



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

ESTUDO E APLICAÇÃO DE MEDIÇÃO COM CÂMERA DE VÍDEO EM MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

por

MARLIO ANTONIO DA SILVA

Dissertação de Mestrado submetida à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do título de Mestre

João Pessoa - Paraíba
Janeiro - 2017

MARLIO ANTONIO DA SILVA

ESTUDO E APLICAÇÃO DE MEDIÇÃO COM CÂMERA DE VÍDEO EM MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre.

Orientador: Professor Dr. João Bosco de Aquino Silva

João Pessoa- Paraíba
Janeiro - 2017

S586e Silva, Marlio Antonio da.

Estudo e aplicação de medição com câmera de vídeo em máquinas de medição por coordenadas / Marlio Antonio da Silva.- João Pessoa, 2017.

107 f. : il.-

Orientador: Profº. Drº. João Bosco de Aquino Silva.
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT

1. Engenharia Mecânica . 2. Metrologia - Imagem. 3. Medição Sem Contato. 4. Medição Por Coordenadas - Máquina. 5. Microfuros.
I. Título.

UFPB/BC

CDU – 621(043)

ESTUDO E APLICAÇÃO DE MEDIÇÃO COM CÂMERA DE VÍDEO EM MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

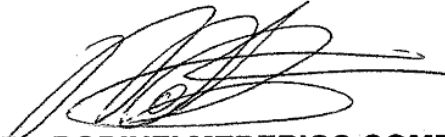
por

Marlio Antonio da Silva

Dissertação aprovada em 26 de janeiro de 2017



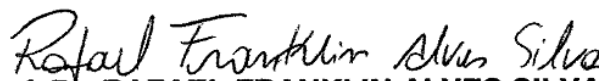
Prof. Dr. JOÃO BOSCO DE AQUINO SILVA
Orientador – UFPB



Prof. Dr. RODINEI MEDERIOS GOMES
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. JOSÉ CARLOS DE LIMA JUNIOR
Examinador Externo –UFPB



Prof. Dr. RAFAEL FRANKLIN ALVES SILVA
Examinador Externo –IFPB

DEDICATÓRIA

Com gratidão dedico a Deus, que fez com que todas as coisas contribuíssem para a concretização deste trabalho;

Com amor, dedico à minha esposa, Érica de Vasconcelos, minha maior motivação, que sempre acreditou na realização deste sonho;

Com orgulho, dedico aos meus pais, Marcos Antonio e Suetânia Ramos, meus primeiros e mais importantes orientadores.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, Érica, que muito me incentivou a investir no sonho de prosseguir na carreira acadêmica, sempre ao meu lado, ajudando a superar todos os obstáculos que surgiram.

Aos meus pais, Marcos e Suetânia, que sempre com muito esmero, me mostraram a importância do estudo e a continuidade no aprendizado, deixando claro que não há um fim das atividades para quem está disposto a aprender, ou como meu pai sempre diz: “Descanso só o eterno”.

Agradeço ao professor e orientador João Bosco, que têm sido inspiração desde o período da graduação em Engenharia Mecânica, tanto pelo seu contínuo empenho na pesquisa e ensino, como por sua humildade, que certamente me influenciaram a seguir nessa fascinante área.

Ao professor José Carlos, que com sua experiência, forneceu um enorme apoio durante o período de elaboração desta dissertação, oferecendo conselhos importantíssimos, enriquecendo assim o conteúdo deste trabalho.

Ao técnico do LEP, Manoel Fideles (vulgo chefe), que sempre com muita dedicação prestou todo o suporte necessário em cada uma das medições realizadas nesta dissertação.

Aos antigos amigos que tornei a encontrar no LEP, Francisco Augusto, Joab Sobreira, Rafael Franklin e Wagner Correia, aos quais tive o prazer de trabalhar lado a lado.

Aos novos amigos e companheiros de trabalho do LEP, Fábio Barroso, Henrique Nóbrega, Julyana Quirino, Pedro Valentim e Verilton Nunes, que sempre prestativos, nunca mediram esforços para ajudar em um momento de dificuldade.

Aos colegas da pós-graduação, Caio Cezar, Gustavo de Sá, Herculano Telino, Kamilla Henrique, que ajudaram bastante a suportar a carga dessa caminhada, tornando-a muito mais agradável.

À CAPES pelo suporte financeiro.

Quanto mais aumenta o nosso conhecimento, mais a nossa ignorância se evidencia. (John F. Kennedy)

RESUMO

É evidente que com o crescente avanço da indústria manufatureira exista a necessidade de um controle de qualidade eficiente, que atenda essa demanda produzida dentro de um espaço de tempo cada vez mais curto. Em função disto, as Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC) são amplamente empregadas para inspeção de diversos componentes na indústria atual, pois além de contarem com o Comando Numérico Computacional (CNC) – o que torna o processo de medição muito mais rápido do que os métodos convencionais – podem ainda medir inúmeras geometrias, uma vez que dispõem de diversos sensores que são adequados para várias situações, por conseguinte, dificilmente haverá uma configuração que a MMC não possa medir. As medições efetuadas por uma MMC podem ser divididas em dois grandes grupos: as medições por contato e as medições sem contato. As medições por contato utilizam o sensor de toque, conhecido como apalpador, que coleta pontos coordenados na peça medida com a deflexão do sensor quando houver o toque. As medições sem contato podem ser realizadas com o sensor *laser* ou uma câmera digital. O presente trabalho de dissertação de mestrado tem como finalidade apresentar algumas aplicações de medições sem contato com a utilização de uma MMC, que incorpora uma câmera CCD (*Charge-Coupled Device*), em componentes como bicos injetores de combustível, placas de circuito impresso e esferas de alta exatidão, visto que esses elementos apresentam geometrias com dimensões inferiores a 4 mm, impossibilitando medições com o uso do sistema de medição por contato convencional.

Palavras-chave – metrologia por imagem, medição sem contato, máquina de medição por coordenadas, microfuros.

ABSTRACT

It is evident that with the increasing advance of the manufacturing industry there is a need for an efficient quality control that meets this demand produced within an increasingly shorter period of time. As a result of this, Coordinate Measuring Machines (CMMs) are widely used for inspection of various components in the current industry, in addition to having the Computer Numeric Control (CNC) - which makes the measurement process much faster than conventional methods - can still measure numerous geometries, since they have several sensors that are suitable for various situations, therefore, there is hardly a configuration that the CMM can't measure. Measurements made by a CMM can be divided into two groups: contact measurements and non-contact measurements. Contact measurements use the touch sensor, known as a probe, which collects coordinate points on the measured piece with the sensor deflection when touching. Non-contact measurements can be performed with the laser sensor or a digital camera. The present work of master dissertation aims to present some applications of non-contact measurements with the use of a CMM, which incorporates a Charge-Coupled Device (CCD) camera, in components such as fuel injectors nozzles, printed circuit boards and sphere of high accuracy, since these elements have geometries with dimensions less than 4 mm, making it impossible to measure with the use of the conventional contact measurement system.

Keywords – metrology by image, non-contact measurement, coordinate measuring machine, micro-holes.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	18
APRESENTAÇÃO.....	18
1.1 INTRODUÇÃO.....	18
1.2 OBJETIVOS GERAIS	19
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	20
CAPÍTULO 2.....	22
MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS	22
2.1 INTRODUÇÃO.....	22
2.2 DESENVOLVIMENTO DA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS ...	22
2.3 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DAS MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	24
2.4 ESTRUTURA BÁSICA DE UMA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	25
2.5 TIPOS DE MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS E SEUS ACIONAMENTOS.....	27
2.5.1 Tipo <i>Gantry</i>	27
2.5.2 MMC manual.....	28
2.5.3 MMC assistida por computador	29
2.5.4 MMC diretamente controlada por computador (DCC)	29
2.6 SENSORES	30
2.6.1 Sensores com contato.....	30
2.6.2 Sensores sem contato	33
2.6.2.1 Medição unidimensional com a utilização do sensor laser	33
2.6.2.2 Medição de distância com utilização de sensores multidimensionais	34
2.6.2.3 Sensores de processamento de imagens	35
2.7 FONTES DE ERROS EM MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS	36
2.7.1 Erros devido à estrutura da MMC	37
2.7.2 Erros devidos a peças medida	38

2.7.3 Erros devido à estratégia de medição	39
2.7.4 Erros devidos ao algoritmo de ajustagem e avaliação.....	40
2.7.5 Erros devidos aos fatores externos.....	41
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
CAPÍTULO 3.....	42
FUNDAMENTOS DA MEDIÇÃO POR IMAGENS	42
3.1 INTRODUÇÃO.....	42
3.2 A VISÃO DE MÁQUINA APLICADA NA METROLOGIA	42
3.3 DISPOSITIVOS USADOS PARA CAPTURA DE IMAGENS	44
3.3.1 Lentes.....	45
3.3.2 Câmeras digitais	47
3.3.3 Sistemas de medição por imagem	47
3.3.4 Sensores de imagens	48
3.4 PARÂMETROS DE CÂMERAS E LENTES	50
3.4.1 Distância focal.....	50
3.4.2 Abertura	51
3.4.3 Profundidade de campo	52
3.4.4 Valor e tempo de exposição.....	52
3.5 ILUMINAÇÃO	53
3.6 FATORES QUE INFLUENCIAM AS MEDIÇÕES POR IMAGEM.....	56
3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
CAPÍTULO 4.....	58
CARACTERÍSTICAS E PRINCIPAIS FERRAMENTAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO POR IMAGEM VISIONPAK	58
4.1 INTRODUÇÃO.....	58
4.2 CARACTERÍSTICAS DE UM SOFTWARE UTILIZADO EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO POR IMAGEM.....	58
4.3 JANELAS BÁSICAS DO VISIONPAK.....	59
4.4 ILUMINAÇÃO	60
4.4.1 Iluminação coaxial.....	61
4.4.2 Iluminação por anel.....	61

4.4.3 Modo de saturação de luz	62
4.5 FOCALIZAÇÃO	62
4.5.1 O foco automático	62
4.5.1.1 O intervalo de varredura	64
4.5.1.2 Velocidade de varredura	65
4.5.2 Focalização pelo nível de contraste	65
4.6 AS FERRAMENTAS DE MEDIÇÃO	66
4.6.1 Ferramentas de detecção de arestas	67
4.6.1.1 Ferramenta de ponto	68
4.6.1.2 Ferramenta de caixa	69
4.6.1.3 Ferramenta de círculo e ferramenta de arco	69
4.6.1.4 Ferramenta de máximo e mínimo	70
4.6.2 Ferramentas complementares	71
4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
CAPÍTULO 5.....	73
MATERIAIS, APLICAÇÕES PRÁTICAS E DISCUSSÃO DE	
RESULTADOS.....	73
5.1 INTRODUÇÃO.....	73
5.2 MATERIAIS	73
5.2.1 A Máquina de medição por coordenadas	73
5.2.1.1 O sensor câmera	75
5.2.2 Guia de calibração	76
5.2.3 Bicos injetores de combustível.....	77
5.2.4 Placas de circuito impresso	79
5.2.5 Esferas de alta exatidão.....	80
5.2.6 Engrenagens	80
5.3 APLICAÇÕES PRÁTICAS USANDO OS SISTEMAS QVP E VISIONPAK.....	81
5.3.1 Definição do sistema de coordenadas local.....	82
5.3.2 Medições dos diâmetros dos furos de bico injetores.....	83
5.3.3 Medição de uma placa de circuito impresso	85
5.3.4 Medição de uma esfera de alta exatidão	88
5.3.5 Medição de uma engrenagem usada em relógio	88

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
5.4.1 Medição das discordâncias entre o sensor de contato e o QVP	91
5.4.2 Medições dos bicos injetores de combustível	92
5.4.3 Medições dos parâmetros da placa de circuito impresso	95
5.4.4 Medições do diâmetro da esfera de alta exatidão	95
5.4.5 Medição do diâmetro de uma engrenagem usada em relógio	96
5.4.6 Discussões dos resultados	97
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
CAPÍTULO 6.....	99
CONCLUSÃO	99
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
ANEXO A.....	107
COEFICIENTES T DE <i>STUDENT</i>.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Classificação das lentes de acordo com a resolução.....	46
Tabela 5.1: Especificações técnicas do sensor câmera QVP.....	76
Tabela 5.2: Medições das discordâncias com a utilização da guia de calibração	92
Tabela 5.3: Valores da medição dos diâmetros do bico injetor de combustível 1	93
Tabela 5.4: Valores da medição dos diâmetros do bico injetor de combustível 2	93
Tabela 5.5: Valores da medição dos diâmetros do bico injetor de combustível 3	94
Tabela 5.6: Valores da medição dos diâmetros do bico injetor de combustível 4	94
Tabela 5.7: Valores da medição dos parâmetros da placa de circuito impresso	95
Tabela 5.8: Valores da medição dos parâmetros da esfera de alta exatidão.....	96
Tabela 5.9: Valor da medição do diâmetro de uma engrenagem	97
Tabela A.1: Coeficientes t de <i>Student</i>	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Máquina de Medição por Coordenadas	23
Figura 2.2: Natureza da medição por coordenadas.....	25
Figura 2.3: Estrutura básica de uma MMC	26
Figura 2.4: Máquina de medição por coordenadas tipo <i>Gantry</i>	28
Figura 2.5: Deslocamento devido ao toque do sensor na peça.....	31
Figura 2.6: Esquema descritivo do apalpador comutador (esquerda) e o apalpador medidor (direita)	32
Figura 2.7: Princípio de funcionamento dos sensores laser por triangulação	34
Figura 2.8: Medição através de sensores de distância multidimensionais	35
Figura 2.9: Principais fontes de erros em uma Máquina de Medição por Coordenadas	37
Figura 2.10: Erros geométricos de uma MMC A) Erros referentes a cada eixo de translação B) Erros de ortogonalidade entre dois pares de eixos coordenados.	38
Figura 2.11: Influência da distribuição de pontos na medição	40
Figura 3.1: Representação das etapas de um sistema de visão computacional	43
Figura 3.2: Esquema descritivo da captura de imagem através de um dispositivo	45
Figura 3.3: Etapas dos processos em um sistema de medição por imagem	48
Figura 3.4: Elementos fotossensíveis dos sensores CCD (esquerda) e CMOS (direita)	49
Figura 3.5: Representação da distância focal em câmeras	51
Figura 3.6: Representação da profundidade de campo.....	52
Figura 3.7: Iluminação frontal difusa	54
Figura 3.8: Iluminação direcional.....	54
Figura 3.9: Iluminação por anel.....	55
Figura 3.10: Iluminação diascópica.....	56
Figura 4.1: Janela principal do VISIONPAK.....	59
Figura 4.2: Janela de iluminação	61
Figura 4.3: Ferramenta de foco automático (esquerda) e foco de superfície (direita).....	63
Figura 4.4: Percurso de varredura durante a execução do foco automático	64
Figura 4.5: Barras do nível de contraste da imagem	66
Figura 4.6: Representação da detecção de borda em um circuito impresso	67
Figura 4.7: Ícone da ferramenta de ponto (esquerda) e exemplo de medição utilizando a ferramenta de ponto (direita)	68

Figura 4.8:Ícone da ferramenta de caixa (esquerda) e exemplo de medição utilizando a ferramenta de caixa (direita).....	69
Figura 4.9:Ícone da ferramenta de circulo (a); exemplo de medição com a ferramenta de circulo (b); ícone da ferramenta de arco (c); exemplo de medição usando a ferramenta de arco (d).....	70
Figura 4.10:Ícone da ferramenta de máximo (a); exemplo de medição com a ferramenta de máximo (b); ícone da ferramenta de mínimo (c); exemplo de medição usando a ferramenta de mínimo (d).....	71
Figura 5.1: MMC modelo Crysta-Apex S 7106	74
Figura 5.2: Sensor para medição com contato (a); sensor câmera QVP e o sensor <i>laser</i> (b) da MMC	74
Figura 5.3: Sensor câmera QVP	75
Figura 5.4: Guia de calibração.....	77
Figura 5.5: Bicos injetores de combustível de carros.....	78
Figura 5.6: Microfuros do bico de injetor de combustível de carro	78
Figura 5.7: Bico injetor de combustível de motocicleta de 12 furos.....	79
Figura 5.8: Placa de circuito impresso	79
Figura 5.9:Esfera de alta exatidão	80
Figura 5.10: Engrenagens.....	81
Figura 5.11: Exemplo dos efeitos da saturação na medição de um bico injetor de combustível: (a) Imagem com saturação de luz; (b) Imagem com a iluminação ajustada.....	82
Figura 5.12: Representação das características coletadas para determinação da origem do sistema coordenado	83
Figura 5.13: Procedimento de medição do bico injetor de combustível 1	84
Figura 5.14: Medição do furo 2 do bico injetor de combustível 4	85
Figura 5.15: Representação dos parâmetros controlados na fabricação de PCI.....	86
Figura 5.16: Determinação do isolamento entre trilhas.....	86
Figura 5.17: Determinação da largura de pista.....	87
Figura 5.18: Medição da distância cobre-furo.....	87
Figura 5.19: Medição do diâmetro da esfera de alta exatidão	88
Figura 5.20: Medição da engrenagem: (a) Captura de pontos; (b) Círculo gerado pelo <i>software</i>	89

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
d	Diâmetro do diafragma
DCC	<i>Direct Computer Controlled</i>
EV	<i>Exposure Value</i>
f	Distância focal
$\bar{I}$	Média das indicações
I_i	i-ésima indicação
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LEP	Laboratório de Engenharia de Precisão
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
n	Número de medições realizadas
N	Valor de abertura relativa
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PCI	Placa de circuito impresso
QVP	<i>Quick Vision Probe</i>
Re	Repetibilidade
SMI	Sistema de Medição por Imagem
t	Coeficiente t de <i>Student</i> com 95,45% de probabilidade e $n-1$ graus de liberdade
t_{EXP}	Tempo de exposição
u	Incerteza-padrão obtida a partir da amostra
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
ν	Número de graus de liberdade
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda da indústria por processos automatizados, especialmente no que se referem à inspeção de peças, as máquinas de medição por coordenadas se tornaram imprescindíveis por sua versatilidade e eficiência em diversas aplicações. Esses instrumentos são capazes de localizar pontos em um espaço tridimensional, o que possibilita agilidade de execução bem como a realização de tarefas complexas. Além disso, são integrados com computadores que apresentam uma interface para sua automatização.

As MMCs (Máquinas de Medição por Coordenadas) podem executar medições de componentes através de sensores de contato, como o sensor de toque (*Touch Trigger*), incluindo também os sensores sem contato, como o sensor *laser* e o sensor câmera. A escolha do sensor a ser utilizado em uma medição depende da complexidade e/ou geometria da peça a ser medida, apresentando assim vantagens e desvantagens em cada situação, pois não há sensor que seja capaz de executar todas as tarefas metrológicas de maneira satisfatória (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

Devido à capacidade de detectar um ponto diretamente sobre um componente a ser medido, o sensor de toque é amplamente utilizado em inspeção de ângulos, formas, posições e dimensões de padrões geométricos. Porém, apresentam algumas limitações quando há necessidade de inspeção em geometrias complexas, ou ainda, na medição de pequenas cavidades que impossibilitem o acesso do sensor, em, por exemplo, microfuros. Outro fator importante na utilização dos sensores de toque é a rigidez dos componentes inspecionados, essa propriedade deve ser elevada suficiente para que não ocorra a deformação dos elementos medidos (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

Com o objetivo de atender essas limitações apresentadas pelo sensor de toque, os sensores sem contato são indicados para inspeção de componentes como placas de circuito impresso, que apresentam bordas que não podem ser detectadas pela esfera do sensor de toque, como também para verificação de geometrias não triviais, a exemplo de painéis de asas

de avião. O sensor *laser* consiste na emissão do feixe de luz sobre uma superfície, e concentra a dispersão difusa da luz nos fotodetectores. Entretanto se as superfícies do componente forem polidas, haverá difusão de luz insuficiente retornando para os fotodetectores (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

A utilização do sensor câmera se justifica quando há necessidade de inspecionar peças pequenas e de geometria complexas (SEUNG-WOO, 1996). Existem, ainda, componentes que possam ser suficientemente flexíveis, que possam deformar-se devido ao esforço exercido pelo sensor de toque. Este sensor consiste basicamente na montagem de uma câmera de exatidão posicionada em um dos eixos coordenados da MMC, onde a imagem é captada e então analisada pelo *software*, que por sua vez divide a imagem em *pixels* – que são elementos de imagem –, o que torna possível a inspeção da peça (HOCKEN; PEREIRA, 2012). Com o objetivo de verificar as limitações da utilização do sensor câmera no campo da metrologia dimensional, De Chiffre e Hansen (1995), consideraram a influência exercida pelos seguintes fatores: sensor, iluminação, objetos, plano de fundo, sistema óptico e o sistema mecânico.

Diante disso, este trabalho de mestrado tem como objetivo apresentar a importância da utilização da metrologia por imagem na inspeção de peças dos setores automotivo e microeletrônico. Para o setor automotivo, como por exemplo, a inspeção do diâmetro dos microfuros do bico injetor de combustível. Já no setor microeletrônico a inspeção de placas de circuitos impressos, por exemplo, a distância entre trilhas desses componentes. Em ambos os casos as dimensões das geometrias a serem inspecionadas são consideradas microdimensões, tornando-se inviável o uso dos sensores de toque convencional ou o sensor *laser*.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

Estudar os principais fundamentos da metrologia por imagem utilizando uma câmera de vídeo CCD (*Charge-Coupled Device*) incorporada a uma máquina de medição por coordenadas com múltiplos sensores.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar as principais técnicas de medição com a utilização de Máquinas de medição por coordenadas em modelos manufaturados.
- Descrever os princípios da metrologia por imagem e os principais parâmetros que influenciam os resultados apresentados na medição por imagem.
- Utilizar o sistema VISIONPAK da MMC modelo CRYSTA-APEX S 7106, pertencente ao Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da Universidade Federal da Paraíba, para realizar a análise dos parâmetros de medição utilizando este sistema.
- Apresentar aplicações da visão de máquina em componentes como bico injetor de combustível, esferas de calibração, placas de circuitos impressos e engrenagens de pequeno porte utilizadas em componentes como relógios.
- Discutir sobre os resultados obtidos nas medições com a utilização da câmera de vídeo.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em 6 (seis) capítulos, nos quais os seguintes assuntos são abordados:

O capítulo 2 (dois) trata acerca do desenvolvimento das Máquinas de Medição por Coordenadas ao longo dos anos, e como se tornaram instrumentos poderosos na inspeção geométrica da indústria atual, além de apresentar seus princípios de funcionamento, estrutura básica e métodos de medição de modelos manufaturados.

O capítulo 3 (três) apresenta uma introdução aos princípios da metrologia por imagem, com os conceitos fundamentais que sustentam a aplicação de câmeras em MMCs, as estruturas básicas e os tipos de câmeras utilizadas em medições e as influências de alguns fatores sobre o resultado de inspeções dos objetos de trabalho.

No capítulo 4 (quatro) são descritas as principais funções disponíveis pelo *software* aplicado neste trabalho para as medições das peças inspecionadas. O *software* em questão é o VisionPak, que processa as imagens capturadas pelo sensor câmera, possibilitando a inspeção de diversos parâmetros geométricos, como bordas, furos, altura, entre outros fatores aos quais se deseja inspecionar durante as medições.

O capítulo 5 (cinco) aborda acerca dos resultados obtidos através de medições em alguns componentes, visando apresentar as principais vantagens da aplicação da metrologia por imagem em MMCs. Adicionalmente, os resultados serão analisados e discutidos.

No capítulo 6 (seis) são apresentadas as conclusões do corrente estudo, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão tratados os assuntos concernentes aos fundamentos da medição por coordenadas, os principais aspectos das Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC), seu desenvolvimento ao longo dos anos e como vem atendendo as diversas necessidades presentes na indústria atual.

2.2 DESENVOLVIMENTO DA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

A primeira máquina de medição por coordenadas foi criada no final da década de 50 pela empresa Ferranti, Ltd., na Escócia, com o intuito de aprimorar a medição conferindo-lhe maior velocidade e rapidez na execução. O que impulsionou o desenvolvimento da máquina de medição por coordenadas foi o fato de que na medida em que os processos de usinagem se tornaram automatizados - com peças sendo confeccionadas em minutos mediante a utilização de máquinas de controle numérico – as inspeções dessas peças, por outro lado, levavam horas para serem concluídas (SLADEK, 2016).

Assim, Harry Ogden, engenheiro mecânico da Ferranti, Ltd., desenvolveu uma máquina de medição mecânica, disposta de um *display* mostrador para tornar mais rápida a inspeção das peças confeccionadas. Essa máquina tinha o eixo X com curso de 610 mm, o eixo Y com 381 mm e o eixo Z com 254 mm, apresentava ainda resolução de 0,012 mm e exatidão de 0,025 mm. (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

Criada em 1962, a Digital Electronic Automation (DEA) foi a primeira empresa dedicada à fabricação de MMC. A formação da empresa se deu após Franco Sartorio, engenheiro do controle de qualidade da Fiat, na Itália, perceber a falta de avanço tecnológico no que se referia ao conhecimento sobre medição, na época, o que o induziu a pesquisar em outros países como as aferições eram realizadas. Sartorio, porém pôde constatar que as companhias possuíam o mesmo problema que a empresa italiana, o que tornava ineficiente a

atividade de medir placas de superfícies. Existindo, então, a oportunidade de atender essa necessidade comum entre as empresas, Franco Sartorio juntamente com Giorgio Minucciani e Luigi Lazzaroni formaram a DEA (HOCKEN; PEREIRA, 2012). Outras empresas foram criadas, tornando cada vez mais competitivo o mercado, o que impulsionou o desenvolvimento tecnológico das máquinas de medição por coordenadas.

No Japão, a empresa Mitutoyo iniciou o desenvolvimento de MMCs em 1968, onde constatou as vantagens de realizar inspeções através do uso da máquina de medição por coordenadas, integrando também as medições no eixo Z. Em 1980, a Mitutoyo apresentou a primeira MMC diretamente controlada por computador (HOCKEN; PEREIRA, 2012), e, até os dias atuais, a empresa é uma das principais fornecedoras de MMC no âmbito mundial. A Figura 2.1 mostra uma das máquinas produzidas por essa empresa:



Figura 2.1: Máquina de Medição por Coordenadas
Fonte: MITUTOYO, 2016

De acordo com Sladek (2016), o desenvolvimento da tecnologia computacional juntamente com o avanço da ciência da computação, foram os fatores que tornaram possíveis o uso completo dos fundamentos dos cálculos de expansão para geometria vetorial e gaussiana. Em função disto, a utilização destes fundamentos juntamente com a técnica de

identificação de pontos em uma superfície da peça medida, impulsionou a construção da primeira máquina de medição por coordenadas controlada numericamente, apresentada por Zeiss. O modelo em questão foi a máquina de medição UMM 550, apresentada em 1973, marcando, com isso, o nascimento da tecnologia por coordenadas moderna, bem como seu uso na indústria manufatureira.

Com a utilização de controladores CNC nas máquinas de medição por coordenadas, tantos os erros - que anteriormente eram devido às ações do operador - foram diminuídos, como também as medições passaram a ser realizadas mais rapidamente. Então, as máquinas de medição por coordenadas passaram a serem utilizadas desde a concepção do processo produtivo até a inspeção geométrica dos componentes fabricados, integrando cada vez mais o setor de manufatura (MARTIN, 2010).

2.3 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DAS MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Podendo ser operadas tanto manualmente como automaticamente, as máquinas de medição por coordenadas baseiam-se no princípio da aquisição de pontos no espaço tridimensional, onde as coordenadas (x, y, z) são registradas sobre a peça medida, possibilitando, então, a realização da inspeção geométrica do elemento.

A primeira MMC dispunha apenas de um leitor digital que indicava a localização central do sensor de toque, o que tornava possível a medição de comprimentos de serem calculadas manualmente. Entretanto, com o avanço da tecnologia, os computadores foram integrados às MMC com a utilização de programas computacionais específicos que permitiram o desenvolvimento de características geométricas sofisticadas, automação da MMC, correção de erros geométricos, compensação de temperatura, análises de dados e rede de comunicação para integração entre os sistemas (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

De acordo com Rolim (2003), os programas computacionais, que possibilitam as medições realizadas pelas MMCs, utilizam algoritmos que, por sua vez, usam as coordenadas captadas pelo sensor para obter as geometrias substitutas, por exemplo, círculo, plano, esfera, entre outras. Os conceitos acerca das geometrias substitutas estão baseados nas normas ISO 2004a; ASME 2009; ISO 2005b. Orrego, Di Giacomo e Abackerli (2000) acrescentam, ainda, que após realizada a captação dos pontos coordenados sobre a peça medida, as características

principais de suas geometrias substitutas são comparadas às dimensões nominais e as tolerâncias descritas no projeto da peça.

Os ajustes dos pontos coordenados podem ser feitos utilizando-se alguns modelos matemáticos, entretanto, o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) continua sendo o mais utilizado atualmente pelos fabricantes de MMCs (ROLIM, 2003). A Figura 2.2 exemplifica como essa técnica de medição ocorre em uma máquina de medição por coordenadas.

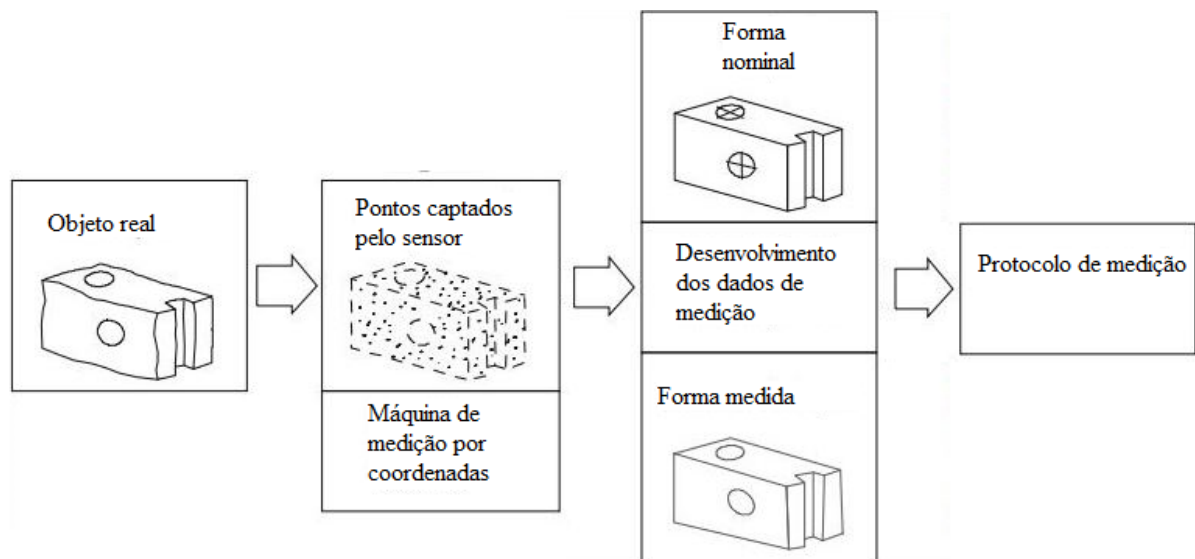


Figura 2.2: Natureza da medição por coordenadas
Fonte: Adaptado de Sladek (2016, p. 18)

Seguindo o esquema descritivo mostrado na Figura 2.2:

- O objeto real é medido através do sensor mais indicado;
- Os pontos captados pela MMC são confrontados com as geometrias nominais - as quais o *software* da máquina utiliza como padrão;
- Havendo a comparação da geometria medida com a nominal utilizada, têm-se então o protocolo de medição com os seus devidos resultados.

2.4 ESTRUTURA BÁSICA DE UMA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

As máquinas de medição por coordenadas são formadas a partir de um conjunto de sistemas que compõem a sua estrutura, esses sistemas que integram a MMC são constituídos de equipamentos mecânicos e eletroeletrônicos que funcionam juntamente com uma unidade

de processamento de um computador, tendo assim a associação completa dos conceitos que definem um sistema mecatrônico. A Figura 2.3 apresenta a estrutura básica de uma MMC.

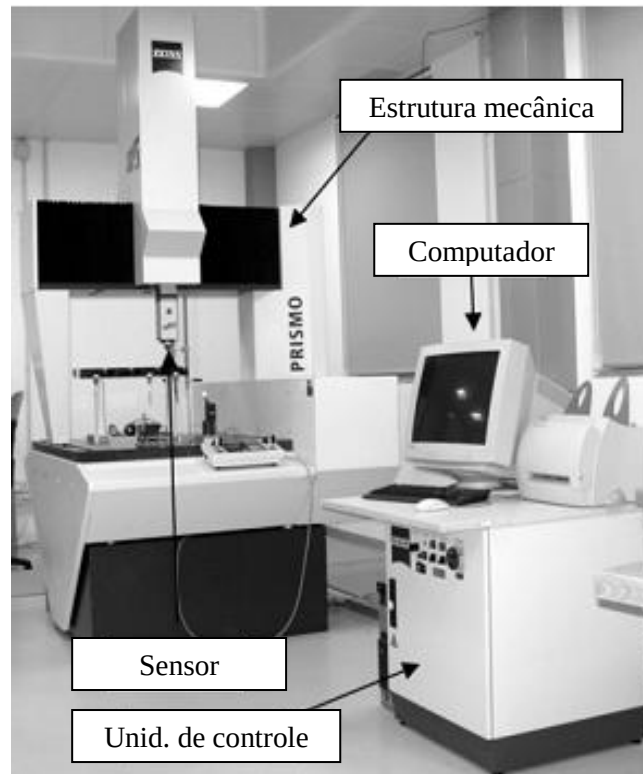


Figura 2.3: Estrutura básica de uma MMC
Fonte: Adaptado de Colosino e Senin (2011, p. 113)

A composição básica de uma máquina de medição por coordenadas consiste nos seguintes sistemas:

- **A sua estrutura mecânica:** Comporta os eixos do sistema cartesiano e seus respectivos transdutores de deslocamento como uma régua óptica linear ou um sistema laser de medição. Os eixos coordenados são ainda dotados de guias aerostáticas, por onde o cabeçote de medição se movimenta ao longo do percurso. De acordo com Andrade (2015), as mesas metrológicas montadas na MMC desempenham um papel importantíssimo na engenharia de precisão, pois são utilizadas como superfícies de referência nas inspeções de componentes.
- **O cabeçote de medição:** Comporta os sensores de medição.
- **A unidade de controle:** De acordo com Rolim (2003), exerce a importante função de iteração entre os sistemas que compõem a MMC, a exemplo dos transdutores de

deslocamento, os sensores de medição, motores de acionamento e equipamentos periféricos.

- **O computador:** Que operando com o *software* de medição, calcula os resultados das inspeções realizadas com a utilização da MMC. Impressoras e outros periféricos podem integrar este conjunto para a apresentação dos resultados obtidos no trabalho.

Apesar de, usualmente, as máquinas de medição por coordenadas apresentarem três eixos coordenados, essas máquinas podem, ainda, possuir um mesa rotatória - o que acrescenta mais um eixo coordenado à sua estrutura. Além disto, há possibilidade de implementação de eixos para a orientação da ponta do cabeçote, conferindo diversas posições para o mesmo.

2.5 TIPOS DE MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS E SEUS ACIONAMENTOS

Existem diversas configurações as quais as MMCs podem ser encontradas. A ABNT NBR ISO 10360-1:2010 determina os tipos de máquinas de medição por coordenadas, onde cada uma é destinada para a aplicação mais apropriada. Em seu trabalho, Lima Jr (2003) apresenta as configurações mais comuns de MMCs usadas na indústria, no entanto, o tipo *Gantry* merece destaque devido ao seu porte e aplicações, conforme pode ser verificado no ponto 2.5.1.

2.5.1 Tipo *Gantry*

Dentro das configurações existentes, esse tipo de MMC (*vide* Figura 2.4) destaca-se por ser principalmente utilizada em medição de peças de grande porte (volume de 10 m³ ou maior) na indústria, como no setor automobilístico e aeroespacial (GINIOTIS; HOPE, 2014). A Figura 2.4 mostra uma MMC do tipo *gantry*:

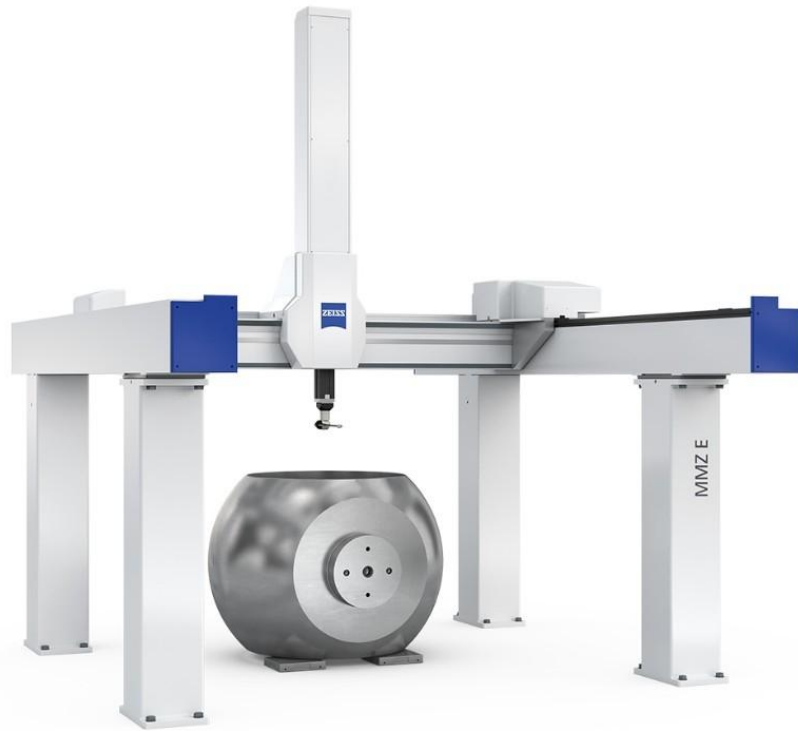


Figura 2.4: Máquina de medição por coordenadas tipo *Gantry*
Fonte: Zeiss, 2016

Segundo Hocken e Pereira (2012), este tipo de MMC apresenta como sua principal vantagem o fácil acesso que o operador tem a qualquer região dentro do volume de operação da máquina.

As diversas configurações de MMCs disponíveis no mercado proporcionaram inúmeros benefícios para o setor manufatureiro, visto que cada tipo de máquina atende a uma grande variedade de peças que precisam ser medidas, com alta exatidão e alta velocidade de operação.

No mais, além de suas formas construtivas, as MMCs apresentam diferentes maneiras de acionamento, como o manual, semiautomático e automático.

2.5.2 MMC manual

Essencialmente, as máquinas de acionamento manual têm o seu cabeçote movimentado pelo operador, para que então seja realizada a coleta de pontos na peça. Em seu trabalho, Rolim (2003) destaca que as máquinas de medição por coordenadas com o modo de operação manual, estão sendo cada vez menos empregadas na indústria atual, isto porque os custos dos modelos automáticos tiveram uma expressiva redução ao longo dos anos.

2.5.3 MMC assistida por computador

As máquinas de medição por coordenadas que operam segundo este modo podem ser posicionadas tanto manualmente, deslocando-se o sensor sobre o objeto de trabalho, quanto movidas com o seu deslocamento sendo acionados eletricamente sob o controle de um operador, que utiliza um *joystick* para tal. Da mesma forma que as MMCs manuais, os pontos captados pelo sensor são processados por um computador. Segundo Walker *et al*, (2013), algumas MMCs assistidas por computador podem ainda realizar diversas funções, tais como: conversão entre as unidades de medidas do Sistema Internacional e o Sistema Inglês; gravação de dados; avaliação geométrica e analítica e também, a possibilidade do desligamento de energia para a realização de ajustes em seu movimento de forma manual.

2.5.4 MMC diretamente controlada por computador (DCC)

As Máquinas de medição por coordenadas diretamente controladas por computador operam de maneira semelhante às máquinas CNC. Neste modo de operação, todos os movimentos realizados pela MMC são controlados por um computador, realizando as suas rotinas de medição. Os ciclos de medição seguem um programa que os torna como padrões, podendo ser repetidos por inúmeras vezes, portanto a possibilidade de criar rotinas de medições programadas torna as MMCs em equipamentos muito poderosos na inspeção de peças em larga escala, pois consegue fazer com que sua operação seja muito mais rápida do que quando movimentada manualmente por um operador. (WALKER *et al* 2012). Segundo Dotson (2015), um programa para máquinas DCC apresenta:

- Comando de movimentos, para direcionar o sensor para o objeto de trabalho.
- Comando de medições, que compara a distância percorrida pelo sensor com o padrão estabelecido na máquina para um determinado eixo.
- Comandos de formatação, responsável por converter os dados coletados em uma informação que possa ser legível em um mostrador ou em impressões.

2.6 SENSORES

Os sensores utilizados atualmente nas MMCs podem ser classificados em dois grandes grupos, são eles:

- Os sensores para medições com contato
- Os sensores para medições sem contato

Colosino e Senin (2011) ainda propõem uma terceira classificação para esses componentes, que são os sensores híbridos. Sensores híbridos nada mais são do que dispositivos que incluem os dois tipos de sensores, com contato e sem contato. Cada um dos sensores que o compõe, pode trabalhar de forma independente, como em situações em que a localização da peça inspecionada é obtida através do sensor sem contato e que a medição seja feita com maior exatidão pelo sensor com contato.

Assim, como existem vários tipos de configurações de máquinas de medição por coordenadas, visto que um único tipo de MMC não atenderia adequadamente a inspeção de todas as geometrias possíveis que as peças possam apresentar, assim também são os seus sensores, que variam de forma construtiva e funcional.

Os sensores de contato ainda são os mais utilizados atualmente, que devido a sua alta versatilidade estes dispositivos são adequados para diversas aplicações na indústria. Logo, são indicados para medições tridimensionais em peças prismáticas e de geometria conhecidas. O toque do sensor na superfície medida gera um sinal elétrico que permite o registro das coordenadas (GINIOTIS; HOPE, 2014).

Por outro lado, os sensores sem contato são usualmente utilizados para medição de pequenos componentes, ou que possam ser deformados com a aplicação de um toque. A medição sem contato utiliza-se do sensor laser e o sensor câmera para a inspeção das peças.

2.6.1 Sensores com contato

O componente utilizado como elemento mecânico de contato é geralmente uma esfera de rubi, que apresenta alta rigidez e alta resistência ao desgaste. Porém, outras configurações podem ser encontradas, como por exemplo, os sensores que apresentam pontas cônicas

(indicadas para localização e diâmetro de furos) e os sensores de pontas cilíndricas (ideais para medições de placas finas).

Na ocorrência do toque do sensor com a superfície medida, a sua extremidade sofre uma deflexão da posição central primária e então, o sinal elétrico é gerado, sendo esta coordenada é fixada e registrada pelo programa computacional. A Figura 2.5 apresenta o esquema descritivo do sensor no momento da medição.

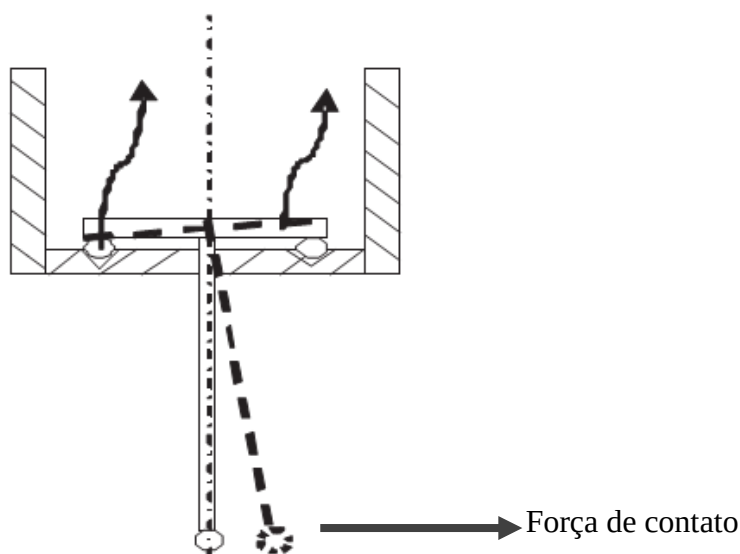


Figura 2.5: Deslocamento devido ao toque do sensor na peça
Fonte: Adaptado de Giniotis e Hope (2014, p 139)

Segundo Valentina (2010), a classificação dos sensores de toque podem ser dadas em duas categorias: apalpador medidor e o apalpador comutador. O apalpador medidor tem com sua característica principal, transmitir um sinal elétrico proporcional ao deslocamento do sensor após o toque com a superfície medida. Em contrapartida, o apalpador comutador tem o seu sinal interrompido devido a uma certa deflexão pré estabelecida do sensor, seja quando a esfera toca a superfície da peça, ou, quando a esfera do sensor deixa a superfície (WECKENMANN *et al.*, 2004). Ambas as classificações são mostradas na Figura 2.6:

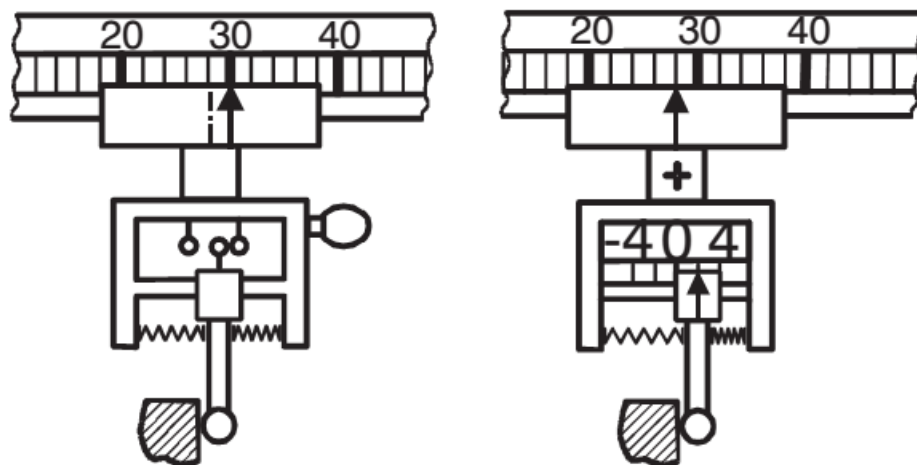


Figura 2.6: Esquema descritivo do apalpador comutador (esquerda) e o apalpador medidor (direita)
 Fonte: (WECKENMANN, *et al.*, 2004)

Ainda de acordo com o autor supracitado, as máquinas que apresentam melhor qualidade operam com a utilização do apalpador medidor, que são indicados para pesquisa em laboratórios. Já as máquinas que utilizam do apalpador comutador, apresentam maior velocidade de operação, além de serem capazes de atenderem à inspeções geométricas, onde não sejam necessários maiores requisitos de precisão, sendo indicados para o controle de qualidade atuante nas proximidades da produção.

Uma observação importante, é que a calibração do sensor contempla o diâmetro da esfera e a deflexão da haste do sensor, que são compensados e portanto diminuem os seus efeitos nas medições realizadas.

De acordo com Dotson (2015), os sensores de toque apresentam em sua configuração básica, pelo menos três elementos, são eles: a base; o sensor e a sua ponta. A base é montada na extremidade de um dos eixos coordenados da MMC, podendo ainda ser girada automaticamente ou manualmente. Algumas recomendações são apresentadas no intuito de melhorar a exatidão da medição, a saber:

- Utilizar pontas rígidas e curtas para diminuir o efeito do momento causado pela força de contato.
- Calibrar o sensor com a utilização de um padrão conhecido.
- Realizar as medições perpendicularmente ao objeto de trabalho.
- Garantir que apenas a ponta do sensor tenha contato com a peça durante a medição.
- Assegurar que a ponta do sensor não esteja solta.

2.6.2 Sensores sem contato

Os sensores sem contato têm como a sua principal vantagem em relação aos sensores de toque, a rápida coleta de dados em superfícies, sem que seja necessária a movimentação do cabeçote da MMC (COLOSINO; SENIN, 2011).

De acordo com Leach (2014), as máquinas de medição por coordenadas que utilizam a visão computacional são capazes de medições em 2½ -D, essas medições feitas em duas-e-meia-dimensões significam que apenas um ajuste pode ser feito no eixo coordenado z, porém, apesar do acesso a este eixo, a medição permanece em uma projeção bidimensional. Medições de alturas são possíveis com a utilização do foco da câmera sobre a superfície medida.

2.6.2.1 Medição unidimensional com a utilização do sensor laser

Um modelo de sensor sem contato é o *laser*, que incide um feixe de luz sobre uma superfície, e então, a posição deste feixe é lido, com a aplicação de uma técnica adequada, através de uma lente no receptor do sensor. De acordo com Dotson (2015), o *laser* apresenta alta velocidade de operação e exatidão, capaz de realizar 200 leituras por segundo, dadas as condições adequadas de contraste da superfície medida e resolução de até 1.27 μm .

Sobre as técnicas utilizadas para detectar a posição do ponto a ser medido pelo sensor *laser*, as mais conhecidas são ainda por triangulação e a técnica de interferometria. Os sensores que funcionam a partir da técnica de triangulação são geralmente utilizados em sistemas de automação e, têm o seu feixe de luz emitido e o eixo óptico do sensor de imagem formando um ângulo que mede várias dezenas de graus, formando com isso, um triângulo em que seus vértices são: o transmissor do *laser*; o ponto medido e receptor do sensor. A distância pode então ser determinada através de relações trigonométricas (HOCKEN; PEREIRA, 2012). O princípio de funcionamento do sensor *laser* por triangulação é apresentado na Figura 2.7:

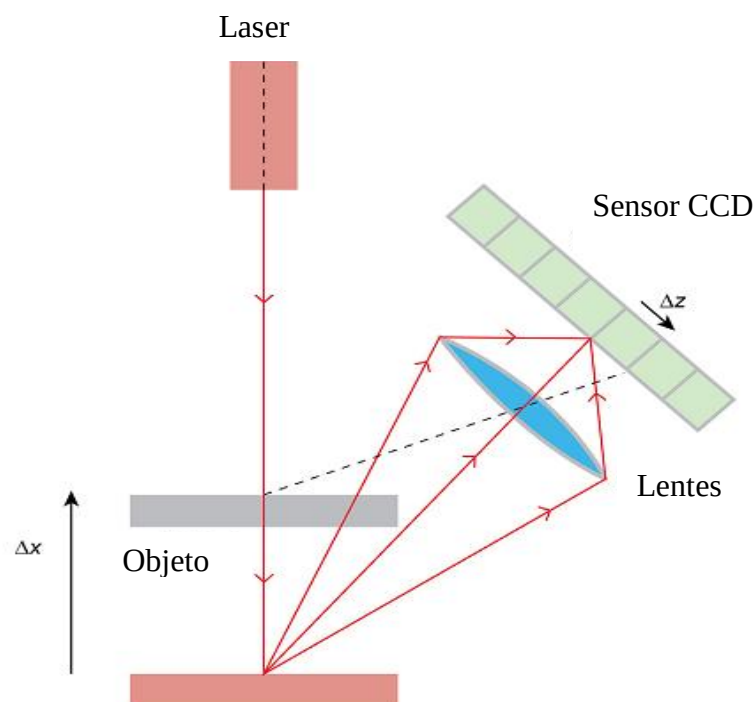


Figura 2.7: Princípio de funcionamento dos sensores laser por triangulação
 Fonte: Adaptado de Leach (2014, p.154)

2.6.2.2 Medição de distância com utilização de sensores multidimensionais

A medição por instrumentos que operam segundo os princípios da triangulação é usada para medições em 1-D, como por exemplo, a determinação de um ponto, para sensores de linha (2-D) e sensores de área que realizam medições em 3-D. A técnica de triangulação em 2-D é realizada através do deslocamento do feixe do *laser* com um espelho em movimento, já as medições em 3-D podem ser feitas com o movimento do eixo para uma posição perpendicular ao plano medido. A superfície é reconstruída de maneira gradativa pelo movimento de varredura do sensor sobre o objeto de trabalho (HARDING, 2013).

Ainda de acordo com Harding (2013), padrões de franjas são escalas cinzas periódicas que apresentam regiões claras e escuras alternadas. Alguns sensores funcionam a partir destes padrões, onde são projetados sobre a superfície do objeto de estudo, e assim, são refletidos e captados pelo receptor destes dispositivos através da técnica de triangulação descrita anteriormente. Logo, não se faz necessário o movimento do eixo da MMC desde que a superfície medida esteja dentro do alcance de medição. Hocken e Pereira (2012), explica que diferentes padrões são usados e avaliados em cada medição para poder atingir resoluções mais altas através de uma única coleta de dados.

A fotogrametria é uma técnica que utiliza a triangulação para determinar a posição de objetos no espaço através de fotografias tiradas em diversos ângulos de visão (HARDING, 2013). Sensores que utilizam essa técnica captam uma determinada superfície da peça medida por duas direções distintas, e cada direção tem o seu próprio sensor de imagem. Ocorre que, geralmente, a peça é insuficientemente estruturada, desse modo, uma grade bidimensional é projetada sobre a superfície e então o padrão resultante obtido por estes sensores é captado e avaliado por duas câmeras (HOCKEN; PEREIRA, 2012). A Figura 2.8 apresenta as diferentes formas de medição de distância com sensores multidimensionais.

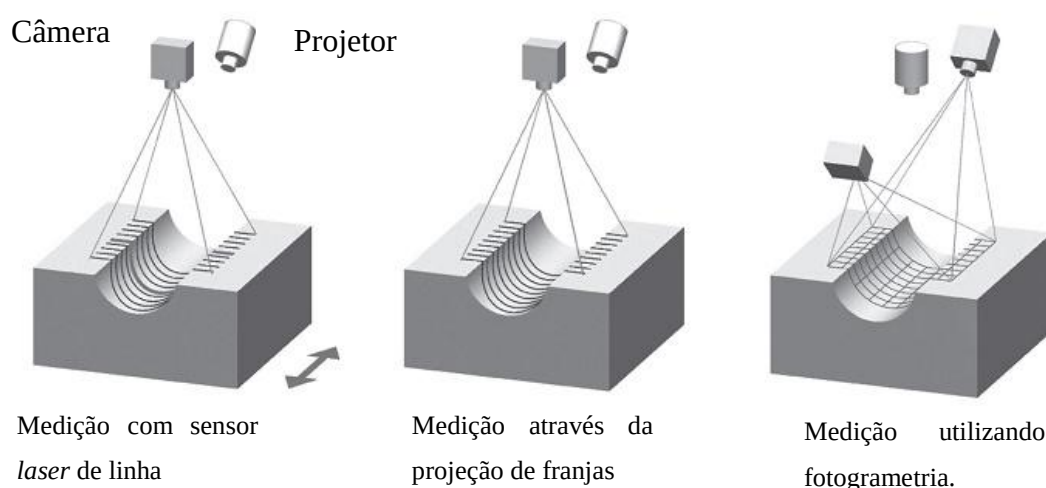


Figura 2.8: Medição através de sensores de distância multidimensionais
 Fonte: Adaptado de Hocken e Pereira (2012, p.136)

2.6.2.3 Sensores de processamento de imagens

Estes sensores têm a função de converter a luz que é refletida pela superfície do objeto de trabalho, em sinais elétricos, que são por fim processados por *software* e formando assim as imagens digitais (LETA *et al.*, 2016). Atualmente, os tipos de sensores utilizados para captura de imagens são os sensores CCD (*Charge-Coupled Device*) e o CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), que serão abordados com maior profundidade no próximo capítulo.

As imagens capturadas são, geralmente, obtidas com o uso de uma câmera CCD, através de suas lentes. Estes sensores estão sujeitos às influências da iluminação do ambiente, do sistema óptico, do objeto de estudo, do plano de fundo (ao qual o objeto de trabalho é

posicionado durante a medição) e do sistema mecânico do dispositivo de medição (DE CHIFFRE; HANSEN, 1995).

Segundo Hocken e Pereira (2012), a principal vantagem que as câmeras CCD têm sobre os sensores CMOS é a sua alta qualidade metrológica, uma vez que os sensores CCD são mais sensíveis a luz se comparados aos sensores CMOS. Portanto, essa relação linear entre a intensidade de luz do sinal de entrada e o sinal digital de saída, é uma característica fundamental para uma medição ser realizada de forma satisfatória.

2.7 FONTES DE ERROS EM MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

De acordo com VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia, 2012, p.21), erro de medição é definido como a diferença entre o valor medido de uma determinada grandeza e o valor de referência. Albertazzi e De Sousa (2008) classificam os tipos de erros como sistemáticos e aleatórios. Os erros sistemáticos são referentes à parte previsível do erro, que pode ser compensado, por outro lado, os erros aleatórios representam a parcela imprevisível do erro de medição.

Os erros em sistemas de medição podem ser dados em função de fatores internos, como os erros provenientes das suas imperfeições estruturais, ou por fatores externos, como condições ambientais, o operador que realiza a medição, ou até mesmo, o instante em que a medição é realizada, estes últimos fatores, porém, independem do sistema de medição (ALBERTAZZI; DE SOUSA, 2008). A Figura 2.9 apresenta o diagrama de Ishikawa com as principais fontes de erros em MMCs.

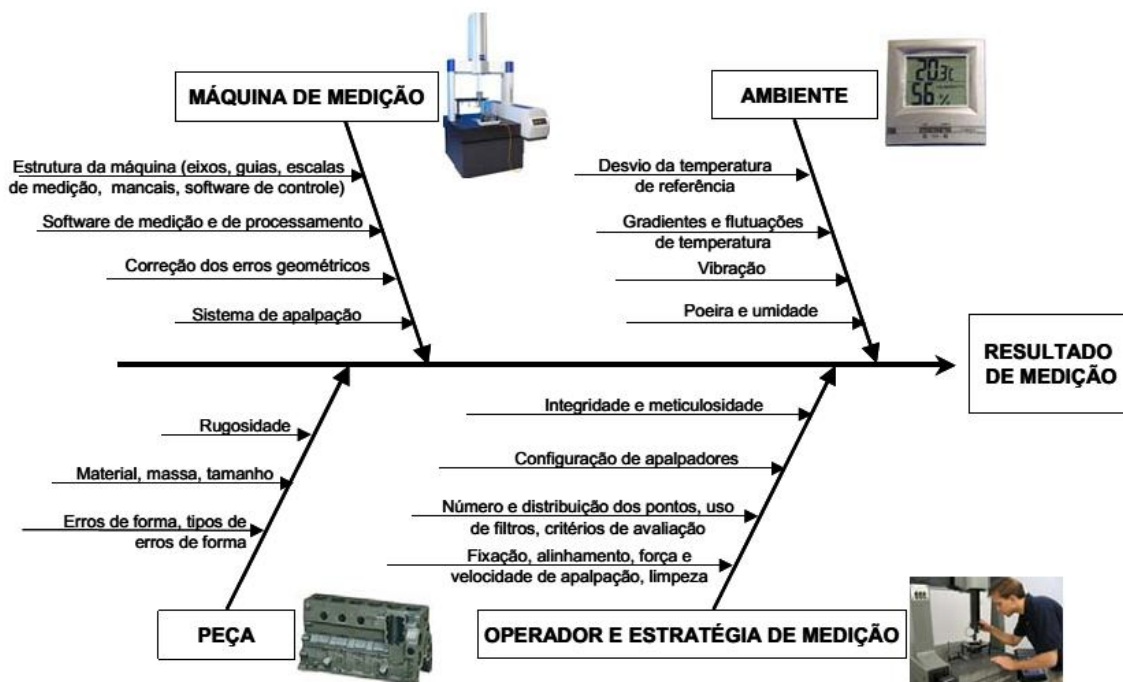


Figura 2.9: Principais fontes de erros em uma Máquina de Medição por Coordenadas
Fonte: HAMBURG-PIEKAR (2006, p. 13)

Devido aos diversos componentes que constituem uma MMC, bem como os fatores oriundos do ambiente e as condições de medição nesses equipamentos; fontes de erros são originárias das imperfeições de cada um destes elementos e assim influenciam os resultados obtidos nas medições.

Dessa maneira, a tarefa de estimar todas as fontes de erros nas máquinas de medição por coordenadas se mostra bastante complexa, porque estes equipamentos podem realizar diversas funções em que estas fontes variam de acordo com a operação executada, com o ambiente de medição, com o operador, e também, pelo método de medição adotado. Porém, é de grande importância a correta identificação e quantificação das fontes de erros para a realização das medições (WEEKERS, 1996; SAVIO, 2006). Wilhelm *et al* (2001), divide as fontes de erros em 5 categorias: estrutura da máquina, a peça medida, a estratégia de medição, algoritmo de ajustagem e avaliação e os fatores externos.

2.7.1 Erros devido à estrutura da MMC

São erros inerentes aos aspectos construtivos da máquina - compreendendo seus componentes como as escalas e geometrias - o sistema de sensores, a dinâmica da MMC e que

afetam diretamente a repetibilidade e a exatidão cinemática da máquina (BARAKAT, ELBESTAWI ;SPENCE, 2000).

Segundo Ramu *et al.* (2011), as máquinas de medição por coordenadas convencionais de 3 eixos, possuem 21 fontes de erros geométricos provenientes da sua estrutura. Silva *et al* (2009), explica que cada eixo de translação possui um erro de posição, três erros angulares (*roll*, *pitch* e *yaw*) e dois erros de retitude (retilineidade), o que soma 6 fontes de erros geométricos por eixo coordenado. Existem, ainda, 3 erros que são referentes a ortogonalidade entre 2 pares de eixos quaisquer da MMC. A Figura 2.10 exemplifica os conceitos apresentados dos erros geométricos em máquinas de medição por coordenadas.

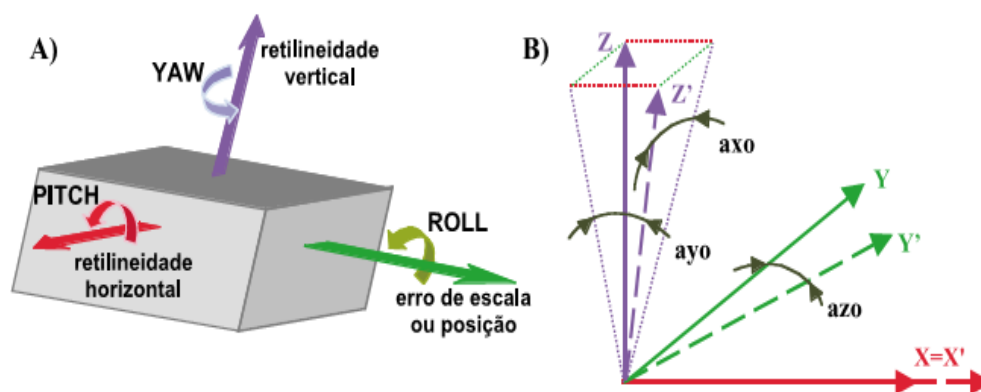


Figura 2.10: Erros geométricos de uma MMC A) Erros referentes a cada eixo de translação B) Erros de ortogonalidade entre dois pares de eixos coordenados.

Fonte: (ORREGO, DI GIACOMO; ABACKERLI, 2000, p.47)

Wilhelm *et al* (2001) acrescenta, ainda nesta categoria, alguns outros fatores a saber: o sistema de sensores e os seus erros aleatórios ou sistemáticos não corrigidos; a troca de sensor e a articulação deste componente; erros dinâmicos (que mesmo sendo menores devido as forças de pequena magnitude são ainda assim classificados como erros estruturais da máquina); temperatura da MMC (devido tanto ao funcionamento quanto ao ambiente e as vibrações as quais a máquina esteja submetida).

2.7.2 Erros devidos a peças medida

São relacionados às propriedades da peça e as iterações durante a medição do objeto de trabalho, onde as principais fontes de erros são: o desvio de forma; o difícil acesso do sensor a algumas regiões ao qual o objeto possa apresentar em sua geometria; as distorções

causadas pela fixação da peça na máquina; o modo pelo qual os pontos são captados e distribuídos sobre a superfície da peça medida; o acabamento superficial e a deformação do objeto de trabalho devido a esforço exercido pelo sensor de toque (WILHELM; HOCKEN; SCHWENKE, 2001).

Orrego, Di Giacomo e Abackerli, (2000) reiteram que os erros provenientes das irregularidades superficiais da peça são principalmente dependentes de fatores como a estratégia de medição, e também de fatores como a forma pelo qual os dados são coletados sobre a superfície do objeto. Com isto, o desconhecimento destes aspectos da peça pode ocasionar na adoção de estratégias de medição inadequadas, acarretando em erros nos resultados da medição (DE OLIVEIRA, 2003).

Outra característica importante que influencia os resultados da medição é o peso da peça, que exerce certa deformação adicional à máquina de medição por coordenadas, visto que os componentes móveis da própria MMC promovem uma deformação em sua estrutura devido ao peso dos mesmos. Portanto, a posição e a montagem da peça sobre a mesa metrológica apresentará efeitos devido à deformação em maior ou menor grau, dependendo das características estruturais da MMC e da rigidez da mesa metrológica (ORREGO; DI GIACOMO; ABACKERLI, 2000). Com o intuito de diminuir as influências causadas pelo peso da peça, técnicas de rebatimento podem ser utilizadas, conforme apontado por Hamburg-Piekar (2006).

2.7.3 Erros devido à estratégia de medição

A estratégia de medição adotada pelo operador pode se mostrar ineficiente, dependendo do elemento medido, culminando em erros de medição. Se por exemplo, na utilização de uma máquina de medição por coordenadas para se estabelecer um plano de referência em uma peça, é recomendável que estes pontos coletados sejam espaçados o suficiente ao longo do plano para que o algoritmo, que utiliza um método numérico, por exemplo, o método dos mínimos quadrados, possa calcular qual o melhor plano pode ser descrito de acordo com esses pontos.

Por outro lado, se os pontos forem coletados dentro de uma mesma região, não compreendendo a maior parte do plano, o resultado pode apresentar um modelo de geometria substituta mais distante do plano real da peça. A Figura 2.11 apresenta como atua a influência dessa abordagem.

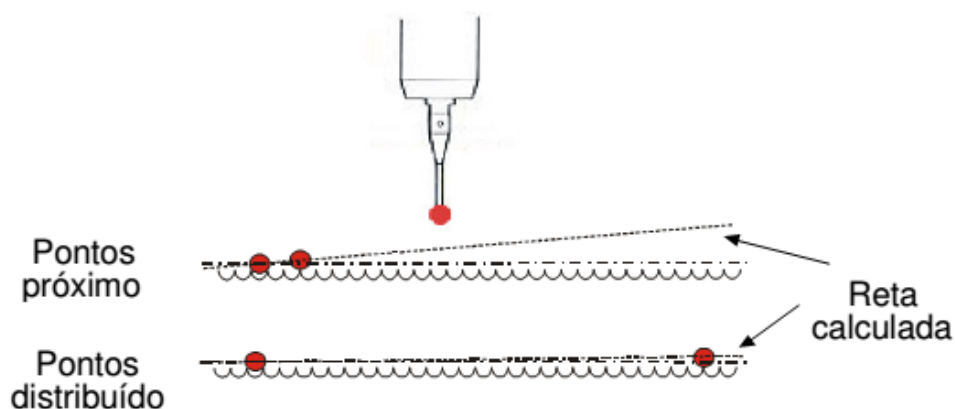


Figura 2.11: Influência da distribuição de pontos na medição
Fonte: (DE OLIVEIRA, 2003)

O operador pode ainda escolher o que medir primeiro em uma peça, determinar o seu sistema de coordenadas e estabelecer qual função do *software* é a mais indicada para uma medição. No entanto, a localização e a quantidade de pontos coletados têm maior influência sobre o resultado da medição (ORREGO, DI GIACOMO; ABACKERLI, 2000).

Para que os erros provenientes da estratégia de medição sejam reduzidos, o operador deverá ser devidamente treinado para realização das medições, pois com o conhecimento mais aprofundado sobre os métodos de medição com uma MMC, optará pelas formas mais adequadas de realizar tal tarefa. Além disso, Orrego, Di Giacomo; Abackerli (2000) acrescentam a importância da criação de sistemas inteligentes, que possam analisar a geometria medida e definir qual o algoritmo que melhor atende a cada medição, assim como a sua distribuição e quantidade de pontos, auxiliando o operador nesta função.

2.7.4 Erros devidos ao algoritmo de ajustagem e avaliação

Esta categoria de erros é principalmente causada por intermédio de métodos utilizados para a ajustagem das geometrias substitutas aos pontos coletados pelo sensor na superfície do objeto de trabalho (PAPA *et al.*, 2013). Segundo Hamburg-Piekar (2006), várias normas internacionais são usadas para indicação de algoritmos para ajustes específicos afim de determinar tolerâncias de tamanho, orientação e localização.

2.7.5 Erros devidos aos fatores externos

São postas nesta categoria algumas ações do operador, como a fixação da peça na MMC, juntamente com as condições de limpeza dos componentes da máquina, e filtragem da peça contribuem como fontes de incertezas que levam a erros de medição (WILHELM; HOCKEN; SCHWENKE, 2001). Ainda de acordo com o autor, mais importante do que categorizar as fontes de erros, é a capacidade de identificar todas estas fontes com o propósito de quantificar e incluí-las na avaliação da incerteza nas medições.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do conteúdo abordado no presente capítulo, verifica-se a importância das máquinas de medição por coordenadas no âmbito mundial e sua posição na indústria manufatureira. Estes equipamentos - que devido a sua versatilidade - apresentam diversos benefícios para inspeções com alta exatidão em peças de geometrias complexas e dos mais variados portes, e, realizam medições de forma rápida, devido à possibilidade de integração de recursos computacionais para sua automatização.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS DA MEDIÇÃO POR IMAGENS

3.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresentará os principais fundamentos da medição por imagem e sua aplicação na metrologia por coordenadas, abordando sobre os seus conceitos e definições, os sensores utilizados para inspeções de imagens digitais e os fatores que influenciam os resultados de medições no uso da metrologia por imagem.

3.2 A VISÃO DE MÁQUINA APLICADA NA METROLOGIA

O termo “visão de máquina” é utilizado para descrever qualquer sistema que utilize a informação visual captada por um sensor óptico, que é posteriormente processada e analisada por um computador, com o intuito de determinar alguma característica que deva ser controlada em uma peça fabricada. Esses sistemas são basicamente constituídos de uma fonte luminosa, para destacar as características as quais se desejam analisar, uma câmera para captar a imagem, um digitalizador para tornar o vídeo no formato compatível com o computador e o sistema computacional com o *software* para análise (HARDING, 2013; CHO, 2005).

As aplicações às quais se destina a visão de máquina podem apresentar, por exemplo, diversos graus de exatidão em seus resultados de medição dependendo do objetivo. Leta *et al.* (2016) explica que em aplicações onde se deseja identificar um componente ou realizar o seu reconhecimento, um sistema de decisão é aplicado, analisando os padrões característicos e comparando-os com os objetos de trabalho, respeitando porém uma certa tolerância especificada, no intuito de que se a peça apresentar a característica dentro desta zona de tolerância não comprometerá o resultado da medição. No entanto, outras atividades como de calibração exigem que esta zona de tolerância com intervalo menor, e, portanto os resultados das medições deverão apresentar um alto nível de exatidão.

A imagem é criada na câmera de vídeo devido à iluminação presente, e ao seu sistema óptico, compreendendo uma região de interesse ou o campo de visão. Esse parâmetro denominado campo de visão é de grande importância para medições por imagem, porque determina o ângulo com que um sistema de imagem poderá ver (CHO, 2005).

Segundo Harding (2013), a digitalização de uma imagem cria uma matriz formada por elementos, denominados *pixels* (*Picture elements*), ao qual cada um destes elementos representa um ponto na imagem. Ainda de acordo com o autor, o valor de cada *pixel* pode ser dado em nível de cinza ou apresentado em formas de regiões claras e escuras. Para analisar estas características, no entanto, ferramentas de simples concepção são utilizadas para relacionar os *pixels* entre si, como para identificação de bordas, contagem das regiões claras e escuras, ou ainda procurando por padrões na forma em que os *pixels* se distribuem em uma área.

Além da aquisição da imagem, outras etapas são comuns à maioria dos sistemas de visão computacional, como o pré-processamento; a segmentação, a extração de característica e a análise da imagem, mostradas na Figura 3.1.

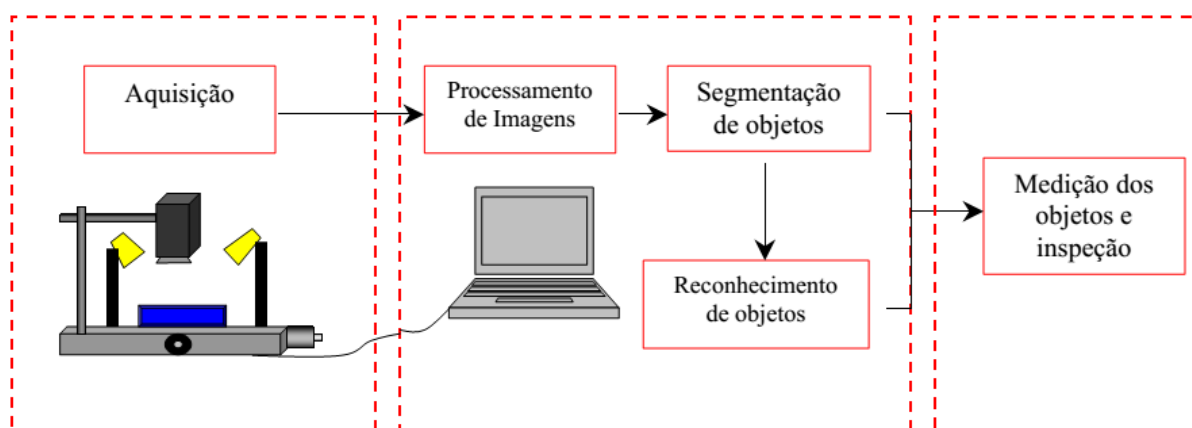


Figura 3.1: Representação das etapas de um sistema de visão computacional
Fonte: (FELICIANO *et al*, 2010)

O pré-processamento é a etapa em que é selecionada uma área de interesse da imagem, a fim de melhorar sua qualidade, através de ações como: a eliminação de artefatos localizados na imagem; a filtragem do ruído presente ou realizando a quantização da imagem, como por exemplo, a limiarização e assim por diante (CHO, 2005). Vale destacar que, de acordo com Harding (2013), a limiarização é um processo de mapeamento de uma escala contínua ou discreta em dois ou mais níveis discretos. Isso possibilita que a seleção de alguns *pixels* da imagem seja realizada, definindo essa seleção em primeiro plano enquanto os demais *pixels*

serão distribuídos como plano de fundo, destacando a característica desejada da imagem (SHAPIRO; STOCKMAN, 2001).

A etapa seguinte ao pré-processamento é a segmentação da imagem. Esse processo tem como objetivo efetuar a subdivisão de uma imagem em regiões (ou elementos) as quais a compõe, tornando mais fácil a interpretação de suas características. Alguns fatores essenciais são considerados, dada à subdivisão da imagem, como a escala de cinza dos *pixels*, o contraste e a textura. (LETA *et al.*, 2016; SILVA, 2016).

Em seguida, a etapa da extração da característica da imagem é realizada. Cho (2005), afirma que a seleção dessas características é feita de maneira cuidadosa, de modo que, são consideradas as informações mais adequadas, no intuito de representar os elementos de interesse da imagem segmentada. Essa etapa tem como o objetivo principal, tornar a pesquisa e aquisição das informações representativas mais fáceis para o processamento da imagem, o que acarreta na diminuição do tempo de análise das mesmas.

Por fim, a última etapa descrita como a análise, realiza a interpretação e reconhecimento das informações obtidas e processadas nas etapas anteriores. A análise é uma fase indispensável para um sistema de visão computacional, pois é nessa etapa em que é feita a inspeção, a medição e o reconhecimento do objeto de trabalho (CHO, 2005; LETA *et al.*, 2016).

Essas informações contribuem para o entendimento de um Sistema de Metrologia por Imagem (SMI), pois esse sistema baseia-se nos mesmos conceitos apresentados para os fundamentos da visão de máquina, porém focando na confiabilidade de peças manufaturadas. O propósito do SMI é de observar as características metrológicas de um determinado componente, avaliando as tolerâncias especificadas no projeto, ou ainda, realizando a avaliação do valor do objeto de medição. (LETA *et al.*, 2016). Assim, vale ressaltar que neste trabalho o termo visão de máquina corresponde ao termo metrologia por imagem.

3.3 DISPOSITIVOS USADOS PARA CAPTURA DE IMAGENS

Como mencionado anteriormente, as imagens são captadas através de um dispositivo, e então, convertida para um formato que possa ser interpretado por um computador. Leta *et al* (2016), explica que o dispositivo de captura de imagem, baseia-se na luz refletida por um objeto, podendo assim, criar uma representação desse componente. A Figura 3.2 exemplifica como a aquisição de imagem é realizada através de um dispositivo:

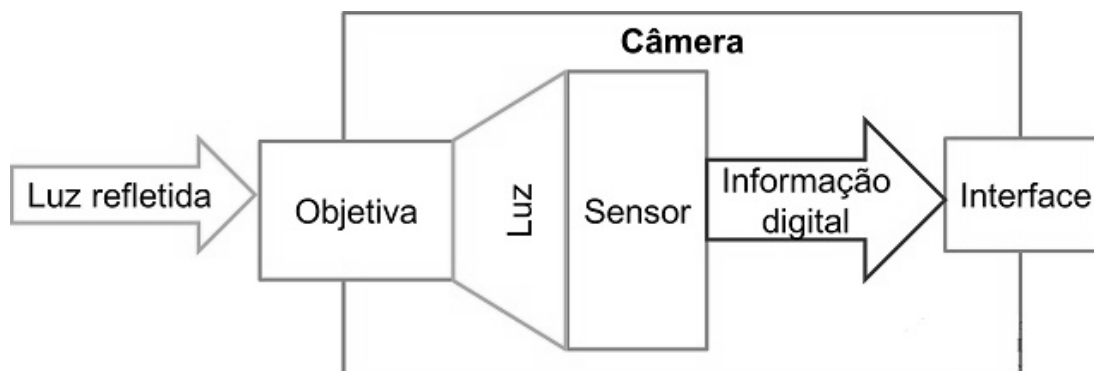


Figura 3.2: Esquema descritivo da captura de imagem através de um dispositivo
 Fonte: LETA *et al* (2016, p.45)

Cada componente que constitui os equipamentos de captura de imagem são selecionados de acordo com a aplicação ao qual se destina. Existem diversos dispositivos usados para inspeção óptica - por exemplo: câmeras digitais; microscópios ópticos; projetores de perfis - porém nesse trabalho de dissertação, serão abordadas as principais características da câmera digital, como os tipos de lentes e sensores de imagem, assim como sua aplicação em máquinas de medição por coordenadas.

3.3.1 Lentes

As lentes são acessórios utilizados em câmeras com basicamente dois propósitos: o primeiro é de refratar a luz refletida pelo objeto de interesse, e segundo, para manter a imagem focalizada enquanto a luz é refratada (FORSYTH; PONCE, 2011). Esses dispositivos ópticos podem ser classificados como lentes convergentes ou lentes divergentes, o que interfere na forma com que os raios de luz são refratados por esses acessórios.

A diferença entre as lentes convergentes e as divergentes consiste basicamente em que, os raios de luz depois da refração poderão ser incidentes em um ponto (lentes convergentes), ou a projeção desses raios irá incidir sobre esse ponto (lentes divergentes). O ponto em que esse fenômeno ocorre, para cada tipo de lente, é conhecido como o seu foco, e a distância entre o foco e a lente é definida como distância focal (LETA *et al.*, 2016).

Ainda de acordo com o autor supracitado, as lentes fotográficas – também conhecidas como lentes objetivas – utilizadas em câmeras digitais, possuem um componente chamado diafragma, que é responsável pelo controle de luz que chega ao sensor. Essas lentes têm por objetivo focar a luz refletida pelo objeto de trabalho no sensor da câmera, e podem, por

exemplo, ter sua distância focal fixa ou móvel. Lentes que possuem distância focal móvel são constituídas de um conjunto de lentes móveis, as quais variam essa distância dentro de uma faixa de valores, dependendo de sua configuração.

A lente objetiva pode ser ainda classificada de acordo com a sua resolução, que define como a imagem será interpretada, dada a distância entre a lente e o componente a ser medido, apresentando mais detalhes do objeto de interesse, sem, no entanto, contar com características indesejadas como distorções ou curvatura de campo (HARDING, 2013; LETA *et al.*, 2016). A classificação de acordo com a resolução das lentes objetivas apresentada por Leta *et al* (2016), é: padrão, alta resolução, macro e telecêntricas, descritas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Classificação das lentes de acordo com a resolução

TIPOS DE LENTES	DESCRIÇÃO
Lentes padrão	Geralmente apresentam baixa resolução, tendo sua distância focal acima de 200 mm.
Lentes de alta resolução	São fabricadas de forma mais complexas com o intuito de induzir menores distorções que uma lente padrão, seu uso é essencial em câmeras com tamanho de <i>pixel</i> bastante pequeno, em que se deseja fazer sua aplicação em medições ou em alinhamentos. Podem ter sua distância focal dentre os valores de 1 mm até 1200 mm
Lentes macro	Lentes macro são projetadas para o uso em pequenos campos de visão, aproximadamente igual ao tamanho do sensor da câmera e produzem baixas distorções nas imagens. As ampliações disponíveis atualmente encontradas estão da ordem de até 12 vezes.
Lentes telecêntricas	As lentes telecêntricas são amplamente utilizadas na medição por imagem, pois não promovem alteração nas dimensões de objetos, provocados por baixas variações na distância focal. Também provocam baixas distorções, pois a luz que entra na lente é colimada. Essas lentes, porém, apresentam a desvantagem de que a dimensão do objeto não pode ultrapassar o diâmetro da lente, impossibilitando seu enquadramento em uma imagem.

Fonte: Adaptado de Leta *et al* (2016); Stemmer Imaging (2016)

A utilização das lentes telecêntricas como uma ferramenta metrológica, trouxe um grande avanço para a visão de máquina, visto que atualmente, a maioria das aplicações de metrologia de precisão, consiste em inspeções de pequenas características geométrica, o que demanda as pequenas distorções de imagem, as quais essas lentes proporcionam (SCHWENKE *et al.*, 2002; HARDING, 2013).

3.3.2 Câmeras digitais

Esses equipamentos podem ser classificados em dois grupos: as câmeras fotográficas e as câmeras industriais (também chamadas de câmeras científicas, ou ainda, ultracompactas). O funcionamento das câmeras fotográficas e industriais é semelhante, visto que possuem praticamente os mesmos componentes básicos, porém, a diferença entre esses grupos, consiste basicamente nas características que cada câmera possui o que torna determinado equipamento mais adequado a uma aplicação que outro (LETA *et al.*, 2016).

As câmeras digitais industriais são os dispositivos usados para captura da imagem em um sistema de visão de máquina, registrando a projeção de uma cena, que está em 3-D, em sua representação em 2-D, ou seja, a imagem (SOLOMON; BRECKON, 2011). Com o advento das novas opções de comunicação para câmeras, como internet, USB, GigE, a adaptação desses dispositivos se tornou mais fácil em sistemas de medição por imagem, possibilitando além da comunicação em rede entre outros componentes, também a maior coleta de dados em medições (HARDING, 2013; LETA *et al.*, 2016).

3.3.3 Sistemas de medição por imagem

Esses sistemas são controlados por CNC, em que seus modelos disponíveis no mercado atual são geralmente máquinas de medição por imagem dedicada, ou mesmo, máquinas de medição por coordenadas que possuam múltiplos sensores, sendo a câmera uma das suas ferramentas de medição.

De acordo com Leta *et al.* (2016), esses sistemas variam de acordo com sua configuração com relação aos seus eixos coordenados (X, Y, Z), que compreendem uma faixa de curso entre 100 mm × 100 mm × 100 mm, para até cursos de 1000 mm × 600 mm × 400

mm. Fatores como iluminação, tipos de lentes disponíveis para o sistema de medição e sensor utilizado na câmera, também devem ser considerados para cada modelo de máquina, visto que são desenvolvidas por diversos fabricantes. A Figura 3.3 exemplifica como as medições com a utilização de uma máquina de medição por visão ocorrem.

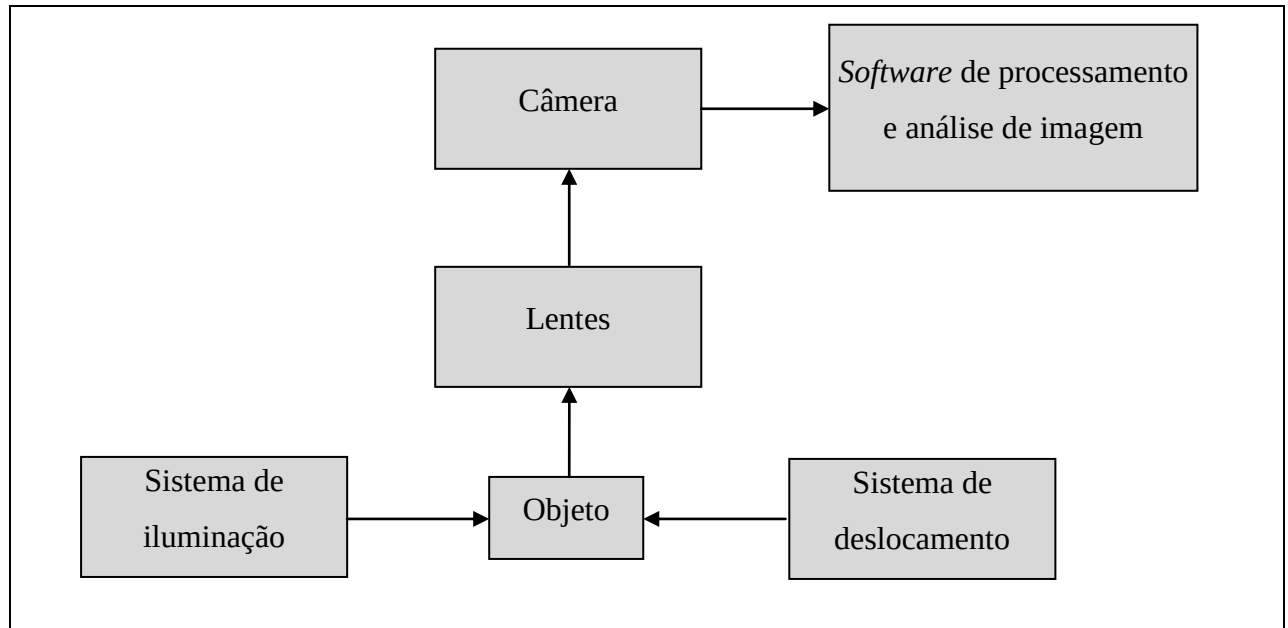


Figura 3.3: Etapas dos processos em um sistema de medição por imagem
Fonte: Adaptado de Leta *et al*, (2016)

Em cada eixo coordenado do sistema de medição, as leituras das escalas graduadas são realizadas por sistemas ópticos, que possibilitam a formação da subdivisão dessa escala, proporcionando assim, um aumento da resolução das medidas de deslocamento, podendo chegar até 0,00001 mm (LETA *et al*, 2016).

3.3.4 Sensores de imagens

Como mencionando no capítulo anterior, existem duas categorias principais de sensores de processamento de imagem: os sensores CCD (*Charge-Coupled Device*) e os sensores CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) (vide Figura 3.4), em que cada tipo de sensor apresenta uma forma de arquitetura.

Criados na década de 1970, os sensores CCD constituem-se de um arranjo de pequenos elementos semicondutores sensíveis a luz. Esses elementos recebem a informação luminosa proveniente do ambiente de trabalho, gerando uma carga elétrica no elemento

fotossensível. A carga é movida entre cada linha do sensor, sendo então convertidas em tensão e amplificadas, formando assim a imagem (LETA *et al*, 2016; SILVA, 2016). As principais vantagens apresentadas por esse sensor, segundo Bigas *et al* (2005), são: induz menor ruído à imagem, produz imagens com *pixels* menores – o que acarreta em maiores resoluções –, possui maior sensibilidade, menor formação de corrente escura e o seu obturador eletrônico sem artefatos.

Já os sensores CMOS, criados cerca de 20 anos após a tecnologia CCD, também são formados por elementos fotossensíveis. Porém a luz incidida sobre o sensor é relacionada com a tensão em cada elemento, sendo a amplificação e filtragem da tensão, realizadas individualmente em cada um desses elementos (LETA *et al*, 2016). Entre suas principais vantagens estão: menor consumo de energia para seu funcionamento; demanda apenas uma única fonte de alimentação; menor custo e alta capacidade de integração (BIGAS *et al.*, 2006).

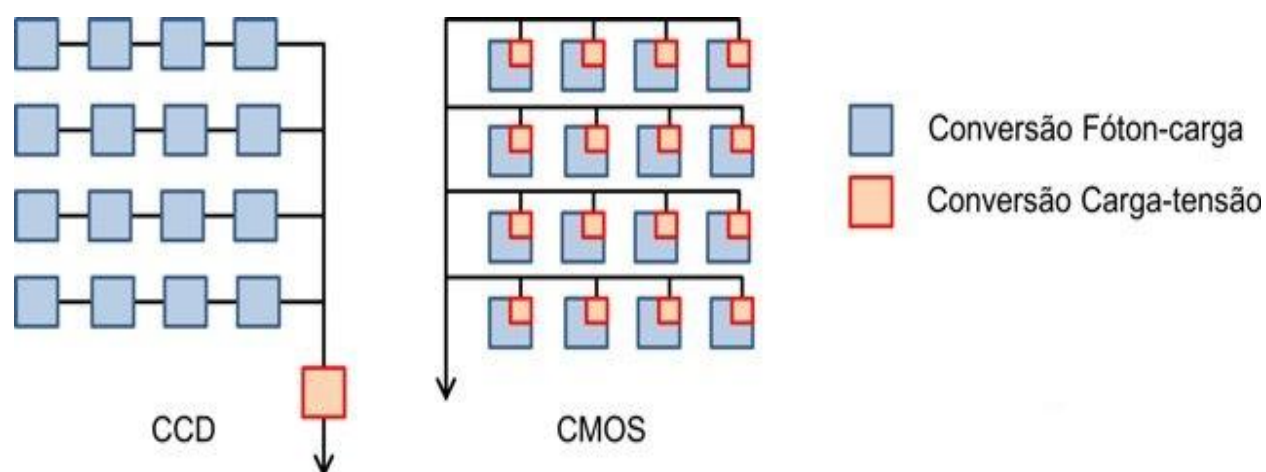


Figura 3.4: Elementos fotossensíveis dos sensores CCD (esquerda) e CMOS (direita)
Fonte: (LETA *et al*, 2016, p.56)

Ainda de acordo com o autor supracitado, a maior proximidade entre os elementos fotossensíveis dos sensores CCD, pode ocasionar um fenômeno descrito como vazamento de luz, partindo dos elementos ao redor para um *pixel* superexposto, devido ao excesso de iluminação incidente sobre ele.

Szeliski (2010), aponta, que tradicionalmente, os sensores CCD apresentam melhores performances que os sensores CMOS, em especial, aplicações onde se faz necessária maior sensibilidade a iluminação, contudo, os sensores CMOS são mais indicados para aplicações que tenham fonte de energia limitada, pois consomem menos energia que os sensores CCD.

Essas particularidades que cada sensor apresenta, devido a sua arquitetura e funcionamento, interferem em como a imagem é formada e em sua qualidade. Entretanto, ambos os sensores tiveram seus avanços tecnológicos durante os anos, o que os tornou atualmente comparáveis, apesar da defasagem que consta entre os períodos aos quais foram criados. Sendo assim, para cada aplicação o uso de um tipo de sensor deve ser justificado após um estudo, considerando os fatores em que esses sensores devem operar.

3.4 PARÂMETROS DE CÂMERAS E LENTES

Os principais parâmetros de câmeras e lentes, que são usados para definir suas características, além de servir como indicadores para as suas aplicações, são: distância focal; abertura; profundidade de campo; tempo de exposição.

3.4.1 Distância focal

É definido como a distância entre o centro óptico da lente e o foco da imagem. Leta *et al* (2016), acrescenta a importância da distinção entre distância focal e distância de focalização, visto que a distância focal acarreta na modificação da posição entre as lentes, alterando o ângulo de visão e consequentemente, a ampliação decorrente no sensor. Por sua vez, a distância de focalização é aquela em que o objeto de estudo está da lente, sem, contudo perder a nitidez. A Figura 3.5 mostra a representação da distância focal em câmeras digitais.

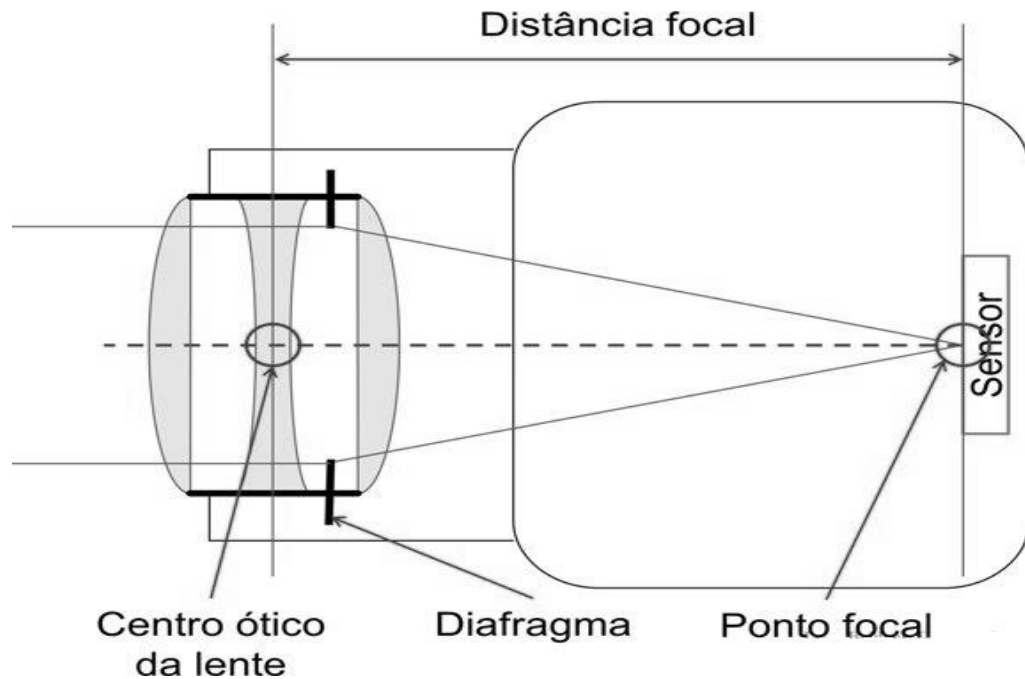


Figura 3.5: Representação da distância focal em câmeras
 Fonte: (LETA *et al*, 2016, p.58)

3.4.2 Abertura

É a área de entrada da luz da lente, e a quantidade de luz que a câmera pode capturar é uma relação proporcional ao diâmetro desse parâmetro. Como geralmente a abertura é de geometria circunferencial, o diâmetro do diafragma é usado para sua caracterização (BAUER; WESTFALL, 2011). O diafragma é um componente interno à lente, constituído de lâminas finas e opacas, responsável pelo controle de luz que passará através da lente para o sensor (LETA *et al*, 2016). Harding (2013) acrescenta que através da abertura, métodos são empregados para redução de aberrações na imagem, reduzindo o brilho e a luz indesejada que é dispersa, fora dos limites geométricos dos elementos da lente.

Esse parâmetro pode ainda ser quantificado, pois as lentes são usualmente ajustadas com diafragmas calibrados em unidades de abertura relativa. Este número adimensional é representado pela letra N (pode também ser encontrado como *f-number*), sendo equivalente à razão entre a distância focal (f) e o diâmetro (d) do diafragma ($N=f/d$) (JACOBSON, *et al.*, 2000). Por convenção, esse número é escrito $f/\#$, em que o símbolo $\#$ é o valor da razão N.

3.4.3 Profundidade de campo

É a região compreendida entre distância da lente em relação ao objeto, ao longo do eixo óptico, em que a imagem estará focalizada, mostrada na Figura 3.6 (BAUER; WESTFALL, 2011). Esse parâmetro é de grande importância na concepção da imagem, pois a manipulação de seu posicionamento e extensão resulta em quão detalhadas serão as características de uma peça medida.

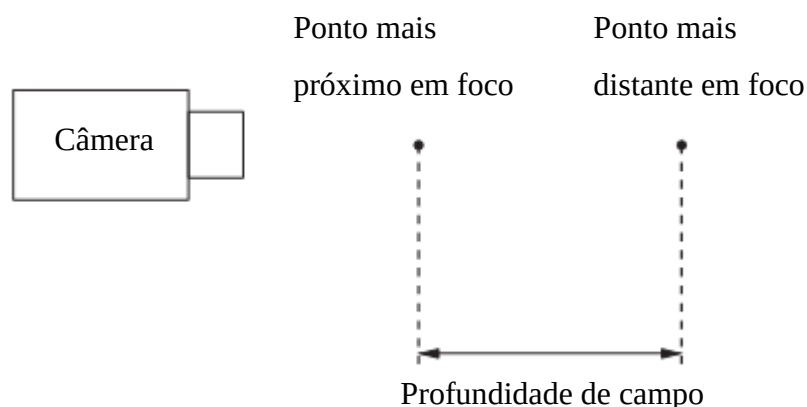


Figura 3.6: Representação da profundidade de campo
Fonte: (FISHER *et al.*, 2014, p. 75)

Como a profundidade de campo é fortemente dependente de outros parâmetros, como a abertura, a distância focal e a distância de focalização, o seu controle pode ser realizado de acordo com a modificação aplicada a esses parâmetros. Se por exemplo, tomando certa distância focal e de focalização, sendo o valor do diâmetro de abertura pequeno, isso significa que o intervalo dos ângulos de luz incidentes será restrito, no entanto, a região em que o objeto estará focalizado será mais ampla. Por outro lado, com o diâmetro de abertura maior, dadas as mesmas condições anteriores, o intervalo dos ângulos de luz incidente será maior, o que resulta em que apenas um intervalo limitado de distância do objeto irá produzir uma imagem focalizada (BAUER; WESTFALL, 2011).

3.4.4 Valor e tempo de exposição

Esses parâmetros estão relacionados, respectivamente, à quantidade de luz e ao tempo que o sensor recebe para capturar uma imagem. Seu controle é feito pelo obturador, que é

localizado no interior da lente ou próximo ao sensor, e tem seu funcionamento em conjunto com o diafragma (FISHER, *et al.*, 2014; LETA *et al.*, 2016). O valor de exposição (também encontrado como a sigla EV- do inglês *Exposure Value*) é uma relação entre o tempo de exposição (t_{EXP}) o valor de abertura relativa (N), apresentado por Jacobson *et al.* (2000), da seguinte forma:

$$EV=3,32 \log \left(\frac{N^2}{t_{EXP}} \right) \quad (3.1)$$

Os valores da escala do EV são utilizados para compensação do valor de exposição, o que serve de indicação para a configuração dos valores de abertura e tempo de exposição.

3.5 ILUMINAÇÃO

As informações ópticas obtidas por um dispositivo de captura de imagem são vulneráveis à iluminação externa, como também às propriedades refletivas e a forma geométrica dos objetos de estudo. Com isso, as imagens e suas características podem sofrer variações devido à uniformidade da iluminação presente no ambiente de medição, soma-se a isso, a maneira com que a superfície do material reflete a luz incidente. Portanto, é de grande importância a correta seleção do tipo de iluminação para cada aplicação, no intuito de evitar erros de medição devido à iluminação (CHO, 2005).

Ainda de acordo com Cho (2005), o controle de iluminação é crucial para a metrologia por imagem, pois sua correta aplicação proporciona uma melhoria na exatidão, como também na confiabilidade e diminuição do tempo de processamento da imagem.

Leta *et al* (2016) apresenta as influências causadas por diferentes formas de fontes luminosas, - como fluorescente, incandescente, LED (*Light-Emitting Diode*) e vapor de sódio - e como proporcionam diversas percepções de textura e cores entre si. No entanto, como nos testes do presente trabalho de dissertação de mestrado foi utilizada a fonte luminosa com lâmpadas LED, serão aqui apresentadas as formas geométricas dos sistemas de iluminação.

A direção com que a iluminação é incidida sobre a superfície de interesse é de suma importância, pois através desse critério há obtenção do máximo de contraste entre as características da peça e o plano de fundo (CHO, 2005).

A Figura 3.7 mostra como a iluminação frontal difusa é disposta:

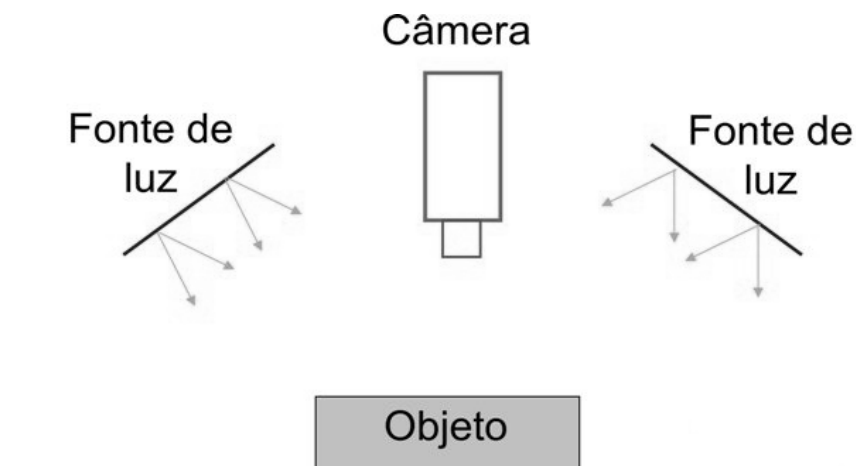


Figura 3.7: Iluminação frontal difusa
Fonte: (LETA *et al*, 2016, p.74)

A iluminação frontal difusa é indicada para promover uniformidade nas condições de iluminação e remoção de sombras no objeto. A difusão da fonte de luz pode ser promovida através de fontes luminosas montadas em ângulos opostos em torno da câmera (CHO, 2005; LETA *et al*, 2016).

Já a iluminação direcional (Figura 3.8) consiste no posicionamento de uma fonte luminosa em ângulo arbitrário à superfície da peça. Seu uso é indicado para redução de reflexos devido à luz incidente em superfícies lisas, no propósito de evidenciar, por exemplo, o contraste em ressaltos (CHO, 2005; LETA *et al*, 2016).

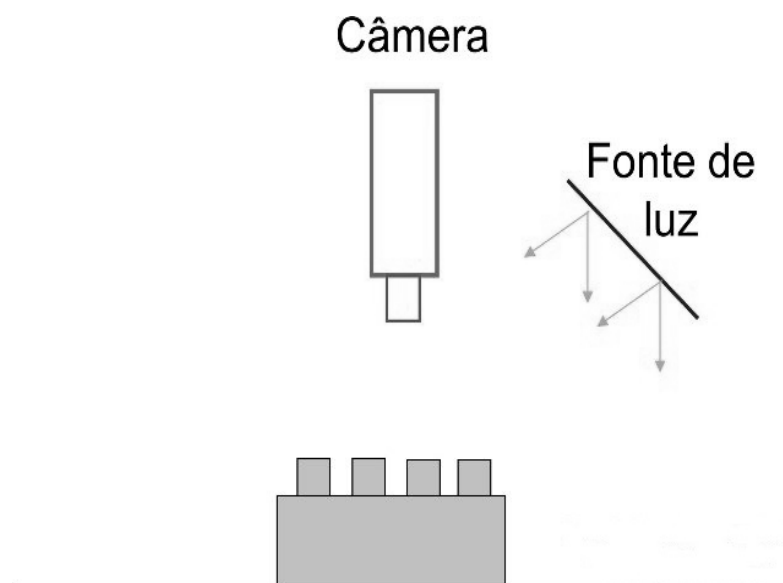


Figura 3.8: Iluminação direcional
Fonte: (LETA *et al*, 2016, p.75)

A iluminação por anel (consiste na disposição de vários anéis concêntricos que possuem diversas lâmpadas LED distribuídas ao longo desses anéis. Por conta dessa geometria, a iluminação por anel é usada quando se deseja reduzir o reflexo de superfícies polidas e de remoção de sombras. Porém, seu objetivo se concentra na inspeção de superfícies, não sendo apropriadas para chanfros (CHO, 2005; LETA *et al*, 2016).

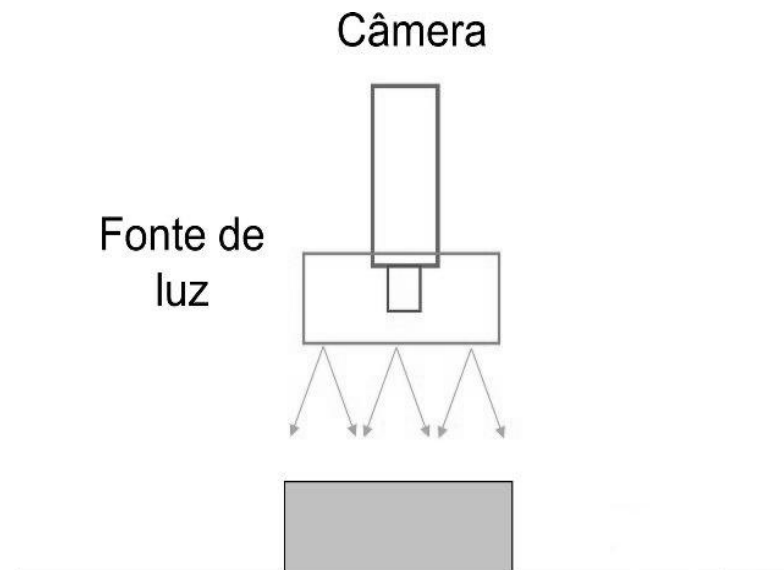


Figura 3.9: Iluminação por anel
Fonte: (LETA *et al*, 2016, p. 75)

Cho (2005) ressalta a eficácia da iluminação por anel em inspeções de objetos que possuem alta refletividade.

Outro tipo de iluminação usada em sistemas de visão é a iluminação diascópica, exemplificado na Figura 3.10, que destaca o contorno do objeto de trabalho, evidenciando as bordas da peça. A fonte luminosa é montada atrás da peça, e com o uso de um colimador, os feixes de luz são transmitidos de forma paralela entre si. Assim, toda luz que chega ao sensor é proveniente da fonte, o que aumenta o contraste nas arestas da peça (CHO, 2005; LETA *et al*, 2016).

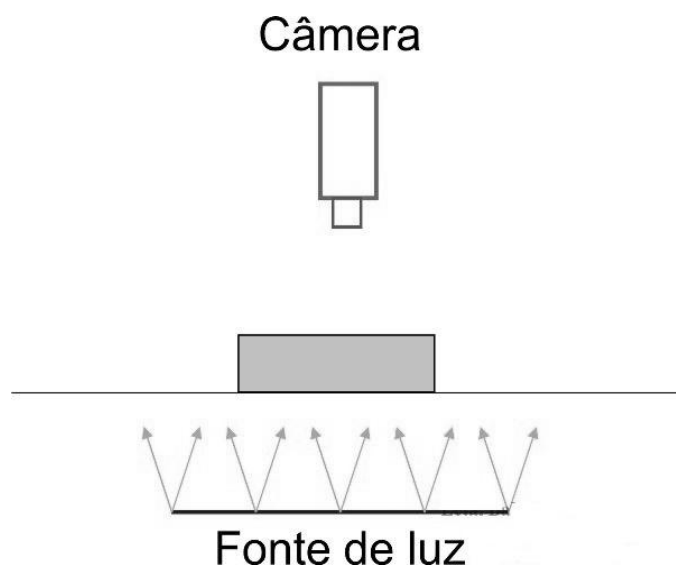


Figura 3.10: Iluminação diascópica
Fonte: (LETA *et al*, 2016, p.76)

Esses tipos de iluminação são bastante utilizados em sistemas de medição por imagem, que para cada aplicação, têm o objetivo de destacar uma característica a ser medida. Contudo, a iluminação deve ser corretamente selecionada e configurada para a obtenção de resultados satisfatórios de medição.

3.6 FATORES QUE INFLUENCIAM AS MEDIÇÕES POR IMAGEM

Com o objetivo de verificar as limitações da utilização da câmera de vídeo no campo da metrologia dimensional, Chiffre e Hansen (1995), consideraram a influência exercida pelos seguintes fatores: sensor, sistema óptico, iluminação, objeto de trabalho, plano de fundo e sistema mecânico. O impacto de cada um desses fatores sobre a exatidão foi apresentado através de resultados experimentais obtidos com o uso de medição por câmera de vídeo.

Com o propósito de investigar a influência do tamanho do *pixel* de uma câmera CCD na resolução de sistemas de medição, De Chiffre e Hansen (1995) utilizaram uma MMC para inspeção de um anel, com diâmetro de 4 mm. Os resultados obtidos pelos autores apontam que o tamanho do *pixel* determina a exatidão do dispositivo de captura de imagem.

Além disso, foi constatado, ainda, que a posição do sensor em relação ao objeto tem influência sobre o resultado, isso se deve, principalmente ao tamanho do pixel. Desse modo, com o intuito de compensar o desvio proveniente do deslocamento do sensor, em relação ao

objeto medido, foi criado um modelo teórico. Verificou-se também, que o foco automático é fortemente dependente da intensidade da luz, isto é, à medida que a intensidade da luz é aumentada, a medição se torna impossível, em razão da capacidade de captação do sensor. Logo, como esperado, planos de fundo refletores apresentaram resultados diferentes dos planos de fundo escuros (CHIFFRE; HANSEN, 1995).

Ainda de acordo com os autores supracitados, o sistema óptico tem uma grande dependência da intensidade de luz, essa dependência aumenta à medida que aumenta a distância focal. Isso ocorre se um objeto a uma grande distancia focal, tem um grande ângulo de abertura, ou seja, recebendo, desse modo, mais luz. Quanto ao sistema mecânico, esse apresentou desvio, mediante à rotação do item sobre os diâmetros medidos, mesmo com um pequeno anglo de rotação, acarretou em um alto desvio.

Concluiu-se que, o uso de câmeras de vídeo permite a realização de medições com exatidões próximas a 1-2 μm , quando todos os parâmetros de configuração estão sobre controle (CHIFFRE; HANSEN, 1995).

Seung-Woo (1996), propôs a análise de incertezas de medição de uma câmera de vídeo, adotando a teoria de ondas ópticas e considerando alguns parâmetros de projeto, a saber: lentes objetivas, fenômeno “*aliasing*” da imagem obtida pela câmera, desfocagem, coerência de iluminação e algoritmos de detecção de arestas. Portanto, verificou-se que a incerteza dos sensores justifica-se, principalmente, pela coerência de iluminação e pelos algoritmos de detecção de arestas.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com as informações apresentadas, neste capítulo, conclui-se que é de suma importância o conhecimento básico sobre os principais equipamentos ópticos, bem como seus componentes e acessórios, sem deixar de lado, os sistemas utilizados para aprimorar seu funcionamento. Haja vista que tais parâmetros influenciam os resultados obtidos através de sistemas de medição por imagem, e por isso, devem ser selecionados adequadamente para cada aplicação.

CAPÍTULO 4

CARACTERÍSTICAS E PRINCIPAIS FERRAMENTAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO POR IMAGEM VISIONPAK

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as características e principais ferramentas do sistema computacional (*software*) de medição por imagem, denominado VISIONPAK o qual é incorporado à Máquina de Medição por Coordenadas, que foi utilizada nesta dissertação de mestrado, modelo CRYSTA-APEX S 7106.

4.2 CARACTERÍSTICAS DE UM SOFTWARE UTILIZADO EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO POR IMAGEM

A configuração de sistemas de medição por imagem exigia, anteriormente, um grande conhecimento em linguagens de programação, como C e linguagens similares, ou havia a necessidade de conhecer uma linguagem dedicada, dependendo do sistema utilizado (HARDING, 2008).

Ainda de acordo com Harding (2008), atualmente os sistemas de medição por imagem podem dispor de múltiplos processadores e memórias de alta velocidade, sem, contudo, que o usuário final necessite executar algum tipo de programação, no intuito de fazer com que o sistema funcione apropriadamente. As câmeras de vídeo usadas em medições, que antes precisavam da gravação de arquivos especiais para o seu funcionamento, passaram a operar perfeitamente com apenas a conexão desse dispositivo no Sistema de Medição por Imagem (SMI). De igual modo, os computadores modernos substituíram as estações de trabalho de alta tecnologia, o que levou à diminuição nos custos nos sistemas de medição por imagem.

A facilidade que os *softwares* trouxeram, juntamente com os preços mais acessíveis, tornou os SMIs mais atrativos às várias inspeções industriais, alinhamentos, e, até mesmo, as simples aplicações de calibração, uma vez que tais atividades, no passado, seriam onerosas, tanto pela aquisição do sistema quanto por sua manutenção e configuração necessária (HARDING, 2008).

Ainda segundo HARDING (2008), o *software* usado no SMI nada mais é que a aplicação de algoritmos matemáticos, esses representam os processos realizados nas imagens capturadas pela câmera, permitindo assim, decisões sobre as características medidas. Essas decisões podem ser, por exemplo, se a característica inspecionada é dimensionalmente correta, se sua superfície apresenta imperfeições aceitáveis ou ainda se há falta de algum componente no objeto de trabalho.

4.3 JANELAS BÁSICAS DO VISIONPAK

O VISIONPAK possui um conjunto formado por barras e janelas que constituem sua interface de medição. O conhecimento desses elementos básicos se mostra de grande importância, pois através da janela principal que serão obtidos os dados de medição; sendo, portanto, indispensável sua correta configuração para atingir resultados com maior exatidão. A Figura 4.1 apresenta cada uma das barras e janelas do VISIONPAK.

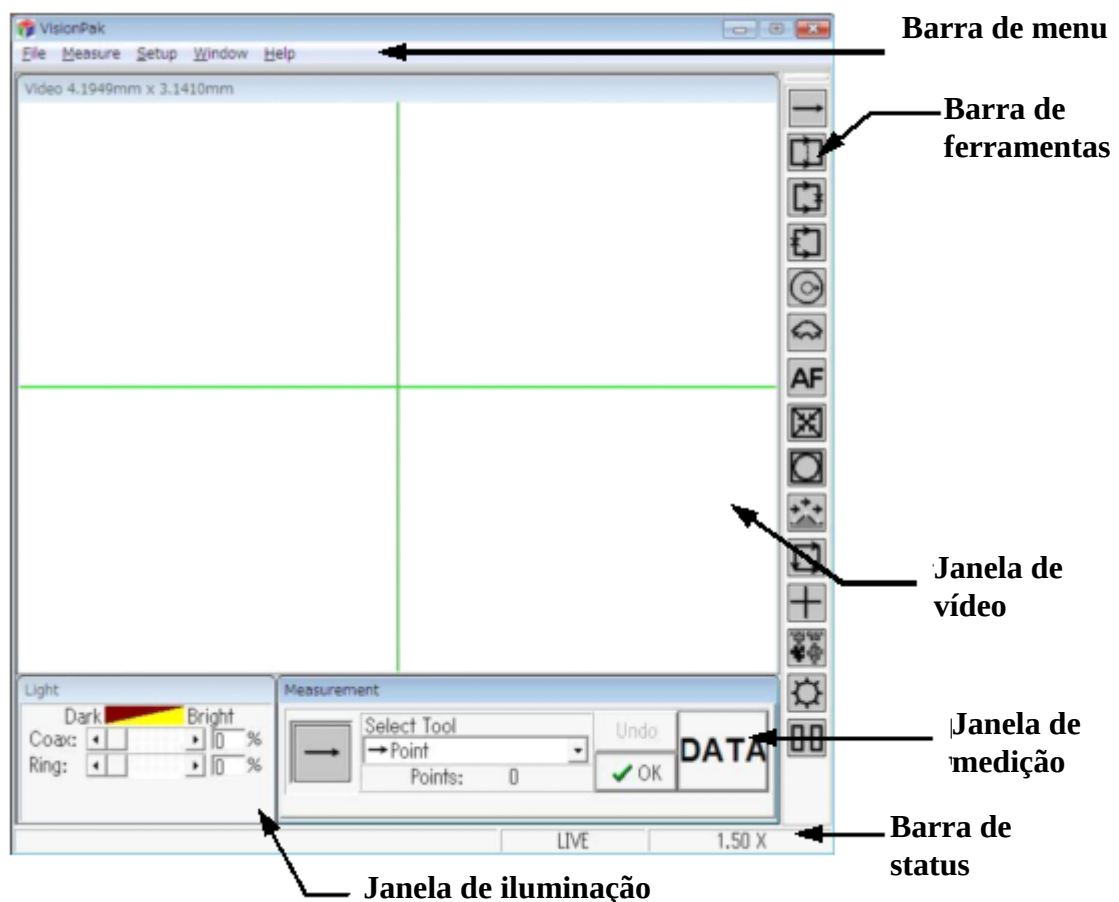


Figura 4.1: Janela principal do VISIONPAK
Fonte: Adaptado de MITUTOYO (2010)

Os seis elementos básicos da janela principal possuem características distintas, que em conjunto, oferecem as ferramentas necessárias para a aquisição dos dados de medição. A seguir, são descritas as características de cada janela e barra:

- **Barra de menu:** permite o acesso aos comandos do VISIONPAK, como os comandos de trabalho e impressão dos arquivos, comandos de medição, configuração de ambiente do *software*, operação de janelas do *software* e informações de ajuda.
- **Barra de ferramentas:** possui os ícones das ferramentas de medição, que são atalhos para as operações de medição feitas na janela de vídeo.
- **Janela de vídeo:** Apresenta a imagem capturada pela câmera de vídeo, podendo ser uma figura importada do disco de armazenamento do computador, ou de periféricos, ou a imagem pode ser obtida em tempo real no momento da medição. As operações realizadas pelas ferramentas de medição são usadas na janela de vídeo.
- **Janela de iluminação:** Permite o ajuste da intensidade das fontes de iluminação presentes na câmera, a saber, a iluminação coaxial e por anel.
- **Janela de medição:** Essa janela permite a selecionar, desfazer e executar as ferramentas de medição. Também é apresentado na janela de medição o número de pontos obtidos na medição de uma característica da peça.
- **Barra de status:** Apresenta as informações do modo de vídeo (se a imagem usada na medição é armazenada ou é obtida em tempo real), a ampliação da lente utilizada, como também informações sobre o estado atual do botão selecionado do VISIONPAK.

As informações expostas por cada barra da janela principal é de grande importância para possíveis ajustes durante a medição de componentes.

4.4 ILUMINAÇÃO

Como mostrado na seção 4.3, a intensidade de luz pode ser controlada através da janela de iluminação, com o arrasto do cursor ou inserindo um valor numérico. O menor incremento para esse ajuste de iluminação é de 1% para ambas as fontes. A Figura 4.2 apresenta a interface da janela de iluminação:

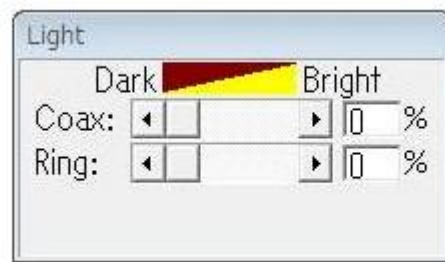


Figura 4.2: Janela de iluminação
Fonte: MITUTOYO (2010)

Os diferentes tipos de iluminação são usados para detectar características distintas na superfície da peça, como apresentado no CAPÍTULO 3, contudo, neste trabalho de dissertação, foram usados dois tipos de iluminação, aos quais a MMC possui, a saber, a iluminação coaxial e por anel.

Com o propósito de obter uma clara visão do estágio de medição, as fontes de iluminação devem ser ajustadas, pois os objetos medidos poderão apresentar características refletivas diferentes, necessitando assim, o ajuste mais adequado para cada caso. De igual forma, o plano de fundo em que a peça se encontra posicionada pode influenciar, de acordo com sua refletividade, logo deve ser considerado juntamente com as características da peça, durante a configuração da intensidade das fontes luminosas.

4.4.1 Iluminação coaxial

Esse tipo de iluminação consiste na emissão de um feixe de luz diretamente no objeto, através das lentes da câmera de vídeo. A iluminação coaxial é indicada para detectar as condições superficiais da peça.

4.4.2 Iluminação por anel

A partir dos anéis que cercam as lentes da câmera, esse tipo de iluminação projeta o feixe de luz sobre a superfície da peça em um ângulo, por conta disso, pequenas fissuras superficiais e áreas de superfícies com alta rugosidade são visivelmente atenuadas, para que não se destaquem. Essa característica é particularmente útil quando a iluminação coaxial

promover ruído excessivo na imagem, impedindo com que arestas sejam detectadas pelo programa computacional.

4.4.3 Modo de saturação de luz

Se houver iluminação excessiva sobre a superfície da peça, a imagem ficará saturada com a luz incidente, diminuindo assim, a exatidão da medição. Para diminuir o efeito da saturação durante a inspeção de peças, utiliza-se o modo de saturação do VISIONPAK, a fim de orientar sobre o melhor ajuste de iluminação. Assim, a região saturada é destacada em amarelo na janela de vídeo, evidenciando as áreas da superfície com alta incidência de luz.

4.5 FOCALIZAÇÃO

As imagens podem ser focalizadas através da ferramenta de foco automático ou pelo nível de contraste, porém o foco automático só pode ser realizado em sistemas que operem por CNC. O procedimento para focar uma imagem no SMI deve seguir os seguintes passos:

1. Mover o sensor câmera de modo que seu posicionamento esteja sobre a superfície de interesse.
2. Ajustar a intensidade de luz, seguindo as indicações apresentadas anteriormente.
3. Utilizar a ferramenta de foco automático (apenas em máquinas CNC) ou, mover a câmera para o ponto de maior contraste, a fim de focalizar a imagem através desse nível de contraste.

A imagem corretamente focalizada apresenta maior nitidez em as suas características, sendo imprescindível para a medição por imagem, pois o correto ajuste desse parâmetro resulta em maior coleta de pontos nas inspeções.

4.5.1 O foco automático

A técnica de foco automático atende uma das tarefas mais críticas para o processamento de imagens em vários sistemas ópticos: que é localizar a posição focal do

sistema de medição. Esse procedimento para obtenção de imagens cada vez mais limpas, torna-se necessário em medições dimensionais, inspeções e rastreamento de objetos (CHO, 2005).

De acordo com Cho (005), outra importante função do foco automático, especialmente para a metrologia por imagem, é a determinação da distância entre um objeto e uma posição de referência. Esse recurso é utilizado para medição da altura com que a superfície da peça está da lente da câmera.

O princípio de funcionamento desses sensores é semelhante aquele com que os sensores por triangulação operam, porém, o feixe de luz é focalizado sobre a superfície da peça, e, por conseguinte, a porção da luz refletida é direcionada a um detector de foco, através de um dispositivo divisor de feixe (SCHWENKE *et al.*, 2002).

A função de foco automático no VISIONPAK faz com que a imagem seja rapidamente focalizada, sem, no entanto, realizar a captura de algum ponto. Para esse fim, existe a função de foco de superfície, que detecta um ponto na posição central da ferramenta. Nesse sentido, após ajustar o foco da imagem, o ponto é usado para medição de distância no sentido perpendicular ao plano da imagem.

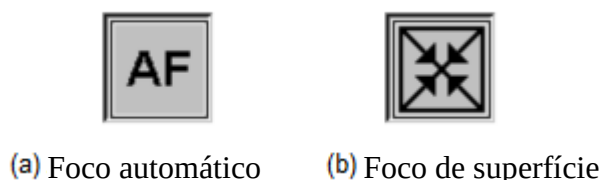


Figura 4.3: Ferramenta de foco automático (esquerda) e foco de superfície (direita)
Fonte: Adaptado de MITUTOYO (2010)

Uma vez selecionada a ferramenta de foco automático (ou foco de superfície), a câmera de vídeo se move automaticamente para a região selecionada na janela de vídeo, focalizando-a.

Hocken e Pereira (2012), afirmam que o contraste pode ser usado como parâmetro para determinação do foco de uma imagem. Isso ocorre quando a câmera de vídeo percorre o eixo óptico no intervalo que contém a superfície de interesse, logo, o contraste da imagem atinge o valor máximo no ponto em que o plano da superfície da peça coincide com o plano focal do sensor.

Quando a câmera de vídeo é movida para o ponto selecionado pela ferramenta de foco automático, o programa computacional escolhe o melhor contraste na área em que a ferramenta é executada, definindo então, o ponto focal. Porém, o contraste será apenas avaliado na região em que a ferramenta de focalização estiver abrangendo, e, caso essa área apresente uma pequena variação do contraste, a execução da ferramenta do foco automático falhará.

4.5.1.1 O intervalo de varredura

É o intervalo no qual a câmera de vídeo poderá cobrir quando a ferramenta de foco automático for selecionada (vide Figura 4.4). Contudo, a distância máxima que o sensor pode percorrer durante a varredura depende da lente instalada.

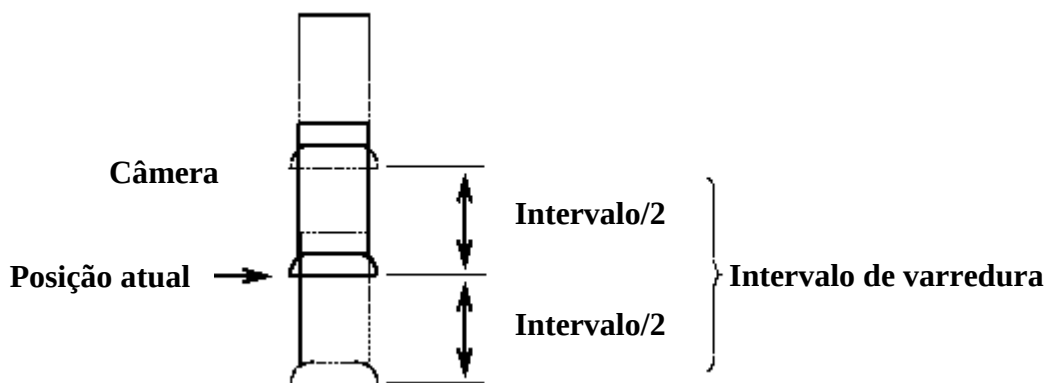


Figura 4.4: Percurso de varredura durante a execução do foco automático
Fonte: Adaptado de MITUTOYO (2010)

Dentro dos limites dos valores desses intervalos para cada lente é possível realizar sua configuração dentro das opções do *software*. Porém, deve-se atentar que a superfície da peça, ou qualquer outro obstáculo, não esteja dentro do intervalo de varredura, o que poderá causar danos ao equipamento.

4.5.1.2 Velocidade de varredura

Esse parâmetro determina com que velocidade o sensor irá percorrer o intervalo de varredura. Para essa aplicação, existe a possibilidade de configuração entre duas opções: velocidade alta e baixa.

Configurando a velocidade de varredura como alta, a câmera de vídeo irá mover-se apenas uma vez ao longo do intervalo de procura, localizando o ponto com maior contraste dentro da região selecionada e estabelecendo-o como o ponto focal. Contudo, essa configuração apresenta baixa exatidão de foco.

Por outro lado, a opção de velocidade baixa de varredura permite com que o sensor percorra dois ciclos de varredura, e, baseando-se no ponto de maior contraste, define o ponto focal. Essa opção é recomendada quando se deseja obter maior exatidão do foco.

4.5.2 Focalização pelo nível de contraste

Em sistemas de medição manual, a imagem é focalizada através da observação da janela de vídeo, na qual o operador verifica se a superfície de interesse está devidamente nítida para os propósitos da medição. Entretanto, quando a focalização é realizada dessa maneira, o resultado da imagem obtida pode variar, visto que, essa tarefa é fortemente dependente do operador. Diante disso, no intuito de corrigir esse problema, o VISIONPAK oferece uma escala com os níveis de contraste, auxiliando o operador a realizar o ajuste do foco na peça de trabalho.

Usando a ferramenta de focalização pelo nível de contraste, é possível obter resultados com alta exatidão, mesmo em sistemas de medição manual. Esse procedimento é realizado através da movimentação do sensor, de forma que imagem apresentada na janela de vídeo esteja com a melhor nitidez possível. A Figura 4.5 mostra a escala de nível de contraste usada no VISIONPAK:

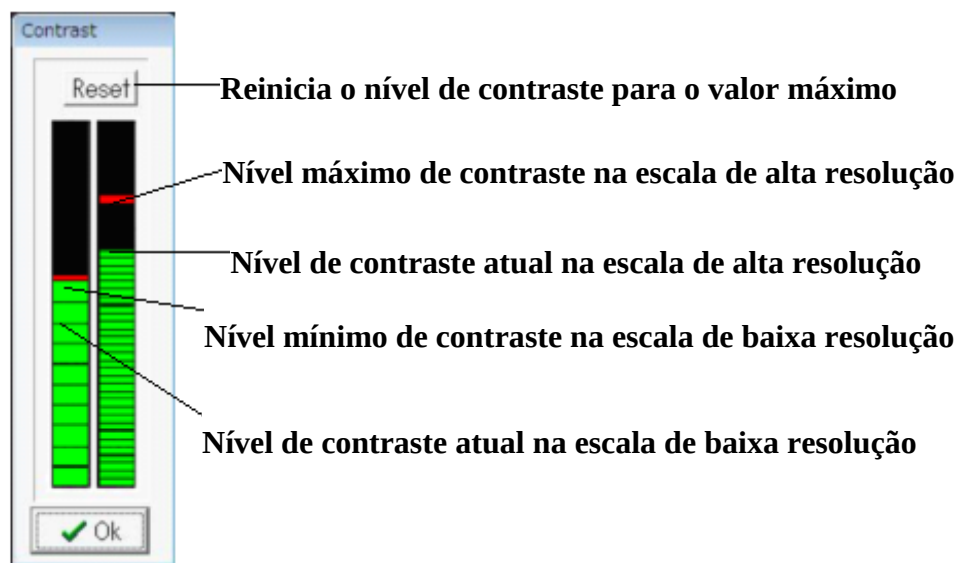


Figura 4.5: Barras do nível de contraste da imagem
 Fonte: Adaptado de MITUTOYO (2010)

Uma imagem que apresente um baixo nível de contraste está desfocada, entretanto, a imagem apresentará um alto nível de contraste no ponto em que entra em foco. Por essa razão, o nível máximo de contraste é definido como o seu ponto focal.

Ambas as escalas de baixa e alta resolução apresentam o nível de contraste no centro da imagem obtida pela câmera de vídeo, compreendendo a uma região de dimensão 50×50 pixels. A relação entre essas escalas consiste em: um incremento da escala de baixa resolução equivale a 50 incrementos na escala de alta resolução.

A marca vermelha nas escalas indica o nível máximo de contraste segundo a ferramenta de focalização. Se o nível indicado em verde não atingir essa marca, significa que existe outra posição para qual a câmera de vídeo deva ser movimentada, e, portanto, apresente um nível de contraste maior.

4.6 AS FERRAMENTAS DE MEDIÇÃO

A barra de ferramentas do VISIONPAK fornece uma série de recursos para captação de pontos, a saber: oito ferramentas para detecção de arestas; uma para captação de um ponto central em qualquer região clara (função definida pelo manual do *software* como “centróide”); uma ferramenta manual que permite entrada de um ponto através de um clique com o mouse sobre a região de interesse; uma ferramenta de identificação de padrões; e por fim, as

ferramentas de iluminação. Contudo, este trabalho de dissertação irá explorar apenas as ferramentas utilizadas nas medições do presente estudo.

4.6.1 Ferramentas de detecção de arestas

Os recursos do VISIONPAK para detecção de arestas são baseados na variação de iluminação entre a característica medida e a superfície adjacente. A Figura 4.6 mostra a representação de um circuito impresso, em que a intensidade da luz refletida pela superfície da peça é medida pelo *software*, e, o sentido da varredura de medição é indicado pela seta que corta as trilhas do circuito impresso.

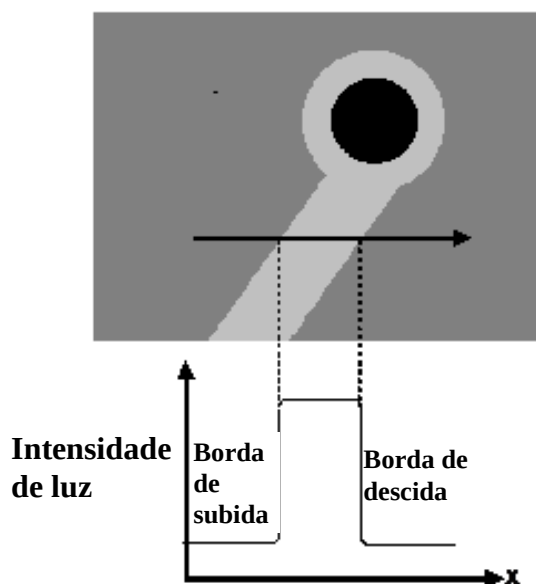


Figura 4.6: Representação da detecção de borda em um circuito impresso
Fonte: Adaptado de MITUTOYO (2010)

A região que compreende a trilha do circuito impresso, representada no gráfico da Figura 4.6, sofre uma brusca mudança de intensidade de iluminação, e os pontos onde essa variação ocorre é definido como as arestas da região de interesse. A primeira mudança da intensidade de luz é chamada de borda de subida, enquanto a segunda mudança é conhecida como borda de descida. Esses fatores são usados para a identificação da aresta pelo VISIONPAK.

A variação da intensidade de iluminação, mostrada na Figura 4.6, é uma representação ideal. No entanto, para casos reais, irregularidades como falhas superficiais e poeira

promovem ruídos no sinal de iluminação que são interpretados pelo *software*. Com isso, arestas que apresentem baixa relação sinal-ruído são chamadas de bordas fracas, em contrapartida, são conhecidas como bordas fortes aquelas que possuam alta relação sinal-ruído.

As ferramentas de detecção de arestas foram projetadas baseadas nessas informações, tendo como objetivo capturar pontos dessas características de maneira eficiente diante de diversas condições de medição.

4.6.1.1 Ferramenta de ponto

Esse recurso permite a geração de um único ponto quando ocorre a interseção entre a linha de varredura e a aresta de interesse, sendo, portanto, útil para detecção de aresta de qualquer geometria.

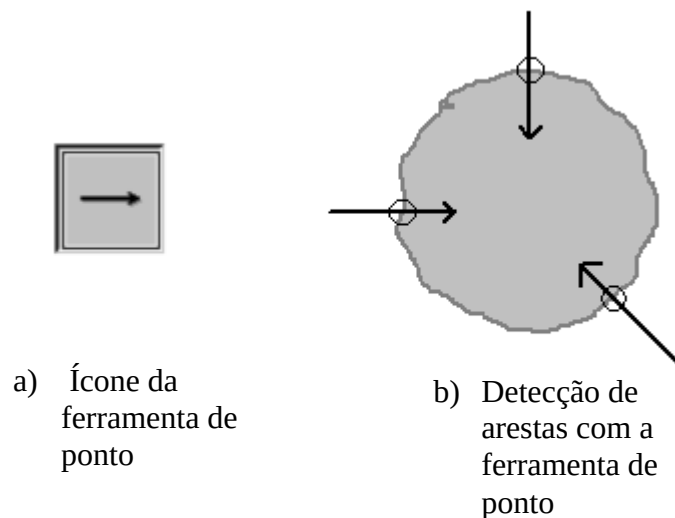


Figura 4.7:Ícone da ferramenta de ponto (esquerda) e exemplo de medição utilizando a ferramenta de ponto (direita)

Fonte: Adaptado de MITUTOYO (2010)

As linhas de varredura mostradas na Figura 4.7 podem ser posicionadas de acordo com a estratégia de medição adotada pelo operador, e os pontos captados são automaticamente definidos como pontos de aresta.

4.6.1.2 Ferramenta de caixa

A ferramenta de caixa promove a geração de uma série de linhas de varredura paralelas, onde cada linha detecta um ponto quando há interseção com uma aresta, conforme exemplificado na Figura 4.8:

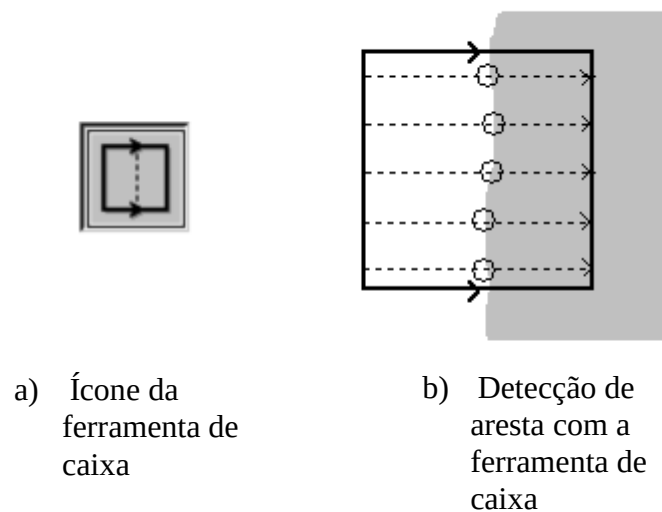


Figura 4.8:Ícone da ferramenta de caixa (esquerda) e exemplo de medição utilizando a ferramenta de caixa (direita)

Fonte: Adaptado de MITUTOYO (2010)

As dimensões e a posição da caixa formada podem ser alteradas de acordo com a necessidade da medição, permitindo assim, limitar a sua abrangência apenas à característica medida. Ademais, o uso da ferramenta de caixa é indicado para medição de arestas uniformes e contínuas na superfície de interesse.

4.6.1.3 Ferramenta de círculo e ferramenta de arco

A ferramenta de círculo localiza geometrias circulares por intermédio das linhas de varredura radiais ao longo de 360°, desse modo, com a obtenção de seus pontos, fornece a posição e o diâmetro da circunferência mais adequada segundo os dados coletados, como mostrado na Figura 4.9:

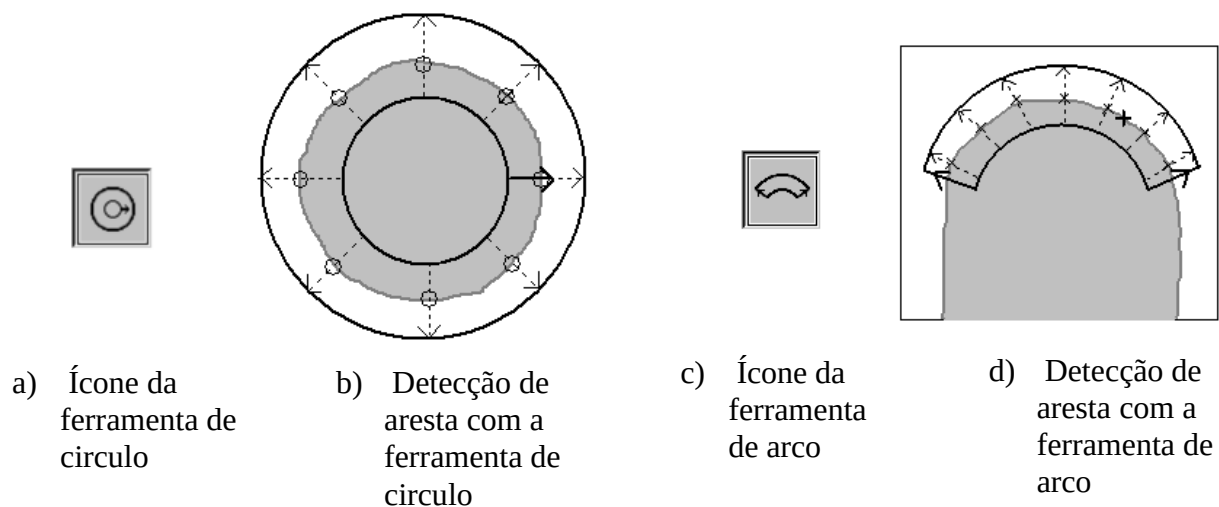


Figura 4.9:Ícone da ferramenta de círculo (a); exemplo de medição com a ferramenta de círculo (b); ícone da ferramenta de arco (c); exemplo de medição usando a ferramenta de arco (d)
 Fonte: Adaptado de MITUTOYO (2010)

Essa ferramenta é útil para medição de furos circulares e elementos de geometria semelhante, entretanto, faz-se necessário que a característica do objeto de trabalho possa ser devidamente enquadrada pela câmera de vídeo, pois, isso garante uma obtenção de resultados com maior exatidão.

De modo semelhante, a ferramenta de arco é usada para detecção de padrões circulares, sendo indicada para uso em peças com seção de circunferência. No mais, pode ser configurada em diversos ângulos de varredura.

4.6.1.4 Ferramenta de máximo e mínimo

De forma semelhante à ferramenta de caixa, esses recursos permitem a geração de linhas de varreduras paralelas, porém, nesse caso, detectam o ponto mais distante da região do início da varredura na aresta da peça (ferramenta de máximo), ou, o ponto mais próximo do início da varredura na aresta (ferramenta de mínimo).

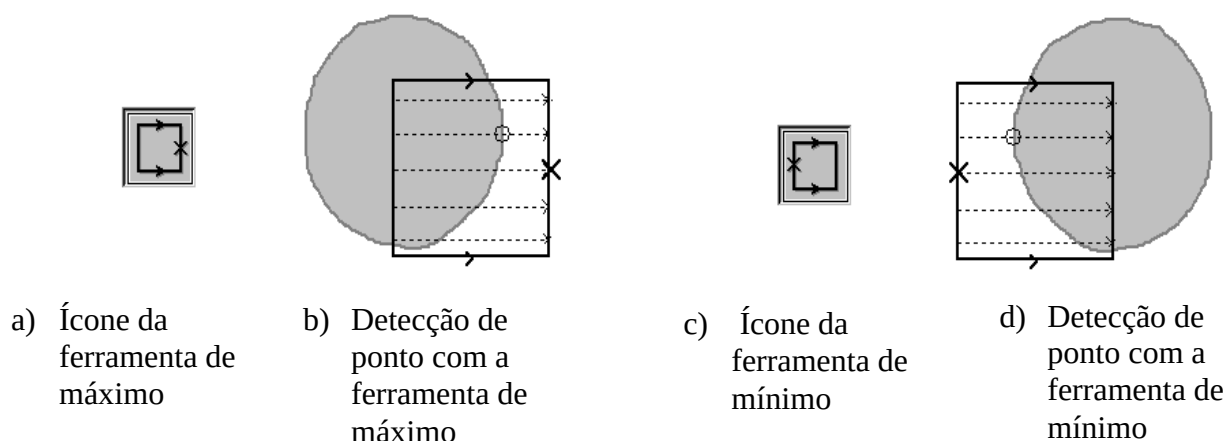


Figura 4.10:Ícone da ferramenta de máximo (a); exemplo de medição com a ferramenta de máximo (b); ícone da ferramenta de mínimo (c); exemplo de medição usando a ferramenta de mínimo (d)

Fonte: Adaptado de MITUTOYO (2010)

Ambas as ferramentas são úteis para a determinação de pontos na extremidade de um objeto, mesmo que esse apresente arestas de geometrias irregulares.

4.6.2 Ferramentas complementares

O VISIONPAK ainda dispõe de outros recursos para detecção de arestas, de pontos, de identificação de padrões e as ferramentas de ajustes de iluminação. Com relação à detecção de arestas, é importante destacar a ferramenta de Rastreamento Automático de Borda, que é indicada principalmente quando a característica de interesse da peça não está completamente enquadrada na imagem. Essa ferramenta permite que ocorra uma varredura na superfície da peça, fazendo com que a câmera mova-se automaticamente, e, tendo o objetivo de detectar a continuidade da característica não enquadrada na imagem inicial.

Para a captação de pontos, o VISIONPAK possui a ferramenta manual e a ferramenta de centroide. A ferramenta manual possibilita a seleção de pontos na superfície da peça, a cada clique do *mouse*, sem, contudo, detectar arestas no objeto de trabalho. Já a ferramenta de centroide é indicada para detectar um ponto central de uma região definida por brilho, em uma característica de forma irregular.

A ferramenta de detecção de padrões realiza uma varredura ao longo da imagem mostrada na janela de vídeo, identificando as geometrias configuradas pelo operador.

Por fim, as ferramentas de iluminação que permitem que quando executadas, o ajuste de iluminação seja realizado automaticamente, dada a fonte luminosa, evidenciando assim, a característica desejada da imagem.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O VISIONPAK fornece uma grande diversidade de ferramentas, com o propósito de atender as mais variadas condições de medição, de modo que a influência do operador seja cada vez menor sob os resultados de inspeções. Entretanto, torna-se indispensável ao operador o conhecimento dessas funções, a fim de promover, em cada aplicação, a correta seleção das ferramentas do *software*, visto que essa seleção está diretamente ligada à exatidão resultante da medição executada pelo sistema de medição por imagem.

CAPÍTULO 5

MATERIAIS, APLICAÇÕES PRÁTICAS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Os materiais empregados neste trabalho de dissertação serão descritos no corrente capítulo, como também os procedimentos adotados para a realização de medições em peças de dimensões pequenas ou em casos em que os parâmetros a serem medidos são de dimensões inferiores a 4 mm. As medições foram realizadas com a utilização de um sistema de medição por imagem. Em seguida, serão apresentadas a análise e a discussão dos resultados obtidos nas medições.

5.2 MATERIAIS

5.2.1 A Máquina de medição por coordenadas

A máquina de medição por coordenadas MITUTOYO, modelo CRYSTA-APEX S 7106 foi utilizada para medições das peças inspecionadas, no presente estudo, sendo essa MMC, pertencente ao Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP), da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), mostrada na Figura 5.1:

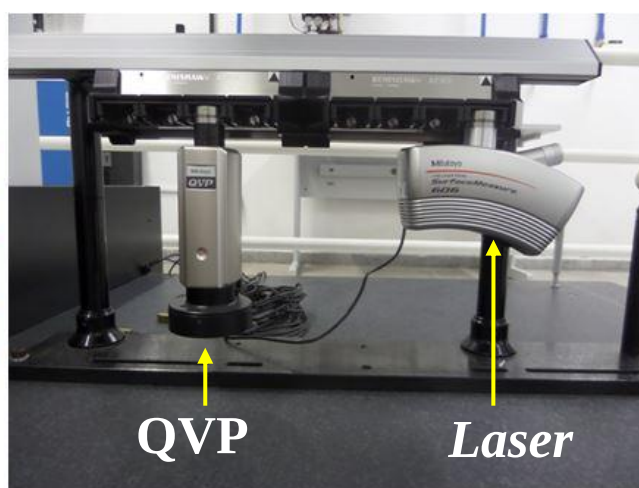


Figura 5.1: MMC modelo Crysta-Apex S 7106

Classificada como um modelo de alto desempenho, essa máquina – que opera por CNC – dispõe de três sensores, sendo um sensor para medição com contato e dois para medição sem contato, a saber, um sensor *laser* e uma câmera CCD, conforme apresentado na Figura 5.2:



a) Sensor para medição com contato



b) Sensores para medição sem contato

Figura 5.2: Sensor para medição com contato (a); sensor câmera QVP e o sensor *laser* (b) da MMC

Seus eixos coordenados movem-se ao longo da mesa metrológica sobre guias aerostáticas, e o alcance máximo é de 700 mm para o eixo X, 1000 mm para o eixo Y e 600 mm para o eixo Z. As peças inspecionadas por essa MMC devem ter, portanto, as dimensões adequadas para o espaço útil que a máquina comporta.

Cabe ressaltar que, devido a sua estrutura, a MMC permite que peças de até 1000 kg possam ser medidas. Essa característica, combinada com seus múltiplos sensores, e o alcance de cada eixo coordenado, permite que uma vasta variedade de peças possam ser medidas.

5.2.1.1 O sensor câmera

Indicado para medição sem contato de micro geometrias ou de componentes flexíveis, o MITUTOYO QVP (*Quick Vision Probe*) é o cabeçote que dispõe de uma câmera CCD montado na máquina de medição por coordenadas, exemplificado na Figura 5.3. O modelo QVP é especificamente projetado para atuar em máquinas de medição por coordenadas, e é operado através do *software* VISIONPAK (vide CAPÍTULO 4).



Figura 5.3: Sensor câmera QVP
Fonte: MITUTOYO, 2016

Esse sensor dispõe ainda de duas fontes luminosas: uma coaxial e uma por anel. Essas, compostas de lâmpadas LED distribuídas na estrutura da câmera.

As especificações técnicas desse sensor são apresentadas na Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Especificações técnicas do sensor câmera QVP

Especificações do QVP						
Unidade principal do QVP	Tamanho do sensor CCD		1/3” (B/W)			
	Ampliação do tubo óptico		0,375×			
	Iluminação	Coaxial	Fonte LED (embutida): Dissipação de energia de 5W ou menor			
		Por anel	Fonte de LED: Dissipação de energia 10W ou menor			
	Massa		Modelo de junta automática: 315g, Modelo de haste: 390g			
	Ampliação óptica		0,375×	1,125×	1,815×	3,75×
	Campo de visão (mm)		9,6×12,8	3,2×4,3	1,9×2,6	1×1,3
	Distância de focalização (mm)		59	72,3	59,5	44
Lentes	Ampliação		ML1× Opcional	ML3× Padrão	ML5× Opcional	ML10× Opcional
	Abertura relativa (N)		0,03	0,07	0,11	0,18
	Profundidade de campo (µm)		306	56	23	8
	Massa		70g	47g	59g	75g
QVP I/F BOX	Tensão de alimentação		AC 100-240V			
	Frequência		50/60 Hz			
	Potência		45W			
	Massa		3800 g			

Fonte: Adaptado de MITUTOYO, 2016

Nas medições realizadas neste trabalho de dissertação foi utilizada a lente objetiva ML3×. Essa objetiva, segundo suas especificações, é a mais adequada para medição das características dos componentes apontados ao longo deste estudo.

5.2.2 Guia de calibração

Esse componente de alta exatidão é utilizado para a verificação de discordâncias entre os resultados obtidos com o sensor de toque e o sensor câmera.

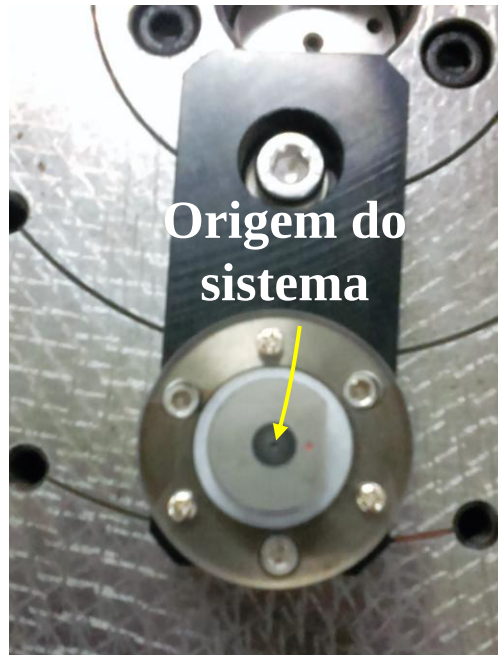


Figura 5.4: Guia de calibração

Devido a sua geometria, o guia de calibração permite que a origem ($X=0$, $Y=0$, $Z=0$) seja definida em um furo localizado em seu plano superior, com o uso do sensor de toque (vide Figura 5.4). Após estabelecer a origem do sistema de coordenadas local da máquina com o uso deste guia, a medição do diâmetro desse furo é feita pelo sensor câmera, observando, então, as coordenadas (X_f , Y_f , Z_f) do centro do furo e comparar com as coordenadas ($X=0$, $Y=0$, $Z=0$) do sistema de coordenadas definido com o sensor de contato.

5.2.3 Bicos injetores de combustível

Amplamente utilizados em motores dos veículos atuais, os bicos injetores de combustível – juntamente com o sistema de injeção eletrônica – possibilitaram o dimensionamento de motores com consumo de combustível mais eficiente. Segundo Peiner *et al* (2009), a quantidade utilizada de combustível e a emissão de gases de exaustão, em motores Diesel, são fortemente dependentes da geometria dos furos dos bicos injetores.

Esses componentes apresentam diferentes geometrias, variando de acordo com o uso a qual se destina e/ou fabricante. Os microfuros dos bicos injetores de combustível são usinados por máquinas de corte a *laser* ou através de máquinas de eletroerosão, conferindo dimensões entre 100-200 μm (PEINER, *et al* 2009; EMAMVERDI; ABBASI, 2014).

Devido à magnitude da dimensão do diâmetro dos microfuros, os sensores de toque convencionais usados em MMCs são impossibilitados de realizar as medições dessas características, sendo necessárias adaptações em sensores de toque delgados, onde cada furo é medido individualmente.

Nas aplicações deste trabalho de dissertação, foram medidos os diâmetros de microfuros de quatro bicos injetores de combustível, onde três desses, identificados durante as medições como bicos injetores 1, 2 e 3 (Figura 5.5 e Figura 5.6) já foram utilizados em carros de passeio, e um bico injetor de combustível de motocicleta (Figura 5.7), identificado como bico injetor 4, utilizado apenas para testes em um motor experimental.



Figura 5.5: Bicos injetores de combustível de carros



Figura 5.6: Microfuros do bico de injetor de combustível de carro



Figura 5.7: Bico injetor de combustível de motocicleta de 12 furos

5.2.4 Placas de circuito impresso

Diversos parâmetros técnicos são controlados em Placas de Circuito Impresso (PCI, também referidas pela sigla PCB, do inglês *Printed Circuit Board*), como por exemplo, distância entre trilhas, a fim de proporcionar o seu isolamento adequado.

Devido à diversidade de projetos desses componentes, cada fabricante possui seu próprio método para desenvolvimento de placas de circuito impresso, porém para o propósito deste trabalho, foram utilizadas as informações contidas no Manual de Parâmetros Técnicos da empresa CIRCUIBRAS. A placa utilizada nas medições é mostrada na Figura 5.8:



Figura 5.8: Placa de circuito impresso

5.2.5 Esferas de alta exatidão

As esferas de alta exatidão são usadas como padrão para medições. Fabricadas em metal duro e possuindo 1,00 mm de diâmetro, essas esferas apresentam circularidade de 0,1 μm .



Figura 5.9: Esfera de alta exatidão

5.2.6 Engrenagens

Outros elementos utilizados nas medições foram as engrenagens empregadas em relógios de pulso, que, além das pequenas dimensões geométricas, são facilmente desmontados na aplicação de uma pequena carga, tornando a sua medição através de um sensor câmera mais adequada. A Figura 5.10 apresenta as engrenagens medidas:

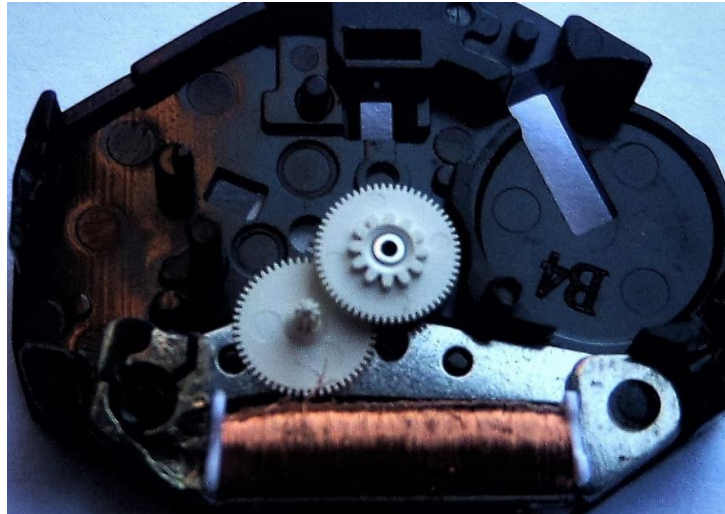
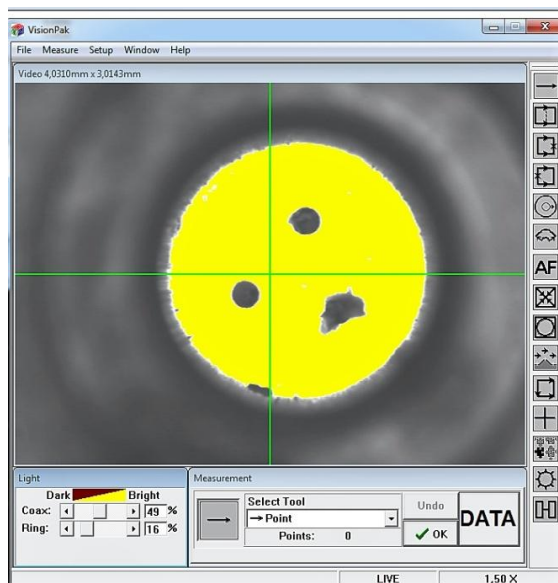


Figura 5.10: Engrenagens

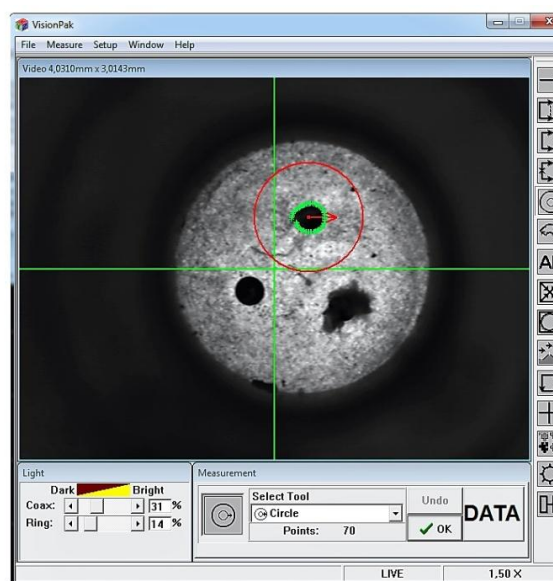
5.3 APLICAÇÕES PRÁTICAS USANDO OS SISTEMAS QVP E VISIONPAK

Antes de cada uma das medições realizadas neste trabalho foi feito o procedimento chamado de focalização. A focalização das peças medidas foi realizada através do uso da ferramenta de foco automático, tendo em vista que a MMC utilizada opera por CNC.

Para cada componente utilizado neste estudo, foram ajustadas as fontes de iluminação com o auxílio das ferramentas de configuração do VISIONPAK, tudo em conformidade com as recomendações da literatura (CHO, 2005; LETA, *et al.*, 2016), a fim de conferir destaque à característica de interesse, diminuindo a influência de saturação de luz nas imagens. A Figura 5.11 exemplifica um ajuste de iluminação com o uso da ferramenta da saturação do *software*, em um bico injetor de combustível.



a) Região com saturação de luz, destacada em amarelo.



b) Imagem com a iluminação ajustada

Figura 5.11: Exemplo dos efeitos da saturação na medição de um bico injetor de combustível: (a) Imagem com saturação de luz; (b) Imagem com a iluminação ajustada

Como mencionado anteriormente, o excesso de iluminação incidente sobre uma superfície diminui a exatidão da medição, o que exige que para cada peça as fontes de iluminação sejam devidamente ajustadas.

5.3.1 Definição do sistema de coordenadas local

No intuito de verificar a diferença entre a origem do sistema de coordenadas local, definido com o sensor de contato, e a origem obtida com a medição por imagem, o guia de calibração descrito na seção 5.2.2 foi utilizado de acordo com os seguintes passos:

- Com o uso do sensor de toque, realiza-se a coleta de quatro pontos sobre o plano superior do guia de calibração, a fim de estabelecer a origem do sistema de coordenadas da MMC sobre o referido plano. Esse procedimento garante que o plano XY da MMC seja paralelo à superfície superior do guia de calibração.
- Após a definição do plano em que a origem estará posicionada, segue-se com o alinhamento do eixo coordenado X com a aresta destacada na Figura 5.12. Esse passo

tem como objetivo definir a direção e o sentido de cada eixo X, Y e Z do novo sistema de coordenadas.

- Em seguida, coletando-se quatro pontos sobre o a geometria definida por um segmento de círculo do guia de calibração, obtém-se as coordenadas do centro do referido círculo e atribui-se as coordenadas do centro deste círculo como a origem (0, 0, 0) do sistema de coordenadas local da MMC.
- Então, com a substituição do sensor de toque para o sensor câmera, realiza-se a medição do furo central do guia de calibração, com a utilização da ferramenta de círculo do VISIONPAK, o que fornece as coordenadas do centro desse círculo.
- Os resultados obtidos pela medição por imagem permitem verificar o quanto os valores das coordenadas (X,Y,Z) do círculo se distanciam dos valores da origem (0,0,0) do sistema de coordenadas local definido com o sensor de contato.

A Figura 5.12 apresenta as características coletadas para a definição da origem do sistema de coordenadas da MMC. Foram realizadas cinco medições para determinação da repetibilidade do sistema.

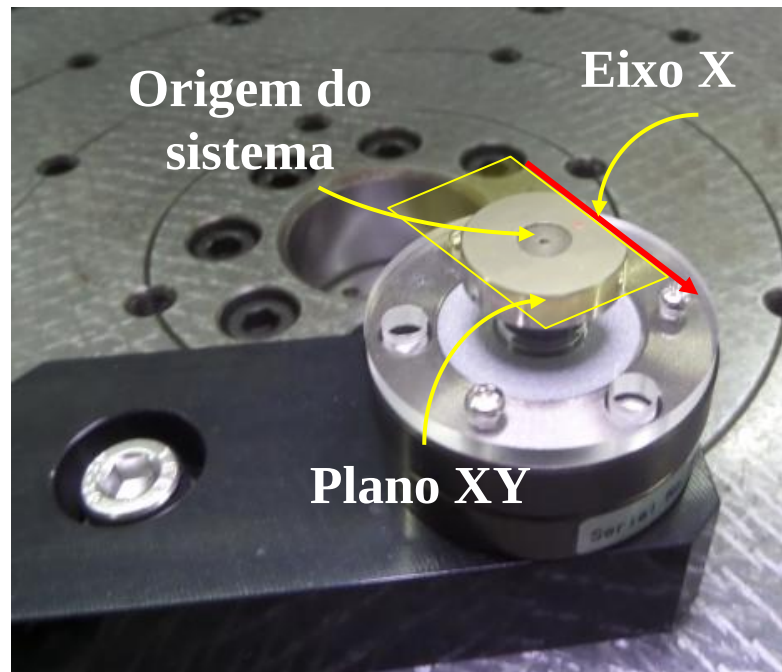
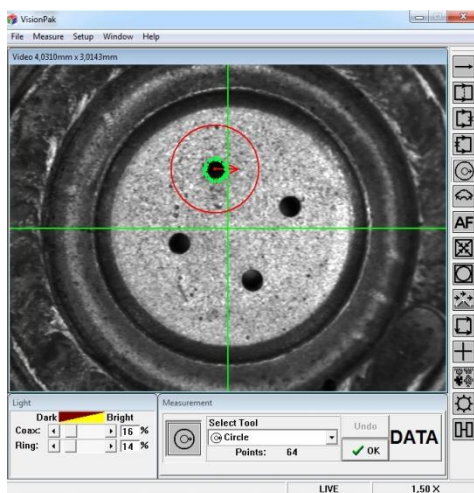


Figura 5.12: Representação das características coletadas para determinação da origem do sistema coordenado

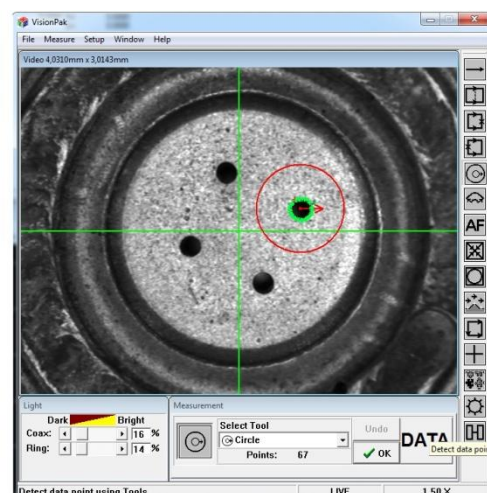
5.3.2 Medições dos diâmetros dos furos de bico injetores.

Nas medições dos bicos injetores de combustível, após a execução dos procedimentos de focalização e ajuste de iluminação, a determinação das dimensões dos diâmetros dos microfuros foi realizada com o uso da ferramenta de círculo, do VISIONPAK. A medição do diâmetro de cada furo foi efetuada cinco vezes, a fim de obter a estimativa de alguns parâmetros, como a repetibilidade do sistema.

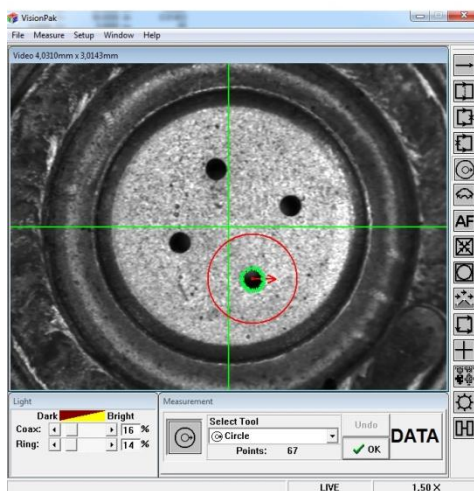
A medição é realizada de forma semelhante para todos os bicos injetores de combustível utilizados no corrente trabalho, sendo exemplificada pela Figura 5.13, que apresenta a janela de vídeo durante a medição do bico injetor 1:



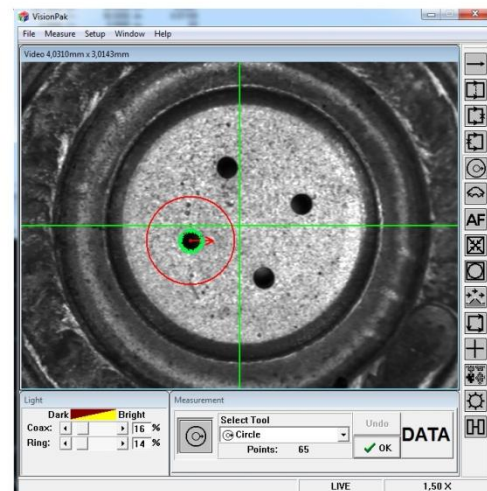
a) Medição do diâmetro do furo 1



b) Medição do diâmetro do furo 2



c) Medição do diâmetro do furo 3



d) Medição do diâmetro do furo 4

Figura 5.13: Procedimento de medição do bico injetor de combustível 1

Vale a pena destacar a medição do bico injetor de combustível 4, modelo esse projetado para motores de motocicletas, que apresenta 12 furos pelos quais ocorrem a atomização do combustível. Apesar de possuir um maior número de furos, apenas foram medidos quatro desses, pois já oferecem dados suficientes para a determinação dos parâmetros ao qual o presente trabalho se objetiva. A título de exemplo, a Figura 5.14 mostra a distribuição dos furos do bico injetor de combustível 4 e identifica os furos medidos:

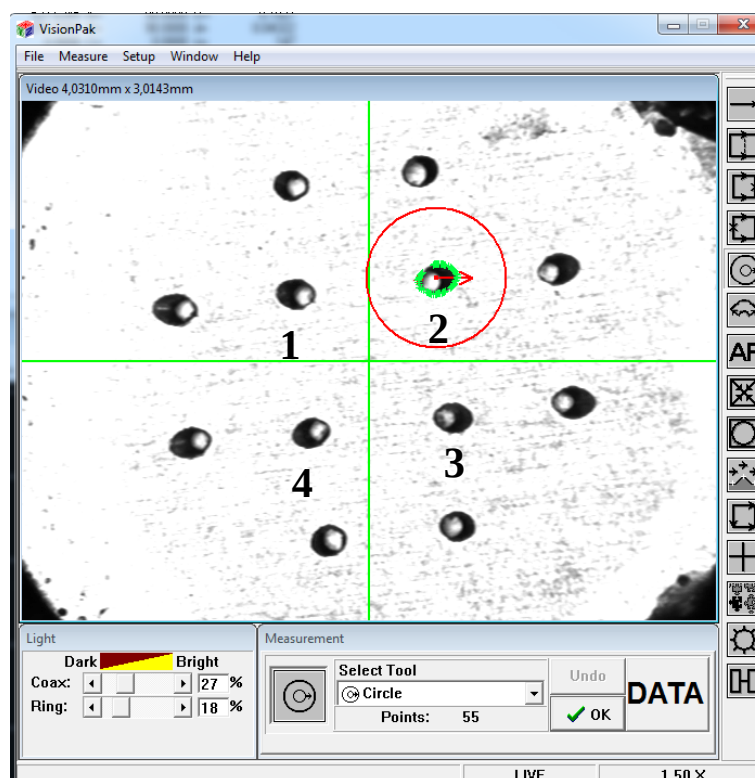


Figura 5.14: Medição do furo 2 do bico injetor de combustível 4

5.3.3 Medição de uma placa de circuito impresso

Foram selecionados alguns parâmetros controlados para a fabricação de placas de circuitos impressos, a saber, distância para isolamento entre trilhas, a largura de pista e a distância cobre-furo (*vide* Figura 5.15). No mais, ressalta-se que cada parâmetro desses foi medido cinco vezes para a determinação dos resultados apresentados.

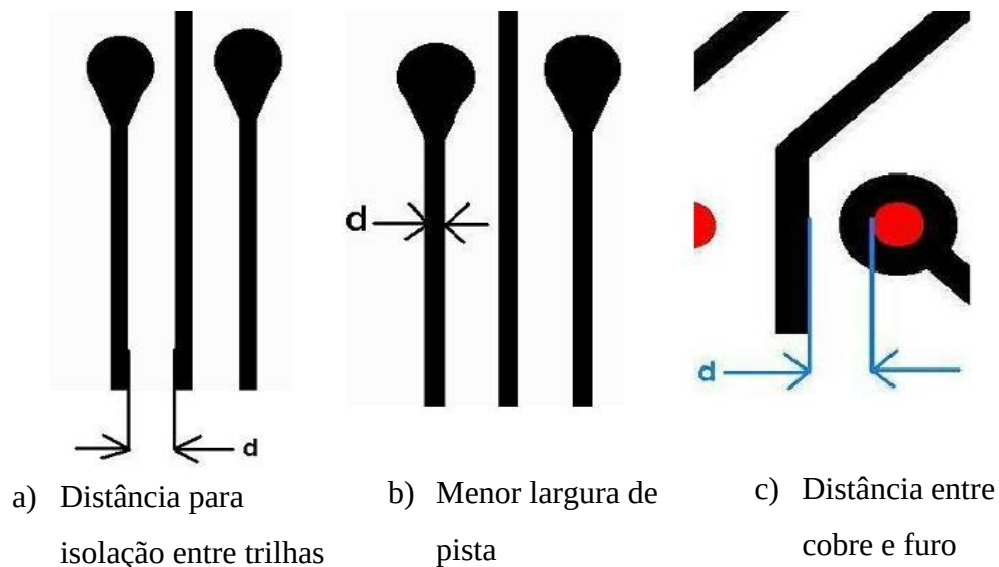


Figura 5.15: Representação dos parâmetros controlados na fabricação de PCI
Fonte: Adaptado de CIRCUIBRAS (2009)

A distância de isolação entre trilhas foi determinada com o uso da ferramenta de caixa do VISIONPAK, onde foram detectadas duas arestas correspondentes às trilhas selecionadas para a medição. Na Figura 5.16 é apresentada a região em que a medição foi realizada:

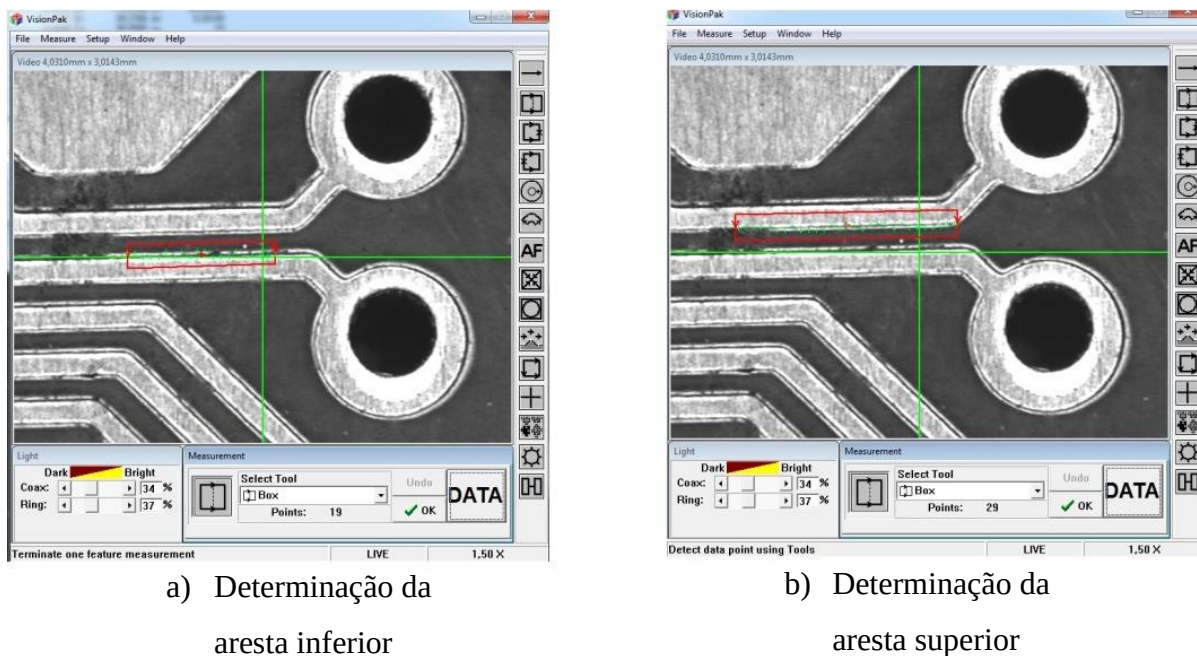
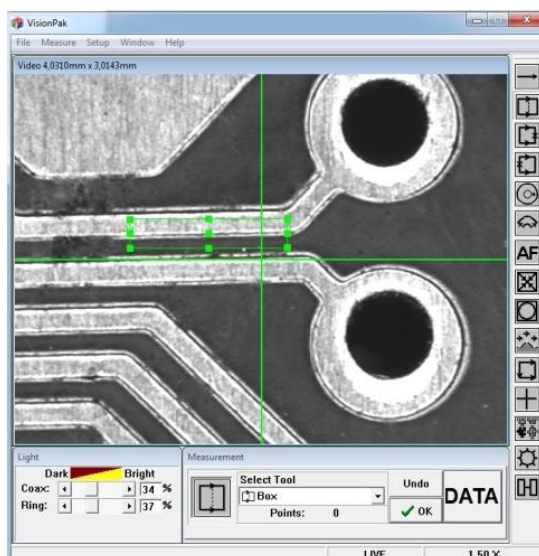
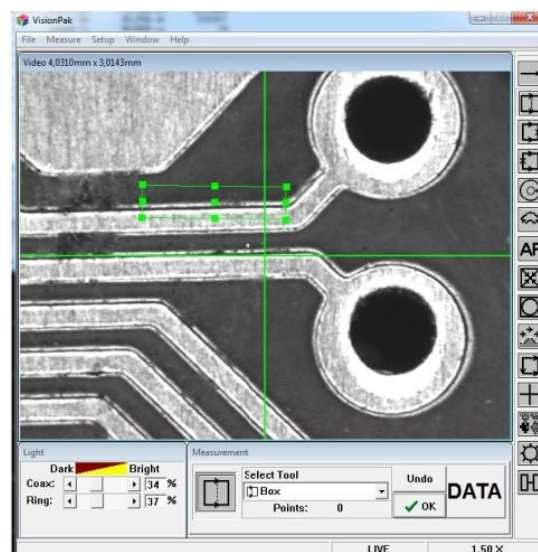


Figura 5.16: Determinação do isolamento entre trilhas

De maneira semelhante, as medições da largura de pista foram realizadas com o uso da ferramenta de caixa, como exemplificado na Figura 5.17:



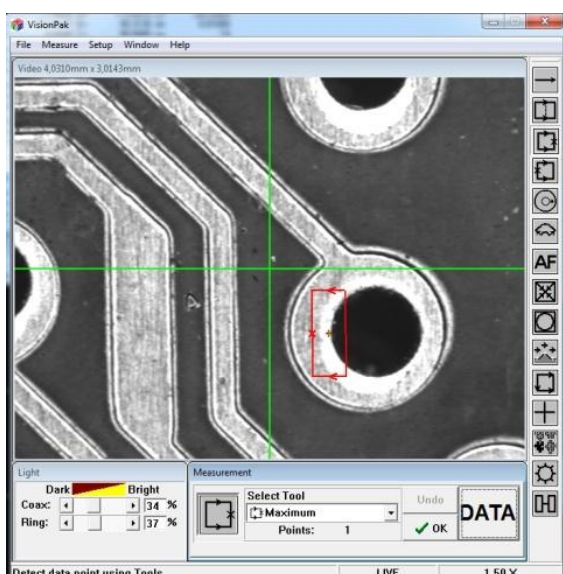
a) Determinação da
aresta inferior



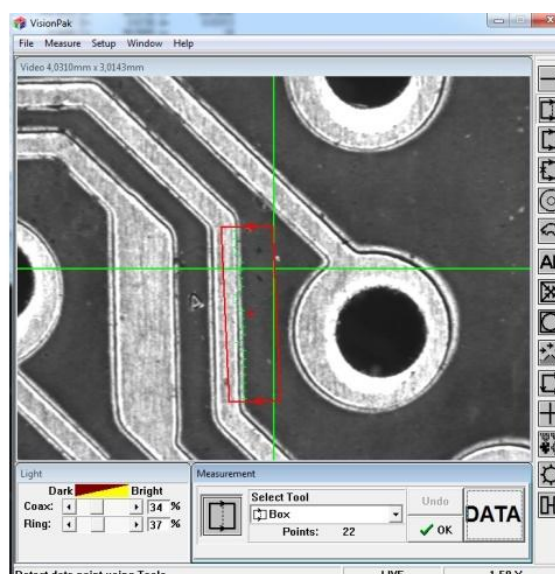
b) Determinação da
aresta inferior

Figura 5.17: Determinação da largura de pista

Para a determinação da distância cobre-furo foram utilizadas as ferramentas de mínimo e de caixa (*vide* Figura 5.18). É importante destacar que o uso da ferramenta de mínimo garante que o ponto mais próximo na trilha seja capturado, o que acarreta em resultados mais satisfatórios, pois elimina a influência do operador caso os pontos fossem obtidos manualmente.



a) Captura de ponto
tangente ao furo



b) Determinação de
aresta

Figura 5.18: Medição da distância cobre-furo

5.3.4 Medição de uma esfera de alta exatidão

A esfera de alta exatidão foi medida com a aplicação da ferramenta de círculo do *software*, determinando o diâmetro desse componente. A Figura 5.19 apresenta a captura de pontos sobre a borda que define o maior círculo da esfera:

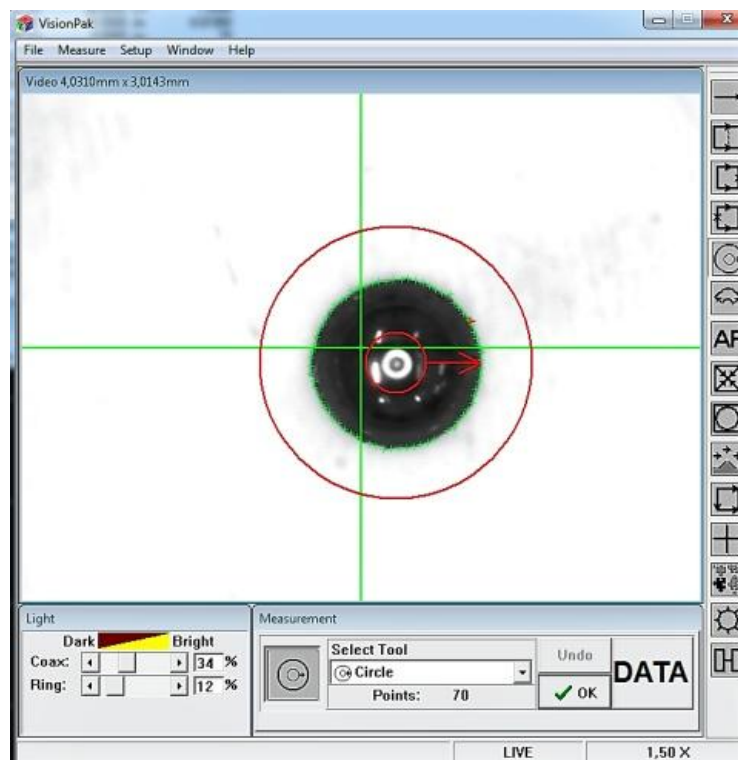


Figura 5.19: Medição do diâmetro da esfera de alta exatidão

5.3.5 Medição de uma engrenagem usada em relógio

Por fim, a medição do diâmetro externo da engrenagem foi obtida através da captura de quatro pontos, igualmente espaçados em torno da borda que define o diâmetro externo da engrenagem. Após essa etapa, o *software* determina, segundo os algoritmos que o regem, o círculo mais adequado formado por esses pontos coletados. Os dados obtidos foram coletados com o uso da ferramenta de ponto do software VISIONPAK, conforme exposto na Figura 5.20:

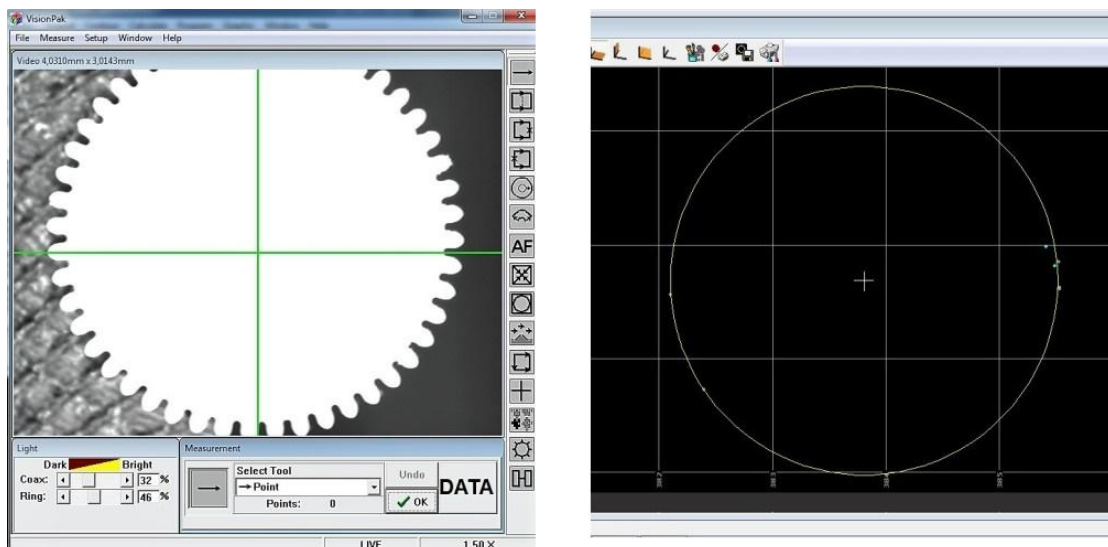


Figura 5.20: Medição da engrenagem: (a) Captura de pontos; (b) Círculo gerado pelo *software*

Convém ressaltar que na medição desse componente, as bordas são definidas pelo perfil dos dentes, impossibilitando a identificação das arestas referentes ao círculo externo da engrenagem com utilização da ferramenta de círculo (que, por exemplo, foi utilizada nas medições dos diâmetros dos bicos injetores de combustível). Por este motivo a determinação do diâmetro externo, como já mencionado, foi através da captura de quatro pontos igualmente espaçados em torno da borda que define o diâmetro externo da engrenagem.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada componente medido através do QVP foram determinadas a incerteza de medição e a repetibilidade, pois, segundo Albertazzi e De Sousa (2008), esses parâmetros possibilitam a determinação da intensidade do erro aleatório de um sistema de medição.

A incerteza-padrão é correspondente ao desvio-padrão do erro aleatório de medição e pode ser estimada através da seguinte equação:

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n - 1}} \quad (5.1)$$

$$\nu = n - 1$$

Sendo:

u	incerteza-padrão obtida a partir da amostra
I_i	i-ésima indicação
$\bar{I}$	média das indicações
n	número de medições realizadas
ν	número de graus de liberdade

O grau de liberdade de uma medição representa o nível de segurança com que a incerteza-padrão é determinada, sendo definido pela subtração do número de medições repetidas menos um.

Ainda de acordo com Albertazzi e De Sousa (2008), o efeito do erro aleatório pode ser minimizado quando várias medições repetidas são realizadas, e então calculada a média dos valores obtidos, pois, o erro aleatório das indicações individuais é maior que o erro aleatório da média. A incerteza-padrão da média é utilizada quando o mensurando é invariável, logo, a equação (5.2) mostra que esse parâmetro é inversamente proporcional à raiz quadrada do número de medições repetidas que foram efetuadas.

$$u_{\bar{I}} = \frac{u}{\sqrt{n}} \quad (5.2)$$

Onde:

$u_{\bar{I}}$	Incerteza-padrão da média
u	Incerteza-padrão
n	número de medições repetidas

A repetibilidade é usada para definir uma região onde espera-se que o erro aleatório seja encontrado em um sistema de medição. Esse parâmetro é calculado através da multiplicação da incerteza-padrão pelo coeficiente t de *Student*, como mostrado na equação (5.3) (ALBERTAZZI; DE SOUSA, 2008). Diferentes valores do coeficiente t de *Student* podem ser encontrados para diversos valores de graus de liberdade e nível de confiança, porém neste estudo será usada apenas a probabilidade de 95,45%.

$$Re = \pm t \times u \quad (5.3)$$

Em que:

Re Repetibilidade

t Coeficiente t de *Student* com 95,45% de probabilidade e $n-1$ graus de liberdade

u Incerteza-padrão

De modo semelhante ao cálculo da incerteza-padrão da média, a repetibilidade da média é obtida por:

$$Re_{\bar{I}} = \frac{t \times u}{\sqrt{n}} \quad (5.4)$$

5.4.1 Medição das discordâncias entre o sensor de contato e o QVP

As medições realizadas com ambos os sensores de toque e câmera utilizando a guia de calibração são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Medições das discordâncias com a utilização da guia de calibração

Guia de calibração	Coordenada X	Coordenada Y
Coordenadas da origem do sistema (mm)	0,0661	-0,0433
	0,0468	-0,0439
	0,0482	-0,0435
	0,049	-0,0508
	0,0491	-0,053
	0,0456	-0,0584
Média (mm)	0,0508	-0,049
Incerteza-Padrão (mm)	0,0076	0,0063
t de Student (95,45%)	2,649	
Repetibilidade (mm)	0,020	0,017
Incerteza da média (mm)	0,0031	0,0026
Repetibilidade da média (mm)	0,0082	0,0068

Com relação à discordância entre as medições realizadas com o sensor de toque e o QVP, nota-se que os valores de dispersão apresentados na Tabela 5.2 são de tal magnitude, que, garantem a confiabilidade do sistema de medição usado para os testes do presente estudo.

5.4.2 Medições dos bicos injetores de combustível

Os resultados dos diâmetros dos microfuros dos bicos injetores de combustível são apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 5.3: Valores da medição dos diâmetros do bico injetor de combustível 1

Bico injetor de Combustível 1	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4
Diâmetro (mm)	0,1995	0,202	0,2027	0,1985
	0,2006	0,2024	0,202	0,198
	0,2054	0,2001	0,2033	0,1979
	0,2057	0,2033	0,2019	0,1988
	0,2001	0,2007	0,2021	0,1991
Média (mm)	0,2023	0,2017	0,2024	0,1985
Incerteza-Padrão (mm)	0,0030	0,0013	0,0006	0,0005
t de Student (95,45%)	2,869			
Repetibilidade (mm)	0,0087	0,0037	0,0017	0,0015
Incerteza da média (mm)	0,0014	0,00058	0,00026	0,00023
Repetibilidade da média (mm)	0,0039	0,0017	0,00076	0,00066

Tabela 5.4: Valores da medição dos diâmetros do bico injetor de combustível 2

Bico injetor de Combustível 2	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4
Diâmetro (mm)	0,2432	0,2441	0,2455	0,2488
	0,2492	0,2449	0,2454	0,2491
	0,2502	0,2433	0,2456	0,2495
	0,2492	0,2438	0,2454	0,2494
	0,2501	0,2442	0,2454	0,2494
Média (mm)	0,2484	0,2441	0,2455	0,2492
Incerteza-Padrão (mm)	0,0029	0,00059	0,000089	0,00029
t de Student (95,45%)	2,869			
Repetibilidade (mm)	0,0084	0,0017	0,00026	0,00083
Incerteza da média (mm)	0,0013	0,00026	0,00004	0,00013
Repetibilidade da média (mm)	0,0038	0,00075	0,00011	0,00037

Tabela 5.5: Valores da medição dos diâmetros do bico injetor de combustível 3

Bico injetor de Combustível 3	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4
Diâmetro (mm)	0,2668	0,2695	0,2678	0,2699
	0,2657	0,2696	0,2685	0,2701
	0,2666	0,2694	0,2683	0,2701
	0,267	0,2699	0,2685	0,2704
	0,2659	0,2701	0,2686	0,2694
Média (mm)	0,2664	0,2697	0,26834	0,26998
Incerteza-Padrão (mm)	0,00057	0,00029	0,00032	0,00037
t de Student (95,45%)	2,869			
Repetibilidade (mm)	0,0016	0,00084	0,00092	0,0011
Incerteza da média (mm)	0,00025	0,00013	0,00014	0,00017
Repetibilidade da média (mm)	0,00073	0,00037	0,00041	0,00047

Tabela 5.6: Valores da medição dos diâmetros do bico injetor de combustível 4

Bico injetor de Combustível 4	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4
Diâmetro (mm)	0,1927	0,195	0,201	0,1947
	0,1898	0,1957	0,2003	0,195
	0,1957	0,1947	0,1987	0,1952
	0,1868	0,1952	0,1995	0,1942
	0,1934	0,1954	0,1994	0,1952
Média (mm)	0,19168	0,1952	0,19978	0,19486
Incerteza-Padrão (mm)	0,0034	0,00038	0,00089	0,00042
t de Student (95,45%)	2,869			
Repetibilidade (mm)	0,0099	0,0011	0,0025	0,0012
Incerteza da média (mm)	0,0015	0,00017	0,00040	0,00019
Repetibilidade da média (mm)	0,0044	0,00049	0,0011	0,00054

5.4.3 Medições dos parâmetros da placa de circuito impresso

Os resultados obtidos nas medições dos parâmetros das placas de circuito impressos são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Valores da medição dos parâmetros da placa de circuito impresso

Placa de circuito impresso	Isolação entre trilhas	Largura de pista	Cobre-furo
Distância (mm)	0,1837	0,2258	0,7224
	0,1771	0,2047	0,7164
	0,1812	0,2006	0,7383
	0,1767	0,2038	0,7187
	0,1808	0,2362	0,721
Média (mm)	0,1799	0,21422	0,72336
Incerteza-Padrão (mm)	0,0030	0,016	0,0087
t de Student (95,45%)	2,869		
Repetibilidade (mm)	0,0085	0,045	0,025
Incerteza da média (mm)	0,0013	0,0071	0,0039
Repetibilidade da média (mm)	0,0038	0,020	0,011

5.4.4 Medições do diâmetro da esfera de alta exatidão

Por possuir apenas uma característica a ser medida para seu controle geométrico, foram realizadas medições adicionais à esfera de alta exatidão, visto que quanto maior o número de medições repetidas, menor será o valor do erro aleatório da média.

Os valores obtidos nas medições são apresentados na Tabela 5.8:

Tabela 5.8: Valores da medição dos parâmetros da esfera de alta exatidão

Esfera de alta exatidão	
Diâmetro (mm)	1,0024
	1,0025
	1,0029
	1,0039
	1,004
	1,0034
	1,0028
	1,0038
	1,0034
	1,0044
	1,0034
Média (mm)	1,00335
Incerteza-Padrão (mm)	0,00065
t de Student (95,45%)	2,284
Repetibilidade (mm)	0,0015
Incerteza da média (mm)	0,00019
Repetibilidade da média (mm)	0,00044

5.4.5 Medição do diâmetro de uma engrenagem usada em relógio

Os resultados mostrados na Tabela 5.9 são referentes aos quatro pontos captados para a determinação do diâmetro externo da engrenagem:

Tabela 5.9: Valor da medição do diâmetro de uma engrenagem

Engrenagem	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
Ponto 1	385,4943	286,8169	309,4579
Ponto 2	385,5365	286,612	309,4579
Ponto 3	382,0988	286,5588	309,4579
Ponto 4	382,3989	285,724	309,4579
Diâmetro (mm)	3,4201		

5.4.6 Discussões dos resultados

Verifica-se que para cada peça inspecionada, a dispersão das geometrias medidas é muito pequena, chegando a apresentar valores de incerteza-padrão da média de até 0,07 μm , como pode ser verificado nas medições dos bicos injetores de combustível. De modo semelhante, visto que a Repetibilidade da média depende da incerteza-padrão, sua estimativa segue os valores desse parâmetro, e, portanto, o erro aleatório presente nas medições será esperado dentro de uma faixa na escala micrométrica.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto no corrente capítulo, observam-se diversas vantagens que a medição por imagem com o uso QVP pode fornecer. Por exemplo, para a medição dos bicos injetores de combustível, um único quadro, compreendido pela janela de vídeo é o suficiente para a medição todos os diâmetros dos microfuros, sendo essas realizadas de uma só vez, o que resulta em uma velocidade de medição mais alta do que com o uso de sensores de toque delgados. Convém ressaltar que não é possível medir o diâmetro destes furos usando o sensor de contato da MMC. Devido à natureza de suas geometrias, a PCI é rapidamente inspecionada pelo QVP com riqueza de detalhes, o que possibilita o controle dos parâmetros necessários para a fabricação desses componentes. De modo semelhante, as esferas de alta exatidão são captadas pelo sensor câmera, que retorna os valores do diâmetro desse componente

rapidamente, não sendo possível realizar essa mesma tarefa com o sensor de toque, visto o esforço exercido no contato é suficiente para mover a esfera.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de dissertação de mestrado teve como objetivo realizar o estudo, e apresentar aplicações da medição por imagem com a utilização de uma câmera de vídeo, sendo esse sensor, integrado a uma máquina de medição por coordenadas (MMC). Para tal, foi realizado um estudo dos princípios de funcionamento das MMCs, os sensores utilizados nesses equipamentos, assim como suas diferentes configurações estruturais e formas de acionamento. Adicionalmente, foram apresentados os conceitos básicos da medição por imagem, assim como os recursos que o *software* que a MMC usada nesta dissertação dispõe.

A máquina de medição por coordenadas pertencente ao Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da UFPB dispõe além do sensor de toque e o sensor *laser*, o cabeçote MITUTOYO QVP (*Quick Vision Probe*), que consiste em uma câmera CCD (*Charge-Coupled Device*) especificamente dimensionada para o funcionamento em MMCs. As aplicações práticas deste trabalho de dissertação foram realizadas com o uso do QVP, que opera segundo os recursos do *software* VISIONPAK. As principais conclusões deste trabalho são apresentadas a seguir:

- A fim de comparar a diferença de resultados entre os sensores de toque e o QVP, foram realizadas medições de uma guia de calibração, que é projetada para esse propósito, apresentando resultados satisfatórios, com pequenas discordâncias entre os resultados, chegando a apresentar o valor de 7,6 μm de incerteza-padrão no eixo X e 6,3 μm para o eixo Y.
- Os resultados das medições feitas com o sistema de imagem QVP em peças como: bicos injetores de combustível; placas de circuito impresso; esferas de alta exatidão e engrenagens de pequeno porte, comprovaram a eficácia do sistema de medição por imagem para medições de parâmetros com dimensões inferiores a 4 mm as quais não seriam possíveis com o sistema de medição por contato.

As vantagens observadas durante a execução dos testes do corrente estudo foram: alta velocidade de medição; mínima influência do operador sobre os resultados, pequena dispersão de dados e repetibilidade, alta exatidão dos resultados obtidos, geração de imagens das peças com riqueza de detalhes na escala micrométrica.

Entre as desvantagens do sistema de medição por imagem utilizado, pode-se citar a limitação das dimensões das características de interesse, que devem estar totalmente enquadradas na janela de vídeo do *software*, que compreende uma área sobre a superfície da peça de 3,2×4,3 mm, devido a lente montada no QVP.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Expandir o uso do sensor QVP com a utilização de diferentes lentes objetivas. Essa ação possibilita a medição de parâmetros com dimensões diferentes das apresentadas no corrente trabalho de dissertação. Isto considerando que existem disponíveis na configuração da MMC usada neste trabalho, além da lente objetiva ML3×, as objetivas de ampliação ML1×; ML5× e ML10×.

Desenvolver o estudo da aplicação da medição por imagem, através da utilização de ferramentas complementares do *software* VISIONPAK, como o recurso de Rastreamento Automático de Borda, que possibilita a medição de características que não sejam completamente apresentadas na janela de vídeo. Essa aplicação merece destaque por fazer uso do controle numérico computadorizado da MMC, sendo de grande importância, principalmente na medição de parâmetros de Placas de Circuito Impresso.

Definir uma estratégia de medição para determinação de parâmetros dimensionais de engrenagens, por exemplo, diâmetro externo, com a utilização do *software* VISIONPAK.

Aplicar os fundamentos da medição por imagem estudados nesta dissertação para a medição e análise da rugosidade superficial de componentes mecânicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTAZZI, A.; DE SOUSA, A. R. **Fundamentos da Metrologia científica e industrial**. 1. ed. Barueri, SP: Manole, 2008.

ANDRADE, J. S. **Medição e Análise de Planeza de Superfícies Metrológicas Usando Nível Eletrônico e os Métodos de Moody e Malha Retangular**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2015.

BARAKAT, N. A.; ELBESTAWI, M. A.; SPENCE, A. D. Kinematic and geometric error compensation of a coordinate measuring machine. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 6, p. 833-850, 2000.

BAUER, W.; WESTFALL, G. D. **University physics with modern physics**. 1. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011.

BIGAS, M. et al. Review of CMOS images sensors, v. 37, n. 5, p. 433-451, 2006.

CARL Zeiss. **Zeiss**. Disponível em:

<<http://www.zeiss.com/metrology/products/systems/large-cmms/mmz-e.html>>. Acesso em: 27 Outubro 2016.

CHO, H. **Optomechatronics: Fusion of optical and mechatronic engineering**. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2005.

CIRCUIBRAS CIRCUITOS IMPRESSOS. PARÂMETROS TÉCNICOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITOS IMPRESSOS, n. 3, p. 31, 2009.

COLOSINO, B. M.; SENIN, N. (Eds.). **Geometric Tolerances: Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring**. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2011.

DE CHIFFRE, L.; HANSEN, H. N. Metrological Limitation of Optical Probing Techniques for Dimensional Measurements. **Institute of Manufacturing Engineering, Technincal University of Denmark**, 10 Janeiro 1995.

DE OLIVEIRA, A. L. **Validação de Processos de Medição por Coordenadas em Operações de Controle da Qualidade**. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2003.

DOTSON, C. L. **Fundamentals of Dimensional Metrology**. 6^a. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2015.

EMAMVERDI, O.; ABBASI, A. Influence of nozzle holes diameter on the first and second law balance in DI Diesel engine. **Journal of Power Technologies**, v. 94, n. 1, p. 20, 2014.

FELICIANO, F. F.; DE SOUZA, I. L.; LETA, F. R. Visão Computacional Aplicada à Metrologia Dimensional Automatizada: Considerações Sobre Sua Exatidão. **ENGEVISTA**, v. 7, n. 2, 2010.

FISHER, R. B. et al. **Dictionary of Computer Vision and Image Processing**. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 2014.

FORSYTH, D.; PONCE, J. **Computer Vision: A modern approach**. 2. ed. [S.l.]: Pearson, 2011.

GINIOTIS, V.; HOPE, A. **Measurement and Monitoring**. 1. ed. New York: Momentum Press, 2014.

HAMBURG-PIEKAR, D. S. **Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas**. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.

HARDING, K. (Ed.). **Handbook of Optical Dimensional Metrology**. 1^a. ed. [S.l.]: CRC Press, 2013.

HOCKEN, R. J.; PEREIRA, P. H. (Eds.). **Coordinate Measuring Machine and Systems**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

JACOBSON, R. E. et al. **The Manual of Photography**: Photographic and digital imaging. 9. ed. [S.l.]: Focal Press, 2000.

LEACH, R. **Fundamental Principles of Engineering Nanometrology**. 2. ed. Waltham: Elsevier, 2014.

LETA, F. R. et al. **Metrologia por imagem**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

LIMA JUNIOR, J. C. **Determinação da Planeza de Superfícies Metrológicas Assistida por Computador**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba. [S.l.]. 2003.

MARTIN, V. B. **Melhoria da confiabilidade metrológica na inspeção de componentes usadas com aplicação na indústria nuclear**. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Curso de Pós-Graduação em Metrologia, Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010.

MITUTOYO. VISIONPAK user's guide, n. 2, p. 120, 2010.

MITUTOYO. Mitutoyo USA. Disponível em: <<http://ecatalog.mitutoyo.com/CMM-Probes-Optical-non-contact-probe-system-C1017.aspx>>. Acesso em: 24 Dezembro 2016.

ORREGO, R. M. M.; DI GIACOMO, B.; ABACKERLI, A. J. Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: Considerações Gerais. **Revista de Ciência & Tecnologia**, São Paulo, v. 8, n. 16, p. 43-56, 2000.

PAPA, M. C. D. O. et al. Testes de Desempenho de Máquinas de Medir (MMC): Diferenças e seus Impactos na Decisão sobre a Capacidade da Medição para Manufatura. **7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**, 2013.

PEINER, E.; BALKE, M.; DOERING, L. Form measurement inside fuel injector nozzle spray holes. **Microelectronic Engineering**, v. 86, n. 4, p. 984-986, 2009.

RAMU, P. et al. Development of a parametric model and virtual machine to estimate task specific measurement uncertainty for a five-axis multi-sensor coordinate measuring machine. **Precision Engineering**, 13 January 2011. 431-439.

ROLIM, T. L. **Sistemática Indicadora de Método para Calibração de Máquina de Medição por Coordenadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2003.

SAVIO, E. Uncertainty in testing the metrological performances of coordinate measuring machines. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 55, n. 1, p. 535-538, 2006.

SCHWENKE, H. et al. Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering, v. 51, n. 2, p. 685-699, 2002.

SEUNG-WOO, K. Measurement Uncertainty Limit of a Video Probe in Coordinate Metrology. **Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology**, 9 Janeiro 1996.

SHAPIRO, L. G.; STOCKMAN, G. C. **Computer Vision**. 1. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2001.

SILVA NETO, J. C. D. **Metrologia e Controle Dimensional**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

SILVA, J. B. D. A. et al. Approach for uncertainty analysis and error evaluation of four-axis co-ordinate measuring machines. **Int J Adv Manuf Technol**, 2009; 41 (11-12). 1130-1139.

SILVA, R. F. A. **Desenvolvimento De Um Sistema Para Preset De Ferramentas, Por Meio De Processamento De Imagens, Para Máquinas-Ferramenta CNC.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2016.

SLADEK, J. A. **Coordinate Metrology Accuracy of Systems and Measurements.** 1. ed. Berlim: Spriger, 2016.

SOLOMON, C.; BRECKON, T. **Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab.** 1. ed. [S.l.]: Wiley-Blackwell, 2011.

STEMMER IMAGING. **The Imaging and vision handbook.** [S.l.]: [s.n.], 2016.

SZELISKI, R. **Computer Vision: algorithms and applications.** [S.l.]: Springer & Business Media, 2010.

VALENTINA, L. V. O. D. Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC. **Máquinas de medir por coordenadas:** Apostila, 2010. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/veriano/materiais/09_Maquinamedircoordenadas.pdf>. Acesso em: 2 Novembro 2016.

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012.

WALKER, H. F.; BENDOW, D. W.; ELSHENNAWY, A. K. **The Certified Quality Technician Handbook.** 2. ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2012.

WECKENMANN, A. et al. Probing Systems in Dimensional Metrology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2004. 657-684.

WEEKERS, W. G. **Compensation for Dynamic Errors of Coordinate Measuring Machines.** [S.l.]. 1996.

WILHELM, R. G.; HOCKEN, R.; SCHWENKE, H. Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 50, 2001. 553-563.

ANEXO A

COEFICIENTES *t* DE *STUDENT*

Tabela A.1: Coeficientes *t* de *Student*

Faixa de abrangência/ Probabilidade					
Graus de liberdade	σ 68,27%	1,96 σ 95%	2,00 σ 95,45%	2,58 σ 99,00%	3,00 σ 99,73%
1	1,837	12,706	13,968	63,657	235,784
2	1,321	4,303	4,527	9,925	19,206
3	1,197	3,182	3,307	5,841	9,219
4	1,142	2,776	2,869	4,604	6,620
5	1,111	2,571	2,649	4,032	5,507
6	1,091	2,447	2,517	3,707	4,904
7	1,077	2,365	2,429	3,499	4,530
8	1,067	2,306	2,366	3,355	4,277
9	1,059	2,262	2,320	3,250	4,094
10	1,053	2,228	2,284	3,169	3,957
11	1,048	2,201	2,255	3,106	3,850
12	1,043	2,179	2,231	3,055	3,764
13	1,040	2,160	2,212	3,012	3,694
14	1,037	2,145	2,195	2,977	3,636
15	1,034	2,131	2,181	2,947	3,586
16	1,032	2,120	2,169	2,921	3,544
17	1,030	2,110	2,158	2,898	3,507
18	1,029	2,101	2,149	2,878	3,475
19	1,027	2,093	2,140	2,861	3,447
20	1,026	2,086	2,133	2,845	3,422
25	1,020	2,060	2,105	2,787	3,330