

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA  
O REFERENCIAMENTO DE PEÇAS EM CENTROS DE USINAGEM CNC

por

Yachel Rogério Mileski

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Outubro de 2021

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA  
O REFERENCIAMENTO DE PEÇAS EM CENTROS DE USINAGEM CNC

por

Yachel Rogério Mileski

Engenheiro de Controle e Automação

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Aprovada por:

Prof. Dr. Eduardo André Perondi ..... PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Marcelo Götz , ..... DELAE/UFRGS

Prof. Dr. Roberto Sílvio Ubertino Rosso Jr. , ..... UDESC

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 15 de Outubro de 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de dedicar o presente trabalho a todas as pessoas que, de alguma forma, auxiliaram no meu crescimento, tanto profissional, quanto pessoal.

Aos meus pais, Adriana Baldasso Mileski e Carlos Rogério Mileski, pelos ensinamentos, carinho e apoio. Por acreditarem em mim, sempre me guiando na busca dos meus sonhos.

À minha namorada, Roberta Picanço Casarin, pelo amor, compreensão, carinho e confiança. Por sempre estar do meu lado, mesmo nos finais de semana de trabalho árduo.

Aos meus orientadores, André João de Souza e Heraldo José de Amorim, pela orientação e amizade dentro e fora da universidade.

Ao técnico do LAUS, Guilherme Vargas Schirmer, pelo auxílio durante toda a fase de testes.

Aos professores, Roberto Sílvio Ubertino Rosso Jr., Eduardo André Perondi e Marcelo Götz, pelas considerações que tornaram este trabalho melhor.

Aos meus avós, Lourdes Baldasso e Cláudio Mileski, pelos momentos acolhedores (e pelo melhor fricassê do mundo).

À minha tia Giovana Baldasso, por ser quase que uma irmã, sempre parceria para os melhores momentos.

Aos demais familiares, pelos almoços e jantas sempre alegres e com muitas histórias.

Aos meus amigos, pela confiança e pelos momentos de descontração, que me ajudaram a encarar o mestrado com mais tranquilidade.

Enfim, a todas as pessoas que sempre estiveram ao meu lado, meu muito obrigado!

## RESUMO

Centros de usinagem CNC apresentam alta flexibilidade. No entanto, devido aos altos custos de aquisição das máquinas operatrizes, é importante limitar o tempo ocioso de máquina. Uma abordagem comum para a redução dos tempos ociosos é o uso de equipamentos e técnicas para melhorar os procedimentos envolvidos no *setup* da máquina, incluindo o referenciamento de peças. Assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um sistema de referenciamento de peças em um centro de usinagem CNC com três eixos utilizando visão computacional. Através do sistema proposto, a identificação da posição e da orientação da peça de trabalho é realizada e, através desses dados, a conversão da trajetória de ferramenta é definida no programa CN, dispensando assim o alinhamento da peça e a localização de sua origem. A eficácia da metodologia proposta foi investigada através de procedimentos de validação experimental, nos quais foram avaliados os desvios dimensionais e angulares de peças usinadas em diferentes orientações. Os resultados obtidos são promissores e indicam a viabilidade de futuras aplicações industriais de sistemas baseados na metodologia desenvolvida.

**Palavras-chave:** Sistema de visão computacional; Centro de usinagem CNC; Referenciamento

## **ABSTRACT**

CNC machining centers present high flexibility. However, machine idle time must be reduced due to high acquisition costs. A common approach for managing the machine idle time is using techniques and equipment to improve machine setup operations, including part referencing. Thus, this work aims to develop a part-referencing system for a 3-axis CNC machining center using computer vision. The proposed system identifies the workpiece position and orientation. Then, it converts the tool path in the NC program through these data, dispensing both the alignment of the part and the location of its origin. The effectiveness of the proposed methodology was investigated through experimental validation, in which dimensional and angular deviation of machined parts were evaluated for different part orientations. The results indicate the feasibility of the industrial application of this methodology.

**Keywords:** Computer vision system; CNC machining center; Part-referencing

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Organização do Trabalho.....	2
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	Calibração de Sistemas Ópticos .....	4
2.2	Processamento Digital de Imagens.....	7
2.2.1	Processamento de baixo nível.....	8
2.2.2	Processamento de nível intermediário .....	13
2.2.3	Processamento de alto nível.....	17
2.3	Processo de Fresamento em Máquinas CNC.....	17
2.3.1	Qualidade do produto final .....	21
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA.....</b>	<b>23</b>
3.1	Sistema de Aquisição de Imagens .....	23
3.2	Calibração dos Parâmetros Intrínsecos da Câmera.....	26
3.3	Calibração dos Parâmetros Extrínsecos da Câmera .....	29
3.4	Identificação do Sistema de Coordenadas da Máquina na Imagem .....	31
3.1	Identificação do Sistema de Coordenadas da Peça de Trabalho na Imagem.....	36
3.1.1	Peças com sistema de coordenadas definidos em CAM.....	37
3.1.2	Peças com sistema de coordenadas definidas em um vértice com ângulo reto .....	43
3.2	Mudança de Sistemas de Coordenadas.....	45
3.3	Geração do Código G .....	53
<b>4</b>	<b>VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>55</b>
4.1	Teste 1 .....	58
4.2	Teste 2 .....	59
4.3	Teste 3 .....	60
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>62</b>
5.1	Teste 1 .....	62
5.2	Teste 2 .....	64
5.3	Teste 3 .....	66
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>75</b>

6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	75
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>
	<b>ANEXO I Comandos G e M .....</b>	<b>81</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Câmara Pinhole (adaptado de Lavarda, 2017). .....	5
Figura 2.2	Relação entre os pontos do objeto e da imagem (adaptado de Jain, et al., 1995). .....	5
Figura 2.3	Etapas de processamento digital de imagens [adaptado de Gonzalez e Woods, 1992]. .....	8
Figura 2.4	Relação entre tamanho do sensor e campo de visão [adaptado de Stemmer et al., 2005]. .....	10
Figura 2.5	Contraste entre diferentes tonalidades de cinza [adaptado de Stemmer et al., 2005]. .....	10
Figura 2.6	(a) Imagem original; (b) Histograma da imagem original; (c) Imagem com histograma equalizado; (d) Histograma equalizado [adaptado de Gonzalez e Woods, 1992]. .....	12
Figura 2.7	Detecção de borda por operadores de derivação [adaptado de Grassi, 2005]. .	14
Figura 2.8	Transformada de Hough: (a) espaço da imagem; (b) espaço de parâmetros. ...	17
Figura 2.9	Fresamento: (a) tangencial concordante; (b) tangencial discordante; (c) frontal concordante; (d) frontal discordante [Dib, 2013]. .....	18
Figura 2.10	Fresamento (a) em cheio, (b) parcial, (c) de face [Dib, 2013]. .....	19
Figura 2.11	Eixos de movimento em máquina CNC [adaptado de Joshi, 2021]. .....	20
Figura 2.12	Relações que afetam a qualidade da máquina-ferramenta [adaptado de Weck, 2001]. .....	22
Figura 2.13	Fatores que influenciam na qualidade da peça usinada [adaptado de Weck, 2001]. .....	22
Figura 3.1	Fluxograma do sistema desenvolvido. ....	24
Figura 3.2	Câmara <i>Microsoft LifeCam Cinema</i> . ....	25
Figura 3.3	Modelo rotina <i>Acquisition.m</i> . ....	25
Figura 3.4	Modelo rotina <i>Camera_Calibration.m</i> . ....	26
Figura 3.5	Imagens do padrão xadrez utilizado para identificação dos parâmetros intrínsecos. ....	27
Figura 3.6	Média do erro de reprojeção por imagens. ....	28
Figura 3.7	Projeção extrínseca dos padrões xadrez. ....	28
Figura 3.8	Modelo rotina <i>Extrinsics_Parameters.m</i> . ....	30
Figura 3.9	Exemplo de identificação do sistema de coordenadas da imagem. ....	30
Figura 3.10	Modelo rotina <i>Machine_Coordinate_System.m</i> . ....	31
Figura 3.11	Imagem da mesa do centro de usinagem com distorções corrigidas. ....	32
Figura 3.12	Região de interesse da imagem (ROI). ....	32

Figura 3.13	(a) Imagem em tons de cinza; (b) Histograma da imagem a; (c) Imagem com histograma equalizado; (d) Histograma equalizado.....	33
Figura 3.14	Imagem após a aplicação do filtro de Wiener.....	34
Figura 3.15	Identificação das bordas da região de interesse da mesa: (a) bordas sem dilatação; (b) bordas com dilatação. ....	35
Figura 3.16	Gráfico do espaço de parâmetros dos pontos na região de interesse. ....	35
Figura 3.17	Pontos de interesse da mesa identificados pelo programa. ....	36
Figura 3.18	Modelo rotina <i>CAM_Coordinate_System.m</i> . ....	37
Figura 3.19	Peça exemplo desenvolvida em CAD.....	38
Figura 3.20	Identificação do sistema de coordenadas CAM na imagem. ....	38
Figura 3.21	Imagem CAD binarizada. ....	39
Figura 3.22	Centroide (em azul) da imagem CAD binarizada.....	39
Figura 3.23	Identificação dos pontos de interesse na imagem CAM.....	40
Figura 3.24	Distância e ângulos entre centroide e pontos de interesse na imagem CAM. ..	40
Figura 3.25	Modelo rotina <i>Real_Workpiece_Coordinate_System.m</i> . ....	41
Figura 3.26	Imagem da peça com distorções corrigidas. ....	41
Figura 3.27	Região de interesse da peça apresentada na Figura 3.26. ....	42
Figura 3.28	Binarização da peça e identificação do centroide. ....	42
Figura 3.29	Sistema de coordenadas da peça identificados pelo programa. ....	43
Figura 3.30	Modelo rotina <i>Real_Workpiece_Coordinate_System.m</i> . ....	44
Figura 3.31	Exemplo de identificação com a rotina <i>Real_Workpiece_Vertex_Coord_Sys.m</i> . ....	46
Figura 3.32	Sistema de coordenadas da peça na imagem identificados pelo programa. ....	46
Figura 3.33	Modelo rotina <i>Coordinates_Table_World.m</i> . ....	48
Figura 3.34	Sistema de coordenadas do padrão xadrez.....	48
Figura 3.35	Sistema de coordenadas da máquina na imagem. ....	49
Figura 3.36	Relação entre o sistema de coordenadas da máquina no mundo com o sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo. ....	49
Figura 3.37	Modelo rotina <i>Coordinates_Workpiece_World.m</i> . ....	51
Figura 3.38	Sistema de coordenadas da peça na imagem. ....	51
Figura 3.39	Relação entre o sistema de coordenadas da máquina (azul) e da peça (preto) no mundo com o sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo. ....	52
Figura 3.40	Relação entre o sistema de coordenadas da máquina e da peça no mundo. ....	53
Figura 3.41	Modelo rotina <i>G_Code.m</i> .....	54
Figura 3.42	(a) Pontos definidos em CAM; (b) Código G gerado pela rotina desenvolvida .....	54

Figura 4.1	Referenciamento das coordenadas x e y da ferramenta em relação à mesa do centro de usinagem. ....	56
Figura 4.2	Posicionamento da câmera e padrão xadrez para obtenção dos parâmetros extrínsecos.....	57
Figura 4.3	Peça came fixada no centro de usinagem CNC. ....	58
Figura 4.4	Desenho da came desenvolvido em CAD.....	58
Figura 4.5	Identificação do sistema de coordenadas definido em CAM nas peças reais orientadas em (a) 0°, (b) 30° e (c) 45° em relação ao eixo x do centro de usinagem. ....	59
Figura 4.6	Desenho do círculo desenvolvido em CAD.....	60
Figura 4.7	Identificação do sistema de coordenadas definido em CAM nas peças reais: (a) círculo 1, (b) círculo 2 e (c) círculo 3. ....	60
Figura 4.8	Identificação do sistema de coordenadas das peças quadradas orientadas a (a) 0°, (b) 30° e (c) 45° com o eixo x da mesa do centro de usinagem.....	61
Figura 4.9	Fresamento de dois canais perpendiculares nas peças quadradas.....	61
Figura 5.1	Parâmetros dimensionais (PD) definidos sobre a peça com formato de came. ....	62
Figura 5.2	Parâmetros dimensionais (PD) medidos nas três posições avaliadas. A linha tracejada corresponde à dimensão nominal (29,25 mm). ....	63
Figura 5.3	Parâmetros dimensionais (PD) definidos sobre a peça com formato circular. ....	64
Figura 5.4	Parâmetros dimensionais (PD) medidos em cada ensaio. A linha tracejada corresponde à dimensão nominal (49 mm).....	65
Figura 5.5	Parâmetros dimensionais definidos sobre a peça quadrada. ....	66
Figura 5.6	Parâmetros dimensionais (PD) medidos em cada ensaio na peça orientada com ângulo de 0°. A linha tracejada corresponde à dimensão nominal (10 mm).....	67
Figura 5.7	Parâmetros dimensionais (PD) medidos em cada ensaio na peça orientada com ângulo de 30°. A linha tracejada corresponde à dimensão nominal (10 mm)...	68
Figura 5.8	Parâmetros dimensionais (PD) medidos em cada ensaio na peça orientada com ângulo de 45°. A linha tracejada corresponde à dimensão nominal (10 mm)...	69
Figura 5.9	Fatores influentes no desvio dimensional: (a) parâmetro dimensional; (b) orientação da peça; (c) parâmetro dimensional x orientação da peça. ....	71
Figura 5.10	Influência da orientação da peça no desvio angular: (a) horizontal, (b) vertical. ....	73
Figura I.1	Lista de Comandos G.....	81
Figura I.2	Lista de Comandos M.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Parâmetros da câmera ajustados via software.....	25
Tabela 3.2	Parâmetros intrínsecos da câmera <i>Microsoft LifeCam Cinema</i> .....	27
Tabela 4.1	Características do centro de usinagem CNC ROMI Discovery 308.....	55
Tabela 5.1	Medidas do came. ....	63
Tabela 5.2	Análise de variância para avaliar a influência do parâmetro dimensional sobre o desvio dimensional para as peças came. ....	64
Tabela 5.3	Medidas do Círculo.....	65
Tabela 5.4	Análise de variância para avaliar a influência do parâmetro dimensional sobre o desvio dimensional para as peças circulares. ....	66
Tabela 5.5	Medidas do Quadrado – Peça orientada com ângulo de 0° em relação à mesa do centro de usinagem. ....	67
Tabela 5.6	Medidas do Quadrado – Peça orientada com ângulo de 30° em relação à mesa do centro de usinagem. ....	68
Tabela 5.7	Medidas do Quadrado – Peça orientada com ângulo de 45° em relação à mesa do centro de usinagem. ....	69
Tabela 5.8	Média dos desvios dimensionais para os ensaios realizados. ....	70
Tabela 5.9	Análise de variância para avaliar a influência da medida e da orientação sobre o desvio dimensional.....	70
Tabela 5.10	Desvios angulares nas usinagens das peças quadradas.....	72
Tabela 5.11	Análise de variância para avaliar a influência da orientação sobre o desvio angular.....	72

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAD	Design Auxiliado por Computador
CAM	Manufatura Auxiliada por Computador
CAPP	Planejamento de Processo Auxiliado por Computador
CCD	<i>Charge Coupled Device</i> (Dispositivo de carga acoplada)
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> (Metal-óxido semicondutor complementar)
CN	Comando Numérico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
ISO	Organização Internacional de Normalização
LAUS	Laboratório de Automação em Usinagem
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> (Placa de fibra de média densidade)
MFDP	Sistema Máquina / Ferramenta / Dispositivo de Fixação / Peça
PD	Parâmetro Dimensional
RGB	Sistema de cores aditivas e primárias que carrega na abreviação as nomenclaturas <i>Red</i> (vermelho), <i>Green</i> (verde) e <i>Blue</i> (azul)
ROI	Região de Interesse
SCM	Sistema de Coordenadas do Mundo
SCMI	Sistema de Coordenadas da Máquina na Imagem
SCMM	Sistema de Coordenadas da Máquina no Mundo
SCPI	Sistema de Coordenadas da Peça na Imagem
SCPM	Sistema de Coordenadas da Peça no Mundo
SCPXI	Sistema de Coordenadas do Padrão Xadrez na Imagem
SCPXM	Sistema de Coordenadas do Padrão Xadrez no Mundo
MCU	<i>Machine Control Unit</i> (Unidade de controle da máquina)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Porta universal)

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Latinos

$a_e$	Penetração de trabalho, mm
$a_p$	Profundidade de usinada
$a_n$	Medição $n$ na peça em formato came, mm
$b_n$	Medição $n$ na peça em formato circular, mm
$c_n$	Medição $n$ na peça em formato quadrado, mm
$cc$	Valor de intensidade luminosa da camada colorida
$C_x$	Coordenada X da projeção ortogonal do centro óptico no plano de projeção, mm
$C_y$	Coordenada Y da projeção ortogonal do centro óptico no plano de projeção, mm
$C\%$	Contraste
$d_{o,CAM}$	Distância euclidiana entre o centroide da peça e a origem do sistema de coordenadas na imagem CAM, <i>pixels</i>
$d_{1,CAM}$	Distância euclidiana entre o centroide da peça e o ponto que representa o eixo das abcissas do sistema de coordenadas na imagem CAM, <i>pixels</i>
$d_{2,CAM}$	Distância euclidiana entre o centroide da peça e o ponto que representa o eixo das ordenadas do sistema de coordenadas na imagem CAM, <i>pixels</i>
$d_{o,Real}$	Distância euclidiana entre o centroide da peça e a origem do sistema de coordenadas na imagem da peça real, <i>pixels</i>
$d_{1,Real}$	Distância euclidiana entre o centroide da peça e o ponto que representa o eixo das abcissas do sistema de coordenadas na imagem da peça real, <i>pixels</i>
$d_{2,Real}$	Distância euclidiana entre o centroide da peça e o ponto que representa o eixo das ordenadas do sistema de coordenadas na imagem da peça real, <i>pixels</i>
$E$	Matriz de parâmetros extrínsecos
$e_{padrão\_xadrez}$	Espessura do padrão xadrez, mm
$e_{peça}$	Espessura da peça, mm
$f_o$	Distância focal, mm
$f(x', y')$	Função da imagem

$FOV$	Campo de visão, mm <sup>2</sup>
$k_1$	Coefficiente de distorção radial 1
$k_2$	Coefficiente de distorção radial 2
$k_3$	Coefficiente de distorção radial 3
$h_1$	Operador de Sobel 1
$h_2$	Operador de Sobel 2
$I$	Matriz de parâmetros intrínsecos
$Il$	Intensidade luminosa
$m_n$	Medição $n$
$p_n$	<i>Pixel</i>
$PMAG$	Magnificação primária
$r$	Distância entre um ponto com distorção e o centro da imagem, <i>pixels</i>
$R$	Matriz de rotação
$R_{SCPM}^{SCPXM}$	Matriz de rotação do sistema de coordenadas da máquina no mundo em relação ao sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo
$R_{SCPM}^{SCMM}$	Matriz de rotação do sistema de coordenadas da peça no mundo em relação ao sistema de coordenadas da máquina no mundo
$SS$	Tamanho do sensor, mm <sup>2</sup>
$s_x$	Número de <i>pixels</i> por unidade de comprimento na direção X, <i>pixel/mm</i>
$s_y$	Número de <i>pixels</i> por unidade de comprimento na direção Y, <i>pixel/mm</i>
$T$	Matriz de translação
$T_x$	Translação nas coordenadas x, mm
$T_y$	Translação nas coordenadas y, mm
$T_z$	Translação nas coordenadas z, mm
$T_{SCPM}^{SCPXM}$	Matriz de translação do sistema de coordenadas da máquina no mundo em relação ao sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo
$T_{SCPM}^{SCMM}$	Matriz de translação do sistema de coordenadas da peça no mundo em relação ao sistema de coordenadas da máquina no mundo

$x_{origem\_máquina}^{SCPXM}$	Coordenada x da origem da máquina no sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo, mm
$y_{origem\_máquina}^{SCPXM}$	Coordenada y da origem da máquina no sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo, mm
$x_{eixox\_máquina}^{SCPXM}$	Coordenada x do ponto que representa o eixo das abscissas da máquina no sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo, mm
$y_{eixox\_máquina}^{SCPXM}$	Coordenada y do ponto que representa o eixo das abscissas da máquina no sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo, mm
$x_{origem\_máquina}^{SCPM}$	Coordenada x do ponto que representa a origem da máquina no sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo, mm
$y_{origem\_máquina}^{SCPM}$	Coordenada y do ponto que representa a origem da máquina no sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo, mm
$x_{peça}^{SCMM}$	Coordenada x da peça no sistema de coordenadas da máquina no mundo, mm
$y_{peça}^{SCMM}$	Coordenada y da peça no sistema de coordenadas da máquina no mundo, mm
$x_{peça}^{SCPXM}$	Coordenada x da peça no sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo, mm
$y_{peça}^{SCPXM}$	Coordenada y da peça no sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo, mm
$x_{origem\_peça}^{SCMM}$	Coordenada x do ponto que representa a origem da peça no sistema de coordenadas da máquina no mundo, mm
$y_{origem\_peça}^{SCMM}$	Coordenada y do ponto que representa a origem da peça no sistema de coordenadas da máquina no mundo, mm
$x_{eixox\_peça}^{SCMM}$	Coordenada x do ponto que representa o eixo das abscissas da peça no sistema de coordenadas da máquina no mundo, mm
$y_{eixox\_peça}^{SCMM}$	Coordenada y do ponto que representa o eixo das abscissas da peça no sistema de coordenadas da máquina no mundo, mm
$x_{ponto}^{SCPM}$	Coordenada x do ponto definido em CAM no sistema de coordenadas da peça no mundo, mm
$y_{ponto}^{SCPM}$	Coordenada y do ponto definido em CAM no sistema de coordenadas da peça no mundo, mm
$X_w$	Localização de um ponto nas coordenadas do mundo no eixo X, mm
$Y_w$	Localização de um ponto nas coordenadas do mundo no eixo Y, mm
$Z_w$	Localização de um ponto nas coordenadas do mundo no eixo Z, mm

$x'$	Localização de um ponto nas coordenadas da imagem no eixo X, <i>pixels</i>
$y'$	Localização de um ponto nas coordenadas da imagem no eixo Y, <i>pixels</i>
$x'_d$	Localização de um ponto nas coordenadas da imagem com distorção no eixo X, <i>pixels</i>
$y'_d$	Localização de um ponto nas coordenadas da imagem com distorção no eixo Y, <i>pixels</i>
$X_{OM}$	Coordenada X da intersecção das retas que representam o sistema de coordenadas da máquina na imagem.
$Y_{OM}$	Coordenada Y da intersecção das retas que representam o sistema de coordenadas da máquina na imagem.
$WD$	Distância de trabalho do sistema, mm

### Símbolos Gregos

$\alpha_{o,CAM}$	Ângulo entre o centroide da peça e a origem do sistema de coordenadas na imagem CAM, graus
$\alpha_{1,CAM}$	Ângulo entre o centroide da peça e o ponto que representa o eixo das abcissas do sistema de coordenadas na imagem CAM, graus
$\alpha_{2,CAM}$	Ângulo entre o centroide da peça e o ponto que representa o eixo das ordenadas do sistema de coordenadas na imagem CAM, graus
$\tau$	Tangente do ângulo formado pelo desalinhamento vertical dos sensores da câmera
$\rho$	Distância da reta até a origem, <i>pixels</i>
$\theta$	Ângulo entre o eixo x e a normal da reta, graus
$\phi_{SCPM}^{SCPXM}$	Ângulo entre o eixo das abcissas do sistema de coordenadas da máquina no mundo e o eixo das abcissas do sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo, graus
$\phi_{SCPM}^{SCMM}$	Ângulo entre o eixo das abcissas do sistema de coordenadas da peça no mundo e o eixo das abcissas do sistema de coordenadas da máquina no mundo, graus
$\psi_{horizontal}$	Desvio angular do canal horizontal, graus
$\psi_{vertical}$	Desvio angular do canal vertical, graus

# 1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia e a disputa por novos negócios são os principais fatores que motivam as empresas de todos os setores a uma busca crescente por vantagens competitivas [Vieira Jr. et al, 2011]. No campo da usinagem, as empresas utilizam recursos e técnicas que permitem a redução de perdas em seu sistema produtivo através da diminuição do consumo de materiais e energia, produção de peças com níveis de qualidade cada vez maiores e otimização do tempo de produção. Neste contexto, os centros de usinagem por comando numérico computadorizado (CNC) permitem a produção de peças complexas com alta flexibilidade devido à trajetória programável da ferramenta. Porém, o controle do tempo ocioso da máquina é essencial para a otimização da produtividade e dos custos de produção, de modo que técnicas relacionadas à redução do tempo de *setup* da máquina sejam muito importantes [Costa, 2014].

Segundo Jaharah et al., 2009, o *setup* pode ser entendido como a atividade de preparação da estação de trabalho para a execução de um determinado lote de peças. Em um processo de fabricação utilizando centros de usinagem CNC, por exemplo, existem diversas etapas de *setup*, como o pré-ajuste de ferramentas [Silva et al., 2017] e a definição dos pontos de referência da máquina e da peça [Smid, 2003]. De acordo com He et al., 2021, as duas principais estratégias de referenciamento de peças em centros de usinagem CNC são o referenciamento manual e o uso de dispositivos especiais para fixação. Enquanto a primeira consiste em alinhar e posicionar manualmente a peça para, em seguida, fazer a localização manual do zero-peça, o segundo permite o posicionamento preciso da peça em uma posição específica, dispensando a localização do zero-peça a cada ciclo de fabricação. Embora extremamente flexível, a operação manual é demorada e pode causar desperdício devido ao posicionamento deficiente. No entanto, dispositivos especiais como o desenvolvido por Beralava et al., 2021, ajudam a reduzir o *lead time*, mas são caros e limitam a flexibilidade, sendo indicados para produção em série.

O problema do tempo gasto no *setup* de máquinas-ferramenta vem sendo abordado através de diferentes técnicas. Dentre elas, o uso de sistemas de visão computacional está sendo cada vez mais utilizado em aplicações industriais. Segundo Groover, 2008, os sistemas de visão computacional consistem na aquisição, processamento e interpretação dos dados de imagem visando alguma aplicação. Suas principais aplicações consistem em automatizar tarefas complexas que demandam tempos elevados ou substituir a mão-de-obra humana em

tarefas repetitivas e/ou cansativas. Entre outras áreas, estes sistemas são aplicados na astronomia [Sharif e Uyaver, 2017], medicina [Pun et al., 1994], logística [Thamer et al., 2014] e manufatura [Sathiyamoorthy, 2014]. Dentro de processos de fabricação, sistemas de visão computacional têm auxiliado significativamente em diversas fases do ciclo produtivo de um produto, como na orientação de deslocamento de um robô, automatização de tarefas em células de manufatura, planejamento da produção e controle de qualidade [Rudek, et al., 2001].

Dentro desse contexto, as aplicações industriais de sistemas de visão computacional são classificadas em quatro categorias: (i) monitoramento e controle de processos, (ii) reconhecimento e classificação de peças, (iii) inspeção e (iv) orientação e controle de manipuladores robóticos. Uma vez que cada uma destas aplicações possui diferentes necessidades em termos de exatidão, resposta dinâmica e processamento, e como os custos envolvidos na aquisição de um sistema de visão podem variar significativamente com estes parâmetros, seu desenvolvimento deve contemplar as necessidades específicas do uso ao qual se destina [Golnabi e Asadpour, 2007].

Com base nessas aplicações, o presente trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema de visão computacional de baixo custo para a automatização da etapa de *setup* em centros de usinagem CNC, mais especificamente no referenciamento de peças de trabalho. Por meio deste sistema pretende-se realizar a identificação da posição e orientação de uma peça na máquina para, através destes dados, realizar a conversão do comando numérico (CN) desenvolvido para a sua manufatura através de um *software* CAM para o sistema de coordenadas da máquina.

## 1.1 Organização do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos.

- **Capítulo 1:** apresenta a introdução sobre o tema abordado, o cenário contemporâneo e as motivações que deram origem à escolha do tema, além dos objetivos da pesquisa.
- **Capítulo 2:** realiza um breve estudo sobre os processos de fabricação utilizando centros de usinagem por comando numérico (CNC), os procedimentos de calibração de sistemas ópticos e as principais técnicas de processamento digital de imagens.

- **Capítulo 3:** descreve a metodologia proposta para a aquisição de imagens, a calibração da câmera utilizada, o pré-processamento, a segmentação da imagem e a obtenção dos dados de interesse – como a orientação e posição da peça em relação à mesa da máquina. Por fim, é proposto um método para a correção automática do comando numérico para a usinagem de peças em centros de usinagem CNC.
- **Capítulo 4:** exhibe o procedimento experimental e os materiais utilizados nos testes de validação do sistema de posicionamento da peça, nos quais foram avaliados os desvios dimensionais e angulares de diferentes peças usinadas em diferentes orientações.
- **Capítulo 5:** mostra os resultados das medições dos desvios, bem como a discussão sobre os mesmos.
- **Capítulo 6:** expõe as considerações finais sobre os resultados da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os principais conceitos utilizados neste trabalho. Na **Seção 2.1** realiza-se uma investigação sobre a calibração de sistemas ópticos, na qual é apresentada a modelagem matemática de uma câmera considerando suas não-idealidades. Além disto, nessa seção são apresentados os métodos para a identificação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera. A **Seção 2.2**, apresenta métodos de processamento digital de imagem, incluindo conceitos das etapas de aquisição, pré-processamento, segmentação, descrição e identificação. Por fim, na **Seção 2.3** são exibidas as principais características de um processo de fabricação utilizando centros de usinagem CNC, bem como a elaboração do comando numérico (CN) ou código G.

### 2.1 Calibração de Sistemas Ópticos

A calibração de sistemas ópticos pode ser entendida como um processo de determinação das características geométricas digitais e ópticas da câmera, considerando que seja conhecido um conjunto de pares de pontos bidimensionais em uma imagem e seus respectivos pontos tridimensionais no sistema de coordenadas do mundo (SCM). Através de equações não-lineares, é possível relacionar estes pontos e, assim, identificar os coeficientes de calibração [Marques, 2007].

Marques, 2007, classifica os dados resultantes da calibração como parâmetros extrínsecos e intrínsecos. Os parâmetros extrínsecos correspondem às informações de posição e orientação da câmera em relação a um sistema de coordenadas do mundo, enquanto os parâmetros intrínsecos representam as características ópticas e geométricas internas da câmera, como distância focal, fatores de escala, posição em *pixels* da projeção ortogonal do centro óptico no plano de projeções e distorções.

A fim de compreender melhor o processo de calibração, é preciso obter inicialmente o modelo matemático da câmera. Para isso, é mais prático considerar o modelo de uma câmera fundamental, ou câmera *Pinhole*. Esse tipo de câmera não apresenta lente, mas apenas um orifício por onde capta-se a luz para o seu interior. A imagem é formada através da interseção dos raios luminosos com o fundo da câmera. A Figura 2.1 esquematiza a câmera *Pinhole*. Analisando a figura, percebe-se que a imagem formada no fundo da câmera está invertida em relação ao objeto. Por este motivo, é considerada a imagem com o plano situado à mesma

distância do fundo da câmera ao orifício, porém para frente e, assim, obtendo a imagem na mesma orientação do objeto.

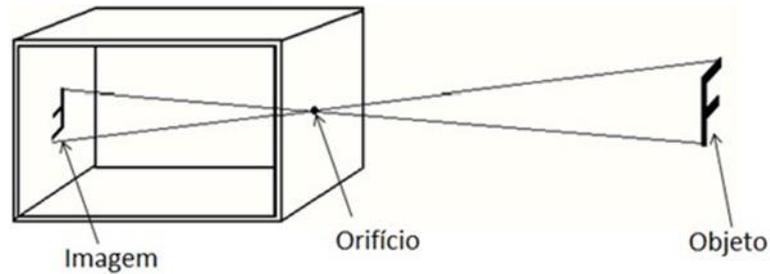


Figura 2.1 – Câmera Pinhole (adaptado de Lavarda, 2017).

Além disto, sabe-se que quanto mais próximo um objeto está da câmera, maior é a sua imagem projetada no interior da câmera. Da mesma forma, quanto maior a distância entre o orifício e o plano de projeção – também chamada de distância focal  $f_o$  – maior a imagem formada. Assim, é possível estabelecer uma relação entre as coordenadas do mundo  $X_w, Y_w$  e  $Z_w$  e as coordenadas da imagem  $x'$  e  $y'$ , como apresentado nas Equações (2.1) e (2.2). A Figura 2.2 apresenta essa relação entre pontos do objeto e da imagem.

$$x' = \frac{f_o}{Z_w} X_w \quad (2.1)$$

$$y' = \frac{f_o}{Z_w} Y_w \quad (2.2)$$

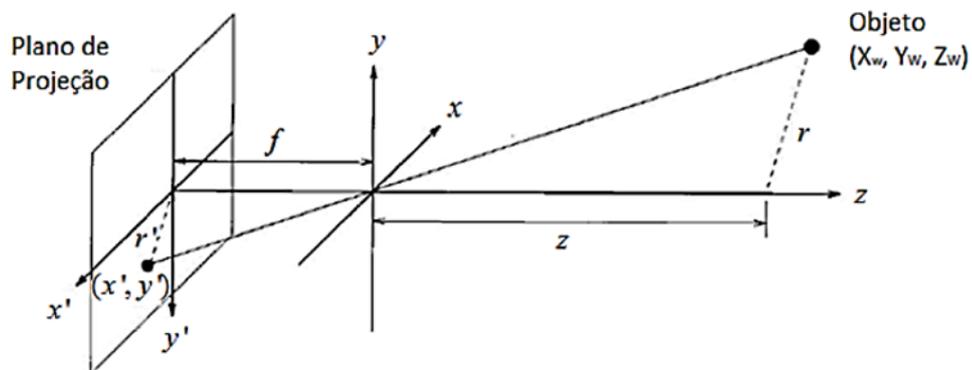


Figura 2.2 – Relação entre os pontos do objeto e da imagem (adaptado de Jain, et al., 1995).

Câmeras do tipo *Pinhole* não apresentam distorções. Contudo, para produzir uma imagem mais nítida, é necessário que o orifício seja muito pequeno, o que faz com que poucos raios luminosos sejam captados e resulta em baixa intensidade de luz. Para resolver esse problema são utilizadas lentes. Porém, ao mesmo tempo em que permitem uma passagem maior de luz, as lentes também geram distorções devido às suas formas. Uma das distorções mais comuns é a distorção radial, gerada principalmente por câmeras com lente do tipo grande angular, que provoca uma curvatura próximo às bordas das imagens. Dessa forma, ao invés das coordenadas  $X_W$ ,  $Y_W$  e  $Z_W$  serem projetadas no ponto  $x'$  e  $y'$ , que corresponde ao ponto sem distorção, elas serão projetadas no ponto com distorção  $x'_d$  e  $y'_d$ . A relação entre as coordenadas  $x'$  e  $y'$ , e as coordenadas  $x'_d$  e  $y'_d$  são apresentadas nas Equações (2.3), (2.4) e (2.5),

$$x' = x'_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (2.3)$$

$$y' = y'_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (2.4)$$

$$r = \sqrt{x_d'^2 + y_d'^2} \quad (2.5)$$

onde  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são os coeficientes de distorção radial e  $r$  é a distância entre um ponto (com distorção) e o centro da imagem.

Portanto, quanto mais afastado do centro da imagem, maior será a distorção radial em um ponto. O efeito da distorção radial pode ser representado por um polinômio de sexto grau, como apresentado nas Equações (2.3) e (2.4). Esses parâmetros são obtidos a partir de algum método de calibração [Marques, 2007].

Um método bastante utilizado para a calibração de câmeras é descrito por Zhang, 2000. Este método consiste na utilização de diversas imagens de um padrão de calibração a fim de identificar a matriz de transformação de coordenadas que converta os pontos da imagem para coordenadas do mundo, ou seja, identificar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera. O método aplicado é dividido em duas partes: a primeira identifica os parâmetros considerando que a distorção da lente é nula, e a segunda estima esses parâmetros incluindo o coeficiente de distorção usando aproximação não-linear por mínimos quadrados (algoritmo Levenberg-Marquardt). Os parâmetros identificados na primeira etapa são utilizados como estimativa inicial. Seguindo o modelo apresentado por Marques, 2007, a

matriz dos parâmetros intrínsecos  $I$  e a matriz dos parâmetros extrínsecos  $E$  são apresentadas nas Equações (2.6) e (2.7), respectivamente,

$$I = \begin{bmatrix} s_x & \tau & C_x \\ 0 & s_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_o & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_o & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$E = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

onde  $s_x$  e  $s_y$  são os números de *pixels* por unidade de comprimento nas direções horizontal e vertical,  $\tau$  é a tangente do ângulo formado pelo desalinhamento vertical dos sensores da câmera,  $C_x$  e  $C_y$  são as coordenadas da projeção ortogonal do centro óptico no plano de projeção,  $f_o$  é a distância focal,  $R$  é uma matriz de rotação  $3 \times 3$  e  $T$  é uma matriz de translação  $3 \times 1$ .

A Equação 2.8 apresenta a relação entre as coordenadas do mundo e da imagem utilizando as matrizes de parâmetros intrínsecos e extrínsecos [Marques, 2007].

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = IE \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

## 2.2 Processamento Digital de Imagens

Antes de abordar as etapas de processamento de imagens, é importante compreender o conceito de imagens digitais. De acordo com Gonzalez e Woods, 1992, uma imagem monocromática consiste em uma função bidimensional de intensidade da luz  $f(x',y')$ , onde  $x'$  e  $y'$  são as coordenadas espaciais. Este tipo de representação é comum para imagens em tons de cinza. Imagens coloridas em tons RGB (do inglês *red, green & blue*) podem, por exemplo, ser representadas como uma função tridimensional  $f(x',y',cc)$ , onde  $cc$  é a camada colorida.

Em uma imagem digital, tanto as coordenadas espaciais quanto o brilho são discretizados. Dessa forma, uma imagem pode ser considerada uma matriz cujos índices de

linhas e de colunas identificam um ponto na imagem e o correspondente valor do elemento da matriz identifica a intensidade luminosa. Cada elemento dessa matriz é chamado de *pixel*.

As operações de sistemas de visão computacional podem ser divididas em três etapas: processamento de baixo nível, processamento de nível intermediário e processamento de alto nível. O primeiro corresponde ao sensoriamento (aquisição da imagem) e pré-processamento (conversão de cores, filtragem, etc.). A segunda etapa representa a segmentação e a descrição. A partir deste procedimento ocorre a divisão da imagem em blocos e a extração de características relevantes. Por fim, no processamento de alto nível, ocorre a interpretação dos dados. Todas as etapas apresentam uma relação direta com uma base de conhecimento [Gonzalez e Woods, 1992]. Um resumo das etapas é apresentado na Figura 2.3.

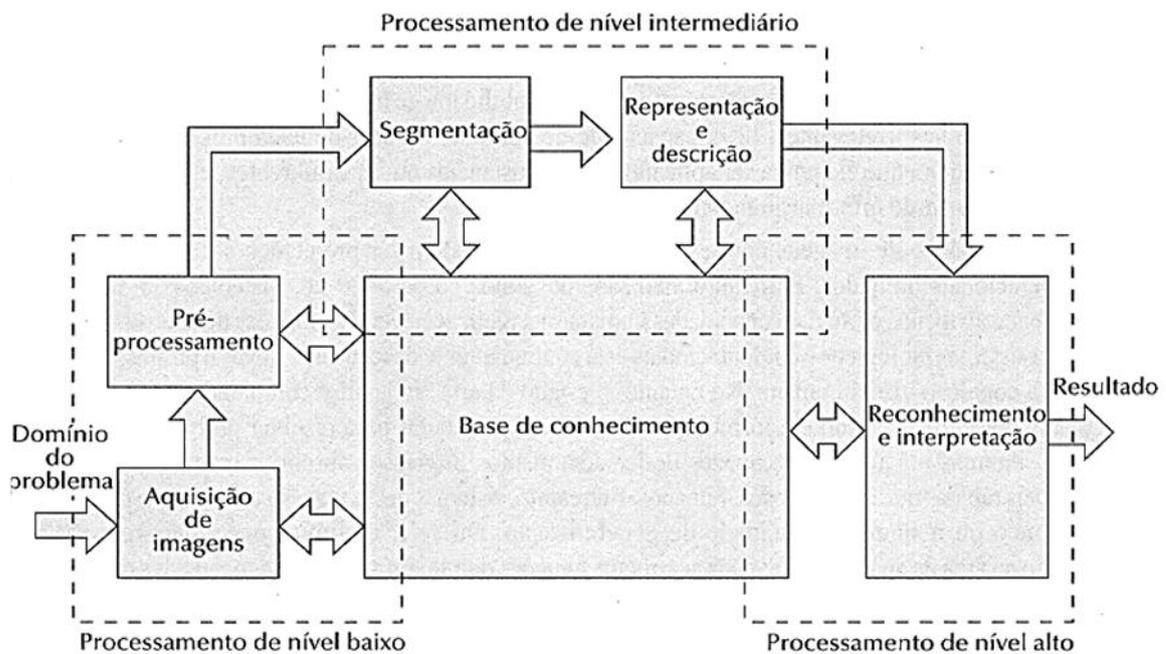


Figura 2.3 – Etapas de processamento digital de imagens [adaptado de Gonzalez e Woods, 1992].

### 2.2.1 Processamento de baixo nível

O processamento de baixo nível é aquele onde tanto a entrada, quanto a saída do processo são imagens. Essa etapa aborda tanto a aquisição da imagem, quanto o seu pré-processamento. No procedimento de aquisição da imagem, existem dois elementos relevantes que fazem parte de um sistema de visão computacional. O primeiro é referente aos equipamentos que compõem o ambiente (*hardware*), tais como câmeras, transmissores,

computadores e o sistema de iluminação. O segundo elemento consiste na rotina (*software*) que processa as imagens e gerencia as ações a serem utilizadas [Rudek et al, 2001].

As câmeras são consideradas como sendo o elemento básico presente na maioria das soluções de sistemas de visão. Seu funcionamento consiste na difração da luz refletida de um objeto nas lentes e incidência da mesma em uma matriz de sensores sensíveis a luminosidade. Estes sensores, que geralmente são CCD (*charge coupled device*) ou CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*), registram a intensidade de luz que chega naquele ponto (*pixel*) e, assim, formam a imagem do objeto. No mercado, existem diversos tipos de câmera, como câmeras analógicas, câmeras digitais, câmeras inteligentes, *WebCams* ou *PC-Cam*, câmeras *wireless* e câmeras especiais [Pavim et al, 2002].

Os principais parâmetros a serem considerados na seleção e ajuste de uma câmera são abertura de lentes ( $f/\#$ ), magnificação primária, limites focais, contraste e distorções [Stemmer et al, 2005]. A abertura de lentes ( $f/\#$  ou *f-number*) representa o controle de abertura da íris das lentes, proporcionando uma medida da quantidade de luminosidade que sensibiliza o sensor óptico. À medida que a íris se fecha,  $f/\#$  aumenta. Em conjunto com a íris, o obturador determina a exposição dos sensores à luz. Em câmeras de vídeo, esse controle é realizado de forma eletrônica, podendo ser automático ou manual [Batista, 2021].

A magnificação primária (*PMAG*) é uma grandeza adimensional que consiste na razão entre o tamanho do sensor (*SS*) e o campo de visão (*FOV*). A Equação 2.9 representa o quanto o objeto em estudo será aumentado ou diminuído conforme o tamanho da imagem projetada no sensor, e a Figura 2.4 ilustra a relação entre o tamanho do sensor e o campo de visão.

$$PMAG = \frac{SS}{FOV} \quad (2.9)$$

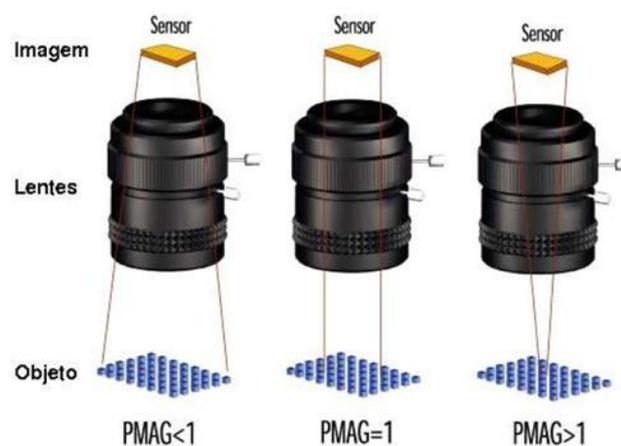


Figura 2.4 – Relação entre tamanho do sensor e campo de visão [adaptado de Stemmer et al., 2005].

O comprimento focal das lentes ( $f_{o,c}$ ) consiste em uma relação entre a distância máxima de trabalho do sistema ( $WD_{\max}$ ) e a magnificação primária. Ele representa a distância na qual o sistema óptico consegue focar nos objetos e pode ser calculado através da Equação 2.10.

$$f_{o,c} = \frac{WD_{\max} \cdot PMAG}{1 + PMAG} \quad (2.10)$$

O contraste é outro elemento fortemente influenciado pelas características da lente, da câmera e pelas condições de iluminação. É um fator que compara as diversas tonalidades de cinza (intensidade luminosa) da imagem adquirida auxiliando na identificação e diferenciação de objetos nas imagens. A Figura 2.5 mostra diferentes tonalidades de cinza, evidenciando o contraste entre elas. O contraste (C%) geralmente é definido de forma percentual. A Equação 2.11 apresenta o cálculo do contraste entre diferentes intensidades luminosas ( $I$ ).

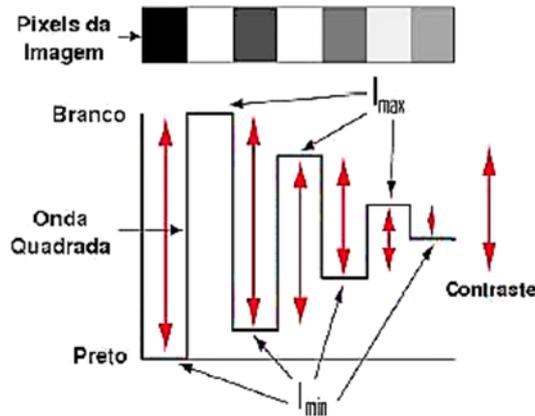


Figura 2.5 – Contraste entre diferentes tonalidades de cinza [adaptado de Stemmer et al., 2005].

$$C\% = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \cdot 100 \quad (2.11)$$

As distorções são também importantes fatores relacionados com as características da câmera. As principais características e métodos para sua correção de distorções foram abordados na **Seção 2.1**.

O sistema de iluminação também faz parte do sistema de aquisição de imagens. A iluminação, que pode ser natural ou artificial, é necessária para a sensibilização do sensor óptico e tem como objetivo a projeção de luz sobre algum objeto de estudo, já que, geralmente, este não emite luz própria [Jähne, et al., 1999]. Existem diversas técnicas de iluminação tais como a direcional, a multi-direcional, o anel, o campo escuro, a luz de fundo, a cúpula, a difusa, a “dia nublado”, a estruturada e a polarizada [Stemmer et al., 2005]. Como neste trabalho será considerado o desenvolvimento de uma rotina que identifique os pontos de interesse da cena sem a necessidade de um sistema de iluminação especial, o tema não será aprofundado.

O processamento de baixo nível também inclui o pré-processamento. Essa etapa tem como objetivo aprimorar a qualidade de uma imagem, corrigindo alguns fatores como iluminação, contraste, distorções e nitidez [Russ, 1998]. Neste trabalho, as principais técnicas de pré-processamento aplicadas são a determinação de uma região de interesse (ROI), a conversão de cores, a equalização do histograma e a aplicação de filtros para redução de ruídos.

A determinação de uma ROI (*Region Of Interest*) caracteriza-se pela extração de um segmento de uma imagem digital. Essa extração normalmente é realizada quando se deseja analisar apenas uma parte específica da imagem. Pode-se classificar a ROI em dois tipos: ROI normal e ROI virtual. A primeira, também conhecida como ROI primária ou ROI pai, corresponde a uma cópia da região da imagem original (nova imagem com dimensões da área selecionada) na qual é possível realizar operações sem afetar a imagem original. Já a ROI virtual, também conhecida como ROI secundária ou ROI filha, consiste em uma região em que operações realizadas sobre a mesma afetam a imagem original [Pavim et al, 2002].

A imagem obtida pela maioria das câmeras apresenta o padrão de cores RGB, sendo composta de *pixels* vermelhos, verdes e azuis. O padrão RGB opera com três planos de imagens independentes (um para cada cor), que, quando combinados, resultam em uma imagem colorida [Gonzalez e Woods, 1992]. Entretanto, para algumas aplicações, o processamento de imagens coloridas torna-se muito custoso devido ao tratamento de matrizes tridimensionais. Desta forma, o processamento adotado para simplificar a representação de uma imagem é a conversão para tons de cinza ou em representação binária.

Uma imagem em tons de cinza pode ser representada por uma matriz bidimensional com valores de 8 bits, sendo cada *pixel* representado pela sua intensidade luminosa em que “0” representa a ausência de cor (preto) e “255” representa o máximo de cor (branco). Além

desta etapa, também é útil a conversão das imagens para representação binária, como será visto no procedimento de nível intermediário.

Algumas etapas de pré-processamento estão diretamente relacionadas com a análise e manipulação de histogramas. Um histograma consiste em um gráfico de barras verticais que representam a frequência de uma determinada amostra [Freund, 2004], ou seja, a distribuição de frequência com que uma determinada intensidade de luminosidade aparece em uma imagem. A equalização é uma técnica de manipulação de histogramas que tem como finalidade redistribuir os valores dos níveis de cinza de uma imagem para obter um histograma mais uniforme. Isso permite aumentar o intervalo dinâmico de uma imagem, aumentando o contraste de imagens adquiridas sob condições de iluminação precárias [Gonzalez e Woods, 1992]. Um exemplo de imagem com histograma equalizado é apresentado na Figura 2.6.

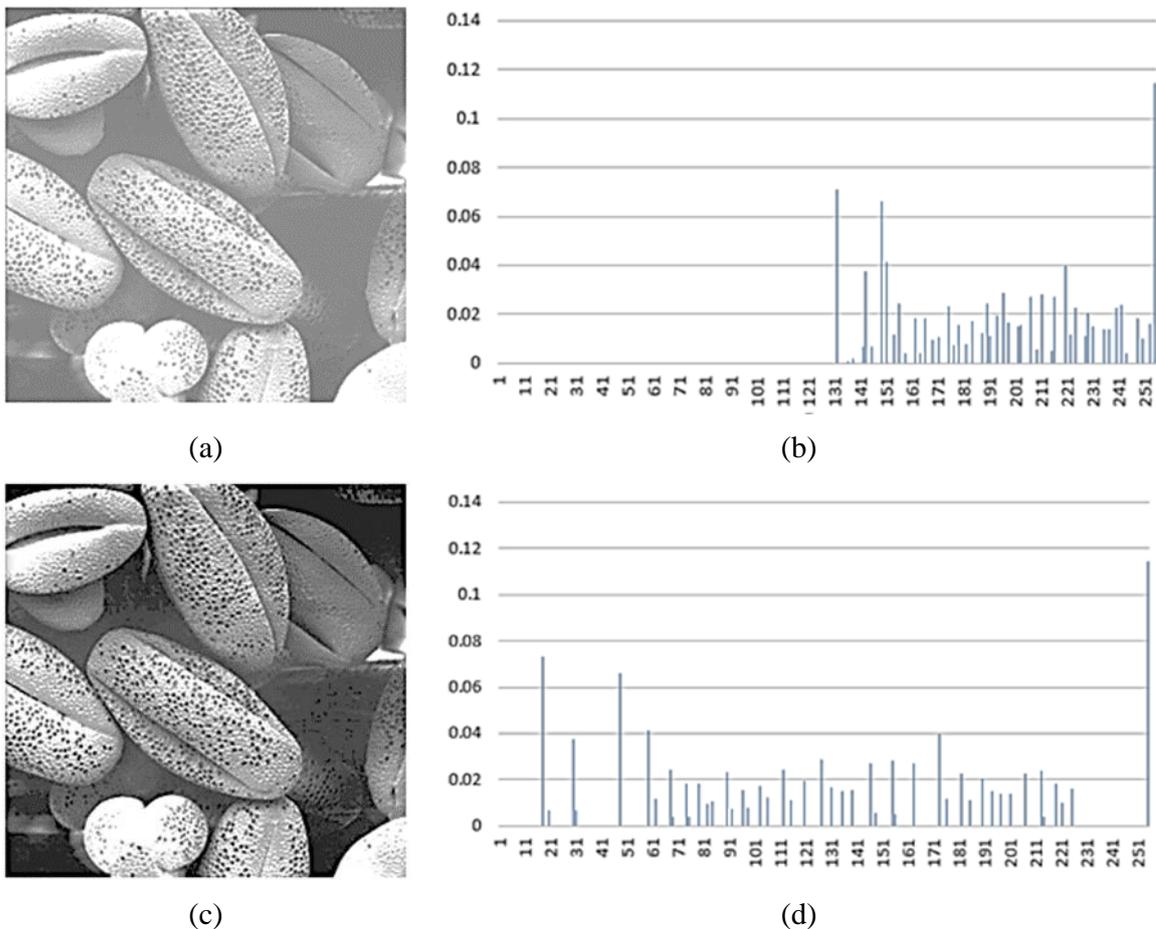


Figura 2.6 – (a) Imagem original; (b) Histograma da imagem original; (c) Imagem com histograma equalizado; (d) Histograma equalizado [adaptado de Gonzalez e Woods, 1992].

A filtragem é outro procedimento que também é aplicado no pré-processamento de imagens. Ela é necessária devido ao aparecimento de ruídos em imagens. Esses ruídos, provenientes principalmente das condições de iluminação, são prejudiciais nas etapas subsequentes, tais como a segmentação e detecção de características da imagem [Marques e Vieira, 1999]. Existem diversas técnicas de filtragem, dentre as quais se pode destacar o filtro Wiener, o qual será utilizado neste trabalho. O filtro de Wiener consiste em um filtro que minimiza o erro quadrático médio da diferença entre a imagem restaurada e a imagem original, considerando os efeitos dos ruídos [Lim, 1990]. Isso torna a imagem mais suave.

### 2.2.2 Processamento de nível intermediário

As operações de processamento de nível intermediário são realizadas após a aquisição e o pré-processamento da imagem. Nesta etapa, os itens de entrada consistem em imagens e as saídas, geralmente, correspondem a um conjunto de dados de interesse – que posteriormente servem de entrada para o reconhecimento e interpretação.

No processamento de nível intermediário estão incluídos os processos de segmentação e descrição [Gonzalez e Woods, 1992]. O primeiro consiste em métodos que subdividem uma imagem em suas partes constituintes. Através deste procedimento é realizado o agrupamento de partes com características em comum [Russ, 1998]. Entre os parâmetros de uma imagem utilizados para a segmentação destacam-se a intensidade luminosa, a tonalidade de cor, a textura, os contornos e o espectro de frequência [Pavim et al, 2002].

Uma das técnicas utilizadas na segmentação é a binarização da imagem. Assim como a imagem em tons de cinza, uma imagem binária também é representada por uma matriz bidimensional, porém com apenas dois valores: “1” (branco) e “0” (preto). Os valores de uma matriz binária são estabelecidos a partir da conversão de uma imagem em tons de cinza. No caso, cada *pixel* com intensidade luminosa abaixo de um limite (*threshold*) é definido como “0” (preto) e *pixels* com intensidade luminosa acima deste limite são definidos como “1” (branco). Esse *threshold* é definido a partir da análise do histograma de intensidade luminosa. Os picos no histograma geralmente identificam as diferentes regiões homogêneas e os limites podem então ser estabelecidos entre eles [Russ, 1998].

O processo de identificação das bordas presentes na imagem também faz parte da etapa de segmentação. Neste trabalho, este processo será realizado através da aplicação de filtros derivativos. Filtros derivativos correspondem principalmente a operadores de

diferenciação, como o gradiente e a magnitude do gradiente. Geralmente, esses filtros são utilizados para a detecção de pontos onde ocorre uma maior variação de intensidade entre os *pixels* [Gonzalez e Woods, 1992], sendo que, muitas vezes, esses pontos representam as fronteiras (bordas) dos elementos da imagem. Ao analisar a imagem de uma região escura sobre um fundo branco (Figura 2.7), observa-se que a borda (transição do escuro para o claro) é apresentada como uma rampa no gráfico de intensidade luminosa. Isso representa o fato de que bordas em imagens digitais são, em geral, levemente borradas, como resultado da captação [Grassi, 2005].

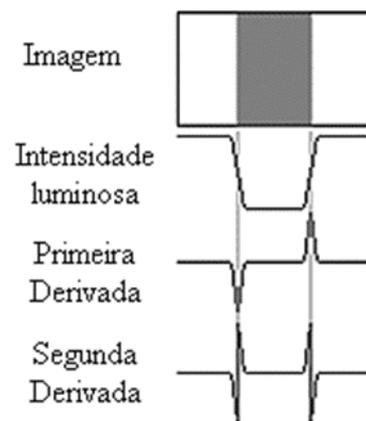


Figura 2.7 – Detecção de borda por operadores de derivação [adaptado de Grassi, 2005].

Observando a Figura 2.7 nota-se que a primeira derivada é nula em todas as regiões de intensidade constante e assume um valor constante durante uma transição de intensidade. Da mesma forma, a segunda derivada é zero em todos os locais exceto no início e no fim de uma transição de intensidade. Com base nisso, é evidente que a magnitude da primeira derivada (gradiente) pode ser utilizada para a detecção de bordas, enquanto a resposta da segunda derivada pode ser utilizada para determinar quando um *pixel* está do lado claro ou escuro da borda [Grassi, 2005]. As Equações (2.12) e (2.13) apresentam as expressões do gradiente  $\nabla f(x', y')$  e da magnitude do gradiente  $|\nabla f(x', y')|$ , respectivamente,

$$\nabla f(x', y') = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x', y')}{\partial x'} \\ \frac{\partial f(x', y')}{\partial y'} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$|\nabla f(x', y')| = \left[ \left( \frac{\partial f(x', y')}{\partial x'} \right)^2 + \left( \frac{\partial f(x', y')}{\partial y'} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

onde  $f(x', y')$  corresponde ao *pixel* nas coordenadas  $x'$  e  $y'$  da imagem.

A obtenção da magnitude do gradiente também pode ser realizada através da convolução bidimensional de uma máscara na imagem, como apresentado nas Equações (2.14) e (2.15),

$$f = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ p_4 & p_5 & p_6 \\ p_7 & p_8 & p_9 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$|\nabla f(x', y')| \approx [(f * h_1)^2 + (f * h_2)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

onde  $p_n$ , com  $\{n \in \mathbb{N} | 1 \leq n \leq 9\}$ , correspondem aos *pixels* de uma imagem e  $h_1$  e  $h_2$  representam máscaras.

Os operadores de Sobel (ou detector de bordas de Sobel) são exemplos de máscaras utilizadas para a obtenção de bordas. Os operadores de Sobel e a obtenção da magnitude do gradiente a partir da convolução das máscaras com a matriz apresentada na Equação 2.15 são apresentados nas Equações (2.16), (2.17) e (2.18).

$$h_1 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$h_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$|\nabla g(x', y')| \approx [((p_7 + 2p_8 + p_9) - (p_1 + 2p_2 + p_3))^2 + ((p_3 + 2p_6 + p_9) - (p_1 + 2p_4 + p_7))^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

Após a etapa de segmentação, é comum realizar as etapas de representação e descrição que consistem na identificação e armazenamento de características importantes da imagem denominadas descritores do objeto. Estes descritores são comumente representados por um conjunto de dados numéricos que permite estabelecer um banco de dados que armazena as características que identificam o objeto analisado [Gonzalez e Woods, 1992]. Com isso, a imagem é dividida em fronteiras ou regiões. Uma fronteira pode ser descrita pelo seu tamanho, orientação, número de concavidades etc. enquanto que as regiões podem ser caracterizadas pela sua cor, textura, área etc. Neste trabalho, os principais descritores do objeto que serão utilizados são: centroide, perímetro, área e equação de retas relacionadas à borda de um objeto na imagem.

A transformada de Hough é comumente utilizada para a identificação da equação das retas relacionadas à borda de um objeto de interesse na imagem. Essa transformada é aplicada sobre uma imagem binarizada e seu funcionamento consiste em mapear todos os pontos pertencentes a uma mesma reta na imagem em um único ponto de um novo espaço de parametrização (espaço de parâmetros) da curva procurada [Gonzalez e Woods, 1992]. Para uma nova parametrização, a transformada de Hough utiliza a relação presente na equação da reta, representada na Equação 2.19,

$$\rho = x' \cos \theta + y' \sin \theta \quad (2.19)$$

onde  $x'$  e  $y'$  são as coordenadas da imagem,  $\rho$  é a distância da reta até a origem e  $\theta$  representa o ângulo entre o eixo das abscissas e a normal à reta.

Na transformada de Hough, um ponto no espaço da imagem corresponde a uma função senoidal no espaço de parâmetros, e um ponto no espaço de parâmetros corresponde a uma reta no espaço da imagem. Além disto, pontos que pertencentes à mesma reta do espaço da imagem correspondem a curvas com o mesmo ponto em comum no espaço de parâmetros, e pontos que pertencem à mesma curva no espaço de parâmetros correspondem às retas que passam por um ponto no espaço da imagem. A Figura 2.8 ilustra a transformada de Hough.

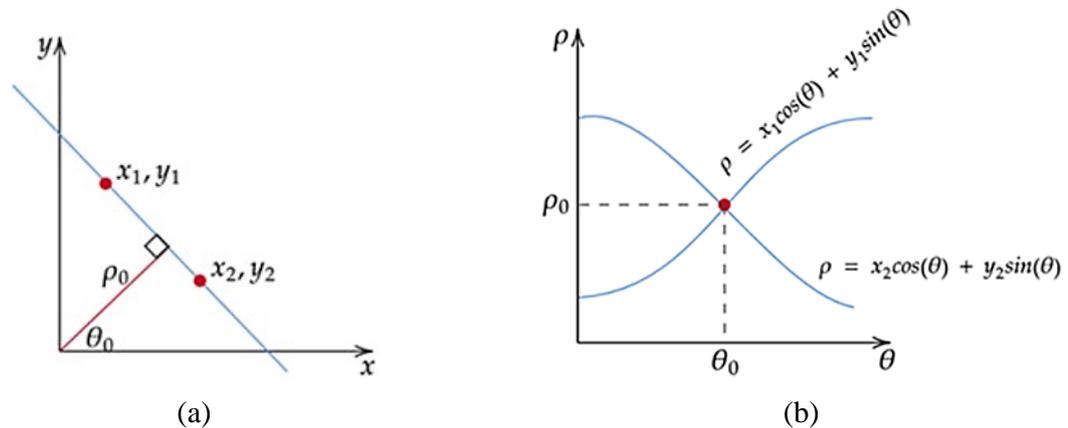


Figura 2.8 – Transformada de Hough: (a) espaço da imagem; (b) espaço de parâmetros.

### 2.2.3 Processamento de alto nível

Reconhecimento e interpretação são as operações que abrangem o processamento de alto nível (ou cognição inteligente). De acordo com Gonzalez e Woods, 1992, é nesta etapa que o sistema interpreta os dados obtidos nos processos descritos nas subseções anteriores e determina a ação que o sistema irá executar.

Diferente dos processamentos de baixo nível (**Subseção 2.2.1**) e nível intermediário (**Subseção 2.2.2**) os quais abrangem técnicas bem definidas de formulações teóricas, o conhecimento e a compreensão dos princípios fundamentais tornam-se menos precisos e especulativos no processamento de alto nível. Isso faz com que seja necessária uma formulação mais ampla de restrições e idealizações com a intenção de reduzir a complexidade da tarefa a um nível que permita que ela seja tratada por meio de ferramentas numéricas e analíticas.

## 2.3 Processo de Fresamento em Máquinas CNC

Groover, 2008, define usinagem como sendo um processo de fabricação no qual ocorre a remoção de material da peça bruta em formato de cavaco. Os processos de usinagem podem ser classificados como convencionais – processos que utilizam energia mecânica para a remoção de material da peça, principalmente através de cisalhamento entre a ferramenta e a peça – e não convencionais – processos que utilizam outro tipo de energia como a cinética, a termoquímica e a termoeletrica. Dentre os diversos processos convencionais de usinagem, será abordado neste trabalho o fresamento.

O processo de fresamento consiste em operações de corte que utilizam uma ferramenta multicortante, chamada fresa, constituída de arestas cortantes dispostas simetricamente ao redor de um eixo. Essa ferramenta apresenta um movimento de rotação ao redor do seu eixo, permitindo que cada uma das arestas de corte retire independentemente parte do material em usinagem. O movimento de avanço é, geralmente, realizado pela própria peça de trabalho fixada na mesa da máquina [Ferraresi et al., 1974]. Em outras palavras, o fresamento é o processo de usinagem que envolve a remoção de material com espessura de corte instantaneamente variável, em corte interrompido, gerado pela combinação entre avanço da mesa, ou do eixo ferramenta, e o movimento rotativo da ferramenta multicortante com geometria definida [Dib, 2013].

O fresamento pode ser tangencial (Figura 2.9a e Figura 2.9b) ou frontal (Figura 2.9c e Figura 2.9d), e o corte pode ser concordante ou discordante. O fresamento tangencial realiza grande parte da usinagem na face cilíndrica da ferramenta ( $a_p > a_e$ ), enquanto o fresamento frontal age no topo da ferramenta ( $a_e > a_p$ ), onde  $a_e$  é a penetração de trabalho e  $a_p$  é a profundidade de usinagem. O corte concordante ocorre quando o sentido do movimento de avanço da peça tem o mesmo sentido do movimento de rotação da fresa, enquanto no corte discordante, o sentido é contrário [Diniz et al., 2009].

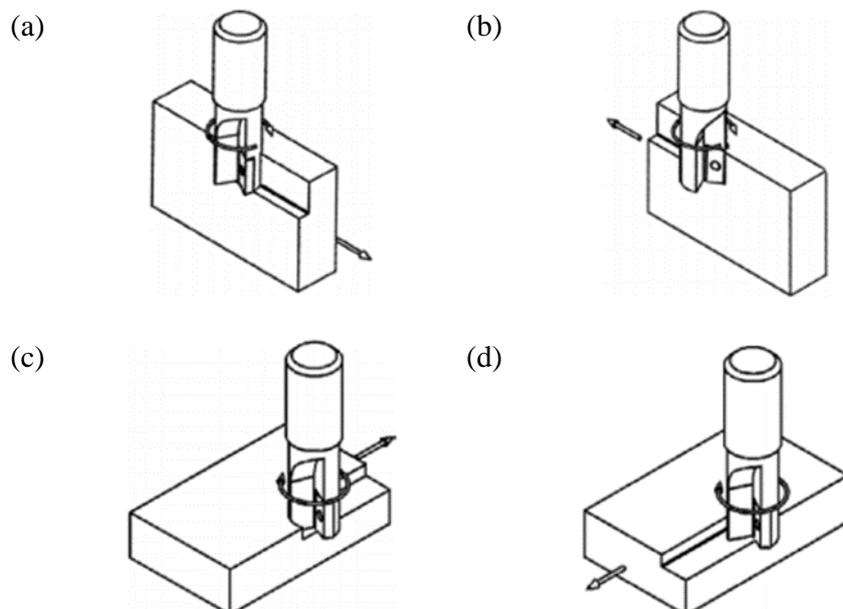


Figura 2.9 – Fresamento: (a) tangencial concordante; (b) tangencial discordante; (c) frontal concordante; (d) frontal discordante [Dib, 2013].

O fresamento frontal ainda pode ser dividido em três tipos: fresamento em cheio, fresamento parcial e fresamento de face [Dib, 2013], como mostra a Figura 2.10.

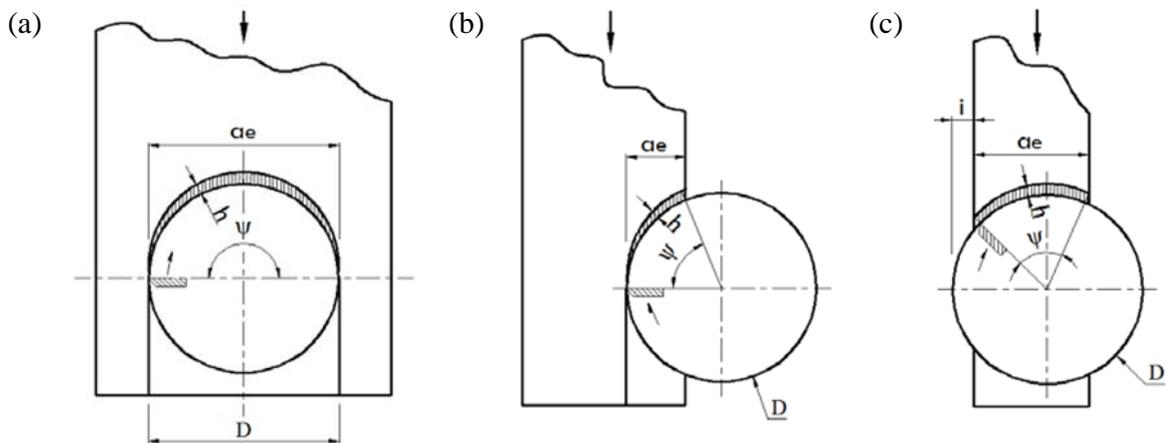


Figura 2.10 – Fresamento (a) em cheio, (b) parcial, (c) de face [Dib, 2013].

O processo de fresamento foi o primeiro a ser automatizado utilizando comando numérico computadorizado (CNC). O CNC é um método de controle dos movimentos de máquinas pela interpretação direta de um conjunto de instruções. Máquinas CNC são equipadas com seu próprio processador dedicado [Kalpakjan e Schmid, 2001]. Dentre as principais vantagens da utilização de máquinas CNC quando comparadas com máquinas convencionais, destacam-se a flexibilidade de operação, a precisão dimensional, a repetitividade e a produtividade. Já as desvantagens estão associadas com o maior custo inicial, o tempo de programação e o custo de manutenção.

Em uma máquina CNC, cada eixo de movimento é equipado com um dispositivo de acionamento, a fim de substituir o volante da máquina-ferramenta convencional. Um eixo de movimento é definido como um eixo no qual ocorre o movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho. Os eixos primários de movimento são os eixos ortogonais  $x$ ,  $y$ ,  $z$  que formam o sistema de coordenadas da máquina [Joshi, 2021]. A Figura 2.11 apresenta um exemplo do sistema de referências da máquina.

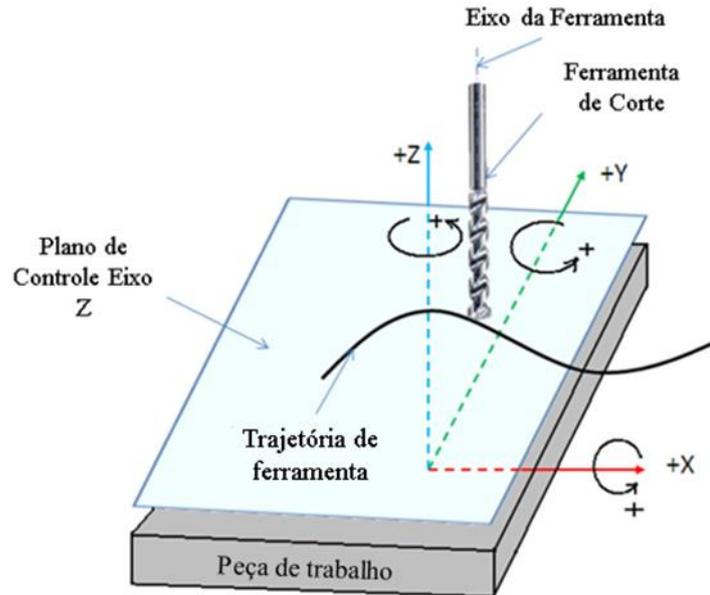


Figura 2.11 – Eixos de movimento em máquina CNC [adaptado de Joshi, 2021].

Os programas desenvolvidos para usinagem são geralmente preparados remotamente em sistemas integrados de projeto (CAD) e fabricação (CAM, CAPP), onde é possível simular o programa de comando numérico (CN) para verificar eventuais problemas que poderiam ocorrer durante o processo real de usinagem. Através da utilização dos sistemas CAD/CAM, são realizadas as seguintes etapas para obter um programa CN [Marcicano, 2021]:

1. Preparação das superfícies a serem usinadas.
2. Seleção dos parâmetros e variáveis de processo (tolerância, sobremetal, ferramentas, parâmetros de corte etc.).
3. Geração automática das trajetórias das ferramentas.
4. Pós-processamento dos programas, adequando ao formato do CN específico.

Existem quatro termos básicos que definem um programa CN: caractere, palavra, bloco e programa. Caractere consiste na menor unidade do programa CN; ele pode ser representado por um dígito, uma letra ou um símbolo. Palavra é a combinação de caracteres alfanuméricos que serve como instruções na máquina CNC como, por exemplo, posições dos eixos, velocidade de avanço, comandos preparatórios e funções diversas; cada palavra é constituída de uma letra seguida de um numeral. Bloco é um agrupamento de palavras, ou seja, o conjunto de comandos sequenciados de forma lógica. Programa é formado por

múltiplas linhas de comandos, que serão executados pela unidade de controle da máquina (MCU).

Os principais comandos utilizados em um programa de comando numérico (CN) são os comandos do tipo G e M. Os comandos G são utilizados para predefinições ou preparação do sistema de controle para uma condição desejada ou estado de operação. Por exemplo, o comando G01 é utilizado como predefinição de interpolação linear com avanço controlado. Os comandos M especificam funções diversas da máquina-ferramenta com a finalidade de instruí-la para tarefas como rotação do fuso (ligar horário ou anti-horário e desligar), troca automática de ferramenta, refrigeração (ligar e desligar), final de programa, chamar sub-rotina dentre outras [Joshi, 2021]. O conjunto de comandos G e M estão apresentados no **Anexo A**.

### **2.3.1 Qualidade do produto final**

De acordo com Weck, 2001, a qualidade de uma máquina-ferramenta está diretamente associada com os sistemas que a compõem, ao uso a que se destina, aos esforços mecânicos e térmicos que é submetida, a forma como essa afeta o meio ambiente e as precisões e acabamentos estipulados para a peça. A Figura 2.12 apresenta algumas das relações que definem a qualidade de uma máquina ferramenta. Quando a finalidade é processar componentes com qualidade, ou seja, com exatidão dimensional, geométrica e acabamento usinado, outros fatores passam a ser considerados. Dentre esses fatores, tem-se material e geometria de ferramenta, fixação da peça e desgaste de ferramenta. A Figura 2.13 apresenta algumas relações que influenciam na qualidade da peça.

O reconhecimento da meta final do processo é a primeira etapa nas decisões de compras de máquinas, equipamentos e ferramentas com excelente custo/benefício. Se a meta é fabricar uma peça de excelente qualidade e tolerância muito apertada, será necessário um sistema máquina/ ferramenta/ dispositivo de fixação/ peça (MFDP) com custo mais elevado para usiná-la. Por outro lado, quando as exigências de qualidade são menos rigorosas, uma parte dos recursos do sistema MFDP será desperdiçada. Além disso, as empresas devem estar cientes de que é necessário obter apenas a qualidade da peça que atenda às especificações do cliente e aos requisitos funcionais. Por exemplo, se a tolerância de uma peça for 5  $\mu\text{m}$ , obter 3  $\mu\text{m}$  será perda de tempo e dinheiro, pois os clientes se recusarão a pagar pela melhor qualidade não solicitada. Portanto, para maximizar a economia, o fabricante deve ajustar a qualidade da produção aos requisitos funcionais e de qualidade da peça [Vos, 2017].

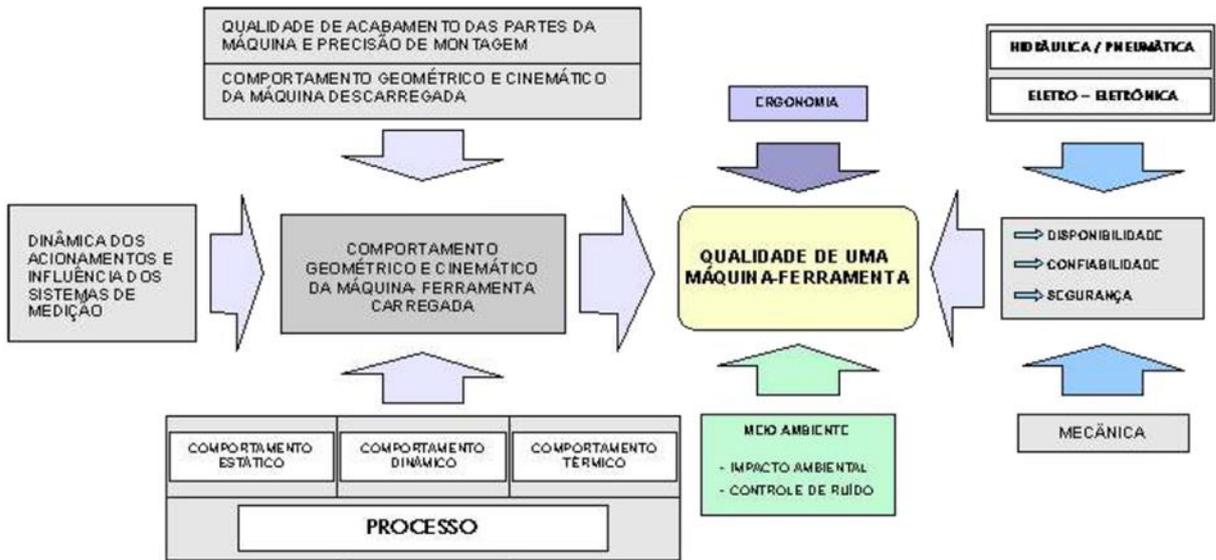


Figura 2.12 – Relações que afetam a qualidade da máquina-ferramenta [adaptado de Weck, 2001].

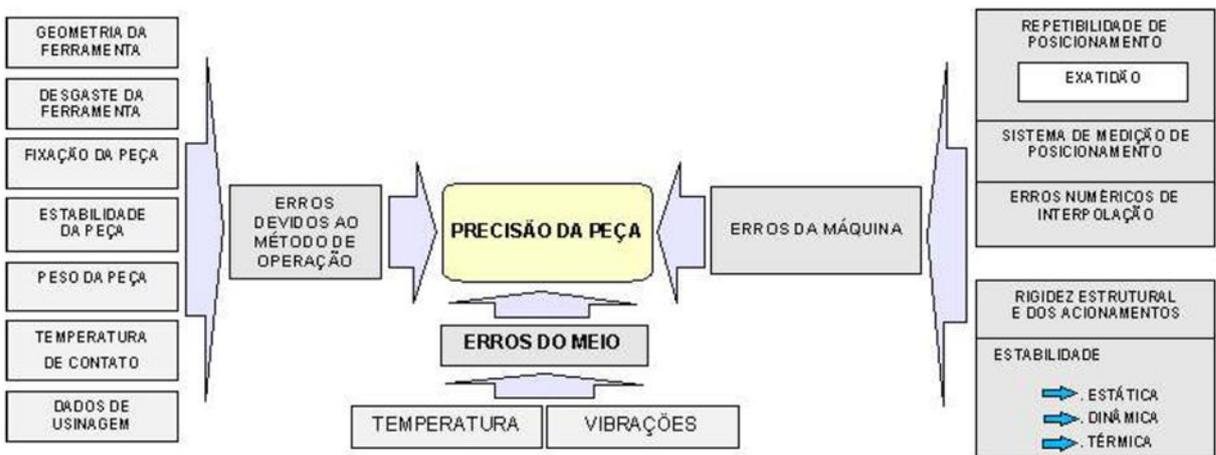


Figura 2.13 – Fatores que influenciam na qualidade da peça usinada [adaptado de Weck, 2001].

### 3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Objetiva-se o desenvolvimento de um sistema de visão computacional capaz de realizar o referenciamento de um centro de usinagem CNC independentemente da posição e orientação da peça de trabalho. Para tanto, o mesmo foi dividido em sete etapas: escolha e ajustes do sistema de aquisição de imagens (**Seção 3.1**), determinação dos parâmetros intrínsecos (**Seção 3.2**) e extrínsecos (**Seção 3.3**) da câmera, identificação do sistema de coordenadas da máquina (**Seção 3.4**) e da peça de trabalho (**Seção 3.1**) na imagem, mudança do sistema de coordenadas da peça para o sistema de coordenadas da máquina (**Seção 3.2**) e correção da trajetória de ferramenta, em linguagem ISO6983, para posterior usinagem da peça (**Seção 3.3**).

A implementação das rotinas de processamento digital de imagens foi desenvolvida no software MATLAB 2020. Este ambiente foi escolhido devido ao seu grande conjunto de funções relacionadas ao processamento de imagens e manipulações com sistemas matriciais. O algoritmo que modela em alto nível a execução das etapas desenvolvidas e identifica as entradas, saídas e rotinas associadas é apresentado no fluxograma da Figura 3.1.

#### 3.1 Sistema de Aquisição de Imagens

Como citado na **Subseção 2.2.1**, as etapas de aquisição de imagens e pré-processamento fazem parte do processamento de baixo nível. O sistema de aquisição consiste em equipamentos que compõem o ambiente (câmeras, transmissores, computadores e sistemas de iluminação) e em rotinas que realizam a captura das imagens e ajustes via *software*.

A câmera *Microsoft LifeCam Cinema* (Figura 3.2) foi utilizada no estudo. Esta é uma câmera de baixo custo do tipo *WebCam* que possui uma taxa de transferência de vídeo de até 30 quadros por segundo e uma resolução máxima de  $1280 \times 720$  *pixels*. Para a aquisição de imagens, não é necessária a utilização de uma placa de aquisição dedicada e sua comunicação com o computador é realizada através de barramento USB 2.0.

Neste trabalho, um sistema de iluminação especial não foi desenvolvido para a aquisição das imagens. As correções de ambiente (brilho, contraste, sombras e ruídos) foram realizadas via *software*.

A rotina desenvolvida para a aquisição, *Acquisition.m*, apresenta duas funções básicas: ajustes da câmera e captura de imagens. A Figura 3.3 ilustra o modelo que representa a rotina.

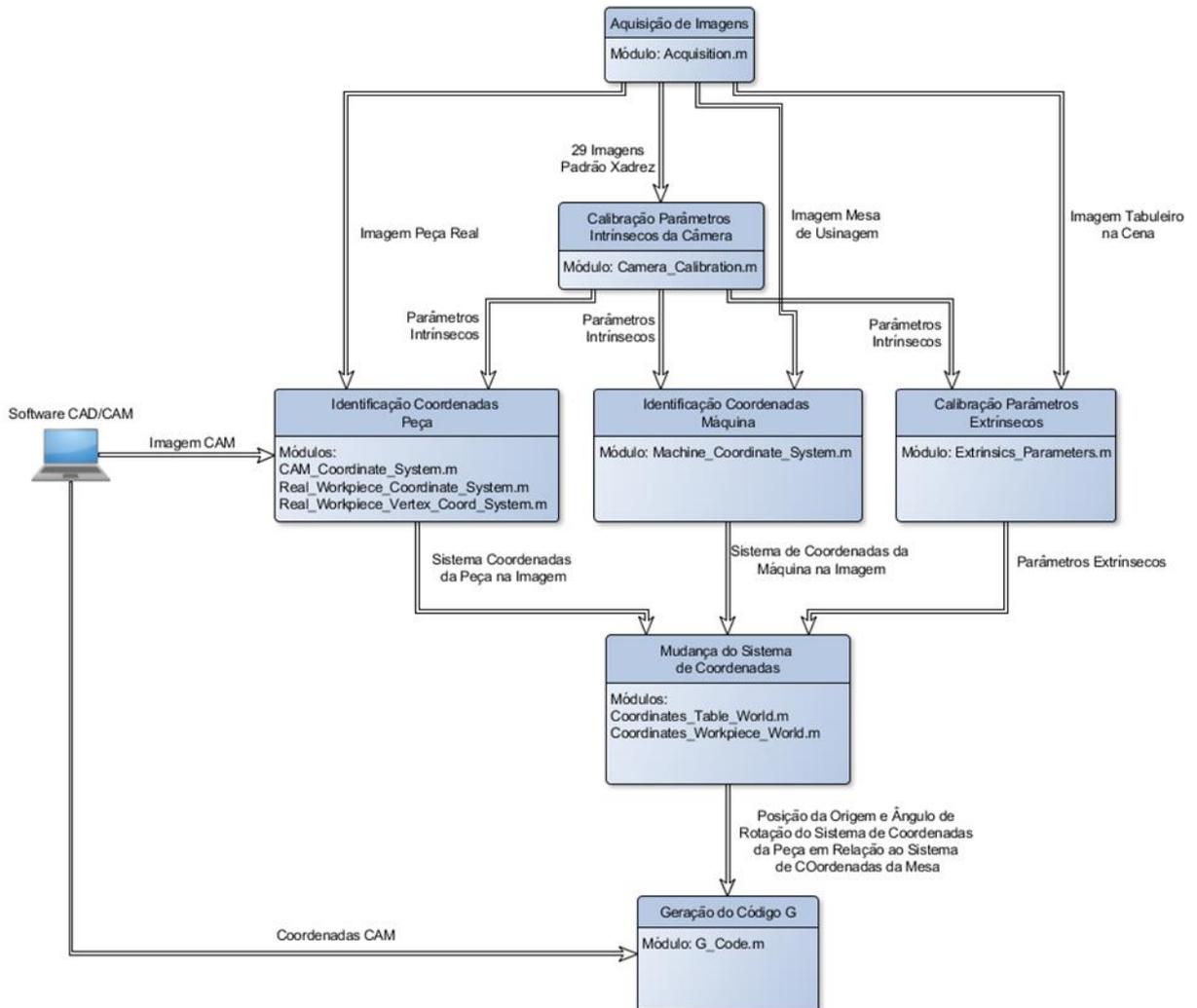


Figura 3.1 – Fluxograma do sistema desenvolvido.

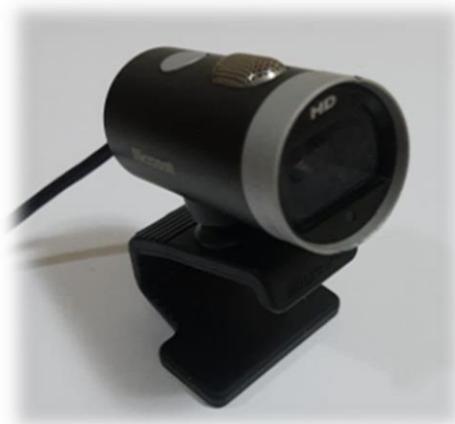
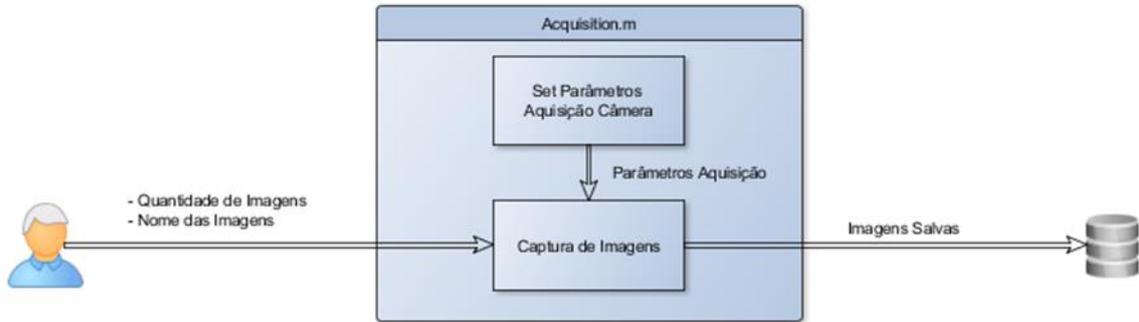


Figura 3.2 – Câmera *Microsoft LifeCam Cinema*.Figura 3.3 – Modelo rotina *Acquisition.m*.

A função ajuste tem como objetivo definir alguns parâmetros da câmera tais como brilho, contraste, exposição e ajuste de foco. Os valores dos parâmetros definidos são apresentados na Tabela 3.1. A maioria dos parâmetros de câmera podem ser ajustados automaticamente pela própria câmera, porém é preciso que o foco seja ajustado manualmente, ou pelo menos mantido fixo. Isso é necessário para manter a calibração. Os valores de exposição e foco foram definidos a partir de dados empíricos.

Tabela 3.1 – Parâmetros da câmera ajustados via software.

Parâmetro	Descrição	Valor
Brilho	Indica o nível de brilho que se ajusta de acordo com a quantidade de iluminação da imagem.	Ajuste Automático
Contraste	Indica o nível de contraste que se ajusta à diferença entre as áreas mais brilhantes e mais escuras da imagem	Ajuste Automático
Exposição	Especifica o valor de exposição para ajustar os detalhes de realce e sombra da imagem.	-5 [adimensional]
Focus	Define a distância focal	0 mm

A função “captura” recebe como entrada o número de imagens a serem captadas e o nome das mesmas. Em seguida, acessa o *hardware* da câmera (configurando os parâmetros nos níveis escolhidos), realiza a coleta e retorna as imagens salvas em uma pasta definida pelo usuário.

### 3.2 Calibração dos Parâmetros Intrínsecos da Câmera

O procedimento de calibração visa corrigir possíveis distorções provenientes de características da câmera. Este pode ser entendido como a determinação das características geométricas e ópticas internas da câmera (parâmetros intrínsecos), bem como sua orientação e posição em relação a um sistema de coordenadas definido (parâmetros extrínsecos). A rotina desenvolvida que contém o processo de calibração dos parâmetros intrínsecos é a *Camera\_Calibration.m* apresentada na Figura 3.4.

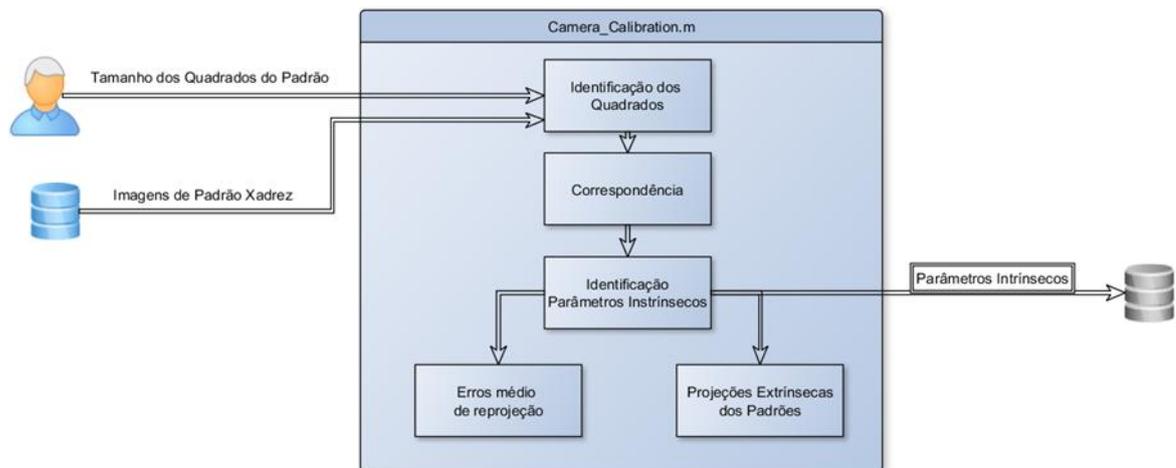


Figura 3.4 – Modelo rotina *Camera\_Calibration.m*.

Como o processo para a determinação dos parâmetros intrínsecos neste trabalho segue o método proposto por Zhang, 2000, múltiplas imagens de um padrão de calibração (padrão xadrez) em diferentes posições foram utilizadas (Figura 3.5).

Após a aquisição das imagens de calibração, foi realizado o procedimento de correspondência, o qual consiste na determinação da relação entre os pontos do padrão e suas respectivas projeções nas imagens. Sabendo-se que os quadrados do padrão xadrez apresentam 20 mm de lado, é possível determinar pares de pontos correspondentes entre o padrão e a imagem. A especificação dos pontos pode ser feita de forma manual (o usuário escolhe os pontos que serão utilizados pela calibração), automática (o método de correspondência identifica automaticamente os pontos utilizando técnicas de processamento de imagens) e semiautomática (o usuário seleciona alguns pontos e o método faz uma interpolação para obter os demais pontos). O método de detecção automática foi o utilizado neste trabalho. Após a aquisição e a correspondência foi aplicado o método demonstrado por

Zhang, 2000, para a obtenção dos parâmetros intrínsecos e dos coeficientes de distorção radial da câmera *Microsoft LifeCam Cinema*. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.2.

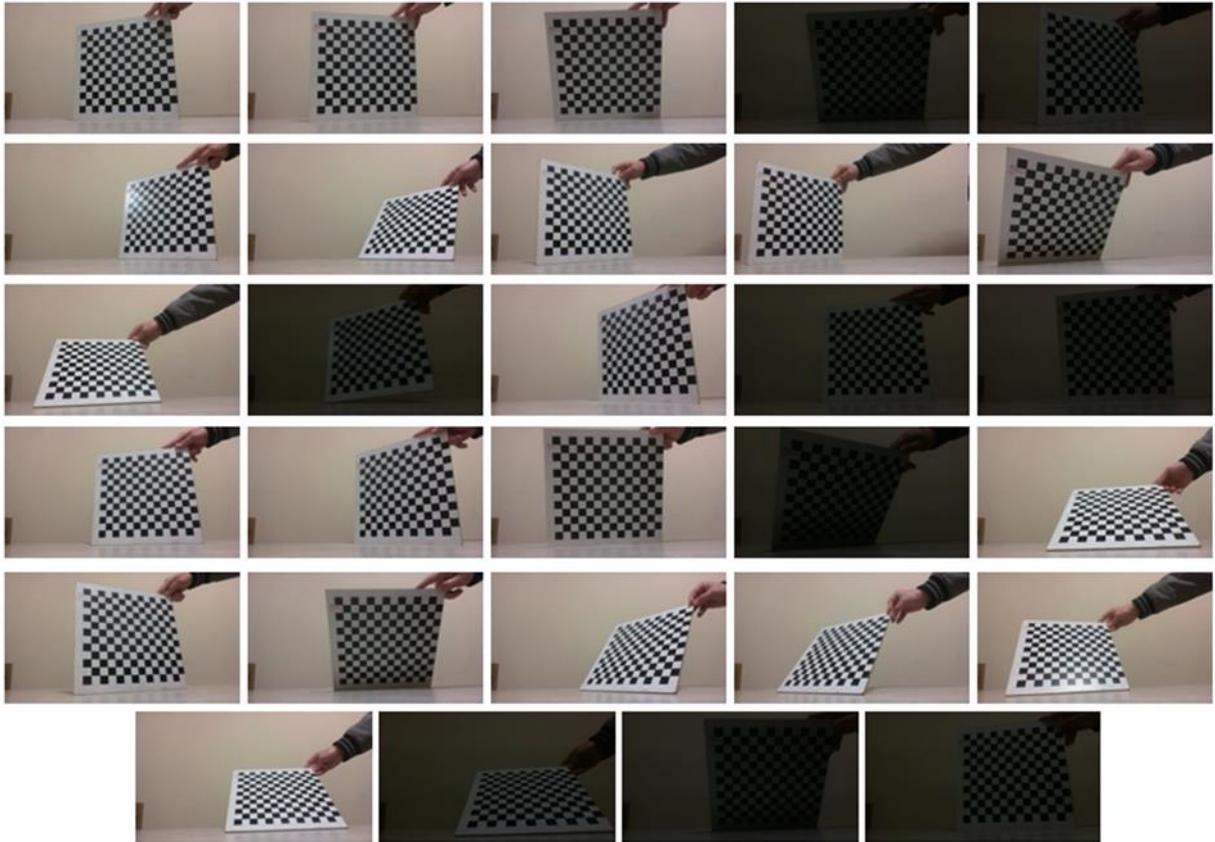


Figura 3.5 – Imagens do padrão xadrez utilizado para identificação dos parâmetros intrínsecos.

Tabela 3.2 – Parâmetros intrínsecos da câmera *Microsoft LifeCam Cinema*.

Parâmetro	Valor
Coeficiente de Distorção Radial $k_1$	0,0096
Coeficiente de Distorção Radial $k_2$	-0,0270
Coeficiente de Distorção Radial $k_3$	0,0542
$f_0 \cdot s_x$	986,7531 pixels
$f_0 \cdot s_y$	988,4432 pixels
$\tau$	0
$C_x$	652,1702 pixels
$C_y$	358,4681 pixels

Além da determinação dos parâmetros é realizada também a estimativa do erro de precisão da calibração através do gráfico de barras (Figura 3.6), bem como a projeção extrínseca dos padrões xadrez (Figura 3.7).

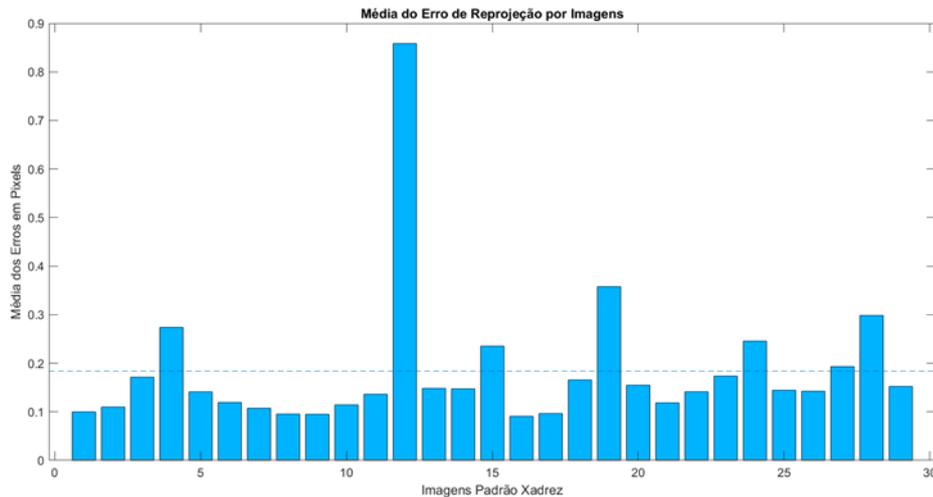


Figura 3.6 – Média do erro de reprojção por imagens.

Analisando o gráfico da Figura 3.6, percebe-se que uma das imagens do padrão xadrez apresenta um erro de reprojção discrepante em relação às demais. Entretanto, como esse erro não ultrapassa o valor de um pixel, a imagem não foi descartada na calibração.

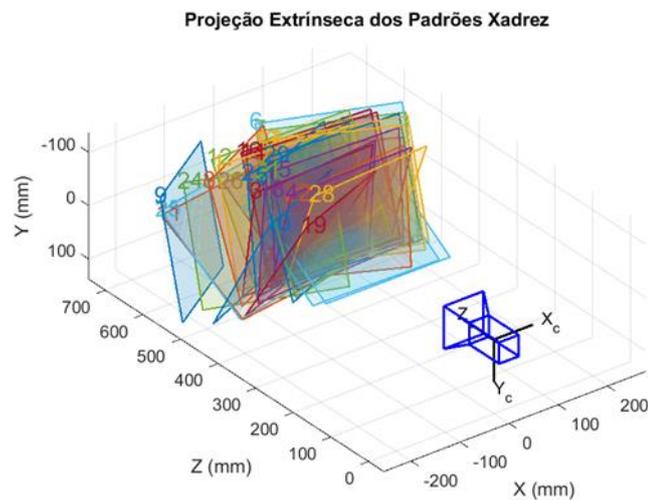


Figura 3.7 – Projeção extrínseca dos padrões xadrez.

A identificação dos parâmetros intrínsecos da câmera é realizada apenas uma vez durante todo o trabalho. Estes parâmetros não se alteram com a posição da câmera.

O código de calibração intrínseca da câmera presente na rotina *Camera\_Calibration.m* recebe como entrada o número de imagens de padrão xadrez, o tamanho de cada quadrado do padrão de calibração e o diretório das imagens. A partir disso, a rotina realiza a identificação dos cantos dos quadrados automaticamente, a correspondência de suas medidas na imagem  $\times$  medidas reais, e retorna os valores dos parâmetros intrínsecos, do erro e das projeções.

### 3.3 Calibração dos Parâmetros Extrínsecos da Câmera

A identificação dos parâmetros extrínsecos é a etapa onde é definida a posição e orientação da câmera em relação ao plano de trabalho, ou seja, é definida a matriz de rotação  $R$  e translação  $T$  do sistema de coordenadas da câmera em relação ao sistema de coordenadas da imagem. A determinação dos parâmetros extrínsecos inicia-se com o posicionamento da câmera, o qual deve ser realizado de forma que a câmera não seja movimentada nas etapas seguintes (etapas de reconhecimento do sistema de coordenadas da máquina-ferramenta e da peça de trabalho). No caso, adotou-se o posicionamento de câmera perpendicular ao plano da mesa da máquina e à peça.

Após o posicionamento da câmera é necessária a captura de uma imagem de um padrão xadrez no plano de trabalho. A partir desta imagem, e da informação do comprimento das arestas dos quadrados do padrão, aplicou-se novamente o método de Zhang, 2000, para obter os parâmetros extrínsecos da câmera.

A rotina desenvolvida que contém o processo de calibração dos parâmetros extrínsecos é a *Extrinsics\_Parameters.m*. O modelo que representa a rotina é apresentado na Figura 3.8.

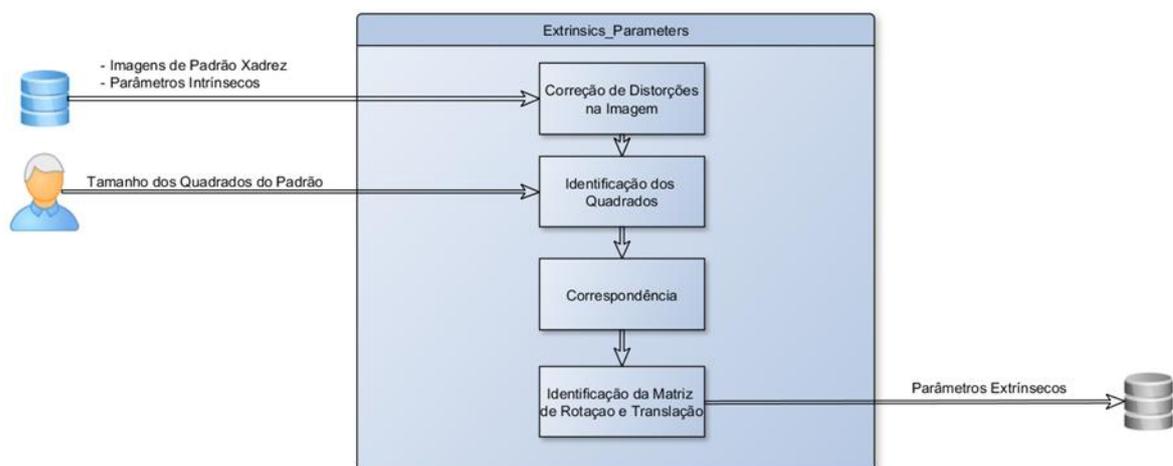


Figura 3.8 – Modelo rotina *Extrinsics\_Parameters.m*.

Essa rotina utiliza como dados de entrada os parâmetros intrínsecos (obtidos na etapa anterior), a imagem de um padrão xadrez perpendicular à câmera e as dimensões dos quadrados do padrão xadrez utilizado. A partir dos parâmetros intrínsecos, foram realizadas as correções de distorções nas imagens dos padrões sendo então identificados os cantos dos quadrados (semelhante à etapa de calibração intrínseca) e aplicadas as equações do método de Zhang, 2000, para a determinação das matrizes de rotação e translação.

A Figura 3.9 ilustra um exemplo de aplicação, em que uma imagem do padrão é corrigida, as intersecções dos quadrados são identificadas e o sistema de coordenadas da imagem é definido. As matrizes de rotação  $R$  e translação  $T$ , que relacionam o sistema de coordenadas do padrão xadrez (imagem) com o sistema de coordenadas da câmera para o exemplo citado são apresentadas nas Equações (3.1) e (3.2).



Figura 3.9 – Exemplo de identificação do sistema de coordenadas da imagem.

$$R = \begin{bmatrix} 0,9908 & -0,1214 & -0,0601 \\ 0,1219 & 0,9925 & 0,0049 \\ 0,0591 & -0,0122 & 0,9982 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$T = \begin{bmatrix} -106,9597 \\ -54,4836 \\ 214,6771 \end{bmatrix} [\text{mm}] \quad (3.2)$$

### 3.4 Identificação do Sistema de Coordenadas da Máquina na Imagem

Após a obtenção dos parâmetros extrínsecos é realizada a identificação do sistema de coordenadas da máquina na imagem. Este processo foi desenvolvido na rotina *Machine\_Coordinate\_System.m*, cujo modelo é representado pela Figura 3.10. Essa rotina, que apresenta como entrada os parâmetros intrínsecos e uma imagem da mesa do centro de usinagem, realiza os seguintes procedimentos: correção das distorções da imagem, obtenção da região de interesse (ROI), equalização do histograma, remoção dos ruídos, identificação das bordas, dilatação da borda e identificação das coordenadas da máquina na imagem. O resultado deste último corresponde à saída do processo.

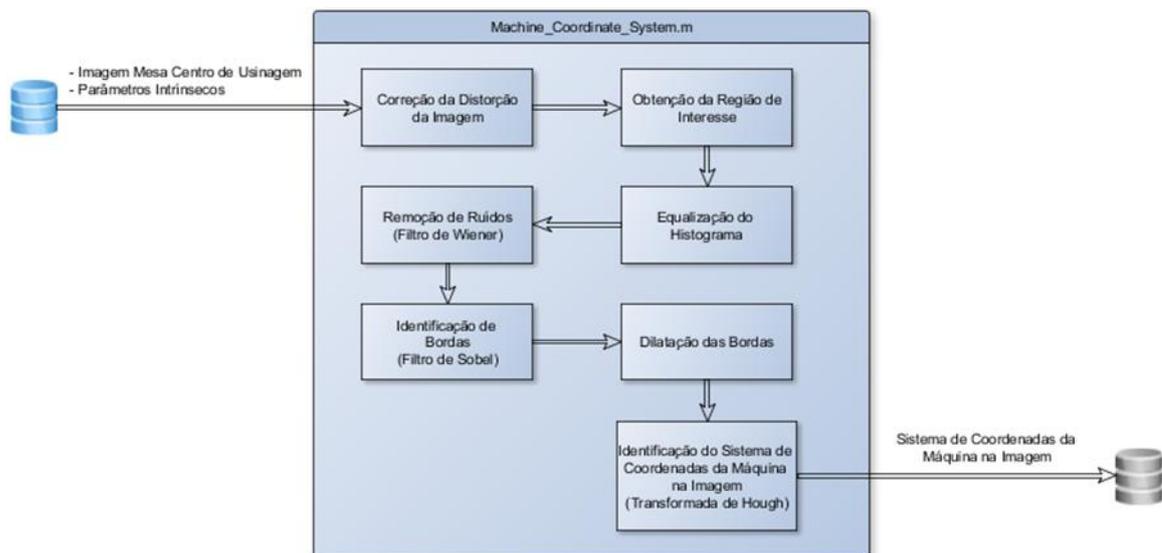


Figura 3.10 – Modelo rotina *Machine\_Coordinate\_System.m*.

Assim como na etapa anterior, o primeiro procedimento nessa rotina é a correção das distorções da imagem utilizando os parâmetros intrínsecos (Figura 3.11). A partir da imagem corrigida, deve-se selecionar uma região de interesse na imagem para a detecção das arestas que irão definir o sistema de coordenadas da mesa. O corte da imagem na região de interesse

é apresentado na Figura 3.12. No programa computacional desenvolvido, este corte pode ser realizado tanto de forma manual (o operador seleciona a região na imagem) quanto automática (uma mesma região da imagem é sempre selecionada).



Figura 3.11 – Imagem da mesa do centro de usinagem com distorções corrigidas.



Figura 3.12 – Região de interesse da imagem (ROI).

Após a seleção da região de interesse, algumas técnicas de pré-processamento são aplicadas, como a conversão de cores do RGB para tons de cinza, equalização do histograma e a remoção de ruídos. Como citado da **Subseção 2.2.1**, a equalização do histograma visa redistribuir os valores dos níveis de cinza de uma imagem para obter um histograma mais uniforme. Isso faz com que o intervalo dinâmico de uma imagem aumente, ou seja, aumenta o contraste de imagens adquiridas sob condições de iluminação precárias. A Figura 3.13

apresenta a diferença entre as imagens antes e depois da equalização, bem como os seus histogramas.

O filtro utilizado para a remoção de ruídos é o filtro de Wiener, pois ele se adapta à variação da imagem local, realizando maior suavização em regiões com menor variação. Essa abordagem geralmente produz resultados melhores do que a filtragem linear.

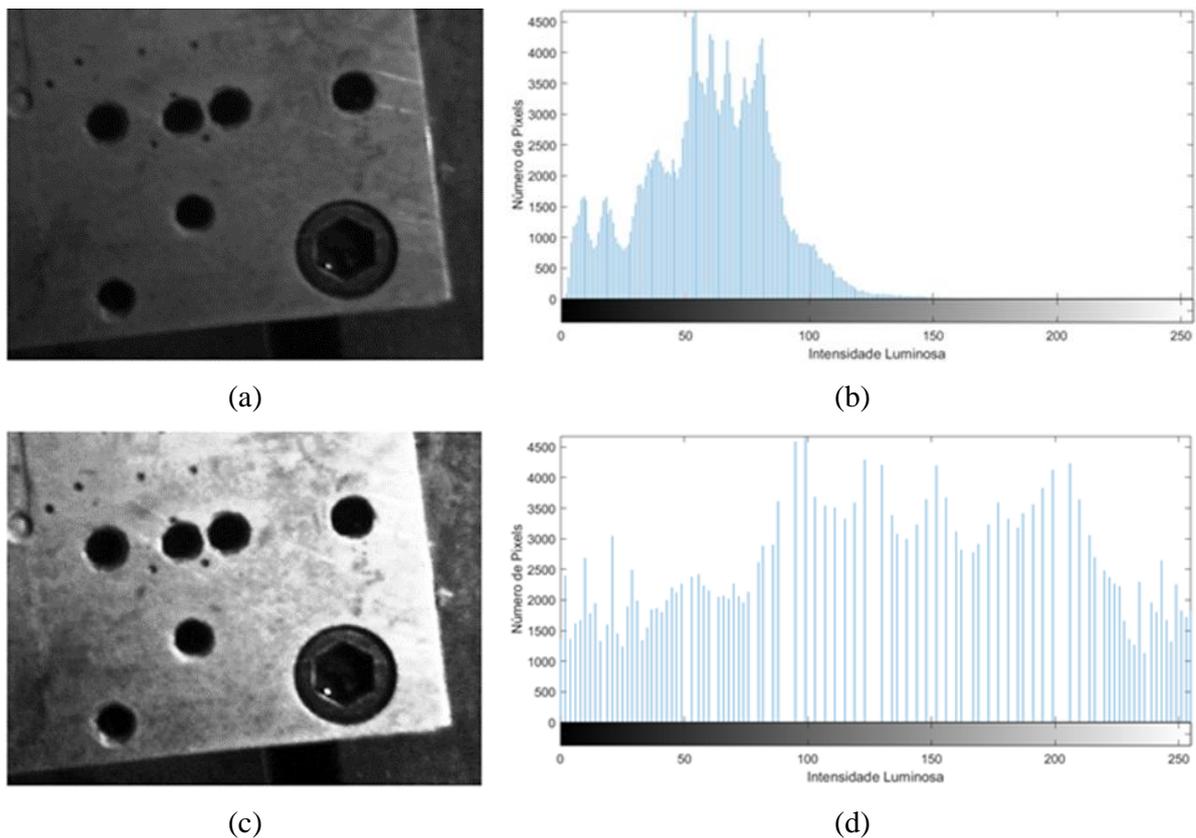


Figura 3.13 – (a) Imagem em tons de cinza; (b) Histograma da imagem a; (c) Imagem com histograma equalizado; (d) Histograma equalizado.

O filtro adaptativo é mais seletivo do que um filtro linear comparável, preservando as bordas e outras partes de alta frequência da imagem. De maneira geral, o filtro de Wiener funciona melhor quando o ruído é um ruído aditivo de potência constante (branco), como o ruído gaussiano. A aplicação do filtro facilita as etapas seguintes, como a identificação das bordas da imagem. A Figura 3.14 mostra a imagem da mesa de usinagem após a aplicação do filtro de Wiener.

Conforme citado na **Seção 2.2**, a etapa realizada após o pré-processamento é a segmentação na qual a imagem é dividida em elementos de interesse. Para a identificação do

sistema de coordenadas da mesa de usinagem, é preciso reconhecer a borda da mesma. Dessa forma, a segmentação estará direcionada para as fronteiras.

Existem diversos filtros capazes de identificar bordas em uma imagem, como os filtros derivativos de Sobel, Roberts e Prewit. Neste trabalho utilizou-se o filtro de Sobel. Mais informações sobre segmentação utilizando métodos derivativos são apresentadas na **Subseção 2.2.2**. A aplicação do filtro de Sobel na Figura 3.14 é apresentada na Figura 3.15.

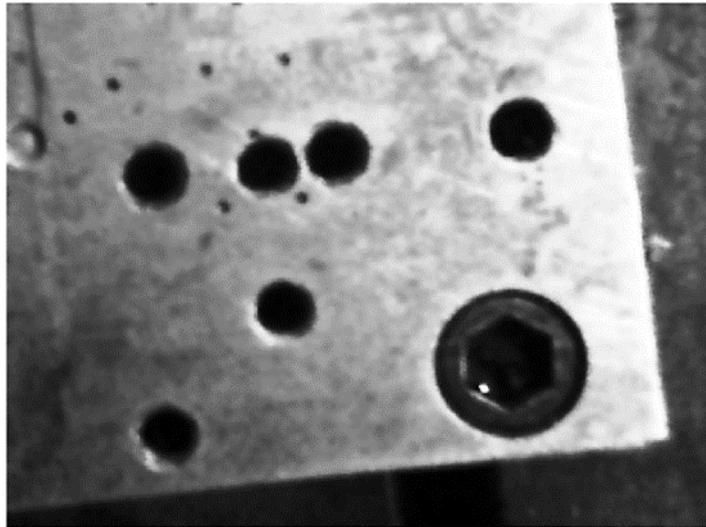
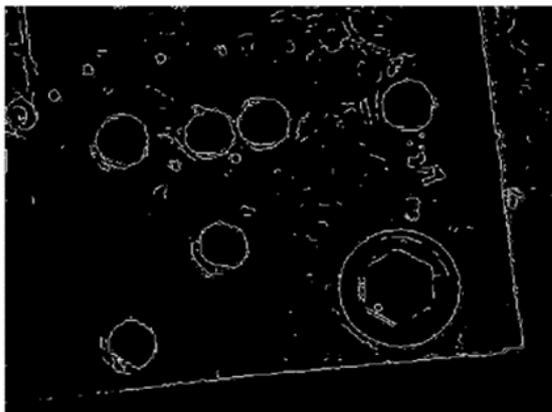
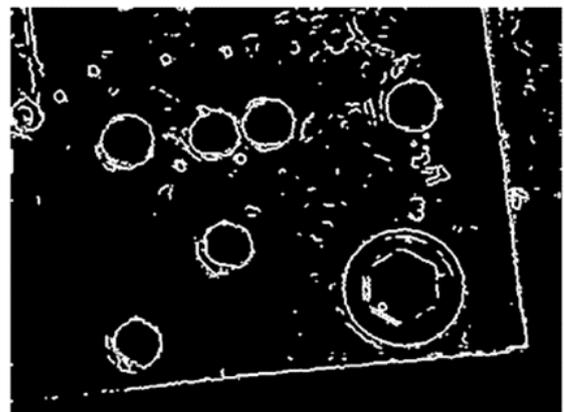


Figura 3.14 – Imagem após a aplicação do filtro de Wiener.

Além da identificação das bordas, também é realizada uma dilatação do tipo “disco” de raio 1 pixel sobre cada elemento da imagem para ressaltar as bordas. O resultado da dilatação é apresentado na Figura 3.15b.



(a)



(b)

Figura 3.15 – Identificação das bordas da região de interesse da mesa: (a) bordas sem dilatação; (b) bordas com dilatação.

Para identificar as arestas da mesa, utiliza-se a transformada de Hough. Como mencionado na **Subseção 2.2.2**, a transformada é aplicada sobre uma imagem binária (neste caso, a imagem das bordas com dilatação) com o objetivo de mapear todos os pontos pertencentes a uma mesma reta na imagem em um único ponto em um novo espaço de parametrização. Seguindo a Equação 2.19, obtêm-se o espaço de parametrização apresentado na Figura 3.16. Os pontos circulos na imagem representam as duas retas que apresentam maior número de pontos concentrados.

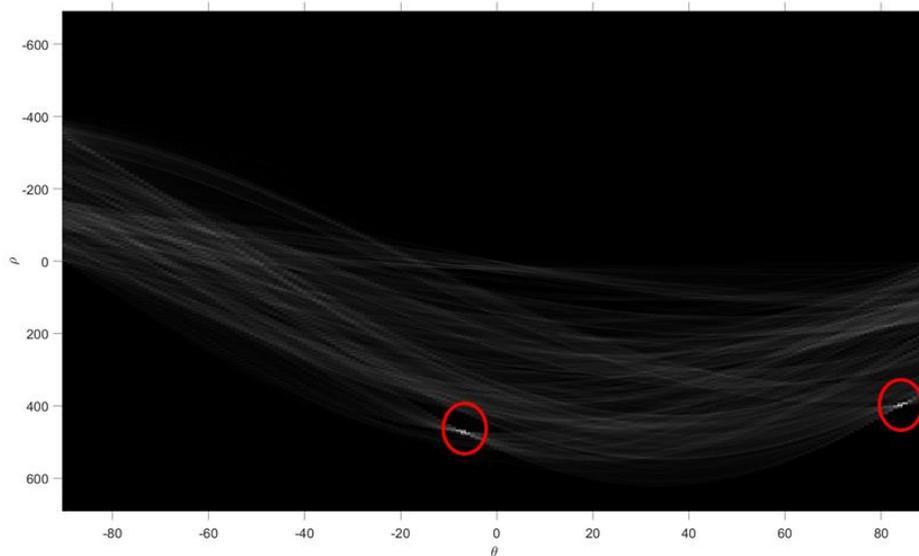


Figura 3.16 – Gráfico do espaço de parâmetros dos pontos na região de interesse.

Reescrevendo a Equação 2.19 na forma da Equação 3.3 e substituindo os valores de  $\rho$  e  $\theta$ , determina-se a equação da reta.

$$y' = \frac{\rho}{\sin \theta} - x' \cdot \frac{1}{\tan \theta} \quad (3.3)$$

Considerando que as retas são representadas pelas Equações (3.4) e (3.5), pode-se determinar as coordenadas de intersecção dessas arestas (XOM e YOM) a partir das Equações (3.6) e (3.7). Os pontos dessa intersecção também são considerados como a origem do sistema de coordenadas da mesa.

$$y_1' = a_1 x_1' + b_1 \quad (3.4)$$

$$y_2' = a_2 x_2' + b_2 \quad (3.5)$$

$$X_{OM} = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} \quad (3.6)$$

$$Y_{OM} = a_1 X_{OM} + b_1 \quad (3.7)$$

Além da origem, também é identificado um ponto sobre cada uma das retas que foram definidas como aresta de forma a representar as coordenadas  $x$  e  $y$  da mesa na imagem. O sistema também apresenta uma proteção que garante que esses pontos sejam os mais distantes da origem (mínimo 15 *pixels* distantes da origem). A Figura 3.17 mostra as arestas identificadas. Assim como a determinação dos parâmetros extrínsecos da câmera, a identificação das arestas da mesa é realizada apenas uma vez, considerando a câmera fixa. Uma vez que a câmera mude de posição ou de orientação, este procedimento deve ser realizado novamente.



Figura 3.17 – Pontos de interesse da mesa identificados pelo programa.

### 3.1 Identificação do Sistema de Coordenadas da Peça de Trabalho na Imagem

Duas metodologias distintas desenvolvidas para a identificação do sistema de coordenadas da peça na imagem serão abordadas nesta seção.

A primeira consiste na identificação do sistema de coordenadas da peça definido pelo desenho do programa CAM, independente do formato da peça, e seu mapeamento na imagem da peça real (**Subseção 3.1.1**). A segunda metodologia desenvolvida considera que a peça apresente duas arestas com ângulo reto entre si e que o sistema de coordenadas se apresenta posicionado neste vértice (**Subseção 3.1.2**).

### 3.1.1 Peças com sistema de coordenadas definidos em CAM

Para a identificação do sistema de coordenadas definido em CAM na imagem da peça real foram desenvolvidas duas rotinas: *CAM\_Coordinate\_System.m* (identifica o sistema de coordenadas definido no desenho CAM) e *Real\_Workpiece\_Coordinate\_System.m* (realiza o mapeamento do sistema de coordenadas identificado na rotina anterior na imagem da peça real).

A rotina *CAM\_Coordinate\_System.m* tem como entrada uma imagem CAM (com o sistema de coordenadas explícito) e, a partir da aplicação de diferentes processos, retorna como saída alguns dados de interesse, como pontos do sistema de coordenadas (origem, ponto no eixo das ordenadas e abscissas), centroide da peça, ângulo entre o centroide e os pontos do sistema de coordenadas, distância entre o centroide e os pontos do sistema de coordenadas, orientação do sistema de coordenadas e maior diagonal da peça. O modelo que representa o funcionamento da rotina é ilustrado pela Figura 3.18.

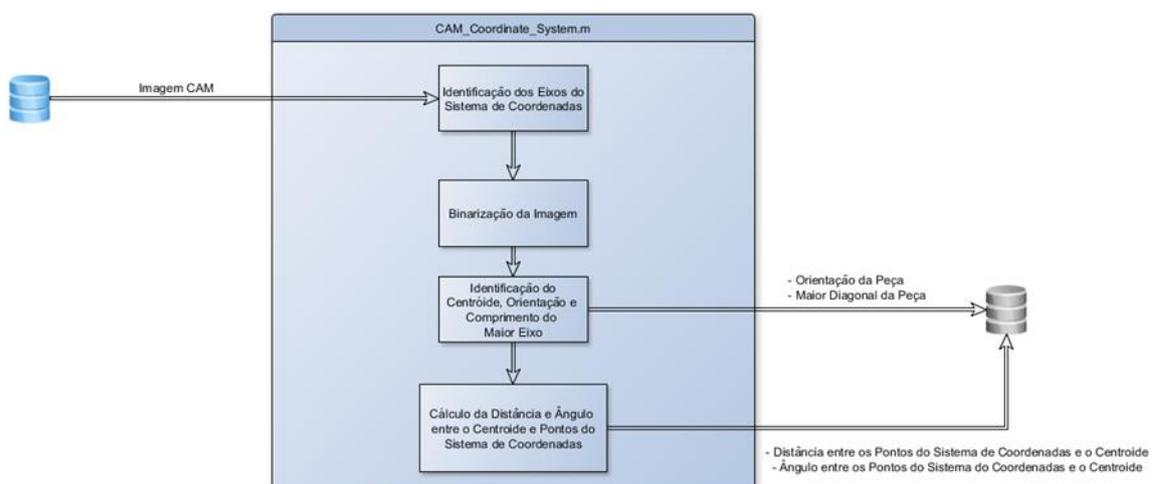


Figura 3.18 – Modelo rotina *CAM\_Coordinate\_System.m*.

As imagens CAD e as definições de manufatura CAM foram realizadas utilizando o *software Siemens NX 11.0*. A Figura 3.19 mostra um exemplo de peça desenvolvida em CAD. A partir da imagem CAD, é realizada a identificação do sistema de coordenadas CAM (eixos XM, YM e ZM em vermelho, verde e azul, respectivamente). Essa identificação é realizada da seguinte forma: verificam-se todos os pixels da imagem procurando intensidades que estejam dentro da faixa de vermelho e verde pertencentes aos eixos XM e YM. Quando um pixel está dentro desta faixa, o mesmo é convertido para branco (valor “255”). Caso não esteja, seu valor é convertido para “0” (preto). O resultado dessa aplicação é apresentado na Figura 3.20.

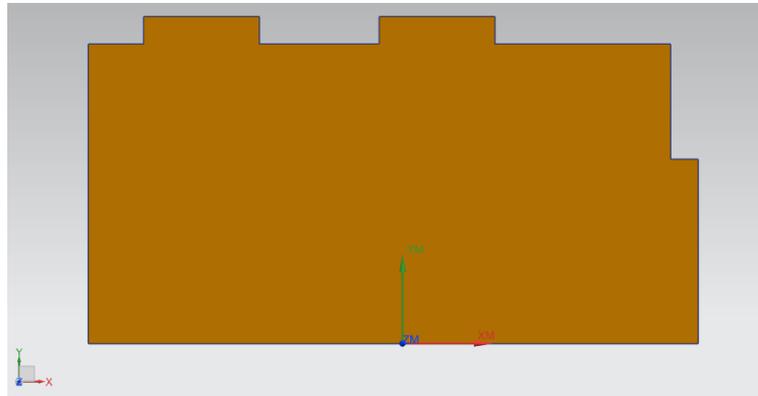


Figura 3.19 – Peça exemplo desenvolvida em CAD.

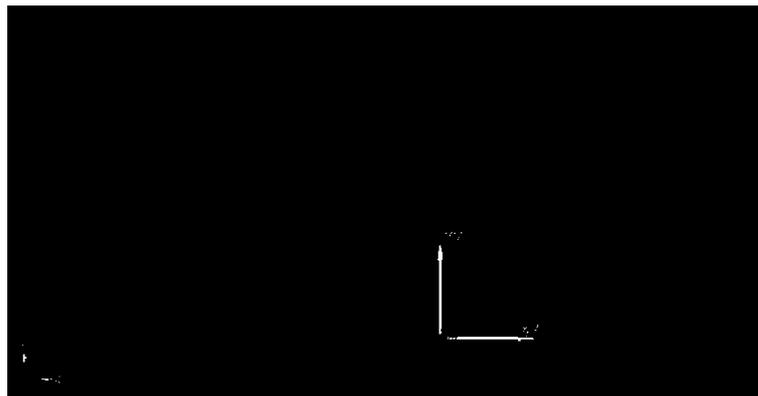


Figura 3.20 – Identificação do sistema de coordenadas CAM na imagem.

Após a identificação do sistema de referências, é realizada a binarização da imagem total (Figura 3.21). Como definido na Subseção 2.2.2, esse método de segmentação por área consiste na conversão dos valores de pixels em “0” e “1” a partir de um *threshold*. O valor do *threshold* definido é igual à metade da faixa de intensidade, ou seja, “125”.



Figura 3.21 – Imagem CAD binarizada.

A imagem binária da peça CAD permite determinar algumas propriedades como centroide, comprimento do maior eixo da imagem e orientação. Essas propriedades são calculadas automaticamente através da função *regionprops*, disponível no MATLAB. A Figura 3.22 exibe o centroide (em azul) identificado para a imagem CAD binarizada.

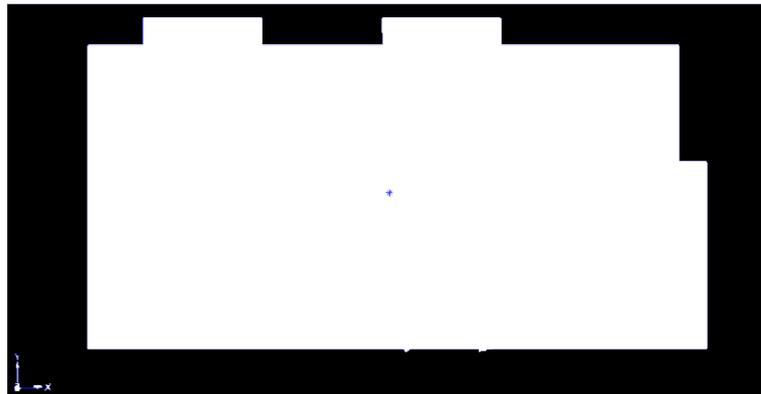


Figura 3.22 – Centroide (em azul) da imagem CAD binarizada.

A fim de obter as equações das retas dos eixos do sistema de coordenadas CAM, aplicou-se a transformada de Hough. De forma análoga à aplicada no reconhecimento do sistema de coordenadas da máquina, a partir das equações de reta, são determinados alguns pontos de interesse, como a origem, um ponto no eixo das ordenadas e um ponto no eixo das abscissas. O conjunto das informações é exibido na Figura 3.23, onde em azul está determinado o centroide, vermelho os pontos dos eixos do sistema de coordenadas e o círculo verde representa a intersecção das retas (origem do sistema de coordenadas).

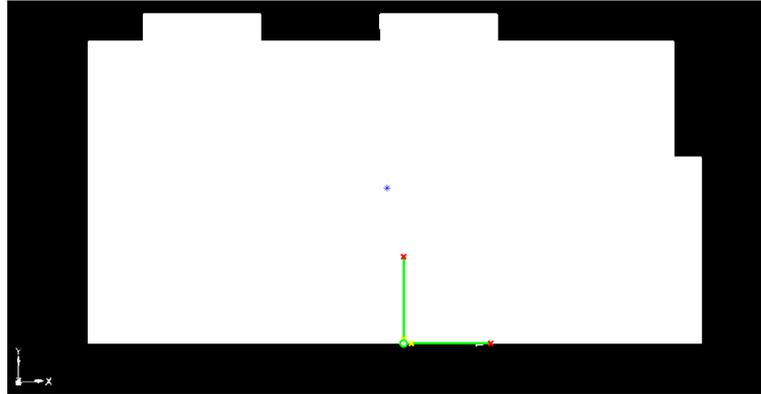


Figura 3.23 – Identificação dos pontos de interesse na imagem CAM.

Por fim, a rotina *CAM\_Coordinate\_System.m* identifica a distância euclidiana e o ângulo entre o centroide e os pontos de interesse ( $d_{0,CAM}$ ,  $d_{1,CAM}$ ,  $d_{2,CAM}$ ,  $\alpha_{0,CAM}$ ,  $\alpha_{1,CAM}$ ,  $\alpha_{2,CAM}$ ). Essas informações são fornecidas como coordenadas polares e permitem a identificação do sistema de coordenadas na imagem da peça real (Figura 3.24).

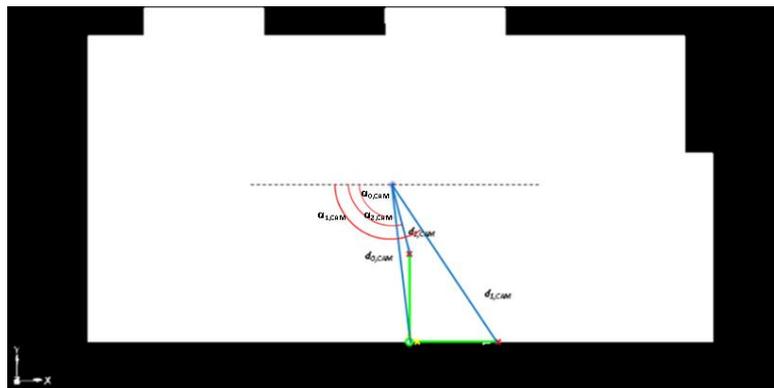


Figura 3.24 – Distância e ângulos entre centroide e pontos de interesse na imagem CAM.

Alguns dados identificados na rotina *CAM\_Coordinate\_System.m*, juntamente com os parâmetros intrínsecos e uma imagem da peça real são utilizados como entrada para a rotina *Real\_Workpiece\_Coordinate\_System.m* com o objetivo mapear o sistema de coordenadas da peça em CAM na imagem da peça real. O modelo associado é apresentado na Figura 3.25.

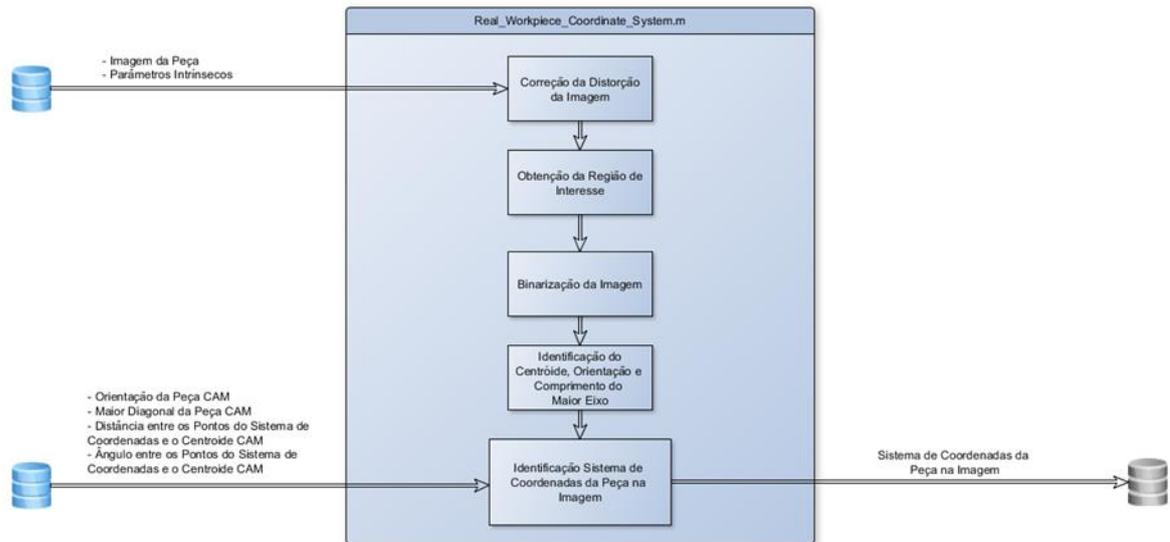


Figura 3.25 – Modelo rotina *Real\_Workpiece\_Coordinate\_System.m*.

Assim como na identificação do sistema de coordenadas da máquina, as primeiras etapas desta rotina são a correção das distorções da imagem (Figura 3.26) e obtenção da região de interesse (Figura 3.27).



Figura 3.26 – Imagem da peça com distorções corrigidas.

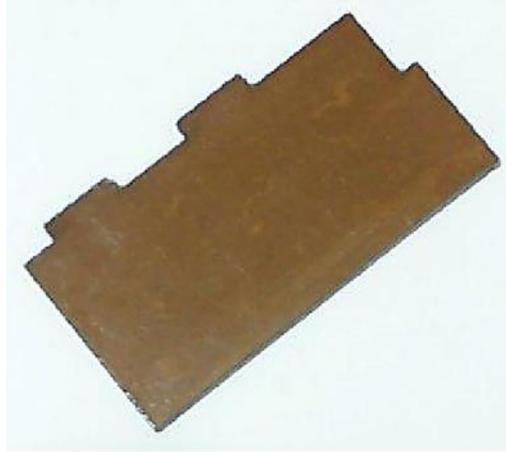


Figura 3.27 – Região de interesse da peça apresentada na Figura 3.26.

Após a obtenção da região de interesse é realizada a binarização da imagem, bem como a identificação das propriedades da região como centroide, comprimento do maior eixo e orientação (Figura 3.28).

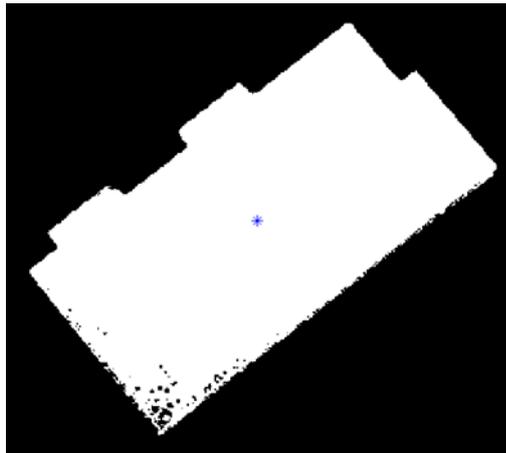


Figura 3.28 – Binarização da peça e identificação do centroide.

O mapeamento dos pontos de interesse do sistema de coordenadas definido em CAM na imagem real é realizado utilizando os dados de ângulos e distâncias obtidos anteriormente. Entretanto, como a imagem real pode apresentar uma escala diferente – devido ao afastamento da câmera – é necessário realizar um ajuste de escala. O fator utilizado para este ajuste é a razão entre o comprimento do maior eixo da imagem real pelo comprimento do maior eixo da imagem CAM Equação 3.8. Assim, a distância entre o centroide e os pontos de interesse é igual ao fator de escala multiplicado pela distância identificada na imagem CAM (Equações 3.9, 3.10 e 3.11).

$$fator\_escala = \frac{comprimento\_maior\_eixo\_Real}{comprimento\_maior\_eixo\_CAM} \quad (3.8)$$

$$d_{O,Real} = fator\_escala \cdot d_{O,CAM} \quad (3.9)$$

$$d_{1,Real} = fator\_escala \cdot d_{1,CAM} \quad (3.10)$$

$$d_{2,Real} = fator\_escala \cdot d_{2,CAM} \quad (3.11)$$

Assim como a distância, o ângulo também precisa ser ajustado. Isso é necessário porque a orientação da peça real pode não corresponder à mesma da imagem CAM. Essa orientação é obtida pelo comando *regionprops*, presente no MATLAB. A soma do ângulo de orientação com o ângulo obtido na imagem CAM corresponde ao ângulo entre o centroide e o ponto de interesse.

Após a identificação da distância e do ângulo entre o centroide e os pontos de interesse, o sistema de coordenadas da peça na imagem foi identificado (Figura 3.29).

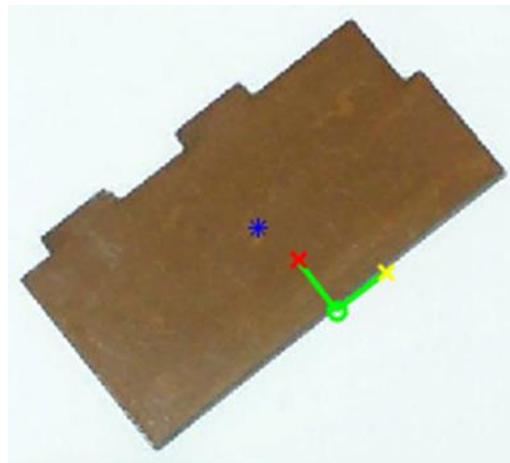


Figura 3.29 – Sistema de coordenadas da peça identificados pelo programa.

### 3.1.2 Peças com sistema de coordenadas definidas em um vértice com ângulo reto

A metodologia apresentada nesta subseção, diferente da apresentada na **Subseção 3.1.1**, não depende da imagem desenhada em CAD/CAM. Entretanto, sua aplicação apresenta duas restrições: (i) a peça de trabalho deve conter ao menos um vértice com ângulo reto e (ii) o sistema de coordenadas CAM deve estar localizado no vértice.

A rotina desenvolvida para este método, *Real\_Workpiece\_Vertex\_Coord\_Sys.m*, apresenta como entradas uma imagem da peça e os parâmetros intrínsecos e como saída retorna o sistema de coordenadas da peça. A Figura 3.30 ilustra o modelo que representa esta rotina.

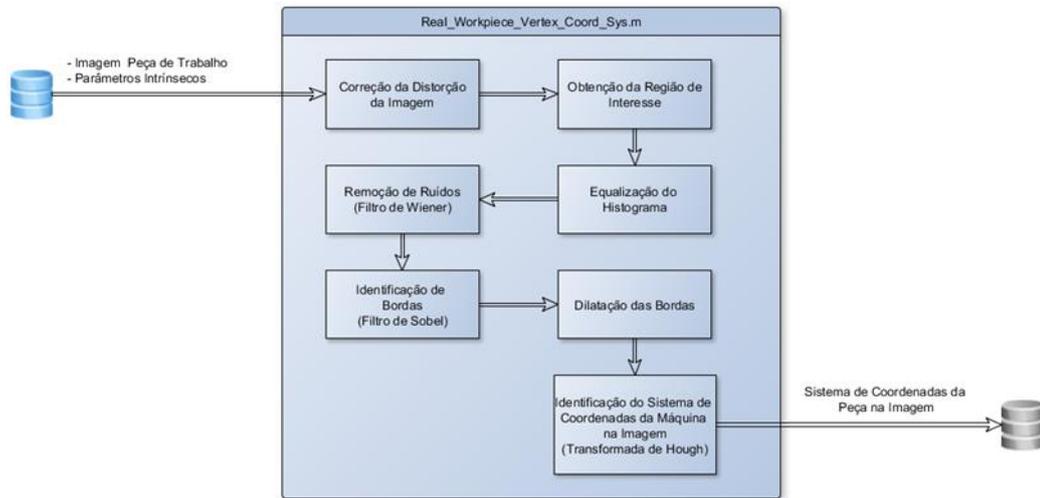


Figura 3.30 – Modelo rotina *Real\_Workpiece\_Coordinate\_System.m*.

O procedimento realizado para a identificação do sistema de coordenadas da peça na imagem a partir deste método é semelhante ao desenvolvido para o reconhecimento do sistema de coordenadas da máquina (Seção 3.4). A Figura 3.31 mostra um exemplo de identificação realizado com a rotina *Real\_Workpiece\_Vertex\_Coord\_Sys.m*. Sua execução inicia com a aquisição da imagem, seguida por (a) correção das distorções, (b) definição da região de interesse da imagem (ROI), (c) avaliação da imagem em tons de cinza, (d) histograma correspondente, (e) geração de imagem após equalização, (f) histograma equalizado, (g) aplicação do filtro de Wiener para filtragem dos ruídos, (h) binarização, (i) dilatação das bordas e (j) identificação da equação das retas e dos pontos de interesse do sistema de coordenadas através da transformada de Hough.

Por fim, é identificado o sistema de coordenadas da peça na imagem (Figura 3.32). A identificação dos pontos desse sistema apresenta o mesmo algoritmo do utilizado na identificação dos pontos da mesa de usinagem, no qual é garantido que os pontos de cada eixo estão a pelo menos 15 *pixels* de distância da origem.

Diferente da determinação dos parâmetros extrínsecos da câmera e das arestas da mesa, a identificação das arestas da peça é realizada uma vez para cada peça posicionada na mesa do centro de usinagem.

### 3.2 Mudança de Sistemas de Coordenadas

A fim de determinar a posição e orientação da peça de trabalho em relação à mesa da máquina e, assim, realizar a correção da rotina de usinagem, é preciso realizar algumas conversões de sistemas de coordenadas. Os sistemas de coordenadas considerados são:

- Sistema de Coordenadas do Padrão Xadrez na Imagem (SCPXI): trata-se do sistema de coordenadas identificado durante o procedimento de correspondência na calibração dos parâmetros extrínsecos (**Seção 3.3**);
- Sistema de Coordenadas do Padrão Xadrez no Mundo (SCPXM): consiste no sistema de coordenadas do padrão xadrez convertido em coordenadas do mundo após a realização da calibração dos parâmetros extrínsecos (**Seção 3.3**); este sistema relaciona as coordenadas da imagem (em *pixel*) com as coordenadas do mundo (em mm);
- Sistema de Coordenadas da Máquina na Imagem (SCMI): é o sistema de coordenadas da mesa da máquina definido através dos procedimentos realizados na **Seção 3.4**;



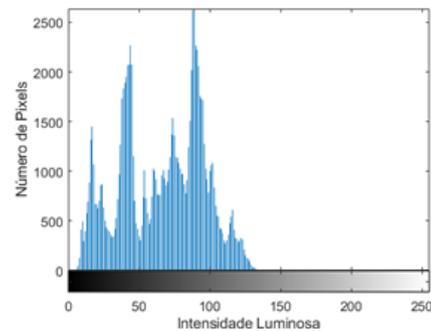
(a)



(b)



(c)



(d)

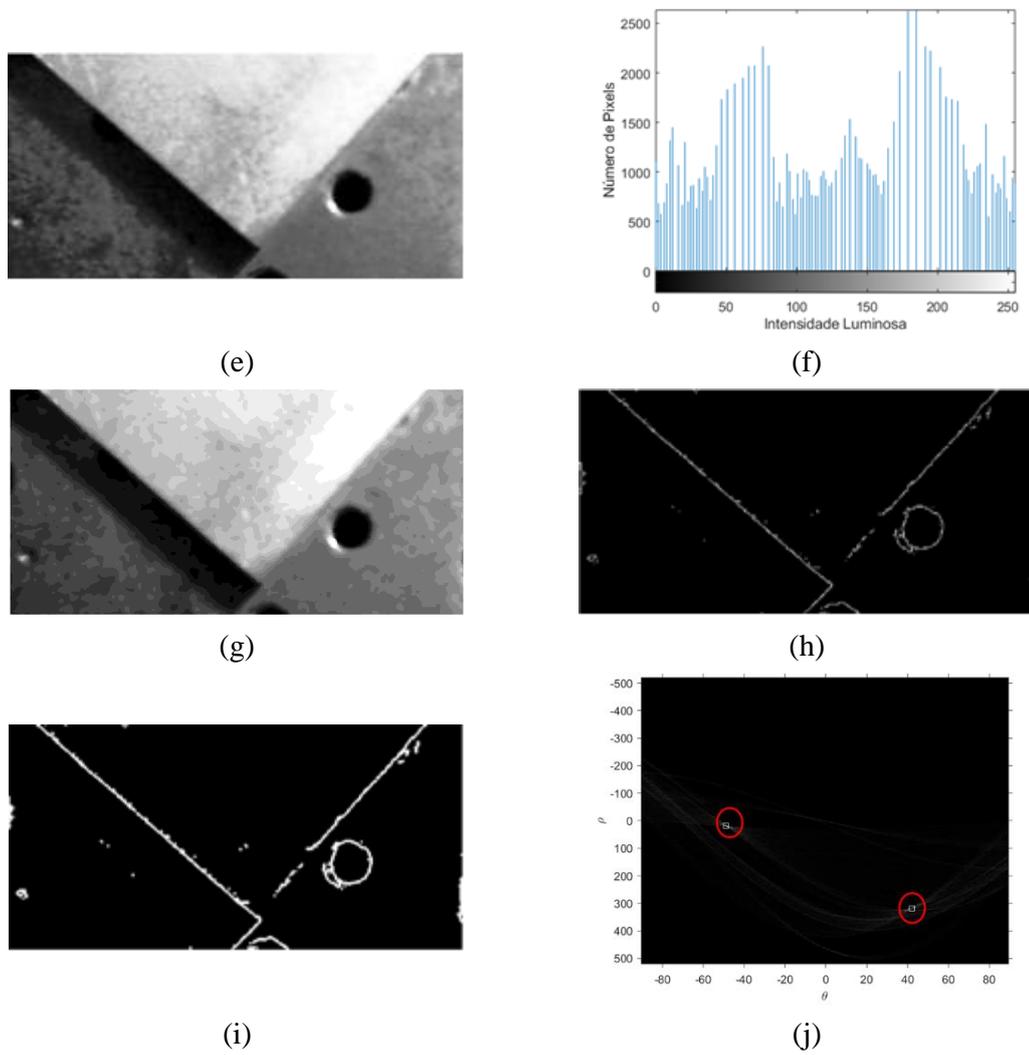


Figura 3.31 – Exemplo de identificação com a rotina *Real\_Workpiece\_Vertex\_Coord\_Sys.m*.

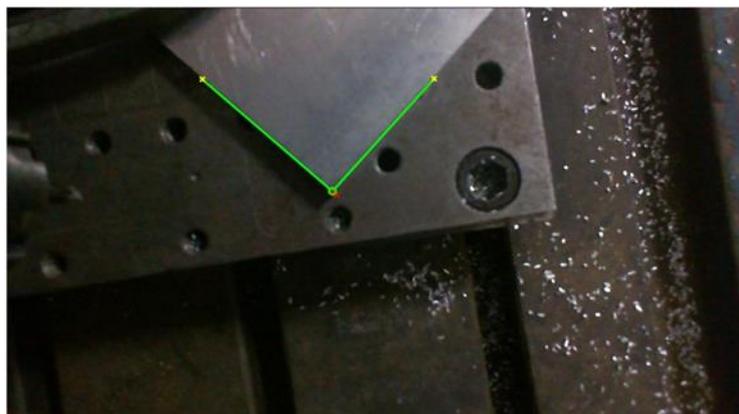


Figura 3.32 – Sistema de coordenadas da peça na imagem identificados pelo programa.

Sistemas de coordenadas considerados (cont.)

- Sistema de Coordenadas da Máquina no Mundo (SCMM): é o sistema de coordenadas da mesa na imagem convertido para as coordenadas do mundo através da relação com os parâmetros extrínsecos;
- Sistema de Coordenadas da Peça na Imagem (SCPI): é o sistema de coordenadas da peça de trabalho identificado através dos procedimentos realizados na **Seção 3.1**;
- Sistema de Coordenadas da Peça no Mundo (SCPM): é o sistema de coordenadas da peça na imagem convertido para as coordenadas do mundo através da relação com os parâmetros extrínsecos.

Para realização das mudanças dos sistemas de coordenadas, foram desenvolvidas duas rotinas: *Coordinates\_Table\_World.m* e *Coordinates\_Workpiece\_Table.m*.

A *Coordinates\_Table\_World.m* tem como objetivo identificar a relação entre o SCMI com o SCPXM. Essa rotina apresenta como entrada a espessura do padrão xadrez (inserida pelo usuário), os parâmetros extrínsecos (identificados na **Seção 3.3**) e os pontos do sistema de coordenadas da máquina na imagem (identificados na **Seção 3.4**). Os principais processos realizados pela rotina são a correção dos parâmetros extrínsecos de acordo com a espessura do padrão xadrez, a transformação do SCMI para o SCPXM e a identificação das matrizes de rotação e translação entre esses sistemas. Por fim, a rotina retorna essas matrizes. O modelo que representa esta rotina é apresentado na Figura 3.33.

A fim de manter as imagens da mesa da máquina no mesmo plano que o padrão xadrez, mantendo assim a mesma relação *pixel/mm* identificada durante a determinação dos parâmetros extrínsecos da **Seção 3.3**, foi necessário realizar um ajuste de acordo com a espessura do padrão xadrez. Considerando que neste projeto a câmera estava orientada perpendicularmente ao plano da mesa e da peça, o ajuste necessário tinha relação com translação da câmera no eixo z, mais especificamente, o ajuste realizado correspondeu à soma do valor relativo ao deslocamento z com a espessura do padrão xadrez, como mostra a Equação 3.12, onde  $T_x$ ,  $T_y$  e  $T_z$  são os valores de translação nas coordenadas x, y e z, e  $e_{padrão\_xadrez}$  é a espessura do padrão xadrez.

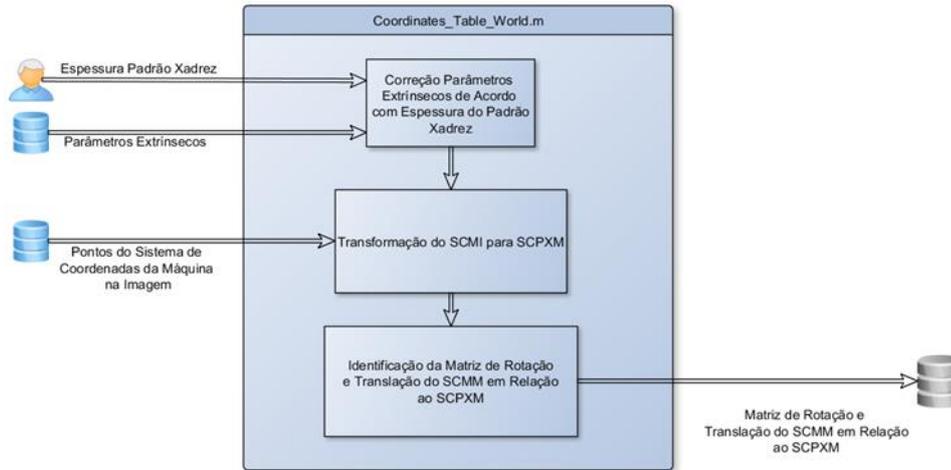


Figura 3.33 – Modelo rotina *Coordinates\_Table\_World.m*.

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z + e_{padr\tilde{a}o\_xadrez} \end{bmatrix} [\text{mm}] \quad (3.12)$$

Após o ajuste dos parâmetros extrínsecos realizou-se a conversão do sistema de coordenadas da máquina na imagem para o sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo. Essa conversão foi realizada utilizando a função *transformPointsInverse*. Um exemplo de aplicação na qual é relacionado o sistema de coordenadas do padrão xadrez (Figura 3.34) com o sistema de coordenadas da máquina (Figura 3.35) é apresentado na Figura 3.36.

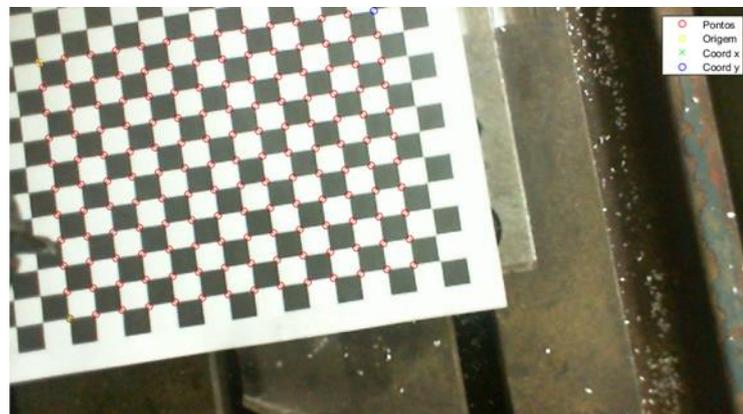


Figura 3.34 – Sistema de coordenadas do padrão xadrez.

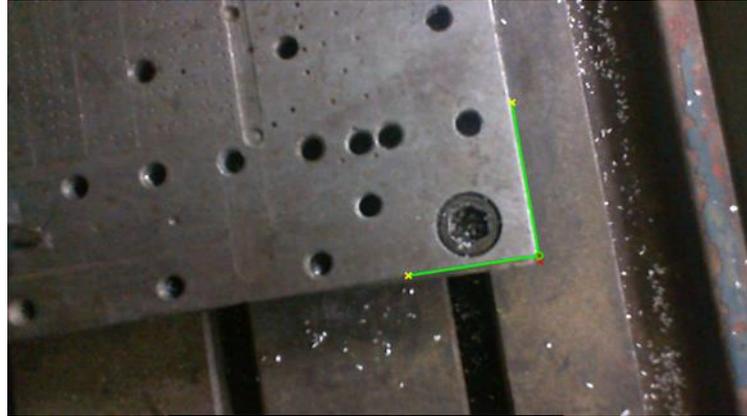


Figura 3.35 – Sistema de coordenadas da máquina na imagem.

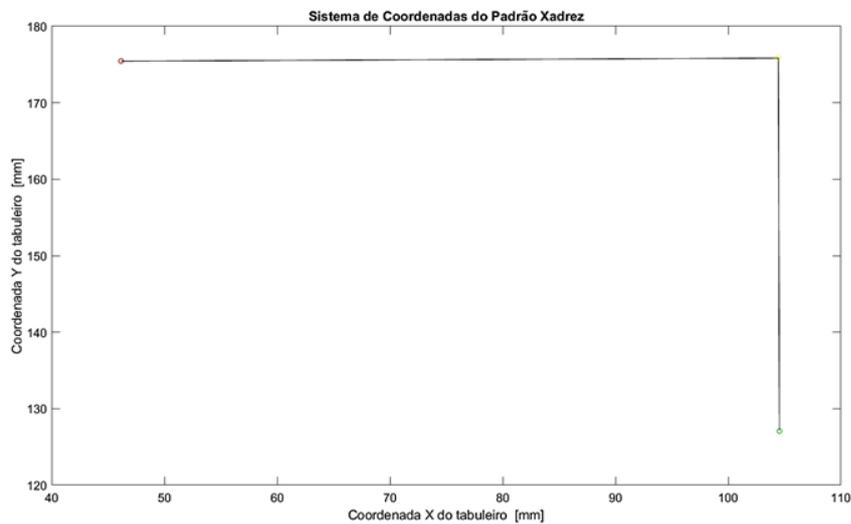


Figura 3.36 – Relação entre o sistema de coordenadas da máquina no mundo com o sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo.

A matriz de translação do sistema de coordenadas da máquina no mundo em relação ao sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo  $T_{SCMM}^{SCPXM}$  consiste nas coordenadas da origem deste sistema (Equação 3.13). Já a matriz de rotação  $R_{SCMM}^{SCPXM}$  pode ser definida pela Equação 3.14, onde  $\phi_{SCMM}^{SCPXM}$  corresponde ao ângulo entre o eixo das abscissas do SCMM e o eixo das abscissas do SCPXM.

$$T_{SCMM}^{SCPXM} = \begin{bmatrix} x_{origem\_máquina}^{SCPXM} \\ y_{origem\_máquina}^{SCPXM} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$R_{SCMM}^{SCPXM} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_{SCMM}^{SCPXM}) & -\text{sen}(\phi_{SCMM}^{SCPXM}) \\ \text{sen}(\phi_{SCMM}^{SCPXM}) & \cos(\phi_{SCMM}^{SCPXM}) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

O ângulo entre o eixo das abscissas do SCMM e o eixo das abscissas do SCPXM pode ser determinado pela Equação 3.15,

$$\phi_{SCMM}^{SCPXM} = a \tan\left(\frac{y_{eixo\_máquina}^{SCPXM} - y_{origem\_máquina}^{SCPXM}}{x_{eixo\_máquina}^{SCPXM} - x_{origem\_máquina}^{SCPXM}}\right) \quad (3.15)$$

onde  $x_{eixo\_máquina}^{SCPXM}$  e  $y_{eixo\_máquina}^{SCPXM}$  são as coordenadas do ponto que representa o eixo das abscissas da máquina no sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo e  $x_{origem\_máquina}^{SCPXM}$  e  $y_{origem\_máquina}^{SCPXM}$  são as coordenadas da origem da máquina no SCPXM.

A rotina *Coordinates\_Workpiece\_Table.m* tem como objetivo identificar a relação entre o sistema de coordenadas da peça na imagem e o sistema de coordenadas da máquina no mundo. A Figura 3.37 mostra o modelo que representa esta rotina. A estrutura deste modelo é similar à da rotina *Coordinates\_Table\_World.m*, no qual dados de espessura do padrão xadrez e da peça, inseridos pelo usuário, são utilizados para correção dos parâmetros extrínsecos (Equação 3.16).

Além disto, a conversão do sistema de coordenadas da peça na imagem para o sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo também é realizada utilizando a função do MATLAB *transformPointsInverse*. Um exemplo de aplicação na qual é relacionado o sistema de coordenadas do padrão xadrez (Figura 3.34) com o sistema de coordenadas da máquina (Figura 3.35) e o sistema de coordenadas da peça (Figura 3.38) é apresentado na Figura 3.39.

Como os sistemas da mesa e da peça são considerados coplanares após a correção dos parâmetros extrínsecos, é possível converter os pontos da peça no SCPXM para o sistema de coordenadas da máquina no mundo através da Equação 3.17, onde  $x_{peça}^{SCMM}$  e  $y_{peça}^{SCMM}$  são as coordenadas da peça no sistema de coordenadas da máquina no mundo e  $x_{peça}^{SCPXM}$  e  $y_{peça}^{SCPXM}$  são as coordenadas da peça no sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo.

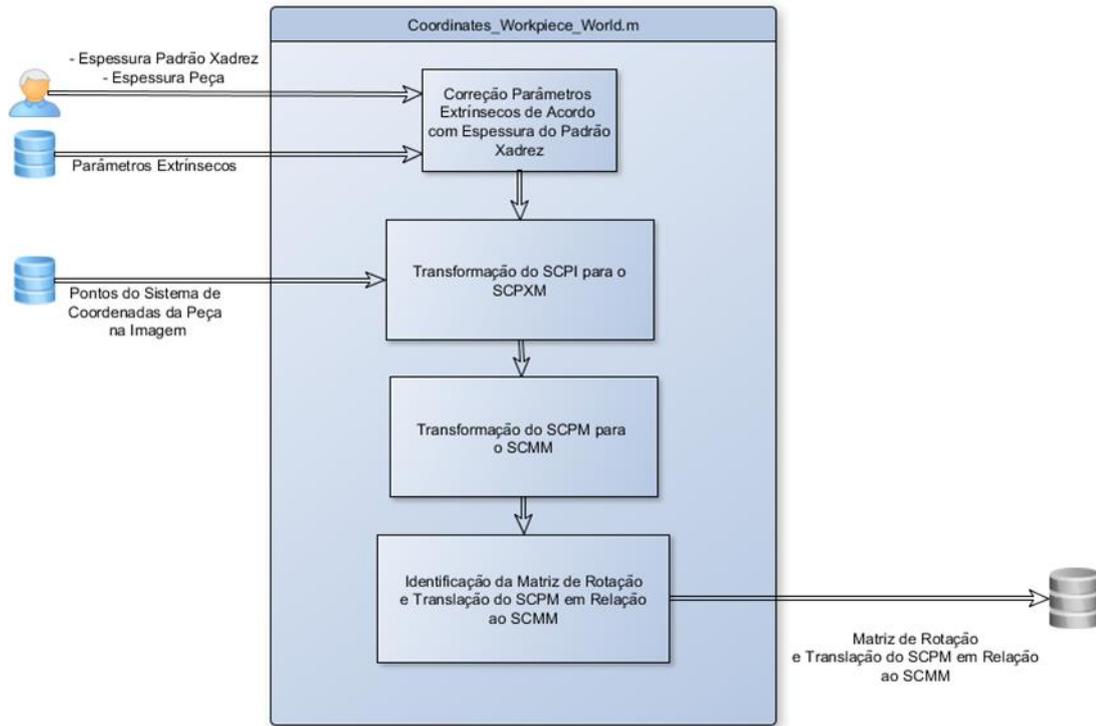


Figura 3.37 – Modelo rotina *Coordinates\_Workpiece\_World.m*.

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z + e_{\text{padrão\_xadrez}} - e_{\text{peça}} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$



Figura 3.38 – Sistema de coordenadas da peça na imagem.

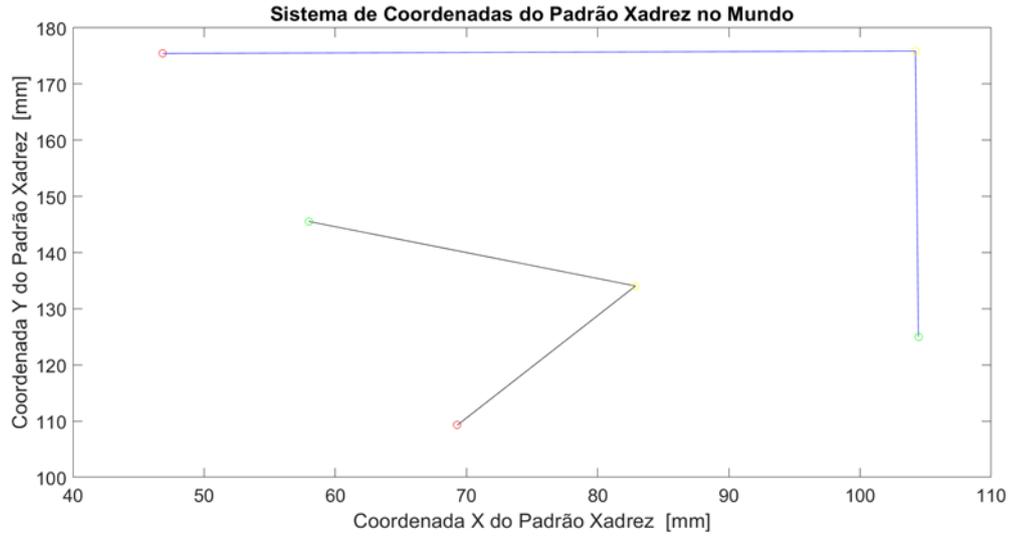


Figura 3.39 – Relação entre o sistema de coordenadas da máquina (azul) e da peça (preto) no mundo com o sistema de coordenadas do padrão xadrez no mundo.

$$\begin{bmatrix} x_{peça}^{SCMM} \\ y_{peça}^{SCMM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_{SCMM}^{SCPXM}) & -\text{sen}(\phi_{SCMM}^{SCPXM}) \\ \text{sen}(\phi_{SCMM}^{SCPXM}) & \cos(\phi_{SCMM}^{SCPXM}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{peça}^{SCPXM} - x_{origem\_máquina}^{SCPXM} \\ y_{peça}^{SCPXM} - y_{origem\_máquina}^{SCPXM} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Assim, inserindo os dados da posição da origem e do ponto do eixo das abscissas da peça no SCPXM, é possível determinar os pontos relevantes da peça no SCMM.

De forma análoga ao cálculo realizado para a determinação da relação entre SCPXM e SCMM, as matrizes de translação  $T_{SCPM}^{SCMM}$  e rotação  $R_{SCPM}^{SCMM}$  entre SCMM e SCPM são calculadas através das Equações (3.18) e (3.19), onde  $\phi_{SCPM}^{SCMM}$  corresponde ao ângulo entre o eixo das abscissas do SCPM e o SCMM.

$$T_{SCPM}^{SCMM} = \begin{bmatrix} x_{origem\_peça}^{SCMM} \\ y_{origem\_peça}^{SCMM} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$R_{SCPM}^{SCMM} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_{SCPM}^{SCMM}) & -\text{sen}(\phi_{SCPM}^{SCMM}) \\ \text{sen}(\phi_{SCPM}^{SCMM}) & \cos(\phi_{SCPM}^{SCMM}) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

O ângulo entre o eixo das abscissas do SCPM e o SCMM pode ser determinado pela Equação 3.20,

$$\phi_{SCPM}^{SCMM} = a \tan\left(\frac{y_{eixo\_peça}^{SCMM} - y_{origem\_peça}^{SCMM}}{x_{eixo\_peça}^{SCMM} - x_{origem\_peça}^{SCMM}}\right) \quad (3.20)$$

onde  $x_{eixo\_peça}^{SCMM}$  e  $y_{eixo\_peça}^{SCMM}$  são as coordenadas do ponto que representa o eixo das abscissas da peça no sistema de coordenadas da máquina no mundo e  $x_{origem\_peça}^{SCMM}$  e  $y_{origem\_peça}^{SCMM}$  são as coordenadas da origem peça no SCMM. A Figura 3.40 mostra a relação entre o sistema de coordenadas da peça no mundo e o sistema de coordenadas da máquina no mundo.

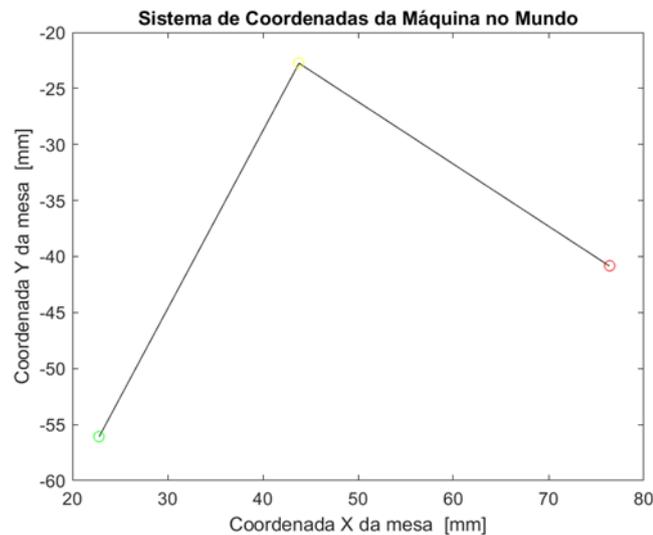


Figura 3.40 – Relação entre o sistema de coordenadas da máquina e da peça no mundo.

### 3.3 Geração do Código G

A última etapa da metodologia proposta consiste na elaboração do programa de comando numérico para a usinagem da peça no centro de usinagem CNC. Para isto foi desenvolvida a rotina *G\_Code.m* que, a partir das coordenadas dos pontos do programa CN, das matrizes de rotação e do vetor posição do sistema de coordenadas da peça em relação à máquina converte os pontos do programa CN para o sistema de coordenadas da máquina. O modelo que representa a rotina é apresentado na Figura 3.41. O processo realizado pela rotina consiste na multiplicação da matriz de transformação, contendo o ângulo e a posição identificados na etapa anterior, pelo ponto definido em CAM. As coordenadas do ponto são determinadas pela Equação 3.21, onde  $x_{ponto}^{SCPM}$  e  $y_{ponto}^{SCPM}$  são as coordenadas do ponto definidos no programa CN,  $T_{SCPM}^{SCMM}$  e  $R_{SCPM}^{SCMM}$  são as matrizes de translação e rotação da peça em relação à

máquina e  $x_{\text{ponto}}^{SCMM}$  e  $y_{\text{ponto}}^{SCMM}$  são as coordenadas no sistema de coordenadas da máquina, que irão definir a trajetória da ferramenta no programa CN.

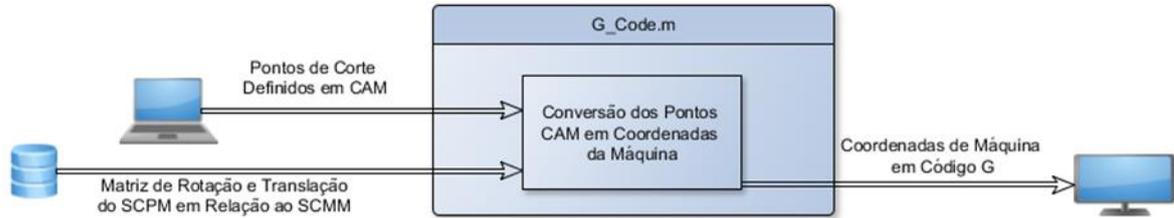


Figura 3.41 – Modelo rotina *G\_Code.m*.

$$\begin{bmatrix} x_{\text{ponto}}^{SCMM} \\ y_{\text{ponto}}^{SCMM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{SCPM}^{SCMM} & T_{SCPM}^{SCMM} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{\text{ponto}}^{SCPM} \\ y_{\text{ponto}}^{SCPM} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Um exemplo de pontos a serem usinados no sistema de coordenadas da peça em CAM e o seu respectivo código G são apresentados, respectivamente, nas Figura 3.42a e Figura 3.42b.

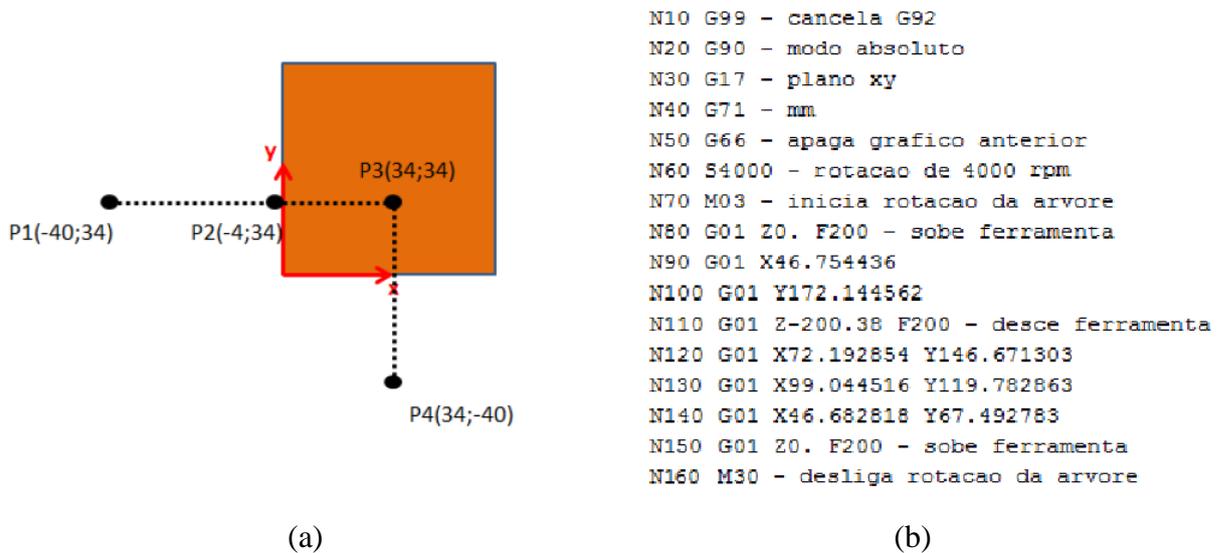


Figura 3.42 – (a) Pontos definidos em CAM; (b) Código G gerado pela rotina desenvolvida

## 4 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Com o intuito de avaliar o sistema de visão computacional desenvolvido para realizar o referenciamento de um centro de usinagem CNC independentemente da posição e orientação da peça de trabalho, três tipos de teste foram realizados para validação experimental.

Os dois primeiros consistem na avaliação da metodologia aplicada a peças com diferentes formatos, uma came e um círculo, na qual o sistema de coordenadas é definido em CAM, enquanto o terceiro é realizado em peças de projeção quadrada, com a origem do sistema de coordenadas em um dos vértices.

Os ensaios apresentam sequência de procedimentos semelhantes – setup inicial da máquina, identificação dos parâmetros extrínsecos da câmera e reconhecimento do sistema de coordenadas da mesa da máquina – diferindo apenas no reconhecimento da peça de trabalho e no tipo de usinagem realizada. Todos os experimentos foram realizados considerando peças orientadas a 0°, 30° e 45° em relação ao eixo das abcissas da mesa do centro de usinagem.

Para realização dos ensaios foi utilizado um centro de usinagem CNC ROMI, modelo Discovery 308 disponível no Laboratório de Automação em Usinagem na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAUS/UFRGS). As principais características do centro de usinagem são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características do centro de usinagem CNC ROMI Discovery 308.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Comando	ROMI Mach 8
Curso do eixo X	450 mm
Curso do eixo Y	310 mm
Curso do eixo Z	410 mm
Distância entre o nariz da árvore e a mesa	120 a 530 mm
Superfície da mesa	425 x 1060 mm
Área de trabalho	360 x 840 mm
Avanço rápido nos eixos X e Y	12000 mm/min
Avanço rápido no eixo Z	8000 mm/min
Avanço de corte programável	1 a 5000 mm/min
Potência máxima	7,5 cv (5,5 kW)
Rotação máxima	4000 rpm

Os testes de validação foram realizados sobre uma mesa auxiliar, posicionada sobre a mesa de trabalho do centro de usinagem CNC. O alinhamento entre a mesa auxiliar e a máquina foi garantido através da usinagem das bordas da mesa auxiliar no próprio centro de usinagem. Assim, ambos os planos de referência x-y (mesa de trabalho e mesa auxiliar) são horizontais e os sistemas de coordenadas são paralelos.

O *setup* inicial, que precede a realização dos ensaios, consiste no referenciamento do centro de usinagem CNC. Este procedimento é realizado de forma manual e tem como objetivo localizar o zero-máquina. A origem do novo sistema foi definida no vértice inferior esquerdo da mesa, como mostra a Figura 4.1.

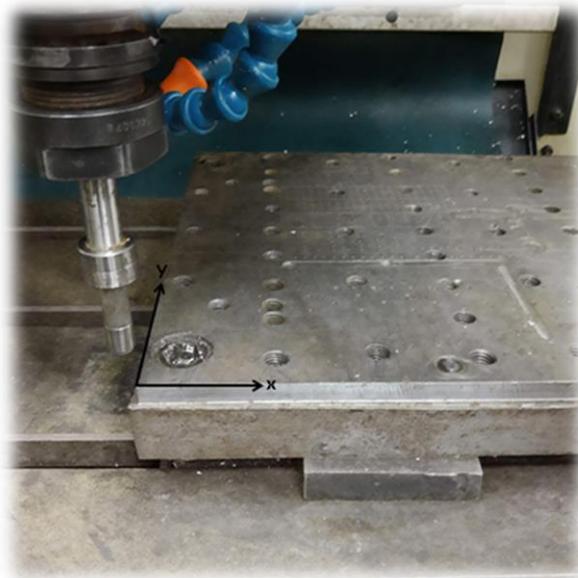


Figura 4.1 – Referenciamento das coordenadas x e y da ferramenta em relação à mesa do centro de usinagem.

A ferramenta de corte utilizada para a usinagem foi uma fresa de topo de metal duro YG-1 K2, com duas arestas de corte, diâmetro nominal de 7 mm e haste de 60 mm. Além da fixação da ferramenta no eixo-árvore, foi avaliado o batimento radial da ferramenta utilizando um relógio comparador DIGIMESS 121-304, com resolução de 0,01 mm. Este procedimento foi realizado a fim de reduzir erros provenientes de desalinhamento da ferramenta.

A partir dos parâmetros intrínsecos do sistema identificados através do procedimento apresentado na **Seção 3.2**, é necessário realizar a identificação dos parâmetros extrínsecos. A primeira etapa para este processo é a fixação da câmera na estrutura da coluna do centro de

usinagem. Após a fixação da câmera, é realizada a captura de uma imagem do padrão xadrez, posicionado sobre a mesa do centro de usinagem (Figura 4.2). O padrão xadrez utilizado possui espessura de 0,1 mm e é composto por quadrados com arestas de 10 mm.



Figura 4.2 – Posicionamento da câmera e padrão xadrez para obtenção dos parâmetros extrínsecos.

A identificação dos parâmetros extrínsecos foi realizada seguindo a metodologia apresentada na **Seção 3.3**. Seguindo a identificação dos parâmetros extrínsecos, realizou-se a identificação do sistema de coordenadas da mesa do centro de usinagem. Para esta etapa, o padrão xadrez foi removido, a câmera mantida na mesma posição e uma imagem da mesa foi obtida. Esta imagem deve conter o canto definido como zero-máquina durante o *setup*. A identificação do sistema de coordenadas da máquina seguiu o método exibido na **Seção 3.4**.

Após a identificação do sistema de coordenadas da máquina, a identificação do sistema de coordenadas da peça e a correção do comando numérico foram efetuadas para a realização do processo de usinagem.

#### 4.1 Teste 1

Os primeiros ensaios foram realizados em três peças de MDF (*Medium Density Fiberboard*) com espessura de 16,5 mm, com formatos semelhantes a uma came. Estas peças foram posicionadas com orientação de, aproximadamente, 0°, 30° e 45° em relação ao eixo das abcissas da mesa do centro de usinagem. A Figura 4.3 mostra uma das peças fixadas no centro de usinagem e a Figura 4.4 seu desenho em CAD.



Figura 4.3 – Peça came fixada no centro de usinagem CNC.

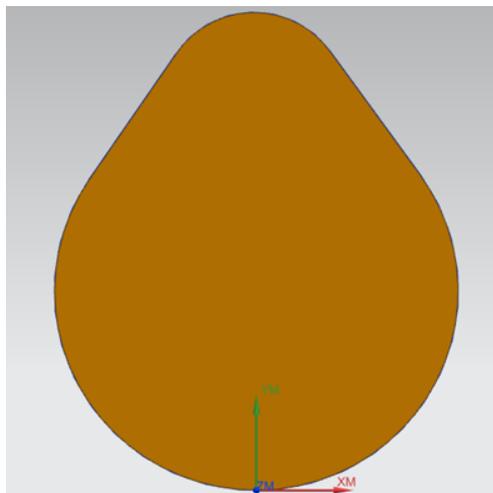


Figura 4.4 – Desenho da came desenvolvido em CAD.

Aplicando a metodologia apresentada na **Subseção 3.1.1** para identificação do sistema de coordenadas da peça na imagem, nas peças orientadas a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ , foram obtidos os resultados apontados na Figura 4.5.

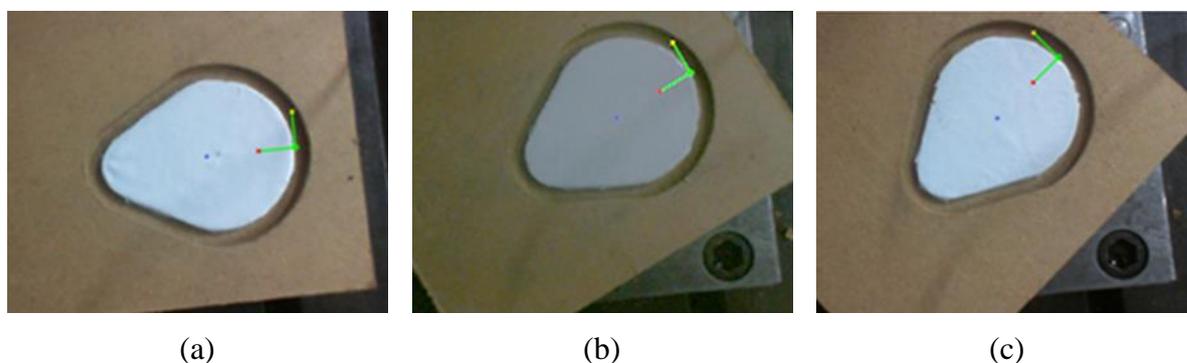


Figura 4.5 – Identificação do sistema de coordenadas definido em CAM nas peças reais orientadas em (a)  $0^\circ$ , (b)  $30^\circ$  e (c)  $45^\circ$  em relação ao eixo x do centro de usinagem.

Para avaliar a exatidão do sistema é realizado um furo nas coordenadas  $x = 0$  [mm],  $y = 30,275$  mm da peça CAM. Essas coordenadas correspondem ao centro da circunferência maior da came. Após a identificação do sistema de coordenadas na peça real, como apresentado na Figura 4.5, e das conversões dos sistemas de coordenadas (**Seção 3.2**) e geração do código G (**Seção 3.3**), realizou-se a furação com rotação  $n = 3000$  rpm e profundidade de corte  $a_p = 4$  mm e. A eficiência do sistema foi avaliada através da medição das características dos furos produzidos utilizando um paquímetro quadrimensional de resolução 0,02 mm.

## 4.2 Teste 2

O segundo testes consiste na realização de ensaios em três peças de projeções circulares previamente usinadas em MDF, com diâmetro de 105 mm e espessura de 16,5 mm. A Figura 4.6 ilustra o desenho da peça com o sistema de coordenadas definido em CAM e a Figura 4.7 a identificação nas três peças reais. A avaliação do sistema na peça circular foi realizada a partir da furação no seu centro (coordenadas CAM  $x = 0$  [mm],  $y = 52,5$  mm), com posterior medição da distância entre os quadrantes da peça e do furo. Os parâmetros de processo utilizados foram os mesmos do procedimento detalhado na **Seção 4.1**.

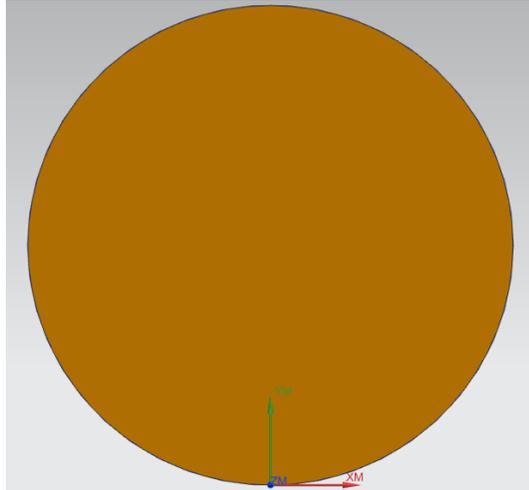


Figura 4.6 – Desenho do círculo desenvolvido em CAD.

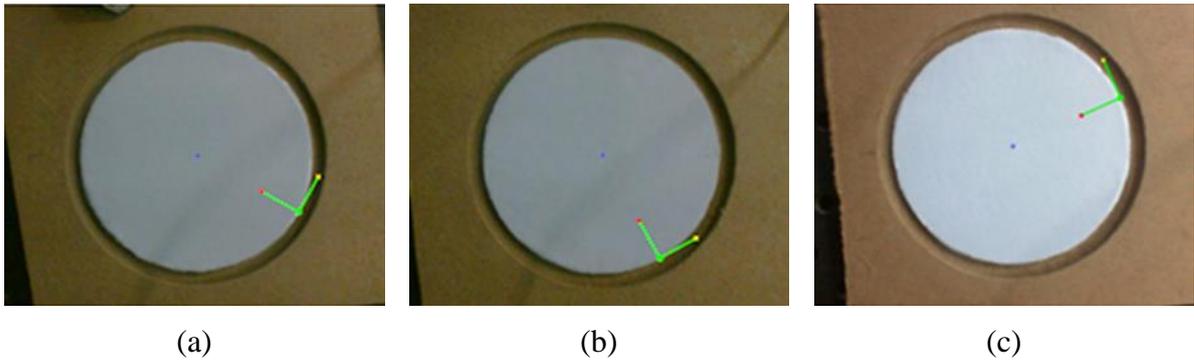


Figura 4.7 – Identificação do sistema de coordenadas definido em CAM nas peças reais: (a) círculo 1, (b) círculo 2 e (c) círculo 3.

### 4.3 Teste 3

O terceiro teste de validação consistiu em nove ensaios de usinagem em peças quadradas de alumínio ABNT 5052-F, com dimensões  $100 \times 100 \times 9,2$  mm. Nestes ensaios, três peças foram posicionadas para cada uma das orientações avaliadas ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$  em relação ao eixo das abcissas da mesa do centro de usinagem). A metodologia utilizada nestes ensaios é a de identificação do sistema de coordenadas da peça através do vértice com ângulo reto.

Os procedimentos de usinagem realizados consistem no fresamento de dois canais perpendiculares. Estes canais permitem a medição e avaliação do desvio dimensional de posição e o desvio angular. A Figura 4.8 apresenta a identificação do sistema de coordenadas

para as uma peça posicionada em cada um dos ângulos e a Figura 4.9 a peça em processo de usinagem dos canais. Para o fresamento utilizou-se uma rotação  $n = 800$  rpm, velocidade de avanço  $v_f = 80$  mm/min e profundidade de corte  $a_p = 2$  mm.

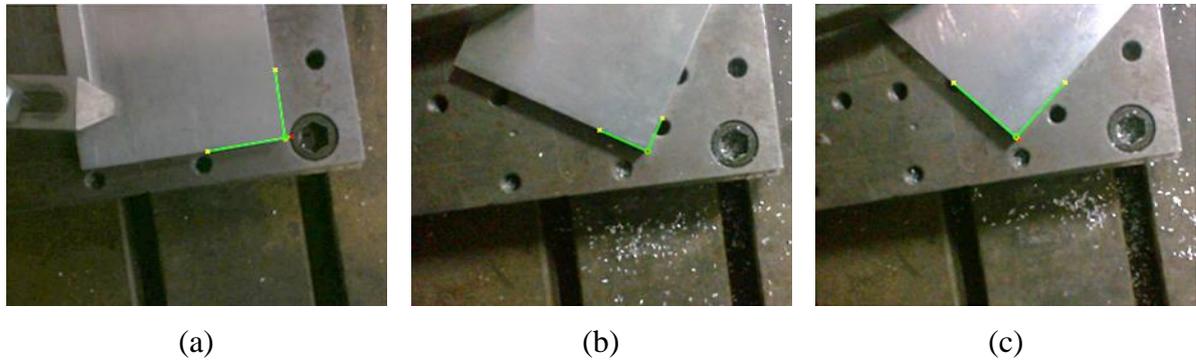


Figura 4.8 – Identificação do sistema de coordenadas das peças quadradas orientadas a (a) 0°, (b) 30° e (c) 45° com o eixo x da mesa do centro de usinagem.



Figura 4.9 – Fresamento de dois canais perpendiculares nas peças quadradas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta e discute os resultados dos três testes realizados. Inicialmente são avaliados os resultados sobre a peça em formato de came (**Teste 1**), seguida da peça de formato circular (**Teste 2**) – ambos usinados em MDF. Por fim, são realizadas medições sobre as peças quadradas em alumínio (**Teste 3**).

### 5.1 Teste 1

Para os ensaios realizados sobre a peça em formato similar a uma came mediu-se a distância entre os quadrantes da circunferência maior e do furo em três direções, definidas pelos parâmetros dimensionais (PD)  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  (Figura 5.1).

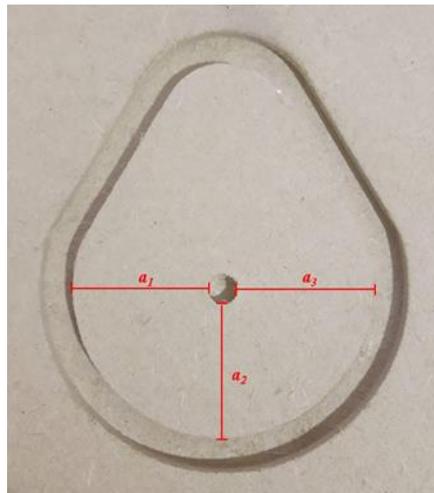


Figura 5.1 – Parâmetros dimensionais (PD) definidos sobre a peça com formato de came.

Sabendo-se que o diâmetro da circunferência inferior da peça é igual a 65,5 mm e que o raio da ferramenta é igual a 3,5 mm, espera-se que  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  apresentem valores próximos a 29,25 mm (valor nominal). O resultado das medições para as peças em formato came nas orientações de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$  são apresentados na Tabela 5.1.

A Figura 5.2 resume os resultados da medição dos parâmetros dimensionais para a peça em formato de came. Apesar do comportamento similar observado para os parâmetros dimensionais medidos após a usinagem da peça-base em diferentes orientações, há uma tendência de deslocamento do furo para a esquerda ( $a_3 > a_1$ ) para os testes realizados com a peça base a  $30^\circ$  e  $45^\circ$  do sistema de coordenadas da máquina.

Tabela 5.1 – Medidas do came.

PD $a_n$	Medição 1 ( $m_1$ ) [mm]	Medição 2 ( $m_2$ ) [mm]	Medição 3 ( $m_3$ ) [mm]	Média ( $\bar{M}$ ) [mm]	Desvio Padrão ( $S$ ) [mm]	Incerteza do tipo A $\frac{S}{\sqrt{n}}$ [mm]	Desvio Dimensional ( $29,25 - \bar{M}$ ) [mm]
Peça orientada com ângulo de 0° em relação à mesa do centro de usinagem							
$a_1$	29,18	29,20	29,18	29,18	0,01	0,01	0,07
$a_2$	28,29	27,99	28,29	28,04	0,17	0,10	0,96
$a_3$	29,16	29,08	29,22	29,16	0,07	0,04	0,09
Peça orientada com ângulo de 30° em relação à mesa do centro de usinagem							
$a_1$	28,72	28,74	28,8	28,74	0,04	0,02	0,51
$a_2$	28,59	28,59	28,59	28,34	0,00	0,00	0,66
$a_3$	29,68	29,64	29,60	29,64	0,04	0,02	-0,39
Peça orientada com ângulo de 45° em relação à mesa do centro de usinagem							
$a_1$	$a_1$	28,72	28,72	28,70	28,72	0,01	0,01
$a_2$	$a_2$	28,77	28,67	28,67	28,42	0,06	0,03
$a_3$	$a_3$	28,92	29,90	29,86	29,86	0,55	0,32

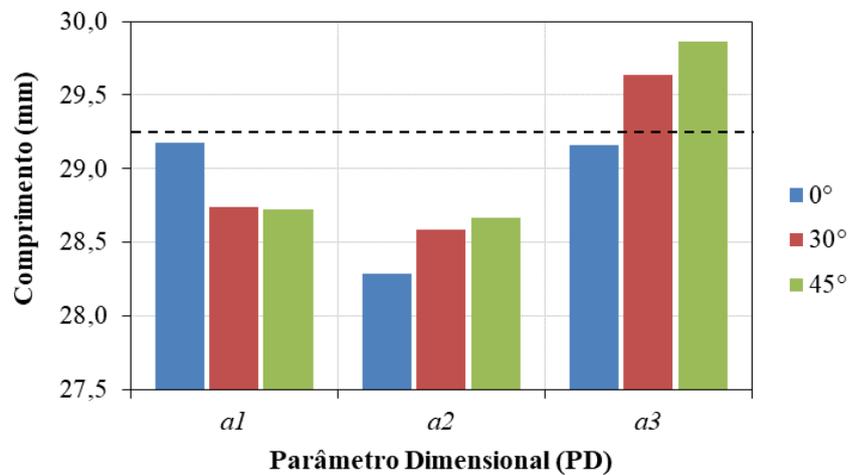


Figura 5.2 – Parâmetros dimensionais (PD) medidos nas três posições avaliadas. A linha tracejada corresponde à dimensão nominal (29,25 mm).

Para avaliar a influência da posição da medição (parâmetro dimensional) sobre o desvio da posição do furo foi realizada uma análise de variância simples, com intervalo de confiança de 95% que indicou influência significativa da posição do parâmetro dimensional sobre o desvio dimensional como é apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Análise de variância para avaliar a influência do parâmetro dimensional sobre o desvio dimensional para as peças came.

Efeito	Soma Quad.	G.D.L.	Média Quad.	Teste F	Prob.	Influência significativa
PD	1,660067	2	0,830033	10,55724	0,010836	Sim
Erro	0,471733	6	0,078622	---	---	---

## 5.2 Teste 2

Os testes realizados com a peça de projeção circular foram avaliados através da medição da diferença entre a posição dos quadrantes da peça e do furo em quatro direções representadas pelos parâmetros dimensionais  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  e  $b_4$ , como ilustra a Figura 5.3.

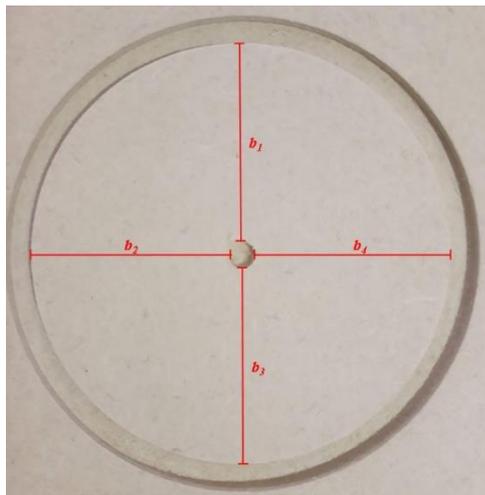


Figura 5.3 – Parâmetros dimensionais (PD) definidos sobre a peça com formato circular.

A partir dos diâmetros da peça (105 mm) e do raio da ferramenta (3,5 mm), espera-se que os parâmetros dimensionais ( $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  e  $b_4$ ) apresentem valores próximos a 49 mm (valor nominal). Três ensaios (A, B, C) foram realizados para peças com formato circular, e os resultados das medições são apresentados na Tabela 5.3. Os valores de PD medidos após cada ensaio são resumidos na Figura 5.4. Nota-se uma tendência de deslocamento do furo para baixo ( $b_1 > b_3$ ) e para a esquerda ( $b_4 > b_2$ ) nos ensaios B e C. No ensaio A o furo foi deslocado para cima ( $b_3 > b_1$ ). Esse erro pode estar associado com as condições de iluminação na captação da imagem, gerando sombreamentos e dificultando a correta identificação das arestas.

Tabela 5.3 – Medidas do Círculo

PD $b_n$	Medição 1 ( $m_1$ ) [mm]	Medição 2 ( $m_2$ ) [mm]	Medição 3 ( $m_3$ ) [mm]	Média ( $\bar{M}$ ) [mm]	Desvio Padrão ( $S$ ) [mm]	Incerteza do tipo A $\frac{S}{\sqrt{n}}$ [mm]	Desvio Dimensional ( $49 - \bar{M}$ ) [mm]
Ensaio A							
$b_1$	48,44	48,4	48,46	48,44	0,03	0,02	0,56
$b_2$	47,82	47,72	47,70	47,72	0,06	0,04	1,28
$b_3$	49,52	49,5	49,52	49,52	0,01	0,01	-0,52
$b_4$	50,20	50,38	50,40	50,38	0,11	0,06	-1,38
Ensaio B							
$b_1$	50,16	50,20	50,20	50,20	0,02	0,01	-1,20
$b_2$	48,06	48,00	47,98	48,00	0,04	0,02	1,00
$b_3$	47,92	47,98	47,96	47,96	0,03	0,02	1,04
$b_4$	50,10	50,04	50,00	50,04	0,05	0,03	-1,04
Ensaio C							
$b_1$	50,20	50,14	50,12	50,14	0,04	0,02	-1,14
$b_2$	48,42	48,40	48,34	48,40	0,04	0,02	0,60
$b_3$	48,10	48,08	48,18	48,10	0,05	0,03	0,90
$b_4$	49,98	50,02	49,98	49,98	0,02	0,01	-0,98

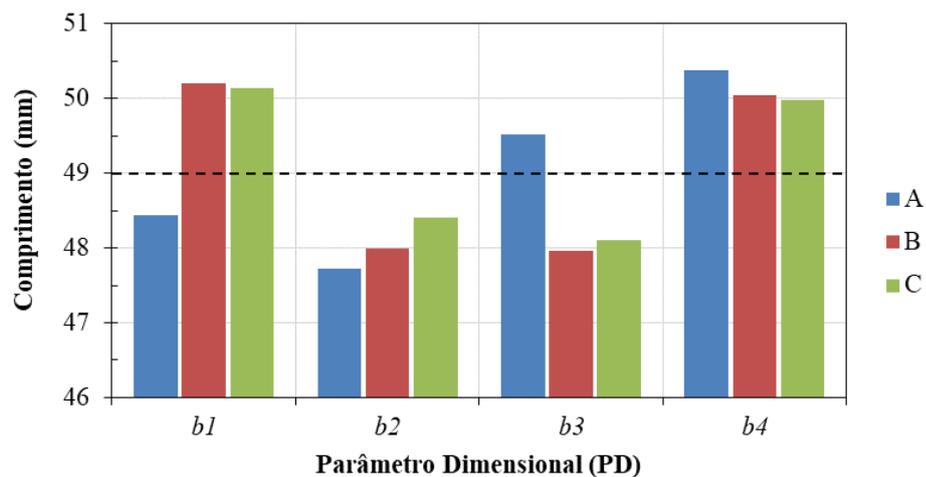


Figura 5.4 – Parâmetros dimensionais (PD) medidos em cada ensaio. A linha tracejada corresponde à dimensão nominal (49 mm).

A fim de avaliar a influência da posição da medição (parâmetro dimensional) sobre o desvio da posição do furo foi realizada uma análise de variância simples, com intervalo de

confiança de 95%. Esta análise indicou influência significativa da posição do parâmetro dimensional sobre o desvio dimensional como é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Análise de variância para avaliar a influência do parâmetro dimensional sobre o desvio dimensional para as peças circulares.

Efeito	Soma Quad.	G.D.L.	Média Quad.	Teste F	Prob.	Influência significativa
PD	8,281867	3	2,760622	5,791110	0,021018	Sim
Erro	3,813600	8	0,476700	---	---	---

### 5.3 Teste 3

A avaliação dos canais realizados sobre as peças quadradas de alumínio foi realizada através dos parâmetros dimensionais ( $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$ ) ilustrados na Figura 5.5. O valor nominal de todos os parâmetros dimensionais (PD) é 10 mm.

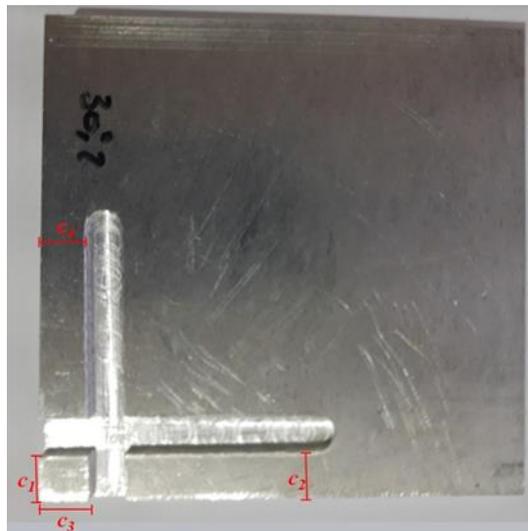


Figura 5.5 – Parâmetros dimensionais definidos sobre a peça quadrada.

Três ensaios (A, B, C) foram realizados, e os resultados das medições dos parâmetros dimensionais (PD) para as peças orientadas a  $0^\circ$  em relação à mesa da máquina são exibidos na Tabela 5.5 e os valores de PD medidos são resumidos na Figura 5.6. O mesmo procedimento foi realizado para as peças orientadas a  $30^\circ$  – ensaios D, E, F (Tabela 5.6 e Figura 5.7) e a  $45^\circ$  – ensaios G, H, I (Tabela 5.7 e Figura 5.8).

Tabela 5.5 – Medidas do Quadrado – Peça orientada com ângulo de 0° em relação à mesa do centro de usinagem.

PD $c_n$	Medição 1 ( $m_1$ ) [mm]	Medição 2 ( $m_2$ ) [mm]	Medição 3 ( $m_3$ ) [mm]	Média ( $\bar{M}$ ) [mm]	Desvio Padrão ( $S$ ) [mm]	Incerteza do tipo A $\frac{S}{\sqrt{n}}$ [mm]	Desvio Dimensional ( $10 - \bar{M}$ ) [mm]
Ensaio A							
$c_1$	10,30	10,32	10,28	10,30	0,02	0,01	-0,30
$c_2$	9,62	9,68	9,58	9,62	0,05	0,03	0,38
$c_3$	10,28	10,26	10,30	10,28	0,02	0,01	-0,28
$c_4$	11,24	11,26	11,08	11,24	0,10	0,06	-1,24
Ensaio B							
$c_1$	9,30	9,24	9,28	9,28	0,03	0,02	0,72
$c_2$	9,44	9,60	9,60	9,60	0,09	0,05	0,40
$c_3$	10,08	10,08	10,06	10,08	0,01	0,01	-0,08
$c_4$	10,12	10,08	10,10	10,10	0,02	0,01	-0,10
Ensaio C							
$c_1$	9,68	9,68	9,66	9,68	0,01	0,01	0,32
$c_2$	10,10	10,00	10,04	10,04	0,05	0,03	-0,04
$c_3$	10,04	10,06	10,04	10,04	0,01	0,01	-0,04
$c_4$	9,90	9,92	9,90	9,90	0,01	0,01	0,10

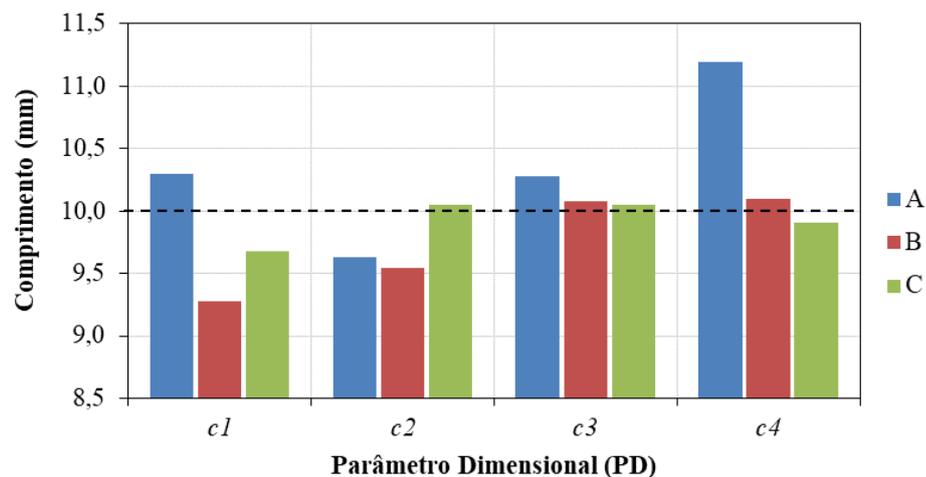


Figura 5.6 – Parâmetros dimensionais (PD) medidos em cada ensaio na peça orientada com ângulo de 0°. A linha tracejada corresponde à dimensão nominal (10 mm).

Tabela 5.6 – Medidas do Quadrado – Peça orientada com ângulo de 30° em relação à mesa do centro de usinagem.

PD	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão	Incerteza do tipo A	Desvio Dimensional
$c_n$	$(m_1)$	$(m_2)$	$(m_3)$	$(\bar{M})$	$(S)$	$\frac{S}{\sqrt{n}}$ [mm]	$(10 - \bar{M})$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]
Ensaio D							
$c_1$	8,92	8,92	8,96	8,92	0,02	0,01	1,08
$c_2$	9,62	9,62	9,50	9,62	0,07	0,04	0,38
$c_3$	9,42	9,42	9,38	9,42	0,02	0,01	0,58
$c_4$	9,18	9,12	9,12	9,12	0,03	0,02	0,88
Ensaio E							
$c_1$	9,42	9,40	9,40	9,40	0,01	0,01	0,60
$c_2$	10,52	10,40	10,40	10,40	0,07	0,04	-0,40
$c_3$	10,34	10,34	10,36	10,34	0,01	0,01	-0,34
$c_4$	9,40	9,36	9,34	9,36	0,03	0,02	0,64
Ensaio F							
$c_1$	10,20	10,20	10,20	10,2	0,00	0,00	-0,20
$c_2$	9,90	9,92	9,92	9,9	0,01	0,01	0,08
$c_3$	9,80	9,80	9,82	9,8	0,01	0,01	0,20
$c_4$	10,30	10,30	10,32	10,3	0,01	0,01	-0,30

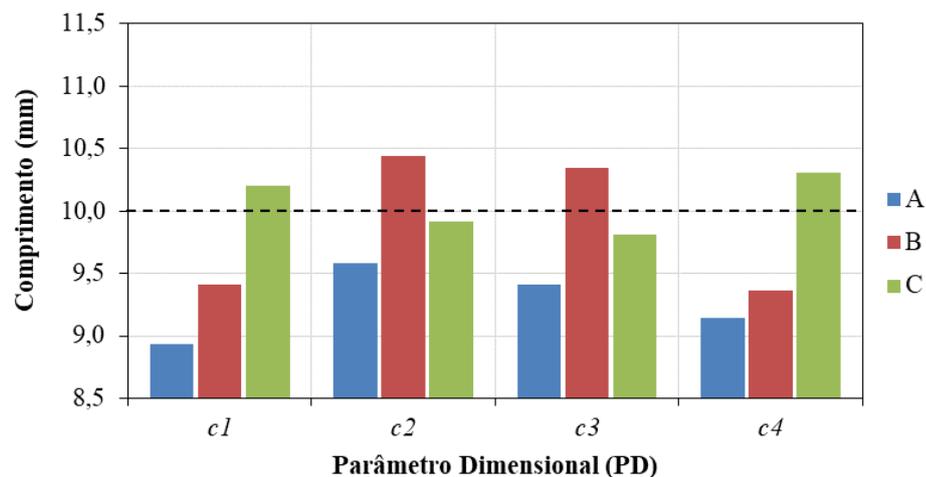


Figura 5.7 – Parâmetros dimensionais (PD) medidos em cada ensaio na peça orientada com ângulo de 30°. A linha tracejada corresponde à dimensão nominal (10 mm).

Tabela 5.7 – Medidas do Quadrado – Peça orientada com ângulo de 45° em relação à mesa do centro de usinagem.

PD	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão	Incerteza do tipo A	Desvio Dimensional
$c_n$	$(m_1)$	$(m_2)$	$(m_3)$	$(\bar{M})$	$(S)$	$\frac{S}{\sqrt{n}}$ [mm]	$(10 - \bar{M})$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]
Ensaio G							
$c_1$	9,74	9,72	9,68	9,72	0,03	0,02	0,28
$c_2$	10,38	10,36	10,30	10,36	0,04	0,02	-0,36
$c_3$	9,98	9,98	9,98	9,98	0,00	0,00	0,02
$c_4$	9,60	9,62	9,62	9,62	0,01	0,01	0,38
Ensaio H							
$c_1$	10,08	10,10	10,08	10,08	0,01	0,01	-0,08
$c_2$	9,40	9,44	9,44	9,44	0,02	0,01	0,56
$c_3$	9,70	9,74	9,74	9,74	0,02	0,01	0,26
$c_4$	10,60	10,62	10,58	10,60	0,02	0,01	-0,60
Ensaio I							
$c_1$	9,62	9,60	9,62	9,62	0,01	0,01	0,38
$c_2$	10,22	10,20	10,20	10,20	0,01	0,01	-0,2
$c_3$	9,98	9,98	9,98	9,98	0,00	0,00	0,02
$c_4$	9,58	9,56	9,58	9,58	0,01	0,01	0,42

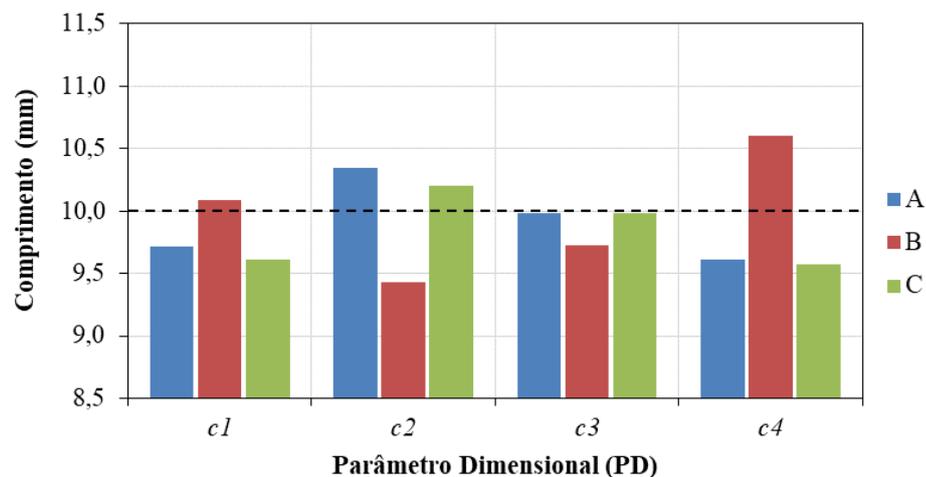


Figura 5.8 – Parâmetros dimensionais (PD) medidos em cada ensaio na peça orientada com ângulo de 45°. A linha tracejada corresponde à dimensão nominal (10 mm).

A Tabela 5.8 resume os desvios dimensionais obtidos nos diferentes testes realizados.

Tabela 5.8 – Média dos desvios dimensionais para os ensaios realizados.

<b>Ensaio</b>	<b>Média Desvio Dimensional [mm]</b>
Came 0°	-0,37
Came 30°	-0,26
Came 45°	-0,17
Círculo - Ensaio A	0,01
Círculo - Ensaio B	0,05
Círculo - Ensaio C	0,15
Quadrado 0° - Ensaio A	0,36
Quadrado 0° - Ensaio B	-0,23
Quadrado 0° - Ensaio C	-0,09
Quadrado 30° - Ensaio A	-0,73
Quadrado 30° - Ensaio B	-0,13
Quadrado 30° Ensaio C	0,05
Quadrado 45° Ensaio A	-0,08
Quadrado 45° Ensaio B	-0,03
Quadrado 45° Ensaio C	-0,15

A fim de avaliar a influência do parâmetro dimensional ( $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  e  $c_4$ ) e da orientação da peça sobre o desvio dimensional, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de dois fatores como intervalo de confiança de 5%. Os resultados são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Análise de variância para avaliar a influência da medida e da orientação sobre o desvio dimensional.

<b>Efeito</b>	<b>Soma Quad.</b>	<b>G.D.L.</b>	<b>Média Quad.</b>	<b>Teste F</b>	<b>Prob.</b>	<b>Influência significativa</b>
Orientação	0,481	2	0,240	1,071	0,358	N
PD	0,487	3	0,162	0,723	0,547	Não
Orientação x PD	0,938	6	0,156	0,696	0,654	Não
Erro	5,387	24	0,224	---	---	---

A Figura 5.9a mostra o gráfico do desvio dimensional em função do PD, enquanto a influência da orientação da peça sobre o desvio dimensional é exibida na Figura 5.9b. A

Figura 5.9c ilustra um gráfico de dois fatores do desvio dimensional em função da orientação da peça para os diferentes parâmetros dimensionais.

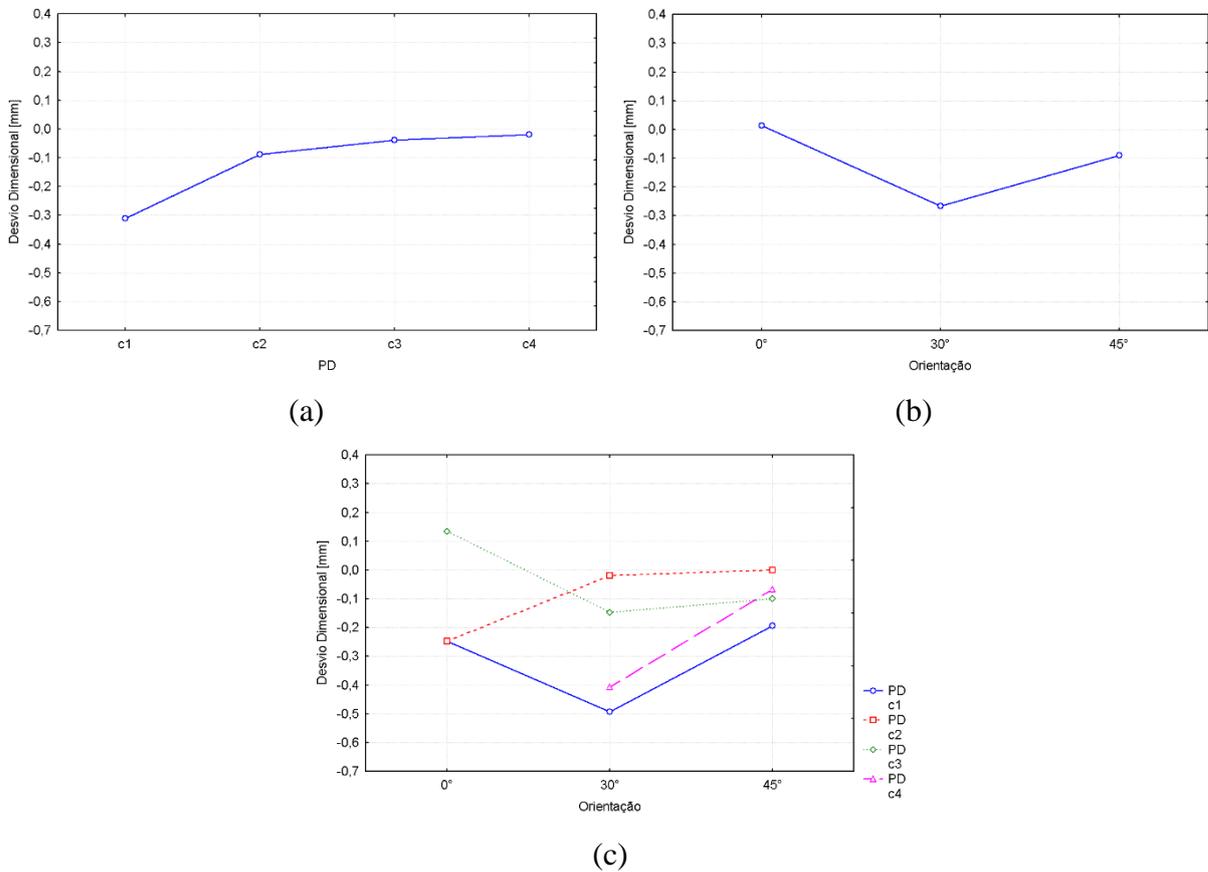


Figura 5.9 – Fatores influentes no desvio dimensional: (a) parâmetro dimensional; (b) orientação da peça; (c) parâmetro dimensional x orientação da peça.

Além dos desvios dimensionais, as medições realizadas nos ensaios das peças quadradas permitem avaliar também o desvio angular. Esse desvio é verificado através da inclinação dos canais verticais e horizontais respectivamente a partir das Equações (5.1) e (5.2), onde 56,5 mm é ponto onde  $c_2$  e  $c_4$  foram medidos. Esse valor corresponde à diferença entre o comprimento do rasgo e o raio da ferramenta.

$$\psi_{horizontal} = a \tan \frac{(c_2 - c_1)}{56,5} \quad (5.1)$$

$$\psi_{vertical} = a \tan \frac{(c_4 - c_3)}{56,5} \quad (5.2)$$

A Tabela 5.10 apresenta os desvios angulares das medições realizadas nos quadrados.

Tabela 5.10 – Desvios angulares nas usinagens das peças quadradas.

Ensaio	Orientação 0°			Orientação 30°			Orientação 45°		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$\psi_{horizontal}$	-0,690	0,325	0,365	0,710	1,014	-0,284	0,649	-0,649	0,588
$\psi_{vertical}$	0,973	0,020	-0,142	-0,304	-0,994	0,507	-0,365	0,872	-0,406

Aplicando a análise de variância de fator único com intervalo de confiança de 5%, para os desvios angulares horizontais e verticais, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 5.11. A Figura 5.10 também apresenta a influência das orientações nos desvios angulares.

Tabela 5.11 – Análise de variância para avaliar a influência da orientação sobre o desvio angular.

Efeito	Soma Quad.	G.D.L.	Média Quad.	Teste F	Prob.	Influência significativa
Desvio angular horizontal						
Orientação	0,349	2	0,174	0,386	0,694	Não
Erro	2,708	6	0,451	---	---	---
Desvio angular vertical						
Orientação	0,450	2	0,225	0,464	0,649	Não
Erro	2,909	6	0,484	---	---	---

Diferente do observado para a metodologia avaliada nos Testes 1 e 2, a ANOVA para os desvios dimensionais segundo a metodologia aplicada no Teste 3 (baseada na localização do vértice) indica a ausência de influências significativas sobre os resultados. Para o intervalo de confiança adotado, nem o local onde é realizada a medição do rasgo na peça (PD) nem a orientação na qual a mesma é posicionada na mesa do centro de usinagem CNC apresentam influência significativa sobre os desvios dimensionais e angulares. Isso indica que a metodologia desenvolvida apresenta consistência em sua aplicação e que os desvios são provenientes de outros fatores.

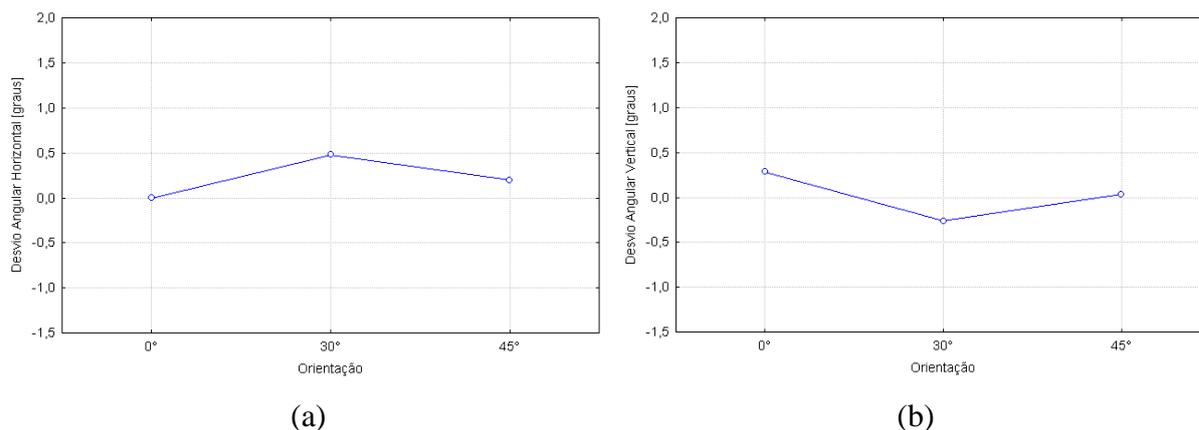


Figura 5.10 – Influência da orientação da peça no desvio angular: (a) horizontal, (b) vertical.

Um dos fatores que influenciam nos resultados é a câmera utilizada. Neste trabalho, foi utilizada uma câmera de baixo custo do tipo *WebCam* com resolução de  $1280 \times 720$  *pixels*. A utilização deste tipo de câmera permite uma avaliação do comportamento do sistema; porém, isso afeta a precisão dos resultados, uma vez que a relação *pixel/mm* é diretamente afetada. A utilização de câmeras do tipo *full HD* ( $1920 \times 1080$  *pixels*) ou *4K* ( $3840 \times 2160$  *pixels*) pode garantir melhores resultados. Além disto, a calibração dos parâmetros extrínsecos da câmera, identificação do sistema de coordenadas da mesa do centro de usinagem CNC e identificação do sistema de coordenadas da peça de trabalho são realizados em imagens separadas. Pequenas movimentações na câmera entre esses processos podem influenciar na calibração e na identificação precisa da relação *pixel/mm*, fator que pode estar associado com a diferença de precisão entre os ensaios realizados para peças com a mesma orientação.

Para os ensaios realizados sobre a came e o círculo foi aplicada a metodologia onde a imagem da peça real é relacionada à imagem no sistema CAD/CAM. Os maiores desvios dimensionais foram identificados nesses ensaios. Um dos fatores que pode ter influenciado nestes resultados é a quebra da continuidade da área da peça quando é realizada a etapa de binarização. A área é diretamente relacionada com a identificação do centroide da peça e, assim, falhas na área influenciam diretamente na identificação do sistema de coordenadas da peça, comprometendo a precisão.

Embora os testes de validação realizados para a investigação da viabilidade do uso industrial de uma visão computacional desenvolvida com base na metodologia proposta não atinjam todo o espectro de precisão exigido pela indústria, os resultados são promissores e indicam a viabilidade da aplicação industrial desta metodologia.

A comparação direta com outros sistemas de visão computacional para aplicações industriais, como apresentado por Silva, et al, 2017, Klanick e Senventer, 2010 e Araújo e Lins, 2020, apoia esta análise e atesta a viabilidade de aplicações futuras. Ni et al., 2020, projetou um sistema de posicionamento baseado em visão com uma precisão de 0,2 mm para o processamento de produtos eletrônicos. O sistema desenvolvido por Wan et al., 2019 para localização de peças fundidas apresentou repetitividade em 2 mm. Klanicnik e Senveter (2010) desenvolveram um sistema de visão para a detecção de zero-peça em fresadoras, com uma precisão estimada (com base na resolução da câmera) de 0,3 mm.

A funcionalidade mais semelhante foi apresentada por de Araújo e Lins, 2020, que desenvolveram um sistema de visão estéreo para a localização do zero-peça em centros de usinagem CNC que permite a medição 3-D das peças posicionadas.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto e desenvolvido um sistema de visão computacional para melhorar o referenciamento de peças em centros de usinagem CNC. O sistema utilizou uma câmera de baixo custo e permitiu a correção da trajetória da ferramenta em código G para uma peça posicionada aleatoriamente e orientada na mesa de trabalho da máquina-ferramenta.

A viabilidade de utilização do sistema desenvolvido foi validada experimentalmente. Os testes indicaram alguns entraves com desvios dimensionais máximos excedendo a faixa de precisão desejada para operações de usinagem que merecem ser estudados em trabalhos futuros.

A identificação dos pontos de interesse da peça e da máquina e a correção da trajetória da ferramenta através da reestruturação do código G são as maiores contribuições deste trabalho, conferindo à proposta um grande potencial de inovação na indústria de usinagem. Uma vez que a precisão do sistema de visão computacional pode ser melhorada através da seleção de diferentes câmeras, pela técnica de calibração extrínseca, pelas técnicas de iluminação e pelas técnicas de processamento digital de imagens – além da simples aproximação da câmera caso uma conversão *pixel/mm* mais vantajosa seja necessária, é seguro concluir que a metodologia desenvolvida apresenta um potencial para reduzir a perda de tempo com *setup* de máquina em centros de usinagem CNC.

### 6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O principal foco consiste na melhoria da precisão/exatidão do sistema desenvolvido. Para a aquisição de imagens, é interessante realizar testes utilizando câmeras com maiores resoluções que a utilizada neste trabalho (preferencialmente uma câmera 4K). Este equipamento possibilitaria uma maior relação *pixel/mm* e, assim, garantiria uma melhor precisão.

Além da câmera, sugerem-se testes da calibração de câmeras utilizando padrões de pontos no lugar dos padrões xadrez. Esse tipo de padrão pode reduzir incertezas devido à resolução da impressão, bem como redução de efeitos de *aliasing*.

Para a correção dos efeitos de quebra de continuidade de área, mencionado no **Capítulo 4**, pode-se realizar a interpolação dos pontos faltantes de forma a ter uma representação mais próxima da peça real. Além disso, pode-se aplicar outros métodos de

identificação do formato da peça, como métodos descritivos de assinatura ou método da cadeia.

O estudo e a aplicação de redes neurais artificiais e aprendizado de máquina com aplicação em visão computacional também podem auxiliar na obtenção de melhores resultados.

## REFERÊNCIAS

Araújo, P. R. M. e Lins, R. G. “Computer vision system for workpiece referencing in three-axis machining centers”. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 106, n.5-6, p. 1-14, 2020.

Batista, E. “A exposição na câmera de vídeo”. **Revista Zoom Magazine**. <http://www.fazendovideo.com.br/artigos/a-exposicao-na-camera-de-video.html>. Acesso em 11-08-2021.

Beralava, H., Pandey, R., Samudre, S. e Parpiyani, J. **Development of Machining Fixture to Improve Machining Lead Time of Helical Gearbox Case**. In: *Advances in Manufacturing Systems – Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Singapore: Springer, 2021.

Costa, F. S. S. **Estudo dos Ganhos de Produtividade e de Qualidade em Máquinas CNC com o Uso de Sistemas Toolsetter Laser**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia de Produção, Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2014.

Dib, M. H. M. **Fundamentos do Fresamento: Uma Aplicação em Microfresamento**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2013.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 7 ed., São Paulo: Artliber, 2009.

Ferraresi, D., Ruffino, R. T. e Pallerosi, C. A. **Usinagem dos Metais: Processo de Fresamento**. 3 ed., São Paulo: ABM, 1974.

Freund, J. E. **Estatística Aplicada**. 11 ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

Golnabi, H. e Asadpour, A. “Design and application of industrial machine vision systems”. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, vol. 23, n. 6, p. 630-637, 2007.

Gonzalez, R. C. e Woods, R. E. **Digital Images Processing**. Boston: Addison-Wesley, 1992.

Groover, M. **Automation, Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing**. 3 ed., New Jersey: Prentice-Hall, 2008.

Grassi, M. V. **Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Visão para Robô Industrial de Manipulação**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

He, W., Jiang, Z. e Ming, W. “A critical review for machining positioning based on computer vision”. **Measurement**, vol. 184, n.109973, 2021.

Jaharah, A. G., Choudhury, I. A., Masjuki, H. H. e Che Hassan, C. H. “Surface integrity of AISI H13 tool steel in end milling process”. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, vol. 4, n. 1, p. 88-92, 2009.

Jähne, B., Haussecker, H. e Geissler, P. **Handbook of Computer Vision and Applications, Vol 1: Sensors and Imaging**, San Diego: Academic Press, 1999.

Jain, R., Kasturi, R. e Schunck, B. G. **Machine Vision**, New York: McGraw-Hill, 1995.

Joshi, S. N. “Mechatronics and Manufacturing Automation, Module 7: CNC Programming and Industrial Robotics”. Lecture Note. **National Programme on Technology Enhanced Learning (NPTEL)**, 2021.

Kalpakjan, S. e Schmid, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 4 ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

Klančnik, S. e Senverter, J. “Computer-based workpiece detection on CNC milling machine tools using optical camera and neural networks”. **Advances in Production Engineering and Management**, vol. 5, p. 59-68, 2010.

Lavarda, C. **Experimentos de Física para o Ensino Médio e Fundamental com Materiais do Dia-a-Dia – Câmera Escura**. <http://www.2.fc.unesp.br/experimentosdefisica/>. Acesso em 02-10-2017.

Lim, J. S. **Two-Dimensional Signal and Image Processing**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990.

Marcicano, J. P. P. **Introdução ao Controle Numérico**. Notas de Aula. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/cnc.pdf>, Acesso em 11-08-2021.

Marques, C. C. S. C. **Um Sistema de Calibração de Câmeras**. Dissertação (Mestrado) em Matemática, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

Marques, O. F. e Vieira, H. N. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

Ni, Q., Li, D., Chen, Y. e Dai, H. “Visual positioning algorithm based on micro assembly line”. **Journal of Physics: Conference Series**, vol. 1626, n. 012023, 2020.

Pavim, A. X., Coan Jr., J. e da Silva, M. G. **Seminário em Sistemas de Visão Aplicações no Controle de Qualidade e Rastreabilidade**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

Pun, T., Gerig, G. e Ratib, O. “Image analysis and computer vision in medicine”. **Computerized Medical Imaging and Graphics**, vol. 18, n. 2, p. 85-96, 1994.

Rudek, M., Coelho, L. S. e Canciglieri Jr., O. “Visão computacional aplicada a sistemas produtivos: fundamentos e estudo de caso”. **Anais do XXI ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Salvador, 2001.

Russ, J. C. **The Image Processing Handbook**. 3 ed., New York: CRC Press, 1998.

Sathiyamoorthy, S. “Industrial application of machine vision”. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, vol. 3, p. 678-682, 2014.

Sharif, M. H. e Uyaver, S. “Astronomical objects detection in celestial bodies using computer vision algorithm”. **Annals of the CSITA-2017 – 3<sup>rd</sup> International Conference on Computer Science, Information Technology and Applications**, Dubai, 2017

Silva, R. F. A., Silva, J. B. A., Diniz, L. S., Nóbrega, L. H. M. S. e Silva, V. N. “Sistema para pré-ajustagem de ferramentas utilizando processamento de imagens aplicado a um centro de usinagem CNC”. **Revista Principia – Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, vol. 1, n. 36, p.141-156, 2017.

Smid, P. **CNC Programming Handbook**. 2 ed., Nova York: Industrial Press, 2003.

Stemmer, M. R., Orth, A., Roloff, M. L., Deschamps, F. e Pavim, A. X. **Apostila de Sistema de Visão**. Sistemas Industriais Inteligentes, Florianópolis, 2005.

Thamer, H., Weimer, D., Kost, H. e Scholz-Reir, B. “3D-computer vision for automation of logistics process”. In: **Efficiency and Innovation in Logistics**, Cham: Springer, p 67-75, 2014.

Vieira, Jr. M., Silva, J. M. A., Correr, I., Coppini, N. L. e Baptista, E. A. “Losses Caused by the Presetting of Tools by the Manual Method”. **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, Singapore, 2011.

Vos, P. “10 etapas simples para ampliar o desempenho na usinagem”. **Usinagem Brasil**, Artigos Técnicos, 2017. <http://www.usinagem-brasil.com.br/11739-10-etapas-simples-para-ampliar-o-desempenho-na-usinagem/>. Acesso em 11-08-2021.

Wan, G., Li, F. e Wang, G. “Visual positioning and grasping application of industrial robot for casting parts”. **Automation, Control and Intelligent Systems**, vol. 7, n. 1, p. 18-24, 2019.

Weck, M. **Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung**. 6 ed., Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.

Zhang, Z. “A flexible new machine technique for camera calibration”. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, vol. 22, n. 11, p 1330-1334, 2000.

## ANEXO I – Comandos G e M

G00	Rapid Linear Positioning	G55	Work Coordinate System 2 Selection
G01	Linear Feed Interpolation	G56	Work Coordinate System 3 Selection
G02	CW Circular Interpolation	G57	Work Coordinate System 4 Selection
G03	CCW Circular Interpolation	G58	Work Coordinate System 5 Selection
G04	Dwell	G59	Work Coordinate System 6 Selection
G07	Imaginary Axis Designation	G60	Single Direction Positioning
G09	Exact Stop	G61	Exact Stop Mode
G10	Offset Value Setting	G64	Cutting Mode
G17	XY Plane Selection	G65	Custom Macro Simple Call
G18	ZX Plane Selection	G66	Custom Macro Modal Call
G19	YZ plane Selection	G67	Custom Macro Modal Call Cancel
G20	Input In Inches	G68	Coordinate System Rotation On
G21	Input In Millimeters	G69	Coordinate System Rotation Off
G22	Stored Stroke Limit On	G73	Peck Drilling Cycle
G23	Stored Stroke Limit Off	G74	Counter Tapping Cycle
G27	Reference Point Return Check	G76	Fine Boring
G28	Return To Reference Point	G80	Canned Cycle Cancel
G29	Return From Reference Point	G81	Drilling Cycle, Spot Boring
G30	Return To 2nd, 3rd and 4th Ref. Point	G82	Drilling Cycle, Counter Boring
G31	Skip Cutting	G83	Peck Drilling Cycle
G33	Thread Cutting	G84	Tapping Cycle
G40	Cutter Compensation Cancel	G85	Boring Cycle
G41	Cutter Compensation Left	G86	Boring Cycle
G42	Cutter Compensation Right	G87	Back Boring Cycle
G43	Tool Length Compensation + Direction	G88	Boring Cycle
G44	Tool Length Compensation - Direction	G89	Boring Cycle
G45	Tool Offset Increase	G90	Absolute Programming
G46	Tool Offset Double	G91	Incremental Programming
G47	Tool Offset Double Increase	G92	Programming Of Absolute Zero
G48	Tool Offset Double Decrease	G94	Feed Per Minute
G49	Tool Length Compensation Cancel	G95	Feed Per Revolution
G50	Scaling Off	G96	Constant Surface Speed Control
G51	Scaling On	G97	Constant Surface Speed Control Cancel
G52	Local Coordinate System Setting	G98	Return To Initial Point In Canned Cycles
G54	Work Coordinate System 1 Selection	G99	Return To R Point In Canned Cycles

Figura I.1 – Lista de Comandos G.

M00	Program Stop
M01	Optional Stop
M02	End of Program
M03	Spindle On CW
M04	Spindle On CCW
M05	Spindle Stop
M06	Tool Change
M07	Mist Coolant On
M08	Flood Coolant On
M09	Coolant Off
M19	Spindle Orientation On
M20	Spindle Orientation Off
M21	Tool Magazine Right
M22	Tool Magazine Left
M23	Tool Magazine Up
M24	Tool Magazine Down
M25	Tool Clamp
M26	Tool Unclamp
M27	Clutch Neutral On
M28	Clutch Neutral Off
M30	End Program, Stop and Rewind
M98	Call Sub Program
M99	End Sub Program

Figura I.2 – Lista de Comandos M.