

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

**Sistema de Visão Computacional para Soldagem Linear
Automatizada de Chapas Chanfradas**

Átila Astor Weis

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews-Jr.
Coorientador: Prof. Dr. Nelson Lopes Duarte Filho

Rio Grande, 2018

W426s Weis, Átila Astor

Sistema de visão computacional para soldagem linear automatizada de chapas chanfradas / Átila Astor Weis – 2018.
99 f.

Orientador: Paulo Lilles Jorge Drews-Jr.
Coorientador: Nelson Lopes Duarte Filho
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação, Rio Grande/RS, 2018.

1. Visão computacional. 2. Automação. 3. Processamento de imagens. 4. Identificação de características. 5. Robô de solda. I. Drews-Jr., Paulo Lilles Jorge. II. Duarte Filho, Nelson Lopes. III. Título.

CDU 004

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Sistema de Visão Computacional para Soldagem Linear Automatizada de
Chapas Chanfradas**

Átila Astor Weis

Banca examinadora:



Prof. Dr. Adolfo Bauchspiess



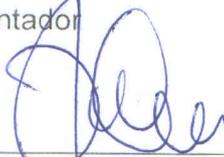
Profa. Dra. Hepará Lillian Costa Murray



Prof. Dr. Ricardo Nagel Rodrigues



Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews-Jr.
Orientador



Prof. Dr. Nelson Lopes Duarte Filho
Coorientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Angela Clara Zinn Weis e Astor Antonio Weis, que sempre nos ensinaram, aos meus irmãos e a mim, a importância da educação e que, mesmo com todas as dificuldades, nos incentivaram a estudar e conquistar o tudo aquilo que eles não puderam. Agradeço principalmente ao meu pai que viveu pra ver os três filhos conquistarem um diploma universitário, que trabalhou arduamente durante todos os anos para que não nos faltasse nada e que nos deixou abruptamente neste ano.

Aos meus irmãos Aline Weis e Adalto Antonio Weis, que mesmo pela distância sempre me apoiaram para superar todas as dificuldades. Em especial à minha namorada, Rosiane Inês da Silva, que ao longo dos últimos anos foi a principal responsável pelo suporte nos momentos mais difíceis e que muitas vezes teve que aguentar o mau humor e o estresse gerados no desenvolvimento deste trabalho, sem teu apoio nada disso seria possível.

Aos meus Professores Paulo Lilles Jorge Drews-Jr. e Nelson Lopes Duarte Filho, pela dedicação de ambos em diversas reuniões semanais e pela orientação recebida nestes dois anos de mestrado. Aos meus colegas de mestrado, companheiros de sala e de projeto, Braian Kozgen Maciel, Jusoan Lang Mór, Luciane Baldassari Soares, Matheus Frantz de Faria, Mateus Schott e Renan Zafalon da Silva, com quem dividi a maior parte do tempo do desenvolvimento deste trabalho e que me auxiliaram por diversas vezes, obrigado.

Agradeço aos funcionários do LaPES, em especial ao Daniel Souza e a Thais Passos que foram responsáveis pela preparação, acompanhamento e avaliação dos testes práticos no laboratório. Por último, à todos os integrantes do Nautec e demais funcionários da FURG que de alguma forma contribuíram no desenvolvimento deste trabalho, muito obrigado.

RESUMO

WEIS, Átila Astor. **Sistema de Visão Computacional para Soldagem Linear Automatizada de Chapas Chanfradas**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

Processos de soldagem são reconhecidos por serem laboriosos, repetitivos e pelos riscos no ambiente de trabalho, mas são essenciais em diversos setores industriais. Os avanços tecnológicos permitiram a robotização e automatização destes processos nos últimos anos, reduzindo a necessidade de intervenção humana, com ganhos de produtividade.

Para automatizar um processo de soldagem é necessária a medição óptica das características pertinentes ao processo das peças a serem soldadas. Entre elas, as dimensões da junta e a disposição espacial das peças. É importante ainda identificar a trajetória de movimentação da tocha de solda para deposição uniforme de material na junta para produzir um cordão de solda dentro das especificações.

Para tanto, faz-se necessário um sistema automático de rastreamento e identificação de características. Neste trabalho propõem-se um sistema baseado em imagens monoculares passivas para rastreamento e dimensionamento automático de chanfros. O sistema de visão é responsável por extrair as características geométricas do chanfro nas imagens, selecionar os parâmetros para o processo de soldagem, e garantir o alinhamento do sistema durante a execução, baseado em imagens monoculares passivas.

Métodos de processamento de imagens e detecção de características levantados de trabalhos relacionados são apresentados e discutidos. Apresenta-se ainda as dificuldades no desenvolvimento do sistema baseado somente em imagem passiva.

Posteriormente, faz-se a avaliação dos métodos selecionados na capacidade de percepção da geometria dos chanfros. Resultados finais de funcionamento do sistema durante a soldagem são apresentados com imagens obtidas durante testes, sem a intervenção humana na execução. Por último, destaca-se ainda as necessidades de desenvolvimento do sistema e da metodologia para avaliação dos resultados.

Palavras-chave: Visão Computacional, Automação, Processamento de Imagens, Identificação de Características, Robô de Solda.

ABSTRACT

WEIS, Átila Astor. **Computer Vision System for Bevelled Sheets Automated Linear Welding**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

Welding processes are recognized by the laborious, repetitive work and the hazardous work environment, but are essential in various industrial sectors. Technological advances allowed the robotization and automation of these processes in recent years, reducing the need for human intervention, with productivity gains.

To automate a welding process it is necessary to identify the pertinent characteristics of the parts to be welded to set-up the process. Among them, the physical dimensions of the joint and the spatial arrangement of the parts. It is also important to identify the welding torch path for a uniform material deposition in the joint, producing a weld bead within the specifications.

Therefore, it is necessary a system to automatically identify and track the characteristics. In this work, it is proposed a system based on passive monocular images to automatically track and identify the joints. The vision system is responsible for extracting the geometric characteristics of the joint in the images, selecting the parameters for the welding process, and ensuring the alignment of the system during execution, based on passive monocular images.

Image processing and features detection methods extracted from related works will be presented and discussed. The difficulties to develop a system based only on passive images are also presented.

Subsequently, the selected methods are evaluated in the ability to detect the joints' geometry. Final results of the system operation during the welding process, without execution intervention, will be presented. Finally, the system development needs and the proposed results evaluation and validation are also highlighted.

Keywords: Computer Vision, Automation, Image Processing, Characteristics Identification, Welding Robot.

LISTA DE FIGURAS

1	(a) Linha de produção de uma indústria automotiva com robôs e gabaritos mecânicos para soldagem, em (b) sistemas comerciais com uso de <i>lasers</i> para identificação de chanfros, e em (c), <i>design</i> e construção de navios de casco duplo - destaca-se as aberturas entre 500-700 mm ² para acesso. Imagens adaptadas da internet.	3
2	À esquerda: Módulos do Sistema <i>Bug-O Matic Weaver</i> . À direita: Operação Supervisionada do Sistema. Adaptado de (Systems, 2017). .	4
3	A relação de movimentação entre os módulos do <i>Bug-o Matic Weaver</i> e os parâmetros para soldagem. Câmera fixada à frente a uma distância <i>d</i> do braço.	5
4	À esquerda: Características da junta do tipo “V”. À direita: Representação nas imagens das linhas do chanfro na vista superior. .	6
5	Classificação de soluções para rastreamento e identificação de chanfros encontrados na revisão bibliográfica.	10
6	Arquitetura de alto nível para sistemas VBM. Em verde: processamento da imagem; Violeta: inteligência computacional; Amarelo: operações de medição. Adaptado de (Shirmohammadi and Ferrero, 2014).	19
7	Arquitetura VBM para identificação de características de chanfros em imagens.	20
8	Relação trigonométrica do modelo <i>pinhole</i> da câmera para conversão do domínio da imagem para o espaço (píxel/milímetro).	25
9	Condições de aquisição e algoritmos avaliados.	27
10	Combinação de métodos que obtiveram o melhor resultado estimando as linhas do chanfro, para aquisição a 90°.	34
11	Método de detecção de bordas Sobel e a extração das 4 linhas do chanfro nas imagens.	35
12	Disposição da câmera e do robô para aquisição de imagens durante o processo de solda.	35
13	Calibração de distâncias entre o centro da imagem e a ponta do arame de soldagem (dX: pulsos de <i>encoder</i> do <i>tractor</i> , dY: pulsos de <i>encoder</i> do <i>weaver</i>).	37

14	Condições de juntas avaliadas para medição das características do chanfro. Abertura de raiz de 3 mm na condição 1 em (a), de 9 mm na condição 2 em (b) e 6 mm na 3 em (c), todas com 45° de ângulo de chanfro. Observação: todas as imagens foram adquiridas com poucos minutos de diferença, ou seja, com a mesma condição da câmera e condições parecidas de iluminação. Pode-se observar as diferenças nas superfícies das chapas pelos riscos e diferenças na reflexão da luz.	38
15	Em (a) imagem original do chanfro na condição 1 avaliada. Características de 3 mm de abertura de raiz e 45° de ângulo de chanfro. Em (b) destacadas as linhas do chanfro. Como pode-se observar, visualmente nas imagens, a mancha no centro do <i>backing</i> é mais expressiva do que os limites entre o chanfro e o <i>backing</i>	39
16	À esquerda: execução do método proposto - estimação do chanfro e centro da junta é feita em toda a extensão do chanfro. À direita: operador posiciona visualmente a ponta do arame no centro da junta em diferentes pontos do chanfro e tais posições são anotadas.	40
17	Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 1 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.	43
18	Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 2 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.	44
19	Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 3 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.	45
20	Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 1 avaliada. Junta desalinhada em relação ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.	46
21	Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 2 avaliada. Junta desalinhada em relação ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.	47
22	Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 3 avaliada. Junta desalinhada em relação ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.	48
23	Identificação das bordas do chanfro para cálculo do alinhamento (são consideradas os pontos mais externos). Detecção após o primeiro (a), o segundo (b) e o terceiro (c) passe de solda. Após o terceiro passe, perde-se a referência do chanfro, que ainda pode ser visto em (a) e (b). O quarto passe é realizado para reforço, que garante o preenchimento total da junta. Destaca-se: as imagens são da mesma chapa entre diferentes passes, a fuligem gerada no processo se deposita na superfície, alterando a coloração da mesma.	49
24	Em (a) aquisição de imagens de um processo de soldagem FCAW. Em (b) um processo de soldagem com uso de tocha aspirada para remoção dos fumos.	50
25	Passos do método proposto para remoção de faíscas das imagens. . .	51
26	Comparação de sequência de <i>frames</i> originais e com as faíscas suprimidas pelo método proposto, durante processo de soldagem.	52

27	Pode-se observar em (a) que neste ponto a ferrugem dentro do chanfro não afeta a detecção. Já em (b), o método erra com a presença do ruído. Em (c), pode-se notar que a superfície da chapa está totalmente oxidada, mas ainda assim, o método conseguiu detectar as linhas corretamente. Já em (d) o método errou. Detalhe: a linha vertical mostra o centro da imagem e torna-se verde quando coincide com o centro da junta.	55
28	Pode-se observar em (a), (b) e (c), diferentes regiões do cordão de solda em uma análise macrográfica da estrutura metalográfica. Como pode-se visualizar, nenhum defeito de deposição de material aparente pode ser constatado.	56
29	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.	69
30	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.	70
31	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.	71
32	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.	72
33	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.	73
34	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.	74
35	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.	75
36	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.	76
37	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.	77
38	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.	78
39	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.	79
40	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.	80
41	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.	81
42	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.	82
43	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.	83

44	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.	84
45	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.	85
46	Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.	86

LISTA DE TABELAS

1	Método de levantamento do chanfro	15
2	Áreas de interesse nas imagens dos artigos revisados que fazem uso de imagem passiva	15
3	Técnicas de visão utilizadas nos artigos revisados que fazem uso de imagem passiva	16
4	Grupos de pesquisa e suas publicações	17
5	Top 10 combinações com melhores resultados para métrica E_{PC} . . .	31
6	Comparação entre o resultado da medição das características do chanfro em diferentes condições.	38
7	Aferições corretas para as características do chanfro pelo Método proposto, em diferentes condições visuais das chapas avaliadas, após a adequação dos dados em intervalos de 1 mm.	39
8	Comparação entre o resultado do método proposto e o centro de referência para juntas alinhadas ao trilho do robô	41
9	Comparação entre o resultado do método proposto e o centro de referência para juntas desalinhadas com o trilho do robô	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
FCAW	<i>Flux-Cored Arc Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
LaPES	<i>Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Soldagem</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LSD	<i>Line Segment Detector</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
OpenCV	<i>Open Source Computer Vision</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PPHT	<i>Progressive Probabilistic Hough Transform</i>
RANSAC	<i>RANdom SAmples Consensus</i>
VBM	<i>Vision Based Measurement</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	Motivação	4
1.2	Definição do Problema	7
1.3	Objetivo	7
1.4	Estrutura do Texto	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Iluminação Ativa	10
2.2	Iluminação Passiva	11
2.2.1	Identificação por Imagem Passiva antes do processo de Soldagem	12
2.2.2	Identificação por Imagem Passiva durante o processo de Soldagem	13
3	METODOLOGIA	18
3.1	Processamento das Imagens	20
3.1.1	Pré-processamento	20
3.1.1.1	Filtro de ruído	21
3.1.1.2	Realce	21
3.1.1.3	Limiarização	22
3.1.2	Análise das Imagens	22
3.1.3	Medição	24
3.2	Aferição <i>offline</i> da junta	25
3.3	Aferição <i>online</i> da junta	28
4	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL	30
4.1	Aferição <i>offline</i> da junta	30
4.1.1	Avaliação da aferição <i>offline</i> da junta	36
4.1.1.1	Medição das características do chanfro	37
4.1.1.2	Identificação do centro da junta	39
4.1.1.3	Identificação do centro entre os passes	49
4.2	Aferição <i>online</i> da junta	50
5	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	53
6	CONCLUSÃO E PRÓXIMOS PASSOS	57
6.1	Publicações Relevantes	58
	REFERÊNCIAS	59

7	APÊNDICE	64
7.1	Resultados da aferição <i>offline</i> da junta	64
7.2	Resultados identificação do centro da junta	68

1 INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem são reconhecidos pela sua importância na cadeia produtiva de diversos setores industriais. Por isso, a busca do aumento na eficiência e pela diminuição dos custos associados de tais processos guiam as pesquisas e os avanços tecnológicos no setor.

A mecanização e a robotização se apresentam como alternativas aos processos manuais, como é o caso da soldagem. A soldagem é reconhecidamente um processo laboral e repetitivo, sendo a qualidade final do processo dependente diretamente da habilidade do operador/soldador. O processo torna o ambiente insalubre gerando subprodutos nocivos ao ser humano, que precisa de proteção, e é associado a diferentes doenças ocupacionais, como destacado em (Borská et al., 2002, Korczynski, 2000).

Indústrias automobilísticas empregam células robotizadas que automatizam todo o processo de soldagem, veja Figura 1 (a). Com uso de gabaritos mecânicos, é feito o alinhamento entre a peça e a célula, garantindo soldas pontos com grande precisão e eficiência. Em linhas de manufatura mais complexas, nas quais não há padronização das peças a serem soldadas, sensores como lasers de alta resolução ou escâneres são empregados, permitindo calcular a trajetória da tocha de solda no espaço 3D com precisão, veja alguns exemplos na Figura 1 (b). Os altos investimentos iniciais são justificados pela quantidade de unidades produzidas na linha de produção em massa.

Por outro lado, a indústria naval é caracterizada pela dificuldade de serialização da produção. Cada navio requer um projeto e mudanças na produção devem ser feitas, seja no local de produção, na ordem da construção e no *design* propriamente dito. Mesmo que se busque uma padronização dos projetos de embarcações, ainda tem-se a construção de um navio como um projeto único. Um navio será um projeto único, constituído de um conjunto de blocos montados, a partir de chapas, painéis e tubulações (Eyres and Bruce, 2012). Por isso, soluções de automação flexíveis para os processos são imprescindíveis.

Diversos avanços foram feitos nos últimos anos para automatização/robotização de processos de soldagem, como destacado em (Lee, 2014). *Lee* apresenta diferentes soluções usadas em estaleiros sendo, desde robôs móveis, de 1 a 6 graus de liberdade, até os habituais robôs manipuladores articulados com 6 graus de liberdade posicionados em plataformas



Figura 1: (a) Linha de produção de uma indústria automotiva com robôs e gabaritos mecânicos para soldagem, em (b) sistemas comerciais com uso de *lasers* para identificação de chanfros, e em (c), *design* e construção de navios de casco duplo - destaca-se as aberturas entre 500-700 mm² para acesso. Imagens adaptadas da internet.

móveis. O Autor argumenta ainda que devido à evolução nos *designs* dos navios, cada vez mais cresce o uso de estruturas de casco duplo nas embarcações, acarretando no aumento de trabalhos a serem realizados em estruturas fechadas, muitas delas com aberturas de 500-700 mm², o que impossibilita o uso de células robotizadas maiores, destacado na Figura 1 (c).

Sistemas conhecidos como “*teach-and-play-back*” são aqueles que os parâmetros do sistema e das trajetórias são configurados *offline*, ou seja, antes de que o processo ocorra, e não possuem realimentação de informação durante o processo. Tais sistemas são muito usados em processos de solda em que as peças são padronizadas e possuem gabaritos mecânicos, responsáveis pelo alinhamento do sistema. Estes sistemas executam os parâmetros programados e não se adaptam a mudanças que possam ocorrer durante o processo, não sendo recomendados a todos os processos de manufatura, como é o caso da construção naval.

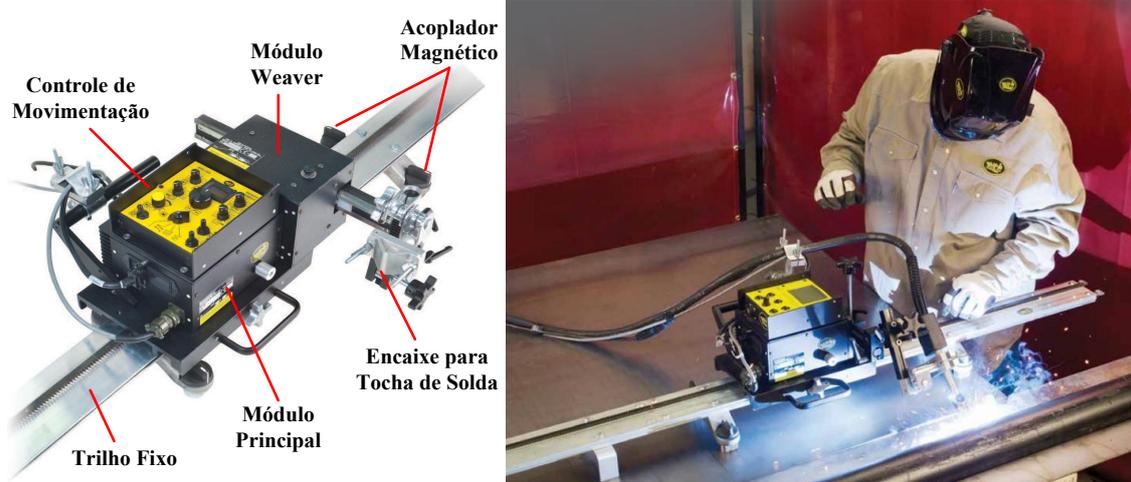


Figura 2: À esquerda: Módulos do Sistema *Bug-O Matic Weaver*. À direita: Operação Supervisionada do Sistema. Adaptado de (Systems, 2017).

1.1 Motivação

No caso dos estaleiros brasileiros, foram introduzidos sistemas robotizados para auxílio nos processos de soldagem, sendo um deles o *Bug-O Matic Weaver*. Este mecanismo é responsável por carregar a tocha de solda e é operado pelo soldador, que ajusta os parâmetros de movimentação do robô e os parâmetros da máquina de solda durante o processo, veja Figura 2. O mecanismo é posicionado sobre um trilho retilíneo fixado em qualquer superfície metálica plana por acopladores magnéticos. O sistema tem o intuito de liberar o soldador, sendo responsável por carregar a tocha de solda, e permite a instalação em condições extremas de soldagem, permitindo soldas: em planos inclinados, sobre a cabeça, em tubulações (com alteração no sistema de trilhos) e locais restritos e de difícil acesso.

O *Bug-O Matic Weaver* é um robô amplamente empregado para soldas lineares. O robô tem 2 graus de liberdade, ambos com juntas prismáticas, permitindo a movimentação independente dos dois eixos, como pode ser visto na Figura 3. Pode-se ainda configurar diferentes parâmetros de movimentação como: velocidades lineares do módulo principal e do módulo *weaver*, tectimento (que incluem amplitude de oscilação e período de parada), permitindo regimes oscilatórios da tocha com diferentes padrões de tectimento da solda.

Apesar das vantagens destacadas, a adesão do sistema em estaleiros brasileiros foi pequena, quase inexpressiva. Isso se deve à curva de aprendizado necessária para operação e ao tempo de configuração do sistema. A ociosidade destes dispositivos despertou a possibilidade de desenvolvimento de um sistema autônomo, utilizando o mecanismo como base, para realização de soldas com a mínima intervenção humana.

Para isso, primeiramente, é necessário um sistema capaz de aferir as características pertinentes ao processo e parametrizar automaticamente os equipamentos: o robô e a máquina de solda. Posteriormente, deve-se garantir a conformidade dos parâmetros dura

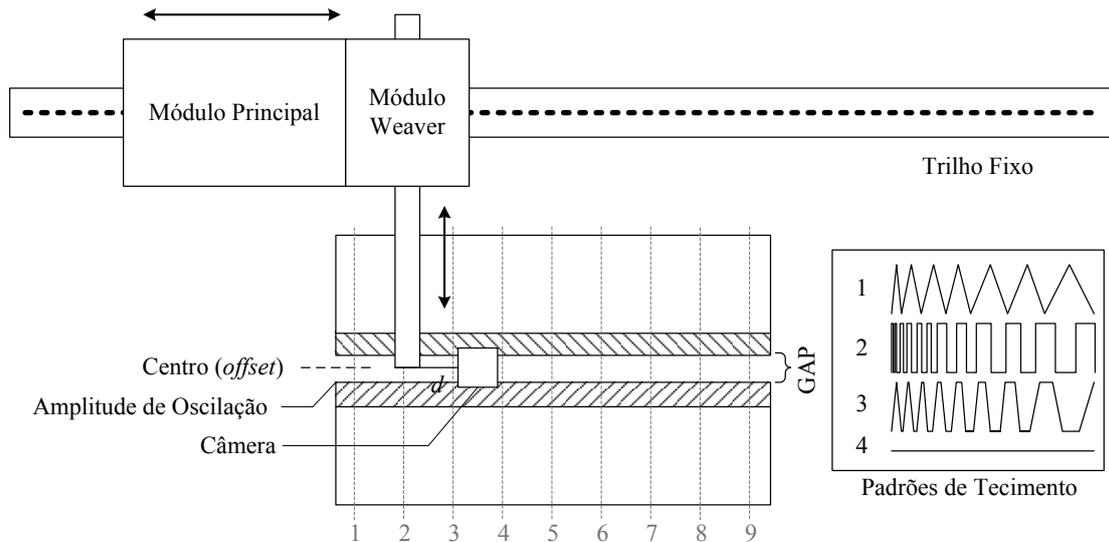


Figura 3: A relação de movimentação entre os módulos do *Bug-o Matic Weaver* e os parâmetros para soldagem. Câmera fixada à frente a uma distância d do braço.

nte a soldagem, para que o resultado esteja dentro dos parâmetros de qualidade exigidos pelas normas.

Shirmohammadi *et. al.* (Shirmohammadi and Ferrero, 2014) apresentam o crescente uso de câmeras, em diferentes setores, como instrumentos de medição. Esse uso específico foi denominado de VBM (do inglês: *Vision Based Measurement*, ou Medição Baseada em Visão). O Autor ainda argumenta que:

“Como sistemas VBM são baseados em dispositivos eletrônicos e computadores, o VBM não só pode ser automatizado, mas também é tipicamente mais rápido e preciso do que o olho humano pode ver e medir”, (Shirmohammadi and Ferrero, 2014).

Sistemas VBM são compostos pelo sensor visual (qualquer sensor que possa obter uma imagem do meio físico: câmera, escâneres de laser ou de raio X) e a unidade de processamento (que recebe a imagem e realiza as operações de medição). Há no mercado equipamentos com soluções que identificam a geometria e rastreiam o chanfro, durante o processo de soldagem. Tais equipamentos comerciais são compostos por sensores lasers ou câmera e luz estruturada.

A proposta de abordagem deste trabalho é o uso apenas de câmera para medição e rastreamento de chanfros. Por isso, propõe-se o uso de apenas imagens passivas, ou seja, sem o uso de lasers ou luz estruturada (baseado também em laser). O uso de sistemas lasers requerem maiores investimentos com aquisição de filtros ópticos específicos e medidas de segurança para seu uso em ambientes industriais.

Imagens capturadas por câmeras são representações planares de ambientes 3D. Por essa característica, perde-se a noção da relação entre profundidade e dimensão na cena,

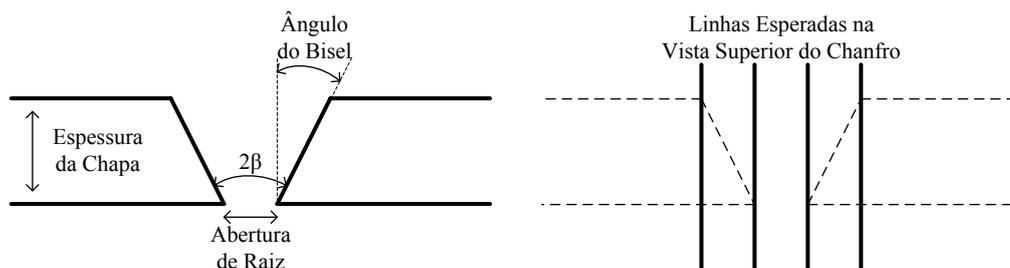


Figura 4: À esquerda: Características da junta do tipo “V”. À direita: Representação nas imagens das linhas do chanfro na vista superior.

dificultando inferências espaciais sobre os objetos, sem conhecimento prévio.

Quando há uso de lasers ou luz estruturada, a geometria 3D do objeto é destacada pelo padrão de luz, permitindo a identificação e conversão de medidas. Imagens estereoscópicas (ou pares estéreos de imagens) são outra forma de solucionar este problema: simulando a visão humana, pode-se inferir a distância e o tamanho de objetos caso se conheça a relação de captura das duas imagens. Contudo, a dificuldade na medição e identificação das características de chanfros com uso de câmera monocular e por imagem passiva, é acentuada.

Da mesma forma, há dificuldades quando se trata do rastreamento da junta durante o processo de soldagem. Os subprodutos nocivos do processo que tornam o ambiente insalubre também afetam a aquisição de imagens. Ruídos como fumaça, faíscas, respingos e a radiação do arco de solda deterioram a qualidade das imagens capturadas nestes ambientes hostis. São necessárias abordagens nos níveis de *hardware* e de *software* para permitir a aquisição e processamento das imagens e a extração das características durante o processo.

Os parâmetros para a configuração da máquina de solda e do sistema robótico são definidos com base nas características da junta. Neste trabalho, limitou-se o desenvolvimento para juntas do tipo “V”, para junção de chapas grossas de aço, tendo como base informações de que esse tipo de junta é a mais utilizada na construção naval. Para junção desse tipo de chapas, normalmente de 13 mm de espessura, são necessários de 3 a 5 passes de solda.

Os parâmetros utilizados para configuração da máquina de solda (tensão e velocidade de alimentação do arame) e do robô (velocidade dos eixos, regime e tempos de oscilação) foram definidos por especialistas em soldagem, levando em consideração a taxa de deposição de material e o aporte térmico desejados, para que a solda esteja dentro das normas especificadas. Os parâmetros abrangem diferentes configurações de juntas “V” com aberturas de raiz de 3 a 9 mm (em intervalos de 1 mm) e ângulos de chanfro (duas vezes o ângulo de Bisel, ou 2β) de 45° , 47° , 48° , 50° , 52° , 53° e 55° , características ilustradas na Figura 4. Com os parâmetros selecionados, a solda é realizada em 4 passes.

A medição das características da junta será realizada em seções uniformemente distribuídas pela peça, como ilustrado na Figura 3. Para cada seção transversal, além das

características da junta, o sistema deve ser capaz de identificar o centro da junta, responsável pelo alinhamento do robô e da tocha de solda. Além de reconhecer o início e o fim do chanfro.

À direita da Figura 4 estão ilustradas as imagens esperadas da vista superior das juntas. Diversos problemas na solda decorrem do mau alinhamento do sistema, como: mordeduras nas laterais do chanfro, distribuição não-uniforme de material na junta e a própria destruição do chanfro pelo arco, inutilizando a peça.

Como destacado em (Boekholt, 1996) um dos processos de soldagem mais utilizados em estaleiros é a Soldagem a Arco elétrico com Eletrodo Tubular, ou FCAW (do inglês *Flux-Cored Arc Welding*). O processo FCAW é muito utilizado em sistemas robóticos devido à alta produtividade, confiabilidade, facilidade de uso e de automação. Neste processo, um eletrodo tubular consumível é fundido pelo arco elétrico, na junta formada por duas peças. Diferentes gases podem ser utilizados para proteção extra do processo, como o dióxido de carbono (CO_2) que é usado para proteger a solda de contaminantes do ar, e apresenta baixo custo em relação ao uso de outros gases. Processos de solda FCAW são conhecidos pela geração excessiva de faíscas e de fumos durante a soldagem.

1.2 Definição do Problema

O problema tratado nesse trabalho pode ser definido como: *Aferir as características geométricas de juntas do tipo “V” e rastrear-las durante o processo de soldagem, baseadas somente em imagens monoculares passivas*. Entende-se como restrição: a posição fixa da câmera em relação ao robô durante todo o processo; e o tempo de processamento das imagens, com desempenho *online* necessário.

1.3 Objetivo

Avaliar técnicas de processamento de imagens e de visão computacional para identificação de características de chanfros em imagens, para ao final, propor um sistema de visão computacional, que faça somente uso de imagem monocular passiva. O sistema deve ser capaz de aferir as características da junta a ser soldada e parametrizar o processo de soldagem, sendo parâmetros para movimentação do robô e referências para o equipamento de solda.

O sistema deve ainda ser capaz de rastrear o chanfro, por meio de imagem monocular passiva, durante todo o processo de soldagem, identificando alterações geométricas na junta. O sistema de visão identificará o centro da junta, gerando as referências para atuação no robô, em malha aberta, garantindo o alinhamento entre a tocha de solda e a junta durante a soldagem.

Ao final, pretende-se realizar a soldagem de forma autônoma, com base nos dados

extraídos da junta pelo sistema de visão, e avaliar o processo realizado. De forma mais detalhada pretende-se:

- Estudar métodos de identificação de características (bordas e linhas) em imagens;
- Testar métodos de identificação de características obtidos da bibliografia e verificar os resultados na identificação da junta;
- Apresentar um sistema para aferição automática das características de chanfros “V” em ambientes industriais, levando em conta ruídos presentes no ambiente;
- Avaliar a capacidade do sistema em situações reais de uso.

1.4 Estrutura do Texto

No Capítulo 1 apresentam-se o crescente uso de robôs nos processos de soldagem na indústria naval e alternativas para automatização destes processos. Apresentam-se ainda as principais dificuldades de automatização baseada em câmeras monoculares e imagens passivas e os objetivos deste trabalho, contextualizando o problema abordado.

No Capítulo 2 apresentam-se a revisão do estado da arte com trabalhos que automatizam processos de soldagem baseados em visão computacional. Faz-se um levantamento dos métodos utilizados nas soluções em sub-áreas de pré-processamento das imagens (filtro, realce e segmentação) e detecção de características (bordas e linhas). Analisa-se ainda características físicas para aquisição das imagens como tipo de câmeras, ângulo de aquisição, iluminação da cena e uso de filtros ópticos.

No Capítulo 3 apresenta-se o sistema de visão computacional para identificação e rastreamento de juntas. Apresenta-se ainda a metodologia aplicada na identificação das características em imagens passivas para captura da dimensão do chanfro.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados do sistema para identificação das características em imagens em ambiente controlado e, posteriormente, em ambiente real. No Capítulo 5 avaliam-se os resultados obtidos nos testes e discute-se o funcionamento do sistema como um todo.

Por último, no Capítulo 6 resume-se os resultados obtidos, os próximos passos para desenvolvimento do trabalho e os trabalhos publicados até o momento, relacionados com esta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos de medição automática de chanfros por visão computacional podem ser divididos, segundo os resultados encontrados na revisão bibliográfica, entre os trabalhos que fazem uso de imagens ativas ou passivas. No caso das ativas, é irradiada energia artificial para gerar a imagem. Como é o caso de uso de escâneres: um laser é utilizado para medir a distância dos objetos na cena capturada, o que gera imagens com nuvens de pontos, posteriormente processadas. Já no uso de imagens passivas, as imagens são formadas pela reflexão da radiação na cena, como por exemplo, a da luz visível no caso das câmeras comuns. Os trabalhos que fazem uso de laser escâneres comerciais fechados ou que não detalham a utilização de métodos de visão em nenhum momento do processo são considerados fora do escopo desta revisão bibliográfica, portanto, omitidos neste levantamento.

Dentro dos trabalhos que fazem uso de imagens passivas, podemos separá-los em outros quatro grupos, ilustrados na Figura 5, com uso de:

- **Iluminação ativa:** quando faz-se uso de padrões laser para iluminar a cena. Tais padrões têm sua forma conhecida (linha, cruz, círculo, entre outros) e são utilizados para destacar a geometria 3D dos objetos. Ao reconhecer a mudança nesse padrão laser pode-se inferir as dimensões e distâncias dos objetos em relação à câmera. Ainda assim, a imagem é gerada passivamente, através dos feixes de luz que atingem o sensor da câmera, por isso se enquadrando como imagem passiva;
- **Iluminação passiva:** a imagem é gerada pela luz que chega ao sensor, refletida na superfície dos objetos da cena. A luz presente na cena pode ser natural ou não (quando do uso de outras fontes de luz, como lâmpadas);
- **Pares estéreos:** imagens capturadas por duas câmeras a uma distância conhecida permitem a inferência 3D da cena como, profundidade, dimensão e distância dos objetos, prática conhecida como estereoscopia;
- **Pares estéreos a partir do movimento:** neste caso, as imagens são adquiridas de uma mesma câmera, que por sua vez, se movimenta para adquirir imagens em pontos distintos conhecidos.

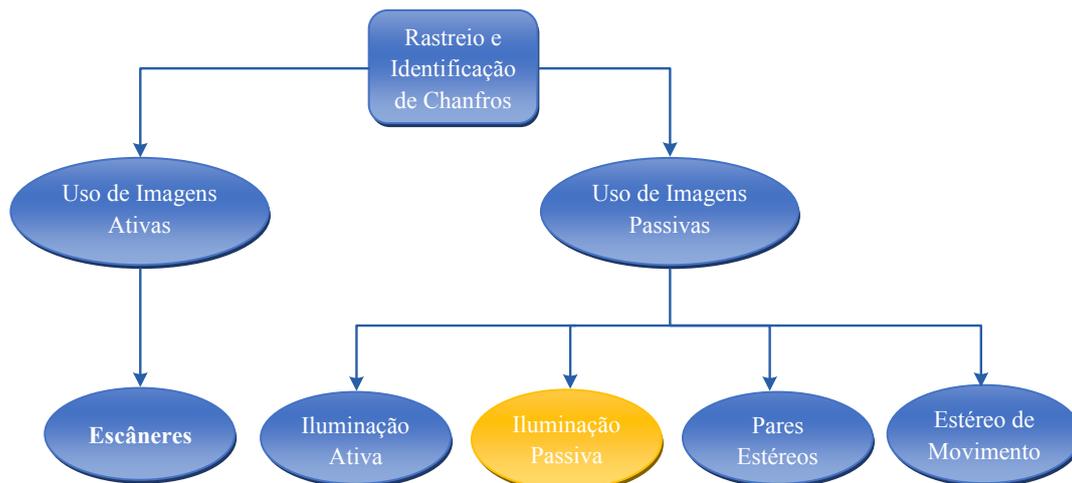


Figura 5: Classificação de soluções para rastreamento e identificação de chanfros encontrados na revisão bibliográfica.

Será aprofundada a pesquisa nos trabalhos voltados para a identificação do chanfro, antes e durante a solda, sem o uso de iluminação ativa. No entanto, cabe uma breve revisão da abordagem clássica que utiliza iluminação ativa, uma vez que esta reflete os primeiros desenvolvimentos para a identificação automática.

2.1 Iluminação Ativa

As primeiras publicações envolvendo a captura automática das dimensões do chanfro utilizando uma combinação de câmera com iluminação laser datam da década de 1980 (Drews et al., 1986, Kawahara, 1983). Em Kim et al. (1996), é apresentado um sistema que faz uso de luz estruturada (laser) para identificação de diferentes juntas a serem soldadas. O sistema é composto por uma câmera CCD (*Charge-Coupled Device*), filtros ópticos, emissor laser e foi testado em processos de soldas GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). A identificação do chanfro é feita em dois passos: primeiramente é feito o reconhecimento geométrico do chanfro antes da soldagem e, durante a solda, são levantadas as características da junta previamente identificada. Os algoritmos de visão aplicados para detecção da linha laser é a segunda derivada Gaussiana (filtro de Marr-Hildreth (Marr and Hildreth, 1980)) e, para determinação das dimensões do chanfro, é verificada a continuidade de segmentos do laser com a determinação das linhas pelo método de aproximação poligonal, apresentando erros menores que $0,5\text{mm}$ nos experimentos apresentados pelos autores. Kim *et al.* argumentam que o sistema proposto é robusto contra interferências geradas pelo arco de solda, como faíscas, variações da luminosidade do arco de solda, reflexões luminosas e fumaça.

Hang and Pritschow (1999) tratam diretamente o problema gerado pela interferência das faíscas no levantamento do chanfro com uso da luz estruturada. O sistema (sensor CCD + filtros ópticos) captura a linha laser distorcida devido às faíscas, sendo necessário

posteriormente determinar a posição real da linha laser nas imagens. Pelo método proposto, após a binarização das imagens, subtrai-se frames consecutivos para identificar partes não constantes (os ruídos luminosos) e retirá-las das imagens a serem analisadas. Após a filtragem, a linha laser é determinada com o método Multi-pico, que determina o pixel de maior intensidade da linha. Os autores assumem que o laser é mais visível que as faíscas. Agrupa-se ainda a análise da vizinhança, assumindo que as interferências luminosas possuem características aleatórias e não contínuas na imagem e o laser apresenta uma distribuição contínua. O chanfro é identificado pela segmentação da linha laser em testes com solda GMAW.

Já em He et al. (2016, 2015), apresenta-se um sistema de rastreamento de chanfro com uso de laser visualizando, ao mesmo tempo, a poça de fusão e chanfro à frente por meio de um braço robótico fixo. O sistema é composto por uma câmera CCD, filtros ópticos e vidros escuros para diminuição da luminosidade que chega à lente da câmera. Além disso, propõem um arcabouço para identificação do chanfro em três estágios: i) mapa de características de orientação; ii) mapa de saliência de orientação; iii) mapa de saliência de brilho. Primeiramente em i) usa-se o filtro de Gabor para filtrar as frequências características da linha laser na imagem. Depois, em ii), segmentam-se as imagens binarizadas com um método de agrupamento pela distância Euclidiana, empregado para determinar se os segmentos são da linha laser. Por último, em iii), determina-se, pela análise dos pixels em valores absolutos e da vizinhança, a componente da linha laser. O método de binarização adaptativa de Otsu é usado para agrupar as informações anteriores e permitir a identificação do chanfro em tempo real durante o processo de solda MAG (*Metal Active Gas*), sujeito às interferências luminosas do processo.

Em (Bauchspiess and Alfaro, 1997, Bauchspiess et al., 2001), os autores apresentam um modelo de estado preditivo para rastreamento *online* de trajetórias com grande precisão. Uma câmera CCD e um laser são utilizados para capturar o chanfro à frente da tocha, fornecendo informação da trajetória a ser executada.

Embora sem apresentar inovações significativas, cabe mencionar os trabalhos (Gu et al., 2013, Xie et al., 2008) e (Fang and Xu, 2009) onde são usados algoritmos para segmentação da linha laser para identificação do chanfro durante o processo de soldagem. Por outro lado, Xiao (2011a) propõe o uso de três linhas laser paralelas para aumentar a precisão do levantamento em chanfros curvilíneos. Já em Xu et al. (2008) é usado um padrão circular de laser para levantamento 3D de chanfros.

2.2 Iluminação Passiva

Nesta subseção serão destacados os trabalhos que fazem uso apenas de iluminações passivas para levantamento e rastreamento do chanfro.

2.2.1 Identificação por Imagem Passiva antes do processo de Soldagem

Chen et al. (2005) é o primeiro artigo relevante a tratar de rastreamento de chanfros usando somente imagens passivas. Nele, uma câmera monocular CCD é utilizada para captura de imagens em diferentes posições a serem soldados, fixa ao terminal de um robô manipulador. Compõe-se então um par estéreo, usado para calcular as posições 3D do chanfro e a trajetória da tocha. É proposto um melhoramento do algoritmo de Ghosal (Ghosal and Mehrotra, 1993) para detecção de bordas com precisão de sub-pixel. O método proposto foi testado para chanfros em formato de “S” (chapas) e de “Sela” (derivação em tubos) antes do processo de soldagem acontecer, com erros menores de 4,5 mm nas estimativas 3D de chanfros. Embora o trabalho tenha pontos interessantes como o uso de estimação subpixel, de fato trata-se de uma estimativa estéreo com grande precisão de posicionamento devido à fixação no robô manipulador.

Em Zhou et al. (2006) é apresentado um sistema composto por 2 câmeras CCD fixas ao terminal de um robô manipulador. Uma das câmeras é responsável pelo rastreamento do chanfro e, a outra, pelo acompanhamento da poça de fusão para garantir a qualidade da solda. O chanfro é determinado antes do processo de solda, não lidando portanto com as interferências geradas no processo. O algoritmo proposto usa pré-processamento através do filtro de mediana para suavizar as imagens, depois binariza-se a imagem e utiliza-se um algoritmo de erosão (*thinning*) na região de interesse para encontrar uma linha que represente o chanfro. Os testes mostraram erros menores que 0,5mm e o sistema roda em um PC (*Personal Computer*) em tempo real (25Hz). A estimativa é feita em uma pequena região de interesse o que permite tal desempenho.

O sistema proposto por (Dinham and Fang, 2012) faz uso também de 2 câmeras CCD para identificação de diferentes tipos de junta antes do processo de solda robotizada. O sistema detecta bordas e determina segmentos de linha usando a transformada de Hough. De forma semelhante, em (Li et al., 2016), diferentes tipos de junta são identificados antes da solda. O sistema constituído por câmera CCD utiliza mapas de saliência para determinação da posição do chanfro. Em (Shi et al., 2007) também é feito o levantamento de diferentes tipos de junta antes do processo. Utilizando uma câmera CCD, adquire-se uma imagem da peça e usa-se o método de Canny (1986) para determinação das bordas e identificação do chanfro, e a abordagem de Harris para determinação de cantos que identificam o início e fim do chanfro.

No trabalho de (Nele et al., 2013) é apresentado um sistema fixo a um robô de soldagem linear, semelhante ao que se propõe. Nele, uma câmera CCD é fixada à frente da tocha e faz uso de iluminação externa com LEDs (*Light-Emitting Diode*) e não visualiza a poça de fusão. Testado em soldas GMAW, o sistema rastreia o chanfro e atualiza as posições em frequência de 30Hz, mesma taxa da aquisição de imagens. A tocha e o chanfro são detectados na imagem através da técnica de casamento de modelos (*template matching*). O sistema é capaz de corrigir o alinhamento entre a tocha e o chanfro durante o

processo, baseado nas informações espaciais da tocha e chanfro. Os algoritmos utilizados são apresentados em alto nível sem maiores detalhes, onde diz-se que para o casamento de modelos é utilizando um algoritmo de aprendizado de padrões baseado nas bibliotecas da ferramenta LabView.

2.2.2 Identificação por Imagem Passiva durante o processo de Soldagem

Bauchspiess et al. (1997) apresentam um sistema com câmera CCD que visualiza a poça de fusão e permite correções no alinhamento entre a tocha e o chanfro e nos parâmetros de soldagem (tensão e corrente) durante a execução do processo. Os autores apresentam um sistema para processamento paralelo das informações do processo, garantindo a geração das referências em tempo de execução.

Shen et al. (2008) apresentam um sistema para acompanhamento da poça de fusão e rastreamento simultâneo do chanfro. O sistema é composto por uma câmera CCD, filtros ópticos, vidros escuros e 2 espelhos que conduzem a luminosidade gerada no processo à lente da câmera. A poça de fusão é acompanhada para garantia da qualidade do processo de solda. Para rastreamento do chanfro, faz-se uso de filtro de mediana para suavizar ruídos, algoritmos de detecção de bordas (não especificados) e de erosão. As linhas são estimadas usando mínimos quadrados a uma frequência de $5Hz$. Os testes foram realizados durante solda GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) em chanfros com formato “Y”, com erros máximos de 0,2 mm.

Wei et al. (2011) apresentam um sistema para rastreamento de chanfro e controle da poça de fusão de forma simultânea. As características das bordas são buscadas para determinação do chanfro e vários métodos de visão são aplicados para o rastreamento, como: operador Sobel (Sobel and Feldman, 1968), Canny (Canny, 1986), *threshold* e erosão. Destaca-se que os autores dividiram em duas partes o rastreamento do chanfro: primeiramente, faz-se uso de algoritmos menos complexos para determinar a localização do chanfro, logo após, usam-se algoritmos mais complexos para determinar e filtrar a linha do chanfro. Wei *et al.* argumentam ganhos no tempo de processamento e no resultado. O sistema de aquisição de imagens é composto apenas pela câmera CCD, e o sistema se diz tolerante às variações de iluminação devido ao arco de solda. O trabalho demonstrou o sistema durante solda do tipo GTAW. Erros na detecção foram menores que 0,4 mm e o tempo de processamento é de aproximadamente $333ms$. O *hardware* utilizado não é especificado.

Zou et al. (2011) apresentam uma abordagem diferente dos demais, uma vez que propõem o rastreamento do chanfro analisando apenas a poça de fusão. Ao analisar-se o formato da poça, identifica-se o centro da junta dado pela deposição do material fundido. A posição da tocha é determinada pelo arame não fundido que alimenta a poça. Verificadas diferenças entre as posições do arame e do centro da junta, o sistema as corrige, tentando alinhá-las para uma deposição mais uniforme de material. O sistema de aquisição possui câmera CCD e filtros ópticos, roda em um PC industrial e é testado em soldas GMAW.

O sistema composto por câmera CCD, filtros ópticos e vidros escuros também é usado em (Xu et al., 2014, 2012a,b,d), para rastreamento da poça de fusão e do chanfro. Nos trabalhos os autores do mesmo grupo de pesquisa apresentam testes feitos com métodos de Roberts (Roberts, 1963), Sobel (Sobel and Feldman, 1968), Prewitt (Prewitt, 1970), Laplaciano e Canny (Canny, 1986), para detecção de bordas. Por fim, os autores propõem um método de “Canny melhorado” que apresenta melhores resultados. O sistema apresenta precisão de $\pm 0,169mm$, testado em soldas GTAW e roda em um PC industrial.

Em (Ye et al., 2013) é apresentado um sistema que visualiza a poça de fusão e o chanfro ao mesmo tempo. Composto por câmera CCD, filtros ópticos e vidros escuros, o sistema filtra ruídos com filtro de Mediana e determina o chanfro pela detecção de bordas (por Sobel (Sobel and Feldman, 1968) e operações morfológicas). Após as bordas detectadas, é utilizada a transformada de Hough para determinar os segmentos de linha. Com precisão de $0,4mm$, rodando em um PC em tempo real, o sistema foi testado em soldas GMAW.

Ma et al. (2010) e Shen et al. (2010) apresentam resultados do sistema para rastreamento e controle da poça de fusão. O sistema com câmera CCD, filtros ópticos e vidros escuros, rastreia o chanfro pelas variações entre a iluminação da chapa e do chanfro. Usam-se métodos de detecção de bordas (não especificado) e as linhas são calculadas usando mínimos quadrados. Testes foram feitos em soldas do tipo GTAW, em chanfros retilíneos e curvos, com erros de $0,3mm$ nas medições. O sistema roda em um PC industrial em tempo real.

Cabe ainda mencionar Liu et al. (2015) que propõem o sistema de aquisição (câmera CCD e filtro óptico) acoplado junto à tocha, visualizando o chanfro tipo “V” e a poça de fusão. Regime oscilatório é utilizado para preencher o chanfro. Dessa forma, a câmera oscila junto com a tocha durante o processo. Busca-se extrair as linhas superiores e inferiores do chanfro nas imagens e calcula-se a linha central do chanfro para alinhamento da tocha. Para tratar o movimento oscilatório da câmera que altera as posições de chanfro e poça a cada *frame*, os autores calculam as regiões de interesse da poça e do chanfro em cada iteração baseado nos momentos das imagens. O chanfro é determinado com base no método Canny (Canny, 1986) para detecção de bordas e as linhas são determinadas pelo método RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS) (Fischler and Bolles, 1981). Os autores publicaram outros trabalhos na área onde descrevem o método de segmentação aplicado à identificação das bordas da poça de fusão, porém sem focar na captura das dimensões do chanfro, logo são omitidos nesta revisão.

A Tabela 1 sumariza as abordagens de mapeamento de chanfro baseadas em visão, fazendo a separação das técnicas entre as que são dependentes de iluminação estruturada daquelas que são baseadas somente em imagens adquiridas com iluminação passiva. Já a Tabela 2 destaca qual a região de interesse observada nos artigos revisados. Nota-se que a maioria dos trabalhos busca considerar o chanfro e a poça de fusão.

Tabela 1: Método de levantamento do chanfro

Método	Referências
Laser ou luz estruturada	(Bauchspiess and Alfaro, 1997, Bauchspiess et al., 2001, Fang and Xu, 2009, Gu et al., 2013, Hang and Pritschow, 1999, He et al., 2016, 2015, Kim et al., 1996, Muhammad et al., 2016, Viviani et al., 2014, Xiao, 2011b, Xie et al., 2008, Xu et al., 2008)
Imagem passiva	(Bauchspiess et al., 1997, Chen et al., 2011, Chen and Lv, 2014, Chen et al., 2005, Dinham and Fang, 2012, Li et al., 2016, Liu et al., 2015, Ma et al., 2010, Nele et al., 2013, Shen et al., 2010, 2008, Shi et al., 2007, Wei et al., 2011, Xu et al., 2014, 2012a,b,d, Ye et al., 2013, Zhang et al., 2014, Zhou et al., 2006, Zou et al., 2011)

Tabela 2: Áreas de interesse nas imagens dos artigos revisados que fazem uso de imagem passiva

Área de interesse	Referências
Poça de fusão Chanfro	(Bauchspiess et al., 1997, Zou et al., 2011) (Chen et al., 2005, Dinham and Fang, 2012, Li et al., 2016, Nele et al., 2013, Shi et al., 2007, Zhou et al., 2006)
Poça de fusão e chanfro	(Chen et al., 2011, Liu et al., 2015, Ma et al., 2010, Shen et al., 2010, 2008, Wei et al., 2011, Xu et al., 2014, 2012a,b,d, Ye et al., 2013, Zou et al., 2011)

Na Tabela 3 sumarizam-se os algoritmos e técnicas frequentemente utilizados para a abordagem do problema de dimensionamento do chanfro. É prevalente o uso de técnicas clássicas de processamento de imagens e visão computacional. Entre os filtros para pré-processamento e remoção de ruído destacam-se o uso de filtro mediana, onde o novo valor de um pixel é dado pela mediana da vizinhança, e da técnica de binarização por limiarização (*threshold*), onde o novo valor do pixel é obtido por uma regra que procura por um valor mínimo. Além das técnicas de filtragem, alguns métodos fazem uso de operações morfológicas de erosão e dilatação para eliminar pequenos artefatos.

Ainda na Tabela 3, é possível observar o amplo uso de métodos clássicos de detecção de bordas, cantos e linhas. Em alguns casos, como nos filtros Roberts (1963), Prewitt (1970) e Hough (1962), a escolha se justifica na simplicidade de implementação e baixo capacidade de processamento requerido.

Tabela 3: Técnicas de visão utilizadas nos artigos revisados que fazem uso de imagem passiva

Técnicas de visão	Referências
Filtro Mediana	(Dinham and Fang, 2012, Li et al., 2016, Ma et al., 2010, Shen et al., 2010, 2008, Wei et al., 2011, Xu et al., 2014, 2012a,b, Zhou et al., 2006, Zou et al., 2011)
Filtro Média	(Shi et al., 2007, Ye et al., 2013)
Filtro Gaussiano	(Xu et al., 2014, Zhang et al., 2014)
Operadores Morfológicos	(Dinham and Fang, 2012, Ye et al., 2013)
Threshold	(Chen et al., 2005, Li et al., 2016, Ma et al., 2010, Shen et al., 2010, Wei et al., 2011, Xu et al., 2014, 2012a,b,d, Ye et al., 2013, Zhang et al., 2014, Zhou et al., 2006, Zou et al., 2011)
Threshold Adaptativo	(Chen et al., 2011, Dinham and Fang, 2012)
Perona–Malik (difusão anisotrópica)	(Xu et al., 2012b,c,d)
Sobel	(Dinham and Fang, 2012, Wei et al., 2011, Ye et al., 2013)
Canny	(Liu et al., 2015, Shi et al., 2007, Wei et al., 2011)
Canny Melhorado	(Xu et al., 2014, 2012a,b,d)
Hough	(Dinham and Fang, 2012, Ye et al., 2013)
Harris	(Shi et al., 2007)
Haar	(Zou et al., 2011)
Zernike	(Chen et al., 2005)
Thinning	(Dinham and Fang, 2012, Shen et al., 2008, Wei et al., 2011, Zhou et al., 2006)

Por fim, a Tabela 4 apresenta os centros de pesquisa envolvidos no desenvolvimento de equipamentos e técnicas de aferição automática de chanfro baseados em visão. Shan-Ben Chen, da Universidade de Shanghai Jiao Tong, é autor ou co-autor de 16 artigos aqui levantados. Seus trabalhos envolvem tanto o uso de lasers para levantamento das características, quanto o uso só de imagens passivas. Há trabalhos com levantamento offline do chanfro e outros que o fazem durante o processo de solda, lidando com os problemas visuais que são criados no processo. O autor ainda publicou um artigo de revisão em tecnologias inteligentes para soldagem a arco (Chen and Lv, 2014).

Como se pode observar na revisão, são poucos os trabalhos que fazem a identificação do chanfro somente por imagens monoculares passivas, devido às dificuldades na sua implementação e uso. Destaca-se ainda, na identificação de juntas antes da soldagem, o uso de métodos de *template matching*, no qual há a necessidade de conhecimento prévio das peças e da junta.

Tabela 4: Grupos de pesquisa e suas publicações

Grupo de pesquisa	Referências
Soochow University	(Li et al., 2016)
University of Western Sydney	(Dinham and Fang, 2012)
Shandong Jiaotong University	(Zhang et al., 2014)
University of Naples Federico II	(Nele et al., 2013)
Technical University of Denmark	(Liu et al., 2015)
Beijing University of Aeronautics and Astronautics	(Zou et al., 2011)
Universidade de Brasília	(Bauchspiess and Alfaro, 1997, Bauchspiess et al., 2001, 1997)
Shanghai Jiao Tong University	(Chen et al., 2011, Chen and Lv, 2014, Chen et al., 2005, He et al., 2016, 2015, Ma et al., 2010, Shen et al., 2010, 2008, Shi et al., 2007, Wei et al., 2011, Xu et al., 2014, 2012a,b,d, Ye et al., 2013, Zhou et al., 2006)

Para rastreamento do chanfro durante a soldagem, todos os trabalhos baseados em imagens passivas têm como interesse o alinhamento da tocha e do chanfro, visualizando a poça de fusão. Esse interesse se dá pelo controle do processo de deposição de material em tempo real.

A proposta deste trabalho tem como objetivo identificar a característica de juntas utilizadas na construção naval, por meio de câmera monocular e imagens passivas. A medição das características da junta antes da soldagem permitirá a parametrização do processo e, durante o processo, permitirá a identificação de alterações geométricas e o alinhamento do sistema. Destaca-se que o controle de deposição de material não é abordado nesta proposta e, por isso, a poça de fusão não é uma área de interesse.

Portanto, as limitações de projeto tornam peculiar o desenvolvimento deste trabalho. Requer-se a identificação das características do chanfro antes e durante o processo, não tendo sido encontrado trabalho idêntico na bibliografia pesquisada.

3 METODOLOGIA

Neste Capítulo será descrita a organização do sistema proposto. Serão apresentados também os métodos avaliados para utilização no sistema de visão que permitirão alcançar os objetivos pretendidos na Capítulo 1.

O funcionamento do sistema está dividido em duas etapas. A aferição das características do chanfro é realizada antes do processo de soldagem propriamente dito. Por isso determina-se como um processo *offline*.

No segundo momento, inicia-se a soldagem do primeiro passe, com base nas informações retiradas das imagens. Nesta etapa, o sistema deve ser capaz de identificar possíveis desalinhamentos e alterações causadas pelas deformações térmicas das chapas, decorrentes do processo de soldagem. A posição da câmera ficará inalterada durante todo o processo. Por isso, as imagens podem sofrer com a ação da soldagem, as quais podem conter fumaça, faíscas e iluminação não-uniforme. Como esta etapa é realizada durante o processo de soldagem, denomina-se de uma etapa *online*.

Em um processo de solda regular deve ser garantido o alinhamento do sistema durante o processo, sem alteração dos parâmetros configurados na etapa anterior (*offline*), garantindo uma deposição de material uniforme pela junta, o que refletirá na qualidade do processo. Em casos extremos em que há o comprometimento do processo, o sistema deverá identificar tais problemas e agir corrigindo os parâmetros necessários.

Por isso, o sistema de visão proposto para medição geométrica do chanfro, baseado somente em imagem, é dividido em duas etapas:

1. Aferição das características da junta (*offline*);
2. Identificação de alterações geométricas da junta durante o processo (*online*).

Como descrito anteriormente, o sistema é dividido em duas fases, sendo a primeira responsável pela medição das características da junta antes do início do processo de soldagem e, a segunda, pela identificação de alterações geométricas e de alinhamento durante o processo. Os métodos utilizados em cada fase do sistema são descritos nas duas sub-seções subsequentes.

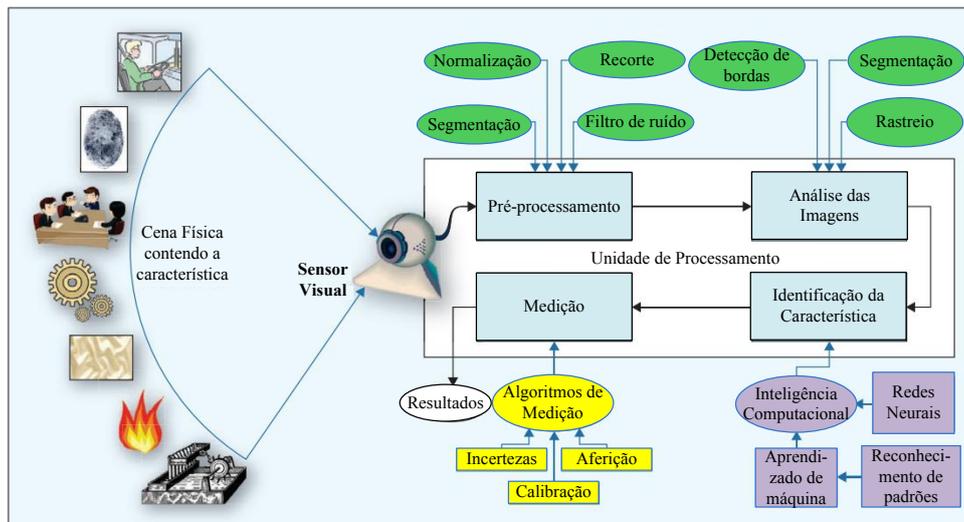


Figura 6: Arquitetura de alto nível para sistemas VBM. Em verde: processamento da imagem; Violeta: inteligência computacional; Amarelo: operações de medição. Adaptado de (Shirmohammadi and Ferrero, 2014).

Para que seja possível realizar as medições nas imagens, é necessária a adequação dos sinais obtidos da câmera para extração das informações nas imagens. A etapa de processamento das imagens consiste na aplicação de diferentes métodos desde a aquisição até a obtenção da informação, propriamente dita. Shirmohammadi and Ferrero (2014) apresentam uma arquitetura de alto nível para um sistema VBM, ilustrado na Figura 6. Nesta arquitetura, imagens capturadas do ambiente físico por um sensor visual, podem ser processadas pela unidade de processamento em diferentes etapas:

- **Pré-processamento da imagem:** no qual é realizado a adequação dos dados, nesta etapa ocorre a aplicação do filtro de ruídos e o realce dos píxeis, por exemplo. É caracterizado pelo processamento de sinais, propriamente dito;
- **Análise da imagem:** no qual são analisadas e extraídas as informações necessárias do processo a ser medido. Esta etapa é caracterizada pelo processamento da imagem: algoritmos de detecção de bordas, segmentação e rastreamento, por exemplo, são utilizados;
- **Identificação de características:** é a etapa em que o resultado do processo de medição é identificado na imagem. Para isso, técnicas como aprendizado de máquina, redes neurais e reconhecimento de padrões são utilizadas;
- **Medição:** com o processo de identificação concluído, as operações de aferição são realizadas nesta etapa, como aferição de circunferência, área e volume. A calibração é essencial nesta etapa, que é responsável pela obtenção do modelo computacional da região analisada.

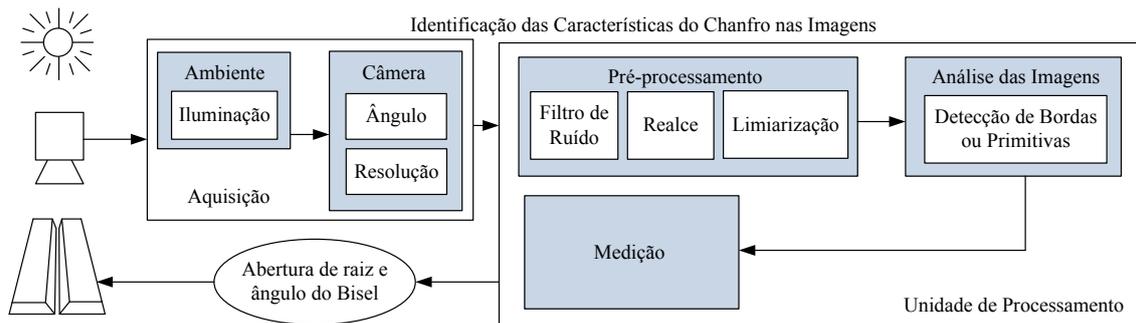


Figura 7: Arquitetura VBM para identificação de características de chanfros em imagens.

Para realização das medições nas imagens é necessária a conversão das informações do domínio da imagem ao domínio físico. Nesta etapa, utiliza-se o modelo *pinhole*, que é uma aproximação dos modelos atuais de câmeras. Neste modelo, assume-se que a imagem é uma representação em escala da cena, sendo o tamanho do objeto na imagem diretamente proporcional ao tamanho real do objeto e da distância do objeto em relação à câmera.

Os parâmetros intrínsecos da câmera são obtidos em uma etapa de calibração, como descrito em (Zhang, 2000). Nesta etapa, identifica-se a distância focal, para as medições, e as características da lente em uso, necessário para eliminação das distorções radiais nas imagens.

Com base na arquitetura apresentada, fez-se o levantamento de algoritmos utilizados em trabalhos do estado da arte. Os métodos levantados são apresentados na Tabela 3, e englobam etapas de pré-processamento e análise das imagens aplicadas. Destaca-se que, para um sistema VBM, não é necessária a aplicação de todas as etapas da arquitetura proposta por Shirmohammadi and Ferrero no processamento das imagens.

3.1 Processamento das Imagens

Com base na arquitetura VBM de alto nível ilustrada na Figura 6, e identificados os métodos utilizados em trabalhos do estado da arte, a arquitetura em avaliação para identificação das características de chanfros em imagens é ilustrada na Figura 7. A etapa de identificação de características não foi identificada no levantamento do estado da arte em aplicações para soldagem. Por isso, as etapas do processamento das imagens consideradas neste trabalho são as de: pré-processamento; análise das imagens; e medição. Os algoritmos avaliados em cada etapa no processamento das imagens são descritos na próxima seção.

3.1.1 Pré-processamento

Etapa de adequação dos dados das imagens e processamento de sinais pode ser dividido nas seguintes etapas: filtro de ruído; realce; e limiarização. Os métodos avaliados em cada etapa serão descritos posteriormente.

3.1.1.1 Filtro de ruído

Como descrito por Shirmohammadi and Ferrero, nesta etapa realiza-se o processamento dos sinais e a adequação dos dados das imagens. Na revisão do estado da arte foram identificados três principais grupos de algoritmos utilizados nesta etapa de processamento, sendo elas: filtro de ruído; realce e limiarização.

Os filtros de ruídos são aplicados para suavização de imagens, para diminuir a interferência de píxeis ruidosos provenientes de problemas durante a aquisição da imagem ou da transmissão dos dados. Este método é baseado na convolução de uma máscara pela imagem, em que o novo valor do píxel é dado pelos valores dos píxeis que estão dentro da máscara. Destacam-se os diferentes filtros avaliados:

- **Filtro de Média:** o valor do novo píxel é dado pela média dos valores dos píxeis que estão dentro da máscara;
- **Filtro Gaussiano:** o valor do novo píxel é calculado com uso de uma distribuição Gaussiana na máscara, na qual os píxeis mais próximos terão maior contribuição para o cálculo;
- **Filtro Mediana:** o valor do novo píxel é a mediana dos valores ordenados dos píxeis dentro da máscara;
- **Operadores Morfológicos:** utilizam-se em sequência, operações de erosão e dilatação nas imagens. Na erosão, o valor do novo píxel é dado pelo número mínimo de píxeis vizinhos dentro da máscara. Nesta etapa, pequenos objetos tendem a ser eliminados. Já na dilatação, o valor do píxel é dado pelo número máximo de píxeis vizinhos dentro da máscara. Nesta etapa, pequenos buracos tendem a ser preenchidos;
- **Filtro Bilateral:** o valor do novo píxel é calculado por uma média ponderada em uma distribuição Gaussiana dos píxeis dentro da máscara. Principal característica deste filtro é a preservação das bordas.

Na aplicação dos filtros deve-se indicar o tamanho da máscara que será aplicada e, no caso de distribuições Gaussianas, o desvio padrão.

3.1.1.2 Realce

Nesta etapa do processamento das imagens, busca-se aplicar técnicas para melhorar a percepção humana nas imagens. Diferentes algoritmos são aplicados, gerando novas imagens com características mais destacadas, como por exemplo, melhorando o contraste que realça os objetos da cena. Dentre eles:

- **Equalização de histograma:** os valores dos píxeis são rearranjados para que haja uma distribuição uniforme dos valores dentro da faixa de representação. Desta forma, aumenta-se o intervalo de representação dos píxeis;

- **Equalização de histograma local:** a diferença com a anterior é que a equalização é realizada dentro de uma máscara;
- **Normalização mínimo-máximo:** recalcula os valores dos píxeis para que todos os valores possíveis sejam representados.

3.1.1.3 Limiarização

Nesta etapa, busca-se separar os valores dos píxeis em dois grupos a partir de um limiar. Desta forma, binariza-se a imagem final em que regiões com valores acima do limiar passam a ser 1 e abaixo passam a ser 0. Nos métodos:

- **Limiarização binária:** o valor do limiar é fixo e determinado de acordo com a condição visual como, iluminação, objeto observado e etapas anteriores utilizadas.
- **Limiarização de Otsu:** é utilizado o método de Otsu (1975) para calcular o limiar para cada imagem.

3.1.2 Análise das Imagens

A detecção de bordas é uma das etapas mais comuns na análise de imagens. As bordas são caracterizadas pela transição entre um objeto e outro, ou mesmo entre o objeto e a cena. Identificando-se as bordas de um objeto e, posteriormente segmentando-o da imagem, é possível realizar as medições das características desejadas. Os métodos avaliados nesta etapa são:

- **Canny:** assume-se que há ruído gaussiano nas bordas. Neste método (Canny, 1986), a máscara suaviza o ruído e encontra a borda. O filtro aplicado para realce das bordas é o Gaussiano e, posteriormente, aplica-se a primeira derivada da Gaussiana para encontrar as bordas. Etapas posteriores são realizadas para filtrar a saída, eliminando bordas menos expressivas;
- **Sobel:** O método, proposto em (Sobel and Feldman, 1968), é baseado na convolução de uma máscara sobre a imagem. A máscara para detecção de bordas por gradientes em x é:

$$\Delta_x = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

normalmente de *kernel* $[3 \times 3]$, resulta na primeira derivada parcial de uma área de 3×3 píxeis.

- **Laplaciano:** O método não possui direção e é baseado na convolução de uma máscara sobre a imagem:

$$\nabla = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix},$$

normalmente de *kernel* $[3 \times 3]$, resulta na segunda derivada parcial de uma área de 3×3 píxeis.

Outros métodos utilizados na análise das imagens são métodos de detecção de primitivas. Nesta etapa, diferentemente de apenas detectar bordas, formas geométricas, conhecidas são mais relevantes, como por exemplo, linhas formadas pelo contorno dos objetos.

Há métodos utilizados para detecção de diferentes formas geométricas contudo, o objetivo na análise das imagens neste trabalho se limita às linhas. Destacam-se, pois, os métodos de detecção de linhas avaliados:

- **Hough (1962):** o método é aplicado em imagens binárias e é uma transformação das linhas do espaço cartesiano para coordenadas polares. As linhas no espaço cartesiano são representadas por pontos com maiores intersecções nas coordenadas polares. Um limiar deve ser ajustado em uma fase de calibração do método para limitar o número de linhas consideradas;
- **Hough probabilístico** (do inglês *Progressive Probabilistic Hough Transform - PPHT*): é baseado na transformada de Hough, mas demanda menor processamento. Baseado num sistema de votação em função do comprimento da linha, é capaz de detectar segmentos de linhas nas imagens. Os parâmetros configurados são o comprimento mínimo da linha e o limiar probabilístico;
- **LSWMS** (Nieto et al., 2011) (do inglês *Line Segment detection using Weighted Mean-Shift*): *Mean-Shift* é uma função de densidade que tem como objetivo inferir a média de um grupo, de acordo com uma função de densidade. O método calcula a área em que há mais densidade dentro de uma janela de interesse. Este ponto é então definido como o ponto central da *Mean-Shift* e da janela de interesse. O processo é repetido sucessivamente até que não exista modificação no ponto central.
- **LSD** (do inglês *Line Segment Detector*): o método proposto por (von Gioi et al., 2012), calcula o ângulo da linha a cada pixel, criando um campo vetorial unitário. Posteriormente, agrupa os píxeis vizinhos com o mesmo ângulo dentro de uma tolerância parametrizável e, por último, encontra segmentos de reta que melhor descrevam estes grupos de píxeis.

Além destes métodos encontrados nos trabalhos revisados do estado da arte, buscou-se avaliar o algoritmo *K-means*. Neste método, busca-se agrupar os dados pela semelhança. Dessa forma, particiona-se o espaço de dados em um Diagrama de Voronoy (Aurenhammer, 1991). Cada grupo é representado pelo seu centróide, que é atualizado iterativamente até que a condição de parada seja atingida.

3.1.3 Medição

Após a identificação das linhas do chanfro na imagem, é necessária a segmentação das quatro linhas do chanfro. Uma etapa de conversão das dimensões é responsável em converter as informações do domínio da imagem para o espaço, para realizar a medição.

As linhas do chanfro nas imagens são extraídas partindo da premissa de que as quatro linhas que representam as bordas do chanfro estão dispostas verticalmente nas imagens. Contabiliza-se então, o total de píxeis de borda em cada coluna da matriz da imagem associada. As colunas são integradas produzindo como saída um vetor onde cada elemento representa o somatório dos píxeis de borda/linha naquela coluna.

Admite-se que as posições com os quatro maiores picos de valores neste vetor representam as linhas do chanfro. Desta forma, convertem-se as linhas para pontos no espaço da imagem. O centro da junta é calculado com base nos quatro pontos extraídos.

Para conversão das informações de píxeis para milímetros, usa-se o modelo *pinhole*. Com a informação da distância focal, encontrada na etapa de calibração da câmera, juntamente com a informação da altura da câmera e a espessura da chapa, faz-se a conversão, ilustrada na Figura 8. Com estas informações é possível converter as dimensões do chanfro mesmo que a câmera não esteja centralizada em relação à junta.

Neste trabalho, assumem-se como conhecidas as informações de distância entre a câmera e a chapa, e a espessura da mesma, não sendo discutidos métodos de obtenção desses valores. Como pode-se visualizar, trata-se de uma relação trigonométrica de triângulos retângulos dado pela Equação 1:

$$\frac{\text{Distância Focal}}{\text{Distância Câmera e Chapa}} = \frac{\overline{bb'}}{\overline{BB'}} \quad \begin{array}{l} \text{(píxeis)} \\ \text{(milímetros)} \end{array} \quad (1)$$

Similarmente é encontrada a relação para $\overline{AA'}$. Já o ângulo do Bisel pode ser encontrado segundo a Equação 2:

$$\hat{\text{Ângulo do Bisel}} = \arctan \left(\frac{d_{A' \perp B'}}{\text{Espessura da Chapa}} \right) \quad (2)$$

Com base nas informações de Abertura de Raiz ($\overline{AA'}$) e o ângulo do chanfro (2β), encontra-se o volume de material que deve ser depositado para preenchimento total da junta. Dessa forma, selecionam-se os parâmetros para realização da soldagem com o aporte térmico necessário e a deposição de material adequada à junta sendo soldada. Os

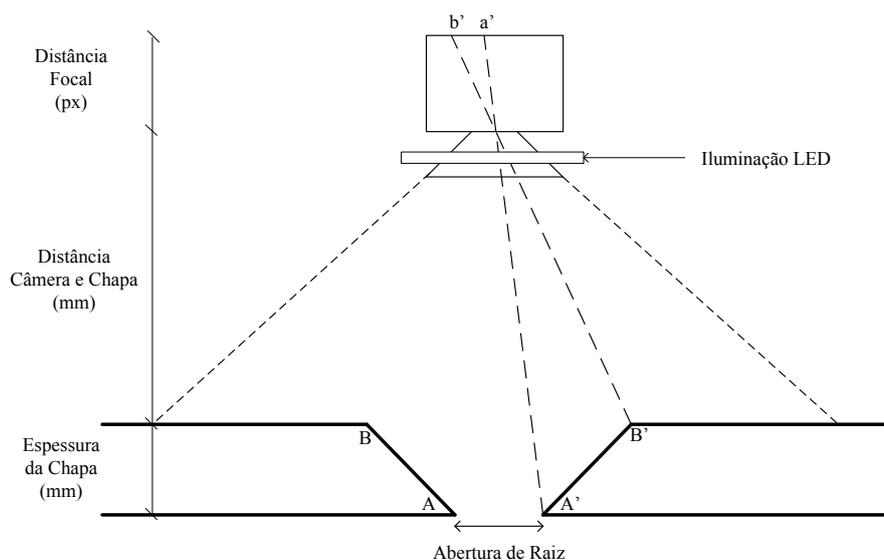


Figura 8: Relação trigonométrica do modelo *pinhole* da câmera para conversão do domínio da imagem para o espaço (píxel/milímetro).

parâmetros selecionados na máquina de solda são: a tensão e a velocidade de alimentação do arame; e os parâmetros de movimentação do robô: velocidades lineares dos módulos (*tractor* e *weaver*) e o regime de oscilação.

3.2 Aferição *offline* da junta

Como pode ser observado na revisão dos trabalhos apresentados no Capítulo 2, diferentes configurações para aquisição das imagens foram utilizadas, dependendo da área de interesse visualizada no processo. Os ângulos da câmera para aquisição variam entre 90° para estimativas *offline* e 45° para acompanhamento da poça de fusão durante a realização do processo. Há também necessidade de uso de combinações de filtros ópticos (vidros escuros e filtros passa-banda) e espelhos, para melhor visualização do processo e redução física de ruídos. Como não há uma prática bem definida nos trabalhos levantados do estado da arte, tomou-se a decisão de testar a efetividade dessas técnicas.

Alguns trabalhos apontam ainda a influência direta do tipo de iluminação da cena. Devido às características construtivas das câmeras, que tendem a reproduzir a visão humana na percepção das cores, o número de sensores que detectam comprimentos de onda referente ao verde é maior do que os que detectam azul e vermelho. Como se propõem o emprego de fonte de luz externa, para garantir iluminação da cena em diferentes condições ambientais, busca-se também avaliar a contribuição na detecção pela cor empregada na iluminação via LED da cena capturada. A fonte luminosa LED será posicionada junto à câmera, como ilustrado na Figura 8.

Há ainda diferentes métodos de processamento de imagens utilizados para detecção das características. Cada trabalho apresenta combinações de acordo com a configuração de

aquisição, a área do processo visualizada e a característica estimada.

Primeiramente, busca-se avaliar a exatidão dos algoritmos para detecção das características do chanfro nas imagens. Assim como em outros tipos de sinais, diferentes etapas podem ser usadas no processamento de imagens, como etapas de filtragem de ruídos, adequação dos valores, realce de características, segmentação, entre outros. Por isso, busca-se avaliar a contribuição de cada etapa do processamento dos sinais na capacidade de detecção dos algoritmos. Além disso, diferentes configurações para a aquisição das imagens foram testadas.

Considerou-se portanto, a influência: do ângulo de aquisição das imagens em relação ao chanfro, iluminação da cena e resolução das imagens de entrada; diferentes métodos de pré-processamento para filtro de ruídos e de realce das imagens; uso de segmentação; e diferentes métodos de detecção de bordas ou linhas.

As configurações avaliadas foram obtidas de trabalhos do estado da arte, descritos anteriormente, e de práticas conhecidas e aplicadas no processamento de imagens. Os métodos testados e as combinações entre as diferentes etapas de processamento das imagens para identificação das linhas do chanfro estão ilustradas na Figura 9. Destaca-se que o objetivo é encontrar a melhor combinação de métodos do estado da arte.

Os testes foram realizados com base em um *dataset* construído em ambiente controlado, considerando as combinações entre Aquisição e Iluminação, conforme descrito na Figura 8. As imagens que compõem o *dataset* foram adquiridas de chanfros com aberturas de raiz de 3, 6 e 9 mm, e ângulo de chanfro de 45° e em diferentes distâncias entre a câmera e a superfície da chapa.

Ao total, 500 imagens compõem o *dataset*, sendo aproximadamente 250 para cada ângulo de aquisição da câmera. A câmera utilizada tem padrão para uso industrial, produzida pela Basler, modelo acA1300-30uc, com sensor CCD e resolução de 1294×964 píxeis, com as lentes da Fujifilm, modelo HF9HA-1B 2/3" 9mm.

Em seguida, as linhas do chanfro na imagem foram anotadas manualmente, fornecendo um *ground truth*, para posterior comparação com os algoritmos de detecção. Dessa forma, para simplificação dos testes, encontra-se a combinação de métodos que melhor descreva a percepção humana na distinção das linhas na imagem, sem a necessária conversão dos valores de píxeis para milímetros, acelerando a avaliação dos resultados, sem perdas de qualidade na percepção.

Após a escolha dos métodos para detecção das linhas da junta nas imagens, será avaliada a capacidade de aferição das características de diferentes chanfros em condições reais. Os resultados das medições das juntas de tipo "V" baseadas em imagens serão comparadas com as medidas extraídas manualmente da chapa com uso de paquímetro. Para isso, mede-se o tamanho da abertura de raiz (*gap* inferior) e o *gap* superior. O ângulo do chanfro é calculado com base nessas duas dimensões.

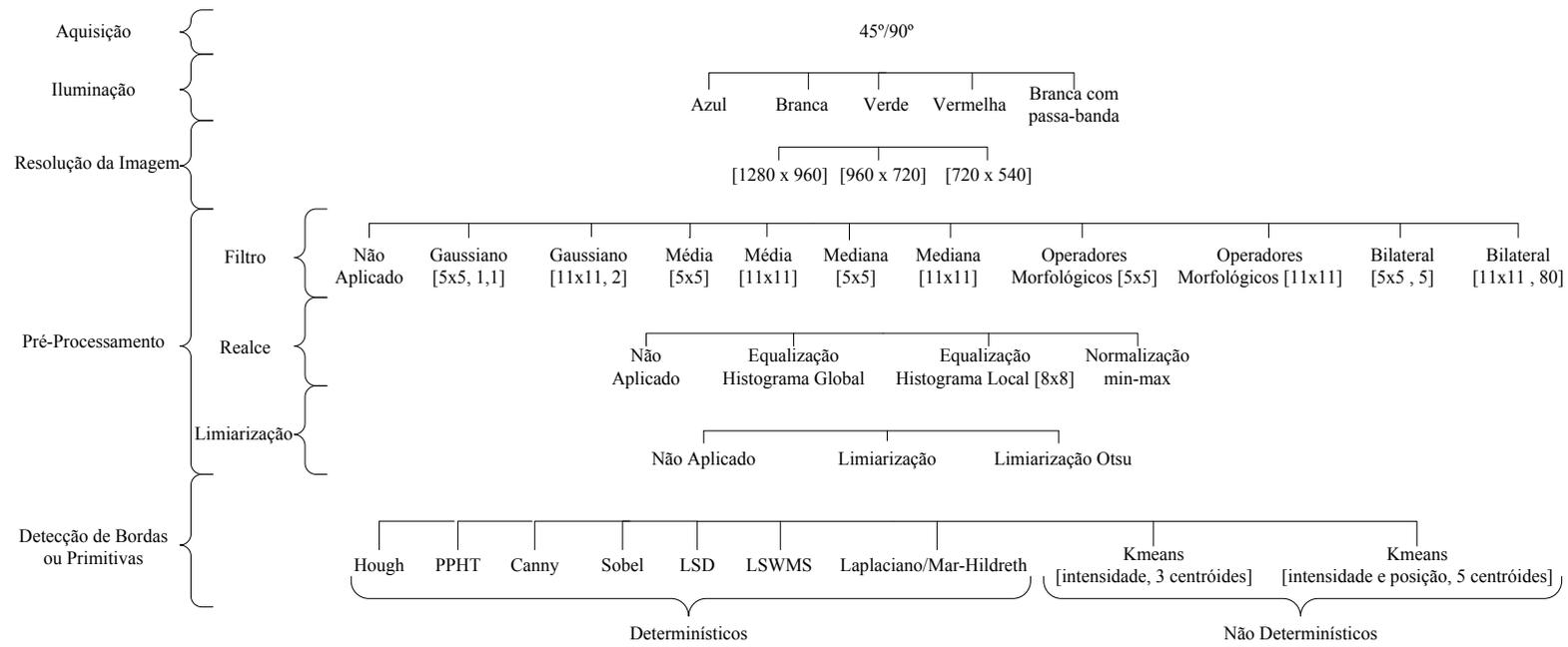


Figura 9: Condições de aquisição e algoritmos avaliados.

Além de ser capaz de aferir as características da junta, o sistema deve identificar o centro da mesma, permitindo alinhar a tocha de solda e o chanfro durante o processo, para uma deposição de material mais uniforme. Para validação desta etapa, serão comparados os centros calculados com base nas imagens e o centro identificado manualmente. Para encontrar o centro da junta manualmente, o operador manipula o robô a fim de posicionar a ponta do arame no ponto central entre os chanfros, anotando a posição do robô.

Por último, para recalcular a trajetória da tocha após a execução de um passe de solda, avalia-se a capacidade de detecção de bordas do método proposto em chanfros já preenchidos. Esta última análise busca validar o uso do mesmo algoritmo proposto para identificação das linhas do chanfro vazio.

3.3 Aferição *online* da junta

Devido ao processo de soldagem a arco, estão presentes na cena ruídos visuais como faíscas, fumaça e variações de iluminação que afetam as imagens. Por isso, propõe-se o uso de diferentes recursos para tratar esses problemas, divididos em soluções de *hardware* e de *software*. Os recursos descritos compõem o sistema de visão proposto.

Primeiramente, aquisições de imagens durante testes de soldagem mostraram a dificuldade de se eliminar via *software*, em tempo real, a fumaça do processo. Por isso, faz-se o uso de um sistema comercial de sucção de fumos, próprio para sistemas de soldagem. Tal recurso é acoplado à tocha de solda, e normalmente é usado em soldas manuais para que o soldador não inale os fumos gerados no processo. Assim, propõe-se essa solução para redução física da fumaça do processo, requerendo um equipamento específico para este fim.

Contudo, mesmo com a remoção da fumaça, os respingos se mantêm. Torna-se necessária a proteção mecânica do sistema de aquisição de imagens (sistema de câmera e iluminação passiva) para evitar que os respingos adiram a lente, interferindo na qualidade das imagens. A proteção mecânica é feita por anteparos acoplados à câmera e um vidro transparente à frente da lente.

Resumem-se as soluções baseada em *hardware* ao uso de sugador de fumos e a proteção mecânica do sistema de visão. Em seguida, apresentam-se as soluções via *software* para tratar os demais problemas.

As faíscas se apresentam como um ruído visual causado pelos respingos de solda. Gotas de metal fundido são expelidas a altas velocidades da poça de solda, deixando um rastro luminoso na imagem. As faíscas são ruídos visuais que afetam diretamente a extração das características da junta, podendo serem confundidas com as próprias linhas do chanfro. Por isso, propõem-se um método para tratar esses ruídos nas imagens, via *software*.

O método proposto é inspirado no trabalho de Hang and Pritschow (1999). Nele, os autores argumentam que dois *frames* consecutivos não possuem a mesma área da imagem

com ruídos visuais causados pelas faíscas. No trabalho, os autores utilizam um sistema laser para rastreamento do chanfro e subtraem dois *frames* consecutivos para identificação das partes constantes nas duas imagens, segmentando assim a linha laser.

Com base nisso, na percepção de que as faíscas sempre aparecem mais claras que o plano de fundo das imagens e que as altas velocidades impedem a sobreposição das mesmas, propõem-se a composição de uma imagem com base em dois *frames* consecutivos, gerando uma nova imagem com as faíscas suprimidas, ao selecionar os píxeis de menor intensidade entre os *frames*. Se denotamos por t o instante que a imagem foi adquirida e por P^t a matriz de píxeis que representa a imagem, então o píxel na linha i e coluna j dessa matriz é P_{ij}^t . Dessa forma, o novo valor do píxel P_{ij}^t é dado por:

$$P_{ij}^t = \min \{P_{ij}^t, P_{ij}^{t-1}\}, \quad \forall 0 \leq i < 964, 0 \leq j < 1294$$

Esse método de supressão de ruídos é proposto para uso no pré-processamento das imagens, sendo a primeira etapa a ser realizada após a aquisição, diminuindo os efeitos das faíscas e da fumaça branca nos algoritmos de detecção de características. Posteriormente, segue-se o processamento da imagem descrito na Figura 7, com os mesmos algoritmos propostos para o uso do sistema na etapa *offline*.

A posição do centro da junta é convertida do domínio da imagem para as dimensões reais, fornecendo a informação necessária para permitir o alinhamento da tocha em relação ao chanfro naquela posição. Como a câmera está posicionada a uma distância d da tocha de solda, veja Figura 3, são conhecidas também as relações das distâncias entre as posições dos pontos calculados nas imagens e a tocha. Dessa forma, faz-se o levantamento do chanfro à frente do processo, a mesma distância d , e os parâmetros do processo são armazenados e aplicados quando a posição da tocha alcançar a mesma posição em que as características do chanfro foram extraídas.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste Capítulo serão apresentados os experimentos realizados. Primeiramente, os resultados da avaliação em ambiente controlado dos algoritmos testados para processamento das imagens na etapa *offline* do sistema proposto. Posteriormente, a avaliação da capacidade de aferição destes métodos em condições reais de chapas e ambiente, ambos não controlados. Logo após, os resultados para a detecção do centro da junta baseado nas imagens em comparação com as posições anotadas por um operador. Por último, os resultados do processamento de imagens adquiridas durante a soldagem, proposta de funcionamento do sistema *online*.

4.1 Aferição *offline* da junta

Considerando as combinações entre os métodos da Figura 9, obtém-se 17.820 combinações para cada ângulo de aquisição da câmera. Para cada combinação de métodos, avaliou-se a capacidade de percepção das linhas do chanfro em imagens com diferentes condições de aquisição. Ao avaliar-se o resultado dessas combinações de métodos descritos anteriormente, buscou-se, por meio de testes exaustivos, a combinação com os melhores resultados para percepção das linhas do chanfro, na etapa *offline* do processo.

Cada imagem processada com as 17.820 possíveis combinações entre os métodos é comparada com a anotação manual da imagem de entrada. Busca-se a menor média de erro entre a posição das quatro linhas do chanfro nas imagens detectadas em relação às linhas anotadas manualmente. O erro médio na identificação do chanfro na imagem pode ser dado pela equação:

$$E_{PC} = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^4 |PC_{D_i} - PC_{GT_i}|, \quad (3)$$

onde PC_D representa o vetor de posições encontradas pelo detector em píxeis e PC_{GT} representa o vetor de posições dado pela integração horizontal das marcações feitas pelo anotador humano na imagem. Dessa forma, cada linha nas imagens é representada por um ponto médio e o erro médio é avaliado entre os pontos médios detectados e anotados.

Com a câmera posicionada a um ângulo de 45° em relação à superfície da chapa, o

Tabela 5: Top 10 combinações com melhores resultados para métrica E_{PC}

Imagem	Ruído	Realce	Limiarização	Detecção	Iluminação
[1280x960]*	Filtro Bilateral [11 x 11]	Não Aplicado		Sobel	
	Filtro Bilateral [11 x 11]	Normalização Global		Sobel	
	Média [11 x 11]	Não Aplicado		Sobel	
	Média [11 x 11]	Normalização Global		Sobel	
	Filtro Bilateral [11 x 11]	Eq. Histograma	Não Aplicado*	Sobel	Branco*
	Filtro Bilateral [11 x 11]	Eq. Histograma		LSD	
	Média [11 x 11]	Normalização Local		LSD	
	Média [11 x 11]	Eq. Histograma		Sobel	
	Média [5 x 5]	Eq. Histograma		LSD	
	Gaussiano [11 x 11]	Eq. Histograma		Sobel	

*Para todas as amostras avaliadas.

menor erro médio encontrado na avaliação E_{PC} de todas as combinações avaliadas foi de 32 píxeis. Pode-se observar que, devido ao ângulo da câmera, houve dificuldade de focar o chanfro na imagem, devido a distância entre a chapa e a câmera não ser constante. O que culminou nos resultados insatisfatórios.

Para fins comparativos, com a câmera posicionada com vista superior da junta, ou seja, a 90° , 593 combinações de métodos retornaram erros médios para E_{PC} menores que 32 píxeis. Com base nestes resultados, a posição da câmera foi escolhida. Para as demais avaliações, considerou-se somente os resultados com aquisição da câmera a 90° .

Durante a análise do desempenho dos algoritmos testados com a câmera a 90° , considerando todas as combinações possíveis dentro desta restrição, notou-se que não houve um método em particular que tenha se destacado dos demais. Em função disto, optou-se por fazer a análise de um conjunto mais limitado das combinações, levando em consideração apenas aquelas com melhores resultados.

No Apêndice 7.1 estão listadas as 100 combinações com menores erros médios avaliados. Como pode-se observar, todas as combinações, entre as 100 melhores, apresentam a resolução original da imagem de entrada ([1280 × 960]). Observa-se também que nenhuma das combinações fez o uso de Limiarização na etapa de pré-processamento. Entre os 100 melhores resultados destacam-se ainda os métodos de detecção Sobel e LSD entre os mais relevantes, com 52 e 38 ocorrências respectivamente.

Restringe-se as demais análises entre os dez métodos mais bem avaliados. Na Tabela 5 estão apresentadas as 10 combinações que apresentaram os menores valores para o erro médio (E_{PC}). Nota-se que todas as combinações apresentam: resolução original da imagem; iluminação branca; sem limiarização.

O filtro de ruído que apresentou a menor média de erro é o Bilateral [11 × 11]. Contudo, entre os Top 10, o filtro de Média [11 × 11] é o que aparece na maioria das combinações: seis ao todo. Isso demonstra que esse filtro apresenta melhores resultados, independentes das demais configurações. Destaca-se ainda que o filtro Bilateral é mais custoso computacionalmente (incrementando o tempo de processamento em cerca de 100 vezes), outro

motivo contra a sua escolha.

A combinação que na etapa de realce apresenta menor erro médio é a não aplicação de realce. Contudo, ao analisarmos o Top 10 melhores resultados, há apenas uma outra ocorrência desta combinação. Por outro lado, no Top 10 resultados é a Equalização de Histograma que aparece entre 5 combinações, sem incrementar significativamente o tempo de processamento da imagem.

No caso dos métodos de detecção, Sobel aparece entre sete das dez melhores combinações, como pode-se visualizar. O Sobel também apresenta o menor tempo de processamento entre os dez métodos melhores classificados.

Dessa forma, não se escolheu a combinação de métodos com o menor erro, pois o *dataset* de teste não representa a população de imagens possíveis. Propõem-se então, utilizar as combinações que apresentam maiores ocorrências entre os dez melhores resultados para a análise do menor erro médio do Ponto Central, uma vez que, a diferença entre os resultados do melhor método dessa avaliação e o décimo é de 1,39 píxeis (irrelevantes na conversão píxel/milímetro). Essa abordagem permite a escolha dos métodos que mais contribuíram na detecção das características do chanfro, dentro de um limite de diferença de erro aceitável.

Sendo assim, os testes demonstraram que a maior ocorrência para aquisição das imagens é com a câmera paralela ao chanfro (imagens com vista superior), com iluminação LED branca e a maior resolução possível da imagem de entrada ($[1280 \times 960]$). Na Figura 10 estão ilustradas as etapas de pré-processamento e detecção escolhidas, sendo a 8ª combinação entre as dez melhores: Iluminação Branca; Resolução da Imagem $[1280 \times 960]$; Filtro de Média $[11 \times 11]$; Equalização de Histograma; Sem Limiarização; Detecção Sobel; com média de tempo de processamento de 0,0047 s em uma CPU Core-i5 com 3,2 Ghz em uma arquitetura Linux 64-bit.

As linhas do chanfro nas imagens são extraídas ao contabilizar-se o total de píxeis de borda em cada coluna da matriz da imagem associada. As colunas são integradas produzindo como saída um vetor onde cada elemento representa o somatório dos píxeis de borda/linha naquela coluna, como ilustrado na Figura 11.

Admite-se que as posições com os quatro maiores picos de valores neste vetor representam as linhas do chanfro. Desta forma, convertem-se as linhas para pontos no espaço da imagem. O centro da junta é calculado com base nos quatro pontos extraídos.

Com base nos resultados dos testes realizados, a câmera será posicionada junto ao braço do robô (módulo *weaver*) à frente da tocha de solda, fora do campo de visão do arco elétrico, paralelamente ao chanfro. Ou seja, com vista superior da junta, como ilustrado na Figura 3.

Portanto, o sistema deverá ser capaz de identificar tais características da junta e o centro da mesma, por imagens da vista superior, e assim, configurar o sistema para realizar a solda autonomamente. Na Figura 12 está ilustrada a disposição final do sistema. A câmera

foi posicionada a 15 cm da superfície da corpo de prova e a 10 cm da tocha de solda. Nesta altura, a relação de píxeis por milímetro da cena é de aproximadamente 14 *px/mm*.



Figura 10: Combinação de métodos que obtiveram o melhor resultado estimação das linhas do chanfro, para aquisição a 90°.

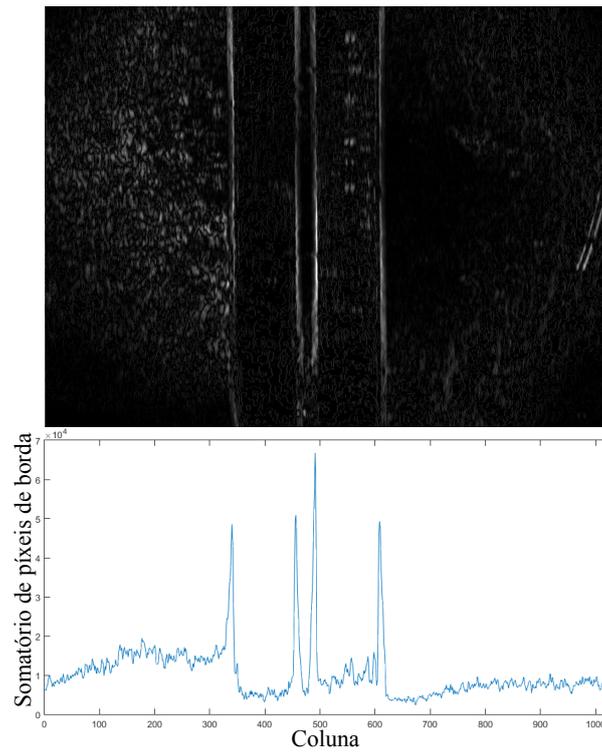


Figura 11: Método de detecção de bordas Sobel e a extração das 4 linhas do chanfro nas imagens.

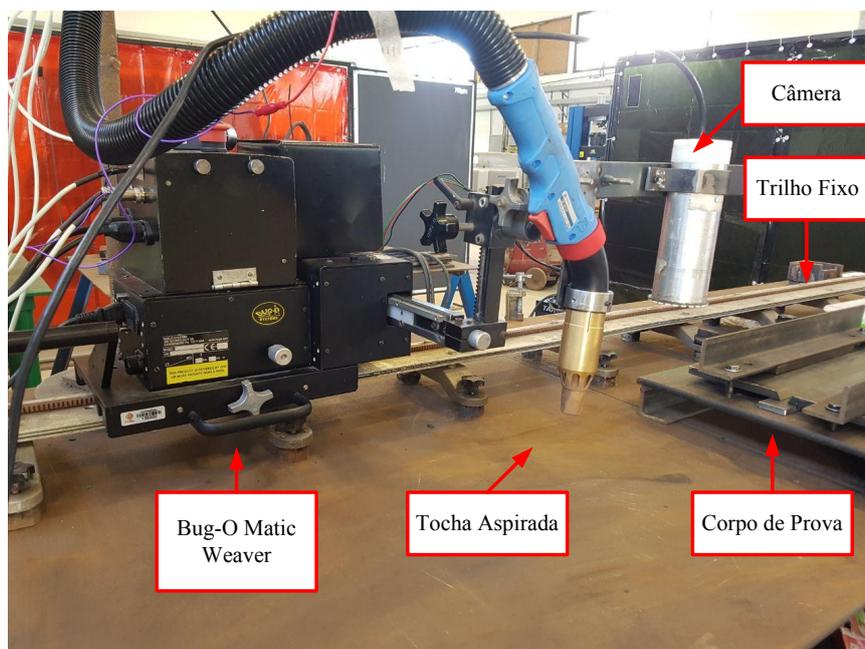


Figura 12: Disposição da câmera e do robô para aquisição de imagens durante o processo de solda.

4.1.1 Avaliação da aferição *offline* da junta

Nesta seção busca-se avaliar os métodos propostos em ambientes reais e não controlados. Serão descritos os testes para aferição da precisão e robustez do sistema proposto.

A avaliação da resposta do método foi realizada em ambiente com condições próximas a dos locais em que se propõem utilizar a solução final. Os testes foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Engenharia da Soldagem (LaPES) da FURG, local em que são realizadas as soldagem, o que permitiu simular um ambiente industrial. Esta avaliação pretende identificar problemas na utilização dos métodos de computação visual propostos, ainda como a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos. Vale destacar que não foram controladas as variações na iluminação ambiente, presença de partículas suspensas, como fumos e poeira, dentre outros ruídos que estes locais estão suscetíveis.

Corpos de prova com as características utilizadas na construção naval, sendo elas, aberturas de raiz entre 3 e 9 mm e ângulos de chanfro (2β) entre 45 e 55°, foram produzidos. Entre as avaliações realizadas nesta etapa estão:

1. o cálculo das características do chanfro;
2. a identificação do centro da junta;
3. identificação das bordas entre os passes.

Em todos os casos, os testes foram realizados com os métodos portados e embarcados no robô de soldagem linear Bug-O. Para tanto, problemas mecânicos tiveram de ser solucionados como o acoplamento mecânico para posicionamento da tocha aspirada e fixação rígida da câmera à frente tiveram de ser elaborados.

O sistema é totalmente dependente da distância entre o centro óptico da câmera e a ponta da tocha. Isso é necessário uma vez que a posição do robô em que a imagem é capturada é diferente da posição onde a tocha se encontra. Por isso, uma vez criado um elo rígido, calibrados e identificados os desalinhamentos entre ambos, para a repetibilidade da execução, a variação entre estas distâncias deve ser nula entre diferentes processos.

A calibração nesta etapa é dada seguindo: após a calibração da câmera propriamente dita, em que se busca corrigir as distorções radiais causadas pela lente, busca-se identificar relação de distância entre o centro da imagem e o centro da tocha de soldagem. O centro de uma imagem capturada é identificado, posteriormente, move-se o robô até a tocha atingir o ponto identificado anteriormente como sendo o centro da imagem. Estas relações são dadas em pulsos de *encoder*: distância percorrida pelos módulos *weaver* e *tractor* do robô entre a posição de aquisição da imagem e a ponta do arame de soldagem. Admite-se distâncias tanto em X (distância ao longo do trilho percorrido pelo *tractor*), como em Y (desalinhamento entre a tocha e a câmera, percorrido pelo *weaver*), como pode ser visualizado na Figura 13.

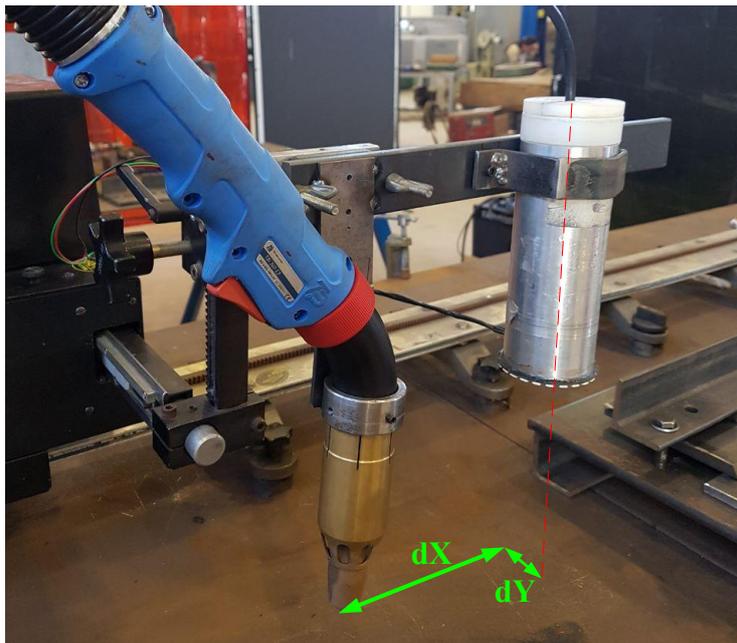


Figura 13: Calibração de distâncias entre o centro da imagem e a ponta do arame de soldagem (dX: pulsos de *encoder* do *tractor*, dY: pulsos de *encoder* do *weaver*).

A relação entre pulsos de *encoder* e milímetros é de 8 para o *tractor*, e de 17 para o *weaver*. Ou seja, o erro mínimo possível entre alinhamento da tocha de soldagem e o centro da junta é de $\frac{1}{17}$ mm (ou 0,059 mm).

4.1.1.1 Medição das características do chanfro

No primeiro caso, corpos de prova com diferentes características foram avaliados pelo sistema. Buscou-se avaliar a capacidade de estimação das características do chanfro, a precisão e repetibilidade do processo.

Esta etapa pode ser descrita como a avaliação não controlada dos resultados obtidos na Seção 4.1. Naquela etapa, foram selecionados os algoritmos que apresentavam o melhor resultado na detecção das linhas em imagens obtidas em ambientes controlados. Neste momento, busca-se avaliar os resultados em corpos de prova reais, com suas imperfeições e ruídos visuais, em local não controlado.

Foram construídos três corpos de prova para esta avaliação, sendo eles com, 3, 6 e 9 mm de abertura de raiz e todos com 45° de ângulo de chanfro, veja Figura 14. Tais valores foram escolhidos por serem a abertura mínima, média e máxima previstas para uso na construção naval. Como o ângulo de Bisel é calculado a partir das linhas detectadas nas imagens, torna-se desnecessário o teste com diferentes ângulos, uma vez que se comprove a detecção correta das quatro linhas pelo sistema. As juntas produzidas apresentam condições reais de chapas utilizadas na construção naval, como pode-se observar na Figura 14, diferentes chapas apresentam diferenças na superfície quanto ao polimento, à refletividade e a presença de riscos.

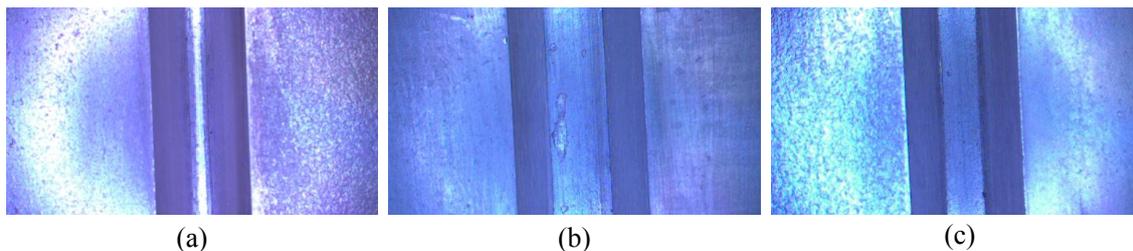


Figura 14: Condições de juntas avaliadas para medição das características do chanfro. Abertura de raiz de 3 mm na condição 1 em (a), de 9 mm na condição 2 em (b) e 6 mm na 3 em (c), todas com 45° de ângulo de chanfro. Observação: todas as imagens foram adquiridas com poucos minutos de diferença, ou seja, com a mesma condição da câmera e condições parecidas de iluminação. Pode-se observar as diferenças nas superfícies das chapas pelos riscos e diferenças na reflexão da luz.

Tabela 6: Comparação entre o resultado da medição das características do chanfro em diferentes condições.

Condição	Erro Abertura de Raiz [mm]				Abertura Superior [mm]			
	Min.	Max.	Med.	Dev. Pad.	Min.	Max.	Med.	Dev. Pad.
1	0.215	0.667	-0.516	0.283	0.397	0.749	-0.538	0.204
2	0.425	0.652	-0.500	0.271	0.056	0.412	0.412	0.290
3	0.059	0.698	-0.168	0.201	0.035	0.390	0.177	0.096

Cada corpo de prova é formado por 2 chapas de metal chanfradas de 30 cm de comprimento. Nestes testes, buscou-se a obtenção do maior número possível de imagens para realizar as medições. Para cada teste foram adquiridas no mínimo 105 imagens de cada chanfro, sendo, portanto, adquirida uma imagem do corpo de prova, a cada 29 mm percorridos.

Na Tabela 6 são observados os erros entre o cálculo das características e as anotadas manualmente. As dimensões físicas foram extraídas com uso de paquímetro, com resolução de 0,05 mm, sendo consideradas a média entre as medições encontradas. Como os parâmetros são escolhidos em referência a intervalos de 1 mm, cabe ainda uma etapa de adequação (arredondamento) dos valores. Na Tabela 7 estão apresentados os resultados dos testes após as devidas adequações das medições.

Com a melhor condição do corpo de prova, no qual não haviam riscos, manchas ou outras imperfeições que se destacassem mais que as linhas do chanfro, veja junta (3) na Figura 14, foi possível obter uma taxa de acerto do cálculo das características de 96,3% das imagens avaliadas, como pode ser visualizado na Tabela 7.

Na pior condição avaliada, a condição 1 da Figura 14 e das Tabelas 6 e 7, apenas 68,9% das imagens avaliadas retornaram os valores das características do chanfro corretos. Tais resultados foram devido ao *backing* (chapa posicionada abaixo do chanfro, responsável por estabilizar o cordão no primeiro passe) estar manchado em diferentes regiões, interferindo na identificação da Abertura de Raiz, principalmente, retornando valores menores do que

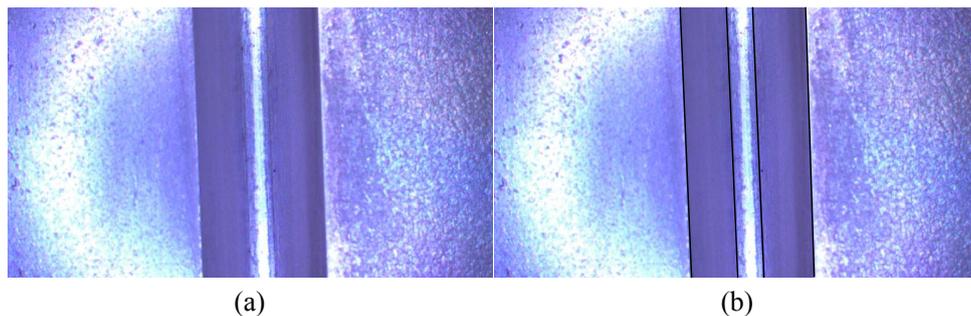


Figura 15: Em (a) imagem original do chanfro na condição 1 avaliada. Características de 3 mm de abertura de raiz e 45° de ângulo de chanfro. Em (b) destacadas as linhas do chanfro. Como pode-se observar, visualmente nas imagens, a mancha no centro do *backing* é mais expressiva do que os limites entre o chanfro e o *backing*.

Tabela 7: Aferições corretas para as características do chanfro pelo Método proposto, em diferentes condições visuais das chapas avaliadas, após a adequação dos dados em intervalos de 1 mm.

Condição	Abertura de Raiz (%)	Abertura Superior (%)	Ângulo (%)	A. Raiz e Ângulo (%)
1	69,8	46,2	77,4	68,9
2	89,3	59,2	85,4	79,6
3	96,3	100	100	96,3

os reais, veja Figura 15. Já no caso intermediário, na condição 2, 79,6% das amostras retornaram os valores corretos para o cálculo das características.

Pode-se comprovar que, como o sistema é baseado em visão passiva, ruídos presentes na cena como chapas metálicas não homogêneas (com riscos, oxidação e sujeira) e reflexões luminosas em parte da chapa, afetam a capacidade de detecção do método, uma vez que tais ruídos possam ter anotações/características visuais nas imagens mais relevantes/destacadas do que as linhas desejadas do chanfro. Dessa forma, cabe um cuidado especial na preparação dos corpos para o uso do sistema.

4.1.1.2 Identificação do centro da junta

Na segunda avaliação, o centro da junta na imagem é calculado como o ponto médio entre as linhas identificadas da abertura de raiz. Como resultado nesta etapa, busca-se minimizar o erro entre o cálculo do centro da junta e o centro “real” identificado manualmente.

Nos testes, diferentes velocidades lineares foram utilizadas no robô durante a aquisição das imagens, para ser possível identificar se há interferência deste fator na capacidade de aferição do método. O teste foi executado das seguintes formas:

- **Velocidade Baixa:** neste, o robô se desloca com velocidade constante de 2,5 mm/s no trilho. Imagens são capturadas em sequência e as aferições são realizadas de acordo com a posição de aquisição das imagens. Movimentos de alinhamento do



Figura 16: À esquerda: execução do método proposto - estimação do chanfro e centro da junta é feita em toda a extensão do chanfro. À direita: operador posiciona visualmente a ponta do arame no centro da junta em diferentes pontos do chanfro e tais posições são anotadas.

braço são realizados durante a movimentação. Não é possível assegurar de antemão a distância percorrida entre duas aquisições da câmera. Vale destacar que as aferições podem ter sido feitas com a câmera não centralizada com a junta.

- **Velocidade Média:** este caso é similar ao destacado anteriormente, porém, a velocidade empregada é maior, igual a 5 mm/s, o que acarreta distâncias percorridas maiores entre aquisições de imagens.
- **Velocidade Alta:** neste, a velocidade utilizada é de 10 mm/s. Cabe destacar que quanto maior a velocidade, menos aferições serão realizadas ao percorrer o corpo de prova.

Este teste foi repetido em três corpos de prova diferentes, sendo as mesmas condições descritas no teste anterior. Foi avaliado ainda a capacidade de detecção com os chanfros alinhados ao trilho do robô e com eles totalmente desalinhados (chegando a 35 mm entre o início e o fim da junta). Dessa forma, busca-se avaliar os resultados em diferentes condições de aplicação do sistema, respectivamente.

Posteriormente, compara-se o resultado de detecção do método com o centro da junta obtido manualmente. Para isso, o operador manipula o robô e posiciona visualmente a ponta do arame de soldagem no centro da junta, veja Figura 16. Nesta etapa, o operador movimenta o robô com passos de 0,5 mm, fornecendo o *ground-truth* para comparação.

Na obtenção manual do centro da junta, esperava-se encontrar um segmento de reta entre o início e o fim da junta, o que não foi comprovado. Devido às imperfeições na fabricação dos corpos de prova e ao método utilizado para obtenção do *ground-truth* manualmente, verificou-se que, em nenhum dos casos avaliados, o centro da junta foi identificado como uma reta, como pode ser visualizado nas Figuras 17, 18 e 19. Foram

Tabela 8: Comparação entre o resultado do método proposto e o centro de referência para juntas alinhadas ao trilho do robô

Teste	Erro [mm]								
Condição	1			2			3		
	Max	Med	D Pad	Max	Med	D Pad	Max	Med	D Pad
V. Baixa	1,054	-0,200	0,469	1,200	0,0145	0,268	0,672	-0,018	0,237
V. Média	0,837	-0,161	0,387	1,026	0,002	0,291	0,601	-0,007	0,235
V. Alta	0,902	-0,165	0,453	1,883	0,020	0,582	0,438	0,045	0,150

Tabela 9: Comparação entre o resultado do método proposto e o centro de referência para juntas desalinhadas com o trilho do robô

Teste	Erro [mm]								
Condição	1			2			3		
	Max	Med	D Pad	Max	Med	D Pad	Max	Med	D Pad
V. Baixa	1,864	0,233	0,257	0,733	0,240	0,242	0,505	0,229	0,131
V. Média	0,985	0,168	0,277	0,743	0,239	0,275	0,451	0,255	0,141
V. Alta	0,583	0,240	0,213	0,665	0,261	0,287	0,507	0,274	0,181

então considerados cinco pontos ao longo do corpo de prova para verificação manual do centro da junta e posterior comparação com o método.

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados para detecção do centro da junta com o trilho alinhado. Nela, apresentam-se o erro máximo, o erro médio e o desvio padrão do erro entre a detecção do centro da junta pelo sistema e o centro manualmente identificado, para cada condição avaliada.

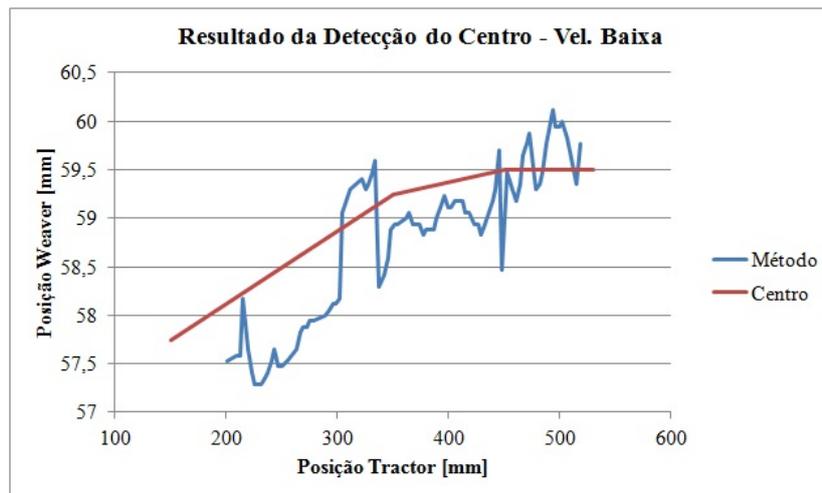
O resultado para a condição 1 avaliada com as diferentes velocidades aplicadas ao robô pode ser visualizado na Figura 17. Nela, a posição do centro da junta, calculado em milímetros pelo sistema, é apresentado em comparação ao centro manualmente identificado. Da mesma forma, pode-se visualizar os resultados para as condições 2 e 3 avaliadas nas Figuras 18 e 19, respectivamente.

Buscou-se ainda avaliar a resposta do sistema em condições reais, como no caso da junta estar desalinhada em relação ao trilho do robô. Neste caso, a atualização do centro do tecimento durante a soldagem será mais frequente.

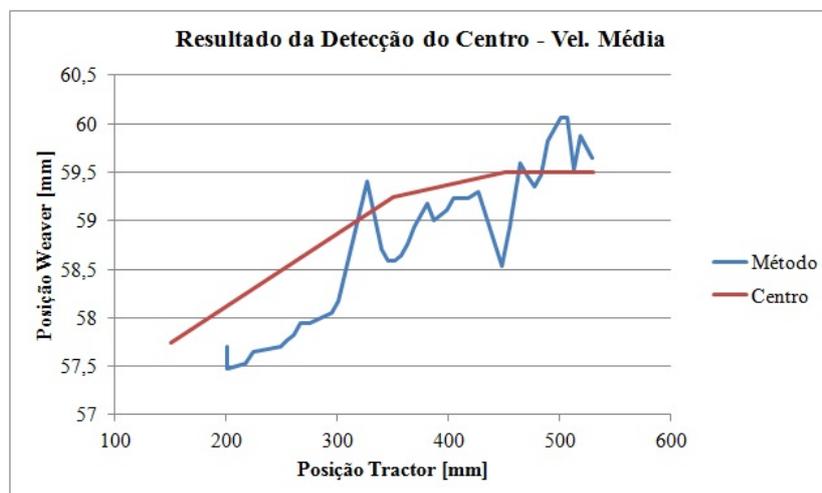
A Tabela 9 apresenta os erros máximos, médios e o desvio padrão para os centros da junta calculados pelo sistema e os identificados manualmente. Os resultados da Tabela 9 podem ser visualizados nas Figuras 20, 21 e 22 para as condições 1, 2 e 3 avaliadas. Destaca-se que a escala do eixo vertical nesses gráficos é maior, se comparado aos anteriores, devido ao desalinhamento entre o trilho do robô e a junta, não sendo possível uma comparação direta entre os gráficos. Em maiores detalhes, podem-se visualizar os resultados dos testes no Apêndice 7.2.

Não foi possível estabelecer uma relação direta entre a velocidade do robô e o erro nas

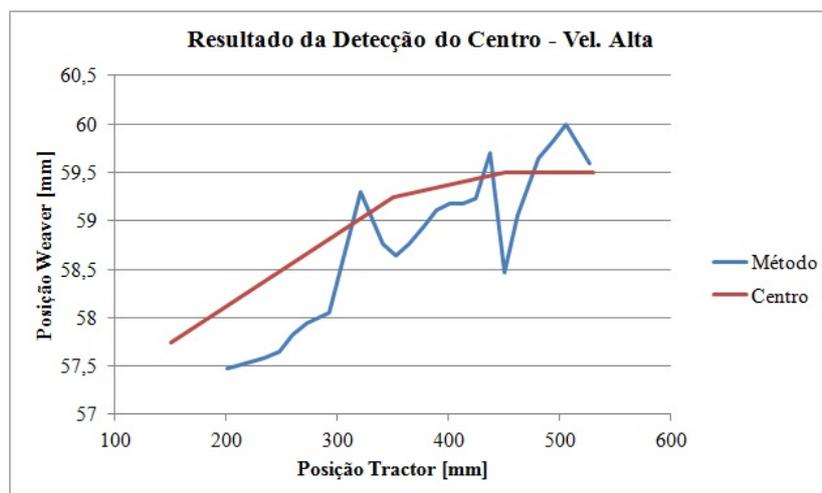
medições. A condição visual da superfície é mais relevante para o sucesso das medições do que a velocidade linear empregada, dado que a amostragem é suficiente para capturar imagens sem *aliasing*.



(a)

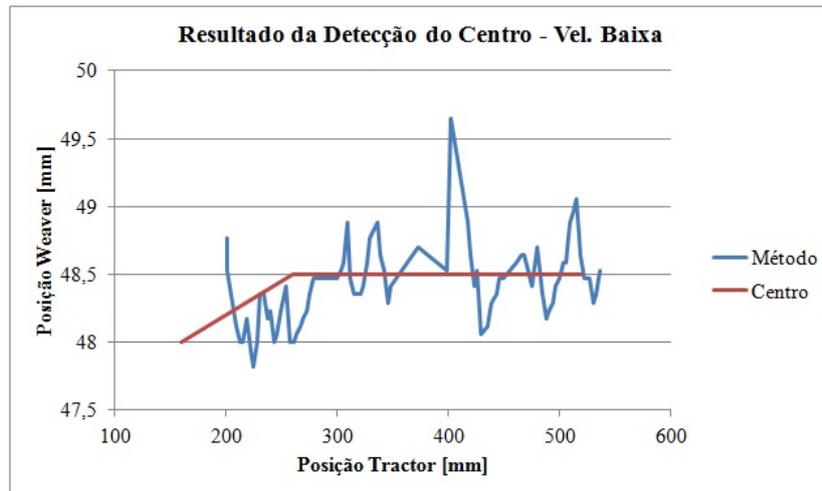


(b)

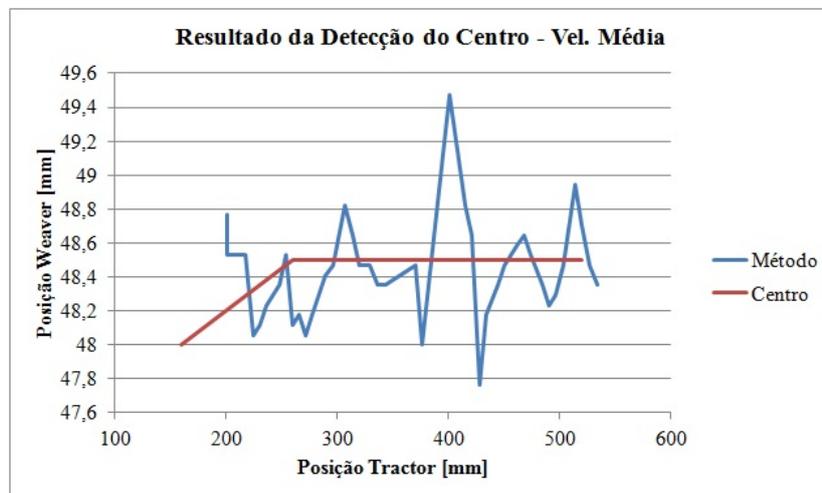


(c)

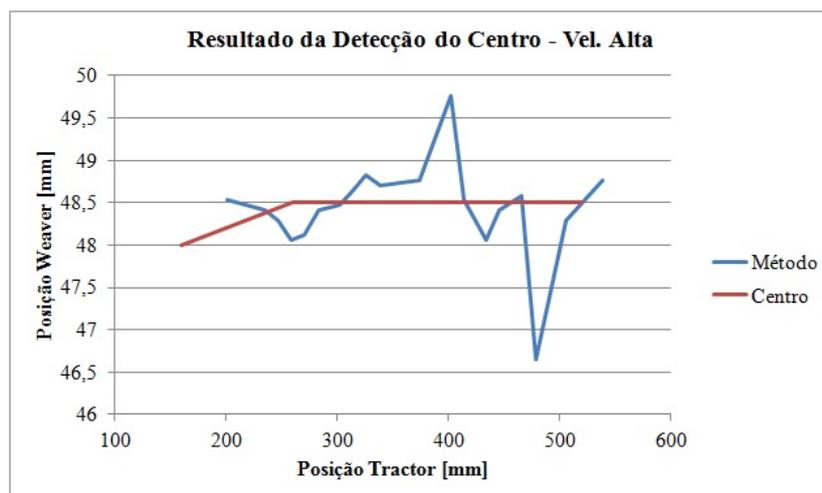
Figura 17: Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 1 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.



(a)

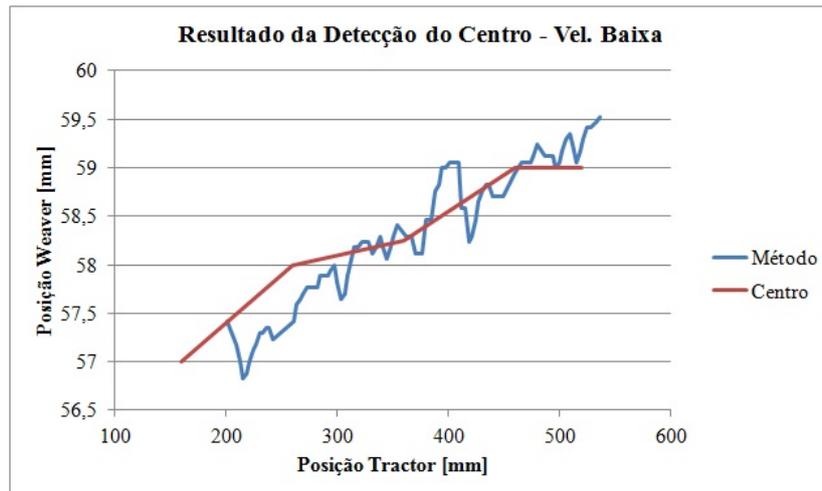


(b)

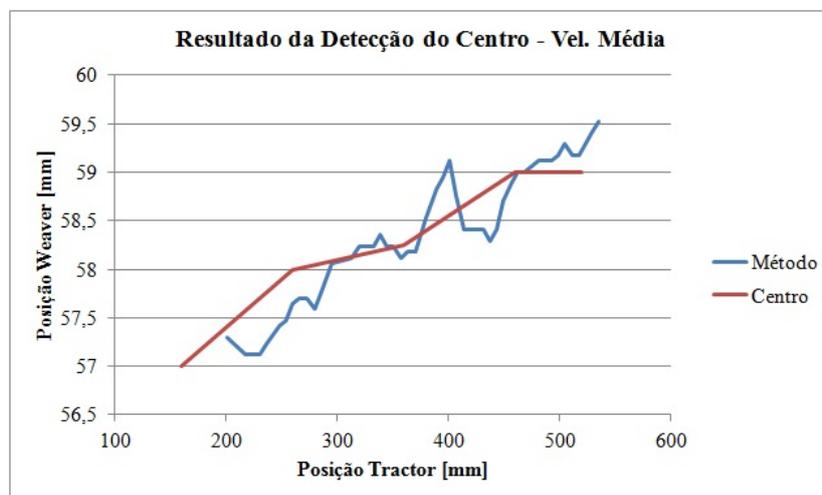


(c)

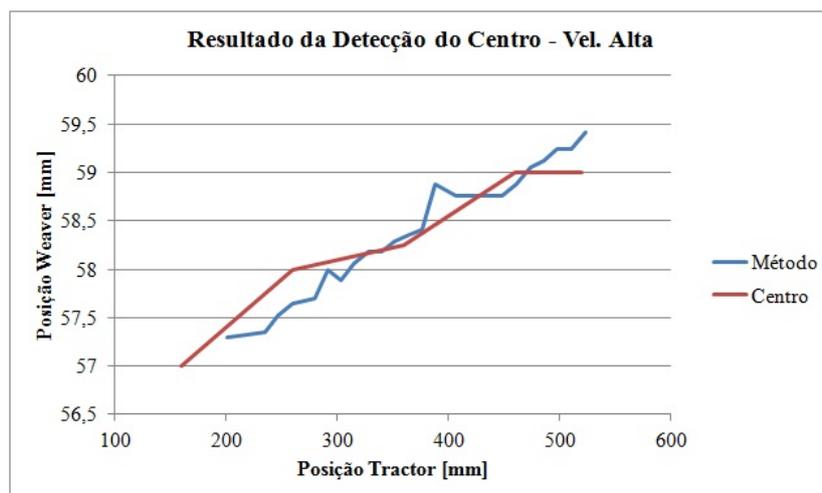
Figura 18: Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 2 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.



(a)

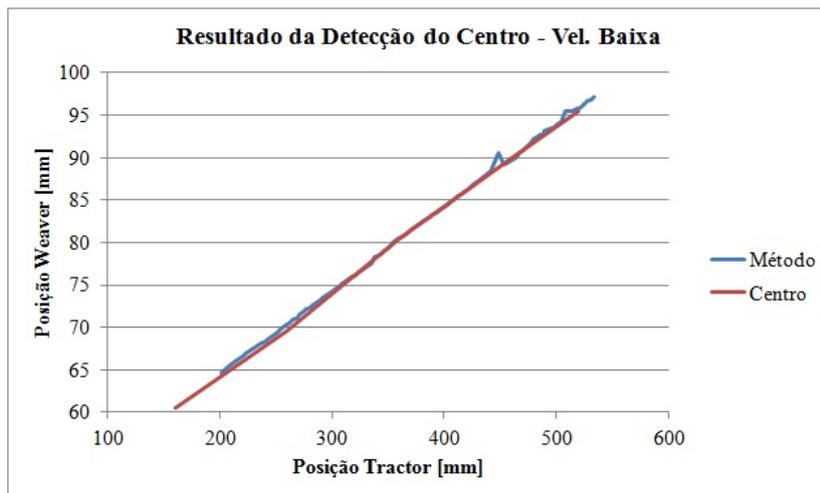


(b)

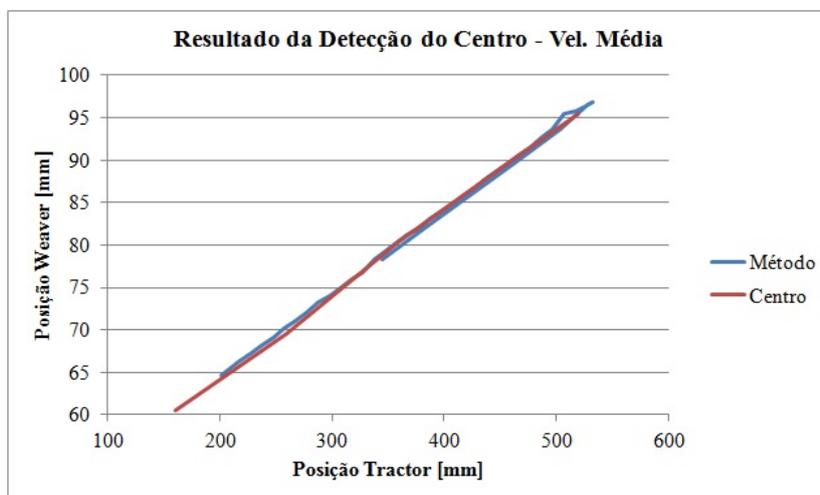


(c)

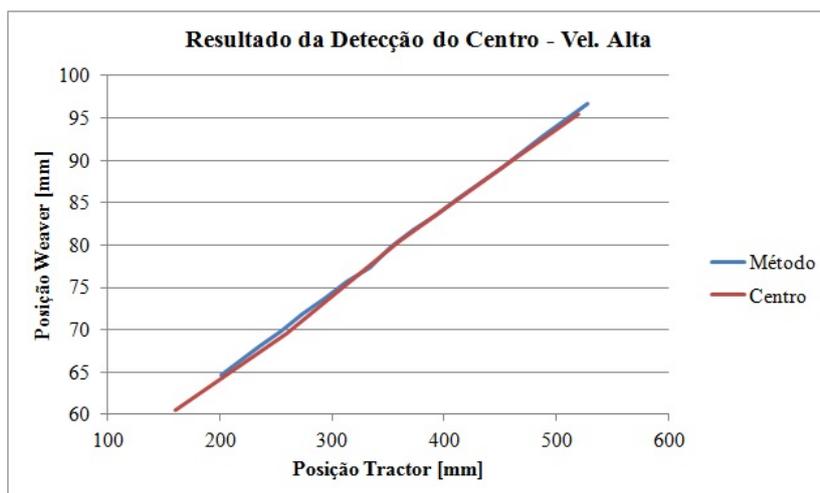
Figura 19: Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 3 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.



(a)

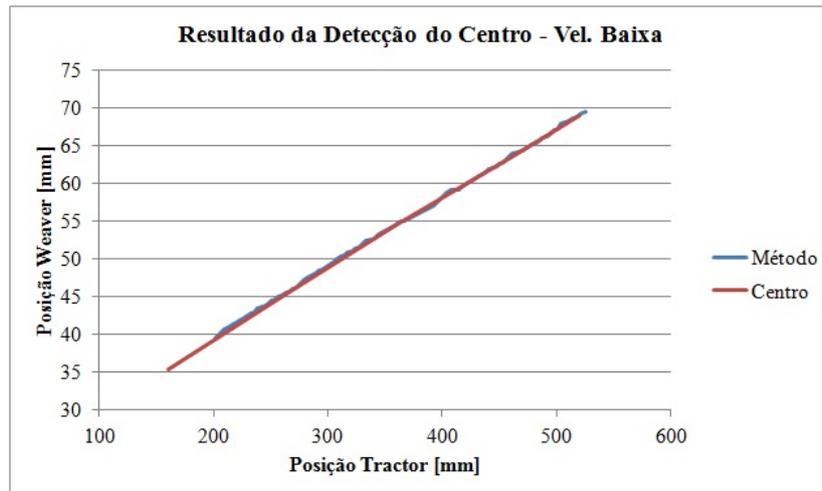


(b)

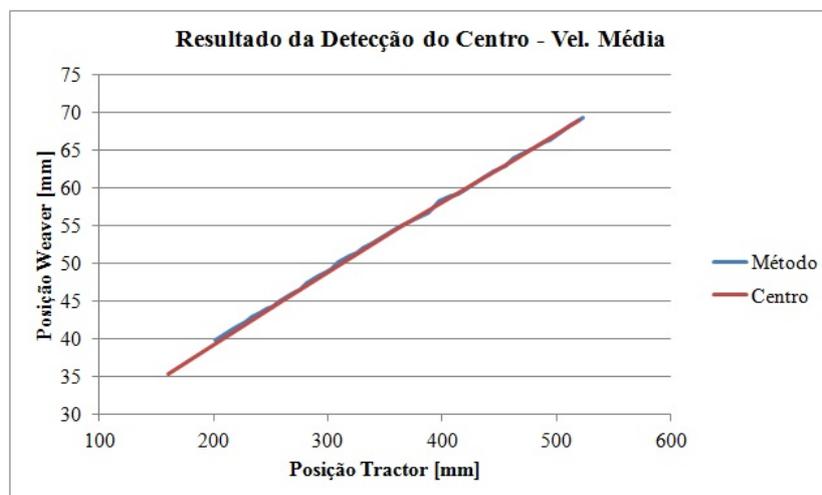


(c)

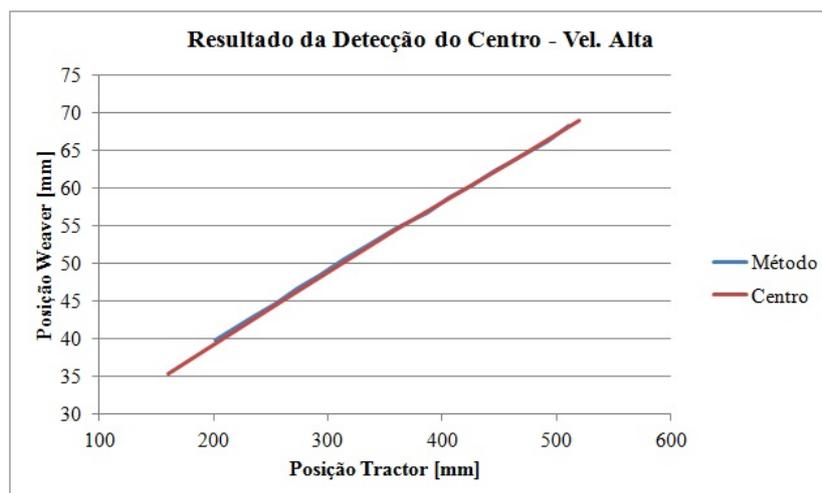
Figura 20: Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 1 avaliada. Junta desalinhada em relação ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.



(a)

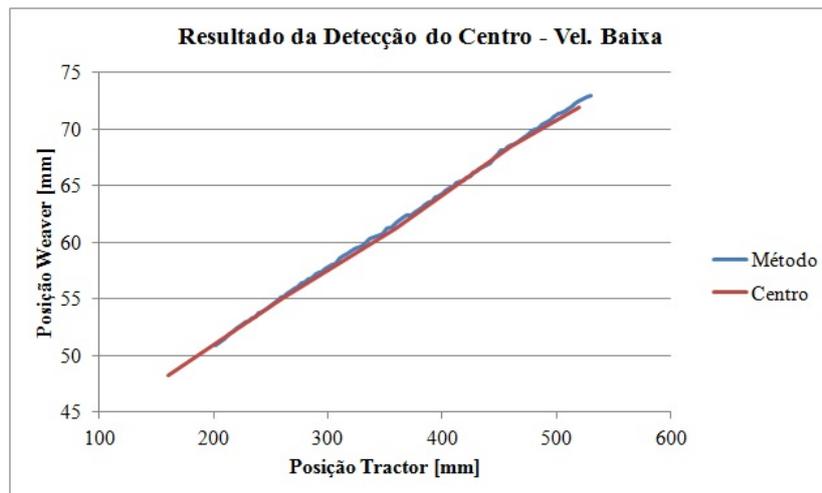


(b)

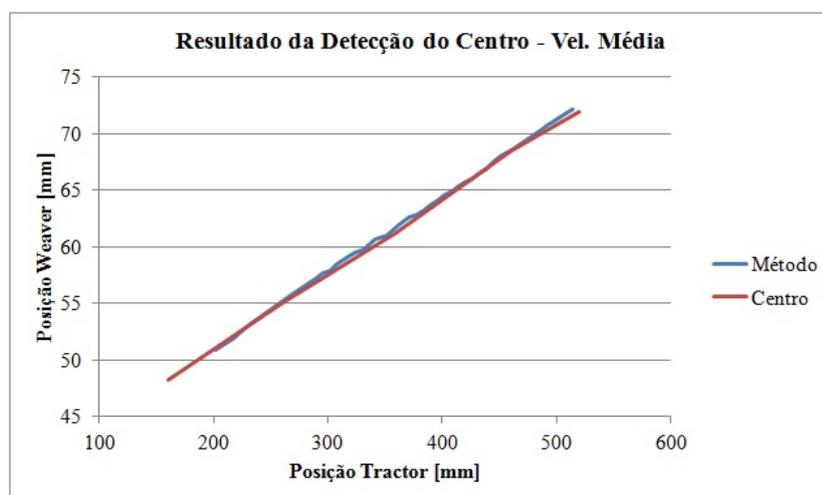


(c)

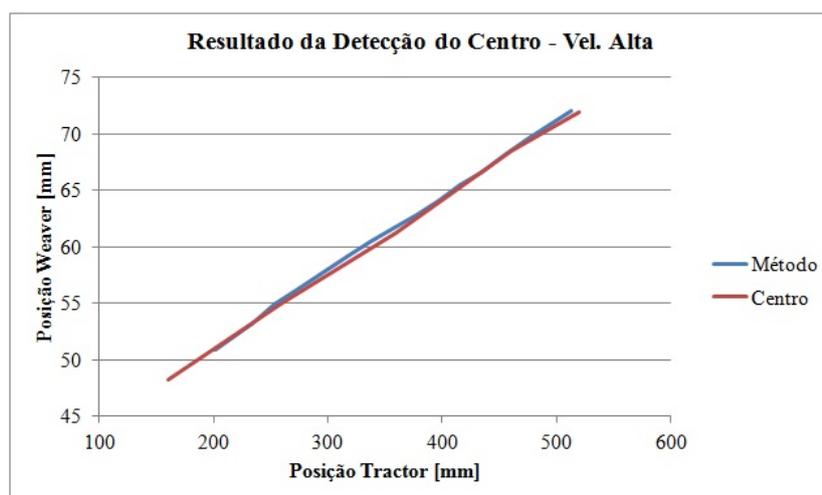
Figura 21: Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 2 avaliada. Junta desalinhada em relação ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.



(a)



(b)



(c)

Figura 22: Resultados para os testes de identificação do centro da junta na Condição 3 avaliada. Junta desalinhada em relação ao trilho do robô. Velocidade do robô: (a) 2,5 mm/s, (b) 5 mm/s e (c) 10 mm/s.

4.1.1.3 Identificação do centro entre os passes

Como método escolhido para identificação das linhas dos chanfros nas imagens é baseado em gradientes, seu uso foi possível para detectar o chanfro, mesmo depois de um passe de solda ser realizado. Sem maiores modificações no código, o método foi utilizado para corrigir o alinhamento do centro do movimento oscilatório do braço antes da realização de outro passe de soldagem.

Como pode ser visualizado na Figura 23, o método se mostrou viável para detectar as bordas mais externas do chanfro. Esta etapa se mostrou necessária pois pode-se observar que, após a soldagem de um passe, a junta tende a mudar. A variação térmica aplicada à chapa pelo processo, dependendo das restrições físicas impostas, pode mudar de forma significativa as posições de centro identificadas antes do início do processo.

Nesta etapa, o método de validação foi a resposta visual. Não foram levantados os erros em comparação com as medições físicas utilizando paquímetro.

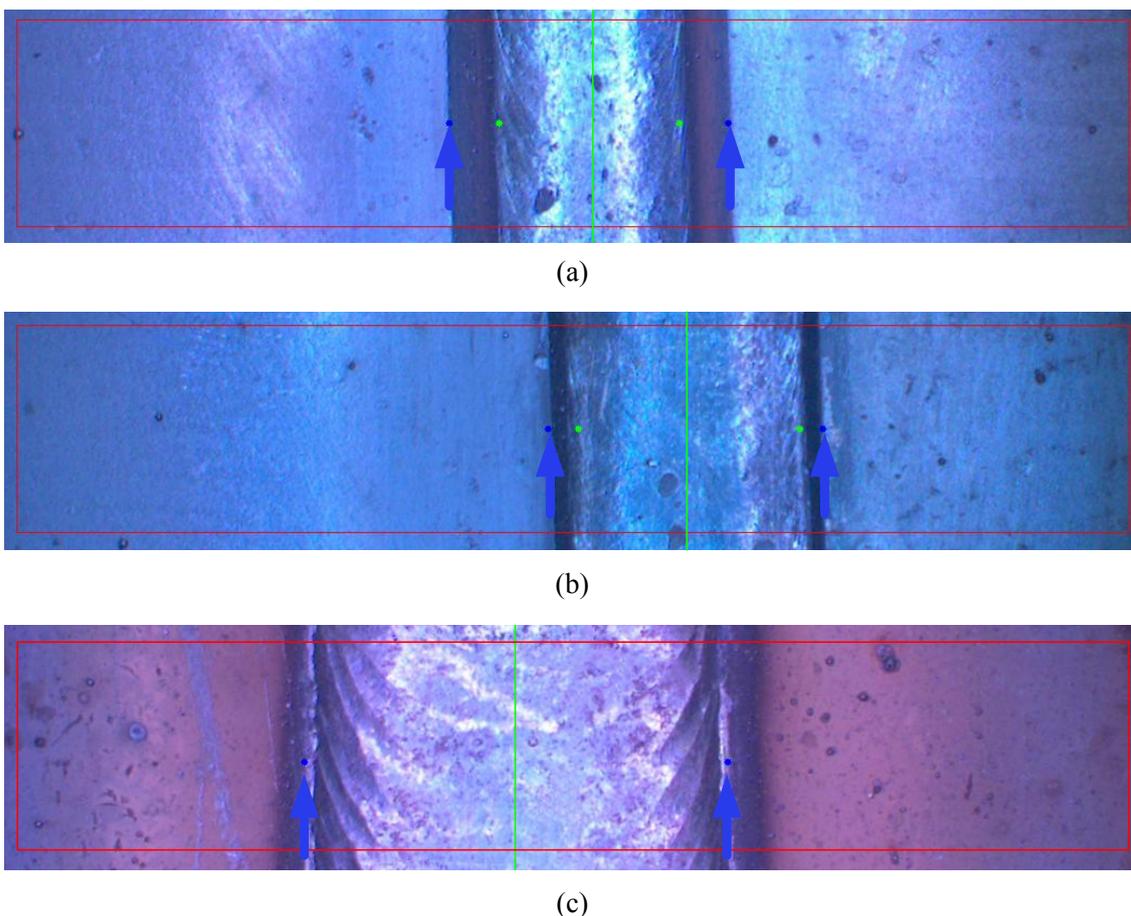


Figura 23: Identificação das bordas do chanfro para cálculo do alinhamento (são consideradas as bordas mais externas). Detecção após o primeiro (a), o segundo (b) e o terceiro (c) passe de solda. Após o terceiro passe, perde-se a referência do chanfro, que ainda pode ser visto em (a) e (b). O quarto passe é realizado para reforço, que garante o preenchimento total da junta. Destaca-se: as imagens são da mesma chapa entre diferentes passes, a fuligem gerada no processo se deposita na superfície, alterando a coloração da mesma.

4.2 Aferição *online* da junta

Todos os testes desta etapa seguiram os passos: primeiramente, imagens durante o processo de soldagem FCAW foram capturadas e posteriormente processadas em um PC. A Figura 12 ilustra a disposição da câmera e do robô para aquisição das imagens durante o teste de solda.

Testes iniciais mostraram a dificuldade de visualização do chanfro durante o processo devido aos fumos gerados. Soldagens FCAW são reconhecidas pela grande geração de fumos. Tal fato mostrou a necessidade de remoção física da fumaça gerada. Pesquisas de mercado mostraram soluções que empregam uma tocha de soldagem adaptada a um sugador de fumos, sem interferir no processo de soldagem. Na Figura 24 são mostradas imagens capturadas sem a remoção dos fumos pelo sugador e com o uso da tocha aspirada.

A Figura 25 mostra o funcionamento do algoritmo proposto para aferição do chanfro durante a soldagem. Nele, dois *frames* de entrada são combinados, selecionando-se o píxel de menor valor em cada posição entre as imagens; para aumentar o contraste da imagem, uma etapa de equalização de histograma é feita; e, posteriormente, a detecção das linhas. Como não fora feita a avaliação de desempenho dos métodos para detecção nesta etapa do sistema, neste exemplo foi utilizado o método LSD (do inglês: *Line Segment Detector*), apresentado em (von Gioi et al., 2012), para detecção das linhas do chanfro.

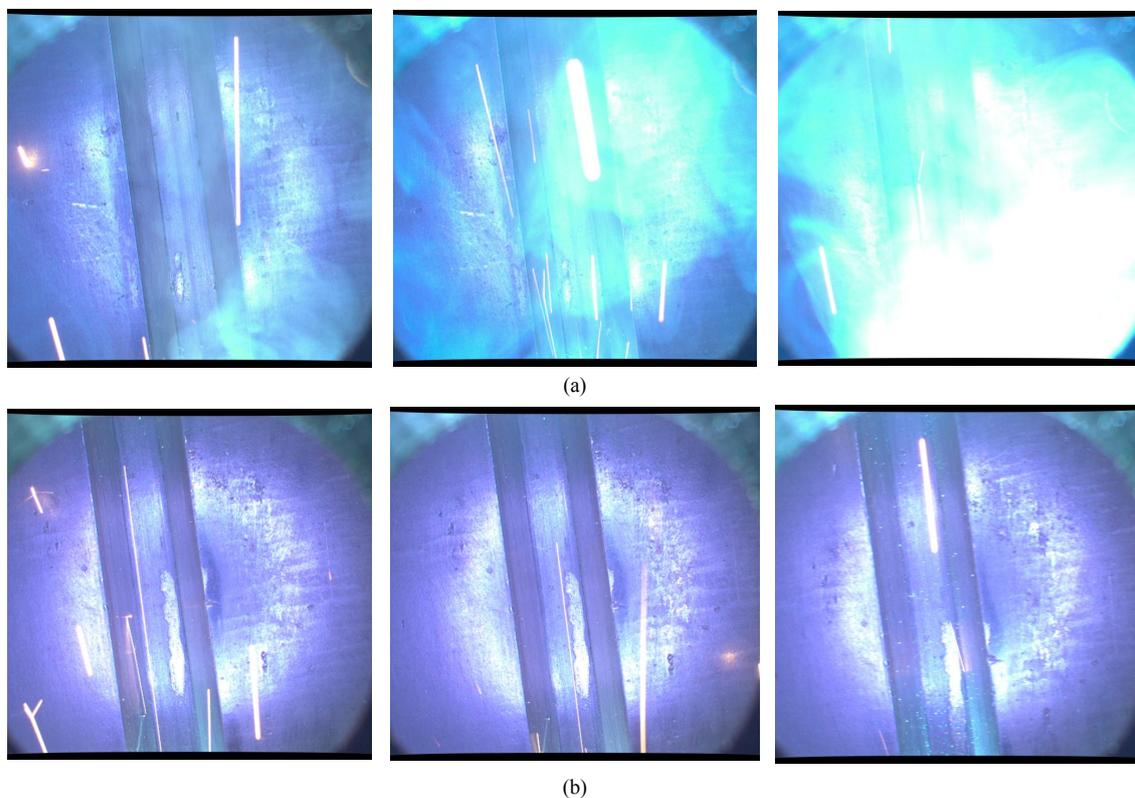


Figura 24: Em (a) aquisição de imagens de um processo de soldagem FCAW. Em (b) um processo de soldagem com uso de tocha aspirada para remoção dos fumos.

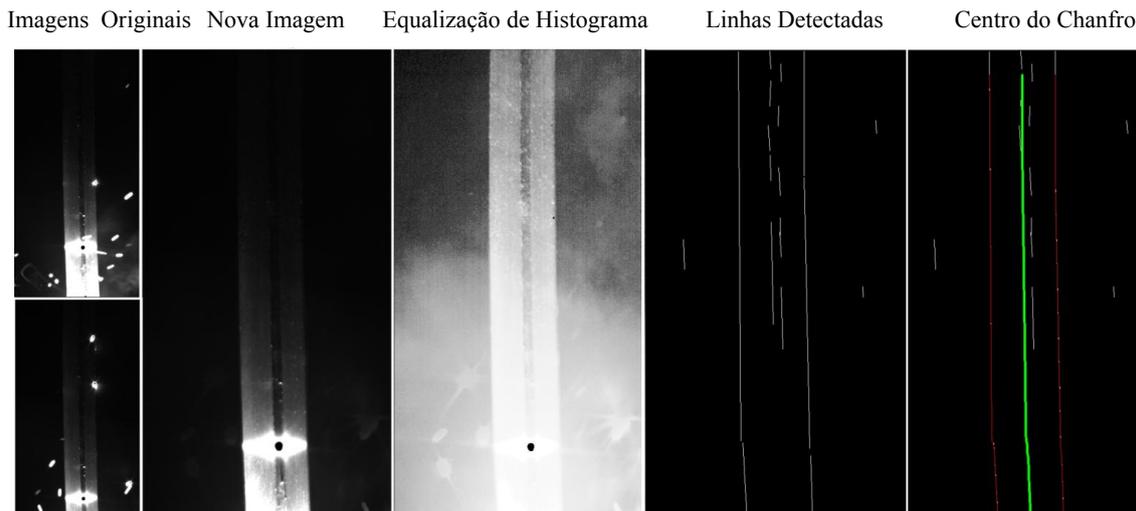


Figura 25: Passos do método proposto para remoção de faíscas das imagens.

Durante a soldagem, devido à radiação luminosa gerada pelo arco de solda, a câmera é configurada com taxas menores de exposição para aquisição das imagens, impedindo que haja saturação na mesma. Por isso, a superfície da chapa parece mais escura. Como a soldagem está acontecendo dentro do chanfro, a luz emitida pelo arco é refletida na lateral do chanfro por toda sua extensão, tornando-o mais claro que a superfície da chapa.

Como pode ser visualizado na Figura 26, está ilustrada uma sequência de *frames* obtidos pela câmera durante processo de soldagem. Pode-se notar que as faíscas são inerentes ao processo e estão presentes em todos os *frames*. Tais ruídos visuais podem afetar negativamente a extração das características do chanfro e o cálculo do centro da junta, justificando o uso do método. Visualiza-se também, que na mesma sequência de *frames* filtrados as faíscas são eliminadas por completo, restando ainda apenas vestígios da fumaça do processo.

Destaca-se aqui que se estiverem presentes faíscas na mesma região da imagem em *frames* subsequentes, não será possível a remoção das mesmas. Por último, estão ilustradas as linhas detectadas pelo método LSD para os *frames* filtrados. Ressalta-se ainda que os resultados aqui apresentados foram obtidos utilizando as imagens com a resolução original, ou seja, com toda a cena capturada, para possibilitar melhor visualização e entendimento. Posteriormente, regiões de interesse serão extraídas e os métodos aplicados apenas nestas regiões, diminuindo a quantidade de dados a serem processados.

Neste teste, não houve correção de alinhamentos durante o processo de solda. Apenas pretendeu-se verificar a viabilidade do método proposto, sem a intervenção na execução do processo. Os testes ainda levantaram os tempos de processamento necessários para cada etapa, veja Apêndice 7.1, tendo como objetivo a posterior migração para um sistema embarcado com necessidades de desempenho em tempo real do sistema.

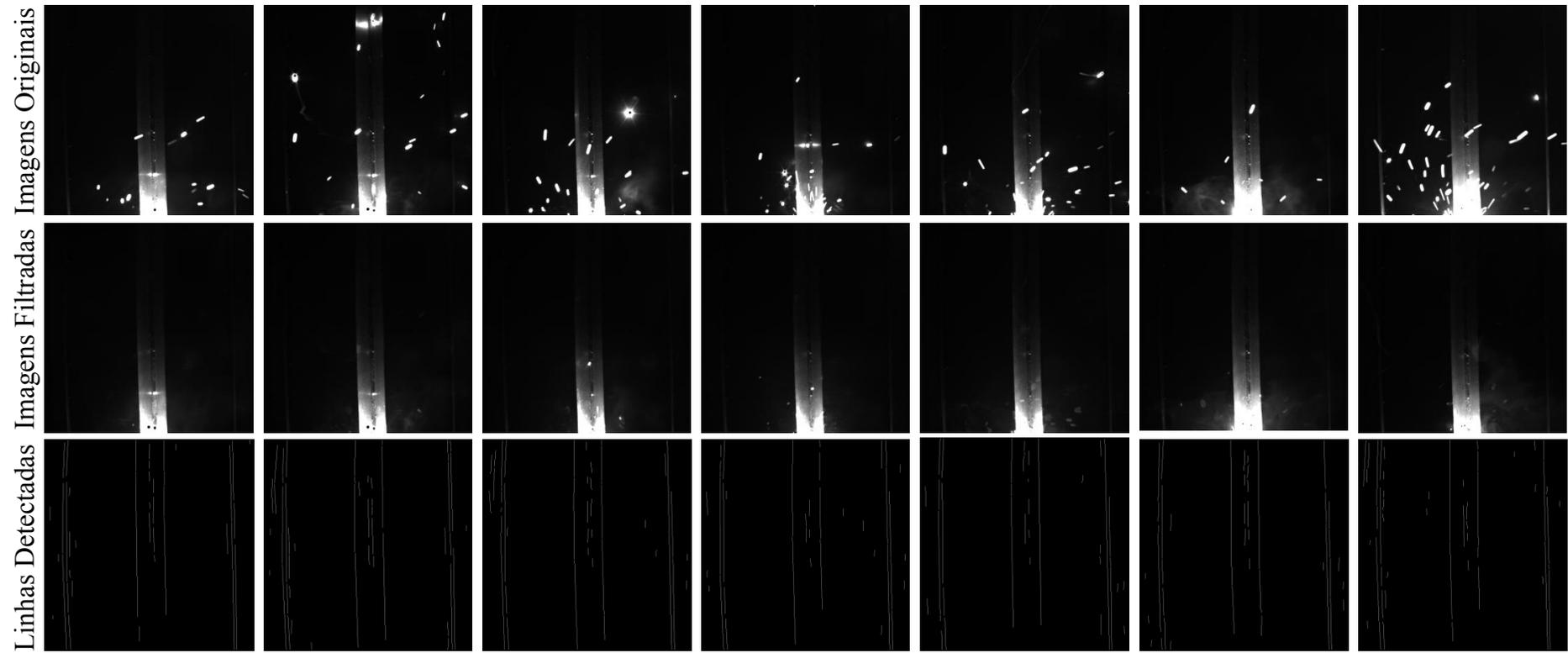


Figura 26: Comparação de sequência de *frames* originais e com as faíscas suprimidas pelo método proposto, durante processo de soldagem.

5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Destaca-se aqui que, o método de Sobel demonstrou os melhores resultados na avaliação em espaço controlado. Este método é baseado em gradientes e, em condições reais mostraram que, ruídos nas chapas como oxidação, riscos e acúmulo de outros materiais, como graxa, podem afetar os resultados de detecção.

A proposta baseia-se no princípio de que as bordas do chanfro destacariam-se na vista superior como linhas verticais. Por algumas vezes, pela incidência da luz passiva, pela refração na superfície metálica ou pelos ruídos externos (na chapa ou por luzes externas), tais linhas se tornem tão sutis nas imagens que o contraste causado pelos ruídos seja mais expressivo e levando o método ao erro.

Como pode ser visualizado na Figura 27, a iluminação passiva é refletida na superfície metálica polida. A região destacada pelo retângulo vermelho é a região de interesse processada na imagem para detecção das linhas do chanfro. Já os pontos verdes e azuis marcam as linhas detectadas.

Sendo esta uma limitação do sistema, cabe um cuidado especial na preparação das chapas que serão soldadas pelo sistema. Quanto melhor a condição visual das superfícies, menores serão os erros de aferições do sistema.

Medidas para aumentar a robustez do sistema foram tomadas como, por exemplo, apenas considerar medições válidas as que retornarem valores para chanfros suportados pelo sistema, com aberturas entre 3 e 9 mm e ângulos entre 45 e 55°. Dessa forma, na interferência de ruídos externos, dificilmente as medições extraídas da imagem retornarão valores nas faixas aceitáveis. Ainda que os pontos com ruídos visuais que acarretem medições erradas das características da junta, mas dentro da faixa de representação, não possam ser identificados durante a etapa de aferição *offline* do sistema, os mesmos podem ser filtrados durante a execução da soldagem, eliminando pontos que ultrapassem o desvio padrão encontrado nas medições.

Como pode se observar nos resultados dos testes em ambiente não controlado, a maior média de erro na medição da junta foi de 0,538 mm para a abertura superior do chanfro. Nesta condição, ruídos visuais presente na superfície da chapa levaram o sistema ao erro nas aferições da junta. Mesmo assim, 68,9% das medições, retornaram as medidas das

características corretas.

Com a melhor condição visual da chapa analisada, a maior média de erro caiu para 0,177 mm, com uma taxa de acerto de 96,3%. Destacando a influência do cuidado na preparação do chanfro para o sucesso da aplicação do sistema.

Na avaliação do cálculo do centro da junta, a maior média de erro encontrada entre o centro real e o calculado foi de 0,181 mm para juntas alinhadas e 0,293 mm para juntas não alinhadas. Ou seja, no pior caso sendo 3 mm a menor abertura de raiz, a maior média de erro de alinhamento foi de 9,76% da dimensão da abertura. Medições fora do desvio padrão serão filtradas durante a execução, diminuindo a influência de medições erradas causadas por ruídos visuais nas chapas metálicas.

Como os parâmetros escolhidos para a soldagem compreendem chanfros em condições discretizadas em 1 mm, observadas as condições mínimas de preparação das chapas para aplicação do sistema, as médias de erros mostraram a capacidade do método em atender com a precisão as medições necessárias. Dessa forma, o sistema se mostrou adequado para a sua finalidade de uso, tanto para medição, quanto para a execução e alinhamento.

Na última avaliação, o sistema realizou a aferição *offline* das características e mesmo com as médias de erros nas medições encontradas durante os testes e descritos na Seção 4.1.1, a soldagem foi realizada de forma autônoma. O processo foi acompanhado por especialistas em soldagem e apresentou resultado satisfatório, sendo que, somente fora necessária a intervenção humana para sinalização do início de cada passe de soldagem e a remoção da escória após o tecimento.

Por último, buscou-se avaliar se a estrutura interna do cordão de solda estava dentro dos parâmetros considerados aceitáveis. Neste tipo de análise é possível visualizar regiões com falta de fusão, trincas internas ou porosidade que comprometem a sanidade da junta e revelam problemas ocorridos durante a soldagem. Para isso, um corpo de prova soldado autonomamente pelo sistema foi selecionado para análise metalográfica de sua estrutura.

O corpo de prova foi cortado em três seções transversais ao cordão de solda, sendo uma seção próxima ao início do cordão, outra ao final e mais uma entre ambas. Após o corte, prepara-se a peça para análise, sendo necessário lixar a seção transversal sucessivas vezes, reduzindo a granulometria das lixas para obter uma superfície polida. Posteriormente, a peça é atacada quimicamente para que a estrutura metalográfica fique visível. Na Figura 28 pode-se visualizar o resultado da macrografia. Como pode ser percebido, não há nenhum defeito aparente de deposição de material na junta.

Pode-se constatar na análise da geometria do cordão de solda o excesso de convexidade da superfície. O especialista que acompanhou os testes destacou que esse fato se dá pela escolha dos parâmetros de soldagem e não está ligado diretamente à deposição do material pelo sistema, ou seja, pode ser necessário rever os parâmetros de soldagem aplicados para cada configuração de junta.

Outro fator que está diretamente associado a precisão do sistema é o elo rígido entre a

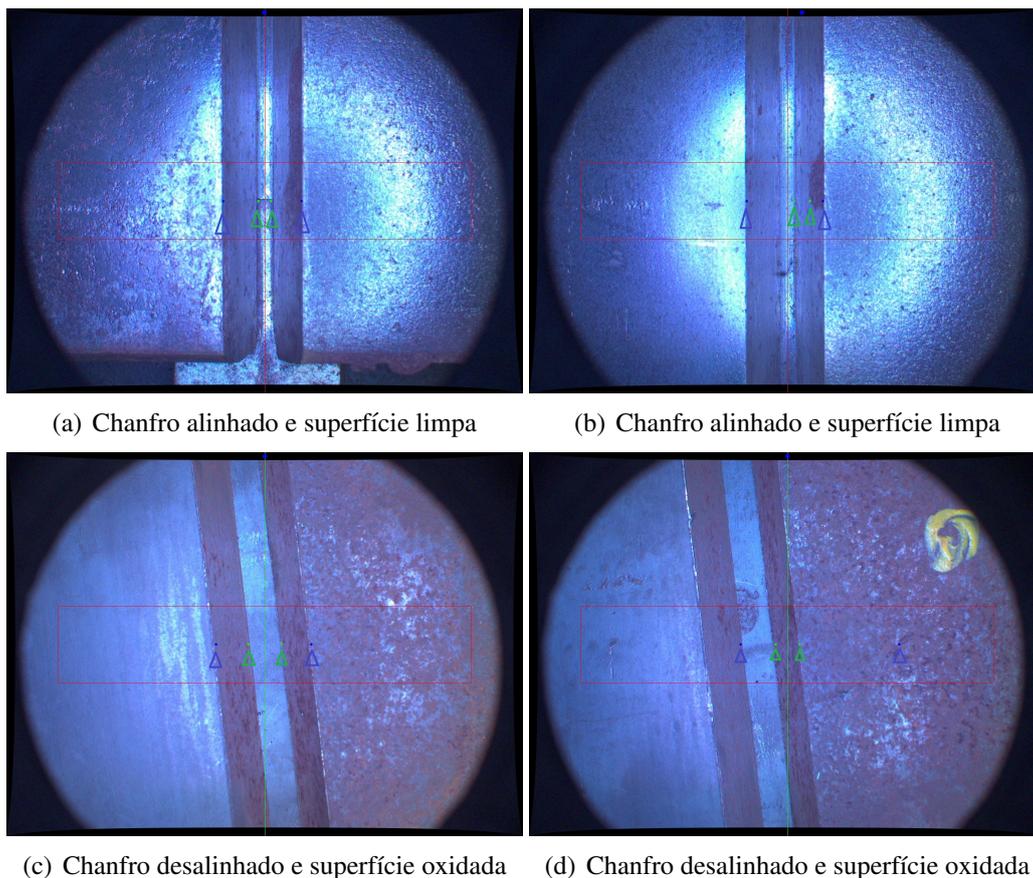


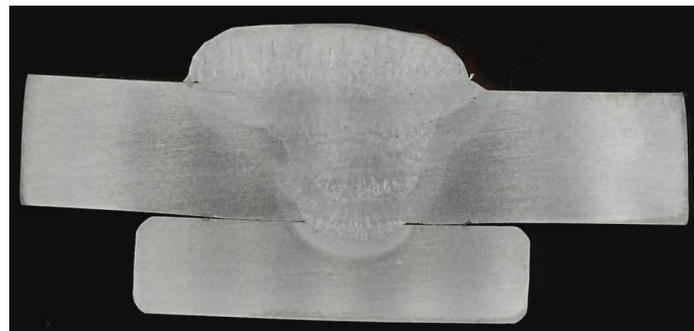
Figura 27: Pode-se observar em (a) que neste ponto a ferrugem dentro do chanfro não afeta a detecção. Já em (b), o método erra com a presença do ruído. Em (c), pode-se notar que a superfície da chapa está totalmente oxidada, mas ainda assim, o método conseguiu detectar as linhas corretamente. Já em (d) o método errou. Detalhe: a linha vertical mostra o centro da imagem e torna-se verde quando coincide com o centro da junta.

tocha e a câmera. Nos testes pode ser visualizado que, a má condição de um dos trilhos utilizados para fixação do robô induziu maiores erros de medição do sistema.

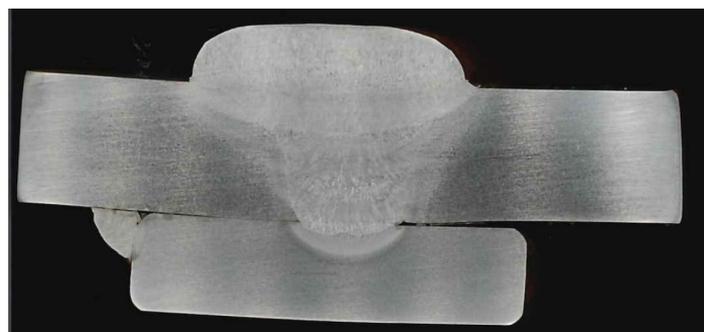
O acoplamento rígido produzido entre a tocha e a câmera considerou os esforços realizados durante o tecimento do cordão, sendo a tocha fixada junto ao braço, com a câmera a frente. Esse arranjo fez com que pequenas ondulações no trilho gerassem grandes variações na posição da câmera (braço de alavanca). A diminuição dos erros de medição do sistema passam pela utilização de um trilho mais uniforme e a readequação da fixação tocha-câmera.



(a) Seção transversal próxima ao início da chapa soldada, após a estabilização do cordão.



(b) Seção transversal do ponto central da chapa soldada.



(c) Seção transversal próxima ao final da chapa soldada, região do cordão estabilizada.

Figura 28: Pode-se observar em (a), (b) e (c), diferentes regiões do cordão de solda em uma análise macrográfica da estrutura metalográfica. Como pode-se visualizar, nenhum defeito de deposição de material aparente pode ser constatado.

6 CONCLUSÃO E PRÓXIMOS PASSOS

Os avanços tecnológicos permitiram a automatização e robotização de processos de soldagem, reduzindo a necessidade de intervenção humana e com ganhos de produtividade. Para automatização destes processos é necessária a identificação das características da junta e a disposição espacial das peças a serem soldadas.

O crescente uso de câmeras na medição de processos é justificada pela maior precisão e velocidade na aferição, quando comparados aos seres humanos. Lasers são muito empregados em soluções industriais, os quais salientam a geometria do chanfro e facilitam a extração das características. No caso do uso de somente imagens passivas para identificação, diferentes métodos de processamento de imagens podem ser empregados.

Para a combinação de métodos para identificação das linhas do chanfro nas imagens, na etapa *offline* do processo, foram escolhidos por meio de testes exaustivos, em ambiente controlado. Posteriormente, o sistema foi testado em ambiente real, suscetível a diferentes fatores externos que pudessem perturbar o sistema. Os resultados mostraram a capacidade de aferição das características da junta, permitindo a parametrização automática do sistema e a operação autônoma da soldagem.

A soldagem foi realizada pelo sistema com a mínima intervenção humana. O processo de soldagem foi considerado satisfatório por especialistas, sem ocorrência de defeitos no cordão soldado.

No caso da identificação *online*, os testes foram realizados com imagens capturadas durante a soldagem e processadas posteriormente em um PC. Não foi possível avaliar o funcionamento da etapa *online* no sistema embarcado. Atrasos no desenvolvimento do *software* e a integração entre os módulos impediram testes com o sistema acoplado ao robô em funcionamento durante a soldagem.

Nesta etapa é necessário o estabelecimento de uma alta taxa de comunicação entre os módulos, para que o sistema seja capaz de adquirir imagens e a condição espacial em que as imagens foram adquiridas (posições do *tractor* e do *weaver* do robô) com mínimo período de tempo entre ambos. Para isso, é necessária a otimização e paralelização do sistema, etapa ainda em desenvolvimento.

Posteriormente, testes serão executados em que a etapa *online* do sistema será testada,

sendo responsável pela correção do alinhamento do sistema durante a execução da soldagem propriamente dita. Ao final, o sistema deve ser capaz de atender todos os requisitos que o qualificam para realizar soldagens de forma autônoma: parametrizar o sistema com base na junta a ser soldada; identificar a trajetória da tocha; e, corrigir a trajetória durante a execução da soldagem, sendo capaz de corrigir interferências externas causadas pela dilatação ou movimentação da peça.

6.1 Publicações Relevantes

Três publicações foram derivadas deste trabalho, sendo respectivamente, um resumo expandido e duas versões completas aceitas para publicação em conferências da área:

Weis, A. A.; Soares, L. B.; Steffens, C. R.; Faria, M. F.; Drews-Jr., P. L. J.; Werhli, A. V.; Duarte Filho, N. L.; Botelho, S. S. C. “Automated seam tracking system based on passive monocular vision for automated linear robotic welding process.” Proceedings of the Symposium on Applied Computing (ACM), 2017. Qualis A1.

Weis, A. A.; Mor, J. L.; Soares, L. B.; Steffens, C. R.; Drews-Jr., P. L. J.; Faria, M. F.; Evald, P.; Azzolin, R. Z.; Duarte Filho, N. L.; Botelho, S. S. C. “Automated seam tracking system based on passive monocular vision for automated linear robotic welding process.” Industrial Informatics (INDIN), 2017 IEEE 15th International Conference. Qualis B1.

Soares, L. B.; Weis, A. A.; Rodrigues, R. N.; Drews-Jr., P. L. J.; Guterres, B.; Botelho, S. S. C.; Duarte Filho, N. L. “Seam Tracking and Welding Bead Geometry Analysis for Autonomous Welding Robot.” XIV Latin American Robotics Symposium and V Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR), 2017. Qualis B3.

REFERÊNCIAS

- Aurenhammer, F. (1991). Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 23(3):345–405.
- Bauchspiess, A. and Alfaro, S. A. (1997). Predictive sensor guided robotic manipulators in automated welding cells. In *Intelligent Robots and Systems, 1997. IROS'97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 2, pages 1144–1150. IEEE.
- Bauchspiess, A., Alfaro, S. C. A., and Dobrzanski, L. A. (2001). Predictive sensor guided robotic manipulators in automated welding cells. *Journal of Materials Processing Technology*, 109(1):13–19.
- Bauchspiess, A., Alfaro, S. C. A., Trier, W., and Drews, P. (1997). Sistema de visão computacional inteligente para robôs de soldagem. *3o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pages 64–69.
- Boekholt, R. (1996). *Welding Mechanisation and Automation in Shipbuilding Worldwide: Production Methods and Trends Based on Yard Capacity*. Elsevier.
- Borská, L., Fiala, Z., Smejkalova, J., and Tejral, J. (2002). Health risk of occupational exposure in welding processes i. genotoxic risk. *Acta medica (Hradec Kralove)/Universitas Carolina, Facultas Medica Hradec Kralove*, 46(1):25–29.
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (6):679–698.
- Chen, H., Lin, T., and Chen, S. (2011). Seam tracking and dynamic process control for high precision arc welding. In *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, pages 193–201. Springer.
- Chen, S. and Lv, N. (2014). Research evolution on intelligentized technologies for arc welding process. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(1):109–122.
- Chen, S.-B., Chen, X., Qiu, T., and Li, J. (2005). Acquisition of weld seam dimensional position information for arc welding robot based on vision computing. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 43(1):77–97.

- Dinham, M. and Fang, G. (2012). Weld seam detection using computer vision for robotic arc welding. In *Automation Science and Engineering (CASE), 2012 IEEE International Conference on*, pages 771–776. IEEE.
- Drews, P., Frassek, B., and Willms, K. (1986). Optical sensor systems for automated arc welding. *Robotics*, 2(1):31–43.
- Eyres, D. J. and Bruce, G. J. (2012). *Ship construction*. Butterworth-Heinemann.
- Fang, Z. and Xu, D. (2009). Image-based visual seam tracking system for fillet joint. In *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2009 IEEE International Conference on*, pages 1230–1235. IEEE.
- Fischler, M. A. and Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM*, 24(6):381–395.
- Ghosal, S. and Mehrotra, R. (1993). Orthogonal moment operators for subpixel edge detection. *Pattern recognition*, 26(2):295–306.
- Gu, W., Xiong, Z., and Wan, W. (2013). Autonomous seam acquisition and tracking system for multi-pass welding based on vision sensor. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(1-4):451–460.
- Hang, K. and Pritschow, G. (1999). Reducing distortions caused by the welding arc in a laser stripe sensor system for automated seam tracking. In *Industrial Electronics, 1999. ISIE'99. Proceedings of the IEEE International Symposium on*, volume 2, pages 919–924. IEEE.
- He, Y., Chen, Y., Xu, Y., Huang, Y., and Chen, S. (2016). Autonomous detection of weld seam profiles via a model of saliency-based visual attention for robotic arc welding. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 81(3-4):395–406.
- He, Y.-S., Chen, Y.-X., Wu, D., Huang, Y.-M., Chen, S.-B., and Han, Y. (2015). A detection framework for weld seam profiles based on visual saliency. In *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, pages 311–319. Springer.
- Hough, P. V. (1962). Method and means for recognizing complex patterns. US Patent 3,069,654.
- Kawahara, M. (1983). Tracking control system using image sensor for arc welding. *Automatica*, 19(4):357–363.
- Kim, J. S., Son, Y. T., Cho, H. S., and Koh, K. I. (1996). A robust visual seam tracking system for robotic arc welding. *Mechatronics*, 6(2):141–163.

- Korczynski, R. (2000). Occupational health concerns in the welding industry. *Applied occupational and environmental hygiene*, 15(12):936–945.
- Lee, D. (2014). Robots in the shipbuilding industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30(5):442–450.
- Li, N., Wang, Z., Xu, H., Sun, L., and Chen, G. (2016). Weld seam detection based on visual saliency for autonomous welding robots. In *Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), 2016 IEEE Workshop on*, pages 284–288. IEEE.
- Liu, J., Fan, Z., Christensen, K. H., Kristensen, J. K., et al. (2015). A real-time passive vision system for robotic arc welding. In *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pages 389–394. IEEE.
- Ma, H., Wei, S., Sheng, Z., Lin, T., and Chen, S. (2010). Robot welding seam tracking method based on passive vision for thin plate closed-gap butt welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(9-12):945–953.
- Marr, D. and Hildreth, E. (1980). Theory of edge detection. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 207(1167):187–217.
- Muhammad, J., Altun, H., and Abo-Serie, E. (2016). Welding seam profiling techniques based on active vision sensing for intelligent robotic welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–19.
- Nele, L., Sarno, E., and Keshari, A. (2013). An image acquisition system for real-time seam tracking. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9-12):2099–2110.
- Nieto, M., Cuevas, C., Salgado, L., and García, N. (2011). Line segment detection using weighted mean shift procedures on a 2d slice sampling strategy. *Pattern Analysis and Applications*, 14(2):149–163.
- Otsu, N. (1975). A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 11(285-296):23–27.
- Prewitt, J. M. (1970). Object enhancement and extraction. *Picture processing and Psychopictorics*, 10(1):15–19.
- Roberts, L. G. (1963). *Machine perception of three-dimensional soups*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Shen, H., Lin, T., Chen, S., and Li, L. (2010). Real-time seam tracking technology of welding robot with visual sensing. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 59(3-4):283–298.

- Shen, H.-y., Wu, J., Lin, T., and Chen, S.-b. (2008). Arc welding robot system with seam tracking and weld pool control based on passive vision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(7-8):669–678.
- Shi, F., Zhou, L., Lin, T., and Chen, S. (2007). Efficient weld seam detection for robotic welding from a single image. In *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, pages 289–294. Springer.
- Shirmohammadi, S. and Ferrero, A. (2014). Camera as the instrument: the rising trend of vision based measurement. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 17(3):41–47.
- Sobel, I. and Feldman, G. (1968). A 3x3 isotropic gradient operator for image processing. *a talk at the Stanford Artificial Project in*, pages 271–272.
- Systems, B.-O. (2017). Modular drive systems datasheet.
- Viviani, A. B., Dutra, J. C., Bonacorso, N. G., and da Silva, R. H. G. (2014). Desenvolvimento de sistema para medição do volume de chanfros para soldagem utilizando tecnologia de medição a laser. In *Anais do VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Uberlândia: ABCM-Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas*.
- von Gioi, R. G., Jakubowicz, J., Morel, J.-M., and Randall, G. (2012). Lsd: a line segment detector. *Image Processing On Line*, 2:35–55.
- Wei, S., Kong, M., Lin, T., and Chen, S. (2011). Autonomous seam acquisition and tracking for robotic welding based on passive vision. In *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, pages 41–48. Springer.
- Xiao, Z. (2011a). Research on a trilines laser vision sensor for seam tracking in welding. In *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, pages 139–144. Springer.
- Xiao, Z. (2011b). Research on a trilines laser vision sensor for seam tracking in welding. In *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, pages 139–144. Springer.
- Xie, Y., Zhang, L., Wu, C., and Yin, J. (2008). A method of robotic visual tracking for a new automatic laser welding line. In *Computer Science and Software Engineering, 2008 International Conference on*, volume 2, pages 891–894. IEEE.
- Xu, P., Xu, G., Tang, X., and Yao, S. (2008). A visual seam tracking system for robotic arc welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(1-2):70–75.
- Xu, Y., Fang, G., Chen, S., Zou, J. J., and Ye, Z. (2014). Real-time image processing for vision-based weld seam tracking in robotic gma. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9-12):1413–1425.

Xu, Y., Lv, N., Zhong, J., Chen, H., and Chen, S. (2012a). Research on the real-time tracking information of three-dimension welding seam in robotic gtaW process based on composite sensor technology. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 68(2):89–103.

Xu, Y., Yu, H., Zhong, J., Lin, T., and Chen, S. (2012b). Real-time image capturing and processing of seam and pool during robotic welding process. *Industrial Robot: An International Journal*, 39(5):513–523.

Xu, Y., Yu, H., Zhong, J., Lin, T., and Chen, S. (2012c). Real-time image capturing and processing of seam and pool during robotic welding process. *Industrial Robot: An International Journal*, 39(5):513–523.

Xu, Y., Yu, H., Zhong, J., Lin, T., and Chen, S. (2012d). Real-time seam tracking control technology during welding robot gtaW process based on passive vision sensor. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(8):1654–1662.

Ye, Z., Fang, G., Chen, S., and Zou, J. J. (2013). Passive vision based seam tracking system for pulse-mag welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9-12):1987–1996.

Zhang, G., Zhu, Z., Si, G., and Wei, X. (2014). Welding line detection based on image for automatic welding machine. In *Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2014 IEEE 7th Joint International*, pages 102–106. IEEE.

Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22(11):1330–1334.

Zhou, L., Lin, T., and Chen, S.-B. (2006). Autonomous acquisition of seam coordinates for arc welding robot based on visual servoing. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 47(3):239–255.

Zou, Y., Li, Y., Jiang, L., and Xue, L. (2011). Weld pool image processing algorithm for seam tracking of welding robot. In *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on*, pages 161–165. IEEE.

7 APÊNDICE

7.1 Resultados da aferição *offline* da junta

Nesta Seção, apresentam-se os resultados das 100 melhores combinações de métodos para detecção das linhas do chanfro com a câmera posicionada a 90°. Os resultados estão em ordem crescente do erro médio entre as linhas detectadas e anotadas manualmente. Pode-se ainda observar as combinações aplicadas; o Erro Médio (px) utilizado para escolha da melhor opção; o Desvio Padrão do Erro Médio nas diferente imagens processadas; o Erro Médio (%) proporcional ao tamanho da imagem; e o tempo total de processamento de cada combinação.

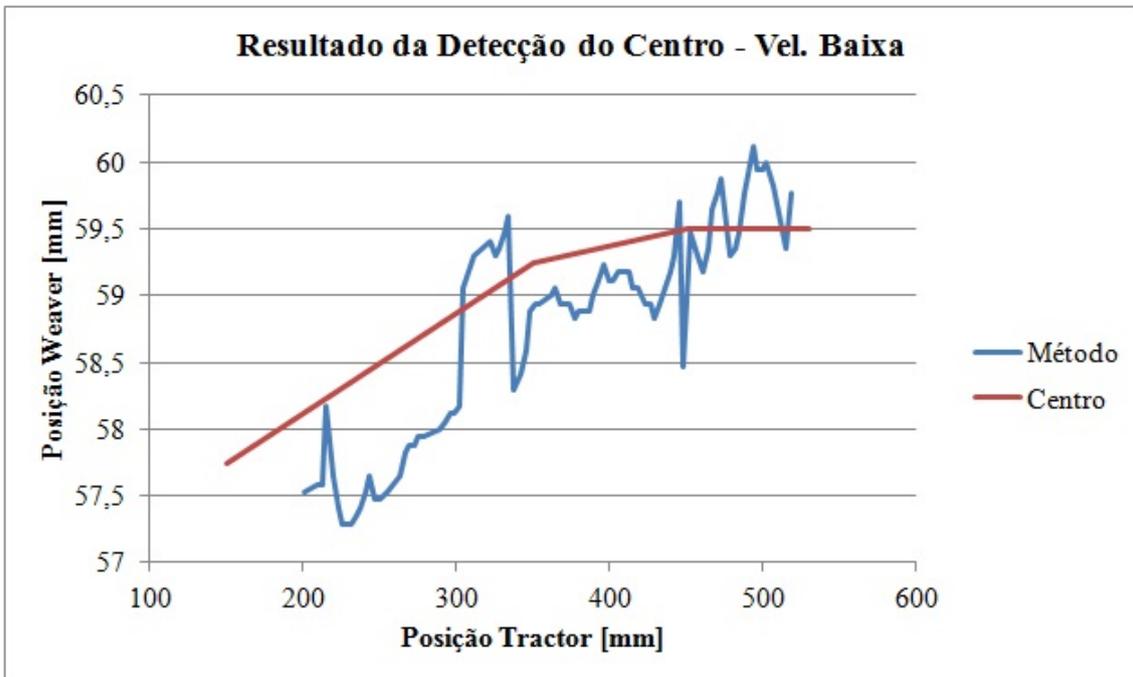
Resolução	Iluminação	Rem. Ruído	Realce	Limiarização	Detector	Prop.Acerto	Erro Médio(px)	σ Erro (px)	Erro Médio(%)	Tempo (s)
[1280 x 960]	Branca	Bilateral[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.022	3.347	4.841	0.262	0.235
[1280 x 960]	Branca	Bilateral[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.022	3.352	4.842	0.262	0.235
[1280 x 960]	Branca	Media[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.022	3.568	5.225	0.279	0.003
[1280 x 960]	Branca	Media[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.021	3.568	5.221	0.279	0.003
[1280 x 960]	Branca	Bilateral[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.023	3.695	5.769	0.289	0.236
[1280 x 960]	Branca	Bilateral[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.015	3.763	5.627	0.294	0.303
[1280 x 960]	Branca	Media[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.013	4.195	6.210	0.328	0.150
[1280 x 960]	Branca	Media[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.022	4.606	7.086	0.360	0.005
[1280 x 960]	Branca	Media[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.015	4.665	6.769	0.364	0.063
[1280 x 960]	Branca	Gaussiana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.023	4.716	11.653	0.368	0.008
[1280 x 960]	Branca	Não aplicada	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.016	5.758	12.375	0.450	0.191
[1280 x 960]	Branca	Gaussiana[5x5]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.019	6.055	12.916	0.473	0.215
[1280 x 960]	Branca	Bilateral[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	Sobel	0.023	6.220	13.643	0.486	0.244
[1280 x 960]	Vermelha	Gaussiana[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.021	6.297	27.797	0.492	0.006
[1280 x 960]	Vermelha	Gaussiana[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.023	6.305	27.783	0.493	0.006
[1280 x 960]	Vermelha	Bilateral[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.020	6.335	27.812	0.495	0.235
[1280 x 960]	Vermelha	Bilateral[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.022	6.347	27.810	0.496	0.235
[1280 x 960]	Vermelha	Mediana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.022	6.364	28.033	0.497	0.033
[1280 x 960]	Azul	Mediana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.022	6.387	27.821	0.499	0.033
[1280 x 960]	Azul	Mediana[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.022	6.417	27.620	0.501	0.031
[1280 x 960]	Azul	Mediana[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.018	6.417	27.620	0.501	0.031
[1280 x 960]	Vermelha	Não aplicada	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.014	6.445	27.864	0.504	0.148
[1280 x 960]	Azul	Bilateral[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.022	6.542	27.604	0.511	0.235
[1280 x 960]	Vermelha	Mediana[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	Sobel	0.023	6.547	28.224	0.511	0.041
[1280 x 960]	Azul	Bilateral[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.019	6.550	27.636	0.512	0.235
[1280 x 960]	Azul	Gaussiana[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.020	6.633	27.702	0.518	0.006
[1280 x 960]	Azul	Gaussiana[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.022	6.646	27.723	0.519	0.006
[1280 x 960]	Azul	Media[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.022	6.683	27.478	0.522	0.003
[1280 x 960]	Vermelha	Media[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.022	6.686	28.314	0.522	0.003
[1280 x 960]	Vermelha	Media[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.020	6.691	28.319	0.523	0.003
[1280 x 960]	Azul	Media[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.019	6.692	27.494	0.523	0.003
[1280 x 960]	Azul	Media[5x5]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.013	6.700	27.886	0.523	0.112
[1280 x 960]	Azul	Gaussiana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.012	6.775	27.854	0.529	0.098

[1280 x 960]	Azul	Media[5x5]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.023	6.800	28.268	0.531	0.004
[1280 x 960]	Azul	Gaussiana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.023	6.800	28.253	0.531	0.008
[1280 x 960]	Branca	Media[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	Sobel	0.023	6.814	14.484	0.532	0.012
[1280 x 960]	Branca	Não aplicada	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.014	7.047	18.417	0.551	0.148
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Mediana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.025	7.082	30.811	0.553	0.033
[1280 x 960]	Azul	Bilateral[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.022	7.083	28.287	0.553	0.236
[1280 x 960]	Vermelha	Media[5x5]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.023	7.085	29.008	0.553	0.004
[1280 x 960]	Vermelha	Gaussiana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.023	7.097	29.050	0.554	0.008
[1280 x 960]	Azul	Media[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.013	7.121	28.305	0.556	0.150
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Mediana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.015	7.142	31.116	0.558	0.104
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Gaussiana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.016	7.151	30.883	0.559	0.098
[1280 x 960]	Branca	Media[5x5]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.023	7.153	17.488	0.559	0.004
[1280 x 960]	Azul	Bilateral[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.011	7.183	28.277	0.561	0.303
[1280 x 960]	Azul	Não aplicada	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.013	7.200	28.992	0.562	0.148
[1280 x 960]	Vermelha	Não aplicada	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.017	7.220	31.469	0.564	0.191
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Media[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.019	7.237	30.896	0.565	0.003
[1280 x 960]	Vermelha	Gaussiana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.014	7.254	29.295	0.567	0.098
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Media[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.025	7.289	30.886	0.569	0.003
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Bilateral[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.025	7.306	31.172	0.571	0.236
[1280 x 960]	Vermelha	Bilateral[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.015	7.390	29.077	0.577	0.303
[1280 x 960]	Vermelha	Bilateral[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.023	7.411	28.764	0.579	0.236
[1280 x 960]	Vermelha	Media[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.014	7.445	29.089	0.582	0.150
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Bilateral[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.014	7.461	31.482	0.583	0.303
[1280 x 960]	Vermelha	Mediana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.014	7.572	33.958	0.592	0.104
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Bilateral[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.020	7.634	33.990	0.596	0.235
[1280 x 960]	Azul	Media[5x5]	Normalização Global	Não aplicada	LSD	0.036	7.642	32.155	0.597	0.040
[1280 x 960]	Branca	Mediana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.022	7.665	18.828	0.599	0.033
[1280 x 960]	Vermelha	Media[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.022	7.746	29.090	0.605	0.005
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Media[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.014	7.763	31.098	0.606	0.150
[1280 x 960]	Vermelha	Media[5x5]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.014	7.805	34.220	0.610	0.112
[1280 x 960]	Vermelha	Bilateral[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.015	7.831	32.157	0.612	0.401
[1280 x 960]	Vermelha	Mediana[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.019	7.831	33.528	0.612	0.031
[1280 x 960]	Vermelha	Mediana[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.022	7.839	33.533	0.612	0.031
[1280 x 960]	Vermelha	Media[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	Sobel	0.023	7.886	29.342	0.616	0.012

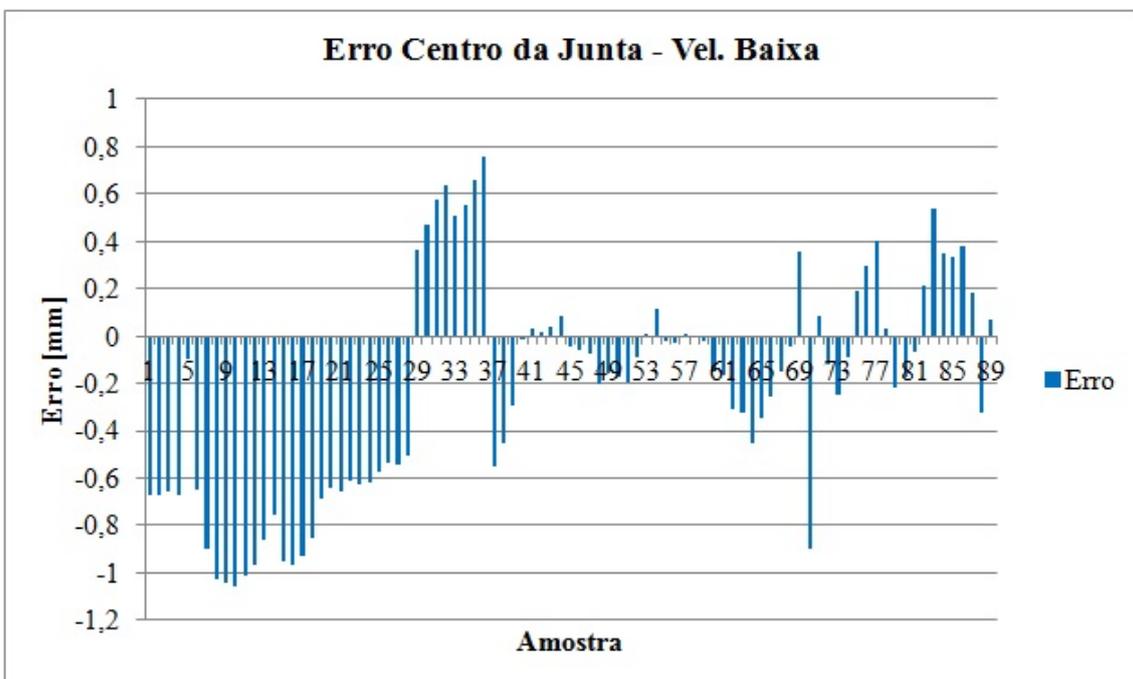
[1280 x 960]	Vermelha	Media[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.015	7.890	29.239	0.616	0.063
[1280 x 960]	Azul	Media[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.022	7.921	28.831	0.619	0.005
[1280 x 960]	Vermelha	Bilateral[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	Sobel	0.023	7.996	32.185	0.625	0.244
[1280 x 960]	Azul	Media[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.010	8.046	28.788	0.629	0.063
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Media[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.025	8.091	31.715	0.632	0.005
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Bilateral[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSWMS	0.012	8.125	32.849	0.635	0.456
[1280 x 960]	Branca	Gaussiana[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.022	8.136	22.687	0.636	0.006
[1280 x 960]	Branca	Gaussiana[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.022	8.144	22.740	0.636	0.006
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Bilateral[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Sobel	0.025	8.147	35.259	0.636	0.235
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Media[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.012	8.159	32.053	0.637	0.063
[1280 x 960]	Vermelha	Gaussiana[5x5]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.018	8.165	34.173	0.638	0.215
[1280 x 960]	Azul	Media[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	feans Intensid	0.014	8.187	28.848	0.640	0.207
[1280 x 960]	Azul	Media[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	Sobel	0.023	8.196	31.844	0.640	0.012
[1280 x 960]	Azul	Não aplicada	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.016	8.258	31.794	0.645	0.191
[1280 x 960]	Azul	Bilateral[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.014	8.279	33.342	0.647	0.401
[1280 x 960]	Branca	Bilateral[5x5]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSD	0.018	8.326	20.951	0.650	0.254
[1280 x 960]	Vermelha	Bilateral[5x5]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.014	8.343	35.813	0.652	0.178
[1280 x 960]	Azul	Bilateral[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSWMS	0.010	8.363	30.517	0.653	0.456
[1280 x 960]	Azul	Gaussiana[5x5]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.013	8.383	37.672	0.655	0.135
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Gaussiana[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	Sobel	0.025	8.388	37.337	0.655	0.008
[1280 x 960]	Azul	Media[5x5]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSWMS	0.008	8.562	31.946	0.669	0.254
[1280 x 960]	Branca	Gaussiana[5x5]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.015	8.644	20.838	0.675	0.135
[1280 x 960]	Azul	Media[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSWMS	0.013	8.667	30.717	0.677	0.206
[1280 x 960]	Azul	Gaussiana[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	LSD	0.038	8.787	34.443	0.687	0.042
[1280 x 960]	Vermelha	Mediana[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	Marr-Hildreth	0.022	8.797	34.382	0.687	0.032
[1280 x 960]	Vermelha	Mediana[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Marr-Hildreth	0.019	8.797	34.369	0.687	0.032
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Mediana[11x11]	Não aplicado	Não aplicada	Sobel	0.018	8.802	36.636	0.688	0.031
[1280 x 960]	Vermelha	Gaussiana[5x5]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.014	8.818	37.266	0.689	0.135
[1280 x 960]	Branca	Bilateral[5x5]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSD	0.014	8.992	29.615	0.702	0.178
[1280 x 960]	Azul	Media[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	LSWMS	0.015	9.013	35.739	0.704	0.245
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Media[11x11]	Eq. Histograma	Não aplicada	LSWMS	0.014	9.164	35.859	0.716	0.206
[1280 x 960]	Azul	Media[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	Means Int+Pc	0.017	9.296	34.455	0.726	0.803
[1280 x 960]	Branca+Filtro	Media[11x11]	Eq. Hist. Local	Não aplicada	feans Intensid	0.017	9.302	38.297	0.727	0.207
[1280 x 960]	Azul	Bilateral[11x11]	Normalização Global	Não aplicada	LSD	0.044	9.313	35.479	0.728	0.268

7.2 Resultados identificação do centro da junta

Nesta Seção, apresentam-se os resultados dos testes práticos para identificação do centro da junta. Pode-se comparar o resultado das medições do centro da junta e o centro real e ainda destaca-se o erro associado em cada medição.

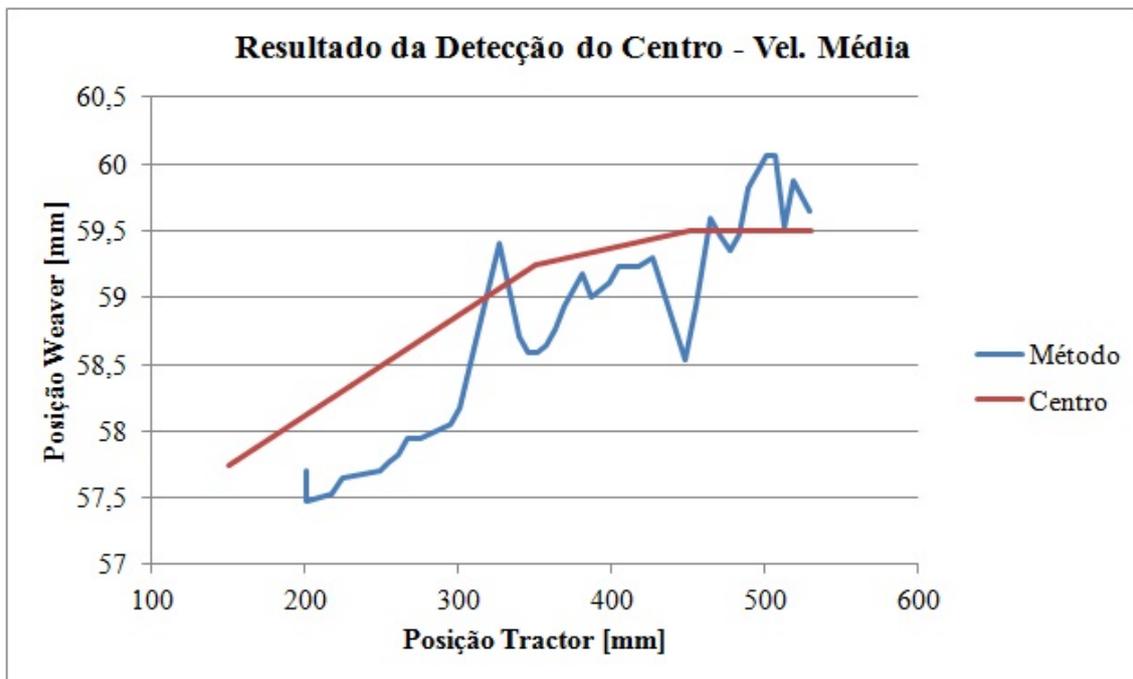


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

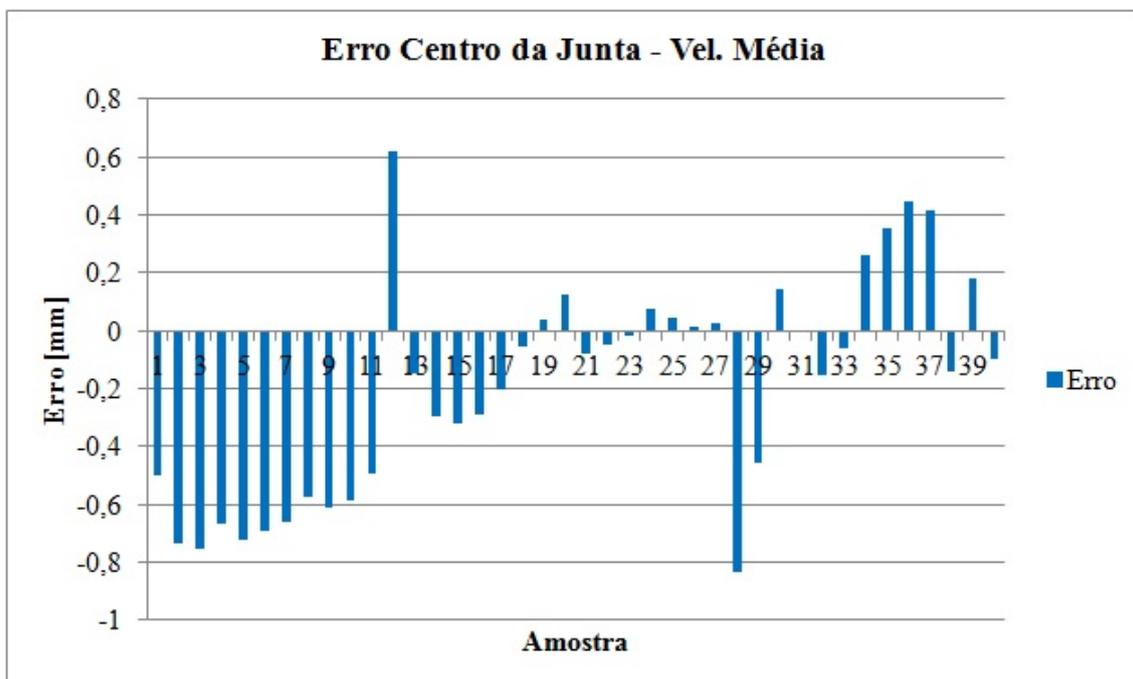


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 29: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.

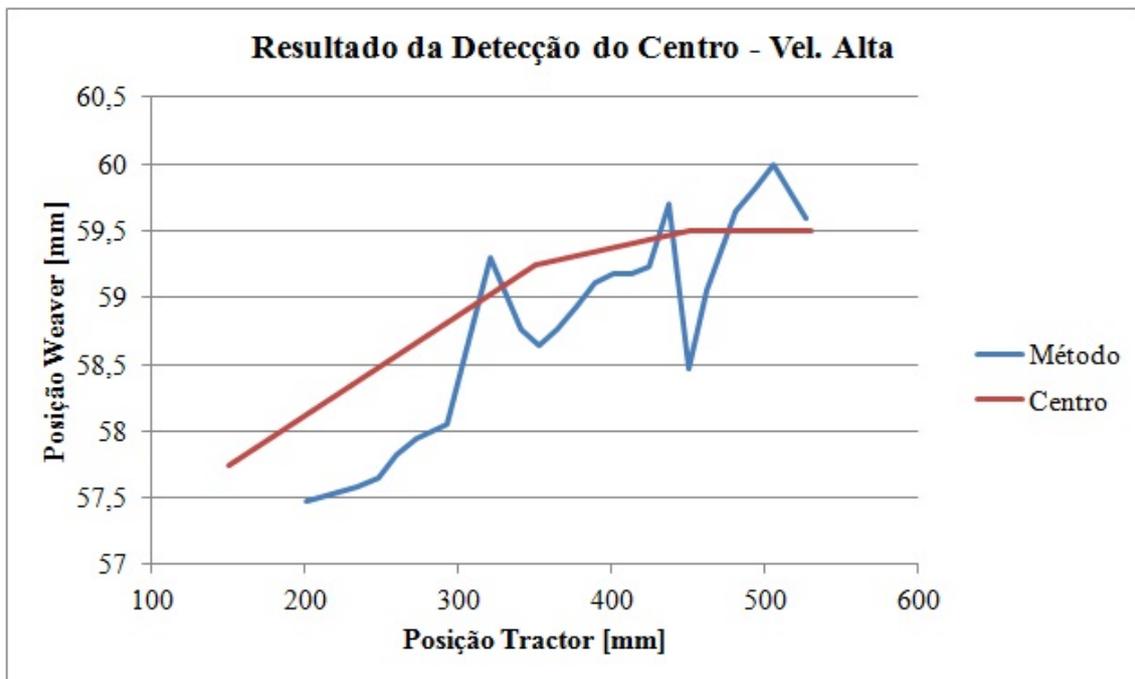


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

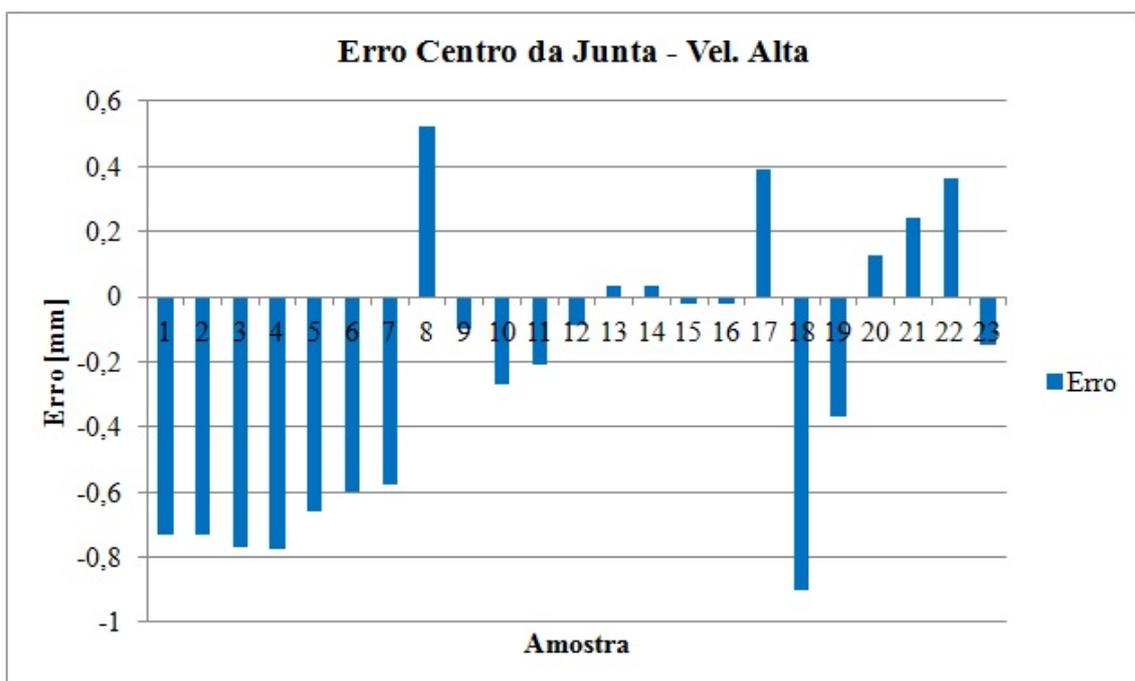


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 30: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.

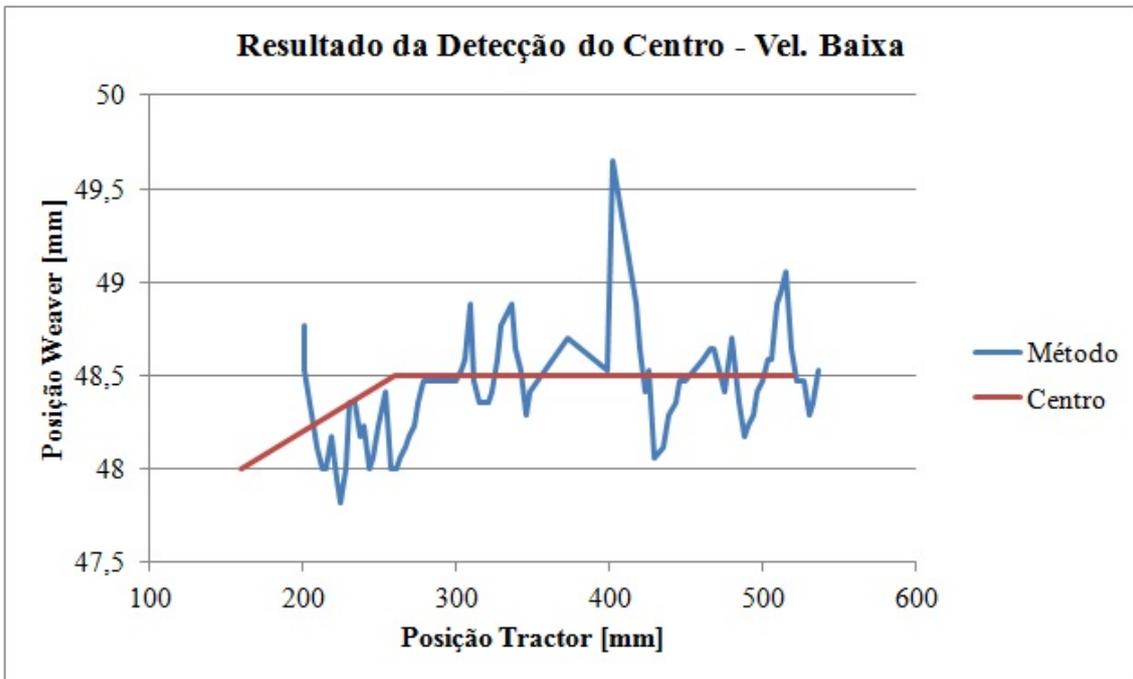


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

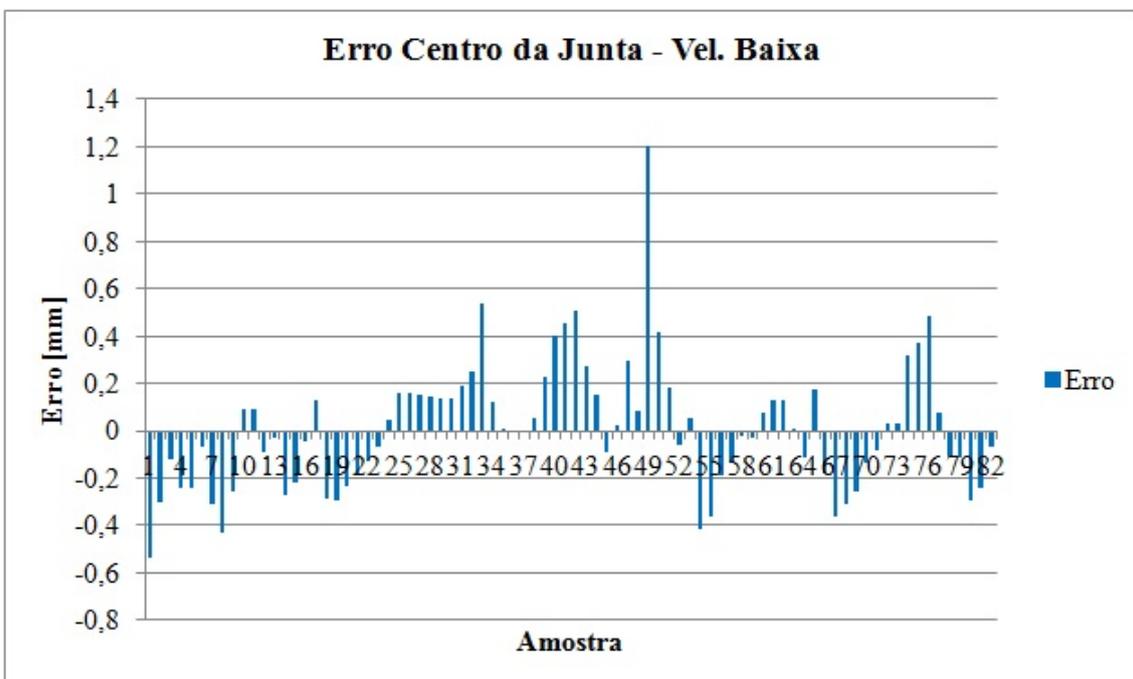


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 31: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.

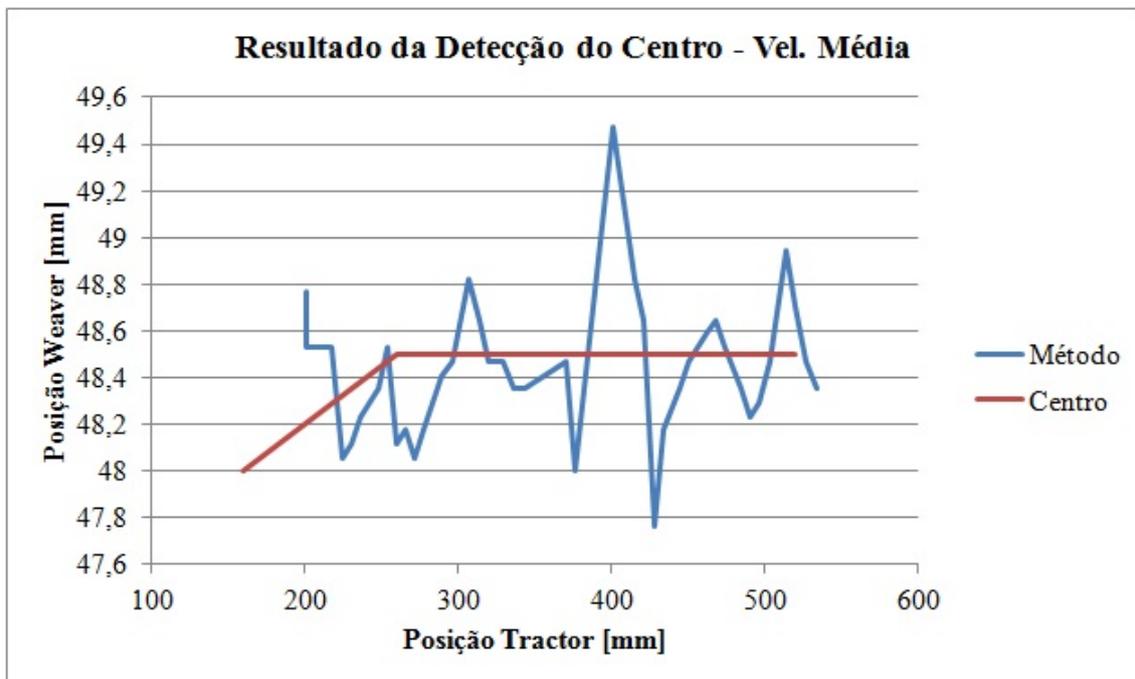


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

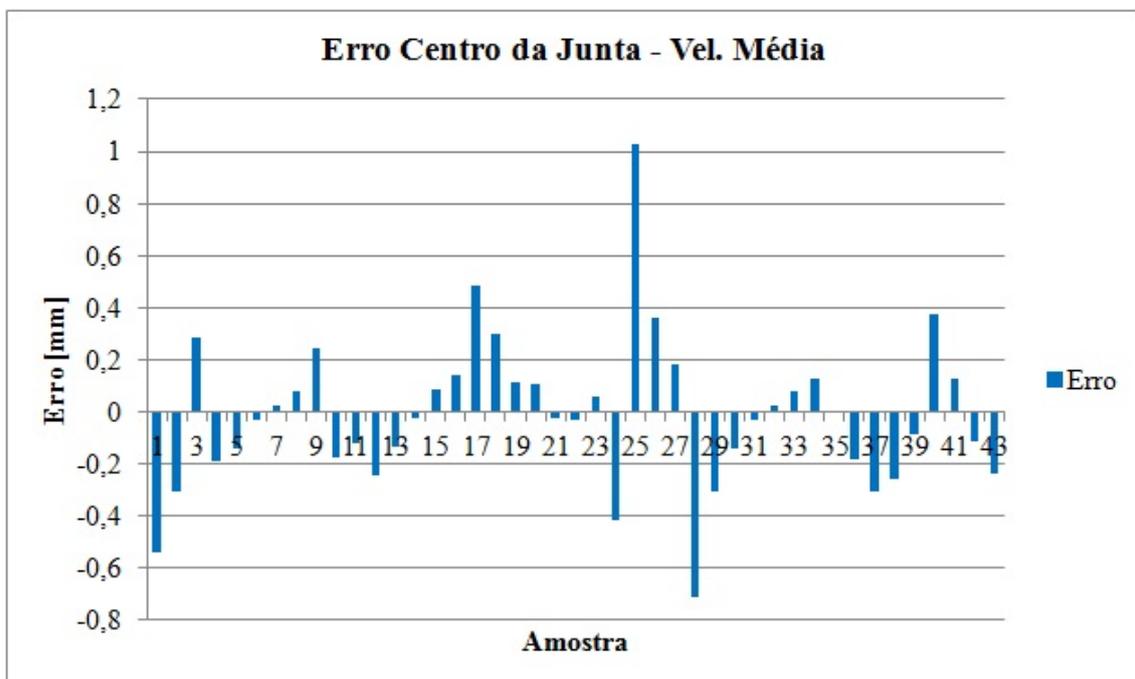


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 32: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.

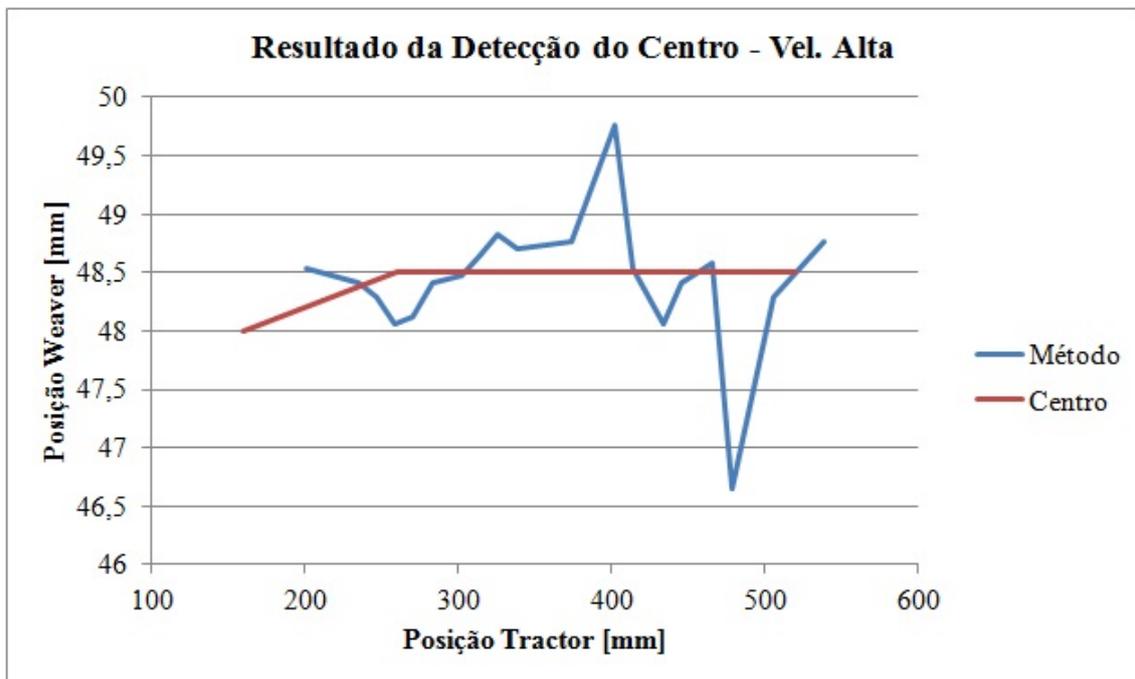


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

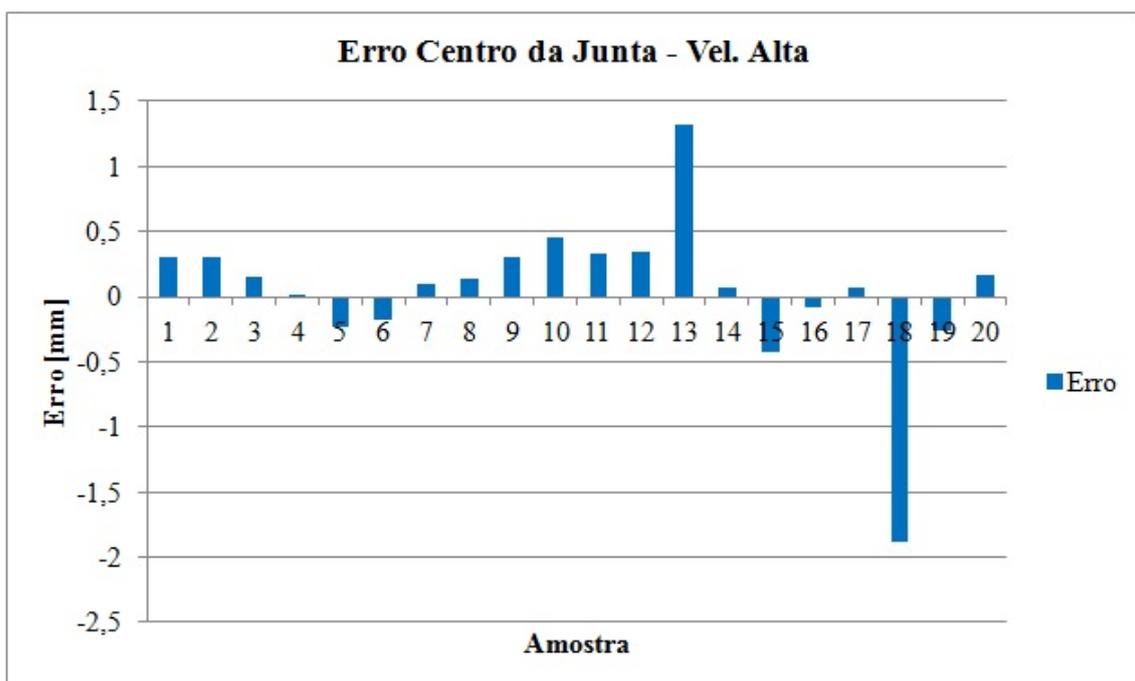


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 33: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.

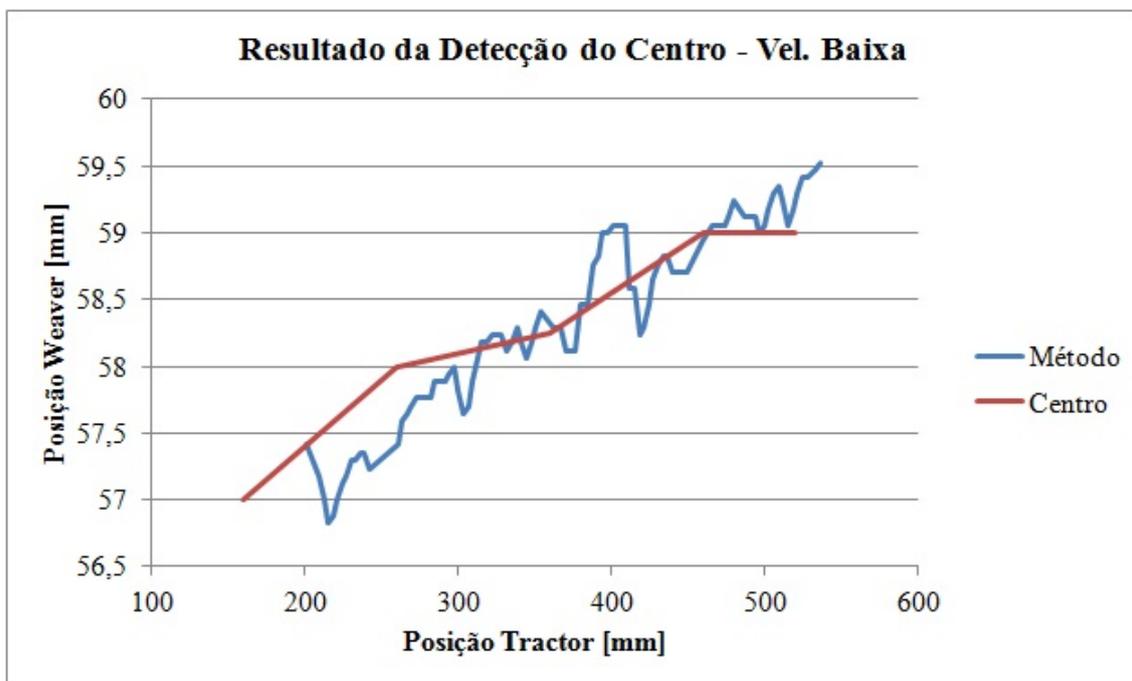


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

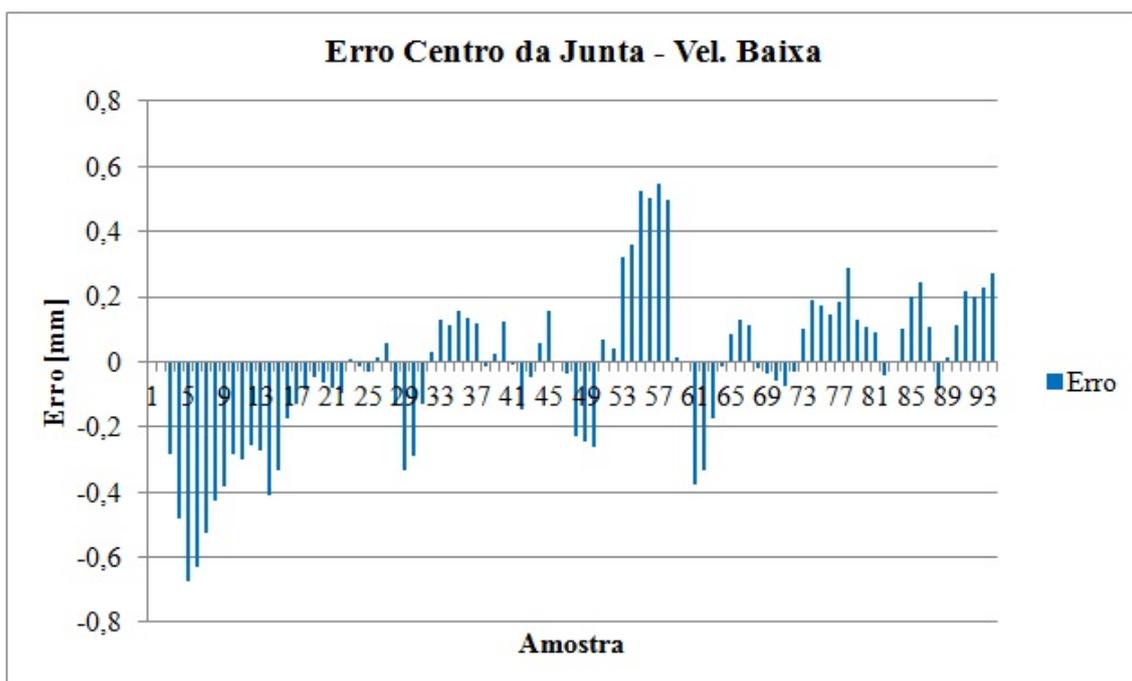


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 34: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.

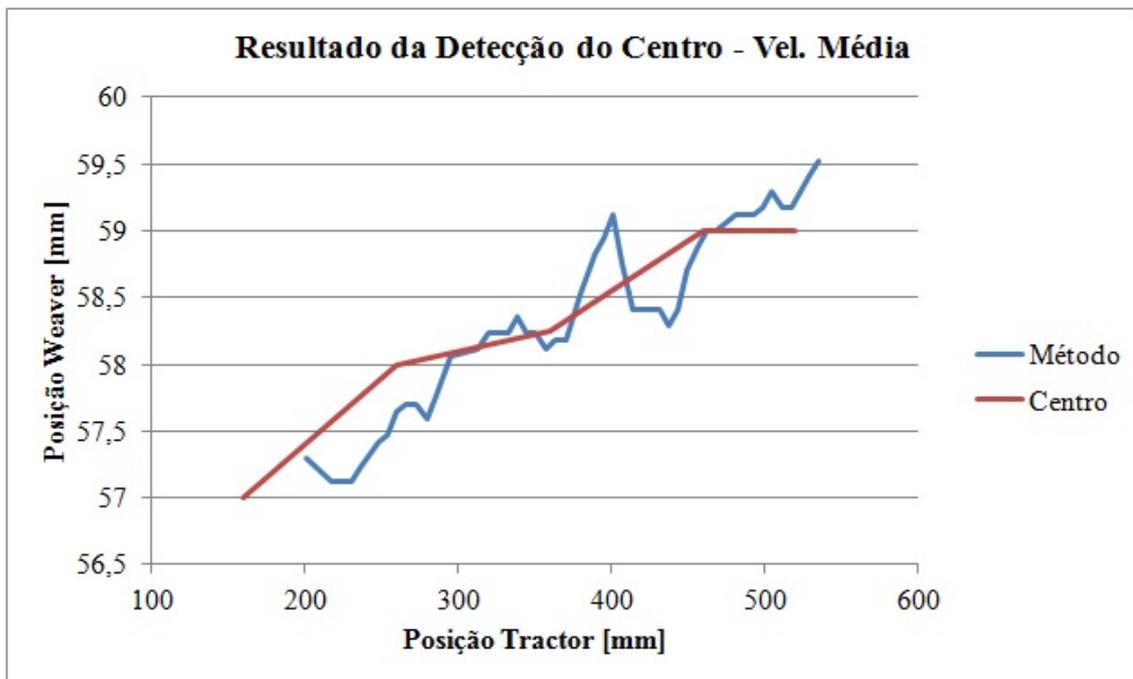


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

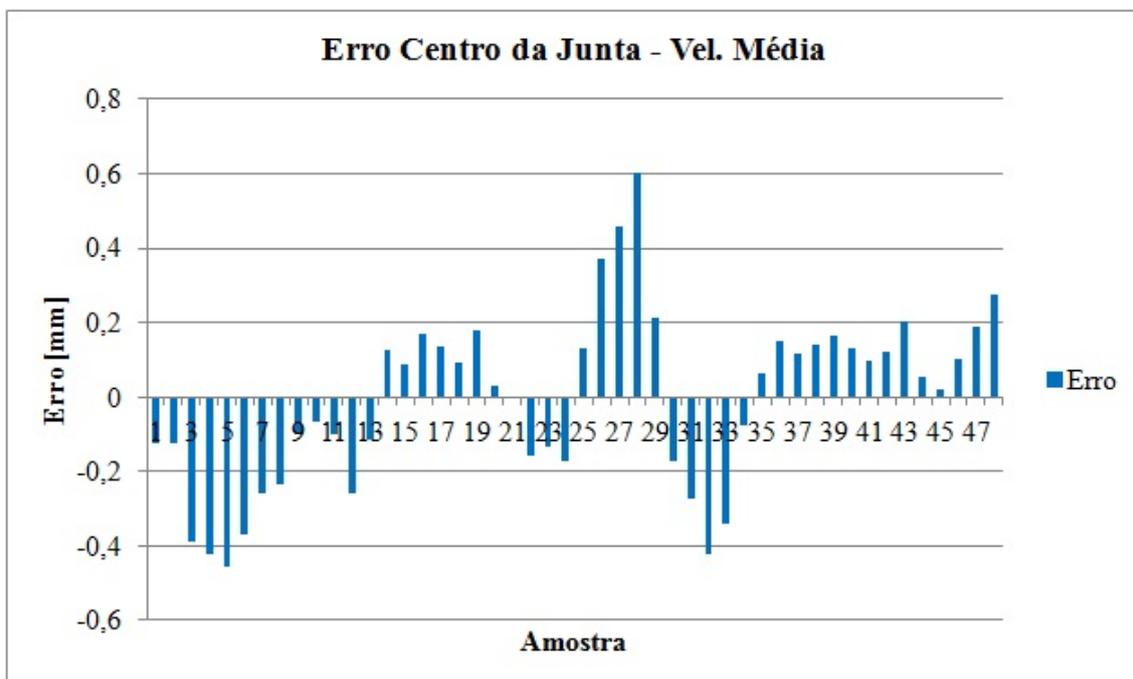


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 35: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.

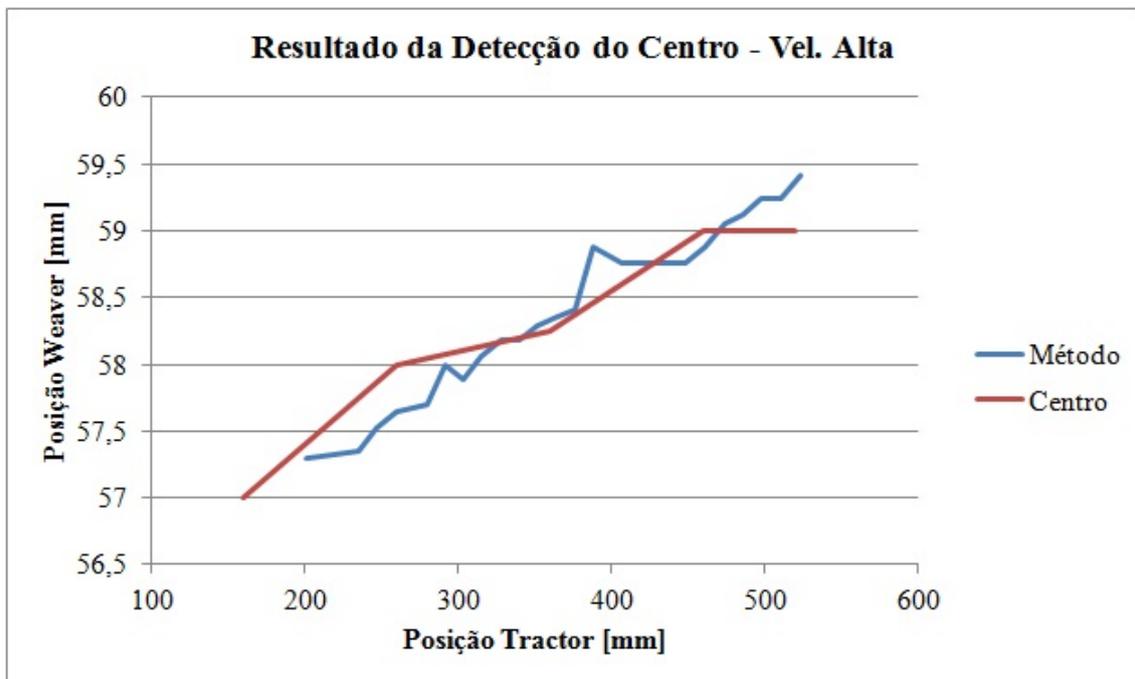


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

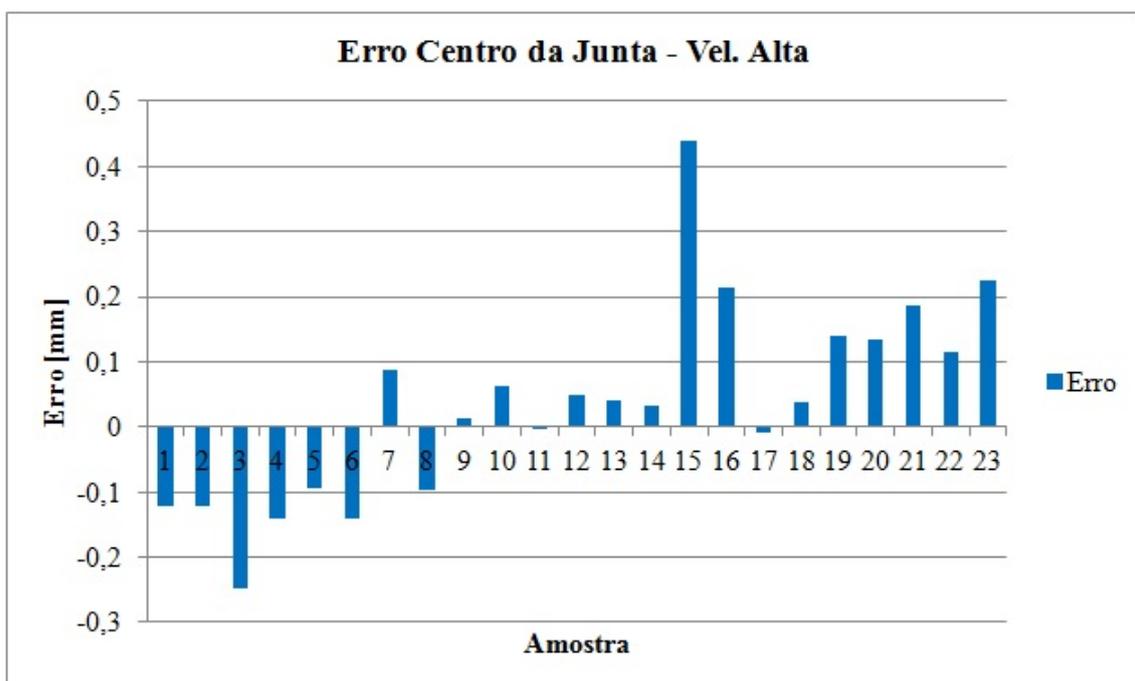


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 36: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.

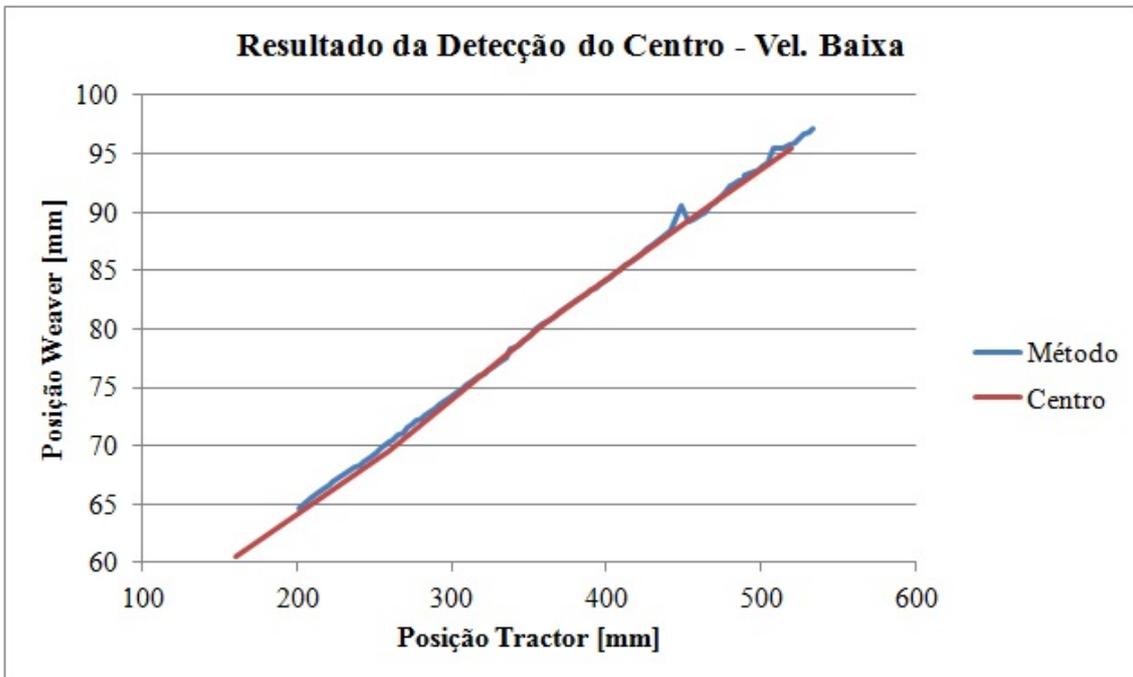


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

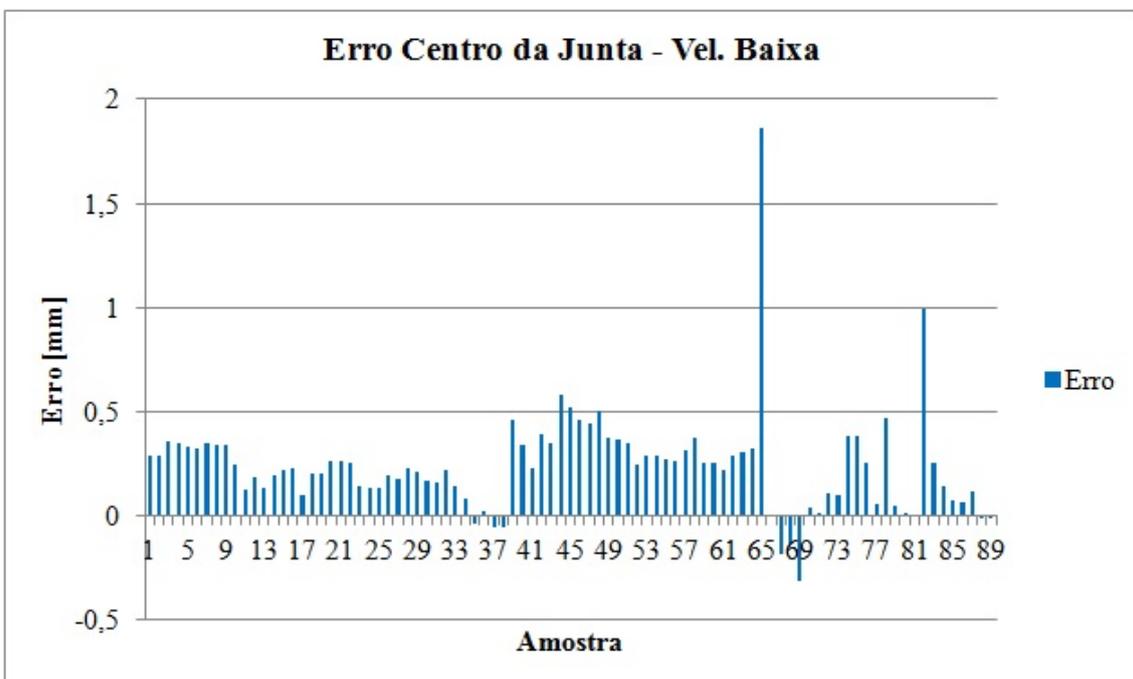


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 37: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta alinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.

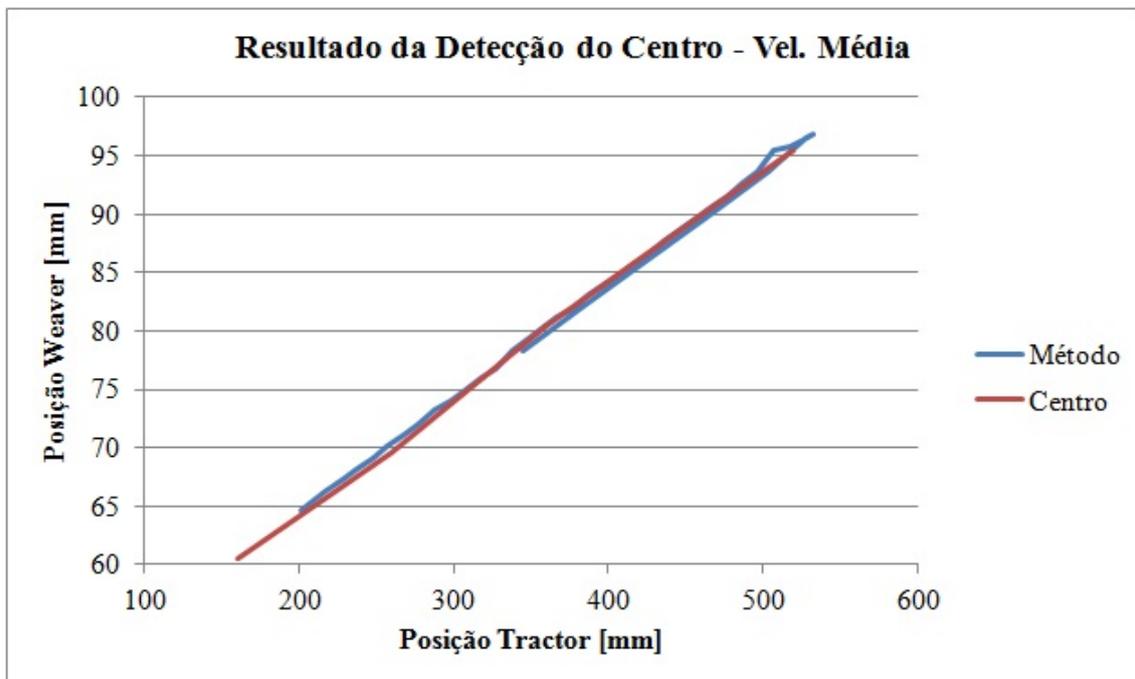


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

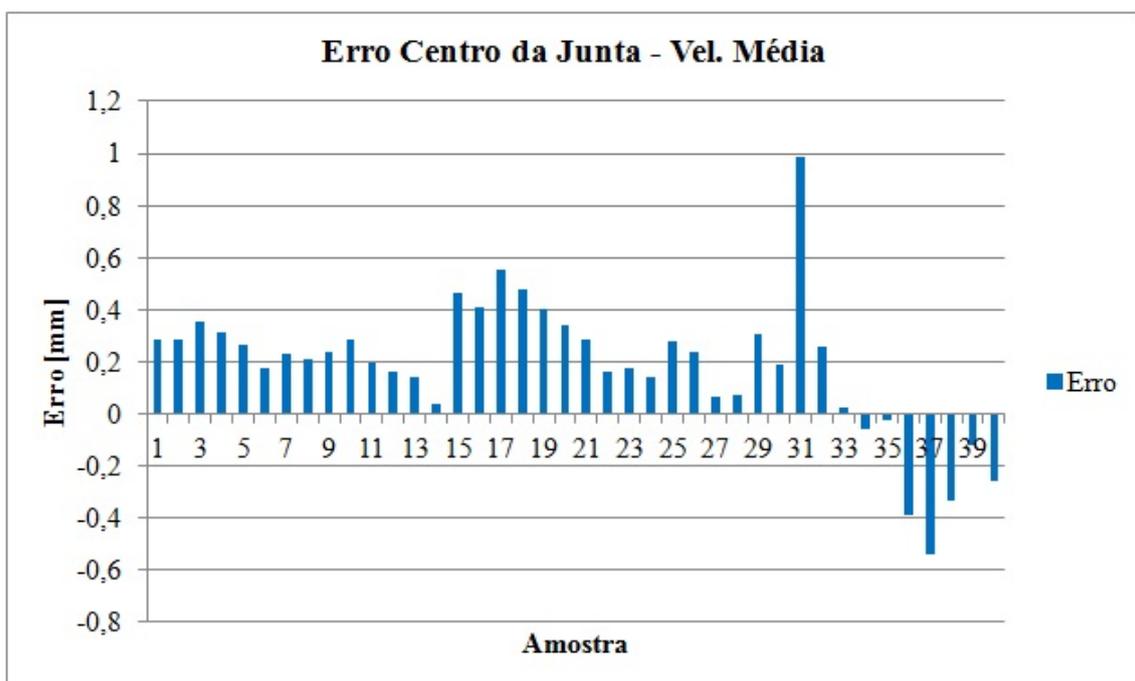


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 38: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.

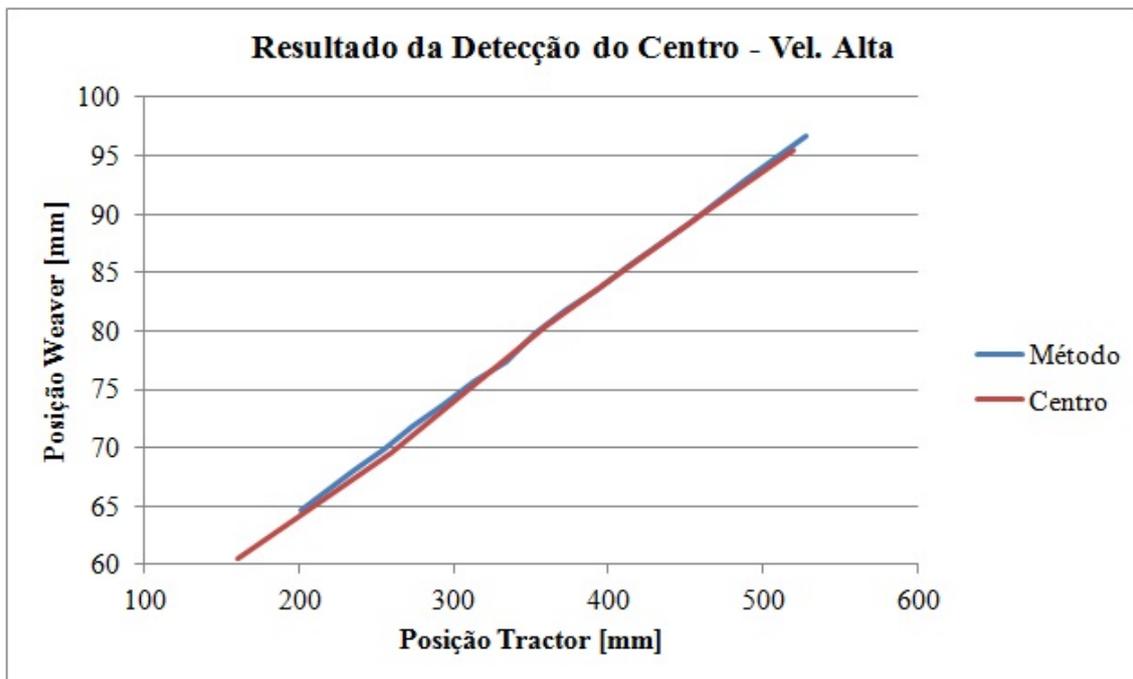


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

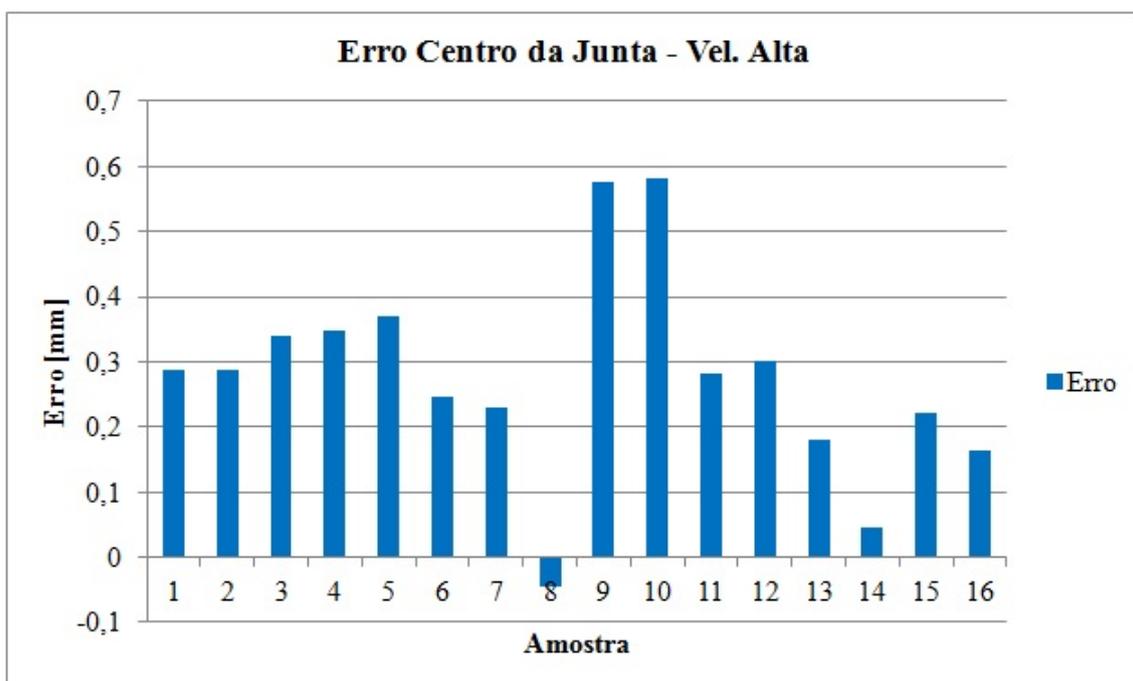


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 39: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.

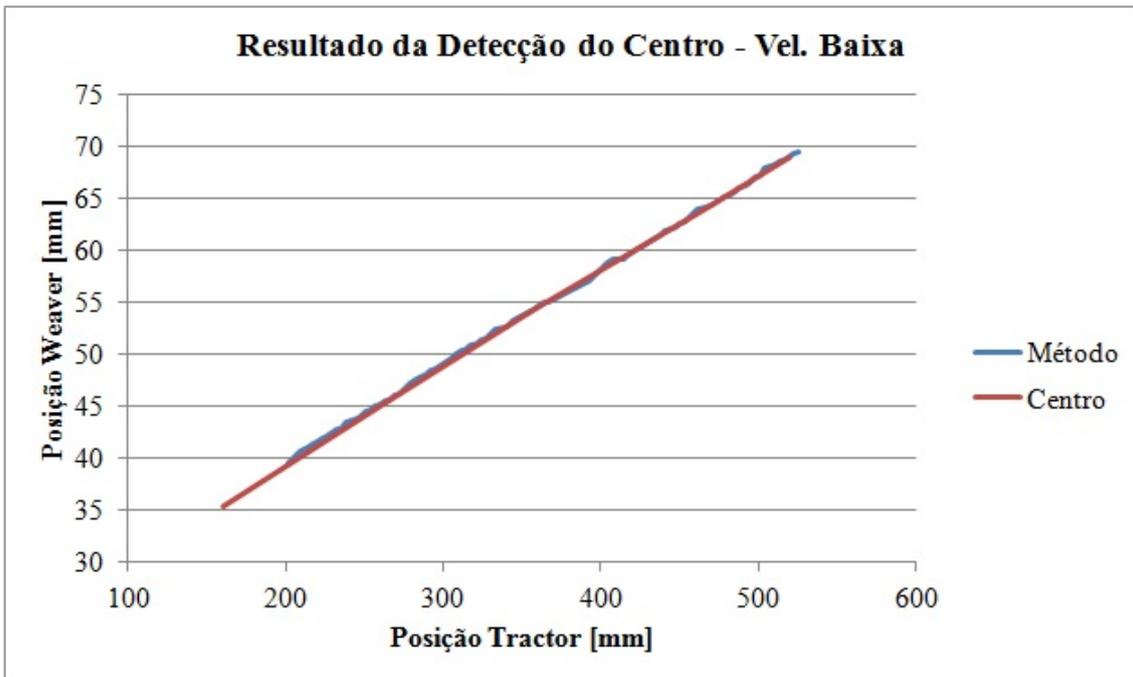


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

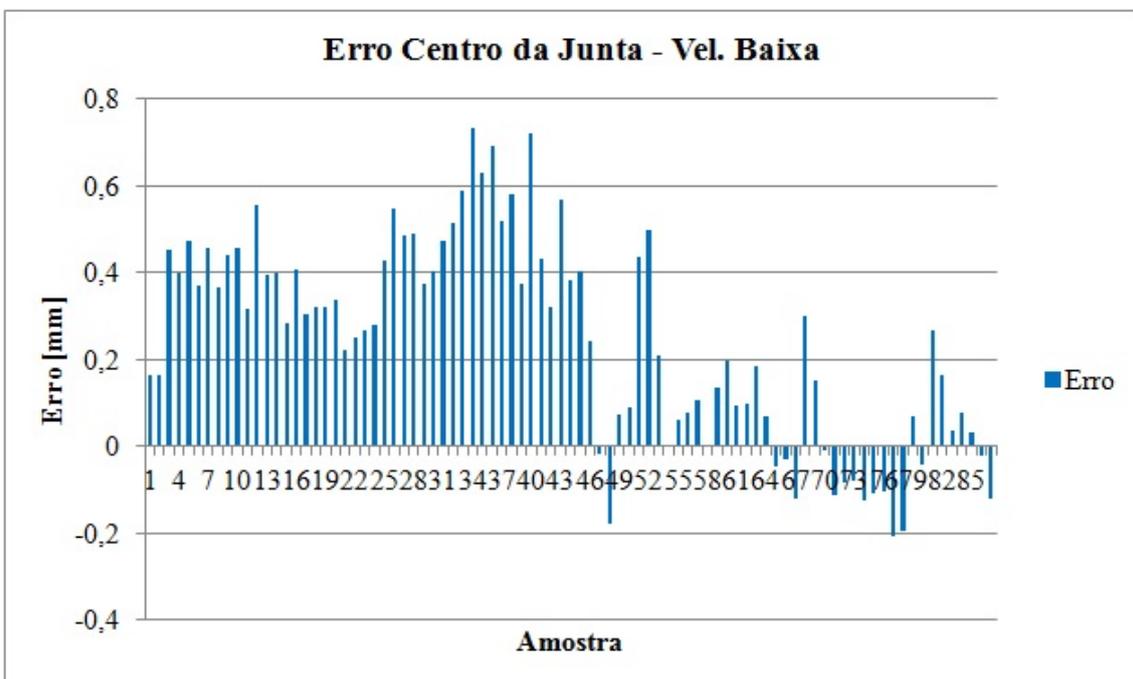


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 40: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 1 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.

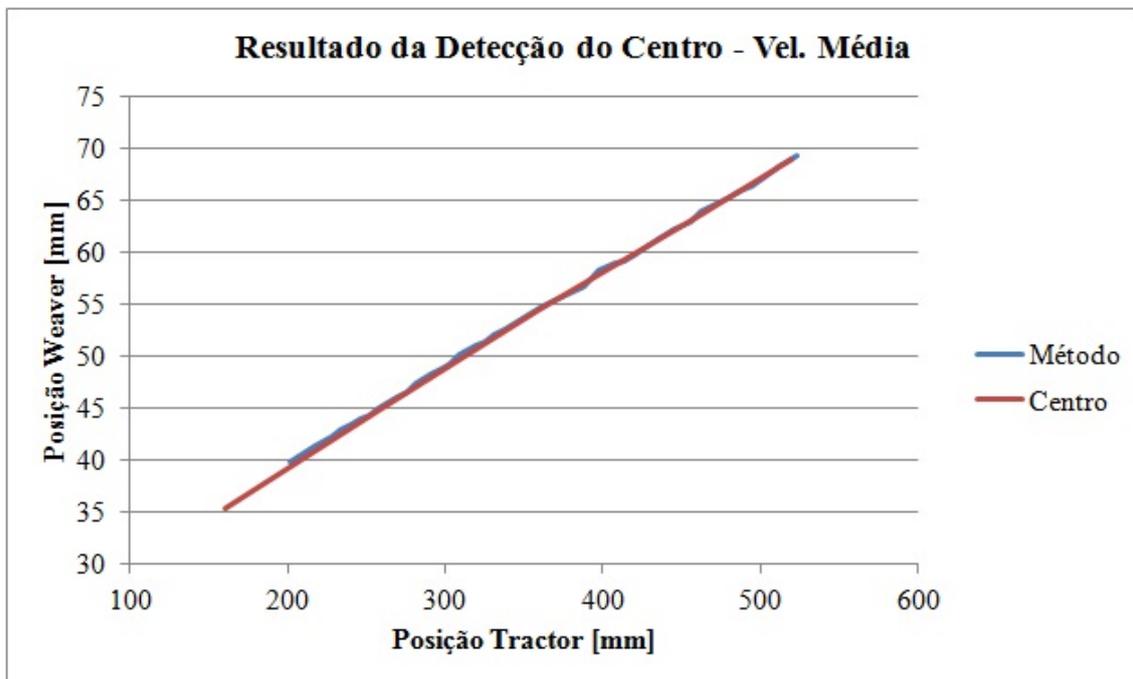


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

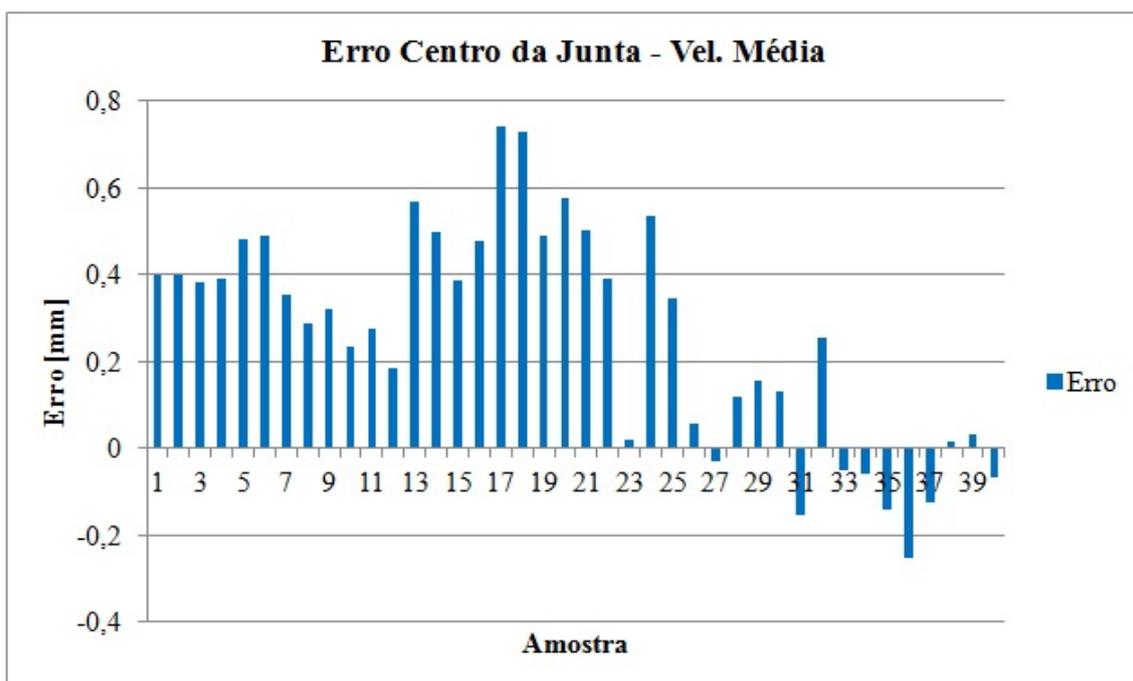


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 41: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.

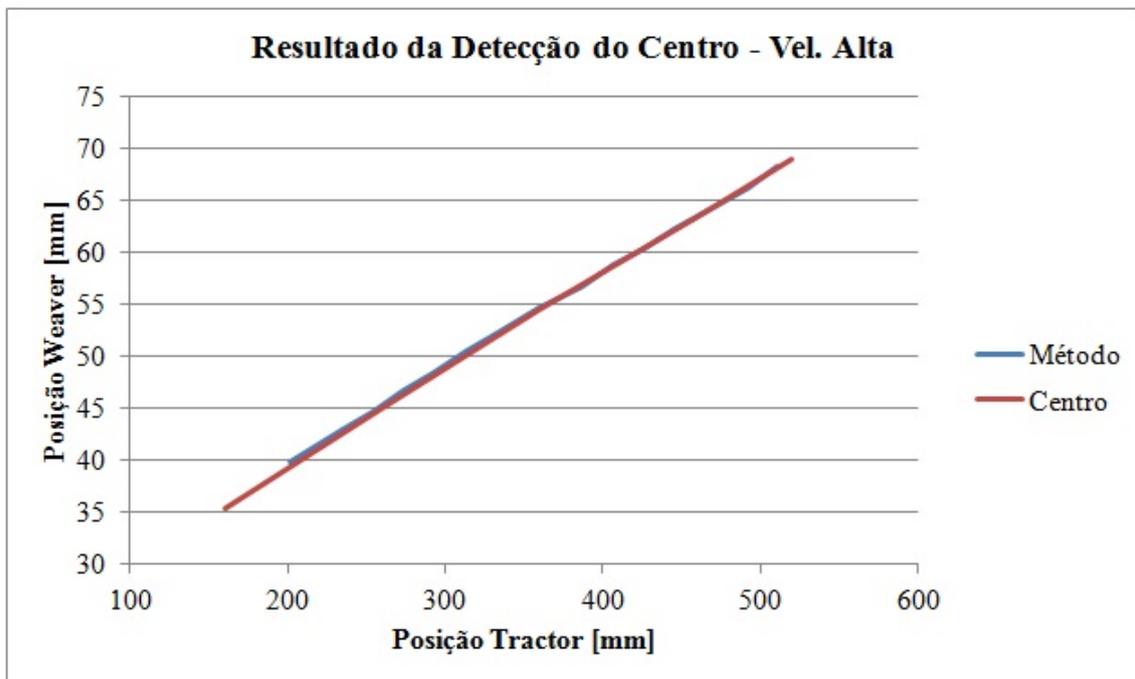


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

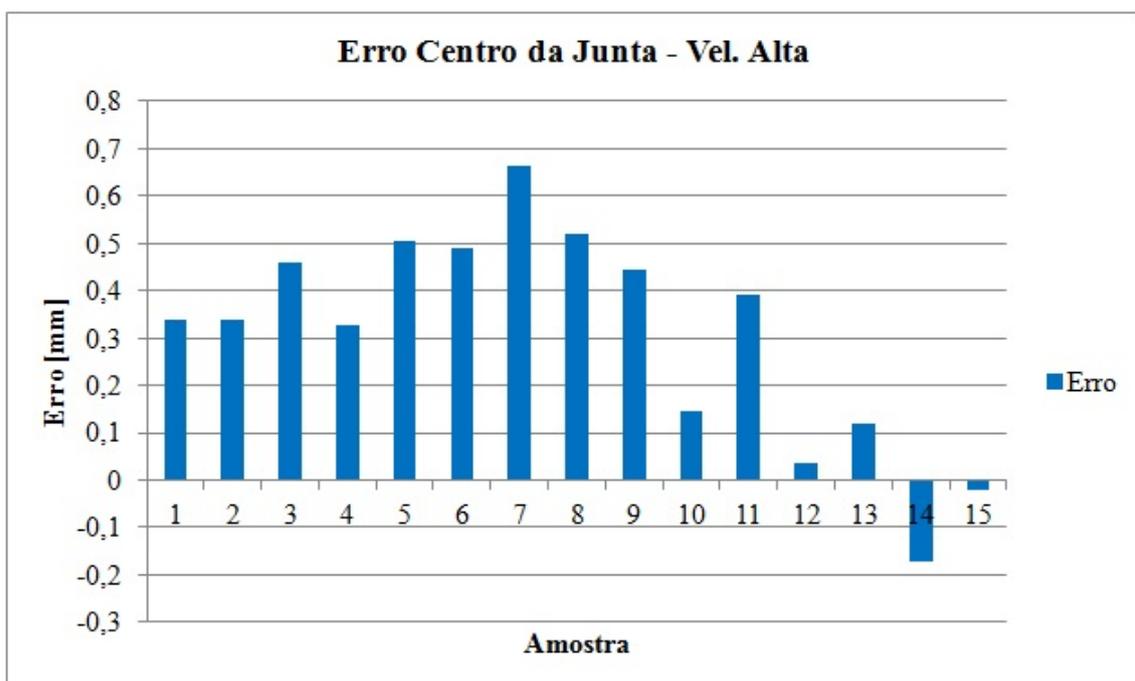


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 42: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.

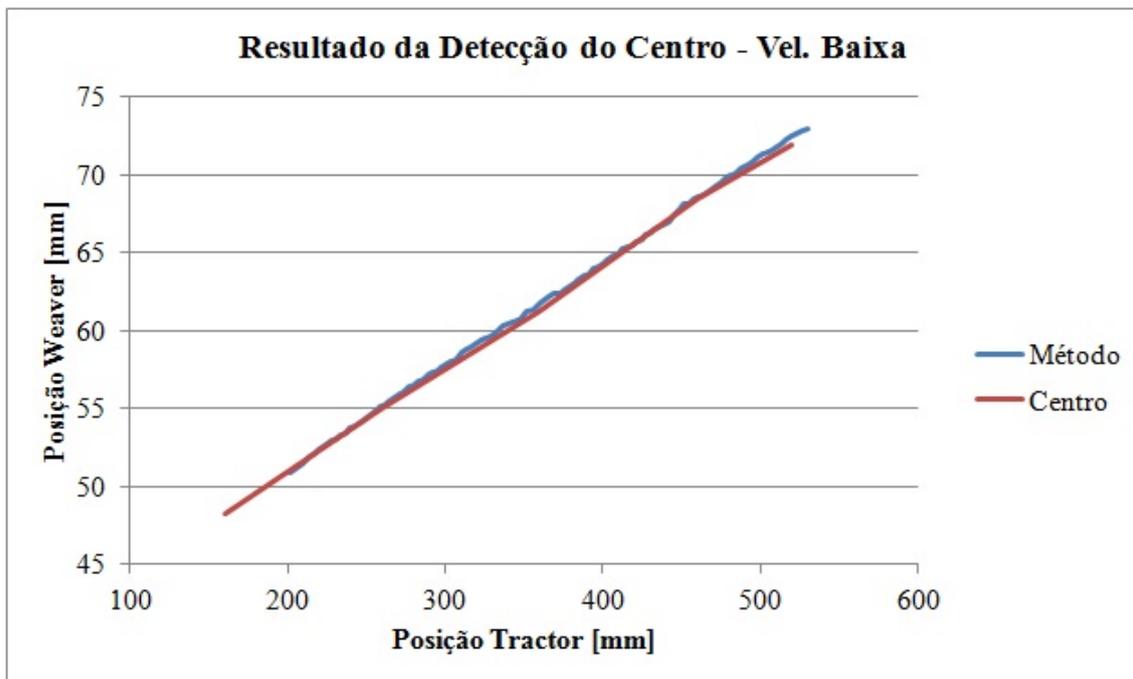


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

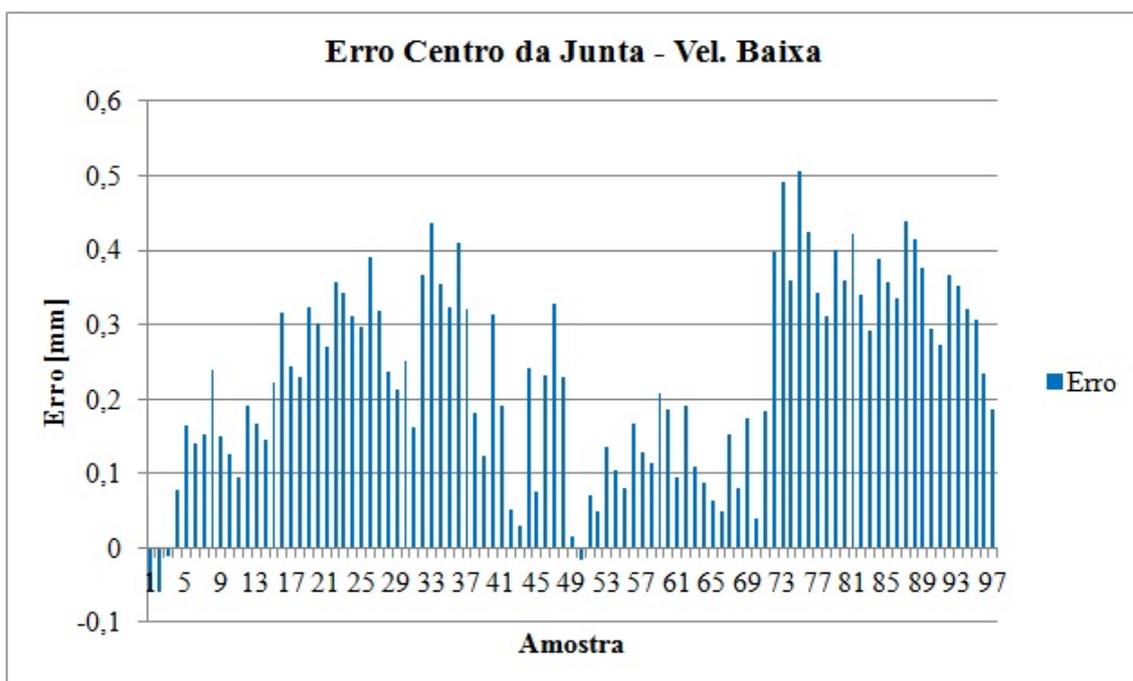


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 43: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 2 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.

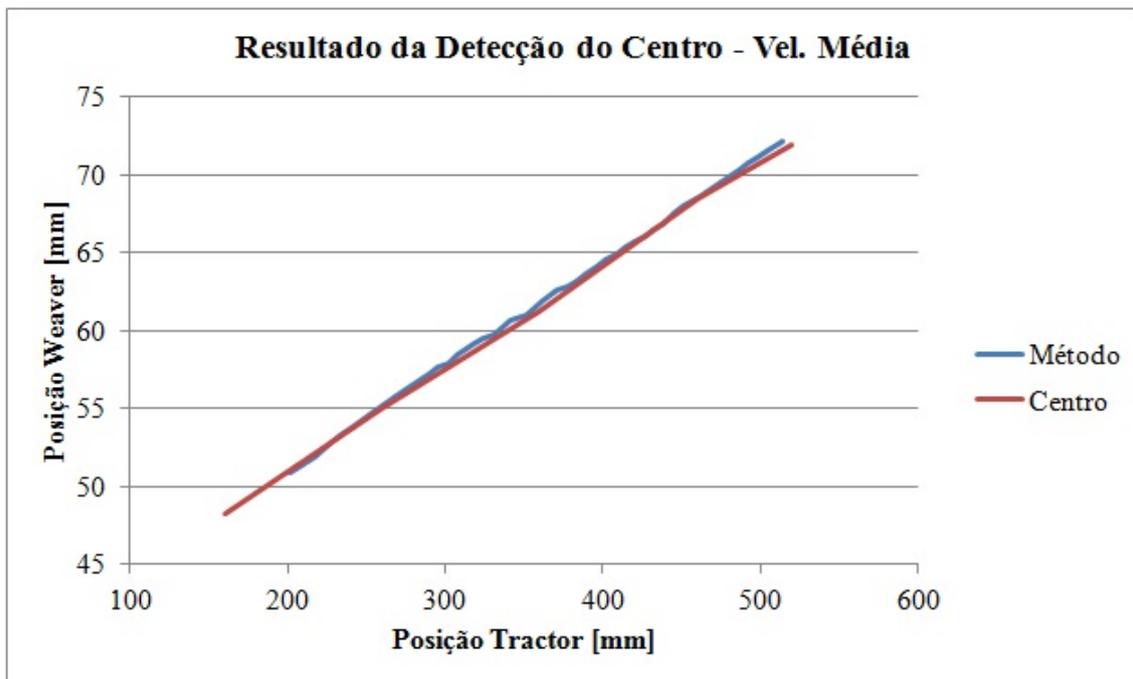


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

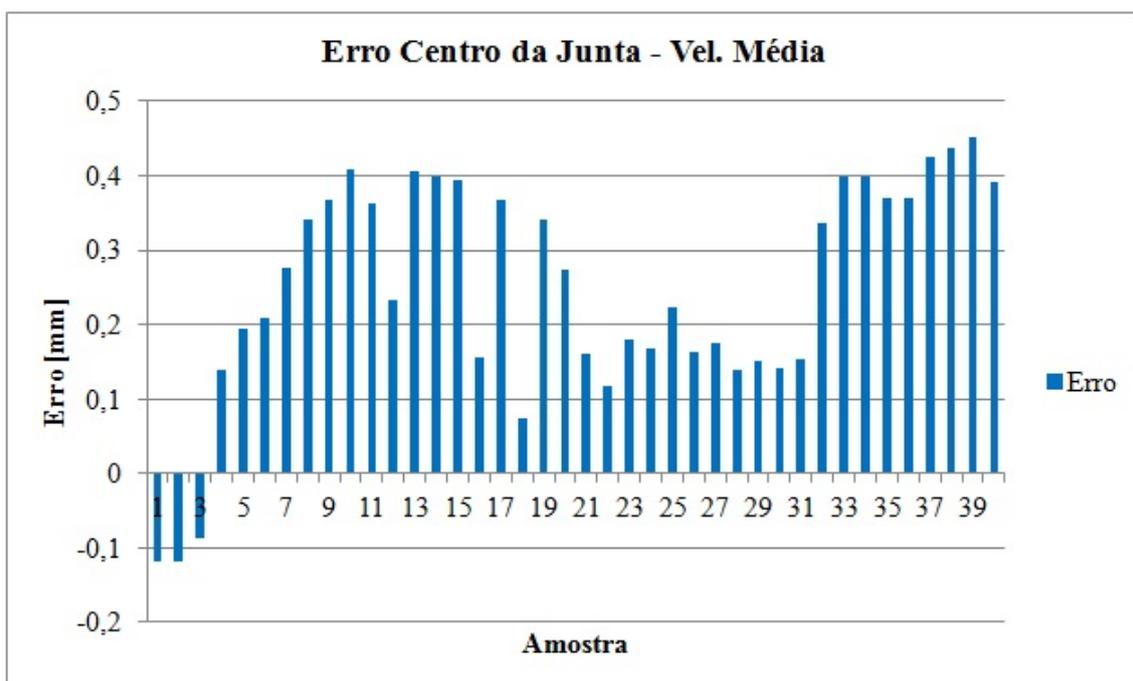


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 44: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 2,5 mm/s.

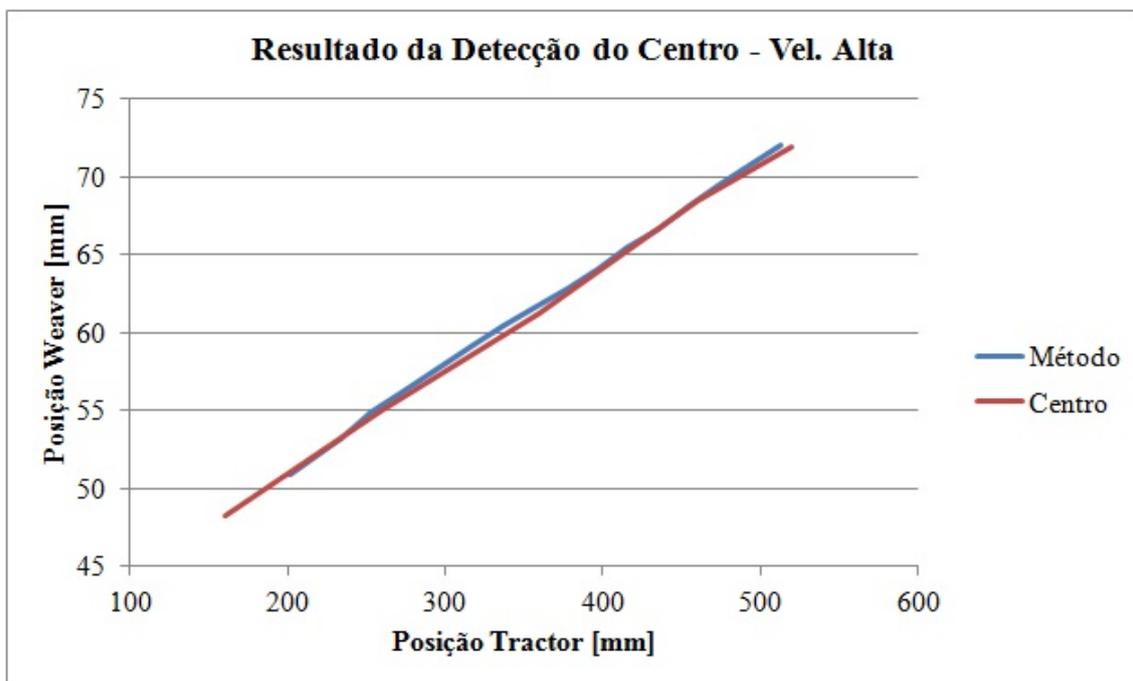


(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.

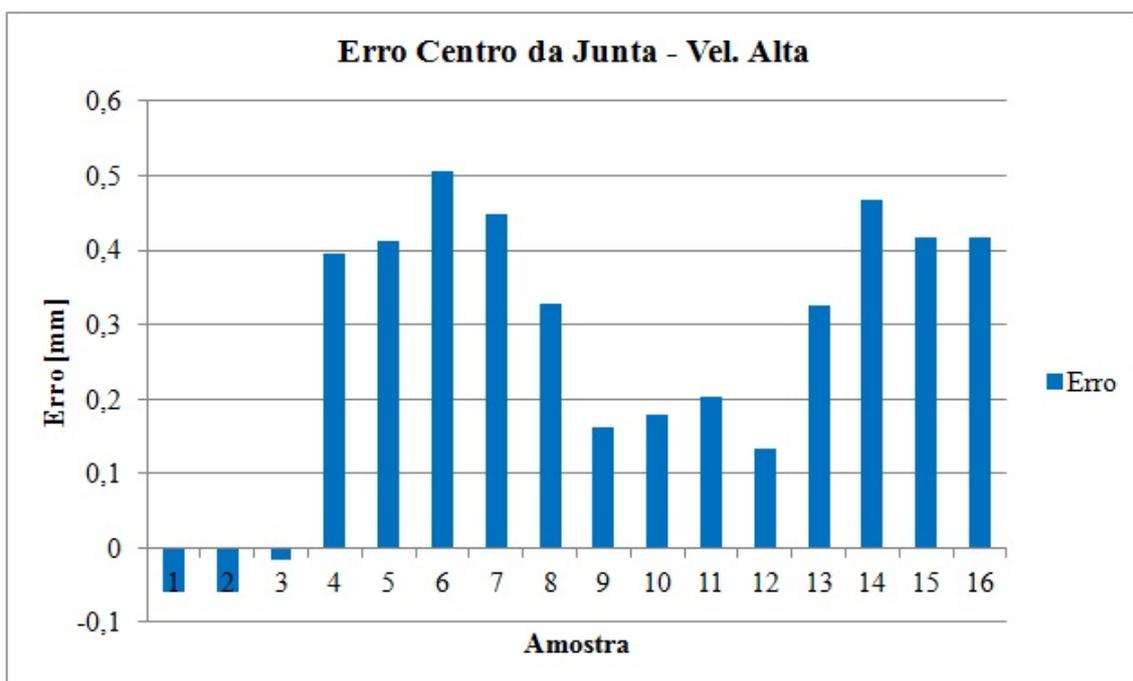


(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 45: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 5 mm/s.



(a) Centro da junta calculado e identificado manualmente.



(b) Erro entre o cálculo do centro da junta e o centro identificado manualmente.

Figura 46: Comparação entre a detecção da junta e o centro real na Condição 3 avaliada. Junta desalinhada ao trilho do robô. Velocidade do robô 10 mm/s.