

Eduardo Bidese Puhl

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO PARA
SENSORIAMENTO POR TRIANGULAÇÃO LASER APLICADO
À SOLDAGEM A ARCO**

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

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra.

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Loureiro Fígaro da Costa Pinto.

Coorientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Florianópolis
2017

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

Puhl, Eduardo Bidese

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO PARA
SENSORIAMENTO POR TRIANGULAÇÃO LASER APLICADO À
SOLDAGEM A ARCO / Eduardo Bidese Puhl ; orientador,
Jair Carlos Dutra, coorientador, Tiago Loureiro
Fígaro da Costa Pinto, coorientador, Régis Henrique
Gonçalves e Silva, 2017.
150 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Sensoriamento . 3.
Soldagem. 4. Automação. 5. Robótica. I. Dutra, Jair
Carlos. II. Pinto, Tiago Loureiro Fígaro da Costa .
III. Silva, Régis Henrique Gonçalves e IV.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. V. Título.

Eduardo Bidese Puhl

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO PARA
SENSORIAMENTO POR TRIANGULAÇÃO LASER APLICADO
À SOLDAGEM A ARCO**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Local, 11 de julho de 2017.

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

Prof. Tiago Loureiro Fígaro da Costa Pinto, Dr. – Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. – Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

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

Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, Prof. Dr.
Universidade Federal de Uberlândia

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

Prof. Walter Antônio Kapp, Prof. Dr.
Universidade Federal do Paraná

Eng. Raul Gohr Jr, Dr.
IMC-Soldagem

Eng. Giovanni Dalpiaz, Dr.
PETROBRAS

Este trabalho é dedicado aos meus pais
João e Cristina e aos meus sobrinhos
Felipe e Marcelo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação e oportunidade de fazer parte da equipe do LABSOLDA.

Ao Prof. Tiago Loureiro Fígaro da Costa Pinto, pela coorientação e conhecimentos transmitidos.

À toda equipe do LABSOLDA que colaborou com o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu amigo Jônathas Alexandre Alves pela parceria e apoio no desenvolvimento do trabalho.

Ao Instituto Federal Catarinense e à PROPI (Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação) pelos incentivos que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

À Petrobras pelos incentivos concedidos por meio do projeto no qual este doutoramento foi inserido.

Aos meus pais João Henrique Puhl e Cristina Fortes Bidese, e ao meu irmão Rafael Bidese Puhl, pela parceria, apoio e compreensão.

À minha companheira Vanessa Bianchi pelo apoio e compreensão

A força de vontade deve ser mais forte do que a
habilidade.
(Muhammad Ali)

RESUMO

A automação da soldagem consiste na difícil tarefa de diminuir a intervenção humana em procedimentos de soldagem. Especialmente na execução do passe de raiz da união de tubos, o papel do soldador é essencial na observação da junta, ajuste dos parâmetros de soldagem e movimentação adequada da tocha. Em procedimentos automatizados, esses ajustes são realizados a partir de medições da geometria da junta e a tocha é movimentada por robô dedicado à aplicação da soldagem. A correta movimentação e o ajuste dos parâmetros de soldagem em função das medições são realizados pelo controle adaptativo do processo. O sucesso deste controle é dependente da qualidade das medições da junta. Essas medições, realizadas durante a soldagem, são dificultadas pelos ruídos impostos pelo ambiente de soldagem, tais como: altas temperaturas, luminosidade do arco, respingos, vibrações, histerese, entre outros. A tecnologia mais aplicada na medição da geometria da junta de soldagem em sistemas automatizados com controle adaptativo é a triangulação laser, devido as suas características metroológicas e de robustez necessárias para a aplicação. Os sensores de triangulação laser para soldagem disponíveis no mercado não permitem muitos ajustes na medição, pois estas são restritas às funcionalidades realizadas pelos fabricantes. Estas características limitam o desenvolvimento de novos sistemas e estratégias de controle. Dentro deste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sensor de triangulação laser e das técnicas adequadas de processamento de imagem e sinais, com as características necessárias para aplicação no controle adaptativo da soldagem do passe de raiz da união de tubos. O *software* do sensor foi desenvolvido com flexibilidade para utilização de diferentes filtros e algoritmos de medição. Foram desenvolvidos os algoritmos da Segunda Derivada, Correlação de Padrões e Ajuste Linear. Os dois primeiros foram inspirados em trabalhos acadêmicos e o último é uma proposta deste trabalho. Para avaliar o sensor e os algoritmos desenvolvidos, o equipamento foi integrado a um sistema de soldagem e aplicado na soldagem do passe de raiz de juntas do tipo “V”, compostas por chapas soldadas na posição plana. Os algoritmos de medição foram avaliados quanto a incerteza de medição apresentada. O algoritmo de Ajuste Linear apresentou os melhores resultados de medição da junta e foi aplicado no controle da soldagem. O controle foi realizado com as técnicas de escaneamento prévio da junta (*off-line*) e correção durante a soldagem (*online*). O controle *off-line* utiliza medições realizadas antes da soldagem para definir os parâmetros do processo e trajetória de movimentação do

robô. Esta técnica se beneficia de realizar medições sem a interferência do processo de soldagem. Entretanto, as variações da junta, ocorridas durante a soldagem não são percebidas. Para que estas variações sejam percebidas, o sensor deve ser utilizado no controle *online* da soldagem. Nesta técnica, as medições são realizadas durante o processo, o que implica na necessidade de maior robustez do sensor e imunidade a ruídos provenientes do processo de soldagem. Neste sentido, ao protótipo desenvolvido, foram incorporados mecanismos de resistência ao ambiente de soldagem, os quais produziram efeito eficaz ao funcionamento do sensor. Nas condições em que os ensaios foram realizados, as soldagens com as duas técnicas de controle propostas resultaram em soldas aprovadas. Estes resultados comprovam o funcionamento do sensor e dos algoritmos desenvolvidos.

Palavras-chave: Automação da soldagem, instrumentação para soldagem, controle adaptativo da soldagem.

ABSTRACT

The welding automation consists on the difficult task of reducing the human intervention on the welding procedures. Especially in the execution of the root pass in pipe welds, the role of the welder is essential in the observation of the joint, welding parameter adjustment and suitable torch movement. In automated procedures, these adjustments are realized based on the measurements of the joint geometry and the torch is moved by a robot dedicated to the welding employment. The correct movement and the adjust of the welding parameters using the measurements are realized by the adaptive control of the process. The success of such control is dependent on the quality of the joint measurements. These measurements, made along the welding process, are problematic because of the ambient noises added by the welding environment such as: high temperatures, arc luminosity, welding spatter, mechanical vibrations, hysteresis, and others. The most applied technology on the measurement of the joint geometry in automated welding systems with adaptive control is the laser triangulation, due its metrological characteristics and robustness necessary in this application. The available sensors for laser triangulation in welding in the market do not provide many options on the adjustment of the measurement, because they are restricted by the functionalities built by the manufacturer. These characteristics narrow the development of new systems and control strategies. Within this context, this work proposes the development of a laser triangulation sensor and the adequate signal and image processing techniques, with characteristics necessary by its application in the adaptive control of welding root pass for tube joints. The sensor's software was developed with the flexibility for the utilization of different filters and measurement algorithms. It was developed algorithms of the Second Derivative, Pattern Correlation and Linear Adjustment. The first two were inspired by previous academic works and the latest is a proposal of this work. To evaluate the sensor and the developed algorithms, the equipment were integrated in a welding system and applied to root pass welding of type "V" joints, composed by metal sheets welded in the plane position. The measurement algorithms have been evaluated with respect to their measurement error. The Linear Adjustment algorithms presented the best joint measurement results and, thus, was applied in the welding control. The control was realized using the techniques of the previous joint scanning (off-line) and correction during the welding (on-line). The off-line control uses measurements previous to the welding to define the process parameters and the robot

movement trajectory. This technique benefits of taking the previous measurements without the interference of the welding process. On the other hand, the joint variations that occurred during the welding process are not noticed. To account for those variations, the sensor must be used in the online control of the welding. In this technique, the measurements are realized during the welding process, which implies in the need of robustness of the sensor and immunity with respect to the noises generated by the welding process. Therefore, it was added to the developed prototype mechanisms of enduring the welding environment, which allowed the effective operation of the sensor. In the conditions that the tests were realized, both welding control techniques resulted in approved welds. These results prove the correct operation of the sensor and developed algorithms.

Keywords: Welding automation, instrumentation for welding, adaptive control of welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Deslocadores de tocha para soldagem de união de dutos. (a) DYNATORQUE (b) POLYSOUDE (c) MAGNATECH (d) TARTILOPE V4 [4].	31
Figura 2 - Graus de liberdade para soldagem orbital de duto [5].	32
Figura 3 - Posições de soldagem em um procedimento orbital de união de dutos [6].	33
Figura 4 - Erros de preparação e montagem de uma junta em "V".	34
Figura 5 - Diagrama esquemático de um sistema de soldagem adaptativa.	35
Figura 6 - Desenho do corpo de prova para soldagem adaptativa.	36
Figura 7 - Bancada soldagem com controle adaptativo com o robô antropomórfico [12].	37
Figura 8 - Parâmetros de deslocamento e oscilação da tocha em torno da linha central da junta, adaptado de [12].	38
Figura 9 - Representação de parâmetros do sensor de triangulação laser.	43
Figura 10 - Diferentes configurações de junta que dos STL comerciais [22]. ..	45
Figura 11- Princípio de funcionamento do sensor de triangulação laser.	48
Figura 12 – Etapas de processamentos de um Sensor de Triangulação Laser. .	49
Figura 13 - Transformação do ponto medido para o sistema de coordenadas do robô.	50
Figura 14 - Modelo de câmera pinhole, [32, 33].	51
Figura 15 - Modelo de câmera pinhole e folha de luz aplicada em sensor de triangulação laser. Adaptado de [33].	52
Figura 16 - Espectro de luz emitida por um arco GMAW, adaptado de [35].	54
Figura 17 - Exemplo de cabeçote de medição por triangulação laser aplicado em soldagem [24]	55
Figura 18 - Imagens capturadas por sensores de triangulação laser com ruídos gerados por respingos (A), reflexividade da junta (B) e Luminosidade do arco (C).	57
Figura 19 - Etapas do processamento de imagem de um STL para soldagem. .	58
Figura 20 - Técnica de máximos e mínimos para definição da ROI.	59
Figura 21 – Técnica de acúmulo de intensidade para definição da ROI.	60
Figura 22 - Resultado do filtro <i>Wavelet</i> [45].	62
Figura 23 - Técnica de subtração da diferença de duas imagens consecutivas A e B, e o resultado do filtro em C.	63
Figura 24 - Extração do perfil da junta por detecção de bordas (imagem filtrada (A), bordas (B) e perfil da linha (C))	64
Figura 25 - Extração do perfil da junta com algoritmo <i>Skeleton</i> (imagem capturada (A), imagem filtrada (B), perfil extraído (C), perfil filtrado (D)), adaptado de [35].	65
Figura 26 - Perfil de intensidade luminosa da linha laser.	65
Figura 27 - Análise do perfil de intensidade com a técnica do valor máximo [50].	66

Figura 28 - Centro de gravidade do perfil de intensidade luminosa da j-ésima linha, adaptado de[51].	68
Figura 29 - Múltiplos picos de intensidade luminosa.	69
Figura 30 - Princípio de funcionamento do algoritmo de derivadas (imagem capturada (A), perfil da junta (B), segunda derivada do perfil (C)).	72
Figura 31 - Algoritmo de extração das características da junta utilizando a transformada de Hough [53].	73
Figura 32 - Algoritmo de correlação de padrões.	74
Figura 33 - Sensor de triangulação laser montado junto a tocha e robô de soldagem.	76
Figura 34 - Parte interna do sensor de triangulação laser.	76
Figura 35 - Projeto óptico e área de medição do sensor.	78
Figura 36 - Dispositivos do protótipo para proteção contra o ambiente de soldagem.	81
Figura 37 - Forma construtiva da cortina de vento.	82
Figura 38 - Placa de refrigeração do sensor.	83
Figura 39 - Fluxograma do <i>software</i> de medição do sensor.	85
Figura 40 - Tela principal do <i>software</i> de medição.	86
Figura 41 - Tela de configuração dos filtros da imagem.	87
Figura 42 - Tela de configuração do algoritmo de medição.	88
Figura 43 - Gráfico de medições no Sistema de Coordenadas da Medição	88
Figura 44 - Diagrama dos algoritmos de extração das características da junta.	89
Figura 45 - Análise de múltiplos picos.	91
Figura 46 - Extração do perfil do chanfro a partir de múltiplos picos, Pico 1 (maior intensidade), Pico 2 (menor intensidade) e Perfil do chanfro.	91
Figura 47 - Derivadas do perfil do chanfro.	93
Figura 48 - Processamento de imagem para algoritmo correlação de padrões.	95
Figura 49 - Extração dos pontos característicos da junta com método de Ajuste Linear.	96
Figura 50 - Cálculo das características da junta.	97
Figura 51 - Diagrama de comunicação do sistema de controle adaptativo.	99
Figura 52 - Fluxo de informação do <i>software</i> de controle.	101
Figura 53 - Representação gráfica do filtro de variação.	102
Figura 54 - Fluxograma do filtro de variação	103
Figura 55 - Representação gráfica do filtro de ajuste linear.	104
Figura 56 - Variáveis de controle de trajetória.	105
Figura 57 - Fluxograma do controle de trajetória da do robô.	107
Figura 58 - Procedimento de recuo.	108
Figura 59 - Fluxograma do processo de filtragem.	110
Figura 60 - Bancada de ensaios (A) e conjunto robótico (B).	111
Figura 61 - Medição do <i>gap</i> com algoritmo de Correlação de Padrões antes da soldagem (A) e durante a soldagem (B).	114
Figura 62 - Medição do <i>gap</i> com algoritmo da Segunda Derivada antes da soldagem (A) e durante a soldagem (B).	115

Figura 63 - Medição do <i>gap</i> com algoritmo de Ajuste Linear antes da soldagem (A) e durante a soldagem (B).....	116
Figura 64 - Gráficos de percentual falhas de medição com os algoritmos de Ajuste Linear, Correlação de Padrões e Segunda derivada.	117
Figura 65 - Montagem do corpo de prova com desalinhamento proposital. ...	121
Figura 66 - Corpo de prova utilizado no ensaio com a técnica de escaneamento da junta.	122
Figura 67 - Medições do <i>gap</i> antes, durante a soldagem e <i>gap</i> de referência para ensaio com leitura prévia da junta.	123
Figura 68. Parâmetros de deslocamento do robô para ensaio com a técnica de controle <i>off-line</i>	124
Figura 69 - Gráfico de variação da velocidade de arame para soldagem com a técnica de controle <i>off-line</i>	125
Figura 70 - Desvios da linha de seguimento nos eixos Y e Z ao longo do eixo X para ensaio com a técnica de controle <i>off-line</i>	126
Figura 71 - Nuvem de pontos medidos, trajetória da tocha e linha de seguimento para ensaio com a técnica de controle <i>off-line</i>	127
Figura 72 - Solda realizada com a técnica de controle <i>off-line</i> face superior do cordão (A) e raiz (B).....	127
Figura 73 - Nuvem de pontos da solda realizada com a técnica de controle <i>off-line</i>	128
Figura 74 - Nuvem de pontos da raiz da solda realizada com a técnica de controle <i>off-line</i>	129
Figura 75 - Corpo de prova utilizado na soldagem com a técnica de correção <i>online</i> , vista da face (A) e raiz da junta (B).	130
Figura 76 - Inspeção do corpo de prova utilizado no ensaio com a técnica de correção <i>online</i>	131
Figura 77 - Inspeção do <i>gap</i> do corpo de prova para ensaio com a técnica de correção <i>online</i>	131
Figura 78 - Resultado da soldagem do corpo de prova com a técnica de correção <i>online</i> , face superior do cordão (A) e raiz (B).	132
Figura 79 - Nuvem de pontos capturada durante a soldagem (A) e trajetória executada (B), referente ao ensaio com a técnica de correção <i>online</i>	133
Figura 80 - Medições do <i>gap</i> , <i>gap</i> filtrado, <i>gap</i> de referência, durante o procedimento de soldagem do corpo de prova realizado com correção durante a soldagem.....	134
Figura 81 - Gráfico de comparação entre o <i>gap</i> medido antes e durante a soldagem.....	134
Figura 82 - Desalinhamentos da linha de seguimento do corpo de prova realizado com a técnica de controle <i>online</i>	135
Figura 83 - Parâmetros de deslocamento do robô para ensaio soldado com a técnica de controle <i>online</i>	136
Figura 84 - Velocidade de arame utilizada na soldagem do corpo de prova com medição simultânea a soldagem.....	137

Figura 85 - Nuvem de pontos superior da solda realizada com medição simultânea a soldagem.....	137
Figura 86 - Nuvem de pontos da raiz realizada com medição simultânea a soldagem.....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros para soldagem de raiz na posição plana com o processo CCC, adaptado de [12].	39
Tabela 2 – Equações de controle do processo para posição plana, adaptado de [12].	39
Tabela 3 - Especificações de sensores comerciais (Meta Vision[22] e ServoRobot[23]).	44
Tabela 4 - Características do sensor desenvolvido.....	77
Tabela 5 - Especificação da câmera.	79
Tabela 6 – Especificações da lente.	79
Tabela 7 - Especificações do módulo laser.	80
Tabela 8 - Parâmetros de soldagem do processo CCC para o ensaio de medição do <i>gap</i>	113
Tabela 9 – Incerteza de medição apresentada pelos algoritmos Ajuste Linear, Correlação de Padrões e Segunda derivada.	117

LISTA DE ABREVIATURAS SIMBOLOGIAS

STL - Sensor de Triangulação Laser.

DBCP - Distância entre Bico de Contato e Peça.

CCC - Curto Circuito Controlado.

GMAW- *Gas Metal Arc Welding*.

SCS - Sistema de Coordenadas do Sensor.

SCB - Sistema de Coordenadas da Base do Robô.

SCI - Sistema de Coordenadas da Interface.

SCM - Sistema de Coordenadas da Medição.

T_F^S – Transf. do sist. de coord. do sensor para coord. da ferramenta.

T_B^S - Transformação do sist. de coord. do sensor para base.

T_B^F - Transformação do sist. de coord. da ferramenta para base.

va - Velocidade de Arame.

A - Amplitude de Oscilação da Tocha.

F - Frequência de Oscilação da Tocha.

tp - Tempo de Parada.

vs - Velocidade de Soldagem.

Ps – Ponto de Seguimento

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	31
RESUMO	35
ABSTRACT	37
LISTA DE FIGURAS	39
LISTA DE TABELAS	43
SUMÁRIO	47
1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	27
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	28
2 AUTOMAÇÃO DA UNIÃO DE TUBOS	31
2.1 NECESSIDADE DE CORREÇÃO	33
2.2 CONTROLE DO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	35
2.3 APLICAÇÃO DE SENSORES NA SOLDAGEM.....	40
2.3.1 Sensores de variáveis do arco.....	41
2.3.2 Sensores de contato.....	41
2.3.3 Sensores ópticos	42
3 SENSORES DE TRIANGULAÇÃO LASER PARA SOLDAGEM	47
3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO STL	47
3.2 CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE TRIANGULAÇÃO LASER	50
3.3 EMISSORES LASER E FILTROS ÓTICOS	53
3.4 PROTEÇÕES DO CABEÇOTE DE MEDIÇÃO DO SENSOR	54
3.5 PROCESSAMENTO DE IMAGENS EM SENSORES DE TRIANGULAÇÃO LASER.....	56
3.5.1 Região de interesse.....	58
3.5.2 Segmentação da imagem	60
3.5.3 Filtragem e remoção de ruídos	61

3.5.4 Extração do perfil da linha laser	63
3.5.5 Análise do perfil de intensidade luminosa	65
3.6 EXTRAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA JUNTA	70
3.6.1 Extração das características da junta com a técnica de derivadas do perfil da junta	71
3.6.2 Extração das características da junta com a técnica de ajuste linear	72
3.6.3 Extração das características da junta com a técnica de correlação de padrões.....	73
4. DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE TRIANGULAÇÃO LASER.....	75
4.1 CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO	75
4.2 PROJETO ÓPTICO E SELEÇÃO DE COMPONENTES	77
4.3 PROJETO MECÂNICO.....	80
4.4 <i>SOFTWARE</i> DE MEDIÇÃO	84
4.5 ALGORITMOS DE EXTRAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA JUNTA.	89
4.5.1 Estratégia de extração do perfil da junta	90
4.5.1 Algoritmo de extração das características da junta com a técnica da segunda derivada.....	92
4.5.2 Algoritmo de correlação de padrões	94
4.5.3 Algoritmo de ajuste linear.....	95
4.5.4 Cálculo das características da junta.....	96
5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE PARA SOLDAGEM	99
5.1 TRATAMENTO DAS MEDIÇÕES	100
5.1.1 Filtro de variação.....	101
5.1.2 Filtro de linearização da trajetória	103
5.2 RECONSTRUÇÃO DA LINHA DE SEGUIMENTO E PERFIL DO <i>GAP</i>	105
6. AVALIAÇÃO DO SENSOR DESENVOLVIDO.....	111

6.1 BANCADA DE ENSAIOS	111
6.1. AVALIAÇÃO DOS ALGORITMOS DE EXTRAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA JUNTA NA MEDIÇÃO DO <i>GAP</i>	112
6.1.1 Resultados das medições do gap com os algoritmos desenvolvidos.....	114
6.1.2 Discussões sobre medição do gap com algoritmos desenvolvidos.....	118
6.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM COM SEGUIMENTO DE JUNTA E CONTROLE DO PROCESSO	120
6.2.1 Corpo de prova soldado com a técnica de controle <i>off-line</i>.....	122
6.2.2 Corpo de prova soldado com a técnica de controle <i>online</i>.....	129
6.2.3 Discussões sobre ensaios de soldagem com seguimento de junta e controle do processo.	138
7. CONCLUSÕES	141
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	143
9. REFERÊNCIAS	145

1 INTRODUÇÃO

Ao longo de anos de evolução, processos de soldagem e técnicas de automação foram desenvolvidos buscando aumentar a qualidade e produtividade da tarefa de união de tubos. Apesar de tão importante, a automação da união de tubos no Brasil não é uma realidade. Este fato se deve, em parte, à complexidade inerente ao processo de soldagem, especialmente no passe de raiz. Inicialmente, a dificuldade surge com diferenças dimensionais da junta, ocasionadas ou por limitações no procedimento de preparação, ou por variações geométricas dos próprios tubos, como por exemplo, ovalização. Em uma operação manual, o soldador tem a capacidade natural de se adaptar a essas variações, utilizando-se dos seus sentidos para atuar na correção do movimento de condução da tocha. Em um procedimento automatizado, em que a condução da tocha é feita por meio de um dispositivo manipulador ou robô de soldagem, a adaptação contínua do movimento é dependente de informações obtidas por sensores externos.

As medições realizadas pelos sensores têm grande responsabilidade no funcionamento de um sistema automatizado. A tecnologia de sensoriamento por triangulação laser tem sido utilizada na automação da soldagem devido as suas características metrológicas e pela capacidade de operação durante o procedimento. Os sensores desta categoria se destacam pela riqueza das informações disponibilizadas e por realizarem a medição da geometria e posição da junta sem a necessidade de contato com a peça. O resultado da medição tem como primeiro objetivo o monitoramento constante do alinhamento da tocha em uma correção frequentemente denominada de seguimento de junta. Além disso, as informações adicionais fornecidas pelo sensor oferecem condições para que sejam tomadas outras atitudes voltadas ao controle e manutenção da poça e do procedimento de soldagem. Essas ações tratam de correções nos parâmetros de movimentação da tocha, no que diz respeito a velocidade de soldagem, amplitude e frequência de oscilação, ou até mesmo alterações nos parâmetros elétricos impostos pela fonte. A atuação sobre essas variáveis configura o controle adaptativo do processo.

Apesar de todas as possibilidades que são obtidas com o uso de sensores laser, a inexistência de equipamentos nacionais voltados para área de soldagem obriga a indústria brasileira a recorrer a soluções estrangeiras. As altas taxas de importação praticadas, além da dependência estrangeira para instalação e manutenção dos sensores, tornam a aplicação destes equipamentos onerosa. Adicionalmente, estes sensores chegam ao Brasil como “caixas pretas”, de modo que não se tem

acesso aos seus princípios de funcionamento, tornando a integração com outros equipamentos limitada às funcionalidades disponibilizadas pelo fabricante.

A falta de domínio sobre esta tecnologia de sensoriamento também foi uma dificuldade encontrada pela equipe do LABSOLDA durante projeto de P&D na área de automação da soldagem. Nestas pesquisas, o LABSOLDA teve a oportunidade de trabalhar com sensores de triangulação laser de duas das maiores fabricantes desta categoria de equipamento, a empresa META Vision e a empresa SERVOROBOT. Um dos desenvolvimentos tinha como objetivo realizar a soldagem de união de tubos de forma automática, utilizando o sensor da META Vision para realimentar um robô da empresa YASKAWA MOTOMAN com informações para realização do controle adaptativo. Apesar de existir um protocolo de comunicação dedicada entre os dois equipamentos, a integração só foi possível com o suporte técnico *in loco* de um especialista alemão. Este procedimento habilitou o robô para realizar algumas tarefas básicas, como por exemplo, o seguimento de junta, contudo não proporcionou uma integração flexível o suficiente para atender a tarefa principal do projeto, o controle adaptativo.

A solução adotada consistiu no desenvolvimento de um sistema de interface responsável por interpretar as informações recebidas do sensor e enviar comandos ao robô por meio de portas digitais. Todas as funcionalidades conferidas pela comunicação ethernet originalmente disponíveis pelo sistema foram perdidas, e o sistema que foi configurado acabou tendo a resolução limitada pelo número de portas digitais disponíveis. O desenvolvimento deste sistema atendeu os requisitos do projeto, todavia, demandou meses de trabalho da equipe do laboratório para contornar a limitação imposta pela integração disponibilizada pelos fabricantes.

Outro objetivo do projeto era integrar os sensores comerciais com o robô desenvolvido no Brasil pela empresa ENGEMOVI, parceira do laboratório. A integração com o sensor META Vision foi viabilizada por meio do protocolo de comunicação ethernet, disponível no equipamento para este tipo de aplicação. Ao solicitar à empresa SERVOROBOT uma alternativa para a integração do seu sensor, foi recebida a resposta de que o equipamento teria o protocolo de comunicação restrito aos robôs de algumas marcas específicas. Esta restrição impede o funcionamento do sensor com o robô nacional da forma adequada, restando a alternativa de utilizar as portas digitais e analógicas do equipamento. Esta opção não permite o completo acesso as funcionalidades do sensor, o que limita sua aplicação.

As dificuldades com os sensores industriais não se restringiram a parte de integração. A utilização do equipamento para medir juntas com alta reflexividade resultou em uma série de erros de medição. Nesta condição, as medições retornavam valores muito diferentes do esperado, em virtude da perturbação de reflexos. Os fabricantes disponibilizam poucas funcionalidades para solucionar este tipo de falha em seus *softwares* de medição. Os ajustes disponibilizados, muitas vezes, são de complexo entendimento e dificilmente auxiliariam um operador que não seja especializado no equipamento. Outra problemática encontrada nos sensores comerciais é a incapacidade de medir juntas não previstas pelo fabricante. No *software* de configuração do sensor é possível escolher, entre as opções disponíveis, o tipo de junta a ser medida. No caso da necessidade de medição de um novo tipo de junta é necessário contatar o fabricante para adquirir o serviço de atualização do *software*.

A experiência do LABSOLDA é um exemplo de como a falta de domínio da tecnologia de sensoriamento limita o desenvolvimento da automação da soldagem. A fim de buscar a diminuição desta dependência de equipamentos e tecnologias importadas e ampliar os horizontes da pesquisa na área de automação da soldagem, o presente trabalho apresenta o estudo e desenvolvimento de um sensor de triangulação laser brasileiro.

1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sensor de triangulação laser de arquitetura aberta e as técnicas adequadas de processamento de imagem e de sinais. Este sensor deverá ter as características necessárias para aplicação no controle adaptativo da soldagem do passe de raiz.

Para alcançar o objetivo geral desta tese os objetivos específicos são:

- Realizar o projeto ótico e mecânico do sensor contemplando os requisitos metrológicos e de resistência estabelecidos pela aplicação.
- Desenvolver e avaliar algoritmos de processamento de imagens e sinais para realizar as medições com o sensor.

- Validar os desenvolvimentos do sensor e dos algoritmos de medição com a soldagem adaptativa do passe de raiz de juntas de topo com chanfro do tipo “V” na posição plana.

As principais contribuições desta tese são:

- O desenvolvimento de um sensor de triangulação laser e seu *software* de arquitetura aberta, para realização de novas pesquisas e desenvolvimentos em estratégias de medição e automação;
- O desenvolvimento dos algoritmos de processamento de imagem e medição aplicados em juntas do tipo “V”;
- Esta tese apresenta as bases para o domínio e nacionalização da tecnologia de projeto, construção e operação de sensores de triangulação laser para soldagem.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A fim de contemplar os objetivos apresentados, a estrutura do presente trabalho está subdividida em seis capítulos.

O primeiro capítulo é a própria introdução do trabalho, onde são apresentados o tema do trabalho de forma genérica, e a necessidade do desenvolvimento de um sensor de triangulação laser com características específicas para aplicação na soldagem de união de tubos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre: a automação da união de tubos; os equipamentos empregados na aplicação; a necessidade de correção automática; as técnicas de controle abordadas no trabalho; e os sensores comumente aplicados na automação da soldagem.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre: os fundamentos dos sensores de triangulação laser; seu princípio de funcionamento; a calibração aplicada nestes sensores; emissores laser e filtros óticos utilizados; mecanismos de proteção do cabeçote de medição; e processamento de imagens aplicado neste tipo de sensor.

O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do sensor de triangulação laser com: as características do protótipo; projeto óptico e

seleção dos componentes; projeto mecânico; *software* de medição; e algoritmos de extração das características da junta.

O Capítulo 5 apresenta o desenvolvimento do sistema de controle para soldagem, o tratamento das medições realizadas pelo sensor, e os algoritmos de reconstrução da linha de seguimento e do perfil do *gap*.

O Capítulo 6 apresenta a avaliação do sensor desenvolvido e a apresentação da bancada de ensaios. Também são apresentados os ensaios de avaliação dos algoritmos de extração das características da junta, e ensaios de soldagem. Estes ensaios validam o desenvolvimento do sensor na medição da junta, e na aplicação para controle do processo de soldagem.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 AUTOMAÇÃO DA UNIÃO DE TUBOS

A tarefa de automação de um procedimento de soldagem de união de tubos enfrenta diversos desafios tecnológicos. Um desses desafios é a robustez exigida pela aplicação na soldagem em campo. Adicionalmente, a restrição de espaço físico exige que o equipamento seja compacto. A solução adotada para este tipo de procedimento é o uso de robôs manipuladores dedicados. Como exemplos de manipuladores dedicados voltados para soldagem de união de tubos estão os equipamentos da Dynatorque [1], Polysoude [2], Magnatech [3] e Tartilope V4 [4] que podem ser visualizados na Figura 1 (a), (b), (c) e (d) respectivamente. Na maioria dos casos estes equipamentos utilizam o processo GMAW.

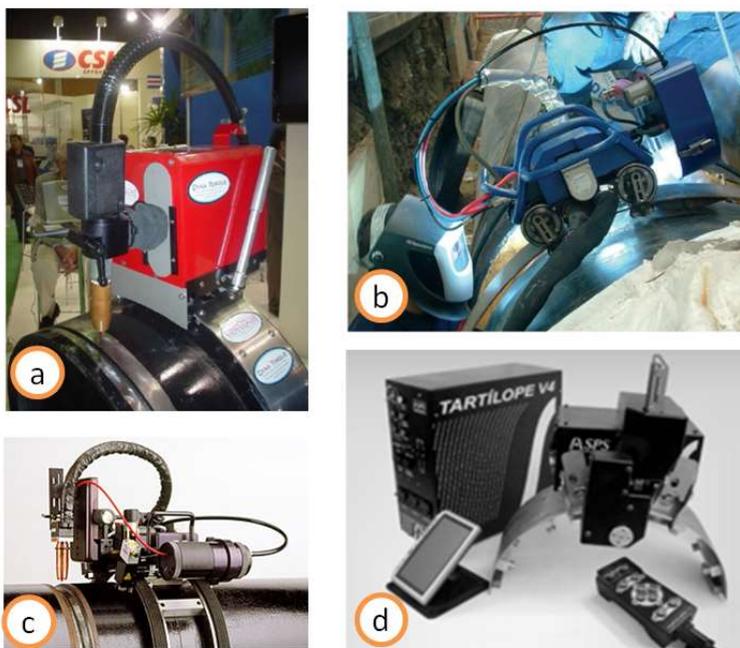


Figura 1 - Deslocadores de tocha para soldagem de união de dutos. (a) DYNATORQUE (b) POLYSOUDE (c) MAGNATECH (d) TARTILOPE V4 [4].

Os manipuladores possuem normalmente de 3 a 5 eixos de movimentação sendo que um destes é o trilho que envolve o tubo. Para o

adequado posicionamento da tocha durante a soldagem, o manipulador deve ser capaz de realizar o movimento de translação ao longo da junta de soldagem, além do posicionamento axial e vertical, ângulo de soldagem e ângulo lateral conforme demonstrado na Figura 2 [5].

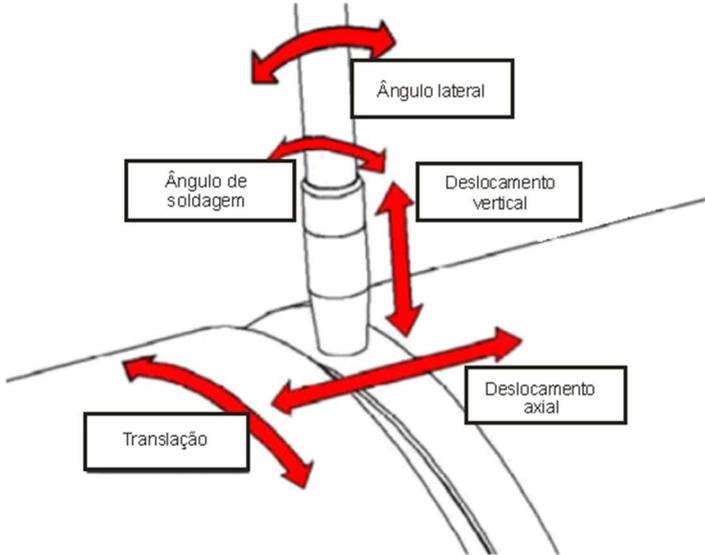


Figura 2 - Graus de liberdade para soldagem orbital de duto [5].

Esta liberdade de movimento é necessária para ajustar a movimentação da tocha de acordo com as necessidades do procedimento. A necessidade de ajustes pode ser causada por diversos fatores como variação da posição de soldagem, variações do perfil da junta ao longo da soldagem entre outros.

2.1 NECESSIDADE DE CORREÇÃO

Como mencionado anteriormente os procedimentos de união de tubos por soldagem automatizada utilizam manipuladores dedicados à aplicação. Eles são fixados ao tubo por trilhos de forma que consigam posicionar a tocha sobre toda a circunferência da junta. Por se tratar de uma junta de união de tubos, em um mesmo cordão de solda o processo ocorre em diferentes posições de soldagem. A Figura 3 apresenta as posições de soldagem plana, sobre cabeça, vertical descendente e vertical ascendente. Cada posição tem um conjunto de parâmetros ideal para a qualidade e produtividade do processo. Um equipamento automático deve realizar o ajuste destes parâmetros para o melhor desempenho [4-6].

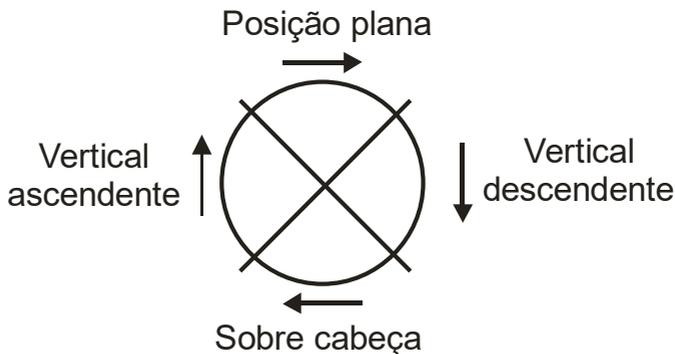


Figura 3 - Posições de soldagem em um procedimento orbital de união de dutos [6].

O trilho serve de guia para que o manipulador se desloque ao redor do tubo, entretanto se não for fixado paralelo à junta, em determinada secção do cordão, a tocha pode sair da posição correta para a soldagem. Quando a junta é mal preparada, seu formato pode ser comprometido e o ângulo do chanfro, nariz do chanfro, *gap*, entre outros, podem apresentar variações ao longo da junta.

A Figura 4 apresenta uma junta reunindo alguns dos possíveis defeitos ligados à preparação do chanfro. O ângulo (α) é menor que (α'), o que implica na área (A) ser menor que a área (A'), desta forma, a quantidade de material depositado no lado de (A') deve ser maior. Outro exemplo é a diferença entre (a) e (a'), que pode comprometer a qualidade da solda de raiz. Erros de montagem e ovalização ou amassamento do tubo provocam o desalinhamento (x) entre as duas secções. Os parâmetros

do passe de raiz e acabamento devem ser ajustados para compensar estes defeitos da junta. A ovalização do tubo também pode provocar alteração da distância entre a ponta da tocha e a junta. Desta forma, durante o deslocamento do manipulador esta distância pode sofrer variações. Todas estas situações podem causar uma falha e devem ser compensadas.

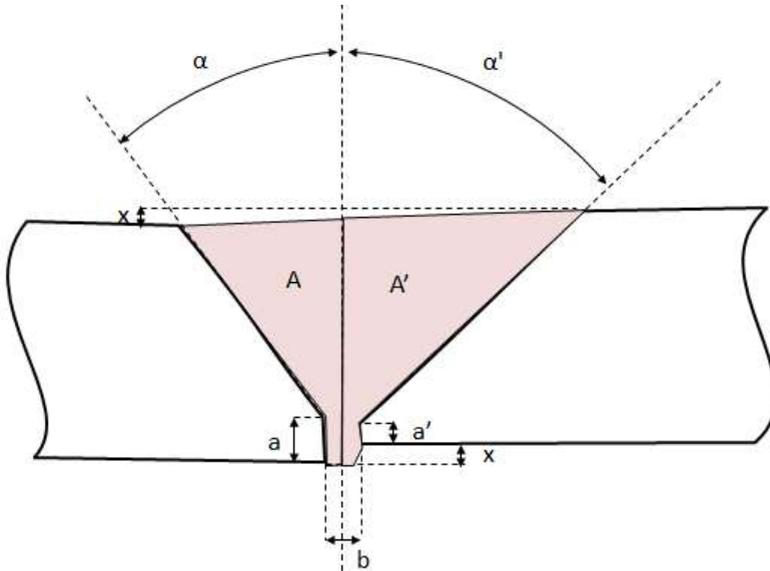


Figura 4 - Erros de preparação e montagem de uma junta em "V".

O calor gerado pela soldagem provoca tensões e deformações nas peças soldadas. Estas distorções podem acontecer de seis formas diferentes: contração longitudinal, contração transversal, distorção angular, abaulamento, flambagem e torção [7]. No decorrer da soldagem, as peças vão aquecendo e trocando calor, assim, sua geometria e posição podem ser alteradas. Em um sistema automatizado, os sensores são responsáveis por detectar estas variações. Os erros de montagem têm característica estática e permanecem constantes durante a soldagem. Entretanto, como as distorções são provenientes do calor e acontecem enquanto a soldagem é realizada, o sensor deve medir a junta durante este processo. De fato, esta variação é dependente do material de base, fixação das peças, processo utilizado, formato da peça, corrente de soldagem entre outros.

As medições realizadas durante a soldagem podem ser utilizadas para realimentar o sistema automatizado no ajuste dos parâmetros do processo. Esta técnica é denominada “Soldagem Adaptativa”.

2.2 CONTROLE DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Um procedimento automatizado com a técnica de controle do processo de soldagem tem por característica ajustar os parâmetros do processo às variações da junta de soldagem [8]. Este técnica de controle deve ser capaz de, por exemplo, identificar o aumento da abertura da raiz e rapidamente atuar em variáveis como a movimentação da tocha ou parâmetros de soldagem. Este tipo de procedimento tem sido foco de muitos estudos pelo mundo [7, 9-11].

A Figura 5 apresenta o diagrama esquemático de um sistema de soldagem adaptativa. Neste tipo de sistema o operador é responsável por inserir as características desejadas da solda na unidade de controle. A partir destas características o sistema ajusta os algoritmos de controle adaptativo. Durante o procedimento, um sensor é responsável por realizar medições da geometria da junta e realimentar a unidade de controle. De acordo com estas medições o algoritmo do sistema ajusta os parâmetros da fonte e do robô.

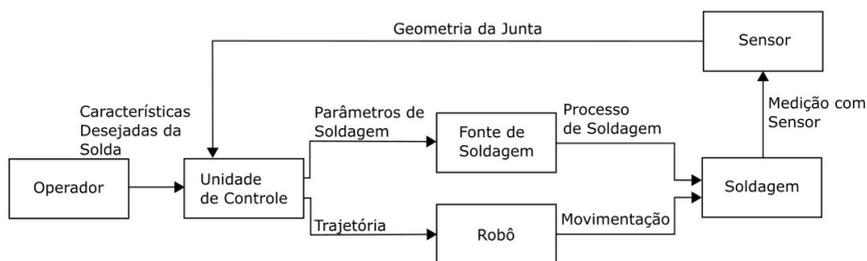


Figura 5 - Diagrama esquemático de um sistema de soldagem adaptativa.

A Figura 6(A) apresenta o desenho de um corpo de prova com perfil da junta variável ao longo do seu comprimento. Neste caso a geometria da parte inicial do junta é diferente da parte final. Como pode ser observado na Figura 6(B), tanto a abertura da raiz como secção transversal do chanfro, variam ao longo da junta (B1 e B2). Para alcançar um resultado satisfatório, a trajetória da tocha e as variáveis de soldagem devem ser ajustadas durante a realização da solda. Em um procedimento

com o sistema de soldagem adaptativa da Figura 5 a movimentação da tocha seria ajustada resultando na trajetória apresentada na Figura 6(B).

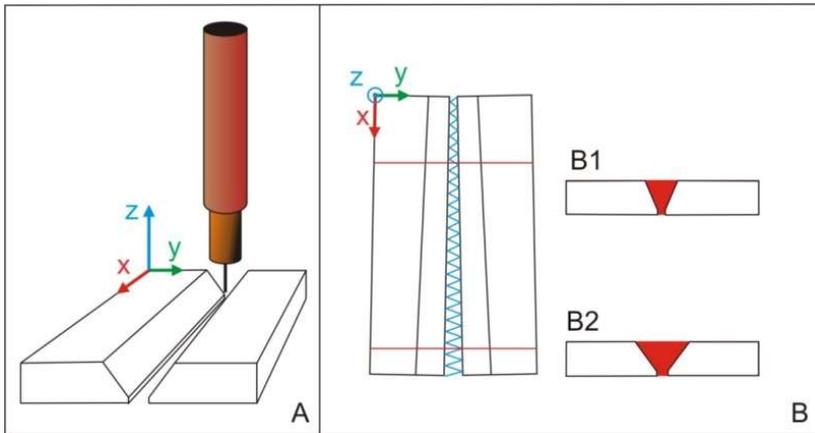


Figura 6 - Desenho do corpo de prova para soldagem adaptativa.

Os sistemas comerciais para controle adaptativo de soldagem disponíveis no mercado apresentam limitações para aplicação de união de tubos. A flexibilidade nas estratégias de controle adaptativo é muitas vezes um limitante para aplicação da soldagem. Um trabalho antecedente a este, realizado no LABSOLDA, utilizou um robô antropomórfico e um sensor de triangulação laser para realizar o controle adaptativo do passe de raiz.

A Figura 7 apresenta a bancada de soldagem de tubos com o controle adaptativo utilizada no trabalho de Kinderman [12]. O robô utilizado para o deslocamento da tocha de soldagem não é dedicado à aplicação de soldagem orbital, mas foi programado para deslocar a tocha ao redor do tubo. As limitações do sistema, tanto no controle da trajetória orbital como no controle adaptativo do processo implicaram na necessidade do desenvolvimento de um controlador externo. Este controlador foi programado para realizar o controle adaptativo, fazendo a interface entre o sensor laser, o robô e a fonte de soldagem.



Figura 7 - Bancada soldagem com controle adaptativo com o robô antropomórfico [12].

A fonte de soldagem utilizada foi a DIGIPLUS, da empresa IMC, equipada com o processo MIG/MAG CCC (Curto Circuito Controlado) [13]. Este processo utiliza o controle da forma de onda da corrente para aumentar a estabilidade e alcançar melhores resultados na soldagem de raiz. O parâmetro de controle utilizado na fonte é a velocidade de arame, va .

Durante a soldagem a tocha é oscilada em torno do centro da junta. Esta oscilação é definida pelos parâmetros de deslocamento da tocha que são [12]:

- Amplitude de oscilação da tocha (A): Amplitude do movimento de oscilação transversal da tocha ao longo da junta.
- Frequência de oscilação da tocha (F): Número de oscilações realizadas a cada segundo durante a soldagem.
- Tempo de parada (tp): Tempo em que a tocha mantém sua posição na extremidade do movimento de oscilação
- Velocidade de soldagem (vs): Velocidade de deslocamento da tocha no sentido do comprimento da junta

A Figura 8 ilustra a os parâmetros de deslocamento e oscilação da tocha em torno da linha central da junta.

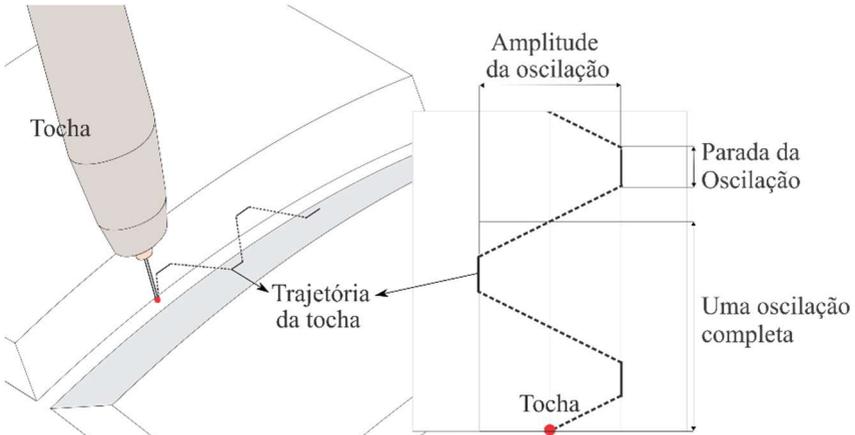


Figura 8 - Parâmetros de deslocamento e oscilação da tocha em torno da linha central da junta, adaptado de [12].

O controle adaptativo desenvolvido por Kinderman [12] relaciona os parâmetros de deslocamento e soldagem com a dimensão do *gap* da junta e a posição de soldagem. Para conhecer os parâmetros ideais para diferentes valores de *gap* e posições de soldagem, foram realizados ensaios na posição plana, vertical descendente e sobre cabeça. Em cada posição foram realizados três ensaios com dimensões de *gap* diferentes. A Tabela 1 apresenta os parâmetros ensaiados para a posição plana. Os ensaios 1, 2 e 3 apresentam os parâmetros levantados para juntas com *gap* de 1,00; 1,99 e 4,63 mm respectivamente.

Tabela 1 - Parâmetros para soldagem de raiz na posição plana com o processo CCC, adaptado de [12].

Ensaio	Gap [mm]	va [m/min]	A [mm]	F [Hz]	tp [s]	vs [cm/min]
1	1	5	0	0	0	30
2	1,99	3,2	2,0	1,0	0,3	15,6
3	4,63	3,2	7,6	0,3	1;0	6,0

Os ensaios da Tabela 1 deram origem às equações de controle do processo apresentadas na Tabela 2 onde o *gap* é representado por "a". Estas equações relacionam o valor de *gap* da junta aos parâmetros de deslocamento e soldagem do processo. A tabela apresenta as equações utilizadas para o controle na posição plana.

Tabela 2 – Equações de controle do processo para posição plana, adaptado de [12].

va [m/min]	$va = 6,818 - 1,818a$ Para $1,00 \leq a \leq 2,00$ mm. $va = 0,3$ Para $2,00 < a \leq 4,63$ mm.
A [mm]	$A = -2,132 + 2,1a$ Para $1,00 \leq a \leq 4,63$ mm.
F [Hz]	$F = -1,01 + 1,01a$ Para $1,00 \leq a \leq 2,00$ mm. $F = 1,502 - 0,252a$ Para $2,00 < a \leq 4,63$ mm.
tp [s]	$tp = -0,261 + 0,273a$ Para $1,00 \leq a \leq 4,63$ mm.
vs [cm/min]	$vs = 30,764a^{-1,053}$ Para $1,00 \leq a \leq 4,63$ mm.

A estratégia de controle baseada na medição do *gap* foi aplicada com sucesso na soldagem do passe de raiz de tubos de 16". A automação realizada se mostrou diretamente dependente da qualidade da medição do *gap*. Desta forma, o sensor utilizado nos ensaios foi avaliado quanto ao erro de medição associado ao *gap*. A incerteza de medição obtida em medições sem a interferência da soldagem foi igual a $0,10 \pm 0,24$ mm e quando aplicado durante o procedimento $0,20 \pm 0,29$ mm. Sendo assim, para que a aplicação desta técnica de controle o sensor utilizado deve apresentar incerteza inferior a estes valores [14].

Diferentes sensores podem ser aplicados para realizar o controle do processo de soldagem. O próximo capítulo apresenta alguns destes sensores.

2.3 APLICAÇÃO DE SENSORES NA SOLDAGEM

A soldagem de raiz da união de tubos pode ser dividida em três etapas, sendo a preparação de uma junta, a execução da soldagem e a inspeção da solda. Todas estas etapas tem influência na produtividade do processo de fabricação e podem ser auxiliadas por sensores.

A etapa de preparação consiste na usinagem e montagem da junta. Estas duas tarefas inevitavelmente resultam em erros de forma da junta que podem ser corrigidos antes da soldagem, compreendidos pelo próprio processo ou compensados por um sistema automatizado. Os sensores aplicados na etapa de preparação da soldagem podem auxiliar no controle de qualidade da junta. Neste caso, a geometria da junta é medida para classificação da peça ou encaminhamento para retrabalho.

Durante a execução da soldagem os sensores podem ser utilizados na medição da posição e geometria da junta. A medição destas características ao longo do procedimento pode ser utilizada para o controlar a soldagem.

Na etapa de inspeção da soldagem os sensores podem ser utilizados para medir as soldas realizadas de forma automática. Esta aplicação pode contribuir para o aumento da produtividade dos procedimentos de controle de qualidade.

Estas etapas do processo podem ser auxiliadas por diferentes tecnologias de sensores. Alguns dos sensores mais aplicados nas etapas do processo de soldagem são apresentados em três grupos e suas subdivisões: [15-17]

- Sensores de variáveis do arco
 - Controle de altura do arco
 - Seguimento de junta por variáveis do arco
- Sensores de contato
 - Sensor de toque mecânico
 - Sensor de toque do arame
- Sensores ópticos
 - Sensor de imagem da poça
 - Sensor de triangulação laser

Os grupos e suas divisões são descritos a seguir.

2.3.1 Sensores de variáveis do arco

Os sensores de variáveis do arco utilizam parâmetros elétricos do processo de soldagem (tensão e corrente) para medir a posição da tocha em relação a junta. Esta técnica pode ser aplicada para o controle de trajetória de juntas do tipo “V” e da distância entre o bico de contato, ou eletrodo e a peça. Para o controle de trajetória com este tipo de sensor é necessário que o robô seja programado para oscilar a tocha ao longo da junta. O resultado desta oscilação na corrente ou tensão de soldagem é processado para encontrar o desalinhamento entre o movimento realizado e a posição da junta. Esta técnica é limitada a correções de trajetória durante a execução da soldagem e não pode ser aplicada em todos os tipos de junta [18, 19].

2.3.2 Sensores de contato

Os sensores de contato podem ser divididos em sensores de contato mecânico e sensores de toque de arame. Os sensores de contato mecânico são formados por um apalpador e um transdutor. O apalpador é o elemento que toca a peça a ser medida e o transdutor é o responsável por transformar este toque em um sinal elétrico. Este transdutor pode ser composto por uma chave mecânica, chave optoeletrônica ou potenciômetro. Os apalpadores mecânicos fornecem a informação da posição da junta em até duas dimensões e podem ser aplicados antes e durante o processo de soldagem.

Os sensores de toque do arame têm seu princípio de funcionamento baseado em uma tensão sensível, aplicada entre o arame da tocha utilizada pelo robô e a peça. Para aplicação deste sensor o robô é programado para

movimentar a tocha sobre a peça em posições específicas. Quando o arame de solda toca a peça, a tensão sensível medida na ponta da tocha cai a zero e a posição da ferramenta é gravada como um ponto sobre a superfície da peça. A partir de uma sequência de toques, a posição da junta pode ser definida e o programa de movimentação do robô ajustado. Esta técnica é somente aplicada na etapa de preparação da soldagem [17].

2.3.3 Sensores ópticos

Os sensores ópticos mais aplicados em soldagem são divididos em duas categorias, sensores de imagem da poça e de triangulação laser. O sensor de imagem da poça utiliza uma câmera posicionada à frente da tocha e direcionada para a poça e arco de soldagem. A imagem capturada pela câmera é processada para medir a posição do centro da poça de fusão e o seu desalinhamento em relação a junta. As medições podem ser utilizadas para o seguimento de junta e o controle adaptativo do processo. A principal vantagem desta técnica é realizar medições de uma região muito próxima ao arco. Devido ao seu princípio de funcionamento, a técnica não é capaz de medir a geometria da junta por completo e é somente aplicada durante a soldagem [20, 21].

Os sensores de triangulação laser (STL) utilizam uma câmera e um projetor laser para realizar medições da geometria e posição da junta. Estes sensores podem ser aplicados nas etapas de preparação, execução e inspeção da soldagem.

As especificações de um STL se dividem em dois grupos, metrológicas e de resistência ao ambiente da soldagem. As especificações metrológicas abrangem a área “A” de medição do sensor, campo de medição, profundidade de medição e resolução, como apresentado na Figura 9. A Tabela 3 apresenta as especificações metrológicas e dimensionais de dois STL comerciais. Estes sensores são construídos para suportar o ambiente da soldagem e possuem refrigeração, janelas óticas e cortina de vento.

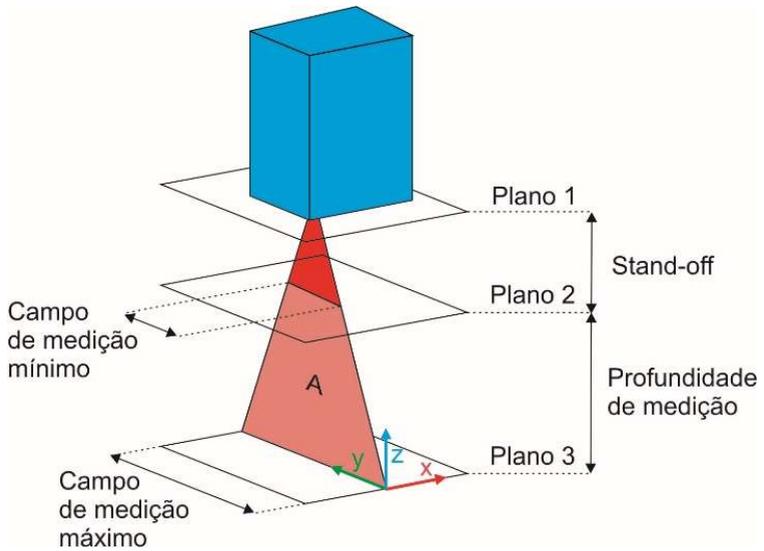


Figura 9 - Representação de parâmetros do sensor de triangulação laser.

Tabela 3 - Especificações de sensores comerciais (Meta Vision[22] e ServoRobot[23]).

	Sensor Meta Vision [24]	Sensor ServoRobot [25]
Imagem		
Modelo	SLS050 V1	Power-Cam
Campo de medição (mm)	50	76
Profundidade de medição (mm)	70	140
Standoff (mm)	65	70
Resolução Horizontal (mm/pixel)	0,05	0,09
Resolução Vertical (mm/pixel)	0,08	0,05
Largura do cabeçote (mm)	39,5	33
Altura do cabeçote (mm)	118	94
Profundidade do cabeçote (mm)	75	58

Estes sensores são preparados para medir tipos específicos de junta. A Figura 10 apresenta de forma esquemática alguns destes tipos de junta. A medição de juntas com características diferentes das programadas fica dependente do aprimoramento do *software* do sensor por parte do fabricante.

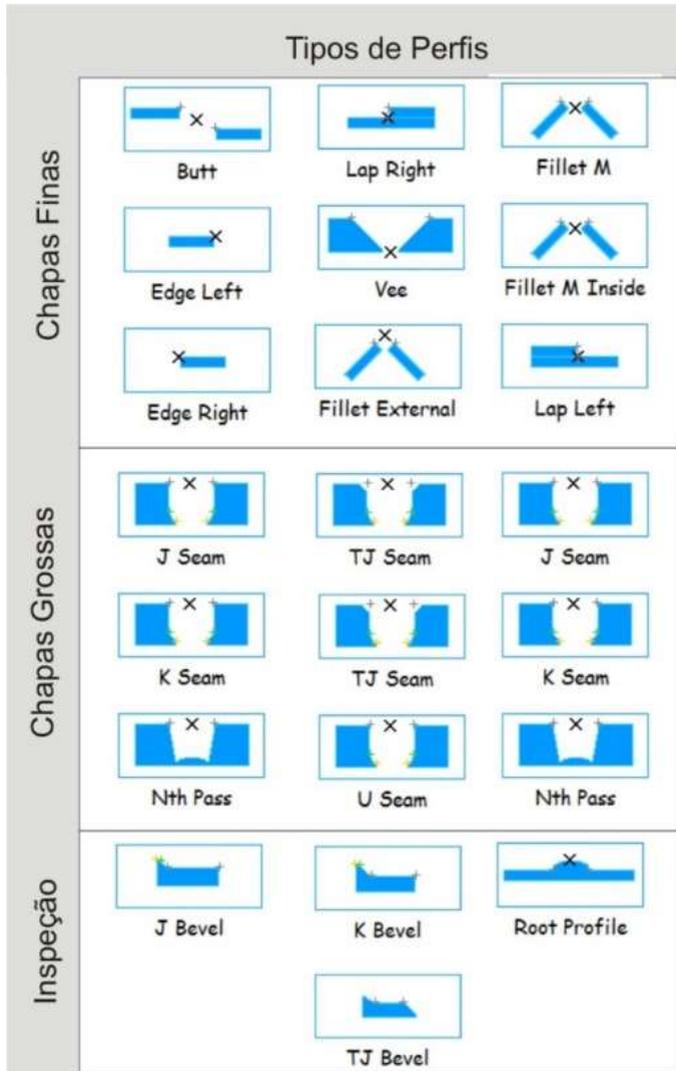


Figura 10 - Diferentes configurações de junta que dos STL comerciais [22].

3 SENSORES DE TRIANGULAÇÃO LASER PARA SOLDAGEM

O sensor de triangulação laser (STL) é um dos sensores ópticos mais aplicados em medições tridimensionais de juntas em procedimentos de soldagem [7, 26]. Entre os dispositivos opto eletrônicos, os STL se destacam por conseguir medir diferentes características da junta durante o procedimento. Ao contrário de outros métodos, como a observação da poça de soldagem, os STL permitem a medição completa do perfil da junta, podendo ser medidos valores de *gap*, ângulo do chanfro, área da seção transversal da junta, entre outros [27, 28].

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO STL

Os principais componentes do STL são a câmera para captura das imagens, um emissor laser e uma unidade de aquisição e processamento de imagem. O funcionamento do sensor é baseado na projeção do laser em forma de uma “folha de luz” de encontro à peça que será medida. A montagem do sensor é feita de modo que a luz projetada incida sobre a superfície a ser medida, dentro o campo de visão da câmera. O ângulo α , entre o eixo ótico da câmera e o plano da folha de luz, é denominado de ângulo de triangulação. A geometria da peça é calculada com base na calibração do sensor e na imagem da projeção do laser sobre a peça. Esta imagem irá conter a linha distorcida pela geometria da peça. Como apresentado na Figura 11, quando uma superfície atravessa a folha de luz no campo de visão da câmera, a imagem capturada carrega a informação da geometria e posição desta superfície. Compreendendo a distância entre câmera e emissor de luz, o ângulo de triangulação e características óticas da câmera, é possível definir o modelo matemático do sensor. Este modelo é utilizado para transformar a informação contida na imagem capturada, em dimensões da peça medida [29].

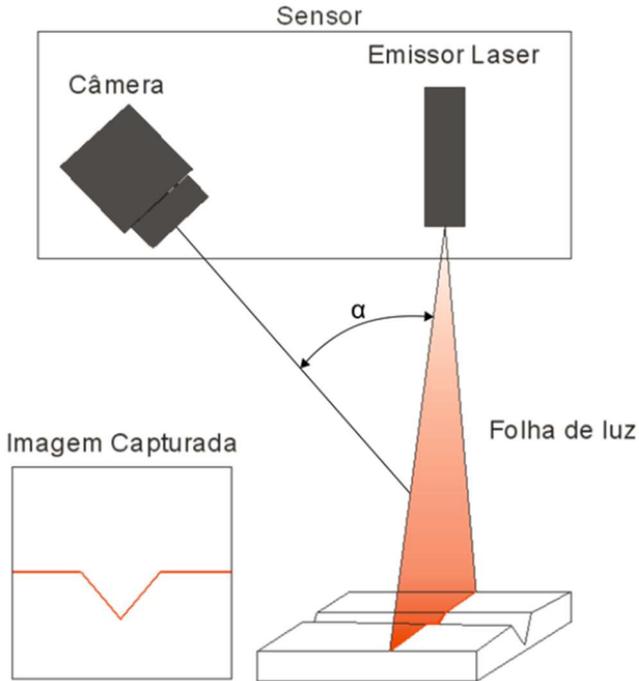


Figura 11- Princípio de funcionamento do sensor de triangulação laser.
Virar a imagem capturada

As etapas de processamento do sensor de triangulação laser estão apresentadas na Figura 12. A imagem capturada pela câmera é inicialmente processada para remoção de ruídos e destacamento do perfil da junta. A partir desta imagem os pontos característicos e do perfil da junta são encontrados. Estes pontos são submetidos a uma transformação de coordenadas de pixels para milímetros no Sistema de Coordenadas da Medição do Sensor (SCS), Figura 13. Os pontos característicos descritos no SCS são utilizados para o cálculo das características da junta como o *gap*, posição, ângulo e área do chanfro.

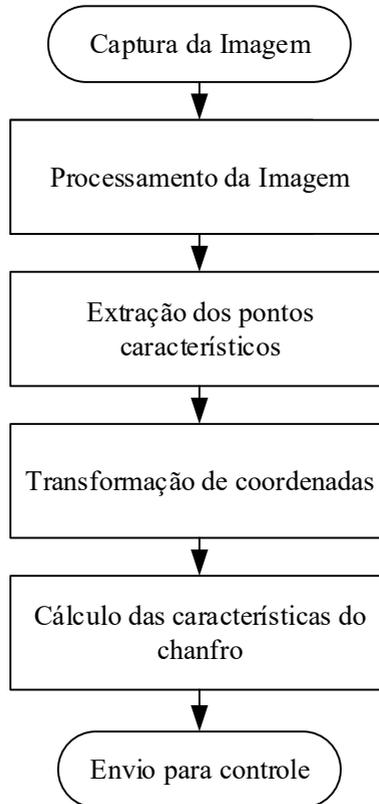


Figura 12 – Etapas de processamentos de um Sensor de Triangulação Laser. Aplicação da calibração

Para realizar o controle de trajetória, a posição da junta medida no SCS, deve ser transformada para o sistema de coordenadas do robô (SCB). A Figura 13 apresenta, de forma esquemática os processos de transformação da informação de um ponto medido para o SCB. Também estão representados o sistema de coordenadas da ferramenta do robô (SCF), sistema de coordenada da medição do sensor (SCS) e o ponto medido pelo sensor. Este ponto pode ser, por exemplo, a posição do centro de uma junta de soldagem. Ao capturar a posição do ponto, esta informação é descrita em função do SCS e deve ser transformada para o SCB para que o possa ser utilizado pelo controlador do robô. A transformação necessária para caracterizar um ponto medido em função do SCB é T_B^S . Esta transformação pode ser definida em função de T_F^S e T_B^F , que respectivamente representam a matriz de transformação que

relaciona o SCF com o SCS, e SCB com SCF. A transformação T_B^F é conhecida pelo controlador do robô e é utilizada para calcular as trajetórias da interface do robô. A matriz T_F^S está relacionada com a fixação entre o STL e a interface do robô. O procedimento que define T_B^S é chamado de calibração extrínseca do sensor e deve ser realizado sempre que a fixação do sensor for alterada[30, 31].

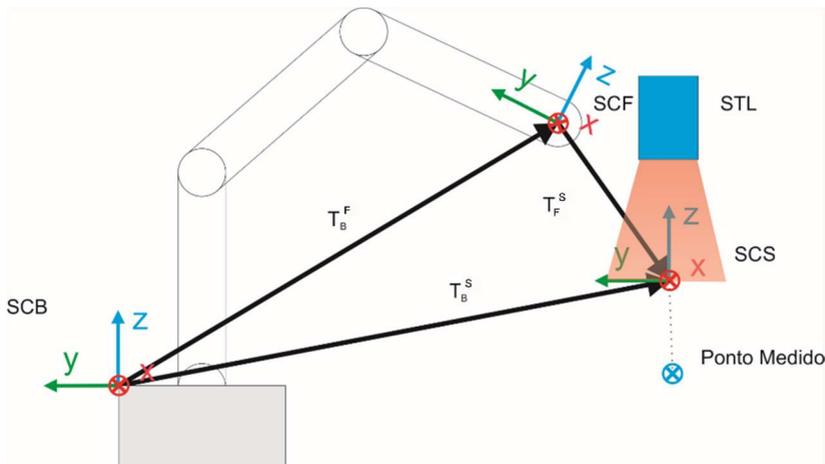


Figura 13 - Transformação do ponto medido para o sistema de coordenadas do robô.

3.2 CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE TRIANGULAÇÃO LASER

O procedimento de calibração do sensor permite que um ponto na imagem capturada, descrito em pixels, seja transformado em uma posição no espaço descrita em milímetros.

O modelo *pinhole* considera que a projeção de uma imagem em um anteparo, através de uma lente, pode ser descrita projetando-se pontos 3D em um plano, através de um ponto central denominado de centro de projeção ou centro da pupila, Figura 14. Desta forma, para qualquer ponto M no espaço 3D, sua representação m na imagem, encontra-se onde a reta que une M ao centro de projeção C intercepta o plano da imagem π [32]

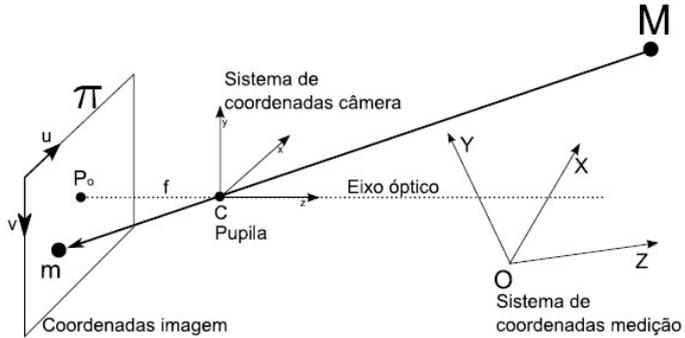


Figura 14 - Modelo de câmera pinhole, [32, 33]

A projeção $m = (u,v)^T$ de um ponto tridimensional qualquer $M = (X,Y,Z,1)^T$ no plano π pode ser descrita pela Equação 1[32].

$$m = P \cdot M \quad \text{Equação 1}$$

Onde P é a matriz de projeção que relaciona a posição de um ponto M no sistema de coordenadas de medição, com a posição do ponto m no sistema de coordenadas da imagem. A matriz P pode ser dividida em parâmetros intrínsecos e extrínsecos, Equação 2. Os parâmetros intrínsecos A se referem a características da câmera que capturou a imagem, os parâmetros extrínsecos estão relacionados à posição e orientação desta câmera no espaço. R representa a matriz de rotação e T o vetor de translação do sistema de coordenadas da medição para o sistema de coordenadas da câmera.

$$P = A \cdot [RT] \quad \text{Equação 2}$$

A Matriz A pode ser descrita de acordo com a Equação 3

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

α e β : representam os fatores de escala dos eixos u e v .

γ : representa o erro de alinhamento angular entre u e v , (normalmente desprezado).

u_0 e v_0 Coordenadas do ponto P_0 .

O modelo *pinhole* relaciona a posição de um ponto no espaço 3D com a posição da imagem deste ponto no plano da imagem 2D. Desta forma é necessária alguma informação adicional para encontrar as coordenadas do ponto M a partir do ponto m e da matriz de projeção P . No caso dos sensores de triangulação esta informação vem da “folha de luz”. Infinitos pontos tridimensionais M podem ser definidos sobre uma reta que liga o ponto m na imagem ao centro de projeção, mas somente um pertencerá simultaneamente ao plano matemático definido pela "folha de luz". O plano matemático da “folha de luz” projetada pelo emissor laser pode ser descrito pela Equação 4. Assim é possível encontrar as coordenadas (X , Y e Z) do ponto M a partir da posição $m(u,v)$ na imagem. A Figura 15 ilustra este princípio [32].

$$Ax + By + Cz + D = 0$$

Equação 4

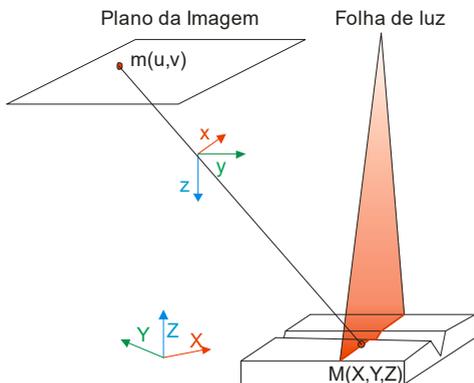


Figura 15 - Modelo de câmera pinhole e folha de luz aplicada em sensor de triangulação laser. Adaptado de [33].

3.3 EMISSORES LASER E FILTROS ÓTICOS

Os emissores laser aplicados em sensores de triangulação têm a função de fornecer a luz estruturada com características específicas para o melhor desempenho do equipamento. As características principais são o conjunto óptico do emissor, comprimento de onda, potência do laser e a característica geométrica da folha de luz.

O conjunto óptico do emissor é responsável por condicionar a luz do laser à projeção necessária. No caso de sensores de triangulação laser baseados na imagem de uma linha, a projeção necessária é a de um plano de luz, que é obtido com o emprego de um elemento óptico difrativo. Este plano deve possuir poucas distorções para que possam ser compensadas e não aumentar os erros de medição. A linha laser projetada deve apresentar perfil de intensidade luminosa constante ao longo do seu comprimento para que o processo de medição seja facilitado. Este perfil deve ser concentrado tornando a linha projetada o mais fina possível.

O comprimento de onda utilizado pelos emissores laser é um fator importante devido ao princípio de filtragem utilizado. Os STL utilizam filtros ópticos para que a linha laser se destaque na imagem. Nesta técnica o emissor laser é utilizado em conjunto com um filtro passa banda de banda passante estreita para que a luminosidade de fundo seja atenuada. O comprimento de onda utilizado como valor de referência do laser e filtro passa banda é escolhido com base no espectro de cores do arco elétrico. A Figura 16 apresenta um exemplo do espectro de cores do arco do processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) onde é possível observar que a intensidade luminosa entre 620 e 680nm é aproximadamente constante e menos intensa que em outras regiões. O comprimento de onda do laser e filtro deve estar contido neste intervalo para facilitar a filtragem da luz do arco [34].

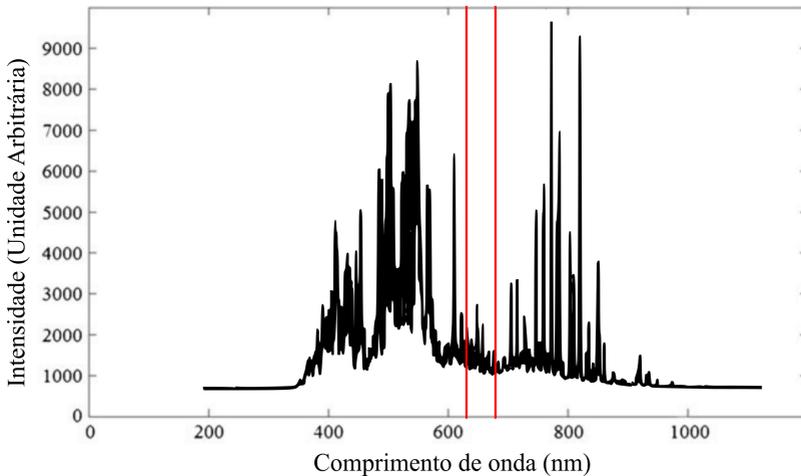


Figura 16 - Espectro de luz emitida por um arco GMAW, adaptado de [35].

A potência do emissor laser deve ser definida com base na segurança e operacionalidade do equipamento. Como o princípio de funcionamento do sensor é baseado na imagem da linha laser, quando mais destacada na imagem mais fácil será a realização a medição. Uma alternativa é aumentar a potência do laser para que a linha laser fique destacada em relação os ruídos gerados pelo processo. Trabalhos acadêmicos mostram que a cima de 30 mW de potência do emissor laser a diminuição de erros de medição do sensor não é mais significativa. Adicionalmente, emissores de potência muito alta podem apresentar riscos para o operador do sensor. [36].

3.4 PROTEÇÕES DO CABEÇOTE DE MEDIÇÃO DO SENSOR

O STL deve apresentar as características necessárias para suportar o ambiente de soldagem, e realizar as medições conforme os requisitos da aplicação. O ambiente de soldagem, especialmente em procedimentos com o processo GMAW, é caracterizado pelos fumos, respingos, partículas suspensas no ar e altas temperaturas próximo à tocha de soldagem. Para que as medições do cabeçote retratem a geometria da junta no momento da soldagem a montagem do cabeçote deve ser realizada o mais próximo possível da tocha. Quanto mais próximo o sensor estiver da tocha de soldagem, melhor para o controle do processo. Por outro lado, a proximidade torna a alta temperatura e presença de

fumos e respingos mais intensas. Trabalhos acadêmicos e equipamentos comerciais utilizam refrigeração com placas de trocas de calor e cabeçotes pressurizados para suportar o ambiente de soldagem. As placas de troca de calor utilizam um fluido para refrigerar o sensor. Este fluido pode ser água, ar ou o próprio gás de proteção da soldagem. A pressurização do cabeçote com ar comprimido ou gás de proteção da soldagem impede que partículas suspensas entrem no equipamento. A Figura 17 apresenta um exemplo de cabeçote de medição com mecanismos de proteção contra o ambiente de soldagem.



Figura 17 - Exemplo de cabeçote de medição por triangulação laser aplicado em soldagem [24]

Os respingos gerados pelo processo de soldagem acabam cruzando o campo de visão da câmera e atingindo as janelas óticas do sensor. O escudo contra respingos destacado na Figura 17, fica posicionado entre a tocha de soldagem e a câmera do sensor com o objetivo de bloquear parcialmente os respingos gerados pelo processo e a luminosidade gerada pelo arco elétrico. Alguns respingos ultrapassam o escudo e são projetados contra as janelas óticas do sensor. Para lidar com esta situação é utilizado uma janela descartável, que quando danificada por respingos pode ser substituída preservando o equipamento.

3.5 PROCESSAMENTO DE IMAGENS EM SENSORES DE TRIANGULAÇÃO LASER

O processamento de imagens dos STL é uma etapa fundamental para o sucesso da medição. Além das fontes de ruído naturalmente presentes no processo de triangulação laser, as medições com sistemas ópticos na soldagem sofrem com os ruídos gerados pelo arco elétrico e a reflexividade das peças. A Figura 18 apresenta diferentes tipos de ruídos gerados pelo processo de soldagem que são comuns em imagens capturadas durante a aplicação do sensor. Na Figura 18(A) é possível observar o efeito característico de respingos que atravessam o campo de visão da câmera durante a soldagem. A Figura 18(B) apresenta ruídos gerados pela característica de reflexividade da peça. Em regiões de maior reflexividade da junta a linha laser aparece com intensidade luminosa reduzida, o que dificulta o processamento. Outro ruído destacado na figura é a presença de reflexos da linha laser.

A Figura 18(C) ilustra ruídos gerados pela intensidade luminosa do arco elétrico que pode aparecer na imagem capturada dificultando a medição do sensor. Nesta figura também é possível observar o ruído gerado pelo reflexo de um ponto de solda presente na imagem capturada. Todos estes ruídos devem ser tratados com os algoritmos de processamento de imagem e medição para que o procedimento tenha sucesso.

A literatura tem como consolidada algumas soluções de hardware para que o sensor suporte as interferências da soldagem. Estas soluções tornam o sensor capaz de suportar o ambiente agressivo, mas não eliminam os ruídos do processo por completo [37, 38]. Por outro lado, a junta a ser medida tem características conhecidas que auxiliam o processamento, como o tipo de chanfro.

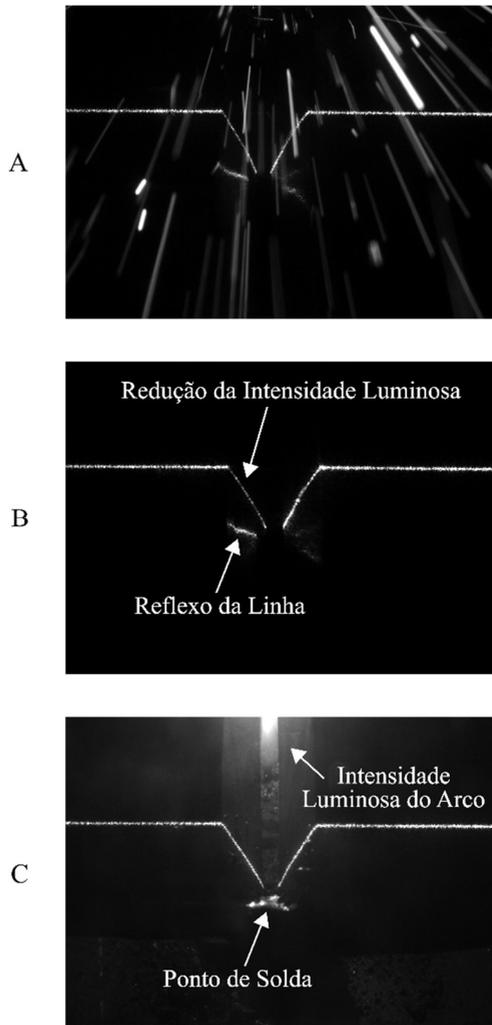


Figura 18 - Imagens capturadas por sensores de triangulação laser com ruídos gerados por respingos (A), reflexividade da junta (B) e Luminosidade do arco (C).

As imagens capturadas pelo sensor são processadas para diminuir a intensidade destes ruídos. As etapas do processamento de imagem estão organizadas na Figura 19 [39]. Depois de capturada, a imagem é segmentada, filtrada e o perfil da junta é extraído. O perfil da junta pode

ser entendido como o conjunto de pontos da imagem que melhor representa a linha laser. A etapa de extração das características da junta apresenta o perfil da junta e a marcação dos pontos característicos. Estes pontos são utilizados para medir a geometria da junta como, por exemplo, o *gap*. [36, 39]

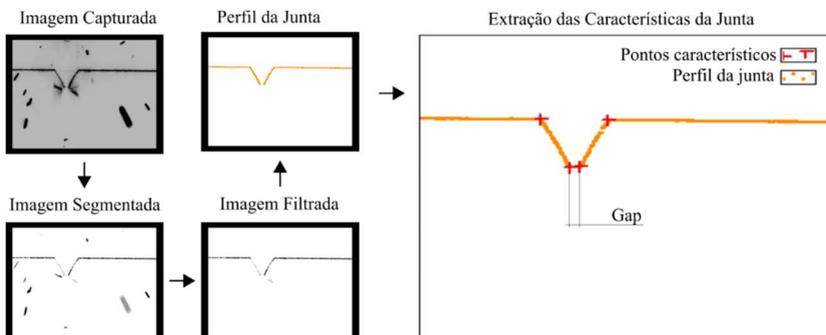


Figura 19 - Etapas do processamento de imagem de um STL para soldagem.

Diferentes estratégias de processamento de imagem podem ser utilizadas para realizar as etapas descritas. Entre estas estratégias estão a utilização de região de interesse, diferentes algoritmos de segmentação, filtros para remoção de ruídos, estratégias para extração da linha laser e análise do perfil de intensidade luminosa da linha. As principais estratégias encontradas na literatura são descritas a seguir.

3.5.1 Região de interesse

A região de interesse (*Region of Interest*, ROI) pode ser utilizada como um mecanismo de aumento da eficiência do processamento de imagem. Esta região é definida com base em uma localização grosseira da linha laser na imagem para reduzir a quantidade de informação processada. Este processamento acontece somente na região de interesse, dispensando o gasto computacional com regiões menos importantes da imagem. A literatura apresenta técnicas para definição da ROI que podem aumentar significativamente a eficiência programa do sensor. As técnicas de Máximos e mínimos, Acúmulo da intensidade da imagem e Estimativa da região de interesse são apresentadas a seguir.

A técnica de máximos e mínimos estima as posições extremas da linha laser ao longo das linhas e colunas da imagem. Primeiramente a

intensidade de fundo da imagem é calculada. O algoritmo que calcula esta intensidade faz uma média dos valores de uma amostragem dos pixels da imagem. Assumindo que a linha laser terá valor mais elevado que o fundo é realizado um processamento para encontrar ao longo das linhas e colunas da imagem, as posições máximas e mínimas da linha laser. A Figura 20 ilustra a região de interesse e os pontos máximos e mínimos das linhas e colunas u e v . A imagem aparece com cores invertidas para melhor visualização [40].

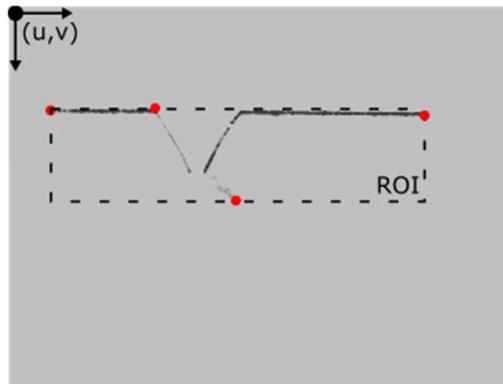


Figura 20 - Técnica de máximos e mínimos para definição da ROI.

A técnica de acumulo de intensidade pode ser aplicada para definição da ROI em imagens ruidosas. Esta técnica é baseada no conhecimento da forma e orientação da linha laser nas imagens capturadas pelo STL. Para definir a ROI, os valores de intensidade dos pixels de cada linha da imagem são somados. Analisando o perfil de intensidade desta soma é possível encontrar a provável posição da linha laser na imagem. Em uma imagem com uma linha laser horizontal os valores luminosidade dos pixels de cada linha da imagem são somados. A Figura 21 apresenta a imagem da linha laser e o gráfico da intensidade acumulada das linhas da imagem. O pico de intensidade luminosa retrata a posição da linha laser. A ROI pode ser definida com base no conhecimento geometria esperada da imagem da junta e na posição do pico de intensidade [39, 41].

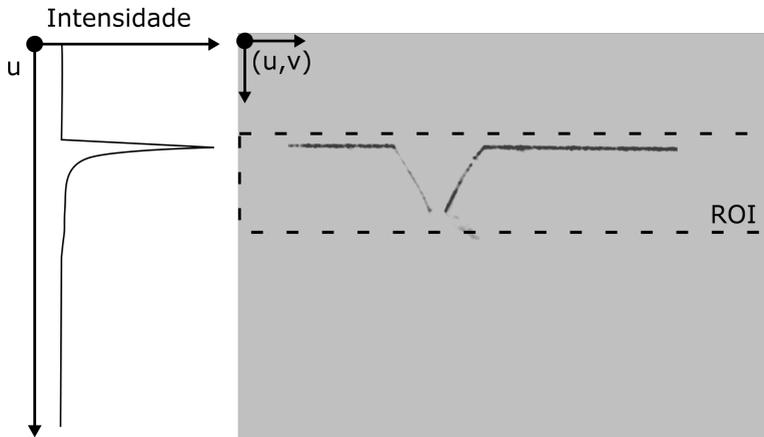


Figura 21 – Técnica de acumulo de intensidade para definição da ROI.

A técnica de estimativa da região de interesse leva em consideração a posição da linha laser em imagens anteriores. No procedimento de seguimento de junta, as informações do sensor são utilizadas para manter a posição relativa entre a tocha e a junta. Como o sensor se desloca junto da tocha, as variações de posição da linha laser na imagem em duas imagens consecutivas são pequenas. Desta forma, a posição da junta encontrada em uma imagem anterior deve ser muito próxima da posição na imagem atual. Uma média de posições da junta em imagens anteriores é utilizada para estimar a ROI de forma eficiente, e com um custo computacional baixo.

3.5.2 Segmentação da imagem

A segmentação de imagens consiste em separar a imagem em duas ou mais regiões. Esta técnica é bastante utilizada para remover os ruídos de fundo gerados pela de luminosidade gerada pelo arco elétrico durante a soldagem. Em imagens com poucos ruídos a linha laser apresenta intensidade luminosa mais intensa que o fundo e pode ser separada por um valor limite, ou *threshold*.

Diferentes técnicas para definir este valor limite de forma adaptativa são apresentadas pela literatura [42, 43]. Em imagens onde a luminosidade do arco é muito intensa, apenas um valor de corte não é suficiente. Desta forma, a imagem pode ser dividida em regiões e para que em cada uma delas seja definido um valor limite apropriado [40].

Outra técnica utilizada para definir o valor de corte da segmentação é a medição da intensidade luminosa do fundo da imagem por uma amostragem. Nesta técnica, o valor de corte é definido por uma média de medições do valor de fundo da imagem.

3.5.3 Filtragem e remoção de ruídos

A filtragem e remoção de ruídos é uma das mais importantes etapas de processamento de imagem. Inevitavelmente, a operação de segmentação não removerá totalmente reflexos e respingos de solda que se confundem com a linha laser. Os filtros podem atenuar ou remover estes ruídos para evitar falhas de medição em etapas futuras. Estes filtros se dividem em duas categorias sendo, filtros no domínio da frequência e filtros no domínio do espaço.

Os filtros no domínio da frequência se caracterizam pela transformação da imagem do domínio do espaço para domínio da frequência aplicando, por exemplo, a transformada de Fourier. A transformação é realizada e os filtros são aplicados no domínio da frequência. Após a aplicação do filtro a imagem é novamente transformada para o domínio do espaço. As imagens de respingos de solda aparecem no domínio da frequência como ruídos de alta frequência. Desta forma, a imagem pode ser submetida a um filtro passa baixa para remoção destes ruídos. Na prática, é muito difícil projetar um filtro que remova os respingos e reflexos devido à característica aleatória do ruído [39].

O Filtro *Wavelet* é uma alternativa que funciona como um filtro passa-alta no domínio da frequência destacando as linhas que aparecem uma determinada direção na imagem. O filtro apresenta bons resultados na remoção de ruídos e destacamento da linha laser [44]. A Figura 22 apresenta uma imagem capturada por um STL onde aparecem a linha laser e ruídos gerados por respingos em (A), e a imagem filtrada com o filtro *Wavelet* em (B) [45].

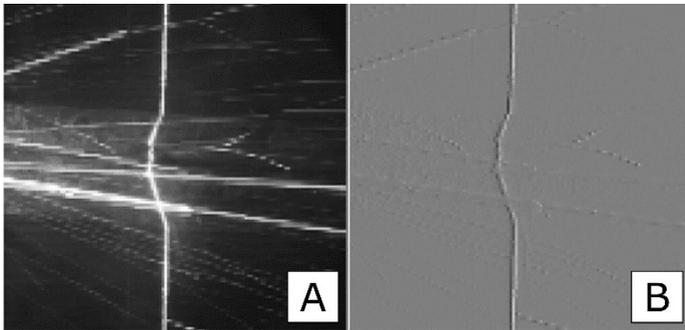


Figura 22 - Resultado do filtro *Wavelet* [45].

Os filtros no domínio do espaço são baseados em operadores morfológicos, e aplicados para destacar características, remover ruídos e suavizar as imagens. O operador morfológico é uma relação entre o pixel da imagem filtrada e os pixels vizinhos da respectiva posição da imagem original. A principal vantagem deste tipo de filtro é sua baixa complexidade e a possibilidade de paralelização, o que diminui muito o tempo de processamento. O principal problema é que o desempenho do filtro depende do tipo de ruído e do operador morfológico utilizado. Desta forma, é difícil projetar um filtro que atenda a todos os ruídos possíveis durante o processo de soldagem.

Estes filtros podem utilizar o conhecimento prévio da geometria da junta para escolha de um operador que atenua os ruídos e mantenha a linha laser. Por exemplo, os respingos presentes em imagens de STL são aproximadamente perpendiculares à linha laser. Desta forma, com o operador morfológico correto, a linha laser pode ser destacada e os ruídos atenuados. Outras aplicações como Abertura e Fechamento, baseadas em Dilatação e Erosão, podem remover pontos luminosos como salpicos presentes na imagem.

A característica dinâmica destes salpicos também pode ser utilizada como fundamento para remoção destes ruídos. Os salpicos gerados pelo processo de soldagem atravessam o campo de visão da câmera em uma velocidade muito superior ao deslocamento da linha laser na imagem. Sendo assim, a análise de duas imagens consecutivas pode identificar os ruídos gerados por salpicos. Esta análise é realizada pixel a pixel observando a variação de intensidade luminosa. A Figura 23 apresenta duas imagens consecutivas A e B, e a imagem resultado do filtro C. Para calcular a imagem C, é subtraída da imagem A, a diferença dos valores de pixel entre as imagens A e B.

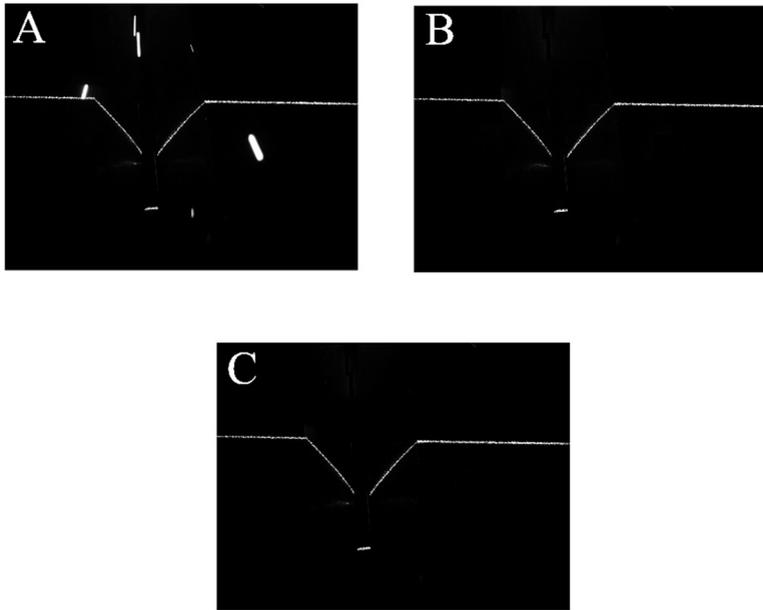


Figura 23 - Técnica de subtração da diferença de duas imagens consecutivas A e B, e o resultado do filtro em C.

Os filtros no domínio do espaço também podem ser empregados na detecção de bordas ou linhas da imagem. Entre os algoritmos conhecidos estão *Canny*, *Sobel*, e *Prewitt* [46]. Estes algoritmos destacam as linhas presentes nas imagens, mas acabam por não ter um efeito satisfatório uma vez que também destacam as linhas geradas por ruídos. [47]

3.5.4 Extração do perfil da linha laser

O perfil da linha laser pode ser entendido como o conjunto de pontos da imagem que melhor representa a geometria da junta. A informação presente no perfil contém, além da geometria, a posição do junta ou cordão de solda. O processo de extração deste perfil está diretamente ligado aos erros de medição do sensor. Mesmo aplicando as técnicas de segmentação, filtragem e destacamento da linha laser, inevitavelmente alguns ruídos continuarão presentes na imagem e poderão comprometer a medição. A seguir são apresentadas as técnicas

de extração do perfil da linha laser por detecção de borda de linha e *skeleton*.

A técnica de detecção de bordas da linha, apresentada por [40], deve ser aplicada em uma imagem filtrada e segmentada como a apresentada na Figura 24 (A). Os ruídos desta imagem foram completamente removidos e a imagem segmentada com uma técnica de *threshold*. Neste procedimento a imagem foi binarizada possuindo somente duas cores, preto e branco. Para a detecção de borda da linha, a imagem é processada coluna a coluna identificando o pixel onde existe a troca de cor dando origem a Figura 24 (B). Em cada coluna são identificados dois pixels da borda superior e inferior da imagem da linha. O cálculo do pixel de central da linha para cada coluna da origem a Figura 24 (C) que apresenta o perfil extraído.

Este algoritmo é dependente do perfeito funcionamento das etapas de filtragem e segmentação. Caso exista algum reflexo ou respingo na imagem o algoritmo não irá extrair o perfil de forma correta.

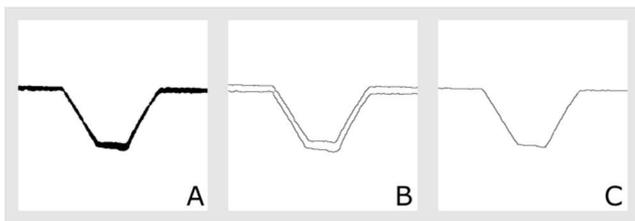


Figura 24 - Extração do perfil da junta por detecção de bordas (imagem filtrada (A), bordas (B) e perfil da linha (C))

O algoritmo *Skeleton* é um tipo de filtro no domínio do espaço que transforma uma imagem complexa em linhas. Depois da etapa de filtragem e segmentação imagem da linha laser é separada do fundo. O algoritmo *Skeleton* tem o propósito de transformar a imagem tornando a linha laser mais fina [48]. A Figura 25 apresenta as etapas de extração do perfil da junta com este algoritmo, sendo em (A) a imagem filtrada de uma junta, em (B) a imagem segmentada, em (C) a imagem processada com algoritmo *Skeleton* e em (D) o perfil da junta filtrado [35].

Depois de processada com algoritmo *Skeleton*, o perfil da junta pode conter ruídos. A remoção destes ruídos o perfil deve ser realizada com algoritmos de filtragem. O custo computacional do *Skeleton* é, muitas vezes, um limitante para aplicações de tempo real em sensores para soldagem. Este algoritmo é fortemente influenciado por ruídos presentes na imagem da linha laser.

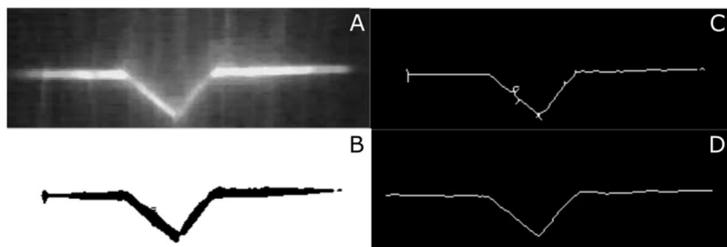


Figura 25 - Extração do perfil da junta com algoritmo *Skeleton* (imagem capturada (A), imagem filtrada (B), perfil extraído (C), perfil filtrado (D)), adaptado de [35].

3.5.5 Análise do perfil de intensidade luminosa

A extração do perfil da junta também pode ser realizada através da análise do perfil de intensidade luminosa da imagem ao longo de cada linha ou coluna. Dependendo da arquitetura do sensor a linha laser pode aparecer ao longo das colunas ou das linhas da imagem capturada. Em uma imagem onde a linha laser aparece na direção das linhas, a análise do perfil de intensidade luminosa das colunas é utilizada para extrair o perfil da junta. A Figura 26 apresenta a imagem da linha laser com “u” linhas e “v” colunas onde a coluna “n” é destacada e o perfil de intensidade luminosa apresentado.

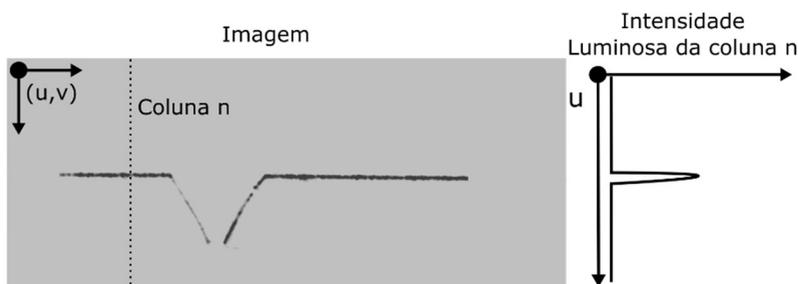


Figura 26 - Perfil de intensidade luminosa da linha laser.

O pico no perfil de intensidade luminosa da coluna representa um ponto em coordenadas (u,v) pertencente ao perfil da junta. A análise de das colunas resultará na extração completa do perfil. Dependendo da característica de ruídos presente na imagem, a análise do perfil pode não

ser tão simples. Em imagens com reflexos e respingos o perfil de intensidade luminosa pode conter mais de um pico. A seguir são apresentadas as técnicas para análise do perfil de intensidade luminosa com as técnicas de: Procura por valor máximo; Ajuste do perfil de intensidade; Cálculo do centro de gravidade do perfil; e Análise de múltiplos picos.

A técnica de procura por valor máximo consiste em utilizar o valor máximo do perfil de intensidade para encontrar o ponto pertencente ao perfil da junta [49]. A Figura 27 apresenta a técnica de análise do perfil por valor máximo. A imagem analisada possui 550 linhas e 750 colunas, onde o perfil de intensidade da linha apresenta dois picos luminosos, gerados pela linha laser e pelo reflexo. Este reflexo é gerado pelo acabamento superficial da junta e pelo ângulo de incidência da luz do laser. Neste caso valor máximo do perfil de intensidade corresponde à posição da linha laser na imagem [50].

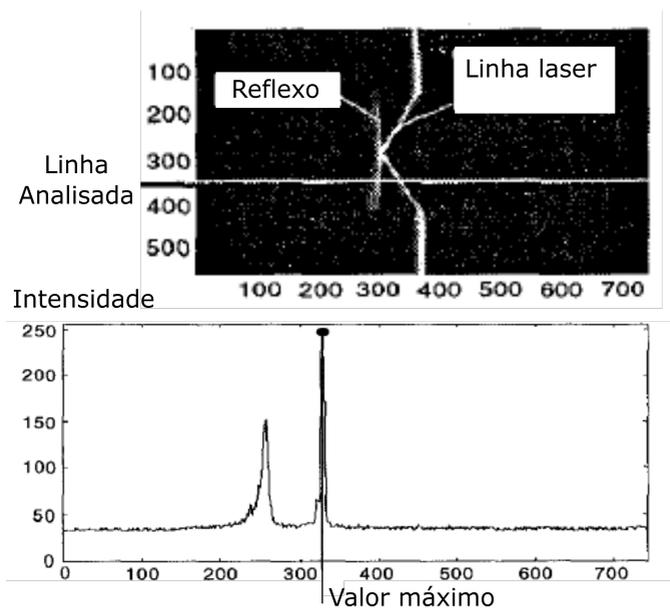


Figura 27 - Análise do perfil de intensidade com a técnica do valor máximo [50].

Esta técnica pressupõe que a linha laser é o ponto de luminosidade mais intenso na imagem, o que na prática, não é sempre verdade. Em regiões de alta reflexividade, ou com a presença de respingos, a linha laser

não é representada pelo pico de maior intensidade. Nestes casos o algoritmo não terá o desempenho esperado. Como ponto positivo a procura por valor máximo tem o custo computacional bastante baixo.

A técnica do ajuste de perfil de intensidade utiliza a característica do perfil de intensidade gerado por uma linha laser para encontrar a sua posição na imagem. Os picos gerados pela linha laser têm perfil aproximado de uma gaussiana, e esta característica pode ser utilizada para identificar a sua posição na imagem. A técnica utilizada procura ajustar uma equação de segundo grau ao perfil de intensidade luminosa. A posição central onde a o algoritmo ajustar a equação corresponde a posição da linha laser. Na prática, o perfil de intensidade pode apresentar variações de acordo com a direção de incidência do laser na superfície e característica de reflexividade da peça [39]. Esta técnica se destaca por conseguir diferenciar os picos de intensidade gerados por respingos grosseiros dos gerados pela linha laser. Adicionalmente, a técnica é capaz de identificar a posição do pico entre dois pixels, configurando uma resolução subpixel.

A técnica do cálculo do centro de gravidade do perfil de intensidade luminosa também pode ser utilizada na detecção da linha laser. O cálculo do centro de gravidade é ilustrado pela Figura 28, que apresenta uma representação de uma imagem capturada por um STL, onde a peça medida é uma junta em “V”. A imagem é composta por uma matriz de pixels organizados em linhas e colunas representadas pela letra “j” e “i”, respectivamente. As colunas “i” estão dispostas ao longo da largura e as linhas “j” e ao longo da altura da imagem.

A extração do perfil da linha laser é realizado pela definição da posição o pico de intensidade luminosa em cada linha “j”. A Figura 28 também apresenta o gráfico de intensidade luminosa ao longo da j-ésima linha. É possível observar que a intensidade luminosa sobre cada pixel da imagem. A posição do pico de intensidade pode ser encontrada através da equação do centro de gravidade, Equação 5 [51]. Esta equação é capaz de encontrar a localização do pico de intensidade luminosa com resolução subpixel.

$$C_j = \frac{\sum(P_{ij} * i)}{\sum P_{ij}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

C_j : posição do centro do pico de intensidade luminosa.
 P_{ij} : intensidade luminosa do pixel.

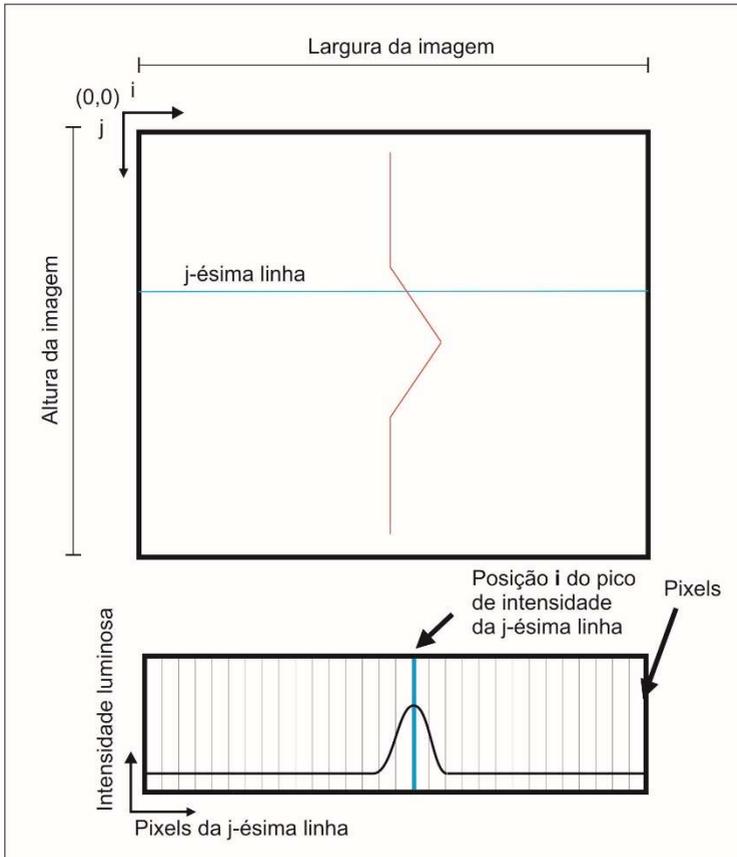


Figura 28 - Centro de gravidade do perfil de intensidade luminosa da j -ésima linha, adaptado de[51].

O centro de gravidade pode ser fortemente influenciado pela presença de um segundo pico de luminosidade. Esta técnica pode ser aplicada em conjunto com a procura por valor máximo. Nesta combinação o cálculo do centro de gravidade é realizado em uma janela em torno da posição do valor máximo. Esta combinação ainda pode minimizar efeitos

do deslocamento do valor máximo devido às características de reflexividade [50].

A técnica de análise múltiplos picos é uma estratégia de extração do perfil da junta que leva em consideração diferentes picos de intensidade luminosa gerados por ruídos, ou pela linha laser. Um grande problema de algoritmos como os de procura por valor máximo e ajuste de intensidade é que na presença de um segundo pico o algoritmo pode falhar na detecção do perfil. Em diversos casos, os respingos que cruzam o campo de visão da câmera e mesmo depois de filtrados, podem apresentar intensidade luminosa superior ao pico da linha laser. Pequenos salpicos ou reflexos da linha laser, que incidem sobre a junta, podem gerar picos de intensidade luminosa com forma parabólica, comprometendo o funcionamento do algoritmo de ajuste de intensidade. A Figura 29 apresenta uma imagem capturada por um STL onde respingos e salpicos geram múltiplos picos de intensidade luminosa. No gráfico de intensidade luminosa é possível observar que o pico gerado pela linha laser é menos intenso que o pico gerado pelo respingo. Neste caso o algoritmo de valores máximos não terá o funcionamento correto. O pico de intensidade gerado pelo salpico tem geometria parabólica, semelhante ao pico da linha laser, o que compromete o funcionamento do algoritmo de ajuste de intensidade.

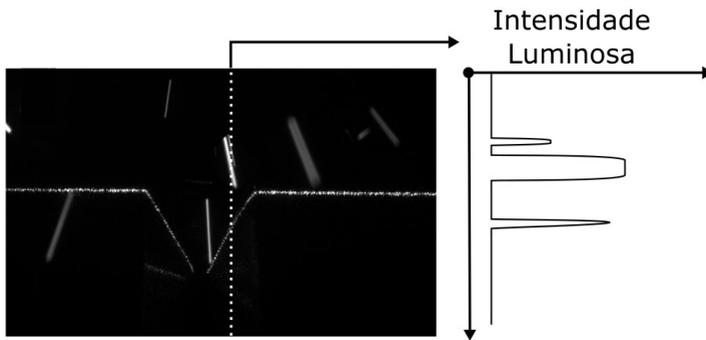


Figura 29 - Múltiplos picos de intensidade luminosa.

Quando o perfil de intensidade apresenta múltiplos picos, é necessário que seja aplicado um algoritmo que escolha entre os picos encontrados o que melhor representa o perfil da junta. Trabalhos acadêmicos apresentam três critérios diferentes para realizar esta seleção [36, 38, 50]. Os três critérios são o valor máximo, forma do pico e critério

de vizinhança. O critério de valor máximo utiliza a intensidade do pico e o de forma utiliza a geometria esperada para escolher o ponto representante do perfil da junta. A Figura 29 mostra que estas estratégias não são suficientes para a perfeita extração do perfil. Na situação apresentada, a alternativa mais adequada para definir o pico que representa o perfil da junta é o critério de vizinhança. Este critério utiliza o conhecimento prévio da geometria da junta para realizar a escolha do pico. Devido a geometria da junta é esperado que a distância entre dois pontos consecutivos do perfil da junta seja pequena. Desta forma, a escolha do pico de intensidade luminosa pode ser feita com base na análise das colunas próximas da analisada.

A literatura apresenta esta técnica como solução para lidar com múltiplos picos presentes no perfil de intensidade [36]. Os algoritmos utilizados para o critério de vizinhança não são amplamente explorados pelos autores.

O perfil da junta pode ser utilizado para encontrar as características geométricas como *gap*. Algumas estratégias de extração das características da junta são apresentadas a seguir.

3.6 EXTRAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA JUNTA

Uma das principais dificuldades enfrentadas no desenvolvimento de sensores de triangulação laser para soldagem é a extração das características da junta. Em etapas de processamento anteriores, a imagem capturada pelo sensor é filtrada e processada resultando no conjunto de pontos do perfil da junta. Este conjunto de pontos, por si só, não é uma informação importante para o controle do processo de soldagem. Entretanto, o processamento deste conjunto de pontos pode resultar nas características geométricas da junta, fundamentais para este controle.

Normalmente as formas das juntas são bem definidas e conhecidas. No caso de juntas do tipo “V”, as extremidades e cruzamentos das linhas presentes no perfil dão origem aos pontos característicos da junta. Estes pontos são empregados no cálculo das características da junta como *gap*, ângulo do chanfro, área da seção transversal entre outros [27, 28]. Neste capítulo, serão apresentados os algoritmos de extração dos pontos característicos da junta, pelas derivadas do perfil, ajuste linear e correlação de padrões.

3.6.1 Extração das características da junta com a técnica de derivadas do perfil da junta

O algoritmo de derivadas pode ser aplicado em juntas compostas por arestas retas como, por exemplo, uma junta em “V”. O algoritmo utiliza a característica de variação da inclinação do perfil da junta para encontrar os pontos característicos. Para que este algoritmo tenha um bom desempenho, o perfil da junta deve ser filtrado e os ruídos removidos. A Figura 30 apresenta o princípio de funcionamento do algoritmo de derivadas. O algoritmo parte de uma imagem capturada por um STL onde é possível observar um ponto de luminosidade intensa, Figura 30 (A). A partir desta imagem, o perfil da junta foi definido com o algoritmo de centro de gravidade, Figura 30 (B). O perfil extraído é derivado duas vezes em relação as colunas da imagem e apresentado em Figura 30 (C). Os picos presentes na segunda derivada do perfil do chanfro dão origem aos pontos característicos da junta [36, 52].

O ruído gerado pela reflexividade da peça aparece no perfil da junta e na segunda derivada do perfil. Neste caso, os picos gerados por ruídos eram menos intensos que os gerados por pontos característicos e não geraram falha de medição. Entretanto, em sinais muito ruidosos podem ocorrer falhas.

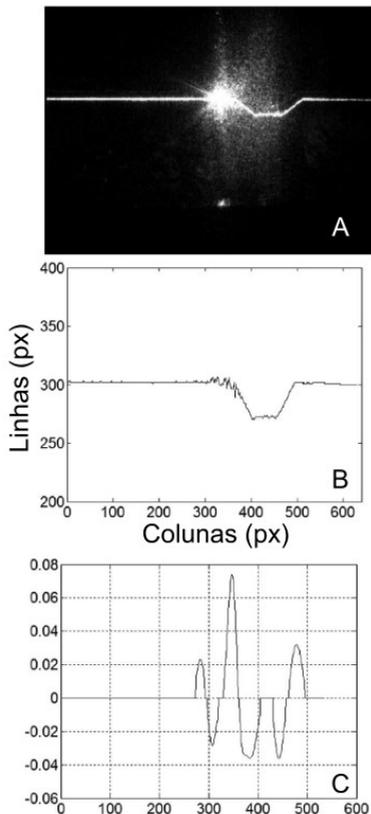


Figura 30 - Princípio de funcionamento do algoritmo de derivadas (imagem capturada (A), perfil da junta (B), segunda derivada do perfil (C))

3.6.2 Extração das características da junta com a técnica de ajuste linear

Os algoritmos de ajuste linear são aplicados onde a imagem da linha laser é composta por uma sucessão de retas. Estas retas são extraídas da imagem da linha laser pelo processamento do perfil da junta. A partir dos pontos do perfil da junta, podem ser realizados cálculos de ajuste linear para se encontrar as retas. Os pontos de início e fim destas retas dão origem aos pontos característicos da junta.

Uma estratégia para extrair as retas da imagem é por meio da transformada de Hough [47, 53]. Esta transformada é aplicada na imagem para se encontrar as retas sem a necessidade de extração do perfil. A

Figura 31 apresenta a imagem filtrada de um chanfro “V” e a imagem marcada com as linhas extraídas com a transformada de Hough [53].

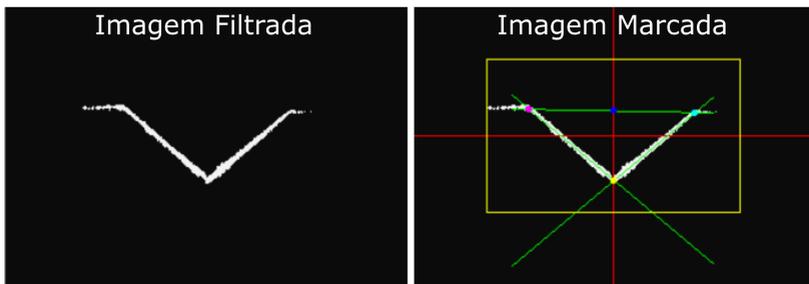


Figura 31 – Algoritmo de extração das características da junta utilizando a transformada de Hough [53].

Esta técnica é capaz de extrair retas mesmo quando aplicada em imagens ruidosas. Um ponto que tem limitado a aplicação do algoritmo é o seu custo de processamento elevado.

3.6.3 Extração das características da junta com a técnica de correlação de padrões

Diferentemente dos algoritmos deste capítulo, o algoritmo de correlação de padrões não depende exclusivamente da extração do perfil da junta. A técnica utiliza padrões previamente salvos para encontrar os pontos característicos da junta na imagem processada. Esta técnica se mostrou eficaz na medição de peças com alta reflexividade [54, 55]. A Figura 32 apresenta os resultados da referência [54] onde o algoritmo de correlação de padrões foi utilizado na medição de juntas usinadas em titânio, material de alta reflexividade. É possível observar que a imagem da linha laser aparece duplicada com linhas refletidas. Na Figura 32 (A) é apresentado o perfil da junta extraído com o algoritmo de centro de gravidade, onde o perfil aparece deformado em função das linhas refletidas. A Figura 32 (B) apresenta o perfil da junta extraído com o algoritmo de correlação de padrões. Devido a seu princípio de funcionamento, o autor recomenda que os padrões de correlação sejam criados no início de toda medição de uma nova peça. Este padrão é criado a partir de um recorte de uma imagem filtrada da linha laser e é correlacionado na posição do ponto de característico, como apresentado na Figura 32.

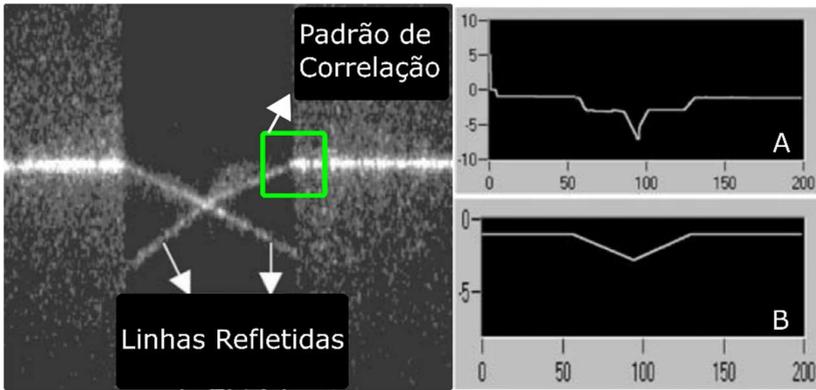


Figura 32 - Algoritmo de correlação de padrões.

4. DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE TRIANGULAÇÃO LASER

O sensor desenvolvido para aplicação em soldagem de união de tubos tem características metrológicas compatíveis com sensores comerciais dedicados à aplicação. O sensor é composto por uma câmera industrial com lentes e filtros óticos que permitiram a construção de um protótipo com característica modular. O emprego de uma câmera industrial reduziu a complexidade do projeto óptico e mecânico do sensor. A unidade de processamento de imagens e medição é composta por um computador de mesa que se comunica com a câmera por meio de protocolo ethernet. As imagens capturadas pela câmera são processadas em um *software* desenvolvido na plataforma LabVIEW [56]. O *software* permite a seleção e configuração de diferentes filtros e estratégias de processamento, permitindo o ajustes durante a aplicação do sensor. Esta característica permitiu o desenvolvimento e comparação de diferentes estratégias para medição das características da junta com este sensor.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO

O protótipo do sensor consiste em um conjunto óptico e carcaça com mecanismos de proteção ao ambiente de soldagem. A Figura 33 apresenta o protótipo montado junto a tocha e ao robô de soldagem. O conjunto óptico do sensor é composto por uma câmera industrial, lentes, filtro passa-banda, janelas óticas e um emissor laser. Entre os mecanismos de proteção do cabeçote estão a janela ótica descartável, sistema de cortina de vento, sistema de refrigeração e escudo contra respingos. A Figura 34 apresenta o sensor sem a tampa lateral da carcaça e os elementos citados anteriormente.

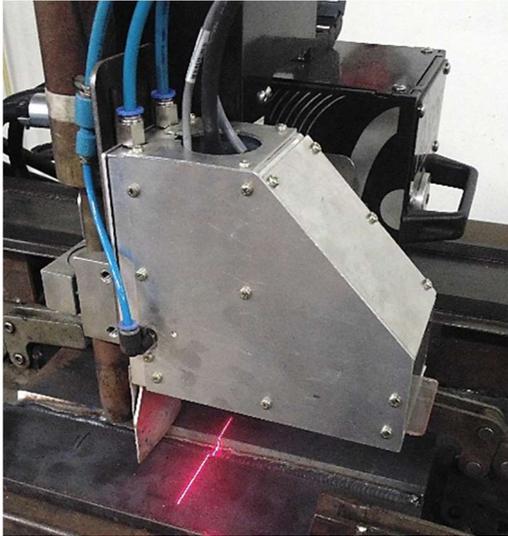


Figura 33 - Sensor de triangulação laser montado junto a tocha e robô de soldagem.

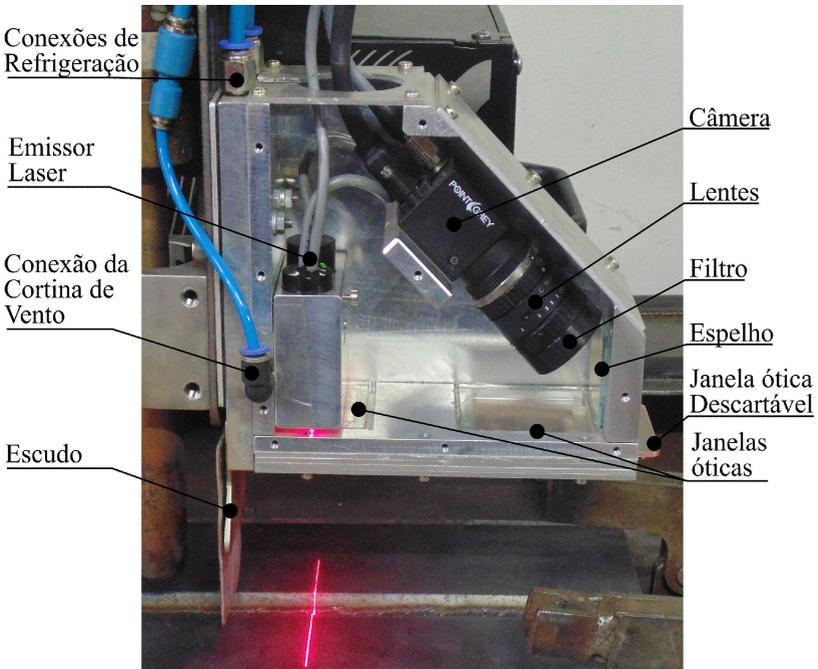


Figura 34 – Parte interna do sensor de triangulação laser

As características metrológicas de área de medição, resolução e dimensão do sensor estão apresentadas na Tabela 4. Devido ao projeto ótico do sensor, o campo de medição varia ao longo da profundidade de medição entre um valor mínimo e máximo. Na tabela, a área de medição é descrita pelos valores máximos de campo de medição e profundidade de medição. Outra característica importante do sensor é o *Stand off*, que pode ser entendido como a distância ente o sensor e o início da faixa de medição. Também são apresentadas as dimensões do equipamento.

Tabela 4 - Características do sensor desenvolvido.

Característica	Especificação
Campo de medição (mm)	60
Profundidade de medição (mm)	80
<i>Standoff</i> (mm)	60
Resolução Horizontal (mm/pixel)	0,05
Resolução Vertical (mm/pixel)	0,09
Largura do cabeçote (mm)	70
Altura do cabeçote (mm)	134
Profundidade do cabeçote (mm)	160

4.2 PROJETO ÓPTICO E SELEÇÃO DE COMPONENTES

O projeto ótico do sensor compreende a seleção e disposição dos componentes ópticos para alcançar os requisitos do projeto. A Figura 35 apresenta o projeto ótico com a disposição dos componentes e área de medição do sensor. A área de medição é definida pela intersecção entre a

folha de luz projetada, e o campo de visão da câmera. O projeto utiliza um espelho de primeira face para direcionar o campo de visão da câmera e diminuir o tamanho do sensor. A disposição do projetor laser, câmera e espelho definem a área de medição do sensor. O ângulo entre o eixo óptico da câmera e o projetor laser é igual a 45° .

O modelo da câmera selecionada para compor o sensor é FL3-GE-13S2M-CS [57] e suas especificações principais são descritas na Tabela 5. A Tabela 6 apresenta as especificações da lente utilizada [58]. O filtro utilizado é do tipo passa-banda com valor de referência igual a 650nm e banda passante igual a 25nm. A Tabela 7 apresenta as especificações do módulo laser utilizado no projeto do sensor [59].

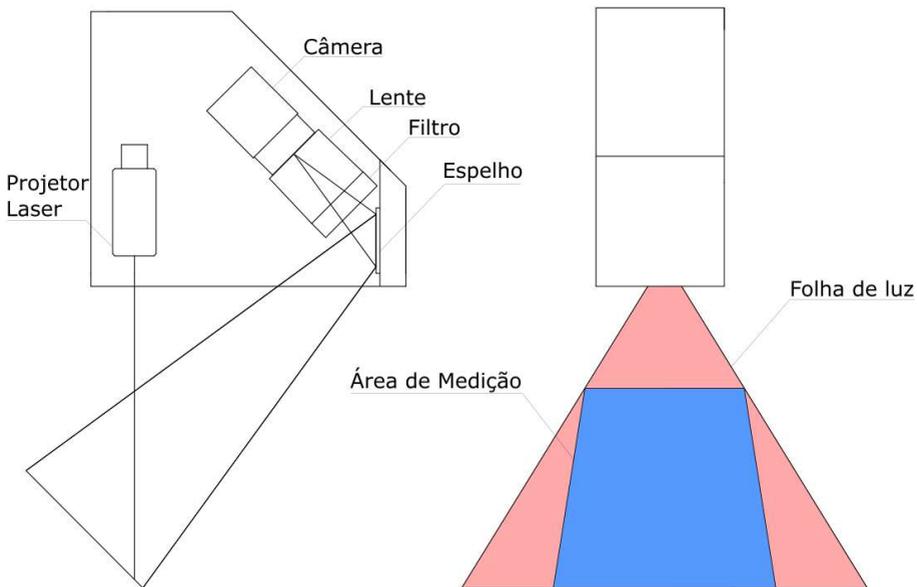


Figura 35 - Projeto óptico e área de medição do sensor.

Tabela 5 - Especificação da câmera.

Característica	Especificação
Resolução (px)	1288 x 964
Frames por segundo	31
Megapixels	1.3
Cor	Monocromática
Resolução de cor	12 bit
Tipo do sensor	CCD
Método de leitura	Global shutter

Tabela 6 – Especificações da lente.

Característica	Especificação
Comprimento focal (mm):	16.0
Tamanho máximo do sensor	2/3"
Abertura (f/#):	f/1.4 - f/16
Distância de trabalho (mm):	300 - ∞
Campo de visão na mínima distância de trabalho (mm):	125.00
Campo de visão (sensor de ½")	22.70°
Rosca do filtro	M30.5 x 0.5
Comprimento (mm):	28.20
Diâmetro máximo (mm):	33.50
Peso (g):	60.00

Tabela 7 - Especificações do módulo laser.

Característica	Especificação
Modelo	Emissor laser com foco externo
Comprimento de onda nominal (nm)	650
Potência (mW)	40
Tipo de modulação	Síncrona
Ângulo de abertura	45
Tensão de operação (v)	5

4.3 PROJETO MECÂNICO

O projeto mecânico compreende as especificações do projeto óptico com relação a disposição dos componentes e dispositivos para suportar o ambiente da soldagem. Estes dispositivos são as janelas óticas, janela descartável, canal da cortina de vento e placa de refrigeração, Figura 36.

As janelas óticas são construídas com vidro de alta transparência com tratamento de antirreflexo. Este tratamento é importante para que não sejam criadas imagens duplas da linha laser ou da luminosidade gerada pelo processo. Estas janelas são protegidas por uma janela descartável construída em acrílico transparente. Eventuais respingos que poderiam danificar a janela óptica são contidos pela janela descartável, que é facilmente substituída quando danificada.

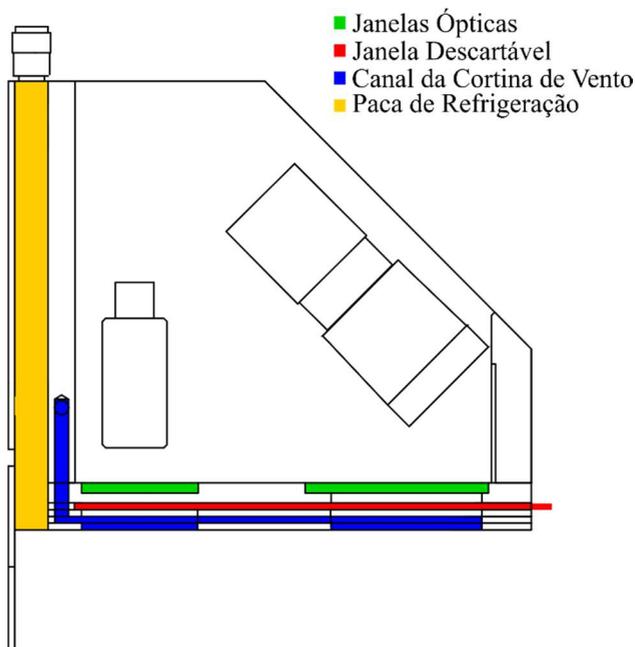


Figura 36 - Dispositivos do protótipo para proteção contra o ambiente de soldagem.

Em virtude da proximidade do sensor com a tocha de soldagem, e da presença de fumos, o sensor dispõe de um canal de cortina de vento. Este canal tem a função de estabelecer um fluxo de ar constante no campo de visão da câmara. Este fluxo cria uma área protegida de fumos na parte inferior do sensor. O fluxo de ar não pode ser muito intenso para que não ocorram perturbações no processo de soldagem. A Figura 37 apresenta a forma construtiva da cortina de vento do sensor desenvolvido.

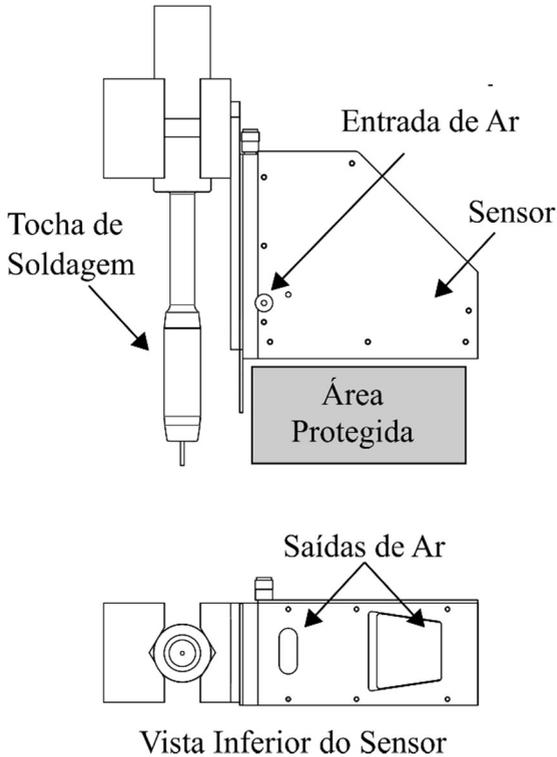
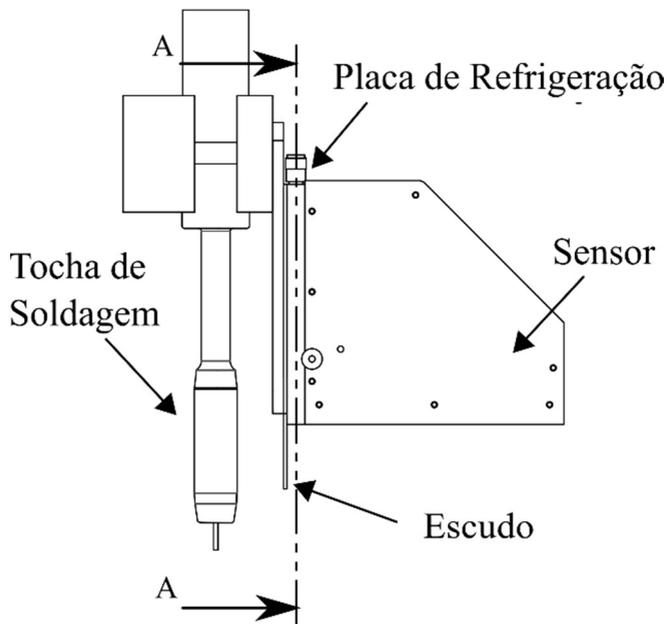
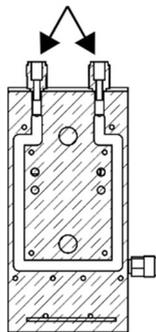


Figura 37 – Forma construtiva da cortina de vento.

O processo de soldagem pode ocasionar o sobreaquecimento do sensor. Por esse motivo foi desenvolvida uma placa de refrigeração. Esta placa tem a função diminuir a temperatura do cabeçote evitando que o calor danifique os componentes optoeletrônicos como a câmera e o emissor laser. A placa é posicionada entre a tocha de soldagem e o sensor, e serve de suporte para o escudo contra respingos, um dos componentes que mais sofre aquecimento. Para controlar a temperatura do sensor, a placa possui um canal que permite a passagem de ar comprimido resfriando o cabeçote. A Figura 38 apresenta a placa de refrigeração e o escudo contra respingos. O canal de refrigeração é apresentado no Corte A-A.



Conexões de Ar



Corte A-A

Figura 38 - Placa de refrigeração do sensor.

4.4 SOFTWARE DE MEDIÇÃO

O *software* do sensor foi projetado para garantir a flexibilidade de configuração dos filtros e processamentos realizados desde a captura de uma imagem até a o final da medição. O fluxograma da Figura 39 apresenta a sequência de funcionamento do *software* de medição. Inicialmente, o *software* disponibiliza a funcionalidade de utilizar imagens recém capturadas pela câmera, ou imagens salvas em banco de dados. A possibilidade de processar imagens salvas permite que sejam testadas diferentes configurações de filtros em uma mesma imagem com ruído. Depois da seleção do modo de entrada, uma imagem é carregada e os filtros selecionados são aplicados. Em seguida dos filtros, o algoritmo de medição é processado. Este algoritmo tem a função de extrair da imagem filtrada os pontos em coordenadas de pixels que apresentam a linha laser e as características da junta. Estes pontos são transformados para o sistema de coordenadas de medição. Os pontos característicos, descritos neste sistema de coordenadas, são utilizados para calcular as características da junta. Estas características podem sofrer influência dos ruídos do processo e resultar em falhas de medição. As medições processadas e enviadas ao sistema de controle do robô.

A Figura 40 apresenta a tela principal do *software* de medição do sensor. A tela é dividida em uma parte de configuração, (Figura 40 (A)) e outra de visualização da medição (Figura 40 (B)). Na parte de configuração, está disponível seleção do modo de entrada de imagens e ajustes da câmera. Estão disponíveis outras configurações nas abas de filtros de imagem e algoritmo de medição.

A parte de visualização da imagem apresenta a imagem atual, imagem processada, medição no sistema de coordenadas da medição e relatórios de medição.

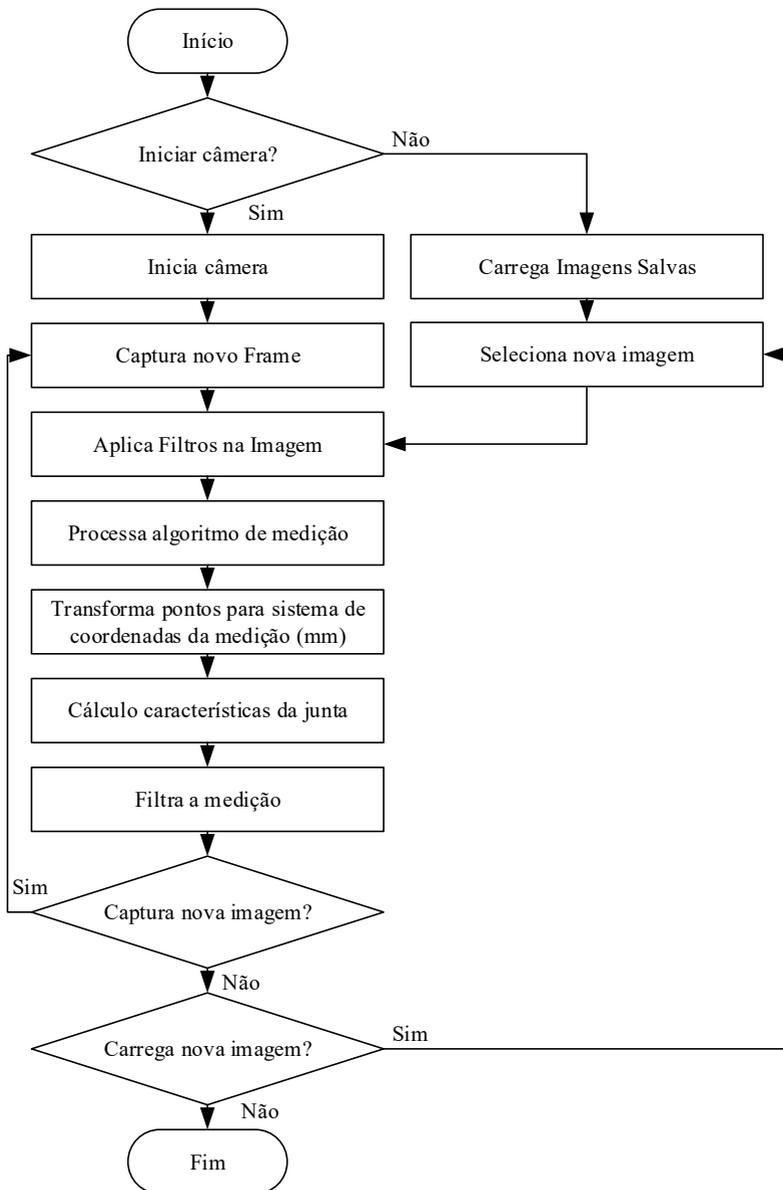


Figura 39 - Fluxograma do *software* de medição do sensor.

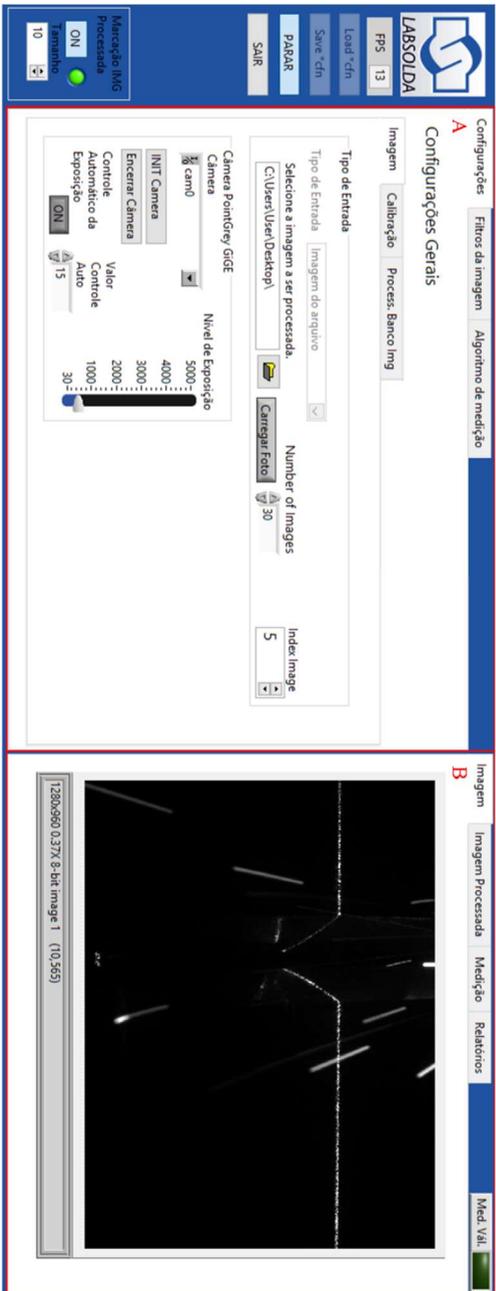


Figura 40 - Tela principal do software de medição.

A aba de filtros da imagem, apresentada na Figura 41, permite que a os filtros desenvolvidos sejam facilmente seleccionados pela lista de sequência de filtros (Figura 41 (A)). Os parâmetros de cada filtro disponível para utilização são configurados na sua respectiva aba, como apresentado na Figura 41 (B). Esta funcionalidade permite que diferentes combinações de filtro sejam facilmente implementadas.

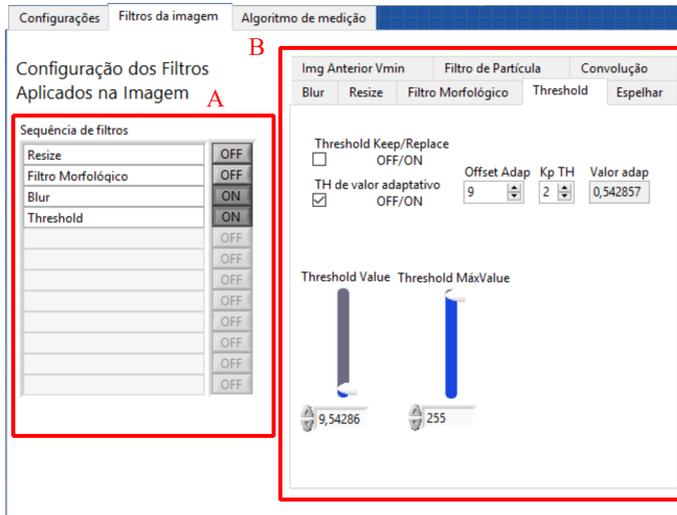


Figura 41 – Tela de configuração dos filtros da imagem.

A imagem filtrada deverá ser processada com o algoritmo de medição configurado na aba apresentada na Figura 42. E o resultado da medição representado no SCM (Sistema de Coordenadas da Medição) será exibido no gráfico apresentado na Figura 43. Além de exibir as informações o sistema envia a medição para o *software* de controle.

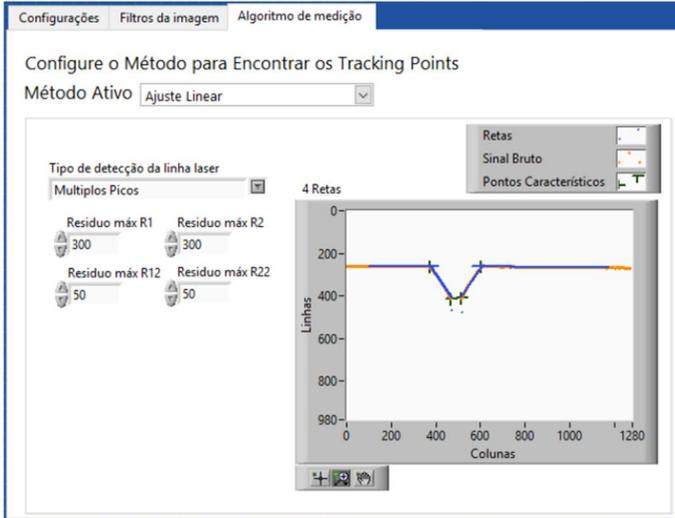


Figura 42 – Tela de configuração do algoritmo de medição.

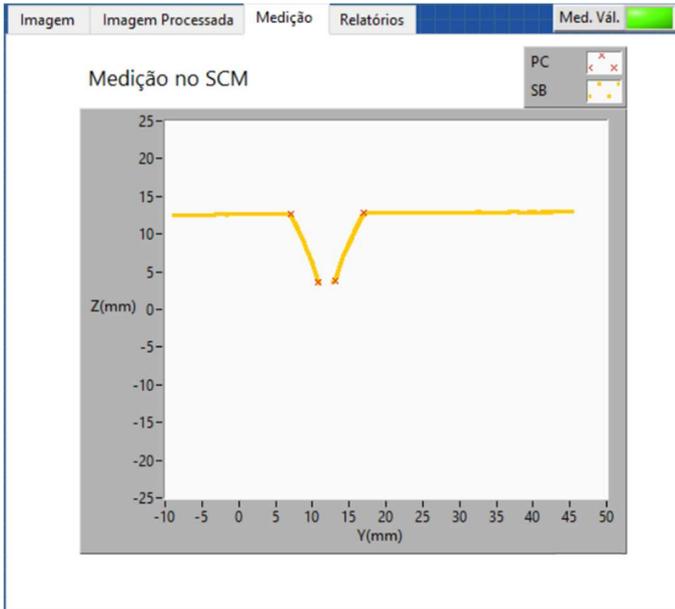


Figura 43 - .Gráfico de medições no Sistema de Coordenadas da Medição

4.5 ALGORITMOS DE EXTRAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA JUNTA.

O sistema proposto possibilita a configuração de diferentes algoritmos de extração das características da junta. Os algoritmos apresentados são baseados em uma sequência de filtros e estratégias de processamento desenvolvidas neste trabalho ou inspiradas na literatura. Foram desenvolvidos os algoritmos da Segunda Derivada, Ajuste Linear e Correlação de Padrões. Estes algoritmos são utilizados para encontrar os pontos característicos da junta. Estes pontos são aplicados no cálculo das características da junta, como por exemplo, o *gap* e a posição. Os dois primeiros algoritmos utilizam a estratégia de extração do perfil da junta para realizar a medição. Nestes casos a extração do perfil da junta é fundamental para o sucesso da medição. O terceiro algoritmo é baseado em padrões previamente salvos.

Os algoritmos da Segunda Derivada e Correlação de Padrões tem seu princípio de funcionamento baseado em trabalhos da literatura e o algoritmo de Ajuste Linear é uma proposta deste trabalho. A estratégia utilizada para extração do perfil da junta também é uma proposta deste trabalho.

A Figura 44 apresenta o diagrama das possibilidades de algoritmos de extração das características da junta disponíveis para configuração. Neste capítulo serão apresentados a estratégia de extração do perfil da junta e os algoritmos desenvolvidos.

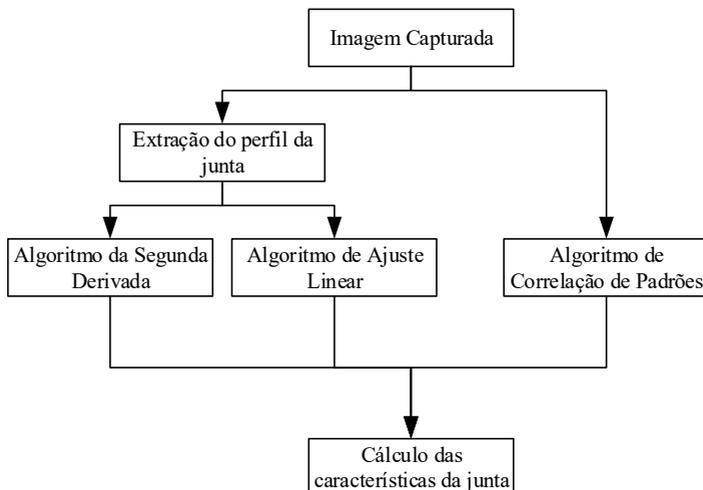


Figura 44 - Diagrama dos algoritmos de extração das características da junta.

4.5.1 Estratégia de extração do perfil da junta

A etapa de extração do perfil da junta consiste em transformar uma imagem capturada pelo sensor em um conjunto de pontos. Estes pontos devem descrever a geometria da junta na imagem. A principal dificuldade para extrair o perfil da junta é tratar os ruídos presentes na imagem. A estratégia desenvolvida para realizar esta tarefa utiliza filtros de imagem e de processamento de sinais. Inicialmente a imagem capturada é segmentada com a técnica *threshold* adaptativo [40]. Esta técnica consiste na estimativa do nível de intensidade do fundo da imagem para definição do valor do filtro. Sendo uma imagem $I(u,v)$ de altura H e largura W , o valor de fundo B é dado pela Equação 6 [40].

$$\left\{ \begin{array}{l} B = \frac{1}{WM_1 + HM_2} \left(\sum_{u=1}^W \sum_{v=1}^{M_1} I(u, 10v) + \sum_{u=1}^{M_2} \sum_{v=1}^H I(10u, v) \right) \\ M_1 = \text{Int} \left(\frac{H}{10} \right), \quad M_2 = \text{Int} \left(\frac{W}{10} \right) \end{array} \right\} \quad \text{Equação 6}$$

Eventuais respingos presentes na imagem podem apresentar intensidade superior ao valor de fundo encontrado, e permanecer na imagem depois da aplicação do *threshold*. A imagem segmentada é então processada com um filtro de partículas para remover estes respingos. Este filtro agrupa pixels próximos com características semelhantes para definir um objeto na imagem. Desta forma pode ser definido um grupo de objetos gerados pelas imagens de respingos, reflexos e da linha laser [60]. Os objetos identificados a partir das imagens de respingos e reflexos são muito menores que os gerados pela linha laser. Esta característica é utilizada para identificar e remover os ruídos. Entretanto, respingos que cruzam a linha laser no momento da captura da imagem, ou reflexos muito próximos à linha, podem ser agrupados ao objeto e permanecerem na imagem. Estes ruídos remanescentes serão tratados depois da extração do perfil.

O perfil da junta é extraído a partir da imagem filtrada com a técnica de múltiplos picos com critério de vizinhança [36, 38]. Nesta técnica o perfil de intensidade luminosa de cada coluna ao longo das linhas é analisada para definir o conjunto de pontos que melhor representa a junta. A luminosidade de cada coluna é analisada para encontrar as posições dos picos de intensidade. Estas posições são encontradas com o algoritmo de ajuste de polinômios quadráticos. Este algoritmo é capaz de encontrar múltiplos picos com resolução subpixel. A Figura 45 apresenta

a imagem de uma junta e os picos de intensidade encontrados em determinadas colunas. A imagem destaca o perfil de intensidade luminosa nas colunas “v” A, B e C. Na coluna A o perfil de intensidade luminosa contém somente um pico. A posição deste pico ao longo das colunas da imagem representa a posição da linha laser. As colunas B e C apresentam dois picos luminosos, sendo que um deles é gerado pela linha laser e outro por um reflexo presente no chanfro ou respingo cruzando a imagem.

Em imagens sem ruídos o pico de maior intensidade representa a posição da linha laser. Entretanto, em regiões onde existe a presença de ruídos gerados por reflexos ou respingos, o ruído pode gerar o pico de maior intensidade. Nestes casos, a análise dos diferentes picos presentes em uma coluna pode auxiliar na definição do ponto que melhor represente a linha laser. De acordo com a Figura 45 esta análise não pode ser realizada com base no valor máximo ou formato do pico. Neste trabalho a escolha do pico que melhor representa a linha laser é baseada no conhecimento prévio do tipo de junta e nos pixels vizinhos ao ponto analisado. Os conjuntos de picos de maior e menor intensidade, (Pico 1 e Pico 2) apresentados na Figura 46 são processados para encontrar o perfil da junta.

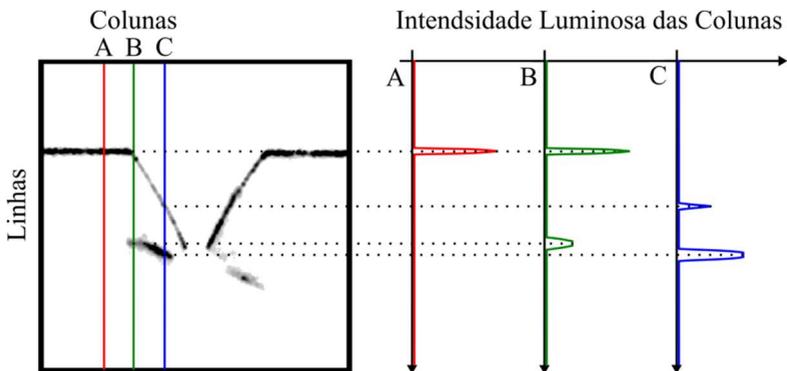


Figura 45 - Análise de múltiplos picos.

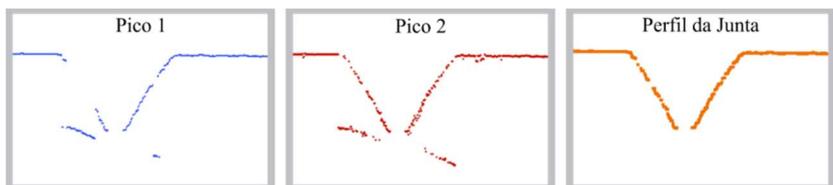


Figura 46 - Extração do perfil do chanfro a partir de múltiplos picos, Pico 1 (maior intensidade), Pico 2 (menor intensidade) e Perfil do chanfro.

4.5.1 Algoritmo de extração das características da junta com a técnica da segunda derivada

O algoritmo da segunda derivada tem seu princípio de funcionamento baseado em trabalhos apresentados na literatura. Este princípio utiliza a característica de variação da inclinação do perfil da junta para encontrar os pontos seus característicos [36, 52]. A análise desta variação é realizada com base na segunda derivada do perfil da junta. Esta operação de derivação tem por característica amplificar os ruídos de alta frequência gerados na extração do perfil. Estes ruídos podem ser atenuados por uma operação de filtragem. O filtro utilizado é baseado no algoritmo fuzzy Takagi-Sugeno descrito pela Equação 7 e Equação 8 onde, P representa o vetor de pontos do perfil da junta, P_f o perfil da junta filtrado e k a coluna filtrada [40]. O vetor P um elemento para cada coluna da imagem processada. Cada elemento armazena respectiva posição do pico de intensidade que representa a linha laser.

$$P_f(k) = \frac{\sum_{h=-5}^5 P(k-h)\mu(h)}{\sum_{h=-5}^5 \mu(h)} \quad \text{Equação 7}$$

Sendo $\mu(h)$ dado pela Equação 8:

$$\mu(h) = \begin{cases} 1 & -3 \leq h \leq 3 \\ 2 - \frac{|h|}{3} & 3 < |h| \leq 5 \\ 0 & |h| > 5 \end{cases} \quad \text{Equação 8}$$

Depois de filtrado o perfil da junta é derivado. A Figura 47 apresenta o perfil filtrado, e sua primeira e segunda derivada. É possível observar que a segunda derivada apresenta picos e vales de maior intensidade na posição onde se encontram os pontos característicos da junta. A posição destes picos ao longo das colunas é correlacionada com o perfil da junta, dando origem a posição dos pontos característicos em pixels.

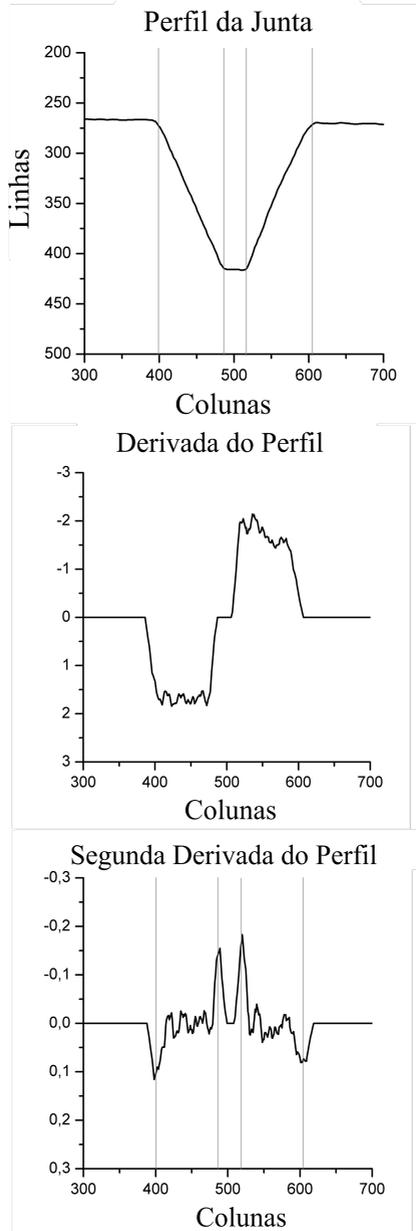


Figura 47 - Derivadas do perfil do chanfro.

4.5.2 Algoritmo de correlação de padrões

O algoritmo de correlação de padrões é capaz de encontrar pontos específicos da junta em uma imagem capturada pelo sensor. Desta forma, não é necessário extrair o perfil da junta para medir as suas características. Esta técnica tem como característica apresentar bons resultados na medição de peças com a presença de ruídos como reflexos ou respingos de solda [54].

Este algoritmo utiliza padrões previamente salvos, para correlacionar com a imagem capturada pelo sensor, e realizar as medições. A Figura 48 apresenta uma imagem capturada por um sensor durante o processo de soldagem, a imagem processada com a marcação das posições de correlação e os padrões utilizados. Estas imagens aparecem com a coloração invertida para melhor visualização.

Nesta técnica os padrões são criados a partir de uma imagem sem ruídos gerados por reflexo ou respingos. Desta forma, o sensor deve ser posicionado sobre uma região da junta onde a captura da imagem seja favorável para captura dos padrões. A imagem de origem dos padrões é submetida a um filtro gaussiano e binarizada por uma operação de *threshold*.

A imagem do perfil da junta é analisada pelo operador do sistema que indica as posições dos pontos característicos. A partir das posições indicadas o *software* cria os padrões. A posição de correlação destes padrões é localizada no centro das imagens. Os padrões 2 e 3 são automaticamente deslocados para que não contenham informação do lado oposto do chanfro. Este procedimento evita que uma variação no *gap* desloque a posição de correlação do padrão e introduza um erro na medição. O deslocamento na posição destes padrões é posteriormente compensado para encontrar a posição real do ponto característico. Quando a medição é iniciada, cada imagem capturada é processada com os mesmos filtros utilizados na criação dos padrões. A posição dos pontos característicos em pixel é obtida a partir da correlação entre a imagem filtrada e os padrões.

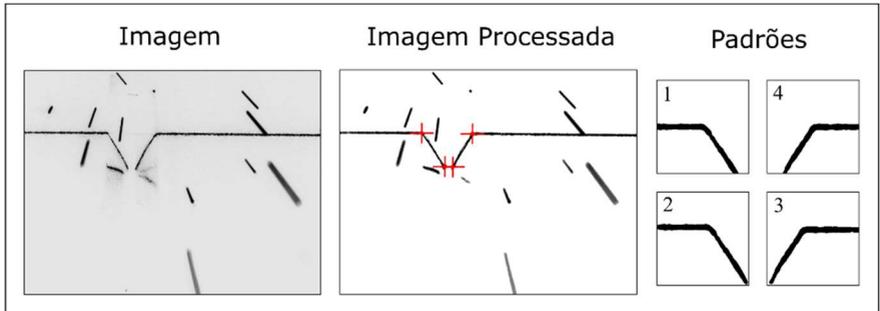


Figura 48 - Processamento de imagem para algoritmo correlação de padrões.

4.5.3 Algoritmo de ajuste linear

O algoritmo de Ajuste Linear tem seu princípio de funcionamento baseado no conhecimento da geometria da junta medida. Este algoritmo foi projetado para realizar medições de juntas do tipo “V”. A imagem capturada pelo sensor de triangulação laser na medição de uma junta deste tipo é composta por retas que são identificadas pelo algoritmo. A Figura 49 apresenta o perfil de uma junta e as retas R1, R2, R3, R4 e pontos característicos do perfil X1, X2, X3 e X4. As retas são encontradas a partir do método de ajuste de mínimos quadrados robusto *bisquare weights* [61-63]. Este método classifica os pontos medidos e atribui a eles pesos diferentes de acordo com a distância entre o ponto e a reta ajustada. Os pontos distantes da reta ajustada tem seu peso reduzido. Os pesos atribuídos aos pontos diminuem significativamente a interferência de outliers no ajuste das retas, o que atribui maior robustez ao algoritmo de medição.

Pontos perfeitamente alinhados resultarão em um ajuste com erro igual a zero. Para definir R1, é ajustada uma reta formada pelos pontos da coluna 0 até a coluna $n + 10$ sendo inicialmente $n = 0$. Caso o erro apresentado esteja abaixo de um valor de corte, n é incrementado e uma nova reta é ajustada. Este algoritmo se repete até que o erro ultrapasse o valor de corte definindo o final da reta R1.

A reta R2 é encontrada ajustando uma reta aos pontos das colunas n até $k + 10$ sendo inicialmente $k = n$. O valor de k é incrementado até que o erro da reta ajustada ultrapasse o valor de corte. As retas R3 e R4 são encontradas com a mesma técnica a partir da outra extremidade do perfil. Os pontos X1 e X4 são encontrados a partir da intersecção das retas R1 com R2 e R3 com R4. Os pontos X2 e X3 são definidos a partir da extremidade das retas R2 e R3.

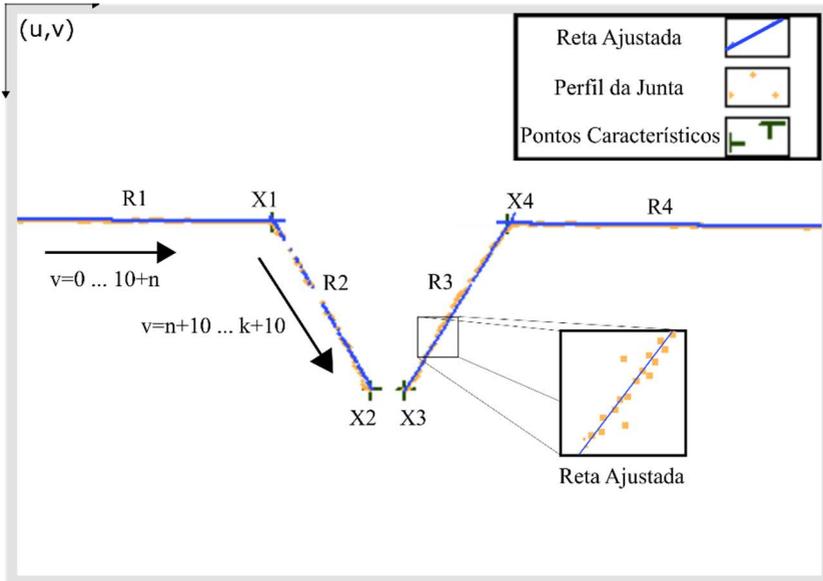


Figura 49 - Extração dos pontos característicos da junta com método de Ajuste Linear.

4.5.4 Cálculo das características da junta

O cálculo das características da junta deve ser realizado a partir dos pontos característicos representados no sistema de coordenadas da medição em milímetros. As informações obtidas no procedimento de calibração são utilizadas para realizar esta transformação. Estes pontos podem ser empregados no cálculo de diferentes características da junta como a posição e o valor do *gap*. A Figura 50 apresenta de forma esquemática o cálculo destas características, o ponto de seguimento (P_s), o *gap* e a reta principal do perfil. Esta reta é criada a partir dos pontos X_1 e X_4 e é utilizada no cálculo do P_s e do *gap*. Os pontos X_1 e X_2 são projetados sobre a reta principal, e P_s é posicionado no centro destes pontos. O valor de *gap* é definido a partir da distância entre os pontos projetados X_1 e X_2 ao longo da reta. Esta estratégia garante que mesmo com a variação da geometria da junta a posição utilizada na correção de trajetória continue centralizada no *gap*.

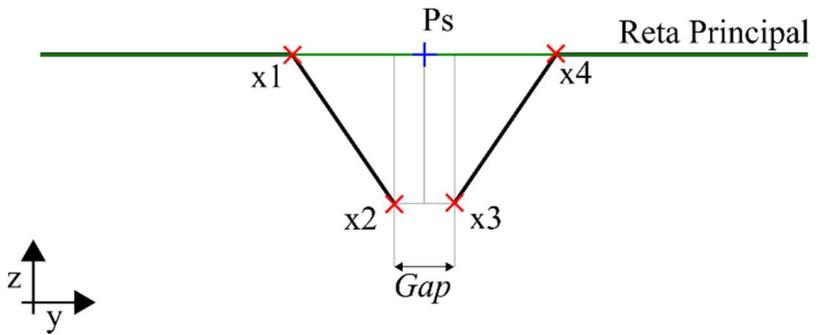


Figura 50 - Cálculo das características da junta.

5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE PARA SOLDAGEM

O sistema de controle desenvolvido utiliza um robô dedicado à soldagem de tubos, uma fonte equipada com o processo adequado para realizar passe de raiz, e um sensor de triangulação laser desenvolvido para medição da geometria da junta. Estes equipamentos são integrados a partir de uma unidade de controle que se comunica com todos os elementos do sistema. A Figura 51 apresenta o diagrama de comunicação do sistema.

A unidade de controle é composta por um computador de mesa que se comunica com a fonte de soldagem e com o robô por meio de comunicação serial RS232. A comunicação com o sensor é realizada por meio de protocolo Ethernet. O computador da unidade de controle executa dois *softwares* que realizam o processamento de imagem do sensor e o processamento das medições para controle do robô e da fonte. O *software* do sensor recebe a imagem capturada pela câmera e extrai as informações da posição e geometria da junta. As medições são armazenadas em um banco de dados e utilizadas pelo *software* de controle.

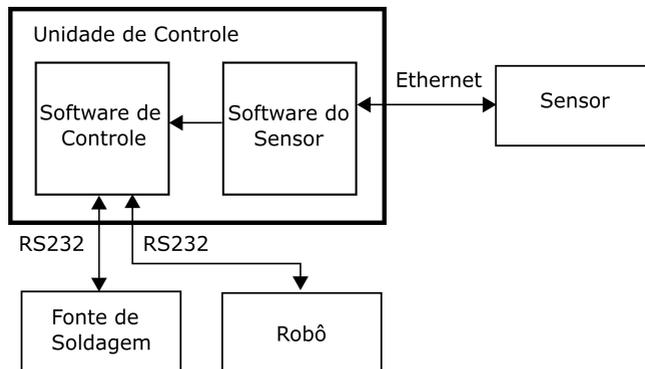


Figura 51 - Diagrama de comunicação do sistema de controle adaptativo.

O *software* de controle processa as medições do sensor e controla a fonte e o robô de soldagem. Para o robô de soldagem são comunicados parâmetros de movimentação como trajetória da tocha, amplitude, frequência de oscilação, tempo de parada, e recebidas informações sobre a posição atual do robô. O algoritmo de controle adaptativo utilizado é apresentado no Capítulo 2.2, [12].

Nos capítulos seguintes serão apresentadas as estratégias de tratamento das medições do sensor.

5.1 TRATAMENTO DAS MEDIÇÕES

As medições realizadas pelo STL carregam consigo os dados das características da junta, como o *gap*, posição do ponto de seguimento e a nuvem de pontos da superfície da junta. Estas medições são processadas de acordo com o fluxo de informações do *software* de controle da Figura 52. As medições realizadas pelo STL estão representadas no sistema de coordenadas da medição do sensor (SCM). Entretanto, as medições neste sistema de coordenadas não representam diretamente a junta. Para que a unidade de controle utilize estas medições, elas devem ser transformadas para um sistema de coordenadas fixo, como o Sistema de Coordenadas da Base do robô (SCB). Esta transformação é definida na calibração extrínseca do sensor, e é fundamental para interpretação das medições, uma vez que o sensor é movimentado durante a soldagem. Os dados do ponto de seguimento e da nuvem de pontos são transformados para o SCB. Outros dados da medição, como o *gap*, não necessitam de transformação e são apenas vinculados a medição.

A calibração extrínseca utiliza a medição no SCM, a informação da montagem do sensor junto ao robô, e a posição do robô no instante da medição para representar o dado medido no SCB. Esta transformação é dependente do sincronismo entre o momento da medição e a gravação referente posição do robô. Para garantir este sincronismo, o *software* do sensor informa ao *software* de controle o momento da captura de uma imagem para que a posição do robô seja gravada, e posteriormente relacionada à medição resultante da imagem.

As medições contendo a posição do robô e os dados medidos pelo sensor no SCB são armazenadas em uma lista para serem utilizadas no controle do processo. Esta lista da origem, a linha de seguimento de junta, ao perfil do *gap* ao longo do comprimento da junta e às nuvens de pontos da peça medida e da trajetória de movimentação. A lista de medições pode ser criada e utilizada durante a soldagem, ou criada antes, em um procedimento de inspeção, e utilizada durante a soldagem.

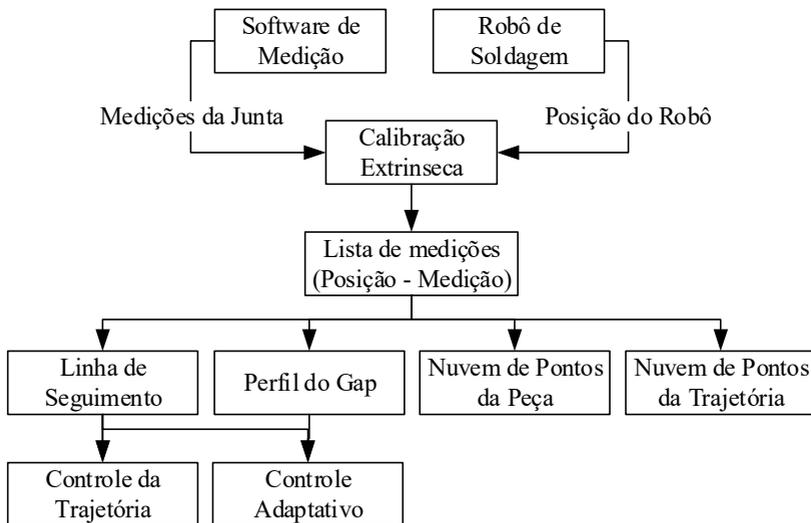


Figura 52 - Fluxo de informação do *software* de controle.

A linha de seguimento é o conjunto de pontos capturados pelo sensor em sucessivas medições que dão origem a trajetória de seguimento de junta. O perfil do *gap* é o conjunto de medições da abertura de raiz ao longo da junta. Devido a ruídos no processo de medição a linha de seguimento da junta e do perfil do *gap* podem não representar a real condição da junta. Para filtrar estes ruídos foram desenvolvidos dois algoritmos, o filtro de variação e o filtro de ajuste linear.

5.1.1 Filtro de variação

As características da junta medida pelo sensor, como a posição central da junta e o valor de *gap* possuem um comportamento de variação esperado. Devido a montagem da junta e usinagem dos chanfros, é esperado que o valor de *gap*, por exemplo, varie continuamente ao longo do comprimento da junta. Neste caso, entre duas medições consecutivas de um chanfro é esperado que o valor de *gap* ou posição medida apresente pouca variação. O filtro de variação utiliza este comportamento para realizar o processo de filtragem e descartar medições que não caracterizam a junta medida.

A Figura 53 apresenta uma junta e o gráfico contendo o valor de *gap* medido, o *gap* real e os pontos excluídos ao longo do comprimento

da junta. Nesta figura, é possível observar que os pontos excluídos apresentam um valor muito diferente das medições vizinhas.

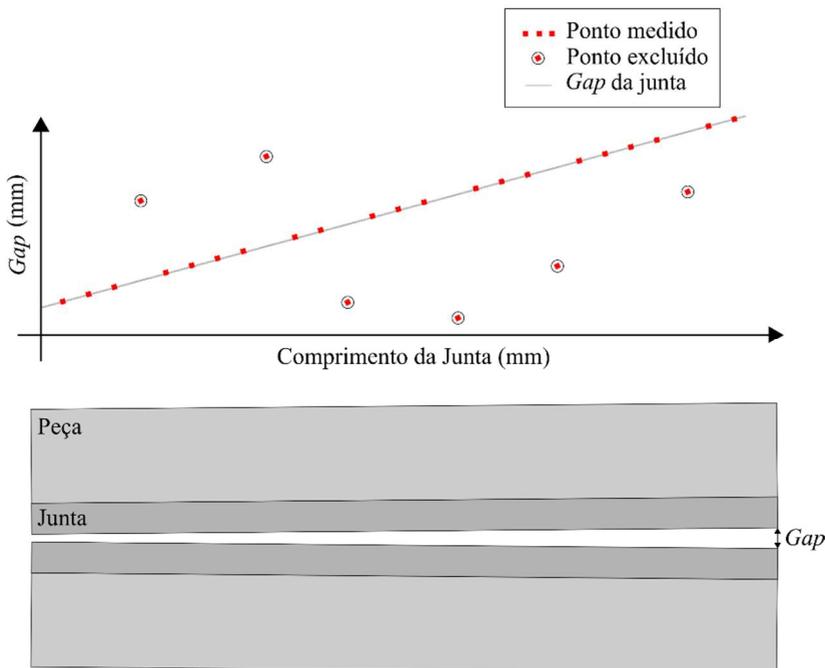


Figura 53 - Representação gráfica do filtro de variação.

O algoritmo utilizado para identificar estes pontos excluídos é apresentado no fluxograma da Figura 54. Para “n” medições de $Gap[]$ é calculado o módulo da diferença entre $Gap[n]$ e $Gap[n-1]$ definindo a variação da medição atual. Quando a variação for inferior a um limite, $Gap[n]$ é validado, caso contrário é descartado. O valor de variação limite utilizado no trabalho é tipicamente 1 mm.

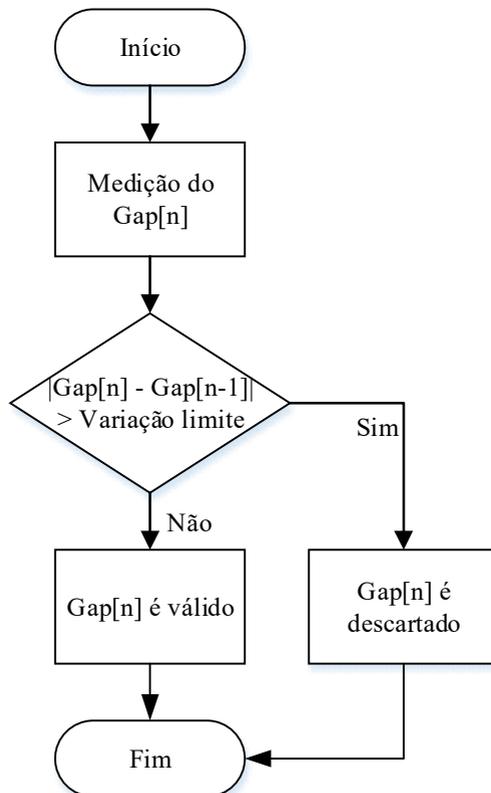


Figura 54 - Fluxograma do filtro de variação

5.1.2 Filtro de linearização da trajetória

As juntas normalmente utilizadas na união de tubos são predominantemente lineares. Esta característica se reflete na variação linear dos valores de *gap* e da posição central da junta. Devido ao processo de soldagem, os valores medidos pelo sensor podem apresentar ruídos e não possuir característica linear. O filtro de linearização utiliza a característica esperada da junta como princípio de funcionamento para suavizar os dados medidos.

O algoritmo utiliza uma janela de medições centrada no ponto filtrado para realizar a filtragem, como apresenta a Figura 55. Esta janela

compreende pontos à frente e atrás do ponto filtrado ao longo do comprimento da junta. Estes pontos são utilizados no cálculo de regressão linear para encontrar a reta que melhor os representa. O ponto filtrado é obtido a partir da reta e da posição central da janela. Este ponto é armazenado em uma lista de pontos filtrados. Quando finalizada a filtragem o centro da janela é deslocado para a próxima medição.

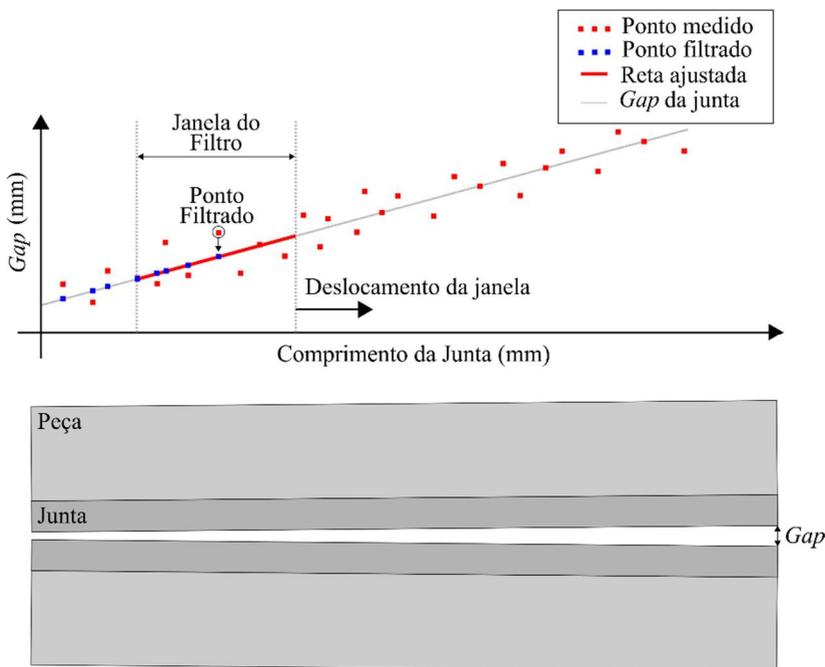


Figura 55 - Representação gráfica do filtro de ajuste linear.

5.2 RECONSTRUÇÃO DA LINHA DE SEGUIMENTO E PERFIL DO GAP

A linha de seguimento de junta e o perfil do *gap* são utilizados no controle de trajetória e dos parâmetros do processo de soldagem. Tanto a linha quanto o perfil do *gap* são criados a partir da lista de medições filtradas ao longo do comprimento da junta. A linha de seguimento é calculada a partir dos pontos de seguimento armazenados na lista de medição. Originalmente estes pontos apresentam uma característica ruidosa e não podem ser utilizados diretamente. Os pontos da lista são filtrados para reconstruir a linha de seguimento utilizada no controle de trajetória do robô.

Para compreender este processo, a Figura 56 apresenta de forma esquemática as variáveis do controle de trajetória como a posição da tocha de soldagem, linha laser, ponto de seguimento e a peça com a junta de soldagem.

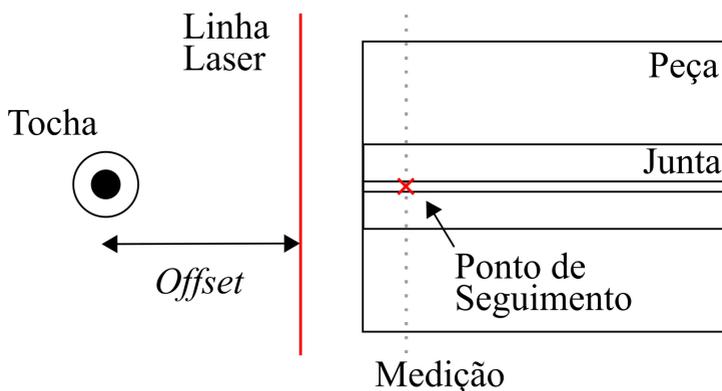


Figura 56 - Variáveis de controle de trajetória.

O procedimento de controle de trajetória do robô é apresentado no fluxograma da Figura 57. A primeira etapa deste procedimento é o posicionamento da tocha no ponto inicial da soldagem. A tocha de soldagem deve ser posicionada no centro da junta respeitando a distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) conforme a Figura 58(A). Para realizar medições na região do *offset*, é realizado o recuo da tocha ao longo do eixo X do robô, e a linha laser é posicionada sobre a posição inicial. Neste momento, o sensor é ativado e as medições da junta são armazenadas na lista de medições. A tocha é novamente deslocada para a

posição inicial enquanto as medições são realizadas e os dados são filtrados, conforme Figura 58(D).

A partir deste momento, a região entre a tocha e a linha laser é conhecida e o procedimento de soldagem ou inspeção da junta é iniciado. No procedimento de inspeção da junta o robô desloca a tocha no sentido do eixo X realizando a leitura da peça. Em um procedimento de soldagem a correção de trajetória é realizada, e o robô é deslocado de acordo com os pontos da linha de seguimento. O robô é deslocado ponto a ponto até que a soldagem seja interrompida pelo operador.

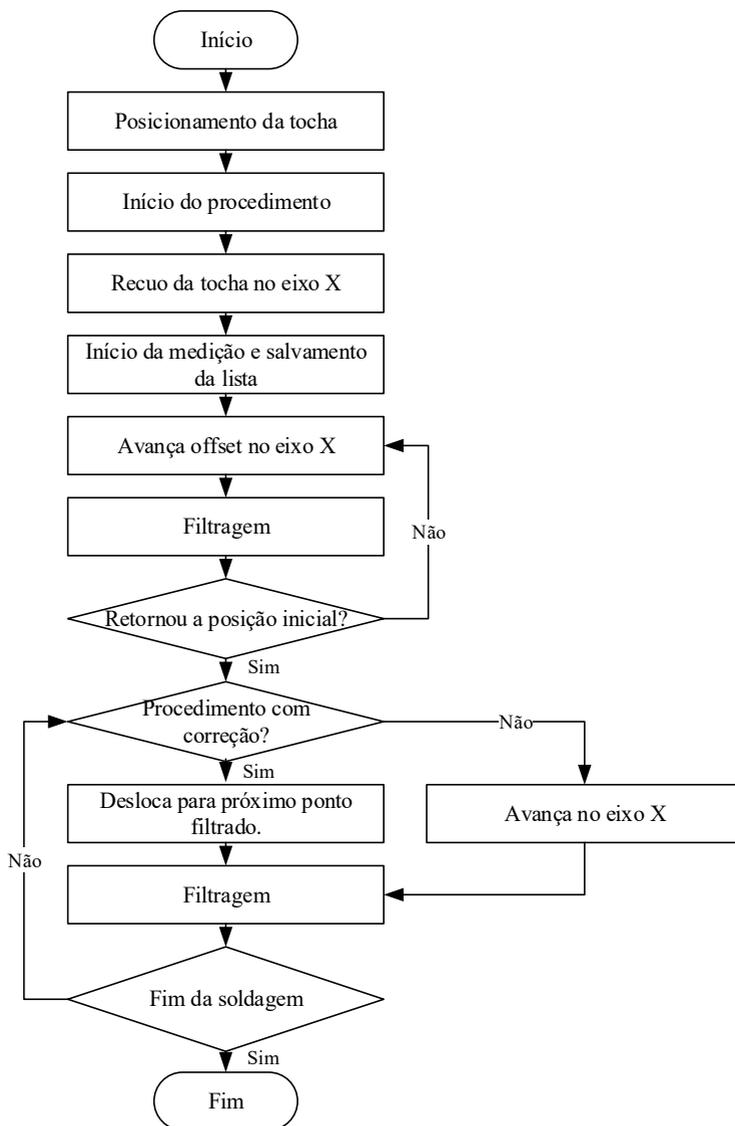


Figura 57 - Fluxograma do controle de trajetória da do robô.

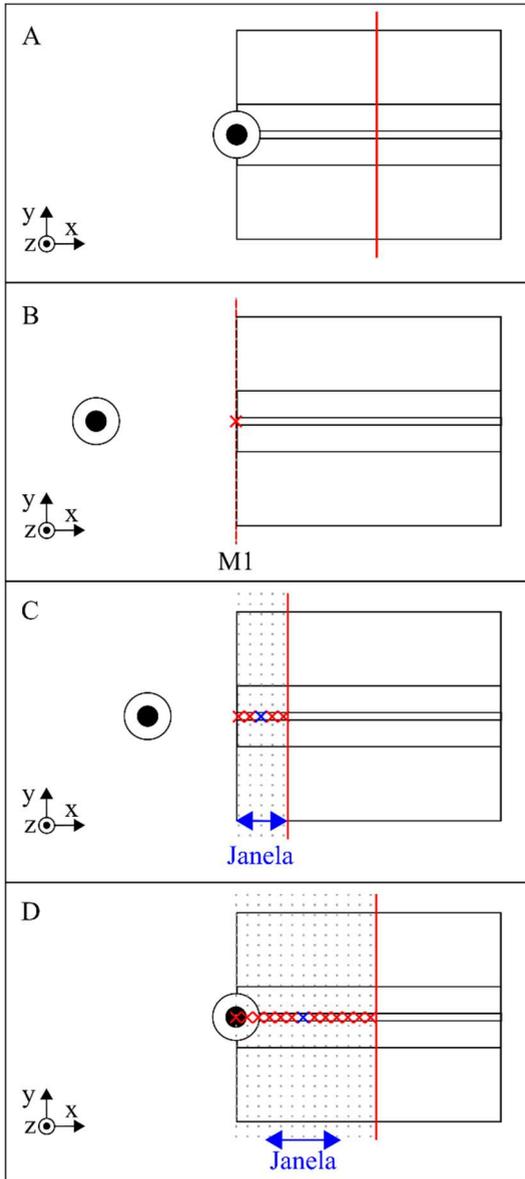


Figura 58 - Procedimento de recuo.

O processo de filtragem acontece separadamente para cada dado medido, como por exemplo, o *gap*, as coordenadas Y e Z dos pontos de

seguimento ao longo do eixo X do robô. Este processo é apresentado no fluxograma da Figura 59. Primeiramente o dado que se encontra na posição central do *offset* é selecionado para ser filtrado. Este dado é comparado com a medição anterior a ele no filtro de variação. Caso o dado não apresente uma variação admissível ele é descartado e o procedimento de filtragem deste dado é finalizado.

Apresentando uma variação admissível é definido o comprimento e posição central da janela do filtro de linearização. Esta posição é determinada pela posição do dado que está sendo filtrado ao longo do eixo X. O comprimento da janela pode ser definido nas configurações do filtro. Na etapa de avanço da tocha, Figura 58(C), a janela pode ser limitada pela distância entre a posição inicial da peça e a linha laser. Os dados filtrados são armazenados em uma lista de medições filtradas. Os pontos de seguimento filtrados dão origem a linha de seguimento, e os valores de *gap*, ao perfil do *gap*. Este perfil é utilizado na estratégia de controle adaptativo e a linha de seguimento no controle de trajetória.

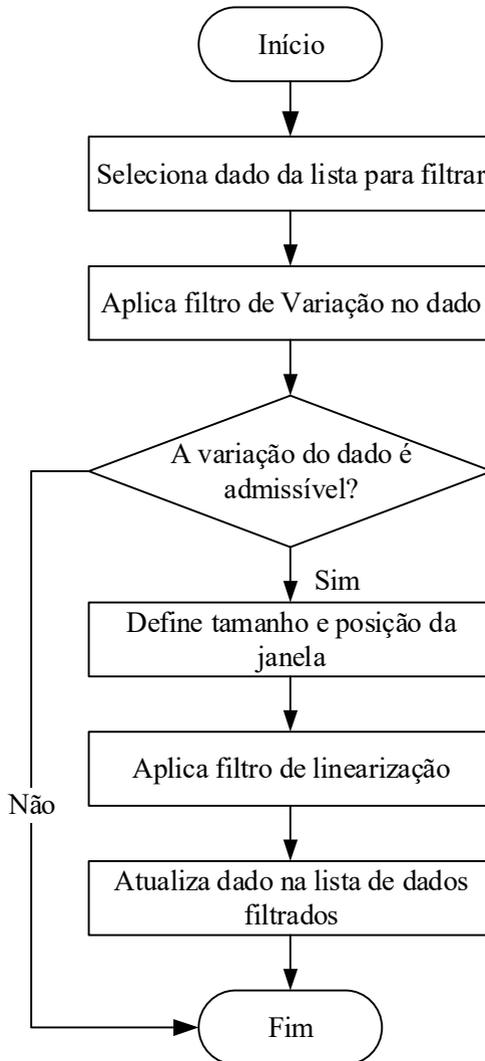


Figura 59 - Fluxograma do processo de filtragem.

6. AVALIAÇÃO DO SENSOR DESENVOLVIDO

Para avaliar o sensor desenvolvido, foram conduzidos ensaios de medição e ensaios de soldagem. Os ensaios de medição avaliaram a incerteza de medição apresentada pelo sensor na medição do gap com os algoritmos desenvolvidos. Os ensaios com soldagem apresentam os resultados obtidos na soldagem de corpos de prova com *gap* variável ao longo da junta. Nestes ensaios também é validada a estratégia de seguimento de junta e de controle dos parâmetros do processo de soldagem

6.1 BANCADA DE ENSAIOS

A bancada de ensaios utilizada, apresentada na Figura 60(A), é composta pela fonte de soldagem (1), conjunto robótico (2), e unidade de controle (3). A Figura 60(B) apresenta o sensor de triangulação laser (1) o robô de soldagem (2) e o suporte para corpos de prova (3).

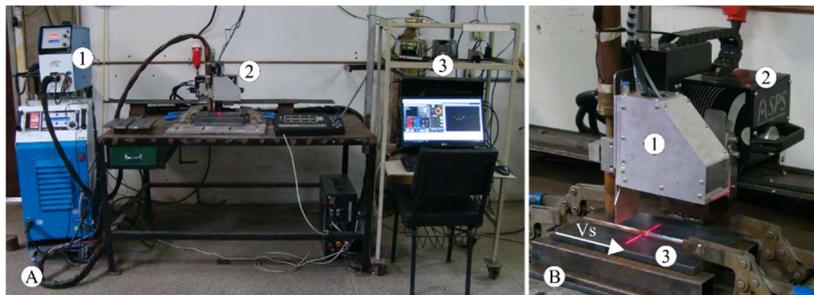


Figura 60 - Bancada de ensaios (A) e conjunto robótico (B).

O robô de soldagem utilizado é o TARTILOPE V4 [4], um robô cartesiano de três graus de liberdade preparado para utilização em trilhos retos flexíveis e em cintas para soldagem orbital. Para facilitar a fabricação de corpos de prova o robô foi montado sobre um trilho reto. A fonte utilizada é a DIGIPLUS da empresa IMC, equipada com o processo MIG/MAG CCC (Curto Circuito Controlado) [13, 64, 65]. A unidade de controle utiliza um computador de mesa com os *softwares* de medição e controle.

Esta unidade é responsável por receber as medições do sensor e informações da posição da tocha para controlar o robô e a fonte de

soldagem. As medições são processadas de acordo com os algoritmos do Capítulo 5.

6.1. AVALIAÇÃO DOS ALGORITMOS DE EXTRAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA JUNTA NA MEDIÇÃO DO *GAP*

Este trabalho aplicará a metodologia de controle adaptativo da soldagem, apresentada no Capítulo 2.2, para validar o desenvolvimento do sensor apresentado. Para o controle do processo de soldagem com esta metodologia, é necessário conhecer a posição e o *gap* da junta a ser soldada. O sucesso da estratégia de controle está especialmente vinculada à qualidade da medição do *gap*. Por este motivo, os autores avaliaram o sensor utilizado para definir a incerteza de medição associadas a esta característica da junta. O sensor utilizado por eles apresentou incerteza de medição associado ao *gap* igual a $0,20 \pm 0,29$ mm em operação simultânea a soldagem e $0,10 \pm 0,24$ mm sem a interferência do processo.

Para a aplicação do sensor desenvolvido com esta metodologia as medições do *gap*, realizadas pelo equipamento, devem apresentar incerteza de medição pelo menos igual ou inferior ao do sensor utilizado pelos autores.

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sensor e dos algoritmos desenvolvidos neste trabalho em medições do *gap*, foram realizados ensaios de medição de uma junta padrão antes e durante a soldagem de raiz. Estas duas condições permitiram a avaliação do sensor com a presença dos diferentes ruídos presentes na aplicação.

A junta padrão utilizada é composta por chapas de aço carbono SAE 1020 de 12,5 mm de espessura, usinadas com ângulo de bisel igual a 30° e 300,0 mm de comprimento entre os pontos de fixação. A montagem das chapas foi realizada de forma que o *gap* entre elas fosse aproximadamente 2,0 mm, com variações nesse valor advindas da usinagem e montagem do corpo de prova. O valor de referência do *gap* foi medido ao longo da junta com o auxílio de um paquímetro de resolução 0,05 mm a cada 30 mm do comprimento da junta.

Neste ensaio o sensor foi utilizado para capturar dois grupos de 2300 imagens do corpo de prova, sendo um grupo composto por imagens capturadas antes da soldagem e outro durante a soldagem do corpo de prova. Neste procedimento as imagens foram salvas no computador com uma frequência de 20 Hz. As imagens foram posteriormente processadas com os algoritmos de medição desenvolvidos neste trabalho. Os dois grupos de imagens foram capturados nas mesmas condições de

movimentação e configuração do sensor. A Tabela 8 apresenta os parâmetros de movimentação e soldagem utilizados nos ensaios. Os parâmetros de deslocamento foram apresentados na Figura 8

Tabela 8 - Parâmetros de soldagem do processo CCC para o ensaio de medição do *gap*.

Parâmetros de Soldagem	Parâmetros de Deslocamento			
Vel. de Arame [m/s]	Vel. de Soldagem [cm/min]	Amp. de Oscilação [mm]	Freq. de Oscilação [Hz]	Tempo de Parada [s]
3,2	15,6	2	1	0,3

As imagens foram processadas com os algoritmos apresentados no Capítulo 4.5 e as medições avaliadas quanto aos erros e falhas de medição. Uma falha de medição é definida quando o algoritmo não consegue medir um valor de *gap* ou quando este valor é superior ao valor máximo de 10 mm.

Os valores de *gap* medidos pelo sensor foram processados com os filtros de variação máxima e filtro de linearização, descritos no Capítulo 5.2, dando origem aos valores de *gap* filtrado. A incerteza de medição do *gap* em um grupo de imagens foi obtido a partir das diferenças entre o *gap* filtrado e *gap* de referência nas posições de medição. O cálculo da incerteza é apresentado pela Equação 9 expressa a faixa de valores em que se espera encontrar o erro de medição. Sendo *Ref*o valor de referência do *gap* na posição *n*, *GapF* o *gap* filtrado, *u* o desvio padrão do módulo do erro e *t* o coeficiente da distribuição de student para 95% de certeza em um conjunto de 11 amostras.

$$Erro = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^n GapF[n] - Ref[n] \mp t \cdot u \quad \text{Equação 9}$$

6.1.1 Resultados das medições do gap com os algoritmos desenvolvidos

A Figura 61 apresenta os resultados de medição do *gap* com o algoritmo de Correlação de Padrões aplicado em imagens capturadas antes (A) e durante a soldagem (B). Durante o processamento das imagens com este algoritmo, o *software* de medição processou os frames com frequência de 14 Hz.

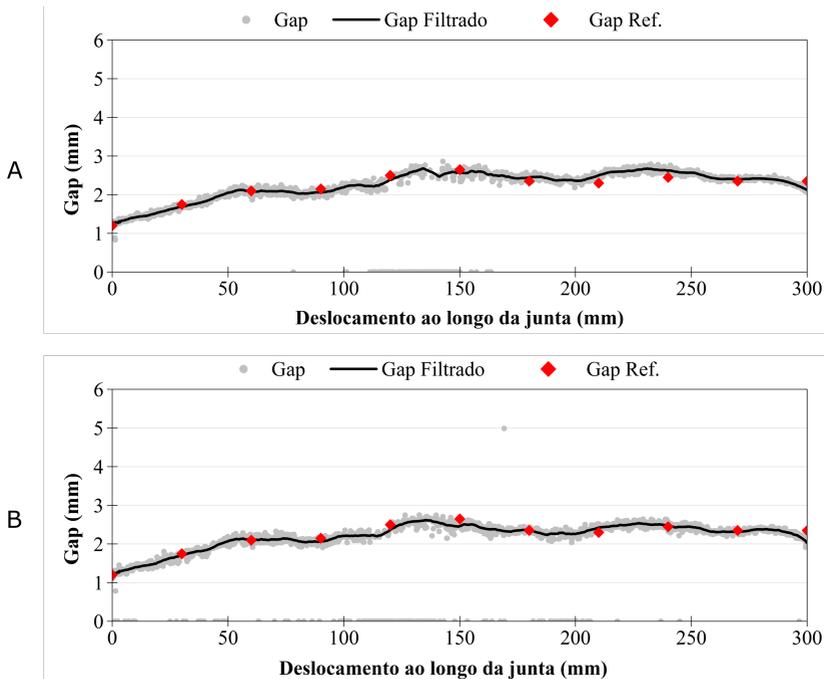


Figura 61 - Medição do *gap* com algoritmo de Correlação de Padrões antes da soldagem (A) e durante a soldagem (B).

Os resultados da medição do *gap* em imagens capturadas antes e durante a soldagem, com o algoritmo da Segunda Derivada são apresentados nas Figura 62 (A) e (B). Durante o processamento das imagens com este algoritmo, o *software* de medição processou os frames com frequência de 8 Hz.

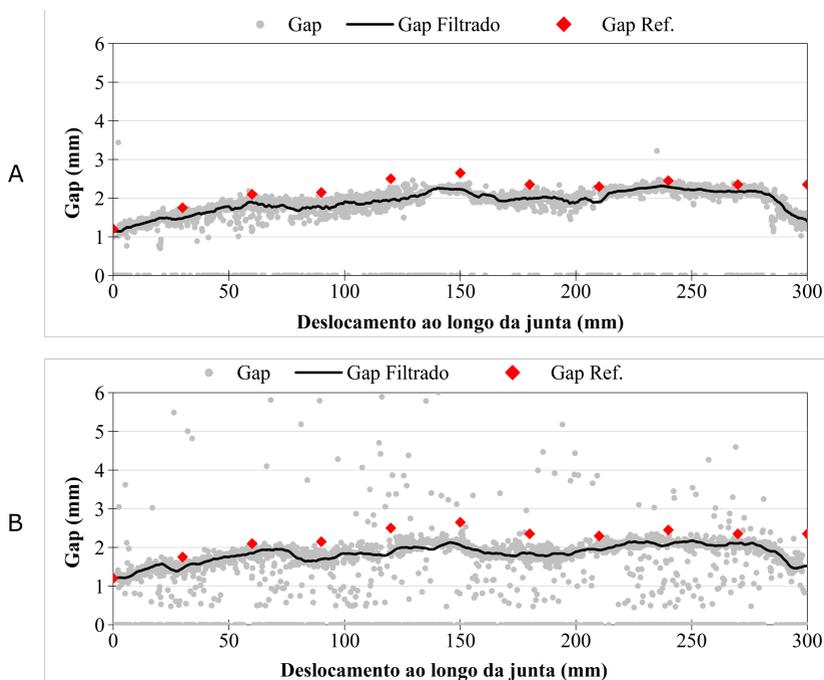


Figura 62 - Medição do *gap* com algoritmo da Segunda Derivada antes da soldagem (A) e durante a soldagem (B).

A Figura 63 apresenta os resultados de medição do *gap* com o algoritmo de Ajuste Linear, o *gap* filtrado e os valores de referência do *gap* ao longo da junta a partir de imagens capturadas antes da soldagem (A) em e durante a soldagem em (B). Durante o processamento das imagens com este algoritmo, o *software* de medição processou os frames com frequência de 7 Hz.

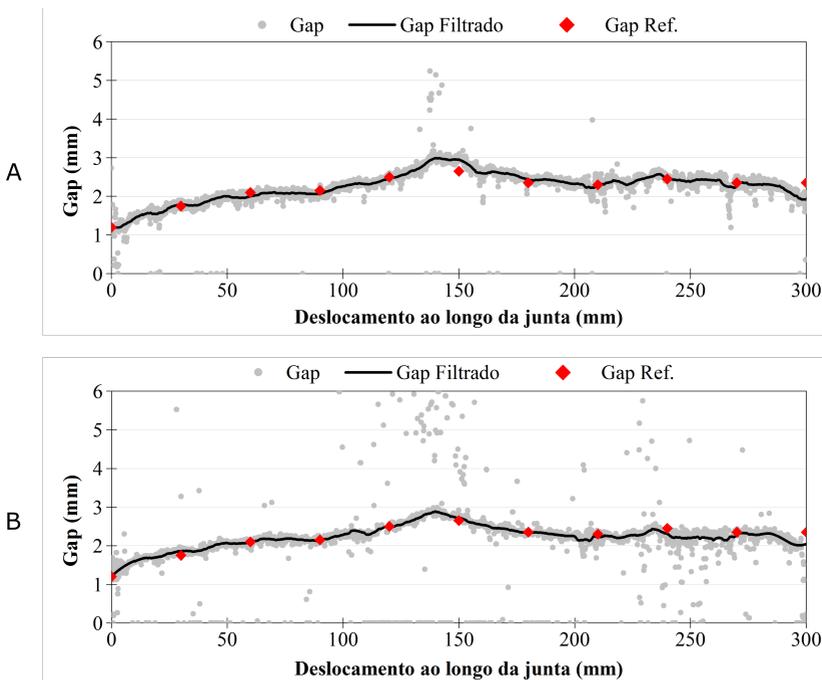


Figura 63 - Medição do *gap* com algoritmo de Ajuste Linear antes da soldagem (A) e durante a soldagem (B).

O percentual de medições falhas de medição com os algoritmos de Ajuste Linear, Correlação de Padrões e Segunda Derivada é apresentado na Figura 64.

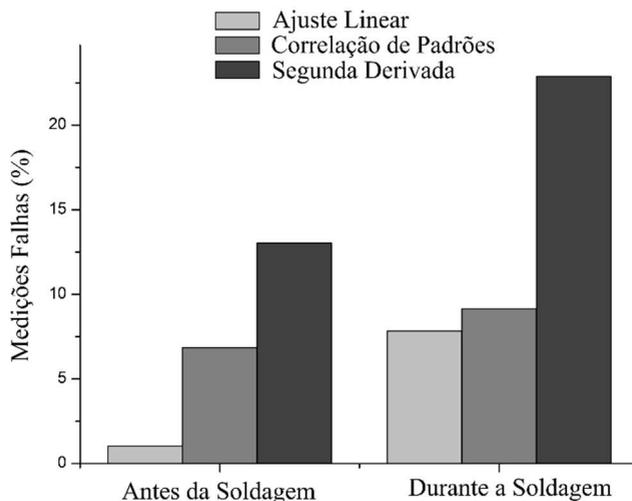


Figura 64 - Gráficos de percentual falhas de medição com os algoritmos de Ajuste Linear, Correlação de Padrões e Segunda derivada.

A Tabela 9 apresenta as incertezas de medição dos algoritmos Ajuste Linear, Correlação de Padrões e Segunda derivada.

Tabela 9 – Incerteza de medição apresentada pelos algoritmos Ajuste Linear, Correlação de Padrões e Segunda derivada.

	Antes da Soldagem	Durante a Soldagem
Segunda derivada	$-0,31 \pm 0,29$ mm	$-0,35 \pm 0,40$ mm.
Correlação de padrões	$0,01 \pm 0,15$ mm	$-0,05 \pm 0,15$ mm
Ajuste linear	$-0,01 \pm 0,17$ mm	$0,01 \pm 0,10$ mm.

6.1.2 Discussões sobre medição do gap com algoritmos desenvolvidos

Os algoritmos de medição desenvolvidos foram avaliados quanto as falhas e erros apresentados na medição do *gap* a partir de imagens capturadas antes, e durante o processo de soldagem. Os valores de *gap* medidos durante a soldagem são influenciados pelos ruídos do processo, e por deformações mecânicas da junta. Desta forma, os erros obtidos a partir de imagens capturadas durante a soldagem foram influenciados por estes fatores.

A análise das medições realizadas com o algoritmo de Correlação de Padrões mostrou a robustez aos ruídos do processo, apresentando pouca variação com a inserção dos ruídos nas imagens. As incertezas de medição encontradas para este algoritmo em imagens capturadas antes e durante a soldagem são iguais a $-0,01 \pm 0,15$ mm e $-0,05 \pm 0,15$ mm. Esta incerteza atende aos requisitos estabelecidos para a aplicação do sensor. O princípio de funcionamento deste algoritmo é baseado em padrões previamente salvos, que são correlacionados com cada imagem capturada para encontrar as posições dos pontos característicos da junta. Devido a este princípio de funcionamento, o algoritmo é robusto por não depender da extração do perfil da junta para posteriormente identificar os pontos característicos. Entretanto, o algoritmo se mostrou extremamente dependente da criação dos padrões para o sucesso da medição. Desta forma, os padrões devem ser recriados no início de cada procedimento. A necessidade de recriar os padrões dificulta a automação com este algoritmo, uma vez que este procedimento é realizado manualmente. Como ponto positivo, o algoritmo pode ser aplicado em diferentes juntas de soldagem, com padrões específicos para cada procedimento.

Entre os algoritmos testados, o da Segunda Derivada, mesmo em imagens sem a presença de respingos e variações luminosas do processo apresentou o maior incerteza de medição. As incertezas de medição encontradas para o algoritmo da Segunda Derivada, em imagens capturadas antes e durante a soldagem, são iguais a $-0,31 \pm 0,29$ mm e $-0,35 \pm 0,40$ mm. Estas incertezas são superiores à incerteza do sensor utilizado no desenvolvimento do algoritmo de controle adaptativo. Desta forma, para a utilizar o algoritmo da Segunda Derivada com este controle adaptativo seriam necessários novos ensaios de validação. Adicionalmente, o percentual de falhas apresentado pelo algoritmo é igual a 27%. Estas falhas, somadas a baixa taxa de processamento alcançada, podem comprometer a soldagem. O resultado alcançado com o algoritmo está diretamente ligado ao princípio de extração das características da

junta utilizado. A operação de derivação do perfil da junta amplifica os ruídos do perfil, o que muitas vezes impede o funcionamento do algoritmo. Os filtros utilizados para suavizar o perfil e reduzir a intensidade dos ruídos acabam causando distorções e inserindo erros na medição. Especialmente na medição do *gap*, estes erros acabam dificultando a aplicação do algoritmo como apresentado. Mesmo com os erros na medição do *gap* o algoritmo é capaz de medir da posição central da junta, podendo ser aplicado no seguimento de junta.

O algoritmo de Ajuste Linear apresentou percentual de falhas, e incerteza de medição do *gap* aceitáveis de acordo com os requisitos da aplicação. As incertezas de medições do *gap* com o algoritmo de Ajuste Linear em imagens capturadas antes e durante a soldagem são iguais a $-0,01 \pm 0,17$ mm e $-0,01 \pm 0,10$ mm. A incerteza encontrada a partir de imagens capturadas antes da soldagem, foi superior ao alcançado em imagens capturadas durante o processo. Este fato ocorreu devido a característica dos ruídos da medição em imagens capturadas durante o processo. Nesta condição os ruídos apresentam valor muito superior ao esperado e são mais facilmente classificados como falha, não influenciando na medição.

O algoritmo de Ajuste Linear se mostrou mais adequado a aplicação que o algoritmo de Correlação de Padrões devido a não depender de ajustes e criação de padrões antes de cada medição. O ajuste linear utilizado na identificação das retas, torna a definição dos pontos de interesse mais robusta e pode ter contribuído para diminuição da incerteza de medição. O algoritmo se adaptou a chanfros com diferentes ângulos e aberturas de raiz, sendo possível a aplicação em juntas com significativa variação geométrica do perfil.

As taxas de processamento alcançadas pelos algoritmos foram relativamente baixas quando comparadas com sensores comerciais. Este desempenho é devido a forma que os algoritmos foram implementados, podendo ser otimizado em futuros desenvolvimentos. Entretanto, como as velocidades de soldagem utilizadas em procedimentos de soldagem de raiz não são elevadas, as taxas de processamento alcançadas são suficientes para realizar o controle do processo.

Em virtude dos resultados apresentados, o algoritmo de Ajuste Linear foi escolhido para aplicação em ensaios de soldagem com seguimento de junta e controle adaptativo do processo.

6.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM COM SEGUIMENTO DE JUNTA E CONTROLE DO PROCESSO

Este capítulo apresenta os ensaios de soldagem realizados para avaliar o sensor de triangulação laser desenvolvido no controle do processo. Durante os ensaios o sensor foi utilizado para medir a geometria da junta. Estas medições foram tratadas de acordo com o Capítulo 5.1. A metodologia de controle do processo apresentada no Capítulo 2.2 foi utilizada para controlar a soldagem.

Os corpos de prova utilizados são compostos por chapas de aço SAE 1020 com 12,5 mm de espessura e 300 mm de comprimento. As chapas foram preparadas com ângulo de bisel igual a 30° e montadas com diferentes aberturas de raiz (*gap*) ao longo do comprimento do corpo de prova. Foram utilizados elementos de fixação soldados aos dois lados do corpo de prova para minimizar o fechamento do *gap* durante a soldagem. Foram realizadas medições de referência do *gap*, utilizando um paquímetro de resolução 0,05 mm, para comparação com os valores medidos pelo sensor.

Os corpos de prova foram montados com desalinhamento proposital em relação ao trilho do robô. O seguimento de junta foi responsável pelas correções de trajetória realizadas. A Figura 65 apresenta a montagem do corpo de prova com o desalinhamento proposital e o sistema de coordenadas do robô.



Figura 65 - Montagem do corpo de prova com desalinhamento proposital.

Serão apresentados dois ensaios realizados com técnicas diferentes, sendo um com medição anterior a soldagem (*off-line*) e outro com medição durante a soldagem (*online*). A técnica de controle *off-line* consiste em realizar uma leitura da junta antes da soldagem e utilizar esta informação para realizar o procedimento. O ensaio com controle *online* não utiliza informações prévias da junta para realizar as correções, ou seja, as medições são realizadas durante a soldagem enquanto o processo é corrigido automaticamente. Para cada ensaio serão apresentadas as imagens do corpo de prova e os resultado de soldagem. As medições do *gap*, os desalinhamentos da linha de seguimento nos eixos Y e Z ao longo do eixo X, os parâmetros de deslocamento da tocha e os parâmetros de soldagem serão apresentados em forma de gráficos. Os pontos do perfil da junta serão apresentados em forma de nuvem de pontos da superfície da peça e trajetória pelo robô. As nuvens de pontos foram apresentadas com imagens geradas pelo software comercial GOM [66].

6.2.1 Corpo de prova soldado com a técnica de controle *off-line*

A técnica de controle *offline* consiste em realizar as medições do cordão antes do procedimento de soldagem e utilizar estas informações no controle do processo. Esta técnica se beneficia da ausência de ruídos do processo para realizar as medições. A Figura 66 apresenta a parte superior do corpo de prova utilizado no ensaio com a técnica de controle *off-line* em (A) e a parte inferior com os elementos de fixação das chapas em (B). É possível observar que o *gap* do corpo de prova apresenta diferentes dimensões ao longo do seu comprimento.

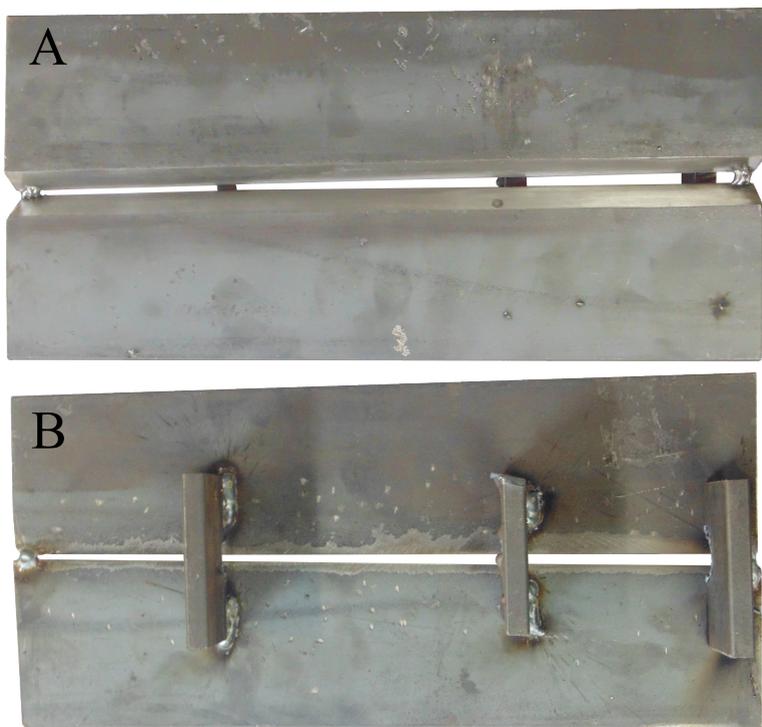


Figura 66 - Corpo de prova utilizado no ensaio com a técnica de escaneamento da junta.

Inicialmente foi realizada uma medição da junta para conhecer a linha de seguimento e o *gap* ao longo do eixo X do robô. A Figura 67 apresenta os valores de *gap* medidos, o *gap* filtrado com os filtros descritos anteriormente e os valores de referência medidos com

paquímetro. As medições do *gap* são filtradas para dar origem ao perfil do *gap*, utilizado no cálculo dos parâmetros de controle do processo.

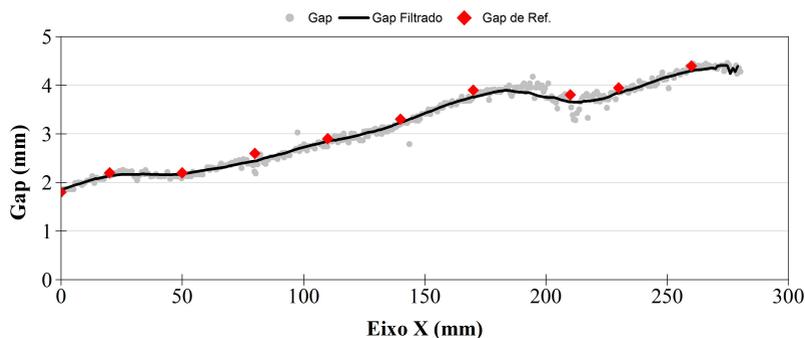


Figura 67 - Medições do gap antes, durante a soldagem e gap de referência para ensaio com leitura prévia da junta.

A partir do perfil do *gap*, a unidade de controle calcula os parâmetros de trajetória enviados ao robô, como a amplitude, frequência de oscilação, tempo de parada e velocidade de soldagem. A Figura 68 apresenta estes parâmetros calculados para este ensaio.

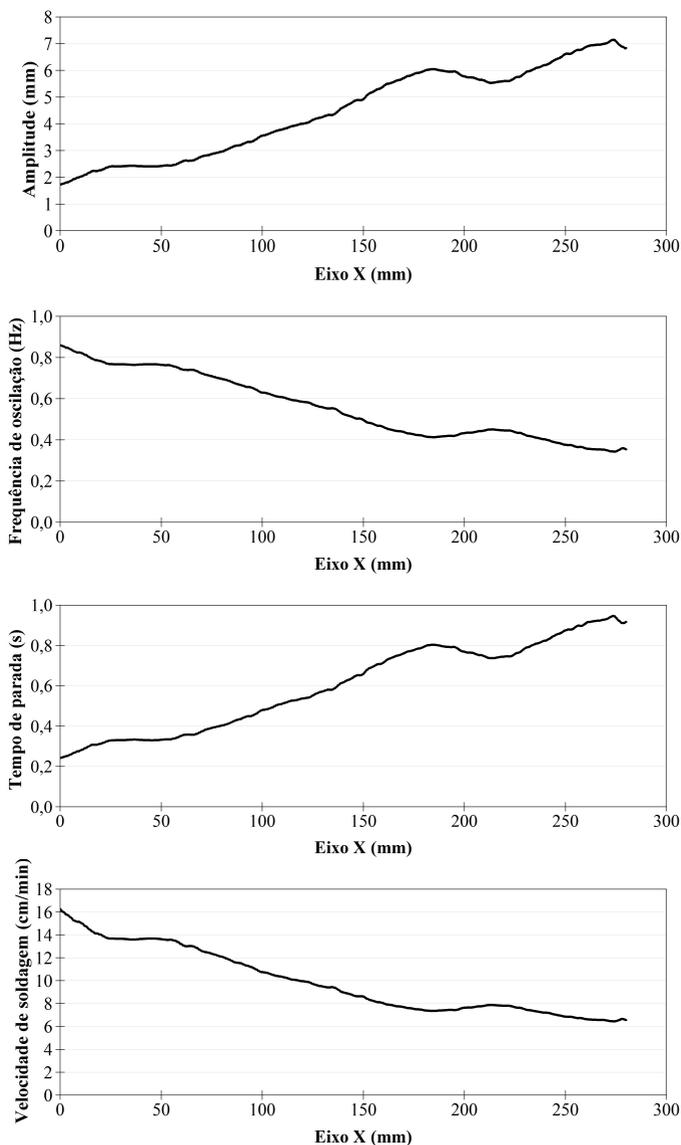


Figura 68. Parâmetros de deslocamento do robô para ensaio com a técnica de controle *off-line*.

Além dos parâmetros de deslocamento, o *software* de controle calcula a partir do perfil do *gap* a velocidade de arame ideal para cada

região da junta. A Figura 69 apresenta o gráfico da velocidade de arame calculada a partir do *gap* medido. De acordo com a equação de controle utilizada, para valores de *gap* maiores que 2 mm a velocidade de arame é constante com valor igual a 3,2 m/min

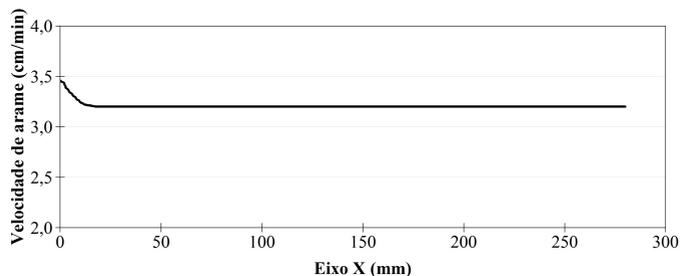


Figura 69 - Gráfico de variação da velocidade de arame para soldagem com a técnica de controle *off-line*.

A trajetória realizada pelo robô é calculada a partir dos parâmetros de deslocamento e da linha de seguimento medida pelo sensor. Os desvios da linha de seguimento, medidos nos eixos Y e Z ao longo do eixo X do robô, são apresentados nos gráficos da Figura 70. Estes desvios foram armazenados para corrigir a trajetória do robô durante a soldagem.

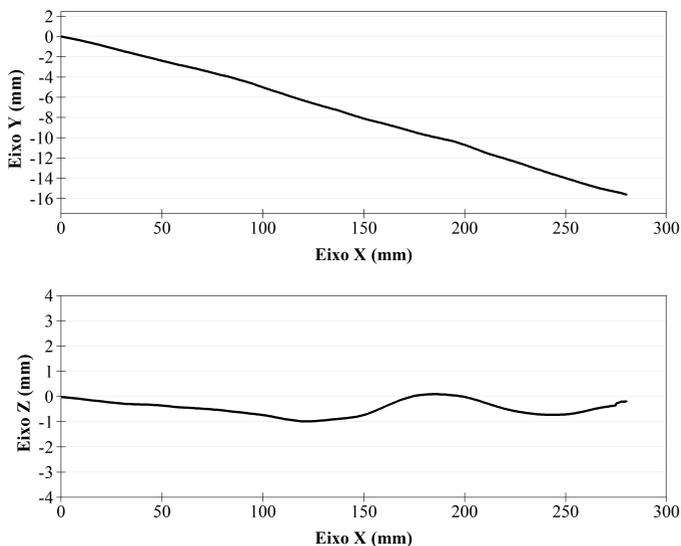


Figura 70 - Desvios da linha de seguimento nos eixos Y e Z ao longo do eixo X para ensaio com a técnica de controle *off-line*.

As medições realizadas ao longo do comprimento da junta também deram origem a nuvem de pontos apresentada na Figura 71. Os pontos medidos estão representados em uma escala de cores de acordo com a sua distância em relação ao plano da chapa. A trajetória calculada a partir das equações de controle adaptativo também é destacada na Figura 71. Nesta figura é possível observar a variação do *gap* na nuvem de pontos medidos e o seu reflexo na trajetória da tocha.

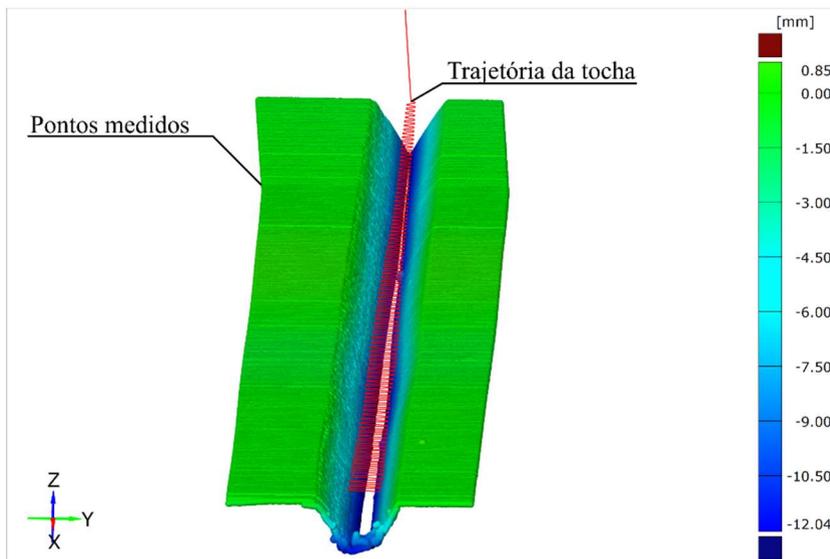


Figura 71 - Nuvem de pontos medidos, trajetória da tocha e linha de seguimento para ensaio com a técnica de controle *off-line*.

Os parâmetros do processo e a trajetória calculada a partir das medições foram utilizadas para realização da soldagem do corpo de prova. A Figura 72 apresenta as partes superior (A) e inferior (B) do corpo de prova soldado. O corpo de prova foi aprovado em uma inspeção visual.



Figura 72 - Solda realizada com a técnica de controle *off-line* face superior do cordão (A) e raiz (B).

Foram realizados escaneamentos do corpo de prova para inspecionar e armazenar a geometria da superfície da parte superior e inferior da raiz. A Figura 73 apresenta a nuvem de pontos da parte superior da solda realizada com a técnica de escaneamento.

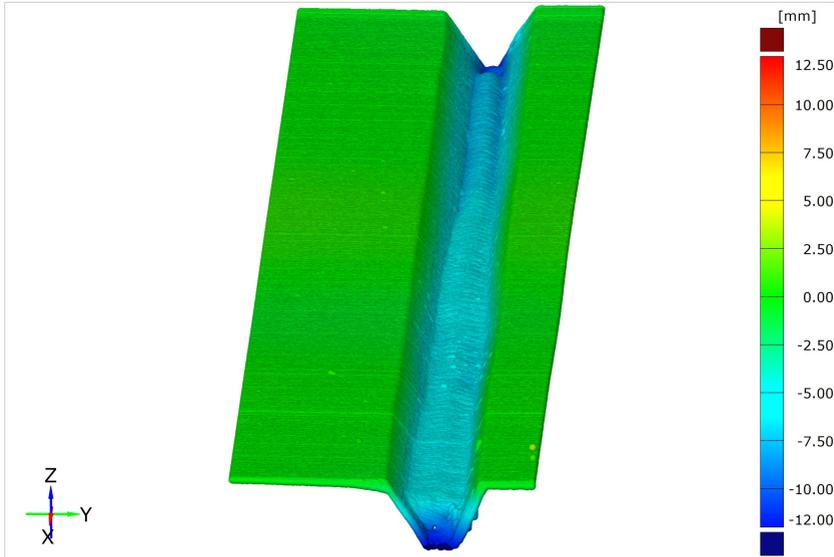


Figura 73 - Nuvem de pontos da solda realizada com a técnica de controle *off-line*.

A nuvem composta pelos pontos capturados na superfície da raiz da solda é apresentada na Figura 74. Esta figura apresenta marcações com a medição do reforço da raiz. Este reforço é calculado a partir da superfície da chapa e do ponto mais distante para uma determinada região.

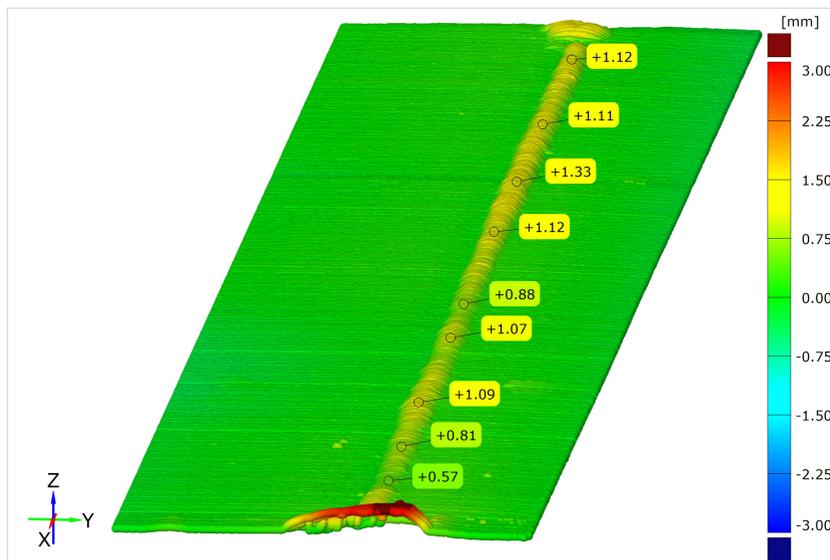


Figura 74 - Nuvem de pontos da raiz da solda realizada com a técnica de controle *off-line*.

6.2.2 Corpo de prova soldado com a técnica de controle *online*

O sensor desenvolvido é capaz de realizar medições da geometria da junta durante o processo de soldagem. Esta característica possibilita que o controle dos parâmetros de soldagem e do deslocamento sejam ajustados com base na condição da junta durante o processo. Esta característica permite que o controle atue corrigindo distorções da junta geradas pelo calor da soldagem.

O corpo de prova utilizado no ensaio com medição e controle *online* é apresentado na Figura 75. É possível observar que o corpo de prova foi montado de forma que o *gap* apresente diferentes valores ao longo do seu comprimento, Figura 75(A). A Figura 75(B) apresenta os elementos de fixação utilizados para minimizar o fechamento da junta durante a soldagem.

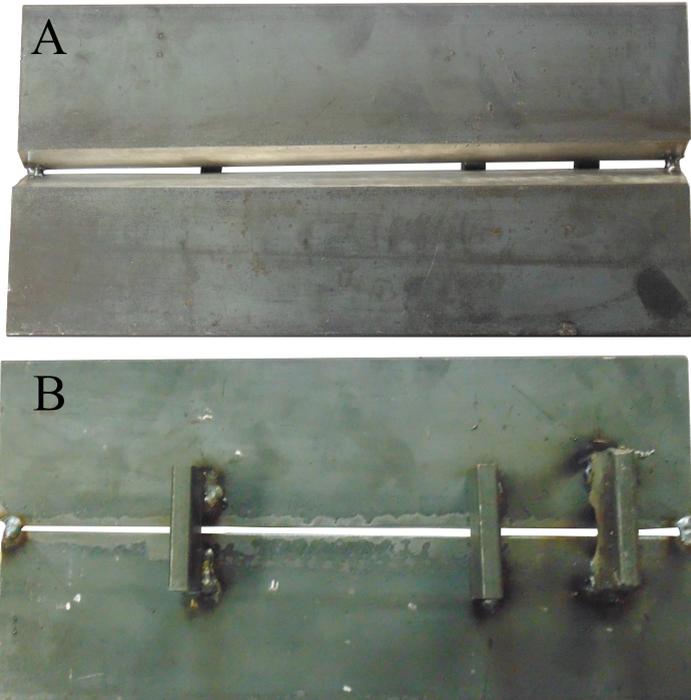


Figura 75 - Corpo de prova utilizado na soldagem com a técnica de correção *online*, vista da face (A) e raiz da junta (B).

Foi realizado um procedimento de inspeção onde o sensor laser foi utilizado na medição a geometria da junta para analisar os efeitos do processo na junta soldada. A Figura 76 apresenta a nuvem de pontos capturados durante a inspeção do corpo de prova. Nesta nuvem os pontos são identificados por uma escala de cores que representa a distância entre o ponto e o plano superior da chapa. Esta nuvem de pontos também apresenta a abertura da raiz variando ao longo do comprimento da junta. Os pontos medidos foram processados com o algoritmo de medição para dar origem as medições do *gap*. A Figura 77 apresenta o gráfico de inspeção do *gap*, *gap* filtrado e *gap* de referência medido com o paquímetro.

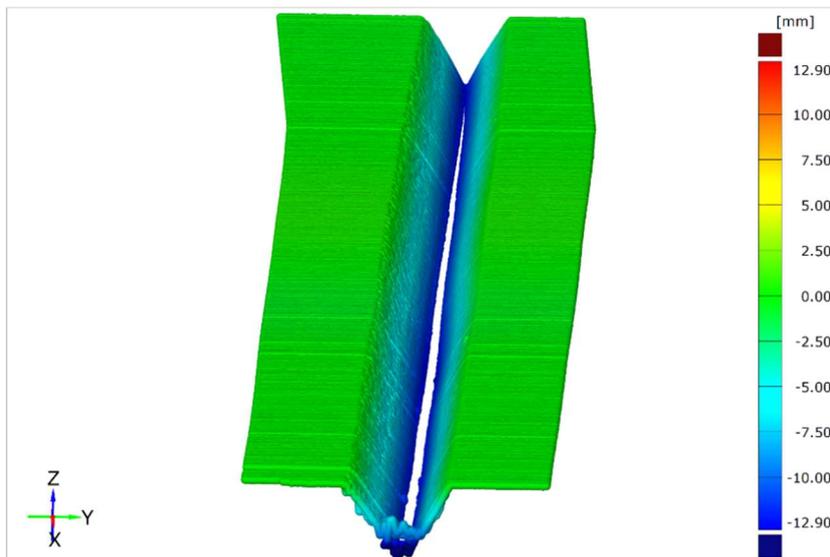


Figura 76 - Inspeção do corpo de prova utilizado no ensaio com a técnica de correção *online*.

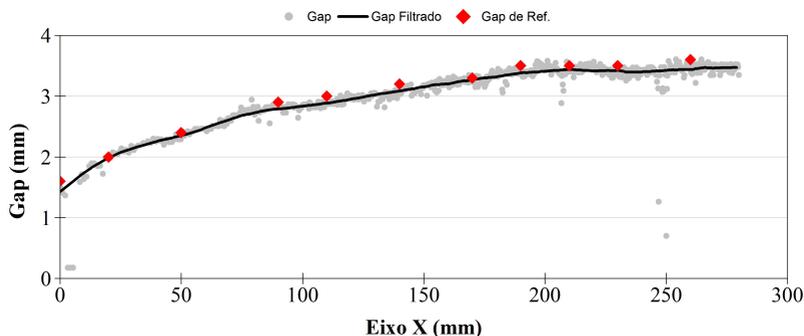


Figura 77 - Inspeção do gap do corpo de prova para ensaio com a técnica de correção *online*.

Após esta etapa de inspeção, a tocha foi posicionada no início da junta e a soldagem foi realizada. Durante a soldagem o sensor capturou as medições da junta e realizou o controle de trajetória e parâmetros de soldagem. O resultado da soldagem é apresentado na Figura 78 sendo a vista superior do cordão em (A) e raiz em (B).



Figura 78 - Resultado da soldagem do corpo de prova com a técnica de correção online, face superior do cordão (A) e raiz (B).

As medições realizadas durante a soldagem do corpo de prova deram origem às nuvens de pontos da Figura 79. A Figura 79(A) apresenta a nuvem de pontos capturada durante a soldagem, que ilustra os ruídos presentes na região do *gap*. Nas laterais da nuvem é possível observar o reflexo da oscilação do sensor durante a soldagem. Este reflexo é devido a folgas no sistema de deslocamento. A oscilação não aparece na região do recuo pois as medições foram realizadas com movimentação linear. A Figura 79(B) apresenta a trajetória executada pela tocha durante o procedimento. É possível observar as variações no padrão de movimentação da tocha de acordo com as medições do *gap* e as correções de trajetória realizadas durante a soldagem.

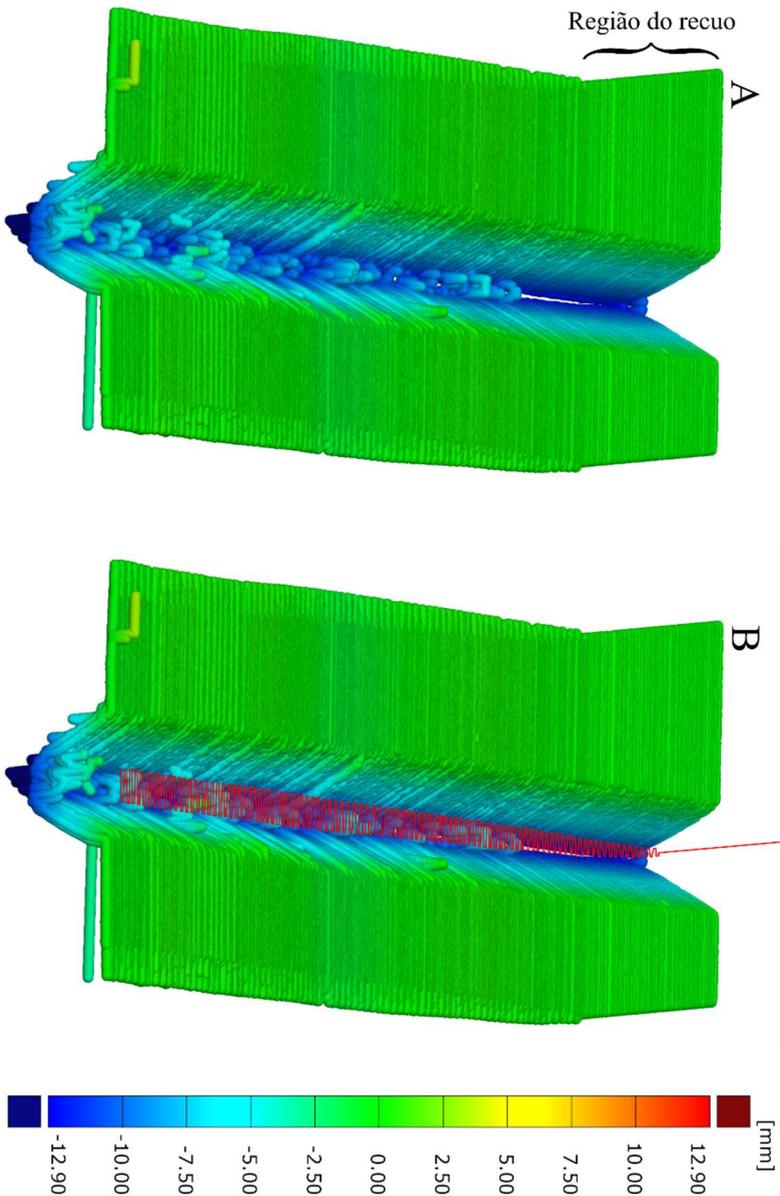


Figura 79 - Nuvem de pontos capturada durante a soldagem (A) e trajetória executada (B), referente ao ensaio com a técnica de correção *online*.

Mesmo com os ruídos presentes na medição do *gap* o algoritmo de controle foi capaz de realizar a soldagem. A Figura 80 apresenta o *gap* medido pelo sensor, *gap* filtrado e *gap* de referência medidos durante a soldagem. Nesta imagem é possível observar o aumento na dispersão dos valores de *gap* medido.

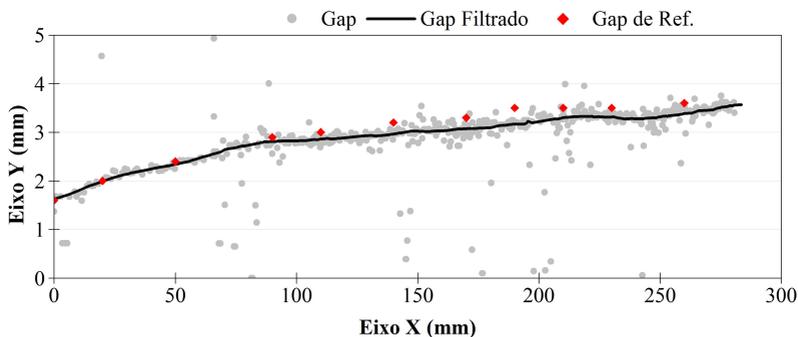


Figura 80 - Medições do *gap*, *gap* filtrado, *gap* de referência, durante o procedimento de soldagem do corpo de prova realizado com correção durante a soldagem.

A Figura 81 apresenta o gráfico de comparação entre os valores de *gap* medidos antes e durante a soldagem. Na figura é possível observar que o *gap* tendeu a fechar durante a soldagem.

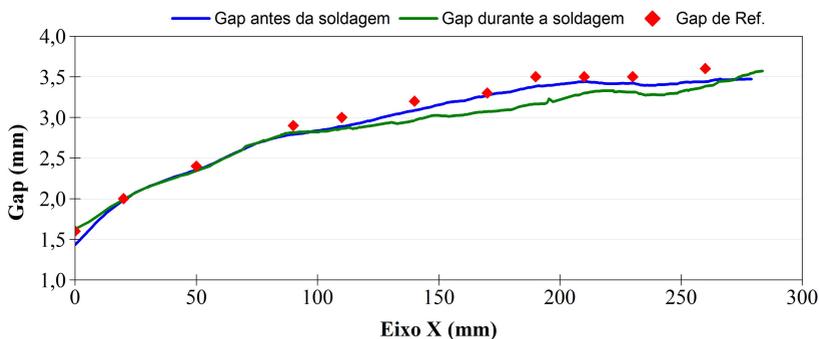


Figura 81 - Gráfico de comparação entre o *gap* medido antes e durante a soldagem.

As medições realizadas durante o procedimento de soldagem também deram origem a linha de seguimento e aos parâmetros de soldagem e deslocamento utilizados. A Figura 82 apresenta os

desalinhamentos da linha de seguimento medida ao longo da soldagem. É possível observar o acentuado desalinhamento ao longo do eixo Y do robô. O eixo Z apresentou apenas desalinhamentos gerados pelas ondulações do trilho do robô, com amplitude máxima de aproximadamente 1 mm. Estes desalinhamentos foram corrigidos durante a soldagem.

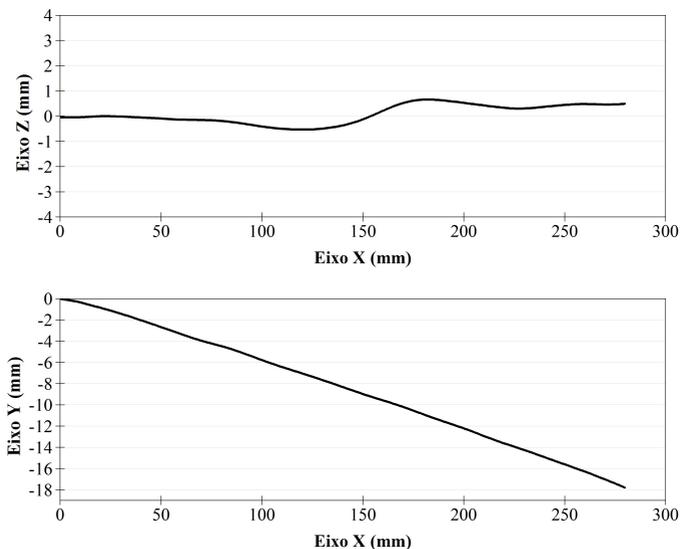


Figura 82 - Desalinhamentos da linha de seguimento do corpo de prova realizado com a técnica de controle *online*.

Os parâmetros de deslocamento como a amplitude, frequência de oscilação, tempo de parada e velocidade de soldagem utilizados durante o procedimento são apresentados na Figura 83.

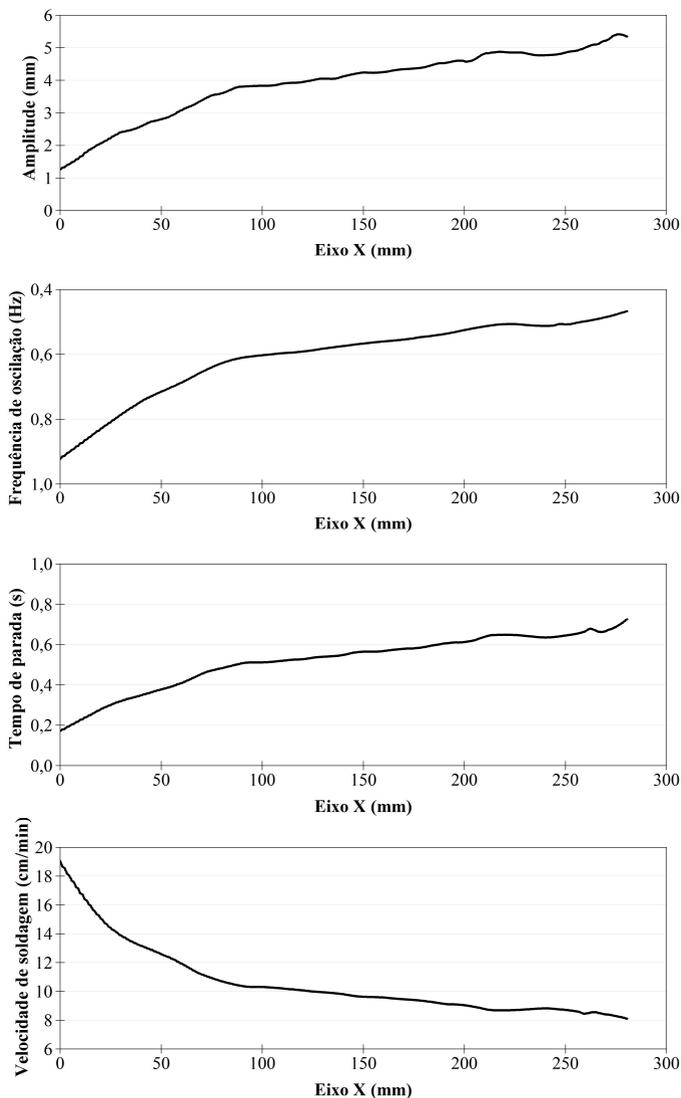


Figura 83 - Parâmetros de deslocamento do robô para ensaio soldado com a técnica de controle *online*.

A Figura 84 apresenta a velocidade de arame utilizada ao longo da soldagem. O algoritmo de controle adaptativo prevê que para *gaps* maiores que 2 mm a velocidade de arame seja ajustada para 3,2 m/min.

Desta forma, quando o *gap* atingiu valores maiores que 2 mm a velocidade de arame permaneceu constante.

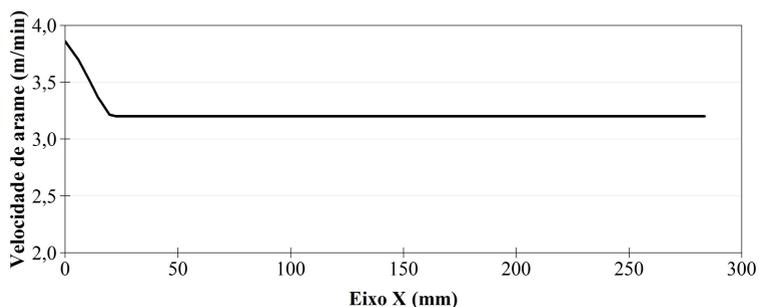


Figura 84 - Velocidade de arame utilizada na soldagem do corpo de prova com medição simultânea a soldagem.

Após a realização da soldagem o sensor de triangulação laser foi utilizado para a inspeção da solda. A Figura 85 apresenta a nuvem de pontos da parte superior do cordão. Esta nuvem representa a superfície da solda e pode indicar pontos de falha de fusão, mordedura e reforço excessivo.

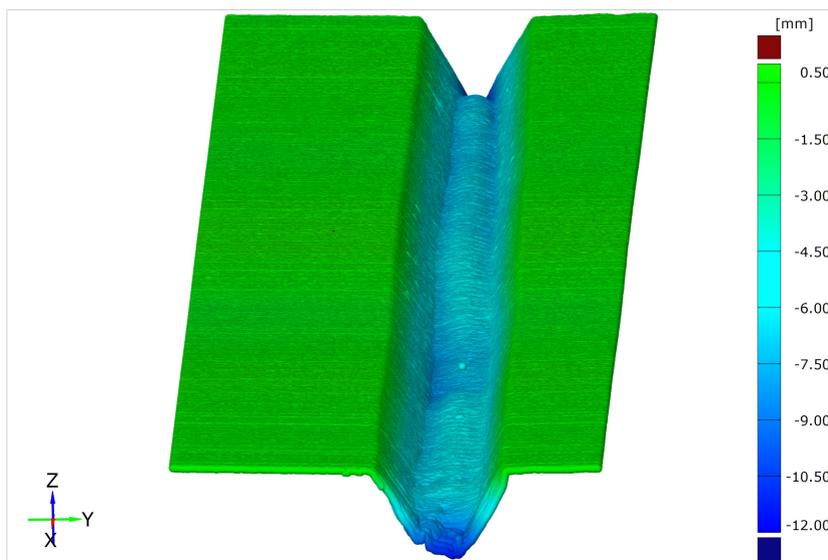


Figura 85 - Nuvem de pontos superior da solda realizada com medição simultânea a soldagem.

A nuvem criada a partir de medições da raiz do corpo de prova é apresentada na Figura 86. Esta nuvem foi processada para realizar medições do reforço da raiz. Este reforço foi obtido a partir da distância entre o ponto mais alto e a superfície matemática da chapa em uma região da raiz.

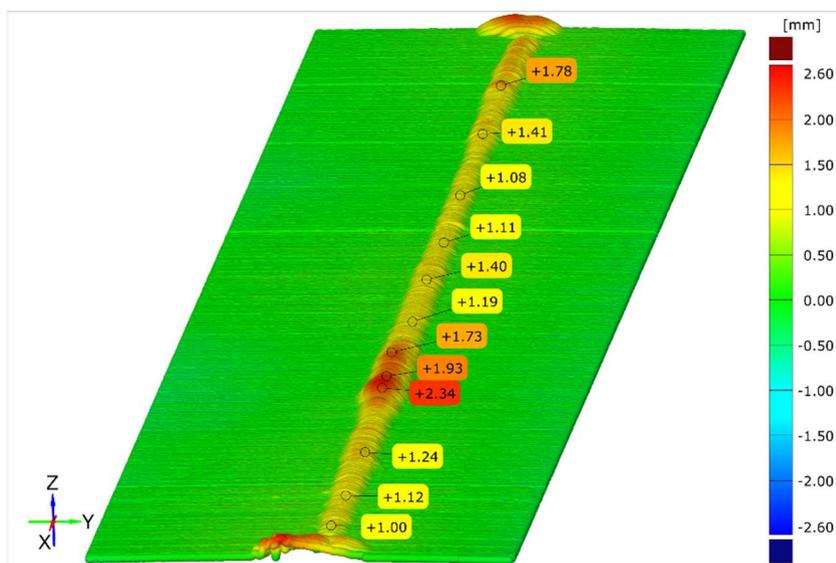


Figura 86 - Nuvem de pontos da raiz realizada com medição simultânea a soldagem.

6.2.3 Discussões sobre ensaios de soldagem com seguimento de junta e controle do processo.

Os ensaios com soldagem mostraram que o sensor desenvolvido é capaz de capturar as informações necessárias para o controle do processo de soldagem. Também foram capturadas nuvens de pontos que foram utilizadas na inspeção e documentação de soldas e corpos de prova. O procedimento de inspeção pode ser aplicado no controle de qualidade da fabricação das juntas ou do resultado da soldagem. Foram realizados ensaios de soldagem empregando duas técnicas diferentes, a técnica de controle *online* e *off-line*. O ensaio realizado com a técnica de controle *off-line* utilizou as informações obtidas a partir da inspeção do corpo de prova para calcular os parâmetros do processo de soldagem. Os resultados

da solda realizada com esta técnica foram submetidos a uma inspeção visual onde não foram detectadas descontinuidades na superfície do cordão de solda (porosidade, trincas, mordeduras, falta de fusão ou falta de penetração). Pode se concluir que, para as condições de aplicação em laboratório, com juntas curtas e bem preparadas, a técnica de escaneamento pode ser aplicada com sucesso. Esta técnica se favorece de realizar medições sem a interferência do processo de soldagem. A ausência dos ruídos do processo exige menos do sensor e justificaria o desenvolvimento de um cabeçote e *software* de medição mais simples e com menor custo computacional.

As condições em que os ensaios foram realizados comprovam o funcionamento do sensor, algoritmos e filtros de processamento de imagem. Entretanto, não retratam uma condição de aplicação em campo, onde as juntas soldadas podem apresentar comprimento muito maior e, conseqüentemente, maiores variações do chanfro durante a soldagem. Adicionalmente, em juntas longas, a necessidade de uma inspeção anterior ao procedimento de soldagem resultaria no aumento do tempo total da operação. Nestas condições, é essencial que as variações de formato da junta, ocorridas devido a soldagem, sejam percebidas e corrigidas durante o processo. Sendo assim, o segundo ensaio, com a técnica de correção durante a soldagem, se fez necessário para comprovar a capacidade do sensor de realizar medições durante o processo de soldagem. Estas medições foram suficientes para realizar o controle do processo de soldagem com os algoritmos propostos. A solda realizada com a técnica de controle *online* também foi aprovada em uma inspeção visual.

No ensaio onde a correção foi realizada durante a soldagem, é possível comparar as medições do *gap* realizadas antes e durante a soldagem. O gráfico da Figura 81 apresentou as medições do *gap* realizadas antes e durante o procedimento de soldagem. Neste gráfico é possível observar a tendência de fechamento, ou diminuição do *gap* durante a soldagem. Mesmo com esta variação dimensional o controle online da soldagem garante que os parâmetros do processo sejam ajustados continuamente. A tendência de fechamento ainda pode ser influenciada pela condição de aplicação, como posição de soldagem, preparo da junta e da faixa dos valores de *gap*. Desta forma, o controle online da soldagem se faz necessário para aplicações em campo onde as variações são maiores que as apresentadas no corpo de prova ensaiado.

Para as condições em que os ensaios foram realizados, tanto a soldagem com escaneamento, como a soldagem com correção durante o processo apresentaram resultados satisfatórios. As nuvens de pontos

capturadas se mostraram uma boa ferramenta para avaliar e armazenar a geometria das juntas e soldas realizadas.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o estudo e desenvolvimento de um sensor de triangulação laser e seus algoritmos de medição e processamento de imagem. O sensor foi desenvolvido com características especiais para atender a aplicação em soldagem e servir de ferramenta para futuros estudos na área. As características necessárias para atender a aplicação de soldagem foram alcançadas com os projetos ótico, mecânico e de *software* do sensor. Os projetos ótico e mecânico do sensor contemplam os requisitos metroológicos da aplicação e mecanismos de resistência ao ambiente de soldagem como refrigeração, cortina de vento, escudo contra respingos e janelas óticas. O *software* do sensor foi desenvolvido com característica modular para permitir a medição com diferentes algoritmos e a integração necessária para o controle do processo.

O sensor foi testado com três algoritmos diferentes, sendo dois deles baseados na literatura e o terceiro proposto neste trabalho. Os experimentos realizados no presente trabalho resultaram no melhor desempenho do algoritmo proposto. Este algoritmo foi aplicado no controle da soldagem do passe de raiz de juntas do tipo “V” na posição plana.

As operações de soldagem foram realizadas com duas técnicas de controle diferentes, o controle com medição durante a soldagem (*online*) e controle com medição anterior a soldagem (*off-line*). A técnica de controle *off-line* se beneficia de realizar medições sem a interferência dos ruídos do processo de soldagem, como respingos e a luminosidade do arco. Entretanto, esta técnica não é capaz de corrigir as deformações da junta devido ao calor imposto pelo procedimento. Para que estas deformações sejam percebidas é necessário utilizar a técnica de controle *online*. A utilização desta técnica só é possível devido aos mecanismos de resistência do sensor. As duas técnicas resultaram em soldas aprovadas, validando o desenvolvimento do sensor e do algoritmo proposto.

O sensor também foi aplicado na inspeção das juntas e soldas apresentadas no trabalho. Estes procedimentos resultaram em nuvens de pontos que retratam a geometria da peça inspecionada. Além do armazenamento da geometria da junta e dos passes intermediários da soldagem as nuvens podem ser utilizadas para o controle de qualidade do procedimento.

Por fim, toda a capacidade técnica e conhecimento desenvolvido acerca do assunto tratado no presente trabalho pode ser constatada com os trabalhos publicados em congresso [67] e com o artigo publicado em revista técnica da área de soldagem [68]. Os resultados apresentados neste

trabalho têm papel fundamental no entendimento dos princípios de funcionamento da tecnologia envolvida e representam um passo importante para a independência de equipamentos estrangeiros. O domínio da tecnologia apresentada permite o aprimoramento dos equipamentos disponíveis no mercado e a liberdade necessária para integração com sistemas automatizados.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os sensor, o sistema de controle e os algoritmos de processamento de imagem e filtragem de sinais abordados neste trabalho servirão de base para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área. Poderão ser realizados trabalhos futuros nas áreas de sensores para soldagem e no desenvolvimento de sistemas automatizados.

O detalhamento de algumas propostas de trabalhos futuros é dado a seguir:

- O sensor desenvolvido nesta tese atendeu a aplicação necessária para validação do seu desenvolvimento. Entretanto, existem alguns pontos de melhoria que podem ser explorados em trabalhos futuros. Um deles é o *software* de medição desenvolvido, que alcançou a taxa de processamento de 7 Hz. A aplicação do sensor em sistemas com maiores velocidades de deslocamento e com ruídos de maior intensidade poderão tornar esta taxa insuficiente. Em um trabalho futuro o *software* de medição pode ser melhorado para operar com a mesma qualidade e com uma taxa de aquisição maior. Esta melhoria pode abranger o desenvolvimento de algoritmos para medição de outros tipos de juntas. Outro ponto de melhoria é o tamanho do cabeçote de medição. O equipamento apresentado neste trabalho tem dimensão consideravelmente maior que os sensores comerciais de mesma capacidade de medição. Isto se deve ao fato do protótipo desenvolvido utilizar uma câmera e um emissor laser industriais para conferir característica modular ao equipamento. Esta escolha implicou no aumento das dimensões do cabeçote de medição e limitou algumas configurações do projeto ótico. Um novo projeto ótico, com componentes compactos pode resultar em um sensor com dimensões reduzidas. Neste novo projeto poderão ser estudadas novas disposições dos componentes do sensor como ângulos de incidência do laser sobre a peça e ângulos entre a “folha de luz” e o eixo ótico da câmera.
- A soldagem da união de tubos compreende os passes de raiz e enchimento da junta. Este trabalho apresentou a aplicação do sensor de triangulação laser no controle do

passo de raiz. Para realização da tarefa de união de forma completamente automatizada seria necessário desenvolver a soldagem automática dos passos de enchimento. Este desenvolvimento necessita de aprimoramentos do sensor apresentado neste trabalho e dos algoritmos de controle utilizados. O principal desafio de desenvolvimento do sensor é a atualização do *software* para habilitar o equipamento a realizar medições da junta de soldagem durante os passos intermediários do preenchimento. Outro desafio é o desenvolvimento das estratégias de controle que serão utilizadas para o enchimento da junta.

- A tecnologia de sensoriamento por triangulação laser também pode ser aplicada na tarefa de inspeção da soldagem. O sensor desenvolvido neste trabalho foi aplicado na medição da superfície das soldas apresentadas. As inspeções realizadas com este sensor geraram nuvens de pontos que retratam a geometria da superfície do cordão. Entretanto, para o controle de qualidade estas nuvens não são suficientes. É necessário conhecer características do cordão como altura, largura, presença de falta de fusão, mordeduras entre outros. Para alcançar este objetivo as nuvens de pontos capturadas pelo sensor devem ser processadas com algoritmos que encontrem estas características. Uma proposta de trabalho futuro é desenvolver um *software* para processamento das nuvens de pontos que atribua ao sensor a funcionalidade de controle de qualidade. Este *software* poderá ser utilizado em conjunto com o sistema desenvolvido. Onde, por exemplo, o sensor é utilizado no controle do processo e em seguida na inspeção da solda realizada.

9. REFERÊNCIAS

1. DYNATORQUE. *Dyna-Torque Technologies*. 2017; Disponível em: <http://dyna-torque.com/>. Acesso em 05 de maio de 2017.
2. POLYSOUDE. *POLYSOUDE the art of welding*. 2017 Disponível em: <http://pt.polysoude.com/>. Acesso em 05 de maio de 2017.
3. MAGNATECH. *Complete product solutions for orbital tube & pipe welding applications*. 2017, Disponível em: <http://www.magnatechllc.com/>. Acesso em 05 de maio de 2017.
4. Carvalho, R.S., *Robô CNC para a automação da soldagem MIG/MAG em posições e situações de extrema dificuldade.*, in *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*. 2009, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis.
5. Filho, F.A.R., et al. *Development of Parallel Manipulators for Welding Robots*. in *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*. 2010.
6. Lima, E.J., et al., *Development of a robot for orbital welding*. *Industrial Robot: An International Journal*, 2005. **32**(4): p. 321-325.
7. Chen, X., Devanathan, R., Fong, A.M., *Advanced Automation Techniques in Adaptive Material Processing*. 2002: World Scientific.
8. Åström, K.J., Wittenmark, B., *Adaptive control*. 1995, Addison-Wesley.
9. Huang, W. and R. Kovacevic, *Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012. **63**(1): p. 235-248.
10. S. Yamane, H.Y., T. Ishihara, T. Kubota, K. Eguchi, K. Oshima, *Adaptive control of back bead in V groove welding without backing plate*. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2004. **9**(2): p. 138-148.
11. Lee, J.I. and K.W. Um, *A prediction of welding process parameters by prediction of back-bead geometry*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000. **108**(1): p. 106-113.
12. Kindermann, R.M., *Soldagem Orbital do Passe de Raiz – Algoritmos para Controle Adaptativo por meio de Sensoriamento LASER*, in *Programa de Pós-Graduação em*

- Engenharia Mecânica*. 2016, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis.
13. Silva, R.H.G., Dutra, J. C. , *Controlled short-circuiting MIG/MAG welding (CCC) - Process analysis tools*. Welding and Cutting, 2009. **3**: p. 162-167.
 14. Kindermann, R.M., Puhl, E B., *Desenvolvimento de sistemas robotizados de soldagem com ênfase na soldagem orbital de tubulações com a utilização de sensoriamento a LASER*. 2016, Relatório Interno - LABSOLDA. p. 12.
 15. Cederberg, P., *On Sensor-Controlled Robotized One-off Manufacturing Robotics*, in *Department of Electrical and Information Technology*. 2004, Lund University: Sweden. p. 123.
 16. Pires, J.N., *Welding robots : technology, system issues and applications* 2006: Springer.
 17. Ivica Garašić, Z.K., Maja Remenar, *SENSORS AND THEIR CLASSIFICATION IN THE FUSION WELDING TECHNOLOGY*. Technical Journal 22, 2015. **4**: p. 1069-1074.
 18. Quinn, T.P., Smith, C., Mccowan, C. N., Blachowiak, E., Madigan, R. B. , *Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding*. Welding Journal, 1999. **SETEMBER**: p. 322-328.
 19. Fridenfalk, M. and G. Bolmsjö, *Design and validation of a universal 6D seam-tracking system in robotic welding using arc sensing*. Advanced Robotics, 2004. **18**(1): p. 1-21.
 20. Wu, C.S., J.Q. Gao, and D.M. Wang, *Observation of weld pool profiles in short-circuiting gas metal arc welding*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011. **225**(10): p. 1873-1887.
 21. Gao, X., et al., *Weld-pool image centroid algorithm for seam-tracking vision model in arc-welding process*. IET Image Processing, 2011. **5**(5): p. 410-419.
 22. Vision, M., *Smart Laser Tools User Manual*. 2012, User Manual, Version 1.0.1.
 23. Servo-Robot, *Power-Cam 3D Vision Camera - Instalation and Operation Manual*, Servo-Robot, Editor. 2015: Canada.
 24. Systems, M.V. *New Generation Laser Sensor Increases Quality & Speed of Welding*. 2014 Disponível em: <http://www.metamvs.com/news>. Acesso em 10 de maio de 2017.

25. TWI. *Robotic arc welding*. 2017 Disponível em: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/robotic-arc-welding-135/>. Acesso em 04 de abril de 2017.
26. Tong, H., Era, T., Ueyama, T., *Development of adaptive control system for alternating current pulsed metal inert gas welding parameters*. Science and Technology of Welding and Joining, 2002. **7**(6): p. 408-412.
27. Buschinelli, P.D.V., *Desenvolvimento de um Sistema Óptico por Triangulação Cônica para Inspeção do Perfil Interno de Dutos*. 2007, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Indústria.
28. Gooch, R., *Optical Metrology in Manufacturing Automation*. Sensor Review, 1998. **18**(2): p. 81-87.
29. Kennedy, W.P., *The Basic of Triangulation Sensors*. The Journal of Applied Sensing Technology, 1998.
30. Qi, Y., Jing, F., Tan, M., *Line-feature-based calibration method of structured light plane parameters for robot hand-eye system*, in *Optical Engineering*. 2013.
31. Jordt, A., Siebel, N. T., Sommer, G., *Automatic High-Precision Self-Calibration of Camera-Robot Systems*, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009.
32. Pinto, T.L.F.C., *Medição óptica, comparação e sinalização de superfícies com forma livre de grande extensão*, in *Programa de Pósgraduação em Engenharia Mecânica*. Universidade Federal de Santa Catarina.
33. Santolaria, J., et al., *A one-step intrinsic and extrinsic calibration method for laser line scanner operation in coordinate measuring machines*. Measurement Science and Technology, 2009. **20**(4): p. 045107.
34. Mirapeix, J., et al., *Plasma spectroscopy analysis technique based on optimization algorithms and spectral synthesis for arc-welding quality assurance*. Optics Express, 2007. **15**(4): p. 1884-1897.
35. Ye, Z., et al., *Passive vision based seam tracking system for pulse-MAG welding*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **67**(9): p. 1987-1996.
36. Hang, K., Pritschow, G. . *Reducing distortions caused by the welding arc in a laser stripe sensor system for automated seam tracking*. in *Industrial Electronics, 1999. ISIE '99. Proceedings of the IEEE International Symposium on*. 1999.

37. Gu, W.P., Xiong, Z. Y., Wan, W., *Autonomous seam acquisition and tracking system for multi-pass welding based on vision sensor*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **69**(1): p. 451-460.
38. Muhammad, J., Altun, H., Abo, E., *Welding seam profiling techniques based on active vision sensing for intelligent robotic welding*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016: p. 1-19.
39. Li, Y., et al., *Recent Developments on Welding Image Processing and Features Extraction*. Measurement and Control, 2007. **40**(5): p. 139-145.
40. De, X., et al. *Features extraction for structured light image of welding seam with arc and splash disturbance*. in *ICARCV 2004 8th Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004*. 2004.
41. Huang, W., Kovacevic, R., *A Laser-Based Vision System for Weld Quality Inspection*. Sensors (Basel, Switzerland), 2011. **11**(1): p. 506-521.
42. Guojin, L., Guorong, W., Jiguang, Z. *A genetic algorithm on welding seam image segmentation*. in *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No.04EX788)*. 2004.
43. Li, Y., et al., *Measurement and Defect Detection of the Weld Bead Based on Online Vision Inspection*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010. **59**(7): p. 1841-1849.
44. Kaur, K., Khehra, S. B., *A Survey on Image Denoising in Wavelet Domain*. International Journal of Research, 2016. **3**: p. 394-398.
45. Liu, X., Wang, G., Shi, Y. *Image Processing of Welding Seam Based on Single-stripe Laser Vision System*. in *Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*. 2006.
46. Huang, Y.R., Zhao, N. N. , *Weld Seam Recognition Based on Wavelet Analysis Algorithm*. Key Engineering Materials, 2011 **480-481**: p. 1593-1597.
47. Jintao, Y., Xian, L., Mingli, D., Shicheng, D., Junling, L., *Weld Seam Recognition Based On CCD Image Processing*. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2015. **8**(6): p. 245-252.
48. Gan, Z., Tang, Q., *Visual Sensing and its Applications: Integration of Laser Sensors to Industrial Robots*. 2011: Springer Berlin Heidelberg.

49. Jae Seon, K., et al. *A robust method for vision-based seam tracking in robotic arc welding*. in *Proceedings of Tenth International Symposium on Intelligent Control*. 1995.
50. Haug, K. and G. Pritschow. *Robust laser-stripe sensor for automated weld-seam-tracking in the shipbuilding industry*. in *Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE*. 1998.
51. Nerosky, L.A., “*Medição de Formas Livres Através da Integração de um Sensor Óptico Tipo "Folha de Luz" em um Braço de Medição*” 2001, Dissertação, PósMCI, Universidade Federal de Santa Catarina.
52. Wu, J., Smith, J. S., Lucas, J. , *Weld bead placement system for multipass welding [using transputer-based laser triangulation vision system]*. IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, 1996. **143**(2): p. 85-90.
53. Sang-Min, Y., et al., *Weld line detection and process control for welding automation*. Measurement Science and Technology, 2007. **18**(3): p. 819.
54. Luo, H., Chen, X., *Laser visual sensing for seam tracking in robotic arc welding of titanium alloys*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005. **26**(9): p. 1012-1017.
55. Fang, Z., Xu, D., Tan, M., *A Vision-Based Self-Tuning Fuzzy Controller for Fillet Weld Seam Tracking*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011. **16**(3): p. 540-550.
56. Instruments, N. *Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW 2017* Disponível em: <http://www.ni.com/labview/pt/>. Acesso em 03 de maio de 2017.
57. Ptgrey. *Flea3 1.3 MP Mono GigE Vision CS-Mount*. 2017 Disponível em: <https://www.ptgrey.com/flea3-13-mp-mono-gige-vision-cs-mount-sony-icx445>. Acesso em 03 de março de 2017.
58. Optics, E. *16mm MegaPixel Fixed Focal Length Lens*. 2017 Disponível em: <https://www.edmundoptics.com/imaging-lenses/fixed-focal-length-lenses/megapixel-fixed-focal-length-lenses/56788/>. Acesso em 03 de março de 2017.

59. Osela. Structured lighting solutions. [cited 2017 3 de março de 2017]; Available from: <http://www.osela.com/products/streamline-laser/>.
60. Demagd, K., et al., Practical Computer Vision with SimpleCV: The Simple Way to Make Technology See. 2012: O'Reilly Media, Inc. 254.
61. Fox, J., Applied Regression Analysis, Linear Models, and Related Methods. 1997: SAGE Publications.
62. BARROS, A.L.B.P., Revisitando o problema de classificação de padrões na presença de outliers usando técnicas de regressão robusta., in Engenharia de Teleinformática - Centro de Tecnologia. 2013, , Universidade Federal do Ceará.
63. Chambers, J.M., Graphical methods for data analysis. 1983: Wadsworth International Group.
64. IMC SOLDAGEM. Linha Digiplus A7. [cited 2017 07 de julho de 2017]; Available from: <http://www.imc-soldagem.com.br/pt-br/equipamentos/fontes-de-soldagem/multiprocesso/linha-digiplus-a7>.
65. DIRENE FILHO, H., MIG/MAG CCC - Avanços na Tecnologia de Controle da Transferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz, in Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2014, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis.
66. GOM. Portal de fabricante de sistema de medição [cited 2017 08 de julho de 2017].
67. Prada, D.L., Puhl, E.B., Pinto, T. L. F. C., Silva, R. H. G., Algoritmo para Extração das Características do Chanfro Aplicado em Sensores de Triangulação Laser para Soldagem,, in XLII CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem. 2016.
68. Silva, R. H. G.; Pinto, T. L. F. C.; Dutra, J. C.; Puhl, E. B.; Viviani, A. B.; Schwedersky, M. B. Welding Joint Features Extraction Algorithm for Laser Triangulation Sensors Applied to Root Pass Control, Soldagem & Inspeção, 2017, Vol.: 22, pp.: 14-23. DOI: 10.1590/0104-9224/SI2201.03.