



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS REITOR JOÃO DAVID FERREIRA LIMA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Alberto Bonamigo Viviani

Sensores de Triangulação a Laser aplicados a Soldagem: aspectos construtivos, avaliação comparativa e desenvolvimento de software livre

Florianópolis – SC
2021

Alberto Bonamigo Viviani

Sensores de Triangulação a Laser aplicados a Soldagem: aspectos construtivos, avaliação comparativa e desenvolvimento de software livre

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

Orientador: Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr.

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

Coorientador: Eng. Walter Antonio Kapp, Dr.

Florianópolis – SC

2021

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

Viviani, Alberto Bonamigo

Sensores de Triangulação a Laser aplicados a Soldagem :
aspectos construtivos, avaliação comparativa e
desenvolvimento de software livre / Alberto Bonamigo
Viviani ; orientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva,
coorientador, Tiago Loureiro Fígaro da Costa Pinto,
coorientador, Walter Antonio Kapp, 2021.

210 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Automação da Soldagem. 3.
Sensores de Triangulação a Laser. 4. Soldagem Adaptativa.
5. Processamento de Imagens. I. Silva, Régis Henrique
Gonçalves e. II. Pinto, Tiago Loureiro Fígaro da Costa. III.
Kapp, Walter Antonio IV. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
V. Título.

Alberto Bonamigo Viviani

Sensores de Triangulação a Laser aplicados a Soldagem: aspectos construtivos,
avaliação comparativa e desenvolvimento de software livre

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

Prof. Sadek Crisostomo Absi Alfaro, Dr.

Universidade de Brasília – UnB

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Prof. Paulo de Tarso Rocha de Mendonça, Dr.

Coordenador do Programa

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2021.

Este trabalho é dedicado à minha amada família e estimados colegas de trabalho.

AGRADECIMENTOS

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

- Professor Régis Henrique Gonçalves e Silva, pela oportunidade de realização deste trabalho, apoio e conhecimentos transmitidos;
- Professor Jair Carlos Dutra, por toda a atuação prévia que possibilitou a realização deste trabalho;
- Professores Tiago Loureiro Fígado da Costa Pinto e Walter Antonio Kapp, pela coorientação e suporte nos desenvolvimentos;
- Doutor Raul Gohr Junior, pelo conhecimento transmitido e disposição ímpar para questionamentos;
- Doutores Cleber Marques e Eduardo Bidese Puhl, pela grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho e atividades afins;
- À dupla dinâmica do setor de compras, Daniel Galeazzi e Rafael Albino Bernardi, além do responsável anterior, Hellinton Direne Filho, e o atual, Ivan Olszanski Pigozzo, todos Mestres e grandes amigos que me auxiliaram tanto nesta jornada;
- Mestres Fernando Costenaro e Felipe Kalil Mendonça, pela grande ajuda e atuação direta no desenvolvimento deste trabalho;
- Demais membros do LABSOLDA, colegas de profissão que tanto estimo, tanto os atuais quanto os que já passaram pelo Instituto, em especial aos colaboradores ainda não citados: Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Prof.a Cleide Maria Marqueze, João Facco de Andrade, Cleber Guedes, M^o Marcelo Pompermaier Okuyama, Rafael Jônatan Horn, Eduardo José da Luz, Ricardo Campagnin, Fernando Ruviano e Marcus Barnetche, além dos meus ex-colegas bolsistas que atuaram sob minha supervisão direta: Rodrigo da Silva Machado, Víctor Pascuo Celva e Gustavo Henrique Truppel;
- Minha família, em especial minha esposa Thalita Juliana Mozer Viviani e nossas filhas, Julieta Fox Mozer Viviani e Jessie Story Rayger, meus pais Carlos Alberto Viviani e Márcia Bonamigo Viviani e meu irmão Henrique Bonamigo Viviani;
- Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica;
- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Sistemas de soldagem adaptativa representam hoje o estado da arte em automação da soldagem. Combinando sensoriamento, algoritmos complexos e integração entre os componentes do sistema de soldagem, é possível que o sistema automatizado tenha o desempenho esperado do soldador. Entre os sensores utilizados para este tipo de sistema, os sensores de triangulação a laser para soldagem (STL) se destacam pela compacidade e riqueza de informações disponibilizadas. Além de posicionar espacialmente a junta, são sensores capazes de medir a geometria do chanfro ao longo da trajetória de soldagem, sem a necessidade de contato com a peça. Este tipo de sensor já é disponibilizado no mercado internacional, sendo que o mercado nacional carece de opções com desenvolvimento próprio no Brasil. Este trabalho explora a tecnologia por trás do projeto e desenvolvimento de um sensor deste tipo, abordando aspectos de arranjo óptico, algoritmos e soluções já presentes na indústria, de forma a nacionalizar este conhecimento multidisciplinar. Os arranjos ópticos considerados auxiliam na escolha do posicionamento ideal entre os principais elementos do sensor, a câmera (ou sensor de imagem) e o laser. Os algoritmos avaliados propiciam opções de escolha entre os que apresentam bom desempenho em geral ou os que desempenham excepcionalmente em casos específicos. Um *software* de processamento de imagens para STL é proposto, desenvolvido em plataforma de *software* livre e disponibilizado ao público, facilitando a avaliação de algoritmos já implementados e o desenvolvimento de novos algoritmos por pesquisadores brasileiros. O estudo de diferentes STL comerciais evidencia as tecnologias de *hardware* e *software* adotadas pelos desenvolvedores estrangeiros, principalmente quanto aos pontos positivos de cada sensor, servindo de base para desenvolvimento dos sensores nacionais. Dessa forma, este trabalho contribui para a nacionalização de uma tecnologia de ponta no campo da soldagem automatizada, com potencial para auxiliar pesquisadores, desenvolvedores e integradores brasileiros a trabalharem com esta tecnologia de forma independente à tecnologia estrangeira ou de melhor escolherem entre os sensores importados já disponíveis no mercado.

Palavras-chave: Automação da Soldagem. Soldagem Adaptativa. Triangulação Laser. Projeto Óptico. Processamento de Imagens. Seguimento de Junta.

ABSTRACT

Adaptive welding systems represent today the state of the art in welding automation. By combining sensing, complex algorithms and integration between the components of the welding system, it is possible for the automated system to perform as expected by the welder. Among the sensors used for this type of system, the laser triangulation sensors for welding (LTS, or STL in Portuguese) stand out for their compactness and richness of information provided. Besides spatially positioning the joint, these sensors are capable of measuring the joint geometry along the welding path, without the need for contact with the workpiece. This type of sensor is already available in the international market, and the domestic market lacks options with its own development in Brazil. This work explores the technology behind the design and development of such a sensor, addressing aspects of optical arrangement, algorithms and solutions already present in the industry, in order to nationalize this multidisciplinary knowledge. The optical arrangements considered help choosing the optimal positioning among the main elements of the sensor, the camera (or image sensor) and the laser. The evaluated algorithms provide a choice between those that perform well in general cases or those that perform exceptionally in specific ones. An image processing software for STL is proposed, developed in a free software platform and made available to the public, facilitating the evaluation of algorithms already implemented and the development of new algorithms by Brazilian researchers. The study of different commercial STL highlights the hardware and software technologies adopted by foreign developers, especially regarding the positive points of each sensor, serving as inspiration for the development of Brazilian sensors. Thus, this work contributes to the nationalization of a cutting-edge technology in the field of automated welding, with potential to assist Brazilian researchers, developers and integrators to work with this technology independently of foreign technology or to better choose among the imported sensors already available in the market.

Keywords: Welding Automation. Adaptive Welding. Laser Triangulation. Optical Design. Image Processing. Seam tracking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – STL realizando correção de trajetória sobre o chanfro.	25
Figura 2.2 – Esboço dos componentes de um STL e princípio de funcionamento.	26
Figura 2.3 – Sistema <i>ARTIST</i>	27
Figura 2.4 – Sensores 1D: Funcionalidades.	28
Figura 2.5 – Sensores 2D: Funcionalidades.	29
Figura 2.6 – STLs disponíveis atualmente no mercado.....	30
Figura 2.7 – Sistema de soldagem orbital interna <i>ORBIS IWM</i>	31
Figura 2.8 – Sistema de manufatura aditiva automatizada <i>LAWS 1000</i>	32
Figura 2.9 - <i>Roboturb</i> realizando medição com sensor de triangulação a laser e resultados da deposição automatizada de duas camadas para recuperação de superfície desgastada.	36
Figura 2.10 – Integração de manipulador <i>TARTÍLOPE V2</i> a sensor <i>SLS050-V1</i>	37
Figura 2.11 – STL de desenvolvimento nacional montado a uma tocha MIG automática.	38
Figura 2.12 – Sistema de soldagem adaptativa desenvolvido por LABSOLDA e parceiros. ..	39
Figura 3.1 – Diagrama de feixes de STL com laser normal à superfície de interesse e sensor de imagem paralelo à esta.	41
Figura 3.2 – Diagrama de feixes com laser e sensor de captura de imagem oblíquos.	43
Figura 3.3 – Diagrama de feixes com laser e sensor de captura de imagem paralelos.....	44
Figura 3.4 – Exemplo de aplicação do ângulo de Schleimpflug.	45
Figura 3.5 – Sensores com projeção pontual fixa.....	49
Figura 3.6 – Concepção de sensor com “corte em delta”.....	50
Figura 3.7 – Sensor com projeção pontual expandida.....	51
Figura 3.8 – Exemplo de sensor com projeção pontual móvel.....	52
Figura 3.9 – Esquemático do arranjo óptico do CSS.	52
Figura 3.10 – Sensor CSS e aplicações: (A) Detecção de borda; (B) Localização do chanfro; (C) Medição de quina em uma só imagem; (D) Detecção do início da junta.....	53
Figura 3.11 – Sensor <i>Arc-Eye</i> da fabricante Valk Welding.	53
Figura 3.12 – Exemplo de combinações de sensores com projeção pontual fixa.	55
Figura 3.13 – Sensor <i>Xtion PRO LIVE</i>	56
Figura 3.14 – Exemplos de aplicação do sensor <i>Xtion PRO LIVE</i>	56
Figura 3.15 – Arranjo de um STL de projeção linear fixa.	58
Figura 3.16 – Sensores <i>SLS</i> (A) e <i>SLS ARC</i> (B).....	59

Figura 3.17 – Sensores <i>POWER-CAM</i> da fabricante Servo-ROBOT.	60
Figura 3.18 – STL com projeção linear singular da RIFTEK. Diferenciação por profundidade de medição: (A e B) 25 mm, (C e D) 130 mm e (E) 250 mm.	61
Figura 3.19 – Sensor <i>CSL – Cross Structured Light</i>	64
Figura 3.20 – Sistema <i>Meta Scout</i> , STL com projeção de 5 linhas.	65
Figura 3.21 – Sensores da linha <i>TH6x</i> da fabricante Scansonic Binzel.	65
Figura 3.22 – Sistemas de escaneamento para soldagem.	66
Figura 3.23 – Sistemas com combinação de vários sensores da fabricante Riftek.	67
Figura 3.24 – Sistema <i>PEMS</i> para medição de bisel da fabricante Meta Vision Systems.	67
Figura 3.25 – Sensores <i>Quanta</i> da fabricante Servo-ROBOT.....	68
Figura 3.26 – Exemplo de aplicação com dois sensores <i>Quanta</i>	68
Figura 3.27 – Sensor com projeção triangular (três linhas) e esquema da visão coaxial.	69
Figura 4.1 – Padrão de teste para aplicação de ruídos.	71
Figura 4.2 – Modelos de ruídos característicos do sensor de imagem e seus histogramas.	71
Figura 4.3 – Outros modelos de ruídos característicos do sensor de imagem e histogramas.	72
Figura 4.4 – Imagem de STL livre de ruídos da soldagem.....	73
Figura 4.5 – Imagens com respingos, em grande quantidade e grosseiros, respectivamente...	73
Figura 4.6 – Imagens com respingos de difícil remoção por filtragem.	75
Figura 4.7 – Imagem com reflexo do arco elétrico.....	76
Figura 4.8 – Imagens com reflexos da face do chanfro.	77
Figura 4.9 – Imagem de ruído com reflexo impróprio da linha laser.	78
Figura 4.10 – Transformações básicas para ajuste dos níveis de cinza.	84
Figura 4.11 – Transformações em potência para ajuste dos níveis de cinza.	85
Figura 4.12 – Transformações em potência para ajuste dos níveis de cinza.	87
Figura 4.13 – Operação de <i>zoom out</i> por <i>pixel sampling</i> (esquerda) e interpolação (direita)..	88
Figura 4.14 – Operação de <i>zoom in</i> por <i>pixel replication</i> (esquerda) e interpolação (direita).	89
Figura 4.15 – Processamento da primeira imagem por comparação com <i>template</i> para definição da <i>ROI</i> , com imagem original (esquerda), <i>template</i> (centro) e <i>matching</i> (direita).....	91
Figura 4.16 – Definição da <i>ROI</i> com base na análise linha a linha e coluna a coluna.	91
Figura 4.17 – Dilatação aplicada ao processamento de textos e elemento estruturante.	93
Figura 4.18 – Operações de erosão e dilatação e exemplos de <i>kernels</i>	93
Figura 4.19 – Operações de erosão (A), dilatação (B), abertura (C) e fechamento (D).	94

Figura 4.20 – Duas máscaras 3x3 de filtros de média, sendo que as constantes multiplicando as máscaras são iguais a soma dos valores dos coeficientes do filtro, para cálculo da média.....	96
Figura 4.21 – Filtragem com mediana, com imagem original (esquerda), filtro de média com máscara 3x3 (centro) e filtro mediana 3x3 (direita).	97
Figura 4.22 – Filtragem Gaussiana, imagem original e mediana, respectivamente.	97
Figura 4.23 – Exemplo de <i>kernels</i> derivativos para operador de Sobel	98
Figura 4.24 – Exemplos de <i>kernels</i> alternativos para operador de Sobel.....	98
Figura 4.25 – Fluxograma da filtragem no domínio da frequência.	99
Figura 4.26 – Exemplos de filtros para domínio da frequência.....	100
Figura 4.27 – Exemplos de diferentes tipos de <i>threshold</i> (limiar) disponíveis na <i>OpenCV</i> ...	102
Figura 4.28 – Segmentação das imagens originais (esquerda) com algoritmo de Otsu (centro) e Otsu melhorado (direita).....	103
Figura 4.29 – Segmentação da imagem original (esquerda) por <i>thresholding</i> associado a <i>ROI</i> (centro) e seu resultado final (direita).....	104
Figura 4.30 – Análise da intensidade luminosa das colunas pela técnica de múltiplos picos.	107
Figura 4.31 – Identificação do perfil da junta (direita) por critérios de vizinhança do Pico 1 (à esquerda, maior intensidade) com o Pico 2 (centro, segunda maior intensidade)...	107
Figura 4.32 – Pontos de inflexão para diferentes tipos de junta: A) tipo U ou com preenchimento parcial, B) quadrada, C) tipo V, D) sobreposta e E) em ângulo.	109
Figura 4.33 – Filtragem da linha laser na imagem original (A) por detecção de mudança de luminosidade (B) e média das linhas de borda (C).....	110
Figura 4.34 – Uso da técnica da segunda derivada para indicação dos pontos de inflexão, sendo (A) imagem original, (B) linha laser identificada e (C) segunda derivada da linha laser.	111
Figura 4.35 – Uso da técnica da segunda derivada em junta com preenchimento parcial, sendo (A) imagem com linha laser filtrada e (B) segunda derivada da linha laser.	111
Figura 4.36 – Exemplo de aplicação de um padrão simples (esquerda) para localizar o ponto de interesse sobre a linha laser (direita).	112
Figura 4.37 –Processamento de imagens por correlação de padrões.	113
Figura 4.38 – Exemplo de aplicação <i>rule based</i> para processamento de imagem.	114
Figura 4.39 – Exemplo de tabelas de descritores primitivos (esquerda) e de junta (direita)..	115
Figura 4.40 – Localização do chanfro por análise dos ângulos nos pontos de inflexão.....	116
Figura 4.41 – Algoritmo “pontos de canto” aplicado em diferentes estágios da soldagem. ..	117
Figura 4.42 – Algoritmo “pontos de canto” aplicado em imagem com ruídos da soldagem.	118

Figura 5.1 – Tomógrafo <i>Metrotom 1500</i> da fabricante Carl Zeiss.	120
Figura 5.2 - Posicionamento dos sensores: (A) STL1, (B) STL2 e (C) STL3.	123
Figura 5.3 – Metodologia para identificação nas n medições por ponto i de referência.	126
Figura 5.4 – (A) Bancada para aquisição de imagens e (B) detalhe do laser sobre a junta....	130
Figura 6.1 – STL1: SLS-050V1 e <i>software</i> Smart Laser Tools.	134
Figura 6.2 – STL2: <i>POWER-CAM</i> e <i>software</i> WeldCom.....	135
Figura 6.3 – STL3: <i>TH6D-150-CF</i> e <i>software</i> THxDView.	136
Figura 6.4 – STL4: Sensor LABSOLDA e <i>software</i> próprio desenvolvido em <i>LabVIEW</i> ...	137
Figura 6.5 – STL1: Resultado da tomografia com detalhamento do arranjo óptico.	138
Figura 6.6 – STL2: Resultado da tomografia com detalhamento do arranjo óptico.	139
Figura 6.7 – STL3: Principais características mecânicas do sensor.	141
Figura 6.8 – STL4: Arranjo óptico do sensor e principais componentes.	142
Figura 6.9 – STL4: Destaque para o sensor sem a proteção lateral montada.....	142
Figura 6.10 – <i>CSI</i> : robô de soldagem interna adaptativa e inspeção, com destaque do STL.	144
Figura 6.11 – Placa de acoplamento e resfriamento do STL1 (esquerda), montada ao sensor (centro) e placa de acoplamento e isolamento do STL2 (direita).....	145
Figura 6.12 – Compensação de movimento inesperado do STL por sensor de três linhas. ...	147
Figura 6.13 – Soluções para acomodação da janela de proteção óptica no STL3 (esquerda) e no STL2 (direita).	148
Figura 6.14 – Padrões de junta pré-programados nos sensores <i>SLS</i> e <i>SLS Arc</i>	149
Figura 6.15 – Integração do STL1 à PCA em sua versão inicial.....	150
Figura 6.16 – Tela de ajuste de padrão do <i>software</i> Smart Laser Tools.....	150
Figura 6.17 – <i>Software</i> WeldCom da fabricante Servo-ROBOT.....	151
Figura 6.18 – Tela do <i>software</i> THxDView, usado pelo STL3.....	152
Figura 6.19 – Sequência de processamento das imagens captadas pelos sensores <i>TH6x</i>	153
Figura 6.20 – Tela de calibração do <i>software</i> do STL4.....	155
Figura 6.21 – Tela de processamento por Correlação de Padrões no <i>software</i> do STL4.....	155
Figura 6.22 – Tela de configuração de <i>templates</i> do software da fabricante RIFTEK.	156
Figura 6.23 – Parâmetros para customização de <i>templates</i> , software da RIFTEK. (A) Comprimento de reta, (B) Distância entre retas, (C) Ângulo de rotação, (D) Ângulo de inclinação da reta, (E) Distância entre retas avançado e (F) Mudança de direção.	156
Figura 6.24 – Avaliação de performance do STL1 para medição da abertura de raiz (<i>gap</i>)..	160
Figura 6.25 – Avaliação de performance do STL2 para medição da abertura de raiz (<i>gap</i>).	161

Figura 6.26 – Funcionamento do filtro antirreflexo.	162
Figura 6.27 – Avaliação de performance do STL3 para medição da abertura de raiz (<i>gap</i>). ..	163
Figura 6.28 – Imagens processadas com STL3, A e B <i>off-line</i> , C e D <i>online</i>	164
Figura 6.29 – Imagens processadas com STL3 na repetição, A e B <i>off-line</i> , C e D <i>online</i> . ..	166
Figura 6.30 – Repetição do ensaio para avaliação operacional do STL3.	167
Figura 6.31 – Gráfico do ensaio <i>off-line</i> do STL3 com escala corrigida.	168
Figura 7.1 – <i>Software</i> livre desenvolvido para processamento de imagem, tela principal.	172
Figura 7.2 – Características da tela principal do <i>software</i> livre desenvolvido.	173
Figura 7.3 – Processamento de imagens para STL.	176
Figura 7.4 – <i>Kernel</i> da dilatação (esquerda) e erosão (direita).	177
Figura 7.5 – Avaliação de performance do STL2 para medição da abertura de raiz.	180
Figura 7.6 – <i>Software</i> para estudo de algoritmos de processamento de imagem para STL. ..	182

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Classificação dos STL para a metrologia óptica, a soldagem e a robótica.....	48
Quadro 5.1 – Equipamentos e condições de soldagem	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Especificação de STL com projeção linear singular fixa.	62
Tabela 5.1 – Especificações dos STL selecionados para investigação de <i>hardware</i>	120
Tabela 5.2 – Parâmetros de soldagem e deslocamento do processo CCC.	124
Tabela 5.3 – Posicionamento dos sensores a laser.	125
Tabela 5.4 – Parâmetros de soldagem MIG/MAG para aquisição de imagens.	131
Tabela 6.1 – Resultados da avaliação de desempenhos de STL comerciais.	159
Tabela 6.2 – Resultados da avaliação de desempenhos de STL comerciais.	166

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>CCD</i>	<i>Charge-Coupled Device</i> , sensor de imagem muito utilizado em âmbito geral, formado por uma matriz de capacitores acoplados
<i>CMOS</i>	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i> , sensor de imagem que utiliza transistores MOSFET em pares simétricos e complementos
<i>CMT</i>	<i>Cold Metal Transfer</i> , processo da Fornius derivado do MIG/MAG
<i>DBCP</i>	Distância Bico de Contato – Peça, mínima distância entre o bico de contato no processo MIG/MAG e a peça a ser soldada
<i>FPGA</i>	<i>Field Programmable Gate Array</i> , dispositivo lógico programável
<i>HT</i>	<i>Hough Transform</i> , transformada de Hough
<i>PCA</i>	Plataforma de Controle Adaptativo, <i>software</i> do LASBOLDA - UFSC
<i>RGB</i>	<i>Red Green Blue</i> , sistema de cores que utiliza Vermelho, Verde e Azul para compor imagens coloridas digitais, muito utilizado em monitores.
<i>ROI</i>	<i>Region of Interest</i> , região de interesse, delimita a área útil da imagem
<i>SDK</i>	<i>Software Development Kit</i>
<i>STL</i>	Sensor de Triangulação a Laser aplicável a soldagem

LISTA DE SÍMBOLOS

d	Deslocamento da superfície de interesse em relação ao início do Campo de Medição, medido a partir de uma distância d_0
d_0	Distância vertical entre o centro das lentes de captação e o ponto de início do Campo de Medição
f	Distância focal da lente de captação
h	Altura aparente do deslocamento d
h'	Altura da imagem projetada pelo deslocamento d
s	Distância aparente do deslocamento d à lente de projeção
s'	Distância da imagem projetada à lente de projeção teórica
s_0	Distância entre o ponto laser sobre a superfície de interesse e o centro das lentes de captação quando a superfície está no início do Campo de Medição ($d = 0$)
z	Medida do deslocamento vertical do ponto laser no sensor
α	Ângulo formado pela superfície do sensor em relação ao eixo das lentes de captação
θ	Ângulo primário de triangulação, formado pelo feixe laser e o eixo das lentes de captação
r	Valor de entrada do pixel (256 níveis, 8 bits)
s	Valor de saída do pixel (256 níveis, 8 bits)
L	Quantização de níveis de cinza da imagem original
$f(x,y)$	Imagem de entrada
$g(x,y)$	Imagem de saída
T	Valor do limiar (<i>threshold</i>)
ρ	Distância da coordenada de origem (0,0),
θ	Ângulo de rotação em radianos (0 corresponde a linha vertical, $\pi/2$ linha horizontal)
$Erro_i$	Erro médio de para cada medição i de referência
Ref_i	Valor de referência da abertura de raiz na posição i de referência
$\overline{GapF_i}$	Valor da média das medições filtradas da abertura na posição i de referência

$\overline{GapF}_n$	Medição de índice n considerada dentro da faixa de medição
n	Número de medições registradas na faixa de medição de cada ponto i de referência
$Precisão_i$	Parcela aleatória do erro calculada para cada ponto i de referência
s_i	desvio padrão da amostra na posição i de referência
t_n	Coeficiente da distribuição de <i>Student</i> , considerando nível de confiança de 95%
$GapF_{n,j}$	Medição filtrada de índice n , da operação j de filtragem
$GapF_{n-1,j}$	Medição filtrada anterior à de índice n , da operação j de filtragem
γ_j	Coeficiente do filtro <i>exponential smoothing</i> na operação j de filtragem
$Gap_{n,j-1}$	Medição “não filtrada” de índice n , da operação anterior ($j - 1$) de filtragem
ErroMax	Maiores valores filtrados de tendência e precisão da medição
ErroMed	Média dos valores filtrados de tendência e precisão
ErroMaxSTL	Maiores valores não filtrados de tendência e precisão da medição
ErroMedSTL	Média dos valores não filtrados de tendência e precisão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVO GERAL	22
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
2	STL - SENSORES DE TRIANGULAÇÃO A LASER PARA SOLDAGEM	24
2.1	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS STL	24
2.2	TIPOS DE STL E ESTADO DA ARTE.....	27
2.3	ALGORITMOS PARA INTEGRAÇÃO DOS STL A SOLDAGEM.....	32
2.4	HISTÓRICO DE APLICAÇÕES COM STL DESENVOLVIDAS NO LABSOLDA..	36
3	ARRANJOS ÓPTICOS APLICÁVEIS A STL.....	40
3.1	ARRANJOS APLICÁVEIS A STL.....	40
3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS STL	46
3.3	STL COM PROJEÇÃO PONTUAL.....	48
3.4	STL COM PROJEÇÃO LINEAR SINGULAR	56
3.5	STL COM MÚLTIPLAS PROJEÇÕES LINEARES.....	63
4	PROCESSAMENTO DE IMAGEM PARA STL	70
4.1	RUÍDOS EM IMAGENS DE STL	70
4.2	ETAPAS DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS PARA STL.....	78
4.3	EXIBIÇÃO.....	81
4.4	FILTRAGEM.....	95
4.5	SEGMENTAÇÃO	100
4.6	IDENTIFICAÇÃO DA LINHA LASER.....	104
4.7	MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA JUNTA	109
5	MATERIAIS E MÉTODOS	119
5.1	INVESTIGAÇÃO DE <i>HARDWARE</i> E <i>SOFTWARE</i> DOS STL COMERCIAIS.....	119
5.2	ENSAIOS DE DESEMPENHO DOS STL COMERCIAIS.....	122

5.3	DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i> DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM .	129
6	AVALIAÇÃO DE SENSORES COMERCIAIS	133
6.1	STL1 – SENSOR META VISION SYSTEMS	133
6.2	STL2 – SENSOR SERVO-ROBOT	134
6.3	STL3 – SENSOR SCANSONIC-BINZEL	135
6.4	STL4 – SENSOR DE DESENVOLVIMENTO NACIONAL - LABSOLDA	137
6.5	AVALIAÇÃO DE <i>HARDWARE</i>	137
6.6	AVALIAÇÃO DE <i>SOFTWARE</i>	149
6.7	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	158
6.8	ANÁLISE DOS RESULTADOS	168
7	SOFTWARE PARA PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE STL	171
7.1	<i>SOFTWARE</i> LIVRE PARA PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE STL	171
7.2	AQUISIÇÃO DE IMAGENS COM STL DURANTE A SOLDAGEM	174
7.3	<i>PIPELINES</i> PARA TESTE DO <i>SOFTWARE</i> DESENVOLVIDO	174
7.4	EXEMPLOS DE DESENVOLVIMENTO PARA O <i>SOFTWARE</i> PUBLICADO	178
8	CONCLUSÃO	183
9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	185
	REFERÊNCIAS	186

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos são fundamentais para o aumento de competitividade e produtividade na indústria em geral, especialmente no setor metal mecânico. A soldagem, nesse contexto, exerce papel fundamental na fabricação e manutenção de equipamentos e peças.

A automação dos processos de soldagem representa um grande potencial no cenário nacional. Apesar de tão importante, no Brasil a quantidade de pesquisas nesse ramo não corresponde a tamanha necessidade das mesmas. A dificuldade de automação e a grande complexidade inerente aos processos de soldagem são fatores que colaboram para esta situação. Em países altamente industrializados, como Alemanha, Estados Unidos e Japão, essa modalidade de produção é alvo de diversos desenvolvimentos.

No setor de Petróleo e Gás, além da Construção Naval, a soldagem é indiscutivelmente o processo de fabricação mais empregado e relevante para garantir a integridade estrutural, além do cronograma de obras e projetos. Nesse campo, o Brasil apresenta grande potencial de desenvolvimento e evolução.

A evolução constante dos processos de soldagem possibilita maiores velocidade de soldagem e taxa de deposição, fundamentais para o aumento de produtividade. Além disso, as fontes de soldagem avançam há décadas a passos largos com a utilização de circuitos microcontrolados, alcançando baixíssimo tempo de resposta (maior capacidade de controle) e grande versatilidade para atuação nas variáveis de processo.

Todos esses avanços acabam demandando o desenvolvimento de novos manipuladores de soldagem. A alta potência e grande taxa de deposição atingidos pelos novos equipamentos e processos já superam, em muito, a capacidade de condução da tocha do soldador e de atualização de parâmetros do operador de soldagem. Dessa forma, os manipuladores para soldagem mecanizada atuais já se mostram aquém das exigências.

A evolução natural destes sistemas de movimentação de tocha está na soldagem automatizada. Nessa modalidade, a percepção do operador é substituída por sensores, que têm a função de perceber o ambiente e a situação da peça. Essa percepção possibilita atuação automatizada no movimento da tocha para garantir a qualidade da união ou do revestimento.

A problemática nesse caso vai além do simples seguimento de junta, passo fundamental para qualquer sistema de soldagem automatizada. Para se chegar nesse nível de complexidade manejada pelo sistema de soldagem, é necessária a utilização de algoritmos

complexos para atuar não só na movimentação, mas também na fonte de soldagem. Esse tipo de sistema caracteriza a denominada soldagem automatizada adaptativa.

Um sistema de soldagem adaptativa deve ser capaz de atuar durante o processo de soldagem, superando quaisquer problemas produzidos antes e durante a execução da união. Essas dificuldades provêm do preparo da junta, montagem das peças, qualidade dos consumíveis e do material de base, além de efeitos “colaterais” da própria operação de soldagem, como a deformação pelo aporte térmico à peça.

Especificamente, a soldagem adaptativa implica em desafios de parametrização de soldagem e sensoriamento, formulação de regras (algoritmos) e parametrização de controle, de hardware e software (interface visual, sincronização, comunicação, tratamento de sinais, execução de processos concorrentes, relatórios digitais, tratamento de exceções, correção das variáveis de movimentação e de soldagem, entre outros).

O sucesso da operação, ou mesmo do desenvolvimento de um sistema deste tipo frente a todos esses desafios expostos, está diretamente atrelado à capacidade e qualidade do sensoriamento utilizado. Por esse motivo, são considerados os Sensores de Triangulação a Laser para soldagem (STL) como objeto de estudo deste trabalho, pela riqueza de informações da junta que disponibilizam a cada medição e a escassez de soluções no mercado atual, principalmente a nível nacional. Sendo assim, o desenvolvimento de um STL robusto, de fácil construção e replicação é o passo inicial na jornada que finda na fabricação de um sistema brasileiro de soldagem adaptativa.

A fim de buscar o desenvolvimento da tecnologia brasileira, além de contribuir para a diminuição da dependência nacional de equipamentos importados e tecnologia estrangeira, é necessário o estudo e desenvolvimento de um STL brasileiro capaz de, no mínimo, fazer frente aos sensores estrangeiros atuais. Dessa forma, o estudo e avaliação de alguns STL atualmente disponíveis no mercado inicia a jornada rumo a novos STL brasileiros.

Além da avaliação tecnológica dos sensores estrangeiros, o estudo combinado dos tipos de arranjos de componentes e algoritmos associados aos STL é inédito e de grande valia para desenvolvimentos futuros, uma vez que o projeto de um sensor deste tipo se traduz em grande multidisciplinaridade (soldagem, processamento de imagem, robótica, óptica, automação e programação). O desenvolvimento e publicação de um *software* livre para teste de algoritmos de processamento de imagens para STL é outro resultado esperado deste trabalho, que também servirá de base para desenvolvimentos de algoritmos e sistemas adaptativos brasileiros futuros.

Desta forma, este trabalho contribuirá para o desenvolvimento desta tecnologia, nacionalizando o conhecimento que é geralmente de propriedade exclusiva de empresas estrangeiras e segredo industrial. Além disso, ao explicar o funcionamento e princípios desta tecnologia, também há grande contribuição e incentivo à utilização dos sensores comerciais disponíveis, que ainda hoje são pouco explorados para a soldagem adaptativa a nível nacional.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral a integração de conhecimentos científicos e tecnológicos sobre sensoriamento por triangulação a laser aplicado a soldagem, possibilitando o desenvolvimento futuro de sensores brasileiros deste tipo, capazes de fazerem frente aos sensores estrangeiros, categorizando um estudo pioneiro e um grande avanço nesse campo para a indústria e os desenvolvedores nacionais deste tipo de sensor. A fim de propiciar este cenário, serão avaliados em profundidade aspectos construtivos destes sensores e seus algoritmos de processamento de imagem, sensores comerciais já existentes, com análise comparativa do desempenho real destes sensores e o desenvolvimento de um software livre básico para desenvolvimento futuro de STL e *pipelines* de processamento de imagem.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudo de diferentes arquiteturas ópticas possíveis para a constituição de um Sensor de Triangulação a Laser para soldagem (STL);
- Avaliação das características físicas e operacionais de alguns STL comerciais dos fabricantes Meta Vision Systems, Servo-ROBOT e Scansonic Binzel;
- Estudo dos diferentes algoritmos para processamento de imagens aplicáveis a STL;
- Elaboração e publicação de um *software* desenvolvido em plataforma de *software* livre para teste de novas *pipelines* (sequências) de algoritmos para processamento de imagem para STL, facilitando o desenvolvimento de novos algoritmos por pesquisadores brasileiros;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em nove capítulos, além das referências bibliográficas e três apêndices.

O Capítulo 2 contém a revisão teórica acerca dos sensores de triangulação a laser para soldagem (STL), abordando os princípios de funcionamento, principais características, tipos de sensores, estado da arte, algoritmos relacionados a implementação destes sensores e um breve histórico das aplicações com STL já desenvolvidas no LABSOLDA para melhor situar o leitor no contexto em que este trabalho foi realizado.

No Capítulo 3 são abordados os arranjos ópticos aplicáveis aos STL, com ênfase na classificação dos sensores, tipos e especificidades de cada tipo de arranjo e de sensor.

O Capítulo 4 contém a revisão teórica sobre as técnicas de processamento de imagem utilizadas para construção de um STL, abordando também a questão dos ruídos em imagens de STL e etapas do processamento, inclusive com uma proposta inédita de classificação destas técnicas com ênfase nas aplicações para STL.

Os materiais e métodos estão dispostos no Capítulo 5, abordando os dois principais focos de estudo prático deste trabalho: investigação dos sensores comerciais (*hardware*, *software* e desempenho) e desenvolvimento de um *software* livre de processamento de imagem.

O Capítulo 6 trata da avaliação dos sensores comerciais, abordando aspectos construtivos, características exclusivas de cada modelo em questão de *hardware* e *software* e também o desempenho destes sensores em situação prática de soldagem.

Finalmente, o Capítulo 7 aborda o desenvolvimento do *software* livre proposto, que inclusive foi publicado junto com este trabalho, no intuito de fornecer uma ferramenta para início do desenvolvimento de STL ou mesmo para aulas e demonstrações da tecnologia.

Após as conclusões (Capítulo 8) e as sugestões para trabalhos futuros (Capítulo 9), estão as referências bibliográficas e três apêndices, contendo: glossário de processamento de imagem (Apêndice A), guia de instalação do *software* desenvolvido (Apêndice B) e exemplos de imagem para utilização com o *software* publicado (Apêndice C).

2 STL - SENSORES DE TRIANGULAÇÃO A LASER PARA SOLDAGEM

A automação da soldagem, apesar da difícil tarefa de substituir os sentidos e instintos do soldador, avança continuamente nesta direção. Os sensores utilizados para emular os sentidos do soldador estão em constante desenvolvimento pelos fabricantes e centros de pesquisa universitários.

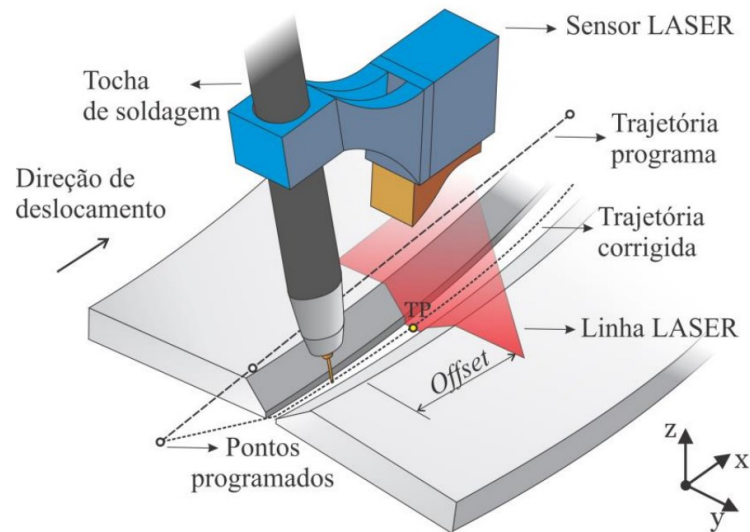
Estes sensores são responsáveis por perceber e medir parâmetros fundamentais para o controle do processo de soldagem, como tensão, corrente, posicionamento e geometria da junta, entre outros. Estes parâmetros são influenciados por diversos aspectos do circuito de soldagem, sofrendo variações por conta do material de base, do tipo de processo de soldagem escolhido, das dimensões e geometrias da junta e do cordão de solda [1], entre outros fatores, como aporte térmico, fixação dos componentes e rigidez dos equipamentos, por exemplo. Todos estes fatores relacionados à variação dos parâmetros necessários para o controle do processo de soldagem evidenciam o alto nível de solicitação a que estes sensores estão submetidos quando empregados no monitoramento para a soldagem adaptativa.

Uma vez que há tipos diferentes de sensores disponíveis no mercado para realimentação de um sistema de soldagem adaptativa, os que disponibilizam maior quantidade de informações são mais atrativos por oferecerem melhor suporte ao desenvolvedor. Sensores simples, como os de contato ou indutivos, apesar de serem acessíveis, não acrescentam muito ao sistema. Dentre os sensores disponíveis para tal aplicação, os Sensores de Triangulação a Laser para soldagem (STL) merecem destaque por sua capacidade em reproduzir a visão do soldador.

2.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS STL

O princípio de funcionamento destes sensores de triangulação a laser recebe este nome já que os elementos envolvidos na medição são três (câmera, laser e objeto ou duas câmeras e objeto, por exemplo), formando um triângulo quando dispostos espacialmente e utilizando da trigonometria para seu equacionamento.

Figura 2.1 – STL realizando correção de trajetória sobre o chanfro.



Fonte: [2].

Estes sensores geralmente são montados à frente da tocha de soldagem, de modo a medir a junta à uma distância denominada *offset* da tocha de soldagem, localizando um *Tracking Point* (TP, ou ponto de interesse) e realizando a correção de trajetória e parâmetros de soldagem, conforme ilustrado na fig.

Os sensores de triangulação são divididos em duas categorias: com triangulação passiva e com triangulação ativa. Quando um dos vértices do triângulo é formado pela fonte de luz (laser, LED ou projetor, por exemplo), a triangulação é referida como ativa, pois a fonte de luz adiciona informação à cena. Se não houver um componente que atue como uma fonte de luz ou algum elemento análogo que adicione informação à cena captada pelo sensor ou sensores de imagem, trata-se de uma triangulação passiva [3].

As principais vantagens destes tipos de sensores são a riqueza de informações acerca do perfil da junta, a possibilidade de utilização durante a soldagem, a ausência de contato com o a peça, a possibilidade de atuação com qualquer processo de soldagem, a independência do movimento da tocha (pode ser linear ou com oscilação) e a versatilidade de perfis de solda passíveis de medição. Esses sensores podem ser utilizados inclusive para inspeção da qualidade das soldas [4] [5] [6] [7].

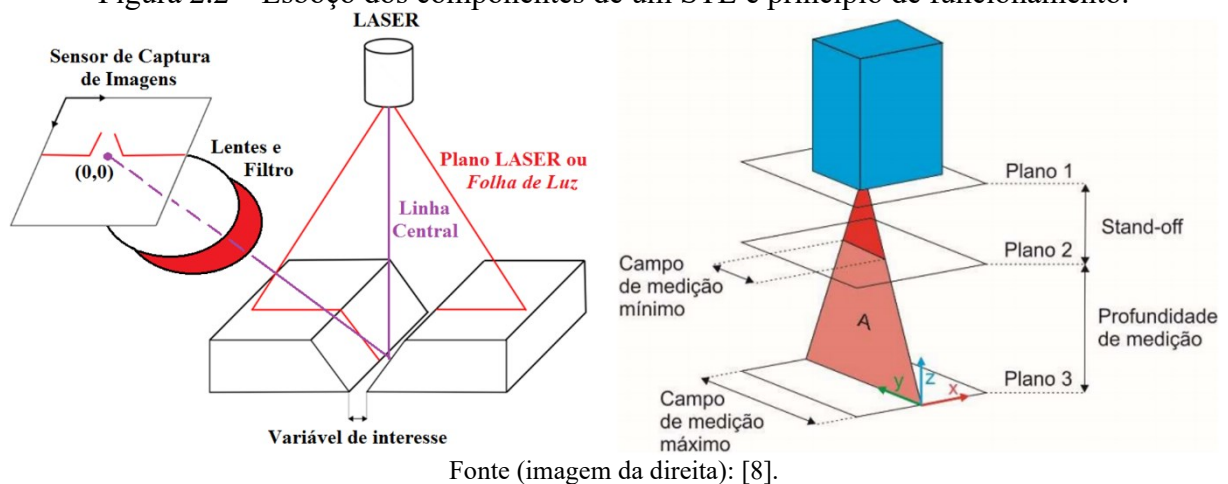
O STL, por sua vez, geralmente é composto por um emissor laser, comumente no comprimento de onda da luz visível vermelha (de 620 a 750 nm), que projeta uma linha de luz estruturada sobre a peça a ser medida, resultando em um plano de projeção laser dentro da faixa operacional do sensor.

A linha projetada é capturada por uma câmera (sensor de imagem), que por sua vez é equipada com um conjunto de lentes e filtros. O conjunto óptico tem a função de garantir que a linha laser seja capturada com qualidade aceitável de imagem dentro de toda a faixa operacional do sensor, que é delimitada pelos parâmetros *Field of View* (largura de medição, ou simplesmente campo de medição) e *Depth of View* (profundidade de medição) do sensor. A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático básico de disposição dos componentes do STL e seu princípio de funcionamento.

O termo correto que faz referência ao intervalo de valores que podem ser medidos por um sistema de medição é “intervalo de medição”. Como existem dois intervalos a serem considerados para os STL de uma linha laser, os mais comuns para aplicações em soldagem, o intervalo horizontal será denominado “Campo de Medição” e o vertical “Profundidade de Medição” ao longo deste trabalho, de modo a facilitar a compreensão do leitor.

Analisando o caminho óptico percorrido pela linha central da Figura 2.2, é possível traçar o diagrama de feixes e calcular as relações trigonométricas inerentes. Independente do arranjo entre emissor laser e sensor de imagem, os STL são especificados na prática pelos parâmetros de *stand-off*, profundidade de medição e campos de medição mínimo e máximo.

Figura 2.2 – Esboço dos componentes de um STL e princípio de funcionamento.



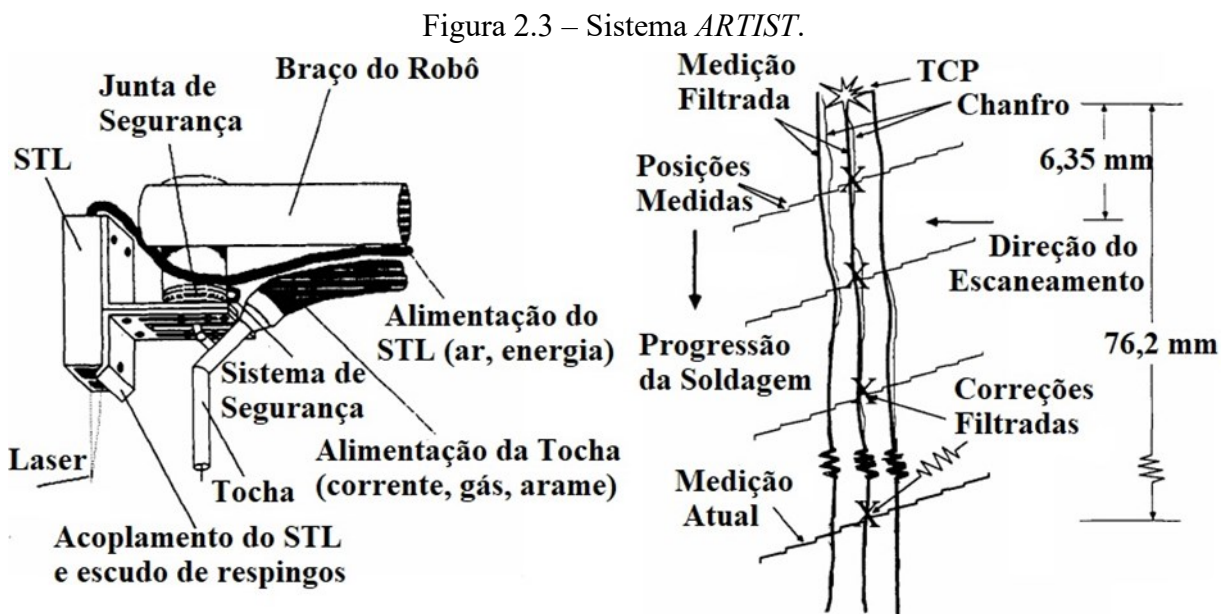
Além dos componentes para realização das medições, os STL se diferem dos demais sensores de triangulação a laser por sua robustez e capacidade de atuar próximo ao arco elétrico. Fabricantes adotam diferentes soluções para seus STL conseguirem desempenhar bem em situações tão severas como as do ambiente de soldagem, utilizando de artifícios como barreiras

físicas permanentes, pressurização interna do sensor, janelas descartáveis, cortina de ar entre o sensor e a peça, entre outras. Essas soluções serão melhor analisadas no Capítulo 6 desta tese.

2.2 TIPOS DE STL E ESTADO DA ARTE

Os STL têm uma longa trajetória de desenvolvimento e seus primórdios datam da década de 60, segundo Stefani [9]. O mesmo autor faz uma revisão minuciosa dos avanços destes sensores ao longo da história, porém salienta a dificuldade de se fornecer um histórico preciso dos desenvolvimentos por serem fruto de uma série de contribuições isoladas aliadas a ferramentas matemáticas clássicas para avaliação de distância e deslocamentos.

Em 1987, Nayak *et al.* [10] já trabalhavam no sistema *ARTIST – Adaptive Real-Time Intelligent Seam Tracking system* (sistema adaptativo inteligente de seguimento de junta em tempo real). Esse sistema previa a utilização de STL para soldagem de raiz, sem realização de leitura prévia da junta (leitura off-line), inclusive com controle dos parâmetros elétricos da soldagem durante o processo. A Figura 2.3 ilustra o sistema *ARTIST* concebido pelos autores.

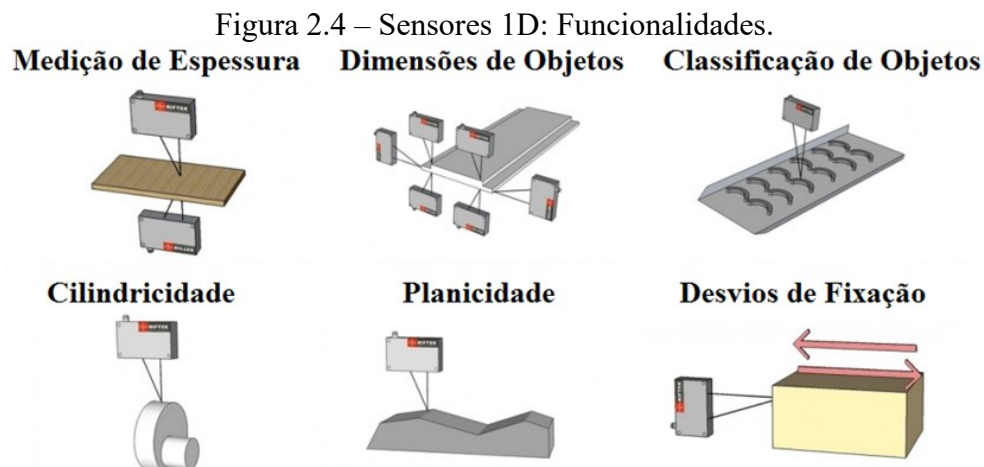


Fonte: Adaptado de [10].

Os STL atualmente disponíveis no mercado estão em sua segunda geração [3], com capacidade de realizar medições com boa precisão, mesmo durante a soldagem (medição *online*). Todavia, por serem produtos voltados para a aplicação industrial, acabam limitados à

capacidade e disponibilidade do fabricante para fazer alterações ou até melhorias em seu funcionamento, permanecendo sempre uma caixa preta para o utilizador.

Os sensores disponíveis no mercado atendem a uma gama de aplicações, sendo que os mais comuns são os sensores de posição, ou sensores 1D. Estes sensores são mais simples do que os sensores 2D, pois projetam apenas um ponto laser sobre a peça. Todavia, têm diversas aplicações, com o uso de um ou mais sensores combinados, como mostrado na Figura 2.4.



Fonte: Adaptado de [11].

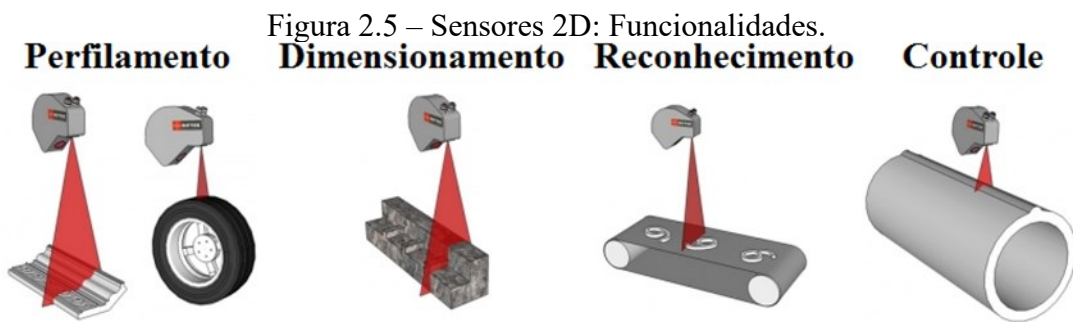
Atualmente existem alguns fabricantes deste tipo de sensor no mercado mundial. Por serem sensores de relativa baixa complexidade, tanto de *hardware* quanto de *software*, o desenvolvimento de um sensor deste tipo requer investimento menor, o que explica em parte a maior oferta do que a de modelos de STL mais complexos. Outro motivo se dá pela grande demanda por esse tipo de sensores, já que são facilmente integráveis às plantas industriais e substituem muito bem vários tipos de sensores ou funcionalidade clássicas dos operadores, como demonstra a Figura 2.4.

Alguns fabricantes de sensores 1D que se destacam no mercado nacional são: Micro Epsilon [12], Keyence [13], Banner [14], Pepperl+Fuchs [15], entre outros.

Todos esses fabricantes são estrangeiros, com representação oficial por empresas nacionais. Alguns desses fabricantes trabalham tanto com sensores de triangulação como com sensores por “tempo de voo” (*Time of Flight, ToF*), basicamente sensores que emitem um pulso e detectam o tempo para o pulso refletido voltar ao aparelho, ou emitem luz continuamente e detectam a mudança de fase entre a onda emitida e a refletida, associando o tempo ou mudança de fase a profundidade do objeto na cena [16].

Outras fabricantes, como a Pepperl+Fuchs, trabalham com a tecnologia PRT (*Pulse Ranging Technology*), ou tecnologia de distância do pulso, análoga ao ToF [17]. Segundo Corrigan [16], as vantagens deste tipo de sensor (ToF) são a facilidade de utilização, a independência para com vários fatores, como coloração da superfície, processamento de imagem, entre medição de distância e de intensidade luminosa, entre outros.

Os sensores 1D, apesar de sua versatilidade, não oferecem riqueza de informações, o que no universo da soldagem é praticamente fundamental quando no desenvolvimento de um sistema de soldagem adaptativa. Em um sistema adaptativo toda a complexidade inerente, alocada originalmente ao soldador, fica incumbida ao sistema de controle. Para esse tipo de aplicação os sensores 2D, também chamados de sensores de folha de luz ou sensores de linha laser, são os mais indicados. A Figura 2.5 demonstra algumas aplicações possíveis para este tipo de sensor. A fabricante Micro-Epsilon, por exemplo, lista mais de 100 aplicações destes sensores em seu website [4].



Fonte: Adaptado de [18].

Sensores 2D voltados a soldagem especificamente, os STL, são um tanto raros no mercado, provavelmente devido às dificuldades de se operar em um ambiente tão hostil a equipamentos eletrônicos como o da soldagem. Qualquer fabricante que ofereça este tipo de equipamento e tenha o domínio da tecnologia envolvida em um sensor deste tipo está trabalhando com o estado da arte em matéria de sensoriamento para soldagem.

Os fabricantes que já dominam esta tecnologia e colocam seus produtos no mercado são poucos, porém quase todos oferecem equipamentos com capacidade operacional parecida e se diferenciam em vários pontos, sejam de *hardware* ou *software*. A Figura 2.6 traz imagens dos STL de alguns dos principais fabricantes, sendo eles: (A) Meta Vision System [19], (B) Servo-ROBOT [20], (C) Scansonic Binzel [21], (D) Keyence [22], (E) Acuity Laser [23] e (F) Riftek [24].

Figura 2.6 – STLs disponíveis atualmente no mercado.

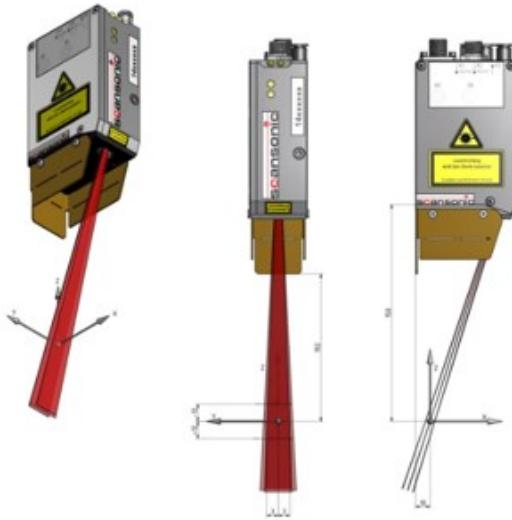
A



B



C



D



E



F



Fonte: (A) [19], (B) [25], (C) [21], (D) [22], (E) [23], (F) [24].

Além dos STL em si, algumas dessas empresas também oferecem soluções completas, compreendendo manipulador robótico, fonte de soldagem, tocha e sistema de seguimento de junta ou mesmo de soldagem adaptativa. Muitas vezes, por se tratarem de serviços complexos de integração, envolvendo equipes multidisciplinares, é comum um fabricante ter um parceiro comercial principal para desenvolver e comercializar esses sistemas. Um exemplo de parceria deste tipo ocorre entre a Meta Vision Systems e a CRC-Evans, produzindo equipamentos avançados como o sistema *ORBIS IWM* [26], capaz de realizar medição, inspeção e soldagem interna de tubos. A Figura 2.7 traz uma imagem de um equipamento *ORBIS IWM*, provavelmente o equipamento comercial disponível hoje de maior tecnologia embarcada em toda a indústria da soldagem orbital.

Figura 2.7 – Sistema de soldagem orbital interna *ORBIS IWM*.



Fonte: [26].

Na temática da manufatura aditiva por soldagem, com alta relevância no cenário mundial atual de inovações e pesquisas para soldagem, a LIBURDI oferece um sistema de fabricação, denominado *LAWS 1000* [27], ou *Liburdi Automated Welding System* (Sistema de Soldagem Automatizada Liburdi, em tradução literal), focado principalmente na fabricação de pás para turbinas e rotores de compressores. Esse sistema configura o sistema comercial mais avançado disponível atualmente para este ramo da soldagem, sendo que o mesmo inclui um sensor de imagem, ao que indica o fabricante um STL de uma linha laser, para realimentação do sistema. A Figura 2.8 traz a propaganda disponibilizada pela fabricante LIBURDI em seu site.

Figura 2.8 – Sistema de manufatura aditiva automatizada *LAWS 1000*.



Fonte: [27].

2.3 ALGORITMOS PARA INTEGRAÇÃO DOS STL A SOLDAGEM

Além das fontes, manipuladores e sensores, os algoritmos são componentes fundamentais de um sistema de soldagem adaptativa. Sem bons algoritmos, todo o esforço despendido na integração dos outros componentes é em vão. Os algoritmos são responsáveis tanto pela pelo tratamento como pelas atitudes do conjunto frente às informações disponibilizadas pelos componentes do sistema.

2.3.1 Algoritmos básico de medição

Os STL, como qualquer instrumento de medição que atue no ambiente, estão sujeitos a adversidades que prejudicam a qualidade das medições executadas, como interferências luminosas provenientes do arco, respingos, fumos metálicos, falta de rigidez dos manipuladores, vibrações, entre outros fatores. Deste modo, é natural que a medição realizada

por um STL contenha uma quantidade expressiva de ruídos. Desse modo, algoritmos básicos de medição são fundamentais para tratamento dos dados fornecidos por esses sensores.

Praticamente todas as publicações sobre a utilização de sensores deste tipo, ou até apenas sobre o projeto de um STL, apresentam métodos simples para tratar os dados das medições. O procedimento mais comum é o de filtragem do sinal, com utilização de uma média móvel. Outros autores optam por estratégias mais complexas e adaptadas a casos específicos.

Um filtro de fácil implementação e que já se mostrou bastante eficaz para tratamento deste tipo de sinal é o *exponential smoothing* (um filtro com característica de passa-baixa) [28] [2] [29]. Este é o método adotado também neste trabalho para tratamento dos dados e está devidamente explicado na metodologia e na Equação 5.6 (página 128). Além do filtro, também é utilizada uma estratégia para exclusão de *outliers* (pontos fora da curva, ruídos tipo impulso), que são altamente prejudiciais à qualidade do sinal, porém facilmente identificáveis.

2.3.2 Algoritmos para seguimento de junta

O primeiro algoritmo fundamental, em qualquer operação de soldagem adaptativa, é o de seguimento de junta. A peça soldada sofre deformações durante o processo e o próprio conjunto do sistema de soldagem adaptativa impõe desvios ao comportamento ideal da operação, seja na fixação da tocha, rigidez do sistema, qualidade do movimento, capacidade da fonte de soldagem, entre outros; por isso a importância de um bom algoritmo de seguimento de junta [3]. Se o efetuador não é movimentado na trajetória adequada, não adianta considerar os demais desvios geométricos para realimentação de quaisquer outros parâmetros, já que a operação não logrará êxito.

Além do algoritmo para seguimento de junta, também são necessários outros, como o de controle das variáveis da fonte de soldagem em função da geometria da junta (seção transversal ou volume), controle da velocidade de soldagem, postura e posicionamento do efetuador em função da geometria da junta e dos passes anteriores, entre outros [2].

No cenário internacional, já foram relatados alguns trabalhos com aplicação de Sensores de Triangulação a Laser para soldagem (STL) para seguimento de junta e até soldagem adaptativa. Park *et al.* [30] utilizaram um STL para medição e planejamento de trajetória na soldagem de bicos de reatores, conseguindo bom resultado prático, porém não configurando aplicação de seguimento de junta ou soldagem adaptativa, apenas um sistema para geração de trajetória por visão.

Fang *et al.* [31] utilizaram um controlador *fuzzy* baseado em regras simples e específicas para realização do seguimento de junta, relatando resultados surpreendentes para a relativa baixa complexidade de implementação envolvida no trabalho destes autores.

Li *et al.* [32] aplicaram um STL de três linhas para realizar o seguimento de junta em soldagem de tubos, obtendo resultados satisfatórios de correção da trajetória de soldagem, porém utilizando chanfros de geometria ideal, o que foge da aplicação a nível industrial.

O trabalho de Rout *et al.* [7] traz uma extensa revisão sobre técnicas e algoritmos desenvolvidos e empregados para o seguimento de junta nos últimos anos, inclusive com a utilização de outros sensores além dos STL, sendo uma excelente fonte para maior aprofundamento neste campo.

No LABSOLDA, Viviani [28] integrou um STL a um manipulador dedicado a soldagem para realização do seguimento de junta em situações de solicitação extrema, com grandes desvios geométricos das juntas, obtendo sucesso parcial, pois seus algoritmos não contemplavam a manutenção da velocidade de soldagem, mas sim da produtividade.

No trabalho de Kindermman [2], o autor já constatou algumas irregularidades associadas ao seguimento de junta realizado com os algoritmos de Viviani [28], porém o trabalho em juntas de dimensões relativamente grandes para um STL possibilitou a absorção destas irregularidades, não comprometendo o resultado final das soldas, mesmo na condição de soldagem adaptativa desenvolvido pelo primeiro autor.

O trabalho de Galeazzi [29], realizado concomitantemente com esta tese, abordou a problemática das falhas no seguimento de junta advindas da falta de rigidez e qualidade de fabricação de trilhos dos robôs, que acabam causando desvios diretos na trajetória de soldagem. Esses desvios são problemáticos pois se tratam de uma mudança repentina no sistema de coordenadas do robô, sendo corrigidos somente após vencida a distância de *offset*, ou seja, a distância entre a tocha (*TCP*) e a linha laser. Os detalhes desta compensação estão descritos em detalhe no trabalho deste autor, sendo recomendado como referência de estudo caso haja dificuldade no entendimento da dimensão que este problema representa na soldagem adaptativa.

2.3.3 Algoritmos para soldagem adaptativa

No trabalho de Huang e Kovacevic [5], além de realizar o seguimento de junta, os autores também desenvolveram algoritmos para a interpretação do perfil da junta a partir da

imagem capturada pelo STL, porém o sistema não foi aplicado com um manipulador industrial dedicado à soldagem.

Chen *et al.* [33] obtiveram sucesso ao aplicar um STL a um robô de soldagem e realizar a soldagem adaptativa pelos parâmetros de abertura de raiz (*gap*) e volume do chanfro, realimentando a corrente e a velocidade de arame para garantir preenchimento uniforme do chanfro.

Outros autores relatam bons resultados, ou então grande potencial de utilização dos sistemas desenvolvidos, porém ficaram limitados a utilização em casos muito específicos e restritos. Este tipo de publicação não caracteriza a verdadeira natureza de um sistema deste tipo, que deve ser robusto e capaz de sobrepor alguma dificuldade imposta pelo processo, independente da origem da mesma (ruídos na imagem, desvios geométricos na fabricação da junta ou menos por conta do aporte térmico, por exemplo) [34], por isso não foram individualmente citados nesta seção deste trabalho.

No LABSOLDA, Kindermann *et al.* [35] fizeram uma primeira tentativa de aplicação de um sistema de soldagem adaptativa com sensor a arco, porém constataram impossibilidade de sucesso devido à falta de informações disponibilizadas pelo sensor para aplicação tão complexa.

Kindermann [2] então implementou um sistema de soldagem adaptativa com o uso de um STL, conseguindo êxito na aplicação do passe de raiz, mesmo em condições de abertura de raiz (*gap*) variável.

Galeazzi [29] deu sequência aos desenvolvimentos da plataforma de controle adaptativo (PCA) e sua aplicação, bem como desenvolveu uma metodologia inovadora para parametrização dos parâmetros adaptativos de soldagem para tubulações.

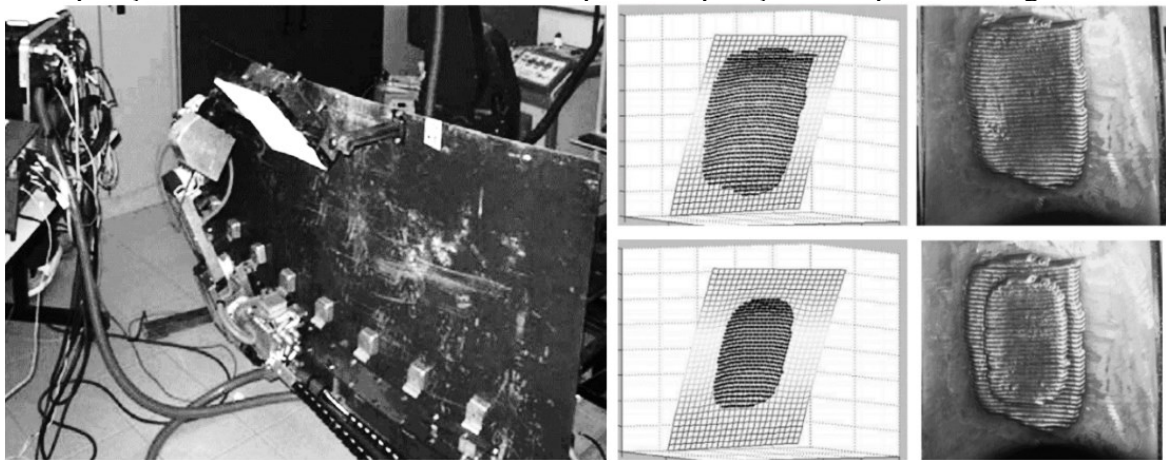
Todos esses algoritmos citados anteriormente neste capítulo dependem diretamente da qualidade das informações disponibilizadas pelo STL para seu bom funcionamento. Assim como para a soldagem, algoritmos robustos são necessários para garantir o correto tratamento das imagens adquiridas pelo STL, para a interpretação e medição da geometria da junta de interesse. Estas técnicas para processamento de imagens são abordadas em profundidade no Capítulo 4.

2.4 HISTÓRICO DE APLICAÇÕES COM STL DESENVOLVIDAS NO LABSOLDA

Trabalhos com os sensores ópticos, denominados Sensores de Triangulação a Laser para soldagem (STL), foram desenvolvidos no LABSOLDA, alguns inclusive em parceria com o LABMETRO – Laboratório de Metrologia e Automatização, também da Universidade Federal de Santa Catarina.

Uma das primeiras parcerias entre os laboratórios resultou no desenvolvimento e aplicação de um robô denominado *Roboturb* [36], dedicado à recuperação de pás de turbinas hidrelétricas por deposição com processo de soldagem Plasma com adição de arame [37]. Para esse projeto foi desenvolvido um sensor de triangulação a laser com três folhas de luz, capaz de medir o vetor normal à superfície e medir a forma da cratera, sem referenciar completamente a forma a ser recuperada da turbina ao sistema de coordenadas do robô, possibilitando o planejamento dos passes a serem depositados [36], conforme ilustrado na Figura 2.9.

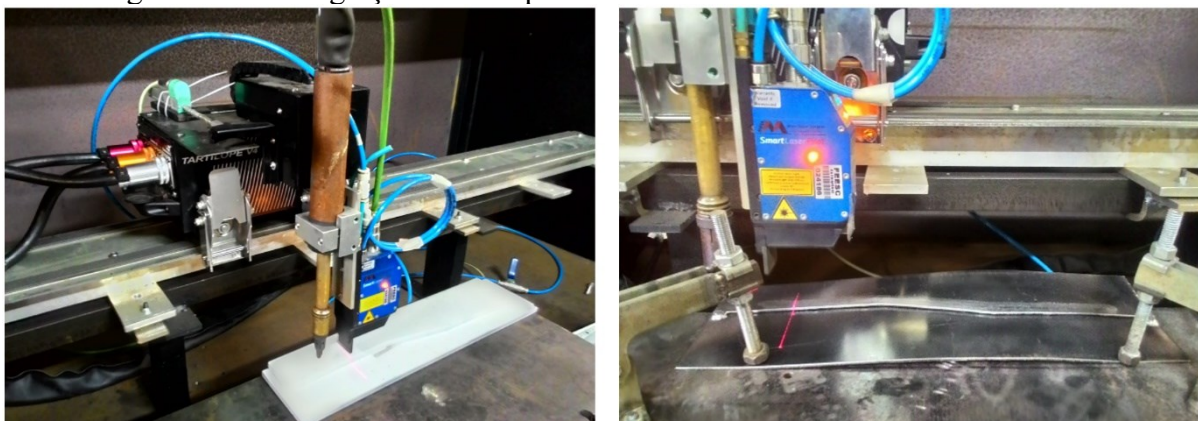
Figura 2.9 - *Roboturb* realizando medição com sensor de triangulação a laser e resultados da deposição automatizada de duas camadas para recuperação de superfície desgastada.



Fonte: [36].

Dando sequência a estes desenvolvimentos, em 2013, Viviani [38] começou a trabalhar no seguimento de junta por sensoriamento óptico a laser. Utilizando um manipulador TARTÍLOPE V2, na versão atual do mesmo (com microprocessador ARM-7), o autor realizou a integração do robô a um STL comercial SLS050-V1 [19], conforme ilustra a Figura 2.10.

Figura 2.10 – Integração de manipulador *TARTÍLOPE V2* a sensor *SLS050-V1*.



Fonte: [28].

As pesquisas com o sensoramento a laser continuaram, com os desenvolvimentos principais culminando em uma tese de doutorado que aborda o projeto e construção de um sensor de fabricação própria do LABOLDA [8], além de *software* e algoritmos relacionados [39]. Além dessa, três dissertações de mestrado: uma abordando um sistema para seguimento de junta [28] e outras duas utilizando do sensor a laser na soldagem orbital adaptativa [2] [29].

O STL nacional, desenvolvido por Puhl [8] em 2017, utiliza uma câmera industrial de 1.3 MP, com comunicação *Ethernet*, equipada com uma lente de comprimento focal igual a 16 mm e filtro passa banda de 650 nm. O projetor laser utilizado tem potência de 30 mW e comprimento de onda igual a 650 nm, com arranjo bastante similar ao retratado na Figura 2.2 (feixe laser normal e sensor de imagem oblíquo à superfície). A sensibilidade deste sensor é de 0,05 e 0,09 px/mm (pixels por milímetro) ao longo do comprimento da linha laser e da altura de medição, respectivamente, similar ao praticado pelos fabricantes estrangeiros [19] [25] [21]. A Figura 2.11 demonstra uma vista lateral (sem a chapa de proteção lateral) do STL desenvolvido no LABSOLDA [8] [39].

A máxima taxa de medição é de 10 aquisições por segundo. Esta taxa de aquisição (10 Hz) é relativamente baixa, quando comparada à taxa nominal dos STL estrangeiros (40 a 60 Hz), porém atende a diversas operações de soldagem, desde que não tenham velocidade de deslocamento excessiva, a ponto de prejudicar em demasia a densidade das medições.

Figura 2.11 – STL de desenvolvimento nacional montado a uma tocha MIG automática.



A aplicação mais recente envolvendo sensoriamento laser no LABSOLDA foi em parceria com a Petrobras, FIRJAN-RJ, EngeMOVI, SPS – Sistemas e Processos de Soldagem e IMC – Soldagem. Nesse desenvolvimento, o LABSOLDA ficou responsável pela integração entre todas as equipes de desenvolvimento, além da implementação dos protocolos de comunicação entre os equipamentos de soldagem com a nova Plataforma de Controle Adaptativo (PCA).

A PCA é um *software* desenvolvido pelo LABSOLDA para conciliar robô, tocha, fonte, sensores e controle da soldagem. Na PCA estão implementados alguns algoritmos de controle adaptativo para soldagem de chapas e tubos, que são responsáveis por controlar todos os equipamentos de soldagem conectados à PCA, sendo que vários desses são produtos do desenvolvimento realizado para esta tese. A Figura 2.12 ilustra o equipamento de soldagem

desenvolvido e integrado ao STL da fabricante Meta Vision Systems [19] e à PCA do LABSOLDA.

Figura 2.12 – Sistema de soldagem adaptativa desenvolvido por LABSOLDA e parceiros.



Fonte: [29].

3 ARRANJOS ÓPTICOS APLICÁVEIS A STL

Assim como o soldador dispõe de diferentes ferramentas e conta com sua expertise para utilizá-las de maneira a produzir um resultado satisfatório, o projetista óptico que desenvolva um STL conta com diferentes componentes e arranjos destes na concepção do sensor.

Uma analogia culinária define de forma simples como cada parte influencia no todo: ingredientes de excelente qualidade têm potencial para produzir pratos de igual valia, mas, utilizados de maneira indevida, acabam produzindo resultados que não agradam. Assim como uma receita culinária não especifica a marca ou qualidade de cada ingrediente específico, estando o foco no modo de utilização correto de cada ingrediente, também o desenvolvedor deve estar atendo a isto.

Neste capítulo são estudados os principais STL disponíveis atualmente no mercado, contemplando os arranjos mais utilizados na composição dos sensores laser para soldagem. Além disso, é apresentada uma composição básica de arranjos e respectivas modelagens dos conjuntos, que configuram a base para o projeto de um sensor deste tipo.

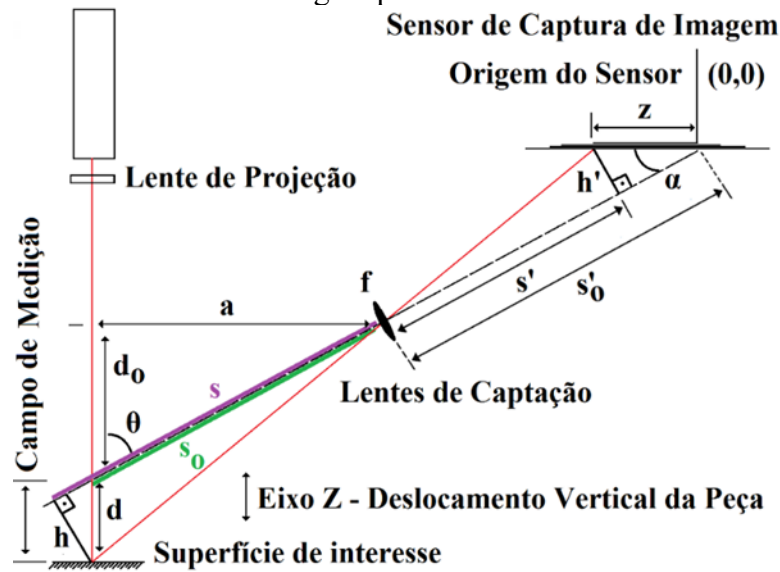
3.1 ARRANJOS APLICÁVEIS A STL

Muhammad *et al.* [40] descrevem os cinco principais componentes de um sistema de sensoramento a laser para soldagem a serem desenvolvidos: unidade de controle do sistema, software, robô, sensor óptico e interface gráfica de usuário.

O que define a efetividade do sensor óptico são a qualidade e combinação de seus componentes (arranjo óptico), além de seus algoritmos. Nesta seção do trabalho, algumas concepções de arranjos são exploradas, a fim de permitir ao leitor vislumbrar a grande variedade de arranjos possíveis de serem concebidos e utilizados.

No caso dos STL que compreendem um emissor laser e um sensor de imagem, seja esse linear ou matricial (1D ou 2D), uma maneira de posicionar os componentes é o laser normal à superfície de interesse e o sensor de imagem paralelo à esta, conforme ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Diagrama de feixes de STL com laser normal à superfície de interesse e sensor de imagem paralelo à esta.



Fonte: Adaptado de [9].

Onde:

h' = altura da imagem projetada pelo deslocamento d

h = altura aparente do deslocamento d

s' = distância da imagem projetada à lente de projeção teórica

s = distância aparente do deslocamento d à lente de projeção

z = medida do deslocamento vertical do ponto laser no sensor

α = ângulo formado pela superfície do sensor em relação ao eixo das lentes de captação

θ = ângulo primário de triangulação, formado pelo feixe laser e o eixo das lentes de captação

d = deslocamento da superfície de interesse em relação ao início do Campo de Medição, medido a partir de uma distância d_0

s_0 = distância entre o ponto laser sobre a superfície de interesse e o centro das lentes de captação quando a superfície está no início do Campo de Medição ($d = 0$)

d_0 = distância vertical entre o centro das lentes de captação e o ponto de início do Campo de Medição.

Conforme representado na Figura 3.1, o deslocamento vertical da superfície de interesse é proporcional à movimentação da projeção da linha laser (ou ponto laser nesta representação) sobre o sensor de imagem. Segundo Stefani [9], considerando-se as lentes como ideais e utilizando-se da semelhança de triângulos, equações clássicas de formação de imagens,

além da hipótese de $z = 0$ quando $d = 0$ (posição de referência no sensor é 0 quando a superfície de interesse está no início do Campo de Medição), temos que:

$$d = \frac{A \cdot z}{(B - z)} \quad 3.1$$

$$A = \frac{d_0 - f \cdot \cos(\theta)}{\cos^2(\theta)} \quad 3.2$$

$$B = \frac{f \cdot \tan(\theta)}{\sin(\alpha)} \quad 3.3$$

As Equações 3.1, 3.2 e 3.3 são aproximações, apresentando erros significativos quando na utilização de conjuntos reais de lentes comerciais, filtros, espelhos (muito comuns para miniaturização) e laser de qualidades diversas. Dessa forma, a calibração do conjunto é sempre indicada, independente da requisição de desempenho do produto.

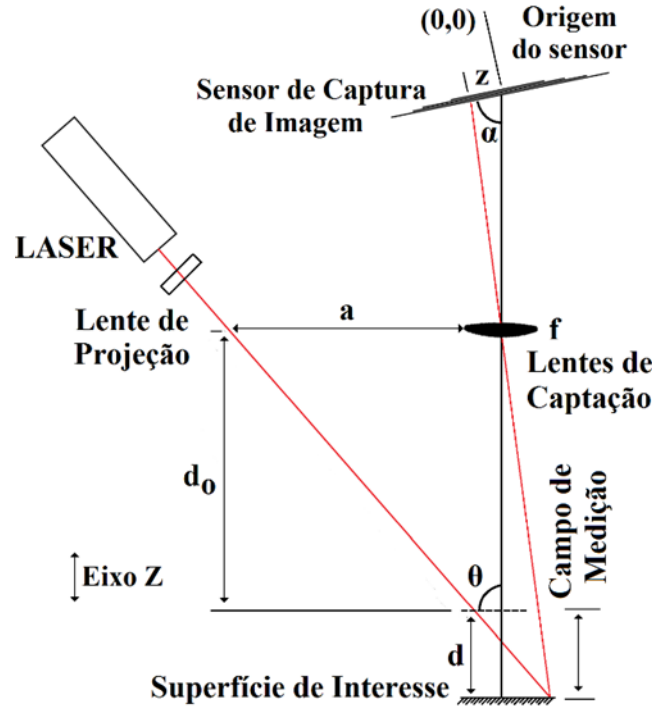
Os parâmetros A e B, descritos nas Equações 3.2 e 3.3, são parâmetros de calibração do sistema. Com o auxílio de uma superfície padrão e um deslocador micrométrico, é possível avaliar a distância z referente à cada incremento da distância do objeto no eixo vertical, montando uma tabela de pontos para calibração. Através do cálculo numérico, é possível encontrar os valores de A e B cujo erro seja o menor possível para correção do valor de z em valor real de deslocamento vertical d . Esses valores são mantidos desde que a disposição dos elementos do STL se mantenha (sem alteração de ângulo ou distância entre os componentes).

A grande vantagem do uso deste tipo de sensor é justamente pela projeção do feixe ser normal à superfície de interesse, o que facilita a montagem de dois ou mais sensores para medição combinada de espessura de chapas, por exemplo. A calibração extrínseca deste tipo de sensor também é facilitada, além da praticidade no projeto do acoplamento do sensor ao efetuator robótico (tocha de soldagem ou outro dispositivo). A desvantagem deste arranjo aparece na utilização para medição de pequenos deslocamentos ou de Campo de Medição estreito, por comprometer a compacidade do conjunto ou a utilização de toda a superfície do sensor de imagem, pela baixa sensibilidade do sensor.

Outro modelo bastante utilizado na indústria para concepção dos STL é com o feixe oblíquo. Este tipo de arranjo é interessante por facilitar a detecção de pequenos deslocamentos, além de facilitar o trabalho com Campo de Medição mais restrito por possibilitar aumento da sensibilidade do conjunto. A Figura 3.2 demonstra um diagrama de feixes de um STL com feixe

e sensor oblíquos. A Equação 3.4, segundo Stefani [9], descreve o comportamento deste tipo de arranjo para deslocamentos da Superfície de Interesse dentro da faixa do Campo de Medição.

Figura 3.2 – Diagrama de feixes com laser e sensor de captura de imagem oblíquos.



Fonte: Adaptado de [9].

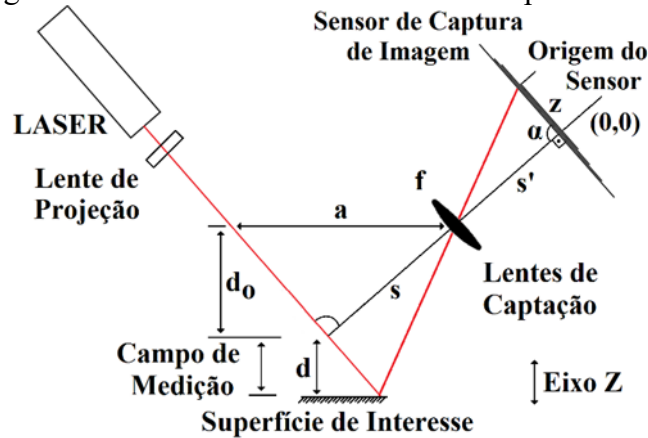
$$d = d_0 + \frac{z \cdot (d_0 - f)}{\left(f \cdot \frac{\tan(\theta)}{\sin(\alpha)} - z\right)} \quad 3.4$$

No caso específico da soldagem, quando se quer medir durante o processo (*online*), a intensidade luminosa do arco elétrico pode representar uma grande fonte de ruídos, principalmente em processos com alta intensidade de corrente ou utilização de corrente pulsada. Nestes casos, esta configuração representada na Figura 3.2 apresenta a vantagem de ter todo o campo de observação da câmera protegido por um anteparo de sombra (escudo), o que evita reflexos direto nos componentes ópticos da câmera, evitando ofuscamento. Além disso, também se rejeita a parcela de luz especular do arco voltaico na imagem a ser processada.

A utilização de um ângulo α entre o sensor e o eixo do conjunto óptico é um recurso interessante, utilizado inclusive para compensar algumas das distorções que o conjunto de lentes de captação possa impingir à imagem. Além disso, com o objetivo de se manter o melhor foco da imagem sobre o sensor, este pode ser inclinado de modo a ter sua superfície paralela ao

feixe laser, conforme demonstrado no arranjo da Figura 3.3. O comportamento deste conjunto, segundo Stefani [9], é descrito na Equação 3.5. Esse tipo de arranjo é interessante para sensores que necessitem de curto *stand-off* (distância entre a superfície do sensor e o início do Campo de Medição), sendo adequado para operações em espaço restrito, como na soldagem de raiz de tubos pelo lado interno.

Figura 3.3 – Diagrama de feixes com laser e sensor de captura de imagem paralelos.



Fonte: Adaptado de Stefani [9].

$$d = d_0 + z \cdot \left(\frac{\cos(\theta) \cdot d_0}{f \cdot \sin(\theta)} - \cos(\theta) \right) \quad 3.5$$

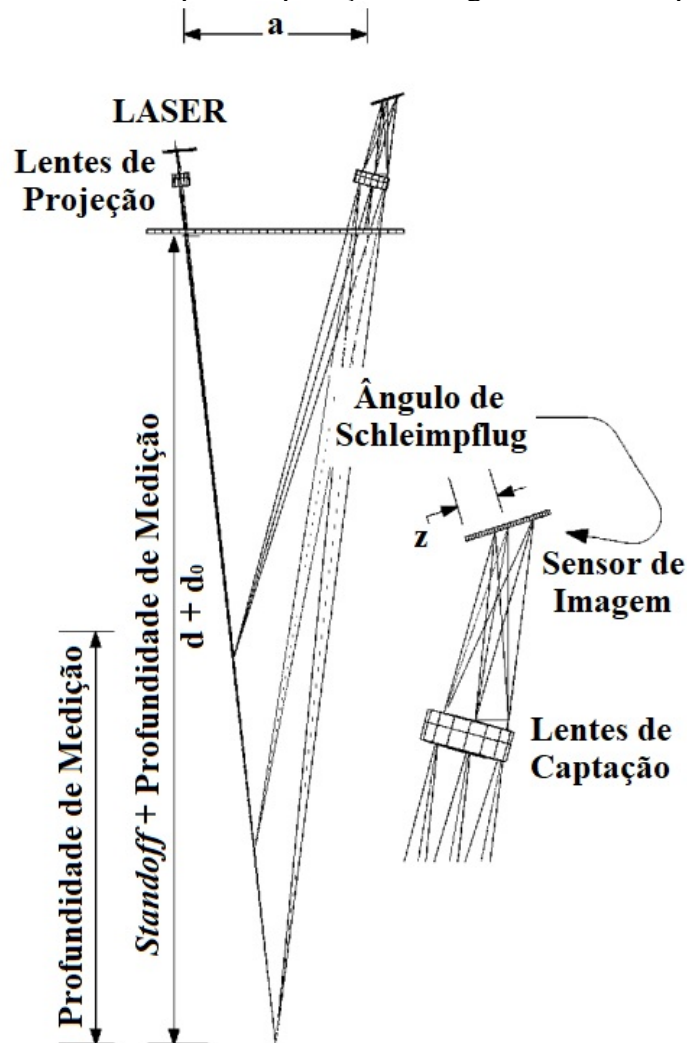
Este tipo de arranjo resulta em um sensor que recebe uma parcela maior de luz refletida especularmente do sensor do que a parcela difusa. Assim, funciona bem para superfícies metálicas polidas ou de alto brilho, como soldagem de alumínio, por exemplo, que no caso dos sensores convencionais só tendem a funcionar bem com superfícies foscas.

Dessa forma, fica evidente a possibilidade de se abordar mais de um tipo de arranjo na fase de projeto de um STL, devido às características que cada disposição agrega ao equipamento. Além disso, é importante que o projetista tenha ciência das características que seu sistema final deve ter, buscando uma concepção que abarque todas ou a maioria destas.

Além dos diferentes arranjos possíveis, o desenvolvedor pode utilizar artifícios no projeto óptico e do projeto mecânico do sensor para beneficiar a aquisição de imagens ou mesmo o processamento das mesmas. A utilização de barreias físicas (*shields*) funciona como um filtro de *hardware* para as fontes de ruído na imagem, por impedir a projeção de partículas ou reflexos indesejados para o sensor de imagem. Além dos artifícios do projeto mecânico, no

projeto óptico há a possibilidade de empregar o ângulo de Schleimpflug [41], um ângulo entre o sensor de imagem e as lentes de captação, que possibilita o foco ideal no sensor de imagem independentemente da distância da peça ao sensor (respeitado o campo de medição do sensor). Um exemplo de aplicação do ângulo de Schleimpflug está na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Exemplo de aplicação do ângulo de Schleimpflug.



Fonte: Adaptado de Blais [41].

A integração de espelhos ou divisores de feixe também é uma opção e pode contribuir significativamente com a compacidade do sensor, além de possibilitar a redução no número de emissores laser para o caso de sensores com projeções múltiplas (através do divisor). No contexto dos STL, a compacidade é interessante por minimizar a chance de colisão do sensor e ampliar ou facilitar o alcance da tocha sobre a junta.

O equacionamento de um sensor, qualquer que o arranjo escolhido, é abordado em várias publicações da área, sendo este geralmente customizado para o caso estudado. De maneira geral, o trabalho de Iakovou (2009) [42] pode ser considerado uma referência neste quesito, sendo indicado ao leitor caso se aventure no projeto de um STL. O trabalho de Blais (2004) [41] também apresenta uma fonte interessante de conhecimentos mais genéricos quanto aos sensores de triangulação e suas possíveis arquiteturas, incluindo um apêndice com equacionamento da precisão esperada para sensores de triangulação a laser na medição de distância para com o objeto.

Tão importante quanto o arranjo em si, escolher o tipo correto de sensor a ser utilizado também é uma tarefa primordial ao sucesso da empreitada. A seguir são expostos vários tipos de sensores, acompanhados de informações de produtos reais já ofertados com essas características, caso os mesmos existam.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS STL

Na nomenclatura dos STL há uma clara divergência para classificação de alguns tipos de arranjos, principalmente os com projeção de uma folha de luz (sensor de uma linha laser) e com projeção de 2 ou mais folhas de luz (sensores de três linhas, por exemplo), principalmente por serem os mais comuns nesse campo da indústria. Resumidamente, há três áreas do conhecimento, cada uma com sua própria classificação destes dois tipos de sensores.

No campo da metrologia óptica, é comum encontrar a nomenclatura 2.5D para sensores de uma linha laser. Essa se deve pela combinação das várias imagens geradas por este sensor serem utilizadas de modo a simular uma medição 3D, por isso recebe o nome de 2.5D, não sendo um 3D nativo (necessita de um sistema de deslocamento, por exemplo) [43]. Desse modo, o sensor de três linhas é classificado neste campo como sensor 3D. O termo 2.5D também é respaldado pelos sistemas cartesianos controlados por imagens de uma câmera montada sobre a base do sistema, que trabalham com imagens 2D no controle de ambiente 3D [44].

Acima de qualquer tipo de associação a classificação para os sensores, na medição de forma se vai até o 3D. Dessa maneira, um sensor de uma linha laser deveria ser reconhecido como 2D neste campo, uma vez que mede instantaneamente um perfil 2D (em Z, normal a superfície, e em Y, tangente a superfície e perpendicular a trajetória X de deslocamento da soldagem). Ainda assim, o sensor de três linhas continuaria sendo classificado como 3D.

Na área da soldagem, é mais comum ver a classificação 2D para sensores de uma linha laser e 3D para sensores de três linhas. Um sensor de uma linha laser mede fundamentalmente a distância em duas direções do ponto de interesse, por isso sendo reconhecido como 2D. Do mesmo modo, o sensor de três linhas, que mede o desvio em três direções do ponto de interesse (duas direções mais a diferença entre as linhas), é reconhecido como sensor 3D [45]. Essas serão as nomenclaturas utilizadas neste trabalho.

Para os desenvolvedores do campo da robótica, há divergência na nomenclatura dos sensores de uma linha, sendo utilizadas as duas já citadas, 2D e 2.5D [46] [47]. Todavia, um sensor laser de três linhas é predominantemente denominado sensor 6D, por realizar a medição de três translações e três rotações a cada imagem adquirida [47]. A fabricante Scansonic Binzel provavelmente se baseou nessa classificação para nomear seus sensores, como o *TH6D*, utilizado neste trabalho [46]. Pela classificação do sensor de três linhas como 6D, o sensor de uma linha deveria ser reconhecido como 3D, por medir duas translações e uma rotação.

Para o sensor de uma linha, a classificação é um tanto confusa, uma vez que a medida instantânea é de um perfil 2D, Z (normal a superfície) e Y (tangente a superfície e perpendicular a trajetória de soldagem X). Todavia, do ponto de vista do movimento da ferramenta no espaço, é preciso definir 6D para geração da trajetória. Então, do ponto de vista de controle de pose de robôs, um sensor com uma folha de luz informa três coordenadas: Y, Z e C (rotação ao redor de X), ou seja, ele poderia ser considerado para o robô um sensor 3D.

Um sensor com 2 ou mais folhas de luz acrescenta a medição do ângulo B (rotação ao redor da direção Y. Esse ângulo extra também informa o vetor normal da superfície, o que é bastante útil para a compensação de movimento e de orientação da ferramenta do robô.

Do ponto de vista da robótica, o sensor de três linhas sem um dispositivo de forma definida acoplado a pegada no sensor não permite travar o sensor em 6D. Mesmo com duas ou mais folhas de luz, não se tem como medir a direção de movimento X (direção da soldagem), e o ângulo A (ao redor do eixo Z, ou normal a superfície). Então, do ponto de vista da robótica, o sensor com as 3 folhas de luz e uma câmera é um sensor 4D.

Do ponto de vista da robótica seriam possíveis sensores 6D, que poderiam fundir duas técnicas de medição encapsuladas no mesmo sensor. Usando duas câmeras, por exemplo, uma com o filtro passa banda, que só enxerga a projeção do laser e mede 3D ou 4D (dependendo do número de linhas), e uma câmera extra, sem filtro e possivelmente colorida, que capta a textura da superfície.

A câmera colorida por si só mediria os 6D, mas de maneira relativa, não absoluta, que tem bastante sensibilidade em X, Y e A, complementar ao sensor 4D que mede bem Z, Y, B e C. Com a fusão das técnicas, o sensor de triangulação mediria 6D de maneira absoluta, o que permite determinar pela sobreposição de coordenadas o fator de escala para as grandezas complementares X e A. Alguns sensores comerciais já apresentam uma segunda câmera, porém com intuito de possibilitar a visualização do processo por outro ponto de vista que não o do sensor de imagem para o laser.

O Quadro 3.1 apresenta um compilado das classificações adotadas em cada área para os sensores de uma e três linhas, de modo a resumir o raciocínio abordado nesta seção do trabalho.

Quadro 3.1: Classificação dos STL para a metrologia óptica, a soldagem e a robótica.

STL	Óptica	Soldagem	Robótica	Nomenclatura
Uma linha	2.5D	2D	3D	Comum na literatura
Três linhas	3D	3D	6D	
Uma linha	2D	2D	3D	Defendida pelo autor
Três linhas	3D	3D	4D	

3.3 STL COM PROJEÇÃO PONTUAL

Os sensores com projeção pontual podem ser considerados os de menor complexidade, tanto pelos tipos de componentes utilizados como pelos algoritmos necessários para o processamento das imagens. A exceção pode estar nos sensores pontuais com projeções móveis, que requerem algum tipo de mecanismo para deflexão do laser ou movimentação do emissor, assemelhando seu comportamento aos sensores de uma linha laser (sensores do tipo “uma folha de luz”) porém com o acréscimo deste mecanismo.

Como a projeção é pontual, dependendo do tipo de utilização vislumbrado é possível conceber um STL deste tipo com sensor linear de imagem, ao invés do sensor superficial padrão (matricial).

Além disso, como a referência visual é um ponto laser, há grande probabilidade de que a intensidade luminosa do ponto laser sobre o sensor seja muito maior do que qualquer outro

ruído presente, o que simplifica o algoritmo para segmentação de imagens necessário. Mesmo os sensores com múltiplas projeções móveis se beneficiam desta característica.

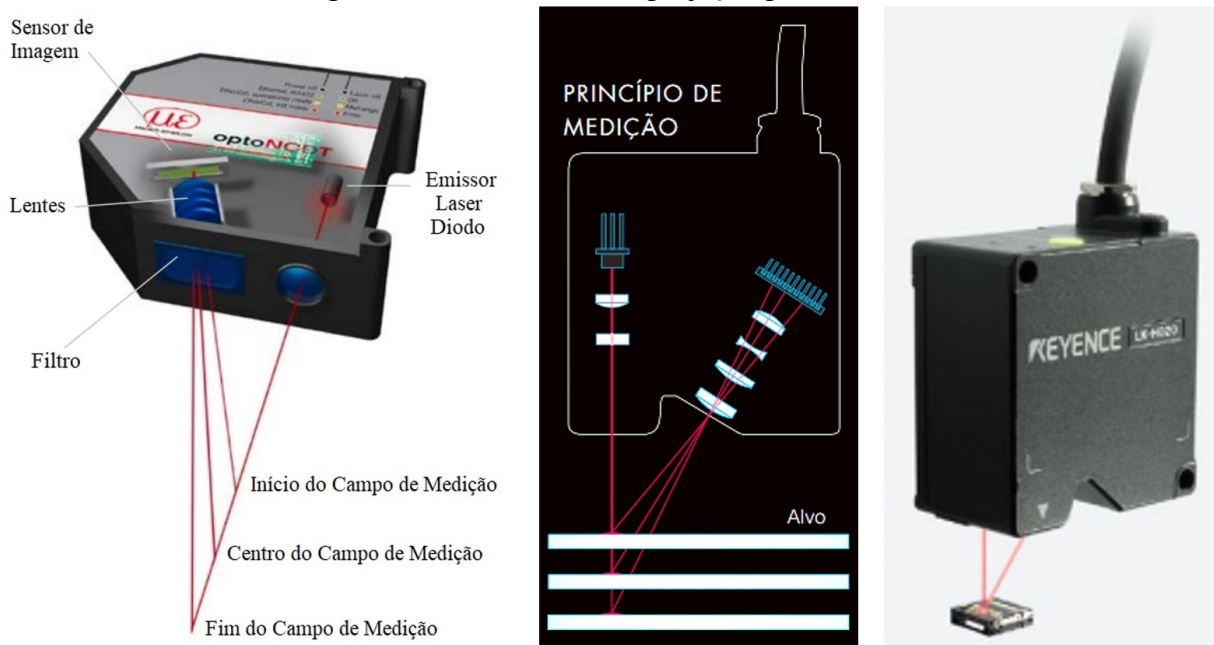
3.3.1 Sensores com projeção pontual fixa

Esse tipo de sensor, talvez o de concepção mais simples dentre todos os estudados neste trabalho, provavelmente é também o mais utilizado na indústria em geral.

A utilização de uma projeção pontual permite o emprego de um emissor laser de baixa potência na maioria das aplicações, simplesmente pela alta densidade luminosa que o ponto laser apresenta. Dessa forma, há grande potencial para miniaturização deste tipo de sensor, além da redução no custo do emissor laser. Por esses motivos, sensores deste tipo tendem a ser compactos e de relativo baixo custo.

Todavia, essa simplicidade se traduz em limitação das informações disponibilizadas por esses sensores: basicamente são sensores que, individualmente, capturam translação em uma única direção. A Figura 3.5 apresenta uma compilação de alguns sensores deste tipo de diferentes fabricantes.

Figura 3.5 – Sensores com projeção pontual fixa.



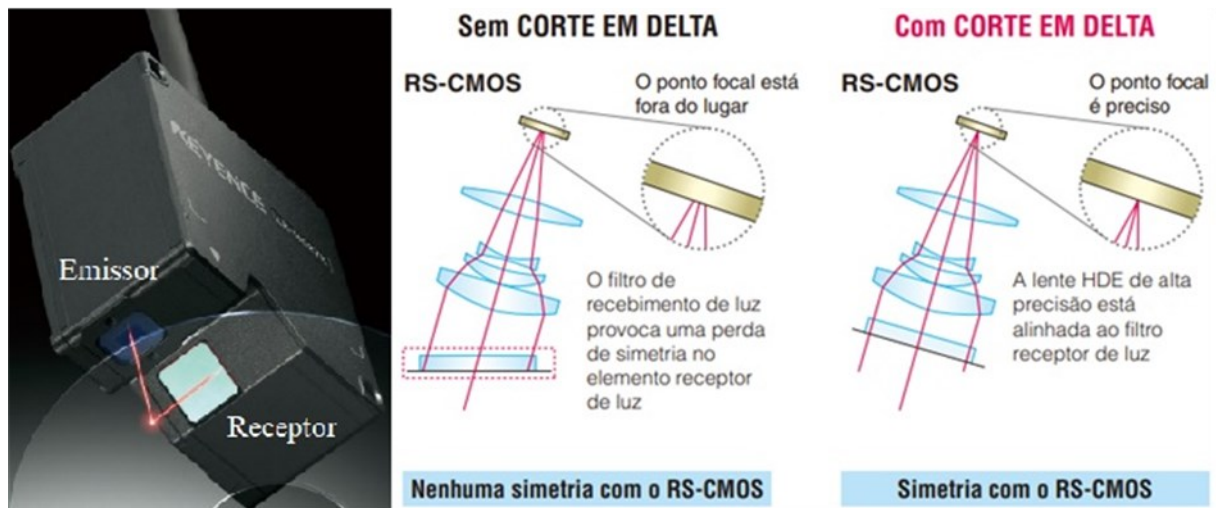
Fonte: Adaptado de [48] [49].

A fabricante Keyence traz em um de seus catálogos alguns exemplos interessantes de soluções para esse tipo de sensor. Para superfícies com certa rugosidade, a ponto de ser

prejudicial aos sensores convencionais deste tipo, é indicado o modelo LK-H087, que faz uso de uma projeção pontual expandida (duas vezes o diâmetro convencional do ponto laser de seus outros sensores análogos), o que propicia menor nível de ruído na medição. As informações deste sensor estão condensadas na Figura 3.7.

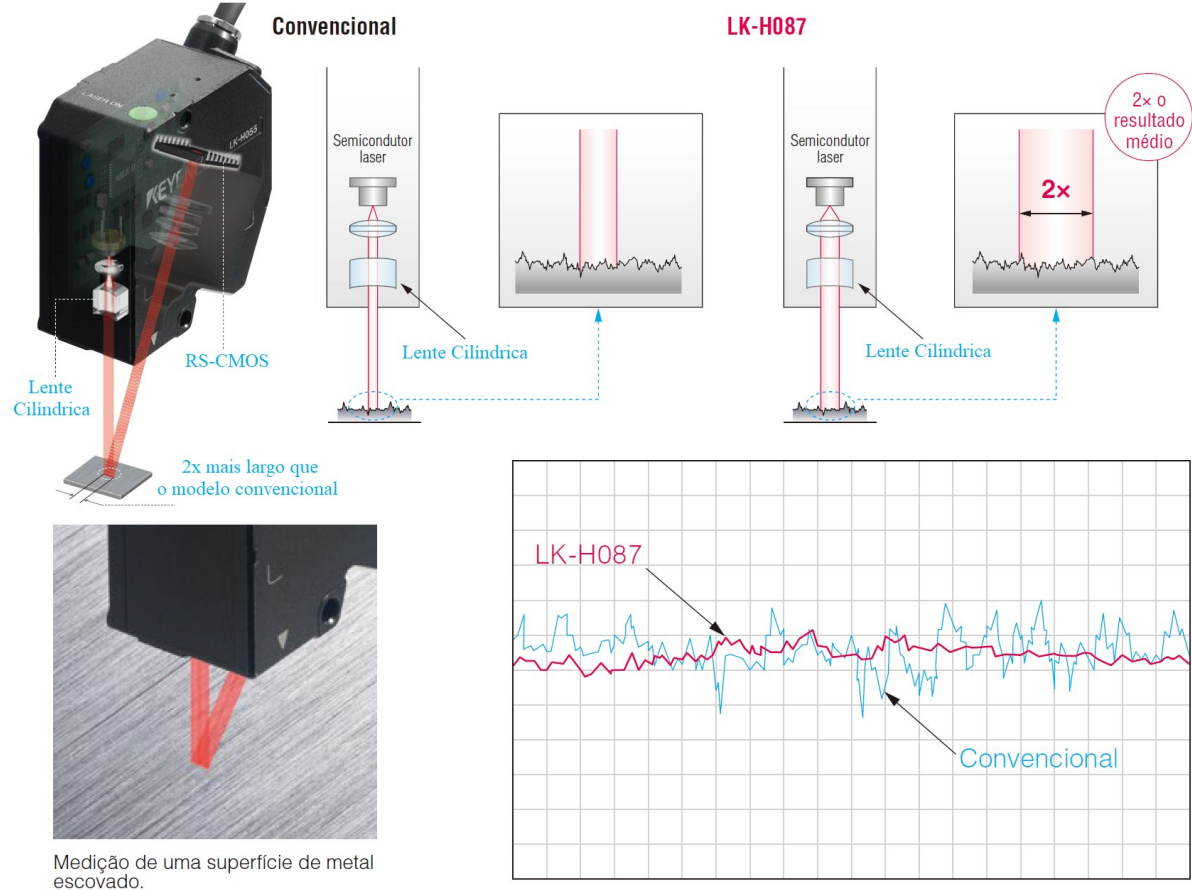
Outra solução interessante adotada por esta fabricante é a lente com “corte em delta”. A lente denominada HDE (ou conjunto de lentes) está alinhada com o filtro, o que evita uma flutuação não desejada do ponto focal sobre o sensor de imagem com a montagem do sensor. Essa solução está representada na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Concepção de sensor com “corte em delta”.



Fonte: Adaptado de [49].

Figura 3.7 – Sensor com projeção pontual expandida.



Fonte: Adaptado de [49].

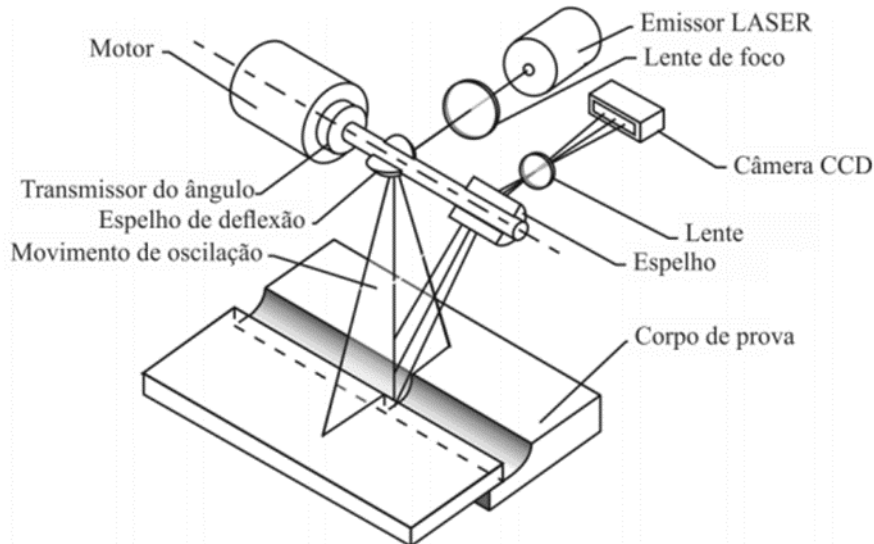
3.3.2 Sensores com projeção pontual móvel

A concepção de STL com projeção pontual é interessante por vários fatores: os elementos do sensor são menos complexos, a medição geralmente não demanda algoritmos de maior capacidade, os componentes têm um valor menor e são sensores menos afetados pelas condições do ambiente de soldagem, como luminosidade do arco, respingos, calor da peça, entre outros. Todas essas facilidades são também acompanhadas pela limitação na quantidade de informações disponibilizadas ao integrado por esse tipo de sensor.

Alguns fabricantes, buscando ampliar o tipo de informações disponibilizadas por esses sensores, optam por uma solução não coloquial: movimentar a projeção pontual, de modo a visualizar periodicamente uma área da peça, ao invés de somente uma linha (considerando a projeção pontual fixa). Esse tipo de solução demanda alguns artifícios de projeto mecânico do cabeçote, de modo a propiciar a translação ou rotação do feixe laser. A Figura 3.8 ilustra um exemplo de sensor com projeção pontual móvel com rotação tanto de elementos da projeção

como da captação. Existem outras concepções para esse tipo de sensor, como a rotação apenas da lente do emissor laser e utilização de um sensor de imagem matricial ao invés de um linear, dispensando a rotação dos elementos de captação, conforme o trabalho de Xu *et al.* [50].

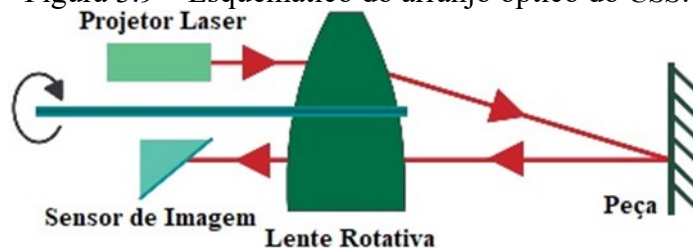
Figura 3.8 – Exemplo de sensor com projeção pontual móvel.



Fonte: [2] *apud* [51].

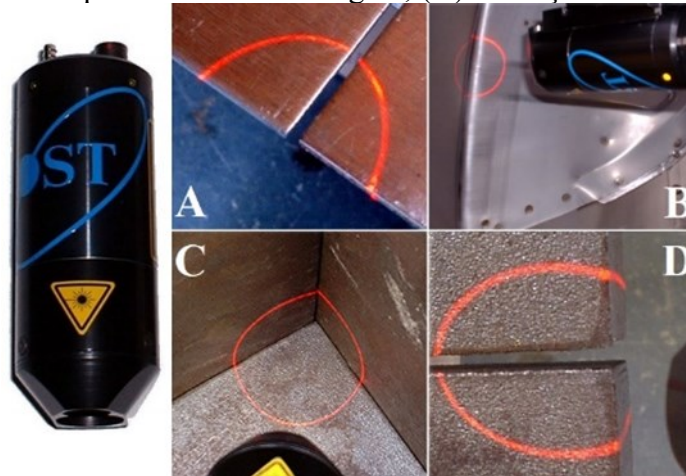
A fabricante Oxford Sensor Technology trabalha com um tipo de sensor que se enquadra nesta categoria. O sensor *CSS – Circular Scanning System* utiliza uma projeção pontual móvel, desenhando sobre a peça medida um padrão circular [52]. Esse padrão é obtido através do uso de uma lente especial, que gira continuamente e garante tanto a deflexão do ponto laser no padrão circular quanto sua correta projeção sobre o sensor de imagem. Uma ilustração do conceito deste sensor está representada na Figura 3.9. Na Figura 3.10 estão retratados o sensor e algumas aplicações deste.

Figura 3.9 – Esquemático do arranjo óptico do CSS.



Fonte: Adaptado de [52].

Figura 3.10 – Sensor CSS e aplicações: (A) Detecção de borda; (B) Localização do chanfro; (C) Medição de quina em uma só imagem; (D) Detecção do início da junta.



Fonte: Adaptado de [52].

Outro sensor que trabalha com esse tipo de arranjo é o *Arc-Eye*, da fabricante Valk Welding. Na verdade, esse é um sensor derivado do CSS, uma vez que em 2012 a Valk Welding comprou os direitos de exclusividade para produção e integração dos sensores CSS da Oxford Sensor Technology [53]. Em 2010 a Valk já iniciava a integração dos sensores CSS com robôs antropomórficos de soldagem da marca Panasonic [53] [54]. A Figura 3.11 mostra a primeira integração relatada pelo fabricante, para seguimento de junta aliado a soldagem laser (LBW) e soldagem MIG/MAG (GMAW).

Figura 3.11 – Sensor *Arc-Eye* da fabricante Valk Welding.



Fonte: [54] [55].

Sensores com projeção pontual móvel são interessantes por aliarem os benefícios de um sensor 1D a um maior nível de informações extraídas da junta. Ainda assim, sensores deste tipo são limitados por não conseguirem visualizar mais de um ponto da junta por frame. Essa limitação pode ser um agravante para o integrador caso haja oscilação constante e indesejada entre os sistemas de coordenadas da base do robô, do sensor e da peça. Esse tipo de situação é bastante comum em manipuladores montados sobre trilho, cujos trilhos são montados sobre as peças a serem soldadas. Ao visualizar apenas 1 ponto longitudinal da peça por frame, uma oscilação desse tipo, que também pode ser causada por falta de rigidez do sistema, pode gerar um desvio significativo na geometria medida da peça, o que certamente atrapalhará o controlador. A alta taxa de medição que esses sensores conseguem por trabalharem com detectores lineares (na faixa dos kHz) pode amenizar essa situação, possibilitando inclusive filtragem expressiva no perfil capturado da junta em cada rotação do sensor.

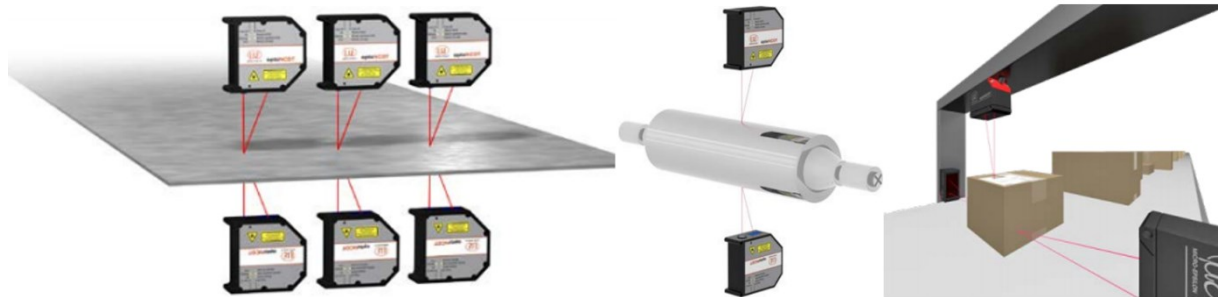
Os STL-2D de projeção linear singular também sofrem com esse tipo de situação. De modo a buscar imunidade do sensor à falta de rigidez do manipulador, a inserção de um ou mais emissores extras, ou até de divisores de feixe, pode ser uma solução apropriada. Uma vez que, no mesmo frame, o sensor visualize mais pontos da mesma peça, é possível fazer uma comparação instantânea entre a medição de cada feixe com a peça e das medições de um feixe em relação ao outro, possibilitando detectar e diferenciar os desvios do sistema de medição em relação à peça dos desvios geométricos da própria peça. A explicação deste fenômeno é complexa, estando abordada em detalhes no trabalho de Galeazzi [29].

Uma outra alternativa seria utilizar o próprio sensor para medir a geometria do trilho conformado sobre a peça de trabalho, através de um perfil específico para a borda do trilho (medição direta) ou de uma peça complexa o suficiente para possibilitar ao robô travar espacialmente o sensor enquanto se movimenta sobre o trilho, realizando uma medição indireta do trilho. O perfil do trilho, qualquer que fosse a forma de medição utilizada, seria então realimentado ao controlador do robô, para compensar eventuais desvios. Este tipo de solução pode não ser adequada se não houver rigidez suficiente no braço do robô, uma vez que a pose (postura) do mesmo durante a leitura do trilho será bem diferente da postura de soldagem, o que pode causar mais perturbações entre os sistemas de coordenadas envolvidos. Por esse motivo, a solução abordada no trabalho de Galeazzi [29] tem potencial para apresentar melhores resultados.

3.3.3 Sensores com múltiplas projeções pontuais

Nessa categoria existem duas possibilidades: um sensor que utilize duas ou mais fontes de luz coerente distintas ou a combinação de dois ou mais sensores de projeção pontual fixa. A segunda opção é a mais explorada na indústria, principalmente pela ampla oferta de sensores com simples projeção pontual fixa. A combinação de dois ou mais sensores é uma estratégia muito interessante por possibilitar a extração de maior quantidade de informações da junta em um mesmo instante de tempo, especialmente de regiões de difícil acesso para medição inclusive por STL de maior complexidade construtiva (2D e 3D). A fabricante Micro-Epsilon mostra algumas possibilidades para a combinação de dois ou mais sensores deste tipo na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Exemplo de combinações de sensores com projeção pontual fixa.



Fonte: Adaptado de [48].

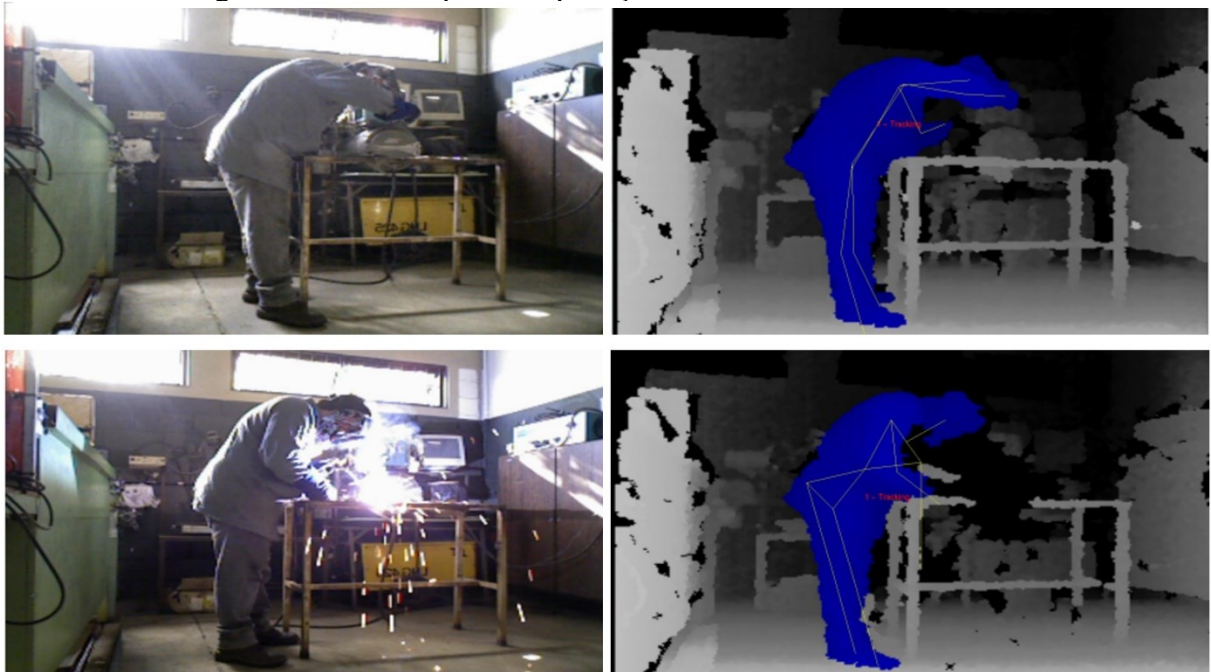
Um exemplo de sensor com múltiplas projeções pontuais aplicado à soldagem foi estudado por Rocha de Andrade e Vilarinho [56]. Os autores utilizaram um sensor comercial *Xtion PRO LIVE* da fabricante ASUS (Figura 3.13), que é composto por um sensor de imagem colorido, dois microfones, um emissor infravermelho (IR) e um sensor infravermelho (IR), para fazer a avaliação da postura do soldador durante o trabalho, conforme ilustrado na Figura 3.14. O estudo de ergonomia foi possível pela capacidade deste aparelho em visualizar e identificar diferentes membros e articulações do corpo do soldador, mesmo com a presença do arco elétrico nas imagens. Este tipo de sensor projeta múltiplos pontos pelo emissor IR, que são triangulados com o sensor IR para então estabelecer a posição espacial de cada um na cena. Além desses, o sensor de imagem ajuda a separar e classificar os objetos da cena, possibilitando o seguimento do soldador durante o processo. Não se trata especificamente de uma aplicação de STL, porém é bastante interessante do ponto de vista operacional do processo, principalmente do ponto de vista da segurança do trabalho.

Figura 3.13 – Sensor *Xtion PRO LIVE*.



Fonte: [56].

Figura 3.14 – Exemplos de aplicação do sensor *Xtion PRO LIVE*.



Fonte: [56].

3.4 STL COM PROJEÇÃO LINEAR SINGULAR

Dentre os STL 2D, os sensores com projeção linear singular são o tipo mais comum encontrado do mercado. Esse tipo de sensor alia a simplicidade construtiva dos sensores 1D (utilizando apenas um tipo diferente de lente e de sensor de imagem) ao aumento na quantidade de informações disponibilizadas, o que muitas vezes é suficiente para atender às demandas no campo da soldagem automatizada.

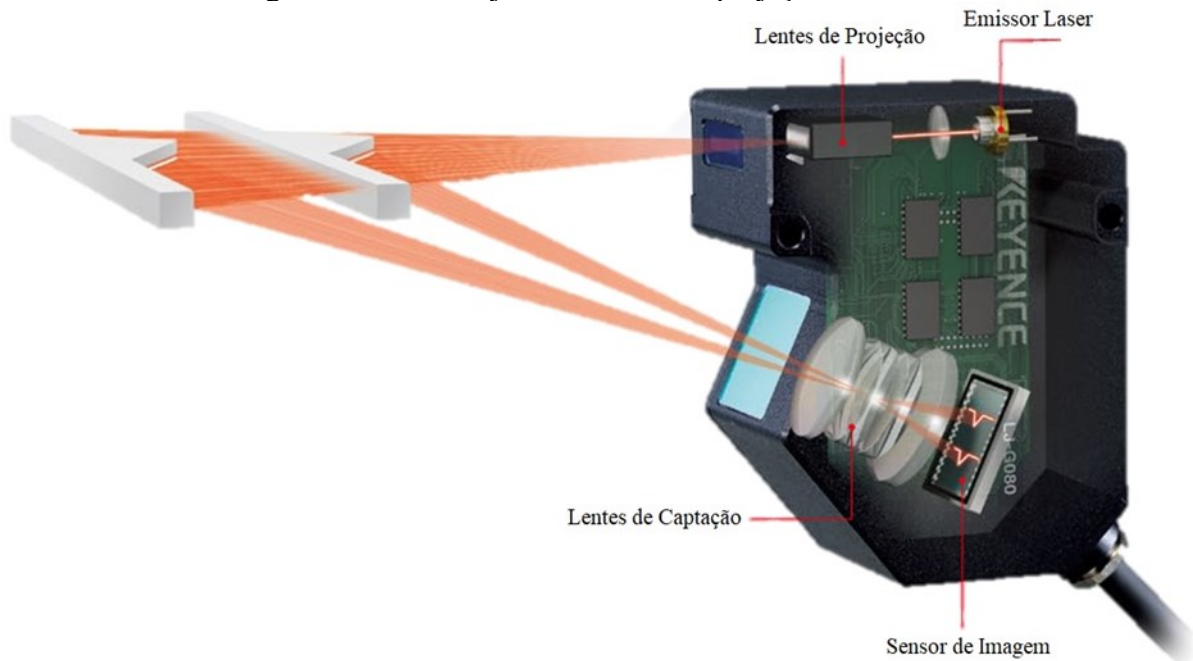
A movimentação da projeção linear é um artifício que pode melhorar o desempenho deste tipo de sensor em algumas aplicações específicas. Esse tipo de solução pode trazer maior simplicidade ao arranjo físico do que um sensor com projeções de múltiplas linhas, porém pode representar um aumento na complexidade de *software* exigida para o processamento de imagens ou mesmo aquisição das mesmas.

A utilização de múltiplas projeções lineares eleva a capacidade de medição do sensor, tanto em precisão quanto em quantidade de informações adquiridas em cada imagem. Esse tipo de sensor, que se qualifica como um sensor 3D, impõe complexidade de projeto significativamente superior aos demais. O *hardware* deste tipo de sensor precisa acomodar emissores extras ou lentes especiais; além disso, o *software* também precisa diferenciar as linhas entre si, o que não ocorre nos outros tipos de sensores. Dependendo da geometria da peça mensurada, esta função de diferenciação entre as linhas é deveras complexa e pode demandar métodos que comprometam a taxa de aquisição do sensor.

3.4.1 Sensores com projeção linear fixa

O tipo mais comum de STL específico para soldagem ofertado no mercado atualmente é este, por aliar simplicidade mecânica à fartura de informações disponibilizadas a cada medição. Os sensores deste tipo utilizam geralmente um único emissor laser combinado a lentes cilíndricas para projeção de uma linha ou plano de luz sobre a peça. Além do laser, utilizam um sensor de imagem, geralmente de tecnologia CMOS, com área de medição compatível às especificações de campo e profundidade de medição desejadas. Um exemplo de arranjo de um STL de projeção linear fixa está ilustrado na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Arranjo de um STL de projeção linear fixa.



Fonte: Adaptado de [13].

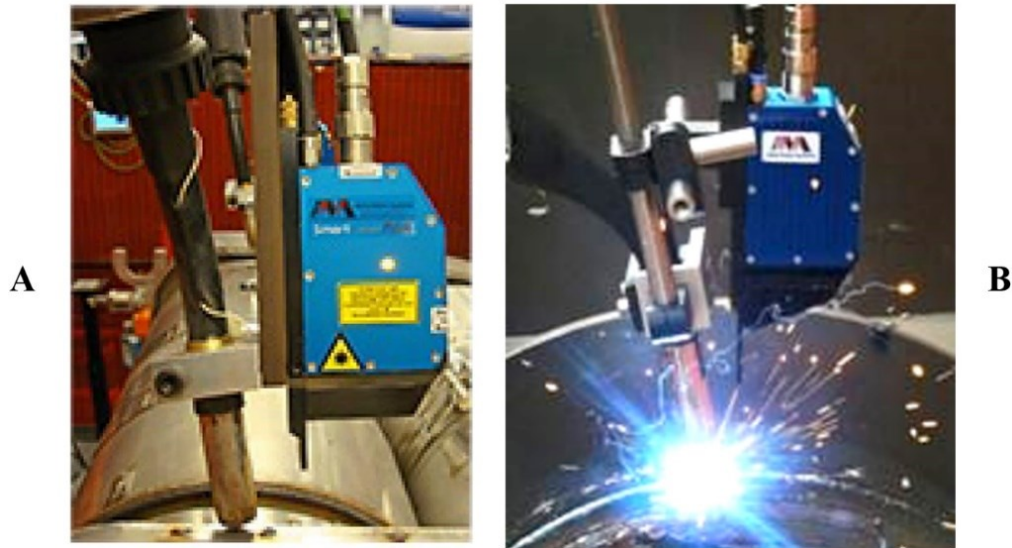
Alguns fabricantes, citados no item 2.2 deste trabalho, se destacam pelas características oferecidas nos seus STL, sendo eles: Meta Vision Systems, Servo-ROBOT, Keyence e Riftek.

A fabricante Meta Vision Systems, por exemplo, é uma das únicas que oferta modelos de STL com *firmware* específico para integradores independentes, não somente atrelados a protocolos de comunicação dos grandes fabricantes de robôs. Outra diferença é a gama de produtos ofertados, sendo cinco modelos de cabeçotes de medição, que podem ser adquiridos independente do sistema de movimentação, bem como soluções completas de medição, como o sistema *Smart Laser Pilot* [57]. Além disso, através de seu principal parceiro, a CRC-Evans, oferta soluções completas para medição, inspeção e soldagem automatizada, como o sistema de soldagem interna *ORBIS* [26], representado na Figura 2.7.

Os sensores desta fabricante estão divididos em duas linhas, sendo elas *Smart Laser Sensors* (SLS) e *SLS ARC* [58] [59]. Os sensores *SLS* foram os primeiros lançados pela empresa (em 1986), sendo componentes de seu sistema de automação da soldagem *VistaWeld* e *Smart Laser Pilot*, indicados principalmente para soldagem a arco submerso (SAW). Os sensores *SLS ARC* foram lançamentos mais recentes (em 2014), projetados para trabalhar especificamente com soldagem a arco, expostos diretamente à luminosidade do arco. A diferença básica está no arranjo dos componentes: enquanto nos sensores *SLS* o emissor laser é normal à superfície da

peça e o sensor de imagem é inclinado, na linha *SLS ARC* emissor e sensor são inclinados, sendo a maior inclinação do laser em relação à vertical perpendicular à superfície da peça. Exemplos de sensores das duas linhas estão representados na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Sensores *SLS* (A) e *SLS ARC* (B).



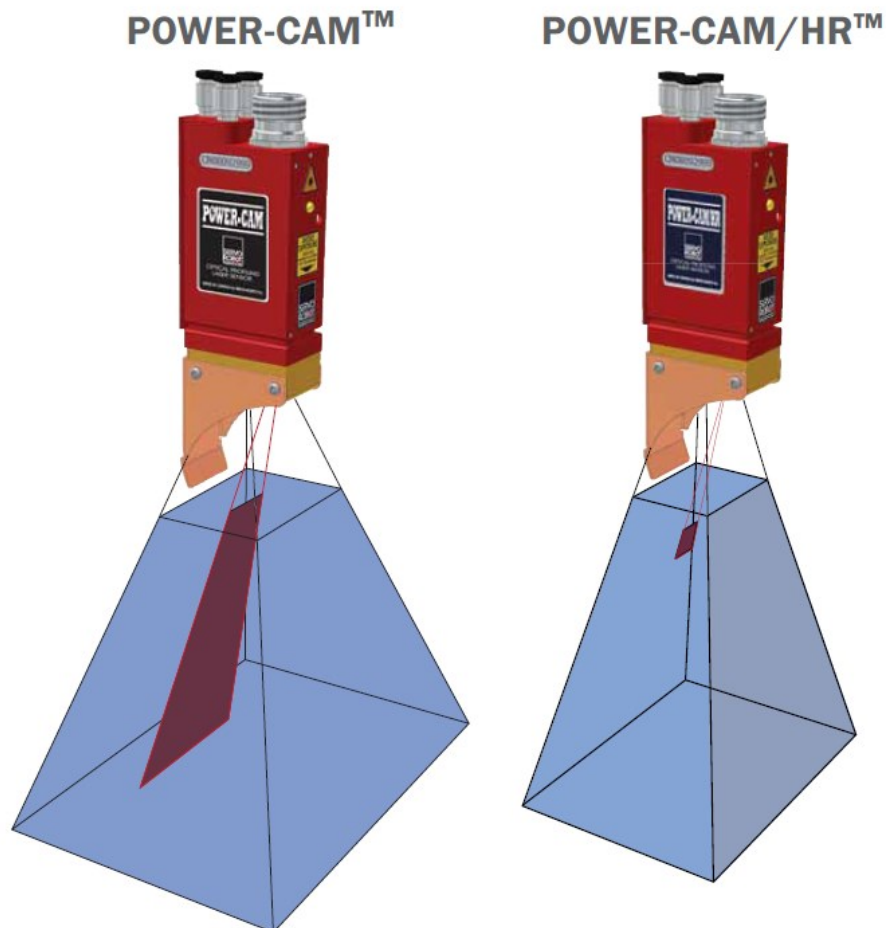
Fonte: A [57] e B [59].

A fabricante Servo-ROBOT, por sua vez, oferta sensores que integram mais de um sensor de imagem, sendo o principal para a triangulação a laser e um secundário para possibilitar a visualização da soldagem pelo operador durante o processo, sem comprometer o uso do sensor principal para o seguimento de junta [20]. Esse tipo de solução é interessante por garantir o perfeito acesso ao sensor principal de imagem pelo sistema de controle mesmo quando o operador solicita imagens de visualização da junta, o que nos outros modelos (que só tenham um sensor de imagem) acaba causando grande diminuição na taxa de quadros por segundo, comprometendo significativamente a qualidade do seguimento de junta.

Essa fabricante trabalha essencialmente com duas linhas de STL, uma voltada para aplicações de seguimento de junta com um único cabeçote (*POWER-CAM*) e outra voltada para operação com combinação de dois ou mais cabeçotes medidores (*Quanta*) [60]. Sobre os sensores *POWER-CAM*, que são STL com projeção singular linear fixa, a fabricante disponibiliza dois modelos, um voltado para chapas finas e outro para chapas espessas (*POWER-CAM* e *POWER-CAM/HR*, respectivamente). Estes dois modelos estão ilustrados na Figura 3.17, sendo que o campo projetado em vermelho é referente ao plano de medição e o volume projetado em azul é referente à visualização disponível através do sensor secundário

(colorido) presente nesses sensores. Diferente de outros fabricantes, a Servo-ROBOT também disponibiliza em seu catálogo os dados operacionais dos cabeçotes para trabalho com arco aberto, em inspeção de chanfros (dimensional da solda) e inspeção de juntas soldadas (inspeção da soldagem), tanto para soldas em filete como soldas em chanfro.

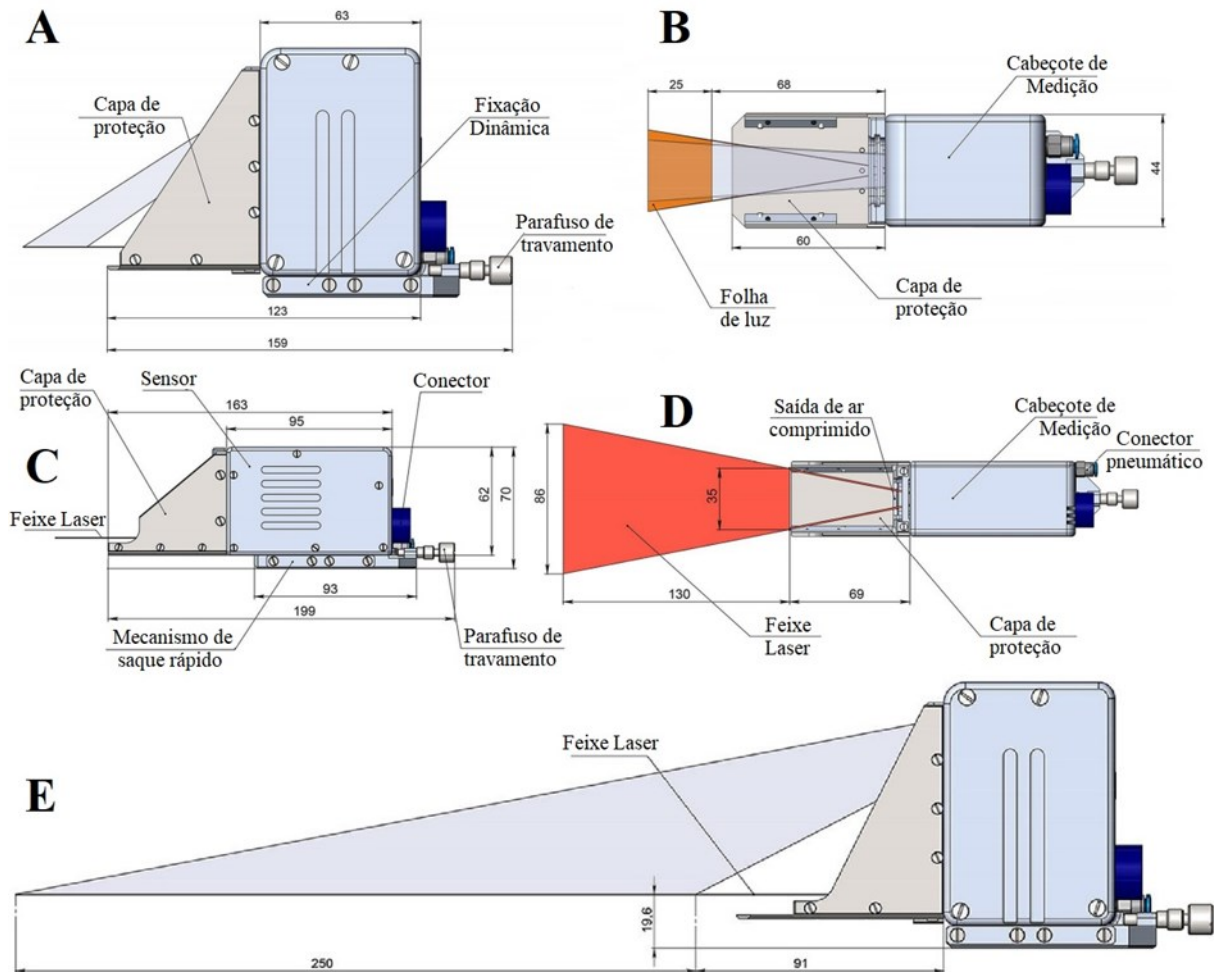
Figura 3.17 – Sensores *POWER-CAM* da fabricante Servo-ROBOT.



Fonte: [60].

O sensor *RF627Weld* da fabricante Riftek, por exemplo, é oferecido em três configurações. Além da diferença geométrica do cabeçote entre elas, as versões também têm diferentes parâmetros de *stand-off*, largura de medição e campo de medição, conforme ilustrado na Figura 3.18. Curiosamente, os três modelos têm uma pequena distância de *stand-off*, o que geralmente não é o caso dos modelos de grande profundidade de medição dos outros fabricantes. Além disso, os cabeçotes de medição de menor e maior profundidades de medição têm a mesma geometria externa, inclusive com os mesmos pontos de fixação ao robô.

Figura 3.18 – STL com projeção linear singular da RIFTEK. Diferenciação por profundidade de medição: (A e B) 25 mm, (C e D) 130 mm e (E) 250 mm.



Fonte: Adaptado de [24].

A Tabela 3.1 traz um compilado de informações de vários modelos de STL com projeção linear fixa singular, de diferentes fabricantes. Apesar da gama variada de modelos e fabricantes, cada qual com suas próprias soluções em arranjo óptico, é interessante notar que todos os fabricantes listados fornecem algum tipo de solução com características similares ao modelo desenvolvido por Puhl [8] (Sensor LABSOLDA), sendo que este autor se baseou principalmente nos sensores ofertados apenas pelas duas primeiras empresas listadas na tabela.

A “Sensibilidade” indicada na Tabela 3.1 representa o valor em milímetros correspondente a um pixel da imagem. O valor informado deveria ser o pior caso, porém provavelmente os fabricantes informe a sensibilidade na altura do *stand-off*, centralizada com o sensor, situação mais favorável (melhor caso), uma vez que o objeto principal dos documentos técnicos disponibilizados por estes é vender os sensores.

Tabela 3.1 – Especificação de STL com projeção linear singular fixa.

Sensor (Fabricante)	<i>Stand-off</i>	Campo de medição próximo e (distante) ou somente nominal	Profundidade de medição nominal	Sensibilidade Horizontal (Vertical)
<i>SLS-050VI</i> (Meta Vision) [19]	65,00 mm	50,0 mm	80,0 mm	0,050 mm (0,080 mm)
<i>POWER-CAM</i> (Servo-ROBOT) [20]	70,00 mm	27,0 mm (76,0 mm)	140,0 mm	0,050 mm (0,090 mm)
<i>POWER-CAM HR</i> (Servo-ROBOT) [20]	92,00 mm	12,5 mm (15,0 mm)	16,0 mm	0,016 mm (0,025 mm)
Sensor nacional LABSOLDA [8]	60,00 mm	60,0 mm	80,0 mm	0,050 mm (0,090 mm)
<i>AccuProfile 820-5</i> (Acuity) [23]	59,95 mm	3,9 mm (5,0 mm)	5,9 mm	0,003 mm
<i>AccuProfile 820-20</i> (Acuity) [23]	89,50 mm	10,0 mm (13,0 mm)	20,0 mm	0,011 mm
<i>AccuProfile 820-40</i> (Acuity) [23]	95,00 mm	20,0 mm (27,0 mm)	40,0 mm	0,019 mm
<i>AccuProfile 820-60</i> (Acuity) [23]	109,50 mm	30,0 mm (40,0 mm)	60,0 mm	0,031 mm
<i>AccuProfile 820-80</i> (Acuity) [23]	130,00 mm	40,0 mm (55,0 mm)	80,0 mm	0,042 mm
<i>AccuProfile 820-120</i> (Acuity) [23]	186,00 mm	60,0 mm (80,0 mm)	120,0 mm	0,063 mm
<i>AccuProfile 820-240</i> (Acuity) [23]	450,00 mm	120,0 mm (160,0 mm)	240,0 mm	0,112 mm
<i>AccuProfile 820-400</i> (Acuity) [23]	695,00 mm	200,0 mm (280,0 mm)	400,0 mm	0,213 mm
<i>AccuProfile 820-1000</i> (Acuity) [23]	1550,00 mm	500,0 mm (800,0 mm)	1000,0 mm	0,600 mm
<i>LJ-V7020K</i> Keyence [22]	24,20 mm	6,5 mm (7,5 mm)	4,6 mm	0,010 mm
<i>LJ-V7020</i> Keyence [22]	20,00 mm	6,5 mm (7,5 mm)	5,2 mm	0,010 mm
<i>LJ-V7060K</i> Keyence [22]	54,60 mm	8,0 mm (8,0 mm)	7,6 mm	0,020 mm
<i>LJ-V7060</i> Keyence [22]	60,00 mm	13,5 mm (15,0 mm)	16,0 mm	0,020 mm
<i>LJ-V7080</i> Keyence [22]	80,00 mm	25,0 mm (39,0 mm)	46,0 mm	0,050 mm
<i>LJ-V7200</i> Keyence [22]	200,00 mm	51,0 mm (73,0 mm)	96,0 mm	0,100 mm
<i>LJ-V7300</i> Keyence [22]	300,00 mm	110,0 mm (240,0 mm)	290,0 mm	0,300 mm

3.4.2 Sensores com projeção linear móvel

Exemplos de aplicações ou sistemas comerciais com esses tipos de sensores não foram encontrados na pesquisa realizada para este estudo. Um motivo para tal está na própria natureza de um sistema deste tipo: ao realizar a movimentação da linha, de modo a ampliar o alcance do sensor sem movimentá-lo, ou então para conseguir capturar a geometria da junta de várias poses

com o sensor fixo, o aumento da complexidade do projeto e implementação de um sensor deste tipo não se justifica pelos ganhos associados à movimentação do feixe.

Uma vez que existem os sensores com múltiplas projeções lineares, que além de agregarem esses benefícios almejados pelo sensor de projeção linear móvel, também oferecem novas e importantes funcionalidades ao sistema, não há justificativa para se optar pela projeção linear móvel ao invés da utilização de múltiplas projeções lineares fixas.

3.5 STL COM MÚLTIPLAS PROJEÇÕES LINEARES

Assim como descrito no item 3.3 deste capítulo, sensores com projeção única pontual ou linear não conseguem informar o suficiente ao sistema de controle para que o mesmo consiga diferenciar diretamente mudanças geométricas do mensurando das movimentações indesejadas entre os sistemas de coordenada da ferramenta, do manipulador e da peça.

Apenas movimentar a projeção linear não garante imunidade a este problema, a não ser que o escaneamento da peça seja feito em movimento pausado, executando mais de uma medição, em perspectivas diferentes da junta, com os sistemas de coordenada na mesma posição. Esse tipo de solução, contudo, implica em perda de produtividade e esforço excessivo de alguns componentes do manipulador, por conta da constante aceleração e desaceleração.

Uma maneira mais adequada de sobrepor essa limitação é combinar mais de um STL de projeção linear singular, estando eles visualizando regiões diferentes da mesma junta no mesmo instante de tempo. Outra é utilizar um STL com duas ou mais projeções lineares.

3.5.1 Sensores com projeção de duas ou mais linhas fixas

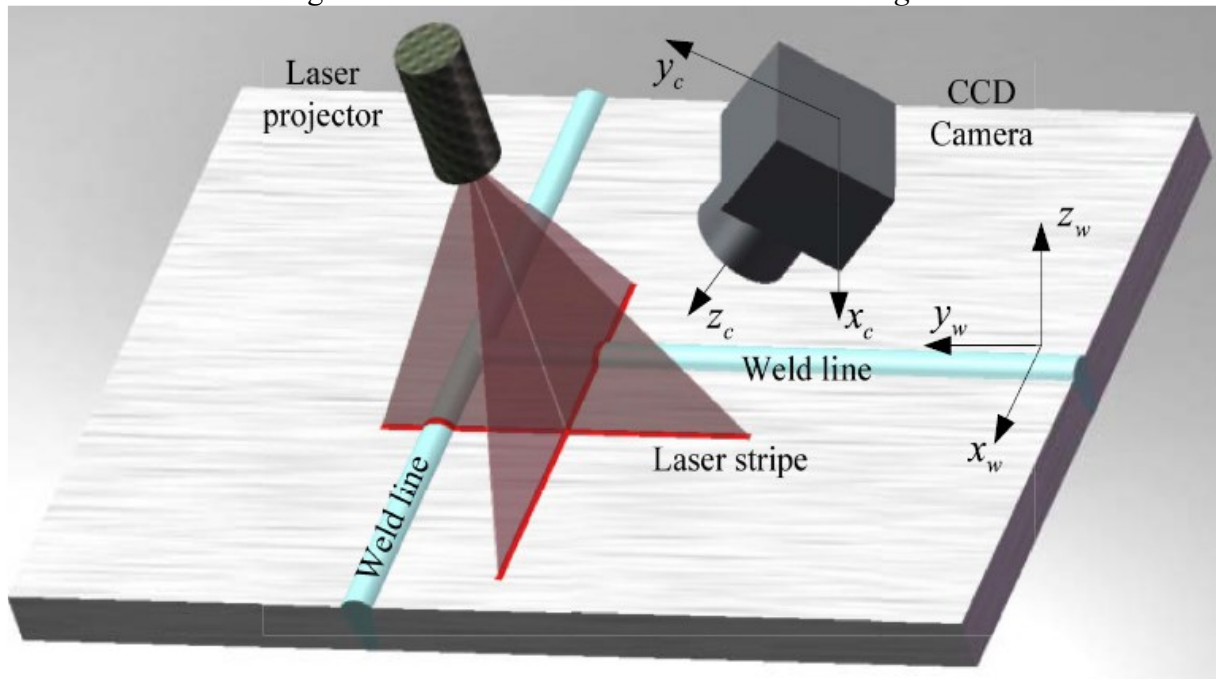
Os STL de múltiplas projeções fixas mais comuns disponíveis atualmente são os de três linhas. Esse tipo de sensor é muito interessante para as aplicações de soldagem adaptativa, especialmente quando é previsto problemas de rigidez do conjunto ou das movimentações indesejadas entre os sistemas de coordenadas envolvidos no equipamento.

Os sensores mais comuns nesta categoria são os que projetam múltiplas linhas paralelas sobre a peça, em especial os de três linhas. Todavia, há sensores desenvolvidos que com número superior, como o sensor de 5 linhas construído por Sung *et al.* [61].

A presença das duas linhas extras possibilita ao sensor detectar translações e rotações nos três eixos, o que aumenta a confiabilidade das medições. Além disso, é possível comparar

o posicionamento entre as três linhas na mesma medição, o que facilita a detecção de alguns tipos de discontinuidades da peça. Um exemplo diferenciado de sensor deste tipo foi proposto por Zhang *et al.* [62], com utilização de projeção de duas folhas de luz perpendiculares, formando uma cruz sobre a peça, conforme ilustra a Figura 3.19.

Figura 3.19 – Sensor *CSL – Cross Structured Light*.

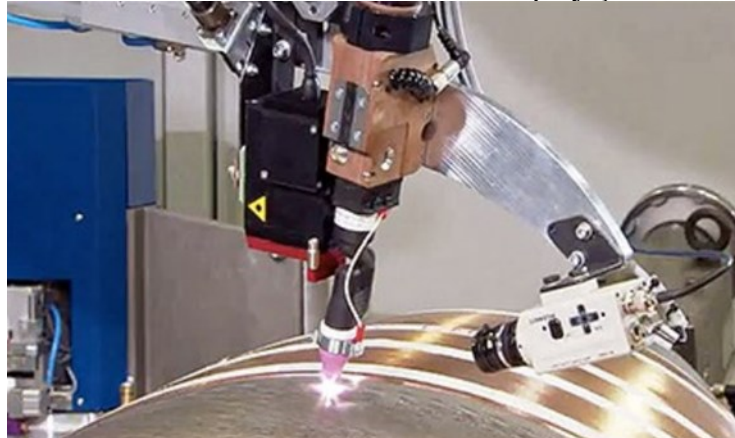


Fonte: [62].

Alguns fabricantes já oferecem soluções deste tipo, a exemplo dos sensores da Meta Vision Systems e Scansonic Binzel, disponibilizando sensores de fácil integração via *Ethernet*, inclusive com manipuladores robóticos genéricos.

A fabricante Meta Vision Systems inclusive anuncia um STL, *Meta Scout*, voltado para sensoriamento de soldagem a laser (LBW) que utiliza projeção de 5 linhas, citando como principais vantagens a maior taxa de aquisição de pontos e o melhor detalhamento das informações sobre a junta [63]. Uma imagem deste sistema está na Figura 3.20. A mesma empresa também comercializa sensores de três linhas, porém voltados principalmente para soldagem por arco submerso (SAW) [64].

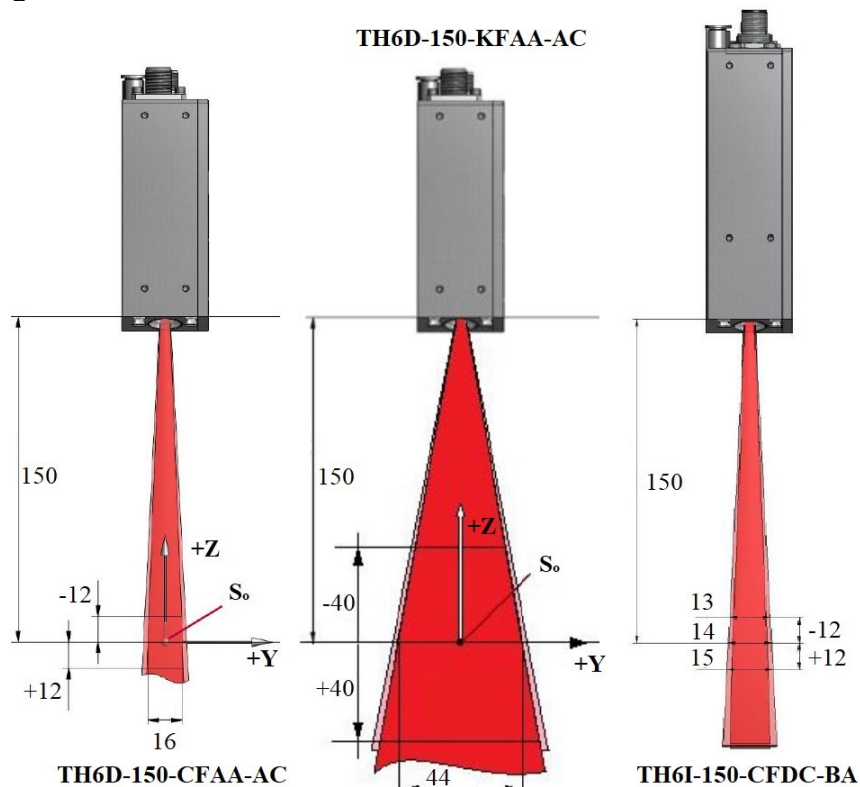
Figura 3.20 – Sistema *Meta Scout*, STL com projeção de 5 linhas.



Fonte: [63].

A Scansonic Binzel também disponibiliza um modelo de sensor com três linhas, voltado especialmente para seguimento de junta durante a soldagem a arco. Disponibilizado em três versões diferentes, retratadas na Figura 3.21, os sensores *TH6x* têm capacidade igual ou superior aos concorrentes em termos de geometria do cabeçote, *stand-off* e sensibilidade, assim como campo e profundidade de medição [65].

Figura 3.21 – Sensores da linha *TH6x* da fabricante Scansonic Binzel.



Fonte: Adaptado de [65]

Outro tipo de sensor que projeta mais de uma linha sobre a peça é o escâner para soldagem. Alguns fabricantes já disponibilizam equipamentos desse tipo, inclusive com opção de movimentação manual, como é o caso do *Wiki-Scan* da fabricante Servo-ROBOT [66] e do *RF627AVIKScan* da fabricante Riftek [67], ambos representados na Figura 3.22. A diferença é que esses sensores utilizam uma linha para triangulação e duas para facilitar o posicionamento manual do sensor sobre a junta. Esses sensores poderiam também ser considerados, para efeitos práticos, sensores com projeção linear singular fixa.

Figura 3.22 – Sistemas de escaneamento para soldagem.

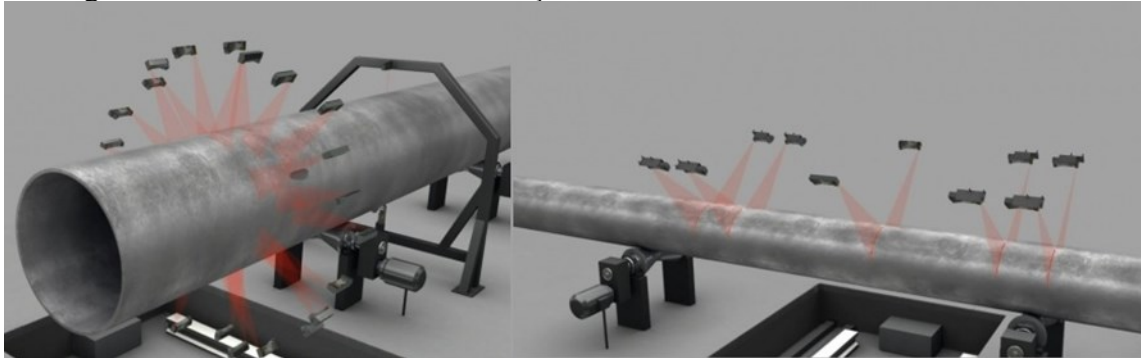


Fonte: Adaptado de [66] (esquerda) e [67] direita.

A combinação de dois ou mais sensores de projeção linear singular também possibilita ganhos em relação a utilização de um único sensor, seja pela produtividade ou pela qualidade das medições. A exemplo dos sensores 1D, os sensores 2D também são combinados em sistemas já disponíveis no mercado.

Um tipo interessante é o sistema *MRT1420-RF1420TB* para medição de tubulações da fabricante Riftek, que dispõe de duas configurações, ilustradas na Figura 3.23: combinação de 24 cabeçotes de medição com projeção linear singular fixa para medição de diâmetro, circularidade e modelo 3D do tubo, ou combinação de 10 cabeçotes para medição de retilidade do tubo.

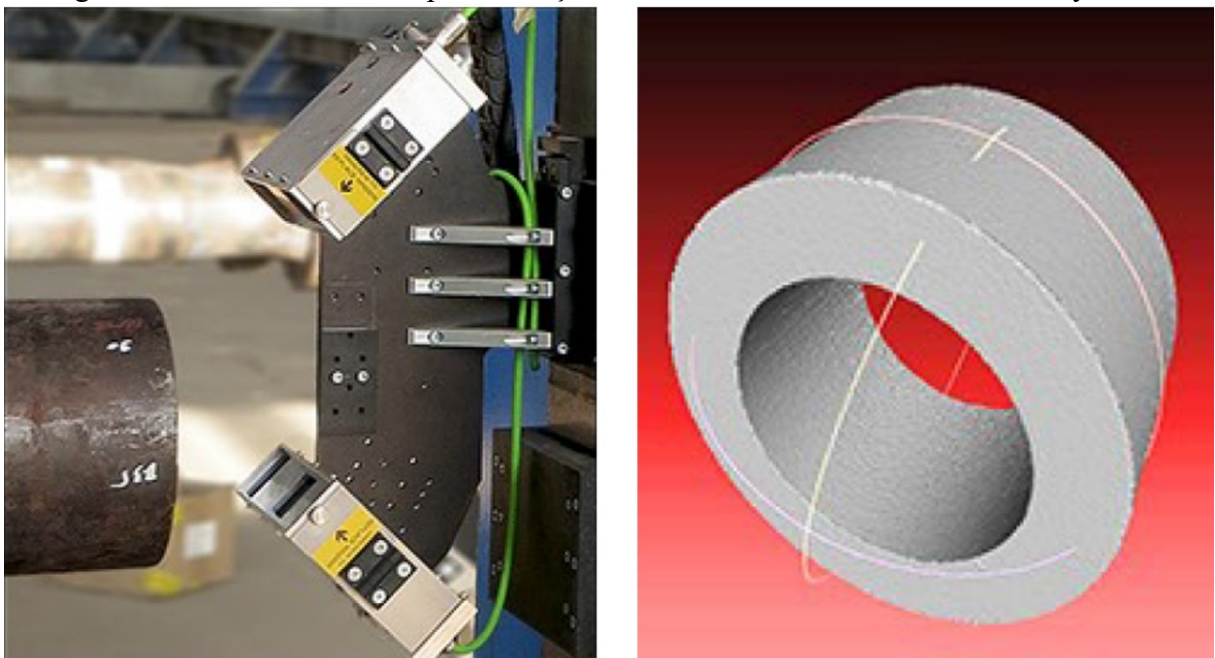
Figura 3.23 – Sistemas com combinação de vários sensores da fabricante Riftek.



Fonte: [67].

A fabricante Meta Vision Systems também dispõe de um sistema similar, porém voltado para medição específica da circularidade das extremidades de tubos a serem unidos, permitindo ao utilizador juntas os pares de tubos mais compatíveis geometricamente entre si do estoque, o que facilita bastante o processo de soldagem. Esse sistema, denominado *Pipe End Measurement System (PEMS)* [64], combina 2 cabeçotes SLS com projeção linear singular, escaneando a face do bisel e superfícies interna e externa até 100 mm do bisel, conforme representado na Figura 3.24.

Figura 3.24 – Sistema *PEMS* para medição de bisel da fabricante Meta Vision Systems.

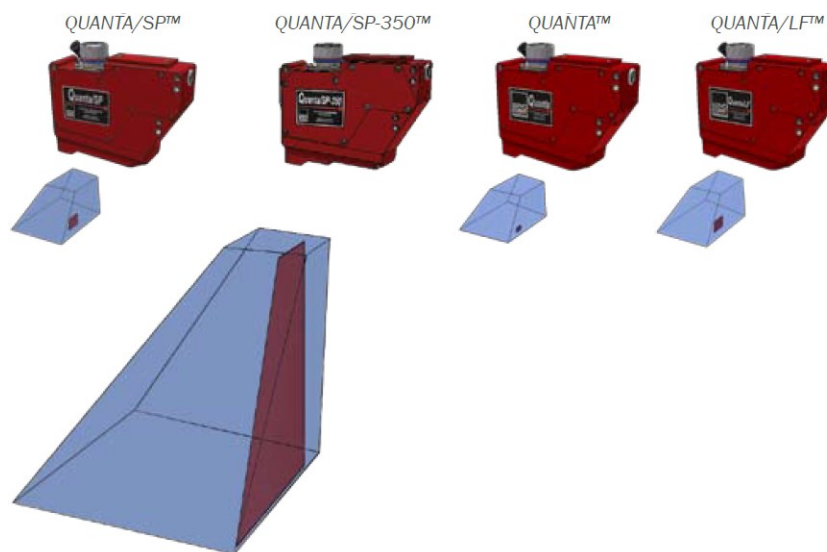


Fonte: [64].

Outra fabricante que disponibiliza sistemas deste tipo é a Servo-ROBOT, com a linha de sensores *Quanta*, que podem trabalhar em conjuntos de duas ou mais unidades, a fim de

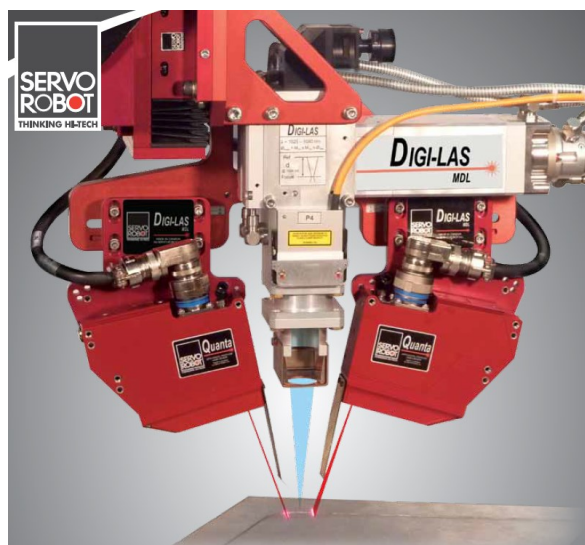
executar tarefas simultâneas de seguimento de junta e inspeção de solda ou aplicações mais complexas que requeiram maior número de sensores [68], como visto na Figura 3.23. Os modelos de sensor desta linha estão retratados na Figura 3.25, sendo que o campo projetado em vermelho é referente ao plano de medição e o volume projetado em azul é referente à visualização disponível através do sensor secundário (colorido) presente nesses sensores. A Figura 3.26 traz um exemplo de aplicação combinando dois sensores *Quanta* para seguimento de junta e inspeção simultânea de soldagem a laser (LBW).

Figura 3.25 – Sensores *Quanta* da fabricante Servo-ROBOT.



Fonte: [60].

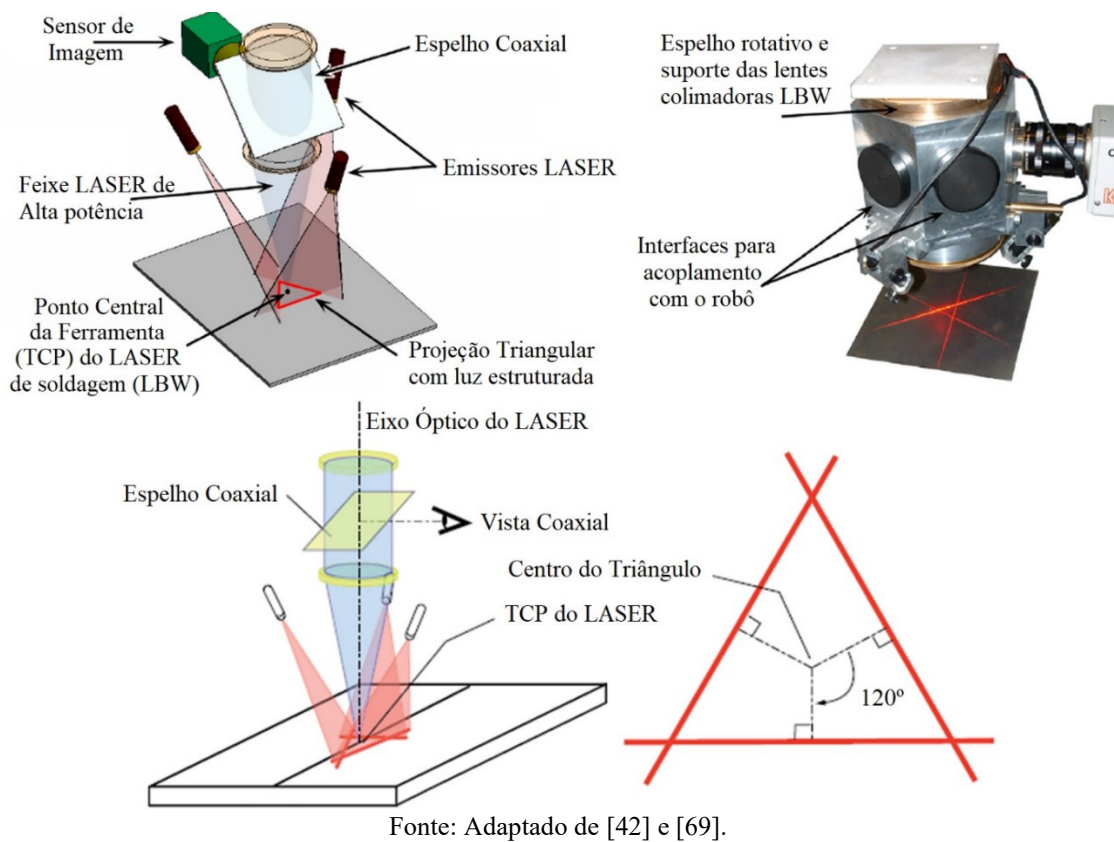
Figura 3.26 – Exemplo de aplicação com dois sensores *Quanta*.



Fonte: [68].

Além de todos esses modelos de sensores e sistemas comerciais citados, há também um sensor com projeção de três linhas, com visão coaxial a um feixe de alta potência para solda a LASER (LBW), que é bastante interessante. Mesmo não encontrando uma referência de que este sensor tenha sido desenvolvido em um produto comercial consolidado, o sensor desenvolvido por Iakovou *et al.* [42] [69]. A Figura 3.27 ilustra o sistema desenvolvido por estes autores.

Figura 3.27 – Sensor com projeção triangular (três linhas) e esquema da visão coaxial.



3.5.2 Sensores com múltiplas projeções lineares móveis

Modelos comerciais que se enquadram nessa categoria de sensores não foram encontrados até o momento da produção deste trabalho. Por se tratarem de sensores altamente complexos em matéria de projeto, implementação e utilização, este tipo de sensor deve ser considerado apenas em casos onde os arranjos descritos anteriormente não forem suficientes, devido a limitações de *hardware* ou *software* da tecnologia atual no período em que o desenvolvedor abordar esta tarefa.

4 PROCESSAMENTO DE IMAGEM PARA STL

Os algoritmos apresentados na seção 2.3 deste trabalho pressupõem a disponibilidade da informação já processada acerca do perfil da junta. Para o caso do desenvolvimento de um sensor próprio, o tratamento das imagens gravadas pelo sensor deve ser feito a fim de possibilitar a medição da junta.

Assim como a escolha dos componentes e arranjo óptico constitui uma etapa chave no projeto de um STL, os algoritmos para processamento de imagem também são essenciais para este desenvolvimento. Tanto o *software* quanto o desempenho esperado do STL são diretamente dependentes destes algoritmos selecionados.

As imagens coletadas por um STL, geralmente *online* (durante a soldagem), apresentam uma gama de ruídos, os quais dificultam as tarefas de identificação e medição do perfil da junta. Desta forma, é preciso entender quais os tipos de ruídos e suas características, para então selecionar métodos capazes de atenuar ou remover completamente estes ruídos da imagem, melhorando a eficácia das etapas seguintes de processamento.

Para facilitar o entendimento deste capítulo, o leitor pode consultar o Apêndice A (página 198) deste trabalho, que contém um glossário dos termos relacionados ao processamento de imagens digitais para STL.

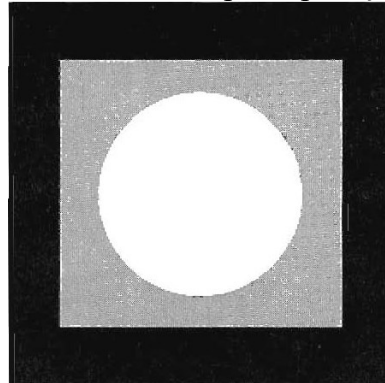
4.1 RUÍDOS EM IMAGENS DE STL

Durante todo o processo de aquisição de uma imagem digital por um STL há adição de ruído à imagem, proveniente de várias fontes, como ruído de padrão fixo (ou pela máscara de cores do sensor), ruído da corrente para o nível escuro da imagem, ruído da leitura do sensor, ruído de amplificação e ruído de quantização. A quantidade final de ruído presente na imagem depende destes fatores, bem como da luz que chega ao sensor de imagem, do tempo de exposição e do ganho do sensor [70].

No contexto do processamento de imagens para STL, os ruídos são um problema constante, visto que podem ter várias origens. De modo resumido, ruídos normalmente são artefatos na imagem produzidos pelo sensor de imagem ou por perturbações do ambiente da soldagem [71]. Os ruídos provenientes do sensor de imagem podem ser modelados por suas características fundamentais, conforme ilustrados na Figura 4.2 (modelos de ruídos com distribuição Gaussiana, de *Rayleigh* e *Gamma*, respectivamente) e na Figura 4.3 (modelos de

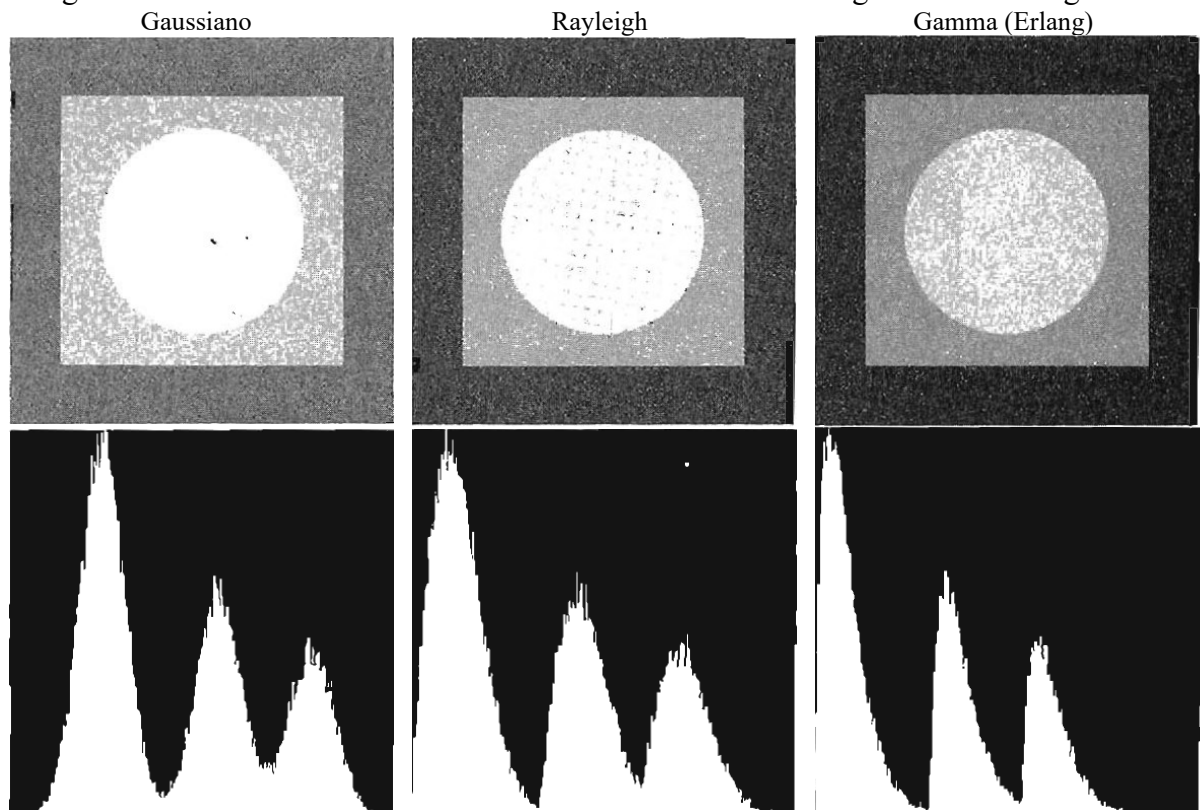
ruídos exponencial, uniforme e de impulso, respectivamente), aplicados na imagem original (um padrão de testes para facilitar a visualização do efeito de cada ruído), retratada na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Padrão de teste para aplicação de ruídos.



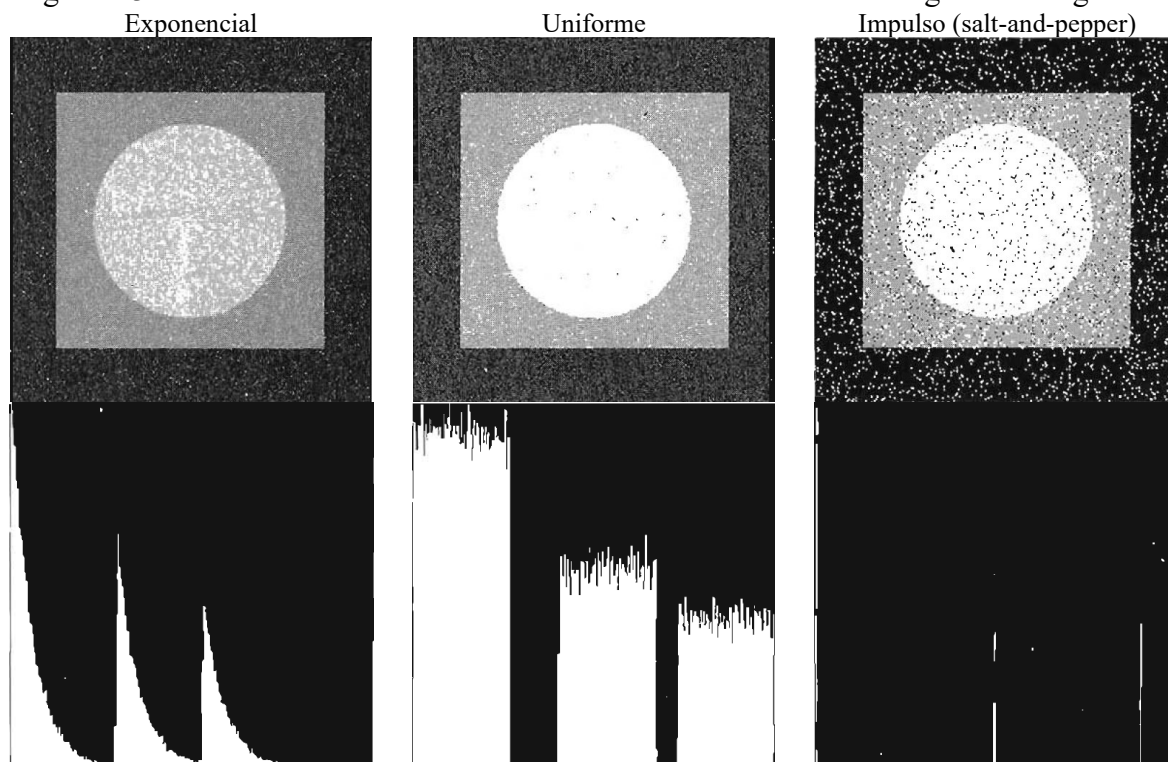
Fonte: Adaptado de [72].

Figura 4.2 – Modelos de ruídos característicos do sensor de imagem e seus histogramas.



Fonte: Adaptado de [72].

Figura 4.3 – Outros modelos de ruídos característicos do sensor de imagem e histogramas.

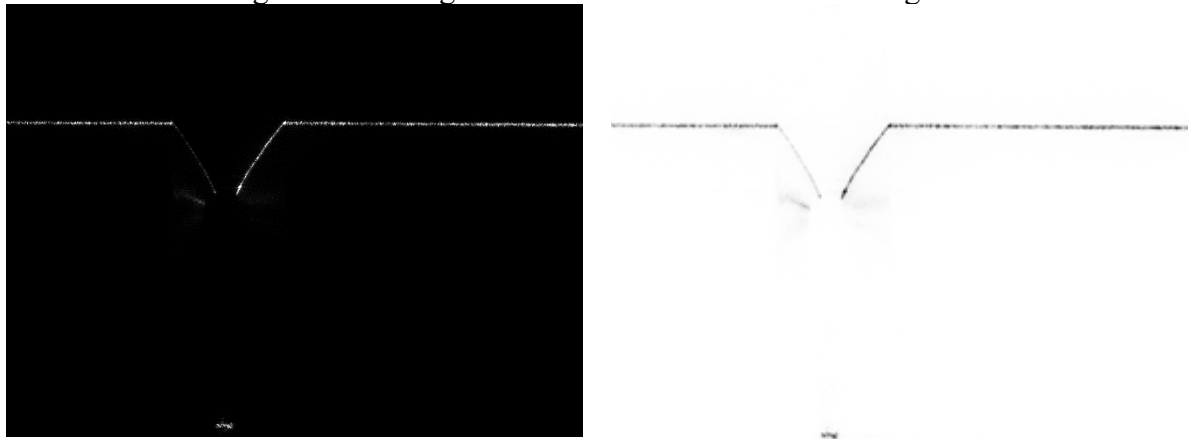


Fonte: Adaptado de [72].

Considerando o grande avanço que os sensores de câmeras industriais acumularam nas últimas décadas, os ruídos produzidos no sensor tender a não serem tão significativos quanto os produzidos pela própria soldagem. Além da qualidade construtiva dos sensores, continuamente aprimorada, os próprios fabricantes de câmeras já disponibilizam ferramentas simples para ajuste dos parâmetros do sensor de imagem e minimização destes ruídos. Não obstante, os níveis de luminosidade dos ruídos produzidos pela soldagem geralmente são significativamente maiores dos que os dos ruídos produzidos no sensor de imagem.

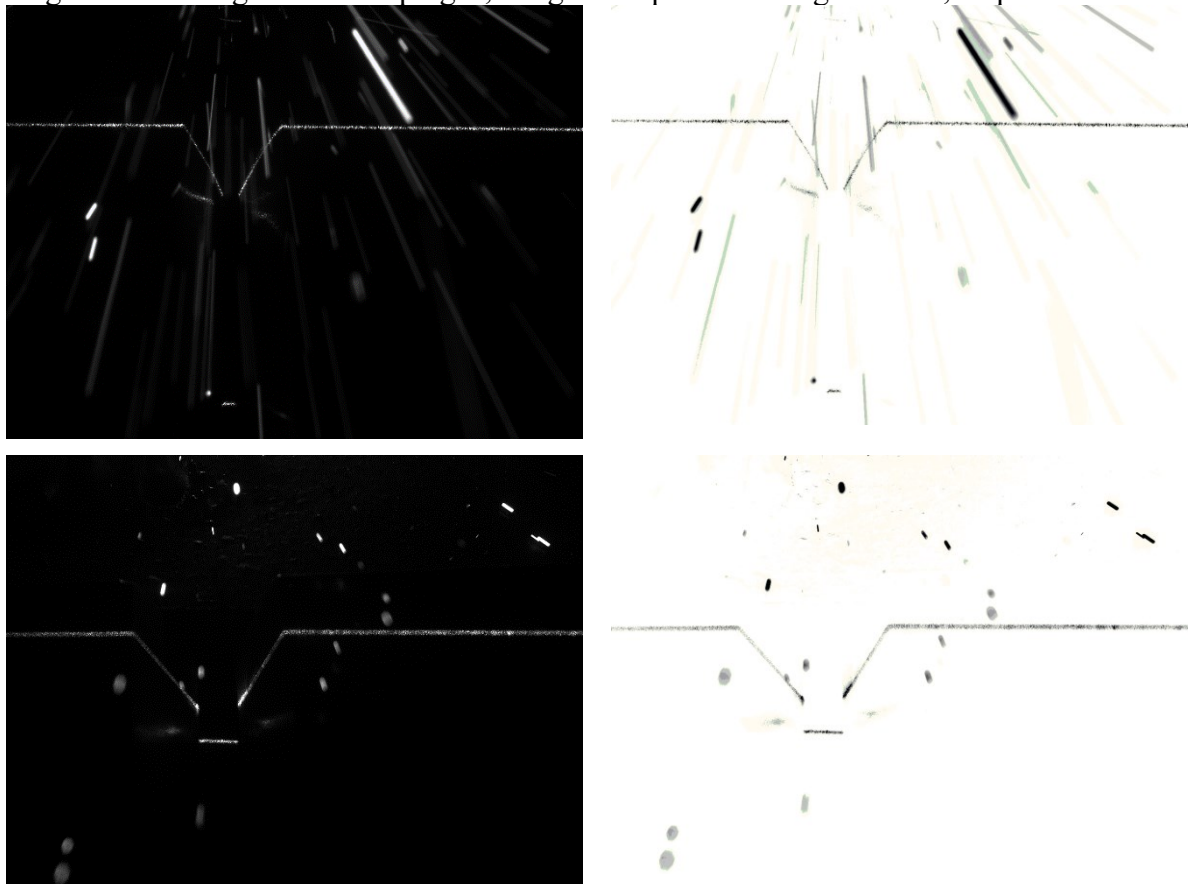
Assim, existem alguns tipos ruídos característicos para as imagens capturas por STL aplicados na soldagem a arco. A imagem retratada na Figura 4.4 pode ser considerada uma imagem livre de ruídos da soldagem. As imagens desta seção acompanham também sua negativa, de modo a facilitar a visualização das mesmas no evento da impressão deste documento. Na Figura 4.4, mesmo categorizada como uma imagem “sem ruídos”, é notável a presença de algumas manchas e reflexos na região da abertura de raiz e também da reflexão da linha laser no suporte de montagem, uma vez que se trata de uma junta em “V” sem o passe de raiz depositado e com abertura de raiz igual a 2,0 mm. Esses artefatos constituem ruídos, porém não são gerados pela soldagem, mas sim pelo emissor laser do STL e a qualidade do acabamento superficial da chapa.

Figura 4.4 – Imagem de STL livre de ruídos da soldagem.



Na sequência, são apresentadas imagens de STL com os ruídos mais característicos da soldagem: respingos. Na Figura 4.5 estão retratadas duas imagens com diversos tipos de respingos, sendo que a primeira os apresenta em grande quantidade e a segunda apresenta respingos mais grosseiros.

Figura 4.5 – Imagens com respingos, em grande quantidade e grosseiros, respectivamente.



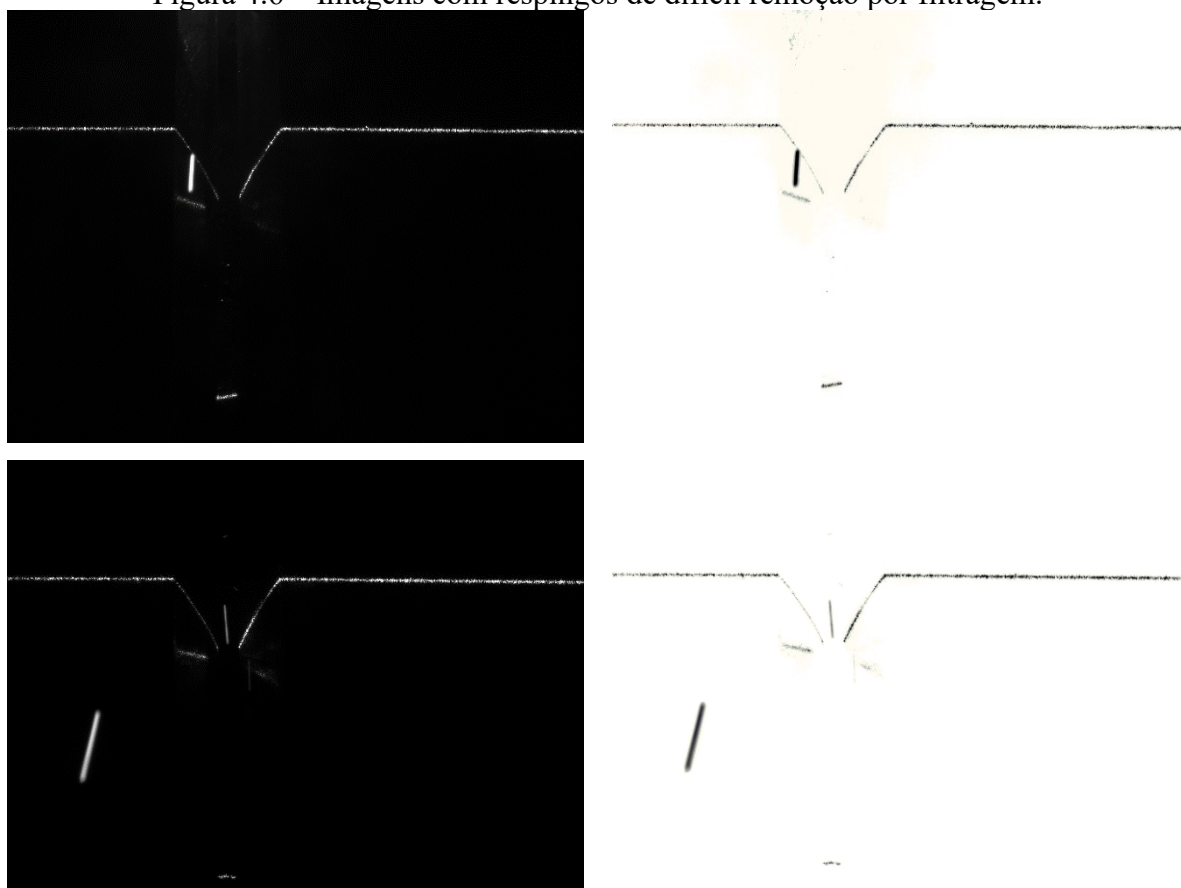
Os respingos, por serem projeções de material metálico incandescente, tendem a produzir um risco na imagem, principalmente devido ao brilho alaranjado e de alta intensidade, o que dificulta muito a filtragem deste tipo de ruído por *hardware* (com uso de filtros passa faixa). Outra implicação dos respingos, mesmo em sensores de imagem do tipo *global shutter* (que fazem a leitura do sensor inteiro respeitando o mesmo “instante” da aquisição da imagem), é que por produzirem artefatos lineares, muitas vezes eles podem interferir nos algoritmos de segmentação e identificação da linha laser, de modo que devem ser eliminados ou atenuados ao máximo na etapa de filtragem da imagem. O uso de um anteparo físico (*shield*) entre a tocha de soldagem e o campo de visão do STL também pode ser uma alternativa para reduzir a incidência dos ruídos de respingos, quando o mesmo for aplicável.

Mesmo nos sensores tipo *global shutter*, na tecnologia CCD, as cargas dos sensores são transferidas transbordando a carga gerada pelos fótons de uma linha para outra em um período muito curto de tempo, se comparado a taxa de quadros nominal do sensor. Assim, se existir um ponto muito brilhante, mesmo quando o sensor não estiver adquirindo imagem, mas transferindo carga, o ponto muito intenso marca os *pixels* na mesma coluna durante a transferência de carga.

Os sensores do tipo CMOS são menos sensíveis ao borrão vertical. Nos sensores que utilizam esta tecnologia, a carga é adquirida internamente no *chip* e não através da transferência externa como no CCD. Além disso, existe o tempo de exposição regulado na própria câmera, durante o qual o sensor é sensibilizado pela luz ambiente, então qualquer perturbação luminosa que cruzar o campo de visão do sensor durante este pequeno tempo (na faixa de 10 ms a 40 ms, geralmente) será captada e afetará diretamente a qualidade da imagem capturada da junta.

Outras implicações dos respingos dizem respeito à sua localização na imagem em relação à linha laser. Respingos que atravessam a linha laser ou que estejam localizados na região do chanfro são especialmente difíceis de serem removidos na etapa de filtragem e diferenciados da linha laser nas etapas seguintes. Exemplos destes tipos de respingos estão na Figura 4.6.

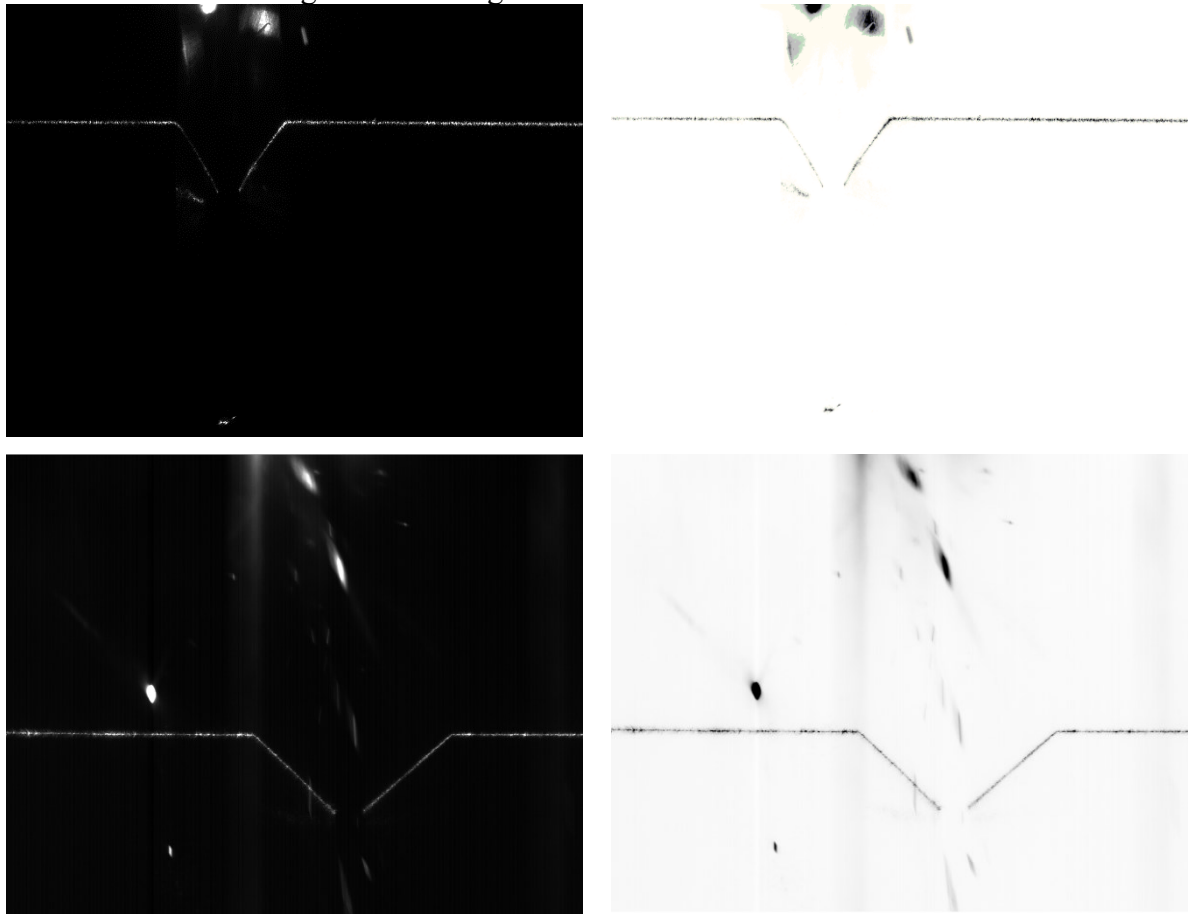
Figura 4.6 – Imagens com respingos de difícil remoção por filtragem.



Uma vez que os respingos estão relacionados principalmente à alimentação de material e um certo grau de instabilidade na transferência metálica, alguns processos mais “limpos”, além dos autógenos obviamente, tendem a não produzir esse tipo de ruído, como é o caso da soldagem TIG, Plasma (PAW), LASER (LBW), feixe de elétrons (EBW), entre outros.

Outro tipo bastante comum de ruído, além dos respingos e reflexos da linha laser, são os reflexos do arco. Esse tipo de reflexo só é um problema quando está localizado muito próximo à linha laser, o que dificilmente ocorre. Pela sua forma e razoável luminosidade, são fáceis de serem eliminados da imagem. Exemplos deste tipo ruído estão na Figura 4.7. Basicamente todos os processos de soldagem a arco estão sujeitos a este tipo de ruído, podendo também se manifestar em processos LBW e EBW, porém geralmente com algum dano ao sensor de imagem pela exposição ao feixe de alta potência.

Figura 4.7 – Imagem com reflexo do arco elétrico.

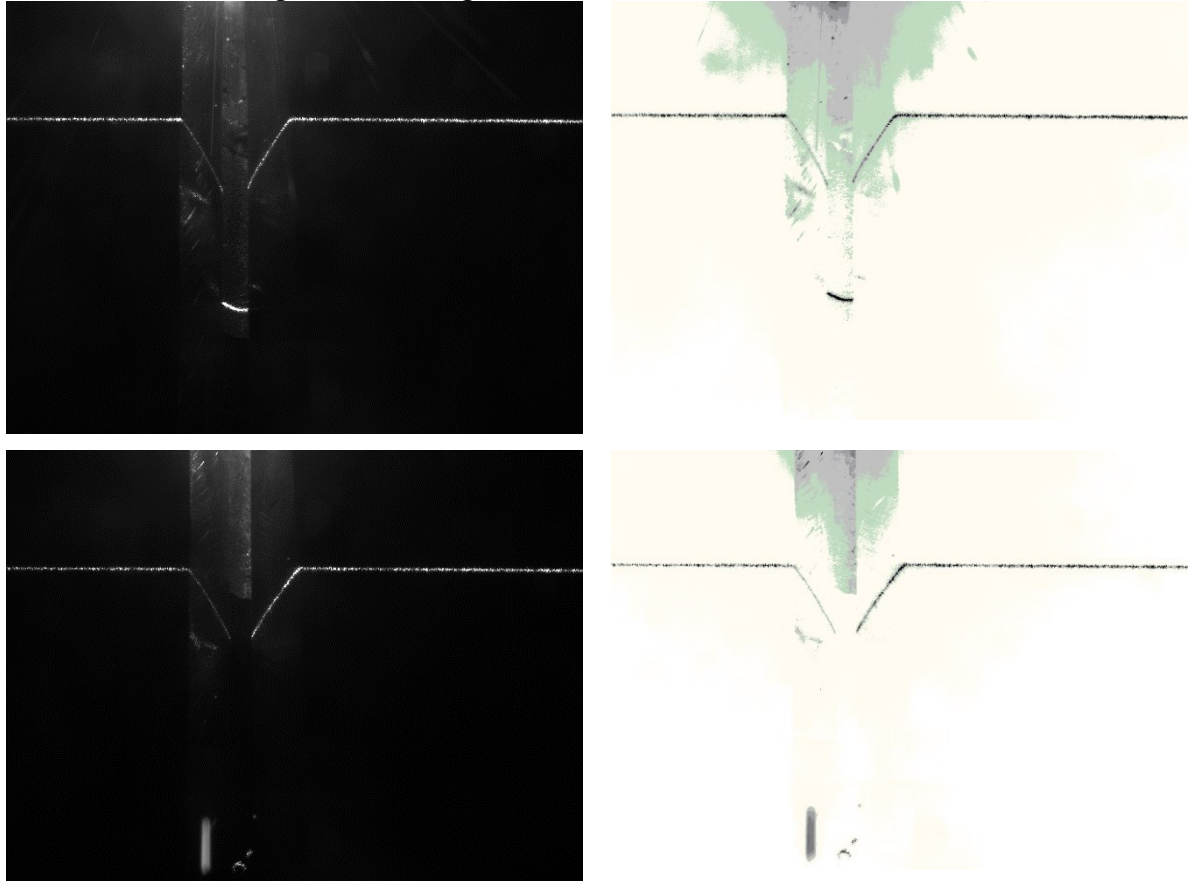


Além do reflexo do arco elétrico, em que o formato característico do arco ou da poça é retratado na imagem capturada pelo STL, há também outro tipo de ruído bastante comum em situações de pulsação da corrente, principalmente pela inabilidade do controlador da câmera em responder rapidamente às mudanças bruscas de iluminação da cena. Esse tipo de ruído caracteriza o reflexo da face do chanfro, sendo um ruído de fácil remoção com o uso de uma técnica de *threshold* (limiar) adaptativa (em setores da imagem). A Figura 4.8 ilustra imagens com a presença deste tipo de ruído.

Em situações com a pulsação de corrente, uma solução é configurar o sensor de imagens para não trabalhar com ganho automático (“AGC off” - *Auto Gain Control* desligado), e para receber um sinal de sincronia ou gatilho externo (*External Trigger*). Desse modo é possível sincronizar a aquisição de imagens para ocorrer quando a corrente de soldagem for mínima (corrente de base), mesmo que a frequência de pulsação seja baixa (próxima de 10 Hz, por exemplo). Deve-se, no entanto, manter o tempo de exposição no padrão de 10 ms a 40 ms, ou seja, ativar a aquisição de imagens pelo gatilho externo, mas manter o obturador digital

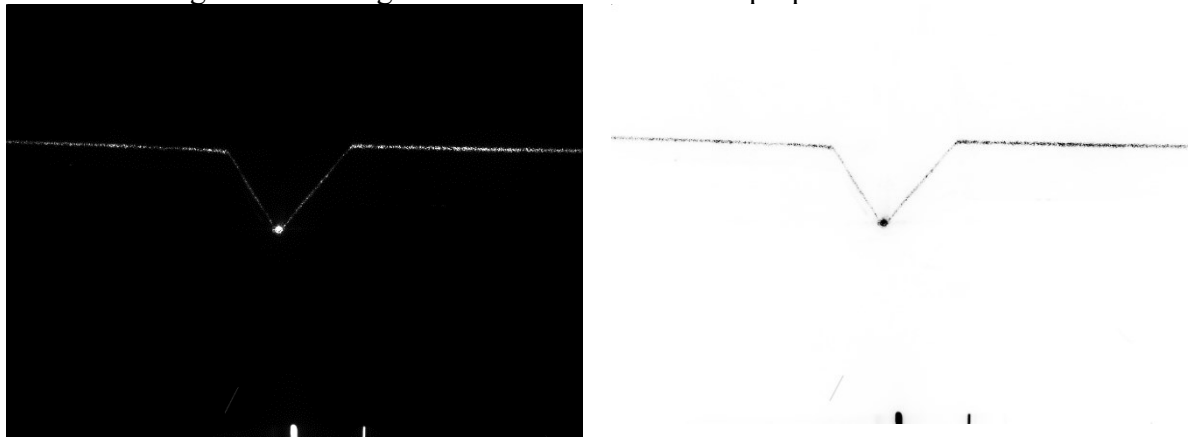
(*Electronic Shutter*) em valor de acordo com a dinâmica de movimento do sensor e nível de luminosidade da cena.

Figura 4.8 – Imagens com reflexos da face do chanfro.



Além destes tipos de ruídos, há também casos de reflexão da linha laser, duplicando a imagem da junta, acumulando um ponto de alta luminosidade na raiz ou projetando uma cópia da junta para o lado oposto da raiz. A Figura 4.9 traz um exemplo deste tipo de ruído, muito comum em peças de material reflexivo, como alumínio, que foram preparadas com esmerilhamento uniforme, semelhante a um acabamento polido. A aplicação de uma técnica diferenciada de preparação da junta, como o uso de jateamento, ou até de algum produto para mudar o aspecto superficial, que não prejudique a solda, como o verniz antioxidante para soldagem (o popular “boca louca”) podem ser boas alternativas para evitar este tipo de ruído.

Figura 4.9 – Imagem de ruído com reflexo impróprio da linha laser.



Tão importante quanto conhecer os tipos de ruídos causados pela soldagem, ter uma boa noção dos passos para o processamento de imagens para STL é fundamental no desenvolvimento de algoritmos para tal tarefa.

4.2 ETAPAS DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS PARA STL

No geral, há uma pequena divergência entre os autores quanto às etapas e classificação das operações de análise de imagens. Segundo von Wangenheim [73] (*apud* Marr [74]) existem 4 passos, de grau crescente de abstração, para análise de uma imagem. Estes passos são [73]:

1. Filtragem e processamento: consiste em mudanças sutis nas imagens, de forma a melhorá-las para as etapas seguintes, sendo que há a entrada de uma imagem e saída de outra imagem nesta etapa;
2. Condicionamento: espera-se a geração de uma nova imagem, provavelmente formatada para as próximas etapas;
3. Rotulação: primeira etapa de interpretação da imagem, a qual recebe uma imagem e produz um modelo descritivo ou conjunto de parâmetros descritores;
4. Modelagem e interpretação: etapa final onde ocorrem a classificação e interpretação dos dados extraídos da imagem, principalmente quanto ao contexto da aplicação relacionado a aspectos espaciais analisados na imagem, com transformação de um modelo de descrição paramétrica de baixo nível para um modelo mais abstrato.

Além da classificação em 4 passos, este autor enuncia 3 formas diferentes para interpretação de uma imagem, sendo estas descritas como domínios do valor, do espaço e da

frequência (espacial, FFT de uma imagem estática). A análise temporal das imagens não é muito útil para processamento de imagens de STL, uma vez que a linha laser tende a apresentar um aspecto esbelto (bastante estreita) e a imagem da junta tende a sofrer uma movimentação excessiva sobre o detector, então comparar imagens sequenciais tende a não apresentar resultados satisfatórios.

Outros autores, como Gonzales e Woods [72] e Puhl [8] denominam 3 etapas para a análise de imagens, divergindo apenas quanto à natureza das operações de cada etapa. Os primeiros dividem em processos de baixo, médio e alto níveis, assim [72]:

1. Baixo nível: envolvem operações primitivas, como pré-processamento para redução de ruídos, aumento de contraste seguintes, sendo caracterizado por ter uma imagem como entrada e outra imagem como saída;
2. Médio nível: tarefas como a segmentação (divisão da imagem em regiões ou objetos), descrição destes objetos para serem utilizados no processamento computadorizado e classificação de objetos individuais, sendo caracterizado por ter uma imagem como entrada e atributos extraídos desta imagem como saída (como contornos, cantos, e a identidade de objetos individuais);
3. Alto nível: envolve a interpretação dos objetos reconhecidos, tanto para a análise da imagem quanto para a aplicação destes resultados no processo envolvido.

Por sua vez, Puhl [8] estabelece os 3 passos com foco especial para a análise de imagens aplicada a STL, sendo:

1. Segmentação: consiste em separar a imagem em duas ou mais regiões, sendo utilizada para remover os ruídos de fundo gerados pela luminosidade gerada pelo arco elétrico;
2. Filtragem e remoção de ruídos: caracterizada com uma das etapas mais importantes no processamento de imagens, busca remover os ruídos e reflexos que não foram tratados na etapa anterior, de modo a evitar falhas de medição na etapa futura, sendo utilizados filtros nos domínios do espaço e da frequência;
3. Extração do perfil e características da junta: busca-se reconhecer o conjunto de pontos da imagem que melhor representa a geometria da junta, além de identificar os pontos chave para a localização espacial do chanfro e a medição de suas variáveis.

Segundo Muhammad *et al.* [75], os algoritmos de processamento de imagem e reconhecimento de padrões, utilizados para extrair informações de imagens capturadas por

STL, são divididos em 3 processos sequenciais, sendo estes o pré-processamento, a extração ou segmentação do perfil da linha laser e a extração do perfil da junta e medição deste. Estes autores ainda citam que a análise da literatura revelou que a maioria dos autores sinalizam a divisão em 3 etapas, porém não suportam tal alegação com citações diretas a trabalhos específicos para corroborar essa afirmação.

Os autores Liangyu *et al.* [76] nomeiam apenas 2 etapas, pré-processamento e pós-processamento, sendo a primeira para reduzir os ruídos da imagem e a segunda para extrair as características da junta e achar o centro do chanfro.

Os autores Zhang *et al.* [77] têm abordagem mais minimalista, nomeando 4 etapas: *Data Read* (leitura dos dados, ou exibição), *Data Filtering* (filtragem), *Feature Extraction* (extração do perfil da junta e medição) e *Data Plotting* (compilação dos resultados de medição).

Os autores Glasbey e Horgan [78] propõe uma classificação em 5 etapas, cada uma compreendendo uma quantidade razoável de técnicas e algoritmos, consistindo basicamente de uma outra visão para o modelo de 4 passos apresentado anteriormente, abordando de maneira mais generalizada e voltada à aplicação das técnicas para diversos fins. Assim, as 5 etapas são [72]:

1. Exibição: compreende técnicas para ajuste da exibição das imagens a serem analisadas por métodos computacionais ou por um observador humano, melhorando a visibilidade dos elementos de interesse ou mesmo o destaque destes em relação ao restante da cena;
2. Filtragem: etapa de aprimoramento das imagens pela aplicação de transformações baseadas em grupos de pixels, seja para reduzir ruídos, suavizar elementos ou destacar as bordas (ou fronteiras) dos objetos presentes na imagem para facilitar a segmentação desta;
3. Segmentação: assim como em [8], na segmentação busca-se dividir a imagem em regiões que correspondam a diferentes objetos, ou partes de um objeto, pela classificação de todos os pixels da imagem;
4. Morfologia matemática: uso de operações para estudar e operar sobre a forma dos objetos presentes na imagem;
5. Medição: extração de informações quantitativas das imagens processadas, como contagem dos objetos, medição de distância entre pixels específicos.

Neste trabalho, nenhuma destas classificações enquadrrou de maneira específica cada etapa do processamento de imagens voltado a STL, de modo que uma nova classificação é

proposta. Dessa forma, 5 passos são elencados, conforme Glasbey e Horgan [78], porém conceitualmente muito mais próxima da classificação adotada por von Wangenheim [73] (*apud* Marr [74]), tomando liberdade para dividir a filtragem e a segmentação em etapas distintas, de modo a facilitar ao leitor consultas futuras ao conteúdo deste trabalho. Além disto, a classificação adotada por Puhl [8] também foi levada em conta para concepção da proposta, uma vez que adota uma nomenclatura focada diretamente na aplicação do processamento de imagens produzidas por sensores de triangulação a laser para soldagem.

Assim, as 5 etapas do processamento de imagens para STL são: exibição, filtragem, segmentação, identificação da linha laser e medição das características da junta.

4.3 EXIBIÇÃO

Esses algoritmos constituem o primeiro passo em qualquer operação de tratamento de imagem. Apesar de algumas vezes serem ignorados e sequer listados na metodologia dos trabalhos científicos, são fundamentais para o processo, principalmente para a replicação dos resultados obtidos por outros pesquisadores [71]. Desse modo, estes algoritmos têm destaque especial nesta publicação e são abordados em maior profundidade.

Os diferentes STL trabalham com combinações diferentes de filtros, lentes e sensores de imagem. Dessa maneira, as imagens obtidas por cada sistema têm características únicas, como resolução, luminosidade, ampliação, distorção, entre outros.

Escolher o modo correto de exibição das imagens do STL é importante pois todos os algoritmos aplicados posteriormente serão afetados por essa decisão. No caso dos STL, que trabalham com imagens adquiridas *online*, ou seja, durante a soldagem, há grande incidência de ruídos por reflexos do arco, fumos e salpicos gerados.

Analisando as cenas comuns aos STL é possível destacar alguns algoritmos que são de grande importância: ajuste dos tons de cinza, binarização, definição de região de interesse *ROI* (do inglês *Region of Interest*) e operações básicas de morfologia matemática, como dilatação, erosão e fechamento.

Algoritmos para correção de distorções decorrentes das lentes ou outros acessórios utilizados não serão abordados por serem inerentes à utilização destes acessórios específicos, sendo dispensáveis a um grande número de aplicações simplesmente por não serem necessários (se não há distorção específica). Essa correção de distorções geralmente já é resolvida com a calibração da câmera e suas lentes e do conjunto câmera, lentes e laser.

Algoritmos específicos para imagens coloridas também não serão abordados, uma vez que a maioria dos STL utiliza sensores de imagem monocromáticos. Segundo Zhang *et al.* [62], como o laser utilizado geralmente tem coloração vermelha, fazer a análise da imagem utilizando apenas a informação do canal vermelho (canal *R*, *Red*, no sistema de cores *RGB*), que apresenta a melhor relação sinal-ruído, pode destacar mais a linha laser do que fazer a conversão tradicional dos três canais de cores em tons de cinza. Desse modo, recomenda-se a conversão das imagens coloridas em imagens de tons de cinza com destaque para as informações de cor vermelha (exclusivamente ou ponderado para o vermelho).

Efetivamente deve-se optar por sensores monocromáticos, sem o filtro *Bayer*, uma vez que é bastante comum a utilização de um filtro passa banda na frequência do laser entre a junta e as lentes de captação. Assim, o sensor irá operar na resolução nominal, já que não haverá pixels sem informação por não receberem sinal fora do comprimento de onda selecionado.

Operações de equalização de histograma, ao contrário das aplicações gerais para fotografia, não são adequadas para processamento de imagens de STL por reduzir o contraste em áreas muito claras ou muito escuras da imagem, o que se traduz em perda de informações do perfil da linha laser [72].

Para aquisição geral de imagens, os sensores têm uma faixa dinâmica de 8 bits, ou seja, 256 níveis de cinza. Porém, existem sensores CMOS com 10 bits e até 12 bits, para aplicações científicas de alto contraste. Todavia, estes sensores tendem a ser mais caros e mais lentos. Uma operação de aumento de contraste por processamento de imagens adquiridas com aberturas diferentes de íris ou diferentes ganhos eletrônicos também não funciona porque requerem imagens estáticas. Este tipo de melhoria de faixa dinâmica e contraste chama-se *HDR* (*High Dynamic Range*), popularizada com o avanço na capacidade de captura e processamento de imagens dos *smartphones* e muito utilizado também na fotografia, tanto amadora quanto profissional.

4.3.1 Ajuste dos tons de cinza (*grayscale*)

Imagens monocromáticas usuais são formadas por um conjunto de pixels (*picture elements*), cada um contendo um determinado valor de intensidade. A combinação ordenada destes pixels, conforme sua distribuição no sensor de imagem no momento da captura, possibilitam representar a imagem digital corretamente.

O número de pixels que representa uma imagem digital representa sua resolução e é avaliado como um indicador da sensibilidade utilizada na captura daquela imagem, sendo esta indicada pelo número de linhas x colunas de pixels da imagem associado ao tamanho da imagem real. Os níveis de intensidade que os pixels de uma imagem comportam determinam a resolução dos níveis de cinza da imagem. Esta resolução geralmente é de 256 níveis, pois trata-se de imagens com 8 bits de resolução dos níveis de cinza. [72]

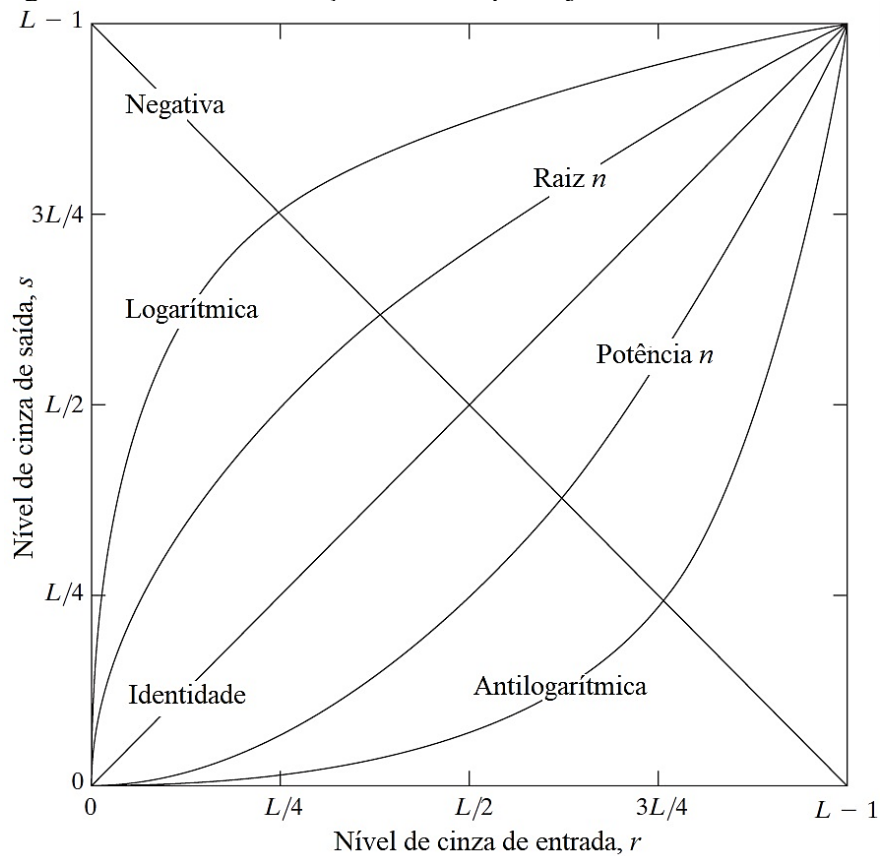
Estes dois parâmetros de resolução (número de pixels e intensidade dos pixels) podem ser modificados para facilitar o processamento de imagem. Todavia, é interessante destacar que uma imagem digital possui níveis discretos de informação em cada pixel, sendo que dobrar a resolução de uma determinada imagem não significa necessariamente um ganho real de informações, por exemplo, uma vez que os pixels criados necessitam ser preenchidos com dados gerados artificialmente. O mesmo ocorre com os níveis de cinza de uma imagem.

No entanto, operações que distribuem as informações contidas em uma imagem de maneira a facilitar a percepção dos elementos desta imagem são bastante utilizadas. Uma delas é o ajuste nos tons de cinza.

Esse ajuste pode ocorrer para algumas finalidades diferentes, mas via de regra sua utilização é oportuna quando a imagem possui baixo nível de detalhes. Para observadores humanos, situações de baixo nível de detalhes, como figura grandes e bordas abstratas, a diminuição na resolução dos níveis de cinza pode aparentar melhora na qualidade de imagem [72]. Todavia, esse efeito é alcançado para observadores humanos, sendo que algoritmos de processamento de imagem não se beneficiam, geralmente, na redução de informação da imagem.

As transformações básicas utilizadas para ajuste de cinza mais condizentes com o processamento digital de imagens com STL são: linear (imagem negativa), logarítmica (log ou log inverso) e por uma potência específica n (elevado a n ou raiz de n). A Figura 4.10 ilustra estes tipos de transformações, todas no domínio do valor. Estas transformações são no domínio do valor, pois consideram apenas o valor do pixel analisado para realização da operação.

Figura 4.10 – Transformações básicas para ajuste dos níveis de cinza.



Fonte: Adaptado de [72].

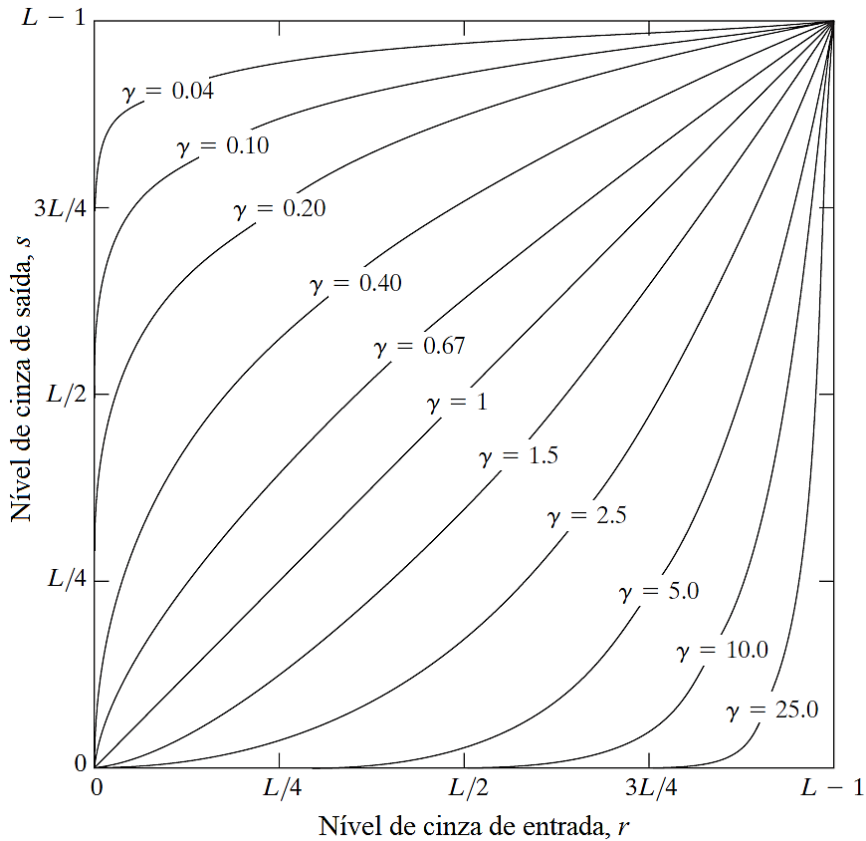
A imagem negativa pode ser uma boa alternativa para exibição da imagem da junta ao operador, principalmente para composição de relatórios técnicos ou de documentação para rastreabilidade da imagem. A Equação 4.1 demonstra como é feita a transformação para imagem negativa, sendo r o valor de entrada do pixel e s o valor de saída deste, com L representando a quantização (níveis de cinza) da imagem original.

$$s = L - 1 - r \quad 4.1$$

Além disso, arranjos que tenham baixa potência no emissor da linha laser, aliado a alta corrente de soldagem, tendem a apresentar as informações de laser e ruído de fundo muito próximas. Neste caso, a transformação do tipo antilogarítmica (logarítmica inversa) expande os níveis de cinza para representar os pixels de alta luminosidade com maior distância de valores entre si, o que pode facilitar a identificação correta da linha laser. A exemplo desta transformação, porém com maior liberdade para ajuste da faixa de expansão dos níveis de cinza, estão as transformações por *Power-Law* (em determinada potência).

A Figura 4.11 traz uma representação das transformações em potência para diferentes valores de γ , com c igual a 1 em todos os casos. Não por acaso, γ representa essa variável já que este tipo de transformação faz uma alteração direta de “gamma” na imagem. Geralmente utilizada apenas para exibição, esta transformação pode ser bastante útil no caso específico citado. A Equação 4.2 descreve a transformação em potência.

Figura 4.11 – Transformações em potência para ajuste dos níveis de cinza.



Fonte: Adaptado de [72].

$$s = c \cdot r^\gamma \quad 4.2$$

Os autores Liangyu *et al.* [76] utilizam um tipo diferente de transformada para pré-processamento, para correção do contraste da imagem. Este algoritmo de intensidade de imagem está representado na Equação 4.3, sendo k e m constantes definidas com base nas Equações 4.4 e 4.5, respectivamente, onde $f(x,y)$ é a imagem de entrada e $g(x,y)$ a processada. Os autores recomendam utilizar $g(x,y)_{\max} = 255$ e $g(x,y)_{\min} = 0$ para o melhor resultado.

$$g(x, y) = k \cdot f(x, y) - m \quad 4.3$$

$$k = [g(x, y)_{\text{máx}} - g(x, y)_{\text{mín}}] / [f(x, y)_{\text{máx}} - f(x, y)_{\text{mín}}] \quad 4.4$$

$$m = k \cdot f(x, y)_{\text{mín}} \quad 4.5$$

4.3.2 Binarização

Binarização é uma das técnicas mais básicas para processamento de imagens. O método de binarização converte uma imagem, inicialmente em escala de cinza (0 a 255 níveis) em uma imagem em preto e branco (0 ou 1, equivalente a 0 ou 255) [79] [77]. Esta técnica, assim como a anterior, também trabalha no domínio do valor, não considerando o fator de vizinhança na realização da troca de valores dos pixels, apesar de utilizar o valor médio, o histograma ou mesmo a variância dos níveis de cinza da imagem para definir o parâmetro de atuação.

Nesta técnica, o ponto principal é escolher o valor T apropriado de *threshold* (limiar). Partindo deste valor T , todo pixel da imagem $f(i, j)$ que contiver informação abaixo desse nível recebe valor igual a 0 na nova imagem, $g(i, j)$, assim como os pixels que tenham valor igual ou maior recebem valor igual a 1, conforme a Equação 4.6 [80] [77]. O valor de T pode ser baseado na distribuição estatística de valores da imagem, o que pode ser uma tarefa difícil em situações onde há variação de contraste e iluminação [79].

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(x, y) \geq T \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad 4.6$$

Uma imagem binarizada de alta qualidade pode fornecer maior precisão no reconhecimento de caracteres ou nuances específicas da cena em comparação com a imagem original, devido a presença de ruído nesta última. Os algoritmos são divididos em duas categorias: binarização global, onde é utilizado um único valor de limiar para toda a imagem e binarização local, onde o limiar é calculado pixel a pixel ou em regiões [76].

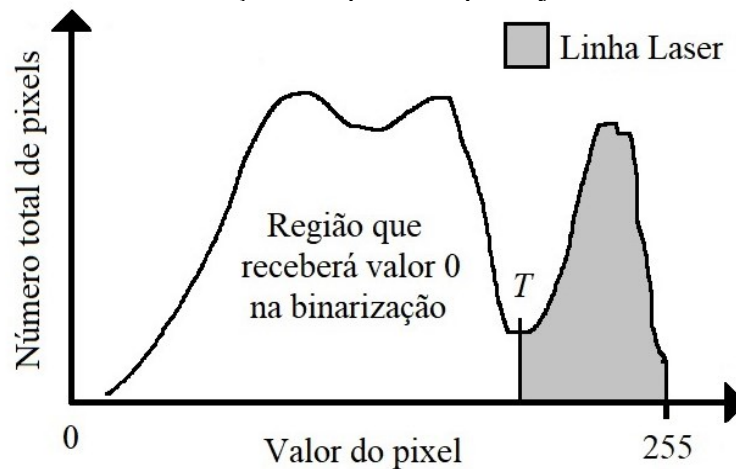
Na biblioteca *OpenCV* versão 4.3.0, o comando para realizar uma operação de binarização é “THRESH_BINARY”, sendo necessário fornecer um valor para o limiar ou utilizar algum método especial para determinação deste valor, como os algoritmos de Otsu [81] e Niblack [82], por exemplo. A documentação *online* da *OpenCV* 4.3.0 [80] e os trabalhos de

Puneet e Garg [79] e Khurshid *et al.* [82] são boas fontes bibliográficas para melhor entendimento das técnicas de binarização.

Aplicada ao processamento de imagens para STL, a binarização é uma técnica que pode ser usada para destacar a linha laser da imagem original, tendo melhor efeito quando há grande presença de ruídos de fundo, como reflexo do arco na superfície da chapa ou produção excessiva de salpicos grosseiros provenientes da soldagem. Em alguns casos específicos, a binarização é capaz de segmentar a imagem, deixando apenas os reflexos da linha laser [77].

Os autores Liangyu *et al.* [76] propõe um método para cálculo automático do valor de T , no qual analisa-se o histograma da imagem para obtenção do valor, similar ao representado na Figura 4.12. Assim, a busca pelo valor de T parte da direita para a esquerda no eixo das abscissas (valor do pixel), ou seja, do valor 255 para o 0, passando pelo primeiro pico até encontrar o meio do primeiro vale, que definirá o valor de T . Para que funcione, esse método necessita de uma diferença significativa entre os níveis de luminosidade da linha laser e do restante da imagem, situação nem sempre possível.

Figura 4.12 – Transformações em potência para ajuste dos níveis de cinza.



Fonte: Adaptado de [76].

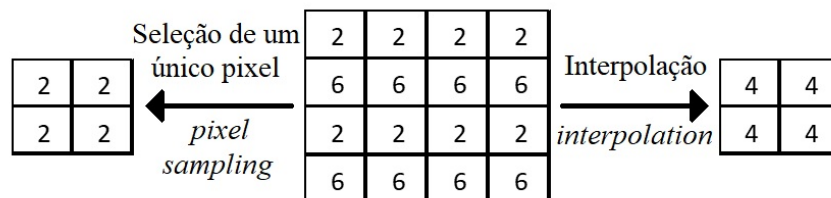
4.3.3 Zoom

As operações de *zoom in* (aumento, aproximação) ou de *zoom out* (diminuição, afastamento) são operações utilizadas para modificar a sensibilidade da imagem. Uma maneira fácil de visualizar o funcionamento de ambas as operações é imaginar uma máscara quadriculada posicionada sobre a imagem que se deseja alternar, sendo essa máscara do mesmo tamanho da imagem, mas com diferente densidade de pixels [72]. Se for ampliação, a máscara

terá os quadrados (pixels) menores do que os da imagem, sendo atribuído um valor para cada pixel da nova imagem com base na imagem original; se for diminuição, a máscara terá pixels maiores do que a imagem original. Após definir os valores para cada pixel de saída, a imagem de saída é então escalonada, de forma que os pixels da nova imagem tenham o mesmo tamanho dos pixels da imagem original.

A diminuição da imagem pode ser realizada pela simples eliminação de pixels específicos da imagem (*pixel sampling*, *block averaging* ou interpolação), tomando o cuidado para que seja mantida uma simetria entre os pixels restantes, de modo a não deformar a imagem [78]. Esta operação, obviamente, reduz a quantidade de informação disponível na imagem original. Dessa forma, não é aconselhável sua utilização, a não ser em casos extremos onde o tamanho da imagem é um fator crítico para o tempo de processamento e não há possibilidade de definição de uma *ROI* (*Region of Interest* – região de interesse). Para evitar efeitos de *aliasing* (serrilhado na imagem), recomenda-se aplicação de *blurring* (desfoque da imagem) antes do encolhimento da imagem [78]. A Figura 4.13 apresenta duas operações de redução de imagem, sendo a imagem da esquerda resultado do *pixel sampling* e a da direita produzida pelo método da interpolação linear com os pixels vizinhos.

Figura 4.13 – Operação de *zoom out* por *pixel sampling* (esquerda) e interpolação (direita).



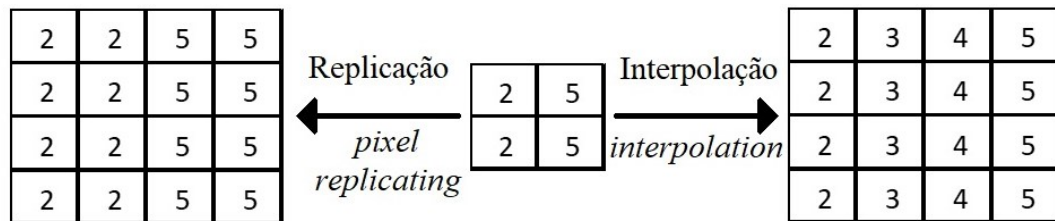
Fonte: Adaptado de [83]

A ampliação de uma imagem, por sua vez, consiste em criar novos pixels e atribuir valores, na escala de cinza, a estes. Uma vez que não é possível criar pixels com novas informações, diretas da cena original (a imagem já foi capturada, então não é possível obter novos dados da cena previamente registrada), alguns métodos para alocação de valores aos novos pixels são considerados. O valor pode ser uma cópia do valor do pixel mais próximo (*pixel replication*), uma média entre os valores dos pixels vizinhos (*block averaging*) ou até uma interpolação entre os valores vizinhos [78] [72]. Existem também métodos mais avançados, como a interpolação bilinear, que tende a produzir imagens com menos efeito de

tabuleiro de xadrez (efeito de quadriculado entre os pixels), conforme o trabalho de Gonzales e Woods [72].

O método de *pixel replication* (cópia de pixels) pode ser utilizado quando se quer aumentar a imagem por uma razão fixa, sendo considerado um caso específico do método da interpolação para ampliação de imagens [72]. Os métodos de *block averaging* (média com valores dos vizinhos) e *interpolation* (interpolação com valores dos vizinhos) são bastante parecidos, mudando apenas a operação realizada, conforme o nome de cada um indica. Na Figura 4.14 estão representadas duas operações de ampliação de imagem, sendo a imagem da esquerda resultado do *pixel replication* e a da direita produzida pelo método da interpolação linear com os pixels vizinhos.

Figura 4.14 – Operação de *zoom in* por *pixel replication* (esquerda) e interpolação (direita).



Fonte: Adaptado de [83]

4.3.4 Definição de região de interesse *ROI*

Muitas vezes o desenvolvedor se depara com alto tempo de processamento de suas imagens, fator que pode ser bastante impactado pelo tamanho das imagens analisadas. Com o avanço dos sensores de imagem nas últimas décadas, cada vez a capacidade de amostragem destes sensores tem sido aumentada, produzindo imagens com alta densidade de pixels e grande número total de pixels.

Uma vez que os métodos de *zoom out*, ou redução da imagem, acabam acrescentando deformações ou perda de informações da imagem original, não são alternativas interessantes para melhorar o desempenho computacional das operações com estas imagens.

Caso possível, é interessante que o desenvolvedor opte por métodos que preservem a informação original da imagem, reduzindo apenas a área analisada da imagem para uma área mínima que contenha, provavelmente, os elementos a serem medidos nas etapas futuras do processamento.

Para tanto, existe a técnica da definição da *ROI* (*Region of Interest*), a região de interesse que será analisada da imagem. Existem diferentes métodos para delimitação da *ROI*, que precisa ser definida em tamanho e localização.

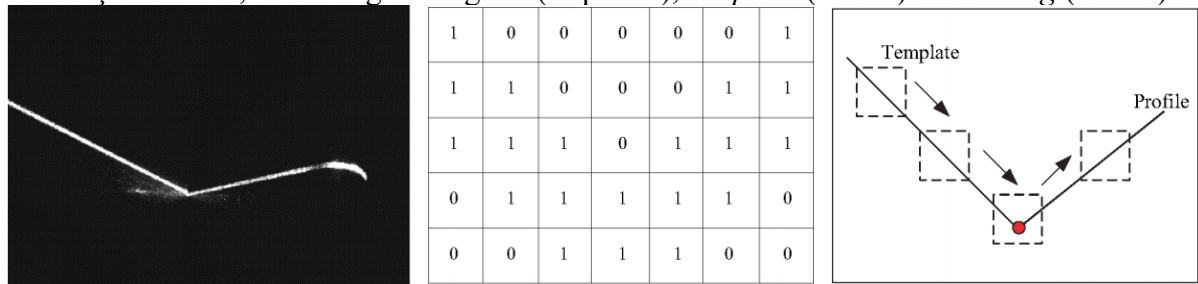
Para os STL, que trabalham geralmente com um tamanho de junta padrão durante a mesma medição, o tamanho fixo da *ROI* pode ser uma facilidade para a implementação e não apresentar grande diferença de otimização em relação às técnicas de tamanho dinâmico. As maneiras de se determinar o tamanho da *ROI* são: manualmente (pelo usuário), com base no perfil da primeira imagem analisada, automaticamente por métodos diversos (sem considerar quaisquer imagens anteriores). Apesar de sua simplicidade, a estratégia de seleção manual é uma boa alternativa, sempre com base no conhecimento da geometria esperada para a junta a ser medida [84]

Da mesma forma, a localização da *ROI* também pode ser determinada com métodos semelhantes: manualmente, com base no perfil da primeira imagem analisada, com base no perfil da última imagem analisada e automaticamente por métodos diversos (sem considerar as imagens anteriores).

Os autores Zhang *et al.* [77] utilizaram a transformada de Radon [85] ao longo das direções horizontal (alinhada à superfície da chapa) e vertical para determinar os valores de máximo (coincidentes com a linha laser), que determinaram o centro da *ROI*. O tamanho da *ROI*, segundo os mesmos autores, varia conforme a aplicação, sendo modificado pelo usuário para atender a cada caso específico (tipo e geometria esperada de junta).

No trabalho de Fang *et al.* [31], os autores utilizam uma estratégia bastante inteligente para a determinação da *ROI*: o *software* utiliza uma rotina singular na primeira imagem, utilizando comparação com um *template* (modelo) para localizar a junta e, então, definir o tamanho da *ROI* com base nessa primeira imagem. A localização da *ROI*, no entanto, segue o centro do perfil encontrado na última medição realizada, melhorando o posicionamento da *ROI*. A Figura 4.15 mostra o processamento, da primeira imagem, no trabalho em questão.

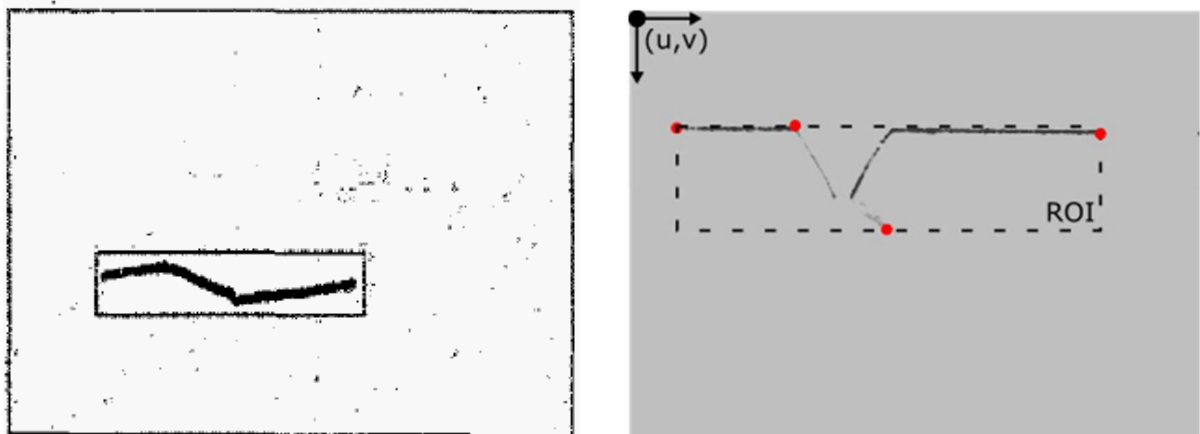
Figura 4.15 – Processamento da primeira imagem por comparação com *template* para definição da *ROI*, com imagem original (esquerda), *template* (centro) e *matching* (direita).



Fonte: [31].

Outro método que pode ser utilizado para automatizar a definição do tamanho e da localização da *ROI* é a análise do nível de luminosidade coluna a coluna e linha a linha na imagem. Uma vez que a linha laser tende a ser o objeto de maior luminosidade retratado nas imagens do STL, tal análise consegue identificar e selecionar a região onde está localizado o chanfro na imagem, utilizando um critério de nível mínimo de intensidade do pixel para verificação dos pontos pertencentes à linha laser [86]. Assim, mesmo que influenciada por alguns ruídos de maior intensidade, a definição da *ROI* excluirá grande parte da imagem que não acrescenta ao processamento e terá grande chance de incluir toda a linha laser, não comprometendo a medição da junta naquela imagem [8]. A Figura 4.16 demonstra duas aplicações deste tipo de técnica.

Figura 4.16 – Definição da *ROI* com base na análise linha a linha e coluna a coluna.



Fonte: [86] (esquerda) e [8] (direita).

4.3.5 Morfologia matemática

Além dos métodos citados anteriormente, outros tipos de ajustes iniciais que podem ser realizados nas imagens se dão por ferramentas envolvendo morfologia matemática. Essas ferramentas são baseadas em operadores matriciais bidimensionais de dimensões ímpares (3x3, 5x5, 7x7 etc.), denominados de elemento estruturante, máscara, filtro ou *kernel*.

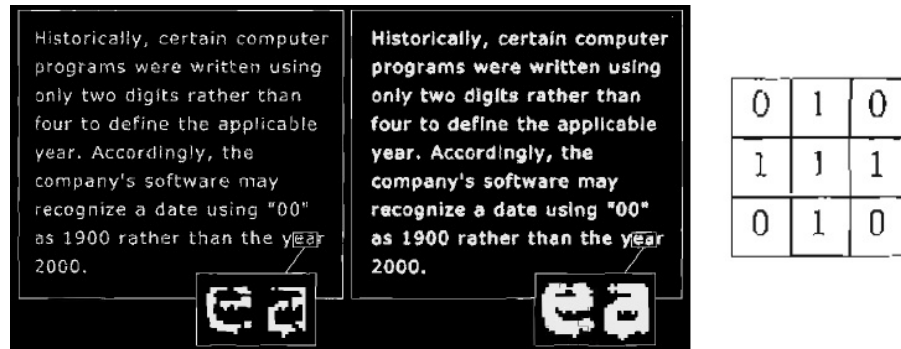
As operações matemáticas entre os elementos estruturantes e as imagens, matematicamente, são operações entre duas matrizes. Estas operações são chamadas de convolução, sendo que a matriz estruturante, ou a matriz de convolução, representa a função matemática que se quer aplicar sobre a imagem. Essa função é aplicada sobre cada pixel da imagem e sua vizinhança imediata, de acordo com a operação especificada, gerando uma nova imagem que reflete a relação da imagem original com a função matemática dada pela matriz. A diferença básica entre a convolução genérica e a morfologia matemática, é que na última a forma do elemento estruturante terá impacto sobre o resultado [73].

O processamento de imagens provenientes de STL pode se beneficiar bastante com esse tipo de técnica. Alguns tipos de elementos estruturantes podem ser customizados e executar operações que ajudam a melhorar a forma da linha laser na imagem, de modo que a mesma apresente menos pontos de baixa intensidade luminosa ou mesmo desencontro de segmentos. Estes elementos estão associados a operação de fechamento, que é uma combinação das operações de dilatação e erosão [71].

Geralmente estas operações são realizadas após a binarização da imagem. Para melhor entendimento, considerar o objeto de interesse sempre representado em nível claro (igual a 1).

A dilatação consiste na expansão dos objetos de alta luminosidade na cena, propagando o contorno dos objetos para regiões mais escuras da imagem. Assim, essa técnica eleva o nível médio de luminosidade da imagem e tende a fundir contornos de objetos próximos. Este tipo de técnica pode ser realizado múltiplas vezes em sequência, uma vez que cada iteração propaga um pixel claro para a vizinhança de 1 pixel somente. A dilatação pode ser considerada uma operação lógica do tipo OR (ou) [71] [73]. Em imagens onde a linha laser aparece muito apagada ou muito fina, é uma ferramenta muito útil. A Figura 4.17 exemplifica o funcionamento da dilatação para processamento de imagens de textos, assim como seu elemento estruturante.

Figura 4.17 – Dilatação aplicada ao processamento de textos e elemento estruturante.



Fonte: Adaptado de [72].

A erosão é basicamente o processo inverso da dilatação. Assim, na erosão os pixels pretos avançam sobre os brancos nos contornos dos objetos, diminuindo o nível médio de luminosidade da imagem. Assim como no caso da dilatação, a operação de erosão pode ser realizada múltiplas vezes. Dependendo do tipo de elemento estruturante adotado, é uma boa medida para reduzir um pouco a espessura da linha laser (se a mesma estiver muito grossa na imagem) ou mesmo reduzir os riscos provocados por respingos na imagem.

A Figura 4.18 apresenta alguns tipos de *kernels* para a operações de dilatação e erosão, onde o *kernel* a considera todos os pixels vizinhos que tocam o pixel considerado e o *kernel* b considera apenas os pixels adjacentes ortogonais.

Figura 4.18 – Operações de erosão e dilatação e exemplos de *kernels*.

	<table><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table> Kernel a	1	1	1	1	0	1	1	1	1	<table><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr></table> Kernel b	0	1	0	1	0	1	0	1	0										
1	1	1																												
1	0	1																												
1	1	1																												
0	1	0																												
1	0	1																												
0	1	0																												
Erosão (AND)	<table><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr></table> Original	0	0	1	0	0	0	1	0	0	<table><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr></table> $G(f) = f \cap a$	0	0	1	0	1	0	1	0	0	<table><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr></table> $G(f) = f \cap b$	0	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	1																												
0	0	0																												
1	0	0																												
0	0	1																												
0	1	0																												
1	0	0																												
0	0	1																												
0	0	0																												
1	0	0																												
Dilatação (OR)	<table><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table> Original	1	1	1	1	0	1	1	1	1	<table><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table> $G(f) = f \cap a$	1	1	1	1	0	1	1	1	1	<table><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table> $G(f) = f \cap b$	1	1	1	1	0	1	1	1	1
1	1	1																												
1	0	1																												
1	1	1																												
1	1	1																												
1	0	1																												
1	1	1																												
1	1	1																												
1	0	1																												
1	1	1																												

Fonte: Adaptado de [71].

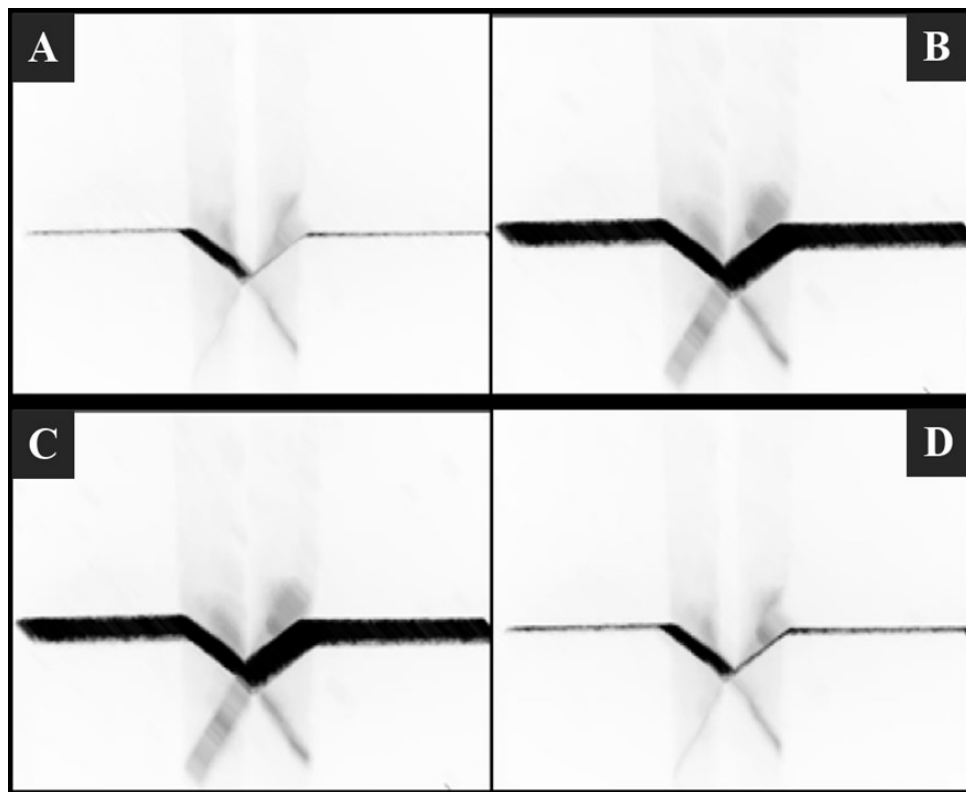
Além dos dois operadores elementares, erosão e dilatação, temos duas combinações clássicas destes: abertura e fechamento.

A abertura é uma operação morfológica onde uma imagem é erodida por um elemento estruturante e, em seguida, dilatada por um segundo operador, que pode ser igual ou diferente ao primeiro [71] [72]. A abertura elimina pequenos objetos na imagem e suaviza o contorno dos maiores. Pode ser utilizada para eliminação de respingos menores, principalmente se o elemento estruturante tiver uma direção de atuação que não prejudique a linha laser na imagem, porém geralmente seu efeito para imagens de STL não é muito útil.

O fechamento, por sua vez, utiliza a combinação inversa, primeiro com a dilatação, seguida da erosão da imagem dilatada. Esta operação fecha pequenos buracos nos objetos e conecta componentes. Desse modo, é uma excelente ferramenta para melhorar a qualidade da linha laser na imagem capturada pelo STL.

Os autores Lee *et al.* [87] realizaram processamento de imagens com estes quatro operadores, representados na Figura 4.19 (as imagens foram invertidas para facilitar a visualização). Os autores concluíram que o fechamento é o mais eficaz para imagens de STL.

Figura 4.19 – Operações de erosão (A), dilatação (B), abertura (C) e fechamento (D).



Fonte: Adaptado de [87].

4.4 FILTRAGEM

Após o ajuste na exibição da imagem, são tomadas as primeiras ações para eliminar da cena os ruídos ou artefatos indesejados quaisquer. A filtragem, por remover elementos da cena, acaba indiretamente afetando a qualidade da imagem do mensurando, devendo o pesquisador julgar com critério os prós e contras de cada algoritmo de filtragem.

Os filtros são basicamente divididos em dois grupos: filtros no domínio real (espaço) e filtros no domínio da frequência. Entre os primeiros, destacam-se os filtros de média móvel (*smoothing*) e detectores de bordas. No domínio da frequência se destaca a filtragem com uso da transformada da Fourier e filtros simples como passa-baixa ou passa-faixa ou customizados.

A técnica de subtração entre imagens consecutivas do STL, partindo do princípio que a movimentação da junta é mínima entre uma imagem e outra (alta frequência de aquisição) e que a dos respingos é grande, teoricamente resolveria todos os problemas de filtragem de imagens de STL, conforme proposto por Haug e Pritschow [88]. Na prática, além de não ser aplicável a maioria das soldagens com oscilação da tocha (tecimento), salvo em casos de equipamento com eixos independentes para a tocha e o sensor, o método também não desempenha de acordo mesmo em condições “visualmente ideais”, uma vez que o perfil da linha laser é fino e a rigidez dos manipuladores pode causar oscilação constante da linha.

O filtro de Wiener [89], conhecido também como filtro dos mínimos quadrados médios ou filtro de mínimo erro quadrático [72], não é muito interessante para aplicações com imagens de STL, a não ser em casos onde as imagens sejam produzidas com um grau excessivo de corrupção dos dados. Nesses casos, seria interessante uma revisão ou substituição dos componentes ópticos para conjuntos em melhores condições ou mais adequados à aplicação específica. Caso haja impossibilidade da substituição, este filtro pode ser uma boa alternativa.

4.4.1 Filtros no domínio real

São filtros que atuam diretamente sobre o valor dos pixels da imagem filtrada. Dentre eles, os mais comuns são os filtros passa-baixa, como média simples, média ponderada, mediana, filtros passa-alta, como o *sharpening* (agudização) e filtros para detecção de bordas. Alguns autores [73] [72] [75] [84] incluem os operadores morfológicos aqui, porém estes já foram alocados ao item 4.3.5 deste trabalho por serem considerados mais importantes para a

exibição da imagem, pelo tratamento na forma dos objetos, do que para a filtragem propriamente dita.

Devido aos ruídos oriundos do arco elétrico, poeira e respingos, existem muitos pontos de ruído independentes na imagem original do chanfro, o que afeta seriamente o pós-processamento da imagem. Portanto, o processo de filtragem para suavização do sinal geralmente é necessário. Alguns filtros passa-baixa tornam obscuros os pontos nítidos; desta maneira, a filtragem média é adotada para proteger a borda da imagem ao remover os ruídos. O princípio básico da filtragem de média é alterar o valor de cada pixel para o valor médio de todos os pixels vizinhos a esse pixel [76] [77]. Este tipo de filtro é especialmente eficaz contra ruídos do tipo *speckle* [75] [90]. A Figura 4.20 traz dois exemplos de filtros de média, sendo o da direita uma média ponderada, ambos filtros do tipo *smoothing*.

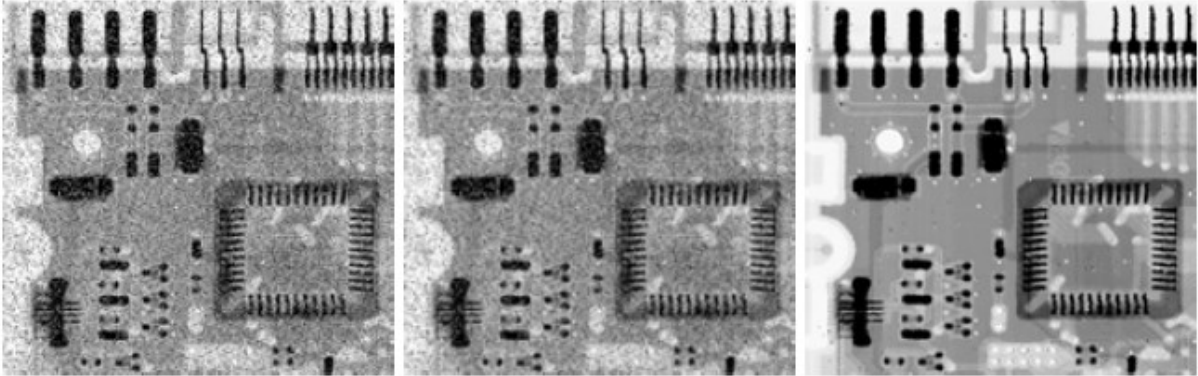
Figura 4.20 – Duas máscaras 3x3 de filtros de média, sendo que as constantes multiplicando as máscaras são iguais a soma dos valores dos coeficientes do filtro, para cálculo da média.

$$\frac{1}{9} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \quad \frac{1}{16} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 2 & 4 & 2 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Fonte: [72].

Outro filtro que pode ser utilizado no processamento de imagens é o filtro de mediana [61]. Neste, o conjunto de pixels vizinhos e o pixel alvo são ordenados, sendo que o valor deste pixel é então substituído pela mediana dos níveis de cinza dos pixels considerados. Esse tipo de filtro é particularmente efetivo para remover ruídos do tipo impulso e também do tipo *salt-and-pepper*. (ruído de sal e pimenta, caracterizados por vários pixels pretos e brancos espalhados aleatoriamente na imagem) [72]. Esse tipo de filtro, para os STL, pode ser uma ótima ferramenta quando é necessário utilizar ganho digital no sensor de imagem ou em situações de soldagem com alimentação de pó metálico. A Figura 4.21 demonstra a capacidade de tal filtro.

Figura 4.21 – Filtragem com mediana, com imagem original (esquerda), filtro de média com máscara 3x3 (centro) e filtro mediana 3x3 (direita).

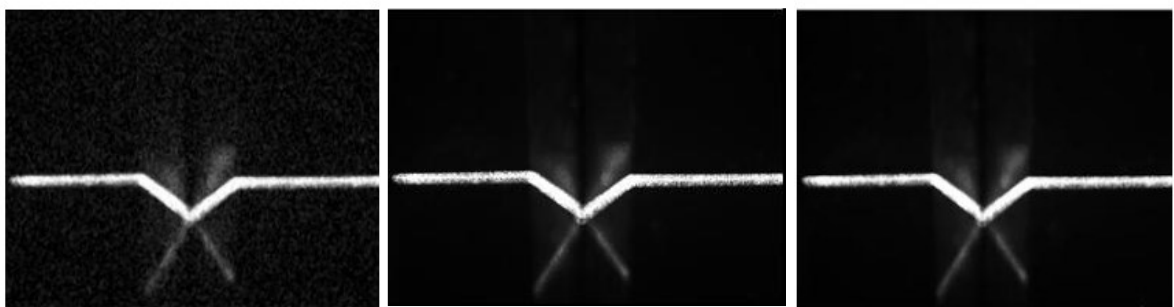


Fonte: [72] apud Joseph E. Pascente, Lixi, Inc.

O filtro de *sharpening*, tem efeito contrário ao filtro de média; enquanto no primeiro os detalhes finos são destacados, no segundo eles são apagados (borrados) [71]. Por essa característica, o filtro *sharpening* não é muito utilizado para processamento de imagens de STL, apesar de ser muito utilizado no processamento de imagens em geral.

O filtro Gaussiano, outro comumente utilizado para processamento de imagens em geral, também não é muito útil no processamento para STL. Este filtro atenua muito as altas frequências, causando perda de informação crucial para medição de posição do chanfro, apesar de ser utilizado por alguns pesquisadores [84] [91] [92]. A Figura 4.22 possibilita a comparação do resultado de filtragem com o Gaussiano (esquerda) com o do filtro de mediana (direita).

Figura 4.22 – Filtragem Gaussiana, imagem original e mediana, respectivamente.



Fonte: Adaptado de [87]

Dentre os detectores de bordas, é interessante destacar alguns, como os algoritmos de Sobel e Canny (normal e *Improved Canny*) [8] [72]. O operador de Sobel detecta magnitude de gradientes (máximos locais) e direção para a detecção das bordas, sendo o método básico composto por 4 etapas: filtragem (*kernels* na Figura 4.32), cálculo do gradiente total (Equação

4.7), cálculo da direção do gradiente (Equação 4.8) e cálculo da magnitude do gradiente (Equação 4.9) [71] [93].

Figura 4.23 – Exemplo de *kernels* derivativos para operador de Sobel

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Fonte: Adaptado de [71].

$$G_v = |S_x| + |S_y| \quad 4.7$$

$$\text{theta} = \text{ATAN}(S_x/S_y) \quad 4.8$$

$$G_m = \sqrt{S_y^2 + S_x^2} \quad 4.9$$

Existem variações de tamanho e tipo dos *kernels* que podem ser utilizados com o detector de bordas de Sobel, contanto que os valores se cancelem e a soma dos mesmos resulte em zero. Exemplos destes *kernels* estão retratados na Figura 4.24.

Figura 4.24 – Exemplos de *kernels* alternativos para operador de Sobel

$$\begin{pmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{pmatrix} \text{Scharf}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \text{Prewitt}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} .5 & 1 & .5 \\ 1 & -6 & 1 \\ .5 & 1 & .5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -2 & 1 & -2 \\ 1 & 4 & 1 \\ -2 & 1 & -2 \end{pmatrix} \text{Laplacians}$$

$$\begin{pmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 5 & -3 & 5 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{pmatrix} \text{Kirsch Compass}$$

$$\begin{pmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{pmatrix} \text{Kirsch Compass}$$

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{pmatrix} \text{Robinson Compass}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} \text{Robinson Compass}$$

Fonte: Adaptado de [71].

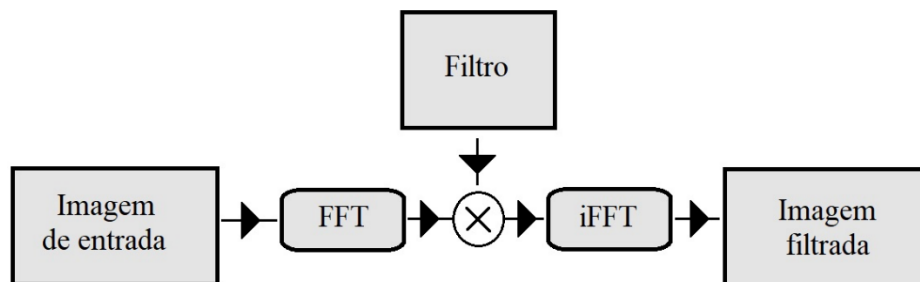
O detector de bordas de Canny [94] também opera de maneira similar ao Sobel, com adição de 4 passos de pós-processamento para limpar mais as bordas. As 4 etapas para o detector de Canny são: filtragem Gaussiana para efeito de *blur*, filtragem bidirecional com filtros Sobel (Figura 4.23), limiar para supressão de valores não-máximos na direção do gradiente para deixar em 0 os pixels que não pertencem às bordas e *thresholding* de histerese em uma faixa do gradiente de direção para eliminar efeitos de *aliasing* e *outliers* [71] [80].

4.4.2 Filtros no domínio da frequência

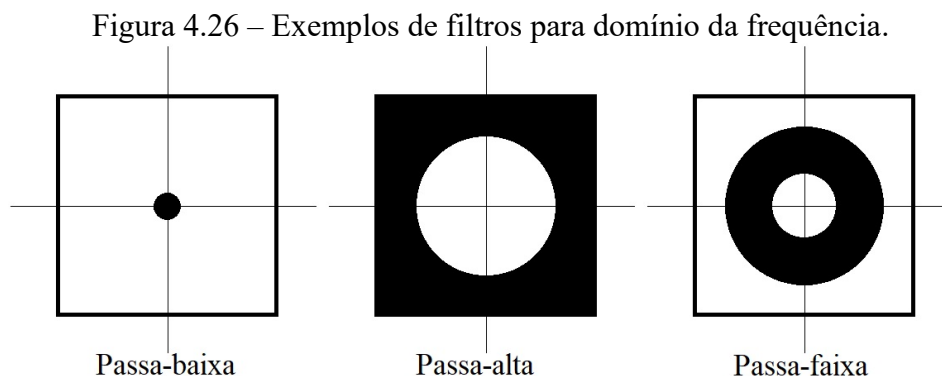
Estes filtros trabalham no espectro de frequência da imagem analisada, sendo necessário primeiro traduzir uma imagem em níveis de cinza para aplicação destes filtros, o que é geralmente feito por uma transformada rápida de Fourier. A transformada mais utilizada é do tipo *DFT* (*Discrete Fourier Transform*, ou transformada discreta de Fourier) e o algoritmo para cálculo desta mais utilizado é o de *FFT* (*Fast Fourier Transform*), pelo ganho computacional na tarefa [73] [72] [71] [80]. A transformada simplesmente modifica a exibição da imagem para sua representação no domínio da frequência. No *OpenCV*, a transformada é calculada mais rapidamente se o tamanho da imagem transformada for uma potência de 2, porém as linhas ou colunas com tamanhos múltiplos de 2, 3 e 5 também são calculadas com boa eficiência [80].

Após a aplicação desta transformação, que inclusive pode ser realizada apenas em uma direção da imagem (horizontal ou vertical), são aplicados alguns filtros, que basicamente excluem algumas frequências presentes na imagem. Finalmente, depois de filtrada, uma transformada inversa é aplicada (*iFFT*), de modo que a imagem filtrada seja novamente representada no domínio real. A Figura 4.25 exemplifica o funcionamento deste processo todo.

Figura 4.25 – Fluxograma da filtragem no domínio da frequência.



Entes os principais filtros, estão os de passa-baixa, passa-alta e passa-faixa, estando estes representados na Figura 4.26, respectivamente.



4.5 SEGMENTAÇÃO

O primeiro conjunto de ações tomadas no tratamento das imagens capturadas pelo STL é geralmente todo voltado para melhorar a segmentação. A segmentação consiste na divisão da imagem em regiões ou categorias, para classificação em diferentes objetos ou partes de objetos [78]. Desse modo, algoritmos diversos são utilizados para “limpar” a imagem, separando os objetos de interesse e facilitando o reconhecimento da linha laser e dos pontos de interesse nos passos futuros [72].

Alguns desses algoritmos mais utilizados no processamento de imagens de STL são as diferentes técnicas de *thresholding* [8] [95] [86], operadores morfológicos (já abordados no item 4.3.5 deste trabalho) combinados a outras técnicas de filtragem (item 4.4) e ajuste de níveis de cinza (item 4.3.1) e operadores para detecção de bordas (item 4.4.1).

Os operadores para detecção de bordas, que para processamentos em geral são considerados mais para segmentadores do que para filtros [72] [71], têm seu comportamento tendendo mais para filtragem no processamento de imagens de STL. Isso se deve, principalmente, ao uso de imagens binarizadas ou na presença de ruídos de alta luminosidade que atravessem a linha laser na imagem, fatores que limitam o desempenho destes algoritmos como segmentadores.

O mapa de distância Euclidiana é, basicamente, a representação de uma imagem binarizada em tons de cinza referentes à distância de cada pixel do pixel de plano de fundo (zero) mais próximo [71]. Mapas de distância Euclidiana não são muito úteis para segmentação de imagens produzidas com STL, uma vez que os perfis a serem segmentados e mantidos

(reflexos da linha laser sobre a peça) são esbeltos (finos), o que diminui muito a atuação deste tipo de técnica para este fim. Esta técnica tem comportamento similar ao operador de erosão (item 4.3.5) [71]. Todavia, as distâncias Euclidianas são a base para outros métodos, como o de correlação de padrões (*matching*, item 4.7.2) [72].

As técnicas de segmentação por textura também não são muito úteis, uma vez que os filtros instalados no conjunto de lentes de captação dos STL, em conjunto com sensores de imagem de baixa resolução, muitas vezes não propiciam informação suficiente para essas técnicas desempenharem satisfatoriamente. Além dessas, segmentação por cores também não é viável para a maioria dos STL, já que utilizam sensores monocromáticos.

A técnica de esqueletização (*skeletonizing*, *thinning*) [96] não é muito utilizada para o processamento de imagens de STL pois, além do relativo alto custo computacional, ela não consegue separar os ruídos que cruzam a linha laser, apenas os afina. Apesar disso, Xu *et al.* [86] relatam bom proveito desta técnica, combinada com filtragem e binarização anteriores e transformadas de Hotelling e Hough na sequência. Esta técnica pode ser utilizada depois de uma operação de fechamento (item 4.3.5) para evitar que ocorra falta de continuidade e deformação no perfil da linha laser.

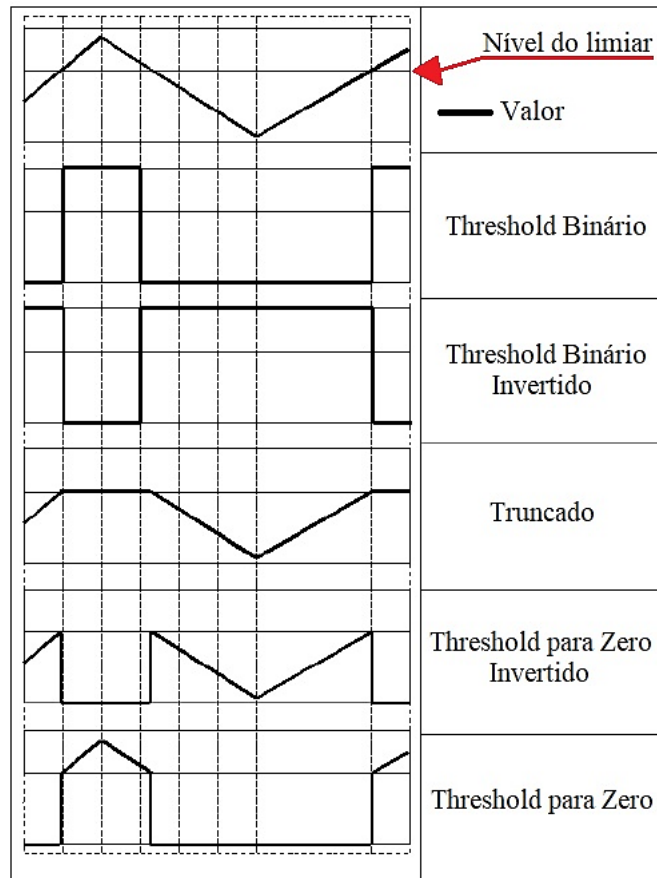
Sobre os métodos de *thresholding* (limiar), existem vários trabalhos com aplicação específica destes para segmentação de imagens de STL [8] [86] [95] [87] [86], que são basicamente divididos em globais e locais [71].

4.5.1 *Threshold*

O *threshold* global atua na imagem inteira de uma só vez, sendo uma boa alternativa para o início do processamento de imagens inclusive, quando aplicado com efeito sutil [71]. Desse modo, são removidos os ruídos de fundo mais brandos, o que facilita o uso dos demais filtros e algoritmos. Os tipos locais utilizam métricas específicas para tratar grupos de pixels separadamente, considerando ou não o restante da imagem para cada grupo. O uso de métodos estatísticos e adaptativos é comum no processamento de imagens em geral [97] [71] [72].

Na biblioteca *OpenCV* 4.3.0 [80], é possível encontrar a documentação acerca de diferentes métodos de *thresholding* disponíveis, além do método de Otsu, que é bastante utilizado para processamento de imagens se STL [75]. A Figura 4.27 demonstra a resposta de alguns destes algoritmos implementados na biblioteca.

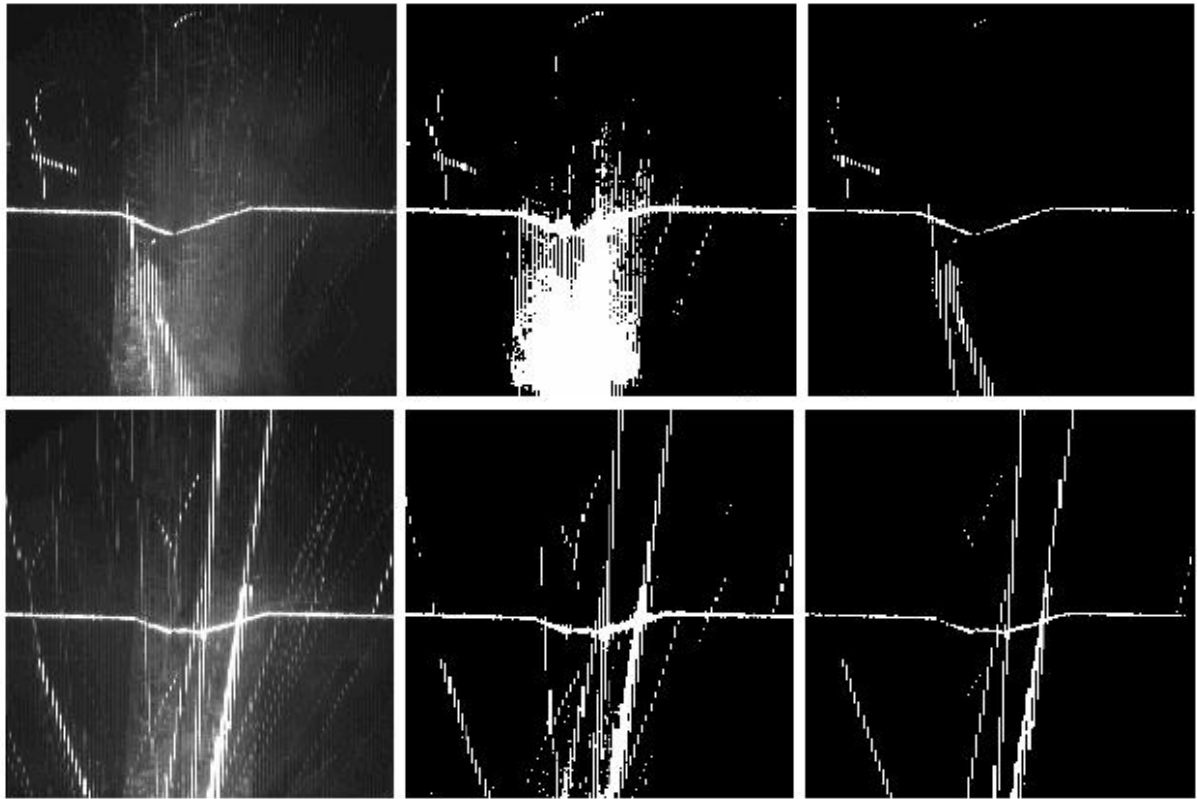
Figura 4.27 – Exemplos de diferentes tipos de *threshold* (limiar) disponíveis na *OpenCV*.



Fonte: Adaptado de [80].

Os autores Shi *et al.* [95] utilizaram o método de *thresholding* de Otsu [81], também com uma versão melhorada deste, para segmentação de imagens com diferentes níveis de ruídos. A Figura 4.28 ilustra o resultado obtidos pelos autores, onde fica evidente a grande capacidade de filtragem e segmentação do algoritmo melhorado de Otsu. Além destes, mais autores utilizam variações do método de Otsu para segmentação [87] [98].

Figura 4.28 – Segmentação das imagens originais (esquerda) com algoritmo de Otsu (centro) e Otsu melhorado (direita).



Fonte: [95].

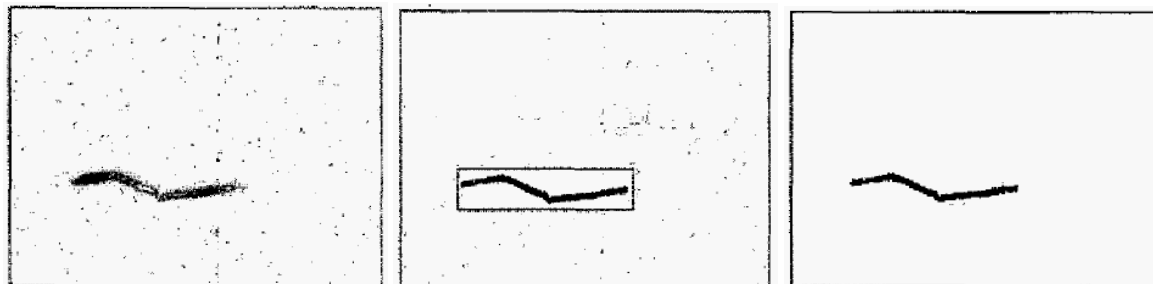
Apesar de serem bastante utilizados para segmentação de imagens de STL, os métodos de *threshold* globais podem apresentar desempenho insatisfatório quando são processadas imagens com grande variação de luminosidade, situação possível de ocorrer nas imagens de STL [99]. Desse modo, técnicas que abordam separadamente regiões menores da imagem são ideais para este tipo de aplicação.

4.5.2 *Threshold* adaptativo

No trabalho de Xu *et al.* [86], uma técnica de *threshold* que leva em conta o nível de cinza médio do fundo, associada a uma técnica de *ROI*, segmenta diretamente a imagem, deixando somente a linha laser em destaque e eventuais ruídos próximos à linha, conforme demonstrado na Figura 4.29. Apesar de ser muito eficiente para esse caso específico, esse método requer uma baixa presença de ruídos, principalmente na região da vizinhança da linha laser, além de uma significativa diferença entre o nível de cinza da linha laser, que deve ser

muito alto, com o dos ruídos de fundo. Desse modo, para imagens como as da Figura 4.28, este método não apresentaria bons resultados.

Figura 4.29 – Segmentação da imagem original (esquerda) por *thresholding* associado a *ROI* (centro) e seu resultado final (direita).



Fonte: [86].

O autor Puhl [8], desenvolvedor do primeiro STL do LABSOLDA, adota o mesmo método dos autores Xu *et al.* [86] para filtragem: *threshold* adaptativo. Neste método, a imagem é dividida em 10 partes iguais, sendo que cada parte desta tem seu nível de cinza médio aferido e utilizado para o *threshold* apenas daquela parte, de modo a melhorar a capacidade da filtragem de eliminar respingos próximos à linha laser e reflexos do arco. Os autores combinam esta técnica com a de filtragem de ruídos baseada no algoritmo *fuzzy* de Takagi-Sugeno [86].

4.6 IDENTIFICAÇÃO DA LINHA LASER

Como o padrão projetado do laser é composto geometricamente de linhas, para a grande maioria dos STL, são propostos métodos que envolvam a detecção dessas linhas diretamente a partir de uma imagem previamente filtrada. Entre estes métodos, destacam-se a transformada de Hough [86] [98] [100], a técnica de múltiplos picos com critério de vizinhança [8] [88] [75], análise de objetos da cena, segunda derivada [8] [86] [101] [102] e correlação de padrões [8] [31] [103]. Apesar de identificarem a linha laser, a maior aplicação para os métodos da segunda derivada e da correlação de padrões é identificar os pontos de interesse das linhas, por isso são abordados no item 4.7 deste trabalho.

O consenso por amostragem aleatória RANSAC (*Random Sample Consensus*), apresentado no trabalho de Fischler e Bolles [104], largamente utilizado para as rotinas de calibração de câmeras no *OpenCV 4.3.0* [80] e utilizada no trabalho de Fang *et al.* [31] em conjunto com o método dos mínimos quadrados, pode ser uma boa alternativa para casos onde

a linha laser apresente um perfil muito ruidoso. Essa situação pode ocorrer por conta da qualidade do conjunto emissor, pela forma ou composição do material de base ou mesmo pela presença excessiva de fumos metálicos provenientes da soldagem. Um exemplo

4.6.1 Transformada de *Hough*

A transformada de *Hough* (HT), derivada da patente US3069654A de 1960 por Paul V. C. Hough [100], desenvolvida em 1972 por Duda e Hart [105] para identificação de linhas e curvas, ainda hoje é a base para inúmeras aplicações em processamento de imagens, com potencial para imagens de STL [86] [86] [75] [98] [106].

Padrões espacialmente estendidos são transformados por este método para produzir recursos compactos em um espaço de parâmetros. Dessa maneira, a HT converte um problema de detecção global no espaço da imagem em um problema de detecção de pico local mais fácil no espaço de parâmetros [107]. Esse método consiste em três etapas básicas [108]:

1. Um pixel do espaço da imagem é transformado em uma curva parametrizada do espaço do parâmetro (ou uma superfície, dependendo do número de parâmetros);
2. Um acumulador com uma matriz de células é colocado no espaço de parâmetros e cada pixel da imagem atribui uma pontuação às células localizadas em sua curva transformada;
3. Finalmente, uma célula com o máximo local de pontuações é selecionada e suas coordenadas de parâmetro são usadas para representar um segmento de curva no espaço da imagem

Essa transformada analisa a imagem de forma global, localizando os pontos mais prováveis de conterem retas significativas na imagem, a depender dos parâmetros de entrada do algoritmo. Para imagens de STL, ela localiza linhas, principalmente, sobre o perfil da linha laser e sobre os respingos (que se apresentam como linhas verticalizadas na imagem). A utilização de uma *ROI* bem parametrizada diminui bastante a influência dos respingos.

Na biblioteca do *OpenCV* 4.3.0 [80], a transformada de *Hough* para detecção de linhas já é implementada com suporte para paralelização e aceleração compatível com a tecnologia *CUDA* da fabricante NVIDIA. Desse modo, desenvolvedores que disponham de *hardware* compatível com esta tecnologia podem se beneficiar com menor tempo de processamento das imagens, além de divisão da carga computacional entre o processador (CPU) e a placa de vídeo

(GPU). O algoritmo retorna vetores de linhas, sendo cada uma representada por um vetor de dois elementos (ρ, θ) , sendo ρ a distância da coordenada de origem (0,0), geralmente o canto superior esquerdo da imagem, e θ igual ao ângulo de rotação em radianos (0 corresponde a linha vertical, $\pi/2$ linha horizontal).

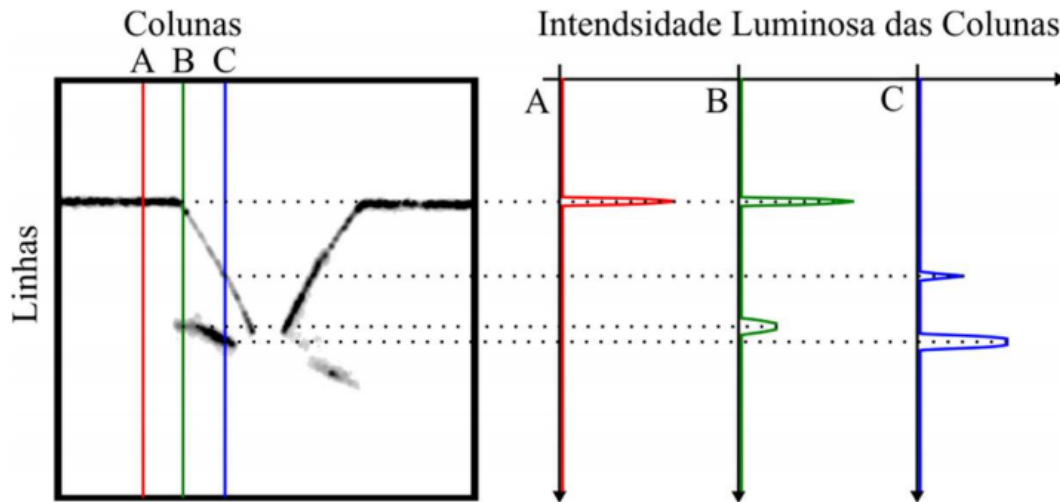
Uma vez que a linha laser está presente em boa parte da imagem do sensor, ela será identificada por várias retas, todas com ângulos muito próximos. Comparando os conjuntos de retas retornadas pelo algoritmo, é possível agrupá-las por semelhança e retirar uma única reta média para representar a linha laser. Em chanfros do tipo V, serão separados 4 conjuntos de retas semelhantes, que representam as duas linhas sobre a chapa e as duas linhas sobre o chanfro.

4.6.2 Máxima intensidade de pixel

O conceito da técnica de múltiplos picos com critério de vizinhança [8] [88] [75] é bastante simples: “a linha laser provavelmente contém um dos pixels mais luminosos em qualquer coluna da imagem analisada e ela tem o aspecto de linha, partindo das extremidades do sensor para o centro”. Com essa descrição, o algoritmo consegue localizar com bastante eficácia a linha laser e descartar os demais ruídos. Dessa forma, esse algoritmo é o mais utilizado para identificação da linha laser em imagens de STL, tanto por sua simplicidade quanto por sua eficácia, que pode ser ainda melhorada quando combinado a operações espaciais ou temporais customizadas pixel-a-pixel [75].

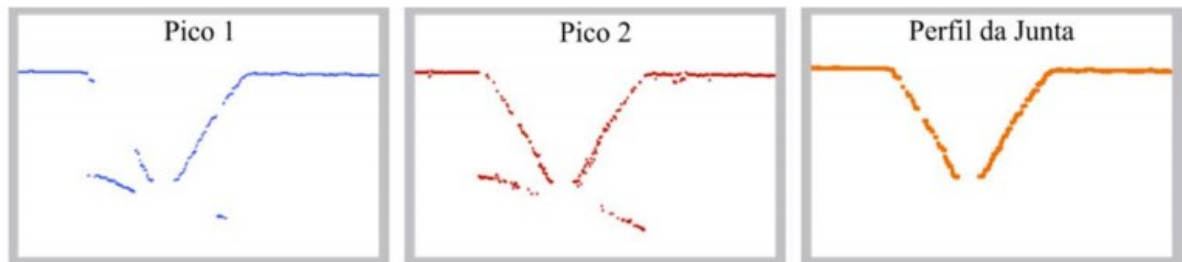
Em sua tese, Puhl [8] ilustra claramente o funcionamento da técnica de múltiplos picos com critério de vizinhança para a análise da intensidade luminosa das colunas (Figura 4.30) e a identificação da linha laser (Figura 4.31). Esta técnica é bastante robusta para situações de soldagem em peças com superfícies reflexivas, seja pelo material de base ou pelo acabamento do chanfro, sendo uma boa ferramenta para análise de imagens na soldagem de alumínio. Além desta proposta, há mais variações deste tipo de análise por intensidade luminosa disponíveis na literatura, todas com resultados positivos [61] [84] [88]. Também há trabalhos que combinam a análise de picos de luminosidade com os frames mais próximos do analisado, utilizando o valor médio entre estes para reduzir o efeito dos ruídos, como no trabalho de Yuan *et al.* [102].

Figura 4.30 – Análise da intensidade luminosa das colunas pela técnica de múltiplos picos.



Fonte: [8].

Figura 4.31 – Identificação do perfil da junta (direita) por critérios de vizinhança do Pico 1 (à esquerda, maior intensidade) com o Pico 2 (centro, segunda maior intensidade).



Fonte: [8].

4.6.3 Morfologia dos contornos

Outra forma de distinguir a linha laser dos demais objetos remanescentes na imagem, após as operações de filtragem e segmentação, é a análise destes objetos, principalmente quanto ao tamanho e aspecto dos mesmos. Na biblioteca do *OpenCV 4.3.0* [80], as ferramentas para esse tipo de análise estão listadas como *Contour Properties* (propriedades do contorno, tradução literal). As principais operações são 5: *Aspect Ratio*, *Extent*, *Solidity*, *Equivalent Diameter* e *Orientation*. Este último, de orientação, retorna a direção principal do objeto, além dos lados do menor retângulo rotacionado que contenha o objeto.

- *Aspect Ratio*: proporção entre a altura (*height*) de um objeto na imagem e sua largura (*width*). Desse modo, pode ser utilizado para diferenciar a linha laser

(largura maior que a altura) dos ruídos (altura e largura próximas, ou altura maior que largura). A Equação 4.10 indica a fórmula para cálculo de *Aspect Ratio*.

$$Aspect\ Ratio = \frac{Width}{Height} \quad 4.10$$

- *Extent*: proporção da área do contorno (*contour area*) para a área do retângulo delimitador mínimo (menor retângulo não rotacionado que contenha o objeto). A Equação 4.11 representa a fórmula da extensão (*extent*) de um objeto, sendo a área do contorno calculada pelo teorema de Green [109]. Pode ser uma alternativa ao *Aspect Ratio*.

$$Extent = \frac{Contour\ Area}{Bounding\ Rectangle\ Area} \quad 4.11$$

- *Solidity*: relação entre a área do contorno (*contour area*) e a envoltória convexa (*convex hull*) de um objeto na imagem, conforme a Equação 4.12. Pode ser usada para identificar grandes reflexos do arco, auxiliando na análise de *Aspect Ratio*.

$$Solidity = \frac{Contour\ Area}{Convex\ Hull\ Area} \quad 4.12$$

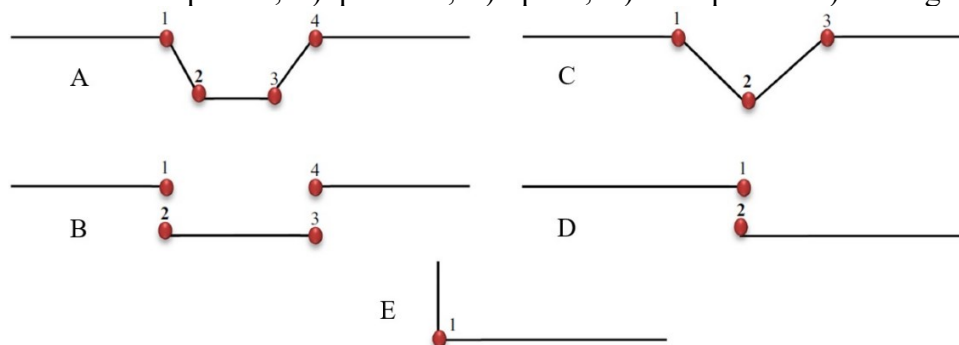
- *Equivalent Diameter*: diâmetro equivalente do círculo que tenha uma área igual à área de contorno de um objeto da imagem, conforme a Equação 4.13. Pode ser utilizado, em combinação com o parâmetro de *Aspect Ratio*, para apagar grandes reflexos do arco ou mesmo da linha laser, dependendo do tipo de ruído.

$$Equivalent\ Diameter = \sqrt{\frac{4 \cdot Contour\ Area}{\pi}} \quad 4.13$$

4.7 MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA JUNTA

O processo de aquisição das informações sobre o perfil da junta envolve a extração de pontos de interesse (conhecidos também como pontos de inflexão ou pontos angulosos) sobre uma linha laser, que permitem identificar e medir o padrão estrutural deformado na junta de soldagem. Estes pontos indicam as posições onde ocorre mudança de trajetória [75]. A quantidade e o tipo destes pontos de inflexão dependem da configuração da junta de soldagem, conforme representado na Figura 4.32. Todos os tipos de pontos angulosos serão tratados por “pontos de inflexão” neste trabalho para maior conveniência do leitor.

Figura 4.32 – Pontos de inflexão para diferentes tipos de junta: A) tipo U ou com preenchimento parcial, B) quadrada, C) tipo V, D) sobreposta e E) em ângulo.



Fonte: Adaptado de [75].

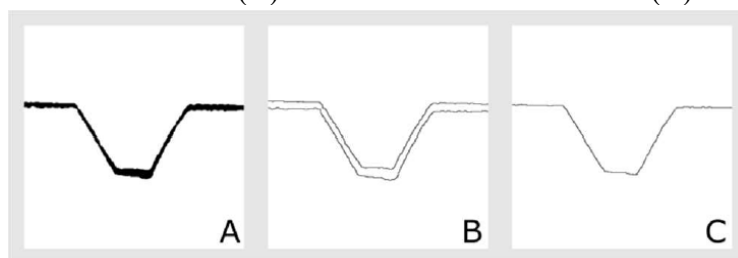
A tarefa elementar para extração das características da junta consiste em identificar estes pontos de inflexão. Em uma situação ideal, a execução dessa tarefa é simples. Entretanto, em situações reais a linha laser extraída diverge consideravelmente de sua forma ideal. As linhas retas não são realmente retas, havendo descontinuidades ao longo das mesmas e o ruído presente faz com que os cantos possam ser detectados em diferentes posições em relação às reais posições, o que torna difícil a identificação dos pontos de inflexão [75].

Diferentes métodos para detectar esses pontos são propostos na literatura, sendo que os principais, além da segunda derivada [8] [86] [101] [102] e da correlação de padrões [8] [31] [103], são: algoritmos baseados em regras [110] [111] [112] [113] [114] [34], análise dos ângulos nos pontos de inflexão [61] [95], detecção de pontos de canto [115] [76] [87] e operações customizadas pixel-a-pixel [90] [62] [77].

Contudo, estes algoritmos tendem a desempenhar melhor quando a linha é contínua e de espessura infinitesimal, com exceção da correlação de padrões, que pode trabalhar inclusive na imagem original sem filtragem ou segmentação [8] [116]. Para os demais algoritmos, a

utilização de filtros para detecção de bordas (item 4.4.1) pode ser uma boa alternativa para transformar o perfil espesso da linha laser em uma linha fina média, a exemplo do trabalho de Xu *et al.* [86]. Outro método de aplicação simples para realizar esse tratamento da linha laser está retratado na Figura 4.33, em que a imagem original binária (A) é filtrada pela identificação dos contornos (troca de valor repentina), gerando duas linhas (B), que então são transformadas em uma linha única por uma média simples entre pixels da mesma coluna (C).

Figura 4.33 – Filtragem da linha laser na imagem original (A) por detecção de mudança de luminosidade (B) e média das linhas de borda (C).

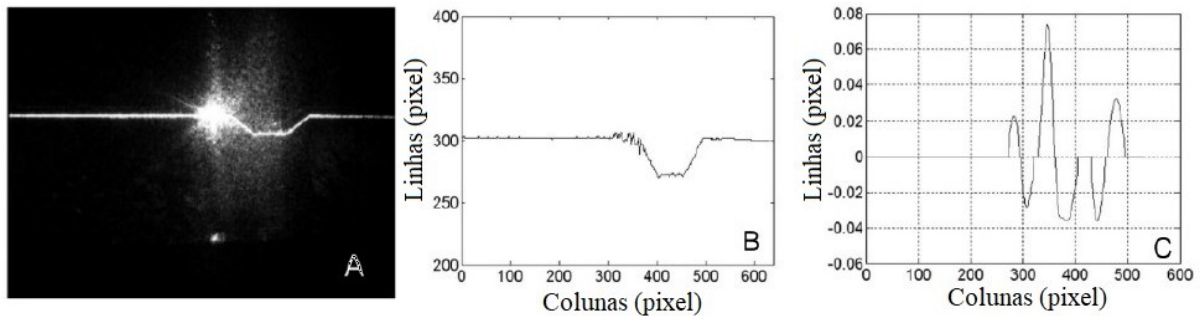


Fonte: [8].

4.7.1 Segunda derivada

A análise da segunda derivada é bastante útil para detecção dos pontos de interesse da junta. Segundo Puhl [8], esse algoritmo desempenha melhor em chanfros com arestas retas, como os do tipo V, por exemplo. Quando a linha laser está orientada horizontalmente com a imagem (caso mais comum), é razoável pressupor que a linha estará paralela com as linhas da imagem (linhas horizontais de pixels). Assim, métodos espaciais que operem na direção das colunas da imagem (vertical) conseguem destacar não só a linha como também os pontos de inflexão da mesma [75]. Uma representação clara do funcionamento deste método está na Figura 4.34, onde a segunda derivada (C) da linha laser indica os pontos de inflexão pelos picos apresentados em seu perfil (B) [101].

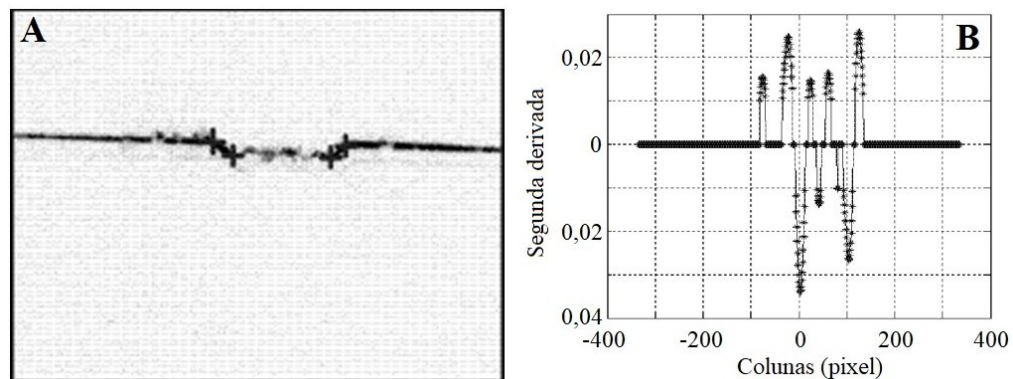
Figura 4.34 – Uso da técnica da segunda derivada para indicação dos pontos de inflexão, sendo (A) imagem original, (B) linha laser identificada e (C) segunda derivada da linha laser.



Fonte: Adaptado de [101].

A utilização da segunda derivada é possível enquanto houver evidência visual clara da mudança de inclinação no perfil da linha laser. Mesmo para situações onde as mudanças são muito sutis, como no trabalho de Li *et al.* [102], na qual a junta já está parcialmente preenchida, a segunda derivada do perfil ainda consegue indicar corretamente a posição de cada ponto de interesse, conforme ilustrado na Figura 4.35. A mudança do valor da segunda derivada, nos picos próximos a inversão de sinal, evidencia os pontos de inflexão da linha laser.

Figura 4.35 – Uso da técnica da segunda derivada em junta com preenchimento parcial, sendo (A) imagem com linha laser filtrada e (B) segunda derivada da linha laser.



Fonte: Adaptado de [102].

4.7.2 Correlação de padrões

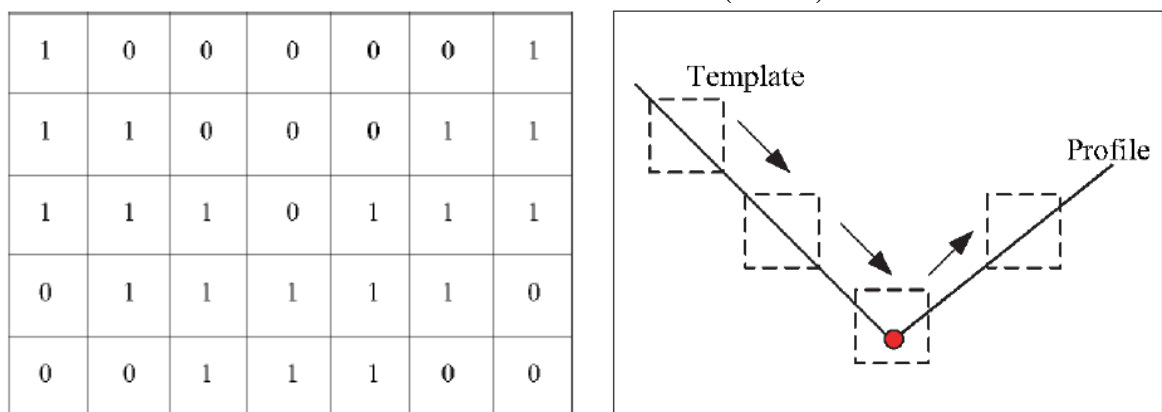
Para imagens de STL, são definidos padrões de imagens para regiões da junta que se deseja localizar. O algoritmo de correlação de padrões também é bastante utilizado para definição dos pontos de interesse. Este algoritmo faz uso de técnicas de *matching* (correspondência) por correlação de imagens para encontrar cada região da imagem que chega

mais próxima dos padrões definidos, sendo sua implementação e modo de funcionamento parecidos com os da convolução de imagens [72]. Uma das grandes vantagens deste algoritmo é ter a capacidade de encontrar estas regiões específicas sem que a imagem seja filtrada previamente, o que simplifica sua implementação. Todavia, é extremamente dependente da qualidade, validade e acurácia dos padrões salvos para realizar a identificação dos pontos corretos de interesse, sendo que essas imagens devem ser subconjuntos de pixels de imagens reais filtradas de STL.

Uma vez que os padrões têm relação direta com a qualidade da detecção dos pontos de interesse, é imperativo que estes tenham validade durante todo o processo de varredura da junta. Dependendo do processo de fabricação da junta, principalmente se envolver etapas de usinagem ou acabamento manuais, o perfil da junta tende a mudar significativamente ao longo de seu comprimento, o que pode invalidar os padrões em certas regiões e causar falha de medição. Segundo Puhl [8], estratégias para atualização dos padrões durante a soldagem são eficazes para evitar este tipo de situação.

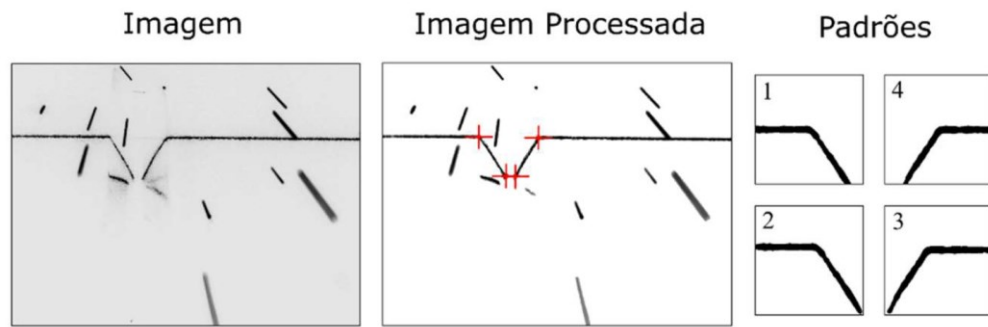
No trabalho de Fang *et al.* [31] é possível observar o comportamento do algoritmo de correlação de padrões em uma imagem simples, com apenas um ponto de interesse, conforme ilustrado na Figura 4.36. Apesar da simplicidade deste padrão, para localização em imagem binária, os autores relatam bom funcionamento, mas com aplicação de filtragem antes da correlação. A FIG traz uma representação do processamento de imagens por correlação de padrões realizado por Puhl [8].

Figura 4.36 – Exemplo de aplicação de um padrão simples (esquerda) para localizar o ponto de interesse sobre a linha laser (direita).



Fonte: [31].

Figura 4.37 –Processamento de imagens por correlação de padrões.

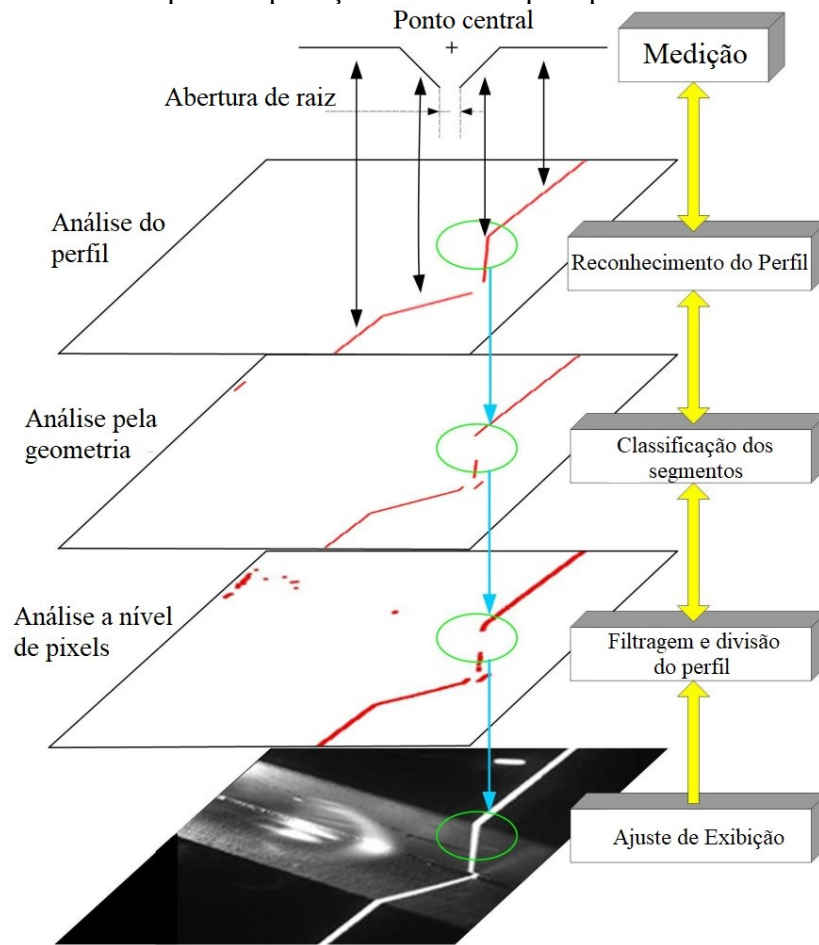


Fonte: [8].

4.7.3 Algoritmos baseados em regras

Os algoritmos baseados em regras (*rule based*) geralmente dividem a linha laser filtrada em segmentos, que então são classificados em um objeto específico de uma lista de objetos padrões de acordo com as regras estabelecidas, basicamente algoritmos que combinam lógica *fuzzy* e múltiplas correlações de padrões [110]. Após a classificação, a combinação destes objetos é interpretada, também segundo regras, para definição dos pontos de interesse. Alguns autores, como Gong *et al.* [111], realizam operações básicas de ajuste de exibição e filtragem, para então realizar a classificação da linha e interpretação da geometria da junta, conforme ilustra a Figura 4.38.

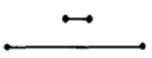
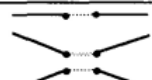
Figura 4.38 – Exemplo de aplicação *rule based* para processamento de imagem.



Fonte: Adaptado de [111].

As listas de objetos padrões variam pouco de autor para autor, uma vez que abordam a classificação de segmentos de perfis de linha laser padrões para a indústrias. Esses padrões são chamados de *Junction Primitives* (ou descritores primitivos) [75]. Além os primitivos, também são relacionadas combinações destes que formam os tipos de chanfro (descritores de juntas). Um exemplo de tabelas de descritores primitivos e descritores de juntas adotadas pelos autores Kim *et al.* [112] está na Figura 4.39.

Figura 4.39 – Exemplo de tabelas de descritores primitivos (esquerda) e de junta (direita).

	Label	Description
Line Primitives	<i>speckle</i> <i>surface</i>	
Junction Primitives	<i>cp</i> <i>cu</i> <i>cd</i>	
	<i>gp</i> <i>gu</i> <i>gd</i>	
	<i>up</i> <i>uu</i> <i>ud</i>	
	<i>ap</i> <i>au</i> <i>ad</i>	
	<i>dp</i> <i>du</i> <i>dd</i>	
	<i>bp</i> <i>bu</i> <i>bd</i>	
Type	Reference pattern language	Profile
Fillet	$\langle surface \rangle \langle cu \rangle \langle surface \rangle$	
Butt	$\langle surface \rangle \langle gp \rangle \langle surface \rangle$ $\langle surface \rangle \langle dp \rangle \langle surface \rangle$ $\langle up \rangle \langle surface \rangle$ $\langle surface \rangle \langle cd \rangle \langle surface \rangle \langle cu \rangle$ $\langle surface \rangle \langle up \rangle \langle surface \rangle$ $\langle surface \rangle \langle dp \rangle \langle surface \rangle \langle cu \rangle$ $\langle surface \rangle \langle cd \rangle \langle surface \rangle$ $\langle surface \rangle \langle cd \rangle \langle surface \rangle \langle cu \rangle$ $\langle surface \rangle \langle cu \rangle \langle surface \rangle \langle cd \rangle \langle surface \rangle$	     
Lap	$\langle surface \rangle \langle cd \rangle \langle surface \rangle$ $\langle cu \rangle \langle surface \rangle$ $\langle surface \rangle \langle cu \rangle \langle surface \rangle$ $\langle cd \rangle \langle surface \rangle$ $\langle surface \rangle \langle dp \rangle \langle surface \rangle$ $\langle surface \rangle \langle up \rangle \langle surface \rangle$	   
Vee	$\langle surface \rangle \langle cd \rangle \langle surface \rangle \langle cu \rangle$ $\langle surface \rangle \langle cd \rangle \langle surface \rangle$	

Fonte: [112].

4.7.4 Mudanças de ângulo

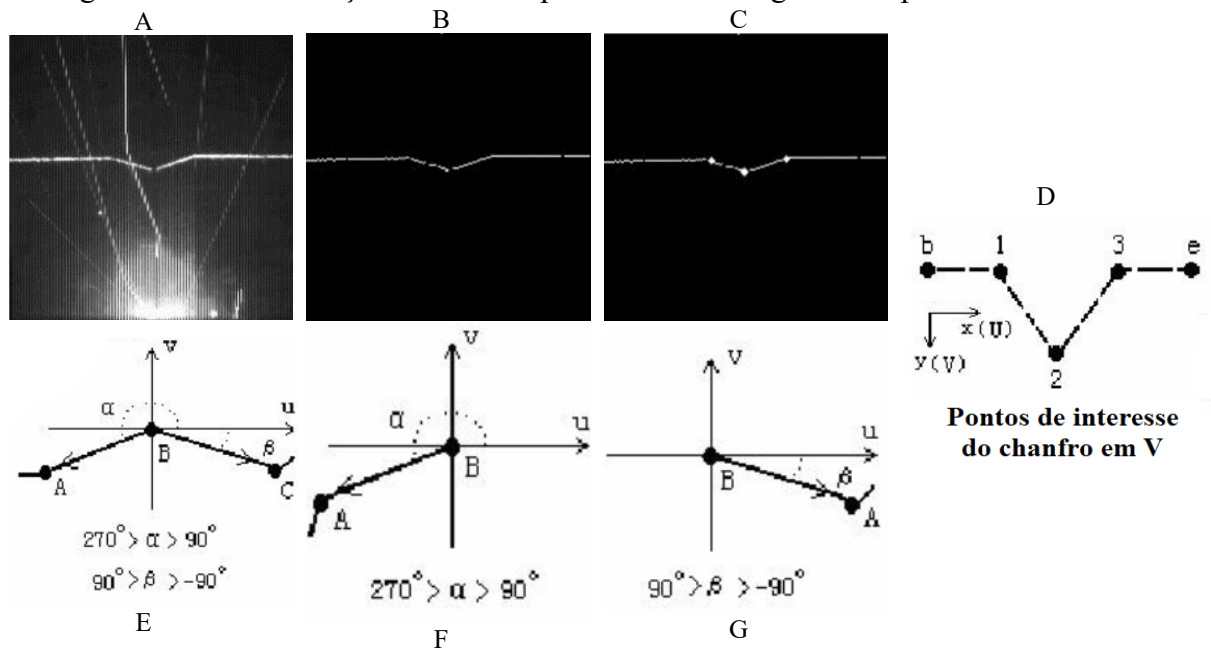
Um caso especial dos algoritmos baseados em regras seria a aplicação para localização exclusiva das mudanças de ângulo que definem a transição da superfície da chapa para a face do chanfro. Esse tipo de implementação é bastante simples, uma vez que considera uma pequena vizinhança em torno do ponto de interesse para localizar uma mudança de ângulo característica da junta ensaiada. Pela simplicidade, muitas vezes esse algoritmo pode apresentar alta taxa de falhar ou requerer ajustes finos para funcionar adequadamente [75].

Um exemplo de aplicação desta técnica é descrito no trabalho de Sung *et al.* [61]. Neste, os autores utilizam filtros de mediana, erosão, dilatação e limiar, sucessivamente, para condicionar as imagens captadas com o sensor de 5 linhas laser utilizado. Após a filtragem, um algoritmo de *Split and Merge* (divisão e fusão, tradução literal) é utilizado para tentar localizar a junta soldada nas coordenadas dos pontos laser. Uma vez que esses autores apenas utilizaram o algoritmo para juntas sobrepostas, que são extremamente simples (uma chapa sobre a outra), este método foi considerado de alta precisão da medição, apesar de suas claras limitações. Uma das vantagens deste método é o baixo custo computacional demandado, o que permite aumentar

a frequência de processamento dos pontos laser; em um sistema com 5 linhas laser, esse tipo de solução pode ser interessante.

No trabalho de Shi *et al.* [95], os autores trabalharam com imagens bastante ruidosas, conforme ilustrado na Figura 4.40-A. Para tanto, utilizaram métodos de OTSU [81] para filtragem e segmentação da imagem, obtendo resultados como os da Figura 4.40-B. Após a segmentação, utilizaram métodos de análise dos ângulos nos pontos de inflexão (Figura 4.40-D) para determinar a localização destes pontos sobre o perfil da linha laser, conforme registrado na Figura 4.40-C. A Figura 4.40-E representa as regras para identificar a transição entre a superfície da chapa e a face do chanfro. A Figura 4.40-F e a Figura 4.40-G indicam as regras para detecção das bordas do chanfro (que definem a abertura de raiz).

Figura 4.40 – Localização do chanfro por análise dos ângulos nos pontos de inflexão.



Fonte: Adaptado de [95].

4.7.5 Pontos de canto

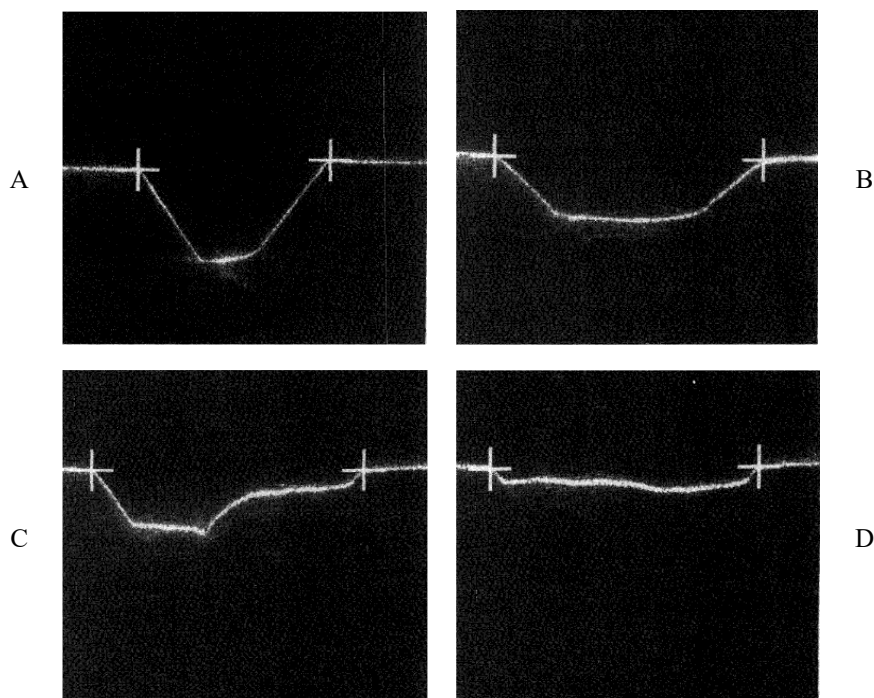
Assim como os algoritmos descritos na seção anterior, em que a mudança de ângulo é a variável observada, a detecção de pontos de canto também caracteriza um caso especial dos algoritmos baseados em regras. Sendo estes dois métodos muito similares, são considerados diferentes apenas pela variável que determina o ponto de inflexão, sendo que nos pontos de cantos não é considerado o ângulo entre a chapa e o chanfro para detecção dos pontos de

interesse. Estes pontos são localizados apenas com algoritmos simples de detecção de canto, como médias móveis ou mesmo comparação com a vizinhança imediata [75].

O trabalho de Wu *et al.* [115] exemplifica uma aplicação de algoritmo deste tipo. Primeiro, os autores aplicam técnicas de afinamento da linha laser para reduzi-la a um único pixel por coluna, seguida de algoritmo de *smoothing* para retirar as discontinuidades da linha. Após a aplicação de uma ROI para redução do custo computacional, os autores empregam uma média móvel de 5 elementos (pixel central mais dois vizinhos para cada lado) para detectar o canto. Este método é de grande simplicidade de implementação e pode funcionar bem, desde que a linha laser não apresente aspecto ruidoso após a filtragem inicial.

Uma vantagem deste tipo de método é a possibilidade de utilização da mesma configuração do algoritmo para medição tanto de passes de raiz como de enchimento. Um exemplo desta aplicação está retratado no trabalho de Wu *et al.* [115], em que o mesmo algoritmo foi capaz de localizar os pontos de canto de imagens em diferentes estágios de preenchimento do chanfro, conforme ilustrado na Figura 4.41. onde ‘A’ representa passe de raiz, ‘B’ “passe quente”, ‘C’ primeiro passe de enchimento e ‘D’ segundo passe de enchimento.

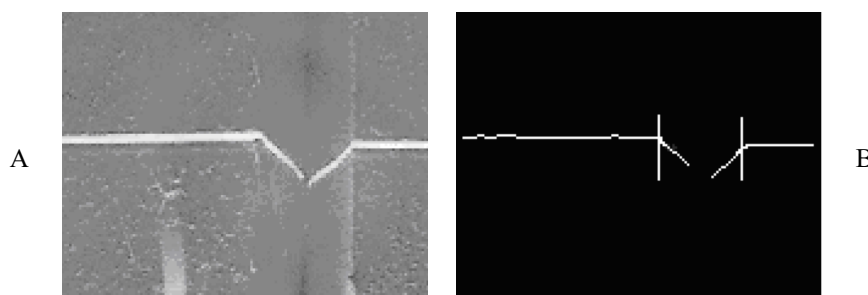
Figura 4.41 – Algoritmo “pontos de canto” aplicado em diferentes estágios da soldagem.



Fonte: Adaptado de [115].

O trabalho de Liangyu *et al.* [76] apresenta resultados promissores para aplicação desta técnica, inclusive sobre imagem com alta concentração de ruídos da soldagem. Um exemplo desta aplicação está retratado na Figura 4.42, onde ‘A’ representa a imagem original e ‘B’ a imagem final já filtrada e processada pelo algoritmo de detecção dos pontos de canto empregado pelos autores.

Figura 4.42 – Algoritmo “pontos de canto” aplicado em imagem com ruídos da soldagem.



Fonte: Adaptado de [76].

4.7.6 Operações customizadas pixel-a-pixel

Algumas implementações levam em conta apenas o domínio do valor, ou seja, o valor local de cada pixel. Este tipo de algoritmo é altamente suscetível a ruídos e variações no próprio perfil da linha laser, muito comuns nas imagens capturadas por STL. Devido a sua simplicidade, bons resultados são relatados apenas em trabalhos desenvolvidos com processos de soldagem de baixa interferência nas imagens, como a soldagem a laser por exemplo, utilizada no trabalho de Zhang *et al.* [77]. Neste trabalho, os autores fazem uma filtragem e extraem o perfil médio da linha laser, para depois procurar variação local entre um pixel e outro e determinar a posição da junta.

Mesmo implementações mais complexas deste tipo de algoritmo, como a encontrada no trabalho de Gu *et al.* [90], na qual os autores buscam quatro pontos de interesse em uma junta do tipo V com vários estágios de preenchimento, ainda assim há necessidade de se adquirir imagens com mínima quantidade de ruídos, de modo a não prejudicar a atuação do algoritmo.

Apesar de sofrer com a influência de ruídos, estes métodos possuem potencial de aplicação quando combinados com outras técnicas para medição das características da junta, de modo que podem ser utilizados para definir ROI ou auxiliar na validação dos pontos encontrados por outros métodos, por exemplo.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Devido ao caráter multidisciplinar deste trabalho, a metodologia foi dividida em três etapas: investigação de *hardware* e *software* dos STL comerciais, ensaios de desempenho destes STL e desenvolvimento de *software* livre para processamento de imagens de STL.

5.1 INVESTIGAÇÃO DE *HARDWARE* E *SOFTWARE* DOS STL COMERCIAIS

Uma vez estudados os diversos arranjos para STL e compilada uma coletânea de algoritmos de processamento de imagem pertinentes, o resultado combinado é uma base tecnológica teórica para o desenvolvimento de um STL próprio.

Frente esta compilação, é interessante para o desenvolvedor ter à disposição informações de qualidades e especificidades dos modelos comerciais bem estabelecidos. Assim, análises de *software* e *hardware* são pertinentes para avaliação dos modelos de STL comerciais considerados. Desse modo, cria-se um compilado de técnicas e inovações presentes nos sensores comerciais que, aliado a base tecnológica teórica, reúne informações de soluções já existentes e a teoria que fundamenta estas soluções.

5.1.1 Sensores de triangulação a laser ensaiados

Os STL considerados nesta etapa foram escolhidos pela disponibilidade para testes *in loco* com os mesmos. Foram considerados quatro sensores e os mesmos são descritos e analisados em detalhes no capítulo 6. Para facilitar a referência a estes sensores no decorrer deste trabalho, a partir deste ponto é adotada a nomenclatura da sigla STL seguida pelo número correspondente a cada sensor, conforme listado na Tabela 5.1, que traz os parâmetros dos quatro sensores escolhidos.

Tabela 5.1 – Especificações dos STL selecionados para investigação de *hardware*.

Parâmetro	STL1 [19] Meta Vision	STL2 [20] Servo-ROBOT	STL3 [21] Scansonic-Binzel	SLT4 [8] LABSOLDA
Número de linhas projetadas (linhas)	1	1	3	1
Campo de medição mínimo (mm)	ni*	27	13	*ni
Campo de medição máximo (mm)	50	76	15	60
Profundidade de medição (mm)	80	140	24	80
<i>Standoff</i> (mm)	65	70	138	60
Sensibilidade horizontal (mm/pixel)	0,05	0,09	0,03	0,05
Sensibilidade vertical (mm/pixel)	0,08	0,05	0,07	0,09
Potência do Laser (mW)	30	130	ni*	40
Frequência mínima (Hz)	30	30	60	31**
Tipo de Sensor	CMOS	CMOS	CMOS	CCD
Ângulo em relação à tocha (vertical)	0°	0° a 10°	0°	0°
<i>Offset</i> mínimo (mm)	35	50(0°) 70(10°)	10 a 30***	ni*
Largura do cabeçote (mm)	39	33	40	70
Altura do cabeçote (mm)	118	94	100	134
Profundidade do cabeçote (mm)	75	58	70	160
Massa do cabeçote (g)	554	475	650	1573

ni*: não informado na documentação do sensor;

**: nominal do sensor de imagem, do STL (imagens processadas) não é informado;

***: em condição de soldagem com processo MIG/MAG a 150 A, valor deve aumentar para corrente superior.

5.1.2 Bancada de ensaios para investigação de *hardware*

A fim de estudar o *hardware* disponibilizado pelos fabricantes, principalmente acerca do arranjo óptico dos sensores, Ensaios Não Destrutivos (ENDs) com tomografia industrial são uma boa alternativa pela qualidade das informações disponibilizadas e baixo risco de dano aos sensores. O aparelho disponível para esses ensaios foi um tomógrafo *METROTOM 1500* da fabricante Carl Zeiss Instruktion Messtechnik, apresentado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Tomógrafo *Metrotom 1500* da fabricante Carl Zeiss.

Fonte: Adaptado de [117].

5.1.3 Metodologia para investigação de *hardware*

O tomógrafo foi utilizado com tensão de 225 kV e corrente de 250 μ A, com captação de 1000 projeções e tempo de integração de aproximadamente 2 segundos. O algoritmo de reconstrução utilizado foi o do tipo *Feldkamp* [117]. A resolução registrada pelo tomógrafo foi de 0,24 mm para todos os eixos medidos. Os ajustes destes parâmetros foram obtidos por testes com o STL1 por um técnico competente em tomografia, proporcionando nuvens de pontos de boa qualidade para os dois sensores ensaiados por este método (STL1 e STL2).

Com as nuvens de pontos de cada sensor foi possível gerar cortes em qualquer direção espacial pelo conjunto. O corte mais interessante foi o que exibe o arranjo óptico, podendo ser chamada de vista lateral do sensor. O *software* utilizado para gerar essas vistas foi o *MyVgl* v2.4, disponibilizado pela executora do END.

Apenas o STL1 e o STL2 foram ensaiados com este tipo de tecnologia. O STL3 não ficou disponível tempo suficiente para realização do ensaio e o STL4 já tem seu arranjo óptico e projeto mecânico conhecidos e publicados no trabalho de Puhl [8], além da possibilidade de desmontagem, que foi feita removendo apenas as chapas externas do sensor, sem afetar o posicionamento interno de seus componentes.

5.1.4 Metodologia para investigação de *software*

A investigação de *software*, não só dos STL selecionados como também dos pertinentes, através da análise de manuais, buscou compilar pontos chave de cada fabricante, consolidando uma fonte de informações para desenvolvedores de *softwares* para STL no futuro.

Os pontos avaliados foram: quais perfis são suportados, tipos de filtros disponíveis, rotinas de calibração, regras para medição dos perfis e potencial de visualização do ambiente de soldagem em tempo real (com sensor principal ou secundário, se estiver disponível).

Os STL selecionados foram objeto de estudo mais a fundo pela disponibilidade de avaliação direta dos *softwares*. Todavia, soluções pertinentes bem documentadas e de livre acesso também foram avaliadas.

5.2 ENSAIOS DE DESEMPENHO DOS STL COMERCIAIS

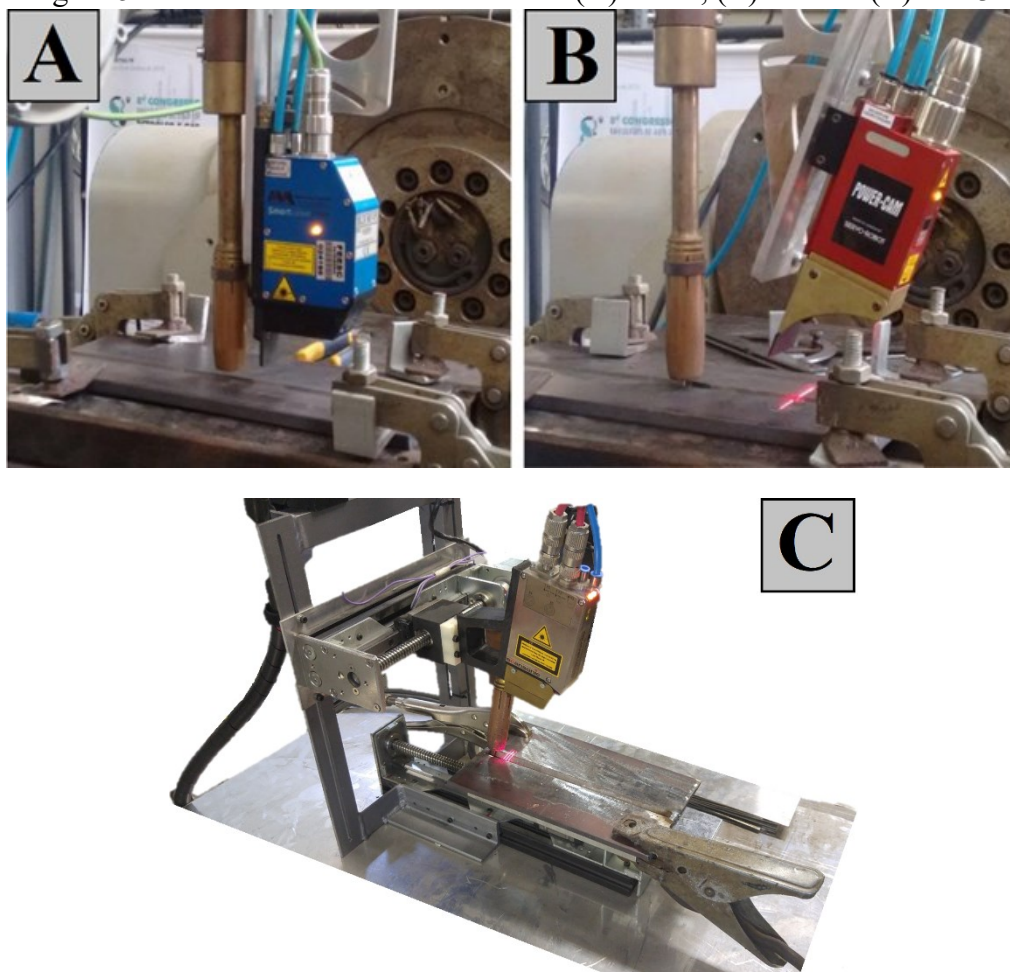
O desempenho real dos STL comerciais deve ser ensaiado a fim de se determinar qual o comportamento esperado de um sensor deste tipo. Para fins de comparação, foram realizados alguns ensaios com e sem soldagem, em condições de aplicação industrial, de modo a verificar qual dos sensores responde melhor a este tipo de solicitação.

5.2.1 Bancada para ensaio operacional dos STL

Buscando avaliar o desempenho dos sensores em situação de aplicação similar à encontrada na indústria, a bancada utilizada para estes ensaios tentou reproduzir uma célula de soldagem robotizada padrão. Para tanto, foi utilizado um manipulador YASKAWA MOTOMAN *HP-20D*, com repetitividade nominal de $\pm 0,06$ mm [118] (para ensaio dos STL1 e STL2, pela integração destes sensores com o manipulador), além do *Sistema Cartesiano de Soldagem – SCS* da fabricante SPS, ainda em sua versão protótipo [119], para ensaio do STL3. Uma tocha MIG/MAG modelo *511 Aut* da fabricante TBi Industries [120] foi acoplada ao manipulador antropomórfico através de um suporte de tocha especial, que possibilitou também o acoplamento dos STL à tocha de soldagem. Para o *SCS* foi utilizada uma tocha modelo *511*, também da TBi Industries, mas na versão manual, pela angulação da mesma, que facilitou a disposição do cabo da tocha na bancada e a fixação do STL3 diretamente ao manipulador. Uma fonte de soldagem *DigiPLUS A7* da fabricante IMC [121] soldagem foi utilizada na variante MIG/MAG CCC [122] [123] para soldagem.

Uma vez que os sensores necessitam de inclinações diferentes, seguindo recomendação dos fabricantes, o *offset* dos sensores não foi o mesmo, porém isso não influenciou o ensaio, já que foram utilizadas rotinas iguais para os sensores encontrarem o início e o final dos corpos de prova. A Figura 5.2 demonstra o posicionamento dos sensores.

Figura 5.2 - Posicionamento dos sensores: (A) STL1, (B) STL2 e (C) STL3.



5.2.2 Metodologia para ensaios operacionais com os STL

Os ensaios foram realizados com corpos de prova com junta de topo e chanfro do tipo V. Os corpos de prova utilizados foram fabricados com chapas de aço carbono classificação SAE 1020 de 9,6 mm de espessura, usinadas com um chanfro de 60° (30° de bisel), largura de 101,6 mm e 300 mm de comprimento entre os pontos de fixação.

A montagem das chapas foi realizada tomando o cuidado de manter a abertura de raiz de aproximadamente 2,0 mm, com variações nesse valor advindas da usinagem e montagem do corpo de prova. O valor de referência da abertura de raiz foi medido ao longo da junta com o auxílio de um paquímetro (resolução 0,02 mm) a cada 30 mm do comprimento da junta. Esse valor serviu de base para comparação entre as medidas obtidas com cada sensor.

Além do ponteamto nas extremidades, os corpos de prova foram fixados pela face da raiz com perfis L soldados, de 20 mm de largura e 40 mm de comprimento (vulgo “cachorro”), de modo a garantir a manutenção da abertura de raiz durante a soldagem.

Foi realizada a medição da abertura da raiz com os sensores laser antes da solda (passe em vazio, *off-line*) e durante a soldagem (*online*). Os parâmetros de soldagem foram os mesmos utilizados no trabalho de Kindermann [2] e estão descritos na Tabela 5.2 para o processo de soldagem MIG/MAG CCC. O Quadro 5.1 apresenta as demais condições de soldagem.

Quadro 5.1 – Equipamentos e condições de soldagem

Condições de soldagem: Corpos de prova: Aço SAE 1020 – 200 mm x 60 mm x 9 mm (C x L x E) Arame: AWS – ER70S-6 – Ø 1,2 mm Gás de proteção: 75% Ar + 25% CO ₂ Vazão: 18 L/min DBCP = 17 mm
Aparato experimental: Manipulador: <i>Yaskawa Motoman HP-20D</i> [118] Manipulador: <i>Sistema Cartesiano de Soldagem – SCS</i> [119] Sensor laser: <i>SLS-050V1</i> – STL1 [19] Sensor laser: <i>Power Cam</i> – STL2 [20] Sensor laser: <i>TH6D-150-CF</i> – STL3 [21] Sensor laser: <i>Sensor LABSOLDA</i> – STL4 [8] Monitoramento do processo: <i>Sistema de Aquisição Portátil SAP 4</i> [124] Monitoramento do processo: <i>Smart Laser Tools – Software</i> do STL1 [57] Monitoramento do processo: <i>WeldCom – Software</i> do STL2 [125] Monitoramento do processo: <i>THxDView – Software</i> do STL3 [46] Monitoramento do processo: <i>Software</i> de desenvolvimento próprio [2]

Tabela 5.2 – Parâmetros de soldagem e deslocamento do processo CCC.

Parâmetros de Soldagem			
Velocidade de Arame [m/min]	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]	Comprimento Soldado [mm]
3,2	120	16,5	300
Parâmetros de Deslocamento			
Velocidade de Soldagem [mm/s]	Amplitude de Oscilação [mm]	Frequência de Oscilação [Hz]	Tempo de Parada [s]
5,0	2,0	0,9	0,3

A Figura 5.2 demonstra o posicionamento dos sensores. Este posicionamento foi arranjado conforme recomendação dos respectivos fabricantes, sendo que o STL1 foi montado normal à peça (ângulo de 90°), o STL2 foi montado com inclinação de 20° em relação à tocha

de soldagem (70° em relação à superfície do corpo de prova) e o STL3 foi montado conforme especificação do fabricante, com inclinação de $7,5^\circ$ (fabricante recomenda de 0° a 15°). O posicionamento dos sensores está detalhado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Posicionamento dos sensores a laser.

STL1 – Figura 5.2 – A	
Offset: menor distância entre o centro da linha laser projetada sobre a peça e a ponta do arame (TCP – Tool Central Point)	47 mm
Ângulo de inclinação do sensor: (em relação à superfície da peça, tocha na posição vertical – 90°)	90°
Stand-off: menor distância entre a base do sistema de coordenadas do sensor e a superfície da peça	37 mm
STL2 – Figura 5.2 – B	
Offset: menor distância entre o centro da linha laser projetada sobre a peça e a ponta do arame (TCP – Tool Central Point)	73 mm
Ângulo de inclinação do sensor: (em relação à superfície da peça, tocha na posição vertical – 90°)	70°
Stand-off: menor distância entre a base do sistema de coordenadas do sensor e a superfície da peça	34 mm
STL3 – Figura 5.2 – C	
Offset: menor distância entre o centro da linha laser projetada sobre a peça e a ponta do arame (TCP – Tool Central Point)	45 mm
Ângulo de inclinação do sensor: (em relação à superfície da peça, tocha na posição vertical – 90°)	$82,5^\circ$
Stand-off: menor distância entre a base do sistema de coordenadas do sensor e a superfície da peça	140 mm

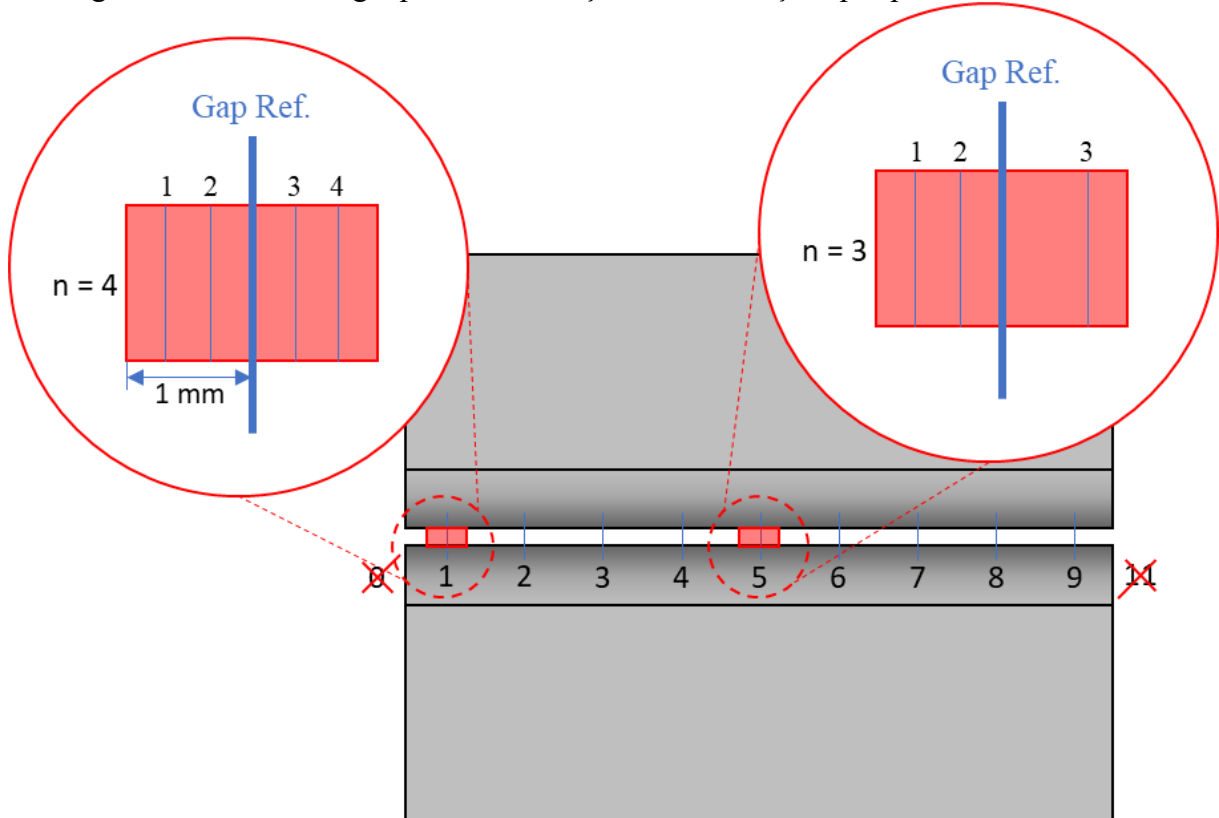
O erro de cada STL para medição da abertura de raiz, em um grupo de imagens, foi obtido a partir das diferenças entre o valor medido e filtrado da abertura de raiz e o valor de referência da abertura de raiz, conforme descrito na Equação 5.1. O *gap* de referência foi obtido nas posições onde a abertura de raiz foi medida com o paquímetro (11 posições sobre cada peça de 300 mm de comprimento, sendo que as medições nas extremidades foram desprezadas, $\therefore i = 9$). A incerteza de medição do paquímetro foi desconsiderada neste estudo, uma vez que o mesmo instrumento foi utilizado para todas as medições realizadas, além das medições serem realizadas por um inspetor de soldagem e ensaios visuais qualificado. A variação de temperatura ambiente também foi considerada desprezível.

Uma vez que foram considerados ensaios *off-line* e *online*, estes últimos com soldagem, não é possível fazer repetidas medições sobre um mesmo ponto da junta (sobre cada ponto i de referência medido com o paquímetro) para a estimativa dos erros i de cada sensor.

Sendo assim, considerou-se que a abertura de raiz não varia no entorno de cada ponto i de referência (faixa de medição). Essa suposição é realista, uma vez que o comprimento considerado no entorno de cada ponto i é mínimo (2 mm no total), bem como o comprimento do corpo de prova soldado é relativamente curto (300 mm), a peça é de espessura razoável (9 mm) e o corpo de prova é montado por ponteamto de 1 pol de comprimento (25,4 mm), garantindo alta rigidez para manutenção da abertura de raiz durante a aplicação da solda.

Desse modo, para cálculo do erro i em cada ponto i de referência, foram consideradas as n leituras filtradas informadas entre 1 mm antes de cada ponto i de referência e até 1 mm depois destes pontos. Como os sensores trabalham com frequências de aquisição diferentes, a quantidade n de pontos utilizados no cálculo do erro i também foi informada para cada medição destas. Como alguns sensores podem não trabalhar com taxa constante de medição, um valor de n foi adotado para cada faixa de medição de cada ensaio, sendo que os valores máximo, médio e mínimo de n foram informados ($n_{\max}$, n_{med} e $n_{\min}$, respectivamente). A Figura 5.3 demonstra esta metodologia, onde no ponto de referência $i = 1$ foram contabilizadas 4 medições de *gap* ($n = 4$) e em $i = 5$ foram contabilizadas apenas 3 medições ($n = 3$), por exemplo.

Figura 5.3 – Metodologia para identificação nas n medições por ponto i de referência.



$$Erro_i = \overline{GapF}_i - Ref_i \pm t_n \cdot s_i \quad 5.1$$

Onde:

Ref_i = valor de referência da abertura de raiz na posição i de referência

$\overline{GapF}_i$ = valor da média das medições filtradas da abertura de raiz na posição i de referência

s_i = desvio padrão da amostra na posição i de referência

t_n = coeficiente da distribuição de *Student*, considerando nível de confiança de 95%

$$Tendência_i = \overline{GapF}_i - Ref_i \quad 5.2$$

$$\overline{GapF}_i = \frac{\sum_{n=1}^n GapF_n}{n} \quad 5.3$$

Onde:

$GapF_n$ = medição de índice n considerada dentro da faixa de medição

n = número de medições registradas na faixa de medição de cada ponto i de referência

$$Precisão_i = t_n \cdot s_i \quad 5.4$$

O desvio padrão s_i , para um conjunto de n medições, é definido para cada posição i de referência conforme a Equação 5.5.

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n (GapF_n - \overline{GapF}_i)^2}{n - 1}} \quad 5.5$$

O filtro utilizado foi o *exponential smoothing*, similar ao utilizado por Kindermann [2], implementado conforme Equação 5.6. O filtro foi aplicado três vezes ($j = 3$), sendo que os coeficientes utilizados do filtro (γ_1 , γ_2 e γ_3 , respectivamente) foram todos relatados. Além do filtro *exponential smoothing*, foi utilizado um filtro simples para descarte de *outliers*, onde variações pontuais da abertura de raiz iguais ou maiores do que 2,0 mm (entre duas medições) foram desconsideradas, sendo repetido o valor da medição anterior até receber uma nova medição de *gap* dentro desta tolerância.

$$GapF_{n,j} = GapF_{n-1,j} + \gamma_j \cdot (Gap_{n,j-1} - GapF_{n-1,j}) \quad 5.6$$

Onde:

$GapF_{n-1,j}$ = medição filtrada anterior à de índice n , da operação j de filtragem

γ_j = coeficiente do filtro *exponential smoothing* na operação j de filtragem

$Gap_{n,j-1}$ = medição “não filtrada” de índice n , da operação anterior ($j - 1$) de filtragem

*obs.: $Gap_{n,j-1}$ para a primeira etapa de filtragem ($j = 1$) é a leitura de *gap* informada pelo sensor e para as demais etapas é a leitura filtrada na etapa anterior ($j - 1$) de índice n .

Uma vez que cada ensaio destes retorna i informações de erro para cada STL em cada cenário ensaiado (*off-line* e *online*), foram considerados dois parâmetros de estimativas de erros para cada cenário: maior valor da estimativa do erro (ErroMax) e média das estimativas de erros (ErroMed). O ErroMax considera o maior valor absoluto da estimativa do erro sistemático (tendência) e também o maior valor da estimativa do erro aleatório (precisão da medição, conhecido antigamente como repetibilidade), independente do índice i em quem foram registradas as medições (pior caso de cada parcela do erro). O ErroMed, por sua vez, representa a média dos valores de tendência e dos valores de precisão da medição. Para fins de comparação, o maior valor e a média dos valores de estimativas de erros sem filtragem da medição de gap também foram relatados como ErroMaxSTL e ErroMedSTL, respectivamente.

As medições foram realizadas com auxílio de uma rotina inicial de procura de chanfro, de modo que os sensores iniciaram a medição no primeiro ponto válido sobre a junta que encontraram, partindo de uma posição anterior à junta. Além da procura de junta, os sensores gravaram até o último ponto reconhecido da junta.

Uma estimativa de erro máximo aceitável para estes sensores serem considerados para aplicação em seguimento de junta e soldagem adaptativa é estabelecida com base no trabalho de Clocksin *et al.* [126]. Neste trabalho, os autores, que utilizaram chapas de 1,0 a 2,0 mm, consideraram ideal um sistema que tivesse erro máximo menor que $\pm 0,5$ mm. Por experiência das aplicações prévias realizadas internamente no LABSOLDA – UFSC, sistemas que tinham erro máximo de $\pm 0,3$ mm desempenham bem para seguimento de junta [38] [28] [2] [29]. Desse modo, o critério adotado por Clocksin *et al.* [126] será respeitado para avaliação dos sensores estudados.

O estudo focado na medição específica da abertura de raiz (*gap*) foi proposto justamente por essa ser uma das variáveis mais importantes ao sistema de soldagem adaptativa

(no caso do passe de raiz). Os parâmetros elétricos da fonte de soldagem e a dinâmica de movimentação da tocha precisam ser ajustados com base em dados concretos de abertura de raiz, uma vez que esse passe (passe de raiz, primeira solda permanente da união) é crítico e determinará o andamento de toda a operação por ser uma condição necessária ao sucesso da execução. Desse modo, é interessante que os sensores apresentem a melhor qualidade de medição possível para este parâmetro.

5.3 DESENVOLVIMENTO DO *SOFTWARE* DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

Buscando não só consolidar uma base tecnológica teórica com as avaliações dos sensores comerciais como fonte de conhecimento para desenvolvimentos de sensores nacionais deste tipo, também foi proposto o desenvolvimento e publicação de um *software* livre para processamento de imagem para STL

Um *software* deste tipo, além de inédito, irá colaborar no acesso a esta tecnologia por pesquisadores e desenvolvedores independentes brasileiros, com grande potencial para também ser utilizado em sala de aula como material didático.

A ideia é ter, ao final do desenvolvimento, uma plataforma em ambiente de *software* livre que possa servir de base para projetos futuros de outros desenvolvedores, com total independência para com o LABSOLDA ou mesmo o autor deste trabalho.

Um *software* deste tipo possibilitará inclusive avaliação de diferentes algoritmos de processamento de imagem, a exemplo dos descritos no Capítulo 4, bem como a proposição e avaliação de novos algoritmos pertinentes ao desenvolvimento de STL.

A fim de validar o *software*, foi necessário compilar diversas imagens capturadas por um STL em situações reais de soldagem, de modo a se obter uma resposta dos algoritmos quando operando nessas situações. Deste modo, a primeira ação desta etapa se concentrou na captura destas imagens.

5.3.1 Bancada para captação de imagens de STL durante a soldagem

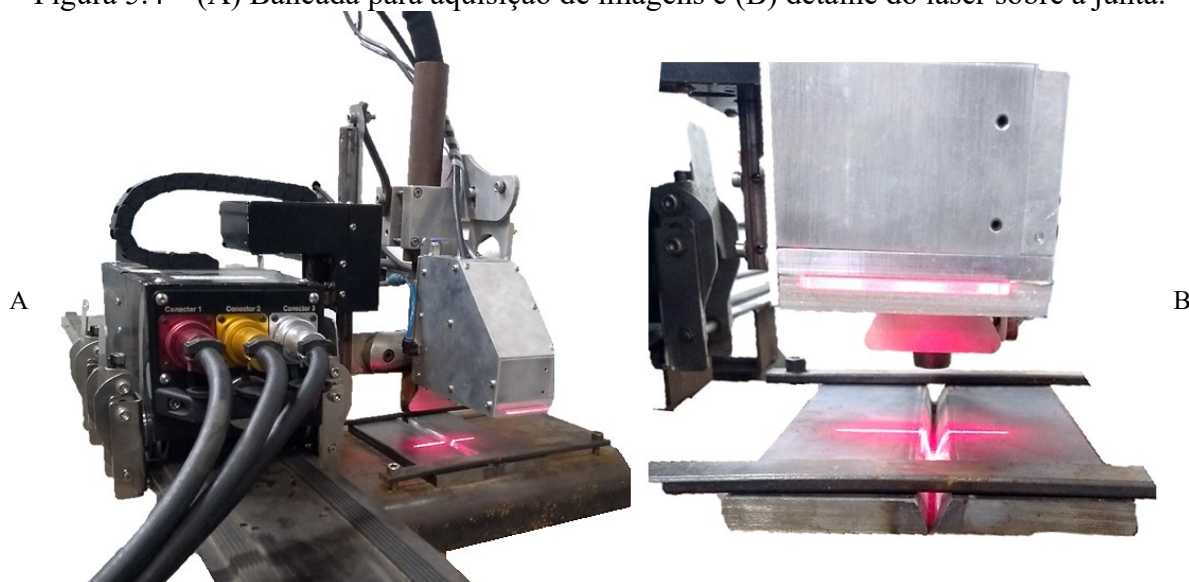
Pela grande representatividade na indústria em geral e pelo grande potencial de automação apresentado por esta variante, o processo de soldagem MIG/MAG é considerado para a realização dos ensaios de captação de imagens de soldagem. Buscando coletar as imagens

em situações reais de soldagem, foi considerado o aço ao carbono para fabricação dos corpos de prova, que foram usinados para montagem de chanfro do tipo V por esmerilhamento manual.

O STL de fabricação do LABSOLDA, produzido no trabalho de Puhl [8], foi escolhido para aquisição das imagens, principalmente pela facilidade no controle dos parâmetros do sensor de imagem e certeza de captação sem interferências de *hardware* ou *software* nativos do equipamento. Para isso, foi utilizado o pacote de desenvolvimento do próprio fabricante para aquisição das imagens [127]. Apenas o parâmetro de tempo de exposição foi ajustado na câmera, de modo a obter uma boa imagem da linha laser, assim como seria ajustado no caso de utilização desta câmera para montagem de um STL. O sensor foi utilizado em 30 frames por segundo, fazendo aquisição de uma nova imagem sempre que possível, independentemente da sua trajetória sobre a peça soldada. A posição do sensor sobre a peça foi registrada para cada foto, porém não era imperativo que a posição fosse alterada de uma foto para outra para que uma nova imagem fosse capturada.

Para deslocamento do conjunto tocha/STL foi utilizado o robô *Tartilope V4* da fabricante SPS [128], compatível com a massa deste conjunto e a velocidade de soldagem vislumbrada. Para a soldagem em si, a fonte de soldagem *Digiplus A7* da fabricante IMC [121] foi considerada pela grande liberdade de controle das variáveis do processo MIG/MAG.

Figura 5.4 – (A) Bancada para aquisição de imagens e (B) detalhe do laser sobre a junta.



5.3.2 Metodologia para captação de imagens de STL durante a soldagem

Uma vez que há a demanda por imagens em situações reais de soldagem adquiridas com um STL, é importante definir tanto os parâmetros de captura destas imagens quanto os parâmetros de soldagem para realização destes ensaios.

De modo a forçar a captura dos ruídos mais comuns de soldagem causados pelo do processo MIG/MAG Convencional, foi considerada a utilização de um processo de soldagem “mal regulado”, forçando intervalos de curto irregulares, reabertura do arco em níveis altos de corrente e total irregularidade na transferência metálica. Esta combinação de fatores negativos à boa soldabilidade se traduziu na produção excessiva de respingos, salpicos e reflexos do arco, ruídos bastante comuns e que tendem a influenciar bastante as imagens capturas por STL ao não serem completamente barrados pelo filtro passa banda do sensor. Os parâmetros utilizados para soldagem estão disponíveis na Tabela 5.4. O gás de soldagem utilizado foi a mistura 25% CO₂ e 75% Ar, na vazão de 12 L/min. A solda foi realizada sobre chapa de aço SAE 1020, de 9,5 mm de espessura, com chanfro em V de 60° de abertura total. O arame utilizado foi o ER70S-6 (conforme AWS 5.18 [129]) de 1,2 mm de diâmetro. Os parâmetros K_s e K_d são inerentes às fontes deste fabricante (IMC) e regulam a indutância da fonte, sendo adimensionais.

Tabela 5.4 – Parâmetros de soldagem MIG/MAG para aquisição de imagens.

Tensão	K_d	K_s	Velocidade de arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)	DBCP (mm)
23,2 V	70	90	3,2	5,0	20

5.3.3 Software para processamento de imagens de STL

O objetivo principal deste trabalho é a assimilação de conhecimentos científico e tecnológico sobre sensoriamento a laser, visando principalmente a nacionalização destes. Por esse motivo, é interessante que a plataforma de desenvolvimento deste sistema seja de amplo acesso aos demais pesquisadores e instituições de ensino, de modo a permitir a reprodução dos conhecimentos aqui agregados e a continuação dos trabalhos de maneira independente.

Assim sendo, a utilização de *software* livre é atrativa para o desenvolvimento deste trabalho. Além de concentrar a programação em ambiente Linux, também foi utilizado um compilador popular entre os desenvolvedores, a plataforma *Qt*. Quanto às ferramentas

computacionais, as *toolboxes* de visão computacional compiladas no conjunto denominado *OpenCV* [80] estão no foco desta publicação, de modo a tornar este desenvolvimento o mais amplamente acessível possível, na contramão de vários institutos e laboratórios de instituições de ensino superior brasileiras que concentrem seus desenvolvimentos nas plataformas pagas, principalmente as estrangeiras.

Partindo desta premissa, foi idealizado um *software* que possibilita o ensaio de diversos filtros e métodos, além da combinação dos mesmos em qualquer ordem desejada, possibilitando a experimentação de várias *pipelines* de processamento de imagem em um único ambiente. A *pipeline* é a sequência de ferramentas de visão computacional, o algoritmo de processamento de imagem, que possibilita ao computador realizar a segmentação da imagem e a identificação de pontos de interesse na mesma [71].

Este *software* precisa oferecer a opção ser facilmente adaptado para trabalhar com aquisição em tempo real de imagens provenientes de uma câmera de conexão *Ethernet* ou *USB*. Caso o usuário deseje utilizar as imagens capturadas neste trabalho ou imagens de outras fontes já salvas, o *software* precisa trabalhar com imagens salvas, previamente capturadas por um STL comercial ou de desenvolvimento próprio.

O *hardware* utilizado para desenvolvimento deste *software* e processamentos de imagens relatados neste trabalho foi: CPU Intel I7 6700, 16 GB memória ram DDR3 1600 MHZ, VGA Nvidia GTX 750ti 2 GB e SSD Sandisk Plus 240 GB. Apesar da compatibilidade de *hardware*, não foi utilizado nenhum recurso *OpenGL* para ganho de processamento com utilização da placa de vídeo.

6 AVALIAÇÃO DE SENSORES COMERCIAIS

A primeira etapa deste estudo consistiu na descrição detalhada de cada sistema avaliado, de forma a fornecer um contexto técnico às avaliações realizadas neste capítulo.

6.1 STL1 – SENSOR META VISION SYSTEMS

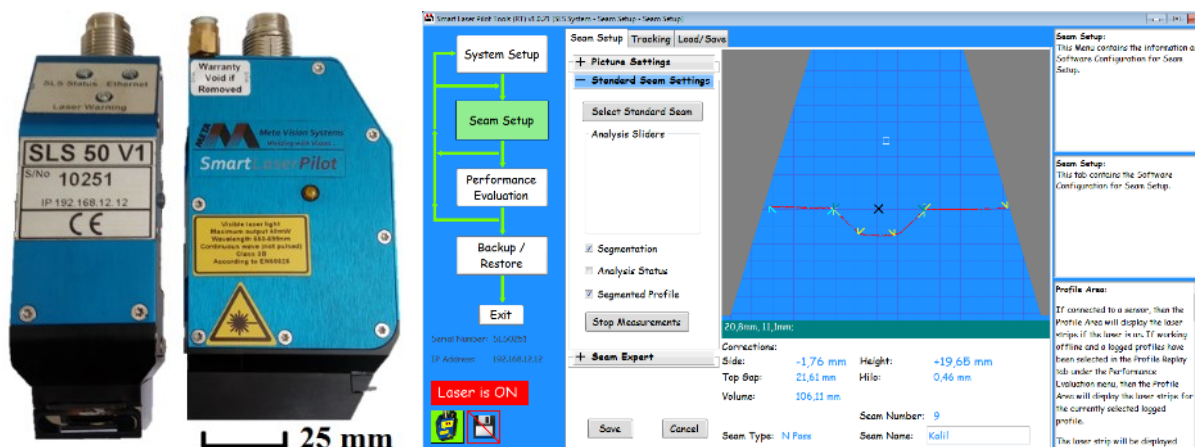
O sensor *SLS-050VI* foi escolhido para algumas aplicações anteriores no próprio LABSOLDA, o que o torna um excelente objeto de estudo uma vez que sua eficácia foi testada e aprovada em trabalhos anteriores [28] [2] [8] [29]. Este STL contém um sensor de imagem CMOS monocromático de 30 fps mínimo e um projetor laser de 30 mW, que trabalha no comprimento de onda de 685 nm, na faixa do vermelho visível [19]. Este sensor apresenta características únicas a seu fabricante, a Meta Vision Systems, sendo sua eletrônica toda embarcada no cabeçote.

Todas as imagens são capturadas, processadas e comunicadas ao operador através do cabeçote de medição, que recebe alimentação e conexão de rede *Ethernet* pelo único cabo de comunicação do sensor. Além disto, o STL1 demanda fornecimento contínuo de ar comprimido, água ou gás de solda para refrigeração de seu trocador de calor e de ar comprimido ou gás de solda para pressurização do cabeçote, de modo a evitar a entrada de partículas e fumos metálicos que possam afetar a eletrônica embarcada.

Este sensor tem comunicação via *Ethernet*, com taxa de aquisição mínima de 25 Hz e precisão de 0,1 mm, indicada pelo fabricante, com resolução horizontal de 0,05 mm e vertical de 0,08 mm [19]. Na Figura 13, além do sensor também está representada uma tela do *software Smart Laser Tools*, que acompanha este sensor. Este *software* é necessário para calibração dos perfis de junta já programados no sensor. Além disso, tem um modo de avaliação, que permite registrar as leituras do sensor para análise posterior.

Uma característica única deste sensor, que já foi abordada anteriormente, diz respeito a *firmware* e SDK para integradores independentes que acompanha o sensor, o que o torna muito mais versátil para os estudos propostos. Por esse motivo, este sensor foi utilizado como padrão de comparação no estudo e validação dos demais sensores.

Figura 6.1 – STL1: SLS-050V1 e *software* Smart Laser Tools.



Através das bibliotecas disponibilizadas pelo fabricante, além da leitura dos desvios do ponto de interesse, também é possível recuperar informações da imagem captada pelo sensor e da imagem segmentada, com a linha laser já isolada. Essa funcionalidade é interessante por possibilitar a aquisição de imagens em condição real de soldagem, que podem ser utilizadas para avaliação de algoritmos próprios de processamento de imagem para STL, no caso do desenvolvimento de um sensor próprio.

A captura do perfil da linha laser também é interessante por permitir o uso do sensor como scanner de superfícies, com levantamento de nuvens de pontos quando na integração com manipulador robótico ou deslocador automatizado das peças a serem mensuradas. Esse tipo de recurso pode ser utilizado para avaliação da qualidade dos passes depositados e do acabamento da solda, além da avaliação de eventuais descontinuidades. Todavia, essas funções de avaliação não são ainda disponibilizadas pelo fabricante, ficando por conta do utilizador a implementação de tal funcionalidade.

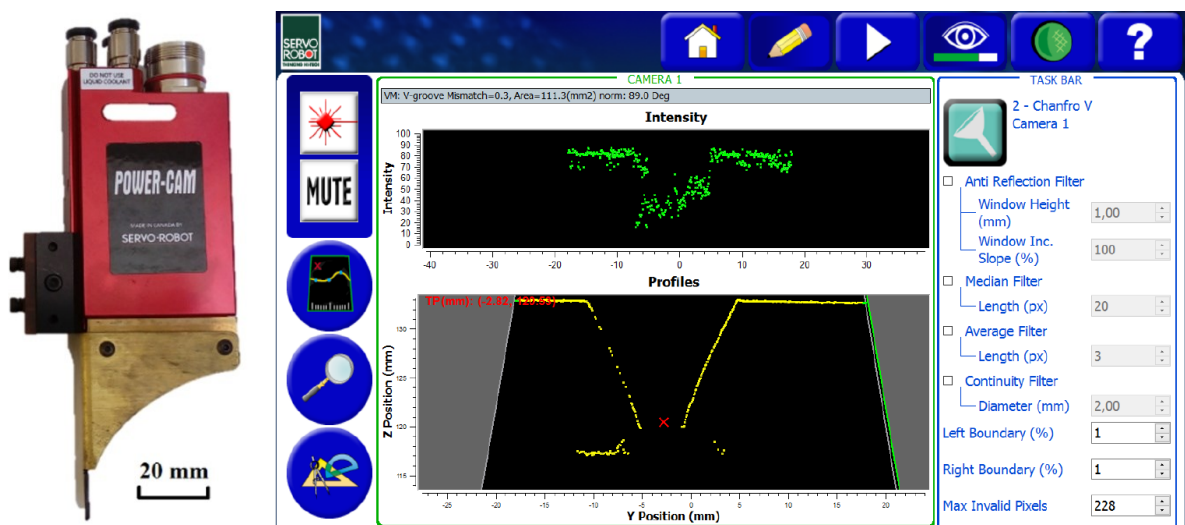
6.2 STL2 – SENSOR SERVO-ROBOT

A fabricante *Servo-ROBOT* disponibiliza uma gama de sensores, não se restringindo exclusivamente à instrumentação para soldagem. O sensor disponível desta fabricante para este trabalho é do modelo *POWER-CAM*, representado na Figura 6.2. O STL2 tem capacidade de medição em taxa de até 1000 Hz, sendo esta alta taxa alcançada via restrição da área de interesse do sensor de imagem; todavia, a taxa mínima de operação é de 30 Hz, similar à do STL1. A fabricante não informa o erro máximo, sendo a resolução de 0,09 mm no eixo horizontal e 0,05 mm no vertical [20], similar ao STL1.

Além do cabeçote de medição, este modelo vem acompanhado da *Power-Box*, uma interface de conexão entre sensor e computador ou controlador robótico, via *Ethernet*, além de ser responsável pelo processamento de imagens. O conjunto funciona com um software fornecido pelo próprio fabricante, chamado de *WeldCom*, que serve tanto para calibração do conjunto quanto para aquisição dos ensaios e inspeção da nuvem de pontos gerada [125].

Esse software possui uma extensão chamada *ADAP* [25], onde é possível se programar relações entre os parâmetros medidos e saídas analógicas e digitais da *Power-Box*. Esta funcionalidade permite controlar periféricos, como a fonte de soldagem e o manipulador robótico, realizando soldagens com algoritmos adaptativos. Por não ser desenvolvido especificamente para um certo fabricante de fontes, apesar da versatilidade, o *ADAP* apresenta algumas limitações, principalmente quanto aos canais de comunicação ou comando para com os periféricos.

Figura 6.2 – STL2: *POWER-CAM* e software *WeldCom*.



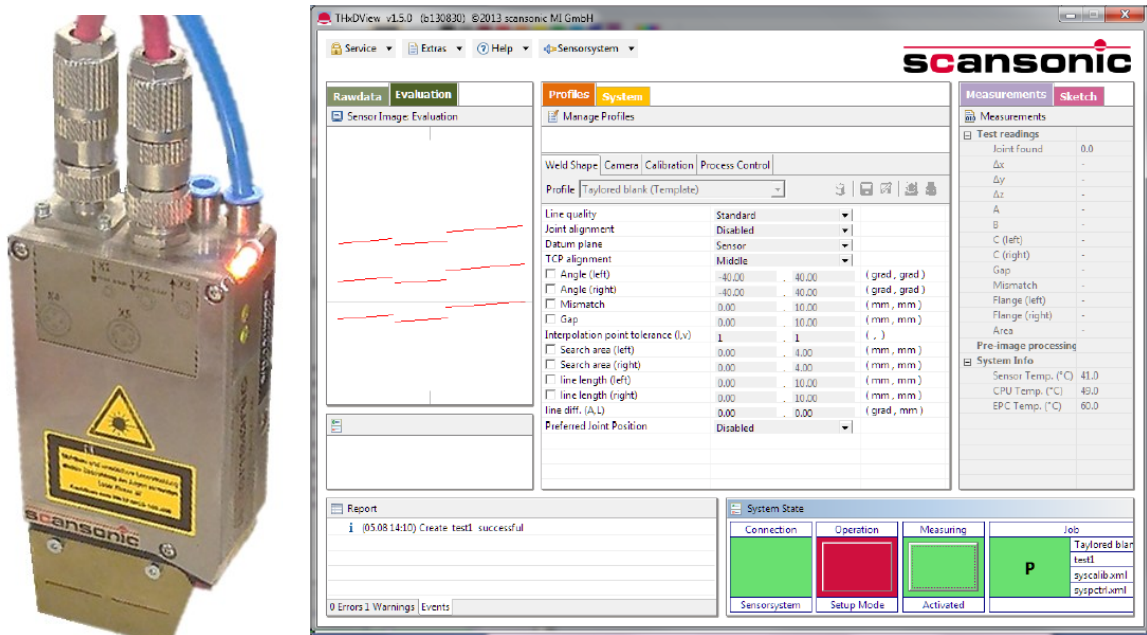
6.3 STL3 – SENSOR SCANSONIC-BINZEL

O STL3 é um sensor de três linhas modelo *TH6D-150-CF* da fabricante Scansonic-Binzel, o único sensor comercial dos três selecionados que tem representação oficial no Brasil até o momento da publicação. Apesar da representação, a empresa responsável, a Abicor-Binzel do Brasil não executa a integração do sensor até o presente momento, exercendo apenas o papel de treinamento para início de operação do sensor junto ao cliente. As

customizações podem ser feitas a pedido do cliente, porém precisam passar pela equipe de desenvolvimento alemã da marca.

Este sensor tem construção similar ao STL2, apesar de serem de fabricantes diferentes. Além da indicação de um arranjo parecido, o sensor também vem acompanhado de um computador de processo, denominado *EPCI* [65]. Uma peculiaridade deste computador é disponibilizar até duas portas de rede *Ethernet* para conexão entre o computador do sistema adaptativo e o *EPCI*, através do *software* que acompanha o conjunto, o *THxDView* [46]. A Figura 6.3 retrata o STL3, *TH6D-150-CF*, além de uma tela do *software THxDView*.

Figura 6.3 – STL3: *TH6D-150-CF* e *software THxDView*.

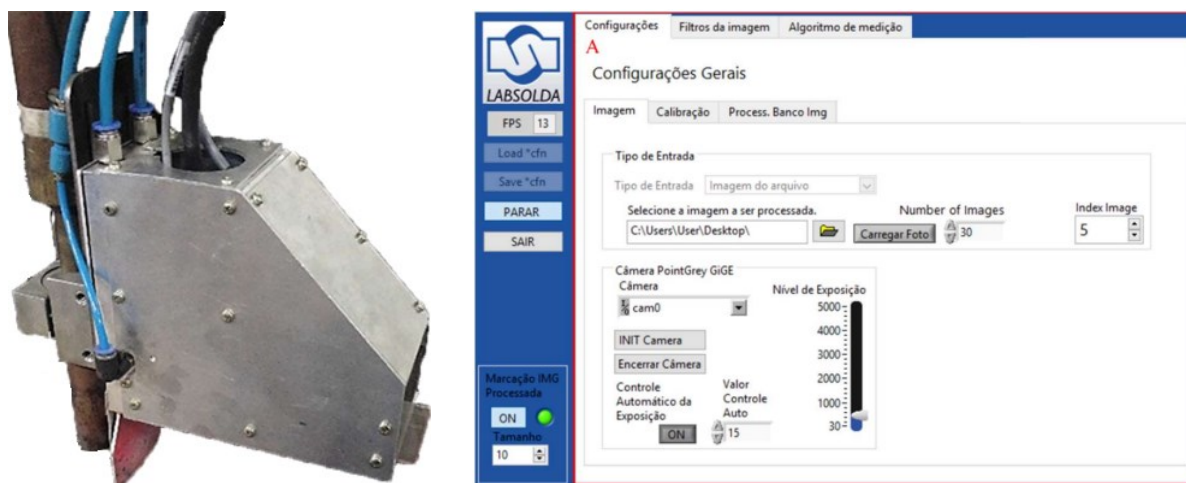


O STL3 tem algumas especificações mais limitadas que os demais STL considerados, como a profundidade de medição de 24 mm e o campo de medição entre 13 mm e 15 mm [21]. Estas restrições se traduzem em refino da resolução do sensor, o que representa uma vantagem para este sensor nos ensaios de desempenho. Ainda, essas restrições dimensionais da área de medição demandaram o projeto de peças de porte pequeno, se comparado à capacidade de medição dos demais cabeçotes selecionados. Desse modo, esperava-se que o desempenho do STL3 fosse superior aos demais, além do fato de trabalhar com projeção de três linhas.

6.4 STL4 – SENSOR DE DESENVOLVIMENTO NACIONAL - LABSOLDA

O STL4 foi desenvolvido como parte do doutoramento de Puhl [8], constituindo um marco no LABSOLDA pelas possibilidades de desenvolvimentos futuros que esta ferramenta propicia. Visando atender as demandas pertinentes à época de seu desenvolvimento, o sensor tem algumas especificações mais abrangentes que os demais STL considerados, como o campo de medição de 60 mm e a profundidade de medição de 80 mm [8]. Apesar dessa maior capacidade espacial, a resolução do sensor ainda é comparável à do STL1 e STL2, que também são sensores de uma folha de luz. A Figura 6.4 apresenta o STL4 e uma tela do *software* desenvolvido para o mesmo na plataforma *LabVIEW-2017* [130].

Figura 6.4 – STL4: Sensor LABSOLDA e *software* próprio desenvolvido em *LabVIEW*.



6.5 AVALIAÇÃO DE *HARDWARE*

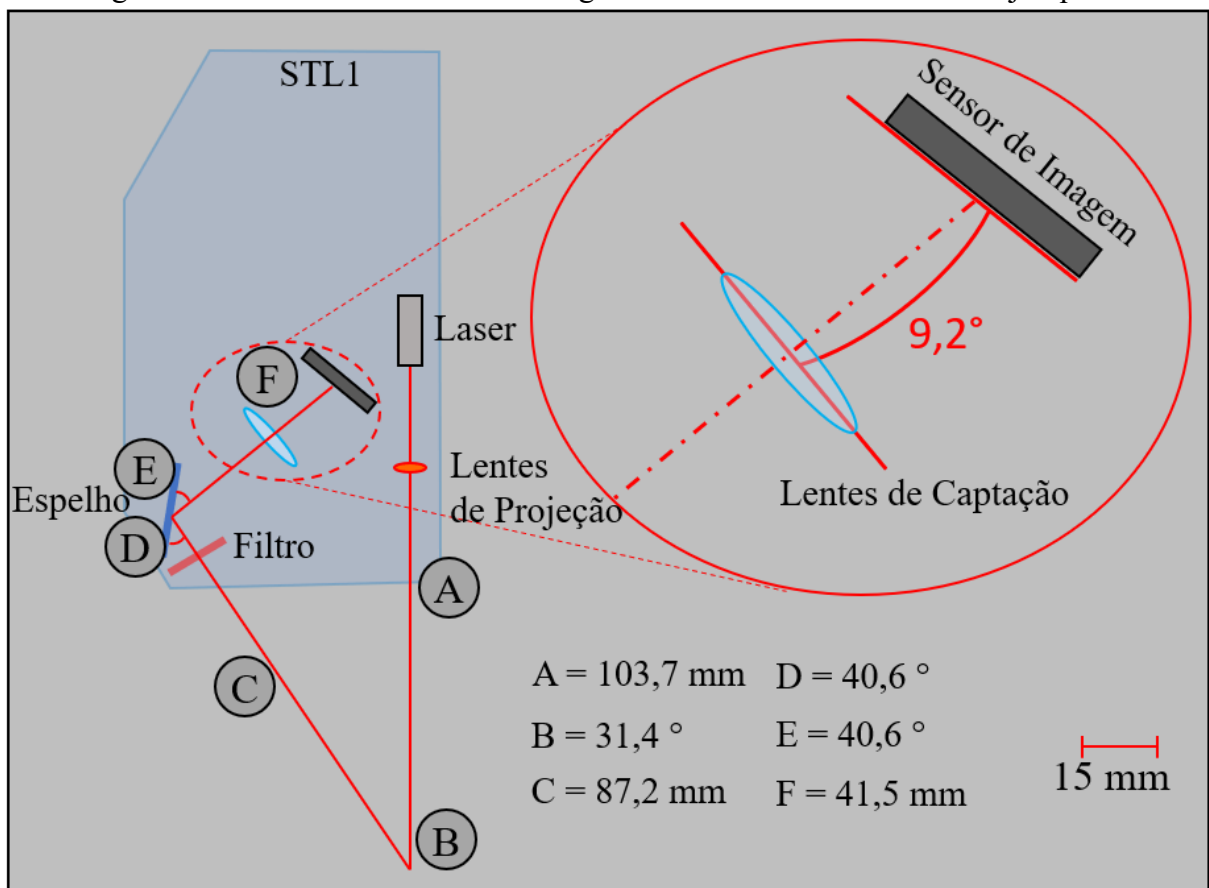
Buscando elucidar as estratégias de *hardware* adotadas pelos fabricantes de STL comerciais, alguns ensaios foram propostos. Os primeiros buscam apurar as soluções de arranjo óptico adotadas por cada fabricante considerado, de modo a nortear futuros desenvolvimentos de STL com base nos arranjos praticados na indústria atual.

6.5.1 Arranjos ópticos dos sensores

A Figura 6.5 demonstra o resultado da tomografia do STL1. Na imagem é possível notar alguns dos elementos básicos de um STL, como o sensor de imagem, o emissor laser, o

conjunto óptico de captação e o filtro, além do arranjo com o feixe laser normal à superfície de interesse e o sensor de imagem em ângulo oblíquo. Através do ensaio também foi possível constatar a presença de um *hardware* embarcado do tipo FPGA (*Field Programmable Gate Array*), apesar de neste plano de corte não estar representado. Em planos anteriores e posteriores de corte é onde ficam alocadas a maior parte das placas de circuitos integrados, semelhante ao modelo representado no trabalho Haug e Pritschow [110]. O próprio fabricante sinaliza a utilização de uma FPGA para o processamento de imagens e execução das demais funções do STL1. Uma FPGA consiste em um arranjo de circuitos integrados que podem ser reconfigurados após sua fabricação pela programação do mesmo. Outros sensores comerciais também trabalham com arranjo óptico similar, principalmente os dos fabricantes KEYENCE (Figura 3.15) e RIFTEK (Figura 3.18), porém o fabricante do STL1 é o único que embarca o processamento de imagens no sensor.

Figura 6.5 – STL1: Resultado da tomografia com detalhamento do arranjo óptico.

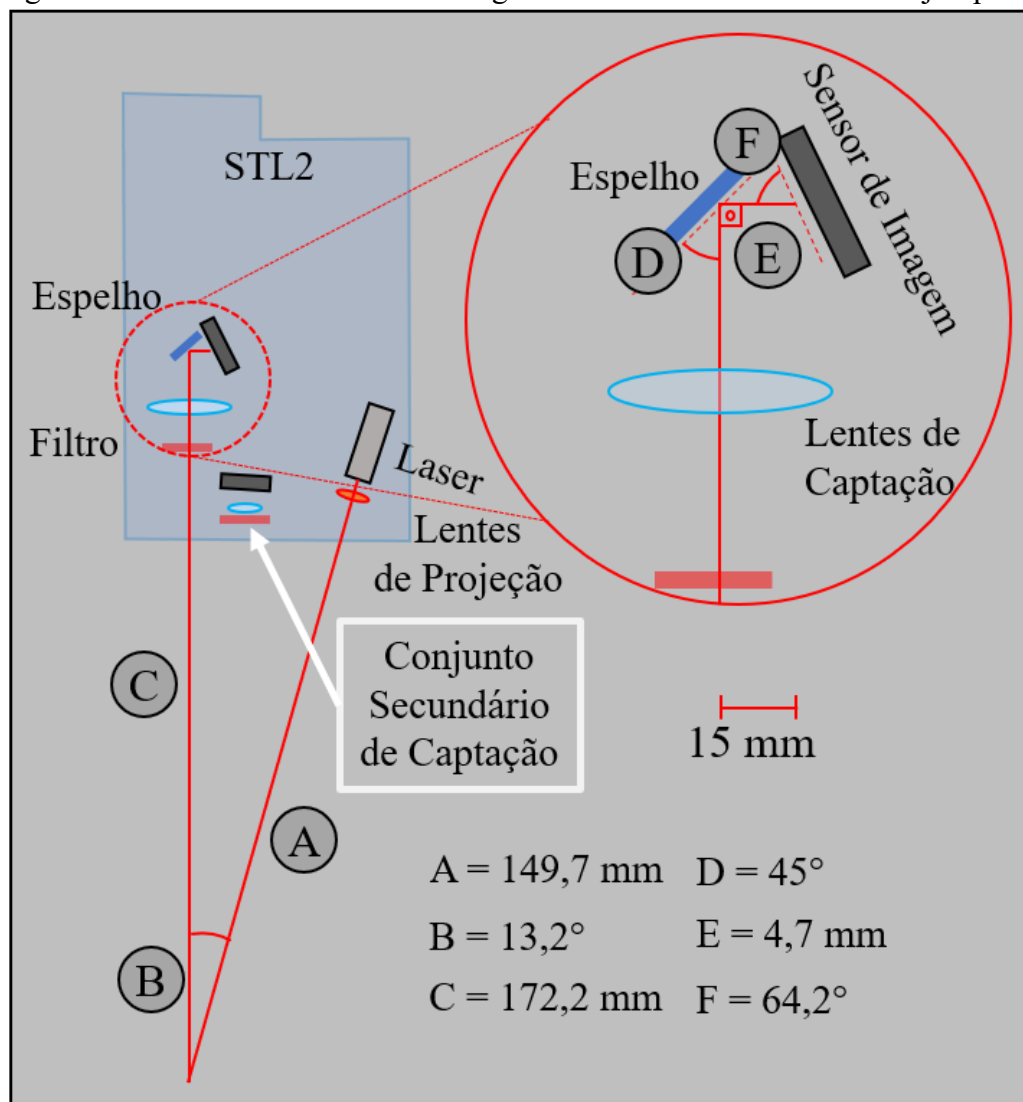


Ainda na Figura 6.5 está representado o detalhamento do arranjo óptico verificado no STL1 através da tomografia. O ângulo de 9,2° entre o sensor de imagem e o conjunto de lentes

é o ângulo de *Schleimpflug*, que possibilita o foco ideal para as imagens capturadas dentro do volume de medição do sensor, facilitando o processamento e conversão das medições em pixels para milímetros.

Na Figura 6.6 estão disponíveis imagens resultantes do END tomográfico do STL2. O arranjo dos elementos ópticos do STL2, conforme vislumbrado no ensaio não destrutivo, são do feixe laser oblíquo à superfície e do sensor de imagem paralelo à superfície da peça. Além disto, ficou evidente que no STL2 há dois sensores de imagem, o que é interessante do ponto de vista da automação. O sensor de imagem secundário, além de ser compacto e demandar poucos elementos extras para captação, o que facilita o projeto mecânico do STL, também é uma grande ferramenta para os operadores de soldagem, por possibilitar visualização em tempo real da situação de soldagem nas proximidades da peça.

Figura 6.6 – STL2: Resultado da tomografia com detalhamento do arranjo óptico.



Muitos serviços de alta complexidade, nos quais a utilização de um STL é quase que indispensável para automação do processo, demandam também uma câmera para visualização da situação de soldagem, de modo a possibilitar supervisão total remota pelo operador de soldagem. Assim, o STL2 já resolve duas demandas de uma única vez nesse tipo de situação. Todavia, a conexão com o sensor é feita por somente uma porta de rede *Ethernet* de capacidade 100 Mbit/s [131], o que já é um indicativo da baixa resolução de imagem do sensor secundário, a fim de evitar demandas acima do possível neste canal que transfere também os dados de medição e comandos do cabeçote laser.

A Figura 6.6 também detalha o arranjo óptico do STL2, onde é possível verificar indiretamente o ângulo de *Schleimpflug* como sendo igual a $19,2^\circ$ ($= 64,2^\circ - 45^\circ$), além de outros parâmetros do caminho óptico principal do conjunto. Além do detalhamento, diferente do STL1, o fabricante do STL2 recomenda que o mesmo seja utilizado com ângulo de 20° em relação à tocha.

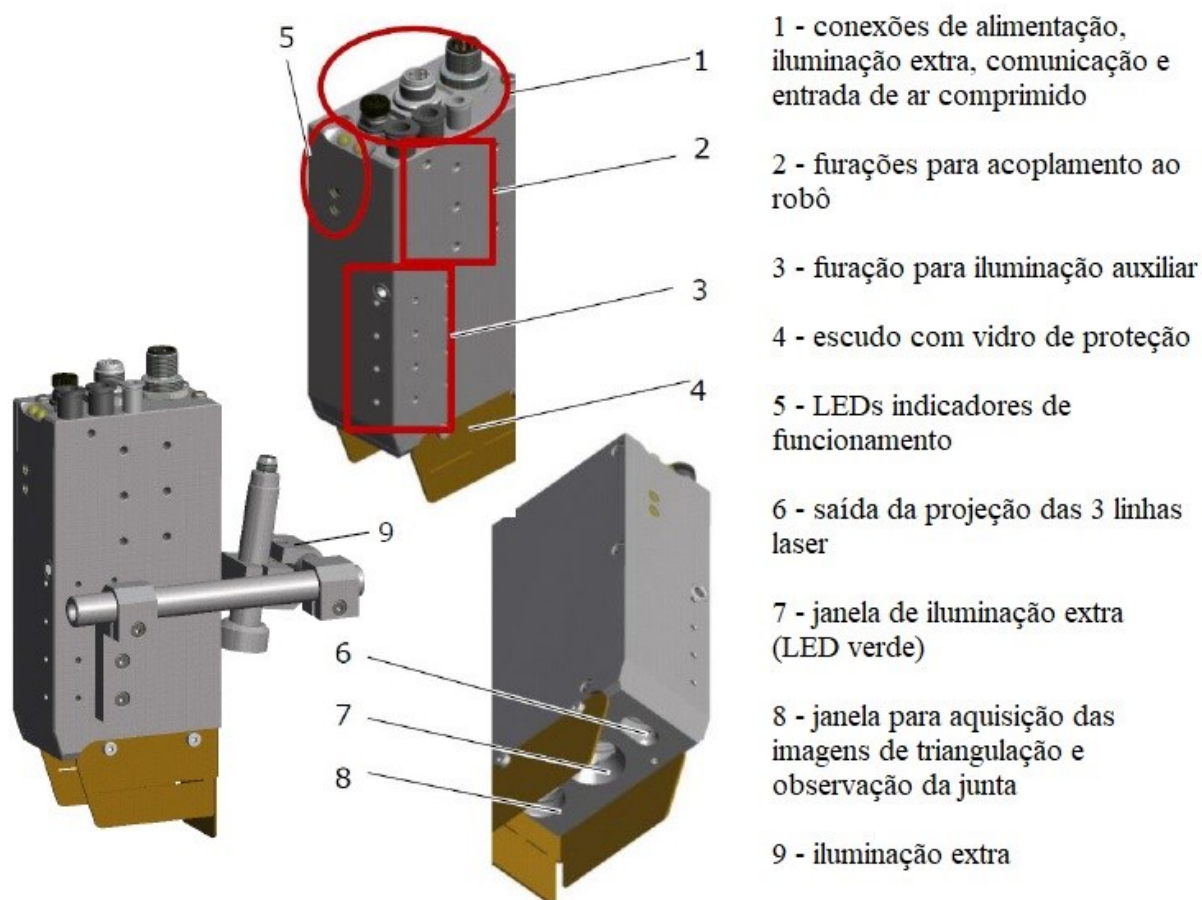
Uma vez que não foi possível a realização do END por tomografia no STL3 e nem a desmontagem do mesmo, por se tratar de um equipamento emprestado pelo fornecedor, restou basicamente a possibilidade de comparações visuais entre este sensor e os demais.

O STL3 utiliza uma arquitetura muito similar à esta do STL2. Além de contar com dois sensores de imagem, um para a triangulação e uma para observação da junta, este sensor também apresenta outros indicativos de trabalhar com um arranjo muito parecido com o do STL2, tanto pelos parâmetros operacionais do sensor (Tabela 5.1, observadas as proporções entre os volumes de medição de cada sensor) como pela própria observação dos sensores lado a lado, geometricamente similares e com elementos ópticos dispostos de maneira bastante similar (pela observação sem desmontagem dos sensores).

Em termos de projeto mecânico o *hardware* do STL3 parece ser o mais robusto dos quatro analisados, exibindo excelente qualidade construtiva e acabamento. Além disso, o sensor dispõe de várias furações auxiliares, para montagem no robô ou de sistemas de iluminação extras, o que facilita muito sua integração com diferentes robôs de soldagem e para diferentes aplicações. Estes recursos estão representados na Figura 6.7 (2 e 3).

Quanto à operação, o fabricante recomenda um *offset* mínimo de 10,0 mm para esse sensor, estando ele inclinado ou não em relação à tocha, sendo que o mesmo pode ser utilizado com inclinação entre 0° e 20° , a depender da situação de operação. Para chapas de materiais ou com acabamento mais reflexivos, o fabricante recomenda o uso de ângulo maior com a tocha, minimizando o efeito dos reflexos da linha nas faces do chanfro.

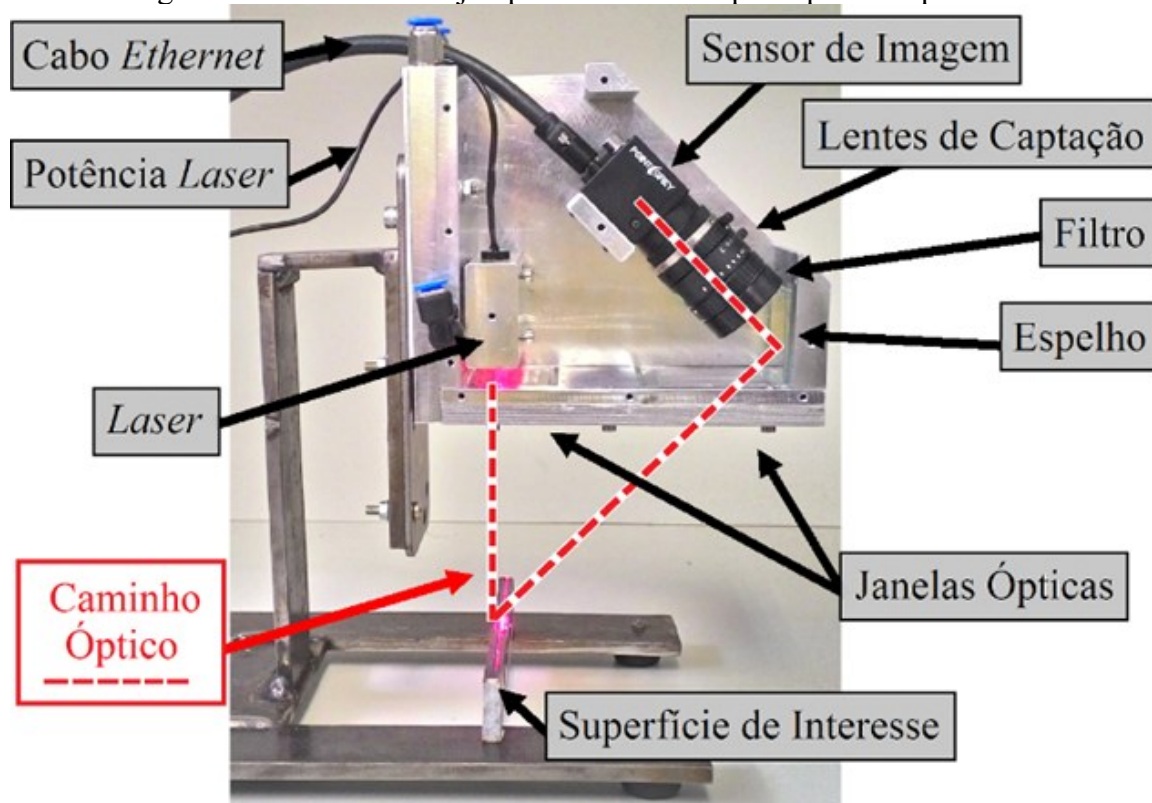
Figura 6.7 – STL3: Principais características mecânicas do sensor.



Fonte: Adaptado de [65].

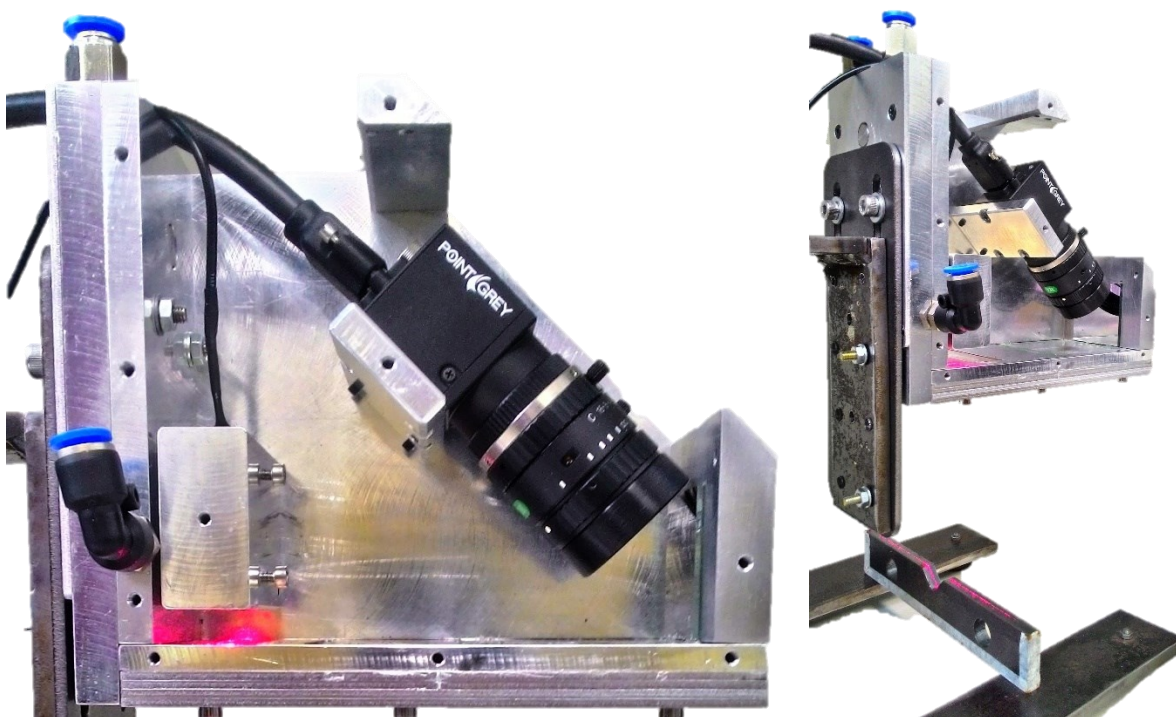
O STL4 não necessitou de um END para exploração de seu arranjo óptico, que inclusive está detalhado no trabalho de Puhl [8], o idealizador e construtor da primeira versão do sensor, representado na Figura 6.8. Comparado aos demais STL, este apresenta dimensões menos esbeltas, uma vez que ainda se trata de um protótipo. Quanto ao arranjo, este sensor tem disposição dos elementos similar ao STL1, com o feixe laser projetado normal à superfície da chapa e a câmera em ângulo oblíquo. Assim como com o STL1, o fabricante do STL4 recomenda que o mesmo seja utilizado na vertical, paralelo à tocha de soldagem. A Figura 6.9 demonstra a fixação do STL4 a uma tocha de soldagem MIG automatizada modelo *511 AUT* da fabricante TBI [120] (à esquerda), assim como uma representação do sensor sem a proteção lateral, com destaque para a câmera posicionado diretamente para o espelho de primeira superfície (à direita).

Figura 6.8 – STL4: Arranjo óptico do sensor e principais componentes.



Fonte: Adaptado de [8].

Figura 6.9 – STL4: Destaque para o sensor sem a proteção lateral montada.

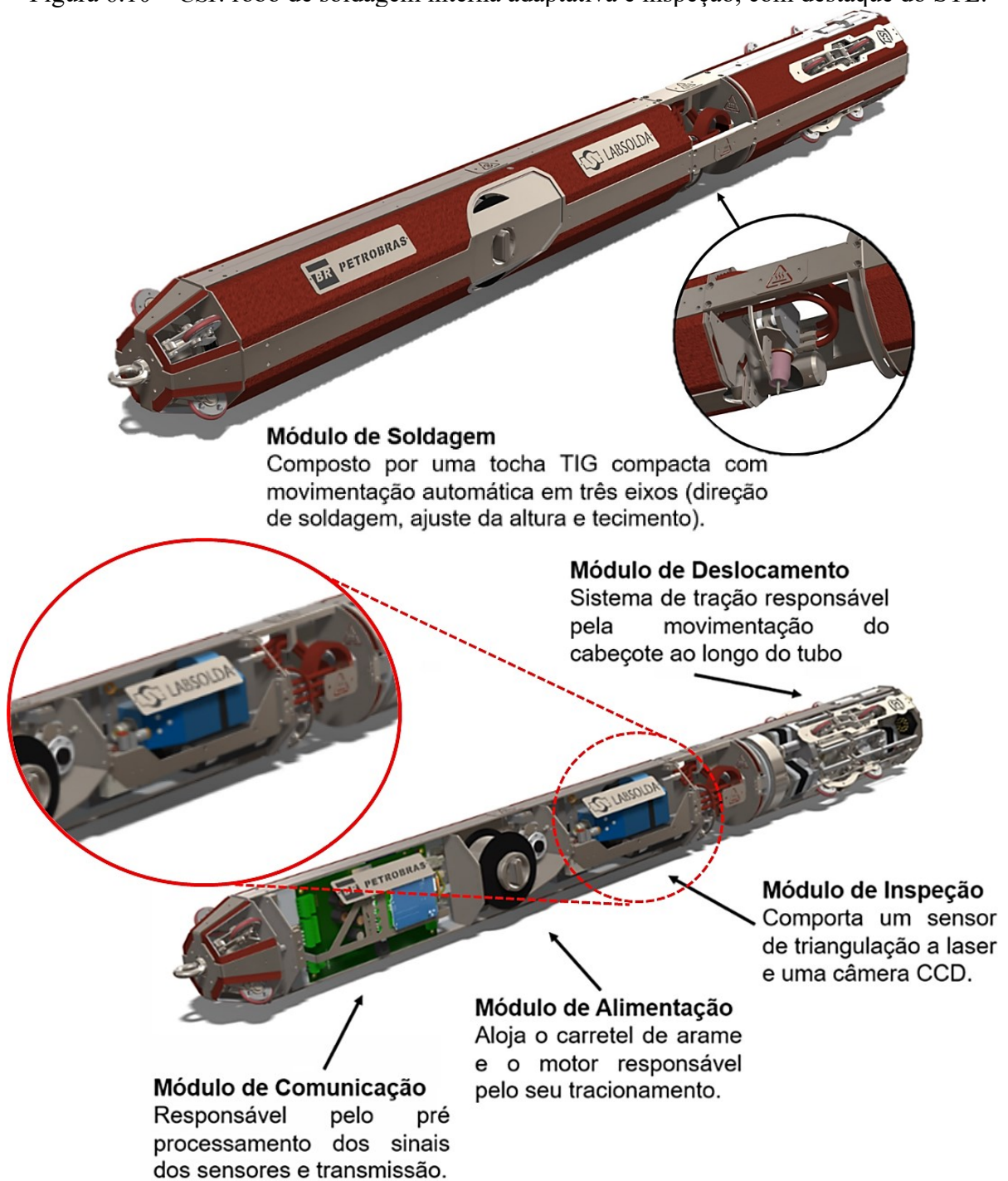


6.5.2 Principais recursos exclusivos de cada modelo

Um recurso único ao STL1 é que o mesmo possui um FPGA embarcado, responsável por realizar todo o processamento de imagens diretamente no cabeçote de medição. Este recurso, apesar de aumentar significativamente o grau de complexidade do projeto mecânico de um cabeçote de medição deste tipo, além de expor a eletrônica de alto valor agregado a riscos desnecessário (pode ser danificada em eventuais colisões, por exemplo), pode ter suas vantagens. A principal vantagem para este tipo de arquitetura é a facilidade de incorporação deste sensor ao restante do sistema de soldagem, pela compactidade do sistema.

Em situações de alta restrição volumétrica para operação dos robôs, sensores deste tipo, como o utilizado no *Cabeçote de Soldagem Interna – CSI* (Figura 6.10), que utiliza um sensor Meta Vision de modelo *SLS-025H*, próprio para espaços restritos. Neste projeto, que inclusive resultou em um pedido de patente (BR1020200150553), sendo desenvolvido concomitantemente com esta tese, o robô projetado consegue operar em tubulações com diâmetro igual ou maior que 5,5 pol, inclusive com seguimento de junta, soldagem adaptativa e inspeções dimensionais da junta e da solda ao final do processo.

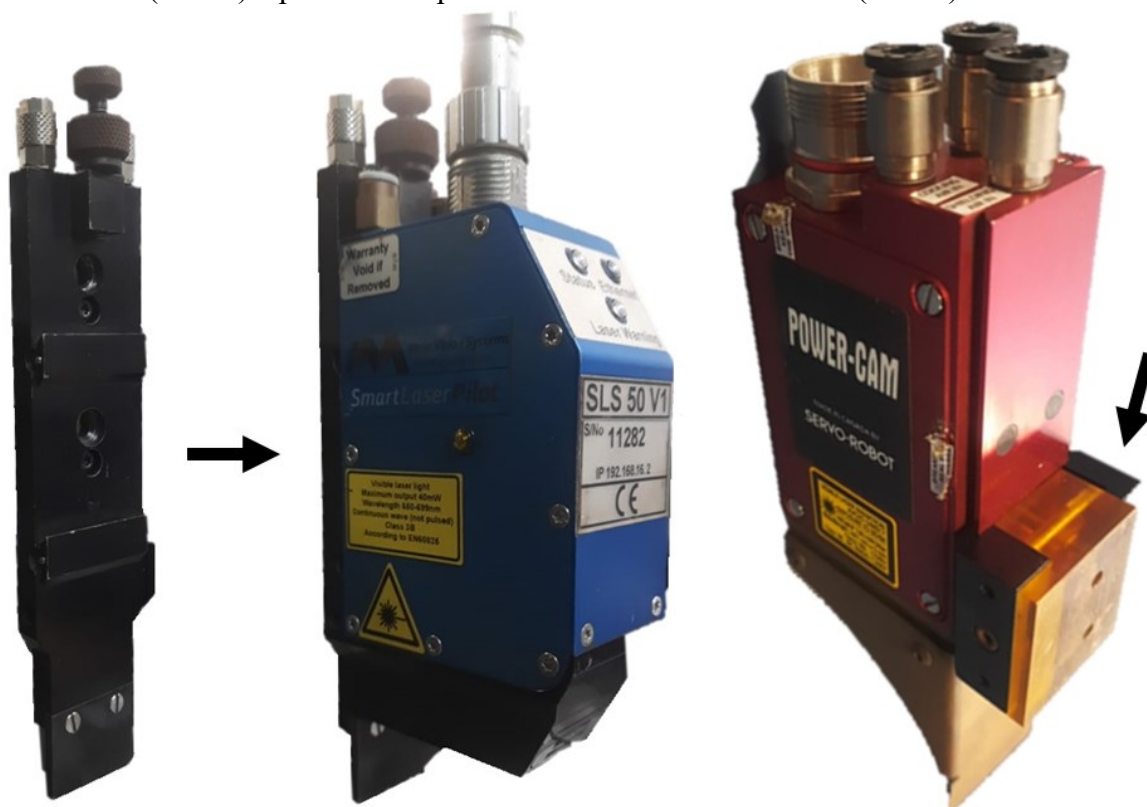
Figura 6.10 – CSI: robô de soldagem interna adaptativa e inspeção, com destaque do STL.



Outro recurso interessante deste sensor (STL1) é a placa de montagem do mesmo ao robô. Com um sistema de saque rápido, aliado a uma solução robusta de posicionamento sem folgas (compensado por esferas com molas), o suporte também conta com um circuito fechado para refrigeração do sensor. Apesar de na prática não ter tanto impacto na refrigeração do sensor como o ar comprimido que é fornecido diretamente no interior do cabeçote, o suporte

refrigerado auxilia na troca térmica, principalmente em soldagem com grande tempo de arco aberto. Esses casos de longa duração de período de arco são muito interessantes para a soldagem adaptativa, principalmente pelo potencial ganho de produtividade e mínimo retrabalho associados a um sistema deste tipo.

Figura 6.11 – Placa de acoplamento e resfriamento do STL1 (esquerda), montada ao sensor (centro) e placa de acoplamento e isolamento do STL2 (direita).



Os demais sensores avaliados possuem placas de refrigeração, porém integradas (fixas) aos cabeçotes, inclusive o STL2 e o STL4 com vedações das câmaras percorridas pelo fluido de arrefecimento para o lado de dentro dos cabeçotes. Por não conseguir desmontar ou radiografar o STL3, não foi possível avaliar se ele tem vedações do circuito de refrigeração para o lado de dentro, porém o projeto do mesmo e os aspectos construtivos indicam que sim.

O suporte que acompanha o STL2, apesar de não ser refrigerado, é construído em material isolante e de alta resistência a esforços físicos, sendo ideal para fixação direta ao braço robótico ou mesmo à tocha. O isolamento elétrico é muito importante nesse tipo de sensor, principalmente na utilização com processos de soldagem de alta corrente ou abertura de arco

por alta frequência, grandes fontes potenciais de dano para a eletrônica embarcada dos cabeçotes laser.

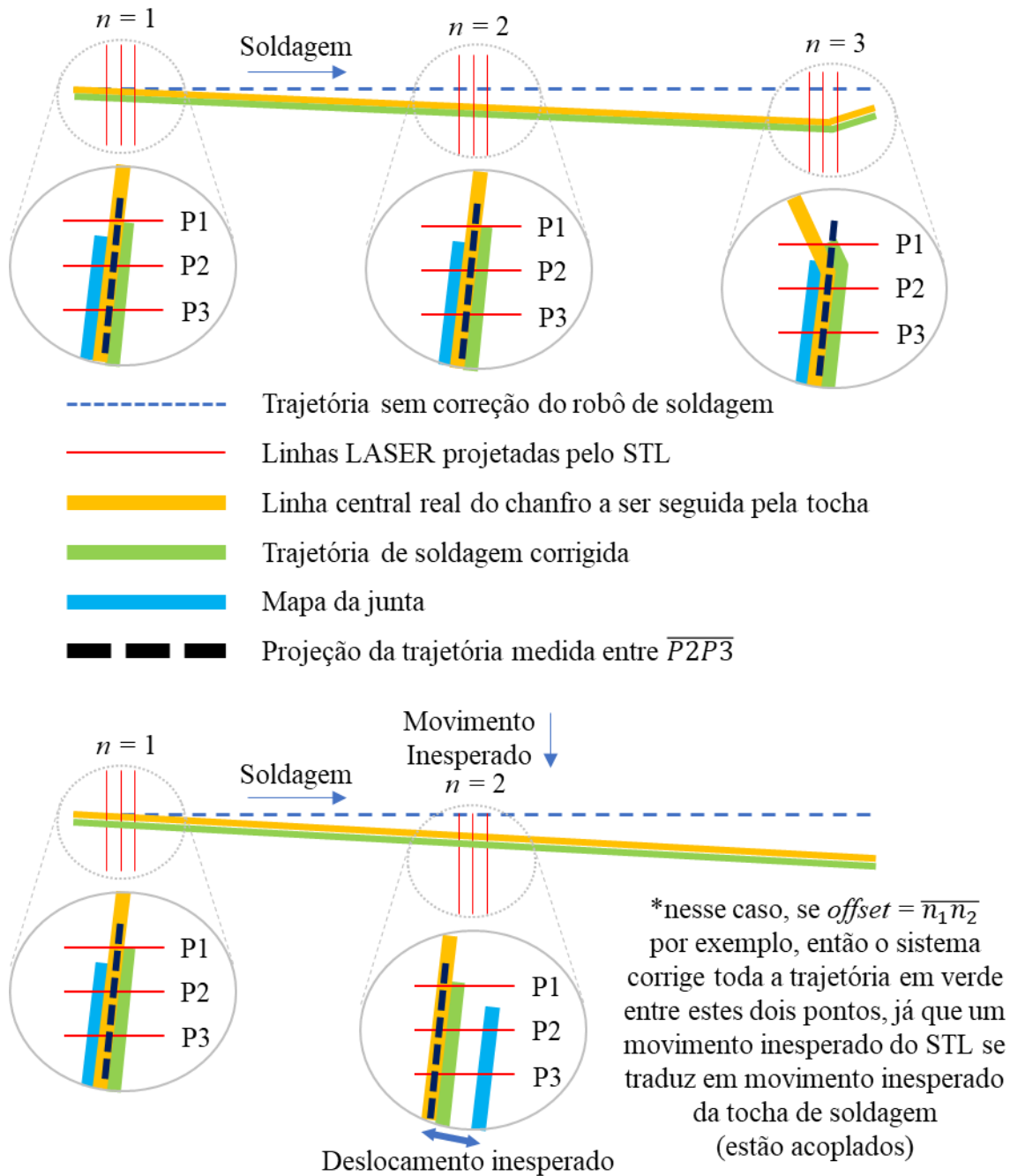
Além do suporte, como já foi dito anteriormente, este sensor dispõe de dois sensores de imagem, um para triangulação e um para visualização. O único aspecto contra deste arranjo é que os dois sensores dividem a largura de banda do mesmo canal de comunicação, o que não é o ideal para aplicações que requeiram alta taxa de medição. O STL2 também pode ser usado inclinado em relação à tocha, o que facilita na diferenciação entre os reflexos diretos da linha laser na superfície do chanfro e os ruídos por reflexos inesperados.

O STL3 é o único dos quatro sensores avaliados que dispõe de três linhas laser projetadas sobre a peça. Uma vez que esse sensor consegue captar a posição do chanfro em três distâncias diferentes na mesma imagem para com o sensor, ele consegue ser imune a problemas de rigidez do robô, como relatado no trabalho de Galeazzi [29].

Para obter tal efeito, o desenvolvedor deve se atentar para que a linha do meio, ou pelo menos a de trás (mais perto do arco), não ultrapassem o comprimento da junta onde foi registrada a última medição válida da linha da frente entre uma medição e outra. Desse modo, é possível comparar a variação da posição da junta com uma ou duas poses diferentes sobre o mapa da junta já registrado, eliminando deslocamentos do conjunto por falta de rigidez e registrando medições da linha da frente livres destas perturbações, perpetuando a qualidade do mapa da junta que é gerado.

Outra alternativa é simplesmente traçar uma reta que passe pelos pontos do meio e de trás e comparar esta reta com o mapa da junta para identificar possíveis movimentos inesperados da referência do sistema de aquisição, conforme demonstrado na Figura 6.12).

Figura 6.12 – Compensação de movimento inesperado do STL por sensor de três linhas.



Além da imunidade, a projeção de mais linhas auxilia também na precisão do sensor e abre espaço para novos desenvolvimentos em algoritmos, uma vez que há mais informações em cada imagem para serem interpretadas e utilizadas pelo projetista.

Outro aspecto muito positivo do STL3 está na presença de dois canais independentes de comunicação, um para as medições e outro para a câmera secundária de visualização. Esse tipo de implementação garante folga para a devida transmissão dos dados, sem uma rotina

atrapalhar a outra. Contudo, o fabricante ainda não disponibilizava opção de incorporar o vídeo ao vivo do sensor secundário a um *software* de terceiros, sendo necessário executar o *software* proprietário do sensor para conseguir acessar essa transmissão.

Um terceiro aspecto positivo do STL3 é a forma como ele fixa a janela óptica e o vidro de proteção ao sensor, com auxílio do próprio escudo de respingos, porém de modo a garantir a permanência da proteção independentemente da posição de soldagem (Figura 6.13). No STL1, por exemplo, soldagens na posição vertical descendente tender a causar a perda da janela de proteção, o que expõe a óptica do sensor a riscos desnecessários e de alto potencial destrutivo para o conjunto. O STL2 também dispõe de uma solução muito similar.

Figura 6.13 – Soluções para acomodação da janela de proteção óptica no STL3 (esquerda) e no STL2 (direita).



Fonte: Adaptado de [65] (esquerda) e [25] (direita).

O STL4, por se tratar de um protótipo, utiliza componentes *off-the-shelf* (direto da prateleira, em tradução direta), o que representa uma grande vantagem. Como os componentes são todos comerciais, a manutenção de um sensor deste tipo é facilitada, principalmente por não depender exclusivamente de um único fornecedor ou de componentes altamente miniaturizados ou customizados. O ponto negativo é a pouca compacidade que o conjunto apresenta, que pode dificultar sua utilização em situações de alta restrição de espaço para operação e acesso à junta.

Todos os quatro sensores contam com entradas de ar comprimido, que além de propiciar uma pressão positiva no interior dos sensores (evitando entrada de partículas), também garante um fluxo de ar em temperatura razoavelmente constante entre o sensor e a peça, evitando distorções severas no caminho óptico do laser até o sensor de imagem. Este tipo de solução é um consenso entre praticamente todos os fabricantes de STL, além destes quatro.

6.6 AVALIAÇÃO DE SOFTWARE

A fabricante do STL1 trabalha com duas linhas principais de sensores, a *SLS* e a *SLS ARC*. Ambas as linhas de STL desta fabricante trabalham com 12 tipos básicos de chanfros, sendo que perfis especiais, diferentes dos presentes na Figura 6.14, requerem modificação necessariamente pela desenvolvedora, restringindo e encarecendo a utilização deste tipo de sensor em aplicações não convencionais. Dos quatro sensores avaliados, os três primeiros (STL1, STL2 e STL3) têm suporte para estes tipos de chanfro, somente o STL4 que ainda tem suporte apenas para chanfros do tipo V, enchimento e inspeção. O STL2 também tem suporte a perfis exclusivos para inspeção.

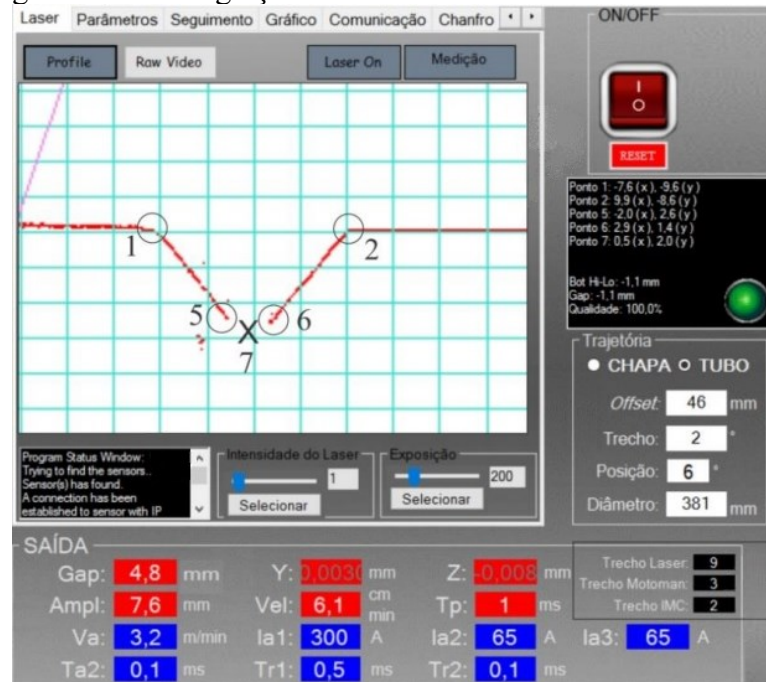
Figura 6.14 – Padrões de junta pré-programados nos sensores *SLS* e *SLS Arc*.



Fonte: [28].

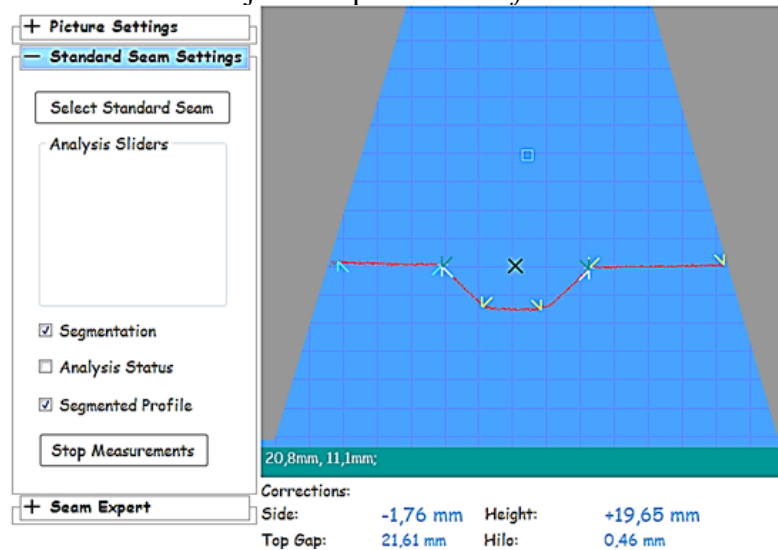
Quanto ao *software* disponibilizado pela fabricante, além de uma SDK (*Software Development Kit*) que contém os comandos básicos de comunicação e troca de parâmetros do sensor, facilitando a integração deste sensor a outros *softwares* de soldagem adaptativa, como a PCA, por exemplo. Na Figura 6.15 está retratada a primeira integração do STL1 com a PCA, em sua versão inicial. Há também um *software* próprio para a calibração dos perfis pré-programados e criação dos parâmetros salvos para acesso rápido durante a operação.

Figura 6.15 – Integração do STL1 à PCA em sua versão inicial.



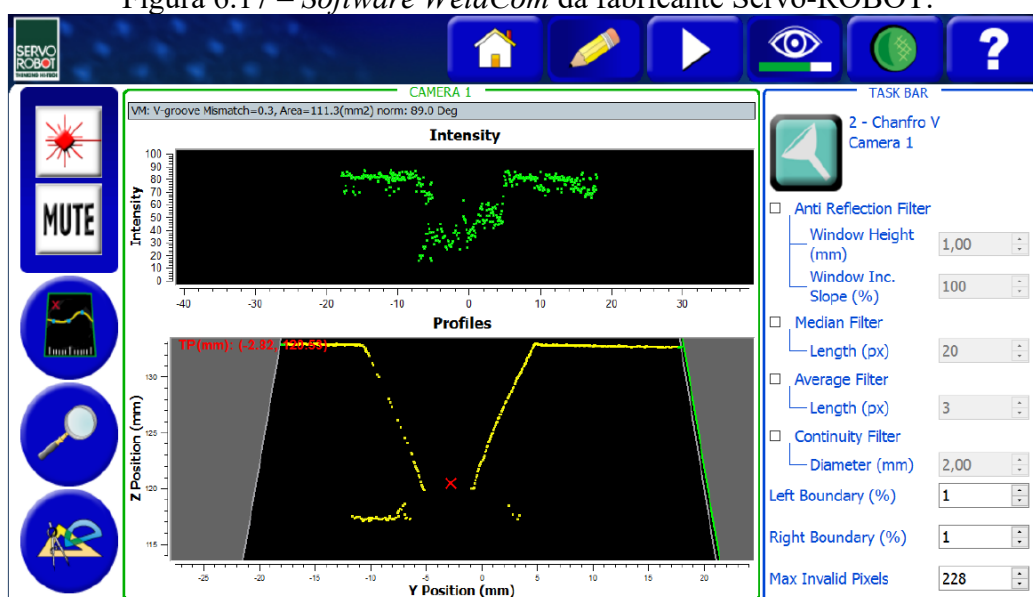
Este *software*, denominado *Smart Laser Tools*, apresenta interface minimalista e de fácil operação, conforme ilustrado na Figura 6.16. Através deste *software*, o operador é solicitado a marcar manualmente os pontos de inflexão da junta sobre o perfil tratado da linha laser real, visualizada pelo sensor sobre a peça de trabalho, o que melhora muito a qualidade das medições, desde que o operador sinalize corretamente ao *software* os pontos solicitados, conforme exibido nos gabaritos disponíveis na mesma tela de marcação destes pontos.

Figura 6.16 – Tela de ajuste de padrão do *software Smart Laser Tools*.



Os *softwares* que acompanham os sensores *POWER-CAM* são o *WeldCom* e o *ADAP*. O primeiro faz a comunicação direta com o sensor, possibilitando ajuste de parâmetros de imagem e de cálculos sobre os pontos medidos; o segundo possibilita a programação de um conjunto de parâmetros para realização de soldagem adaptativa, porém está diretamente ligado à capacidade do robô no qual o sensor vai instalado. Uma captura de tela do *software WeldCom* está retratada na Figura 6.22. Este *software*, apesar da aparência minimalista, é bastante complicado para o operador, que deve acumular algumas horas de teste com o equipamento para conseguir operá-lo de forma satisfatória.

Figura 6.17 – *Software WeldCom* da fabricante Servo-ROBOT.



Este *software*, além da opção de saídas digitais ou analógicas para integração com outros controladores, tem duas interfaces muito interessantes: de inspeção e de calibração dos algoritmos. Na Figura 6.17 está representada a tela de acompanhamento e calibração dos algoritmos, sendo que o primeiro campo, pertinente ao filtro Antirreflexo, que é um dos filtros mais interessantes de se utilizar com este sensor.

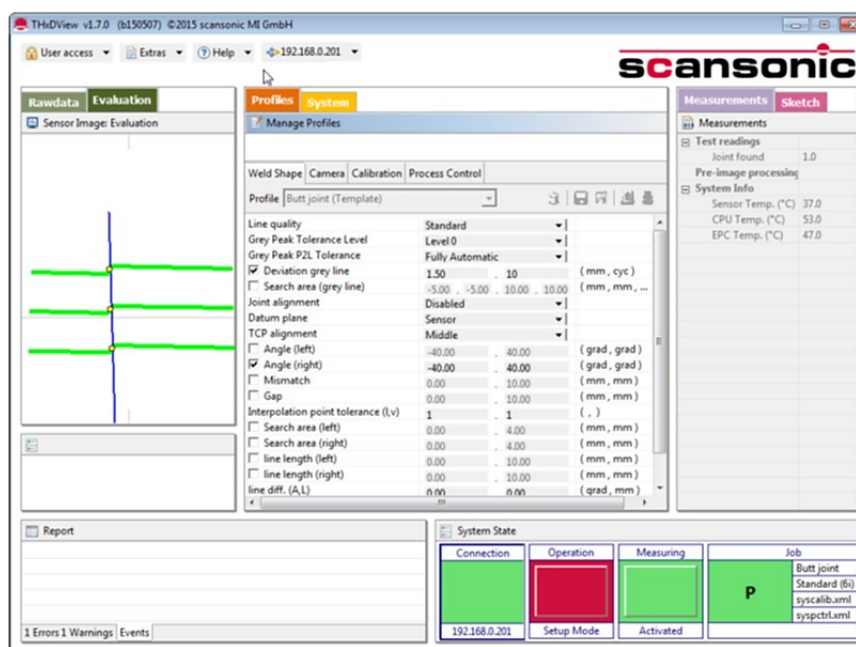
Outra característica interessante deste *software* é a disponibilidade de vários algoritmos para um mesmo perfil de junta, permitindo ao desenvolvedor testar diferentes soluções e achar a que se adequa melhor a sua solicitação.

O grande revés deste *software* é a postura que seu fabricante adota para com desenvolvedores independentes, não disponibilizando qualquer SDK genérica ou mesmo dando qualquer suporte a uma integração deste sensor com um sistema próprio de movimentação de

tocha. O único suporte é para grandes fabricantes de robôs, sendo que a *firmware* do sensor deve ser atualizada para atender a cada fabricante específico.

O *software* que acompanha os sensores *TH6x* (família do STL3), denominado *THxDView*, é bastante simples e intuitivo, porém os perfis pré-programados na memória do sensor requerem atuação direta do operador para funcionamento. Este programa trabalha com vários tipos de restrições, as quais o operador deve conhecer intimamente de maneira a conseguir algum resultado confiável do aparelho. Uma captura de tela deste *software* está ilustrada na Figura 6.18.

Figura 6.18 – Tela do *software THxDView*, usado pelo STL3.



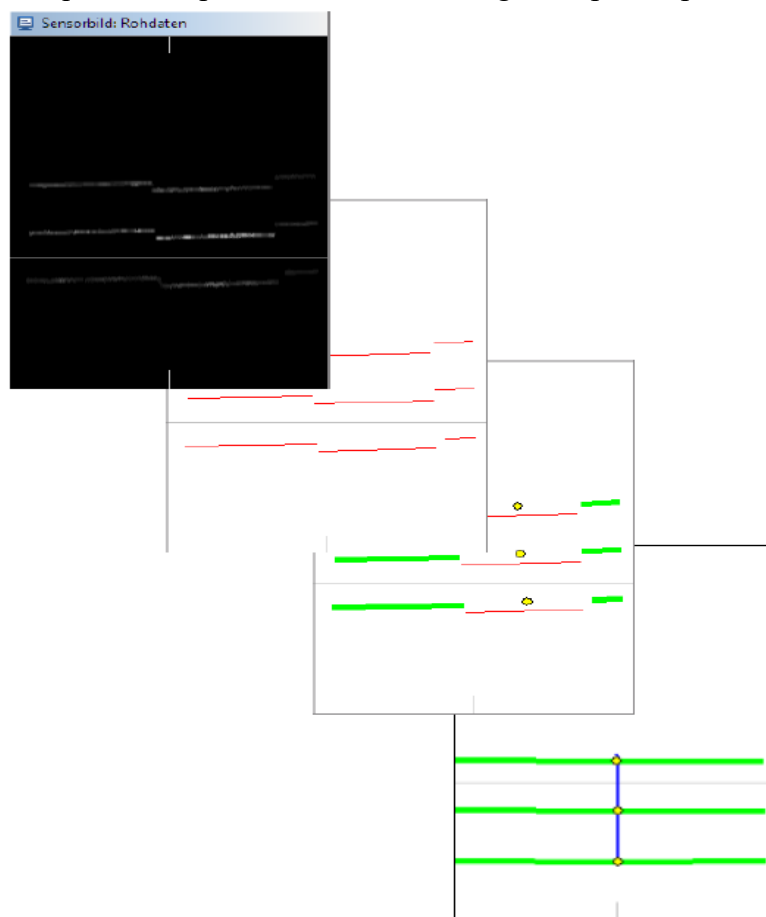
Fonte: [46]

Apesar da necessidade de conhecimento operacional do sensor para conseguir trabalhar satisfatoriamente com ele, a fartura de opções disponíveis ao operador possibilita customizar os perfis pré-programados para atender inclusive juntas com geometrias especiais, diferentes das convencionais encontradas na soldagem, como chanfros com 2 ângulos diferentes ou mesmo juntas com preenchimento parcial. Outro ponto positivo deste sensor é facilidade para verificar qual estágio do processamento de imagem está tendo dificuldades, de modo a facilitar a configuração dos perfis.

A sequência do processamento realizado por este *software* está representada na Figura 6.19, na qual o primeiro passo é o ajuste de exibição da imagem, seguido da filtragem

das três linhas laser (em vermelho), que são devidamente identificadas (mudam para cor verde), assim como os pontos de interesse de cada linha sobre a junta (em amarelo), que finalmente são validados e medidos (representada pela linha azul) pela média entre os três pontos.

Figura 6.19 – Sequência de processamento das imagens captadas pelos sensores *TH6x*.



Fonte: [65]

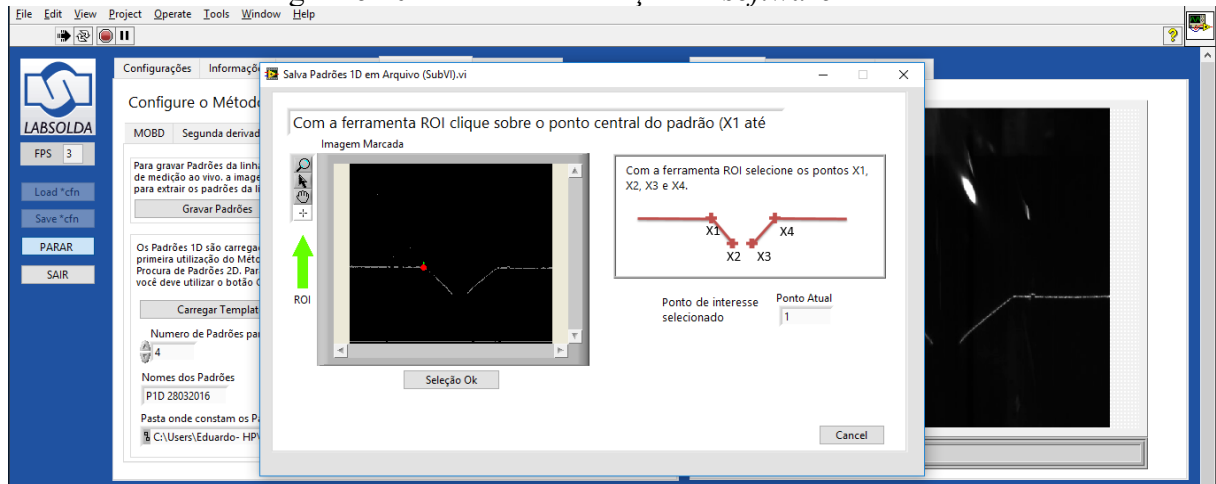
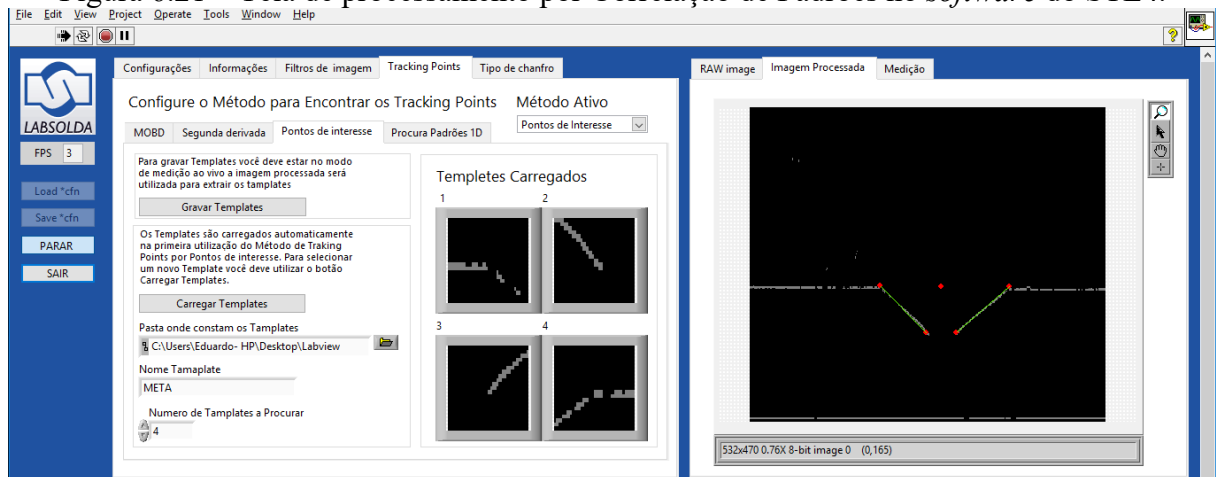
Algumas limitações do *software* estão principalmente em possíveis falhas de implementação ou *debug* do mesmo, que provavelmente serão corrigidas com atualizações futuras. Em alguns casos, as regras definidas não entram em ação até que alguma regra específica seja acionada, sendo que este comportamento não é descrito para o operador no manual do *software*, o que dificulta um pouco a calibração dos perfis novos.

Outro problema, conforme dito anteriormente, é a falta de opção de acesso direto ao vídeo do sensor secundário, que seria uma ótima ferramenta de marketing para um sistema comercial, além da possibilidade real de utilização desta função no acompanhamento da soldagem pelo operador.

A última dificuldade encontrada com este sensor foi a falta de uma SDK para desenvolvimento, sendo que o fabricante apenas disponibiliza um manual do protocolo UDP adotado na comunicação do sensor via *Ethernet*, o que requer um certo esforço computacional para iniciar qualquer comunicação com o cabeçote.

O *software* do STL4, desenvolvido originalmente em ambiente *LabVIEW*, apresenta uma interface intuitiva e bem organizada, limitada apenas pelas ferramentas disponibilizadas pela plataforma de desenvolvimento. Conforme os trabalhos de Silva *et al.* [132] e Puhl [8], o STL4 trabalha com três métodos principais para processamento de imagens: Segunda Derivada, Correlação de Padrões e Ajuste Linear. A Figura 6.20 ilustra a tela de calibração do *software* do STL4, onde o operador consegue manipular a posição dos pontos de interesse para que atendam suas demandas específicas. A Figura 6.21 apresenta a tela de operação pelo algoritmo de Correlação de Padrões no *software* do STL4, inclusive com uma imagem já processada (mostrada à direita).

Apesar de intuitivo, o *software* sofre de um problema crônico de velocidade de processamento, principalmente pela dificuldade em elencar prioridade às tarefas do *LabVIEW* para o processador da máquina. Embora exista a possibilidade de execução deste *software* em ambiente *LabVIEW-RT* [130], inclusive em plataforma *RT-LINUX C-RIO*, ou *sb-RIO*, que dispõem inclusive de *hardware* programável FPGA, com programação no mesmo ambiente, ainda assim trata-se de um *software* com licença paga e *hardware* proprietário. Neste *hardware* a execução de instruções altamente paralelizadas no ambiente *LabVIEW FPGA* segue uma frequência entre 25 MHz e 40 MHz, conforme o modelo da *CPU RT*, que deve ser adquirida juntamente com a licença do *software*. No ambiente *RT Linux* o *LabVIEW-RT*, com suporte pleno a ponto flutuante, tem taxas típicas de execução com priorização de processadores, (tipicamente um *timed loop* por core), de 2 KHz [129]. Desse modo, o próximo passo para esse sensor é migrar seu *software* para uma plataforma de *software* livre para sanar essa dificuldade.

Figura 6.20 – Tela de calibração do *software* do STL4.Figura 6.21 – Tela de processamento por Correlação de Padrões no *software* do STL4.

O *software* disponibilizado pela fabricante RIKTEK [24] apresenta interface bastante intuitiva e com algumas liberdades ao operador, a principal sendo a possibilidade de inserir novos *templates* de chanfro manualmente, sem auxílio do fabricante, conforme ilustrado na Figura 6.22. Contudo, não é claro se os novos *templates* podem livremente customizados ou se devem obedecer a estrutura básica de algum dos *templates* existentes (opção que geralmente é adotada pelos fabricantes). Apesar de não disponível para testes diretos para este trabalho, a vasta documentação da fabricante permitiu uma análise em profundidade deste *software*.

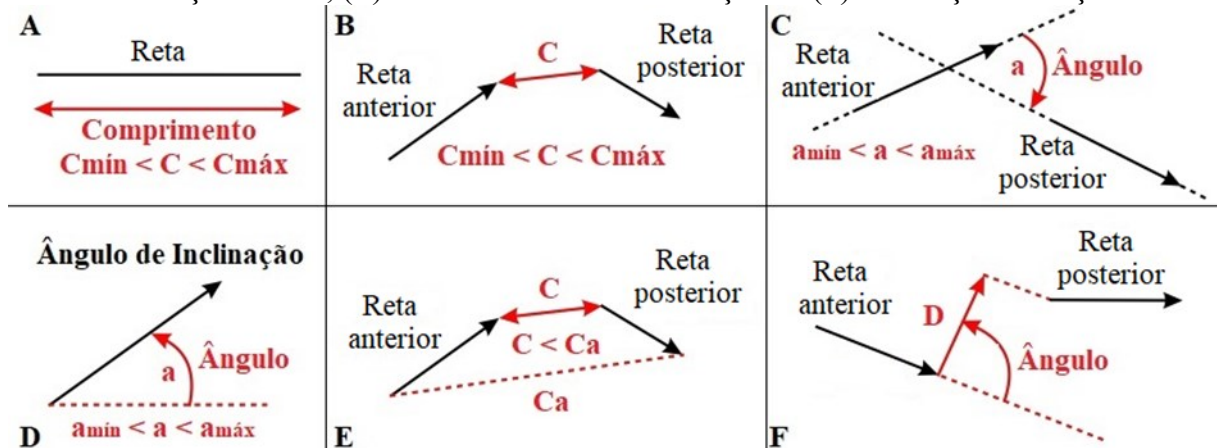
Figura 6.22 – Tela de configuração de *templates* do software da fabricante RIFTEK.



Fonte: [24].

Pela informação disponibilizada no manual de usuário [24], aparentemente os *templates* customizados podem ser construídos a partir de uma combinação sequencial de seis tipos de parâmetros predefinidos, que estão representados na Figura 6.23.

Figura 6.23 – Parâmetros para customização de *templates*, software da RIFTEK. (A) Comprimento de reta, (B) Distância entre retas, (C) Ângulo de rotação, (D) Ângulo de inclinação da reta, (E) Distância entre retas avançado e (F) Mudança de direção.



Fonte: Adaptado de [24].

Além de possibilitar a customização do perfil da junta, o usuário pode customizar também o tipo de informação que será extraído do perfil medido. A fabricante disponibiliza nove tipos de medições que podem ser solicitadas ao *software*:

Line lenght = comprimento de uma reta ou segmento de reta;

Intersection point = coordenadas de intersecção de retas;

Rotation angle = ângulo de rotação, quando passa de uma seção linear para outra;

Line point = ponto em uma reta, informa as coordenadas de um ponto que faz parte de uma reta na posição de 0 a 100% do comprimento da reta;

Far line in direction = coordenadas da reta mais distante em direção específica;

Angle between lines = ângulo entre retas;

Inclination angle = ângulo de inclinação em relação à horizontal;

Point between 2 points = ponto entre dois pontos (similar ao ponto em uma reta, mas entre dois pontos marcados pelo usuário);

Endpoint shift in direction = distância entre linhas (quando há um salto no perfil ou mudança de ângulo significativa).

O *software* também trabalha com algumas regras para reconhecimento e validação da linha laser e dos pontos de interesse, opção interessante se tiver o funcionamento conforme esperado. As opções mais interessantes são: *inverse search*, *search position*, *maximum distance between points*, *maximum line half-width* e *search distance*.

Onde:

Inverse search = inverte a coordenada Z, normal à superfície da chapa (estranhamente não tem inversão de coordenada X no software);

Search position = tipo de busca, variando entre *Projection* (busca o ponto mais alto em um plano), *Center of mass* (busca o centro de massa de um pico na linha laser) e *Butt center* (o ponto médio entre duas superfícies que se encontram);

Maximum distance between points = uma regra de distância máxima entre os pontos da linha laser, servindo para classificar os pontos da linha entre pontos laser ou pontos de contorno;

Maximum line half-width = distância para classificar pontos em *outliers* ou pertencentes à linha laser;

Search distance = distância máxima do ponto de interesse anterior em que o novo ponto de interesse provavelmente aparecerá, servindo para ganhar em processamento e em robustez de detecção.

6.7 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

O desempenho dos STL em situações com e sem soldagem é de suma importância para os integradores, uma vez que há demanda para soluções em ambas as situações, muitas vezes em um mesmo procedimento. Além dos STL de uma folha de luz terem algumas peculiaridades para integração quando montados em robôs sobre trilhos não rígidos, podendo utilizar o sensor antes da soldagem para calibrar os desvios do trilho e do manipulador (conforme apresentado no trabalho de Galeazzi [29]), situações sem soldagem também são muito comuns para compor a documentação e rastreabilidade de uma operação (inspeção da soldagem).

Além destas, as situações com soldagem também são essenciais, principalmente pelos desvios geométricos significativos que o aporte térmico da soldagem pode causar ao material de base. Estes desvios, quando afetarem somente a peça, podem ser corrigidos durante a soldagem com o auxílio do STL e algoritmos de soldagem adaptativa.

Dessa forma, ensaios com os STL considerados em ambas as situações foram realizados conforme o item 5.2.2, de modo a validar o desempenho destes nas duas situações (com e sem soldagem, ou *online* e *off-line*, respectivamente). A Tabela 6.1 reúne os resultados obtidos com estes ensaios.

Além dos dados compilados na Tabela 6.1, também foram gerados gráficos dos ensaios de cada sensor. Nestes gráficos estão representadas as medições de *gap* (abertura de raiz) realizadas pelos três sensores, em duas situações: *off-line* e *online*.

Tabela 6.1 – Resultados da avaliação de desempenhos de STL comerciais.

S		ErroMax	ErroMed	n_{max}	γ_1	ErroMaxSTL	ErroMedSTL	n_{max}
T	Modo	(filtrado)	(filtrado)	n_{med}	γ_2	(não filtrado)	(não filtrado)	n_{med}
L		[mm $\pm$ mm]	[mm $\pm$ mm]	n_{min}	γ_3	[mm $\pm$ mm]	[mm $\pm$ mm]	n_{min}
1	<i>Off</i>	$-0,61 \pm 0,09$	$-0,05 \pm 0,03$	15,00	0,70	$0,53 \pm 1,24$	$0,07 \pm 0,74$	15,00
				14,89	0,10			14,89
				14,00	0,10			14,00
	<i>On</i>	$-0,80 \pm 0,05$	$-0,16 \pm 0,02$	15,00	0,70	$-0,67 \pm 1,12$	$-0,07 \pm 0,61$	15,00
				14,89	0,10			15,00
				14,00	0,10			15,00
2	<i>Off</i>	$-0,24 \pm 0,06$	$-0,14 \pm 0,03$	18,00	0,95	$-0,14 \pm 3,04$	$-0,01 \pm 0,44$	18,00
				18,00	0,20			18,00
				18,00	0,10			18,00
	<i>On</i>	$-0,36 \pm 0,03$	$-0,10 \pm 0,02$	4,00	0,95	$1,01 \pm 1,49$	$0,10 \pm 0,62$	4,00
				3,67	0,20			3,78
				3,00	0,10			3,00
3	<i>Off</i>	$8,70 \pm 0,44$	$5,55 \pm 0,12$	4,00	0,10	$48,34 \pm 49,83$	$11,72 \pm 7,03$	4,00
				4,00	0,90			3,89
				4,00	0,90			3,00
	<i>On</i>	$9,17 \pm 0,18$	$7,22 \pm 0,07$	5,00	0,10	$9,80 \pm 1,36$	$7,42 \pm 0,34$	4,00
				4,11	0,90			4,00
				4,00	0,90			4,00

Onde:

Modo: *Off* = *off-line*, antes da soldagem; *On* = *online*, durante a soldagem

ErroMax = maiores valores de tendência e precisão da medição (pior caso)

ErroMed = média de valores de tendência e precisão

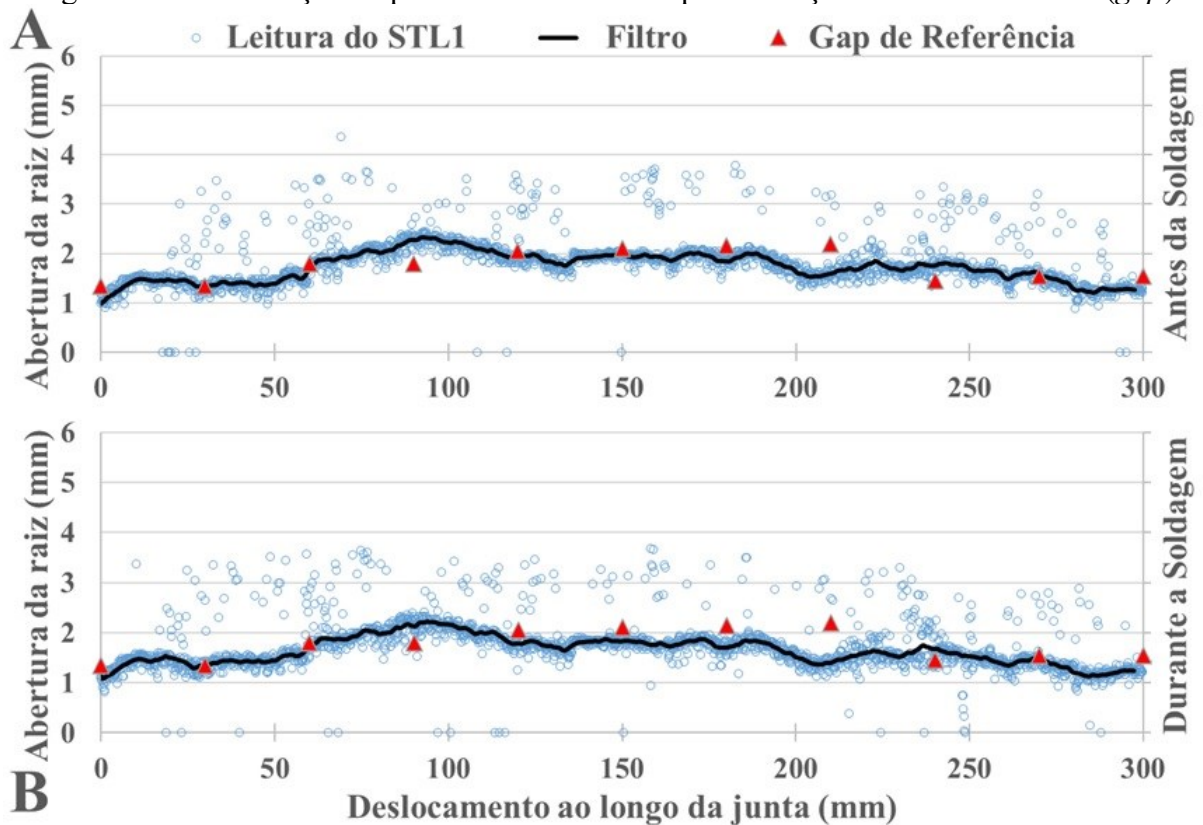
n = número de medições registradas na faixa de medição de cada ponto de referência

n_{max} , n_{med} e n_{min} = valor máximo, médio e mínimo de n em cada faixa, respectivamente

γ_j = coeficiente do filtro *exponential smoothing* utilizado na etapa j de filtragem

A Figura 6.24 apresenta os gráficos resultantes dos ensaios com o STL1. Analisando os resultados obtidos com este sensor, alguns pontos merecem destaque. O primeiro ponto é a manutenção de uma boa taxa de medição (em torno de 15 Hz) tanto nos ensaios antes como durante a soldagem, indicando regularidade no desempenho dos algoritmos de processamento para ambas as situações, o que é ideal para um sensor deste tipo. O valor de n_{med} teve alteração apenas no ensaio *online* sem filtro, isso se deve ao atraso introduzido pela filtragem e ao acaso.

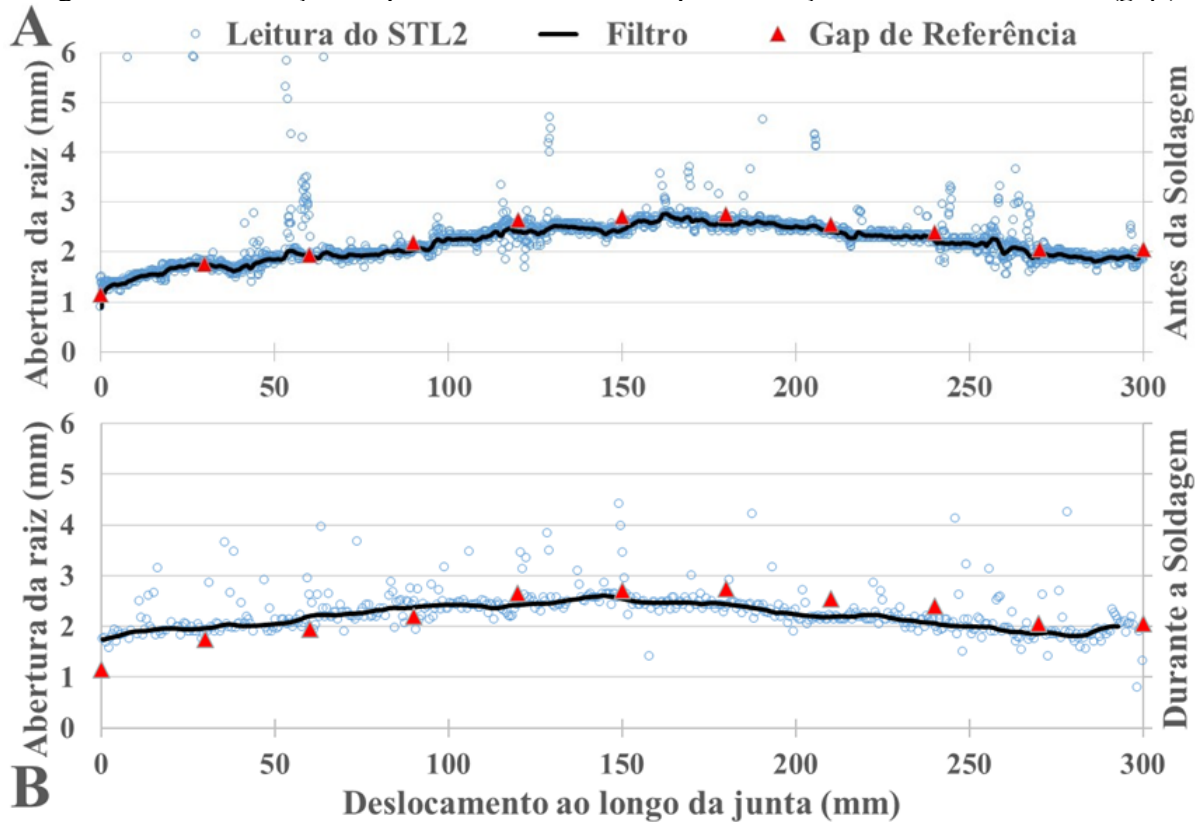
Figura 6.24 – Avaliação de performance do STL1 para medição da abertura de raiz (*gap*).



O segundo ponto de destaque está no máximo valor de erro encontrado, que fica acima do estabelecido como critério de aceitação para esses sensores (máximo de 0,5 mm) caso não seja aplicada a correção da tendência (correção de 0,80 mm para situação com soldagem), embora o sinal filtrado atenda com folga a este critério.

O terceiro ponto se deve ao alto valor de erro verificado nas situações sem filtragem, que também são observadas pelos parâmetros γ utilizados para os tratamentos com o *exponential smoothing* (que basicamente é um filtro do tipo “passa-baixa”). Na primeira iteração foi utilizado um filtro menos agressivo ($\gamma_1 = 0,70$), indicando ausência de ruídos do tipo impulso, porém as duas próximas iterações demandaram parâmetros pesados de filtragem, com indicação de variação constante significativa do valor medido de *gap* em torno do valor médio. A implementação de uma zona morta ajustável talvez atendessem bem este sensor.

Figura 6.25 – Avaliação de performance do STL2 para medição da abertura de raiz (*gap*).



A Figura 6.25 apresenta os resultados de medição obtidos com os STL2, antes e durante a soldagem, com indicação visível da diminuição na taxa de aquisição de pontos válidos durante a soldagem, em comparação com a obtida com o ensaio *off-line*.

Na análise dos resultados dispostos na Tabela 6.1, esta redução é comprovada pela redução no valor de n_{med} de 18,00 (*off-line*) para 3,67 (*online*), uma redução de quase 80% na quantidade de medições válidas. Esta redução se deve, provavelmente, à inserção dos ruídos provenientes da soldagem nas imagens do STL, que causaram um significativo aumento no tempo de processamento das mesmas. Outra hipótese, menos provável, é o da luminosidade inconsistente da soldagem afetar o algoritmo do controle de exposição, que acabe por reduzir a taxa de medições pela dificuldade em encontrar parâmetros adequados de exposição.

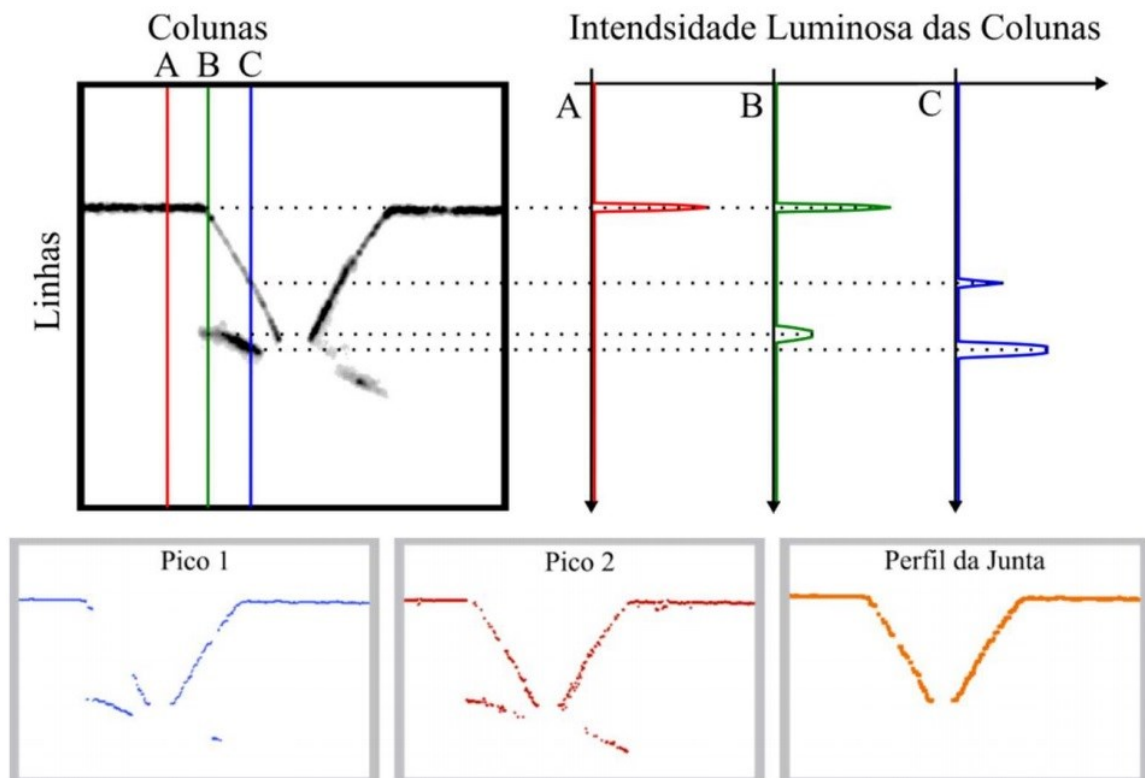
O STL2, por sua vez, disponibiliza alguns filtros, que são utilizados para melhorar a qualidade do sinal. No caso de um chanfro V, que apresenta uma superfície reflexiva na parte inferior do chanfro, o filtro mais adequado foi o antirreflexo. O filtro antirreflexo é baseado na premissa de que a linha laser e os seus reflexos no chanfro apresentam diferentes intensidades luminosas no sensor de imagem.

Dessa maneira, o filtro antirreflexo realiza uma análise de contexto para determinar quais os pontos pertencentes à linha laser, que geralmente são os pontos relativamente próximos à posição principal da linha no sensor, mesmo que não sejam o ponto de maior intensidade luminosa naquela coluna do sensor de imagem, conforme ilustrado na Figura 6.26. Esse método também foi utilizado nos trabalhos de Puhl [8] e Silva *et al.* [132] para juntas com reflexo irregular.

Outro resultado de destaque foi na qualidade das medições realizadas, que mesmo com a redução na taxa, em ambos os modos obteve erro máximo dentro do parâmetro de aceitação para as medições filtradas, inclusive no máximo valor de erro filtrado.

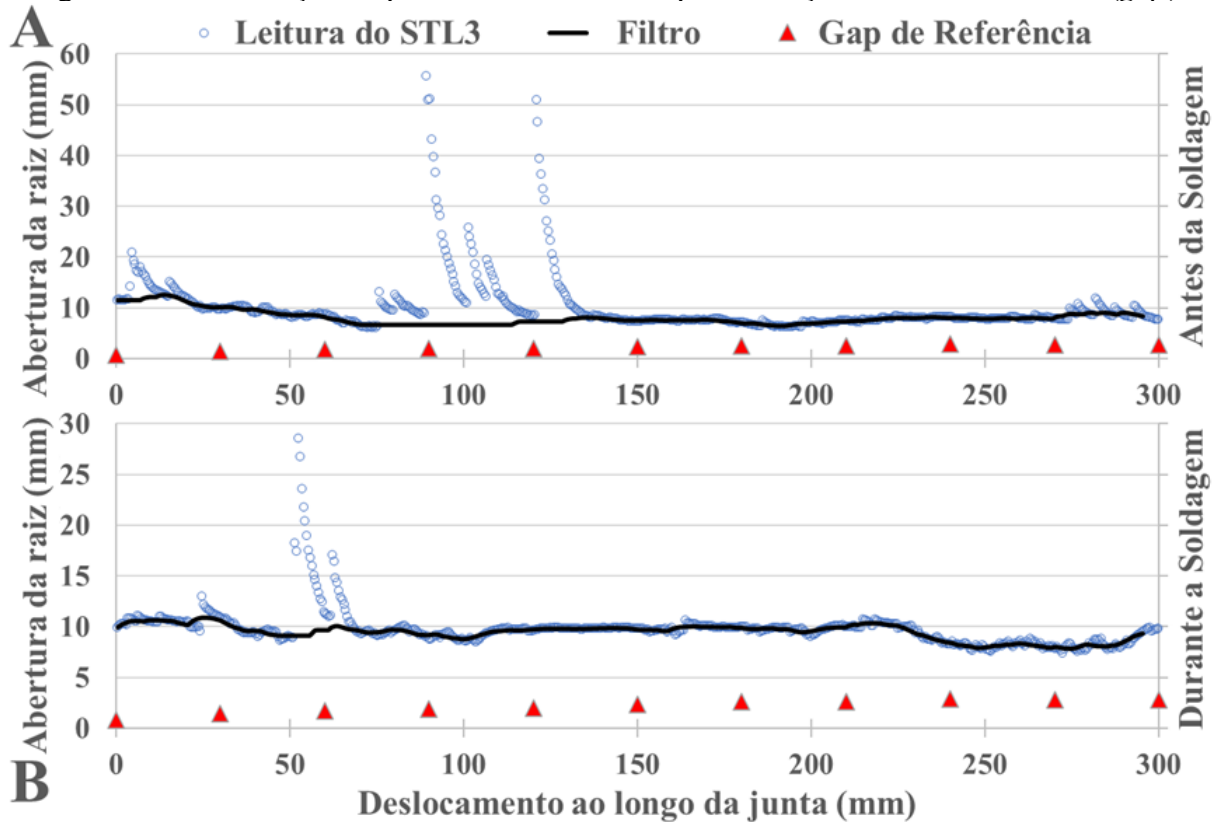
O valor médio de erro sem filtro do ensaio *off-line* do STL2 também ficou dentro do limiar estabelecido, mesmo com os coeficientes do filtro sendo os mesmos do STL1, que não teve o mesmo desempenho satisfatório. Os coeficientes foram definidos empiricamente, analisando as medições e buscando minimizar os erros.

Figura 6.26 – Funcionamento do filtro antirreflexo.



Fonte: Adaptado de [8].

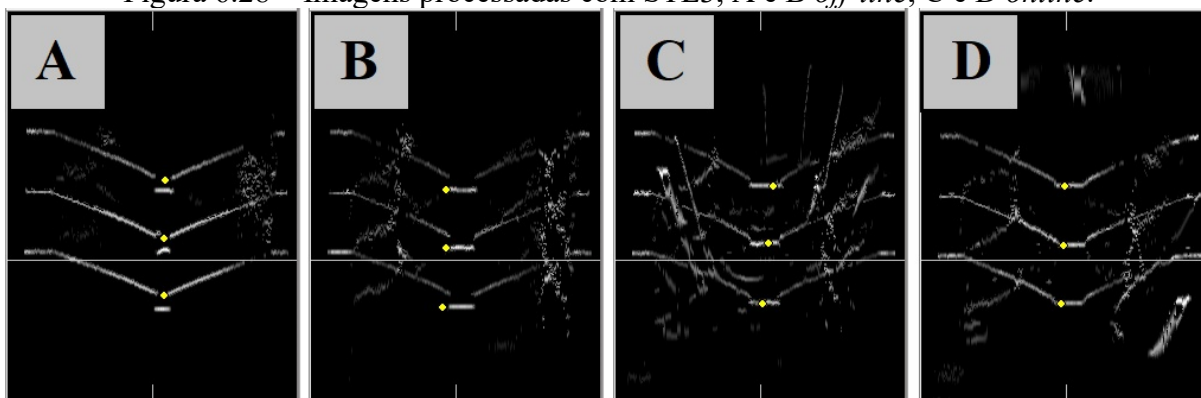
Figura 6.27 – Avaliação de performance do STL3 para medição da abertura de raiz (*gap*).



Na Figura 6.27 estão representados os resultados dos ensaios com o STL3, que utiliza projeção de três linhas laser para triangulação. Apesar de contar com a melhor resolução, conforme descrito na Tabela 5.1, o *software* deste sensor apresentou alguns problemas de execução das regras utilizadas para calibração dos algoritmos. O que aconteceu foi que o sensor mediu, provavelmente, o *top gap* ao invés do *botton gap*, ou seja, mediu a abertura do chanfro em vez da abertura de raiz.

O problema todo foi agravado pela indicação do sensor de que estava reconhecendo corretamente a junta, com a traçagem dos pontos de interesse, conforme ilustrado na Figura 6.28, que contém algumas das imagens processadas pelo STL3 neste ensaio, no modo *off-line* (A e B) e *online* (C e D).

Figura 6.28 – Imagens processadas com STL3, A e B *off-line*, C e D *online*.



Pela Figura 6.28 também foi possível constatar a grande presença de ruídos nas imagens, mesmo nas do ensaio *off-line* (A e B). A Figura 6.28–A representa uma imagem capturada pelo STL3 logo no início da peça, região onde o sensor foi calibrado. Ao percorrer a junta, ficou evidente o surgimento de muitos ruídos, inclusive de respingos (Figura 6.28–C) e reflexos do arco (Figura 6.28–D).

Se for considerado que o STL3 realmente mediu a abertura do chanfro, implicaria em um aumento fixo (ou teoricamente fixo) do valor de referência, uma vez que o ângulo do bisel preparado nas chapas deveria ser constante em todo seu comprimento (chapas preparadas por corte com maçarico oxi-acetilênico e esmerilhamento). Desse modo, se apenas um *offset* para com o valor de referência ocorreu, a precisão da medição deste sensor deveria ter sido a melhor de todas, porém isso não foi observado.

Considerando as parcelas aleatórias dos erros filtrados (precisão da medição), este sensor estaria dentro do critério de aceitação estabelecido ($\pm 0,50$ mm), porém não foi o que apresentou melhor valor de precisão entre os sensores ensaios. Na verdade, se for analisado o erro não filtrado, fica evidente a grande variação que teve nas medições da abertura de raiz, principalmente nos valores máximos de erro.

Além disso, os coeficientes γ da filtragem apresentaram valores opostos aos dos sensores 1 e 2. Na primeira etapa de filtragem, o coeficiente utilizado foi de 0,10, ou seja, um coeficiente de filtragem relativamente pesado para este tipo de aplicação, com frequência de corte próxima de 100 Hz, indicando a presença de ruídos do tipo impulso na medição da abertura de raiz, indicação corroborada pelos altos valores máximos de precisão da medição encontrados para os ensaios não filtrados, em especial o *off-line*. Ainda sobre este resultado, somente a remoção dos *outliers* não foi suficiente para remover estes ruídos do tipo impulso, o

que pode ser um problema de calibração do sensor para aquela junta ou mesmo de método de filtragem da imagem e reconhecimento da linha laser.

Outro parâmetro preocupante observado nos resultados deste sensor foi a quantidade de medições válidas computadas por faixa de medição, estando próximo de 4 medições a cada 2,0 mm de junta percorridos. Este valor é especialmente baixo se for considerada a taxa nominal de operação informada pela fabricante (60 Hz, Tabela 5.1) e a velocidade de movimentação do robô na direção da soldagem (5 mm/s, Tabela 5.2), teoricamente o sistema deveria registrar em torno de 24 medições por faixa de medição (2,0 mm de junta).

Uma vez que os resultados de ensaio do STL3 fugiram em demasia do esperado para esse sensor, um novo ensaio foi realizado com o mesmo, tomando o cuidado para que fosse respeitado o sentido de esmerilhamento na preparação das chapas, para que todas as faces esmerilhadas tivessem o mesmo sentido de preparação, uma medida que foi constatada nas aplicações anteriores do LABSOLDA como benéfica aos STL. Os resultados deste novo ensaio estão listados na Tabela 6.2 (campos em azul) e ilustrados na Figura 6.30.

Pelos resultados contidos na Tabela 6.2, é visível que ocorreu uma melhora significativa nos valores da precisão da medição, porém ainda foram constatadas as mesmas tendências de melhora ao passar da situação *off-line* para *online*.

Os novos níveis médios da precisão da medição filtrada encontrados nesta repetição do ensaio são os melhores entre os sensores ensaiados, o que condiz com a própria natureza deste sensor, que deveria ser mais preciso do que os demais. Desconsiderado a tendência, que parece ter sofrido a mesma influência do ensaio passado, esse sensor seria aprovado no critério de validação considerado ($\pm 0,5$ mm).

Uma outra constatação importante diz respeito ao número de medições válidas, que nessa repetição dos ensaios foi menor ainda, em várias faixas de medição registrando apenas uma única medição para os 2,0 mm da junta considerados. Essa taxa é especialmente baixa, em torno de 2,5 Hz (1 medição a cada 2,0 mm de junta em velocidade de soldagem de 5 mm/s), principalmente se comparada à taxa de medição nominal informada pela fabricante (60 Hz).

Tabela 6.2 – Resultados da avaliação de desempenhos de STL comerciais.

S		ErroMax	ErroMed	n_{max}	γ_1	ErroMaxSTL	ErroMedSTL	n_{max}
T	Modo	(filtrado)	(filtrado)	n_{med}	γ_2	(não filtrado)	(não filtrado)	n_{med}
L		[mm $\pm$ mm]	[mm $\pm$ mm]	n_{min}	γ_3	[mm $\pm$ mm]	[mm $\pm$ mm]	n_{min}
3	<i>Off</i>	$8,70 \pm 0,44$	$5,55 \pm 0,12$	4,00	0,10	$48,34 \pm 49,83$	$11,72 \pm 7,03$	4,00
				4,00	0,90			3,89
				4,00	0,90			3,00
	<i>On</i>	$9,17 \pm 0,18$	$7,22 \pm 0,07$	5,00	0,10	$9,80 \pm 1,36$	$7,42 \pm 0,34$	4,00
				4,11	0,90			4,00
				4,00	0,90			4,00
3	<i>Off</i>	$7,99 \pm 0,04$	$7,72 \pm 0,01$	2,00	0,10	$10,62 \pm 18,97$	$8,07 \pm 2,322$	2,00
				1,67	0,10			1,44
				1,00	0,90			1,00
	<i>On</i>	$8,36 \pm 0,06$	$7,87 \pm 0,02$	2,00	0,10	$8,97 \pm 0,357$	$7,93 \pm 0,05$	2,00
				2,00	0,10			1,56
				2,00	0,90			1,00

*Segunda bateria de ensaios com o STL3

Assim como na Figura 6.28, a Figura 6.29 traz quatro imagens capturas pelo STL3 durante esta repetição dos ensaios, sendo duas (A e B) em condição *off-line* e duas (C e D) no modo *online*. Estas imagens deixam claro que houve uma considerável melhora no perfil da junta visto pelo sensor pela iluminação laser, porém ainda foram constatadas imagens, principalmente no ensaio *online*, com grande presença de ruídos, esses agora exclusivamente da soldagem.

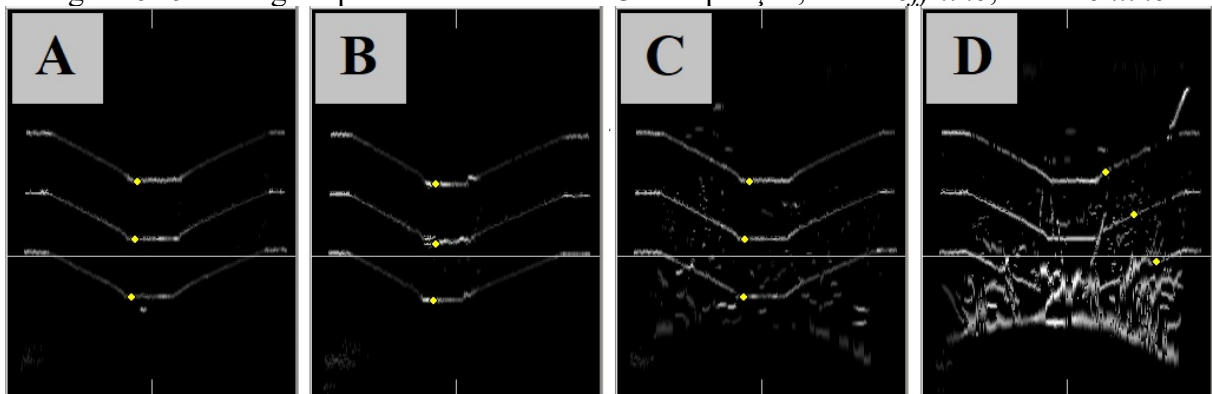
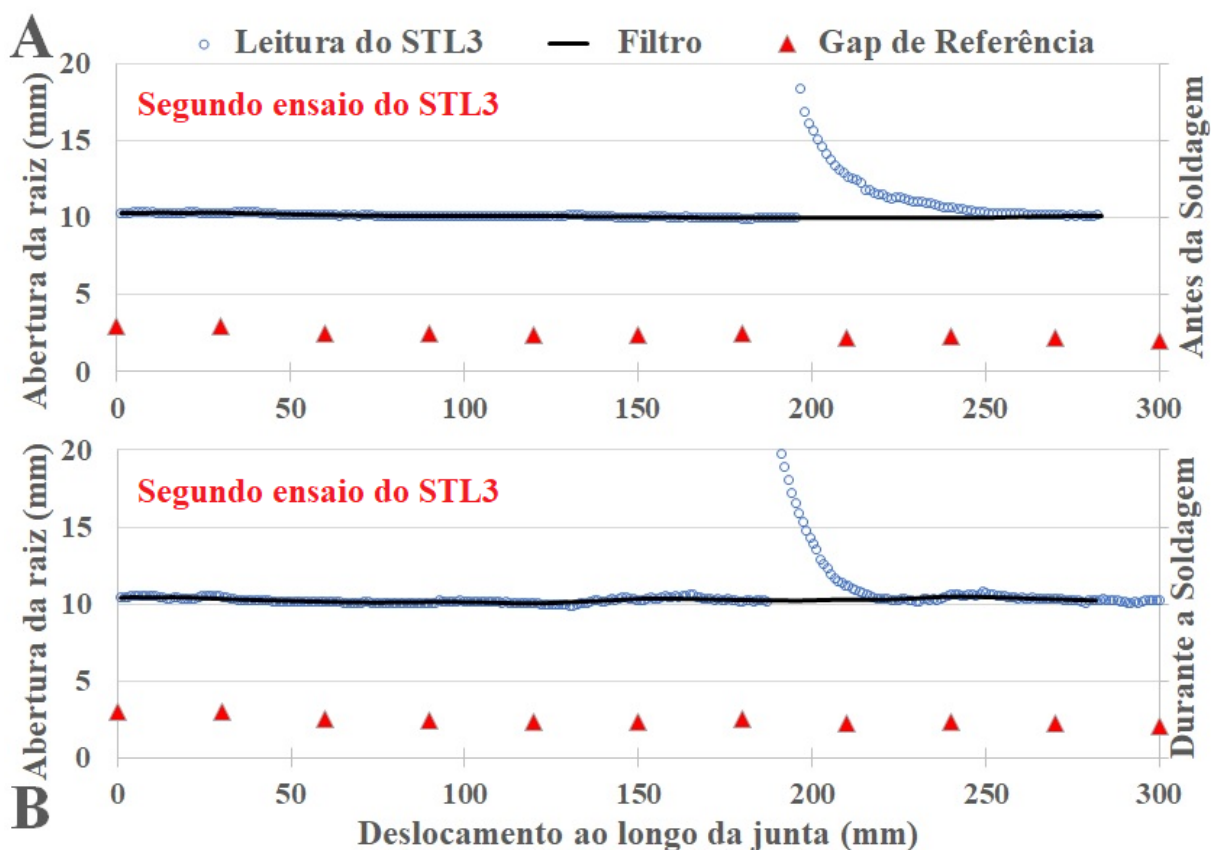
Figura 6.29 – Imagens processadas com STL3 na repetição, A e B *off-line*, C e D *online*.

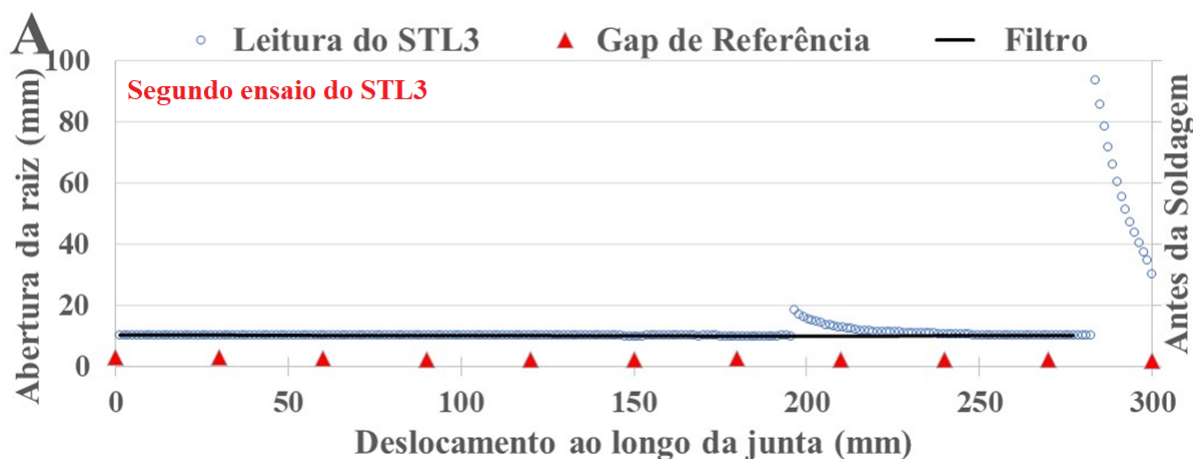
Figura 6.30 – Repetição do ensaio para avaliação operacional do STL3.



Na Figura 6.30 é perceptível, no gráfico A (processo *off-line*) que faltam medições a partir da marca de aproximadamente 280 mm da junta. Na verdade, esses pontos foram medidos e registrados, porém com valores muito acima dos demais pontos do gráfico, de modo que sua representação implicaria em uma alteração drástica na escala do gráfico e comprometeria sua interpretação. Assim, o gráfico completo com escala corrigida está apresentado na Figura 6.31. Como as medições do primeiro e último pontos foram descartadas, não influenciaram no erro.

Ainda assim, a identificação de geometrias neste sensor é muito instável, provavelmente por falhas de implementação no *software* de processamento, principalmente quanto à ativação das regras que são disponibilizadas ao operador para calibração dos perfis. No momento da realização destes ensaios, o próprio fornecedor do sensor já havia sinalizado que uma nova versão de sensor, contemplando atualizações de *hardware* de processamento e *software* estava sendo lançada. Todavia, não foi possível utilizar esse novo conjunto no sensor disponibilizado, o que provavelmente resolveria várias das dificuldades encontradas no ensaio deste sensor.

Figura 6.31 – Gráfico do ensaio *off-line* do STL3 com escala corrigida.



6.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A avaliação de desempenho dos STL comerciais demonstrou resultados interessantes e diferentes para cada cabeçote ensaiado. O STL1, de uma linha laser, demonstrou baixo nível de incertezas no valor médio dos erros apurados. Além disso, conseguiu manter uma taxa de aquisição relativamente alta (aproximadamente 37 Hz) para os dois modos de ensaio: *off-line* (antes da soldagem) e *online* (durante a soldagem). A manutenção de uma boa taxa de medição é uma excelente qualidade em um sensor deste tipo, principalmente quando o mesmo precisa ser utilizado nas duas situações para conseguir superar suas próprias limitações, como demonstrado no trabalho de Galeazzi [29].

Essa combinação de taxa de medição constante e boa precisão da medição demonstram o grande potencial deste sensor para aplicações com soldagem adaptativa e inspeção da soldagem. Assim, essa é uma característica ideal de se buscar na aquisição ou projeto de um sensor deste tipo.

A fabricante do STL1 também utiliza uma abordagem construtiva diferente, embarcando todo o *hardware* de processamento de imagem no cabeçote. Este tipo de abordagem é um tanto controverso, uma vez que o cabeçote está fadado a eventuais danos físicos (impactos com outras estruturas ou manipuladores), o que pode causar dano não só no conjunto de captação de imagens como também no de processamento. Além disso, há todo o esforço de projeto para miniaturizar o *hardware* e embarca-lo no cabeçote, que precisa ser leve e compacto para interferir ao mínimo no robô de soldagem. Desse modo, este tipo de abordagem não é recomendado para projetos de STL.

O STL2, também de uma linha laser, foi ensaiado nas mesmas condições, porém seus resultados foram menos consistentes. Apesar de apresentar bons valores de tendência e precisão da medição, inclusive sendo o único sensor avaliado que conseguiu atender ao critério de aceitação estabelecido para incerteza máxima ($\pm 0,5$ mm), mesmo nos valores máximos de erro registrados, este sensor não apresentou regularidade na taxa de medição. Nos ensaios *off-line* manteve taxa de 45 Hz, a mais alta entre os ensaiados, porém nos ensaios durante a soldagem essa taxa média de medições teve um decréscimo de quase 80%, ficando próxima dos 9 Hz.

Além da falta de constância na taxa de aquisição, a fabricante deste sensor, Servo-ROBOT, não oferece qualquer tipo de alternativa para desenvolvedores independentes integrarem seus sistemas de movimentação de tocha e controle da soldagem a este sensor, restringindo seus a suportarem apenas controladores de grandes fabricantes de robôs. Por esses motivos, esse sensor torna-se pouco atrativo para o cenário brasileiro de soldagem adaptativa.

Todavia, este sensor conta com um sensor de imagem secundário, assim como o STL3, característica muito interessante para um sensor deste tipo. Um sensor de imagem secundário pode ser alocado de modo a observar melhor as características da junta, criando uma nova fonte de informações visuais da junta, que podem ser utilizadas pelos operadores de soldagem, pelos integradores e também para a rastreabilidade do processo. Somente a fabricante do STL3 implementa o sensor secundário de maneira estratégica: este sensor tem seu próprio canal de comunicação com o usuário, de modo a não ocupar a banda do sensor principal e eventualmente prejudicar a taxa de medição do sensor, característica importante para este tipo de abordagem.

Na análise do STL3, o único sensor de três linhas ensaiado, ocorreram constatações imprevistas: o sensor teve o pior desempenho entre os ensaiados. Não só os valores de tendência foram os maiores, provavelmente por uma falha do algoritmo em medir a abertura de raiz, provavelmente medindo a abertura do chanfro, mas também os valores de precisão da medição foram os mais altos dos sensores ensaiados, demonstrando dificuldade em localizar corretamente qualquer que fosse o *gap* que o sensor tentava medir. Além disso, a taxa de aquisição foi a mais baixa também dos sensores ensaiados, ficando próxima de 10 Hz.

Por esses resultados negativos, o ensaio com o STL3 foi repetido, tomando-se cuidado para que a direção de esmerilhamento das chapas fosse no mesmo sentido nos dois lados da junta, condição geralmente favorável aos STL. De fato, a repetição do ensaio mostrou grande melhora nos níveis de incerteza observado para este sensor, ficando com o melhor entre os ensaiados (com aplicação de filtragem, como com todos os STL ensaiados). Todavia, a baixa taxa de medição foi constatada novamente, com taxas entre 3.6 Hz e 5 Hz, relativamente

constantes, porém muito abaixo da taxa nominal informada pela fabricante (60 Hz). Analisando estes resultados, fica clara a capacidade do sensor de três linhas em produzir bons resultados de medição, porém seus métodos, *software* ou mesmo *hardware* necessitam de uma boa revisão por parte da fabricante, para correção de possíveis erros ou mesmo otimização de desempenho.

Desse modo, se fosse possível montar um sensor ideal utilizando as melhores características de cada sensor ensaiado, ele contaria com o *software* do STL1 e também com sua capacidade de manter a taxa de medição constante independente da situação (com ou sem soldagem). Do STL2 ele utilizaria o *hardware* de captação de imagens, ou seja, o cabeçote do sensor, uma vez que o mesmo é o mais leve e mais compacto dos três, e sua precisão da medição. Do STL3 ele utilizaria o *hardware* de processamento de imagens, com um canal de comunicação dedicado para cada sensor de imagem (primário e secundário) e as várias opções de fixação que o cabeçote possui, o que facilita sua implementação para situações diversas. Do STL de desenvolvimento nacional ele utilizaria os componentes de prateleira, uma vez que são de fácil acesso, o que facilita manutenções futuras e mudança de arranjos para situações diferentes.

7 SOFTWARE PARA PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE STL

Uma vez que o objetivo deste trabalho é a nacionalização dos conhecimentos acerca do projeto, desenvolvimento, fabricação e utilização de Sensores de Triangulação a Laser para soldagem (STL), o domínio sobre os algoritmos para processamento de imagem representa uma etapa importante desta proposta.

7.1 *SOFTWARE* LIVRE PARA PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE STL

Pensando em democratizar o acesso à estas ferramentas, além de fornecer uma base sólida para desenvolvimentos futuros e também uma plataforma didática para ensino das técnicas mais utilizadas de processamento de imagem, foi proposto a criação e publicação de um *software* livre junto com este documento. Por esse motivo, é interessante que a plataforma de desenvolvimento deste sistema fosse de amplo acesso aos demais pesquisadores e instituições de ensino, de modo a permitir a reprodução dos conhecimentos aqui agregados e a continuação dos trabalhos de maneira independente.

Assim sendo, a utilização de uma plataforma de *software* livre foi atrativa para o desenvolvimento deste trabalho. Além de concentrar a programação em ambiente *Linux*, também foi utilizado um compilador popular entre os desenvolvedores, a plataforma *Qt*. Buscando também garantir o amplo acesso ao *software* desenvolvido, este também foi migrado para o *Qt* baseado em ambiente *Windows*, um sistema operacional muito comum, principalmente nos ambientes universitários. O Apêndice B contém um tutorial de instalação do *software* desenvolvido e demais programas necessários para customização do mesmo, tanto para sistemas operacionais baseados em *Linux* como em *Windows*.

Quanto às ferramentas computacionais, as *toolboxes* de visão computacional compiladas no conjunto denominado *OpenCV* foram o foco desta publicação, de modo a tornar este desenvolvimento o mais amplamente acessível possível. Ainda que diversos institutos e laboratórios de instituições de ensino superior brasileiras concentrem seus desenvolvimentos nas plataformas pagas estrangeiras, o conjunto *Qt* e *OpenCV* representa uma excelente alternativa baseada em ambiente de *software* livre.

Partindo desta premissa, foi desenvolvido o *software* proposto neste trabalho, que possibilita o ensaio de diversos filtros e métodos, além da combinação dos mesmos em qualquer

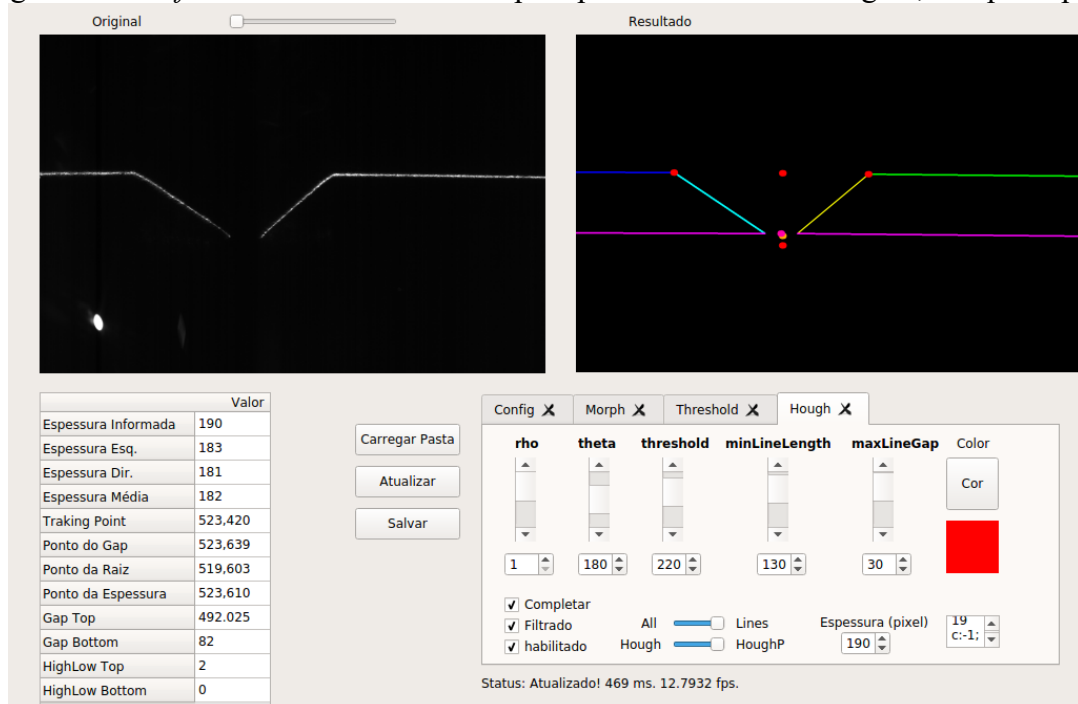
ordem desejada, possibilitando a experimentação de várias *pipelines* de processamento de imagem em um único ambiente.

A *pipeline* é a sequência de ferramentas de visão computacional, ou seja, o algoritmo de processamento de imagem, que possibilita ao computador realizar a segmentação da imagem e a identificação de pontos de interesse na mesma.

Este *software* tem potencial para trabalhar com aquisição em tempo real de imagens provenientes de uma câmera de conexão *Ethernet* ou *USB*, desde que o desenvolvedor faça a devida integração do mesmo com o dispositivo desejado. Como há uma variedade de fabricantes e versões dos *softwares* para câmeras industriais, o esforço para integração de vários dispositivos diferentes seria grande e útil somente por uma curta janela de tempo.

Caso não haja necessidade de trabalhar com aquisição *online* de imagens, o usuário pode optar por trabalhar com imagens salvas, previamente capturadas por um STL comercial ou de desenvolvimento próprio. Algumas imagens registradas neste trabalho já acompanham o *software* (Apêndice C), fornecendo um bom ponto de partida para desenvolvedores iniciantes ou mesmo conteúdo didático para ser trabalhado no *software*. A Figura 7.1 ilustra a tela principal do *software* desenvolvido.

Figura 7.1 – *Software* livre desenvolvido para processamento de imagem, tela principal.

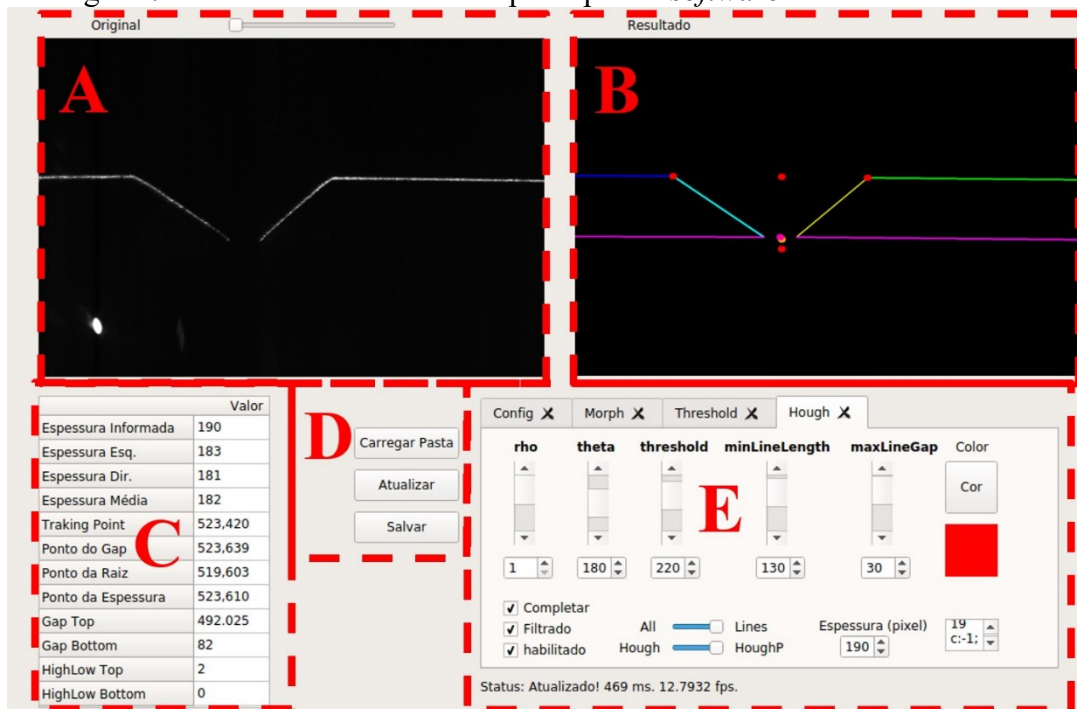


Pela Figura 7.1 é possível perceber que há um baixo grau de customização estética da interface do *software* desenvolvido. Isso se deve principalmente ao fato deste programa ser idealizado para funcionar como uma base de desenvolvimentos futuros (SDK), ficando a cargo dos desenvolvedores manipularem os aspectos visuais da interface para adequá-la à aplicações específicas de cada grupo de trabalho.

Conforme ilustrado na Figura 7.1, também é possível notar que uma *pipeline* estava programada no momento da captura da imagem (Figura 7.2–E), com a sequência de três algoritmos: morfológico, seguido de *threshold* (limiar) e finalmente a transformada de *Hough* para traçagem e identificação da linha laser. A traçagem das linhas coloridas (Figura 7.2–B) para identificar diferentes segmentos da linha laser reconhecidos pelo *software* também foi implementada com objetivo de deixar o processo de análise dos algoritmos mais didático e dinâmico, permitindo pronto reconhecimento do resultado dos métodos selecionados.

A Figura 7.2 traz a mesma tela principal do *software* desenvolvido, mas com a discriminação dos campos principais, sendo eles: em A a seleção e exibição da imagem original que está sendo processada, em B o resultado do processamento de imagens, em C as medições pertinentes realizadas (valores em pixels), em D os comandos para abrir e salvar imagens e em E o campo de seleção e configuração dos algoritmos para montagem das *pipelines*.

Figura 7.2 – Características da tela principal do *software* livre desenvolvido.



O utilizador do *software* desenvolvido deve estar ciente de que se tratam de operações com resultados em pixels e a conversão de pixels para milímetros, para os STL, na grande maioria das aplicações não é linear. Aspectos como o ganho óptico variável conforme a distância do objeto requerem uma calibração do conjunto de triangulação do sensor (câmera, laser e objeto) de modo a possibilitar a correta conversão de pixels para milímetros, similar a realizada no trabalho de Puhl [8], projetista do STL4. Assim, caso o utilizador deseje empregar este *software* em uma operação que requeira informações convertidas em milímetros, o mesmo deverá realizar a calibração do seu sensor e implementar ela na rotina de medição do *software*.

7.2 AQUISIÇÃO DE IMAGENS COM STL DURANTE A SOLDAGEM

Conforme relatado nas seções 5.3.1 e 5.3.2 deste trabalho, foram realizados ensaios com soldagem para aquisição de imagens reais com STL. As imagens julgadas mais significativas capturadas nestes ensaios foram apresentadas na seção 4.1 deste trabalho, representando principalmente os principais tipos de ruídos encontrados em imagens de STL (da Figura 4.4 até a Figura 4.9).

Uma vez que o intuito destes ensaios é capturar imagens para validação de algoritmos de processamento de imagem e o objetivo principal deste capítulo é de apresentar o *software* livre publicado para a comunidade que tenha interesse em desenvolver aplicações ou mesmo seus próprios STL, estas imagens também acompanham o *software* em questão, em sua resolução (1280 pixels x 960 pixels) e condições originais de captura. Estas imagens também estão relacionadas no Apêndice C.

7.3 PIPELINES PARA TESTE DO SOFTWARE DESENVOLVIDO

Além da colaboração no desenvolvimento do algoritmo de Ajuste Linear e sua comparação frente os algoritmos de Segunda Derivada e Correlação de Padrões durante o curso deste trabalho, devidamente relatada nos trabalhos de Silva *et al.* [132] e Puhl [8], também foi desenvolvida uma *pipeline* para processamento de imagem de STL utilizando a biblioteca *OpenCV 3.1.0* e de programação em *C++* para interfaceamento e operações com imagens no *software* desenvolvido especificamente para este trabalho.

Esta *pipeline* foi desenvolvida abordando as técnicas de processamento de imagem convenientes para o primeiro problema que se apresenta a qualquer algoritmo de processamento

de imagens para STL: conseguir identificar corretamente os quatro segmentos de reta que definem o chanfro em “V” tradicional, ou quaisquer que sejam os segmentos que melhor representem a junta estudada.

Apesar de visíveis claramente ao operador humano, como no caso da imagem da Figura 7.2–A, a máquina requer um algoritmo para reconhecer a linha laser, mesmo que a imagem contenha quase nenhum ruído (caso ideal para um STL). Geralmente a linha laser vista pelo sensor não é contínua e não tem intensidade uniforme em seu comprimento, o que dificulta ao *software* identificar corretamente os segmentos da linha. As regiões mais críticas tendem a ser as pontas do chanfro, na parte inferior, pela quantidade de reflexos e ruídos.

Foram testados alguns algoritmos para remoção de ruído e identificação da linha. A *pipeline*, ou sequência de algoritmos, que teve maior sucesso dentre as avaliadas consistiu de quatro simples etapas: primeiro o *closing* (fechamento), seguido de uma operação de *thresholding* (limiar), passando pela aplicação da transformada de *Hough* (para realçar as linhas) e um algoritmo baseado em regras simples para reconhecer a linha laser.

Na Figura 7.2–B está uma captura de tela do *software* com a imagem original (Figura 7.2–A) já processada pela *pipeline* em questão.

Quanto à esta *pipeline*, foram separadas 6 imagens que representam as etapas de processamento (Figura 7.3, de A até F). A imagem original (Figura 7.3–A) foi capturada com o STL1 nos ensaios com soldagem deste trabalho (seção 6.7). Esta foi escolhida por fornecer grande dificuldade ao processamento (diferentes tipos de ruído em uma mesma imagem).

O primeiro processamento de imagem consiste de um fechamento. O algoritmo de fechamento é na verdade uma composição de duas operações: primeiro faz-se uma dilatação (Figura 7.3–B), que aumenta todos os corpos de tonalidade branca acima de um limiar de fundo, engrossando esses corpos na imagem e desfocando os mesmos. Depois, faz-se uma erosão, que é o processo inverso da dilatação, consistindo então de um apagamento das figuras brancas acima do limiar de fora para dentro (Figura 7.3–C).

Essa sequência de operações é fundamental para garantir que todos os vazios da linha laser sejam preenchidos, de modo que a mesma seja sempre detectada pelos algoritmos futuros como corpo único (no caso dois corpos, um de cada chapa na imagem). Na Figura 7.3–C está ilustrado o resultado do processamento com o fechamento. Na Figura 7.4 estão o *kernel* da dilatação e o da erosão, respectivamente. Foram utilizados dois *kernels* binários customizados, de forma a maximizar os efeitos destas operações para o tipo de chanfro utilizado neste trabalho.

Na prática, os algoritmos atuam preferencialmente na direção oposta da que o *kernel* foi definido. No caso da Figura 7.4 à direita, onde está representado o *kernel* da erosão como uma linha horizontal centrada, o algoritmo de erosão tem efeito preferencialmente sobre estruturas no alinhamento oposto, ou seja, vertical centrado com cada pixel de aplicação.

Na sequência da *pipeline*, as imagens passam pelo filtro de *threshold*, ou limiar, cuja principal função é remover o ruído de fundo, proveniente da iluminação do arco refletida nas faces do chanfro e da peça. O resultado nessa imagem está retratado na Figura 7.3–D.

Figura 7.3 – Processamento de imagens para STL.

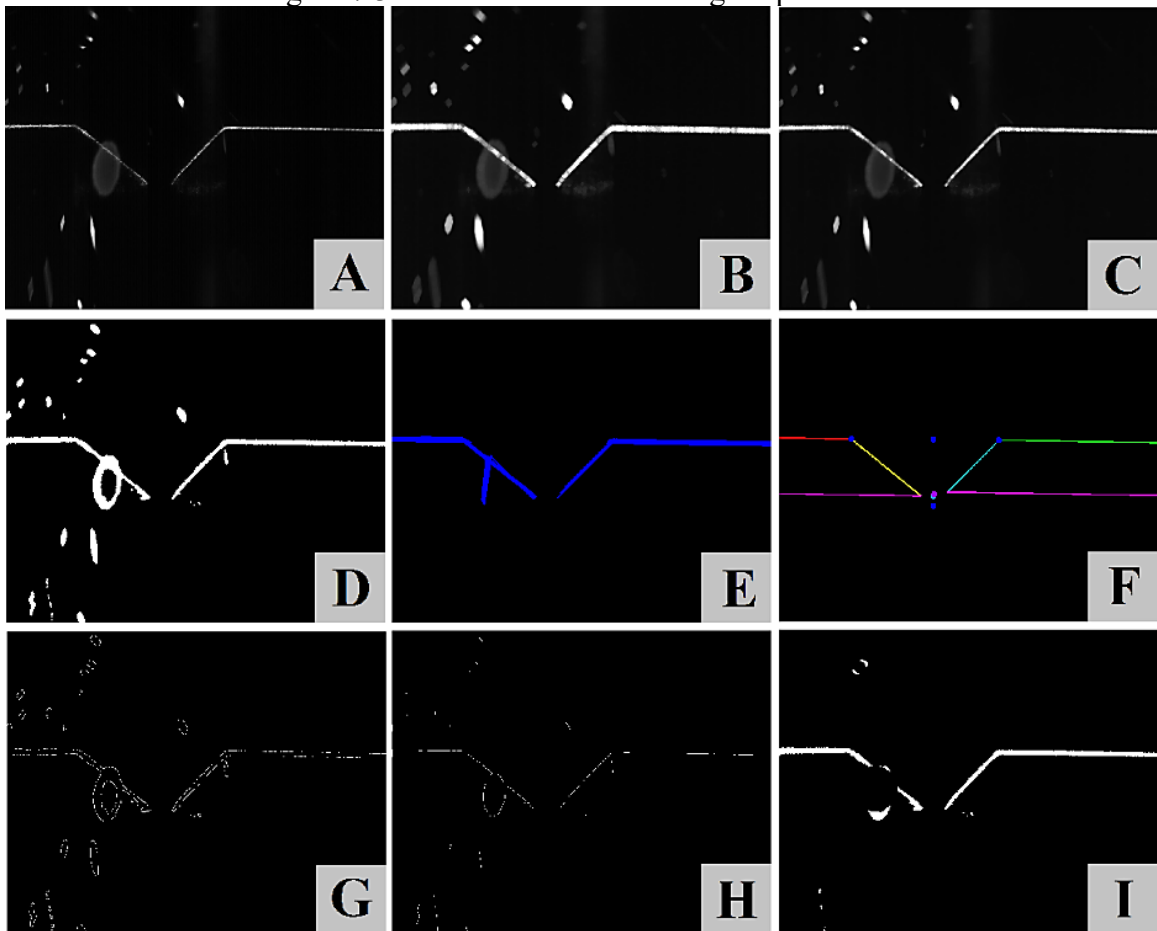
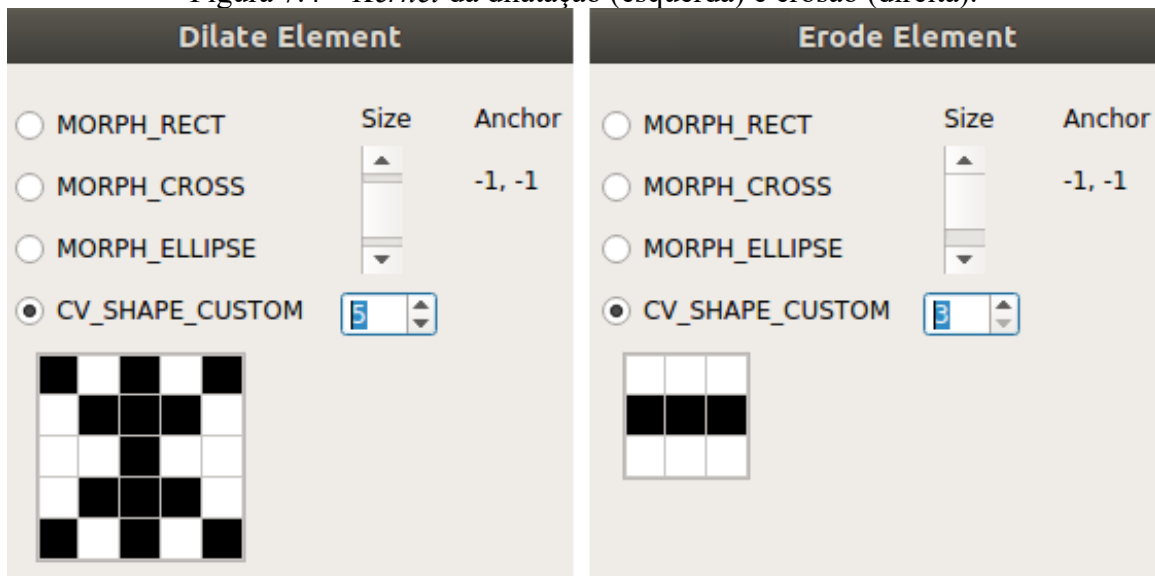


Figura 7.4 – *Kernel* da dilatação (esquerda) e erosão (direita).



A penúltima etapa da sequência principal é a aplicação da transformada de *Hough*. Esse algoritmo consiste basicamente em achar os pixels que tenham intensidade dentro do limiar e tentar traçar retas que passem por estes e os demais pixels da imagem, encontrando as melhores candidatas a retas (as que passam por mais pixels válidos, por exemplo). Nessa etapa, cujo resultado está na Figura 7.3–E, fica evidente que só com este processamento não é possível destacar apenas as linhas do chanfro. Isso ocorre porque alguns respingos e reflexos do arco são muito claros, muito parecidos com retas ou cruzam os segmentos da linha laser na imagem, como é o caso nesta imagem em questão.

Após esta aplicação da transformada de *Hough* foi realizado um processamento de imagem para avaliar as retas retornadas por este baseado em regras. As informações das linhas são verificadas para separá-las em grupos, que são então processados de modo a obter-se um ângulo médio para cada grupo, formando uma única linha para cada elemento do chanfro ou de ruído ainda presente.

Depois disso, pela posição das linhas, é possível diferenciar quais são as faces das chapas (partem da lateral da imagem e são quase horizontais) e quais são as faces dos chanfros (têm um ângulo próximo de 45° e iniciam próximo do fim das faces das chapas). Dessa forma, são separados apenas os 4 segmentos de reta que definem o chanfro em V, conforme ilustrado na Figura 7.3–F.

As linhas rosas desenhadas na Figura 7.3–F são apenas para facilitar a visualização da espessura da chapa e da abertura de raiz, sendo traçadas com base na espessura informada da chapa, através de uma simples cópia dos segmentos de reta que representam as faces da chapa.

Como não foi realizada a calibração do ganho vertical de pixels/mm, que é variável, cabe ao utilizador regular este parâmetro do *software* para que atenda corretamente o seu arranjo óptico de captura das imagens.

Além desses processamentos pela *pipeline* desenvolvida, foram implementadas funções no *software* para estender as linhas até as mesmas se tocarem, melhorando a visualização do chanfro, além de medições pertinentes, como o centro da junta, abertura de raiz e de topo, desnivelamento das chapas, entre outras. Todas as medições são em pixels, sendo que a calibração do sistema de câmera e laser ainda não foi implementada no *software* pois as medições em pixels já permitiram a validação dos cálculos realizados. O resultado dessas implementações está representado na Figura 7.3–F.

Outros métodos, além desta *pipeline*, foram avaliados em outras combinações principalmente combinando a primeira etapa (fechamento) com outros métodos disponíveis na biblioteca *OpenCV* e já implementados no *software*. Assim, foram verificadas combinações da *pipeline* bem-sucedida também com detector de bordas *Canny* (Figura 7.3–G), com o algoritmo de Esqueletização (Figura 7.3–H) e também filtros morfológicos de bolhas (*Blob*, Figura 7.3–I). Estes métodos todos se mostraram muito custosos no tempo de processamento, além de não acrescentarem mudanças essenciais à *pipeline* original, que funcionou muito bem.

Além destes testes, foram selecionadas 1000 imagens consecutivas, adquiridas com o STL1, para comparação da *pipeline* proposta com o algoritmo de Ajuste Linear [132]. No processamento destas 1000 imagens ambos tiveram resultado muito semelhante no quesito medições válidas, sendo os critérios para validação os mesmos dos ensaios com o algoritmo de Ajuste Linear [132]. A diferença significativa observada foi quanto ao tempo de processamento: enquanto o algoritmo de Ajuste Linear, baseado em *LabView*, atingiu taxa média de 10 Hz de processamento, a *pipeline* proposta, mesmo sem qualquer otimização de processamento, atingiu taxa média de 30 Hz no mesmo hardware.

7.4 EXEMPLOS DE DESENVOLVIMENTO PARA O *SOFTWARE* PUBLICADO

O *software* livre publicado neste trabalho, além de uma boa ferramenta didática para o ensino do processamento de imagens digitais, também serve de base para desenvolvimentos futuros por parte de pesquisadores e desenvolvedores independentes.

Uma vez que todo o código fonte do *software* é disponibilizado junto com esta publicação, acompanhado do tutorial para instalação do *software* de edição do mesmo (*software*

Qt e *toolbox OpenCV*, com guia de instalação no Apêndice B), é possível alterar todo e qualquer aspecto deste programa base.

As rotinas já implementadas para leitura, traçagem, exibição e salvamento de imagens, além dos comandos e rotinas do *OpenCV* e bibliotecas de uso geral já incorporadas ao *software*, agilizam grande parte do esforço inicial para criação de um programa deste tipo. Desse modo, fica a cargo do desenvolvedor customizar o *software* para melhor atender às suas necessidades.

Alguns outros *softwares* foram desenvolvidos a partir desta base no decorrer deste trabalho. Esta seção apresenta estes *softwares*, de modo que possam servir de inspiração para outros pesquisadores.

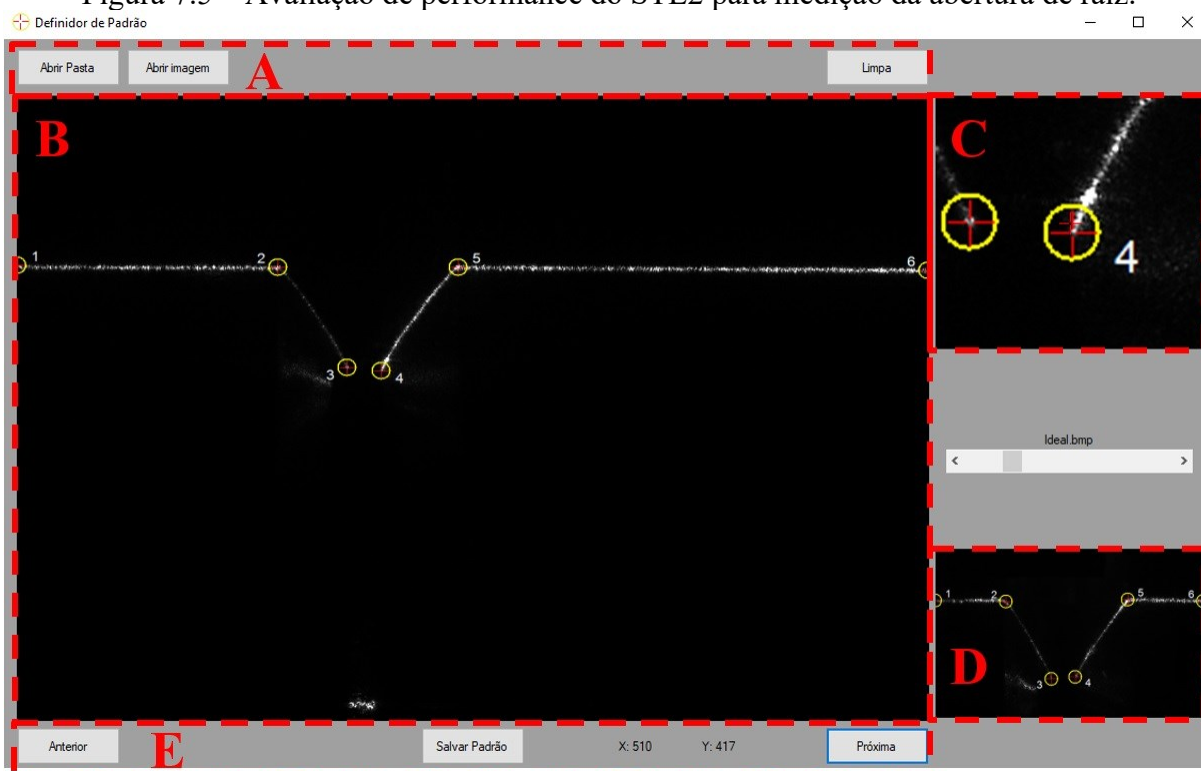
7.4.1 *Software* para criação de gabaritos com imagens de STL

Um dos desafios no desenvolvimento ou análise de algoritmos de processamento de imagens para STL é obter padrões confiáveis de validação para os resultados dos processamentos. Uma vez que as imagens são específicas de cada tipo de aplicação, padrões genéricos não são muito úteis, visto que uma gama de fatores influencia o resultado dos algoritmos, principalmente os aspectos superficiais do material soldado e a disposição dos elementos do circuito de soldagem em relação ao STL.

Dessa maneira, o padrão de validação ideal é um criado a partir de imagens reais, adquiridas por um STL em situação de soldagem, sobre a junta sobre a qual deseja-se avaliar o desempenho do algoritmo em foco.

Um padrão de validação nada mais é, então, do que uma imagem destas com os pontos de interesse devidamente identificados e localizados. Assim, foi desenvolvido um *software* para marcação manual dos pontos de interesse sobre imagens adquiridas por STL. A tela principal deste programa, denominado *Definidor de Padrão*, está retratada na Figura 7.5. Nesta figura a região A contém os botões para carregamento de imagens, em B está o quadro para exibição e traçagem dos pontos, em C uma vista ampliada na região do entorno do mouse, para facilitar o posicionamento dos pontos de interesse, em D uma imagem de gabarito para indicação da ordem que devem ser posicionados os pontos no gabarito e em E os comandos para troca de imagem e criação do padrão.

Figura 7.5 – Avaliação de performance do STL2 para medição da abertura de raiz.



O usuário pode escolher qual tipo de gabarito quer que seja exibido ao operador (Figura 7.5–D), sendo que por padrão é exibido o chanfro do tipo V com 6 pontos de interesse.

A marcação manual dos pontos de interesse, apesar de morosa, é uma atividade que pode gerar grande benefício ao desenvolvedor. Uma vez que os pontos de interesse são posicionados conforme a vontade do desenvolvedor, os algoritmos que utilizarem estes padrões para validação e desempenharem melhor basicamente estarão apenas chegando mais perto da indicação desejada pelo operador do *Definidor de Padrão*. Este tipo de verificação é especialmente útil na avaliação de algoritmos para o processamento de imagens com intuito de documentação e rastreabilidade do processo, onde é preciso ter clareza em quais pontos o *software* está registrando para a peça medida.

7.4.2 *Software* para avaliação de algoritmos de processamento de imagem para STL

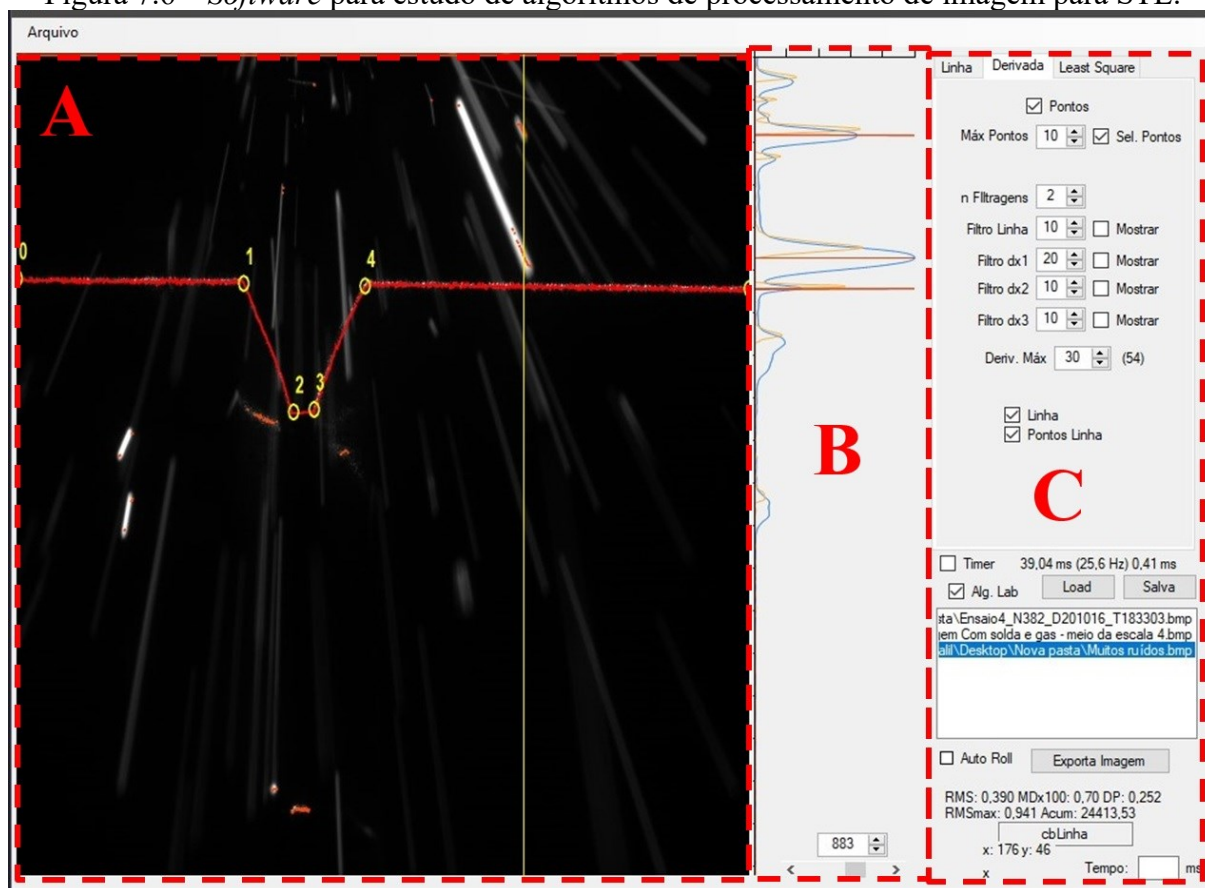
O cenário atual da pesquisa no campo do seguimento de junta e da soldagem adaptativa já apresenta algumas referências dignas de consideração por qualquer desenvolvedor de STL que queira se aventurar no projeto e fabricação de um sensor deste tipo. Alguns destes algoritmos estão inclusive relatados nos capítulos anteriores deste trabalho, em especial os

Capítulos 2 e 4. Todavia, antes de decidir por um algoritmo específico, é interessante que o desenvolvedor avalie algumas opções, de modo a fundamentar sua escolha em resultados práticos dos métodos considerados.

Além da avaliação de algoritmos para escolha, é interessante ter opção também de estudar em profundidade o comportamento de algoritmos específicos, de modo a encontrar falhas ou fraquezas dos mesmos, ou até buscar inspiração em métodos consagrados para solução de problemas análogos já resolvidos por outros autores.

Pensando nessas necessidades, o *software* base foi customizado para propiciar um ambiente de análise criteriosa de algoritmos de processamento de imagem. Este *software* foi chamado de *Análise de algoritmos* e trabalha também integrado ao *Definidor de padrões*, utilizando as imagens padrão geradas por este para validação dos resultados provenientes de cada algoritmo estudado. A tela principal deste *software* está representada na Figura 7.6, sendo que em A está marcado o campo de exibição principal das imagens, em B o campo de exibição da variação de luminosidade da coluna selecionada da imagem (linha amarela em A), com diferenciação para cada etapa de processamento de imagem do algoritmo; em C os comandos para ajuste de parâmetros e calibração dos algoritmos.

Figura 7.6 – *Software* para estudo de algoritmos de processamento de imagem para STL.



8 CONCLUSÃO

Ao final deste trabalho, a consolidação dos conhecimentos científicos e tecnológicos de arranjos ópticos, tipos de STL, algoritmos de processamento de imagem, *softwares* e análises de sensores comerciais se traduz em uma diversificada base para aprendizado e desenvolvimentos futuros do tema. Uma vez que o objetivo principal era a nacionalização destes conhecimentos, o estudo inédito destes temas combinados, em língua portuguesa, ainda com a publicação de um *software* livre para desenvolvimento de algoritmos de processamento de imagem para STL contempla esta proposta e configura um grande passo rumo a sensores de origem brasileira para soldagem, um campo industrial com imenso potencial a nível nacional.

O estudo dos diferentes arranjos ópticos apresentados na literatura e, principalmente, disponíveis comercialmente, contribuí para a inspiração dos futuros desenvolvedores e elucida possíveis soluções de problemas que estes terão de superar. A descrição detalhada dos sistemas comerciais inclusive colabora no dimensionamento de requisitos para projetos futuros, etapa inicial em qualquer projeto de STL.

A compilação associada à teoria de tratamento de imagens das técnicas pertinentes ao processamento de imagens de STL foi dividida em cinco categorias, com uma classificação inédita, desenvolvida para facilitar o estudo e implementação destas técnicas. Esta compilação oferta uma sólida base de consulta para novos desenvolvedores, principalmente aos oriundos da soldagem e engenharia mecânica e não têm familiaridade com a área de processamento digital de imagens. Além da teoria explanada, o glossário disponibilizado no Apêndice A deste trabalho facilita o entendimento e assimilação deste conteúdo, bem como da utilização do *software* publicado.

A análise dos sensores comerciais, dos pontos de vista de *hardware*, *software* e desempenho configura outro estudo inédito apresentado neste trabalho, com destaque para a comparação direta entre três STL comerciais e um de desenvolvimento próprio do LABSOLDA. O uso de técnicas avançadas, como a tomografia industrial, possibilitou a exploração em detalhes dos arranjos ópticos de dois destes sensores, com grande potencial de utilização por futuros desenvolvedores nacionais. As análises de *software* consolidam vários modelos de interface e abordagens diferentes para calibração dos perfis de junta pelos usuários, conhecimentos que podem nortear novos desenvolvimentos, inclusive sobre a plataforma do *software* livre publicado. A avaliação de desempenho destes sensores evidenciou os pontos fortes e fracos de cada sistema ensaiado, características que podem auxiliar engenheiros a

escolherem corretamente entre estes sensores para utilização em projetos futuros. Além disso, a metodologia proposta para o ensaio e avaliação de desempenho destes sensores é inédita e pode ser utilizada por outros pesquisadores ou engenheiros para avaliações futuras de equipamentos deste tipo.

A última etapa deste trabalho consistiu no desenvolvimento e publicação de um *software* livre para processamento de imagens de STL. Além de servir de base para futuros desenvolvimentos de algoritmos de processamento de imagem ou mesmo de soldagem adaptativa, este *software* também tem potencial de utilização como ferramenta didática, uma vez que é leve, de acesso livre e bastante simples e intuitivo de operar e modificar. Várias das rotinas de um *software* de processamento de imagens já estão implementadas e livre de erros, tornando o desenvolvimento sobre esta plataforma muito dinâmico. A publicação deste *software* configura um passo importante rumo a nacionalização dos conhecimentos abordados nesta tese.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma vez que este trabalho estabelece uma sólida base teórica para o projeto de um STL, tanto para o *hardware* (arranjo óptico) quanto para o *software* (processamento de imagem) do mesmo, surgem várias possibilidades de pesquisa, desenvolvimento e inovação neste campo. O próprio LABSOLDA continuará suas pesquisas nessa temática, buscando inclusive a otimização do STL4, que atualmente configura um protótipo, para que se desenvolva em um produto, capaz de atender aos mercados nacional e internacional.

Assim, seriam sugestões interessantes para trabalhos futuros neste tema:

- Otimização do projeto óptico do STL4, estudando talvez a utilização de arranjo otimizado para materiais reflexivos, como representado na Figura 3.3;
- Desenvolvimento de STL para espaços confinados, a exemplo do empregado no CSI (Figura 6.10), uma vez que a fabricante do mesmo descontinuou aquele modelo de linha;
- Estudo dos STL comerciais também quanto à qualidade da medição do ponto de interesse, um parâmetro chave para a realização do seguimento de junta;
- Além da qualidade da medição do ponto de interesse, realização de ensaios com tecimento (oscilação transversal à junta do sensor), de modo a avaliar o comportamento dos STL comerciais neste tipo de situação, comum na soldagem de peças espessas;
- Ainda quanto aos STL comerciais, seria interessante uma comparação detalhada entre os protocolos de comunicação utilizados por cada fabricante, de modo a facilitar a criação de um protocolo próprio e talvez compatível com os demais, possibilitando a utilização conjunta de alguns dos STL com outros de desenvolvimento próprio;
- Realização de ensaios com o STL4, tanto o protótipo aqui estudado quanto suas versões futuras, nos mesmos parâmetros dos testes realizados com os STL comerciais, a fim de comparar suas capacidades e limitações frente os sensores já bem estabelecidos;
- Desenvolvimento de algoritmos inteligentes para calibração dos perfis de junta, com uso de técnicas de inteligência artificial e *machine learning* associadas a *big data*, de modo a facilitar ou mesmo eliminar a intervenção do operador no processo de calibração do sensor sobre o perfil a ser medido, algo que nenhum fabricante faz, de forma eficaz, até o momento da publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. ALFARO, S. C. A. **Sensors for quality control in welding.** *Sold. & Insp.*, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 192-200, set. 2012.
2. KINDERMANN, R. M. **Soldagem orbital do passe de raiz - Algoritmos para controle adaptativo por meio de sensoriamento LASER.** 2016. Dissertação (Mestrado em Fabricação Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
3. XIAOQI, C.; RAJAGOPALAN, D.; AIK, M. F. **Advanced automation techniques in adaptive material processing.** Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2002.
4. MICRO-EPSILON. **Applications for 2D/3D Laser scanners,** Ortenburg–Deutschland, 2017. Disponível em: http://www.micro-epsilon.com/2D_3D/laser-scanner/applications/. Acesso em: 08 jan. 2017.
5. HUANG, W.; KOVACEVIC, R. **Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes.** *Int J Adv Manuf Technol*, [S. l.], v. 63, n. 1, p. 235-248, fev. 2012.
6. NGUYEN, H.; LEE, B. **Laser-vision-based quality inspection system for small-bead laser welding.** *Int J Precis Eng*, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 415-423, mar. 2014.
7. ROUT, A.; DEEPAK, B. B. V. L.; BISWAL, B. B. **Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review.** *Rob Comp Int Manuf*, [S. l.], v. 56, n. 2019, p. 12-37, ago. 2018.
8. PUHL, E. **Desenvolvimento e Avaliação de Protótipo para Sensoriamento por Triangulação Laser aplicado a Soldagem a Arco.** 2017. Tese (Doutorado em Fabricação Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
9. STEFANI, M. A. **Medidores de distância por triangulação a LASER.** 1995. Tese (Doutorado em Física Computacional) – Instituto de Física de São Carlos, Departamento de Física e Informática, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
10. NAYAK, N.; RAY, A.; VAVRECK, A. N. **An Adaptive Real-Time Intelligent Seam Tracking System.** *Journal of Manufacturing Systems*, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 241-245, dez. 1987.

11. RIFTEK. **Laser Triangulation Sensors**, Minsk, Republic of Belarus, 2017.
Disponível em: <https://riftek.com/eng/products/~show/sensors/laser-triangulation-sensor>. Acesso em: 08 jan. 2017.
12. MICRO-EPSILON. **Sensors for manufacturing. Engine Technology International**, Ortenburg–Deutschland, 2014. Disponível em: https://www.micro-epsilon.cz/press/publication/pub-en--2014-03--ETM_March_2014_ME.pdf. Acesso em: 05 mai. 2019.
13. KEYENCE. **Medição instantânea de dois eixos**. Osaka, Japan, 2019. Disponível em: https://www.keyence.com.br/mykeyence/downloadFromDLHistory?downloadAssetId=AS_75658&downloadZipFlag=0. Acesso em: 06 nov. 2019.
14. BANNER. **LTF Series Laser Measurement Sensor**. Minneapolis–USA, 2018.
Disponível em: <http://info.bannerengineering.com/cs/groups/public/documents/literature/164713.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2019.
15. PEPPERL+FUCHS. **Sensors and Systems**. Mannheim, Deutschland, 2017.
Disponível em: https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/doct/tdoct09031_eng.pdf?v=20180912121224>. Acesso em: 06 nov. 2019.
16. CORRIGAN, F. **Flash Lidar Time of Flight (ToF) Camera Sensors on Drones and 10 Terrific Uses**. In: DroneZon, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/best-uses-for-time-of-flight-tof-camera-depth-sensor-technology-in-drones-or-ground-based/>. Acesso em: 06 nov. 2019.
17. SULLIVAN, B. **What is Pulse Ranging Technology (PRT) and Do I Need It?** In: Marshall Wolf Automation, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.wolfautomation.com/blog/what-is-prt/>. Acesso em: 06 nov. 2019.
18. RIFTEK. **2D Laser Scanners**. Minsk, Republic of Belarus, 2017. Disponível em: <https://riftek.com/eng/products/~show/sensors/laser-triangulation-sensor>. Acesso em: 08 jan. 2017.
19. META VISION SYSTEMS. **SLS-050 Preliminary data sheet**. Oxford, UK, 2009.
Disponível em: <http://www.sensorzine.com/datasheet-of-smart-laser-sensor-sls-050-402.html>. Acesso em: 2017 jan. 02.
20. SERVO-ROBOT. **Power-Cam 3D laser vision camera**. Canada, 2015.
21. SCANSONIC BINZEL. **TH6D Datasheet v3.0**, Berlin, Deutschland, 2014.
Disponível em: https://www.scansonic.de/files/downloads/scansonic_th6d-cf-kf_datenblatt_v3.0_en.pdf. Acesso em: 05 fev. 2019.

22. KEYENCE. **High-Speed 2D/3D Laser Profiler LJ-V7000 Series**, Osaka, Japan, 2015. Disponível em: https://www.keyence.com.br/mykeyence/downloadFromDLList?downloadAssetId=AS_72731&downloadZipFlag=0. Acesso em: 05 dez. 2019.
23. ACUITY LASER. **AccuProfile 820 Laser Scanners User's Manual**. Oregon–USA, 2017. Disponível em: <https://www.acuitylaser.com/wp-content/uploads/AP820-manual.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2019.
24. RIFTEK. **Laser Seam Tracking System for Welding Automation RF627Weld Series User's Manual**, Minsk, Republic of Belarus, 2019. Disponível em: https://riftek.com/media/documents/rf627/RF627Weld/Laser_Seam_Tracking_System_for_Welding_Automation_eng.pdf. Acesso em: 08 dez. 2019.
25. SERVO-ROBOT. **Power-Trac Datasheet**, Canada, 2012. Disponível em: <https://welddbot.com/wp-content/uploads/2018/01/Power-Trac.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2019.
26. CRC-EVANS PIPELINE INTERNATIONAL. **ORBIS IWM 12SLi-CRA Internal Welding Machine**, Texas–USA, 2019. Disponível em: <https://www.crc-evans.com/offshore/technology/welding-machines/orbis-iwm-12sli-cra>. Acesso em: 09 dez. 2019.
27. LIBURDI. **LAWS 1000 Brochure**, Ontário, Canada, 2020. Disponível em: https://www.liburdi.com/docs/welding-services/liburdi-automation/LAWS_1000_000.pdf. Acesso em: 20 nov. 2020.
28. VIVIANI, A. B. **Integração de um sensor a laser a um manipulador cartesiano de soldagem para seguimento automático de juntas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Fabricação Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
29. GALEAZZI, D. **Soldagem MIG/MAG Orbital com Sensoriamento Laser: Análise e Melhorias de Condições Operacionais para Aumento da Confiabilidade**. 2019. Dissertação (Mestrado em Fabricação Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
30. PARK, K. *et al.* **Development of an auto-welding system for CRD nozzle repair welds using a 3D laser vision sensor**. *Journal of Mechanical Science and Technology*, [S. l.], v. 21, n. 2007, p. 1720-1725, set. 2007.

31. FANG, Z.; XU, D.; TAN, M. **A Vision-Based Self-Tuning Fuzzy Controller for Fillet Weld Seam Tracking.** *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, China, v. 16, n. 3, p. 540-551, jun. 2011.
32. YUAN, L. *et al.* **Girth seam tracking system based on vision for pipe welding robot.** In: TARN, T. J. *et al.* (eds), *Robot. Weld., Intellige. & Automation*, Berlin: Heidelberg, 2007, v. 362, p. 391-399.
33. CHEN, Z. *et al.* **Laser vision sensing based on adaptive welding for aluminum alloy.** *Front Mech Eng*, China, v. 2, n. 2, p. 218-223, abr. 2007.
34. KIM, J. S. *et al.* **A Robust Method for Vision-Based Seam Tracking in Robotic Arc Welding.** In: Proceedings of Tenth International Symposium on Intelligent Control, 1995, Monterey, CA - USA: IEEE, p. 363-368.
35. KINDERMANN, R. M.; SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C. **Desenvolvimento e validação de algoritmos para emprego de sensores na soldagem robótica orbital do passe de raiz de tubulações.** *Sold. & Insp.*, São Paulo, v. 20, n. 4, p. 391-402, dez. 2015.
36. BONACORSO, N. G.; ALBERTAZZI, A.; DUTRA, J. C. **Automation of the processes of surface measurement and of deposition by welding for the recovery of rotors of large-scale hydraulic turbines.** *Journal of Materials Processing Technology*, Dublin, v. 179, n. 1-3, p. 231-238, out. 2006.
37. BONACORSO, N. G.; DUTRA, J. C. **Adequação do processo plasma com alimentação automática de arame para recuperação de superfícies por soldagem robotizada.** *Sold. & Insp.*, São Paulo, v. 12, n. 4, p. 269-275, dez. 2007.
38. VIVIANI, A. B. *et al.* **Desenvolvimento de sistema para medição do volume de chanfros para soldagem utilizando tecnologia de medição a laser.** In: VIII CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014, Uberlândia, p. 10.
39. PRADA, D. L. *et al.* **Algoritmo para extração das características do chanfro aplicado em sensores de triangulação laser para soldagem.** In: XLII CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, 2016, Belo Horizonte, p. 9.
40. MUHAMMAD, J.; ALTUN, H.; ABO-SERIE, E. **Design Considerations for an Active Laser Vision Based Control for Intelligent Robotic Welding System.** In: ICWET International Conference on Welding Technologies and Exhibition. 2016, Gaziantep – Turquia, p. 9.

41. BLAIS, F. **Review of 20 yeas of range sensor development.** *Journal of Electronic Imaging*, [S. l.], v. 1, p. 231-240, jan. 2004.
42. IAKOVOU, D. **Sensor Development and Integration for Robotized Laser Welding.** 2009. Dissertation (Doctorate Degree), University of Twente, Overijssel – Netherlands, 2009.
43. GUIDI, G. *et al.* **Range sensors on marble surfaces:** Quantitative evaluation of artifacts. *In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2009, [S. l. : s. n.], p. 12.
44. MALIS, E.; CHAUMETTE, F.; BOUDET, S. **Positioning a Coarse-Calibrated Camera with Respect to an Unknown Planar Object by 2D 1/2 Visual Servoing.** *In: IFAC Proceeding Volumes*, 1997, [S. l. : s. n.], p. 497-503.
45. DAVIS, D. **Guidance systems drive automated welding improvements for heavy fabrications.** *The Fabricator*, [S. l. : s. n.], p. 68-69, dez. 2019.
46. SCANSONIC BINZEL. **THxDView Graphical user interface software for the TH6 system.** Berlin, Deutschland, 2015.
47. CANADIAN FABRICATING & WELDING. **ABB Robotics offers laser-based optical triangulation sensors for seam tracking.** *Canadian Metalworking*, Canda, v. 1, p. 2, jan. 2020.
48. MICRO-EPSILON. **optoNCDT - Laser displacement sensore (triangulation) catalog**, Ortenburg–Deutschland, 2019. Disponível em: <https://www.micro-epsilon.com/download/products/cat--optoNCDT--en.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2019.
49. KEYENCE. **Sensor de deslocamento a laser de alta velocidade e alta precisão - Série LK-G5000**, Osaka, Japan, 2018. Disponível em: https://www.keyence.com.br/mykeyence/downloadFromDLList?downloadAssetId=AS_100081&downloadZipFlag=0. Acesso em: 04 dez. 2019.
50. XU, P. *et al.* **A visual seam tracking system for robotic arc welding.** *Int J Adv Manuf Technol*, London, v. 37, p. 70-75, fev. 2007.
51. DVS. **Sensoren für das vollmechanische Lichtbogenschweißen.** [S. l.], 2005.
52. OXFORD SENSOR TECHNOLOGY. **CSS Weld Sensor - Product Datasheet.** Abingdon, Oxfordshire-UK, 2004.
53. VALK WELDING. **Valk Mailing EN 2012-1**, Netherlands, 2012. Disponível em: <https://www.valkwelding.com/en/valk-mailing>. Acesso em: 05 fev. 2019.

54. VALK WELDING. **Valk Mailing EN 2010-01**, Netherlands, 2010. Disponível em: <https://www.valkwelding.com/en/valk-mailing>. Acesso em: 05 fev 2019.
55. VALK WELDING. **Valk Mailing EN 2011-2**, Netherlands, 2011. Disponível em: <https://www.valkwelding.com/en/valk-mailing>. Acesso em: 05 fev 2019.
56. ROCHA DE ANDRADE, J. B.; VILARINHO, L. O. **Avaliação Ergonômica do Trabalho do Soldador por meio de Sensor de Movimento Infravermelho**. In: VIII CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014, Uberlândia, p. 9.
57. META VISION SYSTEMS. **Smart Laser Pilot SLPi System for Robot Welding**, Oxford, UK, 2015. Disponível em: <https://meta-vs.com/sites/default/files/Smart-Laser-Pilot.pdf>. Acesso em: 09 dez. 2019.
58. IMAGING AND MACHINE VISION EUROPE. **SLS ARC for robotic arc welding**, [S. l.], 2014. Disponível em: <https://www.imveurope.com/press-releases/sls-arc-robotic-arc-welding>. Acesso em: 12 mar. 2020.
59. ELETRO OPTICS. **SLS ARC**, [S. l.], 2014. Disponível em: <https://www.electrooptics.com/press-releases/sls-arc>. Acesso em: 12 mar. 2020.
60. SERVO-ROBOT. **Robot Vision Systems Catalog**, Canada, 2011. Disponível em: <https://servo-robot.com/arc-seam-tracking/>. Acesso em: 26 mar. 2020.
61. SUNG, K. *et al.* **Development of a Multiline Laser Vision Sensor for Joint Tracking in Welding**. *Weld J*, [S. l.], v. 88, p. 79-85, abr. 2009.
62. ZHANG, L. *et al.* **Weld Line Detection and Tracking via Spatial-Temporal Cascaded Hidden Markov Models and Cross Structured Light**. *IEEE Tran Inst Meas*, [S. l.], v. 63, n. 4, p. 742-753, abr. 2014.
63. META VISION SYSTEMS. **Meta Laser Vision for Robot Welding Applications**, Oxford, UK, 2015. Disponível em: <https://meta-vs.com/sites/default/files/Robot-Welding-Applications.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2019.
64. META VISION SYSTEMS. **Meta Laser Vision for SAW Pipe Mills**, Oxford, UK, 2015. Disponível em: <https://meta-vs.com/sites/default/files/Tube-Pipe.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2020.
65. SCANSONIC BINZEL. **Training TH6x**. Berlin, Deutschland, 2016.
66. SERVO-ROBOT. **Wiki-Scan**. Canada, 2017.
67. RIFTEK. **Optoelectronic Instruments and System for Geometric Quantities Measurement - Product Catalog 2019**, Minsk, Republic of Belarus, 2019. Disponível em: https://riftek.com/media/catalog/catalog2019/RIFTEK_Catalog_

- 2019_eng.pdf. Acesso em: 11 dez. 2019.
68. SERVO-ROBOT. **DIGI-LAS/MDL Intelligent Modular Laser Welding Head with Seam Tracking and Weld Bead Inspection**. Canada, 2010.
 69. IAKOVOU, D.; AARTS, R.; MEIJER, J. **Sensor integration for robotic laser welding processes**. In: International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication, 24th, 2005, Miami: Icaleo, p. 9.
 70. SZELISKI, R. **Computer Vision: Algorithms and Applications**. 2011. ed., [S. l.]: Springer, 2010.
 71. KRIG, S. **Computer Vision Metrics - Survey, Taxonomy, and Analysis**. 1. ed. [S. l.]: Apress, 2014.
 72. GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. 2. ed. [S. l.]: Prentice Hall, 2002.
 73. VON WANGENHEIM, A. **Análise de Sinais e Imagens para Reconhecimento de Padrões**, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/patrec/imagens.html#E2%20-%20Morfologia%20Matem%C3%A1tica>. Acesso em: 28 abr. 2020.
 74. MARR, D. **Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information**. 2010. ed. Cambridge: W.H. Freeman and Company, 1982.
 75. MUHAMMAD, J.; ALTUN, H.; ABO-SERIE, E. **Welding seam profiling techniques based on active vision sensing for intelligent robotic welding**. *Int J Adv Manuf Technol*, London, v. 88, p. 127-145, abr. 2017.
 76. LIANGYU, L. *et al.* **Image Processing of Seam Tracking System Using Laser Vision**. *Robot. Weld., Intellige. & Automation*, Berlin, v. 362, p. 319-324, 2007.
 77. ZHANG, L.; WU, C.; ZOU, Y. **An On-line Visual Seam Tracking Sensor System During Laser Beam Welding**. In: International Conference on Information Technology and Computer Science, 2009, [S. l.]: IEEE. 2009. p. 4.
 78. GLASBEY, C. A.; HORGAN, G. W. **Image Analysis for the Biological Sciences**. 1. ed., New York, NY-USA: John Wiley & Sons Inc., 1995.
 79. PUNEET; GARG, N. K. **Binarization Techniques used for Grey Scale Images**. *Int. J. of Comp App.*, [S. l.], v. 71, n. 1, p. 8-11, jun. 2013.

80. OPENCV; EXPERIENCE AI. **Open Source Computer Vision 4.3.0 Documentation**, [S. l.], 2020. Disponível em: <https://docs.opencv.org/4.3.0/index.html>. Acesso em: 13 mai. 2020.
81. OTSU, N. **A threshold selection method from gray level histogram**. *IEEE Trans. On System, Man and Cybernetics*, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 62-67, jan. 1979.
82. KHURSHID, K.; SIDDIQI, I.; VICENT, N. **Comparison of Niblack inspired Binarization Methods for Ancient Documents**. In: IS&T-SPIE Electronic Imaging Symposium, 2009, San Jose, CA–USA: DBLP, 2009, p. 10.
83. FISHER, R. *et al.* **Geometric Operations - Geometric Scaling**, [S. l.], 2003. Disponível em: <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/scale.htm>. Acesso em: 25 mar. 2020.
84. HUANG, W.; KOVACEVIC, R. **A Laser-Based Vision System for Weld Quality Inspection**. *Sensors*, [S. l.], v. 11, p. 506-521, jan. 2011.
85. RADON, J. **On the determination of functions from their integral values along certain manifolds**. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 170-176, dec. 1986.
86. XU, D. *et al.* **Features Extraction for Structured Light Image of Welding Seam with Arc and Splash Disturbance**. In: International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Kunming, 2004, China: IEEE, 2004, p. 1559-1563.
87. LEE, J. P. *et al.* **A Study on Optimal Algorithms to Find Joint Tracking in GMA Welding**. *IJESIT*, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 370-380, mai. 2014.
88. HAUG, K.; PRITSCHOW, G. **Reducing Distortions caused by the Welding Arc in a Laser Stripe Sensor System for Automated Seam Tracking**. In: ISIE, 1999, Bled, Slovenia: IEEE, 1999, p. 919-924.
89. WIENER, N. **Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series: With Engineering Applications**. 1. ed. [S. l.]: MIT Press, 1964.
90. GU, W. P.; XIONG, Z. Y.; WAN, W. **Autonomous seam acquisition and tracking system for multi-pass welding based on vision sensor**. *Int J Adv Manuf Technol*, London, v. 69, p. 451-460, mai. 2013.
91. FANG, Z.; XU, D.; TAN, M. **Vision-based initial weld point positioning using the geometric relationship between two seams**. *Int J Adv Manuf Technol*, London, v. 66, p. 1535-1543, set. 2013.

92. KIDDEE, P.; FANG, Z.; TAN, M. **Visual Recognition of the Initial and End Points of Lap Joint for Welding Robots.** *In: International Conference on Information and Automation, 2014, Hailar, China: IEEE, 2014, p. 513-518.*
93. BAAREH, A. K. M. *et al.* **Performance Evaluation of Edge Detection Using Sobel, Homogeneity and Prewitt Algorithms.** *Journal of Software Engineering and Applications, [S. l.], v. 11, p. 537-551, nov. 2018.*
94. CANNY, J. **A computational approach to edge detection.** *Pattern Analysis and Machine Intelligence, [S. l.], v. 6, p. 679-698, 1986.*
95. SHI, Y. H.; WANG, G. R.; LI, G. J. **Adaptive Robotic Welding System Using Laser Vision Sensing for Underwater Engineering.** *In: International Conference on Control and Automation, 2007, Guangzhou, China: IEEE, 2007, p. 1213-1218.*
96. BLUM, H. **A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape.** *In: WATHEN-DUNN, W. Models for the Perception of Speech and Visual Form, 1. ed., Cambridge: MIT Press, 1967.*
97. MURTAGH, F.; RAFTERY, A. E.; STARCK, J. L. **Bayesian inference for multiband image segmentation via model-based cluster trees.** *Image and Vision Computing, [S. l.], v. 23, p. 587-596, fev. 2005.*
98. YU, J. *et al.* **Weld Seam Recognition Based On CCD Image Processing.** *Int J of Sig Proc, Imag Proc and Patt Reco, [S. l.], v. 8, n. 6, p. 245-252, jun. 2015.*
99. POOJA, K. M.; RAJESH, R. **Image Segmentation: A survey.** *In: Recent Advances In Mathematics, Statistics And Computer Science - International Conference, 2015. [S. l.]: World Scientific, 2016, p. 522-523.*
100. HOUGH, P. V. C. **Method and Means for Recognizing Complex Patterns.** *Patente: US3069654A, [S. l. : s. n.], 18 dez. 1960.*
101. LI, Y. *et al.* **Measurement and Defect Detection of the Weld Bead Based on Online Vision Inspection.** *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, [S. l.], v. 59, n. 7, p. 1841-1849, jul. 2010.*
102. LI, Y. *et al.* **On-line Visual Measurement and Inspection of Weld Bead Using Structured Light.** *In: International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2008, Victoria, Canada: IEEE, 2008, p. 6.*
103. LUO, H.; CHEN, X. **Laser visual sensing for seam tracking in robotic arc welding of titanium alloys.** *Int J Adv Manuf Technol, London, v. 26, p. 1012-1017, mai. 2004.*

104. FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C. **Random Sample Consensus A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography.** *Communications of the ACM*, [S. l.], v. 24, n. 6, p. 381-395, jun. 1981.
105. DUDA, R. O.; HART, P. E. **Use of the Hough Transformation to Detect Lines and in Pictures.** *Communications of the ACM*, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 11-15, 1972.
106. BALLARD, D. H. **Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes.** *Pattern Recognition*, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 111-122, 1981.
107. HASSANEIN, A. S. *et al.* **A Survey on Hough Transform, Theory, Techniques and Applications.** *Computer Vision and Pattern Recognition*, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 18, jan. 2015.
108. XU, L.; OJA, E.; KULTANEN, P. **A new curve detection method: Randomized Hough Transform (RHT).** *Pattern Recognition Letters*, [S. l.], v. 11, p. 331-338, mai. 1990.
109. CAUCHY, A. **"Sur les intégrales qui s'étendent à tous les points d'une courbe fermée"** (On integrals that extend over all of the points of a closed curve). *Comptes rendus*, [S. l.], v. 23, p. 251-255, 1846.
110. HAUG, K.; PRITSCHOW, G. **Robust Laser-stripe Sensor for Automated Weld-seam-tracking in the Shipbuilding Industry.** *In: IECON*, 1998, [S. l.]: IEEE, 1998, p. 1236-1241.
111. GONG, Y.; DAI, X.; LI, X. **Structured-light based joint recognition using bottom-up and top-down combined visual processing.** *In: International Conference on Image Analysis and Signal Processing*, 2010, Zhejiang–China: IEEE, 2010, p. 507-512.
112. KIM, J. S. *et al.* **A robust visual seam tracking system for robotic arc welding.** *Mechatronics*, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 141-163, mar. 1996.
113. SICARD, P.; LEVINE, M. D. **Joint Recognition and Tracking for Robotic Arc Welding.** *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 714-728, jul. 1989.
114. NAN, H.; BEATTIE, R. J.; DAVEY, P. G. **A Rule-Based System for Interpreting Weld Seam Images.** *Int J of Adv Man Tech*, London, v. 3, n. 3, p. 111-121, jul. 1988.
115. WU, J.; SMITH, J. S.; LUCAS, J. **Weld bead placement system for multipass welding.** *IEEE Proc.-Sci. Meas. Technol*, [S. l.], v. 143, n. 2, p. 85-90, mar. 1996.

116. ZHU, Z. Y. *et al.* **Recognition of the initial position of weld based on the image pattern match technology for welding robot.** *Int J Adv Manuf Technol*, London, v. 26, p. 784-788, jan. 2005.
117. CARL ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK GMBH. **Traceable 3D X-Ray Measurements.** Deutschland, 2016. Disponível em: http://www.msi-viking.com/assets/images/downloads/productspecsheets/ZEISS%20Spec%20Sheets/ZEISS_MET ROTOM_CT-Specs.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2017.
118. YASKAWA MOTOMAN. **HP20D-A80 High-Precision Industrial Robot.** Ohio—USA, 2020. Disponível em: <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial/assembly-handling/hp-series/hp20d-a80>>. Acesso em: 29 abr. 2020.
119. SPS - SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. **Catálogo de Produtos SPS,** Florianópolis, 2018. Disponível em: https://sps-soldagem.com.br/catalogo/Catalogo_de_equipamentos_SPS-Soldagem.pdf. Acesso em: 15 set. 2020.
120. TBI INDUSTRIES. **MIG/MAG TBi Aut Series.** Deutschland, 2020. Disponível em: <https://www.tbi-industries.com/en/products/mig/welding-torches-tbi-aut>. Acesso em: 29 abr. 2020.
121. IMC SOLDAGEM. **Linha DigiPLUS A7,** Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://www.imc-soldagem.com.br/pt-br/equipamentos/fontes-de-soldagem/multiprocesso/linha-digiplus-a7>. Acesso em: 18 abr. 2020.
122. SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C. **Controlled short-circuiting MIG/MAG welding (CCC) - Process analysis tools.** *Welding and Cutting*, [S. l.], v. 3, p. 162-167, jul. 2009.
123. DIRENE FILHO, H. **MIG/MAG CCC - Avanços na Tecnologia de Controle da Transferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz.** 2014. Dissertação (Mestrado em Fabricação Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
124. LABSOLDA. **SAP - Sistema de Aquisição Portátil.** Florianópolis, 2012. Disponível em: http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/sap_4.php. Acesso em: 21 set. 2015.
125. SERVO-ROBOT. **WeldCom.** Canada, 2009.

126. CLOCKSIN, W. F. *et al.* **An Implementation of Model-Based Visual Feedback for Robot Arc Welding of Thin Sheet Steel.** *Int J Rob Res*, Massachusetts–USA, v. 4, n. 1, p. 13-26, mar. 1985.
127. FLIR. **Blackfly S GigE 1.6 MP 78 FPS Camera**, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.flir.com/products/blackfly-s-gige/?model=BFS-PGE-16S2M-CS>. Acesso em: 26 mar. 2020.
128. SPS - SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. **Tartilope V4 - Sistema de Movimentação Automática para Soldagem.** Florianópolis, 2008. Disponível em: https://sps-soldagem.com.br/catalogo/07-08_Tartilope_V4.pdf. Acesso em: 18 jun. 2020.
129. AWS. **AWS A5.18/A5.18M:2005** - Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding, 2005. ed., Miami, Florida–USA, 2005. Disponível em: https://pubs.aws.org/Download_PDFS/A5.18-A5.18M_2005PV.pdf. Acesso em: 15 mar. 2020.
130. NATIONAL INSTRUMENTS. **Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW 2017**, Texas–USA, 2017. Disponível em: <http://www.ni.com/labview/pt/>. Acesso em: 28 mar. 2020.
131. SERVO-ROBOT. **Power-Box Compact Control Unit - Installation and Operation Manual v2.2.** Canada, 2015.
132. SILVA, R. H. G. *et al.* **Welding Joint Features Extraction Algorithm for Laser Triangulation Sensors Applied to Root Pass Control.** *Sold. & Insp.*, São Paulo, v. 1, p. 14-23, abr. 2017.

APÊNDICE A – GLOSSÁRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

<i>Abertura</i>	<i>Opening</i> , operação morfológica onde uma imagem é erodida por um elemento estruturante e, em seguida, dilatada por um segundo operador
<i>Aliasing</i>	<i>Foldover</i> , efeito que se assemelha a um serrilhado em imagens digitais, ocorre por baixas frequência de amostragem ou resolução (<i>sampling</i>)
<i>Amostragem</i>	Ver ‘ <i>Sampling</i> ’
<i>Aspect Ratio</i>	Proporção entre a altura e a largura de um objeto na imagem
<i>Average</i>	<i>Arithmetic mean</i> , média, filtro que trabalha com valor médio
<i>Binarização</i>	Técnica que envolve a mudança na quantização de uma imagem, que geralmente é de 8 bits (256 níveis), para 1 bit (2 níveis)
<i>Block averaging</i>	Método para realizar a remoção de pixels, para diminuição do tamanho total da imagem (diminui a quantidade de pixels), onde realiza-se uma média entre um número específicos de vizinhos e o pixel central, este último sendo mantido com o valor médio, com alguns ou todos os vizinhos envolvidos no cálculo sendo descartados
<i>Blurring</i>	Efeito de desfoque da imagem, pode ser combinado com o método de <i>pixel sampling</i> para evitar efeito de <i>aliasing</i> durante a redução do tamanho de uma imagem
<i>CCD</i>	‘ <i>Charge-Coupled Device</i> ’, sensor de imagem muito utilizado em âmbito geral, formado por uma matriz de capacitores acoplados
<i>CMOS</i>	‘ <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i> ’, sensor de imagem que utiliza transistores MOSFET em pares simétricos e complementos
<i>Convolução</i>	Operação matemática entre matrizes bidimensionais, sendo uma destas a imagem e as outras os elementos estruturantes ou <i>kernel</i> diversos
<i>Dilatação</i>	<i>Dilation</i> , operação de morfologia matemática que propaga os contornos dos pixels brancos 1 pixel sobre os pixels pretos, aumentando o nível de luminosidade médio da imagem
<i>Elemento Estruturante</i>	Matriz de convolução, bidimensional, com dimensão ímpar, que traduz uma equação ou função matemática a ser aplicada sobre uma imagem em forma de matriz, sendo a aplicação através da convolução

<i>Equivalent Diameter</i>	Diâmetro equivalente do círculo que tenha uma área igual à área de contorno de um objeto da imagem
<i>Erosão</i>	<i>Eroton, Erosion</i> , operação de morfologia matemática que propaga os contornos dos pixels pretos 1 pixel sobre os pixels brancos, diminuindo o nível de luminosidade médio da imagem, inverso da dilatação
<i>Esqueletização</i>	<i>Skeletonizing, Thinning</i> , técnica que reduz os objetos da imagem a versão afinada dos mesmos
<i>Extent</i>	Proporção da área do contorno para a área do retângulo delimitador mínimo (menor retângulo não rotacionado que contém o objeto)
<i>Fechamento</i>	<i>Closing</i> , operação morfológica onde uma imagem é dilatada por um elemento estruturante e, em seguida, erodida por um segundo operador
<i>Global Shutter</i>	Tipo de sensor de imagem que faz a leitura do sensor inteiro respeitando o mesmo instante da aquisição da imagem, ver <i>Rolling Shutter</i>
<i>Grayscale</i>	‘Escala de cinza’, refere-se à quantização de uma imagem digital, geralmente é utilizada uma escala de 256 níveis de cinza para representar uma imagem monocromática (8 bits)
<i>Greyscale</i>	Ver ‘ <i>Grayscale</i> ’, nome alternativo para a mesma técnica (inglês britânico)
<i>Kernel</i>	Tipo de matriz bidimensional, de dimensões ímpares, que traduz uma equação ou função matemática qualquer em forma de matriz, para ser utilizada no processamento de uma imagem qualquer
<i>Limiar</i>	Ver <i>Threshold</i>
<i>Median</i>	Mediana, filtro que trabalha com valor mediano de um conjunto
<i>Noise</i>	Ver Ruído
<i>Outlier</i>	Ponto fora da curva, que destoa significativamente dos demais pontos do conjunto de dados
<i>Pixel</i>	‘ <i>Picture Element</i> ’, ou elemento de imagem, unidade mínima que contém informações pontuais de uma imagem digital, que é representada por um conjunto de pixels
<i>Pixel replication</i>	Método para duplicação de pixels, para aumento do tamanho total da imagem (aumenta a quantidade de pixels), através da duplicação de

	um pixel para um ou mais novos pixels vizinhos, de maneira homogênea entre linhas e colunas da imagem
<i>Pixel sampling</i>	<i>Row-Column Deletion</i> , método de eliminação de pixels, para redução do tamanho total da imagem (diminui a quantidade de pixels), simplesmente pela remoção de pixels em ordem fixa, homogênea entre linhas e colunas
<i>Quantização</i>	Quantidade de tons de cinza que pode ser atribuído a cada ponto digitalizado em uma imagem monocromática (número de bits)
<i>Resolução</i>	Número de pixels total de uma imagem, produto do número de linhas pelo número de colunas da imagem, ver <i>Sampling</i>
<i>Resolução Espacial</i>	Relação entre o número de pixels utilizado para reproduzir uma imagem digital e o tamanho da imagem real, em geral medido em pontos por polegada (dpi, <i>dots per inch</i>)
<i>RGB</i>	' <i>Red Green Blue</i> ', sistema de cores que utiliza Vermelho, Verde e Azul para compor imagens coloridas digitais, muito utilizado em monitores.
<i>ROI</i>	' <i>Region of Interest</i> ', região de interesse, delimita a área útil da imagem
<i>Rolling Shutter</i>	Tipo de sensor de imagem com tecnologia que faz uma varredura (vertical ou horizontal) no momento de ler a imagem capturada do sensor, não sendo ideal para STL, ver <i>Global Shutter</i>
<i>Ruído</i>	Todo e qualquer artefato que não pertença ao escopo da imagem que se quer analisar, podendo ter origem no próprio sensor de imagem ou fruto de perturbações do ambiente da soldagem
<i>Sampling</i>	Número de pontos utilizados para representar uma imagem digital, muitas vezes referido como análogo à resolução espacial da imagem
<i>Salt and Pepper</i>	Tipo de ruído aleatório muito utilizado para teste de algoritmos de processamento de imagem, se caracterizando por cobrir toda a imagem com pixels brancos (<i>salt</i> , sal) e pretos (<i>pepper</i> , pimenta)
<i>Scaling</i>	<i>Geometric Scaling</i> , ver <i>Zoom In</i> e <i>Zoom Out</i>
<i>SDK</i>	' <i>Software Development Kit</i> ', conjunto de softwares básicos para integração de um equipamento ou dispositivo digital
<i>Sharpening</i>	Filtro que acentua os contornos da imagem, ajusta a Nitidez da imagem
<i>Skeleton</i>	Ver Esqueletização

<i>Skeletonizing</i>	<i>Skeleton</i> , ver Esqueletização
<i>Smoothing</i>	Ou <i>Exponential Smoothing</i> , filtro com característica de passa-baixa
<i>Solidity</i>	Solidez, relação entre a área do contorno e a envoltória convexa (<i>convex hull</i>) de um objeto na imagem
<i>Speckle</i>	Fenômeno observado em fontes de luz coerentes, como o laser, causado pela interferência de frentes de ondas, cujo resultado é um conjunto de pixels claros e escuros, criando um efeito de granulado (<i>speckle</i>)
<i>STL</i>	‘Sensor de Triangulação a Laser aplicável a soldagem’
<i>Thinning</i>	Ver Esqueletização
<i>Threshold</i>	Limiar
<i>Zoom In</i>	‘ <i>Zoom</i> ’, ‘ <i>Zooming</i> ’, ‘aumento’, ‘ampliação’, ‘aproximação’, operação que consiste em aumentar a imagem pela criação de novos pixels
<i>Zoom Out</i>	‘ <i>Shrinking</i> ’, ‘redução’, ‘diminuição’, ‘afastamento’, operação para diminuir o tamanho da imagem pela eliminação de pixels

APÊNDICE B – GUIA DE INSTALAÇÃO DO *SOFTWARE* DESENVOLVIDO

Os arquivos pertinentes a este apêndice, compreendendo o *software* livre desenvolvido, a biblioteca *OpenCV* e o *software CMake* para o ambiente *Windows* estão disponíveis para *download* no link:

[Tese_SDK.rar](https://labsolda.ufsc.br/perm/tese_2021_alberto_SDK.rar)

https://labsolda.ufsc.br/perm/tese_2021_alberto_SDK.rar

TUTORIAL DE INSTALAÇÃO PARA SISTEMA OPERACIONAL WINDOWS

Os desenvolvedores do *Qt* disponibilizam uma página com tutorial para instalação deste *software*, com a biblioteca *OpenCV*, em ambiente *Windows*. O tutorial pode ser acessado pelo link:

[How to setup Qt and openCV on Windows - Qt Wiki](https://wiki.qt.io/How_to_setup_Qt_and_openCV_on_Windows)

https://wiki.qt.io/How_to_setup_Qt_and_openCV_on_Windows

Além deste tutorial online, acompanha o pacote SDK disponibilizado neste trabalho um guia com instruções de instalação dos componentes necessários.

O usuário deve se atentar para seguir todas as etapas corretamente, bem como ter certeza de que o processo correu conforme esperado, antes de prosseguir com a abertura do projeto do *software* desenvolvido no ambiente do *Qt*.

Uma vez corretamente instalado e já conectado à biblioteca *OpenCV*, o usuário deve abrir o projeto do *software* publicado no ambiente do *Qt*. O arquivo do projeto é o “openCV.pro”. Basta o usuário iniciar o *Qt*, clicar em abrir um projeto e localizar este arquivo, na pasta “SDK Tese/openCV”, e clicar em Sim/Yes caso haja algum diálogo de confirmação antes do programa carregar.

Uma vez carregado, o usuário deve entrar no arquivo openCV.pro pela interface de projetos abertos do *Qt*. Na linha 20, no parâmetro INCLUDEPATH, o usuário deve alterar o caminho para a pasta pertinente onde foi instalada a biblioteca do *OpenCV*, provavelmente sendo necessário substituir apenas o termo “Desenvolvedor” pelo nome do seu usuário do *desktop*.

A tela (*form*) principal do *software* está nomeada como “visaoC”. A partir deste ponto, fica a cargo do usuário customizar o *software* para suas necessidades.

TUTORIAL DE INSTALAÇÃO PARA SISTEMA OPERACIONAL LINUX

Os desenvolvedores do *Qt* também disponibilizam uma página com tutorial para instalação deste *software*, com a biblioteca *OpenCV*, em ambiente *Linux*. O tutorial pode ser acessado pelo link:

[OpenCV with Qt - Qt Wiki](https://wiki.qt.io/OpenCV_with_Qt)

https://wiki.qt.io/OpenCV_with_Qt

[Como instalar Qt no Linux](https://youtu.be/I5jasWrsxT0)

<https://youtu.be/I5jasWrsxT0>

Além deste tutorial online, acompanha o pacote SDK disponibilizado neste trabalho um guia com instruções de instalação dos componentes necessários.

O usuário deve se atentar para seguir todas as etapas corretamente, bem como ter certeza de que o processo correu conforme esperado, antes de prosseguir com a abertura do projeto do *software* desenvolvido no ambiente do *Qt*.

Uma vez corretamente instalado e já conectado à biblioteca *OpenCV*, o usuário deve abrir o projeto do *software* publicado no ambiente do *Qt*. O arquivo do projeto é o “openCV.pro”. Basta o usuário iniciar o *Qt*, clicar em abrir um projeto e localizar este arquivo, na pasta “SDK Tese/openCV”, e clicar em Sim/Yes caso haja algum diálogo de confirmação antes do programa carregar.

Uma vez carregado, o usuário deve entrar no arquivo openCV.pro pela interface de projetos abertos do *Qt*. Na linha 20, no parâmetro INCLUDEPATH, o usuário deve alterar o caminho para a pasta pertinente onde foi instalada a biblioteca do *OpenCV*, provavelmente sendo necessário substituir apenas o termo “Desenvolvedor” pelo nome do seu usuário do *desktop*.

A tela (*form*) principal do *software* está nomeada como “visaoC”. A partir deste ponto, fica a cargo do usuário customizar o *software* para suas necessidades.

APÊNDICE C – IMAGENS *ONLINE* MAIS SIGNIFICATIVAS DE STL

Neste apêndice estão relacionadas as imagens julgadas mais significativas capturadas pelos ensaios executados segundo a metodologia descrita na seção 5.3 deste trabalho. Uma vez que estas imagens já estão relacionadas nesta publicação (da Figura 4.4 até a Figura 4.9), aqui estão relacionadas conforme o nome do arquivo de cada imagem, de modo a facilitar ao desenvolvedor a identificação destas imagens, já que as mesmas acompanham o *software* livre publicado. Desse modo, o título destas figuras corresponde ao nome idêntico de cada arquivo.

Fig 4.4 - Imagem ideal

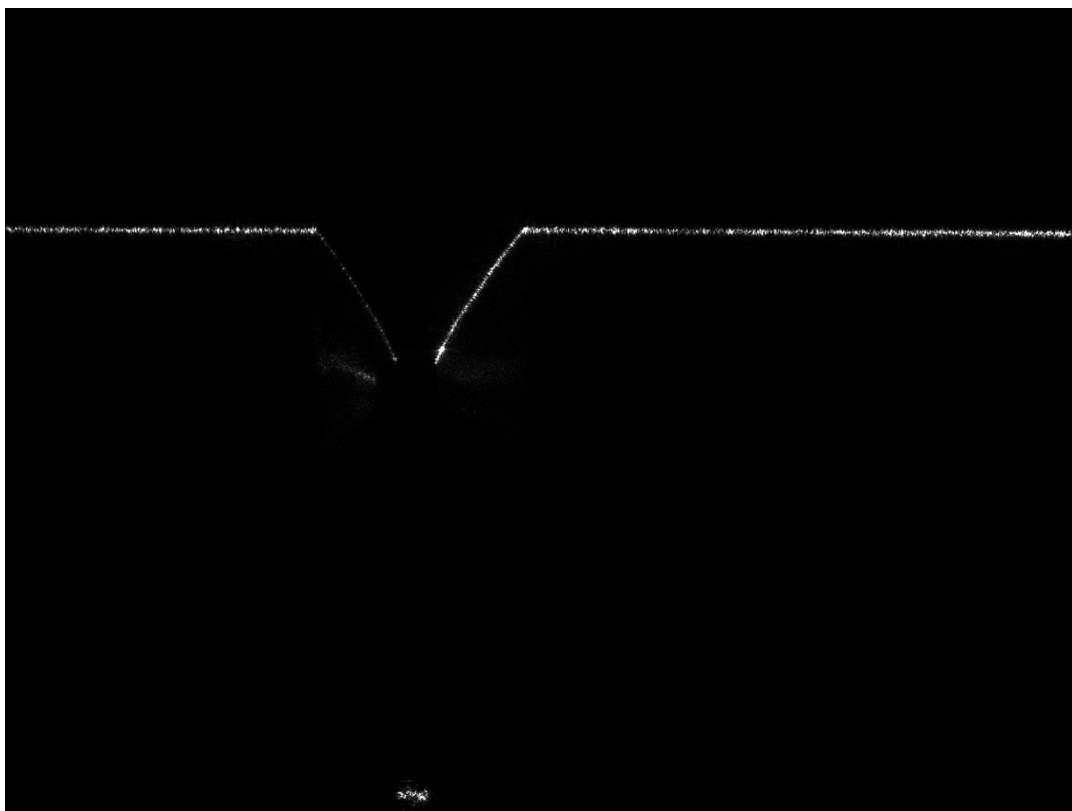


Fig 4.5 - Muitos respingos

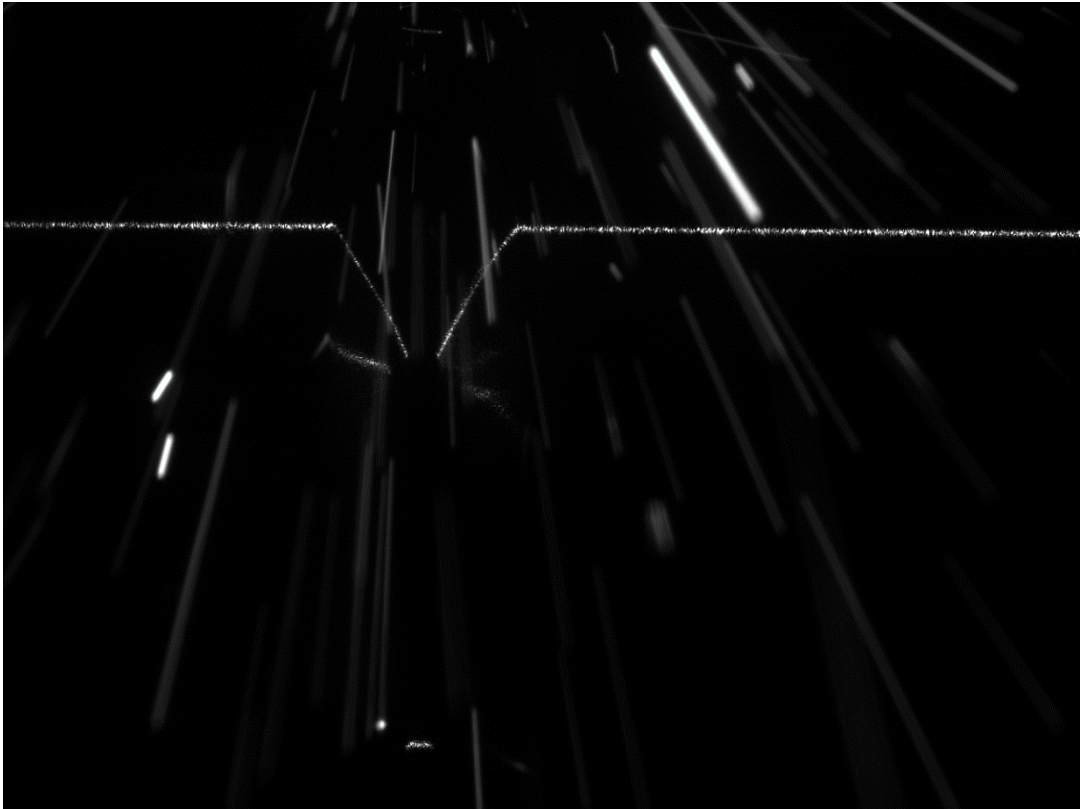


Fig 4.5 - Respingos grosseiros

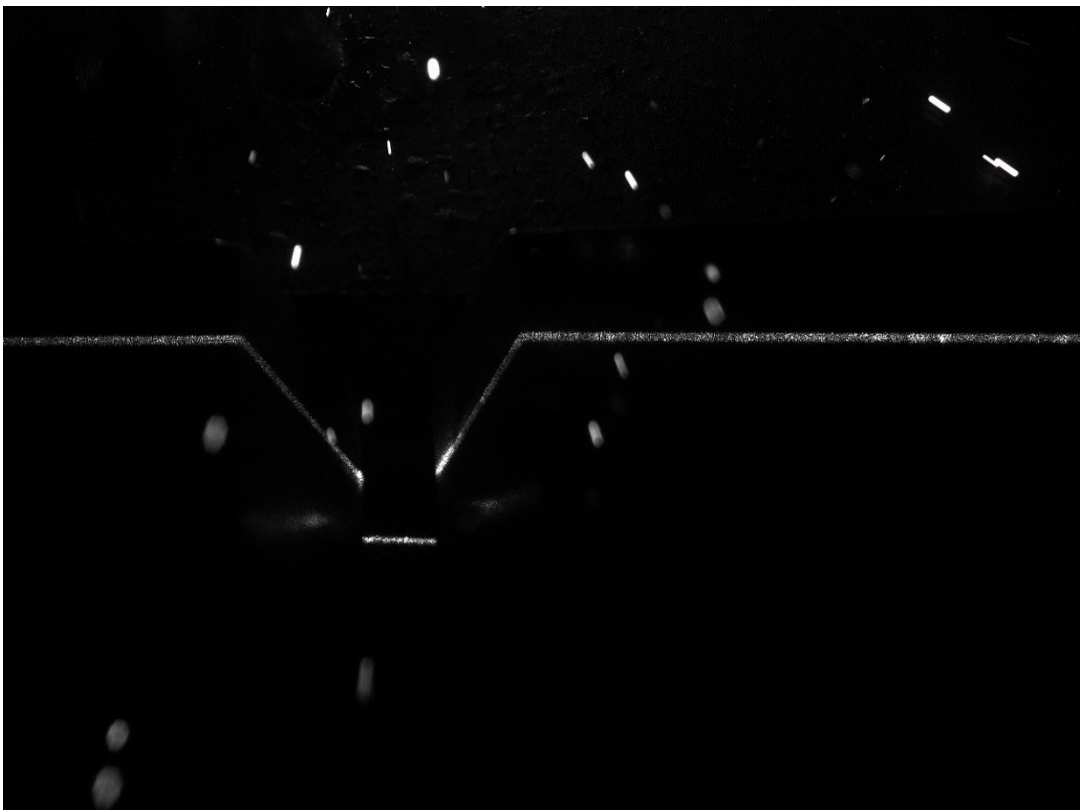


Fig 4.6 - Respingos de difícil remoção 1

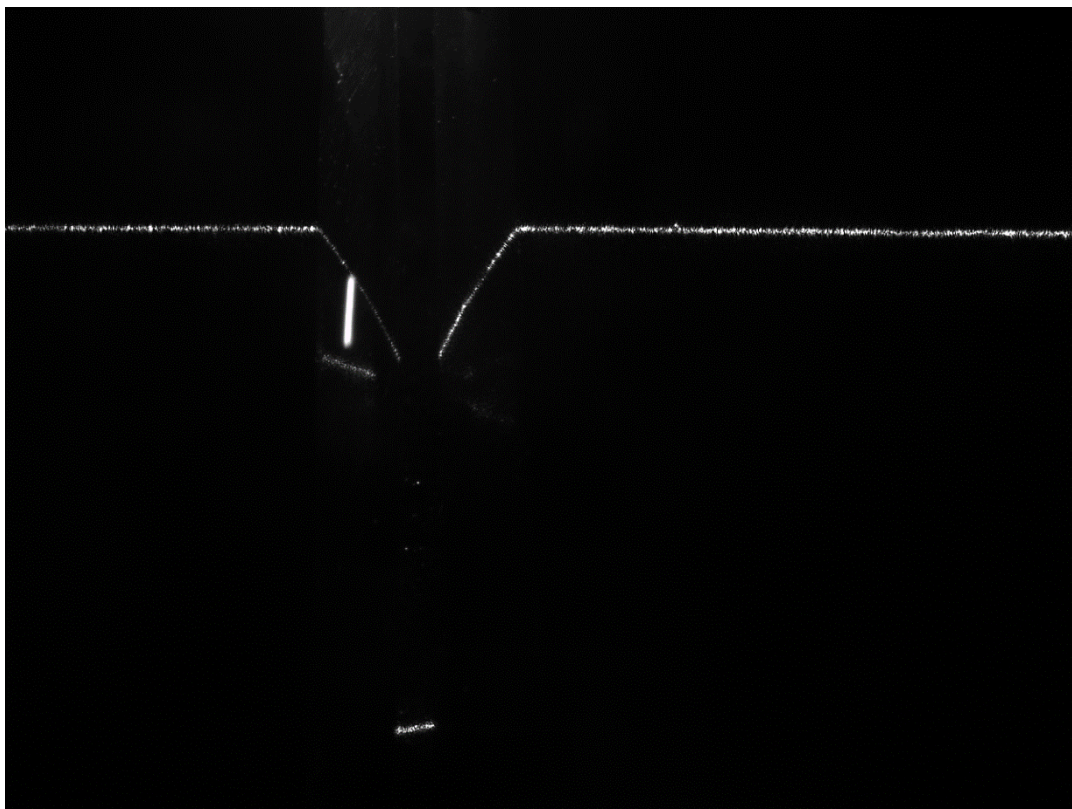


Fig 4.6 - Respingos de difícil remoção 2

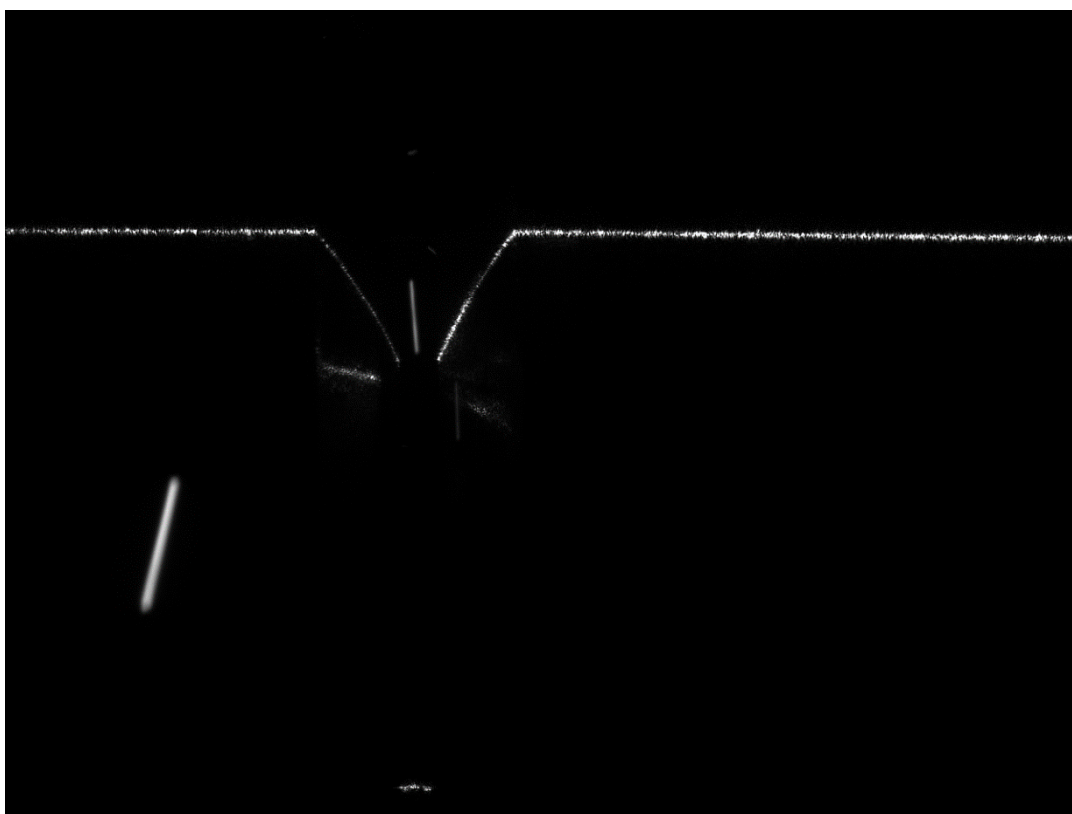


Fig 4.7 - Reflexos do arco 1



Fig 4.7 - Reflexos do arco 2

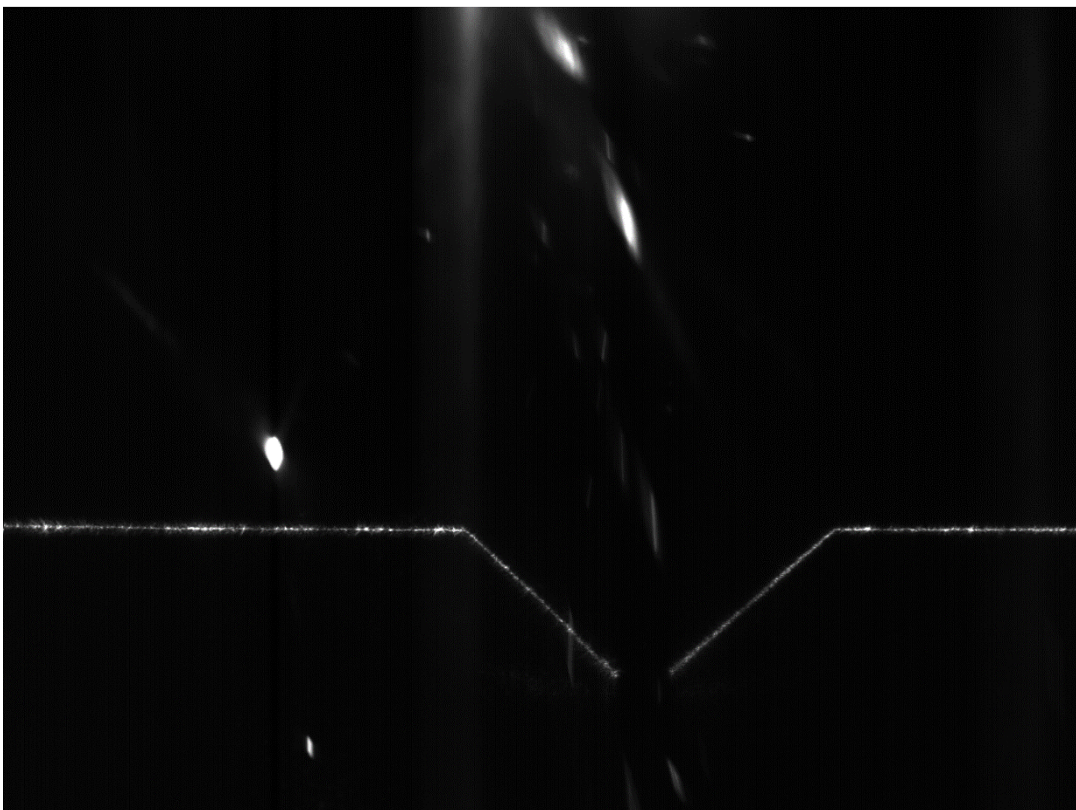


Fig 4.8 - Reflexos da face do chanfro 1



Fig 4.8 - Reflexos da face do chanfro 2

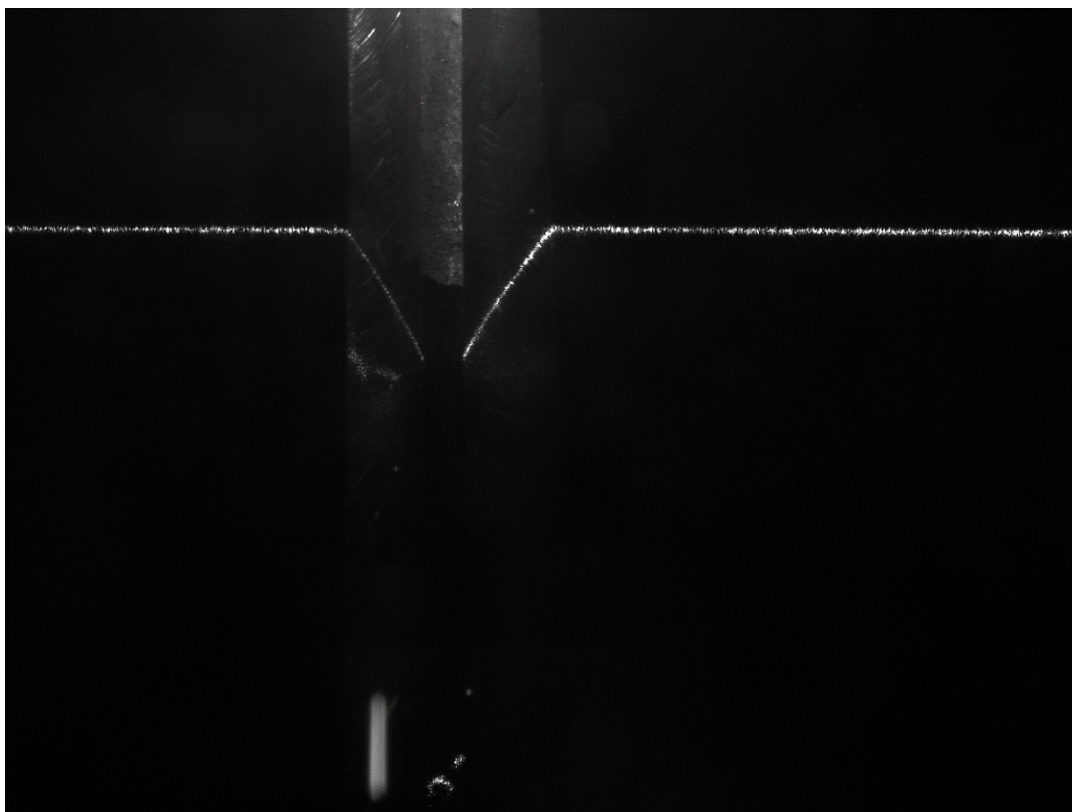


Fig 4.9 - Reflexo impróprio da linha laser

