

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO

MODELAGEM COMPUTACIONAL APLICADA À EXTRAÇÃO  
DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS IRREGULARES EM  
PROCESSOS MULTIOBJETIVOS

Vinicius de Carvalho Paes

Itajubá  
Julho de 2020

Vinicius de Carvalho Paes

**MODELAGEM COMPUTACIONAL APLICADA À  
EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS  
IRREGULARES EM PROCESSOS MULTIOBJETIVOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia de Produção.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Orientador: Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi  
Coorientador: Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva

Itajubá  
Julho de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO

Vinicius de Carvalho Paes

**MODELAGEM COMPUTACIONAL APLICADA À  
EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS  
IRREGULARES EM PROCESSOS MULTIOBJETIVOS**

Tese submetida para banca examinadora em  
14 de julho de 2020, como parte de requisito  
ao título de Doutor em Ciências em Engenharia de Produção.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Wesley Vieira da Silva  
Prof. Dr. Paulo Rotella Junior  
Prof. Dr. Antônio Fernando Branco Costa  
Prof. Dr. José Leonardo Noronha  
Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi (Orientador)  
Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva (Orientador)

Itajubá  
Julho de 2020

*Dedico este trabalho especialmente para minha família e amigos, por todo o apoio nesta jornada.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me indicado o caminho correto a seguir e por ter me aproximado das pessoas que, sem as quais, eu não conseguiria ter prosseguido. Agradeço em especial aos professores, amigos e orientadores Dr. Pedro Paulo Balestrassi e Dr. Anderson Paulo de Paiva. Estes que sempre acreditaram no meu trabalho e valorizaram todo meu esforço e dedicação. A todos os professores do programa de pós graduação que me auxiliaram na busca de conhecimentos, à secretaria do IEPG. À todos os amigos e colegas do GEPE Qualidade. E finalmente ao MEC e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

*“Aqueles que passam por nós,  
não vão sós, não nos deixam sós.  
Deixam um pouco de si,  
levam um pouco de nós.”  
(Antoine de Saint-Exupéry)*

# RESUMO

Sistemas produtivos modernos possuem a necessidade de processos de monitoramento para garantia de qualidade e conformidade na produção. A visão computacional é uma forte aliada no processo de identificação de objetos e extração de características, sendo utilizada em diversos campos de aplicação. A extração de características geométricas de objetos de geometria irregular é um desafio, sobretudo pela complexidade do sistema de medição. Métodos manuais de medição podem não garantir a precisão necessária e também possuem a demanda de um operador experiente, tempo e impactam diretamente no custo final do produto. Desta forma, o objetivo desta pesquisa é a criação de uma modelagem computacional de extração de características geométricas de objetos de geometria irregular, de forma digital, utilizando visão computacional. A análise de bloco padrão confirmou que o sistema de medição baseado na modelagem computacional é satisfatório e possui melhor precisão, comparado ao método de medição manual auxiliada por analisador de imagem. A análise dos experimentos definidos como o objeto de estudo também confirmaram a eficácia do sistema de medição e foi possível calcular o viés do operador manual. Como resultados, as medições no objeto de estudo foram extraídas com êxito, ficaram disponíveis de forma sistematizada, em tempo recorde. O método se mostrou muito eficaz, abrindo possibilidade para diversos trabalhos futuros na área.

**Palavras-chave:** visão computacional; modelagem; extração de características digitais; sistema de medição; repetibilidade e reprodutibilidade.

# ABSTRACT

Modern production systems require monitoring processes for quality assurance and production compliance. Computer vision is a strong ally in the process of object identification and feature extraction, being used in several fields of application. Extracting geometric features from irregularly shaped objects is a challenge, especially due to the complexity of the measurement system. Manual measurement methods may not guarantee the required accuracy and also have the demand of an experienced operator, time and directly impact the final cost of the product. Thus, the objective of this research is the creation of a computational modeling for the extraction of geometric characteristics of objects of irregular geometry, digitally, using computer vision. The standard block analysis confirmed that the measurement system based on computational modeling is satisfactory and has better accuracy, compared to the manual measurement method aided by image analyzer. The analysis of the experiments defined as the object of study also confirmed the effectiveness of the measurement system and it was possible to calculate the bias of the manual operator. As a result, measurements on the object of study were successfully extracted, made available in a systematic way, in record time. The method proved to be very effective, opening the possibility for several future works in the area.

**Keywords:** computer vision; modeling; digital feature extraction; measuring system; repeatability and reproducibility.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Representação 3 componentes de cor do espaço de cores RGB . . . . .	9
Figura 2.2 – Representação vetor que define saturação de cores no espaço de cores RGB . . . . .	9
Figura 2.3 – Áreas necessárias para o cálculo da diluição . . . . .	15
Figura 2.4 – Variáveis de geometria da solda de revestimento . . . . .	15
Figura 2.5 – Etapas do processo de soldagem de revestimento (GOMES, 2010) . . . . .	16
Figura 2.6 – Evolução do volume de publicação no período de 2009-2019 . . . . .	22
Figura 2.7 – Resultados de volume de publicações das junções de palavras-chave ao longo do período de 2009-2019. . . . .	23
Figura 2.8 – Resumo gráfico do processo proposto por CHEN <i>et al.</i> 's (2009) . . . . .	30
Figura 2.9 – <i>Layout</i> do <i>setup</i> do experimento proposto por BHAT <i>et al.</i> 's (2015) . . . . .	31
Figura 2.10 – <i>Layout</i> experimental (RIOS-CABRERA <i>et al.</i> , 2016) . . . . .	32
Figura 2.11 – <i>Layout</i> experimental (Font comas <i>et al.</i> , 2017) . . . . .	33
Figura 2.12 – <i>Layout</i> do <i>setup</i> do experimento proposto por XIONG <i>et al.</i> 's (2019) . . . . .	34
Figura 3.1 – Classificação da metodologia de pesquisa científica em engenharia de produção . . . . .	37
Figura 3.2 – Exemplificação da chapa de aço carbono com solda de revestimento de aço inoxidável: visão superior . . . . .	38
Figura 3.3 – Exemplificação da chapa de aço carbono com solda de revestimento de aço inoxidável e os cortes: visão superior . . . . .	39
Figura 3.4 – Exemplificação da chapa de aço carbono com solda de revestimento de aço inoxidável já com os cortes feitos: visão superior . . . . .	39
Figura 3.5 – Exemplificação corpo de prova de aço carbono com solda de revestimento de aço inoxidável: visão superior . . . . .	40
Figura 3.6 – Exemplificação da chapa de aço carbono com solda de revestimento de aço inoxidável: visão transversal . . . . .	40
Figura 3.7 – Fluxograma das etapas do <i>setup</i> inicial . . . . .	41
Figura 3.8 – Fluxograma etapas de desenvolvimento e análise . . . . .	42
Figura 4.1 – Câmera fotográfica utilizada no experimento . . . . .	43
Figura 4.2 – Visão geral de dados extraídos pelo extrator de características: unidade de <i>pixels</i> para comprimento e altura, <i>pixels</i> quadrados para área e graus para ângulo . . . . .	45
Figura 4.3 – Vetorização de dados do perímetro do aço inoxidável . . . . .	46
Figura 4.4 – Imagem corpo de prova . . . . .	46
Figura 4.5 – Foto com as bordas de fronteira realçadas . . . . .	47

Figura 4.6 – Esboço de imagem digital do corpo de prova com bordas delimitadas . . . . .	47
Figura 4.7 – Pseudocódigo criação máscara fundo da imagem digital . . . . .	48
Figura 4.8 – Pseudocódigo criação máscara do aço carbono da imagem digital . . . . .	48
Figura 4.9 – Pseudocódigo criação máscara do aço inoxidável da imagem digital . . . . .	48
Figura 4.10–Esboço de imagem digital da máscara do corpo de prova . . . . .	49
Figura 4.11–Sobreposição da máscara na imagem do corpo de prova e imagem da máscara . . . . .	49
Figura 4.12–Dados de geometria necessários . . . . .	51
Figura 4.13–Dados extraídos do aço inox . . . . .	52
Figura 4.14–Regressão linear: dados primeiro e segundo quadrante . . . . .	53
Figura 4.15–Comparação experimento DOE com experimento de confirmação . . . . .	54
Figura 4.16–Análise <i>Paired-t</i> Multivariado . . . . .	61
Figura 4.17–Análise de medições de largura e penetração de cordão . . . . .	61
Figura 4.18–Estudo GR&R para os Operadores 1 e 2 . . . . .	68
Figura 4.19–Estudo GR&R para os Operadores 3 e 4 . . . . .	70
Figura 4.20–Gráfico de viés da largura dos blocos-padrão . . . . .	71
Figura 4.21–Gráfico de viés da altura dos blocos-padrão . . . . .	72
Figura 4.22–Gráfico de viés da área dos blocos-padrão . . . . .	73
Figura 4.23–Viés das variáveis $W$ e $P$ de operador humano . . . . .	79
Figura 4.24–Viés das variáveis $R$ e $D$ de operador humano . . . . .	79
Figura 4.25–Interface ImageJ para processo de medição manual . . . . .	83

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Volume de publicações total de palavras-chave nas bases científicas selecionadas . . . . .	21
Tabela 2.2 – Volume de publicações por palavras-chave nas bases científicas selecionadas no período de 2009 até 2019 . . . . .	21
Tabela 2.3 – Volume de publicações das palavras-chave em conjunto nas bases científicas selecionadas no período de 2009-2019 . . . . .	22
Tabela 2.4 – Volume de publicações das junções de palavras-chave nas bases científicas selecionadas no período de 2009 até 2019 . . . . .	23
Tabela 4.1 – Dados de saída do <i>software</i> referentes as características dos corpos de prova do primeiro conjunto de imagens . . . . .	54
Tabela 4.2 – Dados de saída do <i>software</i> referentes as características dos corpos de prova do segundo conjunto de imagens . . . . .	56
Tabela 4.3 – Cálculo das diferenças dos valores de medida manual e automático . . . . .	58
Tabela 4.4 – Resultados de <i>p-value</i> para o teste de Anderson-Darling . . . . .	59
Tabela 4.5 – Resultados para o teste <i>paired-t</i> . . . . .	60
Tabela 4.6 – Dados coletados Operador 1 para bloco padrão 100 mm . . . . .	63
Tabela 4.7 – Dados coletados Operador 2 para bloco padrão 100 mm . . . . .	63
Tabela 4.8 – Dados coletados Operador 3 para bloco padrão 100 mm . . . . .	63
Tabela 4.9 – Dados coletados Operador 4 para bloco padrão 100 mm . . . . .	64
Tabela 4.10–Dados coletados Operador 1 para bloco padrão 75 mm . . . . .	64
Tabela 4.11–Dados coletados Operador 2 para bloco padrão 75 mm . . . . .	64
Tabela 4.12–Dados coletados Operador 3 para bloco padrão 75 mm . . . . .	65
Tabela 4.13–Dados coletados Operador 4 para bloco padrão 75 mm . . . . .	65
Tabela 4.14–Dados coletados Operador 1 para bloco padrão 25 mm . . . . .	65
Tabela 4.15–Dados coletados Operador 2 para bloco padrão 25 mm . . . . .	66
Tabela 4.16–Dados coletados Operador 3 para bloco padrão 25 mm . . . . .	66
Tabela 4.17–Dados coletados Operador 4 para bloco padrão 25 mm . . . . .	66
Tabela 4.18–Análise de componentes principais para <i>Largura, Altura e Área</i> - Operadores 1 e 2 . . . . .	67
Tabela 4.19–Componentes de variação e índices de avaliação do sistema de medição com PCA e CPP - Operadores 1 e 2 . . . . .	68
Tabela 4.20–Análise de componentes principais para <i>Largura, Altura e Área</i> - Operadores 3 e 4 . . . . .	69
Tabela 4.21–Componentes de variação e índices de avaliação do sistema de medição com PCA e CPP - Operadores 3 e 4 . . . . .	69
Tabela 4.22–Linearidade do medidor para largura dos blocos padrão . . . . .	70

Tabela 4.23–Estatística S e R-sq para largura dos blocos padrão . . . . .	71
Tabela 4.24–Viés do medidor para largura dos blocos-padrão . . . . .	71
Tabela 4.25–Linearidade do medidor para altura dos blocos-padrão . . . . .	71
Tabela 4.26–Estatística S e R-sq . . . . .	72
Tabela 4.27–Viés do medidor para altura dos blocos-padrão . . . . .	72
Tabela 4.28–Linearidade do medidor para área dos blocos-padrão . . . . .	72
Tabela 4.29–Estatística S e R-sq para Viés de Área . . . . .	72
Tabela 4.30–Viés do medidor para área dos blocos padrão . . . . .	73
Tabela 4.31–Análise de componentes principais para $W, P, R$ e $D$ . . . . .	74
Tabela 4.32–Dados de medição dos corpos de prova utilizando a modelagem com- putacional proposta . . . . .	75
Tabela 4.33–Componentes de variação e índices de avaliação do sistema de medição usando CPP . . . . .	78
Tabela 4.34–Viés do operador humano . . . . .	79
Tabela 4.35–Dados de medição dos corpos de prova realizados pelo operador humano	80
Tabela 4.36–Cronoanálise operador manual . . . . .	84

# LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Visão geral das pesquisas com relevância ao tema da pesquisa . . . . .	25
---	----

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PCA	Análise de Componentes Principais
RNA	Redes Neurais Artificiais
ZTA	Zona Termicamente Afetada
DOE	Delineamento de Experimentos
IDE	Ambiente de desenvolvimeto integrado
GR&R	Repetitividade e Reprodutibilidade do Instrumento

# LISTA DE SÍMBOLOS

$P$	Penetração
$\bar{P}_{dif}$	Diferença das médias de medições de penetração do cordão
$W$	Largura do cordão
$\bar{W}_{dif}$	Diferença das médias de medições de largura do cordão
$R$	Reforço
$\bar{R}_{dif}$	Diferença das médias de medições de reforço do cordão
$D$	Diluição
$\bar{D}_{dif}$	Diferença das médias de cálculo de diluição do cordão
$A_p$	Área de penetração
$A_r$	Área de reforço
$\alpha_{q1}$	Ângulo perímetro de solda no primeiro quadrante
$\alpha_{q2}$	Ângulo perímetro de solda no segundo quadrante
MSP	Média quadrática fator peça
MSO	Média quadrática fator operador
MSPO	Média quadrática interação peça-operador
MSE	Erro médio quadrático

# SUMÁRIO

	<b>Agradecimentos</b> . . . . .	<b>v</b>
	<b>Resumo</b> . . . . .	<b>vii</b>
	<b>Abstract</b> . . . . .	<b>viii</b>
	<b>Lista de Ilustrações</b> . . . . .	<b>viii</b>
	<b>Lista de Tabelas</b> . . . . .	<b>x</b>
	<b>Lista de Quadros</b> . . . . .	<b>xii</b>
	<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b> . . . . .	<b>xiv</b>
	<b>Lista de Símbolos</b> . . . . .	<b>xv</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa e Relevância</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Problema de Pesquisa</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b> . . . . .	<b>2</b>
1.3.1	Objetivo Geral . . . . .	2
1.3.2	Objetivos Específicos . . . . .	3
<b>1.4</b>	<b>Delimitações do Trabalho</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>1.5</b>	<b>Contribuições</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>1.6</b>	<b>Organização do Texto</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b> . . . . .	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>Visão Computacional</b> . . . . .	<b>6</b>
2.2.1	Cor . . . . .	7
2.2.2	Representação de uma imagem digital . . . . .	7
2.2.3	Processamento de Imagens . . . . .	8
2.2.4	Espaço de cores . . . . .	9
2.2.4.1	Espaço de cores RGB . . . . .	9
2.2.4.2	Espaço de cores CMYK . . . . .	10
2.2.4.3	Espaço de cores HSV . . . . .	10
2.2.4.4	Espaço de cores Y'CbCr . . . . .	10
2.2.5	Paleta de cores . . . . .	10

2.2.6	Equalização do Histograma . . . . .	11
2.2.7	Deteção de bordas e formas geométricas . . . . .	12
2.2.8	<i>Framework</i> OpenCV . . . . .	12
<b>2.3</b>	<b>Soldagem de Revestimento</b> . . . . .	<b>14</b>
2.3.1	Soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis . . . . .	16
<b>2.4</b>	<b>Repetitividade e reprodutividade do instrumento de medição</b> . . . . .	<b>16</b>
2.4.1	GR&R multivariado com análise de componentes principais ponderadas . . . . .	17
<b>2.5</b>	<b>Revisão da Literatura</b> . . . . .	<b>20</b>
2.5.1	Objetivos e critérios de busca . . . . .	20
2.5.1.1	Seleção de trabalhos quanto à relevância ao tema da pesquisa . . . . .	25
2.5.1.2	Seleção de trabalhos quanto à relevância ao tema e objeto de estudo da pesquisa . . . . .	29
<b>2.6</b>	<b>Considerações finais sobre o capítulo</b> . . . . .	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> . . . . .	<b>36</b>
<b>3.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b> . . . . .	<b>36</b>
<b>3.2</b>	<b>Método de Pesquisa</b> . . . . .	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Objeto de estudo</b> . . . . .	<b>38</b>
<b>3.4</b>	<b>Planejamento do método experimental</b> . . . . .	<b>41</b>
<b>3.5</b>	<b>Considerações Finais Sobre o Capítulo</b> . . . . .	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DO MÉTODO EXPERIMENTAL</b> . . . . .	<b>43</b>
<b>4.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b> . . . . .	<b>43</b>
<b>4.2</b>	<b>Setup Inicial</b> . . . . .	<b>43</b>
4.2.1	Preparação dos corpos de prova . . . . .	43
4.2.2	Fotografia corpos de prova . . . . .	43
4.2.3	Setup do ambiente de desenvolvimento (programação) . . . . .	44
4.2.3.1	Definição de <i>framework</i> de visão computacional . . . . .	44
4.2.3.2	Definição de linguagem de programação . . . . .	44
4.2.4	Definição formato saída/ <i>output</i> de dados . . . . .	44
<b>4.3</b>	<b>Desenvolvimento e análise</b> . . . . .	<b>46</b>
4.3.1	Identificação das fronteiras do corpo de prova . . . . .	46
4.3.2	Criação da máscara digital do corpo de prova . . . . .	47
4.3.3	Extração digital da área da solda de aço inoxidável . . . . .	49
4.3.4	Processo de medição digital . . . . .	50
4.3.4.1	Cálculo da altura da chapa de aço carbono . . . . .	51
4.3.4.2	Identificação e cálculo da altura de penetração e reforço . . . . .	52
4.3.4.3	Identificação do perímetro do cordão de solda . . . . .	52
4.3.4.4	Cálculo dos ângulos $\alpha_{q1}$ e $\alpha_{q2}$ do cordão de solda . . . . .	52
4.3.4.5	Cálculo de áreas de retrabalho comparadas com experimento de confirmação . . . . .	53
4.3.5	Análise estatística . . . . .	54

4.3.5.1	Análise da diferença de medição entre os processos de medição . . . . .	58
4.3.5.2	Análise de bloco padrão . . . . .	62
4.3.5.3	Análise de repetibilidade e reprodutibilidade . . . . .	74
4.3.5.4	Cronoanálise . . . . .	83
<b>4.4</b>	<b>Considerações finais sobre o capítulo . . . . .</b>	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões gerais . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>5.2</b>	<b>Contribuições do trabalho . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>5.3</b>	<b>Sugestões para estudos futuros . . . . .</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>89</b>
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE A – GRÁFICOS DE MEDIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO . . . . .</b>	<b>98</b>
	<b>APÊNDICE B – GRÁFICOS DE CURVATURA DO OBJETO DE ESTUDO . . . . .</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE C – GRÁFICOS DE MEDIÇÃO DAS ÁREAS DE CONFORMIDADE DO OBJETO DE ESTUDO . . . . .</b>	<b>128</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativa e Relevância

Em ambientes produtivos, há necessidade de monitoramento dos processos para garantir principalmente o controle de qualidade (COLLEDANI; TOLIO, 2006). Porém, o processo de monitoramento pode não ser trivial, principalmente se a necessidade é diante medição de objetos que possuem geometrias irregulares. Diante tal necessidade de processo de medição, existe a possibilidade de realização de medição com um operador humano, de forma manual. Esta proposta demanda mais recurso de tempo, podendo não garantir a precisão necessária, sendo primordial a experiência do responsável e impactando diretamente na qualidade da medição do processo, devido a possíveis erros do operador humano (LI, 2018).

Uma alternativa ao processo de medição manual é diante uma solução computacional. Uma modelagem computacional utilizando técnicas de visão computacional e extração de características digitais tem a possibilidade de prover as necessidades do processo de medição. A variância ligada ao erro diante a medição do operador e seu cansaço operacional pode ser mitigada, garantindo resultados com mais agilidade e com menor incerteza. A visão computacional é uma técnica consistente e avançada para o processamento de imagens, com resultados propícios e um enorme potencial (TRIPATHI; MAKTEDAR, 2019).

De acordo com DING *et al.* (2017) a visão computacional é muito utilizada para gerar novos níveis de inteligência, como medições precisas automáticas, a fim de reduzir as incertezas ligadas a capacidade da visão do operador, uma vez que possui mais vantagens sobre a visão humana. A aplicação da visão computacional para reconhecimento e mensuração de objetos se mostrou altamente eficiente.

O crescimento da utilização de visão computacional e eficácia no processo de detecção de objetos e padrões, na última década, criou grandes oportunidades e ampliou o campo de extração de características através de imagens (IBRAHIM *et al.*, 2020). A visão computacional está transformando processos associados à engenharia e permite a aquisição, processamento, análise de imagens digitais e a extração de dados de objetos para produzir informações para melhorar a tomada de decisões gerenciais (ZHONG *et al.*, 2019).

Do ponto de vista econômico, os processos de fabricação sempre se destacam como etapas relevantes, com responsabilidades diretas nas operações de agregação de valor dos produtos. Dentre os processos de fabricação, a soldagem possui grande utilização no

ambiente industrial, tendo sua relevância devido a versatilidade ligada desde a produção de estruturas simples, ou mesmo estruturas com grande nível de responsabilidade, com componentes complexos (GOMES, 2010). Problemas no processo de soldagem impactam diretamente os custos de fabricação, com retrabalho e refugo. Podem também resultar em problemas de vida relativos a fadiga, comprometendo toda estrutura final (ZHANG *et al.*, 2019; DENG *et al.*, 2007).

Assim como o impacto do monitoramento e mensuração no processo de soldagem de revestimento é relevante para indústria, outros tipos de processos multiobjetivos também detêm desafios diante extração de características, sobretudo em objetos de geometria irregular. A modelagem computacional de baixo custo e de fácil implantação é capaz de prover resultados satisfatórios para a indústria em diversos campos de atuação em objetos de estudo distintos. Desta forma, esta tese tem a proposta de levantar e responder o questionamento: é possível desenvolver uma modelagem computacional utilizando técnicas de visão computacional para prover resultados de medição de forma sistemática, com maior precisão e agilidade diante processos de medição manuais?

## 1.2 Problema de Pesquisa

Desenvolvimento de uma modelagem computacional voltada a realização de processo de medição de geometrias irregulares em objetos, sendo uma técnica ágil e capaz de prover precisão superior ao processo de medição manual, este definido, para todas as menções nesta tese, como um método que utiliza um *software* analisador de imagens e operador humano para traçar vértices através de cliques de *mouse* para cálculos de área e distância entre pontos.

## 1.3 Objetivos

De acordo com as necessidades e relevâncias expostas nos itens anteriores, esta pesquisa foi elaborada com o intuito de cumprir com o objetivo geral e específicos a seguir.

### 1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma modelagem computacional para extração de características da imagem digital de objetos de geometria irregular utilizando técnicas de visão computacional em processos multiobjetivos.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Diante o objeto de estudo escolhido para validação da modelagem computacional proposta, os objetivos específicos deste trabalho incluem:

- Extração de características de uma imagem digital pertinentes ao processo de medição:
  - Áreas de interesse;
  - Alturas relativas;
  - Largura máxima;
  - Ângulos.
- Extração e vetorização de todos os pontos da imagem referentes as áreas de interesse.
- Comparação das áreas obtidas nos experimentos realizados com o experimento de confirmação.
- Cálculo de diferença de medição dos dados obtidos pela modelagem computacional proposta com os dados obtidos pelo método manual realizado por [GOMES \(2010\)](#).
- Análise da repetibilidade e reprodutibilidade do método proposto com o método manual, diante análise de bloco padrão.
- Análise de viés multivariado de operadores.

## 1.4 Delimitações do Trabalho

Esta tese delimita-se às seguintes condições de contorno:

- (a) Captura da imagem digital dos corpos de prova do objeto de estudo em um ambiente controlado (incidência luminosa e distância focal) e resolução superior a 1300x400 *pixels*;
- (b) Validação do método utilizando a extração de características de soldas de revestimento de aço inox ABNT 316L em chapas de aço carbono ABNT 1020;
- (c) Imagem digital dos corpos de prova já com cortes de seção transversal e preparados com polimento e ataque com nital (revelação fronteira).

## 1.5 Contribuições

O presente trabalho pretende inovar em relação ao estado atual da pesquisa sobre o tema nos seguintes aspectos:

- (A) Modelagem computacional para extração de características de objetos de geometria irregular;
  - Extração de todos os *pixels* referentes as áreas de interesse.
  - Vetorização de todos os pontos de perímetro da área de interesse.
- (B) Modelagem com suporte a automatização de teste de conformidade;
  - Análise automatizada da existência de área de retrabalho - comparação por sobreposição digital de imagens de áreas de interesse com área de experimento de confirmação.
- (C) Comprovação de diferença de medição do sistema de medição manual (dados obtidos por [GOMES \(2010\)](#)) com a modelagem computacional proposta nesta pesquisa.
- (D) Análise de repetibilidade e reprodutibilidade do método proposto com método manual, diante análise de bloco padrão, confirmando e validando a modelagem proposta.

## 1.6 Organização do Texto

Esta tese está dividida em uma estrutura de cinco capítulos:

- **Capítulo 1:** a introdução desta pesquisada é descrita, composta pelas justificativas e relevâncias da mesma, o problema de pesquisa, objetivos, condições de contorno e contribuições.
- **Capítulo 2:** é apresentada a fundamentação teórica. Como este trabalho envolve interdisciplinaridade entre engenharia de produção e ciência da computação, a definição e fundamentação dos principais conceitos relativos a pesquisa e relevância estão presentes neste capítulo, assim como a revisão da literatura e o método de pesquisa utilizado.
- **Capítulo 3:** é apresentado os procedimentos metodológicos da pesquisa. O problema de pesquisa é destacado novamente, assim como as etapas definidas para a busca dos objetivos deste trabalho.

- **Capítulo 4:** o método experimental é aplicado para a extração de características dos corpos de prova, apresentando e discutindo simultaneamente a estratégia utilizada e os resultados obtidos.
- **Capítulo 5:** encerramento deste trabalho, com apresentação das conclusões, contribuições e sugestões para pesquisas futuras.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo possui como objetivo expor a fundamentação teórica desta pesquisa, apresentando os conceitos, técnicas e metodologias utilizadas; apresentando também trabalhos presentes na literatura. Em relação ao uso de visão computacional para extração de características de imagem digital de objetos de geometria irregular, a definição dos processos computacionais utilizados é relevante para auxiliar o entendimento dos desafios na área, assim como a gama de aplicações e as vantagens nesta abordagem. Em relação ao processo de soldagem de revestimento, a discussão é relevante para definir as características deste processo, identificando quais variáveis são relevantes no objeto de estudo abordado nesta pesquisa. Com foco na revisão da literatura, este capítulo também é destinado à busca de trabalhos na literatura identificando o interesse da comunidade científica. Desta forma, apresentando trabalhos que empregam a visão computacional no processo de extração de características de forma geral e diante processos de soldagem. Sendo então estes trabalhos relevantes ao tema e também ao objeto de estudo.

### 2.2 Visão Computacional

A visão computacional pode ser definida como a abstração computacional na identificação de objetos, padrões, expressões alusivas de forma mais próxima no qual um ser humano percebe sua realidade. Sendo interessante destacar as dificuldades diante as diversas variações de cor, geometria, sombra, reflexo, transparência que um objeto pode sofrer (AZEVEDO *et al.*, 2018).

Como humanos, é possível perceber o mundo tridimensional ao nosso redor com facilidade. Ao olhar para um vaso de flor, é possível verificar quão vívida a percepção do mundo tridimensional. É possível para um humano saudável detectar o tipo de formato e transparência de cada pétala apesar dos padrões de cor, luz e sombra que afeta toda uma planta, podendo identificar facilmente o que é parte da planta e o que é informação de fundo. Ao olhar uma foto de família, é possível para um humano identificar facilmente quantas pessoas estão na foto, e ter um palpite de qual é o humor da pessoa através da expressão facial apresentada (SZELISKI, 2010).

Técnicas matemáticas têm sido desenvolvidas na área de visão computacional para abstrair o padrão tridimensional e características dos objetos em imagem. Há então técnicas confiáveis para modelagem 3D de um ambiente, através de imagens parcialmente

sobrepostas (SZELISKI, 2010). Com o campo da inteligência artificial, foi possível desenvolver programas aptos a simular cognição, com o desenvolvimento da visão computacional ou visão artificial capaz de perceber visualmente o ambiente. É possível detectar movimento de uma pessoa em um ambiente com um fundo complexo. Dado um banco de dados de características de faces, é possível identificar pessoas em um conjunto de imagens (AZEVEDO *et al.*, 2018).

Dentro do escopo de visão computacional, temos então parte do problema de pesquisa deste trabalho. Primeiramente é interessante destacar as características da cor de um objeto, esta que sofre variação dependendo da incidência luminosa, podendo auxiliar no processo de captura de imagens digitais, definindo um contraste maior entre objetos distintos presentes na imagem; esta etapa abordada no tópico 2.2.1. Após o processo de captura de imagens, é interessante expor como esta é definida em um ambiente computacional, no caso, é uma matriz composta por tupla de valores, característica abordada no tópico 2.2.2. Com a fundamentação de como a imagem é definida em um ambiente computacional, é possível realizar a abstração de como estas podem ser processadas, qual espaço de cor pode ser utilizado, a possibilidade de utilização de paleta de cores, o algoritmo de suporte utilizado para a detecção de região de fronteiras e detecção de bordas e formas geométricas, além da apresentação do *framework* utilizado que proporciona o suporte nas principais rotinas de visão computacional utilizadas; definições presentes nos tópicos 2.2.3 - 2.2.8.

### 2.2.1 Cor

A cor é uma resposta perceptiva ao espectro visível da luz (intensidade da luz e comprimento de onda) refletida ou emitida por um objeto. Esse sinal de resposta é interagido no olho com a retina e depois é transmitido ao cérebro pelo nervo óptico, o que faz o ser humano atribuir cores a esse sinal. Portanto, a cor não é uma propriedade intrínseca do objeto, pois, se a fonte de luz é alterada, a cor do objeto também muda (MELÉNDEZ-MARTÍNEZ *et al.*, 2005).

A percepção da cor é um fenômeno muito complexo que depende da composição do objeto em seu ambiente de iluminação, das características dos olhos e do cérebro que percebem e dos ângulos de iluminação e visualização (WU; SUN, 2013).

### 2.2.2 Representação de uma imagem digital

O termo imagem é definido como uma função de intensidade luminosa bidirecional, ou seja, a cada ponto do espaço representado em duas dimensões  $(x, y)$  é associado uma intensidade luminosa  $f(x, y)$  finita e superior a zero (GONZALEZ; WOODS, 2009).

Apesar disso, a representação de uma imagem em computador necessita que a

imagem tenha uma quantidade de pontos com intensidade variando sobre uma faixa fixa de valores. Afim de obter a representação, deve-se digitalizar as coordenadas espaciais  $(x, y)$  e quantizar a amplitude  $f(x, y)$  de acordo com alguma representação. Ou seja, cada elemento da imagem tem um valor resultante da função  $f$  no respectivo ponto  $(x, y)$ , que corresponde ao seu tom ou cor (AZEVEDO *et al.*, 2018). Assim, a representação da imagem passa a ser uma simples matriz bidimensional  $x, y$  que pode ser representada na Função 2.1.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(0, 1) & f(0, 2) & \dots & f(0, y - 1) \\ f(1, 0) & f(1, 1) & f(1, 2) & \dots & f(1, y - 1) \\ f(2, 0) & f(2, 1) & f(2, 2) & \dots & f(2, y - 1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(x - 1, 0) & f(x - 1, 1) & f(x - 1, 2) & \dots & f(x - 1, y - 1) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

A denominação *pixel* (do inglês, *picture element*, elemento da figura) se refere a cada elemento da matriz. Geralmente, os *pixels* tem números inteiros como representação. Estas tuplas de valores podem corresponder ao valor do *pixel* na escala de cinza (*grayscale*), ou então, a tupla de valores que representam cores em diversas possibilidades de espaços de cor (HERNANDEZ-HERNANDEZ *et al.*, 2016). A maneira mais comum de representar cores diferentes é o padrão de escala de cor RGB (do inglês, Red-Green-Blue, Vermelho-Verde-Azul) (PEREZ-RODRIGUEZ; GOMEZ-GARCIA, 2019). Existem outras maneiras e outras representações para manipulação de imagens coloridas ou espaços de cor, as quais podemos citar: CMYK (do inglês, Cyan-Magent-Yellow-black, Ciano-Magenta-Amarelo-Preto), HSV (do inglês, Hue-Saturation-Value, Tonalidade-Saturação-Valor), Y’CbCr (que indicam as características de luminância, croma azul e croma vermelho).

### 2.2.3 Processamento de Imagens

Aplicações modernas de automação industrial e robótica dependem cada vez mais de técnicas de processamento de imagens. A comunidade de engenharia está experimentando um crescimento dramático na aplicação do processamento de imagens como uma ferramenta para realizar medições de precisão não intrusivas, navegação de robôs autônomos ou verificação confiável de processos de automação industrial. As técnicas de aquisição e processamento de imagens são familiares às ciências da física, computação, engenharia elétrica e mecânica há um tempo relativamente longo (KURKA; SALAZAR, 2019).

## 2.2.4 Espaço de cores

Quando o objeto manipulado é uma imagem colorida, existe a necessidade de uma representação lógica para as cores. Um espaço de cores é uma maneira de representar uma cor de uma forma computacional através de uma tupla de valores. Cada número dessa tupla corresponde a uma componente da cor. Alguns dos vários espaços de cor que foram desenvolvidos são detalhados a seguir.

### 2.2.4.1 Espaço de cores RGB

O espaço de cores RGB é a representação de luz mais utilizada em computação gráfica e divide o espectro de cores em três componentes: uma vermelha, uma verde e uma azul (GRANIER; HEIDRICH, 2003). A Figura 2.1 exemplifica as 3 cores com 100% de intensidade cada. Para a obtenção de outras cores através dessas componentes, a intensidade de cada uma delas é variada e os valores somados. A Figura 2.2 exemplifica as 3 componentes de cor em espaço cartesiano.

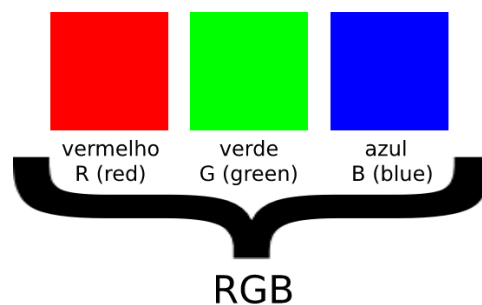


Figura 2.1 – Representação 3 componentes de cor do espaço de cores RGB

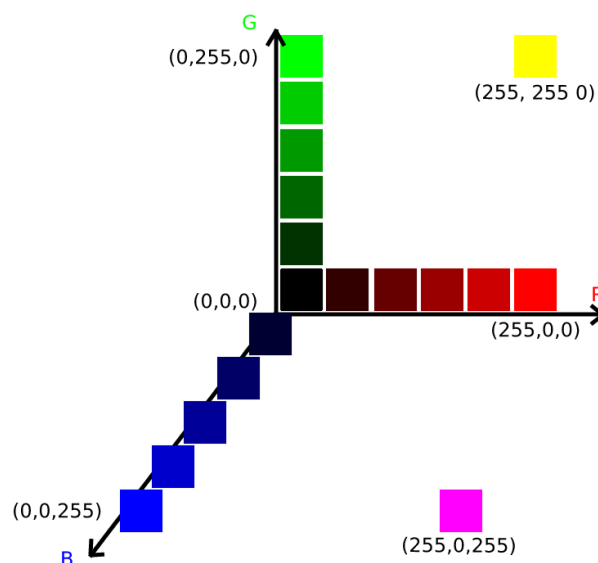


Figura 2.2 – Representação vetor que define saturação de cores no espaço de cores RGB

O espaço de cores RGBA é uma variação do espaço de cores RGB. A diferença entre os dois consiste na inclusão de uma quarta componente na representação das cores, chamada de alfa, que define o nível de transparência da cor, usada nas ocasiões em que imagens sejam formadas por sobreposição de outras imagens (RAFF *et al.*, 2003).

#### 2.2.4.2 Espaço de cores CMYK

Um outro espaço de cores existente é o CMYK. As cores utilizadas como componentes são ciano, magenta e amarelo. Além das componentes serem distintas das utilizadas no espaço de cores RGB, outra diferença estabelecida é a operação efetuada com as componentes para obtenção de outras cores: enquanto no espaço de cores RGB, os valores são somados, no CMYK os valores são subtraídos. A letra K da sigla, que representa a cor preta, que é usada para garantir uma melhor representação para *pixels* com as cores cinza ou preto, porém o preto não é considerado uma cor primária no espaço CMYK (DAHAT; CHAVAN, 2016).

#### 2.2.4.3 Espaço de cores HSV

O espaço de cores HSV é uma transformação do espaço de cores RGB. Ao invés de cores consideradas primárias, representa as cores pelas componentes de tonalidade, saturação e valor de intensidade luminosa (brilho). Seu uso é uma alternativa ao espaço de cores RGB. O espaço de cores HSV é mais comumente aplicado em ferramentas de processamento de imagem, pois permite uma mudança nos tons dos *pixels* de forma mais eficiente e conveniente do que variando tons de vermelho, verde e azul (LI *et al.*, 2019).

#### 2.2.4.4 Espaço de cores Y'CbCr

Y'CbCr é outro espaço de cores criado com o propósito de ser mais eficiente para transmissão de dados do que os outros espaços de cor. Ao se usar o espaço de cores RGB, uma variação de valor baixo em alguma das componentes pode resultar em uma grande alteração na cor resultante. Em um espaço Y'CbCr, uma das componentes é a equivalente digital da luminância (luma representada por Y'), a outra é o chroma azul (do inglês, *blue chroma*, representada por Cb) e chroma vermelho (do inglês, *red chroma*, representada por Cr). As duas últimas componentes desse espaço de cor são as diferenças das componentes azul e vermelho, do espaço de cores RGB, em relação à componente luma (GARZIA, 2013).

### 2.2.5 Paleta de cores

Como descrito, as imagens usualmente são representadas como uma matriz de *pixels*. No ponto de vista de estrutura de dados e armazenamento, esta técnica não se

mostra muito eficiente, ou seja, é possível utilizar de recursos computacionais afim de otimizar o armazenamento.

Uma característica encontrada na representação das imagens é que estas possuem uma paleta de cores (ou um conjunto de cores) que podem ser repetidas em diversas posições na matriz. Verificando esta tendência, foi possível verificar alguns métodos de otimização, visto que nem todas as cores do espectro de cores é utilizado. Assim, visando a otimização do armazenamento da imagem, é definido sumariamente uma paleta de cores referente a esta, definindo o conjunto de cores a serem utilizados na imagem. Em suma, esta paleta de cores é o subconjunto do espaço de cores conhecidas, no qual só contém as cores utilizadas na imagem. Para fins de utilização, a paleta de cores possui um índice específico para cada cor utilizada (CHUNG *et al.*, 2012).

### 2.2.6 Equalização do Histograma

As diferentes intensidades de luz captadas pelos *pixels* em uma imagem digital, devem ocupar preferencialmente toda a gama de níveis discretos, para obter a melhor qualidade de imagem. Neste sentido, as intensidades mínimas de luz de uma imagem devem ser idealmente associadas com o valor zero e as intensidades máximas de luz com o maior valor do mapeamento de alcance discreto. Uma faixa de intensidade de imagem igualmente distribuída garante um bom contraste de imagem. A equalização do histograma de um *pixel* que ocupa a posição  $(x, y)$ , com uma intensidade inicial associada  $I(x, y)$ , é dado pela Equação 2.2 (HAN *et al.*, 2011; KURKA; SALAZAR, 2019).

$$I_e(x, y) = (L - 1/N)C_f(I(x, y)) \quad (2.2)$$

A variável  $L$  representa o número de valores de intensidade possíveis,  $C_f(I)$  é a distribuição de frequência acumulada da intensidade de *pixel*  $I$  e  $N$  é o total de *pixels* da imagem. A distribuição de frequência cumulativa é a soma acumulada dos valores de histograma da imagem no intervalo  $[0, L - 1]$ . Em uma imagem de escala de cinza a equalização é feita diretamente, pois só há uma componente de cor na imagem. Nas imagens coloridas, a equalização é realizada de forma independente em cada componente de cor que compõe a imagem final, como por exemplo as três componentes do espaço de cores RGB (HAN *et al.*, 2011).

Cada coluna em um gráfico de histograma de uma imagem de escala de cinza representa o número de *pixels* que possuem o mesmo exato valor de cinza na imagem. A aplicação do método de equalização resulta a uma exaltação do contraste de uma imagem, por mapear os valores de escala de cinza dos *pixels* de forma que o valor resultante do histograma da imagem seja uniforme (GONZALEZ; WOODS, 2009).

### 2.2.7 Detecção de bordas e formas geométricas

No escopo de visão computacional, uma técnica que é muito utilizada na identificação de objetos e formas específicas é a de detecção de bordas. Com esta técnica, é possível determinar o contorno de um objeto, ou região de interesse (DING; GOSHTASBY, 2001). Desta forma, é possível manipular a imagem digitalmente afim de realizar uma extração de características, como as geométricas. A técnica de detecção de bordas é baseada na análise de mudança de intensidade do *pixel*, podendo determinar as possíveis regiões de fronteira de objetos na imagem (FUJIMOTO *et al.*, 2019).

Existem diversos algoritmos de detecção de bordas presentes na literatura, como o algoritmo de Canny, Kirsch, Prewitt, Roberts, Robinson, Sobel etc. Destes, um dos algoritmos mais populares no processamento digital de imagens para detecção de bordas/contornos é o Canny. Por ter resultados mais satisfatórios e confiáveis o algoritmo de Canny se tornou o critério básico para avaliação de outros algoritmos (MENG *et al.*, 2018).

No algoritmo de detecção de Canny, primeiramente é realizado uma cópia da imagem original para uma imagem em escala de cinza, caso a imagem original seja colorida. Outra cópia da imagem em escala de cinza é realizada, sendo esta submetida a equalização do histograma, em seguida esta é processada com um elemento suavizador para obter uma imagem desfocada que otimiza o processo de detecção de bordas, minimizando os ruídos. O elemento suavizador pode ser um filtro Gaussiano. A técnica faz a análise de mudanças horizontais, verticais e diagonais de intensidade do *pixel* na imagem suavizada em comparação com a imagem de escala de cinza original. As regiões da imagem com variações mais significativas na intensidade dos *pixels* são detectados como bordas/contornos (DING; GOSHTASBY, 2001; KURKA; SALAZAR, 2019).

### 2.2.8 Framework OpenCV

Na área de desenvolvimento de *software*, um *framework* possui por definição um conjunto de códigos já previamente elaborados provendo uma funcionalidade genérica para possível utilização em um conjunto de soluções específicas. As bibliotecas de *software* também possuem um conjunto de códigos de programação para prover funcionalidades, porém a diferença é que um *framework* já é estruturado levando em conta o fluxo de controle da aplicação.

A vantagem na utilização de um *framework* é levada em consideração pelo ganho de tempo de desenvolvimento nas aplicações. Como já possui diversos códigos de programação para soluções genéricas, um programador consegue ganhar bastante tempo de desenvolvimento aproveitando as funcionalidades e estruturando o *software* para uma funcionalidade específica.

No desenvolvimento do experimento computacional desta pesquisa, foi utilizado o *framework* de visão computacional chamado OpenCV (Open Source Computer Vision Library). Como descrito acima, um *framework* garante ganho de produtividade no desenvolvimento de aplicações para aplicação específica (extração de características da solda de revestimento, por exemplo) com um conjunto de funcionalidades abstratas (funções de visão computacional).

A OpenCV é um *framework* de visão computacional e aprendizado de máquina; possui licença BSD de código aberto e foi desenvolvida para prover uma infraestrutura para aplicações de visão computacional e para acelerar a utilização da percepção de máquina em produtos comerciais (OPENCV, 2019).

O conjunto de funções de suas bibliotecas possui mais de 2500 algoritmos otimizados, que inclui um conjunto compreensivo de algoritmos clássicos e do estado-da-arte de visão computacional e aprendizado de máquina. Tais algoritmos podem ser utilizados para detecção e reconhecimento de faces, identificação de objetos, classificar ação de humanos em vídeos, acompanhar movimentos, extrair modelos 3D de objetos, produzir nuvem de pontos 3D a partir de câmeras estéreo, agrupar imagens para produzir uma imagem resultante com uma resolução maior de toda a cena, procurar imagens semelhantes dentro de um banco de dados, remoção de olhos vermelhos resultante de fotos com flash ligado, acompanhar movimento dos olhos, reconhecer cenários para estabelecer marcadores de sobreposição para realidade aumentada, entre outros (OPENCV, 2019).

A comunidade de usuários e colaboradores da OpenCV é formada por mais de 47 milhões de pessoas, e o total de *downloads* do *framework* excede 18 milhões. A OpenCV é utilizada extensivamente em empresas, grupos de pesquisa e esferas governamentais (OPENCV, 2019).

Várias grandes empresas multinacionais também utilizam a OpenCV, como o Google, Yahoo, Microsoft, Intel, IBM, Sony, Honda, Toyota; assim como startups: Applied Minds, VideoSurf e Zeitera. A utilização da OpenCV varia desde agrupamento de imagens do Google Streetview, detecção de invasores em câmera de segurança, monitoração de equipamento de mineração na china, auxiliando deslocamento de robôs, detecção de afogamentos em piscinas, executando arte interativa, verificando escombros em pistas, inspecionando rótulos de produtos de fábricas e para rápida detecção de rostos (OPENCV, 2019).

O *framework* OpenCV possui suporte para várias linguagens de programação, como: C++, Python, Java e possui interface para MATLAB. Sendo possível utilizá-lo nos sistemas operacionais: Windows, Linux, Android e Mac OS (OPENCV, 2019).

## 2.3 Soldagem de Revestimento

O processo de soldagem de revestimento é definido como a adição de uma camada de metal sobre a superfície de outro metal. O objetivo desta abordagem pode ser diante uma dimensão específica desejada, propriedade resultante e/ou fatores econômicas (VARGHESE *et al.*, 2019). Desta forma, é possível citar como exemplos destas necessidades:

- Correção de objetos com desgaste ocorridos por força mecânica ou corrosão (PALANI; MURUGAN, 2006);
- Superfícies que necessitam de características especiais (HEJWOWSKI *et al.*, 2013);
- Adição de metal com propriedade que garanta prorrogação de vida útil de um objeto (COURBON *et al.*, 2019).

Os componentes industriais podem estar sujeitos a diversos tipos de desgaste, demandando manutenções frequentes. A extensão da vida útil de tais componentes pode resultar em economias significativas (LEVIN *et al.*, 1995; PALANI; MURUGAN, 2006).

A aplicação de soldagem pode ser utilizada com a finalidade de melhorar a resistência à corrosão, desgaste, altas temperaturas, melhora da dureza, correção dimensional ou para necessidades metalúrgicas específicas (VERMA; DAS, 2011).

Uma característica específica da soldagem de revestimento, perante à soldagem convencional é dada perante às variáveis de geometria desejada do cordão de solda.

Nas aplicações de soldagem convencional, as variáveis desejadas que podem diferir da soldagem de revestimento são:

- Alta penetração ( $P$ ) da solda no metal de base, visando garantir resistência da área soldada.
- Alta diluição ( $D$ ) - quando é desejado ter maior resistência de junção.

Na soldagem de revestimento, as variáveis desejadas são:

- Baixa penetração ( $P$ ) - não há necessidade de grande penetração, pois o objetivo é revestir o metal base.
- Extensa largura do cordão ( $W$ ) - quanto maior a largura do cordão, uma área mais extensa do metal base receberá recobrimento, necessitando um menor número de passes da solda, influenciando diretamente o tempo de soldagem, características da ZTA e economias no processo.

- Alto reforço ( $R$ ) - diretamente relacionado às características do metal de solda utilizado para garantir propriedades especiais ao processo resultante, como por exemplo, características anticorrosivas e possibilidade de usinagem afim de obter também acabamento desejado.
- Baixa diluição ( $D$ ) - como o processo necessita de baixa penetração, alto reforço e extensa largura do cordão, este também precisa ter uma baixa diluição, que é a razão entre a área de penetração com a área total da solda.

A diluição é representada pela razão da área de penetração ( $A_p$ ) diante a área total da solda ( $A_r + A_p$ ), como pode ser observada na Figura 2.3 e na Equação 2.3.

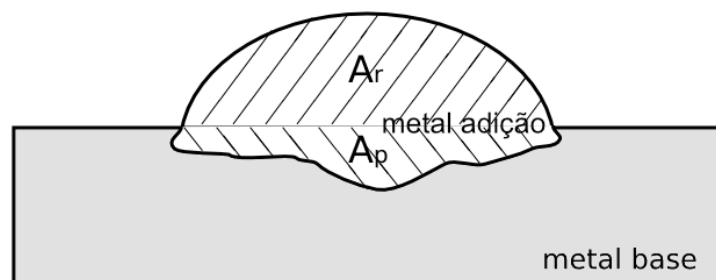


Figura 2.3 – Áreas necessárias para o cálculo da diluição

$$D = [A_p / (A_p + A_r)] \times 100 \quad (2.3)$$

Diante as características das variáveis desejadas da solda de revestimento, é possível observar que estas explicam a geometria final almejada. A Figura 2.4 exemplifica as características geométricas do processo. Com a necessidade de extensa largura do cordão, para que o revestimento permita recobrir maior área possível, com um menor número de passes, impactando também no tempo e economia financeira.

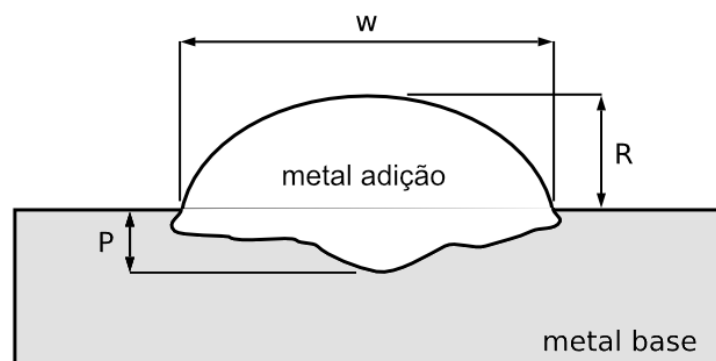


Figura 2.4 – Variáveis de geometria da solda de revestimento

Desta forma, conhecendo as principais necessidades geométricas da solda de revestimento, é possível descrever o processo, onde o revestimento ocorre a cada passe, de

forma que cada cordão seja depositado lateralmente ao anterior e estes podem ter determinado nível de sobreposição em suas fronteiras até que toda a área onde seja necessário o recobrimento seja revestida. É possível verificar tais etapas na Figura 2.5

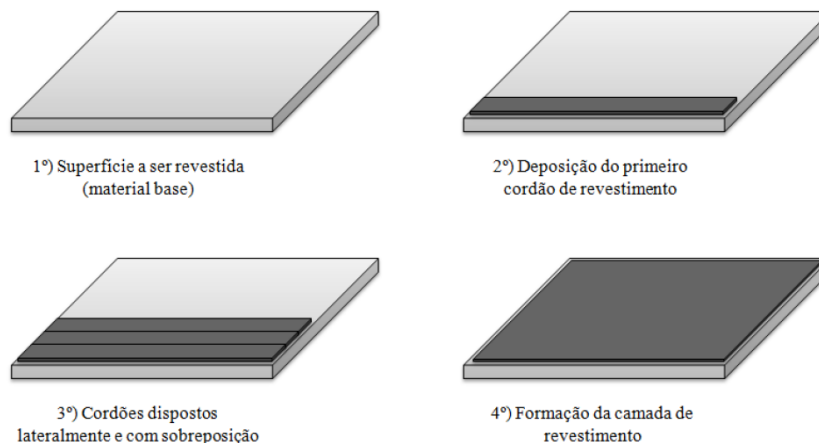


Figura 2.5 – Etapas do processo de soldagem de revestimento (GOMES, 2010)

### 2.3.1 Soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

Devido sua propriedade mecânica e resistência à corrosão, o aço inoxidável é utilizado de forma ampla em materiais estruturais em vários empreendimentos (CHANDRA *et al.*, 2012). A deposição de aço inoxidável em metais base de baixa liga, conhecido também como revestimento de sobreposição de solda de aço inoxidável, é amplamente utilizado para obter resultados de superfície resistentes a corrosão e para evitar falha prematura em metais base (CAO *et al.*, 2018).

A utilização do processo de soldagem de revestimento é principalmente por motivos econômicos. A criação de uma estrutura somente com o aço inoxidável é muitas vezes inviável, pois o custo é muito elevado comparado à utilização de aço carbono. Porém, o aço carbono não possui características anticorrosivas. Desta forma, ao utilizar o processo de soldagem de revestimento é possível ter um menor investimento financeiro em metais base de menor custo.

## 2.4 Repetitividade e reprodutividade do instrumento de medição

O estudo de repetitividade e reprodutividade do processo de medição é utilizado para medir as componentes de variação de uma análise do sistema medição. Este também é conhecido em sua tradução para o inglês como *Gage Repeatability and Reproducibility* que possui como sigla GR&R. Este estudo visa determinar se a variabilidade do processo monitorado é relativamente maior ou menor que a variabilidade presente no sistema de medição (PERUCHI *et al.*, 2012).

Os índices multivariados porcentagem de repetitividade de reprodutividade do sistema de medição ( $\%R\&R$ ) e o número de categorias distintas ( $ndc$ ) identificadas determinam se o sistema é aceitável ou inaceitável (AQUILA *et al.*, 2018). Desta forma, para análise dos valores  $\%R\&R$ :

- $\%R\&R < 10\%$ , sistema de medição aceitável.
- $10\% < \%R\&R < 30\%$ , dependendo da aplicação do sistema de medição, este pode ser considerado aceitável. Fatores como custo do dispositivo e custo de reparo também influenciam nesta decisão.
- $\%R\&R > 30\%$ , sistema de medição inaceitável.

E para análise do  $ndc$ :

- $ndc \geq 5$ , valor recomendado.
- $ndc < 2$ , sistema de medição inaceitável, por não ter capacidade de monitorar o processo.

### 2.4.1 GR&R multivariado com análise de componentes principais ponderadas

A técnica estatística de Análise de Componentes Principais (PCA) é um método válido para analisar múltiplas características de qualidade correlacionadas em um estudo GR&R, sendo também uma ferramenta eficiente para resumir padrões comuns de variação entre variáveis analisadas (PERUCHI *et al.*, 2012 e 2020). De acordo com PAIVA *et al.* (2007 e 2014) a técnica estatística de PCA é capaz de reter informações significativas em seus primeiros eixos, sendo que nos últimos eixos representam a variação associada aos erros de arredondamento, medição e experimental.

A combinação linear de  $\ell$  de  $q$  variáveis aleatórias  $Y_1, Y_2, \dots, Y_q$  definem algebricamente uma PCA. Na visão geométrica, tais combinações representam um novo sistema de coordenadas que são obtidas durante a rotação de um sistema original (JOHNSON; WICHERN, 2007; PERUCHI *et al.*, 2012). A direção de máximo é representada pelas variáveis  $Y_1, Y_2, \dots, Y_q$  das coordenadas dos eixos. A suposição de normalidade multivariada não é requerida no desenvolvimento das componentes principais e estas são não correlacionadas e dependem somente da matriz de correlação  $\mathbf{R}$  ou da matriz de covariância  $\Sigma$  das variáveis  $Y_1, Y_2, \dots, Y_q$ . A Equação 2.4 demonstra o  $i$ -ésimo componente principal e como este pode ser obtido, visto que a matriz de covariância possui pares de autovalores-autovetores  $(\lambda_1, e_1), (\lambda_2, e_2), \dots, \geq (\lambda_q, e_q)$ , onde  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_q \geq 0$ .

$$PC_i = e_i^t Y = e_{1i}Y_1 + e_{2i}Y_2 + e_{3i}Y_3 + \dots + e_{qi}Y_q \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (2.4)$$

$$\text{Maximizar: } \text{Var}[e_i^t Y]$$

$$\text{Sujeito a: } e_i^t e_i = 1$$

$$\text{Cov}[e_i^t Y, e_k^t Y]$$

As variáveis de entrada originais do processo de medição podem ser substituídas pelos escores de componentes principais, que são uma combinação linear não correlacionada. A Equação 2.5 apresenta como obter os escores de cada componente principal, sendo  $\mathbf{E}$  a matriz de autovetores e  $\mathbf{Z}$  a matriz de dados padronizados do conjunto multivariado (JOHNSON; WICHERN, 2007; LOPES *et al.*, 2013).

$$PC_{\text{escore}} = \mathbf{Z}^T \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \frac{y_{11}-\hat{y}_1}{\sqrt{S_{11}}} & \frac{y_{21}-\hat{y}_2}{\sqrt{S_{22}}} & \dots & \frac{y_{q1}-\hat{y}_q}{\sqrt{S_{qq}}} \\ \frac{y_{12}-\hat{y}_1}{\sqrt{S_{11}}} & \frac{y_{22}-\hat{y}_2}{\sqrt{S_{22}}} & \dots & \frac{y_{q2}-\hat{y}_q}{\sqrt{S_{qq}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{y_{1n}-\hat{y}_1}{\sqrt{S_{11}}} & \frac{y_{2n}-\hat{y}_2}{\sqrt{S_{22}}} & \dots & \frac{y_{qn}-\hat{y}_q}{\sqrt{S_{qq}}} \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1q} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{1q} & e_{2q} & \dots & e_{qq} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Sendo  $r$  a variável referente as réplicas,  $o$  para operadores,  $p$  para as peças e  $q$  para as características de qualidade, temos a Equação 2.6 que representa um modelo completo para estudo GR&R multivariado (PERUCHI *et al.*, 2020).

$$PC_n = \mu + \alpha_i + \beta_j(\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (2.6)$$

A análise individual das componentes principais pode não ser adequada, principalmente dependendo da baixa correlação das respostas; é interessante então analisar mais de uma componente, para garantir uma explicação satisfatória para todo o conjunto de dados. Porém, caso as respostas apresentem correlações altas, com a explicação da primeira componente próxima a 90%, a análise por PCA garante uma explicação adequada para a variabilidade do sistema de medição. Uma alternativa mais elegante e eficiente ao problema é utilizar a análise ponderada das componentes principais proposta por PERUCHI *et al.* (2012) para o estudo de GR&R multivariado. Nesta abordagem, as componentes principais são ponderadas com os valores de seus respectivos autovalores. Desta forma, o modelo proposto é apresentado diante a Equação 2.7.

$$CPP = \mu + \alpha_i + \beta_j(\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\text{onde: } CPP = \sum_{i=1}^q [\lambda_i(PC_i)] = \lambda_1 PC_1 + \lambda_2 PC_2 + \dots + \lambda_q PC_q$$

Na Equação 2.7 temos  $\mu$  como uma variável constante e as variáveis aleatórias normais independentes  $\alpha_i + \beta_j(\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$  com média zero e variância  $\sigma_\alpha^2, \sigma_\beta^2, \sigma_{\alpha\beta}^2$  e  $\sigma_\epsilon^2$ . PERUCHI *et al.* (2012) afirma que todos os eixos de PCA podem ser utilizados para estimar o conjunto de dados, visto a estratégia de ponderação adotada, não sendo necessário utilizar um número menor de eixos, seguindo as regras propostas por JOHNSON; WICHERN (2007). Assim, uma das grandes vantagens do método é utilizar todas as informações disponíveis dos escores, já que devido a ponderação, todas estas podem ser utilizadas.

Nas Equações 2.8-2.16 é possível verificar as componentes de variação de repetitividade ( $\hat{\sigma}_{repetitividade}^2$ ), reprodutividade ( $\hat{\sigma}_{reprodutividade}^2$ ), processo ( $\hat{\sigma}_P^2$ ), sistema de medição ( $\hat{\sigma}_{SM}^2$ ) e variação total ( $\hat{\sigma}_T^2$ ) (ARAUJO *et al.*, 2019). As variáveis de média quadrática são representadas por:  $MSP$  para o fator peça,  $MSO$  operador,  $MSPO$  para interação e para o termo de erro  $MSE$ .

$$\hat{\sigma}_{repetitividade}^2 = \hat{\sigma}_\epsilon^2 = MSE \quad (2.8)$$

$$\hat{\sigma}_{reprodutividade}^2 = \hat{\sigma}_\beta^2 + \hat{\sigma}_{\alpha\beta}^2 = \frac{MSP - MSPO}{pr} + \frac{MSPO - MSE}{r} \quad (2.9)$$

$$\hat{\sigma}_P^2 = \frac{MSP - MSPO}{or} \quad (2.10)$$

$$\hat{\sigma}_{SM}^2 = \hat{\sigma}_{repetitividade}^2 + \hat{\sigma}_{reprodutividade}^2 \quad (2.11)$$

$$\hat{\sigma}_T^2 = \hat{\sigma}_P^2 + \hat{\sigma}_{SM}^2 \quad (2.12)$$

Porém, se o efeito de interação não for significativo, o modelo pode ser simplificado para a Equação 2.13. Sendo então possível calcular as componentes de variação do estudo GR&R através das Equações 2.13-2.16.

$$CPP = \mu + \alpha_i + \beta_j + \epsilon_{ijk} \quad (2.13)$$

$$\hat{\sigma}_P^2 = \frac{MSP - MSE}{or} \quad (2.14)$$

$$\hat{\sigma}_{SM}^2 = \hat{\sigma}_{repetitividade}^2 + \hat{\sigma}_{reprodutividade}^2 \quad (2.15)$$

$$\hat{\sigma}_T^2 = \hat{\sigma}_P^2 + \hat{\sigma}_{SM}^2 \quad (2.16)$$

E através das Equações 2.17 e 2.18 é possível obter os índices de avaliação do sistema de medição: %R&R e ndc.

$$\%R\&R = \left( \frac{\hat{\sigma}_{SM}}{\hat{\sigma}_T} \right) 100\% \quad (2.17)$$

$$ndc = \sqrt{(2)} \left( \frac{\hat{\sigma}_P}{\hat{\sigma}_{SM}} \right) \quad (2.18)$$

## 2.5 Revisão da Literatura

### 2.5.1 Objetivos e critérios de busca

No processo de elaboração da revisão da literatura, foram utilizadas 3 bases de pesquisa de periódicos: as bases da Scopus, ScienceDirect e Web of Science. Nesta primeira etapa, foram relacionadas as principais palavras-chave ligadas a esta pesquisa, visando uma busca quantitativa no volume de artigos científicos disponíveis, para justificar de uma forma geral o interesse destas áreas na comunidade científica. Os termos utilizados na pesquisa inicialmente foram:

- computer vision;
- feature extraction;
- measurement.

Neste contexto, esta busca mais abrangente das palavras visa encontrar um universo maior de trabalhos, pois é uma busca independente de cada termo. Os filtros de busca aplicados foram:

- artigos de revistas;
- idioma inglês;
- relevantes ao tópico, título, palavras-chave ou resumo.

Sendo assim, a *string* de busca *booleana* utilizada para a pesquisa tem o padrão: TITULO-RESUMO-TOPICO-PALAVRAS-CHAVE (**TERMO**) E TIPODOCUMENTO (**ARTIGO**) E (LIMITADO-A (IDIOMA, "INGLÊS")).

A Tabela 2.1 evidencia os resultados em volume de artigos desta busca. É possível verificar muitas contribuições nos termos pesquisados; evidenciando que tais termos/processos são muito utilizados, tendo certo interesse na comunidade científica. Um destaque especial ao volume do termo de pesquisa referente as características de medição de objetos, que é o foco primordial de metodologia computacional proposta neste trabalho.

Tabela 2.1 – Volume de publicações total de palavras-chave nas bases científicas selecionadas

Palavras-chave	Volume Publicações		
	ScienceDirect	Scopus	Web of Science
computer vision	125.341	60.566	41.262
feature extraction	217.623	83.804	43.948
measurement	3.811.680	3.462.739	2.261.392

Em seguida, é interessante realizar tal busca de visualização do volume de publicação entre uma janela de tempo de 2009 até 2019, como justificativa, restringir o volume de artigos buscados e evidenciar as pesquisas destas áreas ao longo dos últimos anos, sendo possível verificar tais dados da Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Volume de publicações por palavras-chave nas bases científicas selecionadas no período de 2009 até 2019

Palavras-chave	Volume Publicações		
	ScienceDirect	Scopus	Web of Science
computer vision	65.827	31.699	23.994
feature extraction	126.248	56.160	32.844
measurement	313.670	1.485.778	1.150.749

Neste caso, a *string* de busca *booleana* utilizada para a pesquisa tem o padrão: TITULO-RESUMO-TOPICO-PALAVRAS-CHAVE (**TERMO**) E TIPODOCUMENTO (**ARTIGO**) E ANOPUBLICACAO > 2008 E ANOPUBLICACAO < 2020 (LIMITADO-A (IDIOMA, "INGLÊS")).

Analisando o volume de publicações dos termos por ano, de forma independente, foi possível verificar uma constante de crescimento, indicando então o interesse da comunidade científica, como é possível verificar na Figura 2.6.

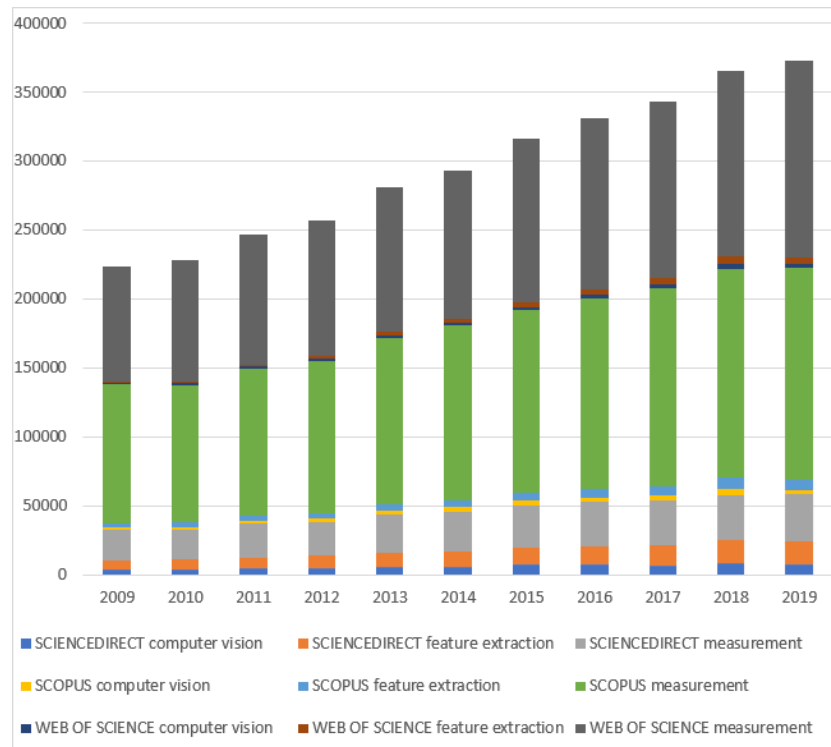


Figura 2.6 – Evolução do volume de publicação no período de 2009-2019

Um ponto pertinente, é verificar a relevância dos termos de pesquisa quando estes são buscados em conjunto. Para verificar então, se há trabalhos relacionados ao tema desta pesquisa. Analisando os resultados presentes na Tabela 2.3 foi verificado um total de 227 artigos encontrados. Destes, uma amostra foi utilizada para apresentar as principais aplicações de visão computacional juntamente com extração de características de imagens de objetos para auxílio no processo de medição. Na seção 2.5.1.1 é possível verificar um conjunto das principais contribuições de tais pesquisas científicas da área.

Tabela 2.3 – Volume de publicações das palavras-chave em conjunto nas bases científicas selecionadas no período de 2009-2019

Palavras-chave	Volume Publicações		
	Science Direct	Scopus	Web of Science
computer vision, feature extraction, measurement	16	155	56

Para esta busca, a *string booleana* utilizada para a pesquisa tem o padrão: TITULO-RESUMO-TOPICO-PALAVRAS-CHAVE (**TERMO-1, E ..., TERMO-N**) E TIPO-DOCUMENTO (**ARTIGO**) E ANOPUBLICACAO > **2008** E ANOPUBLICACAO < **2020** (LIMITADO-A (IDIOMA, "INGLÊS")).

Complementando a busca de artigos realizada, uma busca específica ao processo de medição com visão computacional relativa ao processo e/ou objeto de estudo também foi realizada, verificando o volume de contribuições pertinentes na área. As palavras-chave de pesquisa utilizadas foram:

- computer vision, weld bead geometry
- computer vision, feature extraction, cross-section geometry, weld bead
- machine vision, weld bead geometry
- machine vision, feature extraction, cross-section geometry, weld bead

Nesta etapa de busca, a *string booleana* utilizada para cada pesquisa de conjunto de termos tem o padrão: TITULO-RESUMO-TOPICO-PALAVRAS-CHAVE (**TERMO-1, E ..., TERMO-N**) E TIPODOCUMENTO (**ARTIGO**) E ANOPUBLICACAO > **2008** E ANOPUBLICACAO < **2020** (LIMITADO-A (IDIOMA, "INGLÊS")).

Realizando esta junção de resultados de pesquisa, foi possível encontrar artigos mais específicos ligados ao objeto de estudo desta pesquisa. A Tabela 2.4 mostra a soma dos volumes de publicações nas 3 bases selecionadas no período de 2009-2019. E a Figura 2.7 realça tais publicações por ano.

Tabela 2.4 – Volume de publicações das junções de palavras-chave nas bases científicas selecionadas no período de 2009 até 2019

Palavras-chave	Publicações
computer vision, weld bead geometry	91
computer vision, feature extraction, cross-section geometry, weld bead	6
machine vision, weld bead geometry	131
machine vision, feature extraction, cross-section geometry, weld bead	13

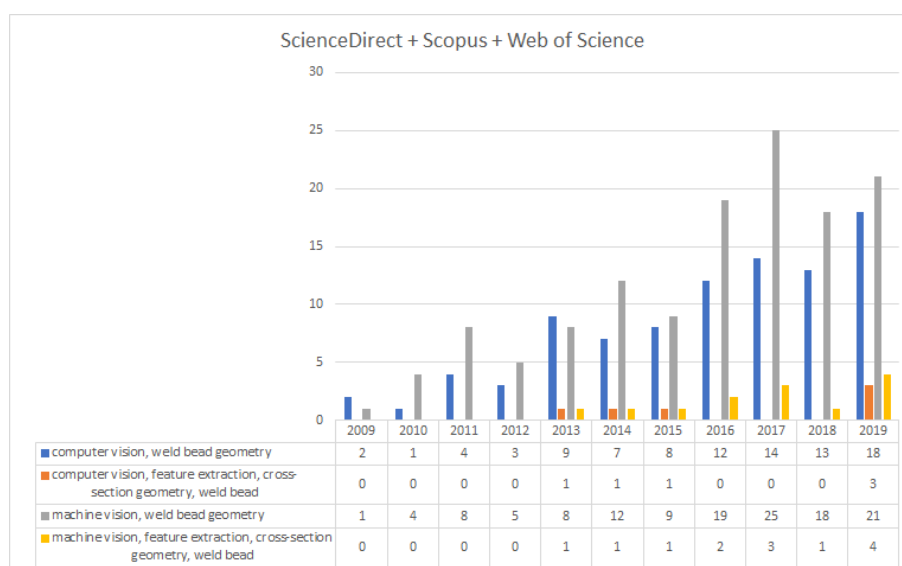


Figura 2.7 – Resultados de volume de publicações das junções de palavras-chave ao longo do período de 2009-2019.

Após realização da busca com filtros ajustados à junção de palavras-chave, um total de 241 artigos foram selecionados.

Realizando a análise dos artigos selecionados, foi possível identificar artigos redundantes, presentes em mais de uma base de pesquisa; artigos não disponíveis para *download* na base de pesquisa e artigos que não estavam disponíveis para *download* por não ter convênio com os periódicos da CAPES, sendo necessária realização de pagamento. Foi perceptível também que as buscas na base de dados da Science Direct para a junção de várias palavras-chave retornavam muitos artigos que não possuíam relevância à pesquisa. Um refinamento realizado utilizando análise do título e resumo foi necessário para selecionar uma amostra dos principais artigos que serão analisados na seção [2.5.1.2](#).

## 2.5.1.1 Seleção de trabalhos quanto à relevância ao tema da pesquisa

É possível verificar no Quadro 2.1 um resumo de pesquisas relevantes ao tema e aplicações práticas em diversos setores.

Quadro 2.1 – Visão geral das pesquisas com relevância ao tema da pesquisa

Aplicação no Setor	Aplicação / Características Monitoradas	Método	Pesquisa
Geral	Cálculo de distância entre pontos	Identificação de pontos através de fonte de luz	MURN; PEČEK (1990)
	Diferentes texturas	Segmentação e identificação de texturas	HOANG <i>et al.</i> (2005)
Meio ambiente	Deteção e medição incêndios florestais	Análise de variação de cor	TOULOUSE <i>et al.</i> (2017)
Indústria Intermediária	Medição em processos de fabricação	Identificação e medição produto	ASOUDEGI (1992)
	Análise de características geométricas do produto	Identificação e medição produto	GADELMAWLA (2011)
	Padrão texturas para usinagem microscópica	Identificação padrão texturas	ZHAO <i>et al.</i> (2019)
Indústria de bens de consumo	Desbaste e acabamento em fábrica de sapatos	Identificação e medição	HU <i>et al.</i> (2007)
Indústria Alimentícia	Comprimento dos peixes	Identificação e medição produto	STRACHAN (1993)
	Comprimento e espécie do peixe	Identificação, classificação e medição produto	WHITE <i>et al.</i> (2006)
	Requeijão e soro de leite	Análise de variação de cor	EVERARD <i>et al.</i> (2007)
	Qualidade de alimentos embalados	Análise de variação de cor	PANDIT <i>et al.</i> (2007)
	Qualidade de carne suína	Análise de variação de cor e textura	SUN <i>et al.</i> (2018)
	Qualidade de carne de aves	Análise de variação de cor	BARBIN <i>et al.</i> (2016)
	Qualidade de carne suína, bovina e aves	Análise de variação de cor	GIROLAMI <i>et al.</i> (2013)
	Método não destrutivo na análise de volume de produção	Identificação e medição produto	SISWANTORO <i>et al.</i> (2013)

A pesquisa de MURN; PEČEK (1990) no início da década de 90 apresenta o potencial de sistema de medição sem contato utilizando visão computacional. O sistema proposto utilizando sensores CCD, para cálculo de distância entre pontos predefinidos marcados por uma fonte de luz. O autor afirma que o sistema proposto é comparável a um teodolito eletrônico eficiente para medições de curta distância.

ASOUDEGI (1992) aborda a importância da utilização de ferramentas de visão computacional em sistemas automatizados de fabricação e examina as possibilidades de medição da circularidade em tempo real, tanto analítica quanto experimentalmente. O artigo é interessante, pois já aborda a grande expectativa da visão computacional no processo de fabricação e empreendimentos em geral; sendo um artigo do início da década de 90.

STRACHAN (1993) descreve em sua pesquisa uma máquina capaz de medir o comprimento de peixes utilizando visão computacional. O erro no processo de medição calculado é de 1% relevantes ao comprimento dos peixes. Se não há orientação no posicionamento dos peixes durante o processo de medição o erro aumenta para 3%. O sistema proposto pode medir peixes eviscerados e flexionados a um fluxo de 1 peixe por segundo. Nesta nova pesquisa de WHITE *et al.* (2006), juntamente com a participação de novos autores, há a descrição de um novo projeto para medir e identificar diferentes espécies de peixes. Os peixes são deslocados ao longo de uma esteira transportadora e monitorados por uma câmera digital. Utilizando visão computacional e algoritmos de processamento de imagens, foi possível identificar se o peixe é do tipo redondo ou chato com 100% de precisão. É possível também medir o comprimento do peixe com até 99,8% de confiabilidade na classificação para sete tipos de espécies de peixes programadas. Os autores apontam o potencial da pesquisa se acoplada em navios comerciais e de pesquisa em campo. A capacidade de processamento de peixes é de 30.000/h.

HOANG *et al.* (2005) afirma que na área de visão computacional a medição de propriedades da imagem, como as texturas e cores presentes, são essenciais. Na pesquisa desenvolvida, é proposto uma modelagem capaz de medir a presença de diferentes texturas em imagens coloridas. O desempenho do algoritmo proposto é ilustrado com a segmentação de diferentes texturas coloridas. Como conclusão da pesquisa, o algoritmo mostra ser preciso na captura das texturas, o método também é eficiente em imagens em escala de cinza.

Na pesquisa de EVERARD *et al.* (2007), a visão computacional é utilizada no processo de fabricação de queijo. As características ópticas do queijo em produção são monitoradas. Dois níveis de pH do leite são monitorados (pH 6 e 6,5) e também duas velocidades de agitação (12,1 e 27,2 rpm). Os parâmetros ópticos do queijo são monitorados variando os níveis de pH e rotação do processo. Os resultados da pesquisa mostraram que a utilização do processo de monitoramento e medição por variação de cor com auxílio

de visão computacional tem potencial para monitorar o processo de produção. Durante o processo de separação de fases (requeijão e soro) ambas as fases são facilmente identificadas por meio da diferença de cores. As variáveis importantes do processo (umidade, sólidos totais no soro do leite e rendimento de soro do leite) foram correlacionadas de forma significativa com as características de cores obtidas pelo processo de medição da variação de cor.

A pesquisa de [HU \*et al.\* \(2007\)](#) é focada no desenvolvimento de um sistema utilizando tecnologia de visão computacional aplicado ao processo de medição da parte superior de sapatos. Este sistema auxilia um robô industrial a executar acabamento por desbaste automático nas bordas do contorno superior do sapato. Desta forma, a força de união da parte superior e inferior é melhorada. Esta pesquisa possui desafios devido ao contorno específico e as irregularidades de borda da parte superior do sapato que dificulta a definição com segurança do caminho de desbaste. Os experimentos realizados na pesquisa demonstraram resultados robustos e consistentes para a solução desejada.

A pesquisa realizada por [PANDIT \*et al.\* \(2007\)](#) se baseia no crescente aumento da conscientização e sofisticação dos consumidores e as expectativas destes na aquisição de produtos alimentícios de qualidade. Desta forma, o monitoramento de qualidade também é necessário. A pesquisa aborda então o monitoramento de alimentos embalados após serem esterilizados utilizando micro-ondas. É utilizado um marcador químico sensível ao calor para servir de corante e visão computacional para determinar os padrões de aquecimento de bandejas de alimento. Os resultados da pesquisa evidenciaram que a combinação da visão computacional, juntamente com a estratégia de utilização do marcador químico mostrou eficiente para o estudo de localização de pontos de variação de temperatura nas bandejas de alimento após esterilização com micro-ondas.

No trabalho desenvolvido por [GADELMAWLA \(2011\)](#) a visão computacional também é uma forte aliada no processo de medição. O processo de medição com precisão desempenha um papel relevante na inspeção de engrenagens de acordo com o autor. E os métodos mais comuns utilizados na atualidade ou demandam de muito recurso de tempo ou de investimento monetário. Outro ponto importante levantado é que nenhum outro método de medição disponível tem capacidade de medir com precisão todas as características da engrenagem minimizando o recurso de tempo necessário nesta tarefa. Desta forma, o objetivo primordial do trabalho é o desenvolvimento de um software para analisar as imagens capturadas das engrenagens e executar os processos de medição e inspeção. Durante o processo de calibragem do software, foram utilizadas 2 engrenagens de tamanhos conhecidos comparando os resultados obtidos. As diferenças máximas entre os parâmetros calculados e os valores reais foram de  $\pm 0,101$  mm para uma engrenagem de dentes retos com 156 mm de diâmetro externo.

Na pesquisa de [GIROLAMI \*et al.\* \(2013\)](#) o objeto de estudo foram as carnes de

maneira geral, como a bovina, de aves e suína. O objetivo é também no foco de monitoramento da qualidade das carnes de forma automatizada através de auxílio de um sistema de visão computacional. Um ponto interessante na pesquisa é quão fidedigno são as cores apresentadas pelo computador, diante as cores reais observadas pela equipe de qualidade e inspeção. Pois mesmo em um ambiente controlado de iluminação, as cores presentes na imagem podem não transmitir as cores reais do alimento. Outro ponto é diante a característica das cores apresentadas no monitor, pois dependendo da qualidade deste equipamento, também poderia alterar as características da cor. Esta etapa também é importante, visto a validação manual do setup do sistema de visão computacional automatizado. Os participantes convidados para testar a qualidade das cores apresentadas pelo equipamento, comparado com as cores reais dos alimentos, confirmaram que as cores apresentadas eram muito similares. Como resultados, os pesquisadores confirmaram que as características de cores avaliadas pelo sistema de visão computacional são mais próximas das cores reais dos alimentos, comparados aos testes usuais do mercado baseados em colorímetro.

[SISWANTORO et al. \(2013\)](#) realçam a importância da indústria alimentícia na atualidade e a necessidade de processamento de uma grande quantidade de produtos. Neste aspecto, o volume dos produtos diante o processo de produção necessita ser mensurado. De forma tradicional, o volume pode ser medido utilizando o princípio de Arquimedes, pelo método de deslocamento de água; porém a literatura informa que tal método é impreciso e também considerado destrutivo. O objetivo então da pesquisa, é utilizar a visão computacional como um método não destrutivo e preciso no processo de medição de volume de produtos alimentícios e aplicação da mesma em linhas de produção. A metodologia proposta conta tanto ferramentas de *software*, quanto de *hardware* para cumprir o objetivo proposto.

A carne de aves precisa ser monitorada para a garantia da qualidade do produto e através da sua cor também é possível verificar o bem-estar do animal no período que antecede o abate. Como as carnes são produtos perecíveis e que podem sofrer facilmente contaminação por bactérias, é necessário um sistema de monitoramento sem contato. Desta forma, na pesquisa de [BARBIN et al. \(2016\)](#), os autores utilizaram um sistema de visão computacional como ferramenta para o processo de medição de cores das carnes de aves, sobretudo o peito de frango em comparação com medidas de referência analítica. Como resultados, afirmaram que a abordagem foi bem-sucedida, até mesmo capaz de evitar *pixels* com pouca informação por conta de reflexão, utilizando um ambiente controlado de normalização da iluminação. Foi encontrada correlação aceitável entre a estrutura proposta e as medidas de cor captadas da carne de frango, mostrando que a ferramenta é útil para avaliação rápida da qualidade, sobretudo em plantas industriais de processamento de carne em larga escala.

O trabalho de [TOULOUSE et al. \(2017\)](#) envolveu um esforço conjunto para criar um banco de dados aberto e consistente de imagens de incêndios florestais. Como justificativa, os autores destacaram o grande apoio que a visão computacional proporcionou na última década para detecção e medição de incêndios florestais. Com este banco de dados é possível calibrar adequadamente a detecção de *pixel* que identifica o fogo, pois determinará a precisão do processamento das imagens de detecção de incêndios. Com esta base de dados disponível, é possível que outros pesquisadores se beneficiem no desenvolvimento e aprimoramento de novos algoritmos para detecção de incêndios. E um grande número de imagens em banco de dados aberto favorece o desenvolvimento de pesquisa na área. Esta questão é abordada com a apresentação do banco de dados e exemplos de uso, que contém imagens e também vídeos com anotações quadro a quadro sobre os incêndios.

[SUN et al. \(2018\)](#) realizaram sua pesquisa também no ramo alimentício. O objeto de estudo é referente a carne suína, especificamente o corte do lombo suíno. O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema de visão computacional para verificar características da carne suína e definir parâmetros de qualidade para a mesma. Um modelo de previsão também foi utilizado para determinar a relação de cor da carne suína e os níveis de qualidade. De acordo com os autores os modelos de previsão foram satisfatórios para o objetivo da pesquisa e a visão computacional foi uma ferramenta eficaz para definição e análise de cor e textura da carne suína.

A pesquisa de [ZHAO et al. \(2019\)](#) é voltada a utilização de visão computacional para processo de medição com precisão em objetos visualizados por microscópio. Os desafios nestes processos são devidos as características das texturas dos objetos vistos com ampliação microscópica e à baixa resolução de reconhecimentos de padrões. Os autores também afirmam que a visão computacional não tem sido amplamente utilizada neste tipo de processo. Como objetivo, tem o posicionamento de precisão dos objetos para usinagem de diamante de ultra precisão, para ter superfícies funcionais e controle por coordenadas polares. Foram realizados experimentos de simulação, para detecção de orientação e resolução de reconhecimento de padrões e os resultados mostram que uma microestrutura polar pode atingir uma resolução de 9,35 nm, capaz de fornecer uma nova precisão nanométrica utilizando os recursos de visão computacional.

#### 2.5.1.2 Seleção de trabalhos quanto à relevância ao tema e objeto de estudo da pesquisa

[CHEN et al. \(2009\)](#) também afirma a necessidade de monitoramento *on-line* do processo de solda, sobretudo na soldagem de controle robótico. Uma lacuna pra ser preenchida nesta área são métodos de aquisição de características durante o processo visando ajuste em tempo real. Na pesquisa realizada, o objetivo principal é abordar novas técnicas no processo de aquisição de dados de *feedback* do processo de solda, principalmente para garantir controle da variável de penetração e também da geometria desejada. Foi

desenvolvido um novo sistema de gerenciamento de solda computadorizado, utilizando uma câmera instalada para suprir características do processo. Para o cálculo da variável de penetração que não é visível pela câmera com visão da superfície do processo, uma rede neural é proposta, utilizando os dados de largura da solda depositada. O algoritmo então utilizado fornece um processamento robusto em tempo real a partir das imagens obtidas, para garantir a aquisição de dados de *feedback* do processo. Foi então realizado um experimento para verificar a eficácia do sistema no processo de soldagem de arco, com resultados satisfatórios. A Figura 2.8 exemplifica o resumo gráfico do fluxo de informação do trabalho desenvolvido.

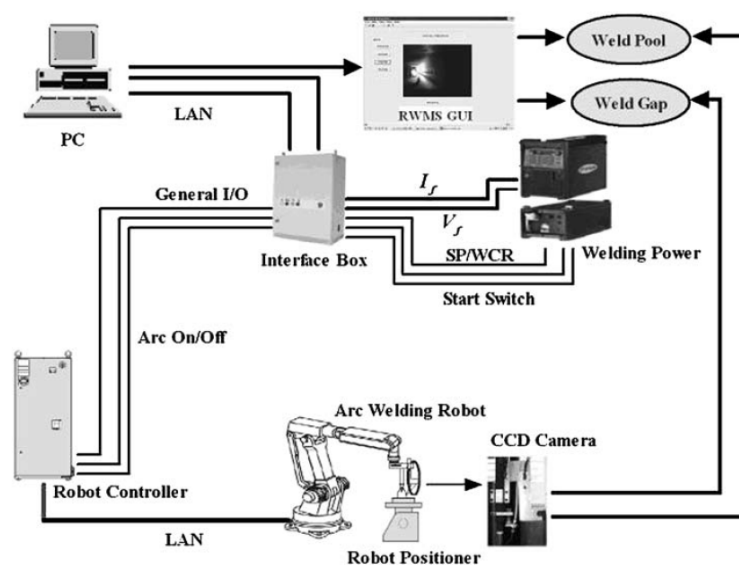


Figura 2.8 – Resumo gráfico do processo proposto por CHEN *et al.*'s (2009)

No trabalho de LIU (2013) estes já dispunham de um sistema de medição tridimensional em tempo real da superfície do processo de soldagem de arco de gás de tungstênio, utilizando visão computacional. As características geométricas extraídas deste sistema são a largura, comprimento e convexidade da superfície de solda. Para o cálculo da penetração foi utilizado um modelo de previsão utilizando os dados extraídos pelo sistema de visão computacional. Porém, uma variável do processo que impacta diretamente a penetração é a corrente de soldagem. Desta forma, uma pergunta científica que impulsionou a pesquisa é se é possível utilizar os mesmos modelos de previsão das variáveis extraídas pelo sistema de medição, variando a corrente, e qual impacto esta variação causa no processo. Visando então buscar tais respostas, experimentos variando a corrente de soldagem foram realizados e os dados característicos do processo resultante foram adquiridos. Como resultados, foi possível verificar correlação não linear da largura do fim do cordão com as variáveis adquiridas pelo sistema de visão computacional.

XIONG *et al.* (2013) ressaltam a importância das tecnologias de fabricação rápida, principalmente diante a redução de desperdício. Neste contexto, a pesquisa é aplicada

no processo de solda de arco a gás, para fabricação rápida. A técnica utiliza visão computacional no monitoramento *on-line* das características do cordão de solda, podendo alterar os parâmetros para melhor adequação a eficiência do processo, material e energia empregada; mantendo controle da largura do cordão de solda durante o processo.

A pesquisa de GIBSON *et al.* (2014) descreve vários princípios de soldagem por fricção, como também os desafios no processo e contribuições na área. Não há uma proposta direta de utilização de visão computacional no processo, porém os autores descrevem a importância da tecnologia tanto no nível industrial, quanto acadêmico.

A pesquisa de AVILES-VINAS *et al.* (2015) também conta como objetivo de propor um método baseado em uma RNA e um algoritmo de visão em tempo real, para aprender habilidades de soldagem em robótica industrial. Desta forma, observando os autores é possível concluir que este foi o primeiro trabalho do grupo de pesquisa que evoluiu para as pesquisas de RIOS-CABRERA *et al.* (2016) e AVILES-VIÑAS *et al.* (2016), pois todos os trabalhos possuem *setup* semelhante.

No trabalho de BHAT *et al.* (2015), este afirma os benefícios e necessidades de monitoramento de processo de fabricação no processo de soldagem de fricção por agitação. A grande vantagem da utilização de visão de máquina neste processo é a não invasividade no monitoramento *on-line*. Desta forma, os principais objetivos desta pesquisa foram a definição do processo de monitoramento analisando as imagens de superfície de solda para extrair características que pudessem responder a pergunta vinculada a qualidade do processo, sendo a solda boa, ou com defeito. O modelo de classificação utilizado possui precisão média de 98%. A Figura 2.9 destaca o *layout* do *setup* proposto.

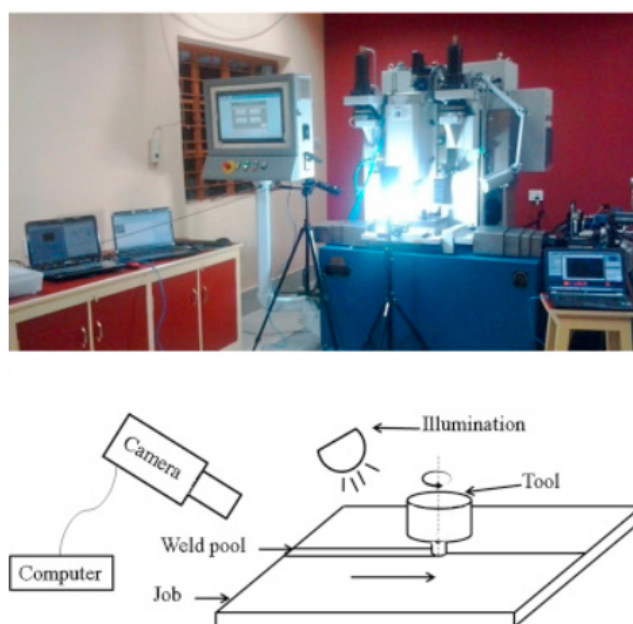


Figura 2.9 – *Layout* do *setup* do experimento proposto por BHAT *et al.*'s (2015)

Na pesquisa de AVILES-VIÑAS *et al.* (2016) foi proposta uma arquitetura baseada em uma RNA, para aprender habilidades de soldagem automaticamente em robôs industriais. O *setup* do *layout* experimental contava com uma câmera e sensor a laser, juntamente com o robô industrial do modelo KUKA KR16. Porém a geometria analisada neste processo é somente a largura e altura do cordão de solda. Possui grande semelhança na pesquisa RIOS-CABRERA *et al.* (2016) na utilização de uma RNA para retroalimentação de dados para prever posteriormente as geometrias específicas a penetração.

Na pesquisa de RIOS-CABRERA *et al.* (2016) é apresentado análises experimentais para definição do processo de implantação de sistema industrial adaptativo para soldagem controlada por robô. É apresentado os desafios e soluções encontradas. O *setup* do experimento conta com um robô industrial do modelo 6-DOF KUKA KR16 conectado a um computador. Uma câmera e sensor de temperatura também fazem parte do *setup* para aquisição de características geométricas do processo. A Figura 2.10 apresenta o *setup* do *layout* experimental utilizado.

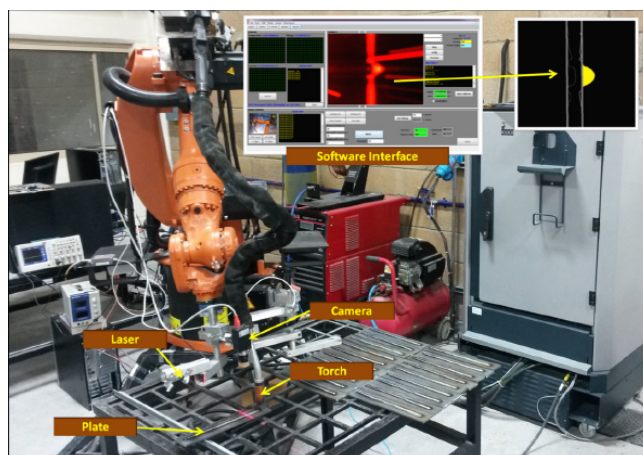


Figura 2.10 – *Layout* experimental (RIOS-CABRERA *et al.*, 2016)

Como contribuições, é apresentado a análise estatística das variáveis significativas ao processo de solda. Posteriormente, é apresentado o impacto destas variáveis na geometria através de um sistema de aprendizado baseado em rede neural artificial. A pesquisa apresenta possibilidade de estimação da penetração da solda através da análise *offline* do resultado e retroalimentação da rede neural com os novos parâmetros.

A pesquisa de Font comas *et al.* (2017) foi relacionada a um sistema passivo *on-line* de obtenção de imagem do processo de solda de arco com plasma. A pesquisa tem foco também na geometria do processo final, ou seja, a extração de características da geometria para medição é desejada. Uma das vantagens do processo utilizado é a não necessidade de outras fontes de luz adicionais para auxiliar no processo de obtenção de imagens, pois a luz resultante do processo de solda poderia atrapalhar a captação de imagens. Uma das contribuições da pesquisa é diante os parâmetros de *setup* do posicionamento da câmera, para melhor obtenção de imagens do processo. O processo é monitorado

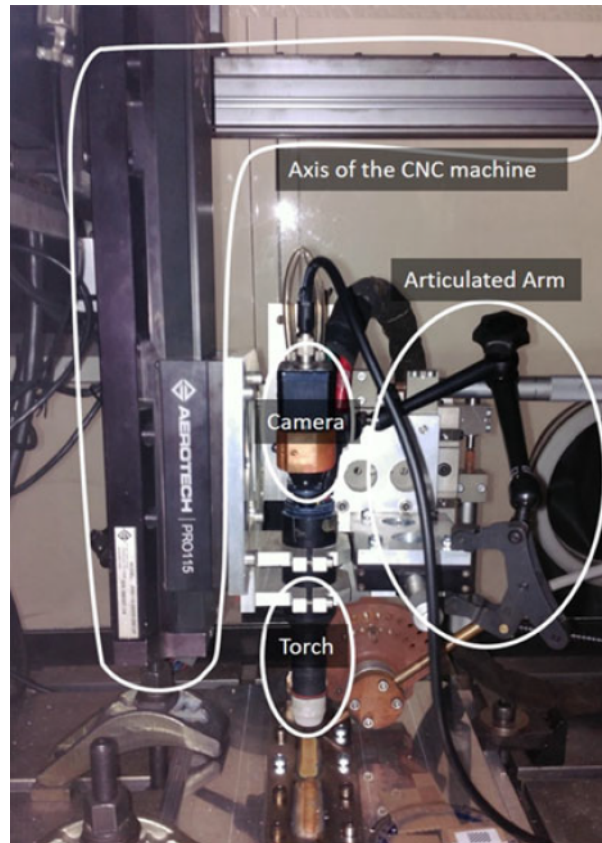


Figura 2.11 – *Layout* experimental (Font comas *et al.*, 2017)

utilizando o auxílio de um torno CNC que é parametrizado para desempenhar o papel de movimentação do arco de solda e também acompanhar o processo com a câmera embutida. É possível verificar na Figura 2.11 o *layout* experimental do trabalho de Font comas *et al.* (2017).

Como resultados, os autores apresentaram 3 principais contribuições:

- identificar a posição ideal da câmera para medir vários parâmetros da superfície da solda;
- reconstrução da superfície em 3D da poça de solda; e
- a influência de diferentes parâmetros de controle na geometria da solda.

A solução apresentada não permite extrair características geométricas de seção transversal (penetração) da solda, apenas características de superfície.

JIN *et al.* (2019) utiliza um sistema de aquisição de imagens para definir características da superfície da solda de adição. Utilizando uma RNA a pesquisa garante resultados satisfatórios para caracterizar o modelo que relaciona os parâmetros geométricos da solda de adição diante a velocidade da solda.

SCIME; BEUTH (2019) realizaram a pesquisa diante o processo de fusão a laser em pó. O objetivo da pesquisa é classificar o resultado do processo e as características da poça de fusão. É utilizado uma câmera de alta velocidade para monitorar a porosidade e instabilidades no processo. Técnicas de visão computacional aliadas ao aprendizado de máquina são utilizadas para diferenciar e classificar as poças de fusão.

Na pesquisa de XIONG *et al.* (2019) este afirma que a detecção automática da altura de deposição do metal de adição é uma das tecnologias principais para fabricação de componentes metálicos com utilização de solda de arco robótico de gás de tungstênio. Então é proposto um algoritmo inovador de rastreamento de separação do ponto entre o estado sólido e líquido do metal de adição através de imagens sucessivas. Como resultados, houve a confirmação da eficácia do método proposto e a capacidade anti-interferência do algoritmo desenvolvido. É possível verificar na Figura 2.12 o *layout* do *setup* do experimento.

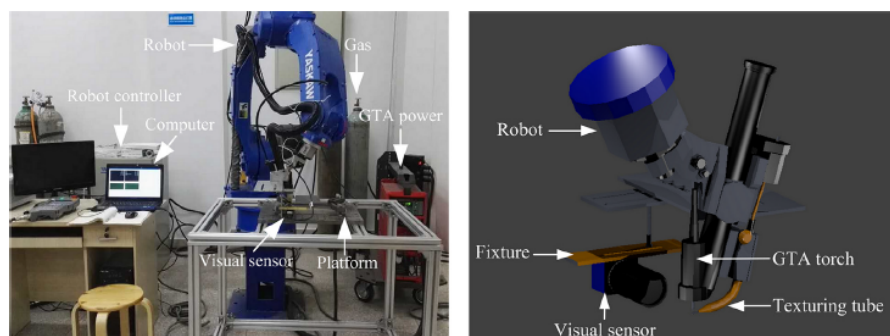


Figura 2.12 – *Layout* do *setup* do experimento proposto por XIONG *et al.*'s (2019)

## 2.6 Considerações finais sobre o capítulo

Este capítulo se mostra relevante para definir o embasamento técnico e teórico do trabalho. Pela pesquisa utilizar técnicas de ciência da computação para prover solução de problemas em processos de engenharia de produção, é necessário destacar e apresentar as características do problema, contextualizando em como a imagem digital é definida no ambiente computacional, quais processos são relevantes na identificação de pontos de interesse, e as ferramentas computacionais disponíveis, como o *framework* apresentado. Como a pesquisa envolve a utilização de visão computacional em um processo de medição, o estudo de viabilidade do sistema de medição por repetibilidade e reprodutibilidade também é importante.

É destacado também uma breve descrição do processo de solda de revestimento. Tendo destaque no metal de adição e o metal base durante o processo de solda de revestimento, as variáveis de interesse do processo, as características geométricas pertinentes.

Com a filtragem de artigos realizada e análise, é possível verificar várias aplicações de técnicas de visão computacional na extração de características. O volume de publicações também demonstra o interesse da comunidade científica na área, sendo tendência na automatização de processos industriais, sobretudo para monitoramento, como visto, um destaque na indústria alimentícia, com muitos artigos na área.

Diversos autores destacam a vantagem da visão computacional por não ser invasiva diante a produção, porém para os trabalhos com monitoramentos *on-line* verificados, nem todas as características geométricas eram analisadas, um ponto de limitação sempre serão as características do metal de adição fundido no metal base, ou seja, as características intrínsecas a penetração. Mesmo as pesquisas que propõem o monitoramento *on-line*, é necessário realizar o corte de seção transversal no corpo de prova para extração de características de penetração para treinamento da rede neural artificial para estimação das características geométricas durante o processo *on-line*.

Uma característica verificada nos trabalhos da literatura é o *setup* necessário para o monitoramento, os equipamentos necessários e os custos envolvidos; principalmente quando utilizam robôs, câmeras industriais de alto desempenho e filtros de luz. As propostas verificadas nos trabalhos são mais relevantes para linhas de produção modernas, pois os ajustes de *setup* podem não ser viáveis ou compatíveis em linhas já existentes. A variável custo também pode ser proibitiva para alguns empreendimentos.

Comparado com os trabalhos na literatura, esta pesquisa garante vantagens no processo de extração de características *offline*. Em linhas de produção que o monitoramento *on-line* não é possível, essa pesquisa tem a proposta de auxiliar na extração e análise de resultados do processo. E nas pesquisas de monitoramento *on-line*, pode auxiliar na agilidade de obtenção dos dados para retroalimentação da RNA. Outro ponto relevante na proposta deste trabalho é o baixo custo de implantação, sem necessidade de modificação na linha de produção.

## 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 3.1 Considerações Iniciais

Diante os conceitos presentes no Capítulo 2, de fundamentação teórica, temos o Capítulo 3 com foco nos procedimentos metodológicos. O problema de pesquisa é novamente destacado, para assim, realçar as etapas a serem utilizadas no método experimental em vista da obtenção dos resultados/objetivos deste trabalho.

Como descrito no Capítulo 1, esta pesquisa possui objetivo de extração de características geométricas e será validada em um processo de soldagem de revestimento. GOMES (2010) utilizou um processo manual com auxílio de um *software* analisador de imagens para identificação das características de soldagem. Sendo um dos objetivos desta pesquisa, a coleta dos dados de forma ágil, com precisão, visando diminuir a incerteza de medição. Dessa forma, considerando todo o processo de obtenção de dados do experimento, há o desejo:

- Extração de características do corpo de prova da imagem digital;
  - Processamento ágil e sistematizado das imagens;
  - Extração de características de medição com precisão melhor que o processo manual;
- Geração de relatório do experimento, expondo dados obtidos;
- Análise de resultados.

Um dos objetivos primordiais desta pesquisa, é estreitar o laço da pesquisa científica com sua aplicação prática, sobretudo na indústria. Dentro deste desejo, há algumas premissas:

- De que adianta a criação de uma pesquisa, onde o conhecimento técnico utilizado está fora do alcance dos tomadores de decisão ou do corpo técnico da indústria, seja por limitação de recursos (tempo) e/ou conhecimento teórico (capacitação).
- A pesquisa deve ser utilizada como um motor para o desenvolvimento da economia. Os recursos de tempo e capital utilizados na pesquisa devem ser revertidos em uma aplicação prática/teórica que ajude a alavancar a economia da região e do país. Desta forma, há o desejo de aplicação prática da metodologia proposta na indústria.

- A pesquisa deve ser acessível. Para que serve, como deve ser utilizada, quais resultados esperados diante as variáveis abordadas e quais as possibilidades de aplicação. Importante que o leitor e/ou os utilizadores da modelagem proposta possuam entendimento destas características, pois podem ser uma barreira em sua utilização.

## 3.2 Método de Pesquisa

Essa pesquisa classifica-se:

- Quanto à natureza: tem característica **aplicada**, com interesse prático na utilização em problemas reais (APPOLINARIO, 2009).
- Quanto aos objetivos: é caracterizada como **normativa**, pois visa aperfeiçoar o uso das técnicas disponíveis na literatura (BERTRAND; FRANSOO, 2002).
- Quanto à abordagem do problema: classificada como **quantitativa**, traduzindo em números os resultados da pesquisa (GERHARDT; SILVEIRA, 2019).
- Quanto ao método de pesquisa: **modelagem**, problemas do mundo real são usualmente complexos, diante muitas características e recursos. A modelagem é a abstração deste problema como um modelo matemático computadorizado (BRAILSFORD *et al.*, 2019).

É possível verificar na Figura 3.1 as diversas classificações disponíveis para a pesquisa científica em engenharia de produção.

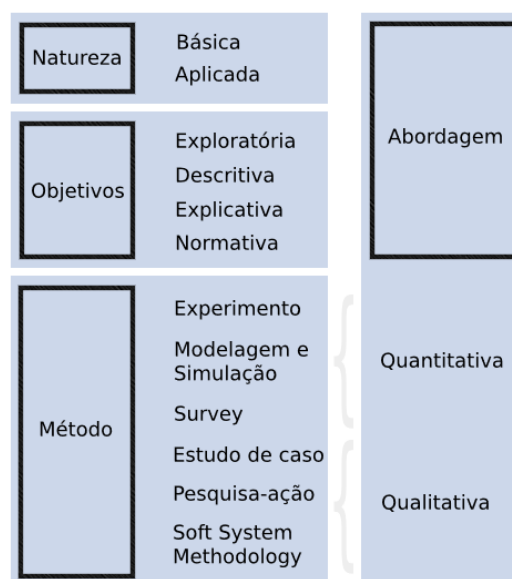


Figura 3.1 – Classificação da metodologia de pesquisa científica em engenharia de produção

### 3.3 Objeto de estudo

Foram utilizados nesta pesquisa os mesmos corpos de prova utilizados na pesquisa de GOMES (2010). A vantagem nesta utilização é a rapidez de já ter os corpos de prova com cortes de seção transversal prontos e a possibilidade de analisar a obtenção de dados manual da imagem digital feita por GOMES (2010) com a abordagem proposta e comparar os resultados. O experimento analisado é composto por 31 corpos de prova compostos pelo metal base de aço carbono ABNT 1020 e pelo metal de adição (solda de revestimento), o aço inoxidável ABNT 316L.

Os corpos de prova são derivados de 31 chapas de aço carbono já com a solda de revestimento, numeradas com cada *setup* de experimento do DOE com os parâmetros que foram utilizados no processo de soldagem de revestimento. A Figura 3.2 exemplifica a chapa de aço carbono com a deposição de aço inox, visão superior.

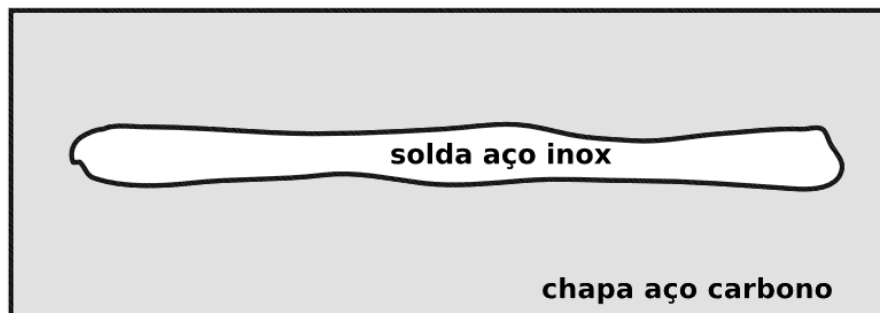


Figura 3.2 – Exemplificação da chapa de aço carbono com solda de revestimento de aço inoxidável: visão superior

Cada chapa foi então cortada em 5 partes, a Figura 3.3 exemplifica esta etapa. Cada corpo de prova resultante recebe a numeração do experimento no qual foi feito (1, ..., 31) e qual corte ele pertence (corte: A, B, C, D e E). A Figura 3.4 exemplifica como é a chapa de solda cortada com a numeração do experimento e a letra correspondente ao corte, visão superior. A Figura 3.5 exemplifica o corpo de prova do experimento 1 e do corte D. Selecionando este mesmo corpo de prova, mas ao invés de olhar com vista superior e sim de forma transversal, é possível exemplificá-lo na Figura 3.6.

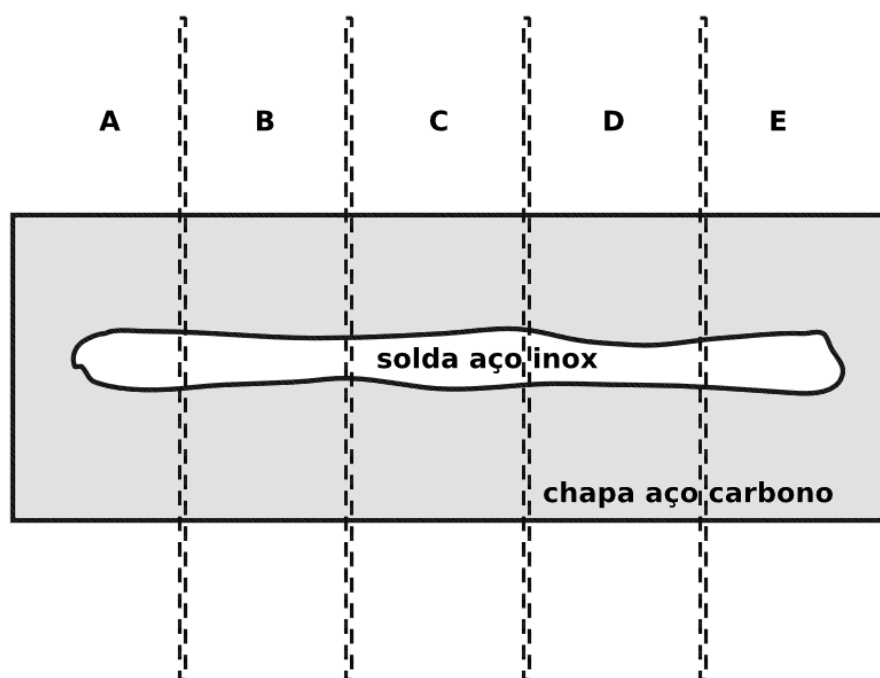


Figura 3.3 – Exemplificação da chapa de aço carbono com solda de revestimento de aço inoxidável e os cortes: visão superior

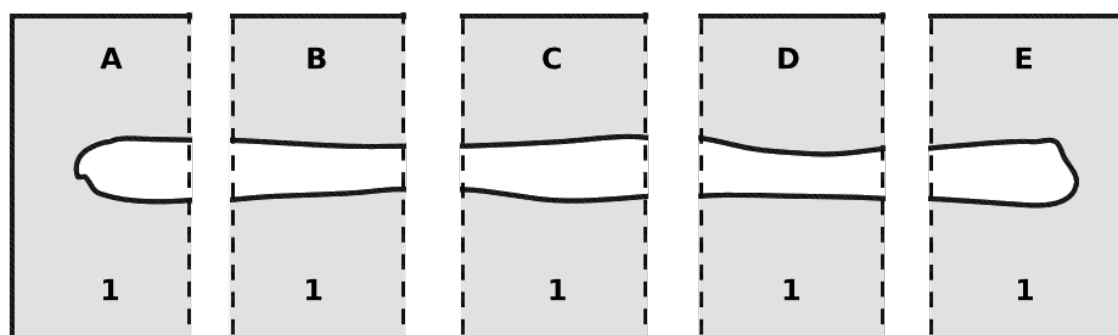


Figura 3.4 – Exemplificação da chapa de aço carbono com solda de revestimento de aço inoxidável já com os cortes feitos: visão superior



Figura 3.5 – Exemplificação corpo de prova de aço carbono com solda de revestimento de aço inoxidável: visão superior

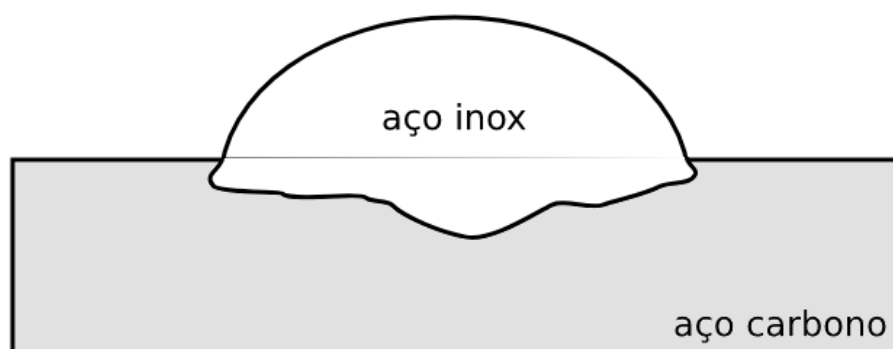


Figura 3.6 – Exemplificação da chapa de aço carbono com solda de revestimento de aço inoxidável: visão transversal

### 3.4 Planejamento do método experimental

Analisando o corpo de prova, foi possível levantar alguns questionamentos sobre quais características precisam ser medidas e quais são relevantes para a pesquisa, também de acordo com o que é encontrado na literatura. Diante destas observações, foi levantado também as melhores estratégias e etapas que devem ser seguidas para correta aquisição de dados e em qual ordem. De acordo com estas necessidades, um *setup* inicial foi definido. É possível verificar as etapas do *setup* inicial na Figura 3.7.

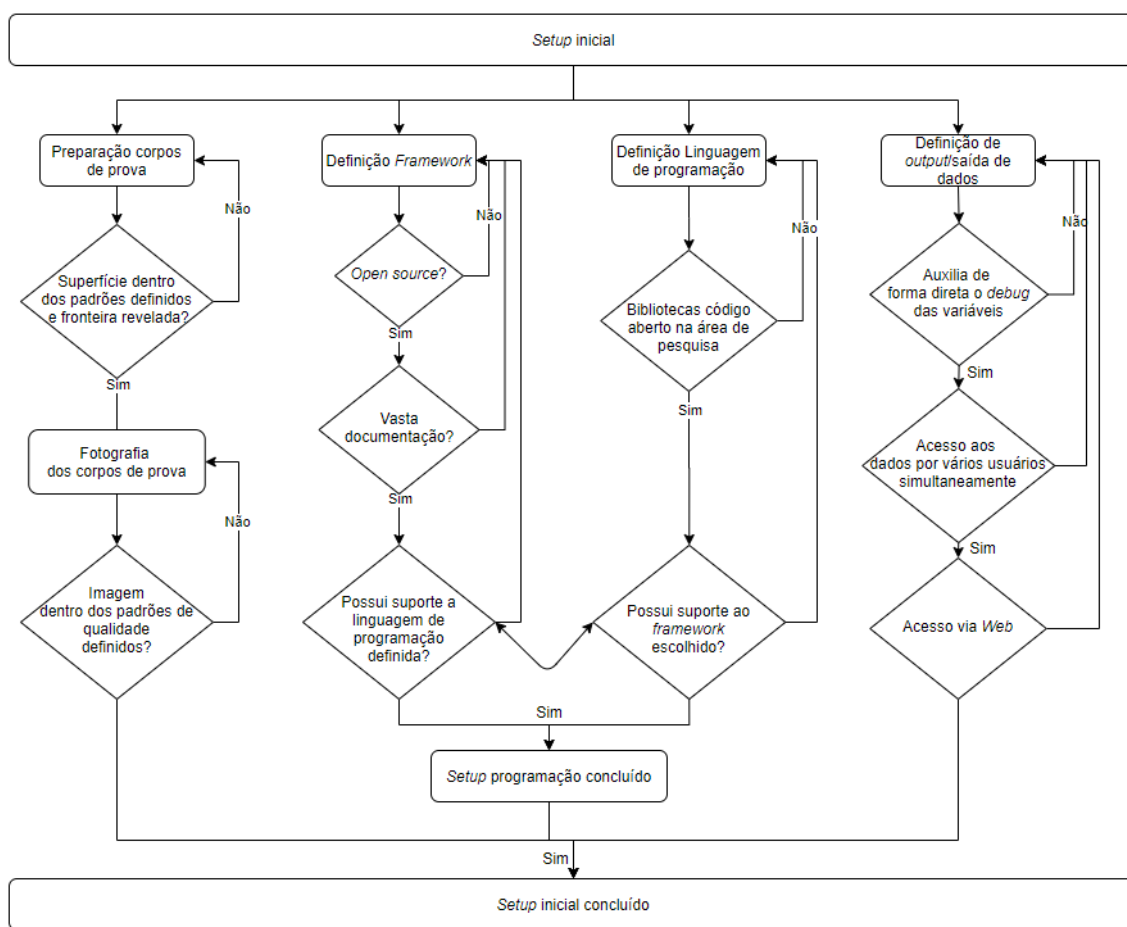


Figura 3.7 – Fluxograma das etapas do *setup* inicial

Com esta etapa inicial de preparo do objeto de estudo e definição de ferramentas a serem utilizadas, é possível dar continuidade com o desenvolvimento da modelagem computacional e análise de dados. A etapa de desenvolvimento e análise pode ser observada no fluxograma da Figura 3.8.

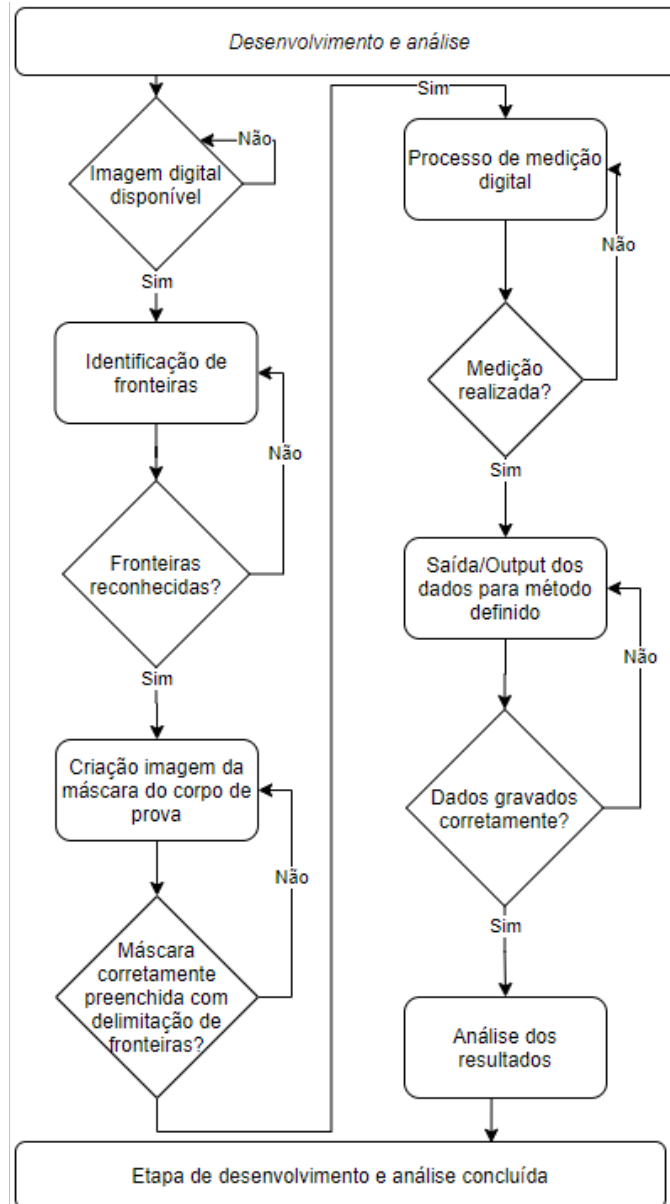


Figura 3.8 – Fluxograma etapas de desenvolvimento e análise

### 3.5 Considerações Finais Sobre o Capítulo

É possível verificar neste capítulo os problemas de pesquisa e as etapas de planejamento, desenvolvimento da modelagem e análise propostas; formalizando os procedimentos metodológicos.

# 4 APLICAÇÃO DO MÉTODO EXPERIMENTAL

## 4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo descreve a aplicação do método experimental definido no capítulo 3 para obter a extração e análise de características da imagem digital do objeto de estudo através da modelagem computacional proposta. Assim, as etapas propostas no processo experimental são realizadas ao longo deste capítulo, juntamente com discussão e apresentação dos resultados.

## 4.2 *Setup* Inicial

Esta etapa compreende as necessidades iniciais, viabilizando as imagens digitais necessárias e definindo parâmetros da estrutura da etapa de desenvolvimento da modelagem computacional e análise.

### 4.2.1 Preparação dos corpos de prova

Como o aço carbono sofre efeitos de oxidação, foi necessário refazer o preparo dos corpos de prova. Desta forma, sendo necessário lixar e polir, além de utilização de nital para revelação de fronteira.

### 4.2.2 Fotografia corpos de prova

Para digitalização dos corpos de prova, foi utilizado uma câmera digital da marca Canon do modelo T3i, esta que pode ser observada na Figura 4.1. As fotos foram realizadas em resolução 12 *megapixels* e utilizando *zoom* máximo da lente 28-135 no modo *creative auto* com *flash* ligado.



Figura 4.1 – Câmera fotográfica utilizada no experimento

### 4.2.3 Setup do ambiente de desenvolvimento (programação)

Para a definição da melhor estratégia desta etapa foi necessário realizar o levantamento das ferramentas existentes, a qualidade da documentação, o volume de membros da comunidade *online* e a interação dos membros da comunidade *open source*.

#### 4.2.3.1 Definição de *framework* de visão computacional

A escolha do *framework* a ser utilizado neste trabalho foi pautada primeiramente pela grande adesão da comunidade *open-source*, qualidade da documentação de *software* disponibilizada e quais linguagens de programação possui suporte. Desta forma, inicialmente os *frameworks* OpenCV e OpenIMAJ foram considerados, pois também são opções amplamente utilizadas na comunidade científica. Analisando todas as vantagens de ambas opções, o *framework* OpenCV foi escolhido, por ter o diferencial de suporte à linguagem de programação *Python* e também possuir licença de código aberto.

#### 4.2.3.2 Definição de linguagem de programação

A linguagem de programação *Python* é muito conceituada e utilizada na comunidade científica e possui diversos repositórios de bibliotecas científicas existentes e de código aberto, tanto na área de visão computacional, quanto na área de estatística, seria de grande valia utilizar um *framework* que desse suporte a esta linguagem, pela facilidade de integração de bibliotecas no algoritmo. Desta forma, a escolha da linguagem *Python* prevaleceu sobre as demais consideradas, já que o *framework* OpenCV também possui suporte a ela.

### 4.2.4 Definição formato saída/*output* de dados

Durante a etapa de planejamento do projeto de pesquisa, foi verificado o potencial de volume de dados que poderiam ser extraídos do experimento. Tais dados poderiam ser explorados também na elaboração de artigos científicos, com diversas contribuições para a comunidade científica. Desta forma, a extração de tais dados e a capacidade de disponibilizar estes de forma simples e intuitiva foi necessária. Esta necessidade também viabilizou o paralelismo do desenvolvimento deste projeto, juntamente com o desenvolvimento de artigos científicos com ajuda de colegas pesquisadores. Mapear a evolução da extração dos dados também foi necessária, principalmente para as seguintes finalidades:

- *Debug* - uma forma de garantir e confirmar que os dados extraídos estavam coerentes. Ao invés de gravar os dados somente nas variáveis do programa, era necessário também uma saída em arquivo, para que os dados pudessem ser avaliados de forma ampla;

- Análise - não somente verificar a coerência dos dados, desenhando os pontos de perímetro para verificar a formação correta das geometrias; mas também uma forma fácil de manipular os dados em outros *softwares* estatísticos.

Uma solução encontrada para suprir todas as necessidades acima foi utilizar a integração com as planilhas *Online* do Google. Ao executar o protótipo de *software*, a cada extração completa dos dados, este se conecta automaticamente com a conta do Google vinculada a esta pesquisa, abre uma planilha pré-determinada, insere os dados de forma sistematizada.

Desta forma, para garantir a integridade dos dados, somente o protótipo de *software* tem acesso de escrita na planilha. Assim, os demais colegas pesquisadores possuem apenas o acesso somente leitura. Estes poderiam verificar os dados mais atuais sempre que precisassem, acessando o *link* da planilha fornecido pelo Google Drive. Na Figura 4.2 é possível verificar o resumo de dados obtidos de cada experimento de corpo de prova.

Identificação da Peça		Características da Imagem										Características da Peça em pixels											
Corpo de Prova	Corte	Perfil	Extensão imagem	Largura	Altura	Área imagem	Perda Pixel Compressão	Total Pixels	Fundo	Aço Inox	Aço Carbono	Área penetração	Altura penetração	Área reforço	Altura reforço	Largura solda	Diluição	Área de retrabalho (faltou solda)	Área refugo (excesso)	Área comum	Ângulo Q1	Ângulo Q2	
1	D	Direito	png	1909	505	964045	21	964024	224443	87466	652115	30073	92	57393	147	619	34,38%	30691		57393	154,3589942	154,8803524	
5	1	D	Esquerdo	png	1949	505	984245	2484	801761	227182	97236	657323	32049	91	64982	149	833	32,95%	29849	84882	154,8851076	154,4725338	
6	2	D	Direito	png	2058	552	1138016	3351	1132865	282610	139180	710875	41407	109	97144	185	764	29,75%	805	9854	87279	154,3443293	154,5308025
7	2	D	Esquerdo	png	2048	535	1095680	2480	1093220	258707	128727	705786	43846	110	84234	164	747	34,08%	13121	2524	81710	156,240071	156,1247191
8	3	D	Direito	png	1738	509	884642	1608	883034	173164	102104	607766	43680	122	57522	131	715	42,78%	31394	832	56690	159,6235648	159,3718166
9	3	D	Esquerdo	png	1782	507	893334	1769	891565	175699	107918	607948	45530	118	61554	131	724	42,19%	33621	344	61210	159,7452289	159,6926791
10	4	D	Direito	png	1797	538	966786	2056	964730	183669	154666	628195	59998	102	95480	149	886	38,79%	10647	18043	77437	161,5650512	161,8024633
11	4	D	Esquerdo	png	1853	550	1019150	2362	1016788	200199	160767	655822	82451	162	78372	139	872	51,29%	22447	5968	72384	161,4378217	161,5228288
12	5	D	Direito	png	1611	473	762003	1369	760634	166273	69783	524578	33853	116	36397	118	524	48,51%	51687		36397	153,6278832	152,8402043
13	5	D	Esquerdo	png	1406	407	572242	734	571508	132315	43259	395934	17028	76	33750	113	432	39,36%	61081		33750	154,2900462	154,2808968
14	6	D	Direito	png	1061	514	853754	1984	851770	185575	97455	568740	46772	157	50205	139	573	47,99%	37879		50205	154,3456432	154,2713241
15	6	D	Esquerdo	png	1732	527	912764	2065	910699	201275	94343	615081	39659	126	54270	146	564	42,04%	40561		54270	152,1218085	151,5981044
16	7	D	Direito	png	1609	492	791628	1995	789633	140486	76249	572898	41945	129	34304	105	552	55,01%	53780		34304	158,8209483	156,5447352
17	7	D	Esquerdo	png	1557	475	739575	928	738647	137508	73813	527326	40031	105	33782	102	540	54,23%	61049		33782	157,8045405	158,4286928
18	8	D	Direito	png	1638	518	848484	1691	846793	178649	108364	559780	54547	151	53817	139	640	50,34%	34267		53817	155,8491514	154,919773
19	8	D	Esquerdo	png	1613	494	796822	1743	795079	165223	99167	530689	47167	127	52564	132	642	47,56%	42267		52564	157,0255702	157,1581101
20	9	D	Direito	png	1597	507	809679	1331	808348	164745	84661	558942	33991	91	52305	128	577	40,15%	35779		52305	154,7988764	154,8797883
21	9	D	Esquerdo	png	1659	524	869316	441	868875	186621	95069	587185	31998	98	62280	145	591	33,66%	32551		62280	153,511376	153,0342856
22	10	D	Direito	png	1614	579	934506	1855	932051	224608	116661	591382	32111	78	85132	186	644	27,53%	4284	1264	83800	150,4110782	150,4110782
23	10	D	Esquerdo	png	1581	547	864807	1388	863419	212487	115843	535089	25445	53	90382	189	638	21,97%	4836	387	89695	149,4086342	149,0889415
24	11	D	Direito	png	1764	527	929626	1484	926144	204796	93742	629606	31759	96	61955	148	642	33,88%	26129		61955	155,0136668	155,2945482

Figura 4.2 – Visão geral de dados extraídos pelo extrator de características: unidade de *pixels* para comprimento e altura, *pixels* quadrados para área e graus para ângulo

É possível verificar na Figura 4.3 os dados de saída referentes ao perímetro do aço inoxidável, para confirmação dos aspectos da geometria. Esta etapa é super importante, pois esta confirmação garante a validação visual da extração com sucesso dos dados do perímetro, garantindo também a possibilidade de cálculos manuais de confirmação das características geométricas da peça a serem confrontados com os dados extraídos automaticamente para confirmação da funcionalidade do experimento.

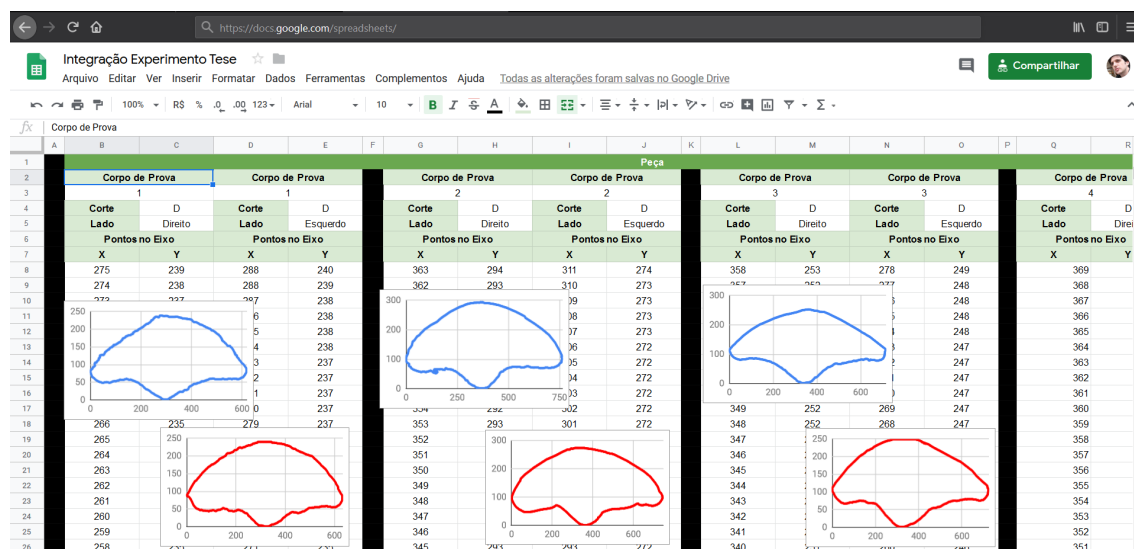


Figura 4.3 – Vetorização de dados do perímetro do aço inoxidável

## 4.3 Desenvolvimento e análise

### 4.3.1 Identificação das fronteiras do corpo de prova

Para que fosse possível iniciar a análise de identificação de bordas de áreas de interesse, que é uma etapa fundamental no processo de extração de características, primeiramente os corpos de prova foram fotografados. A Figura 4.4 ilustra uma imagem de um corpo de prova.

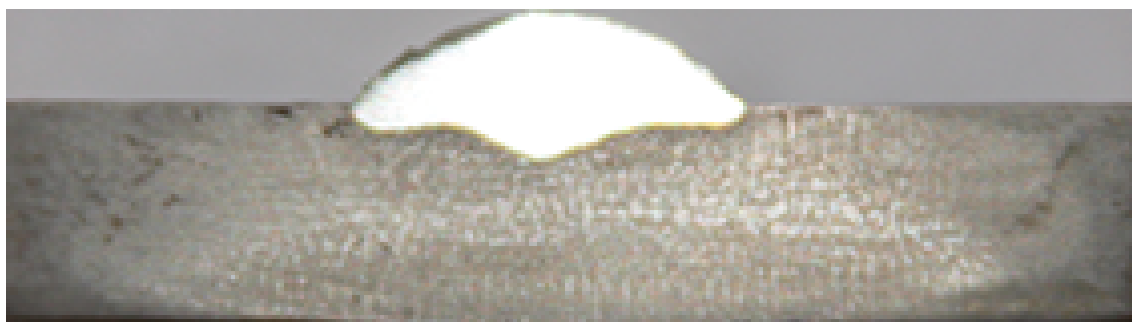


Figura 4.4 – Imagem corpo de prova

Com a imagem digital do corpo de prova disponível, foi necessário definir os pontos que fazem parte da fronteira dos metais e do fundo. Sendo possível identificar tais pontos, é possível então selecionar a área superior aos pontos (fundo da imagem), a área inferior aos pontos (aço carbono) e a área central (aço inoxidável), que pode ser obtida pela subtração da área superior e inferior na imagem original. Para realização desta etapa, o algoritmo de detecção de bordas foi utilizado, sendo esta etapa realizada com a utilização do *framework* OpenCV em *Python*, possibilitando definir as áreas de interesse. O algoritmo inicialmente tem acesso a imagem original colorida. Para otimizar o processo, os canais de cores da imagem são removidos, tendo então uma imagem em escalas de cinza. Após esta etapa,

a rotina de equalização de histograma é utilizada, visando o aumento do contraste da imagem e das regiões de interesse; um filtro suavizador também é aplicado para auxiliar na identificação das regiões de borda e evitar falsos positivos. Com as imagens geradas disponíveis pelo algoritmo (escala de cinza; alto contraste e suavizada), a comparação destas foi possível. Na visão matricial destas imagens, foi então comparado as variações de pixels de cada célula das matrizes ponto a ponto, onde é identificado se há variação significativa de intensidade do *pixel* em determinado ponto, caso positivo este é marcado como um ponto de fronteira em potencial.

A Figura 4.5 ilustra a imagem do corpo de prova com os principais pontos de borda destacados (na cor verde); selecionando somente os pontos de fronteira que dividem as 3 partes importantes desta etapa do experimento: aço carbono, aço inoxidável e fundo cinza.

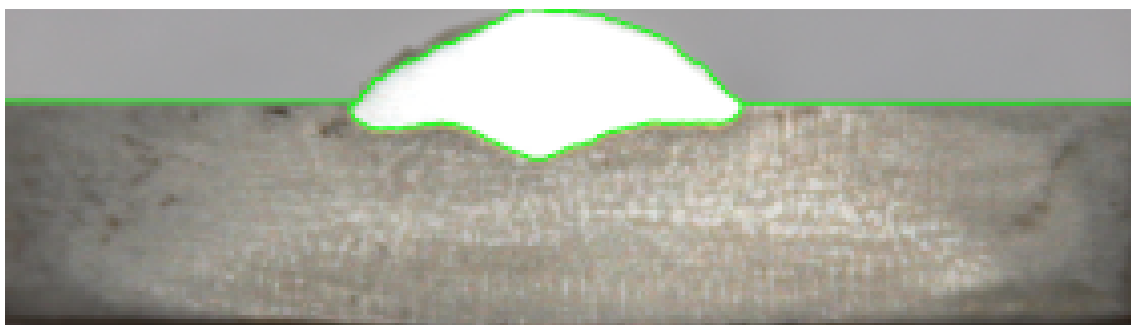


Figura 4.5 – Foto com as bordas de fronteira realçadas

### 4.3.2 Criação da máscara digital do corpo de prova

Nesta etapa, há a necessidade de criar uma máscara digital, para melhor representar os pontos de cada área de interesse. Visualizando a imagem de forma matricial, há a necessidade de mudança das cores dos pixels. A Figura 4.6 é um esboço da visualização matricial de uma imagem de corpo de prova (com fronteiras identificadas), onde cada quadrado de *pixel* é uma célula da matriz  $M$ , que é formada por 10 linhas e 30 colunas.

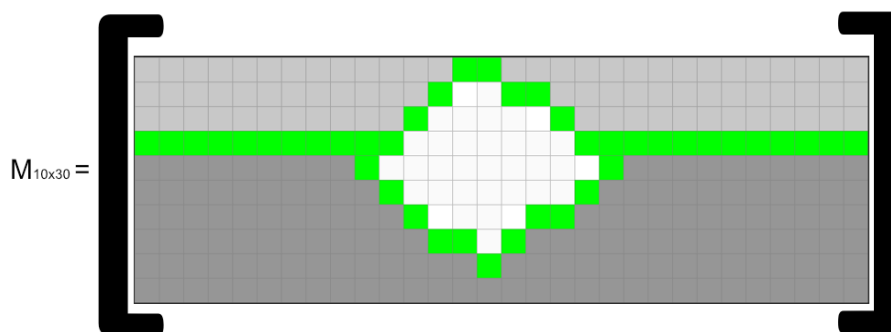


Figura 4.6 – Esboço de imagem digital do corpo de prova com bordas delimitadas

Com a imagem representada pela matriz  $M$ , o objetivo então é utilizar os algoritmos de processamento digital de imagens disponíveis pelo *framework* para realizar as comparações e substituições de valores de cor de cada *pixel* visando definir as áreas de interesse. Desta forma, percorrendo as células da matriz da imagem e utilizando a cor do pixel de fronteira (cor verde) como condição de parada é possível caminhar pela matriz e realizar as substituições.

Como exemplo, o pseudocódigo presente nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 exemplificam os passos, em sequência, para substituição dos *pixels* que representam o fundo da imagem, o aço carbono e o aço inox para as imagens de máscara respectivamente.

Para cada coluna  $j$  da matriz  $M$  faça:

Para cada linha  $i$ , começando do início dos índices da matriz de  $M$  faça:

Se linha  $i$  diferente de  $\text{rgb}(0,255,0)$

então: Mudar a cor do item  $ixj$  da  $M$  para  $\text{rgb}(0,0,0)$

senão: Mudar a cor do item  $ixj$  da  $M$  para  $\text{rgb}(0,0,0)$  e **retorna**

Figura 4.7 – Pseudocódigo criação máscara fundo da imagem digital

Para cada coluna  $j$  da matriz  $M$  faça:

Para cada linha  $i$ , começando da última linha de  $M$  faça:

Se linha  $i$  diferente de  $\text{rgb}(0,255,0)$  e  $\text{rgb}(0,0,0)$

então: Mudar a cor do item  $ixj$  da  $M$  para  $\text{rgb}(255,0,0)$

senão: Se cor do item  $ixj$  for  $\text{rgb}(0,255,0)$

então: Mudar a cor do item  $ixj$  da  $M$  para  $\text{rgb}(0,0,255)$  e **retorna**

senão: **retorna**

Figura 4.8 – Pseudocódigo criação máscara do aço carbono da imagem digital

Para cada coluna  $j$  de  $M$  faça:

Para cada linha  $i$ , começando do início dos índices da matriz de  $M$  faça:

Se linha  $i$  diferente de  $\text{rgb}(0,0,0)$  e  $\text{rgb}(0,0,255)$

então: Mudar a cor do item  $ixj$  da  $M$  para  $\text{rgb}(255,0,0)$

Figura 4.9 – Pseudocódigo criação máscara do aço inoxidável da imagem digital

A Figura 4.10 representa o objetivo final almejado nesta etapa, utilizando uma imagem de esboço matricial para a representação. Desta forma, uma imagem de máscara

foi criada, representando as áreas de interesse da imagem original. Nesta máscara criada, foi definido que o fundo seria preenchido na cor preta, que corresponde aos valores (0,0,0) na escala de cores RGB. Para o aço inoxidável, foi definido que este receberia a cor vermelha, que corresponde aos valores (255,0,0). Para o aço carbono, foi definido que este seria a cor azul, que corresponde aos valores (0,0,255).

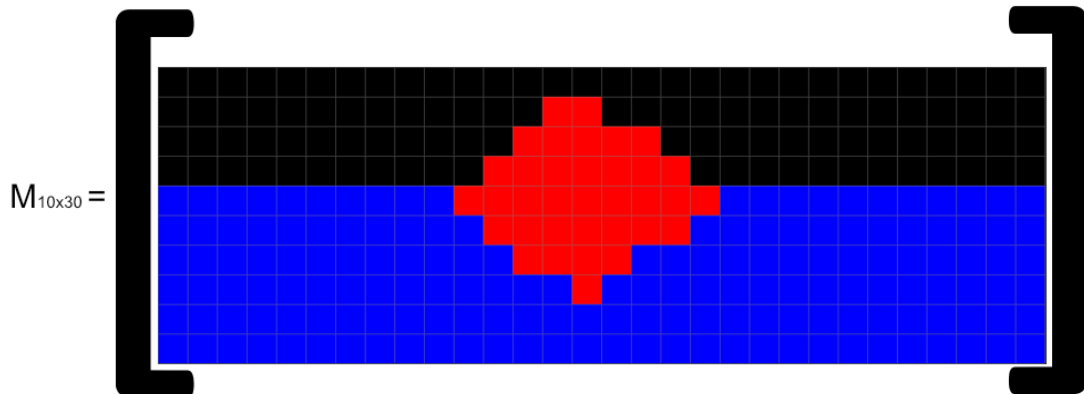


Figura 4.10 – Esboço de imagem digital da máscara do corpo de prova

Em suma, com a estratégia de utilização do algoritmo de detecção das bordas de fronteira, foi possível definir os pontos de perímetro e área do aço inoxidável, do aço carbono e do fundo da imagem; passo importante para viabilizar a criação da imagem máscara. Na Figura 4.11 é possível verificar a sobreposição da máscara na imagem original do corpo de prova e também a imagem final da máscara.

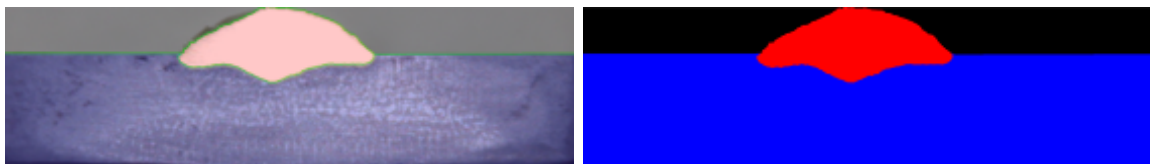


Figura 4.11 – Sobreposição da máscara na imagem do corpo de prova e imagem da máscara

### 4.3.3 Extração digital da área da solda de aço inoxidável

Com a máscara definida, é possível utilizar as funções de processamento digital de imagens para criar uma nova imagem que contenha somente os pontos de cor vermelha (255,0,0). A função recebe como parâmetro de entrada uma matriz da imagem de máscara e a cor da área de interesse que há o desejo de recorte; e retorna uma matriz da imagem da área de interesse recortada. Esta imagem então é a imagem da máscara referente ao aço inoxidável. É criada também uma nova imagem utilizando os pontos de cor azul (0,0,255) e preta (0,0,0); para representar o aço carbono e o fundo. As imagens formadas pelo aço carbono e o fundo são imprescindíveis pois é a partir delas que é possível calcular

a reta que separa a área de reforço ( $A_r$ ), da área de penetração ( $A_p$ ) e também a altura do reforço ( $R$ ) e altura de penetração ( $P$ ).

#### 4.3.4 Processo de medição digital

A Figura 4.12 ilustra todos os dados de medição necessários na extração de características da peça. A partir destas necessidades, foi estudado a melhor ordem de extração de características. Os principais dados necessários nesta etapa são:

- Imagem da máscara do aço carbono e fundo - imagem que contém as alturas necessárias para o cálculo da reta que melhor define a separação da área de penetração da área de reforço da solda.
- Altura do aço carbono - a variável da altura do aço carbono é necessária para os cálculos iniciais e relativos das demais alturas (reforço, penetração e fundo preto da imagem de máscara).
- Imagem da máscara do aço inoxidável - imagem que contém as características geométricas que necessitam ser extraídas, define também a área total a ser utilizada no cálculo da diluição ( $D$ ).
- Altura total do aço inoxidável ( $R + P$ ) - esta altura é fundamental para o cálculo relativo da reta que melhor define a separação da área de reforço da área de penetração. Ela é necessária pois como as imagens de máscara foram desconectadas, é necessário recalcular novamente a razão das alturas do aço carbono relativa dentro da máscara da imagem do aço inox. Para assim, definir a altura de recorte e gerar a imagem da máscara da área de reforço e a imagem da máscara da área de penetração.
- Imagem da máscara da área de reforço - imagem que contém as características necessárias para o cálculo da área de reforço ( $A_r$ ) e da largura ( $W$ ).
- Altura de reforço ( $R$ ) - característica extraída da imagem da máscara da área de reforço.
- Largura de superfície da solda ( $W$ ) - característica extraída da imagem da máscara da área de reforço.
- Imagem da máscara da área de penetração - imagem que contém as características necessárias para o cálculo da área de penetração ( $A_p$ ) e da penetração ( $P$ ).
- Altura da penetração ( $P$ ) - característica extraída da imagem da máscara da área de penetração.

- Vetor de pontos de perímetro extraídos da imagem da máscara do aço inoxidável - o conjunto de pontos são divididos em 4 quadrantes, os pontos do primeiro e segundo quadrante são necessários para o cálculo dos ângulos de curvatura  $\alpha_{q1}$  e  $\alpha_{q2}$
- Ângulo  $\alpha_{q1}$  e ângulo  $\alpha_{q2}$  - característica calculada através dos pontos de perímetro da imagem da máscara do aço inoxidável.

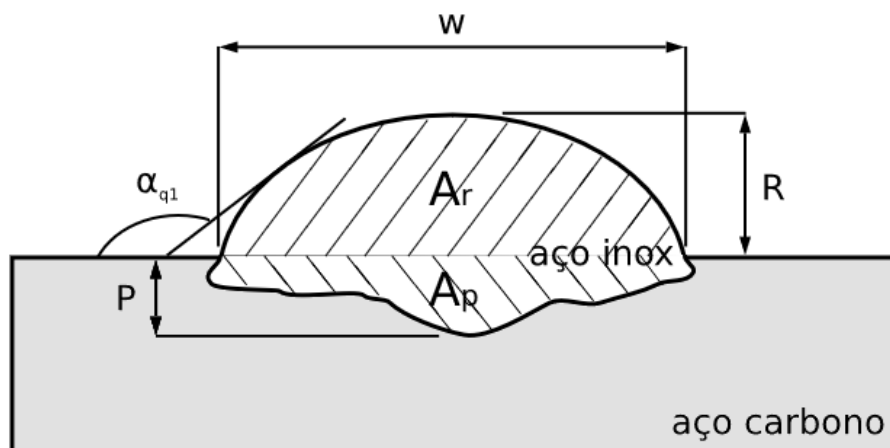


Figura 4.12 – Dados de geometria necessários

#### 4.3.4.1 Cálculo da altura da chapa de aço carbono

O cálculo da altura da chapa de aço carbono é importante pois é a partir dela que é calculada a relação do que é altura total da solda e o que é penetração. A partir da imagem da máscara foi então necessário definir a linha reta que melhor representasse a maioria dos pontos com valores de Y máximos com a cor azul (255,0,0). Sendo então o valor de Y máximo constante ao longo da reta. Este valor de Y é então definido como a constante que irá representar a altura da chapa de aço carbono.

Três abordagens foram levadas em consideração. Na visão da imagem como uma matriz, guardar todos os pontos de máximo de Y na cor azul de cada coluna. Realizar a regressão linear nestes pontos para obtenção da reta. Porém os pontos presentes abaixo da penetração do aço inoxidável seriam um ruído no cálculo. Afim de melhorar esta abordagem, deveria ser calculado a largura e posicionamento do cordão de solda e as colunas referentes a estes pontos deveriam ser retirados da matriz de pontos Y na cor azul. Desta forma, é encontrado uma melhor aproximação da reta de regressão linear. Outra forma seria analisar os pontos de máximo de Y na cor azul das extremidades e adotar um limite de variação. Calculando então uma média para o ponto de início e fim da reta. Esta abordagem é interessante principalmente para simplificar o processo e otimizar o gasto de processamento computacional. A abordagem utilizada usou a técnica de recorte de áreas de interesse. Desta forma, o algoritmo identifica os pontos azuis da

imagem de máscara, recorta esta área de interesse. A imagem resultante então possui altura  $Y$  máxima.

#### 4.3.4.2 Identificação e cálculo da altura de penetração e reforço

Nesta etapa, também foi utilizado a técnica de recorte de área de interesse, identificado todos os pontos na cor vermelha da imagem da máscara. O resultado é uma imagem retangular, com fundo preto, com todos os pontos que representam a área do aço inoxidável presente. Como esta abordagem já tem como resultado uma imagem com a altura do aço inoxidável ( $R+P$ ), esta característica é facilmente extraída. Para o cálculo do reforço ( $R$ ) e da penetração ( $P$ ), foi necessário utilizar os dados da altura do aço carbono para definir também as áreas de cada estrutura. Com o recorte da imagem do aço inoxidável utilizando a variável  $Y$  máxima relativa ao aço carbono, é possível definir 2 novas imagens, referente as áreas de reforço e penetração. Sendo possível extrair as características de largura ( $W$ ), penetração ( $P$ ), reforço ( $R$ ), área de penetração ( $A_p$ ) e área de reforço ( $A_r$ ) Na Figura 4.13 é possível verificar os dados de interesse do aço inoxidável em destaque.

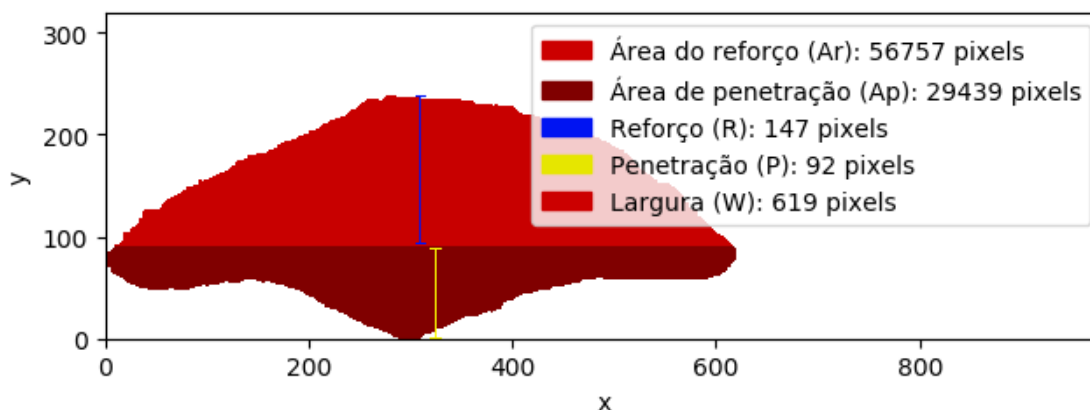


Figura 4.13 – Dados extraídos do aço inox

#### 4.3.4.3 Identificação do perímetro do cordão de solda

Utilizando a função de detecção de contornos da imagem de máscara do aço inoxidável, foi possível vetorizar todos os pontos de perímetro. Durante o processo de análise das imagens através das planilhas do Google, ao desenhar os pontos como um gráfico de dispersão foi possível validar visualmente que o perímetro desenhado do aço inoxidável era compatível com o corpo de prova.

#### 4.3.4.4 Cálculo dos ângulos $\alpha_{q1}$ e $\alpha_{q2}$ do cordão de solda

Uma característica desejada são os ângulos  $\alpha$  da solda. Para ser possível extrair esta característica, foi necessário extrair todos os pontos de perímetro do aço inox. Após

esta extração os pontos de perímetro foram divididos em 4 quadrantes. Nesta etapa, é apenas necessário a extração dos ângulos do primeiro e segundo quadrante. É realizada então a regressão linear dos pontos do primeiro e segundo quadrante visando extrair o coeficiente angular das retas. Na Figura 4.14 é possível verificar a imagem com a extração da característica do perímetro do primeiro e segundo quadrante, juntamente com a reta da regressão linear e o valor do ângulo.

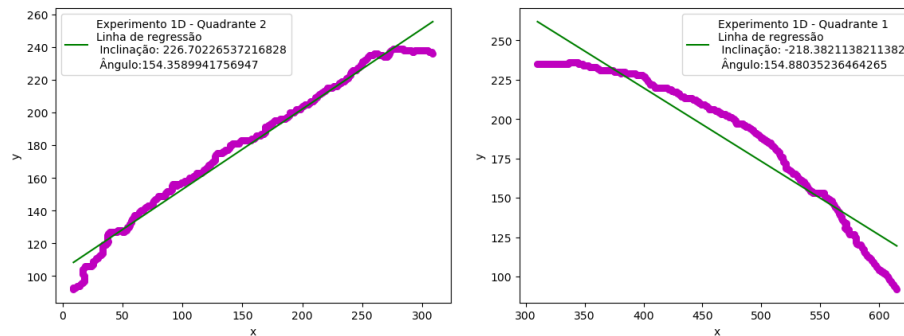


Figura 4.14 – Regressão linear: dados primeiro e segundo quadrante

#### 4.3.4.5 Cálculo de áreas de retrabalho comparadas com experimento de confirmação

Uma outra característica interessante a ser extraída do processo de visão computacional dos cordões de solda é a comparação dos experimentos do DOE com o experimento de confirmação e extrair quantitativamente a área necessária de retrabalho (deposição ou usinagem) na peça. A Figura 4.15 exemplifica um gráfico onde o experimento 21E é desenhado em sobreposição com o experimento de confirmação. É possível observar que a área em cinza é a área comum que os dois corpos de prova possuem. A área em azul é a área de retrabalho que precisa ser usinada e a área em vermelho é a área que seria necessário retrabalho de deposição de material. Estes dados também são interessantes pois podem ser utilizados para comparar o impacto custo em empresas que optam ou não pela utilização de parâmetros otimizados:

- Impacto diante o desperdício do material - necessidade de usinagem.
- Retrabalho levando em conta o recurso tempo, mão-de-obra e depreciação da máquina para realizar novamente o processo de deposição de solda.

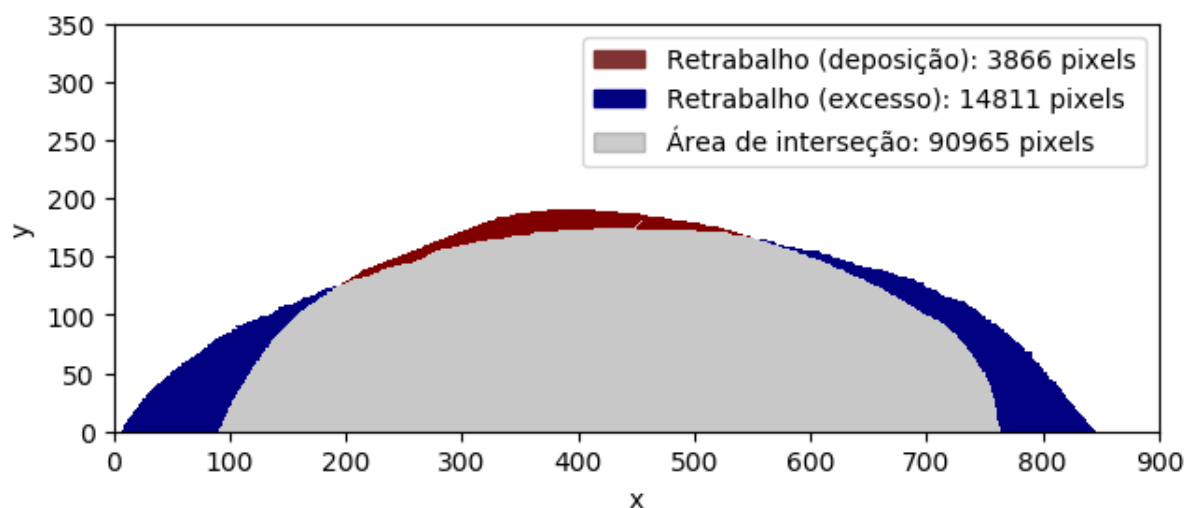


Figura 4.15 – Comparação experimento DOE com experimento de confirmação

### 4.3.5 Análise estatística

Realizando a modelagem e executando o protótipo do algoritmo desenvolvido, foi possível extrair diversas respostas, dentre elas as que estão destacadas na Figura 4.12. Os corpos de prova foram fotografados em 2 ocasiões, gerando 2 conjuntos de dados e estes estão presentes na Tabela 4.1 e 4.2. Lembrando que os dados extraídos nos experimentos estão na unidade de *pixel*, então foi necessário realizar a transformação para milímetros. Os valores de transformação aplicados a cada foto do experimento afim de mudança de escala dos resultados foram calculados a partir dos dados da pesquisa de GOMES (2010). Na variável *Exp.* das tabelas, o número é referente ao experimento do DOE, e a letra é referente ao lado do corte da face da seção transversal (E = face esquerda, D = face direita).

Tabela 4.1 – Dados de saída do *software* referentes as características dos corpos de prova do primeiro conjunto de imagens

Exp.	$A_r$ ( $mm^2$ )	$A_p$ ( $mm^2$ )	$R$ (mm)	$P$ (mm)	$W$ (mm)	$D$ (%)	$\alpha_{q1}$ (°)	$\alpha_{q2}$ (°)
1 D	16,985	8,900	2,529	1,583	10,649	34,38%	154,36	154,88
1 E	19,752	8,117	2,627	1,441	10,745	29,13%	154,69	154,47
2 D	25,942	11,058	3,023	1,781	12,485	29,89%	154,34	154,53
2 E	26,220	11,342	2,928	1,764	12,792	30,19%	156,24	156,12
3 D	16,690	12,674	2,231	2,078	12,179	43,16%	159,62	159,37
3 E	17,564	12,992	2,213	1,993	12,230	42,52%	159,75	159,69
4 D	35,232	16,037	2,941	1,616	16,087	31,28%	161,57	161,80
4 E	24,883	18,169	2,559	2,364	14,215	42,20%	161,44	161,52
5 D	10,743	8,967	2,043	1,876	8,777	45,50%	153,63	152,84

5 E	14,903	6,748	2,382	1,540	8,891	31,17%	154,29	154,30
6 D	14,817	11,165	2,422	2,422	9,379	42,97%	154,35	154,27
6 E	15,758	11,515	2,488	2,147	9,611	42,22%	152,12	151,60
7 D	9,363	11,448	1,735	2,131	9,120	55,01%	158,82	156,54
7 E	10,175	12,057	1,770	1,822	9,372	54,23%	157,80	158,43
8 D	15,152	15,358	2,332	2,534	10,739	50,34%	155,85	154,92
8 E	16,609	14,904	2,346	2,258	11,412	47,29%	157,03	157,16
9 D	16,100	10,463	2,246	1,597	10,123	39,39%	154,80	154,88
9 E	16,920	8,693	2,390	1,615	9,741	33,94%	153,51	153,03
10 D	23,590	8,898	3,096	1,298	10,720	27,39%	150,41	150,41
10 E	29,527	8,313	3,416	0,958	11,532	21,97%	149,41	149,09
11 D	17,635	9,040	2,497	1,620	10,832	33,89%	155,01	155,29
11 E	17,522	8,370	2,599	1,667	10,527	32,33%	153,43	153,36
12 D	24,110	11,392	2,624	1,512	12,723	32,09%	157,10	157,34
12 E	27,890	9,130	2,990	1,252	13,039	24,66%	155,30	155,24
13 D	13,715	5,171	2,466	1,134	7,703	27,38%	149,79	147,92
13 E	12,024	5,750	2,238	1,271	7,848	32,35%	149,71	151,67
14 D	15,770	6,800	2,620	1,223	8,735	30,13%	146,13	148,72
14 E	14,363	7,563	2,436	1,414	8,313	34,50%	149,94	149,54
15 D	11,964	7,081	2,158	1,410	8,354	37,18%	152,68	152,27
15 E	11,620	6,377	2,163	1,528	8,224	35,43%	152,75	151,82
16 D	18,878	7,843	2,707	1,716	10,014	29,35%	153,19	152,08
16 E	17,822	9,920	2,333	1,648	11,148	35,76%	156,80	156,30
17 D	10,702	7,491	1,968	1,646	8,551	41,17%	155,02	153,92
17 E	11,182	7,430	2,033	1,588	8,352	39,92%	153,82	153,43
18 D	22,471	14,837	2,646	2,450	11,986	39,77%	155,96	155,77
18 E	21,863	14,912	2,650	2,511	11,865	40,55%	156,04	155,53
19 D	17,127	7,735	2,746	1,468	8,601	31,11%	148,21	148,31
19 E	16,023	8,263	2,431	1,563	9,481	34,02%	152,15	151,33
20 D	16,574	12,024	2,330	2,013	11,282	42,05%	157,45	157,17
20 E	16,995	11,943	2,252	1,984	11,740	41,27%	158,93	158,20
21 D	32,861	10,213	3,224	1,052	14,322	23,71%	156,70	156,50
21 E	29,492	11,627	3,022	1,152	14,260	28,28%	157,43	157,23
22 D	10,698	8,046	2,090	1,554	8,203	42,93%	152,72	152,51
22 E	10,673	7,860	2,061	1,603	8,193	42,41%	155,17	153,68
23 D	16,970	15,389	2,483	2,413	11,250	47,56%	156,35	155,71
23 E	17,121	15,096	2,455	2,438	11,322	46,86%	156,63	156,04
24 D	16,939	6,865	2,680	1,402	8,789	28,84%	149,95	149,41
24 E	17,957	7,250	2,660	1,232	9,516	28,76%	149,99	150,18

25 D	16,985	9,682	2,482	1,815	10,476	36,31%	154,61	153,59
25 E	18,455	8,879	2,589	1,708	10,621	32,48%	154,22	153,99
26 D	16,862	9,510	2,421	1,877	10,998	36,06%	156,14	155,44
26 E	17,996	8,629	2,699	1,840	10,196	32,41%	151,50	151,83
27 D	18,342	8,872	2,571	1,749	10,285	32,60%	155,32	154,65
27 E	16,544	10,281	2,366	1,844	10,544	38,33%	154,95	155,32
28 D	16,513	10,298	2,258	1,963	10,491	38,41%	156,36	155,71
28 E	15,706	10,412	2,267	2,024	10,381	39,87%	155,54	156,13
29 D	16,822	8,186	2,599	1,624	10,143	32,73%	152,19	151,75
29 E	15,750	9,822	2,217	1,722	10,884	38,41%	157,28	157,21
30 D	15,582	10,048	2,244	1,802	10,334	39,20%	156,53	155,38
30 E	16,968	8,970	2,457	1,644	10,192	34,58%	154,14	153,52
31 D	16,434	9,005	2,394	1,618	10,401	35,40%	155,03	154,82
31 E	14,692	11,146	2,095	1,886	10,250	43,14%	156,80	157,31

Tabela 4.2 – Dados de saída do *software* referentes as características dos corpos de prova do segundo conjunto de imagens

Exp.	$A_r$ ( $mm^2$ )	$A_p$ ( $mm^2$ )	$R$ (mm)	$P$ (mm)	$W$ (mm)	$D$ (%)	$\alpha_{q1}$ (°)	$\alpha_{q2}$ (°)
1 D	17,910	9,460	2,418	1,569	10,626	34,56%	155,73	155,62
1 E	19,641	8,220	2,598	1,426	10,927	29,50%	154,73	153,21
2 D	25,608	11,411	3,025	1,777	12,412	30,83%	153,80	153,97
2 E	26,052	10,892	2,962	1,797	12,707	29,48%	155,12	155,21
3 D	17,763	11,899	2,205	2,056	12,362	40,12%	160,33	160,11
3 E	17,688	13,075	2,229	1,979	12,125	42,50%	159,27	159,05
4 D	32,032	17,783	2,792	1,685	16,071	35,70%	161,29	161,12
4 E	24,797	18,411	2,611	2,328	14,053	42,61%	159,12	159,46
5 D	10,726	9,325	2,016	1,885	8,720	46,51%	154,30	152,98
5 E	13,104	7,870	2,199	1,564	9,285	37,52%	154,50	155,00
6 D	15,064	11,343	2,390	2,390	9,465	42,96%	153,21	152,40
6 E	16,170	11,382	2,507	2,109	9,606	41,31%	151,73	151,49
7 D	9,152	11,582	1,728	2,064	9,447	55,86%	157,29	155,88
7 E	10,340	10,866	1,852	1,786	9,367	51,24%	156,55	155,90
8 D	15,344	15,110	2,341	2,518	10,757	49,62%	155,65	155,74
8 E	16,365	15,005	2,341	2,271	11,426	47,83%	157,24	156,44
9 D	16,414	10,241	2,285	1,545	10,139	38,42%	154,60	154,80
9 E	16,531	8,878	2,379	1,647	9,698	34,94%	153,63	153,03

10 D	24,418	8,665	3,169	1,258	10,624	26,19%	149,07	149,19
10 E	28,938	8,110	3,458	0,967	11,512	21,89%	148,57	148,64
11 D	18,073	8,822	2,585	1,573	10,653	32,80%	154,82	154,44
11 E	18,641	7,822	2,631	1,593	10,733	29,56%	153,54	153,74
12 D	23,598	11,211	2,673	1,524	12,615	32,21%	156,02	156,40
12 E	28,503	9,136	3,033	1,218	13,007	24,27%	154,99	154,77
13 D	13,466	5,315	2,453	1,119	7,812	28,30%	149,48	149,98
13 E	11,885	6,067	2,270	1,238	7,772	33,80%	149,14	149,74
14 D	15,525	6,846	2,707	1,282	8,120	30,60%	146,07	145,43
14 E	14,357	7,979	2,425	1,405	8,225	35,72%	148,21	148,06
15 D	11,852	6,758	2,267	1,360	8,423	36,31%	151,09	149,92
15 E	11,497	6,408	2,185	1,548	8,079	35,79%	151,50	151,39
16 D	17,751	8,961	2,684	1,695	9,887	33,55%	151,93	151,02
16 E	18,357	9,410	2,448	1,591	11,064	33,89%	155,56	156,16
17 D	10,459	7,598	2,021	1,603	8,548	42,08%	153,96	153,17
17 E	11,648	7,289	2,044	1,527	8,479	38,49%	153,03	153,57
18 D	23,030	13,934	2,753	2,366	12,001	37,70%	155,25	155,71
18 E	21,845	15,026	2,684	2,468	11,837	40,75%	155,99	156,02
19 D	16,801	8,005	2,722	1,474	8,618	32,27%	147,39	146,82
19 E	16,267	8,268	2,498	1,536	9,214	33,70%	151,04	151,04
20 D	17,174	11,620	2,391	1,973	11,165	40,36%	156,80	156,63
20 E	17,474	11,395	2,283	1,997	11,580	39,47%	158,44	158,57
21 D	33,632	10,196	3,268	1,027	14,265	23,26%	155,50	155,74
21 E	30,784	10,936	3,120	1,133	14,007	26,21%	156,00	156,16
22 D	10,764	7,661	2,125	1,576	8,117	41,58%	151,78	151,49
22 E	11,304	7,467	2,160	1,539	8,045	39,78%	151,89	151,13
23 D	17,275	15,379	2,413	2,461	11,291	47,10%	157,28	155,50
23 E	16,804	15,413	2,449	2,449	11,310	47,84%	156,27	155,71
24 D	16,926	6,791	2,669	1,346	9,211	28,63%	149,78	148,95
24 E	18,086	7,372	2,763	1,256	8,865	28,96%	147,40	147,25
25 D	17,312	9,546	2,572	1,759	10,377	35,54%	153,34	152,83
25 E	18,259	8,917	2,615	1,736	10,392	32,81%	153,33	152,91
26 D	16,202	10,628	2,346	1,927	10,780	39,61%	155,84	156,51
26 E	18,242	8,721	2,608	1,843	10,386	32,34%	153,01	153,33
27 D	17,889	9,285	2,587	1,732	10,218	34,17%	152,84	153,34
27 E	16,850	9,805	2,461	1,818	10,355	36,79%	154,04	153,94
28 D	16,880	9,925	2,345	1,890	10,495	37,03%	155,80	155,32
28 E	15,834	10,418	2,280	1,998	10,389	39,69%	155,94	156,14
29 D	16,687	8,540	2,582	1,637	9,983	33,85%	152,03	152,69

29 E	14,970	10,666	2,131	1,819	10,811	41,60%	157,30	158,10
30 D	15,698	9,895	2,267	1,747	10,507	38,66%	156,09	155,99
30 E	16,643	9,305	2,472	1,640	10,079	35,86%	153,10	153,54
31 D	16,504	8,944	2,426	1,609	10,323	35,14%	154,45	154,23
31 E	15,147	10,946	2,115	1,830	10,290	41,95%	157,36	157,36

#### 4.3.5.1 Análise da diferença de medição entre os processos de medição

Dadas as diferenças nos processos de medição realizadas por GOMES (2010) e pela metodologia proposta, houve o interesse de verificar se há diferença significativas nas medições realizadas.

As variáveis obtidas pelo sistema de medição manual são representadas por  $\bar{W}_m$ ,  $\bar{P}_m$ ,  $\bar{R}_m$ ,  $\bar{D}_m$  e oriundas da pesquisa de GOMES (2010). As variáveis obtidas pela modelagem proposta são representadas por  $\bar{W}_a$ ,  $\bar{P}_a$ ,  $\bar{R}_a$ ,  $\bar{D}_a$ . Primeiramente é calculado os valores da diferença das medições, exemplificado pelas Equações em 4.1. Os resultados dos valores das diferenças  $\bar{W}_{dif}$ ,  $\bar{P}_{dif}$ ,  $\bar{R}_{dif}$ ,  $\bar{D}_{dif}$  são apresentados na Tabela 4.3.

$$\begin{aligned}
 W_{dif} &= \bar{W}_{m_i} - \bar{W}_{a_i} \\
 P_{dif} &= \bar{P}_{m_i} - \bar{P}_{a_i} \\
 R_{dif} &= \bar{R}_{m_i} - \bar{R}_{a_i} \\
 D_{dif} &= \bar{D}_{m_i} - \bar{D}_{a_i} \\
 \text{com } n &= 1, \dots, 31
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Tabela 4.3 – Cálculo das diferenças dos valores de medida manual e automático

Exp.	$\bar{W}_{dif}$	$\bar{P}_{dif}$	$\bar{R}_{dif}$	$\bar{D}_{dif}$
1	0,56	-0,18	0,12	-7,23%
2	0,4	-0,16	0,22	-6,09%
3	0,5	-0,35	0,28	-10,99%
4	-0,03	-0,27	0,31	-13,79%
5	0,38	-0,1	0,02	-7,72%
6	0,44	-0,43	0,28	-11,33%
7	0,5	-0,44	0,31	-17,50%
8	0,43	-0,22	0,08	-7,87%
9	0,39	-0,36	0,55	-14,44%
10	0,3	-0,13	3,59	-6,43%
11	0,59	-0,32	0,3	-9,61%
12	0,46	-0,28	0,37	-6,38%

13	0,31	-0,23	0,38	-11,19%
14	0,11	-0,13	0,31	-10,60%
15	0,2	-0,15	0,25	-9,76%
16	0,33	-0,13	0,2	-5,93%
17	0,62	-0,24	0,21	-8,96%
18	0,28	-0,34	0,41	-9,27%
19	0,4	-0,36	0,5	-11,47%
20	0,15	-0,24	0,27	-9,80%
21	0,78	-0,21	3,45	-9,81%
22	0,18	-0,4	0,39	-16,42%
23	0,44	-0,25	0,14	-7,45%
24	0,12	-0,11	0,31	-7,48%
25	0,31	-0,09	0,12	-5,01%
26	0,31	-0,12	0,01	-2,22%
27	0,37	-0,29	0,31	-8,78%
28	0,17	-0,19	0,24	-6,29%
29	0,13	-0,18	0,21	-5,58%
30	0,33	-0,23	0,26	-5,80%
31	0,24	-0,25	0,32	-8,06%

Há o desejo de verificar se o conjunto de dados da Tabela 4.3 segue uma distribuição normal. A Tabela 4.4 possui os resultados de *p-value* para o teste de Anderson-Darling para normalidade.

Tabela 4.4 – Resultados de *p-value* para o teste de Anderson-Darling

Variáveis	<i>p-value</i>
$W_{dif}$	0,902
$P_{dif}$	0,362
$R_{dif}$	0,371
$D_{dif}$	0,150

Como todos os conjuntos de variáveis apresentam distribuição normal, é possível utilizar teste paramétrico *paired-t* afim de verificar com 95% de confiança a diferença de medição entre os valores. A Tabela 4.5 apresenta os resultados da análise para os níveis de diferença de medição testados.

Tabela 4.5 – Resultados para o teste *paired-t*

Variáveis	Diferença	<i>p-value</i>
$W_{dif}$	0,25 mm	0,0020
$P_{dif}$	-0,20 mm	0,0210
$R_{dif}$	0,20 mm	0,0050
$D_{dif}$	-7,50%	0,0090

Porém, como é de conhecimento a correlação existente nas variáveis do processo, o teste *paired-t* multivariado é utilizado. Desenvolvendo então a Equação 4.2 pelos passos das Equações 4.3-4.9 de acordo com JOHNSON; WICHERN (2007).

$$\chi^2 = \bar{\mathbf{D}}^T (n^{-1} \mathbf{S})^{-1} \bar{\mathbf{D}} \quad (4.2)$$

$$\bar{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} W_{dif} \\ P_{dif} \\ R_{dif} \\ D_{dif} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,03 \\ -0,24 \\ 0,27 \\ -9,01\% \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\bar{\mathbf{D}}^T = [0,03 \quad -0,24 \quad 0,27 \quad -9,01\%] \quad (4.4)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_{W_{dif}}^2 & \sigma_{W_{dif}} \sigma_{P_{dif}} & \sigma_{W_{dif}} \sigma_{R_{dif}} & \sigma_{W_{dif}} \sigma_{D_{dif}} \\ \sigma_{W_{dif}} \sigma_{P_{dif}} & \sigma_{P_{dif}}^2 & \sigma_{P_{dif}} \sigma_{R_{dif}} & \sigma_{P_{dif}} \sigma_{D_{dif}} \\ \sigma_{W_{dif}} \sigma_{R_{dif}} & \sigma_{P_{dif}} \sigma_{R_{dif}} & \sigma_{R_{dif}}^2 & \sigma_{R_{dif}} \sigma_{D_{dif}} \\ \sigma_{W_{dif}} \sigma_{D_{dif}} & \sigma_{P_{dif}} \sigma_{D_{dif}} & \sigma_{R_{dif}} \sigma_{D_{dif}} & \sigma_{D_{dif}}^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0,0300 & -0,0043 & -0,0001 & 0,0000 \\ -0,0043 & 0,0100 & -0,0071 & 0,0025 \\ -0,0001 & -0,0071 & 0,0157 & -0,0025 \\ 0,0000 & 0,0025 & -0,0025 & 0,0011 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{S}^{-1} = \begin{bmatrix} 38,86 & 38,44 & 6,51 & -69,00 \\ 38,44 & 269,83 & 42,40 & -496,04 \\ 6,51 & 42,40 & 105,21 & 141,20 \\ -69,00 & -496,04 & 141,20 & 2283,52 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\bar{\mathbf{D}}^T \mathbf{S}^{-1} = [0,00 \quad -6,86 \quad 6,03 \quad -51,24] \quad (4.7)$$

$$(\bar{D}^T S^{-1}) \bar{D} = 7,89 \tag{4.8}$$

$$\chi^2 = 244,58 \tag{4.9}$$

Analisando o resultado encontrado, com o auxílio do *software* Minitab 2019, com os graus de liberdade =  $n - p = 27$ , foi confirmado com 95% de confiança que as medidas são diferentes de zero e *p-value* no valor 0,000.

Verificando a Figura 4.16, a área sombreada representa o nível de significância. Verificando o valor de qui-quadrado obtido no teste de *paired-t* multivariado, observa-se que o valor pertence à região crítica, com *p-value* significativo, portanto, rejeita-se a hipótese nula (que as diferenças são iguais a zero). Então há realmente uma diferença de medição.

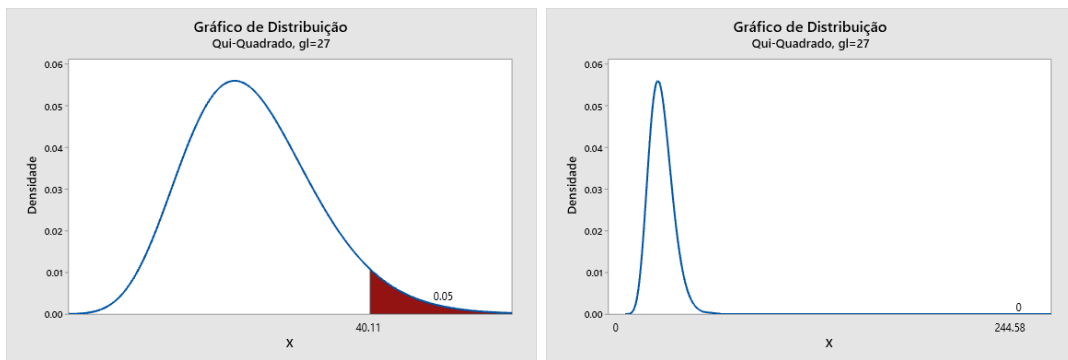


Figura 4.16 – Análise *Paired-t* Multivariado

Analisando os gráficos presentes na Figura 4.17 é possível também verificar que para as medidas de largura o método manual em sua maioria apresenta um valor maior que o método proposto. Já na análise da penetração é possível verificar que o método manual encontra valores menores que o método proposto. Como neste processo é interessante maximizar valores *W* e minimizar valores *P*, e baseado na evidência observada, é interessante então analisar o viés de operador.

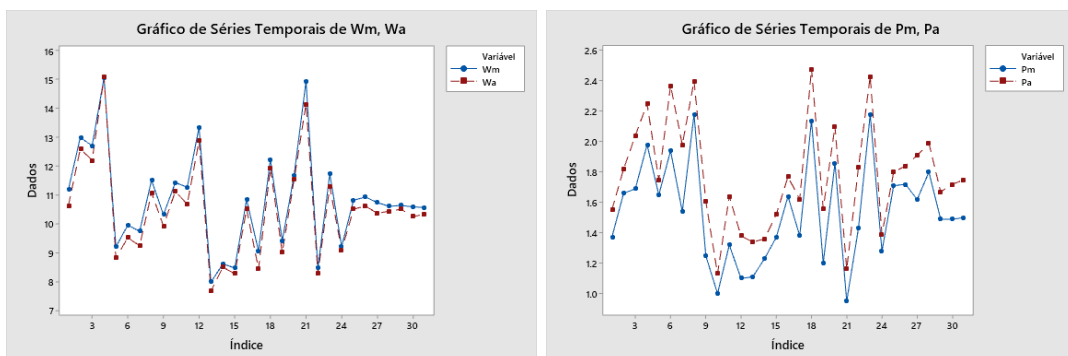


Figura 4.17 – Análise de medições de largura e penetração de cordão

#### 4.3.5.2 Análise de bloco padrão

Uma pergunta a ser respondida diante o processo de medição é referente a precisão. Utilizando a modelagem proposta nesta pesquisa e um método de medição manual, qual abordagem fornece resultados mais precisos. Uma solução encontrada foi a análise de bloco padrão diante ambas abordagens.

O bloco padrão é um padrão de comprimento com dimensões conhecidas e erros de até centésimos de micrometro ( $\mu\text{m}$ ). Para este experimento, foram analisados 3 blocos padrão cerâmicos e com especificação:

- Comprimento padrão 100 mm e altura 35 mm
- Comprimento padrão 75 mm e altura 35 mm
- Comprimento padrão 25 mm e altura 35 mm

O processo de medição dos blocos foi realizado com 4 operadores:

- Operador 1 (computador) - modelagem proposta.
- Operador 2 (computador) - modelagem proposta utilizando a aproximação da máscara resultante a um objeto geométrico; pois é de conhecimento que o objeto analisado é um retângulo - visa eliminar *pixels* de ruído.
- Operador 3 (humano) - análise manual, utilizando o *software* Image J. Operador é aluno de doutorado em engenharia de produção e através de cliques do *mouse* seleciona os pontos de interesse que determinam as dimensões estudadas do bloco padrão, para que o *software* Image J então calcule estas medidas em *pixels*.
- Operador 4 (humano) - análise manual utilizando o *software* Image J. Operador é aluno de pós graduação em engenharia de produção e através de cliques do *mouse* seleciona os pontos de interesse que determinam as dimensões estudadas do bloco padrão, para que o *software* Image J então calcule estas medidas em *pixels*.

A medida padrão do bloco é referente ao seu comprimento. Porém, os dados da altura também foram coletados, juntamente com os dados de área; mas, existem 2 valores para a área dos blocos: a área baseada no cálculo da *largura*  $\times$  *altura* e a área baseada na contagem dos *pixels* em vermelho baseados na máscara da modelagem proposta (no caso do operador computador) e relativa a soma dos *pixels* dentro do perímetro da peça (no caso do operador humano). Os dados coletados pelos Operadores 1-4 para o bloco padrão de 100 mm podem ser observados nas Tabelas 4.6-4.9, para o bloco padrão de 75 mm nas Tabelas 4.10-4.13 e para o bloco padrão de 25 mm nas Tabelas 4.14-4.17 respectivamente.

Os Operadores 3 e 4 realizaram a medição em cada bloco padrão variando o ponto inicial e final da reta que define a altura e largura ao longo da peça. Os operadores baseados em computador sempre analisam a foto do bloco padrão da mesma forma, não tendo variabilidade na medição. Todos os operadores realizaram por 12 vezes o processo de medição em cada bloco padrão.

Tabela 4.6 – Dados coletados Operador 1 para bloco padrão 100 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
1	100,0	35,08	3.508	3.492
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12	100,0	35,08	3.508	3.492

Tabela 4.7 – Dados coletados Operador 2 para bloco padrão 100 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
1	100,0	35,08	3.508	3488
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12	100,0	35,08	3.508	3488

Tabela 4.8 – Dados coletados Operador 3 para bloco padrão 100 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
1	100,1	35,1	3513,51	3481,93
2	100,1	35,2	3523,52	3476,89
3	100,1	35,1	3513,51	3478,35
4	99,9	35,1	3506,49	3471,47
5	99,8	35,2	3512,96	3463,03
6	100,1	35,1	3513,51	3521,77
7	99,8	35,0	3493,00	3484,74
8	99,9	35,1	3506,49	3460,77
9	99,9	35,1	3506,49	3482,78
10	99,8	35,1	3502,98	3521,37
11	99,5	35,2	3502,40	3477,26
12	99,8	35,0	3493,00	3491,24

Tabela 4.9 – Dados coletados Operador 4 para bloco padrão 100 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
1	99,8	34,7	3463,06	3456,27
2	99,6	34,6	3446,16	3452,04
3	99,7	35,0	3489,50	3497,73
4	99,4	34,7	3449,18	3460,77
5	99,7	35,0	3489,50	3500,01
6	99,7	34,8	3469,56	3486,77
7	99,6	34,8	3466,08	3481,67
8	99,6	34,8	3466,08	3485,08
9	99,7	34,9	3479,53	3481,67
10	99,6	34,9	3476,04	3475,36
11	99,4	34,7	3449,18	3486,78
12	99,6	34,5	3436,20	3478,51

Tabela 4.10 – Dados coletados Operador 1 para bloco padrão 75 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
1	75,00	35,08	2631,00	2619,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12	75,00	35,08	2631,00	2619,00

Tabela 4.11 – Dados coletados Operador 2 para bloco padrão 75 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
1	75,00	35,08	2631,00	2616,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12	75,00	35,08	2631,00	2616,00

Tabela 4.12 – Dados coletados Operador 3 para bloco padrão 75 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
1	75,23	35,19	2647,47	2629,18
2	75,23	35,32	2657,26	2638,90
3	75,23	35,19	2647,47	2629,18
4	75,13	35,19	2644,03	2625,76
5	75,03	35,32	2650,36	2632,05
6	75,23	35,19	2647,47	2629,18
7	75,03	35,06	2630,82	2612,65
8	75,13	35,19	2644,03	2625,76
9	75,13	35,19	2644,03	2625,76
10	75,03	35,19	2640,59	2622,35
11	74,84	35,32	2643,46	2625,20
12	75,03	35,06	2630,82	2612,65

Tabela 4.13 – Dados coletados Operador 4 para bloco padrão 75 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
1	75,06	34,80	2612,13	2621,36
2	74,86	34,67	2595,58	2604,75
3	74,96	35,06	2628,25	2637,54
4	74,76	34,80	2601,93	2611,13
5	74,96	35,06	2628,25	2637,54
6	74,96	34,93	2618,49	2627,74
7	74,86	34,93	2615,08	2624,32
8	74,86	34,93	2615,08	2624,32
9	74,96	35,00	2623,37	2632,64
10	74,86	35,00	2619,95	2629,21
11	74,76	34,80	2601,93	2611,13
12	74,86	34,54	2585,83	2594,97

Tabela 4.14 – Dados coletados Operador 1 para bloco padrão 25 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
---------	-----------------	----------------	------------------------	---------------------

1	25,00	34,79	869,75	863,20
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12	25,00	34,79	869,75	863,20

Tabela 4.15 – Dados coletados Operador 2 para bloco padrão 25 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
1	25,00	34,79	869,75	861,52
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12	25,00	34,79	869,75	861,52

Tabela 4.16 – Dados coletados Operador 3 para bloco padrão 25 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
1	24,89	34,76	865,18	862,35
2	24,89	34,76	865,18	860,91
3	24,89	34,68	863,19	854,33
4	25,06	34,76	871,09	866,36
5	24,97	34,76	867,96	853,70
6	24,89	34,76	865,18	864,88
7	24,97	34,68	865,96	855,18
8	24,89	34,76	865,18	857,29
9	24,97	34,85	870,20	867,01
10	25,06	34,68	869,08	853,72
11	24,80	34,68	860,06	865,71
12	25,06	34,76	871,09	860,22

Tabela 4.17 – Dados coletados Operador 4 para bloco padrão 25 mm

Medição	Largura (mm)	Altura (mm)	Área calculada (mm)	Área medida (mm)
1	24,80	34,68	860,06	861,57
2	24,89	34,68	863,19	862,98
3	24,80	34,68	860,06	863,95

4	24,89	34,68	863,19	860,03
5	24,80	34,85	864,28	862,69
6	24,97	34,85	870,20	862,98
7	24,97	34,68	865,96	862,42
8	24,89	34,76	865,18	861,99
9	24,97	34,76	867,96	863,96
10	24,63	34,68	854,17	859,87
11	24,72	34,59	855,06	860,30
12	24,89	34,68	863,19	863,96

Analisando o estudo de GR&R com os Operadores baseados em computador (1 e 2) e humano (3 e 4), foi possível verificar as características de cada sistema de medição. A análise de componentes principais é realizada utilizando o *software* Minitab e os resultados de autovalores, autovetores e explicação de cada componente são apresentados na Tabela 4.18 para Operadores 1 e 2, e Tabela 4.20 para Operadores 3 e 4. As componentes de variação e índices de avaliação do sistema de medição são apresentados na Tabela 4.19 para Operadores 1 e 2, e na Tabela 4.21 para Operadores 3 e 4. A visão geral do estudo do GR&R pode ser observado na Figura 4.18 para os Operadores 1 e 2 e na Figura 4.19 para os Operadores 3 e 4.

Tabela 4.18 – Análise de componentes principais para *Largura*, *Altura* e *Área* - Operadores 1 e 2

	$PC_1$	$PC_2$	$PC_3$
<b>Autovalores</b>	2,9270	0,0730	0,0000
<b>Proporção</b>	0,976	0,024	0,000
<b>Cumulativo</b>	0,976	1,000	1,000
<b>Respostas</b>	<b>Autovetores</b>		
<i>Largura</i>	0,581	-0,405	-0,706
<i>Altura</i>	0,570	0,822	-0,003
<i>Área</i>	0,581	-0,401	0,708

Tabela 4.19 – Componentes de variação e índices de avaliação do sistema de medição com PCA e CPP - Operadores 1 e 2

	$PC_1$		$PC_2$		$PC_3$		$CPP$	
	$\hat{\sigma}$	%Var	$\hat{\sigma}$	%Var	$\hat{\sigma}$	%Var	$\hat{\sigma}$	%Var
GR&R Total	0,001	0,03	0	0,13	0,001	100	0,002	0,03
Repetitividade	0	0	0	0	0	0	0	0
Reprodutividade	0,001	0,03	0	0,13	0,001	100	0,002	0,03
Operadores	0,001	0,03	0	0,12	0,001	91,31	0,002	0,03
Operador peça	0	0,01	0	0,05	0	40,78	0,001	0,01
Peça-a-peça	2,081	100	0,328	100	0	0	6,091	100
Variação Total	2,081	100	0,328	100	0,001	100	6,091	100
ndc	4799		1098		1		4912	

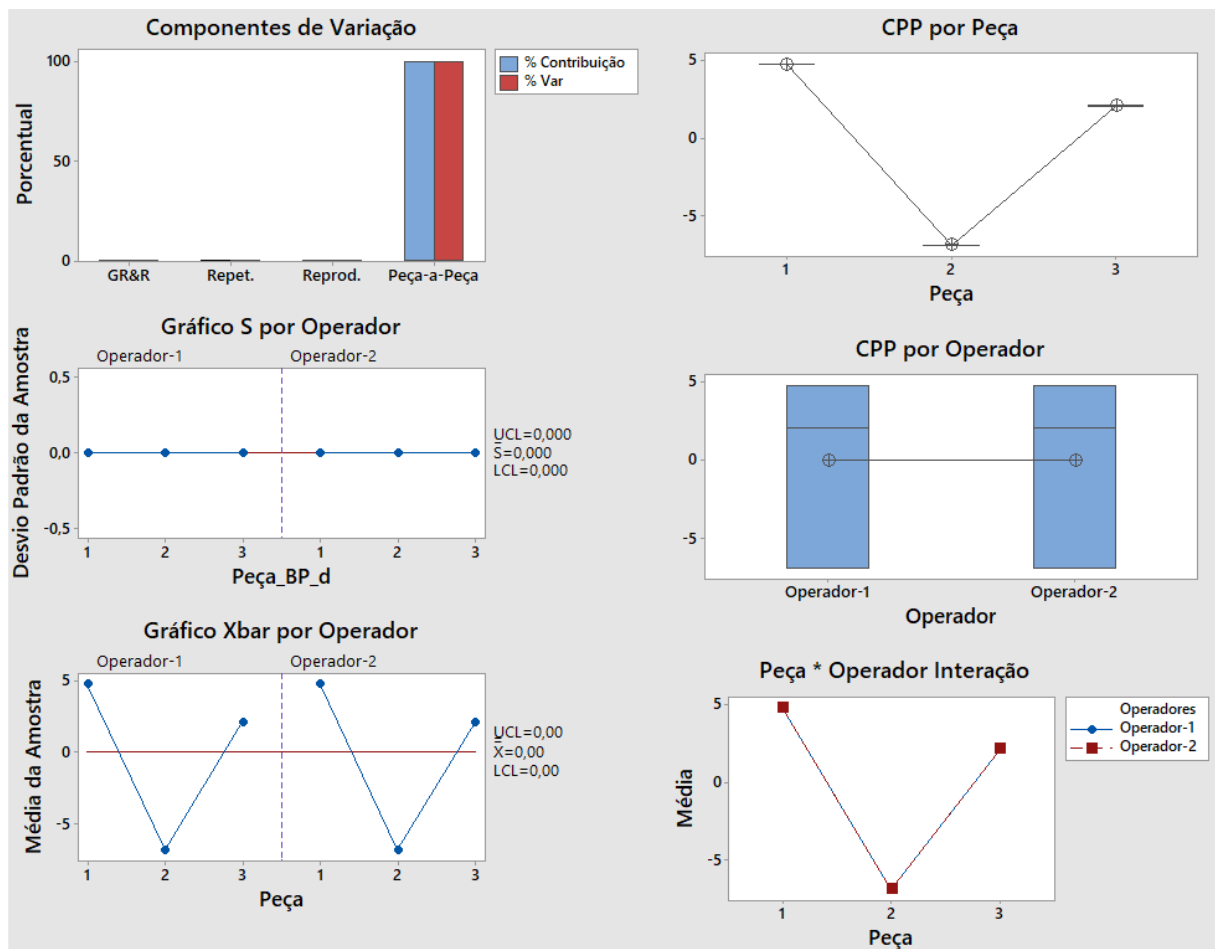


Figura 4.18 – Estudo GR&R para os Operadores 1 e 2

Analisando a componente  $PC_1$ , que representa 97,6% das variáveis originais, é possível verificar que o sistema de medição baseado em visão computacional, proposto neste

estudo é aceitável, com  $\%R\&R = 0,03\%$  e capaz de identificar 4799 categorias distintas. Da mesma forma, utilizando a análise de CPP que não possui perda de explicação das variáveis, é também verificado que o sistema de medição é aceitável com  $\%R\&R = 0,03\%$  e capaz de identificar 4912 categorias distintas. O grande número de categorias distintas é diante a baixa variabilidade do sistema de medição.

Tabela 4.20 – Análise de componentes principais para *Largura*, *Altura* e  $\bar{Área}$  - Operadores 3 e 4

	$PC_1$	$PC_2$	$PC_3$
<b>Autovalores</b>	2,3820	0,6180	0,0000
<b>Proporção</b>	0,7940	0,2060	0,0000
<b>Cumulativo</b>	0,7940	1,0000	1,0000
<b>Respostas</b>	<b>Autovetores</b>		
<i>Largura</i>	0,6250	-0,3340	-0,7060
<i>Altura</i>	0,4650	0,8850	-0,0060
$\bar{Área}$	0,6260	-0,3240	0,7090

Tabela 4.21 – Componentes de variação e índices de avaliação do sistema de medição com PCA e CPP - Operadores 3 e 4

	$PC_1$		$PC_2$		$PC_3$		$CPP$	
	$\hat{\sigma}$	%Var	$\hat{\sigma}$	%Var	$\hat{\sigma}$	%Var	$\hat{\sigma}$	%Var
GR&R Total	0,505	27,02	0,935	100	0,004	100	1,782	39,79
Repetitividade	0,258	13,80	0,480	51,29	0,004	95,03	0,912	20,35
Reprodutividade	0,435	23,22	0,803	85,85	0,001	31,14	1,531	34,19
Operadores	0,336	17,96	0,620	66,32	0,001	31,14	1,184	26,43
Operador peça	0,275	14,72	0,510	54,51	0	0	0,971	21,68
Peça-a-peça	1,801	96,28	0	0	0	0	4,109	91,74
Varição Total	1,871	100	0,935	100	0,004	100	4,478	100
<b>ndc</b>	5		1		1		3	

Como as respostas, relativas ao processo de medição manual realizado pelos Operadores 3 e 4, não possuem correlações altas, visto que  $\%PC_1 < 90\%$  a análise da primeira componente principal não explica de forma razoável a variabilidade do sistema de medição. Assim, realizando a análise somente através do método CPP, temos que o sistema de medição não é aceitável, com  $\%R\&R = 39,79\%$  e capaz de identificar 3 categorias distintas.

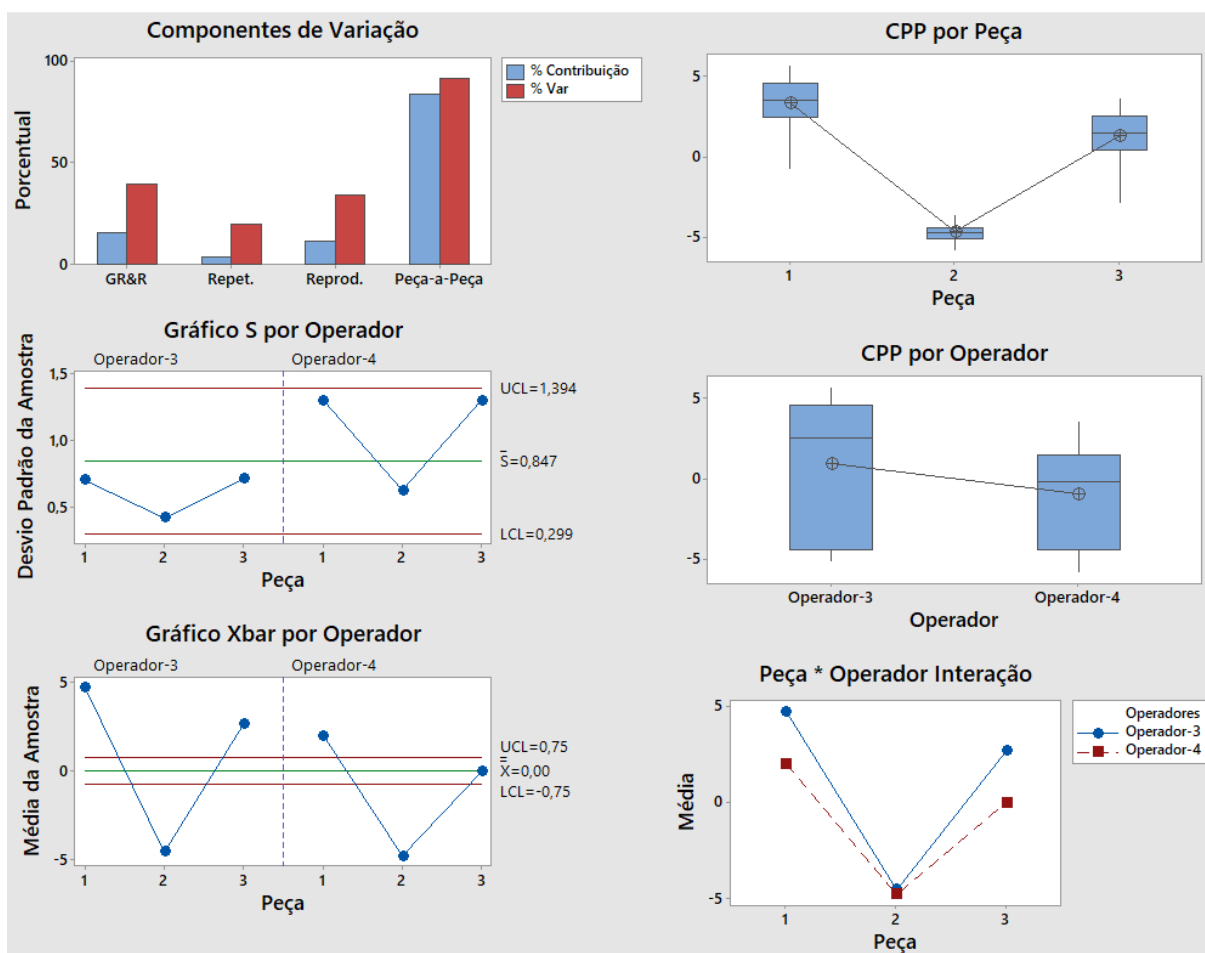


Figura 4.19 – Estudo GR&R para os Operadores 3 e 4

Desta forma, como é possível verificar que o processo de medição baseado em visão computacional é aceitável e mais preciso, uma nova dúvida a ser respondida é qual o viés do sistema de medição manual utilizado pelos Operadores 3 e 4, relativo a largura, altura e área dos blocos padrão.

Realizando o estudo de viés na largura padrão das peças, foi possível verificar os resultados diante as Tabelas 4.22-4.24 e Figura 4.20. Para a altura das peças, foi possível verificar os resultados nas Tabelas 4.25-4.27 e Figura 4.21. E finalmente para a área das peças, foi possível verificar os resultados pelas Tabelas 4.28-4.30 e Figura 4.22.

Tabela 4.22 – Linearidade do medidor para largura dos blocos padrão

Preditor	Coef	Coef SE	P
Constante	-0,05512	0,04260	0,200
Inclinação	-0,0017607	0,0005788	0,003

Tabela 4.23 – Estatística S e R-sq para largura dos blocos padrão

Estatística	Valor
S	0,153127
R-sq	11,7%

Tabela 4.24 – Viés do medidor para largura dos blocos-padrão

Referência	Viés	P
Média	-0,172500	0,000
Bloco 25	-0,101667	0,000
Bloco 75	-0,179583	0,000
Bloco 100	-0,236250	0,000

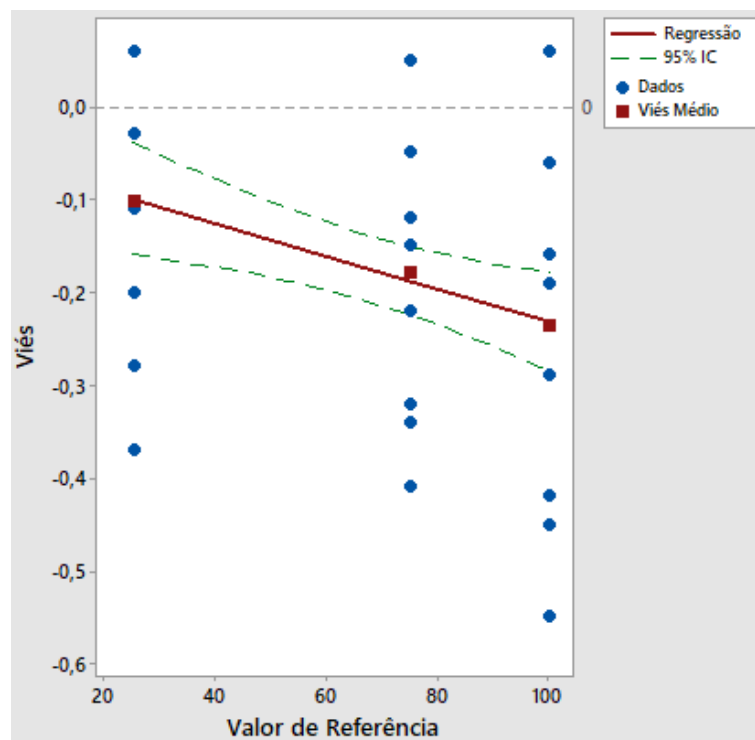


Figura 4.20 – Gráfico de viés da largura dos blocos-padrão

Tabela 4.25 – Linearidade do medidor para altura dos blocos-padrão

Preditor	Coef	Coef SE	P
Constante	7,085	5,209	0,178
Inclinação	-0,2055	0,1489	0,172

Diante os resultados apresentados, é possível verificar um viés médio no processo de medição dos Operadores 3 e 4 para:

- Largura: -0,1725 mm
- Altura: -0,102222 mm
- Área: -9,4839 mm<sup>2</sup>

Tabela 4.26 – Estatística S e R-sq

Estatística	Valor
S	0,172736
R-sq	2,6%

Tabela 4.27 – Viés do medidor para altura dos blocos-padrão

Referência	Bias	P
Média	-0,102222	0,000
Bloco 25	-0,062500	0,000
Bloco 75	-0,122083	0,000
Bloco 100	-0,122083	0,000

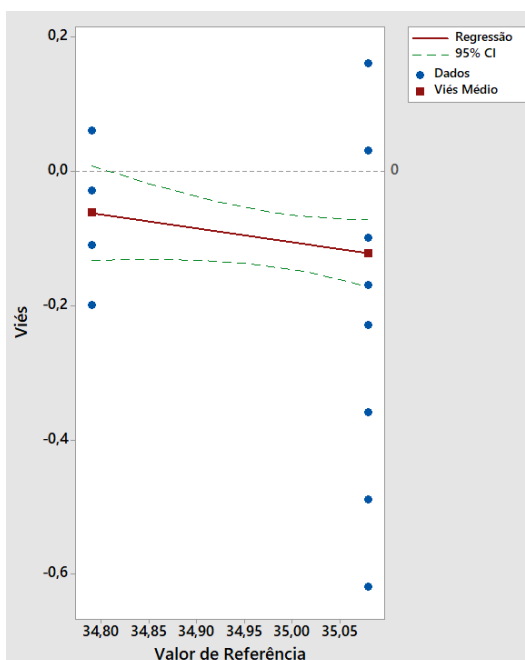


Figura 4.21 – Gráfico de viés da altura dos blocos-padrão

Tabela 4.28 – Linearidade do medidor para área dos blocos-padrão

Preditor	Coef	Coef SE	P
Constante	0,526	3,558	0,883
Inclinação	-0,004297	0,001382	0,003

Tabela 4.29 – Estatística S e R-sq para Viés de Área

Estatística	Valor
S	12,8420
R-sq	12,1%

Tabela 4.30 – Viés do medidor para área dos blocos padrão

Referência	Bias	P
Média	-9,4839	0,000
Bloco 25	-3,1662	0,000
Bloco 75	-10,8354	0,001
Bloco 100	-14,45 00	0,000

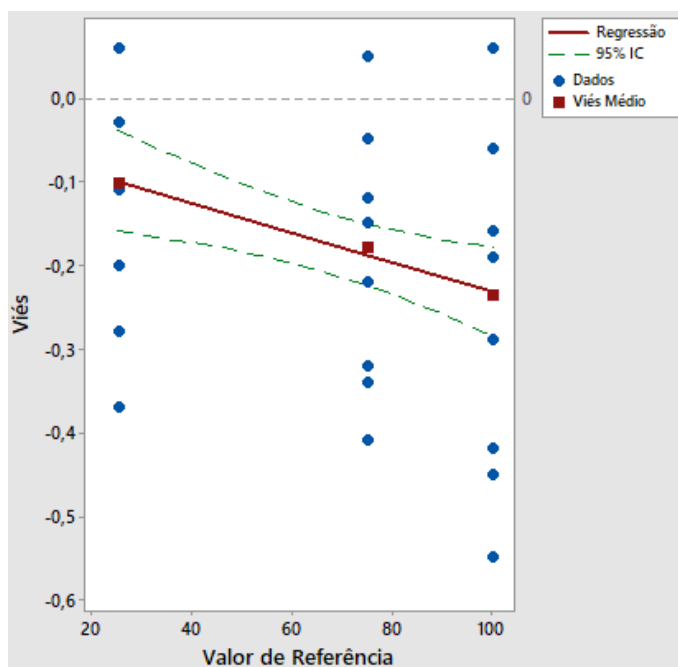


Figura 4.22 – Gráfico de viés da área dos blocos-padrão

## 4.3.5.3 Análise de repetibilidade e reprodutibilidade

Nesta etapa, houve o interesse de verificar diante o sistema de medição proposto, as características de repetibilidade e reprodutibilidade no processo de medição do objeto de estudo. Como existe forte correlação entre as variáveis estudadas, os métodos univariados de análise podem não ser satisfatórios, desta forma, um método multivariado é recomendado. O método de CPP é escolhido, por ter se mostrado mais robusto que o método MANOVA, e por não ter perda de explicação de variáveis (PERUCHI *et al.*, 2012). A análise de componentes principais é realizada para as variáveis  $W, P, R$  e  $D$  utilizando o *software* Minitab, e os autovalores e autovetores são apresentados na Tabela 4.31. As variáveis analisadas estão presentes na Tabela 4.32. Para o estudo de GR&R foram calculadas as componentes de variação para o processo (peça-a-peça), repetitividade, reprodutividade (operadores), GR&R total, sistema de medição, variação total e número de categorias distintas (ndc) que estão apresentados na Tabela 4.33.

Tabela 4.31 – Análise de componentes principais para  $W, P, R$  e  $D$ 

	$PC_1$	$PC_2$	$PC_3$	$PC_4$
<b>Autovalores</b>	2,3579	1,3056	0,2677	0,0688
<b>Proporção</b>	0,589	0,326	0,067	0,017
<b>Cumulativo</b>	0,589	0,916	0,983	1,000
<b>Respostas</b>	<b>Autovetores</b>			
<b><math>W</math></b>	0,233	0,773	-0,581	0,101
<b><math>P</math></b>	-0,473	0,532	0,586	0,387
<b><math>R</math></b>	0,576	0,303	0,542	-0,532
<b><math>D</math></b>	-0,624	0,165	-0,161	-0,746

A aplicação do método PCC pode ser observado nas equação 4.10-4.12. Onde temos a ponderação dos escores das componentes principais ( $PC_q$ ) com os respectivos autovalores ( $\lambda_q$ ).

$$CPP = \sum_{i=1}^q [\lambda_i(PC_i)] = \lambda_1 PC_1 + \lambda_2 PC_2 + \dots + \lambda_q PC_q \quad (4.10)$$

$$CPP = \sum_{i=1}^4 [\lambda_i(PC_i)] = \lambda_1 PC_1 + \lambda_2 PC_2 + \lambda_3 PC_3 + \lambda_4 PC_4 \quad (4.11)$$

$$CPP = 2,3579 PC_1 + 1,3056 PC_2 + 0,2677 PC_3 + 0,0688 PC_4 \quad (4.12)$$

Tabela 4.32 – Dados de medição dos corpos de prova utilizando a modelagem computacional proposta

#	Exp	Peça	W	P	R	D
1	E1-D	1	10,65	1,58	2,53	34,38%
2	E1-D	2	12,49	1,78	3,02	29,89%
3	E1-D	3	12,18	2,08	2,23	43,16%
4	E1-D	4	16,09	1,62	2,94	31,28%
5	E1-D	5	8,78	1,88	2,04	45,50%
6	E1-D	6	9,38	2,42	2,42	42,97%
7	E1-D	7	9,12	2,13	1,74	55,01%
8	E1-D	8	10,74	2,53	2,33	50,34%
9	E1-D	9	10,12	1,60	2,25	39,39%
10	E1-D	10	10,72	1,30	3,10	27,39%
11	E1-D	11	10,83	1,62	2,50	33,89%
12	E1-D	12	12,72	1,51	2,62	32,09%
13	E1-D	13	7,70	1,13	2,47	27,38%
14	E1-D	14	8,74	1,22	2,62	30,13%
15	E1-D	15	8,35	1,41	2,16	37,18%
16	E1-D	16	10,01	1,72	2,71	29,35%
17	E1-D	17	8,55	1,65	1,97	41,17%
18	E1-D	18	11,99	2,45	2,65	39,77%
19	E1-D	19	8,60	1,47	2,75	31,11%
20	E1-D	20	11,28	2,01	2,33	42,05%
21	E1-D	21	14,32	1,05	3,22	23,71%
22	E1-D	22	8,20	1,55	2,09	42,93%
23	E1-D	23	11,25	2,41	2,48	47,56%
24	E1-D	24	8,79	1,40	2,68	28,84%
25	E1-D	25	10,48	1,82	2,48	36,31%
26	E1-D	26	11,00	1,88	2,42	36,06%
27	E1-D	27	10,29	1,75	2,57	32,60%
28	E1-D	28	10,49	1,96	2,26	38,41%
29	E1-D	29	10,14	1,62	2,60	32,73%
30	E1-D	30	10,33	1,80	2,24	39,20%
31	E1-D	31	10,40	1,62	2,39	35,40%
32	E1-E	32	10,75	1,44	2,63	29,13%
33	E1-E	33	12,79	1,76	2,93	30,19%
34	E1-E	34	12,23	1,99	2,21	42,52%
35	E1-E	35	14,22	2,36	2,56	42,20%
36	E1-E	36	8,89	1,54	2,38	31,17%

---

37	E1-E	37	9,61	2,15	2,49	42,22%
38	E1-E	38	9,37	1,82	1,77	54,23%
39	E1-E	39	11,41	2,26	2,35	47,29%
40	E1-E	40	9,74	1,62	2,39	33,94%
41	E1-E	41	11,53	0,96	3,42	21,97%
42	E1-E	42	10,53	1,67	2,60	32,33%
43	E1-E	43	13,04	1,25	2,99	24,66%
44	E1-E	44	7,85	1,27	2,24	32,35%
45	E1-E	45	8,31	1,41	2,44	34,50%
46	E1-E	46	8,22	1,53	2,16	35,43%
47	E1-E	47	11,15	1,65	2,33	35,76%
48	E1-E	48	8,35	1,59	2,03	39,92%
49	E1-E	49	11,87	2,51	2,65	40,55%
50	E1-E	50	9,48	1,56	2,43	34,02%
51	E1-E	51	11,74	1,98	2,25	41,27%
52	E1-E	52	14,26	1,15	3,02	28,28%
53	E1-E	53	8,19	1,60	2,06	42,41%
54	E1-E	54	11,32	2,44	2,46	46,86%
55	E1-E	55	9,52	1,23	2,66	28,76%
56	E1-E	56	10,62	1,71	2,59	32,48%
57	E1-E	57	10,20	1,84	2,70	32,41%
58	E1-E	58	10,54	1,84	2,37	38,33%
59	E1-E	59	10,38	2,02	2,27	39,87%
60	E1-E	60	10,88	1,72	2,22	38,41%
61	E1-E	61	10,19	1,64	2,46	34,58%
62	E1-E	62	10,25	1,89	2,10	43,14%
63	E2-D	1	10,63	1,57	2,42	34,56%
64	E2-D	2	12,41	1,78	3,03	30,83%
65	E2-D	3	12,36	2,06	2,21	40,12%
66	E2-D	4	16,07	1,69	2,79	35,70%
67	E2-D	5	8,72	1,89	2,02	46,51%
68	E2-D	6	9,47	2,39	2,39	42,96%
69	E2-D	7	9,45	2,06	1,73	55,86%
70	E2-D	8	10,76	2,52	2,34	49,62%
71	E2-D	9	10,14	1,55	2,29	38,42%
72	E2-D	10	10,62	1,26	3,17	26,19%
73	E2-D	11	10,65	1,57	2,59	32,80%
74	E2-D	12	12,62	1,52	2,67	32,21%
75	E2-D	13	7,81	1,12	2,45	28,30%

---

76	E2-D	14	8,12	1,28	2,71	30,60%
77	E2-D	15	8,42	1,36	2,27	36,31%
78	E2-D	16	9,89	1,70	2,68	33,55%
79	E2-D	17	8,55	1,60	2,02	42,08%
80	E2-D	18	12,00	2,37	2,75	37,70%
81	E2-D	19	8,62	1,47	2,72	32,27%
82	E2-D	20	11,17	1,97	2,39	40,36%
83	E2-D	21	14,27	1,03	3,27	23,26%
84	E2-D	22	8,12	1,58	2,13	41,58%
85	E2-D	23	11,29	2,46	2,41	47,10%
86	E2-D	24	9,21	1,35	2,67	28,63%
87	E2-D	25	10,38	1,76	2,57	35,54%
88	E2-D	26	10,78	1,93	2,35	39,61%
89	E2-D	27	10,22	1,73	2,59	34,17%
90	E2-D	28	10,50	1,89	2,35	37,03%
91	E2-D	29	9,98	1,64	2,58	33,85%
92	E2-D	30	10,51	1,75	2,27	38,66%
93	E2-D	31	10,32	1,61	2,43	35,14%
94	E2-E	32	10,93	1,43	2,60	29,50%
95	E2-E	33	12,71	1,80	2,96	29,48%
96	E2-E	34	12,13	1,98	2,23	42,50%
97	E2-E	35	14,05	2,33	2,61	42,61%
98	E2-E	36	9,29	1,56	2,20	37,52%
99	E2-E	37	9,61	2,11	2,51	41,31%
100	E2-E	38	9,37	1,79	1,85	51,24%
101	E2-E	39	11,43	2,27	2,34	47,83%
102	E2-E	40	9,70	1,65	2,38	34,94%
103	E2-E	41	11,51	0,97	3,46	21,89%
104	E2-E	42	10,73	1,59	2,63	29,56%
105	E2-E	43	13,01	1,22	3,03	24,27%
106	E2-E	44	7,77	1,24	2,27	33,80%
107	E2-E	45	8,23	1,41	2,43	35,72%
108	E2-E	46	8,08	1,55	2,19	35,79%
109	E2-E	47	11,06	1,59	2,45	33,89%
110	E2-E	48	8,48	1,53	2,04	38,49%
111	E2-E	49	11,84	2,47	2,68	40,75%
112	E2-E	50	9,21	1,54	2,50	33,70%
113	E2-E	51	11,58	2,00	2,28	39,47%
114	E2-E	52	14,01	1,13	3,12	26,21%

115	E2-E	53	8,05	1,54	2,16	39,78%
116	E2-E	54	11,31	2,45	2,45	47,84%
117	E2-E	55	8,87	1,26	2,76	28,96%
118	E2-E	56	10,39	1,74	2,62	32,81%
119	E2-E	57	10,39	1,84	2,61	32,34%
120	E2-E	58	10,36	1,82	2,46	36,79%
121	E2-E	59	10,39	2,00	2,28	39,69%
122	E2-E	60	10,81	1,82	2,13	41,60%
123	E2-E	61	10,08	1,64	2,47	35,86%
124	E2-E	62	10,29	1,83	2,12	41,95%

Nesta etapa, é realizado o estudo GR&R utilizando o método de CPP. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 4.33.

Tabela 4.33 – Componentes de variação e índices de avaliação do sistema de medição usando CPP

	<i>CPP</i>	
	$\hat{\sigma}$	%Var
GR&R Total	0,25705	2,88
Repetitividade	0,25705	2,88
Reprodutividade	0	0
Operadores	0	0
Peça-a-peça	8,91656	99,96
Variação Total	8,92026	100,000
<b>ndc</b>		48

Analisando os resultados do CPP que é composto da ponderação dos autovalores com todas as componentes principais das variáveis, sendo assim, sem perda de informação das variáveis originais, o sistema de medição é satisfatório, com %R&R = 2,88% e capaz de identificar 48 categorias distintas de peças.

Há também o desejo de verificar o viés multivariado do operador humano no processo de medição manual, utilizando o processo de medição proposto como padrão. Utilizando o *software* Minitab para auxiliar nesta análise, foi encontrado os seguintes valores de viés para as variáveis *W*, *P*, *R* e *D*, que são apresentados na Tabela 4.34 e apresentados nas Figuras 4.23-4.24. Os dados de medição do operador manual são apresentados na Tabela 4.35.

Tabela 4.34 – Viés do operador humano

Variáveis	Viés Médio
$W$	0,349503 mm
$P$	-0,183177 mm
$R$	0,208913 mm
$D$	-7,07508%

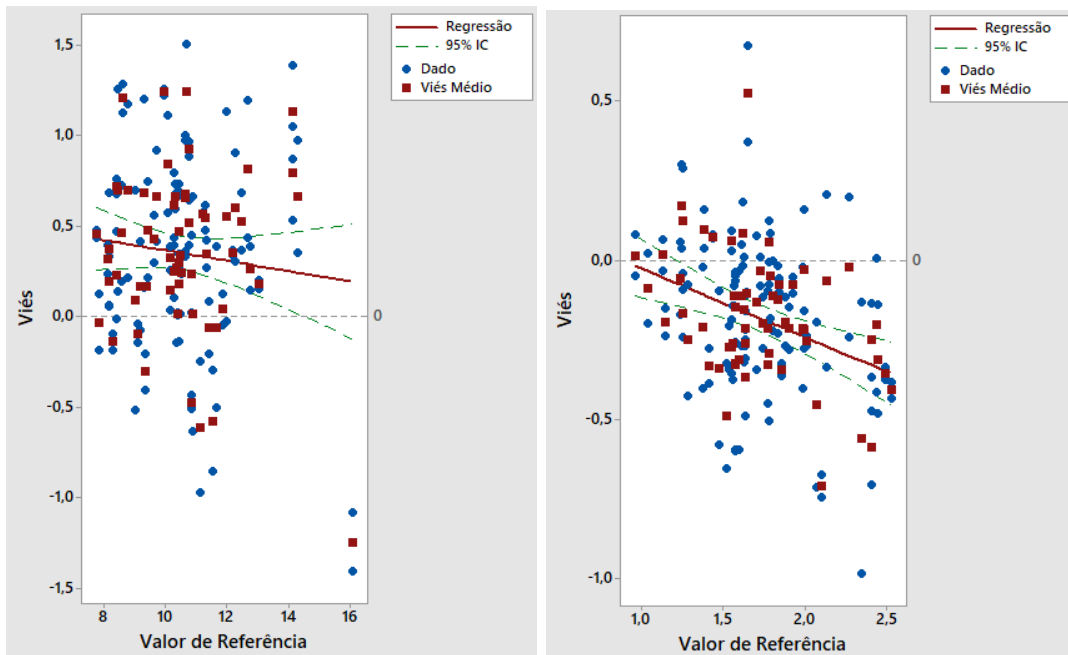


Figura 4.23 – Viés das variáveis  $W$  e  $P$  de operador humano

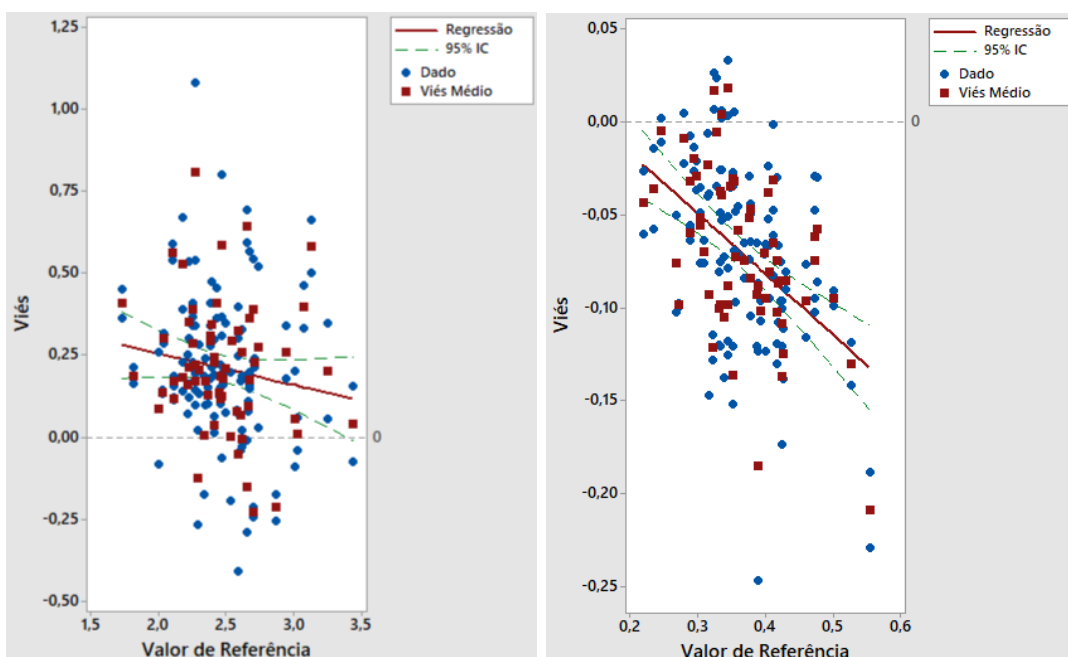


Figura 4.24 – Viés das variáveis  $R$  e  $D$  de operador humano

Tabela 4.35 – Dados de medição dos corpos de prova realizados pelo operador humano

#	Exp.	Peça	W	P	R	D
1	E1-D	1	11,63	0,98	2,67	21,87%
2	E1-D	2	13,13	1,27	3,08	22,74%
3	E1-D	3	13,17	1,35	2,75	28,61%
4	E1-D	4	14,99	2,02	2,61	33,66%
5	E1-D	5	9,92	1,76	2,16	38,29%
6	E1-D	6	10,16	1,70	2,63	34,86%
7	E1-D	7	10,48	1,35	2,09	32,51%
8	E1-D	8	11,63	2,09	2,16	40,85%
9	E1-D	9	10,38	0,97	3,34	14,19%
10	E1-D	10	12,17	1,20	3,63	21,73%
11	E1-D	11	11,38	1,00	2,83	21,20%
12	E1-D	12	13,86	0,86	3,34	19,26%
13	E1-D	13	8,23	1,19	2,59	25,57%
14	E1-D	14	9,68	1,54	2,74	25,41%
15	E1-D	15	8,85	1,54	2,46	28,29%
16	E1-D	16	11,17	1,78	2,45	27,37%
17	E1-D	17	9,27	1,63	1,91	38,58%
18	E1-D	18	13,12	2,04	3,24	26,59%
19	E1-D	19	9,89	0,89	3,25	16,97%
20	E1-D	20	11,79	2,15	2,51	36,39%
21	E1-D	21	15,26	0,84	3,59	17,68%
22	E1-D	22	8,84	1,48	2,29	34,70%
23	E1-D	23	11,88	2,02	2,59	37,76%
24	E1-D	24	9,69	1,35	2,87	23,10%
25	E1-D	25	11,11	1,87	2,33	31,35%
26	E1-D	26	11,55	1,62	2,72	27,34%
27	E1-D	27	11,04	1,46	2,66	28,02%
28	E1-D	28	11,16	1,82	2,58	32,74%
29	E1-D	29	11,17	1,36	2,89	28,33%
30	E1-D	30	11,15	1,32	2,62	29,89%
31	E1-D	31	11,04	1,34	2,47	28,32%
32	E1-E	32	11,28	1,50	2,63	27,92%
33	E1-E	33	12,89	1,90	3,12	27,68%
34	E1-E	34	12,51	1,58	2,52	30,43%
35	E1-E	35	15,00	2,21	2,83	32,30%
36	E1-E	36	9,04	1,64	2,02	37,63%
37	E1-E	37	10,16	1,79	2,84	30,97%

---

38	E1-E	38	9,53	1,58	1,97	38,56%
39	E1-E	39	11,50	2,02	2,44	38,89%
40	E1-E	40	10,63	1,38	2,79	26,51%
41	E1-E	41	11,22	0,91	3,59	15,81%
42	E1-E	42	11,60	1,32	2,80	24,53%
43	E1-E	43	13,17	1,06	3,21	23,35%
44	E1-E	44	7,62	1,16	2,48	24,98%
45	E1-E	45	8,08	1,13	2,88	23,03%
46	E1-E	46	8,20	1,33	2,40	25,88%
47	E1-E	47	10,85	1,80	2,60	31,38%
48	E1-E	48	9,17	1,41	2,35	28,46%
49	E1-E	49	11,97	2,15	3,23	31,09%
50	E1-E	50	9,14	1,36	2,83	26,56%
51	E1-E	51	12,04	1,71	2,46	37,94%
52	E1-E	52	15,18	0,90	3,53	17,25%
53	E1-E	53	8,51	1,31	2,23	34,96%
54	E1-E	54	11,58	1,96	2,67	37,04%
55	E1-E	55	9,11	1,54	2,95	28,03%
56	E1-E	56	10,75	1,73	2,56	34,96%
57	E1-E	57	10,88	1,78	2,36	34,93%
58	E1-E	58	10,79	1,81	2,60	34,58%
59	E1-E	59	10,39	1,74	2,61	32,63%
60	E1-E	60	10,33	1,67	2,56	33,35%
61	E1-E	61	10,52	1,53	2,77	31,74%
62	E1-E	62	10,37	1,53	2,69	31,36%
63	E2-D	1	10,99	1,51	2,63	29,33%
64	E2-D	2	12,81	1,70	2,98	26,75%
65	E2-D	3	12,57	1,87	2,38	34,11%
66	E2-D	4	14,67	2,32	2,69	34,01%
67	E2-D	5	8,96	1,61	2,17	34,35%
68	E2-D	6	9,63	1,93	2,63	33,88%
69	E2-D	7	9,44	1,42	2,18	36,55%
70	E2-D	8	11,71	2,14	2,52	40,02%
71	E2-D	9	10,16	1,52	2,80	26,55%
72	E2-D	10	11,65	0,85	3,79	16,52%
73	E2-D	11	11,13	1,56	2,83	25,79%
74	E2-D	12	13,10	1,19	3,24	20,63%
75	E2-D	13	8,19	1,09	2,56	28,24%
76	E2-D	14	8,56	1,21	2,77	24,91%

---

77	E2-D	15	8,37	1,42	2,28	30,16%
78	E2-D	16	11,20	1,36	2,48	30,80%
79	E2-D	17	8,74	1,30	2,25	29,66%
80	E2-D	18	11,96	2,27	2,93	32,16%
81	E2-D	19	9,73	1,37	2,76	27,77%
82	E2-D	20	11,78	1,77	2,46	32,91%
83	E2-D	21	14,64	1,06	3,30	21,98%
84	E2-D	22	8,22	1,42	2,26	32,55%
85	E2-D	23	11,74	2,44	2,57	44,39%
86	E2-D	24	8,48	0,97	2,82	22,33%
87	E2-D	25	10,68	1,60	2,72	28,78%
88	E2-D	26	10,25	1,75	2,66	31,37%
89	E2-D	27	10,68	1,62	2,65	30,76%
90	E2-D	28	10,50	1,87	2,43	33,23%
91	E2-D	29	10,63	1,47	2,18	30,65%
92	E2-D	30	10,28	1,57	2,66	30,23%
93	E2-D	31	10,21	1,66	2,42	35,73%
94	E2-E	32	10,85	1,51	2,58	26,63%
95	E2-E	33	13,13	1,77	3,28	26,12%
96	E2-E	34	12,54	1,96	2,34	32,82%
97	E2-E	35	15,52	1,36	2,98	25,01%
98	E2-E	36	8,94	1,58	2,31	34,62%
99	E2-E	37	9,90	2,33	2,57	35,06%
100	E2-E	38	9,53	1,80	2,02	40,86%
101	E2-E	39	11,21	2,46	2,58	44,55%
102	E2-E	40	10,13	1,14	2,56	22,57%
103	E2-E	41	10,66	1,04	3,36	19,22%
104	E2-E	42	10,96	1,41	2,94	23,33%
105	E2-E	43	13,22	1,29	2,92	24,58%
106	E2-E	44	7,93	1,01	2,59	21,04%
107	E2-E	45	8,17	1,02	2,79	19,87%
108	E2-E	46	8,48	1,19	2,31	30,76%
109	E2-E	47	10,13	1,60	2,86	31,21%
110	E2-E	48	9,09	1,18	2,32	29,53%
111	E2-E	49	11,80	2,11	2,82	33,96%
112	E2-E	50	8,94	1,19	3,26	20,04%
113	E2-E	51	11,15	1,83	2,41	35,07%
114	E2-E	52	14,66	0,99	3,40	17,42%
115	E2-E	53	8,35	1,53	2,22	40,92%

116	E2-E	54	11,73	2,30	2,60	42,58%
117	E2-E	55	9,60	1,28	2,92	23,17%
118	E2-E	56	10,74	1,64	2,77	29,11%
119	E2-E	57	11,02	1,74	2,64	33,03%
120	E2-E	58	10,46	1,60	2,71	30,15%
121	E2-E	59	10,40	1,77	2,37	32,72%
122	E2-E	60	10,41	1,44	2,84	27,63%
123	E2-E	61	10,39	1,54	2,40	32,48%
124	E2-E	62	10,66	1,49	2,64	28,65%

#### 4.3.5.4 Cronoanálise

Como há o interesse de verificar o quão ágil é o processo de medição de visão computacional baseado em modelagem computacional comparado com o processo de medição manual, foi necessário realizar cronoanálise.

Na Tabela 4.36 é possível verificar o tempo necessário para realizar a medição de cada corpo de prova de forma manualmente. Neste processo, o Operador 3, descrito na seção 4.3.5.2, utiliza novamente o *software* Image J, e através de definição de vértices de polígonos com cliques do *mouse*, realiza o processo de medição. É possível observar a interface do *software* ImageJ na Figura 4.25.

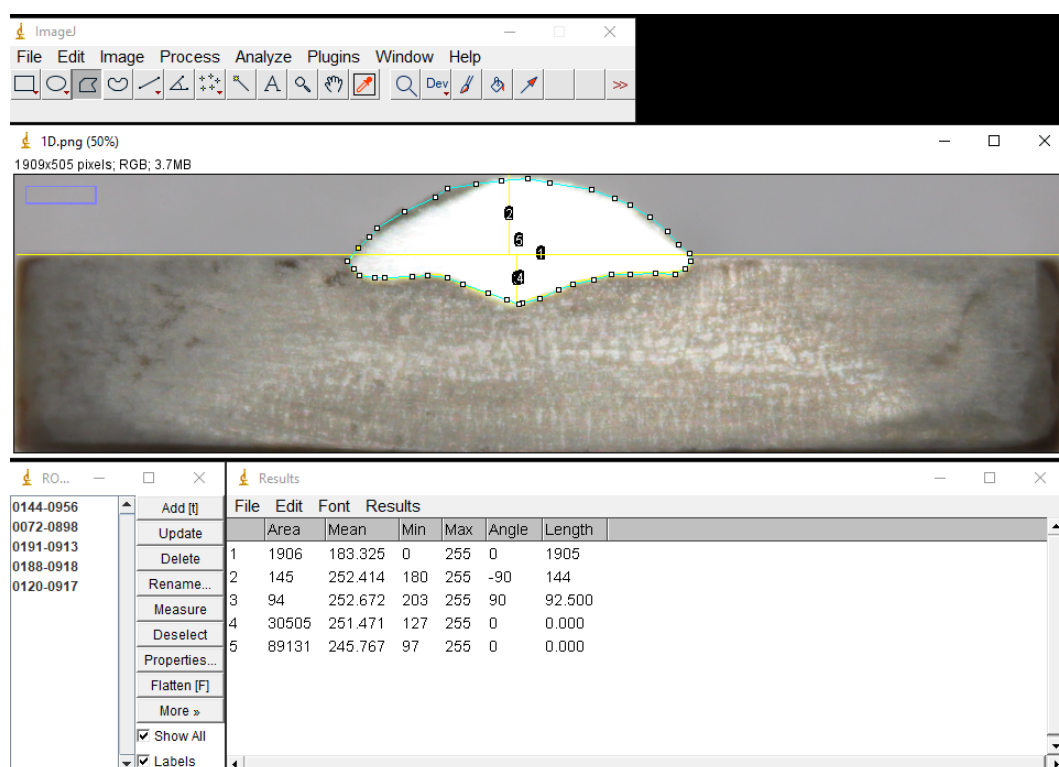


Figura 4.25 – Interface ImageJ para processo de medição manual

Tabela 4.36 – Cronoanálise operador manual

<b>Exp.</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>1</b>	3:09,56	3:05,33
<b>2</b>	3:12,98	3:09,20
<b>3</b>	3:01,23	2:53,44
<b>4</b>	3:13,25	3:45,74
<b>5</b>	3:13,78	3:26,22
<b>6</b>	3:17,16	3:11,15
<b>7</b>	3:07,34	3:26,80
<b>8</b>	3:10,29	3:22,45
<b>9</b>	2:54,54	2:34,00
<b>10</b>	2:45,30	3:21,11
<b>11</b>	3:17,23	2:40,54
<b>12</b>	2:22,26	2:39,39
<b>13</b>	2:23,12	2:45,65
<b>14</b>	3:05,93	2:31,20
<b>15</b>	2:31,34	2:43,79
<b>16</b>	2:11,24	2:15,70
<b>17</b>	1:57,00	1:57,61
<b>18</b>	2:37,85	2:19,85
<b>19</b>	2:32,57	2:31,60
<b>20</b>	2:18,58	2:13,16
<b>21</b>	3:12,52	2:24,00
<b>22</b>	2:29,73	2:40,86
<b>23</b>	2:31,15	2:40,53
<b>24</b>	2:26,80	2:54,21
<b>25</b>	2:44,31	2:15,98
<b>26</b>	2:32,73	2:44,24
<b>27</b>	2:11,88	2:20,90
<b>28</b>	2:34,33	2:09,79
<b>29</b>	1:55,87	2:15,97
<b>30</b>	2:17,91	2:04,48
<b>31</b>	1:46,85	1:45,71

Como é possível verificar na Tabela 4.36, os tempos iniciais que o operador necessita para realizar o processo de medição são ligeiramente maiores que os tempos dos últimos corpos de prova. Uma explicação para este resultado é a agilidade que o operador adquire na utilização repetitiva do *software*. Analisando o tempo médio do operador, este necessita de 2 minutos e 40,28 segundos para analisar cada peça. Como resultado final do processo de medição de ambas as faces (Direita e Esquerda) dos 31 corpos de prova, o tempo total necessário do operador manual é de 2 horas, 45 minutos e 20 segundos.

Para realização da cronoanálise da modelagem computacional proposta, o tempo de medição é calculado no intervalo de tempo de início de execução da aplicação e finalizado quando os dados estão disponíveis na planilha *online* do Google. Desta forma,

o tempo total necessário é de 37 segundos, contabilizando as 62 medições. Com tempo médio aproximado de 0,59 segundos por peça.

Como resultado final, o processo de medição baseado em modelagem computacional é 26810,81% mais ágil que o processo manual realizado pelo operador em questão.

Uma reflexão diante o processo de medição manual em um ambiente produtivo é que o tempo total seria potencialmente maior, pois seria necessário considerar as pausas do operador, as interações com outros funcionários, fadiga na realização de processo repetitivo e outras atribuições do operador.

## 4.4 Considerações finais sobre o capítulo

Neste capítulo foi possível verificar a aplicação do método experimental. Inicialmente com o *setup* de suporte ao desenvolvimento e análise, provendo as imagens digitais do objeto de estudo e as características do ambiente de programação. As atividades de extração de características são apresentadas, juntamente com a estratégia abordada. Com o processo de medição digital realizado, foi possível verificar que realmente existe uma diferença de medição significativa do processo manual, comparado com o processo proposto. A análise de bloco padrão confirmou que o método proposto possui precisão maior que o método manual, sendo um sistema de medição satisfatório, o viés de operador também foi identificado. A análise CPP confirmou que o sistema de medição também é satisfatório para o processo de medição dos corpos de prova. Com a realização da cronoanálise foi possível confirmar também que a modelagem computacional proposta é mais ágil.

# 5 CONCLUSÕES

## 5.1 Conclusões gerais

O processo de medição para garantia da qualidade, em ambientes produtivos, é muito importante. Problemas no processo ou no sistema de medição podem impactar diretamente na qualidade do produto final e na necessidade de retrabalho. O desperdício de matéria-prima, o tempo extra necessário para o retrabalho e para as análises manuais impactam ainda mais a variável custo do produto final e os lucros dos empreendimentos.

Analisando as medições realizadas por um processo manual e pela modelagem computacional proposta através do teste *paired-t* multivariado, foi identificado estatisticamente que há diferença nos processos de medição. Desta forma, foi relevante realizar um estudo aplicado da modelagem proposta com análise de bloco padrão. Com esta análise, foi possível provar que o processo de medição proposto possui melhor precisão, sendo um sistema de medição satisfatório, com  $\%R\&R = 0,03\%$  e capaz de identificar 4912 categorias distintas de peças.

Um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade também é realizado diante o objeto de estudo. Os resultados são satisfatórios, apresentando que o sistema de medição baseado em visão computacional também é aceitável diante a extração de características geométricas em objetos irregulares em processos multiobjetivos, com  $\%R\&R = 2,88\%$  e capaz de identificar 48 categorias distintas de peças.

A cronoanálise realizada também confirmou que a modelagem proposta é muito superior no quesito de tempo necessário para a realização do processo de medição, sendo 26810,81% mais ágil que o processo manual realizado pelo operador humano.

Em suma, a modelagem computacional aplicada à extração de características geométricas irregulares em processos multiobjetivos foi desenvolvida, a tese levantada no capítulo introdutório é corroborada diante o experimento realizado, com todos os objetivos destacados no Capítulo 1 alcançados.

## 5.2 Contribuições do trabalho

As principais contribuições do trabalho estão ligadas ao desenvolvimento do sistema de medição baseado em visão computacional.

O sistema de medição proposto é de grande valia para o setor produtivo, onde existe a necessidade de um sistema de medição para garantia da qualidade. Neste trabalho foi

possível garantir estatisticamente que a modelagem computacional é satisfatória como um sistema de medição e possui vantagens caso comparada aos sistemas de medição que utilizam operadores humanos/manuais; tanto pela menor variabilidade da medição, quanto a variável tempo.

A automatização do processo de teste de conformidade proposta utiliza a técnica de comparação por sobreposição dos corpos de prova do experimento analisado com o respectivo experimento de confirmação. Para aplicações práticas na indústria, ter tais informações disponíveis de forma ágil, são de extrema importância para tomada de decisões estratégicas pela gerência. Sendo possível provar para os tomadores de decisão, que uma mudança na linha de produção, pode justificar ganhos futuros relevantes, mesmo com necessidades de paralisação momentânea do sistema de produção para mudança de *setup*.

É interessante ressaltar a capacidade de vasta extração de dados, como exemplo a vetorização de todos os pontos do aço inoxidável de cada corpo de prova. Esta extração fornece uma gama de possibilidades de trabalhos futuros, alguns destacados na seção 5.3.

### 5.3 Sugestões para estudos futuros

O desenvolvimento da pesquisa mostrou que a visão computacional pode ser uma forte aliada no processo de análise de geometria de corpos de prova do processo de soldagem de revestimento. Possibilitando também a aplicação em diversos outros objetos de estudos em diversos campos de atuação. Visto a vasta gama de informação que podem ser extraídas, é possível também identificar algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo de fatores ótimos no processo de obtenção de imagens de corpos de prova. Analisar a robustez do método em diferentes cenários de iluminação, para garantir eficácia em diversas situações ambientais ou testes em campo.
- Desenvolvimento da mesma metodologia deste trabalho com suporte a *smarthphones*. A possibilidade de realizar todas as análises de forma automática apenas com a utilização de um *smartphone* em campo.
- Utilização de RNA para identificação das fronteiras dos metais presentes nos corpos de prova. A utilização de uma RNA seria uma alternativa na identificação dos corpos de prova, comparado ao algoritmo de detecção de bordas. Confrontar os dados obtidos com o sistema de medição desta pesquisa.
- Capacidade de simulação da geometria final, dado um *setup* selecionado.
- Análise de ZTA com visão computacional.
- Análise de microestrutura dos metais e sua relação com a temperatura da tocha de solda e dureza.

- 
- Incerteza de identificação da área de fronteira analisando microestrutura. Verificar os pontos de fusão dos metais na área de fronteira utilizando um microscópio eletrônico de varredura.
  - Integração de metodologia e análise em máquinas de soldas capacitadas a conexão e operação via internet. Análise, otimização e operação de solda de forma remota: estudo de caso IoT.
  - Aplicação desta modelagem com suporte a entrada de dados por vídeo. Como o vídeo é composto por imagens sucessivas, a possibilidade de integração em uma linha de produção seria de grande contribuição científica.
  - Identificação e classificação de pintas em relação ao câncer de pele.

# REFERÊNCIAS

APPOLINARIO, F. *Metodologia da ciência: filosofia e prática da pesquisa*. [S.l.]: Cengage Learning, 2009. 209 p. (Metodologia da ciência). Citado na página 37.

AQUILA, G.; PERUCHI, R. S.; JUNIOR, P. R.; ROCHA, L. C. S.; QUEIROZ, A. R. de; PAMPLONA, E. de O.; BALESTRASSI, P. P. Analysis of the wind average speed in different brazilian states using the nested grr measurement system. *Measurement*, v. 115, p. 217 – 222, 2018. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224117306838>>. Citado na página 17.

ARAUJO, L. M. M.; PAIVA, R. G. N.; PERUCHI, R. S.; JUNIOR, P. R.; GOMES, J. H. de F. New indicators for measurement error detection in grr studies. *Measurement*, v. 140, p. 557 – 564, 2019. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026322411930288X>>. Citado na página 19.

ASOUDEGI, E. Computerized dimensional inspection. *Computers Industrial Engineering*, v. 23, n. 1, p. 357 – 360, 1992. ISSN 0360-8352. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360835292901357>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

AVILES-VINAS, J. F.; LOPEZ-JUAREZ, I.; RIOS-CABRERA, R. Acquisition of welding skills in industrial robots. *INDUSTRIAL ROBOT-AN INTERNATIONAL JOURNAL*, EMERALD GROUP PUBLISHING LTD, HOWARD HOUSE, WAGON LANE, BINGLEY BD16 1WA, W YORKSHIRE, ENGLAND, 42, n. 2, p. 156–166, 2015. ISSN 0143-991X. Citado na página 31.

AVILES-VIÑAS, J. F.; RIOS-CABRERA, R.; LOPEZ-JUAREZ, I. On-line learning of welding bead geometry in industrial robots. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 83, n. 1, p. 217–231, Mar 2016. ISSN 1433-3015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7422-6>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

AZEVEDO, E.; CONCI, A.; LETA, F. *Computação gráfica - volume 2: Teoria e prática*. Elsevier Editora Ltda., 2018. (Computação gráfica). ISBN 9788535292121. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=CDJ7DwAAQBAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 6, 7 e 8.

BARBIN, D. F.; MASTELINI, S. M.; BARBON, S.; CAMPOS, G. F.; BARBON, A. P. A.; SHIMOKOMAKI, M. Digital image analyses as an alternative tool for chicken quality assessment. *Biosystems Engineering*, v. 144, p. 85 – 93, 2016. ISSN 1537-5110. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S153751101530060X>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations amp; Production Management*, v. 22, n. 2, p. 241–264, Feb 2002. ISSN 0144-3577. Citado na página 37.

- BHAT, N. N.; KUMARI, K.; DUTTA, S.; PAL, S. K.; PAL, S. Friction stir weld classification by applying wavelet analysis and support vector machine on weld surface images. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 20, p. 274 – 281, 2015. ISSN 1526-6125. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612515000730>>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 31.
- BRAILSFORD, S. C.; ELDABI, T.; KUNC, M.; MUSTAFEE, N.; OSORIO, A. F. Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, v. 278, n. 3, p. 721 – 737, 2019. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221718308786>>. Citado na página 37.
- CAO, X.; ZHU, P.; LIU, T.; LU, Y.; SHOJI, T. Thermal aging effects on mechanical and electrochemical properties of stainless steel weld overlay cladding. *Surface and Coatings Technology*, v. 344, p. 111 – 120, 2018. ISSN 0257-8972. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897218301683>>. Citado na página 16.
- CHANDRA, K.; KAIN, V.; BHUTANI, V.; RAJA, V.; TEWARI, R.; DEY, G.; CHAKRAVARTTY, J. Low temperature thermal aging of austenitic stainless steel welds: Kinetics and effects on mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, v. 534, p. 163 – 175, 2012. ISSN 0921-5093. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509311012949>>. Citado na página 16.
- CHEN, H.; LV, F.; LIN, T.; CHEN, S. Closed-loop control of robotic arc welding system with full-penetration monitoring. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, v. 56, n. 5, p. 565, May 2009. ISSN 1573-0409. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10846-009-9329-7>>. Citado 3 vezes nas páginas viii, 29 e 30.
- CHUNG, K.-L.; HUANG, Y.-H.; WANG, J.-P.; CHENG, M.-S. Speedup of color palette indexing in self-organization of kohonen feature map. *Expert Systems with Applications*, v. 39, n. 3, p. 2427 – 2432, 2012. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417411012231>>. Citado na página 11.
- COLLEDANI, M.; TOLIO, T. Impact of quality control on production system performance. *CIRP Annals*, v. 55, n. 1, p. 453 – 456, 2006. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607604570>>. Citado na página 1.
- COURBON, C.; SOVA, A.; VALIORGUE, F.; PASCAL, H.; SIJOBERT, J.; KERMOUCHE, G.; BERTRAND, P.; RECH, J. Near surface transformations of stainless steel cold spray and laser cladding deposits after turning and ball-burnishing. *Surface and Coatings Technology*, v. 371, p. 235 – 244, 2019. ISSN 0257-8972. 8th Rencontres Internationales de la Projection Thermique. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897219301094>>. Citado na página 14.
- DAHAT, A. V.; CHAVAN, P. V. Secret sharing based visual cryptography scheme using cmy color space. *Procedia Computer Science*, v. 78, p. 563 – 570, 2016. ISSN 1877-0509.

1st International Conference on Information Security Privacy 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916001058>>. Citado na página 10.

DENG, D.; MURAKAWA, H.; LIANG, W. Numerical simulation of welding distortion in large structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 196, n. 45, p. 4613 – 4627, 2007. ISSN 0045-7825. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782507002320>>. Citado na página 2.

DING, L.; GOSHTASBY, A. On the canny edge detector. *Pattern Recognition*, v. 34, n. 3, p. 721 – 725, 2001. ISSN 0031-3203. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320300000236>>. Citado na página 12.

DING, W.; GU, J.; SHANG, Z.; TANG, S.; WU, Q.; DUODU, E. A.; YANG, Z. Semantic recognition of workpiece using computer vision for shape feature extraction and classification based on learning databases. *Optik*, v. 130, p. 1426 – 1437, 2017. ISSN 0030-4026. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402616314917>>. Citado na página 1.

EVERARD, C.; O'CALLAGHAN, D.; FAGAN, C.; O'DONNELL, C.; CASTILLO, M.; PAYNE, F. Computer vision and color measurement techniques for inline monitoring of cheese curd syneresis. *Journal of Dairy Science*, v. 90, n. 7, p. 3162 – 3170, 2007. ISSN 0022-0302. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030207717642>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

Font comas, T.; Diao, C.; Ding, J.; Williams, S.; Zhao, Y. A passive imaging system for geometry measurement for the plasma arc welding process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 64, n. 9, p. 7201–7209, Sep. 2017. ISSN 0278-0046. Citado 3 vezes nas páginas viii, 32 e 33.

FUJIMOTO, T. R.; KAWASAKI, T.; KITAMURA, K. Canny-edge-detection/rankine-hugoniot-conditions unified shock sensor for inviscid and viscous flows. *Journal of Computational Physics*, v. 396, p. 264 – 279, 2019. ISSN 0021-9991. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999119304796>>. Citado na página 12.

GADELMAWLA, E. Computer vision algorithms for measurement and inspection of spur gears. *Measurement*, v. 44, n. 9, p. 1669 – 1678, 2011. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224111001990>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.

GARZIA, F. *Handbook of Communications Security*. WIT Press, 2013. ISBN 9781845647681. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=F-KBILnllSoC>>. Citado na página 10.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. *Métodos de pesquisa*. [S.l.]: Editora da UFRGS, 2019. 120 p. (Métodos de pesquisa). ISBN 9788538600718. Citado na página 37.

GIBSON, B.; LAMMLEIN, D.; PRATER, T.; LONGHURST, W.; COX, C.; BALLUN, M.; DHARMARAJ, K.; COOK, G.; STRAUSS, A. Friction stir welding: Process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 16, n. 1, p. 56 – 73,

2014. ISSN 1526-6125. Recent Developments in Welding Processes. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612513000601>>. Citado na página 31.

GIROLAMI, A.; NAPOLITANO, F.; FARAONE, D.; BRAGHIERI, A. Measurement of meat color using a computer vision system. *Meat Science*, v. 93, n. 1, p. 111 – 118, 2013. ISSN 0309-1740. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030917401200277X>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.

GOMES, J. H. de F. *Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico*. 2010. Citado 9 vezes nas páginas viii, 2, 3, 4, 16, 36, 38, 54 e 58.

GONZALEZ, R.; WOODS, R. *Processamento Digital de Imagens*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2009. ISBN 9788576054016. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 11.

GRANIER, X.; HEIDRICH, W. A simple layered rgb brdf model. *Graphical Models*, v. 65, n. 4, p. 171 – 184, 2003. ISSN 1524-0703. Special Issue on Pacific Graphics 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1524070303000420>>. Citado na página 9.

HAN, J.; YANG, S.; LEE, B. A novel 3-d color histogram equalization method with uniform 1-d gray scale histogram. *IEEE Transactions on Image Processing*, v. 20, n. 2, p. 506–512, Feb 2011. ISSN 1057-7149. Citado na página 11.

HEJWOWSKI, T.; MARCZEWSKA-BOCZKOWSKA, K.; KOBAYASHI, A. A comparative study of electrochemical properties of metallic glasses and weld overlay coatings. *Vacuum*, v. 88, p. 118 – 123, 2013. ISSN 0042-207X. Including rapid communications, original articles and a special section with papers from the Eighth International Symposium on Applied Plasma Science (ISAPS 2011), 26 – 30 September 2011, Hakone, Japan. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X1200111X>>. Citado na página 14.

HERNANDEZ-HERNANDEZ, J.; GARCÍA-MATEOS, G.; GONZÁLEZ-ESQUIVA, J.; ESCARABAJAL-HENAREJOS, D.; RUIZ-CANALES, A.; MOLINA-MARTÍNEZ, J. Optimal color space selection method for plant/soil segmentation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 122, p. 124 – 132, 2016. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169916000259>>. Citado na página 8.

HOANG, M. A.; GEUSEBROEK, J.-M.; SMEULDERS, A. W. Color texture measurement and segmentation. *Signal Processing*, v. 85, n. 2, p. 265 – 275, 2005. ISSN 0165-1684. SI on Content Based Image and Video Retrieval. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168404002610>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

HU, Z.; BICKER, R.; TAYLOR, P.; MARSHALL, C. Computer vision for shoe upper profile measurement via upper and sole conformal matching. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 45, n. 1, p. 183 – 190, 2007. ISSN 0143-8166. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816606001072>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.

IBRAHIM, M. R.; HAWORTH, J.; CHENG, T. Understanding cities with machine eyes: A review of deep computer vision in urban analytics. *Cities*, v. 96, p. 102481, 2020. ISSN 0264-2751. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275119308443>>. Citado na página 1.

JIN, Z.; LI, H.; LI, R.; SUN, Y.; GAO, H. 3d reconstruction of gmaw pool surface using composite sensor technology. *Measurement*, v. 133, p. 508 – 521, 2019. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118309813>>. Citado na página 33.

JOHNSON, R.; WICHERN, D. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Pearson Prentice Hall, 2007. (Applied Multivariate Statistical Analysis). ISBN 9780131877153. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=gFWcQgAACAAJ>>. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 19 e 60.

KURKA, P. R. G.; SALAZAR, A. A. D. Applications of image processing in robotics and instrumentation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 124, p. 142 – 169, 2019. ISSN 0888-3270. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327019300160>>. Citado 3 vezes nas páginas 8, 11 e 12.

LEVIN, B.; DUPONT, J.; MARDER, A. Weld overlay coatings for erosion control. *Wear*, v. 181-183, p. 810 – 820, 1995. ISSN 0043-1648. 10th International Conference on Wear of Materials. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164895902007>>. Citado na página 14.

LI, B. Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, n. 101, 2018. Citado na página 1.

LI, Z.-H.; HAN, D.; YANG, C.-J.; ZHANG, T.-Y.; YU, H.-Q. Probing operational conditions of mixing and oxygen deficiency using hsv color space. *Journal of Environmental Management*, v. 232, p. 985 – 992, 2019. ISSN 0301-4797. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718314348>>. Citado na página 10.

LIU, Y. Estimation of weld joint penetration under varying gta pools. *Welding journal*, v. 92, p. 313s–321s, 01 2013. Citado na página 30.

LOPES, L. G. D.; GOMES, J. H. de F.; PAIVA, A. P. de; BARCA, L. F.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P. A multivariate surface roughness modeling and optimization under conditions of uncertainty. *Measurement*, v. 46, n. 8, p. 2555 – 2568, 2013. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224113001425>>. Citado na página 18.

MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, A. J.; VICARIO, I. M.; HEREDIA, F. J. Instrumental measurement of orange juice colour: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 85, n. 6, p. 894–901, 2005. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jsfa.2115>>. Citado na página 7.

MENG, Y.; ZHANG, Z.; YIN, H.; MA, T. Automatic detection of particle size distribution by image analysis based on local adaptive canny edge detection and modified circular hough transform. *Micron*, v. 106, p. 34 – 41, 2018. ISSN 0968-4328. Disponível

em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968432817303086>>. Citado na página 12.

MURN, R.; PEČEK, D. Computer vision measuring system. *Measurement*, v. 8, n. 4, p. 161 – 164, 1990. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0263224190900388>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

OPENCV. *OpenCV about the framework*. 2019. Disponível em: <<https://opencv.org/about/>>. Citado na página 13.

PAIVA, A. P.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P. A multivariate hybrid approach applied to aisi 52100 hardened steel turning optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 189, n. 1, p. 26 – 35, 2007. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607000076>>. Citado na página 17.

PAIVA, A. P. de; GOMES, J. H. F.; PERUCHI, R. S.; LEME, R. C.; BALESTRASSI, P. P. A multivariate robust parameter optimization approach based on principal component analysis with combined arrays. *Computers Industrial Engineering*, v. 74, p. 186 – 198, 2014. ISSN 0360-8352. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835214001715>>. Citado na página 17.

PALANI, P. K.; MURUGAN, N. Development of mathematical models for prediction of weld bead geometry in cladding by flux cored arc welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 30, n. 7, p. 669–676, Oct 2006. ISSN 1433-3015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-005-0101-2>>. Citado na página 14.

PANDIT, R.; TANG, J.; LIU, F.; PITTS, M. Development of a novel approach to determine heating pattern using computer vision and chemical marker (m-2) yield. *Journal of Food Engineering*, v. 78, n. 2, p. 522 – 528, 2007. ISSN 0260-8774. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877405007259>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.

PEREZ-RODRIGUEZ, F.; GOMEZ-GARCIA, E. Codelplant: Regression-based processing of rgb images for colour models in plant image segmentation. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 163, p. 104880, 2019. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919303898>>. Citado na página 8.

PERUCHI, R.; BALESTRASSI, P.; CAMPOS, P.; LOPES, L. Um estudo grr multivariado aplicado no torneamento do aço abnt 12l14. In: . [S.l.: s.n.], 2012. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 18, 19 e 74.

PERUCHI, R. S.; Rotela Junior, P.; Brito, T. G.; Paiva, A. P.; Balestrassi, P. P.; Mendes Araújo, L. M. Integrating multivariate statistical analysis into six sigma dmaic projects: A case study on aisi 52100 hardened steel turning. *IEEE Access*, v. 8, p. 34246–34255, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

RAFF, U.; ROJAS, G. M.; HUETE, I.; HUTCHINSON, M. Computer assessment of neurodegeneration in parkinson disease using data fusion techniques with mr images. *Academic Radiology*, v. 10, n. 9, p. 1036 – 1044, 2003. ISSN 1076-6332. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1076633203001053>>. Citado na página 10.

- RIOS-CABRERA, R.; MORALES-DIAZ, A. B.; AVILES-VIÑAS, J. F.; LOPEZ-JUAREZ, I. Robotic gmaw online learning: issues and experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 87, n. 5, p. 2113–2134, Nov 2016. ISSN 1433-3015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-016-8618-0>>. Citado 3 vezes nas páginas [viii](#), [31](#) e [32](#).
- SCIME, L.; BEUTH, J. Using machine learning to identify in-situ melt pool signatures indicative of flaw formation in a laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Additive Manufacturing*, v. 25, p. 151 – 165, 2019. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418306869>>. Citado na página [34](#).
- SISWANTORO, J.; PRABUWONO, A. S.; ABDULAH, A. Volume measurement of food product with irregular shape using computer vision and monte carlo method: A framework. *Procedia Technology*, v. 11, p. 764 – 770, 2013. ISSN 2212-0173. 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics, ICEEI 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313004106>>. Citado 2 vezes nas páginas [25](#) e [28](#).
- STRACHAN, N. Length measurement of fish by computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 8, n. 2, p. 93 – 104, 1993. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016816999390009P>>. Citado 2 vezes nas páginas [25](#) e [26](#).
- SUN, X.; YOUNG, J.; LIU, J.-H.; NEWMAN, D. Prediction of pork loin quality using online computer vision system and artificial intelligence model. *Meat Science*, v. 140, p. 72 – 77, 2018. ISSN 0309-1740. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309174017314481>>. Citado 2 vezes nas páginas [25](#) e [29](#).
- SZELISKI, R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer London, 2010. (Texts in Computer Science). ISBN 9781848829350. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=bXzAlkODwa8C>>. Citado 2 vezes nas páginas [6](#) e [7](#).
- TOULOUSE, T.; ROSSI, L.; CAMPANA, A.; CELIK, T.; AKHLOUFI, M. A. Computer vision for wildfire research: An evolving image dataset for processing and analysis. *Fire Safety Journal*, v. 92, p. 188 – 194, 2017. ISSN 0379-7112. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711217302114>>. Citado 2 vezes nas páginas [25](#) e [29](#).
- TRIPATHI, M. K.; MAKTEDAR, D. D. A role of computer vision in fruits and vegetables among various horticulture products of agriculture fields: A survey. *Information Processing in Agriculture*, 2019. ISSN 2214-3173. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317318303834>>. Citado na página [1](#).
- VARGHESE, P.; VETRIVENDAN, E.; DASH, M. K.; NINGSHEN, S.; KAMARAJ, M.; MUDALI, U. K. Weld overlay coating of inconel 617m on type 316l stainless steel by cold metal transfer process. *Surface and Coatings Technology*, v. 357, p. 1004 – 1013, 2019. ISSN 0257-8972. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897218311800>>. Citado na página [14](#).

VERMA, A. K.; DAS, S. A brief overview on cladding techniques with a reference to weld cladding using gas metal arc welding. *Reason-A Technical Journal*, p. 45, 07 2011. Citado na página 14.

WHITE, D.; SVELLINGEN, C.; STRACHAN, N. Automated measurement of species and length of fish by computer vision. *Fisheries Research*, v. 80, n. 2, p. 203 – 210, 2006. ISSN 0165-7836. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165783606001512>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

WU, D.; SUN, D.-W. Colour measurements by computer vision for food quality control – a review. *Trends in Food Science Technology*, v. 29, n. 1, p. 5 – 20, 2013. ISSN 0924-2244. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224412001835>>. Citado na página 7.

XIONG, J.; PI, Y.; CHEN, H. Deposition height detection and feature point extraction in robotic gta-based additive manufacturing using passive vision sensing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 59, p. 326 – 334, 2019. ISSN 0736-5845. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584517304635>>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 34.

XIONG, J.; ZHANG, G.; QIU, Z.; LI, Y. Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: material and energy savings in gmaw-based rapid manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 41, p. 82 – 88, 2013. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612005410>>. Citado na página 30.

ZHANG, J.; YU, L.; LIU, Y.; LI, H.; LIU, C.; WU, J.; MA, J.; LI, Z. Effect of welding sequences on the welding stress and distortion in the cfetr vacuum vessel assembly using finite element simulation. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, p. 103930, 2019. ISSN 0308-0161. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016118303351>>. Citado na página 2.

ZHAO, C.; CHEUNG, C. F.; LIU, M. Nanoscale measurement with pattern recognition of an ultra-precision diamond machined polar microstructure. *Precision Engineering*, v. 56, p. 156 – 163, 2019. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635918304288>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 29.

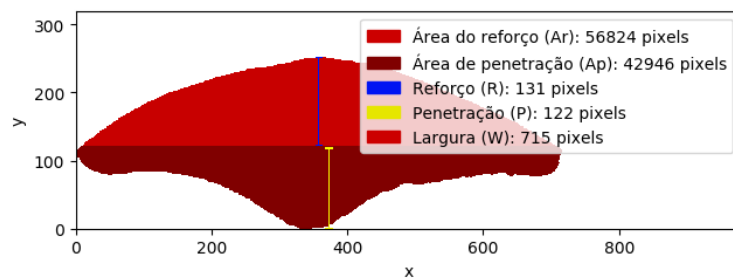
ZHONG, B.; WU, H.; DING, L.; LOVE, P. E.; LI, H.; LUO, H.; JIAO, L. Mapping computer vision research in construction: Developments, knowledge gaps and implications for research. *Automation in Construction*, v. 107, p. 102919, 2019. ISSN 0926-5805. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519303875>>. Citado na página 1.

## Apêndices

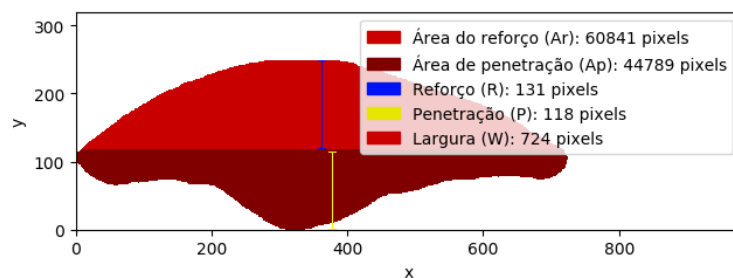
# APÊNDICE A – GRÁFICOS DE MEDIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

Experimento	Perfil	Gráfico
1	Direito	<p>           Área do reforço (Ar): 56757 pixels            Área de penetração (Ap): 29439 pixels            Reforço (R): 147 pixels            Penetração (P): 92 pixels            Largura (W): 619 pixels         </p>
1	Esquerdo	<p>           Área do reforço (Ar): 64344 pixels            Área de penetração (Ap): 31403 pixels            Reforço (R): 149 pixels            Penetração (P): 91 pixels            Largura (W): 633 pixels         </p>
2	Direito	<p>           Área do reforço (Ar): 96364 pixels            Área de penetração (Ap): 40601 pixels            Reforço (R): 185 pixels            Penetração (P): 109 pixels            Largura (W): 764 pixels         </p>
2	Esquerdo	<p>           Área do reforço (Ar): 83486 pixels            Área de penetração (Ap): 43081 pixels            Reforço (R): 164 pixels            Penetração (P): 110 pixels            Largura (W): 747 pixels         </p>

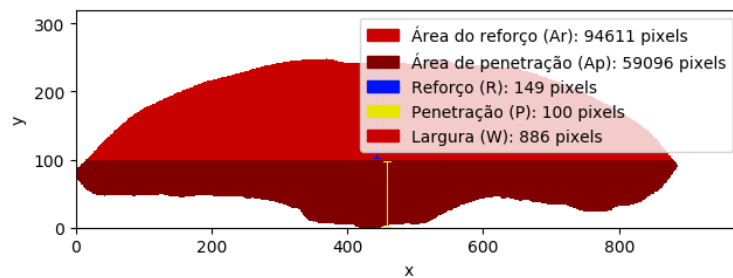
3 Direito



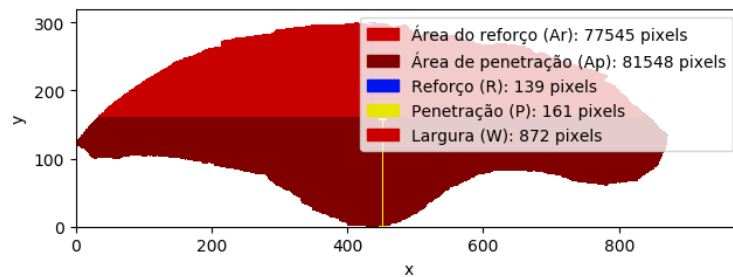
3 Esquerdo



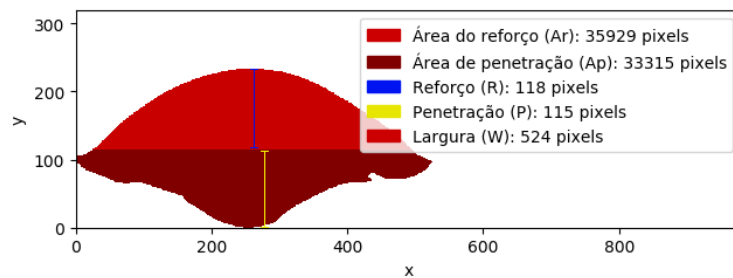
4 Direito



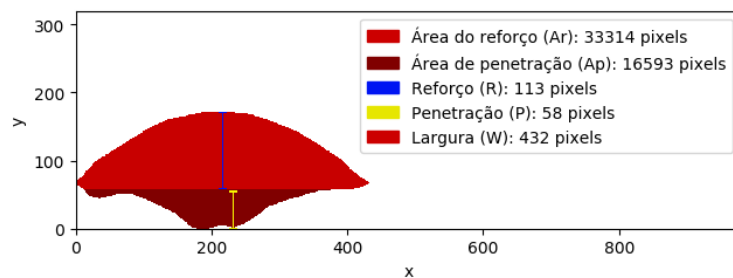
4 Esquerdo



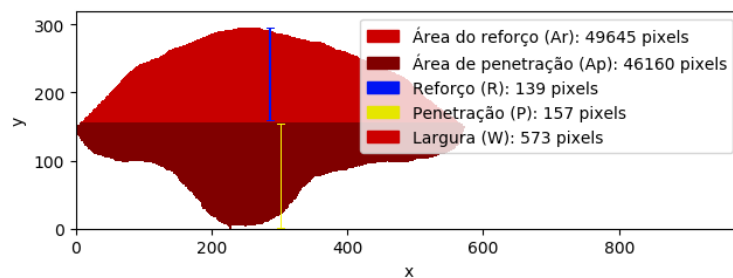
5 Direito



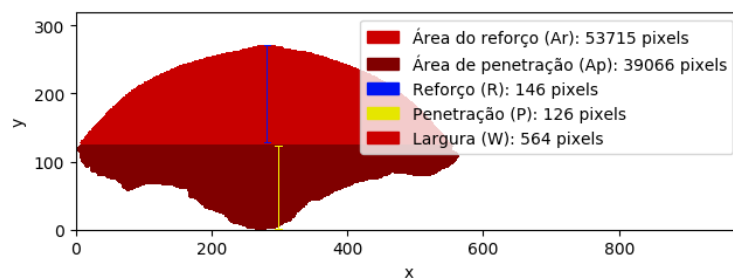
5 Esquerdo



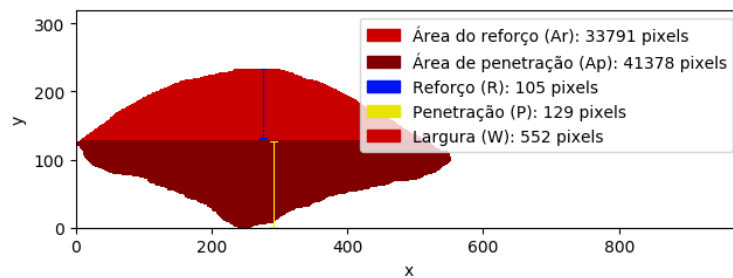
6 Direito



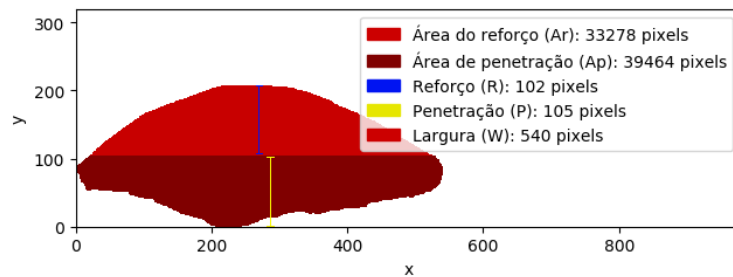
6 Esquerdo



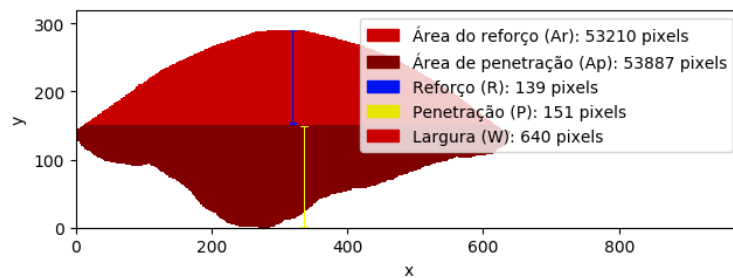
7 Direito



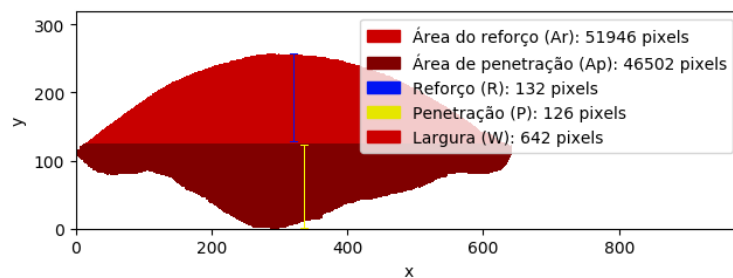
7 Esquerdo



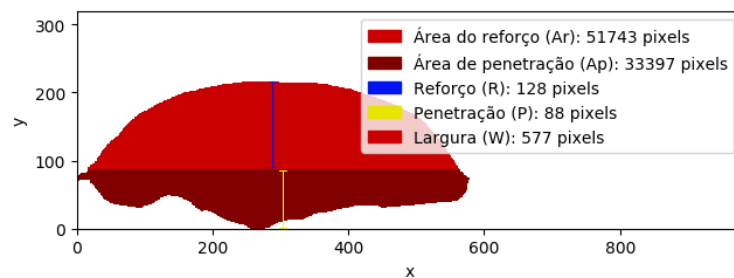
8 Direito



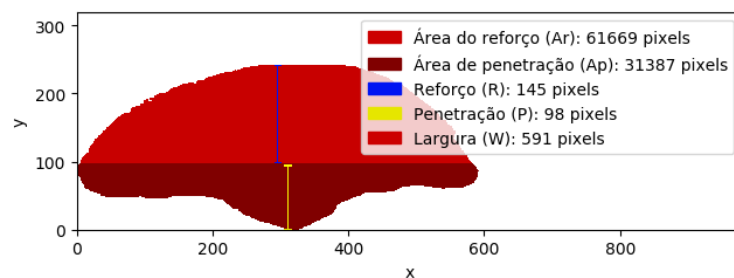
8 Esquerdo



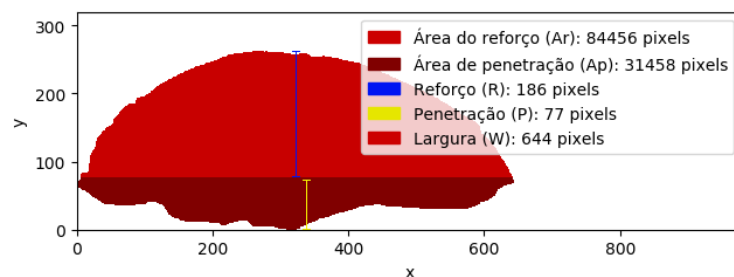
9 Direito



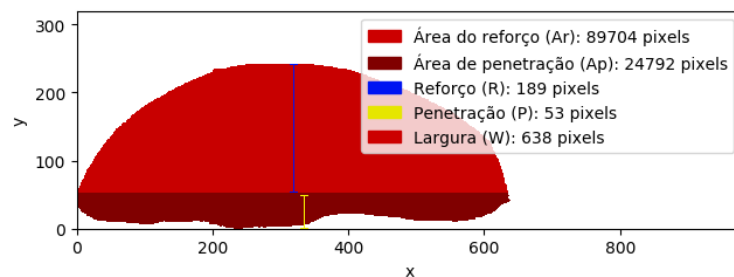
9 Esquerdo



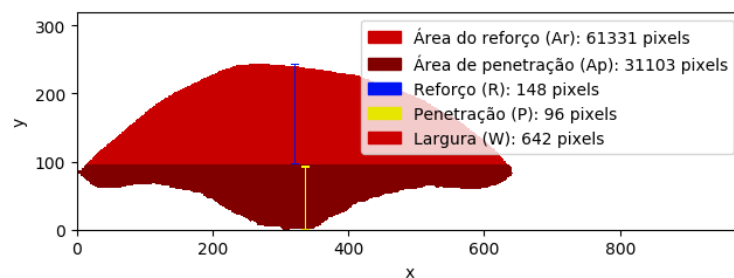
10 Direito



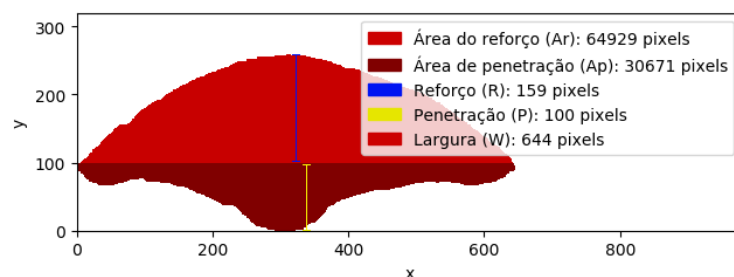
10 Esquerdo



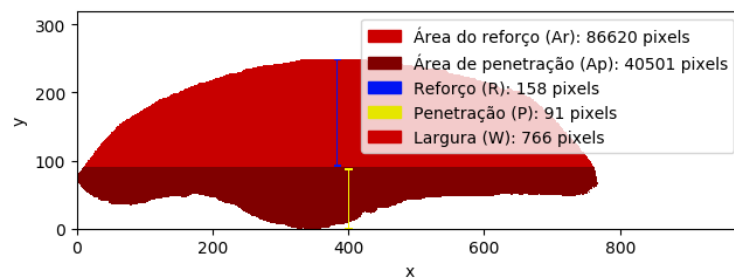
11 Direito



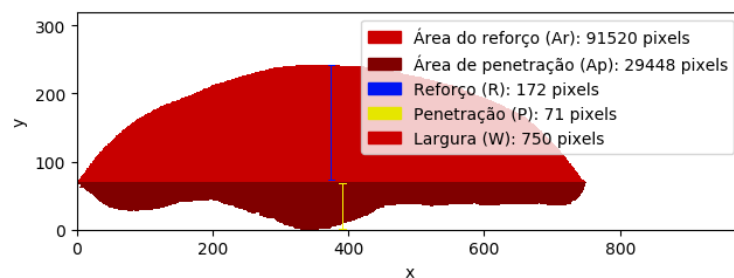
11 Esquerdo



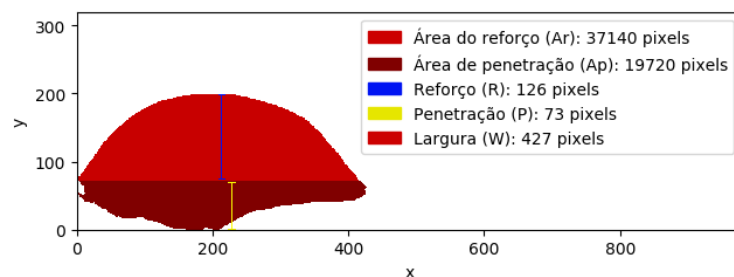
12 Direito



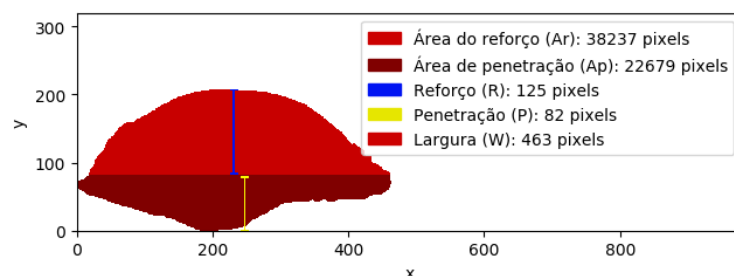
12 Esquerdo



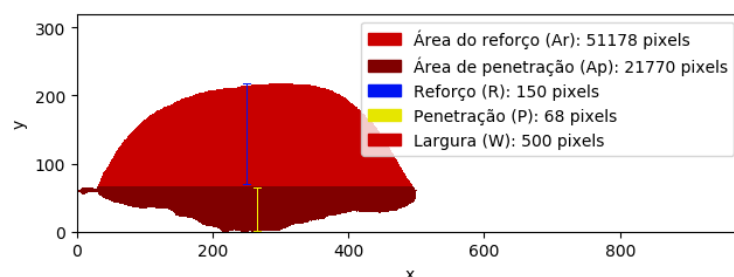
13 Direito



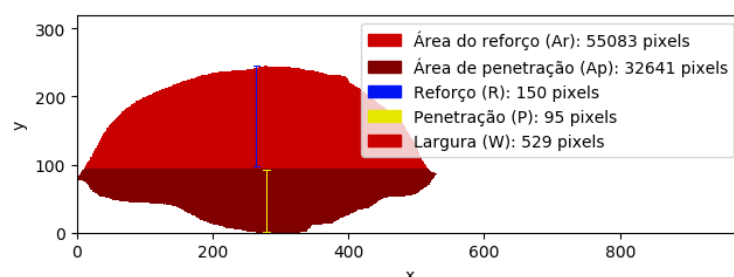
13 Esquerdo



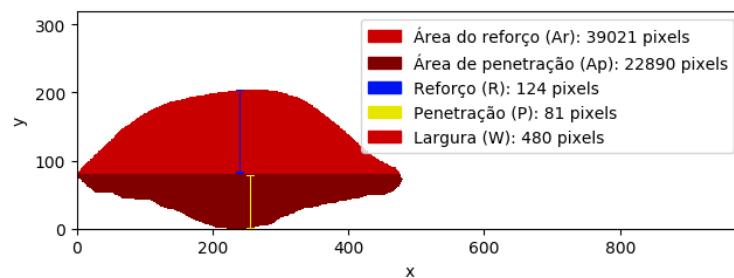
14 Direito



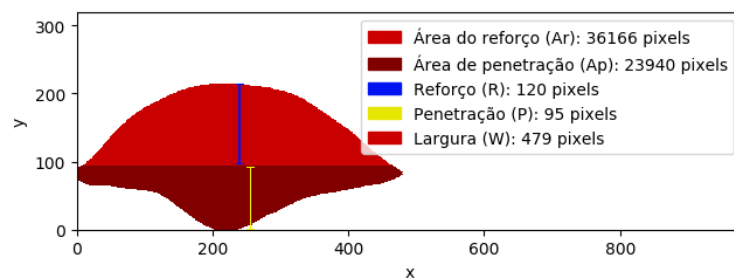
14 Esquerdo



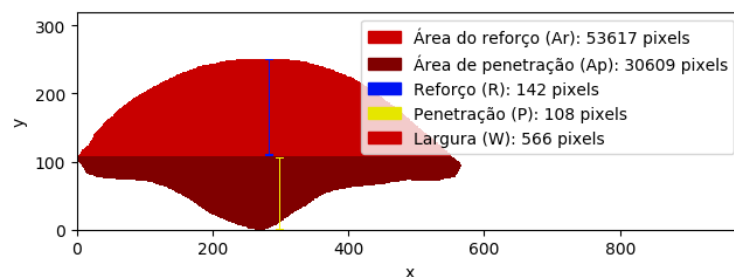
15 Direito



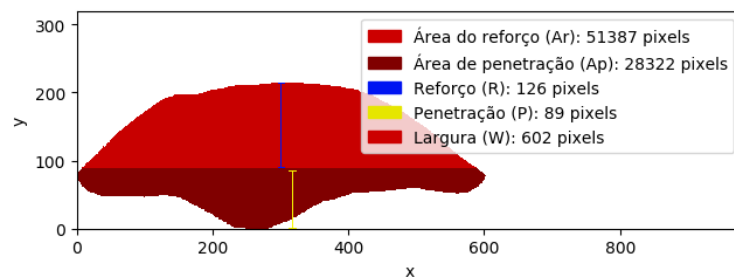
15 Esquerdo



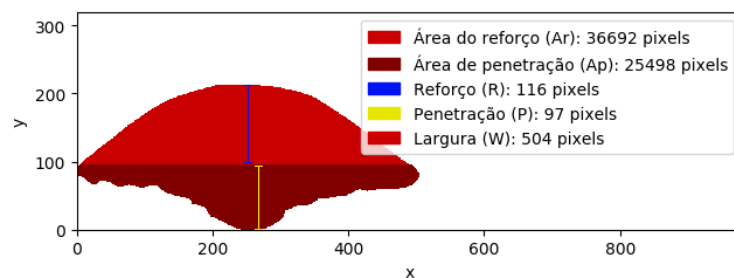
16 Direito



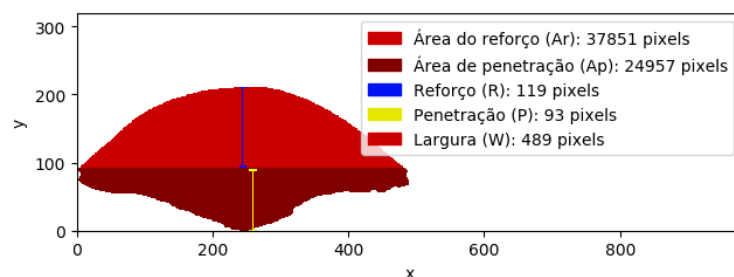
16 Esquerdo



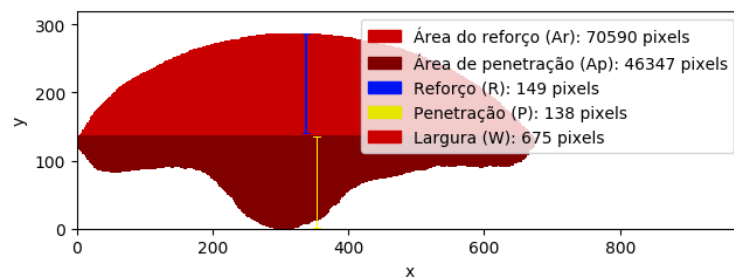
17 Direito



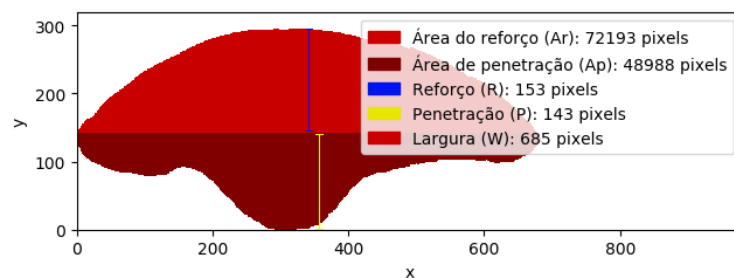
17 Esquerdo



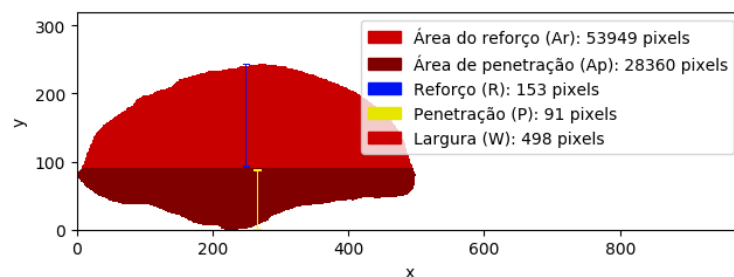
18 Direito



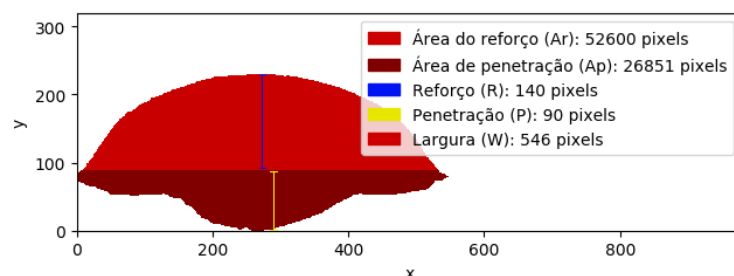
18 Esquerdo



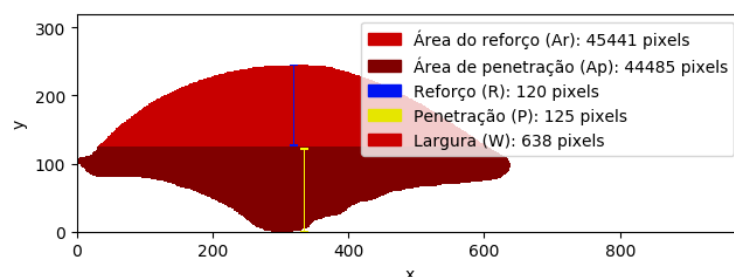
19 Direito



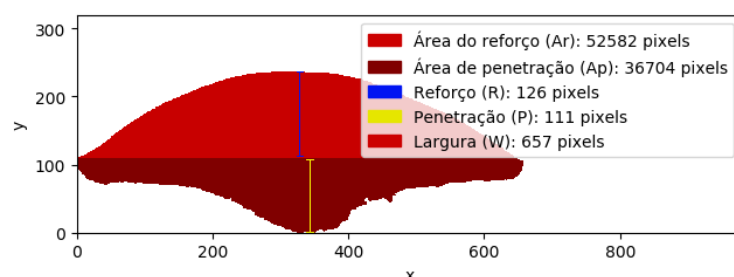
19 Esquerdo



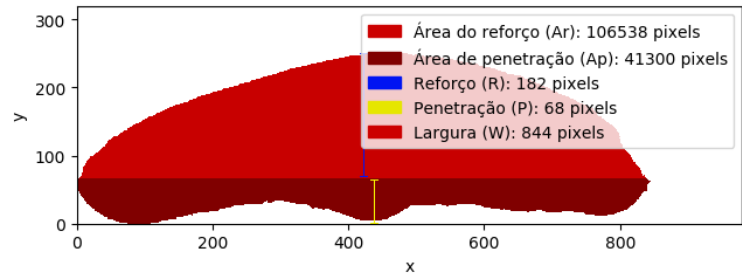
20 Direito



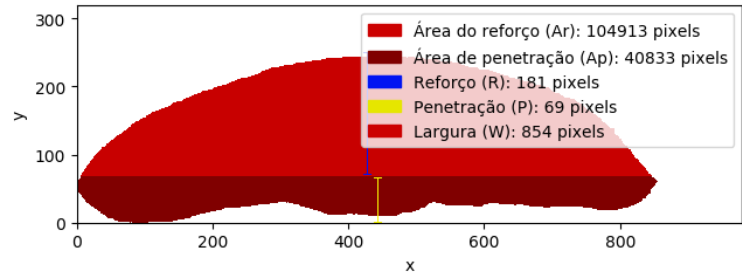
20 Esquerdo



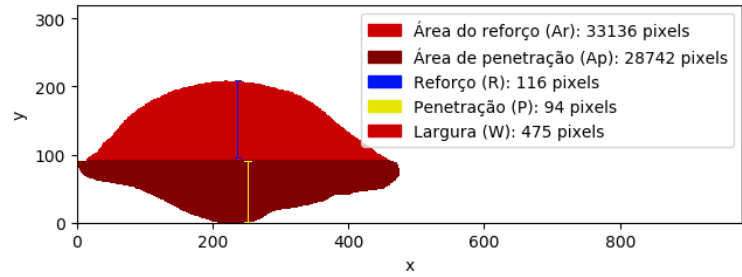
21 Direito



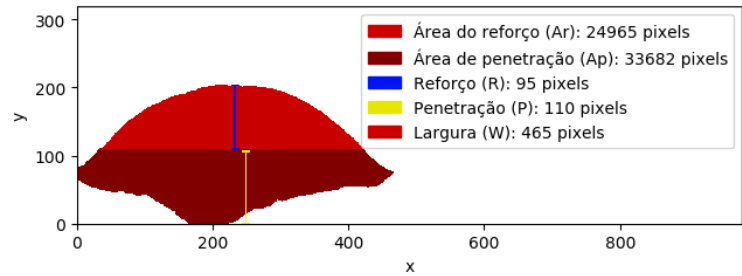
21 Esquerdo



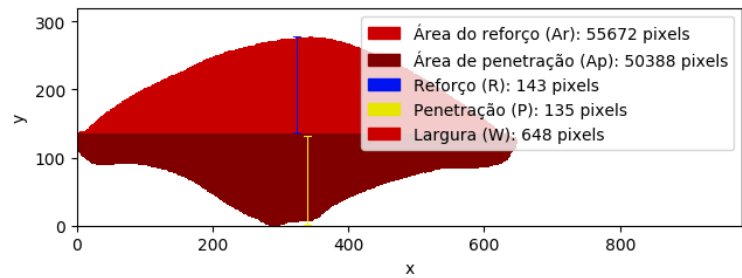
22 Direito



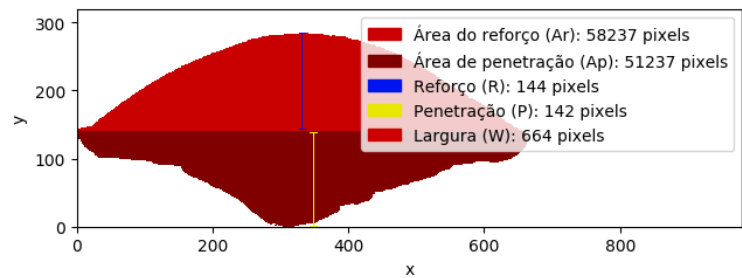
22 Esquerdo



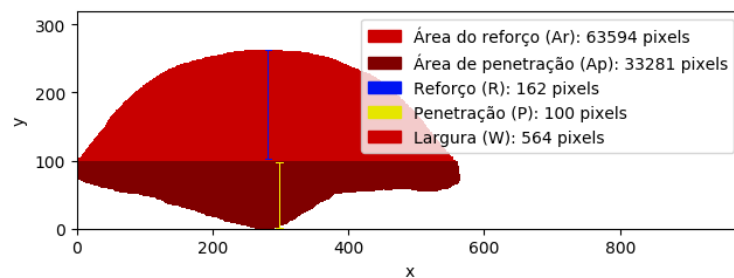
23 Direito



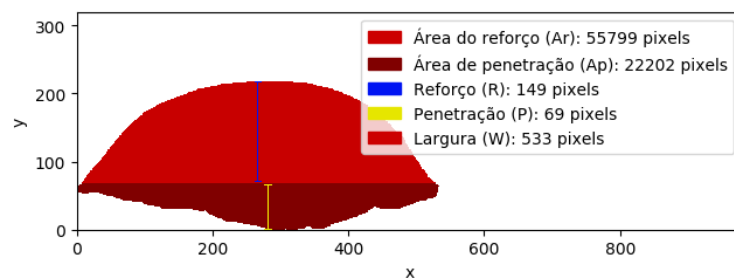
23 Esquerdo



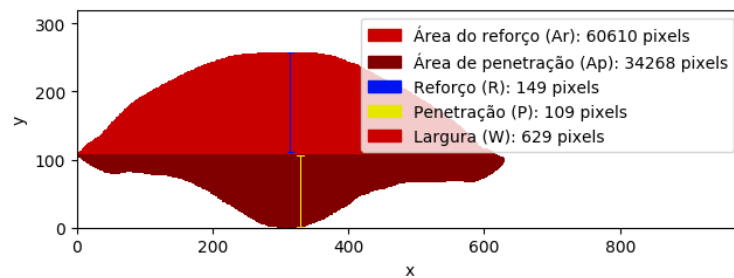
24 Direito



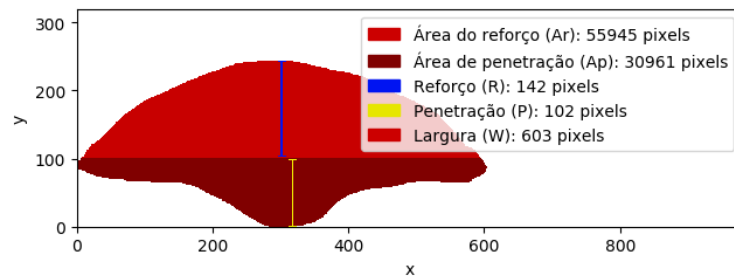
24 Esquerdo



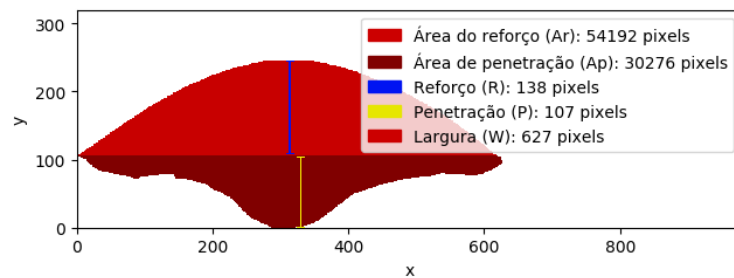
25 Direito



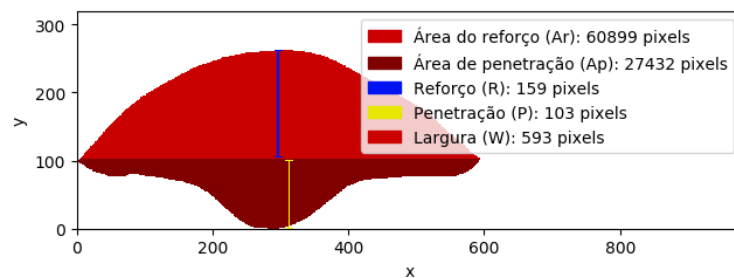
25 Esquerdo



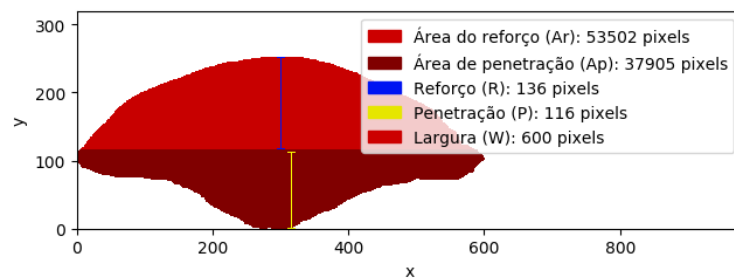
26 Direito



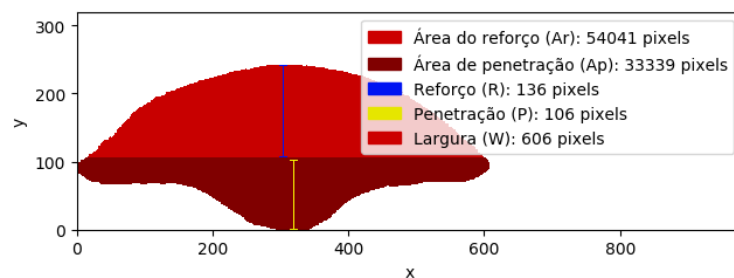
26 Esquerdo



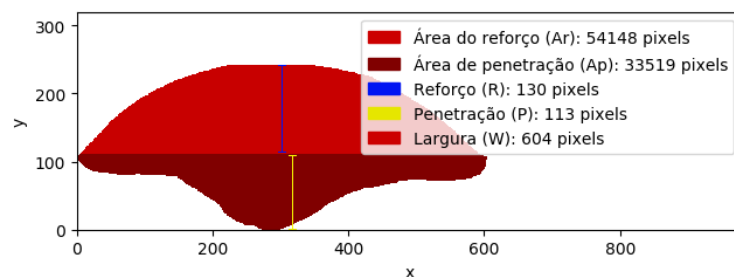
27 Direito



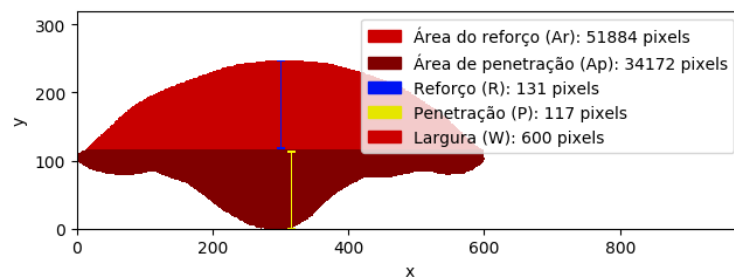
27 Esquerdo



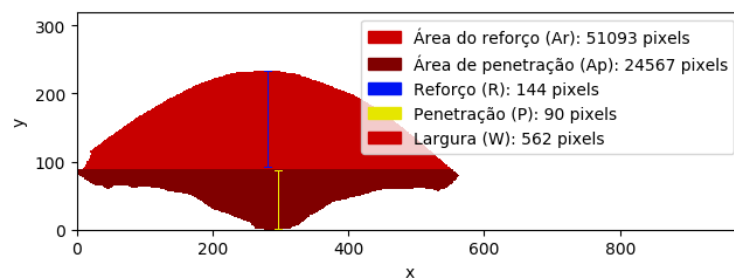
28 Direito



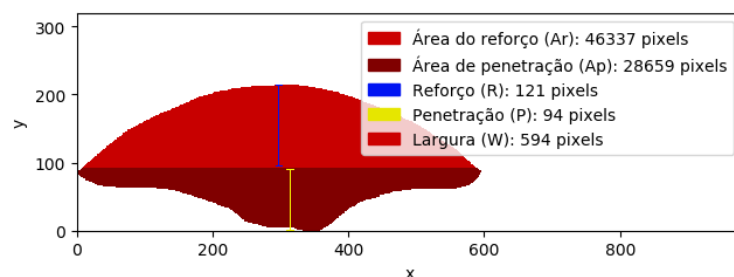
28 Esquerdo



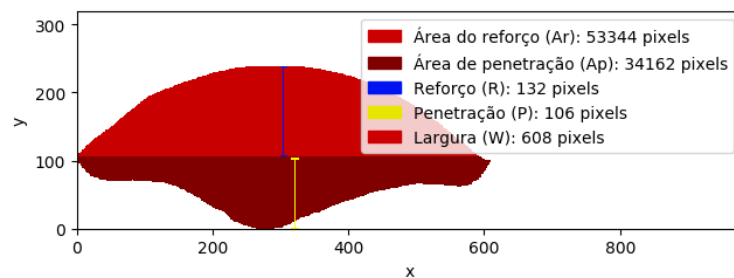
29 Direito



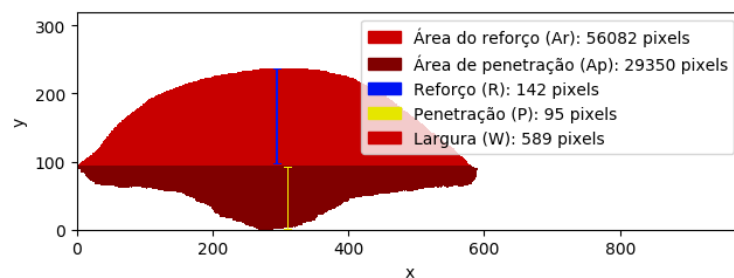
29 Esquerdo



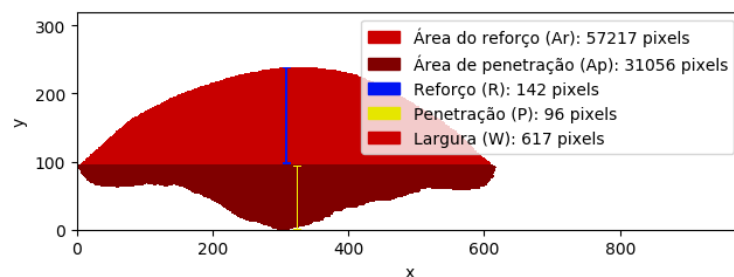
30 Direito



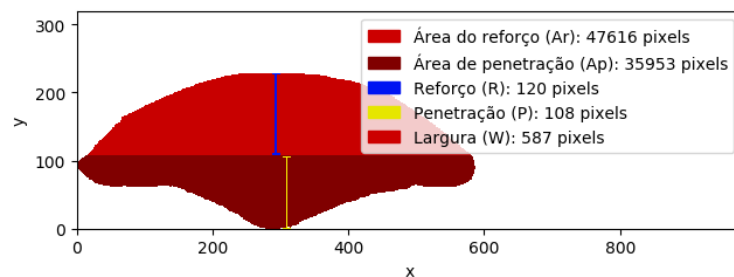
30 Esquerdo



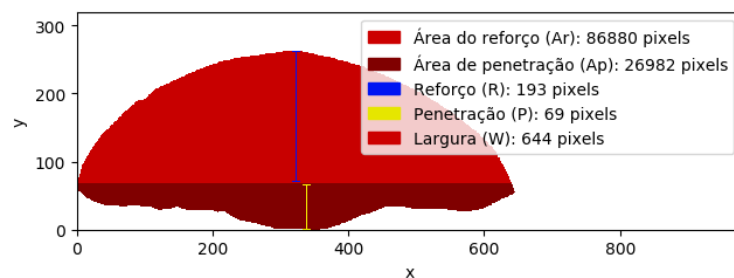
31 Direito



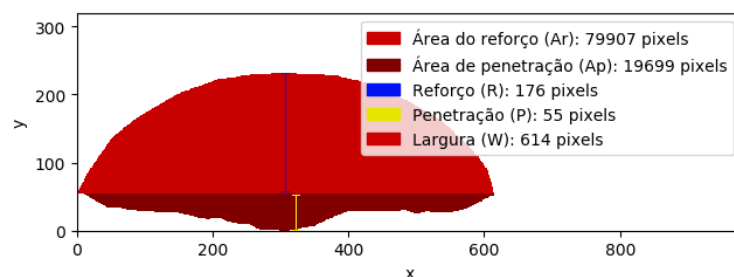
31 Esquerdo



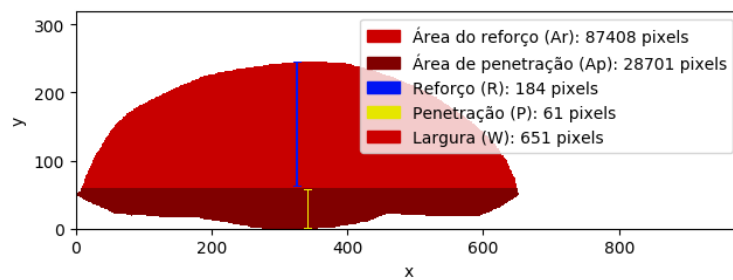
V1 Direito



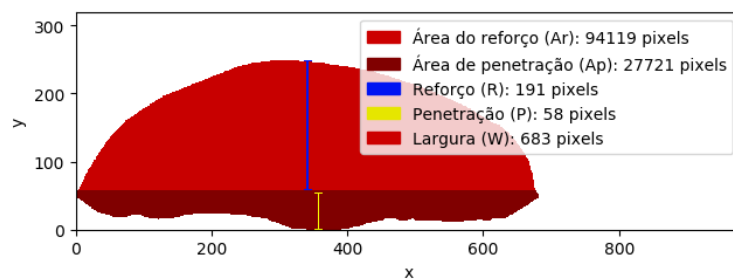
V1 Esquerdo



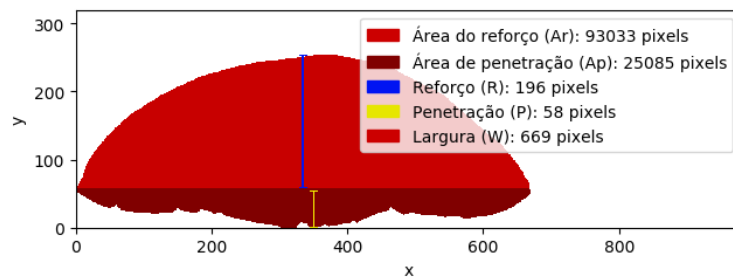
V2 Direito



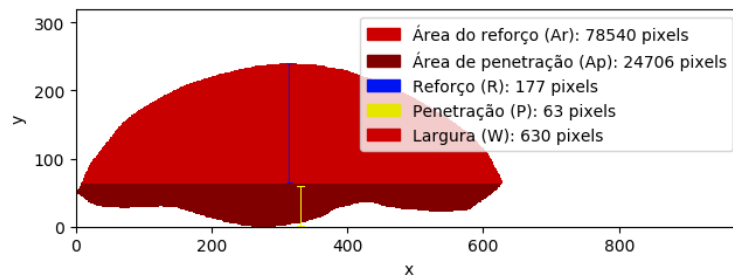
V2 Esquerdo



V3 Direito



V3 Esquerdo

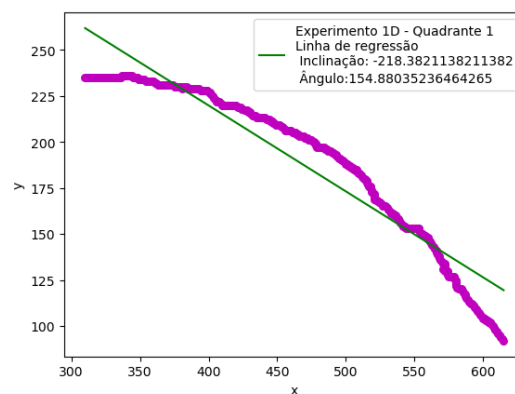
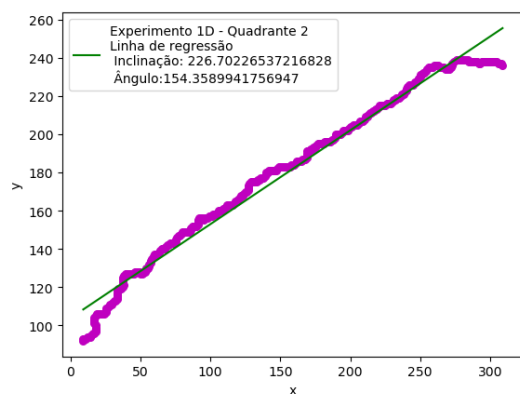


# APÊNDICE B – GRÁFICOS DE CURVATURA DO OBJETO DE ESTUDO

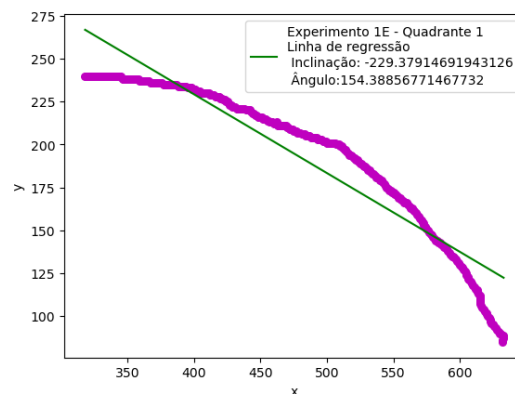
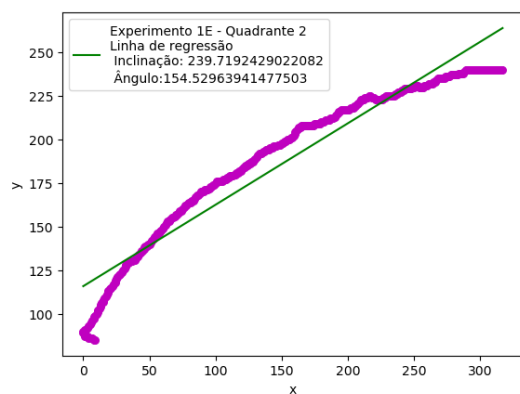
Exp. Quadrante 1

Quadrante 2

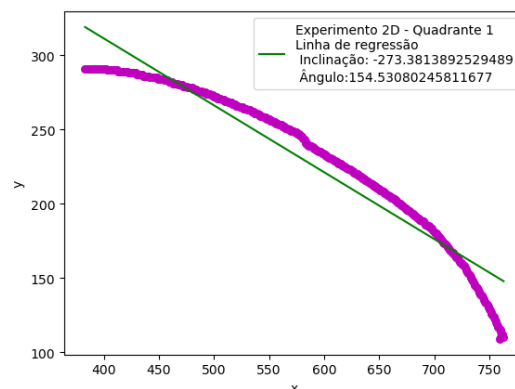
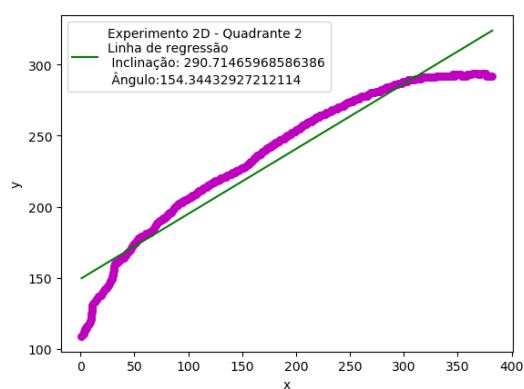
1



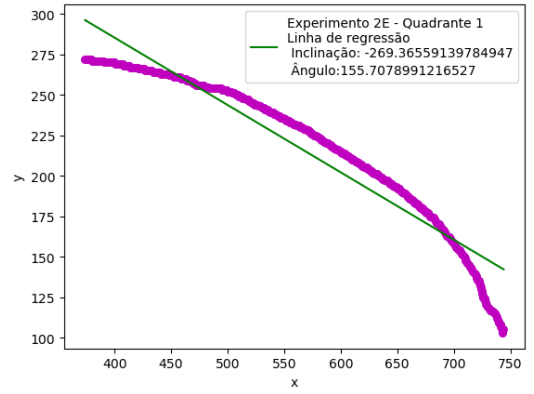
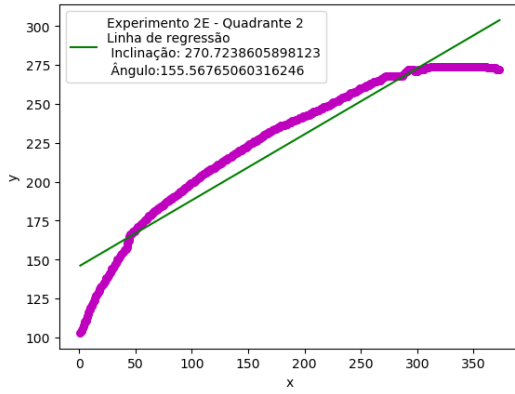
1



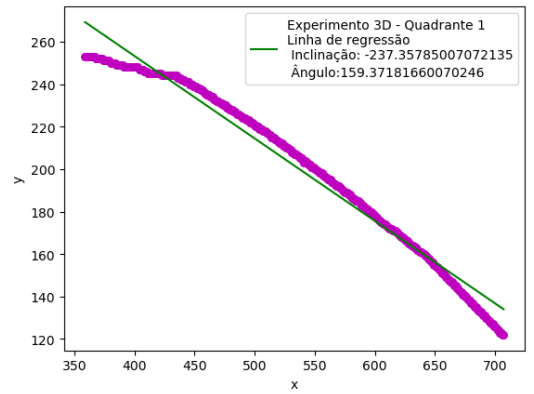
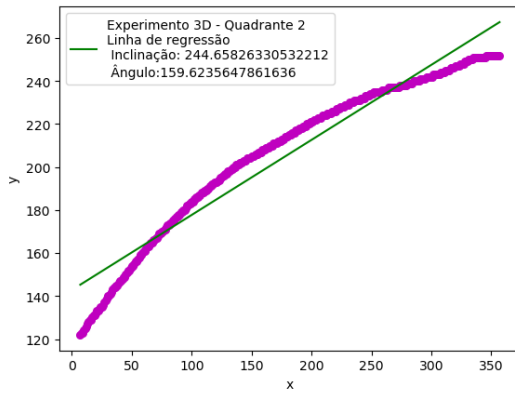
2



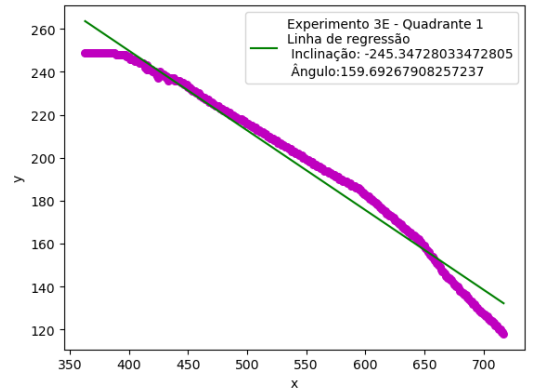
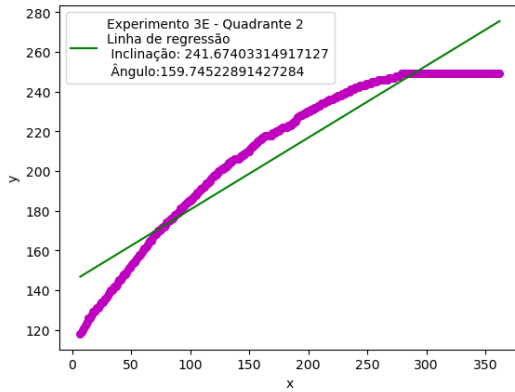
2



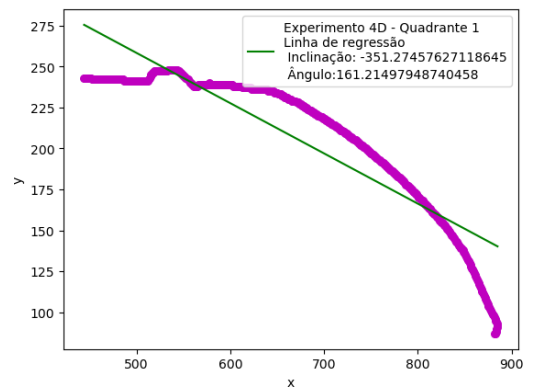
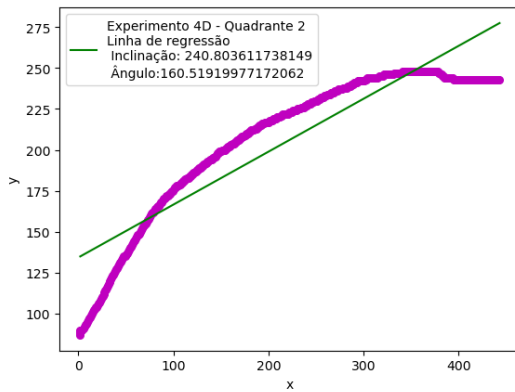
3



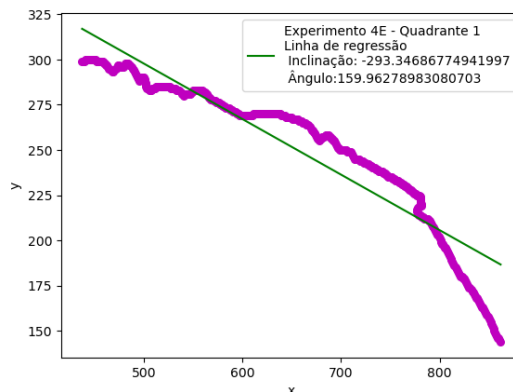
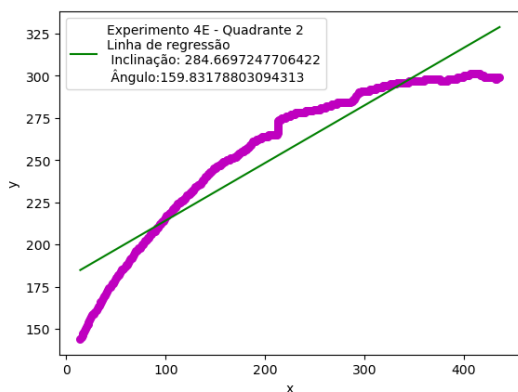
3



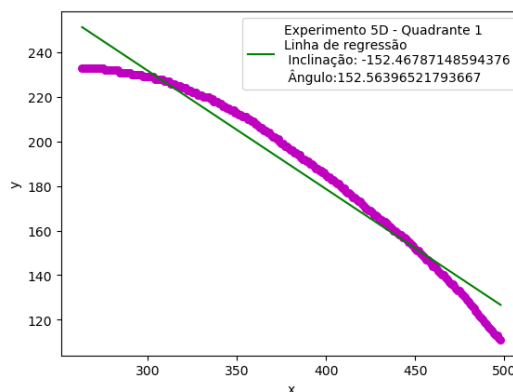
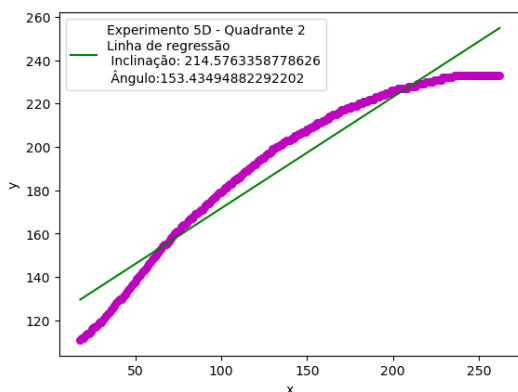
4



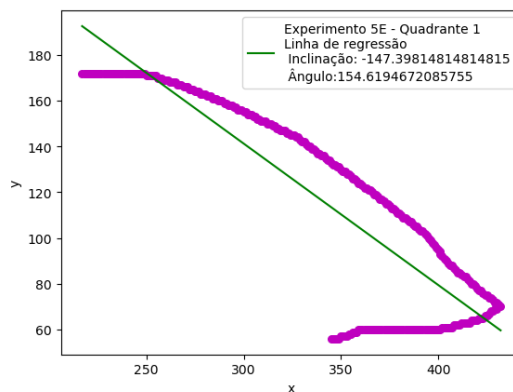
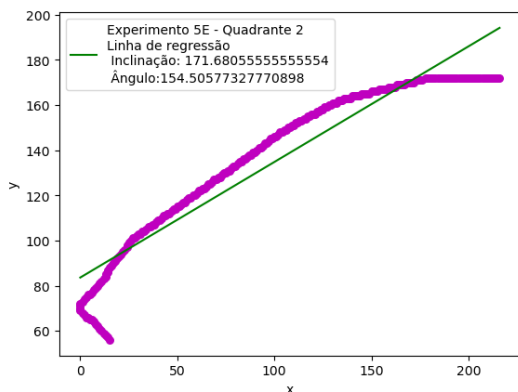
4



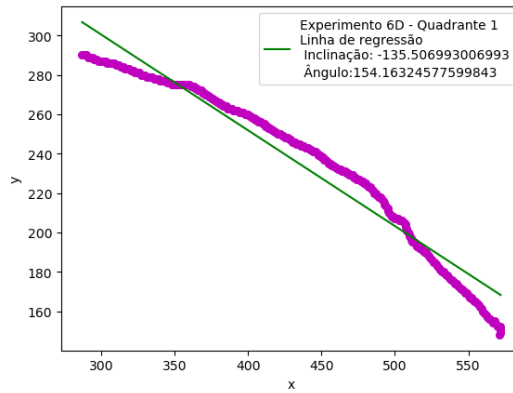
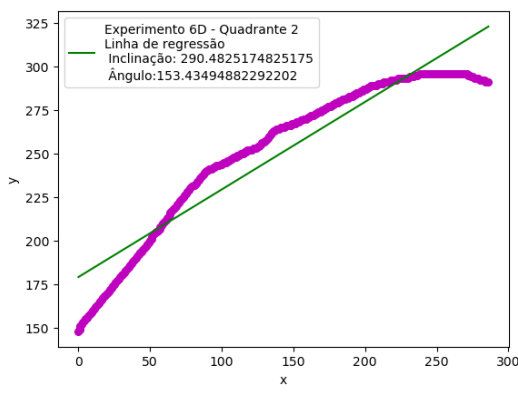
5



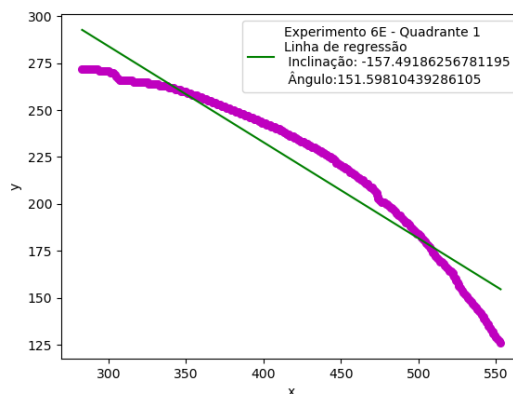
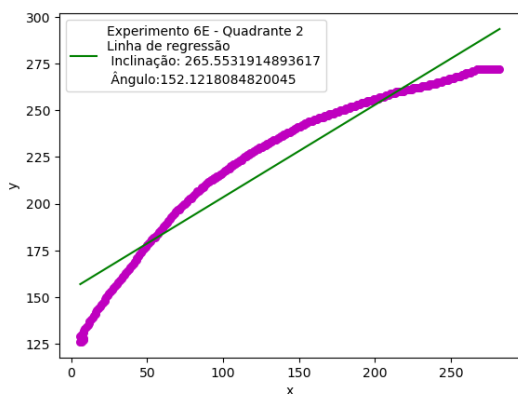
5



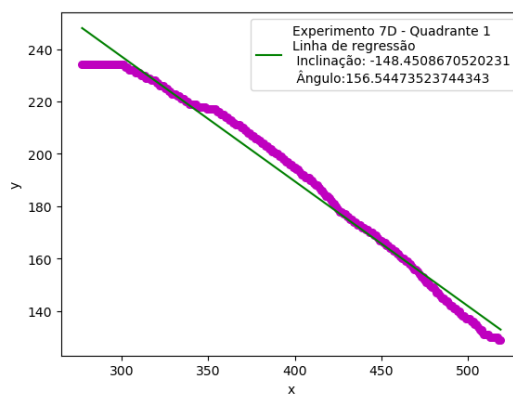
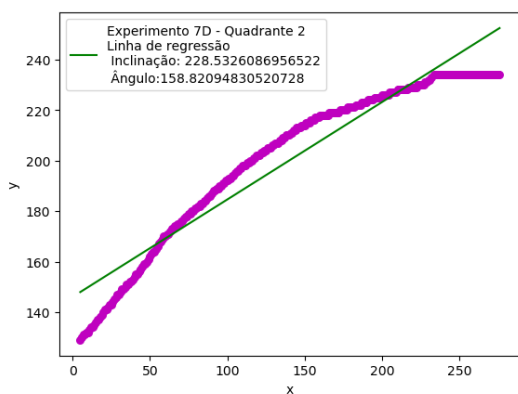
6



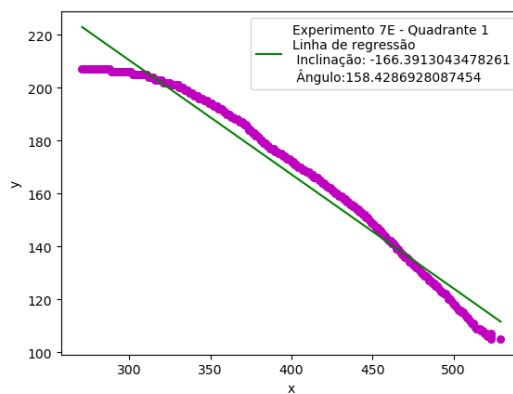
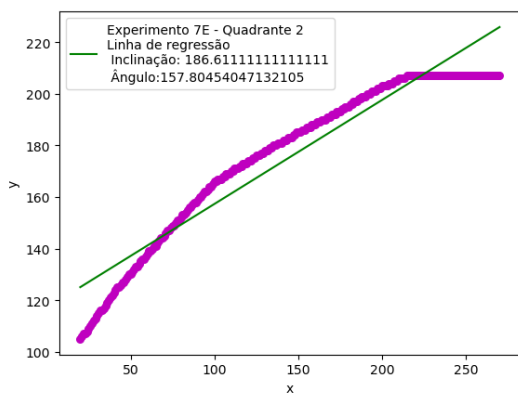
6



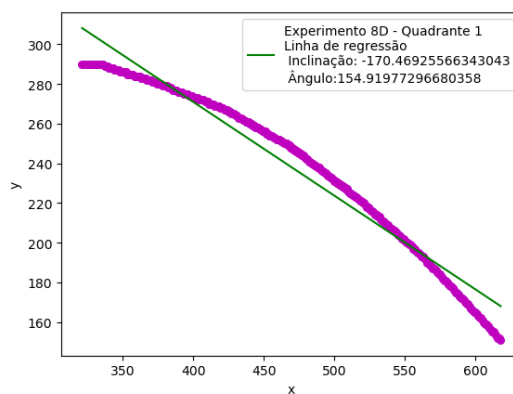
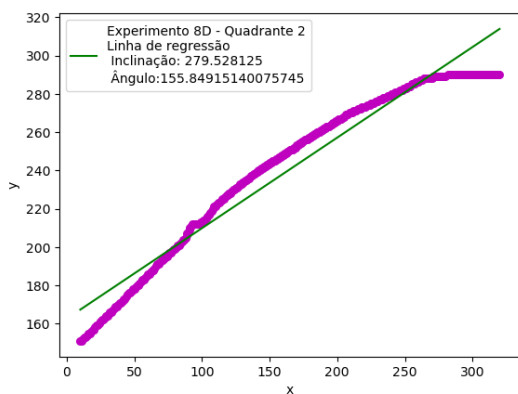
7



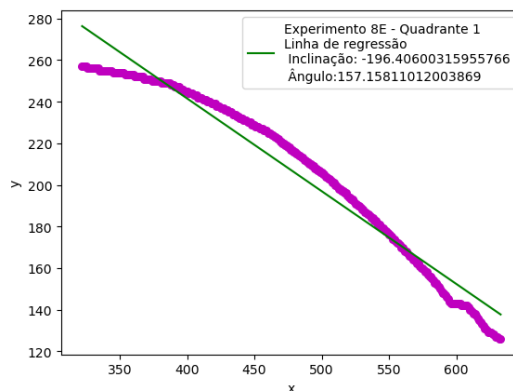
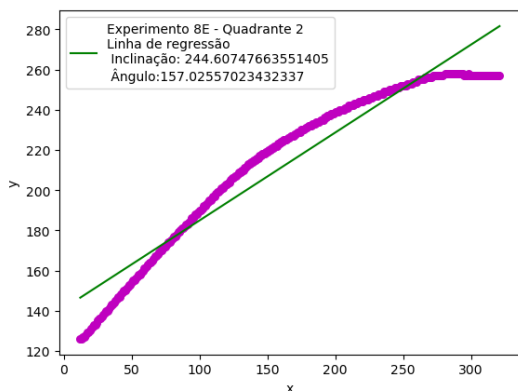
7



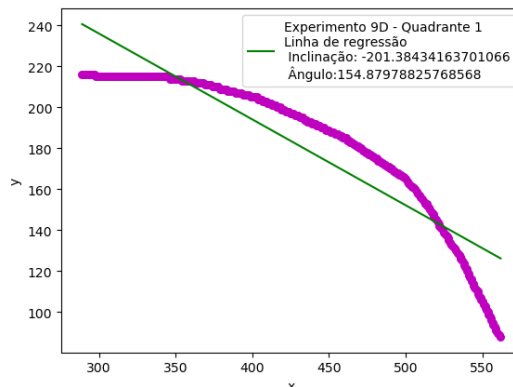
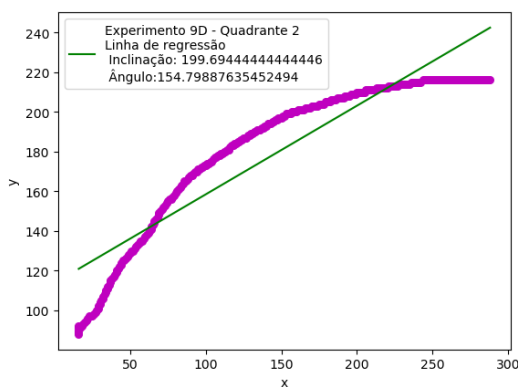
8



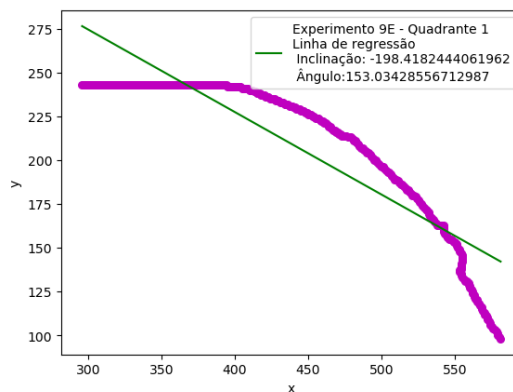
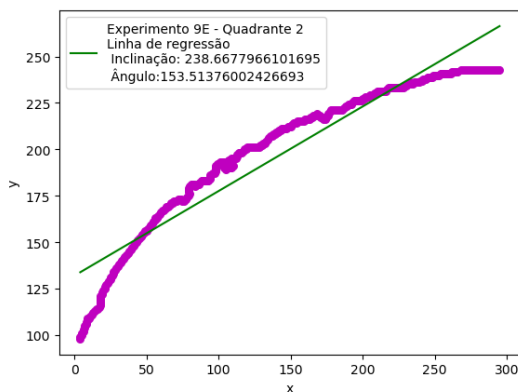
8



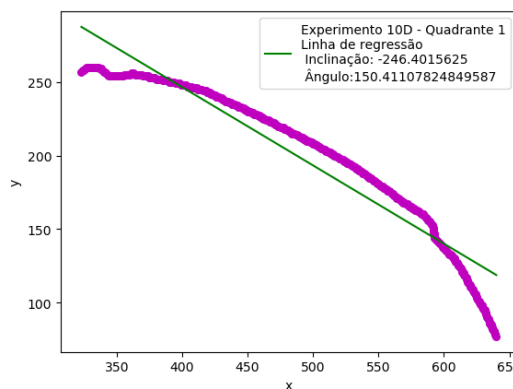
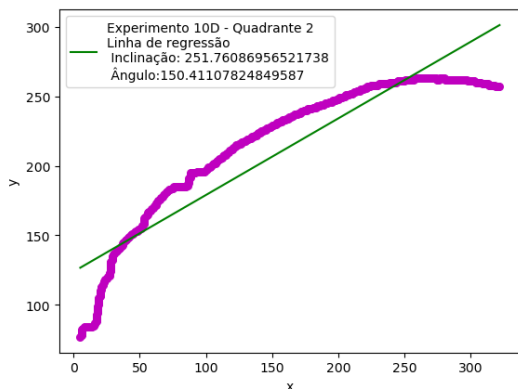
9



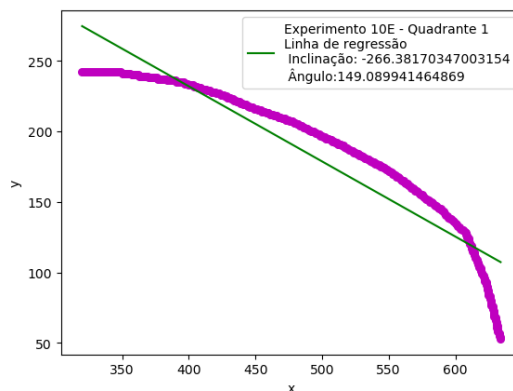
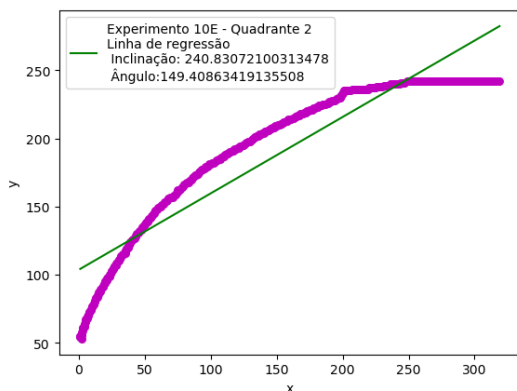
9



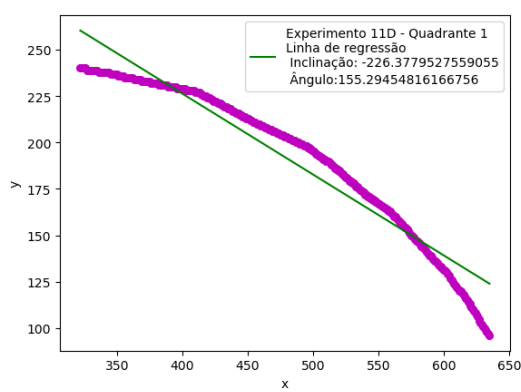
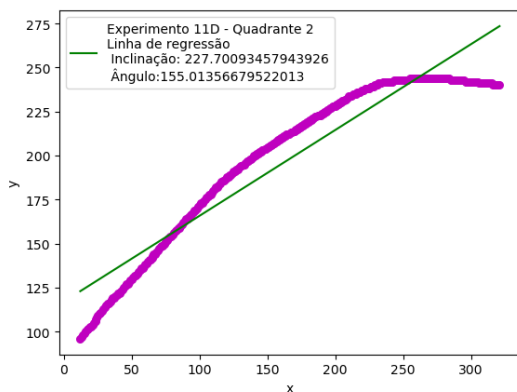
10



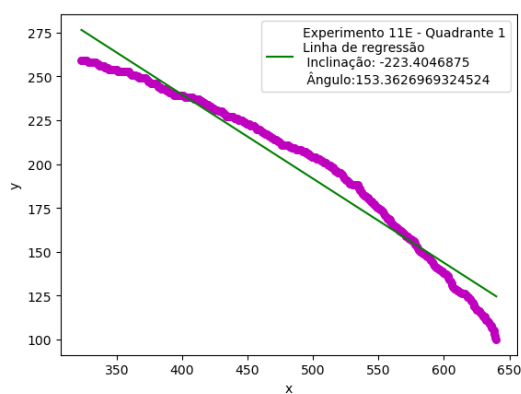
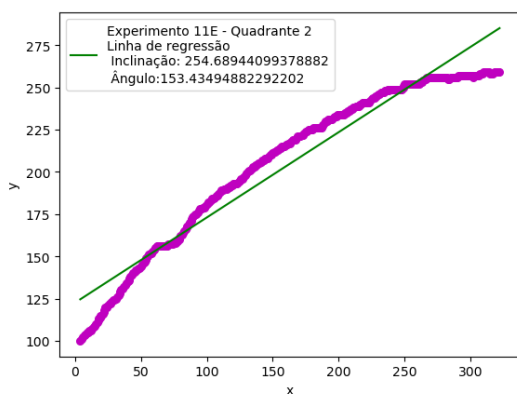
10



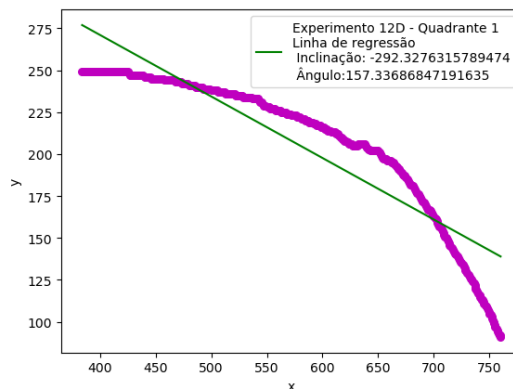
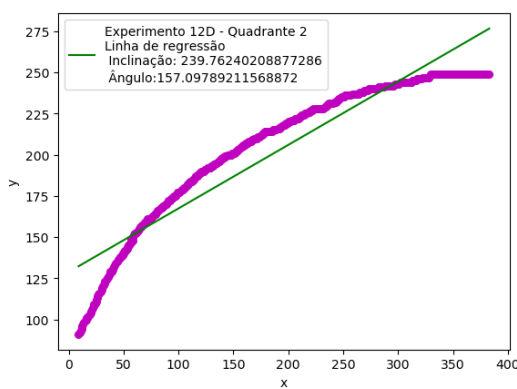
11



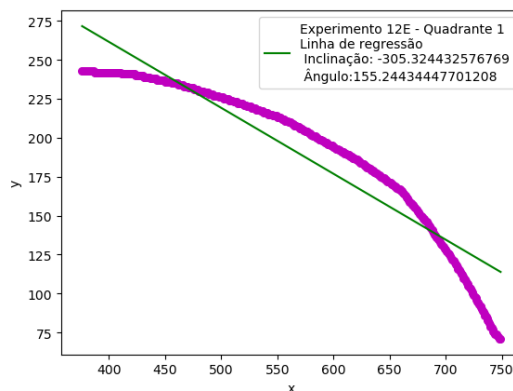
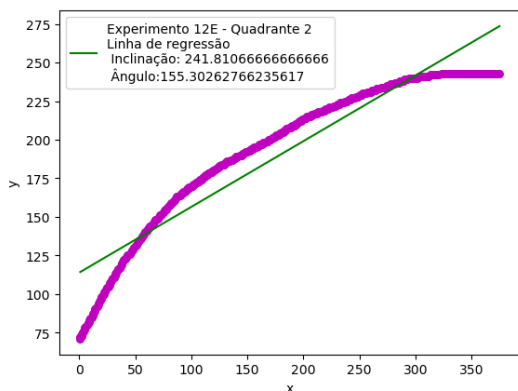
11



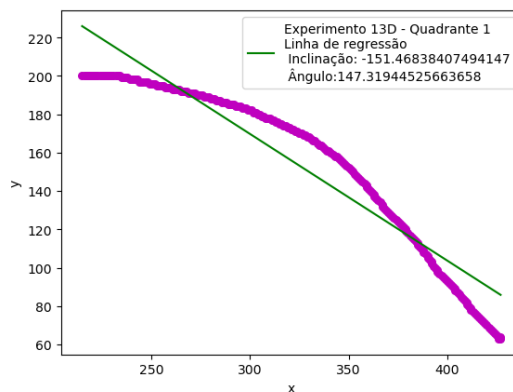
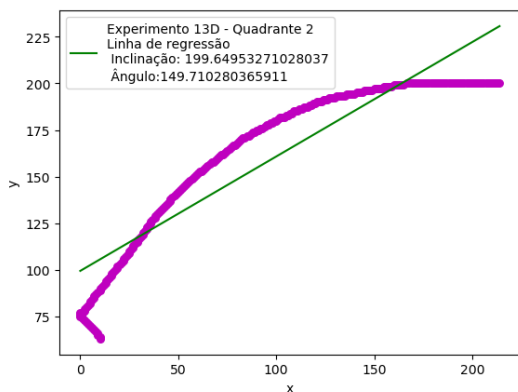
12



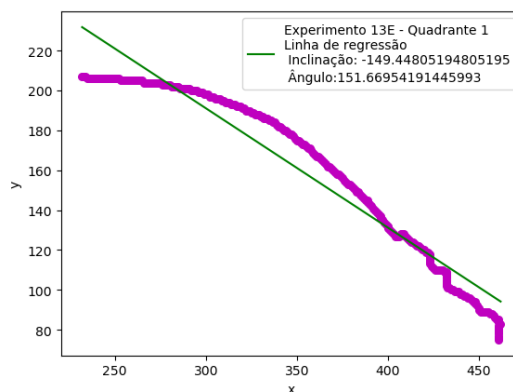
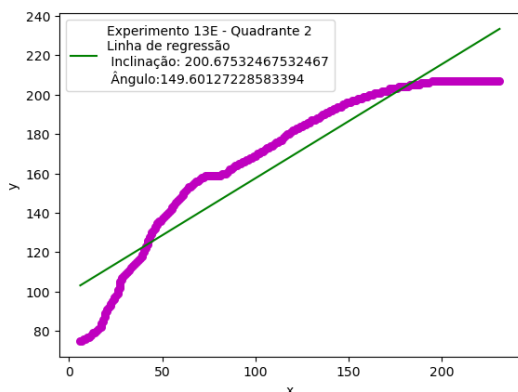
12



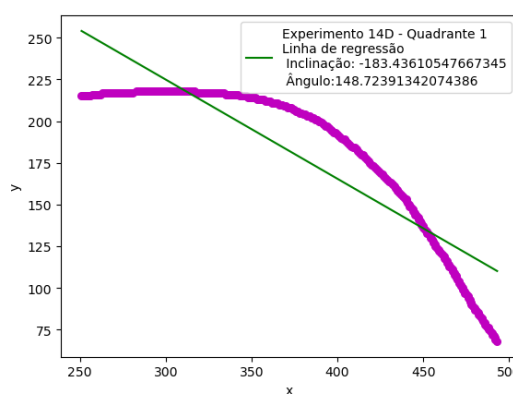
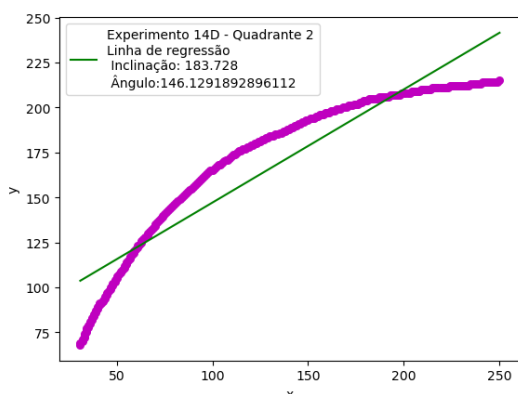
13



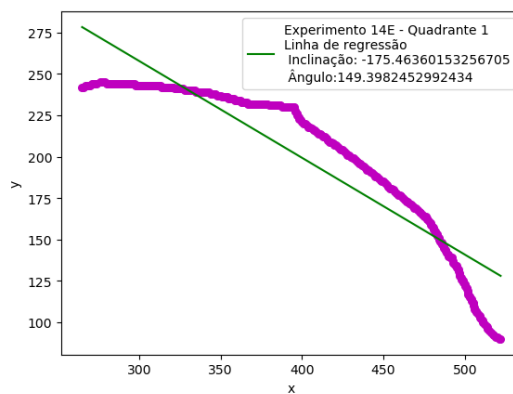
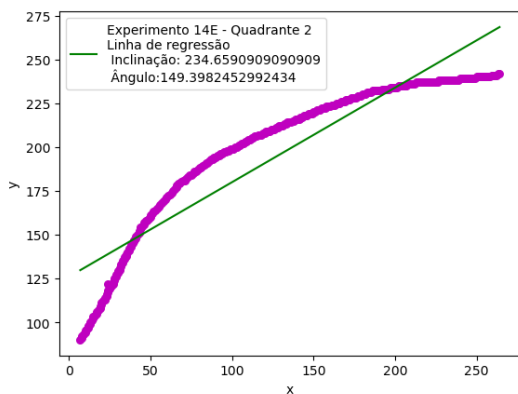
13



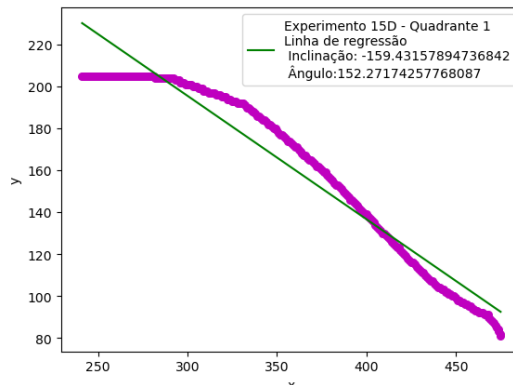
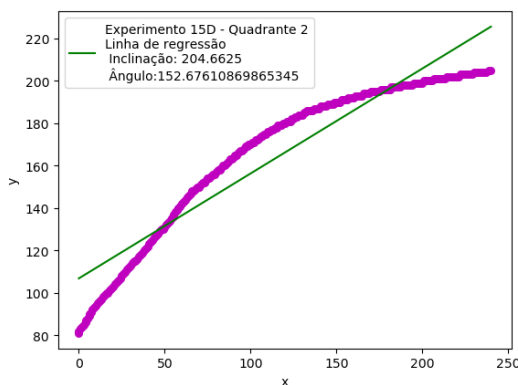
14



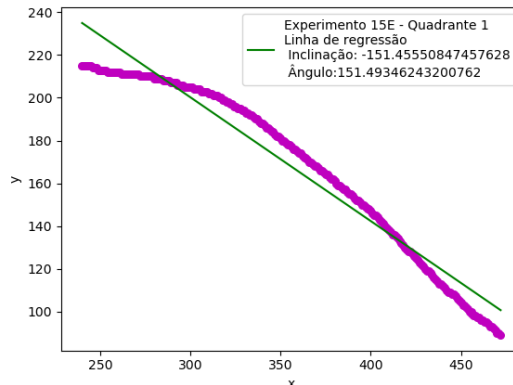
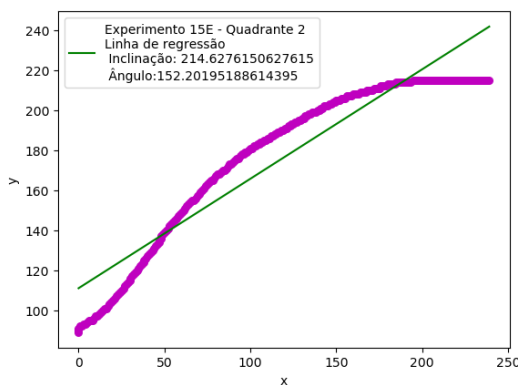
14



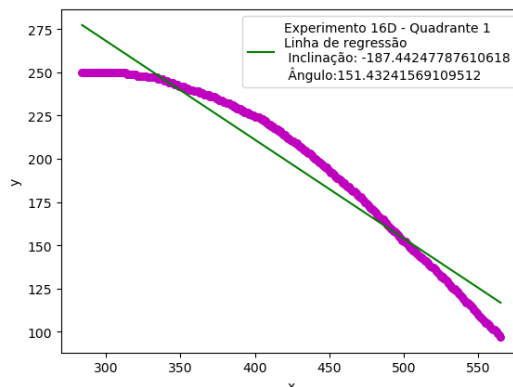
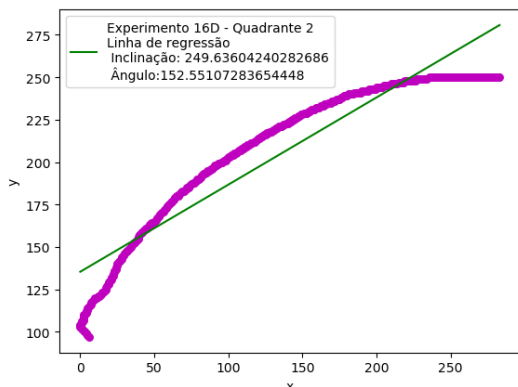
15



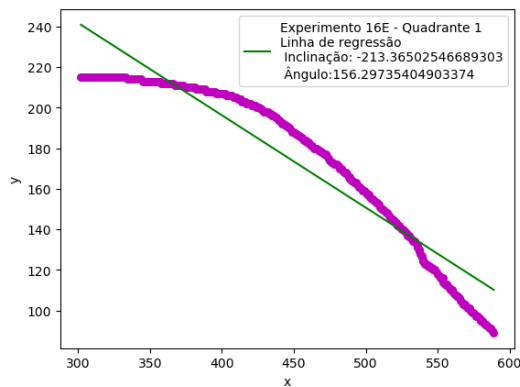
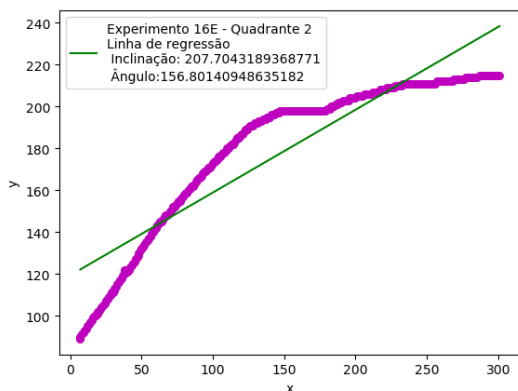
15



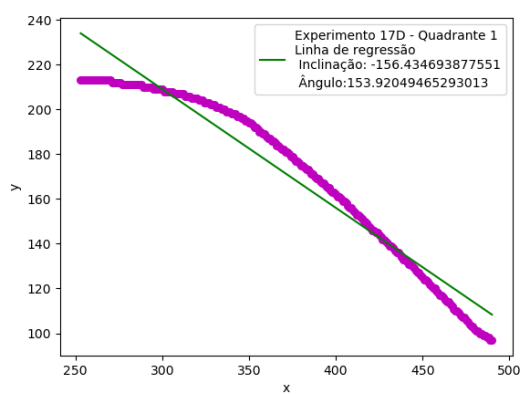
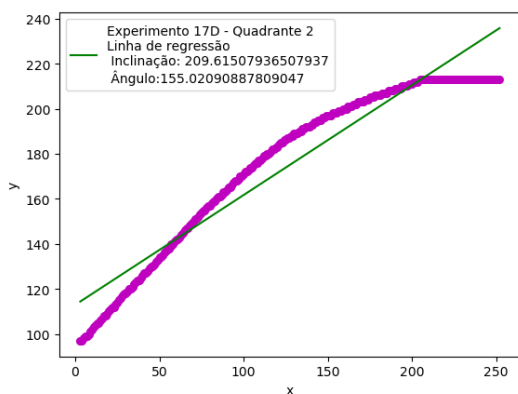
16



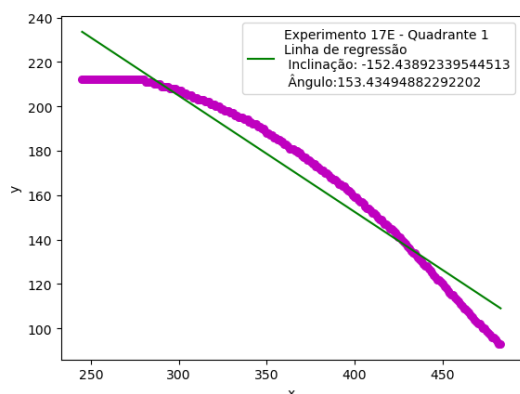
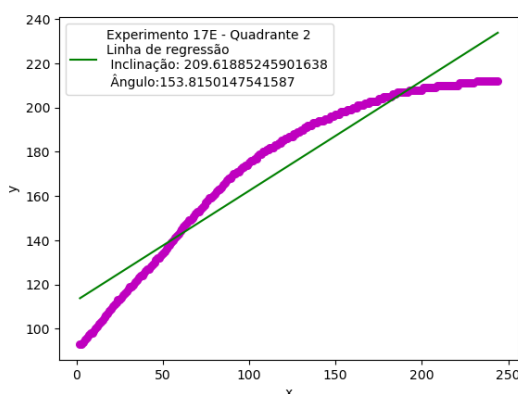
16



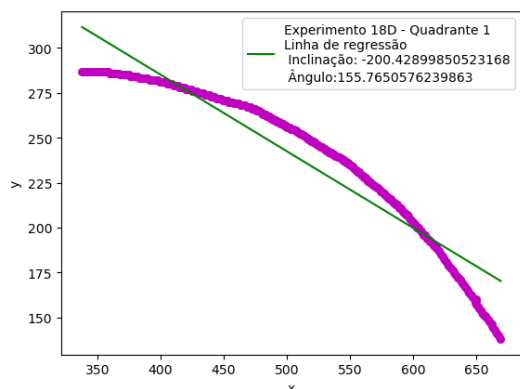
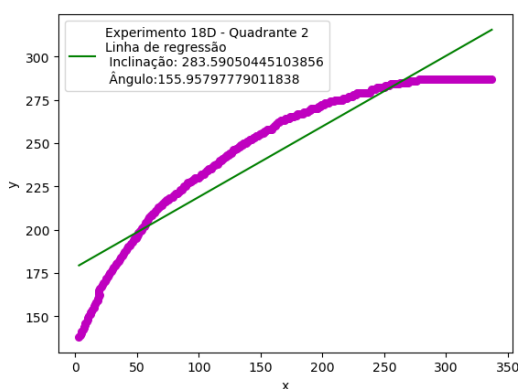
17



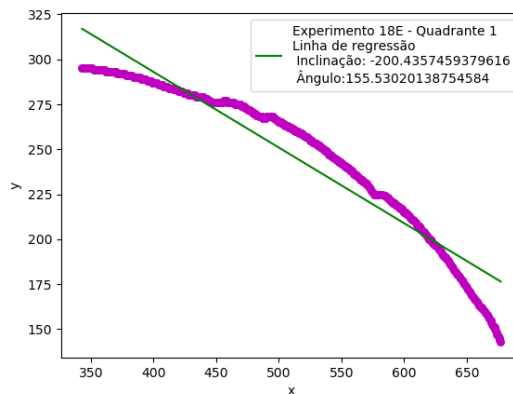
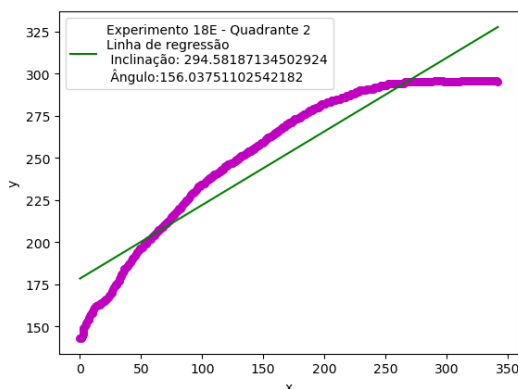
17



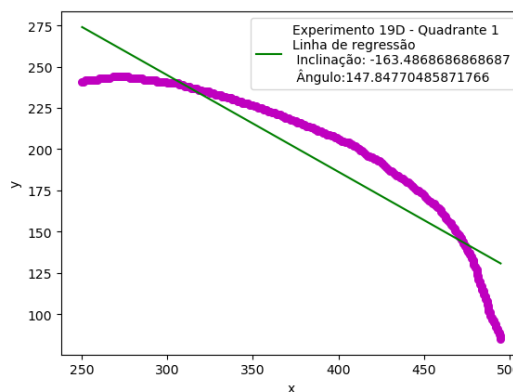
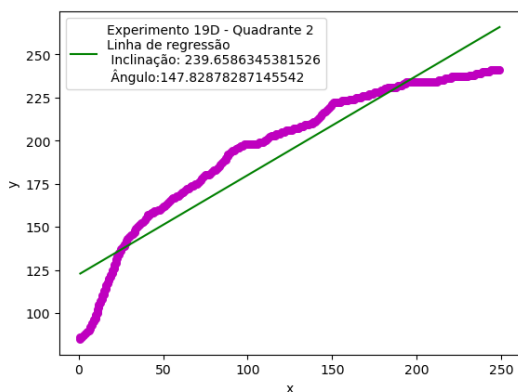
18



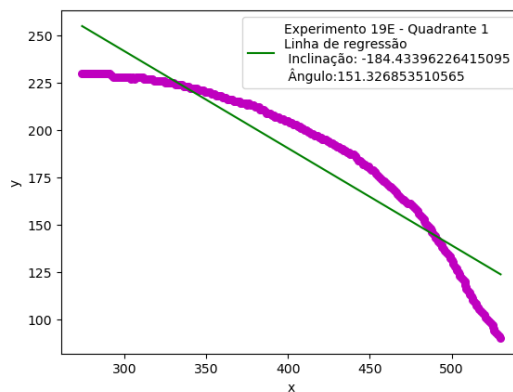
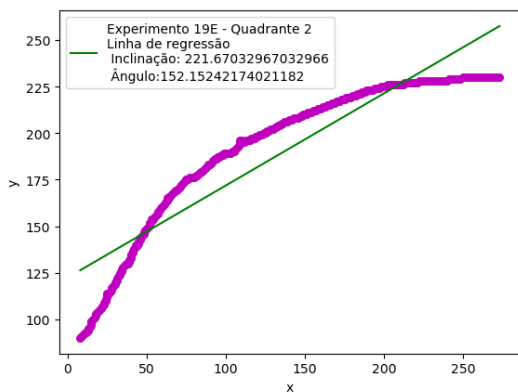
18



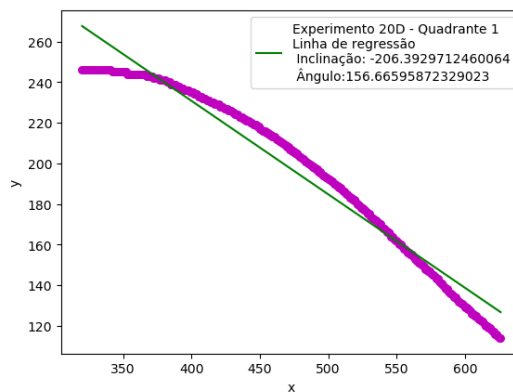
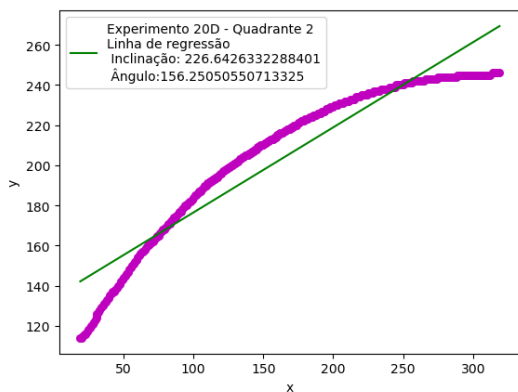
19



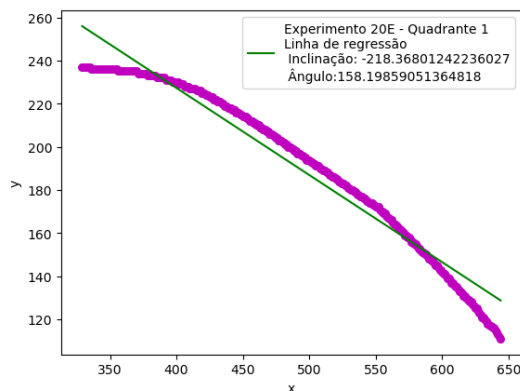
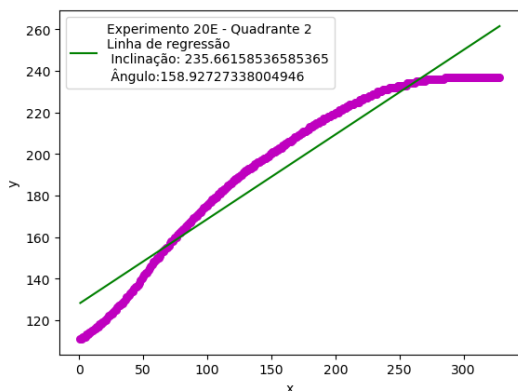
19



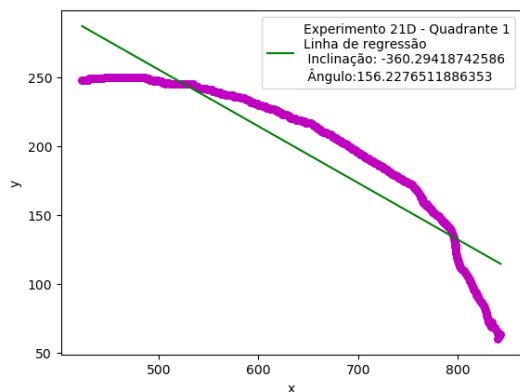
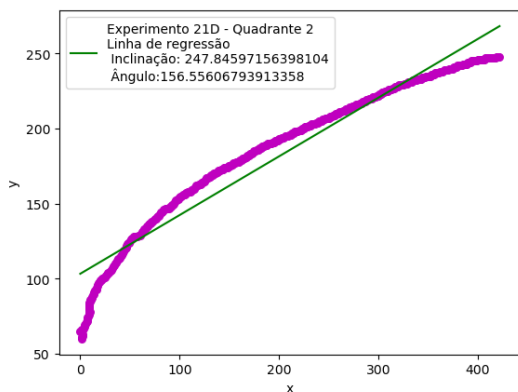
20



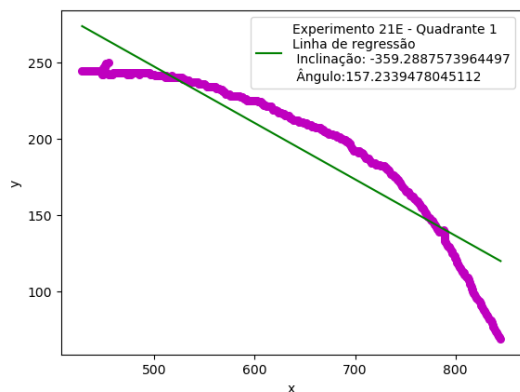
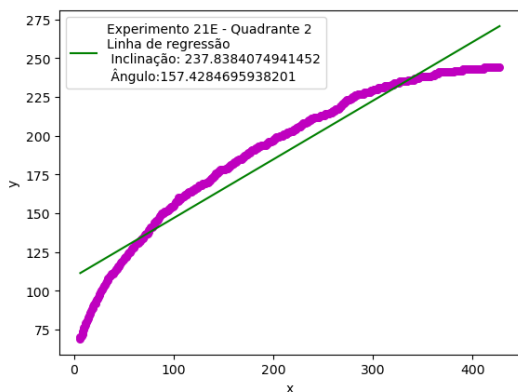
20



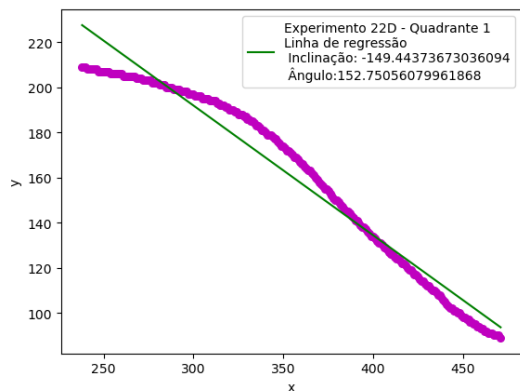
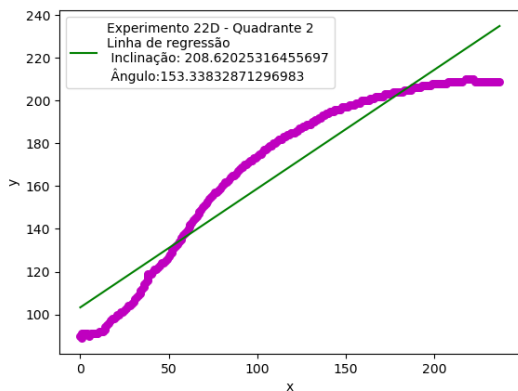
21



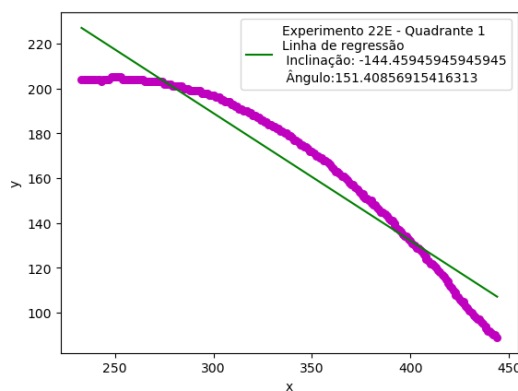
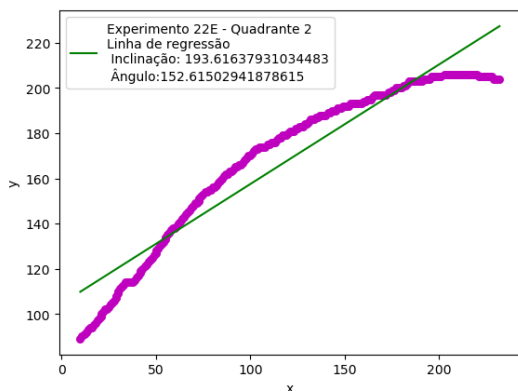
21



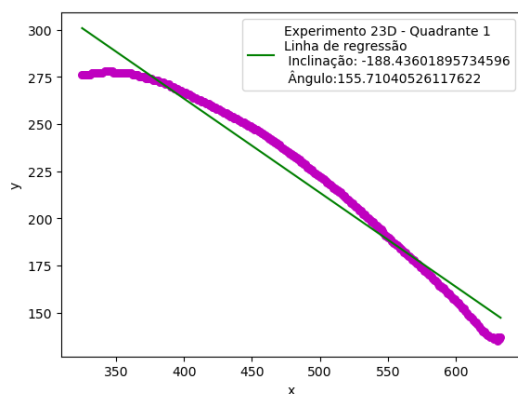
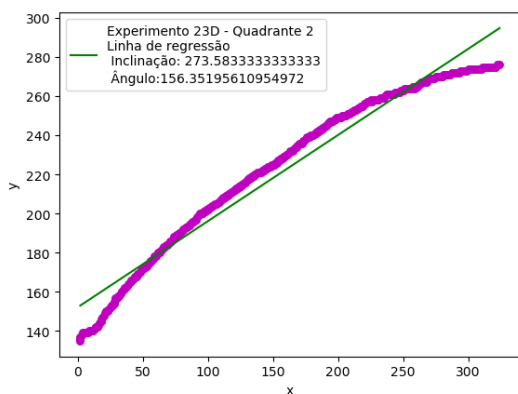
22



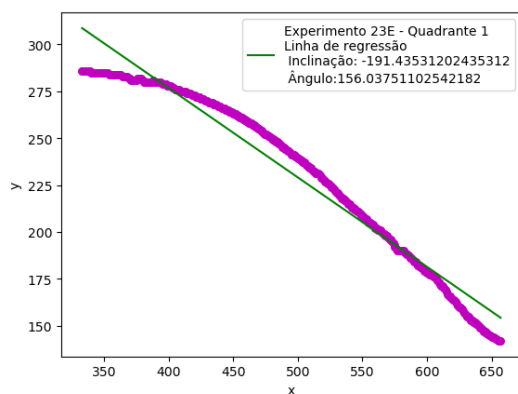
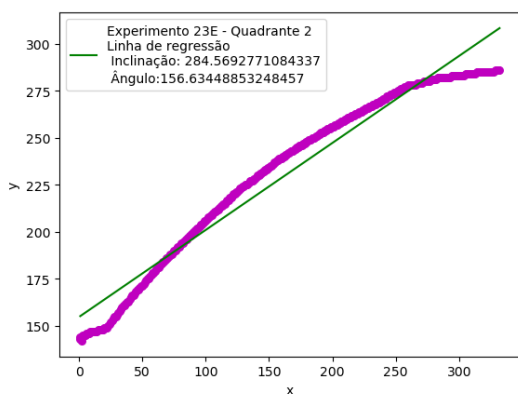
22



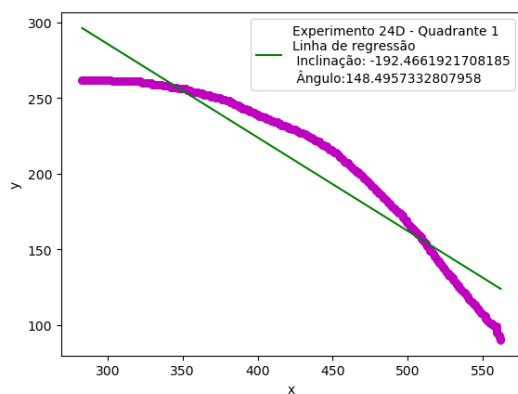
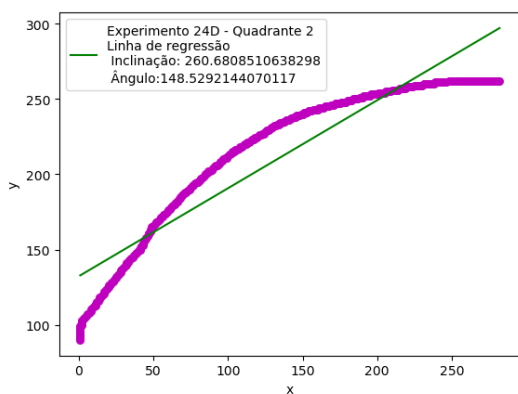
23



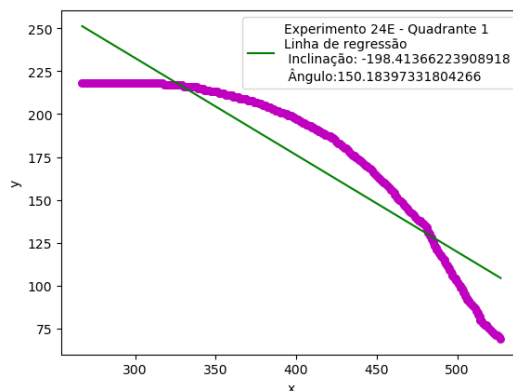
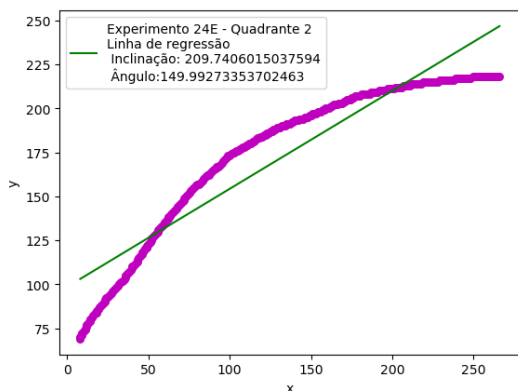
23



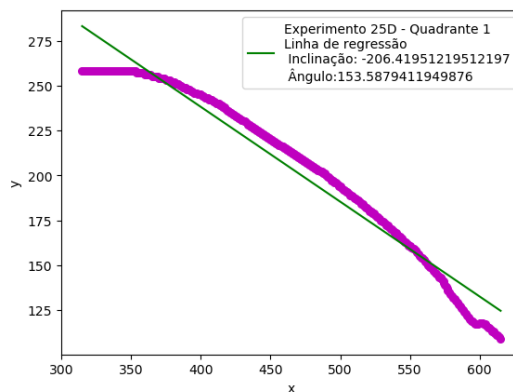
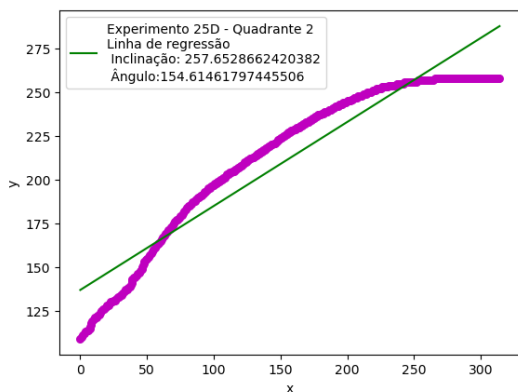
24



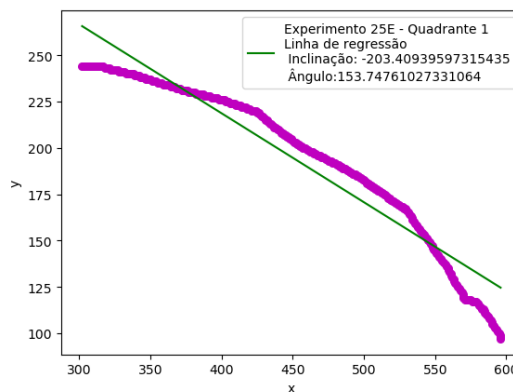
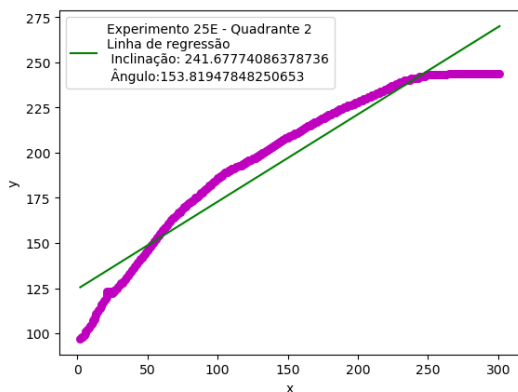
24



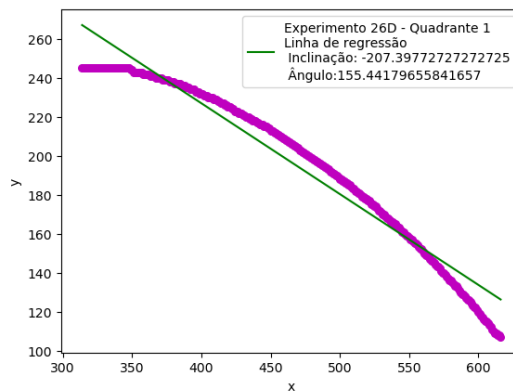
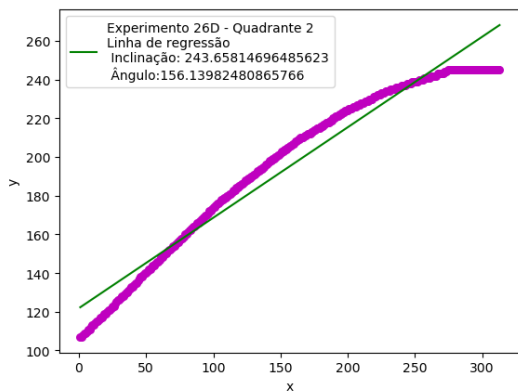
25



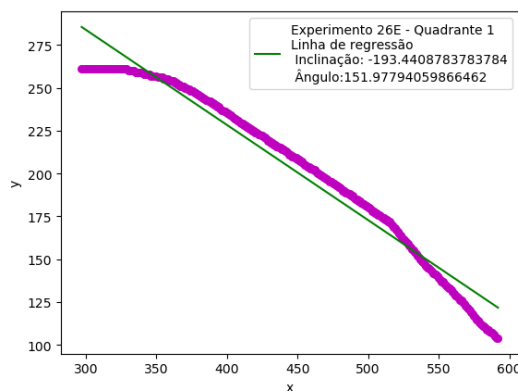
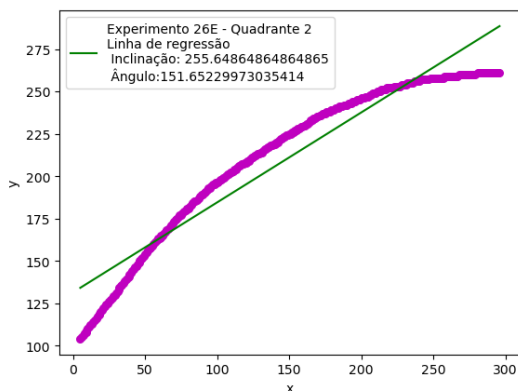
25



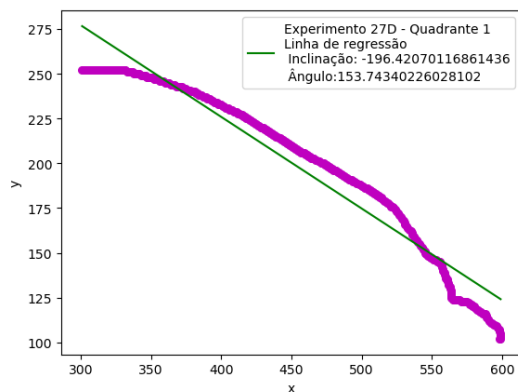
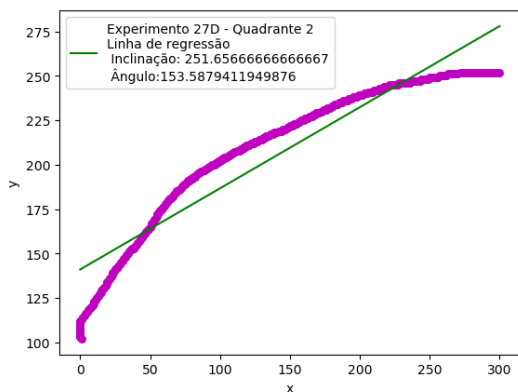
26



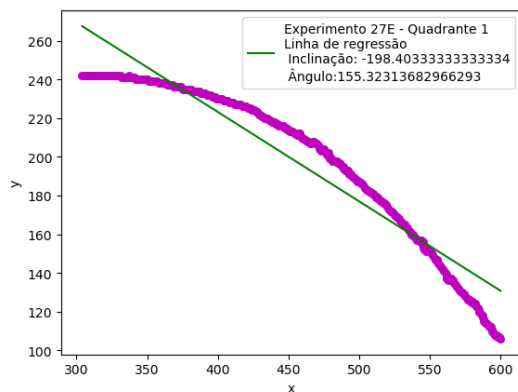
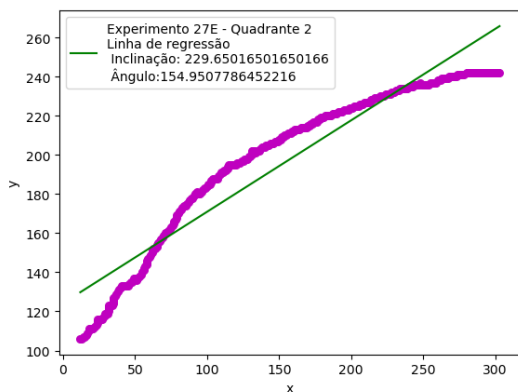
26



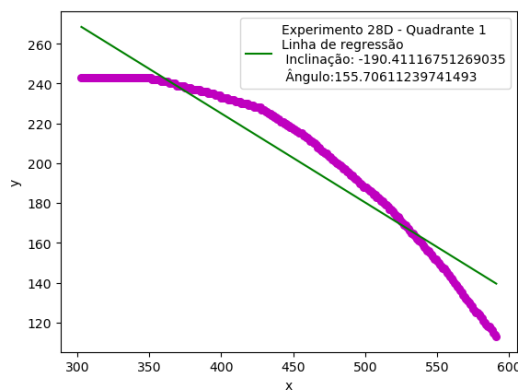
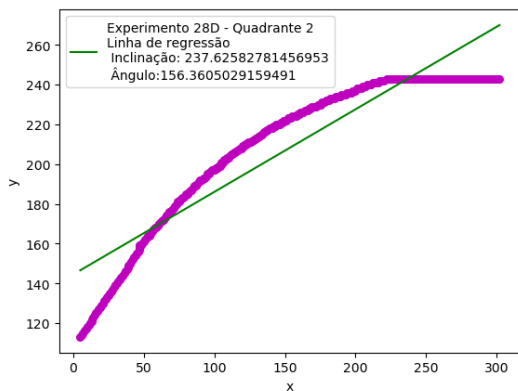
27



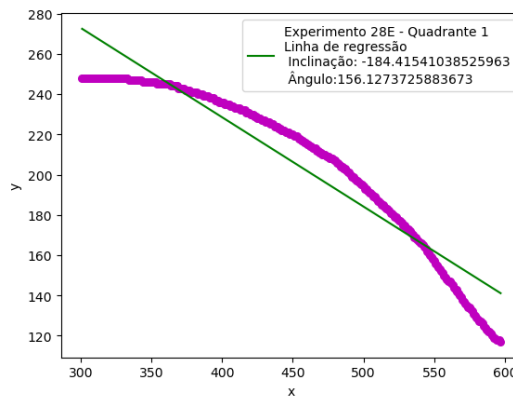
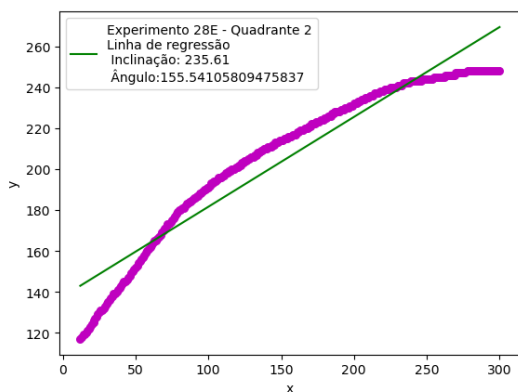
27



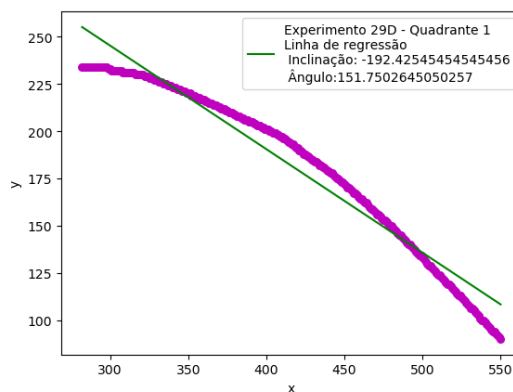
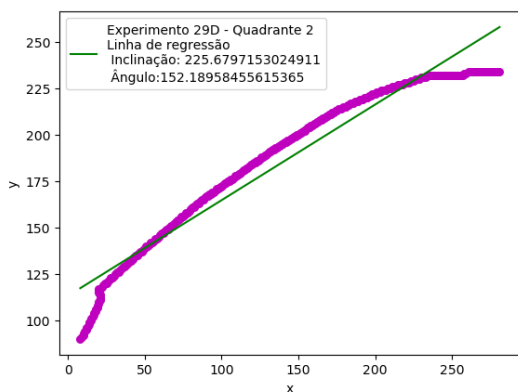
28



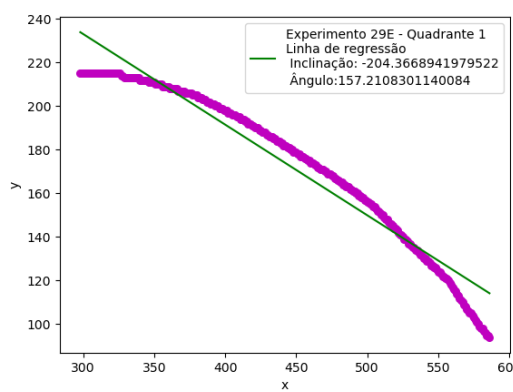
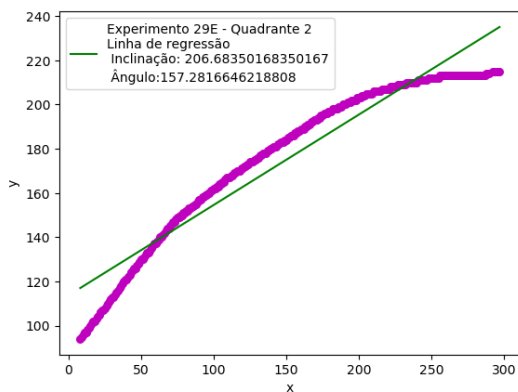
28



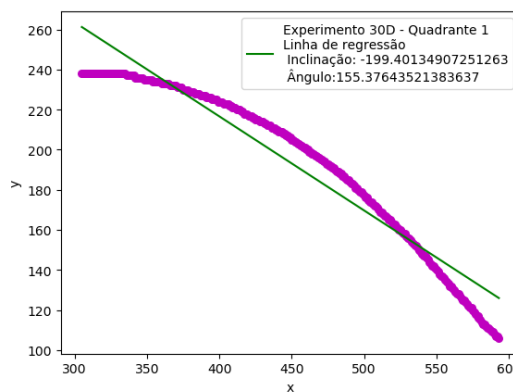
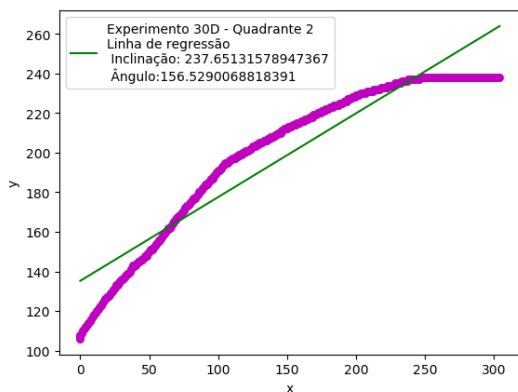
29



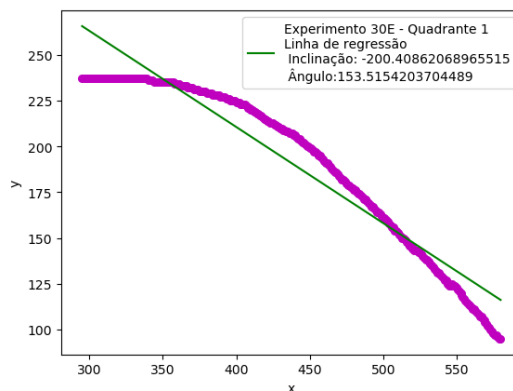
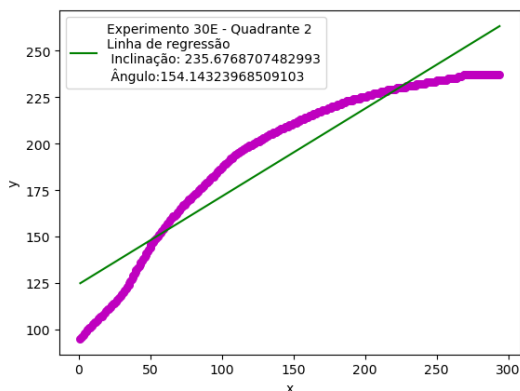
29



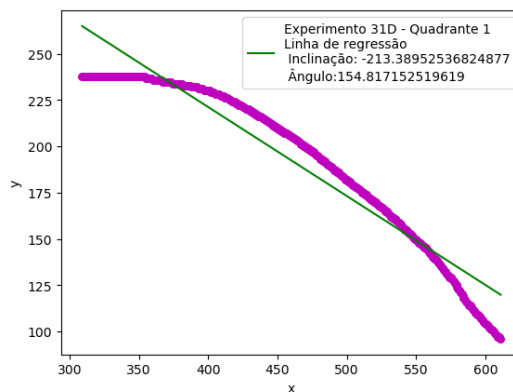
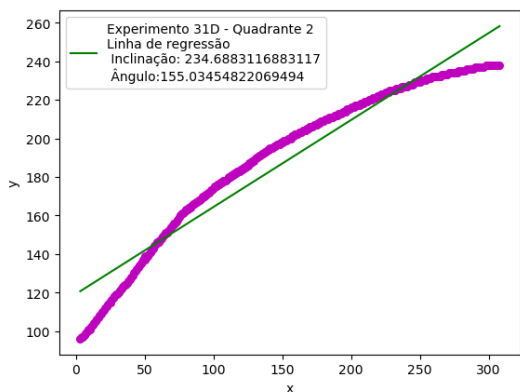
30



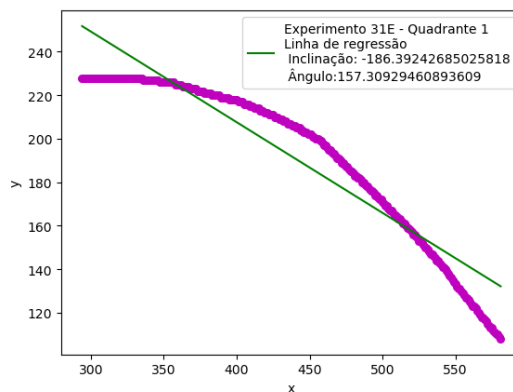
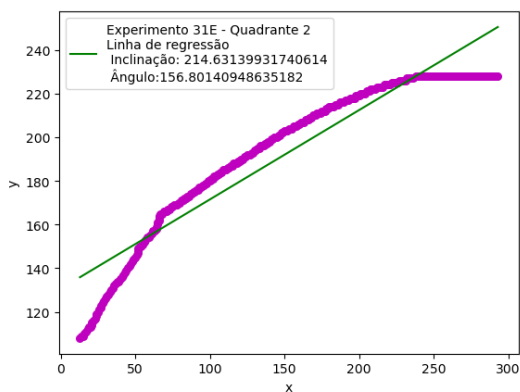
30



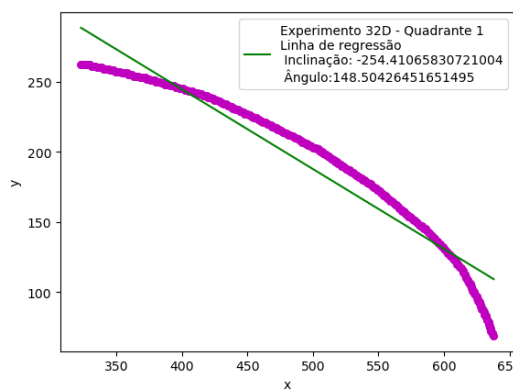
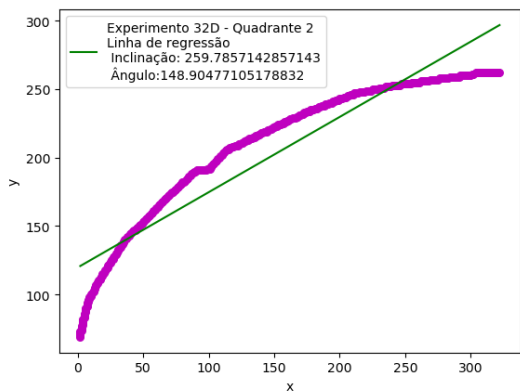
31



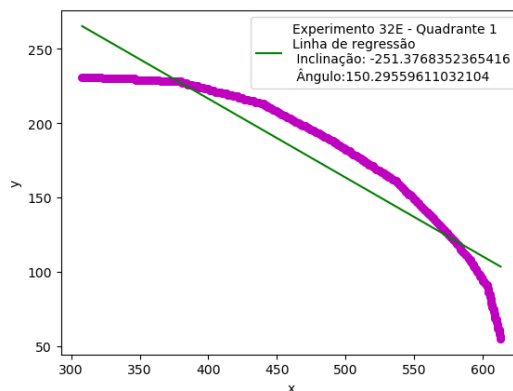
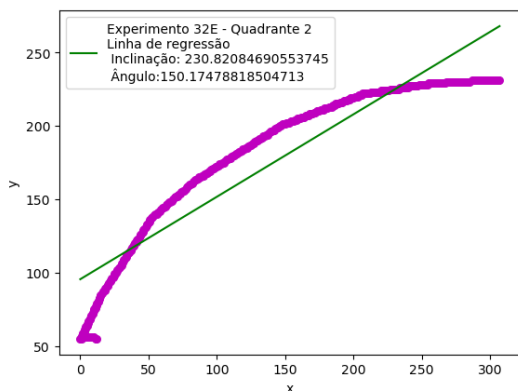
31



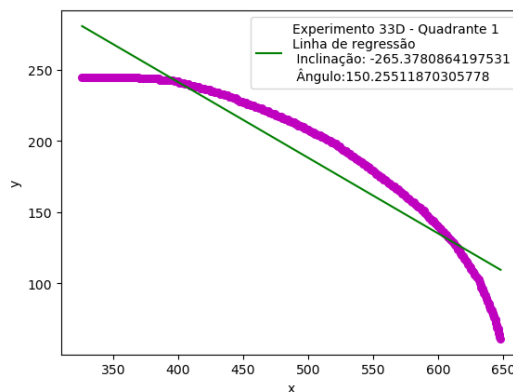
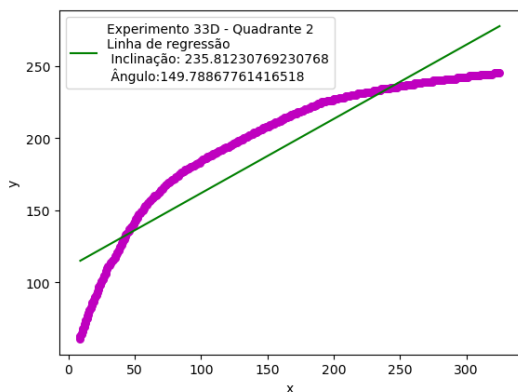
V1



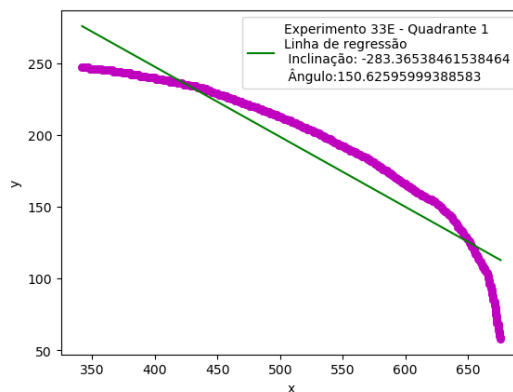
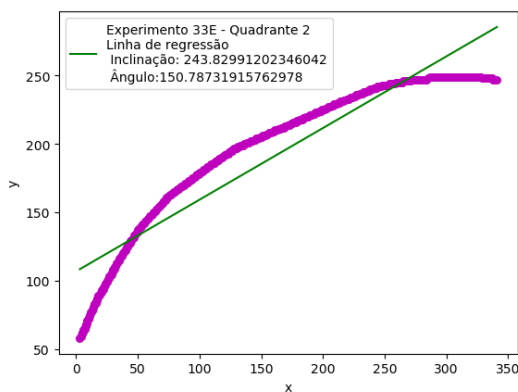
V1



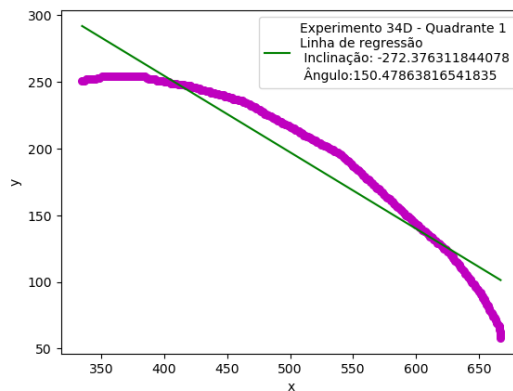
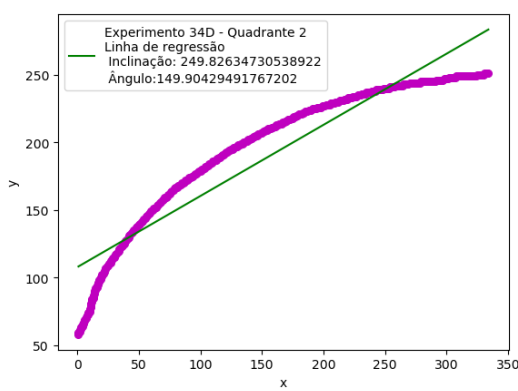
V2



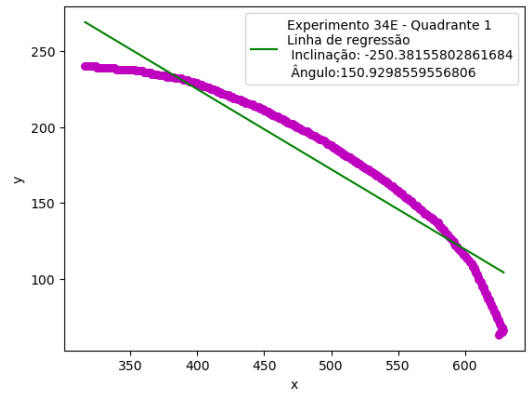
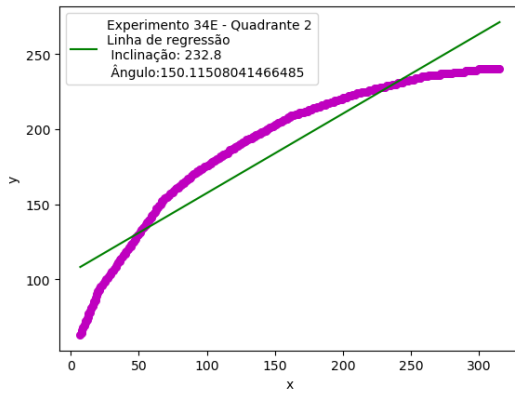
V2



V3



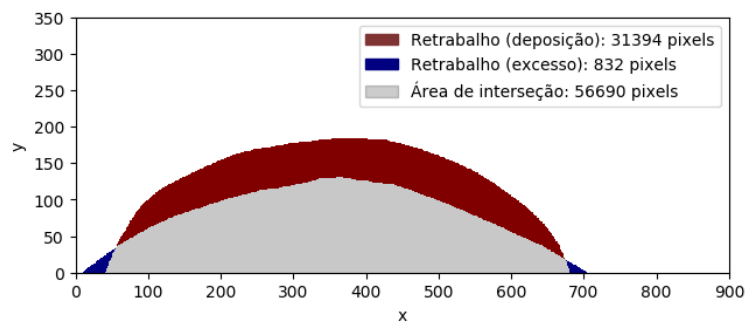
V3



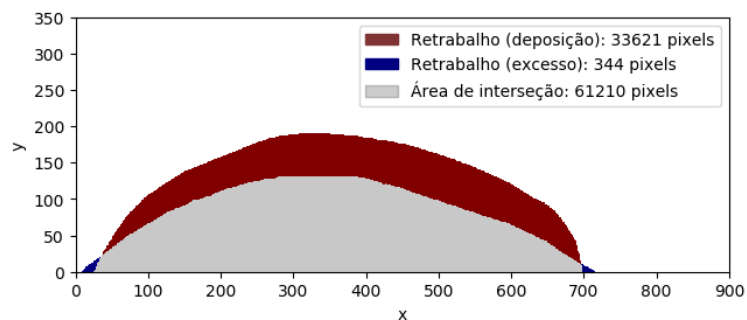
# APÊNDICE C – GRÁFICOS DE MEDIÇÃO DAS ÁREAS DE CONFORMIDADE DO OBJETO DE ESTUDO

Experimento	Perfil	Gráfico
1	Direito	<p>Retrabalho (deposição): 30691 pixels Retrabalho (excesso): 0 pixels Área de interseção: 57393 pixels</p>
1	Esquerdo	<p>Retrabalho (deposição): 29849 pixels Retrabalho (excesso): 0 pixels Área de interseção: 64982 pixels</p>
2	Direito	<p>Área de retrabalho: 805 pixels Área de refugo: 9854 pixels Área de interseção: 87279 pixels</p>
2	Esquerdo	<p>Retrabalho (deposição): 13121 pixels Retrabalho (excesso): 2524 pixels Área de interseção: 81710 pixels</p>

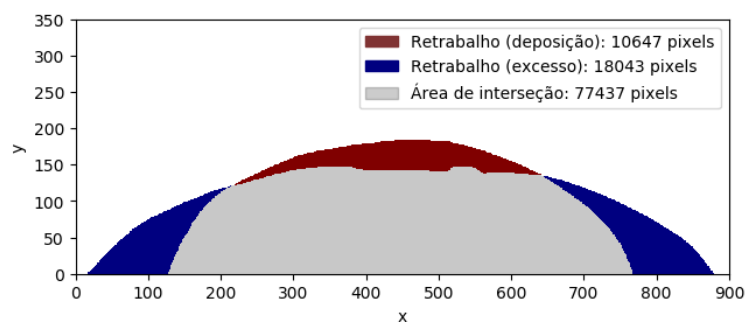
3 Direito



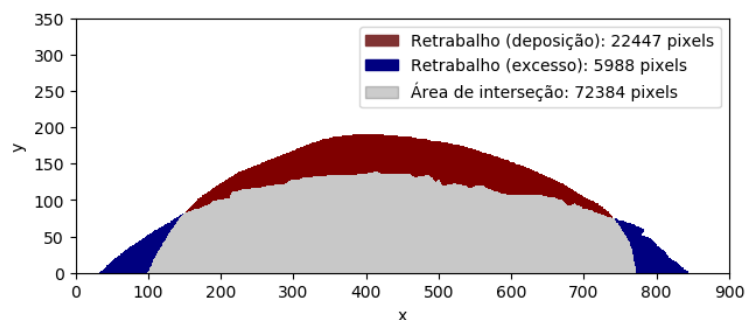
3 Esquerdo



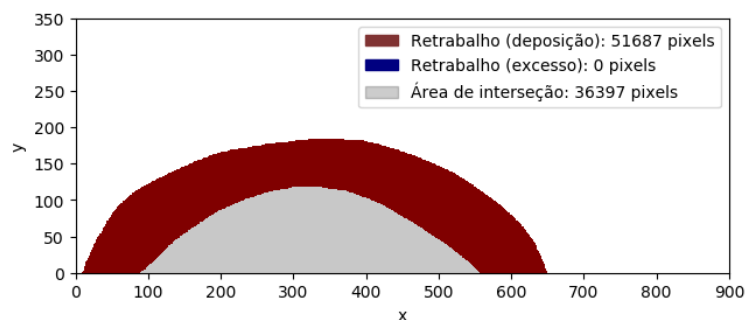
4 Direito



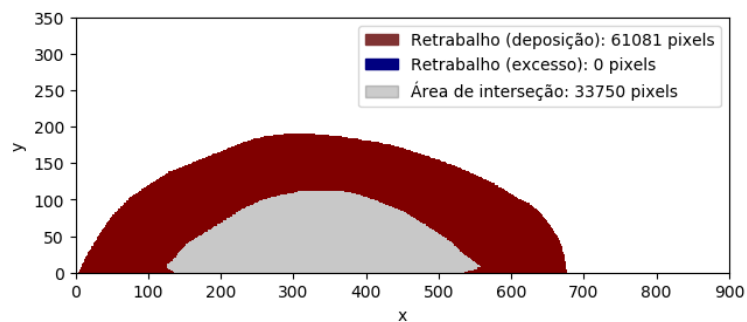
4 Esquerdo



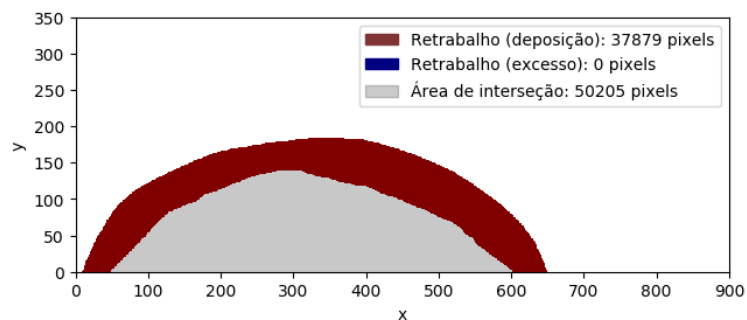
5 Direito



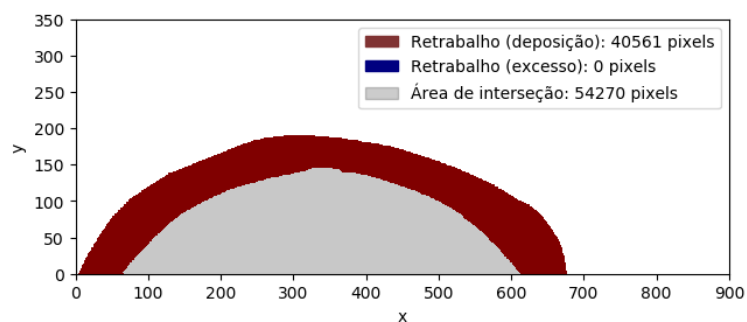
5 Esquerdo



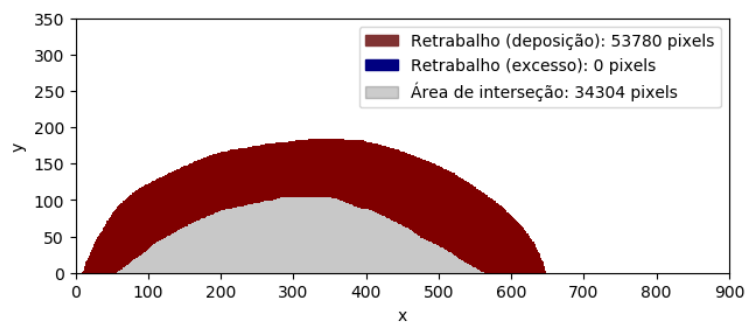
6 Direito



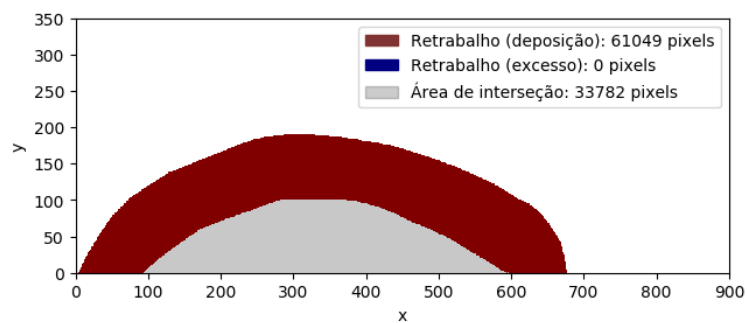
6 Esquerdo



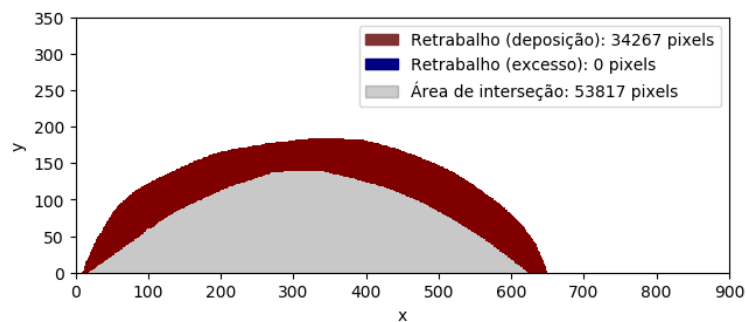
7 Direito



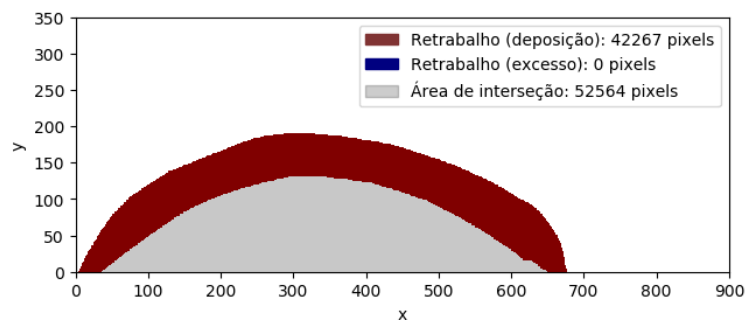
7 Esquerdo



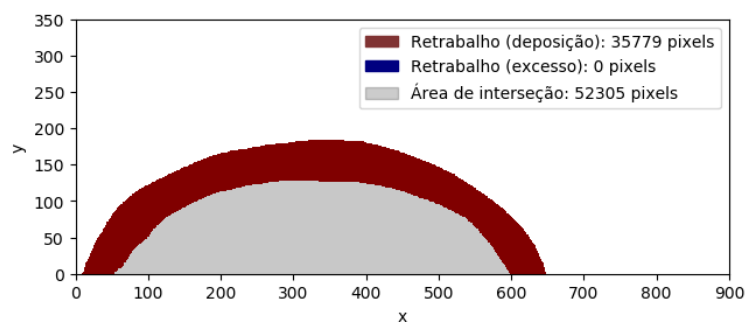
8 Direito



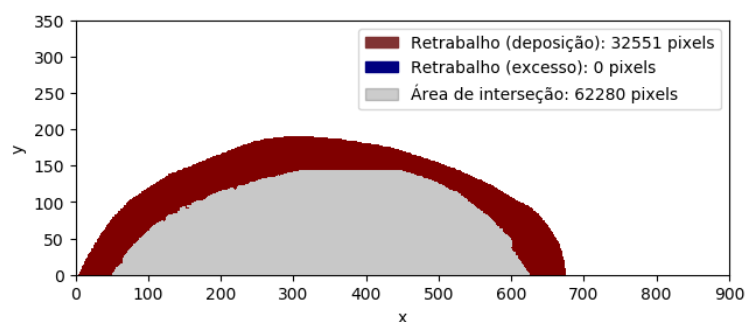
8 Esquerdo



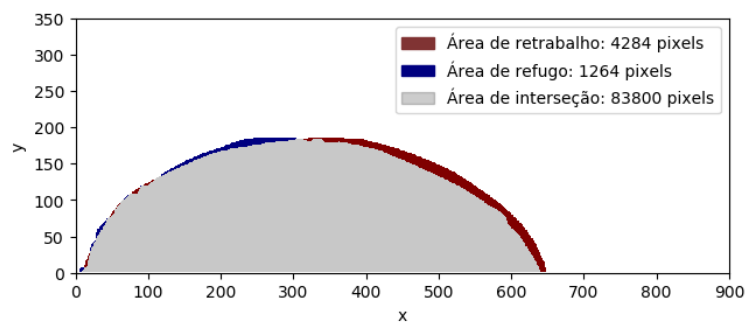
9 Direito



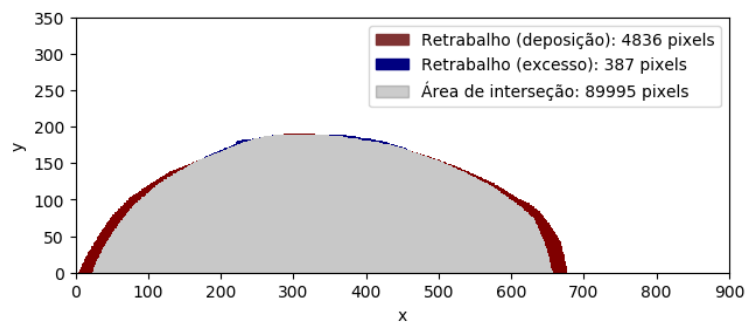
9 Esquerdo



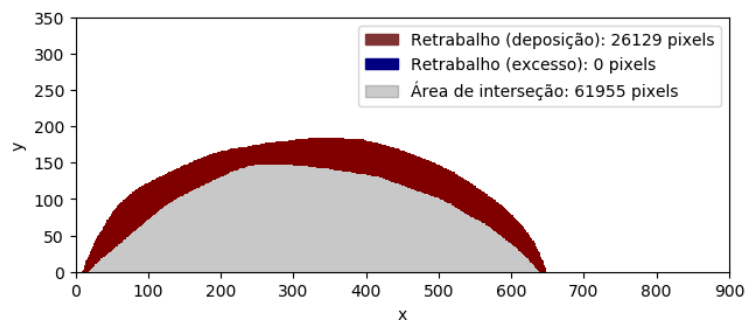
10 Direito



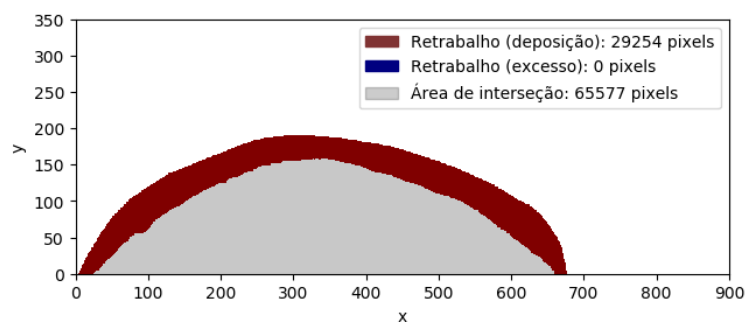
10 Esquerdo



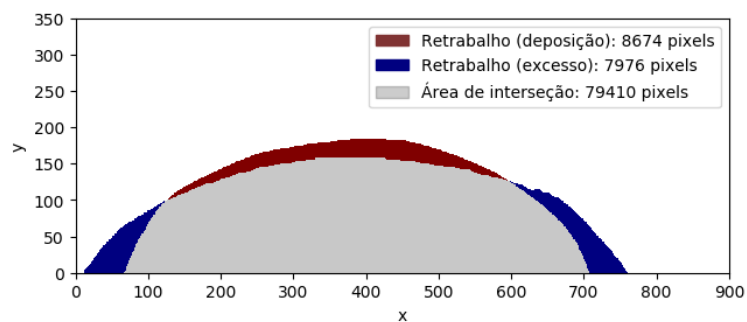
11 Direito



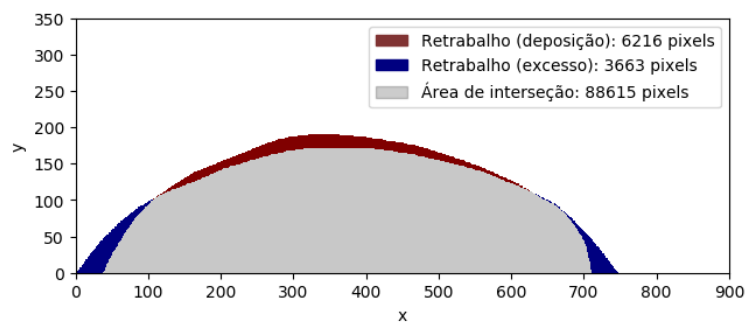
11 Esquerdo



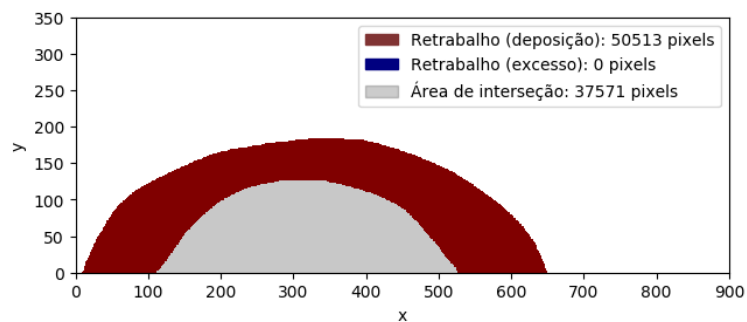
12 Direito



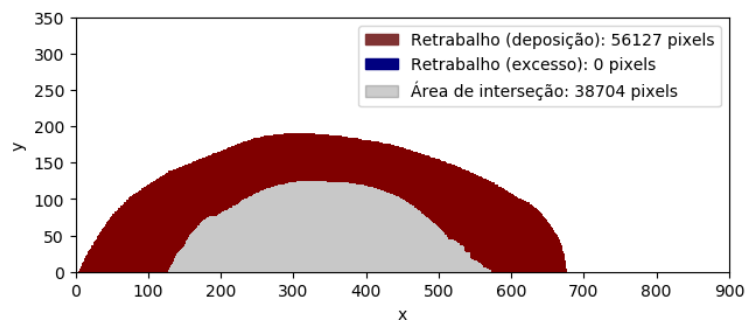
12 Esquerdo



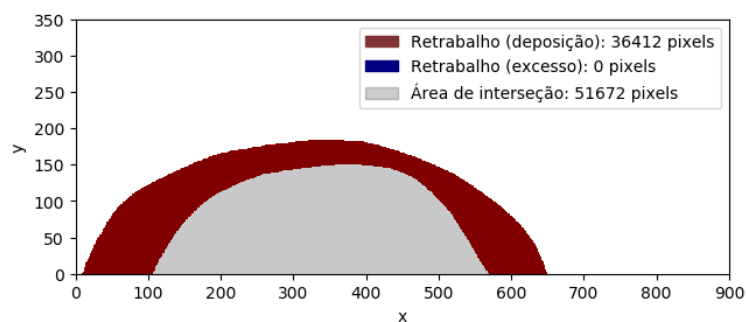
13 Direito



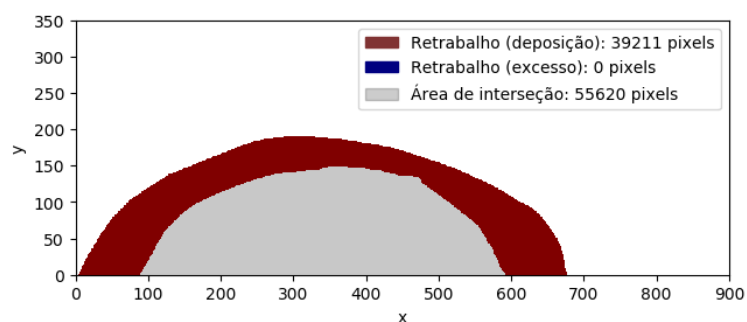
13 Esquerdo



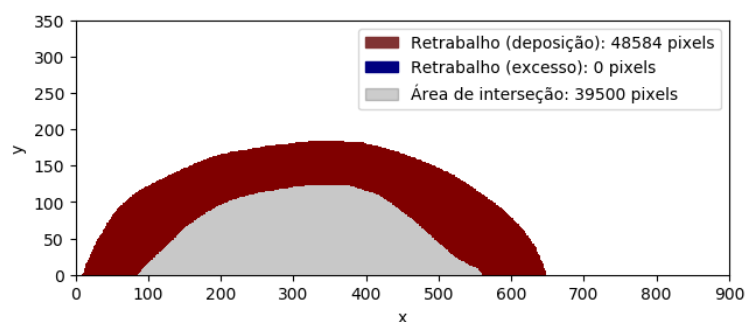
14 Direito



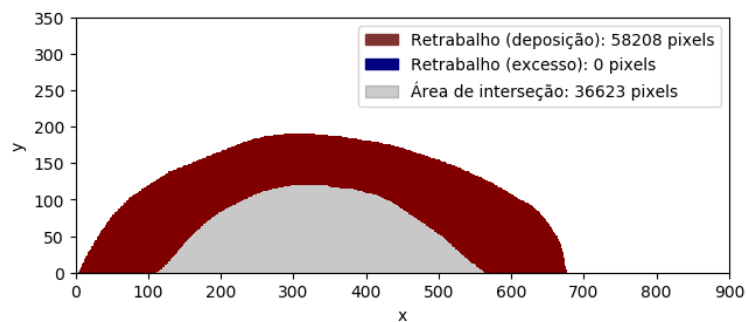
14 Esquerdo



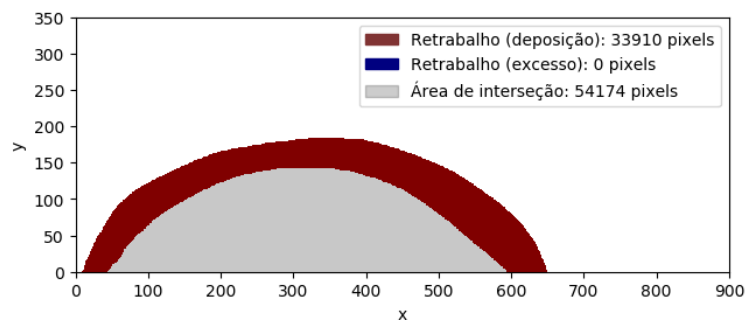
15 Direito



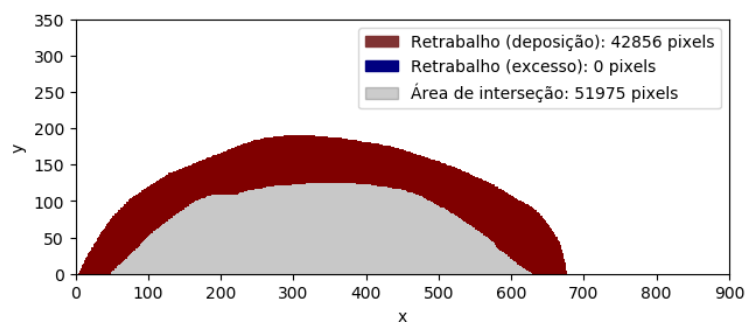
15 Esquerdo



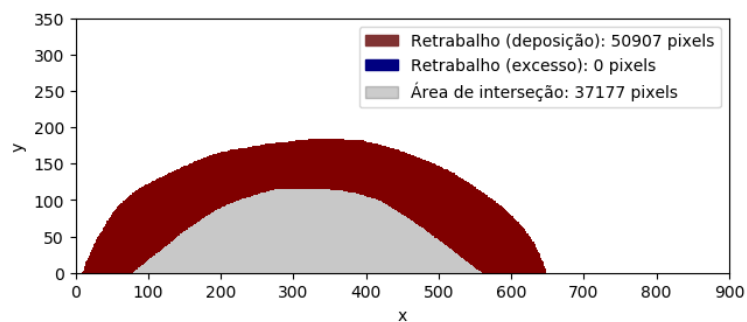
16 Direito



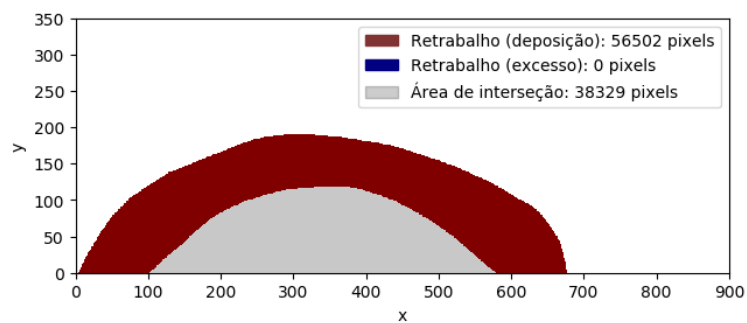
16 Esquerdo



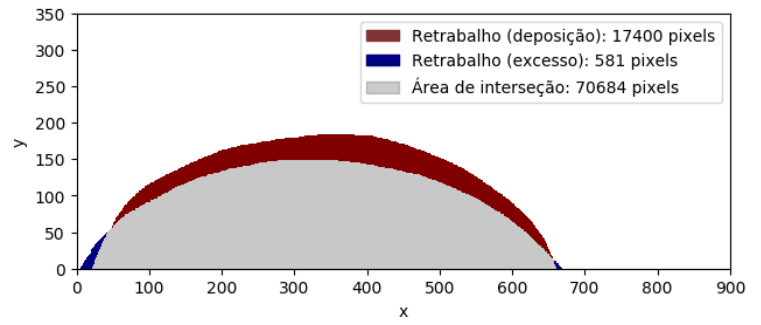
17 Direito



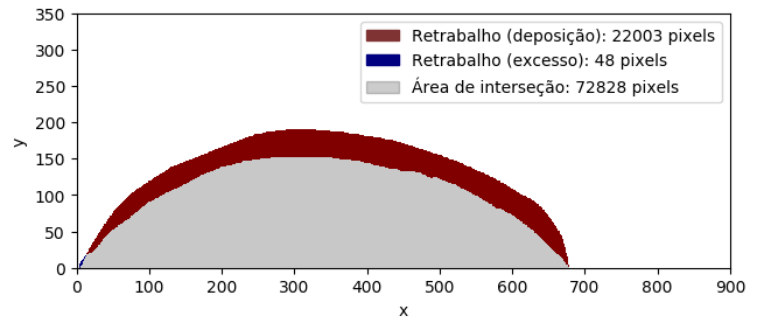
17 Esquerdo



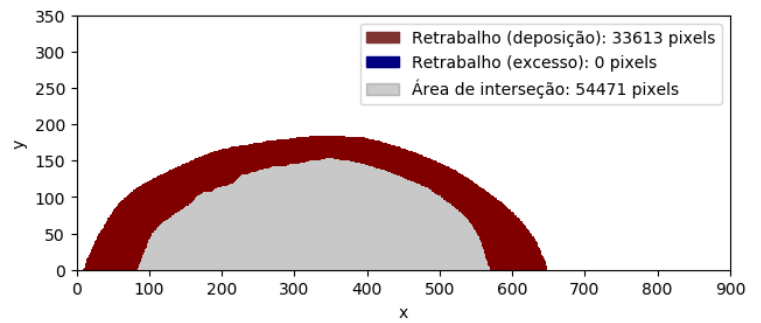
18 Direito



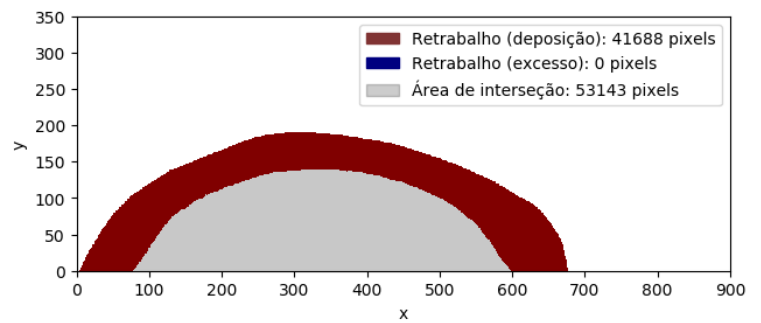
18 Esquerdo



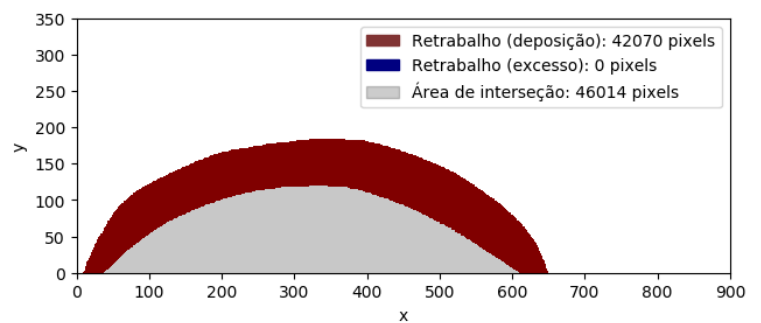
19 Direito



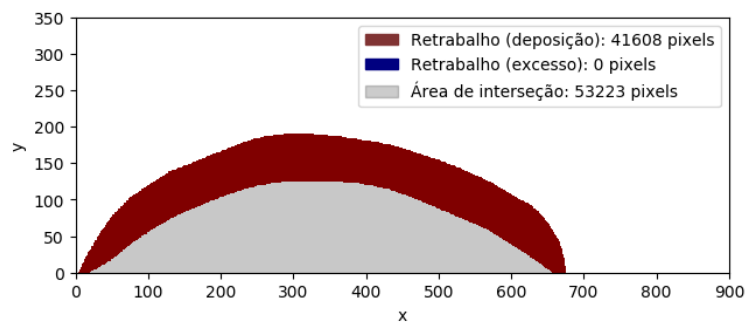
19 Esquerdo



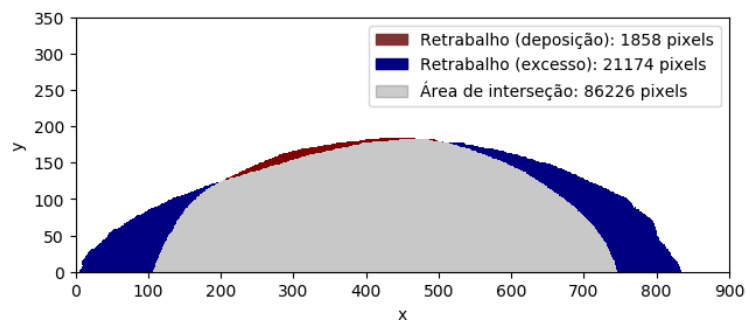
20 Direito



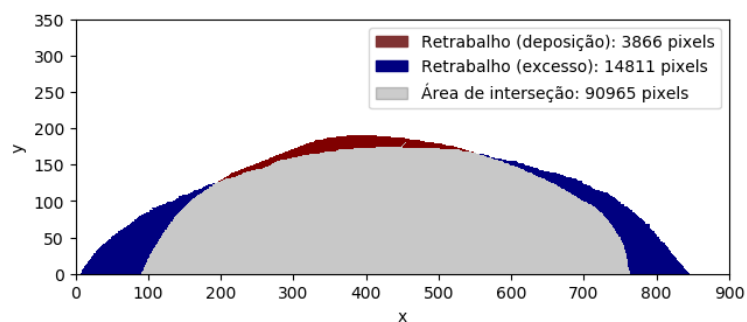
20 Esquerdo



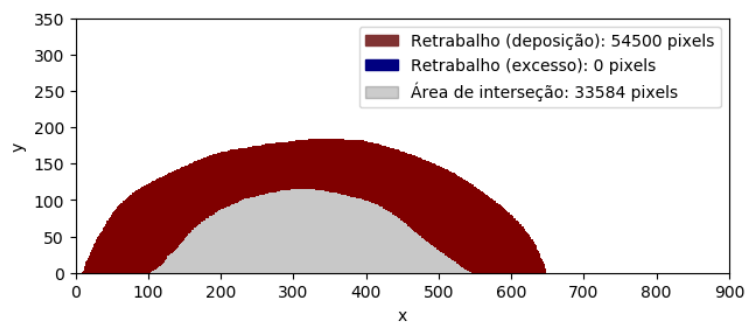
21 Direito



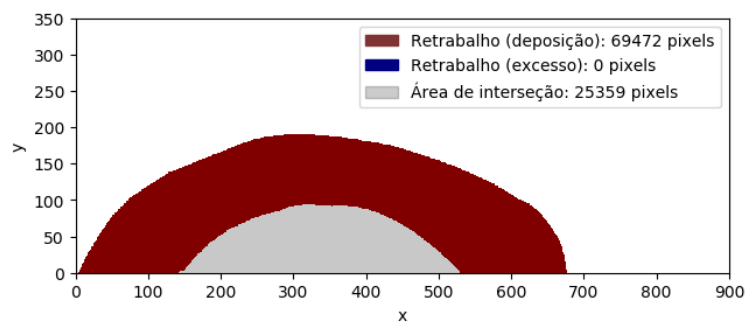
21 Esquerdo



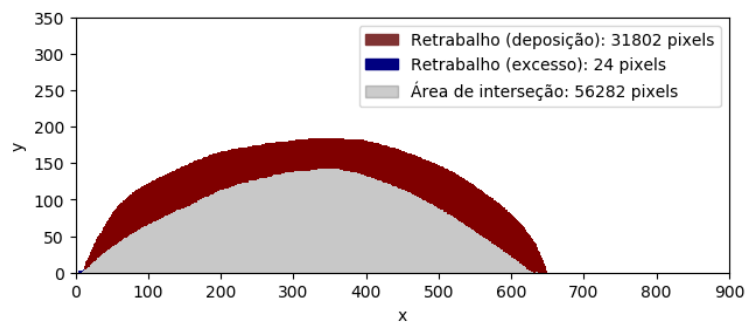
22 Direito



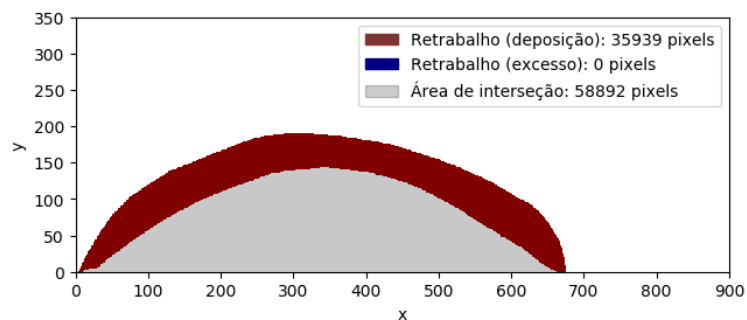
22 Esquerdo



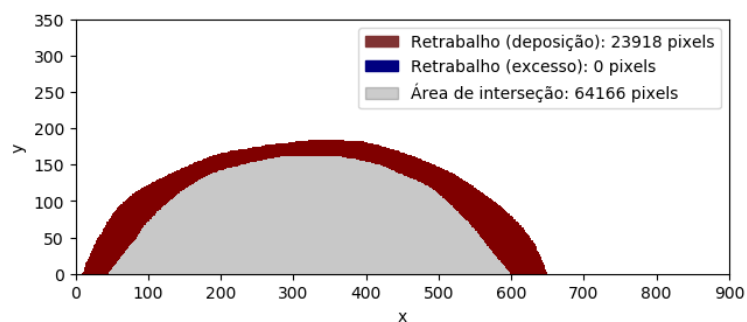
23 Direito



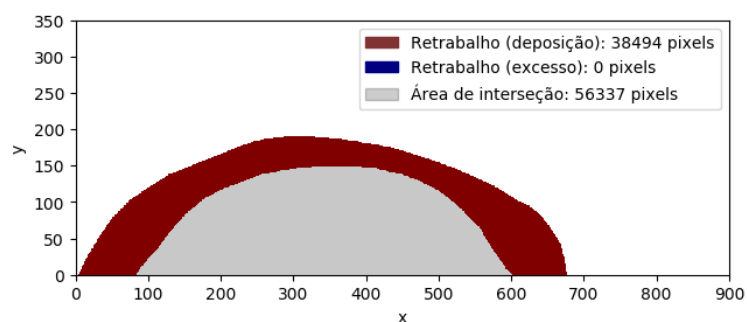
23 Esquerdo



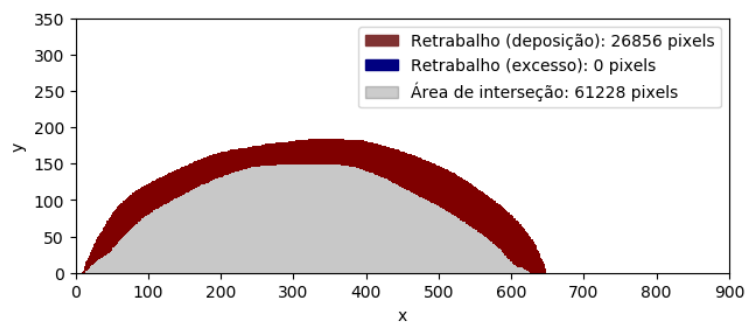
24 Direito



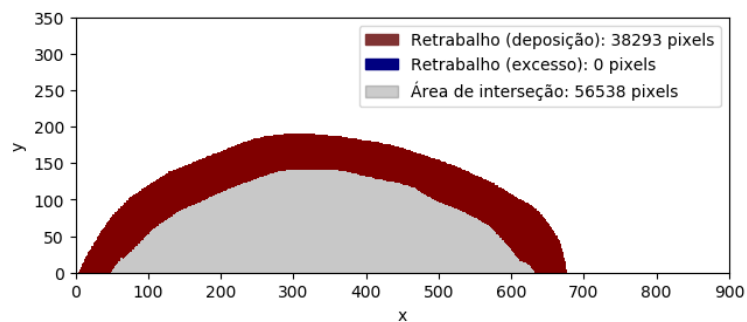
24 Esquerdo



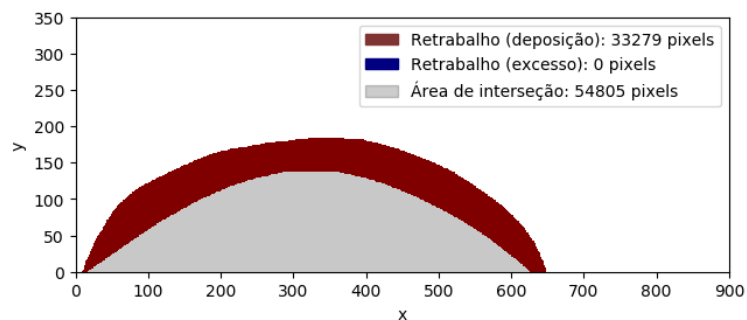
25 Direito



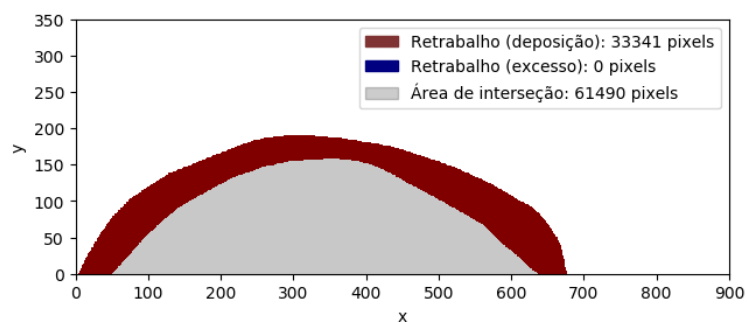
25 Esquerdo



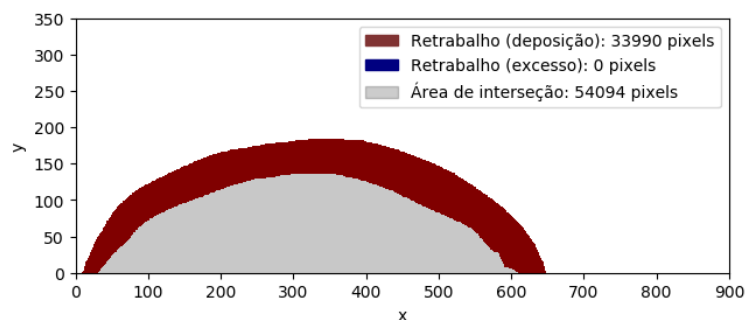
26 Direito



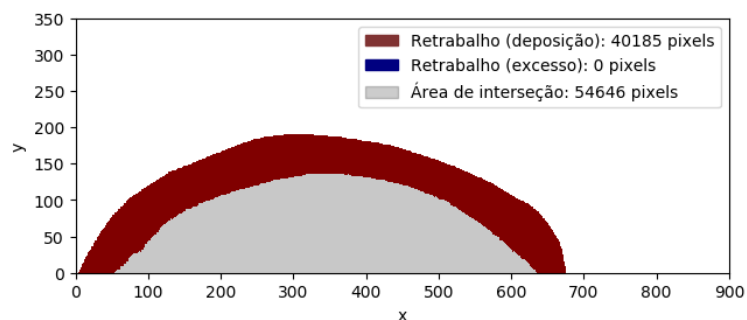
26 Esquerdo



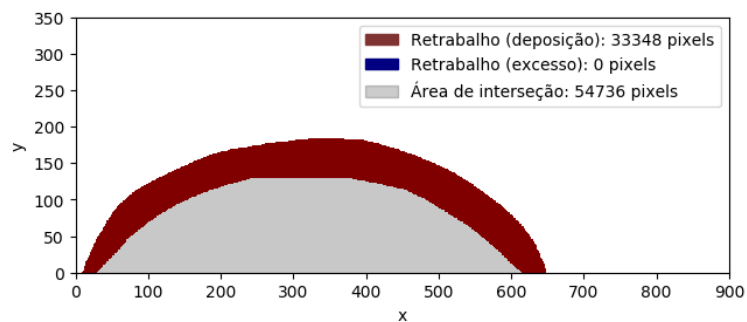
27 Direito



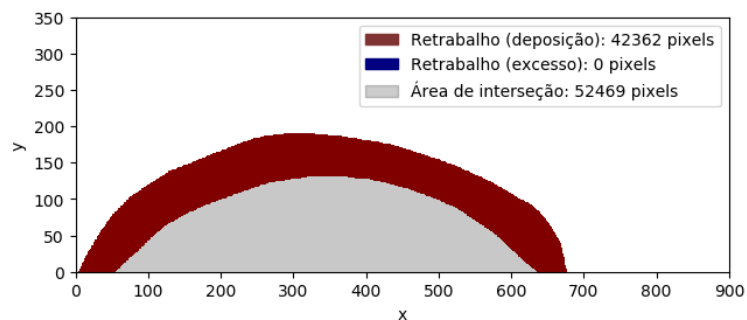
27 Esquerdo



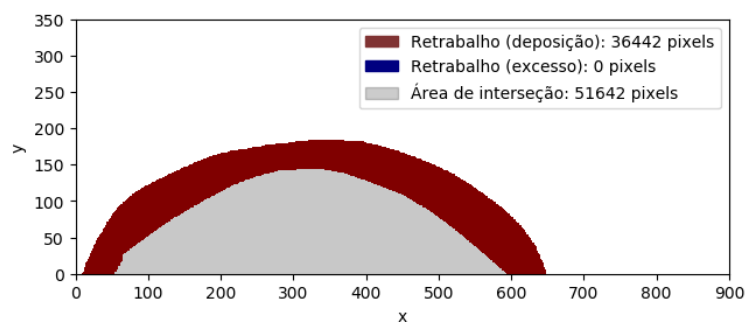
28 Direito



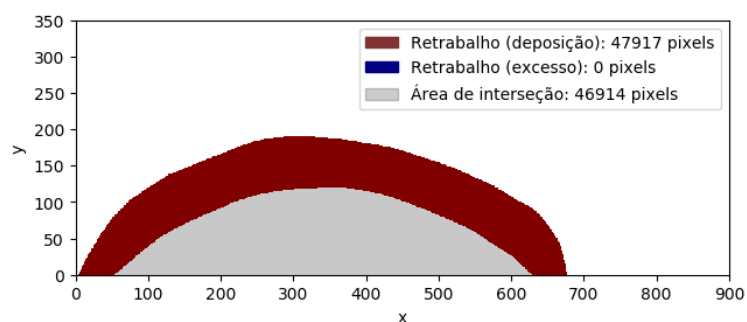
28 Esquerdo



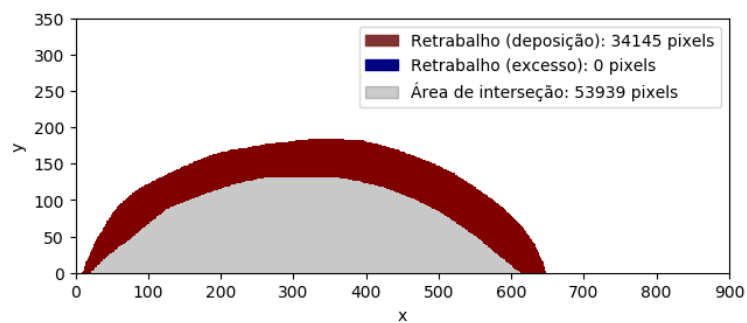
29 Direito



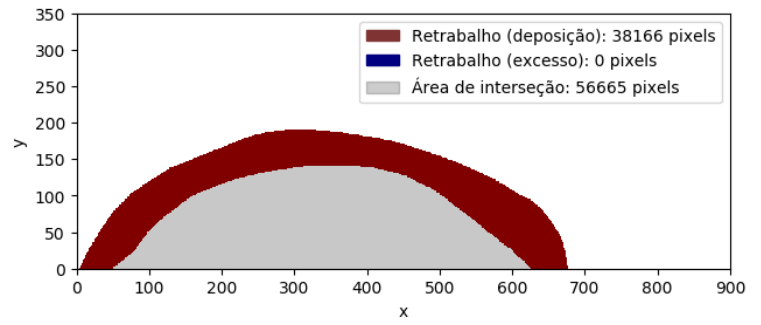
29 Esquerdo



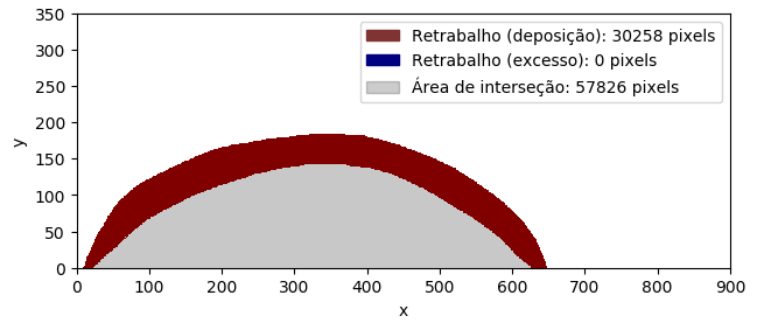
30 Direito



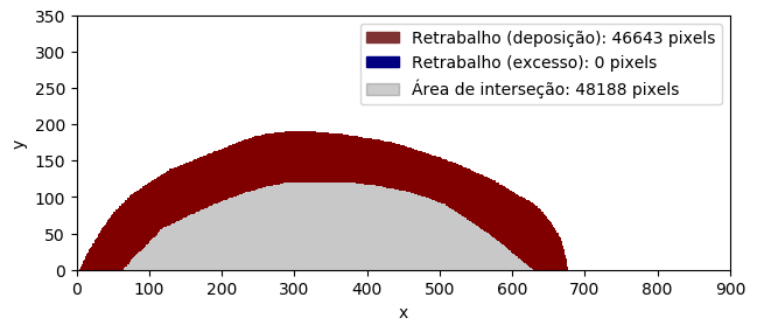
30 Esquerdo



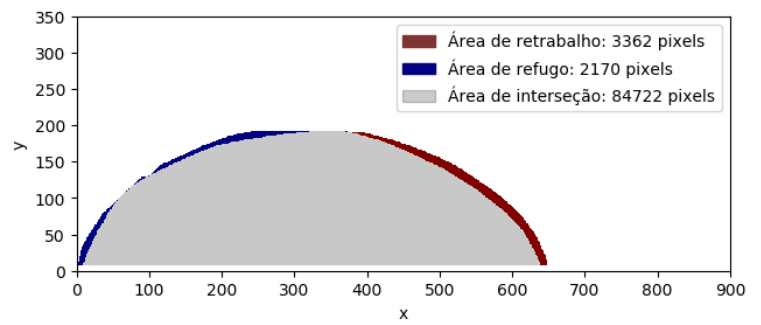
31 Direito



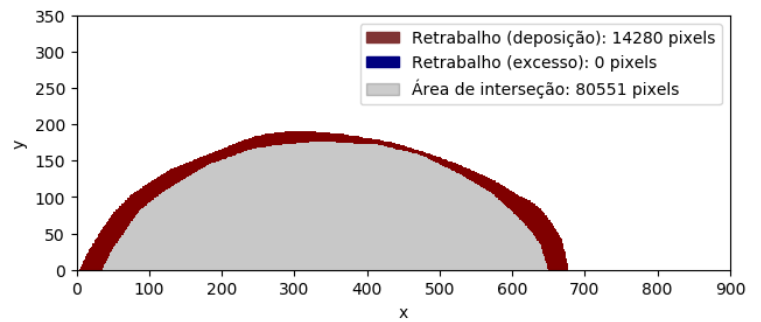
31 Esquerdo



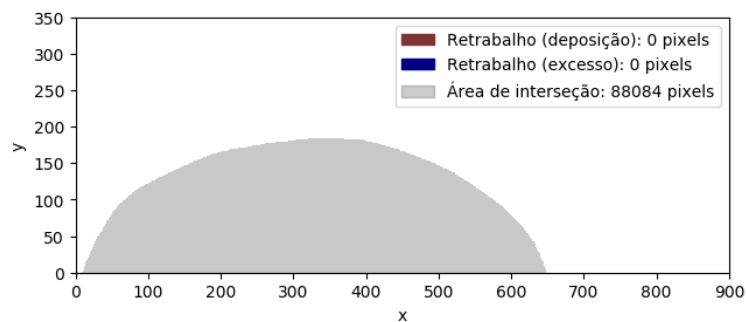
V1 Direito



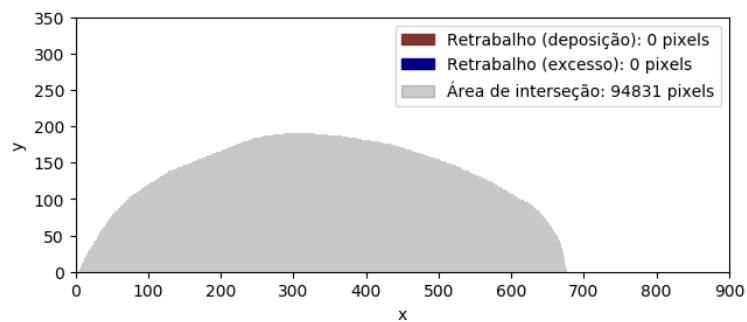
V1 Esquerdo



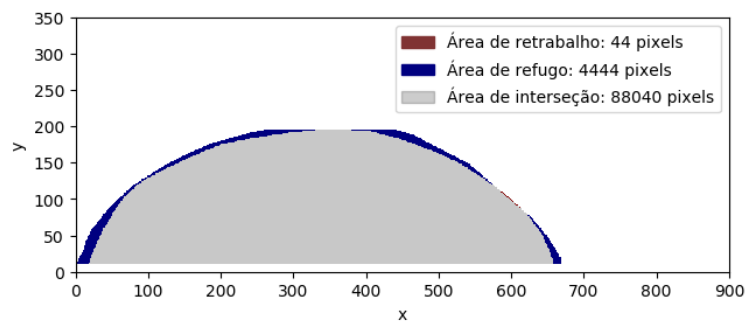
V2 Direito



V2 Esquerdo



V3 Direito



V3 Esquerdo

