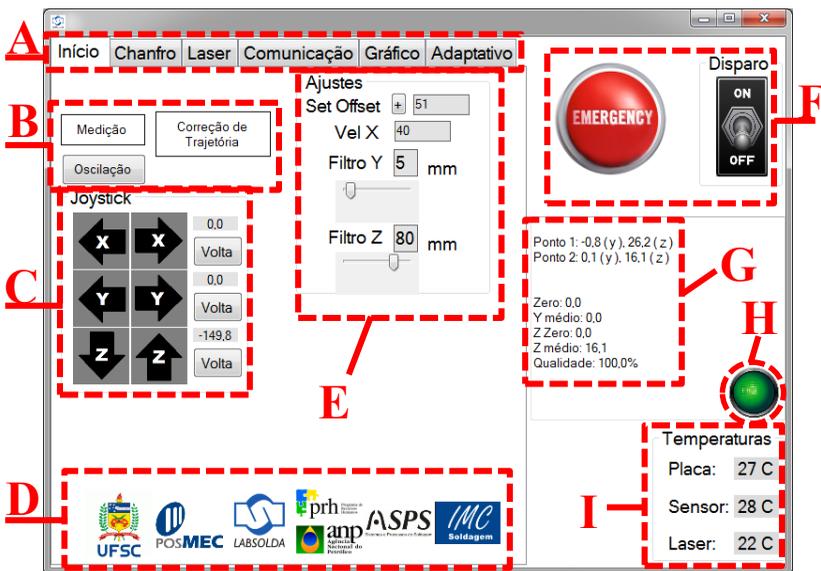


Figura 12 – Tela principal do *software* de seguimento de junta: (A) Abas, (B) Comandos de algoritmos, (C) Joystick, (D) Apoio, (E) Ajustes, (F) Botões, (G) Informações, (H) Indicador de qualidade e (I) Temperaturas.

O arranjo dos comandos da tela principal (Figura 12) foi feito de modo a facilitar o acesso às características que necessitam de acesso constante. A utilização de abas (Figura 12-A) para acomodar os demais comandos e funções do *software* dá destaque aos comandos de acesso constante (Figuras 12-F, G, H e I). Além disso, esse artifício possibilita a acomodação de várias telas em uma janela única de tamanho reduzido. A compacidade da janela do *software* é interessante para atender à grande gama de visores disponíveis no mercado (monitores, televisores,

dispositivos móveis, etc.). O aspecto 4:3 utilizado (resolução de 800x600) também contribui para a compatibilidade.

A seleção do intervalo de filtragem, utilizado nos algoritmos descritos nos itens 3.3.3 e 3.3.4, está disponível ao operador na Figura 12-E. A mudança nos valores do intervalo só é possível antes do início da soldagem, o que implica na limitação de se ter uma única configuração de filtragem por cordão ou trecho de soldagem.

A Figura 13 ilustra a aba “Chanfro”, cuja principal função é permitir ao usuário a seleção do perfil de junta a ser soldado. A correta seleção do perfil é crucial para o sucesso da operação, uma vez que o sensor a laser necessita estar calibrado para o tipo correto de chanfro antes da operação de soldagem ter início. A troca do perfil de junta programado no sensor é realizada pelo usuário através da barra de seleção (Figura 13-B), sendo disponibilizada apenas quando a soldagem não está em execução. A troca do perfil durante a soldagem pode ser feita apenas através de comando do *software*; caso alguma aplicação necessite dessa característica específica, a rotina de seleção deve ser atualizada.

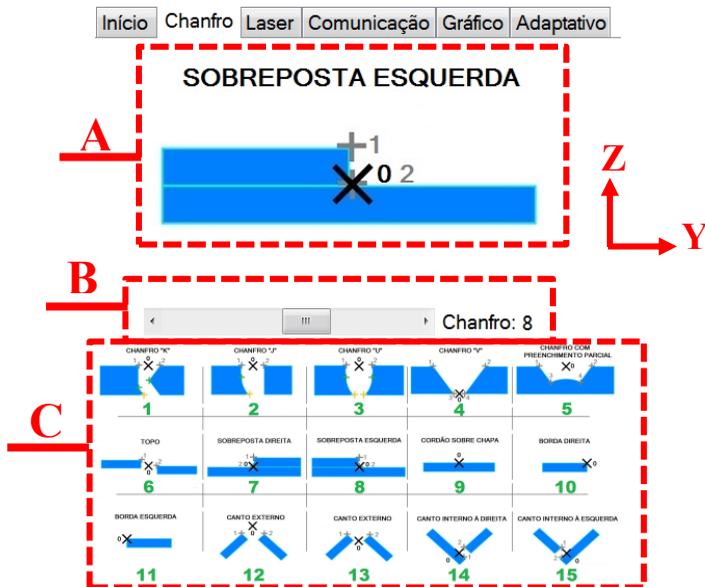


Figura 13 – Aba “Chanfro”: (A) Chanfro selecionado, (B) Barra de seleção e (C) Miniaturas dos chanfros pré-programados no sensor.

Os quinze perfis de chanfro exibidos na Figura 13 são apenas alguns dos tipos que o sensor a laser pode reconhecer e tem programado por padrão em sua memória. O fabricante do sensor dá suporte a novos tipos de chanfro, porém a programação dos perfis no sensor é restrita ao fabricante.

A aba “Laser”, demonstrada na Figura 14, concentra os comandos e informações do cabeçote de medição a laser. O gráfico da Figura 14-B ilustra o perfil da junta já filtrado, utilizado pelo sensor para medição da junta. Os comandos vistos na Figura 14-E alteram a intensidade do laser e o tempo de exposição do sensor de imagem do cabeçote; como o padrão de fábrica do sensor *SLS050-V1* é trabalhar no modo automático de ajuste desses parâmetros, qualquer alteração que não seja a ideal será rapidamente alterada pelo próprio sensor.

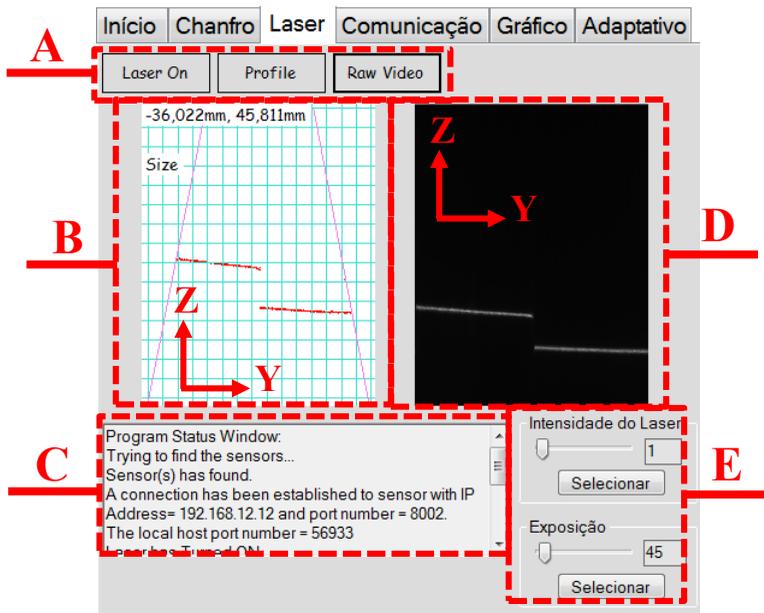


Figura 14 – Aba “Laser”: (A) Botões, (B) Representação do perfil de junta filtrado pelo sensor, (C) Informações de conexão via Ethernet, (D) Imagem disponível no sensor de imagem da unidade e (E) Comandos do sensor.

A imagem contida na Figura 14-D é a mesma que está sobre o sensor de imagem do cabeçote de medição durante sua operação. A visualização dessa imagem, apesar de interessante, compromete

drasticamente a taxa de medição conseguida pelo sensor laser. Dessa maneira, a utilização desta ferramenta deve ficar restrita à demonstração do *software*.

A Figura 15 representa a aba “Comunicação” do *software*, onde estão concentrados os comandos para conexão via porta serial com os periféricos do sistema, exceto o sensor a laser. Nessa aba deverão ser implementados futuramente os comandos para conexão com a fonte de soldagem, também pelo padrão *RS232*, para possibilitar o controle adaptativo sobre o processo de soldagem.



Figura 15 – Aba “Comunicação”: (A) Conexão com o controlador do manipulador robótico e (B) Conexão com o sensor de deslocamento linear.

A aba “Gráfico” do *software*, representada na Figura 16, contém a ferramenta gráfica para visualização em tempo real de informações pertinentes à correção de trajetória. A movimentação do robô sobre o perfil virtual da junta, assim como a construção deste, pode ser observada pelo usuário durante a execução da união. Além disso, estão contidos nessa aba os comandos para recuperação do relatório da soldagem realizada.

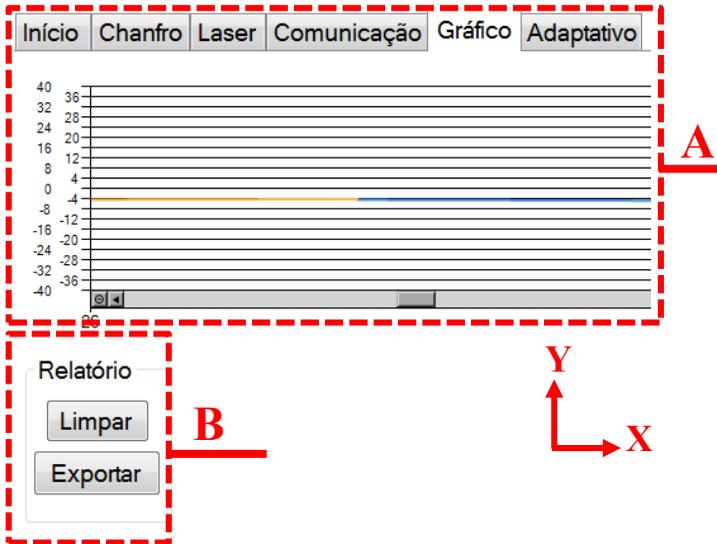


Figura 16 – Aba “Gráfico”: (A) Gráficos do perfil virtual da junta e (B) Comandos para expedição de relatório de soldagem.

A aba “Adaptativo”, ilustrada na Figura 17, compreende uma derivação do *software* que não tem funcionalidade no desenvolvimento do presente trabalho, estando reservada para desenvolvimentos futuros do mesmo. O conceito representado nessa área é o de uma tabela que contenha a parametrização a ser seguida pelo *software* para execução da soldagem. A variável de controle, assim como as variáveis comandadas, poderá ser escolhida pelo operador, que será encarregado de fazer o preenchimento da tabela de parâmetros também.



Toda a programação do *software* de seguimento de junta foi realizada na linguagem *C#*, pela facilidade de programação e riqueza de recursos que a mesma oferece.

### 3.4.1 Comunicação serial entre *software* e manipulador

O protocolo de comunicação inicialmente contemplou o envio contínuo de informações por parte do manipulador, a fim de possibilitar o desenvolvimento de uma rotina precisa de recuperação destes dados; além disso, dessa maneira é possível determinar a taxa de envio por parte do controlador do robô, informação crucial para avaliação da capacidade do sistema. Os dados enviados eram informações de posição do robô (posição em X, longitudinal ao trilho; posição em Y, transversal ao trilho; e posição em Z, normal ao trilho), em caracteres ASCII.

Neste contexto, é necessário um tratamento dos dados recebidos para a correta interpretação dos dados enviados pelo controlador do robô. Algumas dificuldades foram observadas devido a este arranjo de envio: além da quantidade excessiva de elementos para preenchimento do *buffer* de envio (que atrasam a comunicação), há necessidade de diferenciação entre a posição em X, em Y e em Z enviadas pelo controlador e a variação no tamanho das mensagens transmitidas.

O primeiro problema abordado foi o método para conseguir fazer a separação entre mensagem útil e os caracteres para preenchimento do *buffer*. A solução para este problema ocorreu com a utilização de combinações de caracteres especiais ASCII que não são comuns no preenchimento, facilitando assim a diferenciação do conteúdo desejado. As combinações de caracteres foram utilizadas anterior e posteriormente à mensagem, marcando assim o tamanho da mesma e a diferenciando no *buffer* de leitura, funcionando como um encapsulamento da mensagem.

Esta abordagem se mostrou bastante eficaz, porém o tamanho da mensagem era variável, o que impossibilitava garantir uma frequência fixa de envio desta informação ou um tempo fixo para a transmissão desta mensagem. Essa variação de tamanho na mensagem ocorria dependendo do número de caracteres utilizados na representação das posições: por exemplo, no caso de  $X = 18,1$  mm são necessários 4 caracteres para envio da posição (ou 4 Bytes); já no caso de  $X = 1018,1$  mm, são necessários 6 caracteres; ou seja, cada algarismo na base decimal corresponde a um Byte.

A incapacidade de prever o tempo de envio ou a taxa de envio, esta última em caso de envio serial repetitivo da posição, implica na redução da precisão do sistema conforme a soldagem progride, já que os

valores acumulados de posição tendem a ser maiores (e representados por mais dígitos) do que no começo da operação de união. Além disso, a *polling rate*, ou taxa de resposta da posição por parte do manipulador, pode variar de forma aleatória, também prejudicando a precisão do sistema.

A primeira solução evoluiu para uma segunda tentativa na qual as mensagens enviadas são de tamanho fixo, eliminando a necessidade de preenchimento adicional do buffer e da imprevisibilidade da taxa ou tempo de envio das mesmas. A descontinuação do uso de caracteres ASCII também foi uma mudança implementada nesta solução.

O método utilizado para fixar o tamanho da mensagem foi a definição de limites para cada variável de posição e representação das mesmas em 16 bits por posição, o que inclusive contribuiu para um aumento na taxa de envio máxima, devido à quantidade reduzida de informações enviadas. A representação das posições em X na base binária é descrita pela Equação 4 e das posições em Y e Z, na base binária, pela Equação 5. A utilização metodologia diferente para o eixo X foi a fim do aumento no valor máximo suportado para a variável.

$$\text{posição } X_B = [(\text{posição } X + 3200) * 10,0]_2 \quad (4)$$

$$\text{posição } Y_B = [(\text{posição } Y + 320) * 100,0]_2 \quad (5)$$

Como o tamanho da mensagem foi limitado em 16 bits, o valor inteiro máximo representado é de 65535 ( $2^{16} - 1$ ). A necessidade de representação de valores reais foi contemplada pela soma de um coeficiente (possibilitando a representação por números positivos de números positivos e negativos no canal de comunicação) e pela multiplicação de outro coeficiente (possibilitando a representação por números inteiros de números com uma ou duas casas decimais) descritas nas equações 3 e 4. A definição destes limites impôs valores mínimos e máximos aos acumulados para cada variável, sendo que para X o valor pode estar entre -3200,0 e +3200,0 mm e para Y e Z os valores podem estar entre -320,00 e +320,00 mm, intervalos considerados suficientes para as aplicações previstas.

As mensagens trocadas entre os componentes do sistema obedecem um protocolo próprio, desenvolvido pelo fabricante da fonte e adotado pelo fabricante do manipulador e para o desenvolvimento do *software* proposto neste trabalho.

As mensagens que partem do mestre (o computador executando o *software* de seguimento de junta) são compostas por 4 Bytes, sendo o

primeiro representando o cabeçalho da mensagem (a qual escravo diz respeito a mensagem); o segundo identifica qual comando deve ser executado, de uma lista de comandos pré-programados em cada componente do sistema; e os dois últimos são o valor da variável de comando, devidamente tratado conforme as equações 3 e 4. Situações que requerem informar ao escravo mais de uma variável para comando são resolvidas com o envio em sequência de dois ou mais pacotes de 4 Bytes, compondo toda a mensagem.

O escravo por sua vez atende às requisições do mestre e, quando solicitado informação sobre a posição atual do TCP (*Tool Center Point*), a mensagem retornada é composta pelo primeiro Byte de cabeçalho, o segundo Byte que identifica o comando atendido e três pares de Bytes que informam as coordenadas em X, Y e Z, respectivamente. O *software* desenvolvido neste trabalho contempla apenas a comunicação com o controlador do robô e com o sensor a laser, porém a comunicação com a fonte de soldagem pode ser facilmente implementada no futuro já que utiliza o mesmo protocolo.

### 3.4.2 Tratamento das leituras de erro

Os valores de erro informados pelo sensor ao *software* de seguimento de junta são fruto da correta identificação dos *tracking points* do perfil analisado (pontos de interesse do chanfro) e do posicionamento espacial do ponto virtual de referência. O ponto virtual é localizado sempre em um ponto de interesse da junta, como o centro, a borda ou o ponto médio da face, dependendo do perfil analisado. A posição deste ponto virtual sempre oscila em torno da posição real da junta, sendo necessária uma filtragem para atenuar erros aleatórios na correção da trajetória de soldagem.

O filtro utilizado é apenas um amortecimento exponencial, conhecido na literatura por *exponential smoothing* e foi sugerido pela primeira vez em 1956 por Robert Goodell Brown, segundo Mendonça (2013). Segundo o mesmo autor, que utilizou este filtro para realização do seguimento de junta pelo sensoriamento a arco, esta função é basicamente um filtro do tipo *RC* discretizado, que adota um fator de amortecimento  $\alpha$  referente à frequência de corte do filtro. A Equação 6 demonstra a equação de amortecimento utilizada:

$$Erro = Leitura * \alpha + Erro_{anterior} * (1 - \alpha) \quad (6)$$

Na Equação 6, o erro informado ao *software* (**Leitura**) é multiplicado por um coeficiente  $\alpha$ , sendo somado ao último valor de erro filtrado multiplicado por  $1 - \alpha$ . O coeficiente  $\alpha$  utilizado para o eixo Y foi de 0,4 e para o eixo Z foi de 0,2. A Figura 18 representa a eficácia da filtragem utilizada: o gráfico de “Leitura Recebida” demonstra como é mensurado o perfil da junta pelo sensor; o gráfico “Leitura Filtrada” representa o perfil já filtrado pelo *software*. O coeficiente  $\alpha$  utilizado nesta filtragem foi de 0,4.

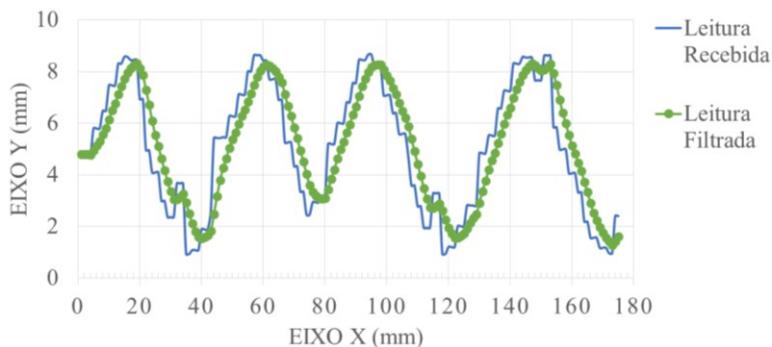


Figura 18 – Gráficos das leituras recebida e filtrada no comprimento da junta.

Os valores dos coeficientes foram determinados empiricamente, através de ensaios repetitivos sobre a mesma peça, encontrando um valor adequado para cada eixo, assim como foi realizado por Mendonça (2013). A frequência de corte necessária ao eixo Z foi mais baixa devido à dificuldade do sensor em posicionar o ponto virtual de referência na altura adequada quando na ocorrência de sombreamento parcial da junta observada. Essa dificuldade é visível na grande flutuação em Z que o ponto virtual apresenta na situação descrita.

### 3.4.3 Algoritmo de correção de trajetória linear

A situação de soldagem com trajetória linear de deslocamento da tocha é muito comum na indústria, principalmente no passe de raiz em juntas *narrow-gap* (de pequena abertura). Nessa situação, os erros de posicionamento identificados pelo sensor a laser são reflexo apenas da condição física da junta. No caso da trajetória com oscilação da tocha, como o sensor está fixado à esta, o próprio movimento oscilatório desloca o sensor em relação à junta, sendo necessário considerar esse

deslocamento para a correta interpretação dos desvios geométricos da peça.

Na soldagem filetada ou sem oscilação, o algoritmo desenvolvido se encarrega de manter a tocha à mesma distância relativa da peça em que ela estava posicionada no início do cordão, conforme a tocha avança na soldagem. Na ocorrência de desvios da linha central da junta em relação à trajetória percorrida pela tocha, o *software* se encarrega de posicionar o TCP novamente na trajetória correta, realizando correções nos eixos Y e Z para tal.

A detecção de desvios entre a tocha e a junta só é possível pelo correto posicionamento do perfil virtual da junta em relação à posição do TCP, informado pelo sensor laser ao percorrer a peça. A construção e referência deste perfil é feita durante toda a execução da soldagem através da comunicação com o sensor e o manipulador.

A existência da defasagem física entre o centro da linha laser e o centro da ferramenta, que é a distância conhecida como *offset*, implica na necessidade de retorno da tocha antes do início da solda. Esse retorno é necessário por possibilitar a medição de todo o perfil da junta, sem que haja uma região não mensurada no início do cordão. Se não for feito o retorno e houver um desvio da linha central da junta dentro desse comprimento de junta não mensurado, o desvio se propagará por toda a execução da soldagem. O fluxograma da rotina inicial do *software*, que é comum a ambos os algoritmos, está representado na Figura 19.

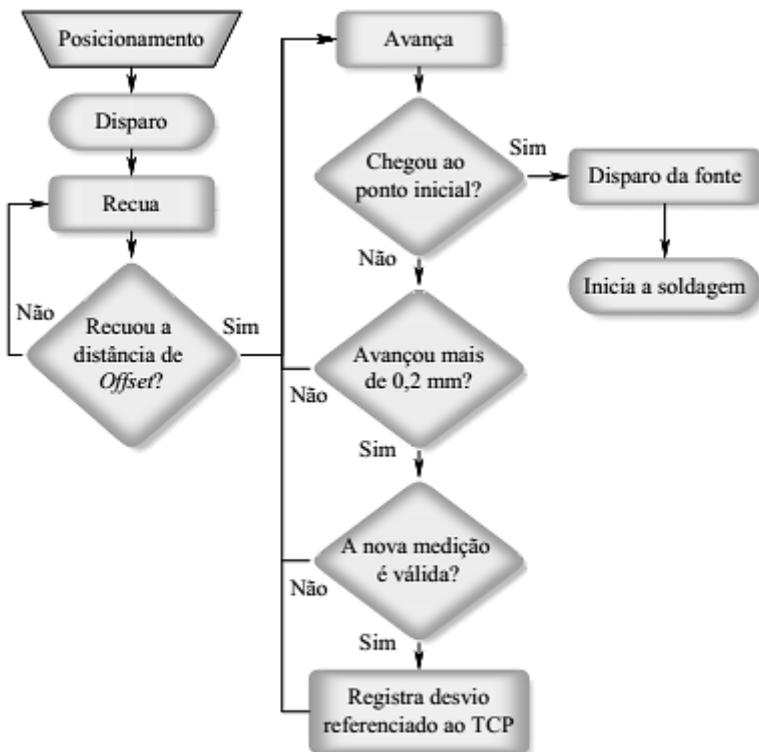


Figura 19 – Fluxograma da rotina inicial do *software* desenvolvido.

A Figura 20 exemplifica a execução deste retorno anterior à soldagem e também a medição da linha central da junta. A construção do perfil virtual da junta é feita pelo agrupamento de várias leituras do perfil em posições diversas sobre a junta, conforme a Figura 20-D demonstra.

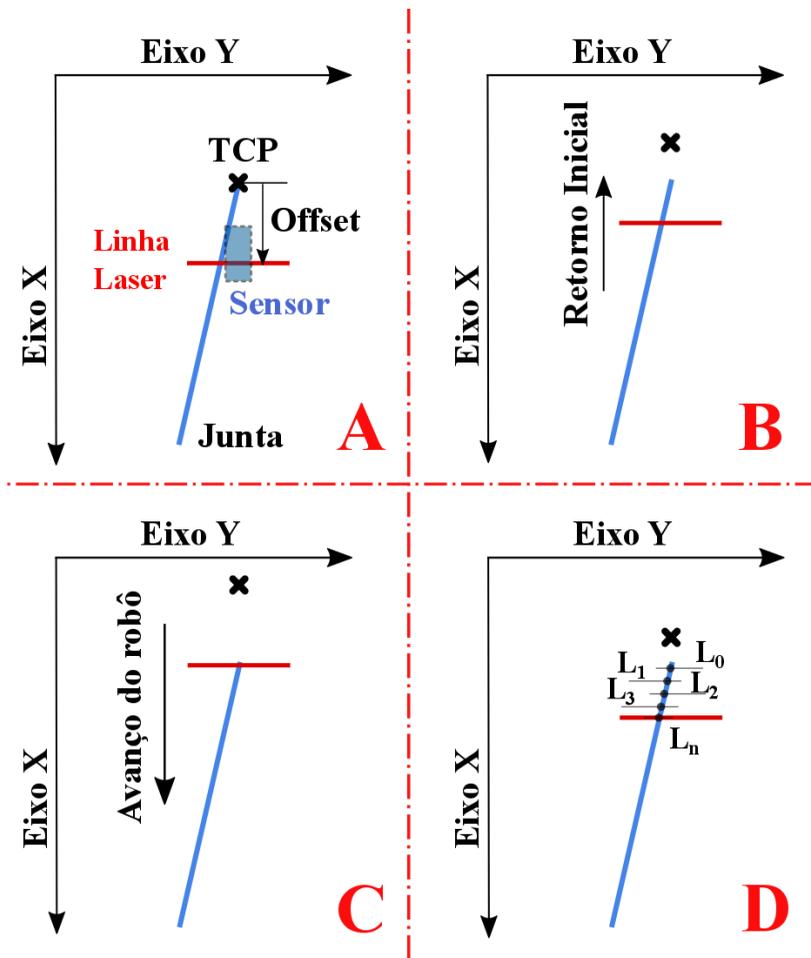


Figura 20 – Captura do perfil da junta: (A) Posição de início da soldagem, (B) Retorno inicial, (C) Início da medição e (D) Leitura do perfil da junta.

A comunicação com o sensor a laser sinaliza constantemente ao *software* quando da execução de uma nova leitura do perfil do chanfro. Paralelamente, o *software* mantém contato constante com o manipulador, sendo informado do deslocamento dos eixos do robô e acompanhando sua evolução durante a soldagem. A cada nova leitura que ocorra em uma posição diferente do manipulador, é adicionada uma nova leitura ao conjunto que compõe o perfil virtual da junta. A diferença entre a posição do robô no eixo X anterior e atual das leituras deve ser maior ou igual a

0,2 mm. Esse valor foi determinado para limitar o máximo de 5 leituras por milímetro de junta mensurada, uma vez que essa quantidade é avaliada como suficiente para os perfis de junta utilizados para soldagem.

A função do *software* nesse momento é concatenar as informações de ambas as fontes: a leitura do sensor é associada à última posição informada pelo manipulador e sua referência é transferida da base do sensor para o TCP. A realização de leituras sucessivas culmina no preenchimento de uma tabela contendo o perfil virtual da junta referenciado à ponta do eletrodo. As informações contidas na tabela do perfil da junta servem de base para as ações de correção tomadas pelo *software* durante o seguimento. Essas informações também são exportadas para uma planilha, contendo o relatório completo da soldagem realizada, ao final de cada operação caso seja de interesse do usuário.

O *software* de seguimento de junta utiliza as informações de posicionamento retornadas pelo controlador do manipulador, juntamente com a tabela, para realizar as ações corretivas no movimento. O algoritmo de correção de trajetória acompanha o movimento do robô em relação ao perfil virtual, reconhecendo os pontos onde será implementada a correção. Cada ponto para correção corresponde a uma leitura registrada anteriormente na tabela pelo sensor. A Figura 21 ilustra como é levantado o perfil virtual da junta e quais pontos são utilizados pelo algoritmo de correção de trajetória linear para comandar o robô.

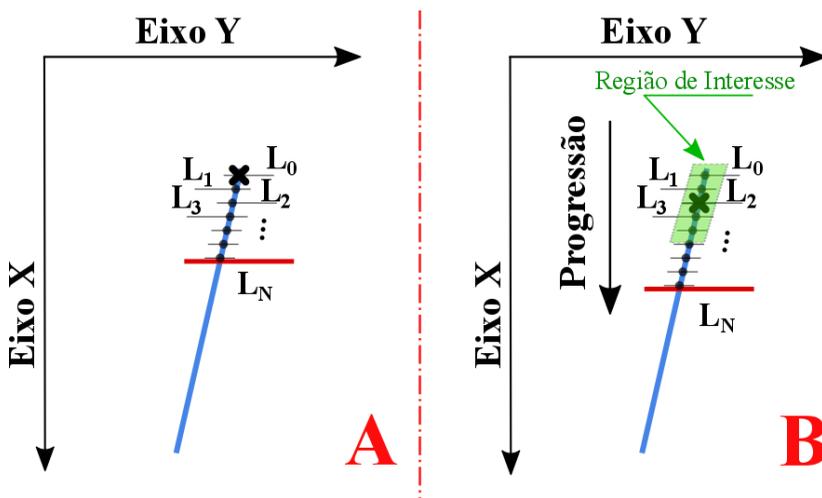


Figura 21 – Seguimento de junta em movimento linear: (A) Início da soldagem e (B) Região de interesse e correção de trajetória.

Uma vez iniciada a soldagem (Figura 21-A), assim que o *software* verifica que o robô está ou passou sobre um ponto da junta que foi mensurado, dá-se início ao cálculo da correção a ser comandada ao manipulador (Figura 21-B). O cálculo realizado é uma média dos erros lidos na região de interesse (adjacente ao ponto central, TCP). A Figura 22 ilustra o fluxograma, a partir do início da soldagem, para o algoritmo de seguimento de junta sem oscilação da tocha.

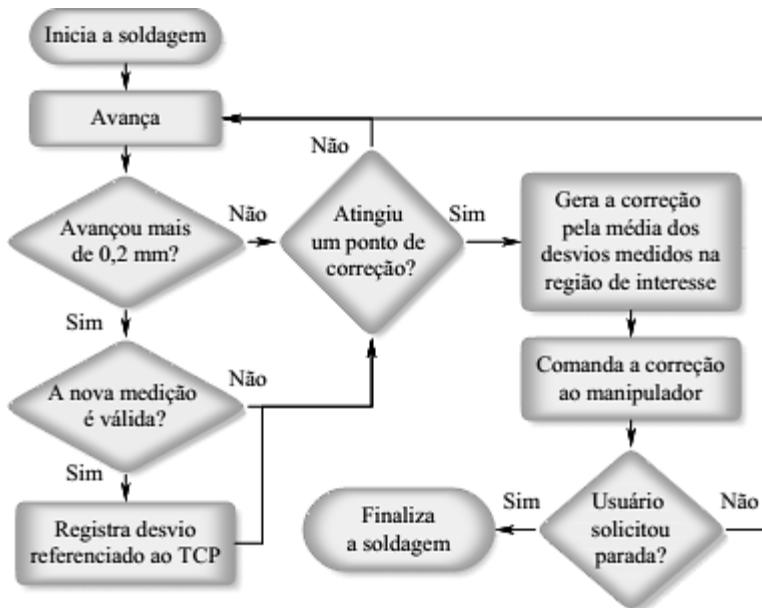


Figura 22 – Fluxograma do seguimento de junta sem oscilação da tocha.

O usuário do *software* deve informar antes do início da soldagem qual é o comprimento de junta dessa região de interesse considerada para o cálculo, tanto para o eixo Y como para o eixo Z. A Figura 21-B demonstra uma região de interesse selecionada para o Eixo Y igual à distância de *offset*. Dessa maneira, o máximo valor admissível para o comprimento da área de interesse é de duas vezes a distância do *offset*.

A seleção de uma região menor implica naturalmente na utilização de menos pontos para o cálculo, porém possibilita ao *software* realizar o seguimento de junta em perfis de chanfros com grandes variações geométricas.

A aquisição das leituras é feita em frequência fixa pelo sensor a laser; por padrão 25 Hz. Dependendo da velocidade de soldagem e da eficácia do sensor em reconhecer o perfil da junta, a quantidade de pontos lidos por unidade de comprimento da junta varia.

Em operações de soldagem de alta velocidade, utilizadas em processos de alta potência ou alta densidade de corrente, é natural que haja menor densidade de leituras no comprimento da junta mensurada. Essa situação ocorre, por exemplo, nos processos MIG/MAG e TIG de alta corrente ou mesmo processos de união por Plasma ou LASER de chapas metálicas de pequena espessura.

Na ocasião de calibração incorreta do sensor para reconhecimento dos pontos de interesse da junta (*tracking points*), a quantidade de medições inválidas é significativa. A incapacidade do sensor em mensurar o perfil da junta é uma falha crítica ao sistema, principalmente em situações de alta velocidade de soldagem, pois diminui a densidade de pontos medidos por unidade de comprimento.

#### **3.4.4 Algoritmo de correção de trajetória com oscilação da tocha**

Nos processos de soldagem, muitas vezes é utilizado a oscilação da tocha durante a condução da mesma. Esse tipo de operação também é comumente chamado de soldagem com tecimento. Nas aplicações de revestimento por soldagem, a largura do cordão está diretamente associada à produtividade da operação. Nas operações de união, no passe de raiz, a oscilação da tocha é utilizada quando na existência da abertura de raiz (*gap*), possibilitando fusão de ambos os flancos do chanfro. Ainda neste tipo de operação, nos passes de enchimento e acabamento, a oscilação permite a obtenção de maior taxa de material depositado por passe, diminuindo o tempo morto da operação e consequentemente aumentando a produtividade do processo.

Por ser de grande utilidade nas operações de soldagem, é fundamental que o *software* desenvolvido neste trabalho tenha capacidade para atuar na correção de trajetórias com oscilação da tocha. O desafio neste tipo de operação está na constante oscilação do sensor sobre a junta, uma vez que este está acoplado diretamente à tocha de soldagem.

A constante oscilação do sensor em torno da junta torna necessário um novo algoritmo de correção, específico para tal condição. O algoritmo para correção de trajetória com oscilação deve ser capaz de identificar qual desvio de trajetória apontado pelo sensor é causado pelo movimento relativo entre sensor e junta na amplitude da oscilação

(natural ao processo em questão) e qual é função de desvios geométricos da peça mensurada (passíveis de correção).

O método para construção do perfil virtual da junta é o mesmo do utilizado pelo algoritmo de correção para soldagem linear, sendo que apenas o modo de interpretação desse perfil mensurado é alterado. Sendo assim, constantemente o *software* captura leituras do perfil associadas ao posicionamento do robô, construindo a tabela com o perfil virtual da junta. A única diferença aqui é que não há deslocamento mínimo no eixo X a ser respeitado pelo *software* para cada novo desvio medido.

A utilização da oscilação, mesmo em frequências consideradas altas para as aplicações convencionais da soldagem (acima de 3 Hz, por exemplo), não se mostrou um empecilho na realização da medição da junta. Todavia, a utilização de grande amplitude de oscilação, aliada a desvios da junta, pode posicionar o chanfro fora do campo de medição do sensor, inviabilizando a correção de trajetória. A sincronia entre a passagem pelo centro do movimento oscilatório e a aquisição das medições poderia resolver em parte essa problemática. Mesmo se fosse utilizada a sincronização, ainda haveria baixa densidade de medições sobre a peça, resultando em dificuldade para o seguimento de junta.

O seguimento de junta em trajetória oscilatória, a exemplo do linear, utiliza pontos de referência para sincronizar o movimento do robô com o perfil virtual da junta. Os pontos de referência nesse caso são os pontos do centro da oscilação, calculados pela média entre dois pontos consecutivos dos extremos do movimento oscilatório. Dessa maneira, a trajetória de soldagem é traduzida em vários pontos médios da oscilação, nos quais a correção é implementada, conforme o robô os alcança no seu deslocamento sobre a junta. A Figura 23 ilustra a construção da linha central, que contém os pontos de referência utilizados na correção do movimento. A Figura 24 mostra o fluxograma deste algoritmo, a partir do início da soldagem.

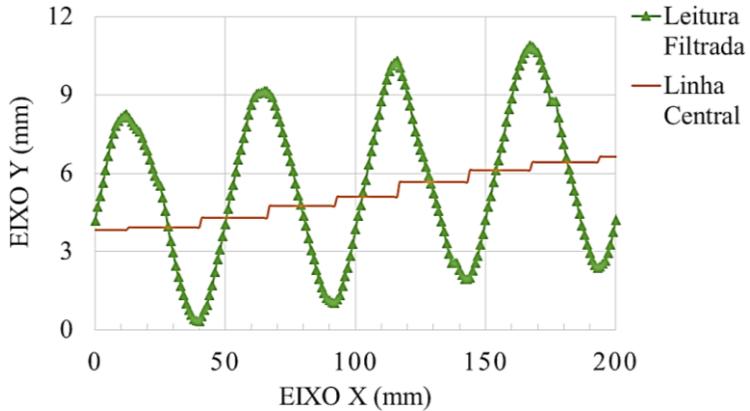


Figura 23 – Gráficos da leitura filtrada e linha central calculada no comprimento da junta.



Figura 24 – Fluxograma do seguimento de junta com movimento oscilatório.

A aplicação da filtragem às leituras de erro é ainda mais crítica neste tipo de movimento, uma vez que ruídos no perfil virtual da junta comprometem a correta análise deste e, por consequência, a identificação dos pontos do extremo do movimento oscilatório.

Além dos algoritmos de correção, é essencial que a interface com o operador fosse adequada à função. Os comandos disponíveis ao operador na Interface Homem Máquina (IHM) do *software* foram dispostos de forma a facilitar a operação do *software* e possíveis futuros desenvolvimentos do mesmo.

Uma vez concluída a implementação dos algoritmos de correção para trajetórias com e sem oscilação da tocha de soldagem, foi possível iniciar os testes para validação da eficácia dos mesmos.

Os primeiros testes são propostos na condição *off-line*, ou seja, sem a realização simultânea de soldagem (apenas a movimentação da tocha sobre a junta, simulando uma operação de soldagem). A determinação do uso deste tipo de ensaio foi devido à praticidade para avaliação visual do resultado da correção, uma vez que é mais fácil observar a ponta do arame-eletrodo e sua posição em relação à peça durante a movimentação quando não há arco elétrico aberto entre eles.

### 3.5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para comprovação da eficácia do sistema de seguimento de junta foi simples: realizar o seguimento de juntas utilizando peças com dimensões conhecidas, com desvios geométricos propositalmente incluídos, a fim de conseguir adequada interpretação dos resultados de seguimento.

Além do sistema desenvolvido para correção automática de trajetória (manipulador robótico cartesiano combinado com sensoriamento a laser), também foi incorporado ao manipulador um sensor extra, de deslocamento linear, com o propósito de mensurar e documentar a real resposta do eixo Y do robô aos comandos do *software* de seguimento de junta.

Na situação de teste *on-line*, ou seja, com soldagem, a resposta do eixo Y é visível pela própria deposição do cordão de solda; como não há solda nos testes *off-line*, o sensor extra possibilita a visualização do resultado da correção. Apesar do resultado visual, as informações do sensor de deslocamento também são guardadas durante a execução da soldagem, provendo uma segunda fonte de dados para testes do sistema.

### 3.5.1 Sensor de deslocamento linear

O sensor de deslocamento linear utilizado é o modelo *8712-100* do fabricante Buster Prazisionsmesstechnik GmbH. Este sensor é um potenciômetro linear no qual a resistência elétrica varia proporcionalmente ao deslocamento sofrido pelo eixo deslizante do equipamento. Segundo o fabricante, o sensor tem uma resolução de 0,01 mm, linearidade de  $\pm 0,30\%$  e faixa de medição de 0 a 100 mm. A Figura 25 ilustra o sensor em questão.

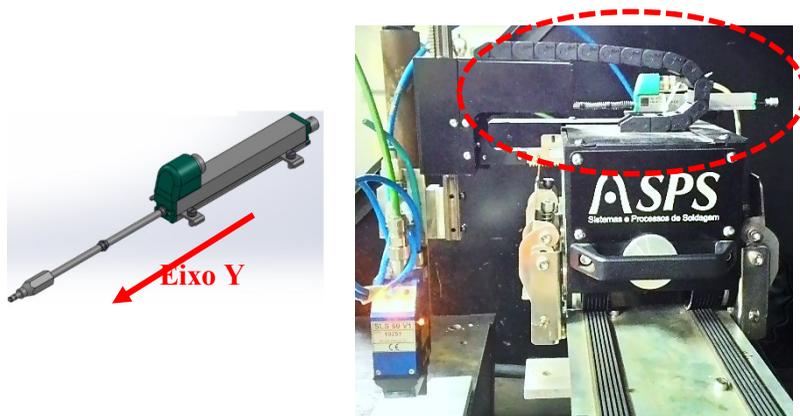


Figura 25 – Sensor de deslocamento linear *8712-100*, detalhe para a montagem do mesmo sobre o robô (toca o eixo Y).

A leitura do deslocamento é feita através deste sensor por intermédio de um micro controlador *ATmega328*, montando em uma placa *Arduino Nano*, que possui um conversor A/D de 10 bits e também uma porta serial no padrão *RS232*. Através da comunicação serial com a placa *Arduino*, foi possível realizar a integração deste sensor com o *software* de seguimento de junta. A leitura da tensão entre os terminais do sensor de deslocamento linear é informada diretamente ao *software* de correção de trajetória. A leitura da tensão sobre o sensor, uma vez que se trata de uma régua resistiva, é proporcional ao deslocamento da haste do mesmo, que está em contato direto com o eixo Y do robô. A própria placa *Arduino* fornece a tensão para alimentação do sensor linear, facilitando a montagem do conjunto.

A inclusão do sensor de deslocamento linear não altera o funcionamento do seguimento de junta, apenas fornece informações extras para uma avaliação posterior ao ensaio. Para facilitar a

compreensão da dinâmica de correção, também foi implementada uma ferramenta gráfica ao *software*, que possibilita visualização em tempo real da leitura do sensor, do erro filtrado pelo *software*, do comando de posicionamento para controlador do robô e da leitura de deslocamento do eixo Y feita pelo sensor de deslocamento linear. Exemplos de funcionamento desta ferramenta estão presentes nos resultados deste trabalho.

### 3.5.2 Corpos de prova

As peças projetadas para os testes precisavam respeitar três limitações impostas pelo sistema de medição:

1. A velocidade de soldagem, não sendo alterada durante o seguimento de junta, torna impossível ao sistema reproduzir com fidelidade trajetórias com mudanças bruscas em direções perpendiculares ao eixo de deslocamento da tocha;
2. A profundidade de campo do sensor a laser, que no caso do sensor utilizado é de 80,0 mm, impossibilitando a medição de peças que excedam essa altura;
3. O campo de visão (comprimento da linha laser máxima passível de medição) suportado pelo sensor utilizado também é um limitante; como o campo é de 50,0 mm, qualquer variação no eixo Y da solda que exceda 25,0 mm do centro da medição, dentro de um deslocamento que seja menor ou igual ao *offset*, não estará visível ao sensor.

Assim, foram projetados 4 perfis de chanfro diferentes, simulando situações variadas e exageradas de desvios geométricos da linha central de junta. Juntas sobrepostas foram utilizadas nessa etapa pela facilidade de fabricação e montagem das mesmas. Todas as peças foram produzidas por corte plasma CNC (Comando Numérico Computadorizado), com subsequente lixamento e pintura. Optou-se pela pintura das peças uma vez que estes ensaios não têm objetivo de demonstrar a capacidade do sensor de mensurar juntas com acabamento superficial ruim ou irregular, mas sim de demonstrar a capacidade de interpretação da junta por parte do *software* de correção. A pintura da peça garantiu que a qualidade da superfície fosse mantida a mesma em toda a extensão da junta. A Figura 26 retrata as peças já acabadas, com os respectivos detalhamentos.

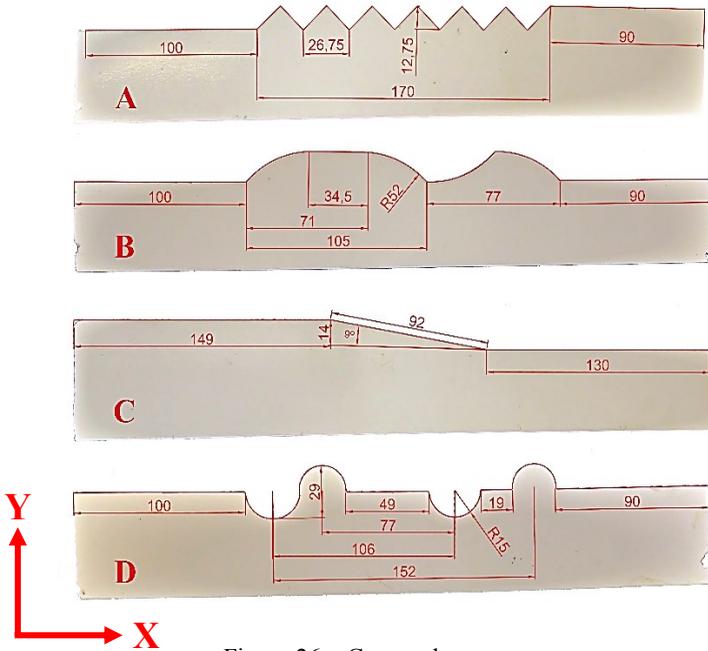


Figura 26 – Corpos de prova.

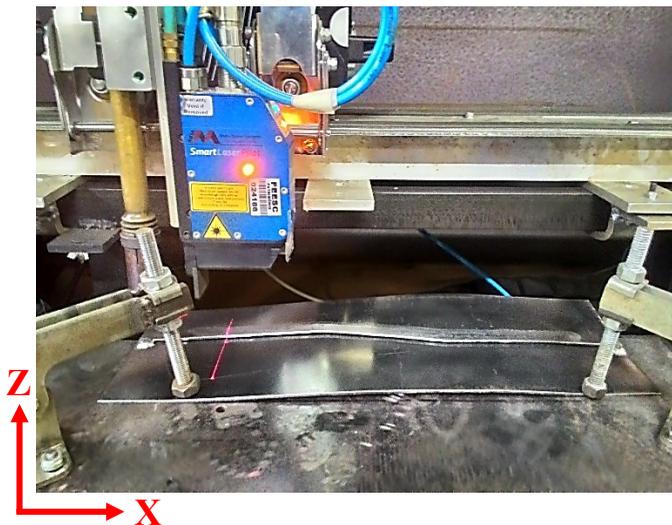


Figura 27 – Sensor a laser posicionado sobre um corpo de prova do tipo C.

Todas as peças mostradas na Figura 26 contemplam transições entre regiões lineares (junta sem variação geométrica na linha central) e regiões com grande variação geométrica da linha central. Esta alternância estimula correções significativas e consequentemente evidencia possíveis erros no algoritmo de seguimento de junta. A Figura 27 ilustra uma peça do tipo C posicionada sob o sensor a laser, com fixação por grampos.

O corpo de prova A (Figura 26-A) foi concebido para forçar correções significativas e sucessivas, obrigando o *software* a atuar significativamente no seguimento de junta sobre todo o comprimento da peça. A atuação em demasia do *software* sobre o movimento do manipulador, além de colocar em prova o algoritmo de correção, evidencia possíveis falhas na filtragem, como o arredondamento dos cantos da peça.

Nos ensaios com este corpo de prova, foi realizada a soldagem apenas de uma face da peça e foi alterado, para cada corpo de prova, o comprimento da área de interesse no eixo Y, de modo a facilitar o efeito prático desse parâmetro no resultado da soldagem. Os comprimentos da área de interesse utilizados foram de 1, 5 e 15 mm. No eixo Z, em todos os testes realizados, foi utilizado o comprimento de 5 mm da área de interesse.

O corpo de prova B, ilustrado na Figura 26-B, tem por finalidade o teste da repetibilidade do algoritmo de correção de trajetória. A soldagem a nível industrial requer boa capacidade de posicionamento e repetibilidade por parte do manipulador. Os processos de alta produtividade, como soldagem por LASER ou processos de alta corrente, também dependem do correto posicionamento da tocha para sua utilização.

Uma vez que o sistema proposto é para seguimento de junta, a utilização do mesmo na soldagem de uma série de peças idênticas, no caso três, com a mesma configuração do sistema, serve ao propósito de destacar quaisquer erros aleatórios do algoritmo de correção. A execução dessas soldas respeita os mesmos parâmetros utilizados para os corpos de prova do tipo A, inclusive a mesma velocidade de soldagem.

O corpo de prova C (Figura 26-C) foi projetado para os ensaios com movimento oscilatório da tocha. A soldagem nos ensaios desse tipo de corpo de prova é realizada em ambas as faces da peça. O primeiro passe é realizado com a mesma configuração do ensaio do corpo de prova A, sendo que o ajuste da área de interesse no eixo Y é ajustado para 5 mm. Este passe inicial tem por finalidade apenas garantir a fixação das peças sobrepostas, para que estas não se distanciem na realização do passe de alta corrente.

A soldagem da face oposta é então realizada com oscilação da tocha, simulando uma utilização para o seguimento de junta na aplicação de revestimentos metálicos. A finalidade deste corpo de prova é avaliar a capacidade do sistema desenvolvido em seguir o perfil da junta mesmo com a oscilação do conjunto tocha e sensor a laser. A frequência de oscilação utilizada é mudada para cada corpo de prova, sendo utilizadas 0,5, 1 e 2 Hz, todos na mesma amplitude, 15 mm.

O corpo de prova D (Figura 26-D) foi projetado para ensaios com movimento linear, com soldagem de apenas uma das faces do corpo de prova, seguindo a mesma metodologia do tipo A, porém comparando o desempenho do sistema desenvolvido com o do sistema *MotoEye Lt.*

Nesta modalidade, a finalidade é comparar o sistema desenvolvido com um sistema comercial de mesma função. O uso de dois sistemas diferentes implica na utilização de dois manipuladores distintos; para os ensaios com o *MotoEye Lt.* foi utilizado o manipulador *HP-20D*, do fabricante MOTOMAN (Figura 28). Um detalhe importante é que o corpo de prova retratado na Figura 26-D foi projetado de forma a forçar a perda de leitura de parte do perfil da junta, uma vez que excede em 2,0 mm a largura da área visível do sensor em trechos específicos. Dessa forma fica evidente o comportamento de cada sistema em tal situação.

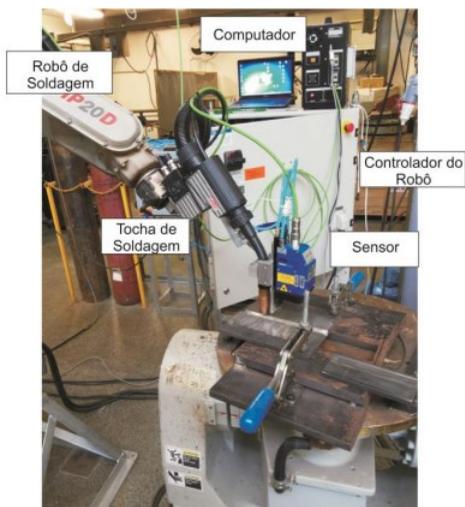


Figura 28 – Sistema *MotoEye Lt.* para seguimento de junta.

Os ensaios com os corpos de prova do tipo C, que contemplam a soldagem em ambas as faces das peças, foram realizados com tempo de

espera entre os passes. O intervalo de tempo entre os passes é suficiente para que as peças retornem à temperatura ambiente. Entre os passes também é realizada a escovação por máquina das peças.

Os corpos de prova concebidos para o presente trabalho representam situações singulares, que provavelmente não serão encontradas na indústria. Apesar de representarem juntas consideradas inapropriadas para a soldagem automática, pela quantidade de variações geométricas abruptas, estas juntas servem bem ao propósito de validação dos algoritmos de correção de trajetória.

### 3.5.3 Bancada de ensaios

A bancada de ensaios utilizada neste trabalho para realização dos testes *off-line* e *on-line* do sistema está representada na Figura 29. A utilização do sensor a laser implicou na necessidade de uma linha de ar comprimido próxima à bancada (Figura 29-A), além de espaço extra para os componentes do sistema de seguimento de junta.

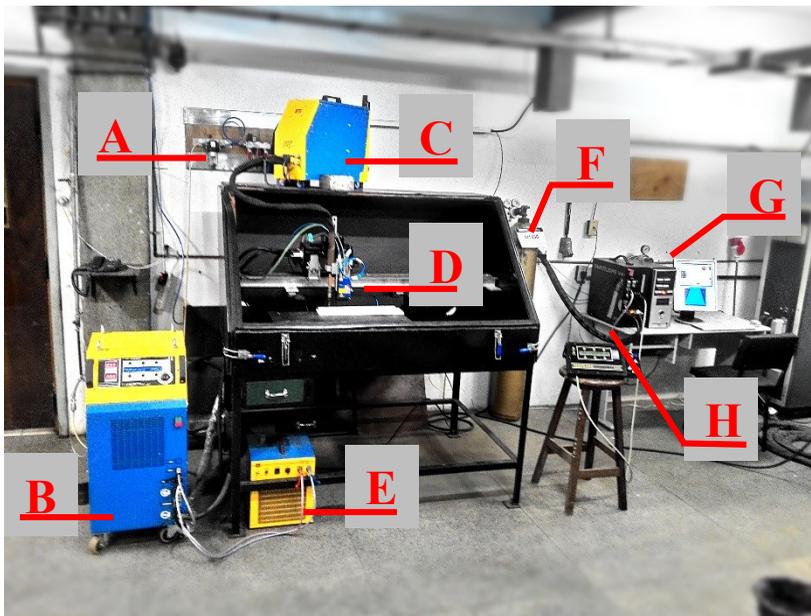


Figura 29 – Bancada de ensaios: (A) Filtros, (B) Fonte de soldagem, (C) Cabeçote alimentador, (D) Robô, tocha, sensor ótico e peça, (E) Trocador de calor, (F) Cilindro de gás, (G) Computador e (H) Controlador do robô e IHM.

Na Figura 29-B está retratada a fonte de soldagem utilizada no presente trabalho, uma *Digitec A7*, com capacidade para até 800 A, do fabricante IMC. A tocha utilizada é a *TBi Aut-511*, com capacidade de corrente de 450 A, produzida pela TBi Industries GmbH.

O manipulador utilizado está representado nas Figuras 29-D e H, respectivamente; foi utilizado o manipulador *TARTILOPE V4* do fabricante SPS. O computador que executa o *software* de seguimento de junta está representado na Figura 29-G; conta com um processador Intel *Core 2 Duo E6550* de 2.33 GHz e 2,0 GB de memória RAM.

O cilindro de gás utilizado na maior parte dos ensaios e visível na Figura 29-F contém a mistura gasosa denominada *C25*, comercializada pela empresa White Martins. Além desta mistura, também foi utilizada a denominada *SS*, do mesmo fabricante, nos ensaios com aplicação de revestimento metálico. A composição de cada uma está descrita junto à metodologia para os ensaios correspondentes, juntamente com a vazão utilizada. A regulagem da vazão foi realizada com auxílio de um fluxômetro acoplado diretamente ao bocal da tocha, utilizando a escala para Ar puro.

O diagrama de comunicação entre os componentes do sistema desenvolvido está representado na Figura 30. O sensor de deslocamento linear, representado sobre o eixo Y do manipulador, é utilizado apenas nos ensaios com movimentação linear, conforme explicado na seção 3.4.1.

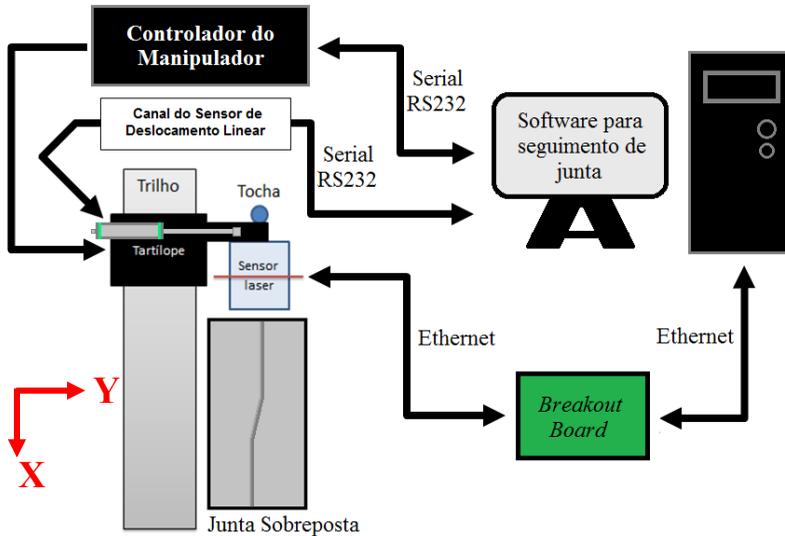


Figura 30 – Diagrama de comunicação entre os componentes do sistema.

### 3.5.4 Metodologia para ensaios com movimento linear

A validação do sistema de correção automática de trajetória deve ser anterior aos testes do mesmo com soldagem, ou *on-line*. Os equipamentos de soldagem são fontes de ruídos, assim como os periféricos que se encontram normalmente próximos à área da soldagem (transformadores, outras máquinas de solda, etc.), podendo influenciar o seguimento de junta. Os testes do sistema a vazio, ou *off-line*, possibilitam identificar falhas no algoritmo de correção ou nos componentes do sistema de medição, facilitando o acerto do sistema na ocorrência destes defeitos.

A comprovação da eficácia do sistema de seguimento de junta nos ensaios *off-line* é feita por meio da comparação entre os comandos de erro no eixo Y informados ao controlador do robô e a resposta do eixo Y do robô, documentada pelo sensor de deslocamento linear. Outra vantagem inerente à utilização desta metodologia proposta é a disponibilidade do perfil virtual da junta anterior à soldagem. Este perfil virtual pode ser comparado com o perfil da junta mensurado durante a mesma, evidenciando possíveis desvios advindos da realização da união.

Os ensaios propostos para a obtenção destes parâmetros devem contemplar a movimentação linear e também a progressão com oscilação

da tocha. Os ensaios de movimento linear (cordões filetados) foram realizados uma única velocidade de soldagem ( $V_s$ ) de 6,66 mm/s (40 cm/min). Esta velocidade foi assim determinada por atender às situações características de utilização do sistema desenvolvido.

Os corpos de prova foram ensaiados com o mesmo posicionamento, sendo alinhados aos eixos do robô, com fixação por grampos sobre a chapa inferior apenas. O posicionamento dos corpos de prova não demandou desalinhamento dos mesmos para os ensaios uma vez que o projeto das peças de teste já contemplou desvios geométricos significativos, simulando tais desalinhamentos.

Os ensaios *off-line* e *on-line* foram realizados todos em sequência para cada corpo de prova. Uma vez a peça em posição, a primeira etapa é realizar a medição no modo *off-line*, com o sensor percorrendo toda a extensão da junta; ao final, é gerado o relatório de soldagem, com as informações coletadas do processo. O posicionamento inicial da tocha de soldagem sobre a junta é realizado de forma manual pelo usuário, indicando ao *software* a posição inicial de soldagem e o afastamento a ser mantido da junta.

Após a conclusão do ensaio *off-line*, o manipulador é retornado para a posição inicial através do *software* e a fonte de soldagem é habilitada, possibilitando a execução da solda. A realização em sequência proporciona não só ganho de tempo, mas principalmente ensaios com e sem soldagem realizados na mesma configuração de calibração do sensor e posicionamento dos equipamentos e peça. Essa medida é importante por possibilitar a comparação dos perfis virtuais da junta medidos antes e durante a soldagem.

Os ensaios com movimentação linear contemplaram os 4 tipos de peças ilustradas na Figura 26, sendo que cada peça atende a um propósito diferente, conforme descrito na seção 3.5.2. A soldagem com movimentação linear nos corpos de prova do tipo C teve apenas o propósito de fixação das chapas e preparação para o passe seguinte, realizado com oscilação da tocha.

A configuração da fonte de soldagem foi feita utilizando o programa sinérgico da mesma para o MIG/MAG Convencional. O arame-eletrodo escolhido foi o ER70S-6 de diâmetro 1,0 mm, compatível com o material de base escolhido para confecção dos corpos de prova (chapas de aço SAE 1010 de 3,0 mm de espessura). O gás de proteção selecionado foi a mistura de 75% Ar + 25% CO<sub>2</sub>, de nome comercial C25, utilizado na vazão aproximada de 12 L/min. A DBCP utilizada em todos os ensaios foi de 20,0 mm, medida entre a face do bico de contato e a linha central da junta, localizada no plano comum às duas chapas resultante da

sobreposição. A Tabela 1 detalha os parâmetros utilizados de movimento sem oscilação da tocha.

Tabela 1: Parâmetros dos ensaios sem oscilação da tocha

Arame-eletrodo	ER70S-6
Diâmetro do eletrodo	1,0 mm
Material de base	Aço SAE1020
Espessura	3,0 mm
Gás de proteção	C25
Vazão do gás	12 L/min
Corrente média	180 A
Velocidade de alimentação	6,6 m/min
DBCP	20,0 mm
Velocidade de soldagem	0,4 m/min

Na preparação da superfície dos corpos de prova foi utilizado o esmerilhamento e também a escovação por máquina, com operação manual das mesmas. A fixação das chapas sobrepostas foi realizada através de ponteamto manual por processo MIG/MAG, em ambas as extremidades da junta e apenas de um lado da chapa. O comprimento dos pontos utilizados variou entre 8 e 12 mm. Os parâmetros e consumíveis do ponteamto foram os mesmos utilizados nos ensaios.

Nos ensaios de cordões filetados foi utilizado o MIG/MAG Convencional Sinérgico, com corrente média de 180 A e o ajuste de altura de arco ( $a$ ) em +10, que representa  $V_a = 110$  mm/s (6,6 m/min). A regulagem de ajuste da altura de arco atua diretamente no comando de velocidade de alimentação do arame-eletrodo na fonte utilizada.

### 3.5.5 Metodologia para ensaios com movimento oscilatório

A exemplo da metodologia utilizada para realização dos ensaios com movimento linear, os ensaios com oscilação da tocha foram realizados também com a sequência de modos de ensaio. A realização dos ensaios *off-line* precedeu os *on-line*, utilizando ambos nessa sequência para todos os corpos de prova ensaiados.

A sequência para realização das soldagens com movimento oscilatório da tocha é a mesma da utilizada para as com movimentação linear, com exceção da utilização nestes da oscilação na programação do manipulador e *software* de seguimento de junta e da troca dos consumíveis de soldagem.

A exemplo da metodologia descrita no item anterior, nesta também é necessário o posicionamento inicial da tocha de soldagem, realizado de forma manual pelo usuário do *software*. Após a leitura do trecho inicial, conforme a rotina descrita na seção 3.4.4, o sistema procede com a movimentação sobre a junta e o seguimento da mesma.

As peças do tipo C (Figura 26-C) foram utilizadas nos ensaios com oscilação da tocha, conforme descrito na seção 3.5.2. Na realização do primeiro passe, para união das chapas, foi utilizada a mesma metodologia dos ensaios das peças do tipo A descrita na subseção anterior 3.5.4, com os parâmetros acertados conforme a Tabela 1.

A aplicação do segundo passe, com deposição do revestimento metálico, utilizou não só movimento oscilatório e regulagem diferenciada da fonte, como também houve necessidade da troca dos consumíveis de soldagem, a fim de simular uma aplicação real. A regulagem da fonte, conforme a Tabela 2, utilizou a variante do processo MIG/MAG Convencional, em modo Normal, com as regulagens: tensão comandada de 17,3 V,  $V_a = 66,67$  mm/s (4,0 m/min),  $K_s = 65$  e  $K_d = 100$ . Os parâmetros  $K_s$  e  $K_d$  regulam a indutância da fonte a partir do evento do curto circuito e da reabertura do arco elétrico, respectivamente.

Tabela 2: Parâmetros dos ensaios com movimento oscilatório da tocha

Arame-eletrodo	ER309LSi
Diâmetro do eletrodo	1,0 mm
Material de base	Aço SAE1020
Espessura	3,0 mm
Gás de proteção	SS
Vazão do gás	12 L/min
Tensão média	17,3 V
Velocidade de alimentação	4,0 m/min
DBCP	20,0 mm
Velocidade de soldagem	0,15 m/min
Amplitude de oscilação	15,0 mm
Frequência de oscilação	0,5; 1,0 e 2,0 Hz

O arame-eletrodo utilizado para o passe com oscilação foi o *ER309LSi* de 1,0 mm de diâmetro. O gás de proteção utilizado foi a mistura denominada *SS*, constituída de 95% Ar, 3% CO<sub>2</sub> e 2% N<sub>2</sub>, na vazão aproximada de 12 L/min. A DBCP utilizada para estes ensaios foi também de 20,0 mm, medida a partir da face do bico de contato até a superfície da chapa a ser revestida.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios com movimentação linear foram todos realizados em sequência. Os consumíveis se mantiveram os mesmos durante os ensaios. Os ensaios com movimento oscilatório foram realizados também em sequência. Foram tomados os mesmos cuidados para limpeza e preparação para todos os corpos de prova antes dos ensaios.

### 4.1 ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

As peças do tipo A foram soldadas utilizando os parâmetros descritos na seção 3.5.4. A metodologia utilizada previu o ensaio de três parâmetros diferentes de filtragem. O CP-A1 foi soldado utilizando o comprimento da área de interesse igual à 5,0 mm. As peças CP-A2 e CP-A3 utilizaram os comprimentos de 1,0 e 15,0 mm, respectivamente, para a área de interesse. A Figura 31 ilustra o resultado dos ensaios.

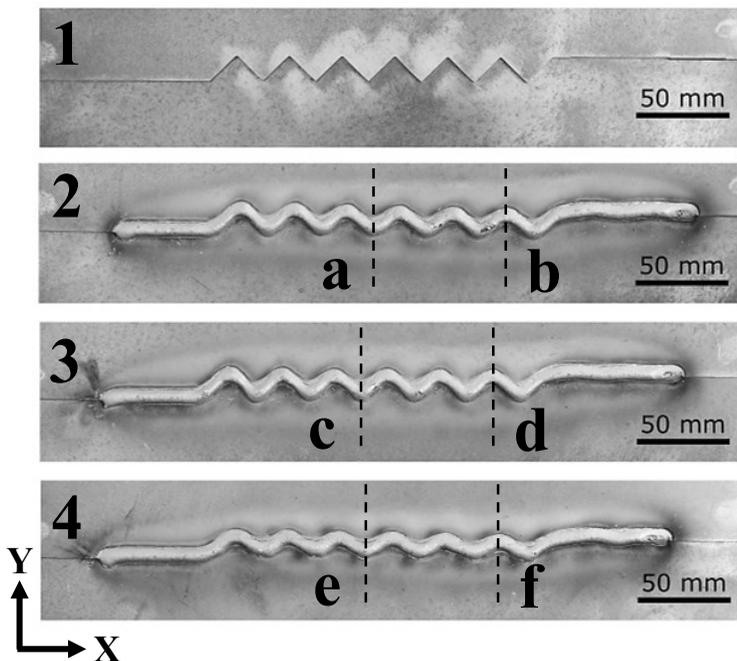


Figura 31 – Peças do tipo A, ensaios de calibração: (1) Junta, CP-A1; (2) CP-A1, área de interesse de 5 mm; (3) CP-A2, 1 mm e (4) CP-A3, 15 mm.

A eficácia no seguimento de junta do sistema desenvolvido é facilmente notada na análise visual dos cordões obtidos na soldagem destas peças. As peças CP-A1 e CP-A2 (Figuras 31-2 e 3, respectivamente), apesar de utilizarem parâmetros diferentes para o cálculo da linha central, apresentaram resultado bastante similar no acabamento e posicionamento do cordão. O resultado da soldagem do CP-A3 demonstra o efeito da área de interesse maior, que acaba por amortecer todas as mudanças bruscas.

A configuração da área de interesse utilizada na soldagem do CP-A3 é indicada para a maioria das operações de soldagem automática. Nessa modalidade de soldagem, desvios na linha central da junta geralmente são oriundos de defeitos e não do projeto da peça. A escolha do maior comprimento da área de interesse facilita o seguimento da linha central na ocorrência de ruídos na medição, beneficiando inclusive o acabamento do cordão.

Além da avaliação visual dos cordões depositados, há outras fontes de dados acerca da eficácia do sistema em realizar o seguimento de junta. Explorando ainda o resultado obtido com as soldagens destes corpos de prova, foram extraídas duas amostras de cada cordão das regiões de interesse, destacadas na Figura 31 pelas linhas tracejadas. As amostras foram preparadas por lixamento, possibilitando a melhor interpretação do resultado da soldagem. A Figura 32 apresenta as imagens macroscópicas de cada amostra metalográfica.

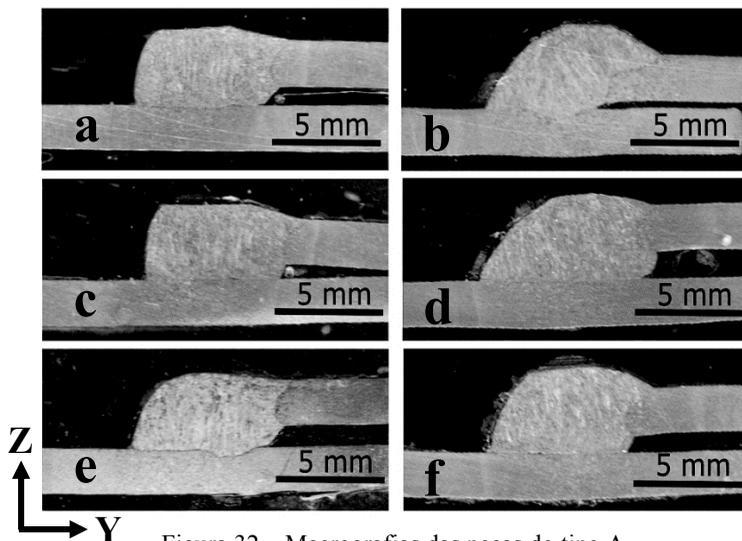


Figura 32 – Macrografias das peças do tipo A.

Na Figura 32, foi possível constatar a falha da soldagem em fundir a chapa inferior, em toda a largura do cordão, nas imagens **a**, **c**, **d**, **e** e **f**. Apesar de possibilitar a visualização de resultados ruins na soldagem destes corpos de prova, pela falta de fusão da chapa inferior, estes ensaios metalográficos serviram a dois propósitos. Esses resultados, mesmo sendo dependentes do posicionamento inicial fornecido pelo usuário, reforçaram a escolha dos parâmetros utilizados na união do CP-A1 para execução dos demais ensaios com movimentação linear. Além disso, foi constatado que a análise visual apenas da face e raiz do cordão não revela informações seguras quanto à qualidade do depósito no quesito abordado.

Apesar do foco desses ensaios ser a avaliação do algoritmo, a qualidade das uniões, revelada na Figura 32, apresentou acabamento ruim devido à preparação do corpo de prova. A preparação da superfície das peças não contemplou a remoção da camada superficial proveniente da laminação. Esta camada influencia diretamente na estabilidade do arco, penetração, molhabilidade da solda e acabamento superficial do cordão.

Outra fonte importante de informações, os ensaios *off-line* foram realizados sempre precedendo os com solda, levantando informações quanto ao estado da junta antes da soldagem e possibilitando inclusive comparações entre os ensaios. Na Figura 33 estão os gráficos contemplando as leituras do sensor de deslocamento linear e do sensor a laser, além da linha central mensurada, obtidos pelo ensaio *off-line* do CP-A1.

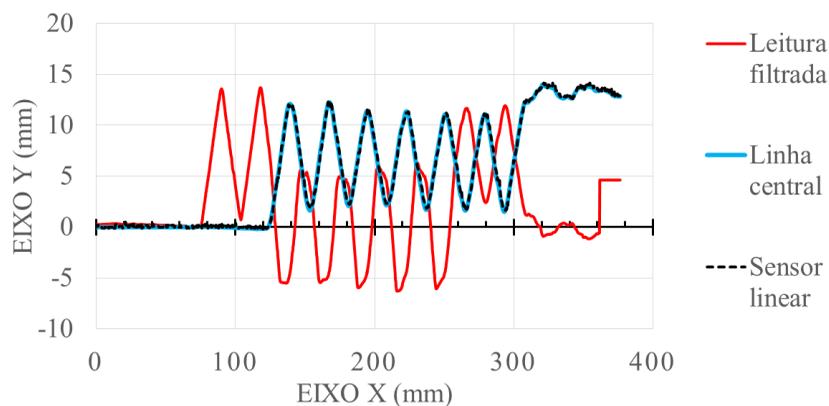


Figura 33 – CP-A1, gráficos do ensaio *off-line*.

A Figura 33 representa as principais informações disponibilizadas no relatório de soldagem. Além destas, há também os parâmetros para o eixo Z e os comandos enviados ao manipulador para realizar o seguimento de junta. Essa ferramenta também pode ser retrabalhada para atender a exigências específicas de cada aplicação. A riqueza de informações providas pelo sensor a laser implica em grande versatilidade para esta ferramenta.

A análise da Figura 33 revela que o sistema obteve êxito em mensurar a junta em questão e realizar o seguimento da mesma. O sucesso na construção do perfil virtual é revelado pela aparência do gráfico da “Leitura filtrada”, demonstrando continuidade nas leituras. O salto de cerca de 5 mm ao final do cordão ( $X = 360$  mm), representado por este gráfico, ocorreu já que o sensor ultrapassou o limite do corpo de prova. Este salto, porém, não influenciou no resultado da soldagem uma vez que o processo foi interrompido antes da tocha atingir esta região.

Os gráficos da Figura 33 também denunciam o *offset* do conjunto, representada pela distância entre o primeiro pico da “Linha filtrada” e o da “Linha central”. Outra constatação importante é o mínimo atraso entre a “Linha central” e a leitura do “Sensor linear”, da ordem de 0,5 mm. Essa distância representa o espaço percorrido pelo manipulador entre o envio da correção e a execução da mesma. Quanto menor for o atraso, caso o mesmo não seja compensado, melhor será o resultado do seguimento de junta. Nos ensaios executados, essa defasagem não comprometeu a qualidade da soldagem. Na maioria das aplicações, a defasagem nessa ordem de grandeza também não influencia na qualidade do produto final.

Outra aplicação interessante da ferramenta de relatório é possibilitar a comparação entre diferentes calibrações do sistema desenvolvido. O ensaio *off-line* com diferentes parâmetros de ajuste do sistema, como os ensaios executados nos corpos de prova do tipo A, representam grande economia de tempo e material para ajuste do sistema frente a uma nova aplicação.

A Figura 34 apresenta os gráficos das leituras do sensor linear e a linha central da junta mensurada, obtidos pelos ensaios de calibração executados com os corpos de prova do tipo A. O ruído presente nas leituras do sensor de deslocamento linear está representado na Figura 34-A devido à ausência de filtragem do sinal proveniente deste sensor. Este ruído provavelmente é fruto de oscilação na tensão sobre o sensor. O gráfico da linha central, representado na Figura 34-B, por ter um sinal filtrado como origem (leituras do sensor a laser), não apresenta ruído.

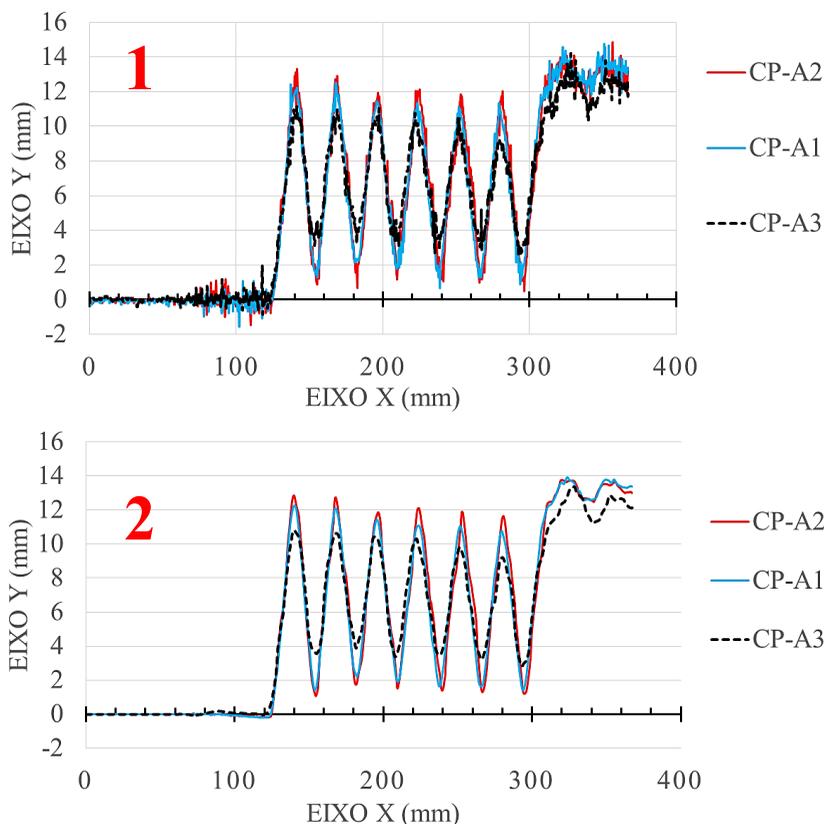


Figura 34 – Ensaio *off-line* de calibração, gráficos: (1) Leituras do sensor de deslocamento linear e (2) Linhas centrais.

Os gráficos ilustrados na Figura 34 expõe o efeito da variação no comprimento da área de interesse adotada. No CP-A2, que utilizou a menor área de interesse (1 mm), é visível que as bordas do corpo de prova são representadas com maior fidelidade do que nos outros corpos de prova. O CP-A3, como visto na Figura 31-4, apresentou a maior atenuação das bordas, já que a filtragem teve mais efeito (área de interesse maior, 15 mm).

A configuração utilizada na soldagem do CP-A1 foi adotada para a união dos outros corpos de prova. Na soldagem das peças do tipo D, todavia, foram utilizados dois parâmetros para a área de interesse, a exemplo do executado para as peças CP-A1 e CP-A2.

Na sequência dos ensaios, foram soldadas as peças do tipo B, com metodologia similar às do tipo A, porém ensaiando a repetibilidade do sistema desenvolvido.

## 4.2 ENSAIOS DE REPETIBILIDADE

Os corpos de prova do tipo B foram projetados para avaliar a repetibilidade do sistema desenvolvido. A combinação de desvios sucessivos e diversos na linha central da junta, aliada a trechos retos intermitentes, configuram uma situação de grande exigência para o sistema realizar o seguimento de junta.

A configuração dos parâmetros de movimentação, elétricos e do *software* se mantiveram os mesmos para todos os CPs deste tipo. A exemplo da soldagem realizada no CP-A1, o comprimento da área de interesse utilizado foi de 5 mm. As características geométricas das peças do tipo B implicam na necessidade de uma região menor de interesse para filtragem, de modo a reproduzir com fidelidade os desvios bruscos da linha central.

Na execução das soldas deste trabalho, todos os corpos de prova receberam o mesmo processo de ponteamto e preparação superficial, a exemplo da descrição feita na seção 3.5.4. Além do respeito à esta condição, os corpos de prova foram todos posicionados relativamente alinhados ao eixo X do robô, porém o início da solda foi definido para cada peça pelo usuário do *software*.

Uma vez que a junta esteja posicionada dentro do alcance do robô e do sensor a laser, variações no alinhamento da peça não devem impactar na realização da soldagem. O resultado da soldagem dos cinco corpos de prova do tipo B está ilustrado na Figura 35.

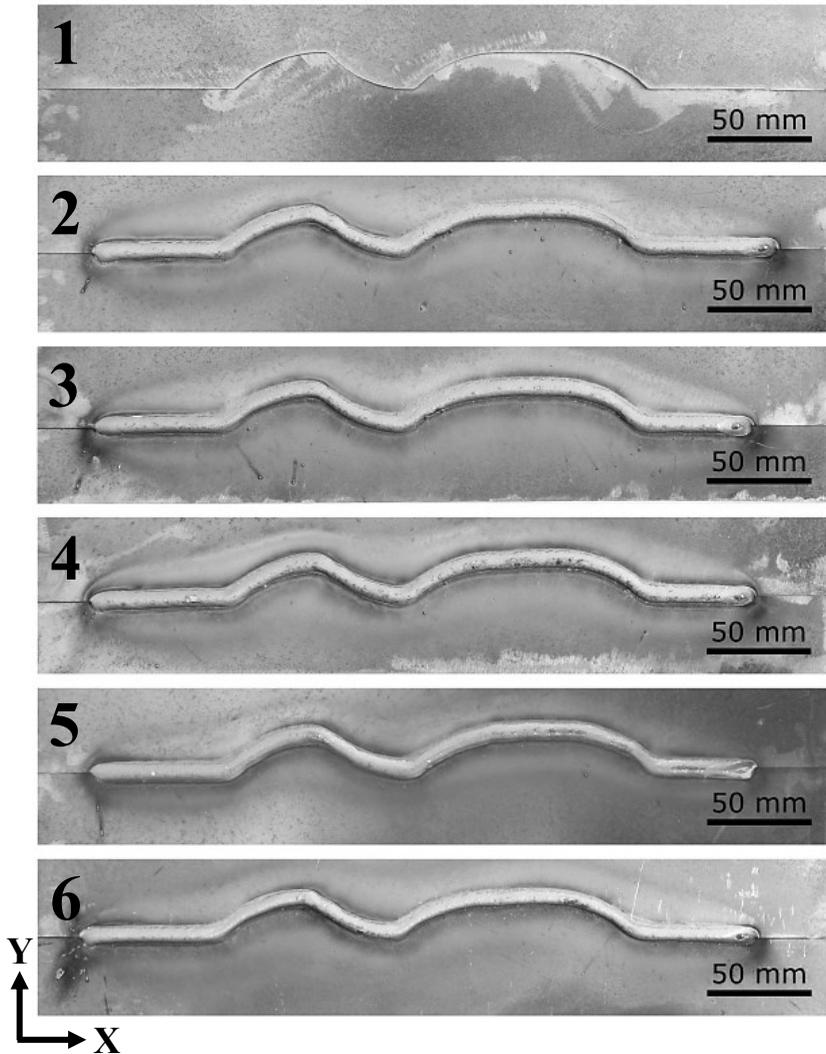


Figura 35 – Peças do tipo B, ensaios de repetibilidade: (1) Junta, CP-B1; (2) CP-B1; (3) CP-B2; (4) CP-B3; (5) CP-B4 e (6) CP-B5.

O resultado do ensaio visual dos cordões representados na Figura 35 é satisfatório. A repetibilidade do sistema de seguimento de junta fica evidente nesse ensaio. Todas as peças foram soldadas sem dificuldade, sendo que o acabamento final das peças foi muito próximo entre os passes depositados.

Uma variação importante, que houve de um ensaio para outro, foi devida ao posicionamento inicial da tocha ser executado pelo usuário. Essa variação fica evidente nos pontos onde a geometria da junta tem variações bruscas na linha central. A realização de posicionamento manual implica na possibilidade de deslocamento na linha central da soldagem, que pode diferir entre os ensaios.

O funcionamento do *software* respeita esse posicionamento inicial da tocha para realizar o seguimento de junta. Caso o usuário desloque a tocha 10 mm à esquerda da junta, por exemplo, todo o cordão será mantido à esta distância da junta.

O *software* foi concebido desta maneira por facilitar o posicionamento dos cordões em situação de soldagem de múltiplos passes por camada. Caso o alinhamento da tocha coincidissem sempre com um mesmo ponto programado no sensor, para realizar a soldagem com mais de um passe por camada seria necessário o deslocamento do ponto de referência, por *software*, para cada cordão de solda.

A solução adotada isenta o usuário da necessidade de reposicionamento virtual do ponto de referência para cada cordão, operação esta que requer tempo e conhecimento específico por parte do usuário. O posicionamento inicial da tocha sendo a referência para execução da solda, além de representar ganho de tempo, possibilita visualização direta e clara da disposição do conjunto em relação à junta.

Essa peculiaridade do *software* desenvolvido pode impor diferenças entre os cordões executados. Assim, além do resultado visual dos cordões depositados, é interessante a análise dos gráficos gerados no relatório de soldagem.

Nestes gráficos, é possível observar a linha seguida pelo sistema para cada soldagem, independentemente da posição inicial da tocha adotada. Os gráficos contemplando os relatórios das cinco soldagens realizadas nesta etapa estão representados na Figura 36. Além destes, na Figura 36 também está ilustrado o gráfico do desvio padrão das linhas centrais dos cinco corpos de prova calculado para cada ponto mensurado no comprimento da junta (eixo X).

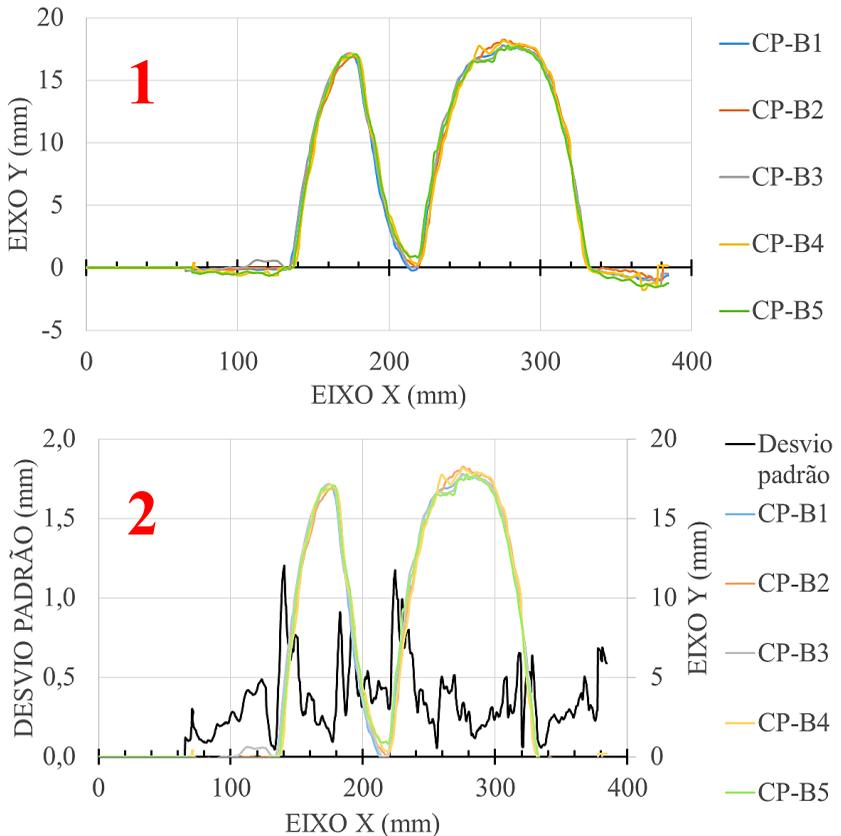


Figura 36 – Ensaio *on-line* de repetibilidade, gráficos: (1) Linhas centrais e (2) Desvio padrão no eixo Y entre as linhas centrais medidas.

Os resultados mostrados na Figura 36-2 indicam boa repetibilidade por parte do sistema. O desvio padrão máximo obtido foi de 1,29 mm. Apesar do valor elevado, esta variação significativa entre as linhas centrais foi observada em apenas duas regiões dos corpos de prova e pontualmente. A média dos valores de desvio padrão representados no gráfico Figura 36-2 foi de 0,31 mm. Este valor é adequado para a maioria das possíveis aplicações do sistema desenvolvido.

Apesar de não ser alarmante o valor do desvio padrão, é necessário conhecer a origem deste número, uma vez que este é utilizado como uma ferramenta para avaliação da capacidade do sistema em realizar o seguimento de junta.

A fabricação das peças por corte plasma automático e posterior preparação superficial por esmerilhamento e escovação por máquina são fontes de incerteza na geometria final da peça. O fato da peça não corresponder às tolerâncias de projeto, porém ter geometria aproximada à esperada, não impede o seguimento de junta.

A fonte de incerteza nesse caso, que compõe os valores obtidos para o desvio padrão, é a diferenciação entre as peças produzidas. A variação geométrica na preparação é relatada como trajetória de soldagem no seguimento de junta. As trajetórias diferindo entre os corpos de prova provoca o aumento no valor do desvio padrão.

Além dos ensaios com deposição de cordões filetados, também foram soldadas peças utilizando movimento oscilatório.

#### 4.3 ENSAIOS COM MOVIMENTO OSCILATÓRIO

As peças do tipo C foram projetadas para execução dos ensaios com movimento oscilatório da tocha. Estas pelas contemplam grandes seções sem desvio da linha central da junta, se comparadas às outras peças soldadas neste trabalho.

A presença de poucos desvios na linha central da junta é ideal para teste do algoritmo de seguimento de junta em movimento oscilatório. Peças com muitos desvios na linha central da junta poderiam influenciar no resultado visual do cordão depositado, uma vez que é utilizada grande amplitude no movimento oscilatório (15 mm). Essa influência poderia mascarar a correção de trajetória executada pelo sistema, não atendendo à proposta destes ensaios. O seguimento de junta de tais peças, no entanto, é possível da mesma forma que na movimentação linear, desde que seja utilizada uma configuração de área de interesse pequena na calibração do *software* (5 mm, por exemplo).

A realização dos ensaios com movimento oscilatório nas peças do tipo C foi precedida pela soldagem do lado inverso destas por movimentação linear. Essa medida foi adotada para evitar o distanciamento das chapas sobrepostas durante a aplicação do cordão com oscilação.

O segundo cordão, depositado com oscilação da tocha, utiliza uma velocidade no eixo X relativamente baixa, de 2,5 mm/s (15 cm/min). Essa baixa velocidade impõe à junta alta energia térmica, favorecendo a dilatação da peça e, consequentemente, empenamento e deformação da mesma. Como as chapas foram ponteadas apenas nos dois extremos, esta deformação implicaria na separação entre as chapas sobrepostas, podendo comprometer a realização dos ensaios.

A aplicação do primeiro passe, então, seguiu a mesma metodologia aplicada à soldagem dos corpos de prova do tipo B. Os resultados das soldagens de união estão representados na Figura 37. A realização de soldagens com movimentação linear sobre peças com poucos desvios da linha central da junta também serve ao propósito de avaliar a capacidade do sistema desenvolvido.

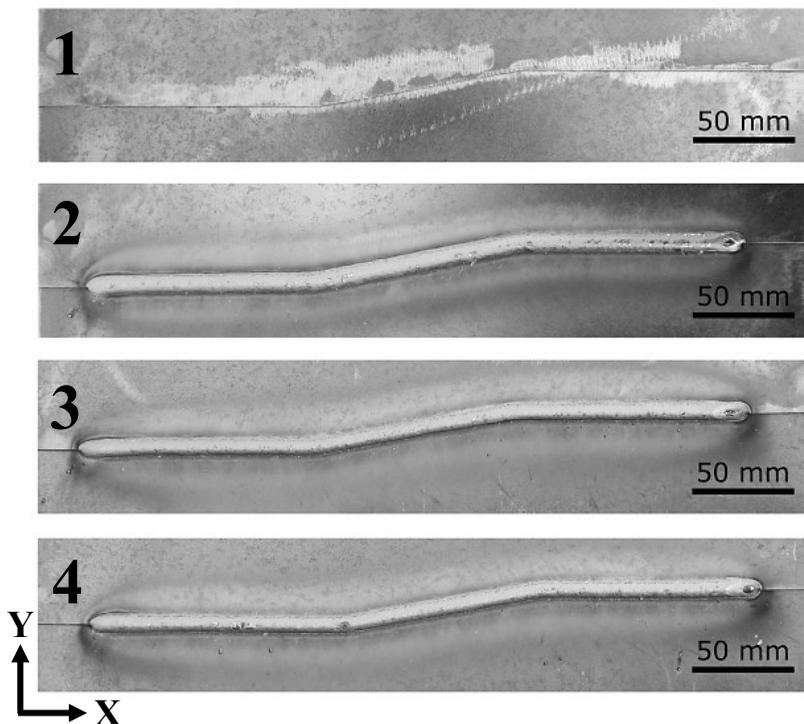


Figura 37 – Peças do tipo C, resultado do passe de união: (1) Junta, CP-C1; (2) CP-C1; (3) CP-C2 e (4) CP-C3.

Pela análise das soldas representadas na Figura 37, é perceptível a eficácia do seguimento de junta aplicado também a trechos com poucas variações na linha central da junta. A qualidade da união obtida nos três corpos de prova soldados foi excelente, sem indicação visual de qualquer falha do sistema em seguir a junta.

A realização do passe com oscilação da tocha simulou uma possível aplicação do sistema desenvolvido: aplicação de revestimentos metálicos. Outras situações muito comuns que utilizam oscilação da tocha

são as soldagens de preenchimento e acabamento das juntas. Uma vez que o sensor a laser possui uma largura significativa de medição, é possível realizar com este o seguimento de junta paralelo à esta, situação impossível à alguns tipos de sensores. O sensor a arco, por exemplo, necessita estar sobre a junta para executar sua função, impossibilitando seu emprego em situação análoga à ensaiada.

A aplicação do revestimento metálico demandou alteração dos consumíveis utilizados. Conforme descrito na seção 3.5.5, foram utilizados o arame-eletrodo 309LSi de 1,0 mm de diâmetro e a mistura gasosa denominada SS. O ajuste da fonte de soldagem também necessitou de alteração, sendo utilizado o processo MIG/MAG Convencional. O LABSOLDA possui linha de pesquisa com utilização da variação Pulsada do processo MIG/MAG para aplicação de revestimento metálico com este tipo de arame-eletrodo. Esta variação resultou em perfuração das chapas de 3,0 mm de espessura, mesmo em situação de corrente média baixa (80 A); por isso a opção pela transferência em curto circuito.

Os posicionamentos iniciais dos cordões, à exemplo dos demais ensaios deste trabalho, foram executados pelo usuário do *software*. O afastamento no eixo Y em relação à junta, no entanto, utilizou a informação de posicionamento fornecida pelo *software* neste eixo para distanciar a linha central do movimento oscilatório em 11,5 mm da junta sobreposta. Essa medida foi adotada para evitar que o cordão tocasse a junta durante a oscilação e, ao mesmo tempo, não se distanciasse muito desta, facilitando a visualização do trabalho executado pelo sistema de seguimento de junta.

A Figura 38 apresenta os resultados obtidos na aplicação do revestimento metálico sobre as peças do tipo C. A frequência de oscilação da tocha foi modificada entre os corpos de prova, sendo utilizadas 0,5, 1,0 e 2,0 Hz para os CPs 1, 2 e 3 respectivamente. O acabamento dos cordões foi diretamente influenciado por estas mudanças, situação visível na Figura 38. Todos os revestimentos utilizaram amplitude de oscilação de 15,0 mm e velocidade de soldagem de 2,5 mm/s (15 cm/min), conforme a metodologia adotada para estes ensaios.

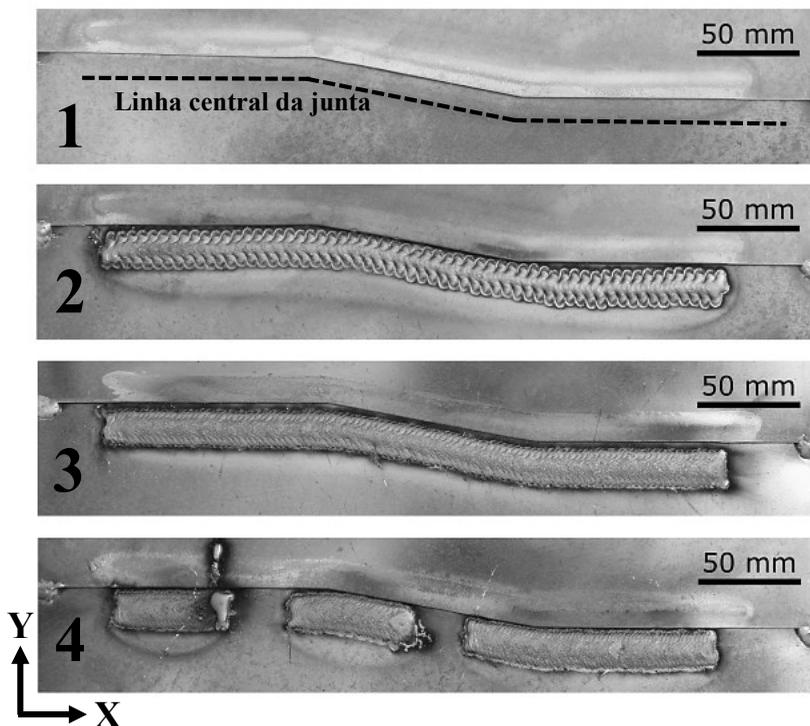


Figura 38 – Peças do tipo C, ensaios com movimento oscilatório da tocha:  
(1) Junta, CP-C1; (2) CP-C1; (3) CP-C2 e (4) CP-C3.

Na Figura 38-2 é possível perceber uma leve mudança na linha central da junta logo após a soldagem completar o comprimento do *offset* (50,6 mm). A mudança, pela sutileza, foi interpretada a primórdio como uma falha inerente à leitura da junta, algo aleatório dependente da capacidade do sensor.

A realização do revestimento do CP-C2 (Figura 38-C) não indicou desvio no seguimento de junta, colaborando para a conclusão obtida após a aplicação do revestimento sobre o CP-C1. Somente na execução do passe sobre o CP-C3 ficou evidente que havia uma falha no *software* de seguimento de junta. Essa falha foi a verdadeira responsável pelos desvios obtidos nos CPs C1 e C3. No CP-C3 o desvio foi tão significativo que o manipulador atingiu o fim de curso do eixo Y, paralisando a operação de soldagem.

A solda no CP-C3 apresentou a primeira intermitência decorrente desta falha. A detecção da mesma foi possível através do estudo do

relatório da soldagem. Neste, ficou evidente que, ao vencer a distância do *offset*, o perfil virtual da junta era referenciado inicialmente de forma aleatória. O problema era fruto do método utilizado para a referência do mesmo.

As Figuras 39, 40 e 41 contêm os gráficos dos relatórios de soldagem de cada corpo de prova do tipo C. No caso do CP-C3, apenas os gráficos do primeiro trecho estão representados (Figura 41).

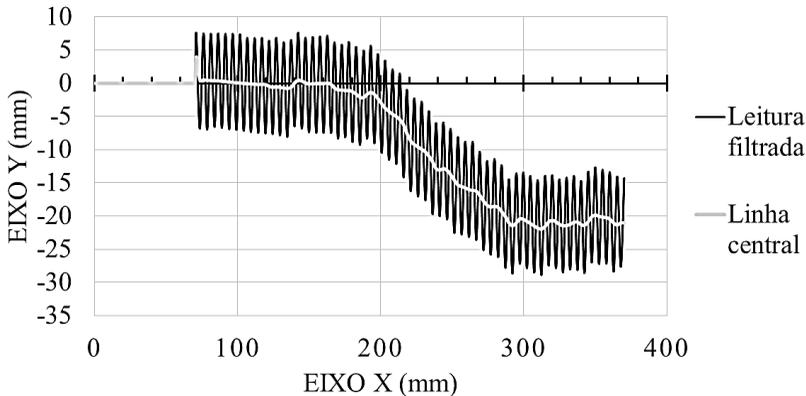


Figura 39 – Gráficos das leituras e linha central do CP-C1, ensaio *on-line*.

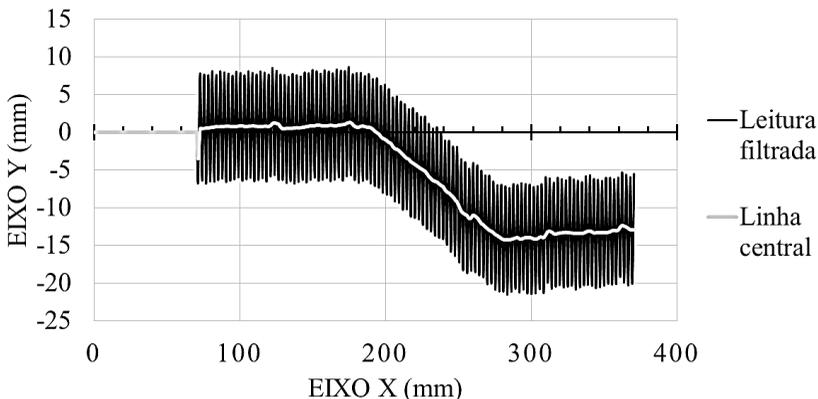


Figura 40 – Gráficos das leituras e linha central do CP-C2, ensaio *on-line*.

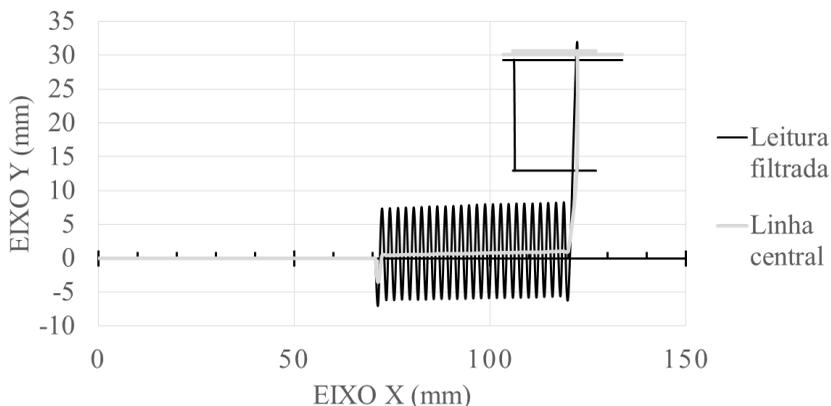


Figura 41 – Gráficos das leituras e linha central do CP-C2, ensaio *on-line*.

A leitura do trecho inicial, que não contempla a oscilação da tocha, mas sim o recuo e avanço do manipulador no eixo X, é a mesma rotina para qualquer tipo de movimentação da tocha. Ao iniciar a soldagem, o sensor a laser já está sobre a região da junta que posteriormente apresentaria o defeito de posicionamento, na utilização do movimento com oscilação.

No início da soldagem, nesta situação, os pontos de máximo e mínimo recebiam valores fora dos limites do eixo Y, que seriam comparados e logo substituídos pelos valores de máximo e mínimo do desalinhamento. A média desses dois valores representa o ponto médio do movimento oscilatório, que é calculado toda vez que um dos extremos do movimento é encontrado pelo *software*.

O problema vinha da atualização de apenas um dos extremos de cada vez, sendo o outro atualizado somente no próximo extremo, já que o movimento oscilatório atinge um extremo de cada vez. Na primeira iteração dessa rotina, porém, apenas um extremo tinha seu valor atualizado antes do cálculo do ponto médio, enquanto o valor do outro permanecia o ajustado pelo *software*. Como a distância do *offset* se manteve a mesma entre os ensaios realizados, o primeiro extremo atualizado era quase sempre o valor de mínimo, denominado assim por convenção de sinais.

Assim, se o valor de mínimo medido era, por exemplo, -10,0 mm, a média seria entre este valor e o do ponto de máximo, igual à -10000 mm conforme a configuração inicial deste. Esse evento resultaria em uma

leitura do desvio da linha central, desconsiderando a transferência para o TCP, de -5005,0 mm, similar ao ocorrido na falha tão evidente no CP-C3.

Uma das possíveis explicações para a não manifestação dessa falha nos corpos de prova anteriores pode estar na variação de luminosidade. O evento de abertura do arco caracteriza uma mudança expressiva na luminosidade sobre o sensor. Esse efeito pode ter encoberto ocasionalmente a falha em questão.

Nesse momento de abertura do arco, há necessidade de o sensor reajustar a potência luminosa do laser e o tempo de exposição do sensor de imagem. Esse reajuste demanda uma fração mínima de tempo, que não é desprezível uma vez que o sensor continua produzindo medições durante este intervalo.

Como as condições de iluminação e observação da linha laser não são ideais nesse intervalo, a medição do sensor fica expressivamente ruidosa. Esses ruídos podem, mesmo depois da filtragem da leitura do sensor, representar ao *software* mudanças sequenciais no sentido do movimento oscilatório. Essas mudanças, por serem muito próximas, atualizam os valores de posições mínima e máxima logo no início da soldagem, impedindo ou amortecendo o efeito da falha analisada sobre o cordão depositado. Por esse motivo, só após a execução da solda e posterior análise do relatório desta para o CP-C3 que foi possível detectar essa falha no algoritmo.

Outra explicação possível seria o manipulador passar sobre o próximo ponto de correção do perfil virtual da junta antes de desviar muito a trajetória. A chegada do manipulador sobre um novo ponto de correção implica no envio de novo comando de correção para o robô. Este novo ponto já seria calculado com os valores medidos de máximo e mínimo, retornando a tocha à posição correta de soldagem.

A falha, uma vez detectada, foi solucionada de maneira muito simples. O algoritmo ainda adota os valores iniciais para os pontos de mínimo e máximo, valores estes necessários para a comparação com a leitura do sensor. Para eliminar a falha, a mudança foi de implementar uma condição ao algoritmo de só calcular o ponto médio da oscilação, no início da soldagem, após a tocha completar um período de oscilação. Dessa forma, os valores de mínimo e máximo são atualizados para a situação real de posicionamento relativo entre tocha e junta, eliminando a tal falha do algoritmo.

Uma vez corrigido, foi repetida a soldagem nos parâmetros utilizados para o CP-C3, sobre uma junta nova. Seguindo a mesma metodologia, para o então CP-C4 foi também realizado o passe de união

seguido pelo passe de revestimento, em lados opostos do corpo de prova. O resultado dessa soldagem está retratado na Figura 42.

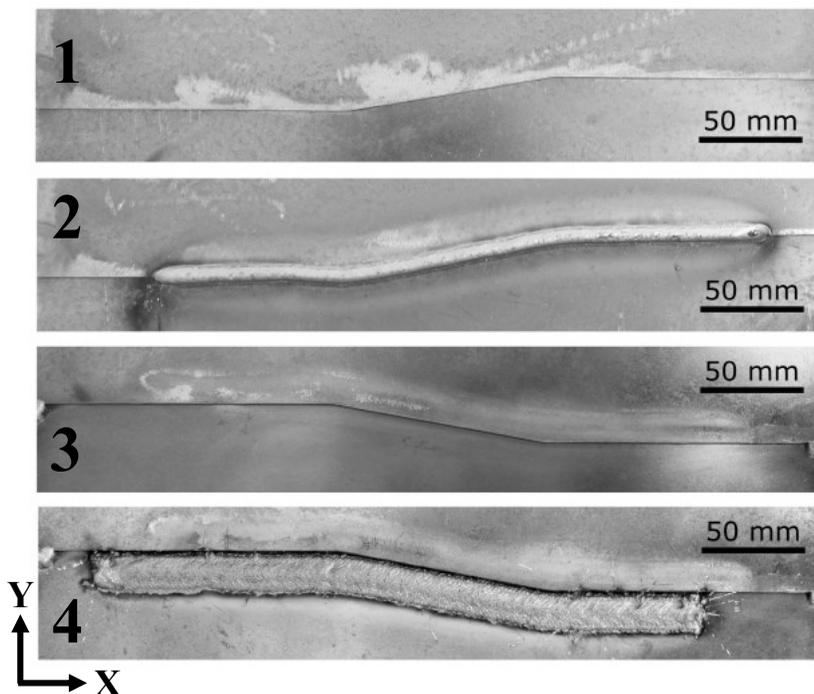


Figura 42 – CP-C4, ensaios com o algoritmo corrigido: (1) Junta; (2) Passe de união; (3) Junta oposta e (4) Passe de revestimento.

A realização deste ensaio confirmou a efetividade da alteração realizada à rotina do algoritmo para medição da junta no início da soldagem. O acabamento do cordão de revestimento, representado na Figura 42-4, deixa evidente a eficácia do sistema na realização do seguimento de junta.

Na Figura 43 estão ilustrados os gráficos do relatório de soldagem do CP-C4. Nestes, é possível observar, na “Linha central”, que esta não sofre mais o desvio inicial, demonstrando que a falha foi realmente eliminada do algoritmo de correção.

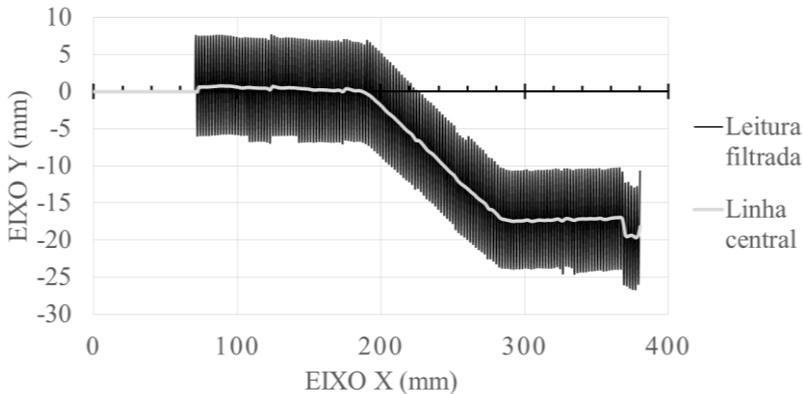


Figura 43 – Gráficos das leituras e linha central do CP-C4, ensaio *on-line*.

A observação da Figura 43 deixa clara a influência que a relação frequência/velocidade de soldagem tem sobre a qualidade do seguimento de junta. A frequência de oscilação mais elevada (2,0 Hz) apresentou uma densidade muito maior de pontos para o cálculo da linha central. Essa maior densidade é refletida na linearidade da linha central. No gráfico da “Linha central” da Figura 39, por exemplo, a densidade de pontos, por conta da baixa frequência (0,5 Hz), é tão baixa que o perfil da linha fica todo irregular. A irregularidade na linha central é passada à peça durante a soldagem, comprometendo o seguimento de junta.

Ainda na Figura 43, ao final da soldagem, próximo ao comprimento de 380 mm no eixo X, os gráficos sofrem um deslocamento no eixo Y de cerca de 3,0 mm. Esse deslocamento na verdade é a leitura do sensor a laser sobre o ponteamto do corpo de prova. Uma vez que a soldagem não avançou até este ponto, esse desvio não influenciou a execução da mesma.

#### 4.4 ENSAIOS DE COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS

Os últimos ensaios realizados para este trabalho envolveram a comparação entre dois sistemas para seguimento de junta. As soldas executadas com auxílio do sistema desenvolvido neste trabalho utilizaram dois parâmetros diferentes para a área de interesse do eixo Y, de 1,0 e 5,0 mm. Esta metodologia foi análoga à utilizada na solda dos corpos de prova do tipo A, sendo que o ajuste da área de interesse com 15,0 mm não foi utilizado por não ser compatível com a peça projetada (desvios muito pronunciados da linha central).

As soldas realizadas com o manipulador antropomórfico *HP-20D* utilizaram todas os mesmos parâmetros. A velocidade de soldagem utilizada no sistema da MOTOMAN foi de 6,66 mm/s (40 cm/min). Este sistema necessita de calibração do conjunto toda vez que o mesmo é modificado. A Figura 44 apresenta o resulta das soldagens realizadas com os dois sistemas.

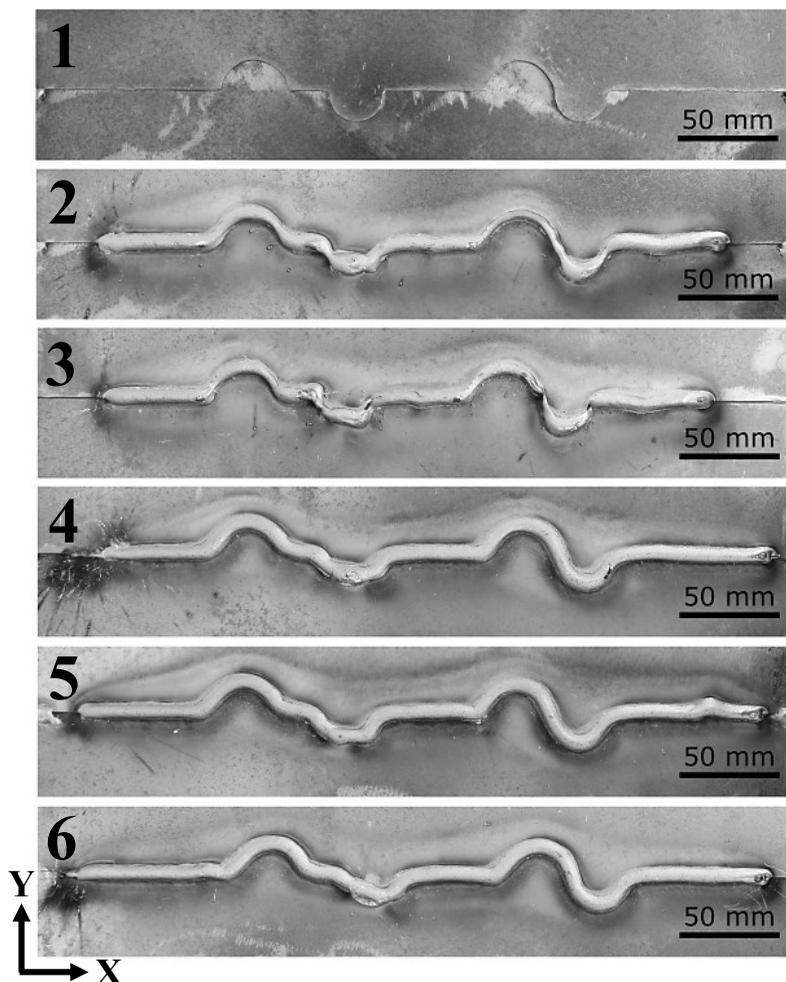


Figura 44 – Ensaio de comparação entre sistemas: (1) Junta CP-D1; (2) CP-D1; (3) CP-D2; (4) CP-D3; (5) CP-D4 e (6) CP-D5.

As Figuras 44-2 e 3, que retratam as peças soldadas com o auxílio do sistema desenvolvido neste trabalho (manipulador *TARTÍLOPE V4*), deixam clara uma limitação do mesmo. Esta é ainda mais evidente quando essas soldas são comparadas às dos CPs D3, D4 e D5, que foram realizadas com auxílio da ferramenta *MotoEye Lt* no robô *HP-20D*. A continuidade dos cordões obtidos pelo manipulador do fabricante MOTOMAN implica em qualidade superior das uniões em relação às executadas pelo sistema desenvolvido.

Essa superioridade é fruto da manutenção da velocidade de soldagem constante durante a progressão da união. O sistema desenvolvido trabalha com uma velocidade fixa no eixo X, aplicando correções na trajetória com velocidades proporcionais nos outros dois eixos. Isso pode ser traduzido em variação da velocidade de soldagem proporcional aos desvios da linha central da junta.

A geometria das peças do tipo D também favorece essa discrepância entre os cordões executados por cada conjunto. Em situação normal de soldagem, onde na maioria das aplicações os desvios da linha central da junta não são incluídos no projeto das peças, essa diferença entre os conjuntos deve ser quase imperceptível. Mesmo que a diferença nessa situação seja muito sutil, ainda assim é interessante que o sistema desenvolvido neste trabalho contemple, em desenvolvimento futuro, a manutenção da velocidade de soldagem.

A manutenção da velocidade de soldagem requer atuação na velocidade no eixo X à medida que os outros eixos são acionados. Essa estratégia não foi adotada no sistema desenvolvido por representar mais volume de dados a serem repassados ao manipulador. Em sua versão atual, o *TARTÍLOPE* já trabalha no limite do seu processador para atender às solicitações do *software* de correção de trajetória. Todavia, a migração do controlador deste sistema para um *hardware* de maior potência já está em desenvolvimento no LABSOLDA. Tão cedo seja feita esta transição, o controlador terá capacidade para atender à esta demanda extra.

Uma diferença clara percebida na realização destes ensaios foi o tempo gasto na preparação de cada sistema. No sistema desenvolvido, há a praticidade do eixo X acompanhar a direção de soldagem. A manutenção do afastamento inicial do TCP em relação à junta implica na necessidade do posicionamento manual da tocha sobre a junta para que o sistema esteja apto a segui-la. No sistema *MotoEye Lt.*, há necessidade da programação da rotina para cada tipo de peça, resultando em um tempo de preparação maior do que o sistema desenvolvido. Além disso, é necessário conhecimento específico de programação do controlador *DX-100* para conseguir realizar a soldagem com seguimento de junta.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao final deste trabalho revelam o sucesso logrado no desenvolvimento do sistema proposto. O desenvolvimento contemplou o estudo do funcionamento e comunicação do sensor a laser *SLS050-VI*. Este estudo marcou o início de uma nova linha de pesquisa do LABSOLDA, que no futuro culminará na construção de um sensor próprio deste tipo.

O protocolo de comunicação implementado entre o *software* desenvolvido e o controlador do robô se mostrou bastante robusto, pois obteve sucesso ao garantir a taxa de comunicação adequada para a realização dos ensaios propostos. A análise dos gráficos dos pontos transmitidos ao manipulador confirmou esse sucesso, uma vez que estes refletem com alta fidelidade o perfil mensurado da junta. Essa representação fiel comunicada ao manipulador garante a qualidade no seguimento de junta. Além disso, a utilização deste protocolo facilita a integração futura do sistema desenvolvido com fontes de soldagem eletrônicas, por ser simples, versátil e eficaz. Alguns padrões de comunicação trabalham com protocolos iguais ou semelhantes ao utilizado neste trabalho.

Os algoritmos de correção de trajetória desenvolvidos provaram sua capacidade nos testes executados, o que reflete o potencial para aplicações usuais em soldagem de união.

O algoritmo para correção de trajetória em movimento linear apresentou bom desempenho em todos os testes, pois foi capaz de realizar o seguimento de junta em situações de extrema solitação.

Durante a soldagem executada pelo equipamento da MOTOMAN, por conta dos expressivos desvios geométricos da junta de teste, foi notável o efeito da manutenção da velocidade de soldagem. Essa característica garante uniformidade no aspecto visual do cordão depositado em juntas com desvios geométricos excessivos. Somente na comparação entre sistemas ficou evidente o benefício desta característica, que não é prevista no algoritmo desenvolvido neste trabalho.

O algoritmo desenvolvido contempla apenas a manutenção da velocidade no eixo X, ou seja, produtividade constante (considerando produtividade como comprimento de junta soldado por hora). Essa característica do algoritmo desenvolvido não deve implicar em descontinuidade dos cordões depositados em situação normal de soldagem, que não prevê desvios bruscos na linha central da junta.

A manutenção da velocidade de soldagem requer a troca de maior quantidade de informações. Esta característica ainda não é contemplada

no algoritmo desenvolvido devido à limitação de *hardware* do controlador do robô utilizado. O *hardware* atual se mostrou sobrecarregado pela rotina de geração de trajetórias, não havendo capacidade para incremento na taxa de comunicação. Esta limitação já está sendo solucionada pelo fabricante do manipulador e, no futuro, possibilitará a implementação de tal função no *software* desenvolvido.

A comparação com o sistema da MOTOMAN possibilitou outra constatação importante acerca do sistema desenvolvido neste trabalho. A praticidade de operação da IHM do *software* para seguimento de junta desenvolvido neste trabalho ficou evidente, principalmente em comparação ao *MotoEye Lt.*. Este último requer muitos ajustes de calibração e conhecimento de programação do controlador *DX-100* por parte do usuário.

A melhor configuração encontrada para a região de interesse dos eixos Y e Z foi com comprimento de 5 mm para ambos. A média das medições que se encontram no comprimento de 5 mm de junta mensurada em torno do TCP mostrou ter o melhor balanço entre eliminação de ruídos e atenuação de mudanças bruscas de geometria. Na soldagem de peças como as utilizadas neste trabalho, é interessante manter a atenuação mínima, para que o perfil da junta seja seguido com fidelidade. Esta ação pode resultar em falhas no seguimento, caso haja ruídos em excesso nas medições fornecidas pelo sensor a laser. Em situação normal de utilização, a configuração encontrada é adequada para a realização do seguimento de junta.

O algoritmo para seguimento de junta em movimentação com oscilação da tocha apresentou uma falha logo nos primeiros testes. A identificação da falha no algoritmo demonstra a pertinência na utilização de peças de teste com desvios geométricos expressivos. Essa falha era manifestada logo no início da soldagem e era fruto de um erro no método de verificação dos pontos de máximo e mínimo da trajetória, quando no início do processo. Portanto, se conclui que o algoritmo não era adequado, o que demandou retrabalho e reensaio do mesmo. O algoritmo foi modificado, recebendo adição de uma função específica para sanar este problema. O algoritmo modificado foi testado no CP-C4 e apresentou bom desempenho, não manifestando mais a falha em questão.

A realização da soldagem com oscilação da tocha seguindo trajetória paralela, mas não sobre, a linha central da junta, demonstrou umas das principais características do sistema. Apesar de propiciar liberdade de posicionamento, o resultado da soldagem é totalmente dependente do posicionamento inicial da junta.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A integração dos componentes em um sistema para seguimento de junta, como início de uma nova linha de pesquisa no LABSOLDA, se mostrou o passo inicial rumo a uma solução estado da arte de soldagem automática. As possibilidades para trabalhos futuros sobre o sistema desenvolvido são muitas. Além das melhorias, há todos os trabalhos que podem ser realizados com auxílio desta ferramenta:

- Criação dos algoritmos para soldagem adaptativa, que por si só já caracteriza um grande desafio;
- A comunicação com fontes eletrônicas e a manutenção da velocidade de soldagem também são possíveis melhorias a serem feitas no *software*;
- A realização de soldagens orbitais, que atualmente representam um grande desafio ao operador de soldagem no quesito repetibilidade e podem se beneficiar muito com o seguimento de junta, por exemplo;
- Integração do *software* desenvolvido com manipulador antropomórfico, possibilitando maior grau de liberdade no posicionamento do conjunto;
- Desenvolvimento de um sensor óptico a laser próprio e todo o aprendizado absorvido neste processo.



## 7 REFERÊNCIAS

BONACORSO, Nelso Gauze. **Automatização dos processos de medição de superfícies e de deposição por soldagem visando a recuperação de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 114 f. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia). Disponível em:

<[http://www.labsolda.ufsc.br/site/publicacoes/teses\\_dissertacoes/tese\\_2004\\_nelso.pdf](http://www.labsolda.ufsc.br/site/publicacoes/teses_dissertacoes/tese_2004_nelso.pdf)> Acesso em: 5 out. 2013.

CHONGJIAN, Fan; FENGLING, Lv; SHANBEN, Chen. **A visual sensing system for welding control and seam tracking in aluminum alloy gas tungsten arc welding.** IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), p. 2700–2705, 2007. Disponível em:

<[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4460073](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4460073)>. Acesso em: 5 out. 2013.

COSTA, Afrânio Rebouças Filho. **Desenvolvimento de um sistema de seguimento de junta que utiliza o próprio arco como sensor.**

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 120 f. 2003.

Dissertação (Mestrado em Engenharia). Disponível em:

<[http://www.labsolda.ufsc.br/site/publicacoes/teses\\_dissertacoes/disse\\_2003\\_afranio.pdf](http://www.labsolda.ufsc.br/site/publicacoes/teses_dissertacoes/disse_2003_afranio.pdf)>. Acesso em: 8 out. 2013.

HAUG, Karsten; PRITSCHOW, Günter. **Robust laser-stripe sensor for automated weld-seam-tracking in the shipbuilding industry.** IECON

'98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.98CH36200), v. 2, p. 1236–1241, 1998.

Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=724281>>.

KIM, Jae Seon; SON, Young Tak; CHO, Hyung Suck; *et al.* **A robust method for vision-based seam tracking in robotic arc welding.**

Intelligent Control, 1995, p. 363–368, 1995. Disponível em:

<[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=525084](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=525084)>. Acesso em: 5 out. 2013.

KINDERMANN, Renan. **Entwicklung und Erprobung von Algorithmen zum adaptiven lasersensorgestützten Mehrlagenschweißen von V- und Kehlnähte mit MSG-Prozess.** GSI SLV München, Alemanha, p. 56 f. 2013. Diplomarbeit (Graduação em Engenharia).

MA, Hongbo; WEI, Shanchun; SHENG, Zhongxi; *et al.* **Robot welding seam tracking method based on passive vision for thin plate closed-gap butt welding.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 48, n. 9-12, p. 945–953, 2009. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-009-2349-4>>. Acesso em: 4 fev. 2014.

MATSUI, Shigetomo; GOKTUG, Gokhan. **Slit laser sensor guided real-time seam tracking arc welding robot system for non-uniform joint gaps.** Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT'02. p. 159–162, 2002. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1189882](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1189882)>. Acesso em: 6 fev. 2014.

MENDONÇA, Felipe Kalil. **Evolução da Técnica de Seguimento de Junta via Sensoriamento do Arco para Operações de Soldagem em Posições Forçadas.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 125 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Disponível em: <[http://www.labsolda.ufsc.br/site/publicacoes/teses\\_dissertacoes/disse\\_2013\\_kalil.pdf](http://www.labsolda.ufsc.br/site/publicacoes/teses_dissertacoes/disse_2013_kalil.pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2014

META VISION SYSTEMS. **SLS-050 Preliminary Data Sheet.** Oxfordshire, Reino Unido, p. 2 f. 2009. Disponível em: <<http://www.metamak.com.tr/wp-content/uploads/2012/04/MetaVision-SLS-Sensor-Datasheet.pdf>>. Acesso em: 3 out. 2013

SHEN, H.Y.; LIN, T.; CHEN, S.B.. **A study on vision-based real-time seam tracking in robotic arc welding.** Robotic Welding, Intelligence and Automation, p. 311–318, 2007. Disponível em: <[http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-73374-4\\_37](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-73374-4_37)>. Acesso em: 5 out. 2013.

SPS, Sistemas e Processos de Soldagem. **Catálogo de Equipamentos.** p. 17, 2013. Disponível em: <[http://www.sps-soldagem.com.br/catalogo/Catalogo\\_de Equipamentos\\_SPS-Soldagem.pdf](http://www.sps-soldagem.com.br/catalogo/Catalogo_de Equipamentos_SPS-Soldagem.pdf)>. Acesso em 14 fev. 2014.

VIVIANI, Alberto Bonamigo. **Desenvolvimento de Sistema para Medição do Volume de Chanfros para Soldagem utilizando Tecnologia de Medição a Laser**. VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014, p. 10. Disponível em: <<http://www.conem2014.com.br/ANAIS/PDFS/CONEM2014-1130.PDF>>. Acesso em 12 fev. 2015.

XIAOQI, Chen; RAJAGOPALAN, Devanathan; AIK, Meng Fong. **Advanced Automation Techniques in Adaptive Material Processing**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2002.

YAMANE, S.; YAMAMOTO, H.; ISHIHARA, T.; *et al.* **Adaptive control of back bead in V groove welding without backing plate**. Science and Technology of Welding and Joining, v. 9, n. 2, p. 138–148, 2004. Disponível em: <<http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=1362-1718&volume=9&issue=2&spage=138>>. Acesso em: 7 out. 2013.

YOSHIZAWA, Toru. **Handbook of Optical Metrology**. CRC Press, p. 919 f. 2009, ISBN 9781466573598.