

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Emanuel Bragiola Ribeiro

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS FONTES DE INCERTEZA
ASSOCIADAS À VISÃO DE MÁQUINA PARA SUBSÍDIO AO
PROJETO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE
CALIBRAÇÃO DE MANÔMETROS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

Coorientador: Miguel Burg Demay, Dr. Eng.

Florianópolis
2015

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

Ribeiro, Emanuel Bragiola

Avaliação experimental das fontes de incerteza associadas à visão de máquina para subsidio ao projeto de um sistema automatizado de calibração de manômetros / Emanuel Bragiola Ribeiro ; orientador, Carlos Alberto Flesch ; coorientador, Miguel Burg Demay. - Florianópolis, SC, 2015. 137 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica.
2. Metrologia e instrumentação.
3. Automação de processos.
4. Sistemas de visão de máquina.
5. Calibração de manômetros. I. Flesch, Carlos Alberto. II. Demay, Miguel Burg. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Emanuel Bragiola Ribeiro

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS FONTES DE
INCERTEZA ASSOCIADAS À VISÃO DE MÁQUINA PARA
SUBSÍDIO AO PROJETO DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO DE CALIBRAÇÃO DE MANÔMETROS**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 24 de agosto de 2015.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.
Orientador

Miguel Burg Demay, Dr. Eng
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina (Presidente)

Cesar Alberto Penz, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr. Ing.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Tiago Loureiro Fígaro da Costa Pinto, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

*“... conventional thinking would not be a
barrier to the pursuit of new challenges...”*
(Apresentação da AR1,
Daytona, 1968)

AGRADECIMENTOS

À UFSC, pela estrutura, conhecimento e pela sua excelência que possibilitaram a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC pela ajuda e condições dadas para concluir o trabalho e o curso.

Ao Laboratório de Metrologia e Automatização pela estrutura.

Ao Prof. Carlos Alberto Flesch, pela orientação.

Ao Miguel Burg Demay, pela coorientação.

Aos Professores Tiago Loureiro Fígaro da Costa Pinto, Rodolfo César Costa Flesch e Armando Albertazzi Gonçalves Jr que me auxiliaram durante o trabalho de Mestrado.

Aos Professores Hazim Ali Al-Qureshi e Rolf Bertrand Schroeter pela confiança ao me recomendar e pela amizade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pelo ensino.

À equipe de Ótica do Labmetro, principalmente à Maryah Elisa Morastoni Haertel, pelos conselhos, e suporte na parte técnica.

À equipe do LIAE-Labmetro, ao Carlos Adriano da Luz, ao Cesar Alberto Penz e William Kramer Scariot que contribuíram no desenvolvimento técnico do trabalho de Mestrado.

Às seguintes pessoas Amanda Avelar, André Fazolo, Bernardo Barancelli Schwedersky, Bernardo Casemiro de Oliveira Fonseca, Conrado Emerick, Enzo Dell'Antonio, Estevam Miscow Machado, Gabriel Landeira, Jhonatan Vinicius Erhart, João Rodrigues Serra Netto, Josias Ribeiro Filho, Léo Vailati, Leonardo Nascimento Cervelin, Luiz Gabriel Alves de Deus, Maria de Fátima Bragiola Ribeiro, Marina da Silva Cabral, Maximiliano Faria, Moema Mesquita, Pablo Rodrigo Pelliza, Pedro Rist Coelho, Ricardo Hatanaka, Tiago Fazolo e, principalmente, Victorio Henrique Bragiola Ribeiro por me mostrar o real valor da vida.

À minha família, por me apoiar, aos meus pais pela compreensão, carinho e paciência e a meu irmão por sua existência, força e espírito de luta que me movem nas horas mais difíceis.

À minha namorada Marina da Silva Cabral por me fazer querer ser uma pessoa melhor e por me fazer querer ir sempre em frente.

RESUMO

A calibração automatizada de manômetros analógicos, através da leitura automática dos instrumentos realizada pela visão de máquina, pode aumentar a qualidade do processo, a partir da redução de incertezas da medição, que são obtidas pela automação da calibração que reduzem erros devido à influência humana sobre o processo e pelo aumento do número de pontos de calibração. Neste trabalho realiza-se uma análise metrológica de como os parâmetros construtivos (distância e alinhamento entre o sistema de captura de imagem e o manômetro; quantidade de manômetros lidos simultaneamente numa mesma imagem; e formato do painel de manômetros) influem sobre o resultado da medição. Para isso realiza-se a identificação das fontes de incertezas que são quantificadas através de métodos experimentais, nos quais são variados: a distância e o alinhamento entre o sistema de captura de imagem e o manômetro, a quantidade de manômetros lidos simultaneamente numa mesma imagem e o formato do painel de manômetros. Para tanto se construiu uma bancada capaz de emular automaticamente as configurações desejadas. Os dados obtidos experimentalmente foram analisados e seus resultados elucidam como a variação dos parâmetros construtivos influencia sobre o resultado da medição. Esses resultados podem ser utilizados para subsídio ao projeto de um sistema automatizado de calibração de manômetros.

Palavras-chave: automação da calibração, visão de máquina, calibração de manômetros.

ABSTRACT

Automated analog gauged calibration that uses automatic machine vision techniques to read the instruments can increase the quality of the reading process. It does so by reducing measurement uncertainties, which are obtained by the automation of the calibration process, which, in turn, reduces the errors that come as a result of human influence in the process, and increases the number of calibration points. In this project, a metrological analysis is made to determine how the constructive parameters (distance and alignment between the image capturing system and the pressure gauge; amount of pressure gauges read simultaneously in a single image; and the gauges panel format) influence the final result of the measurement process. Therefore, it is necessary to identify the sources of uncertainties and quantify the amount of error with experimental methods, in which are the aforementioned variables are set to different configurations and tested. For this purpose a new test rig was built to automatically emulate the desired settings. The experimental data was analyzed and the results elucidate how the variation of constructive parameters influences the measurement result. These results can be used to aid in the design of an automated gauge calibration system.

Keywords: automated calibration, machine vision, manometer calibration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Manômetro com tubo de Bourdon	33
Figura 2 – Diâmetro nominal do manômetro	37
Figura 3 – Pontos de projeção no modelo <i>pinhole</i>	40
Figura 4 – Projeção 2-D	42
Figura 5 – Alinhamento entre plano da imagem e plano do objeto....	46
Figura 6 – Posição dos manômetros no painel	49
Figura 7 – Manômetro adotado	51
Figura 8 – Mesa de posicionamento linear XY	52
Figura 9 – Mesa de posicionamento Z	53
Figura 10 – Sistema de rotação	54
Figura 11 – Bancada para quantificação de incertezas.....	55
Figura 12 – Sistema de iluminação	56
Figura 13 – Bancada para quantificação da incertezas.....	60
Figura 14 – Rotação e translação para alinhamento	62
Figura 15 – Translação para o ajuste de dw	63
Figura 16 – Gabarito de alinhamento	64
Figura 17 – Fluxograma procedimentos gerais de ensaio	66
Figura 18 – Gabarito 1 para calibração de câmera.....	68
Figura 19 – Pontos de leitura	71
Figura 20 – Gabaritos para calibração da câmera com composição de lentes	73
Figura 21 – Configurações para quantificação de incerteza da distância entre manômetro e sistema de captura de imagem.....	77
Figura 22 – Configuração $(m_{ct})_{56,5}$	78
Figura 23 – Configuração $(m_{ct})_{84,5}$	80
Figura 24 – Configuração $(m_{ct})_{113}$	82
Figura 25 – Configuração $(m_{ct})_{124}$	84
Figura 26 – Configuração $(m_{ct})_{132}$	86
Figura 27 – Painéis de manômetros	88
Figura 28 – Configurações para quantificação de incerteza da quantidade de manômetros.....	89
Figura 29 – Configuração $(m_{11})_{1 \times 2}$	91
Figura 30 – Configuração $(m_{11})_{2 \times 2}$	93
Figura 31 – Configuração $(m_{12})_{2 \times 3}$	95
Figura 32 – Configuração $(m_{11})_{2 \times 3}$	97
Figura 33 – Configuração $(m_{11})_{2 \times 3 \text{calota}}$	100

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Leituras configuração (m_{ct}) _{56,5}	79
Gráfico 2 – Leitura configuração (m_{ct}) _{84,5}	81
Gráfico 3 – Leitura configuração (m_{ct}) ₁₁₃	83
Gráfico 4 – Leitura configuração (m_{ct}) ₁₂₄	85
Gráfico 5 – Leitura configuração (m_{ct}) ₁₃₂	87
Gráfico 6 – Leitura configuração (m_{11}) _{1x2}	92
Gráfico 7 – Leitura configuração (m_{11}) _{2x2}	94
Gráfico 8 – Leitura configuração (m_{12}) _{2x3}	96
Gráfico 9 – Leitura configuração (m_{11}) _{2x3}	98
Gráfico 10 – Leitura configuração (m_{11}) _{2x3calota} formato do painel ..	101
Gráfico 11 – Comparação entre tendências.....	104
Gráfico 12 – Resultados dos ensaios para avaliação da distância entre manômetro e sistema ótico.....	105
Gráfico 13 – Resultados dos ensaios para avaliação da quantidade de manômetros.....	107
Gráfico 14 – Resultados dos ensaios para avaliação da forma do painel	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Diâmetros nominais em função da classe de exatidão	37
Quadro 2 – Características normativas do manômetro	51
Quadro 3 – Pontos de leitura.....	69
Quadro 4 – Pontos de leitura desalinhamento	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação por intervalo de medição	35
Tabela 2 – Classe de exatidão	36
Tabela 3 – Diâmetros nominais, dimensões e tolerâncias.....	37
Tabela 4 – Comprimento mínimo do ponteiro	38
Tabela 5 – Quantidade mínima de pontos adotados.....	39
Tabela 6 – Média dos valores de leitura do desalinahamento + θ	75
Tabela 7 – Média dos valores de leitura do desalinahamento - θ	75
Tabela 8 – Média dos valores de leitura do desalinahamento + φ	76
Tabela 9 – Média dos valores de leitura do desalinahamento - φ	76
Tabela 10 – Leitura configuração $(m_{ct})_{56,5}$	79
Tabela 11 – Leitura configuração $(m_{ct})_{84,5}$	80
Tabela 12 – Leitura configuração $(m_{ct})_{113}$	82
Tabela 13 – Leitura configuração $(m_{ct})_{124}$	84
Tabela 14 – Leitura configuração $(m_{ct})_{132}$	86
Tabela 15 – Leitura configuração $(m_{11})_{1 \times 2}$	92
Tabela 16 – Leitura configuração $(m_{11})_{2 \times 2}$	94
Tabela 17 – Leitura configuração $(m_{12})_{2 \times 3}$	96
Tabela 18 – Leitura configuração $(m_{11})_{2 \times 3}$	98
Tabela 19 – Leitura configuração $(m_{11})_{2 \times 3 \text{calota}}$	101
Tabela 20 – Comparação do desalinhamento positivo com a referência	103
Tabela 21 – Comparação do desalinhamento negativo com a referência.....	103
Tabela 22 – Representatividade da incerteza de resolução	106
Tabela 23 – Tendência devido ao deslocamento.....	108
Tabela 24 – Incerteza instrumental	108
Tabela 25 – Comparação da tendência entre as configurações $(m_{11})_{2 \times 3}$ e $(m_{11})_{2 \times 3 \text{calota}}$	110

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

2-D	Bidimensional
3-D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LED	<i>Light-emitting diode</i>
LSI	<i>Linear shift-invariant</i>
NBR	Norma Brasileira
PSF	<i>Point Spread Function</i>
ROI	<i>Region of Interest</i>
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{\text{medição}}$	Amplitude de medição do manômetro
c	Centro ótico
d	Diâmetro Nominal
D_e	Menor divisão de escala do manômetro
d_w	Distância de trabalho da lente
E_a	Posição escala anterior
E_f	Posição final da escala
E_i	Posição inicial da escala
E_p	Posição da escala posterior
f	Distância focal
h	Distância entre ponteiro e marcações da escala
I	Indicação do manômetro
N	Número de escalas anteriores a posição do ponteiro
P_p	Posição do ponteiro
V	Correção da medição de pressão negativa
θ	Ângulo de zênite
Φ	Ângulo azimutal

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	29
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	29
1.2. OBJETIVOS	31
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	32
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1. MANÔMETROS ANALÓGICOS COM INDICAÇÃO POR PONTEIRO.....	33
2.1.1. Aspectos normativos	34
2.1.2. Classificação.....	35
2.1.3. Aspectos construtivos.....	36
2.1.4. Calibração.....	38
2.2. FONTES DE INCERTEZAS DO SISTEMA DE VISÃO DE MÁQUINA	39
2.2.1. Distorção de perspectiva	40
2.2.2. Paralaxe	42
2.2.3. Distorção de lente.....	43
2.2.4. Resolução	43
2.2.5. Iluminação.....	43
3. PROJETO DA BANCADA PARA QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS.....	45
3.1. RELAÇÃO DAS FONTES DE INCERTEZAS COM PARÂMETROS CONSTRUTIVOS	45
3.1.1. Características construtivas do manômetro	45
3.1.2. Desalinhamento entre manômetro e sistema de captura de imagem	46
3.1.3. Iluminação.....	47
3.1.4. Distância entre manômetro e sistema de captura de imagem ..	47
3.1.5. Quantidade de manômetros	48
3.1.6. Formato do painel.....	48
3.2. BANCADA PARA QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAs ..	50
3.2.1. Manômetro	50
3.2.2. Sistema de posicionamento	51
3.2.3. Sistema de iluminação.....	56
3.2.4. Sistema de captura de imagem	57
3.2.5. Algoritmo	58
3.2.6. Montagem da bancada para quantificação de incertezas.....	59

4. ENSAIOS	61
4.1. PROCEDIMENTOS GERAIS DE ENSAIO	61
4.1.1. Alinhamento entre os planos do manômetro e do sistema de captura de imagem	63
4.1.2. Distância de trabalho.....	65
4.2. PROCEDIMENTO DE TRANSLAÇÃO DO MANÔMETRO	67
4.3. PROCEDIMENTO DE ROTAÇÃO	68
4.4. PROCEDIMENTO DE LEITURA	69
4.4.1. Obtenção da indicação	72
4.5. AVALIAÇÃO	73
4.6. ALINHAMENTO ENTRE MANÔMETRO E SISTEMA DE CAPTURA DE IMAGEM.....	74
4.7. DISTÂNCIA ENTRE MANÔMETRO E SISTEMA DE CAPTURA DE IMAGEM.....	76
4.7.1. Leitura na distância de 56,5 – configuração $(m_{ct})_{56,5}$	78
4.7.2. Leitura na distância de 84,5 mm – configuração $(m_{ct})_{84,5}$	80
4.7.3. Leitura na distância de 113 mm – configuração $(m_{ct})_{113}$	82
4.7.4. Leitura na distância de 124 mm – configuração $(m_{ct})_{124}$	84
4.7.5. Leitura na distância de 132 mm – configuração $(m_{ct})_{132}$	86
4.8. QUANTIDADE DE MANÔMETROS LIDOS NUMA MESMA IMAGEM.....	87
4.8.1. Leitura de 2 manômetros – configuração $(m_{11})_{1x2}$	91
4.8.2. Leitura de 4 manômetros – configuração $(m_{11})_{2x2}$	93
4.8.3. Leitura de 6 manômetros – configuração $(m_{12})_{2x3}$	95
4.8.4. Leitura de 6 manômetros – configuração $(m_{11})_{2x3}$	97
4.9. FORMATO DO PAINEL.....	99
4.9.1. Painel calota para 6 manômetros configuração $(m_{11})_{2x3calota}$..	100
5. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	103
5.1. INFLUÊNCIA DO ALINHAMENTO.....	103
5.2. INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE MANÔMETRO E SISTEMA DE CAPTURA DE IMAGEM	105
5.3. INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE MANÔMETROS ..	106
5.4. INFLUÊNCIA DO FORMATO DO PAINEL	109
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	111
6.1. CONCLUSÕES.....	111
6.2. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	113
REFERÊNCIAS.....	115

APÊNDICE A – INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO.....	119
APÊNDICE B – INFLUÊNCIA DA TENDÊNCIA INSTRUMENTAL	121
APÊNDICE C – ESTIMATIVA DA INCERTEZA	129
APÊNDICE D – CONSTRUÇÃO DO GABARITO DE CALIBRAÇÃO DE CÂMERA.....	133
APÊNDICE E – CONSTRUÇÃO DO GABARITO DE ALINHAMENTO	137

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A medição de pressão tem grande importância na indústria, que utiliza frequentemente como solução manômetros¹ de Bourdon, devido ao seu custo, confiabilidade e robustez.

No maior fabricante mundial de compressores herméticos para sistemas de refrigeração, existem cerca de 400 torres de ensaio de vida, com quatro sistemas fechados de refrigeração instrumentados por um manômetro analógico cada (LANDEIRA, 2013). Isso gera uma demanda, de ao menos, 1.600 instrumentos, cuja calibração periódica é obrigatória para que os ensaios sejam válidos, segundo a norma ASHRAE 23(ANSI, 2005).

Entretanto, a qualidade da calibração dos manômetros é influenciada pelo operador, que está sujeito a cometer erros durante o processo de calibração devido ao cansaço e ao estresse resultante dessa atividade considerada enfadonha e morosa. Além disso, o custo para calibrar convencionalmente um manômetro analógico muitas vezes é tão elevado que se aproxima do custo de um equipamento novo (HEMMING, 2007).

Nesse cenário, um sistema automatizado de calibração de manômetros analógicos por visão de máquina apresenta grande potencial para suprir a demanda pela qualidade que o mercado exige. Ele proporciona menores valores de incertezas, melhor reprodutibilidade e repetibilidade – devido à pequena ou nenhuma interferência humana (ALEGRIA e SERRA, 2000). Ademais, o sistema pode aumentar a produtividade, o que possibilita realizar a calibração em mais pontos do intervalo de medição num mesmo período de tempo. Isso permite levantar a curva de erros do instrumento mais próxima do real e diminuir gastos operacionais e de mão de obra (HEMMING e LETHO, 2001).

Embora a automação da calibração de manômetros possa melhorar a qualidade do processo, no mercado não foram encontrados equipamentos destinados a essa aplicação. Existem equipamentos capazes de calibrar automaticamente outros instrumentos analógicos por ponteiro, que apesar de apresentarem as características

¹ A fim de padronizar a denominação do instrumento de medição de pressão, adotou-se o termo manômetro no texto, como já ocorre na norma ABNT NBR 14105-1 (ABNT, 2011), uma vez que as características construtivas e os conceitos de funcionamento são os mesmos para os vacuômetros e manovacuômetros.

² O tudo de Bourdon pode possuir diferentes formas dependendo de sua aplicação, sendo as

metrológicas para atender às normas vigentes, calibram apenas um instrumento por vez, vide Steinmeyer (2013). Isso não é de interesse da indústria, a qual busca soluções com enfoque em confiabilidade metrológica e produtividade.

Nesse cenário, sistemas automatizados que utilizam visão de máquina para calibrar mais de um manômetro por imagem, apresentam vantagens em termos do melhor gerenciamento, tendo em vista a manutenção periódica, a comunicação com os sistemas computacionais e a limpeza dos equipamentos.

À luz do exposto, tem-se a justificativa para o desenvolvimento do projeto de um sistema automatizado de calibração de manômetros analógicos por visão de máquina. O enfoque dado neste trabalho é que o sistema seja capaz de realizar a leitura automática dos manômetros utilizados nos testes de vida e ensaio de desempenho nas fabricantes de sistemas de refrigeração, visando duas características: confiabilidade metrológica e produtividade.

A utilização de visão de máquina na leitura de instrumentos analógicos é bem desenvolvida e tem suas características e soluções conhecidas. Entretanto, para calibração de mais de um instrumento numa mesma imagem, não foram encontrados estudos que fornecessem soluções ou que avaliassem esse tipo de situação.

As razões para tal são: a perda de área útil, que resulta numa resolução pior do sistema de medição e a acentuação da paralaxe e da distorção da lente.

A fim de garantir as propriedades metrológicas do sistema automático de calibração de manômetros, deve-se obter as fontes de incertezas de acordo com as variáveis do projeto mecânico do sistema de visão de máquina.

Para isso, é preciso levantar as possíveis fontes de incerteza – por meio de pesquisa realizada na bibliografia disponível – e quantificá-las experimentalmente.

Embora a leitura simultânea de manômetros numa mesma imagem não tenha sido encontrada como tema de estudos, muitos dos trabalhos existentes na literatura, como de Hemming, Palosuo e Lassila (2002), Lima, Pereira e Vasconcelos (2008), Liu, Liu e Wang (2008) e Sablatnig e Kropatsch (1994) fornecem informações pertinentes ao projeto de um sistema de visão de máquina para leitura de instrumentos analógicos. Além disso, eles abordam a identificação das possíveis fontes de incerteza relacionadas ao projeto mecânico do sistema e às características construtivas dos instrumentos analógicos.

Entretanto, apenas nos trabalhos de Hemming e Letho (2001), Hemming e Letho (2002) e Hemming, (2007), foram adotados métodos adequados para análise de incertezas – como, por exemplo, ISO GUM (INMETRO, 2008) e Monte Carlo (JCGM, 2008).

Dessa forma, é preciso realizar a quantificação das incertezas do sistema de visão de máquina de acordo com métodos adequados. Essas incertezas embasam o projeto de um sistema automatizado de calibração de manômetros que visa atender os desejos da indústria.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho de mestrado é caracterizar experimentalmente as fontes de incerteza para apoio ao projeto mecânico de um sistema automatizado de calibração de manômetros no tocante às características de câmera, de lentes e da posição espacial do par manômetro-sistema de captura de imagem, formado pelo conjunto câmera lente.

Esse será atingido a partir do levantamento das fontes de incerteza, que são obtidas através de estudos existentes na literatura. A partir disso é possível quantificar as fontes de incerteza utilizando o método experimental comparando os resultados obtidos em ensaios, nos quais se avaliam as influências do alinhamento entre manômetro e sistema de captura de imagem, da distância entre manômetro e sistema de captura de imagem, da quantidade de manômetros lidos numa mesma imagem e do formato do painel.

Para quantificar as incertezas, empregou-se um mesmo manômetro, uma mesma câmera e uma lente para todas as situações de ensaio. Isso permite analisar separadamente as incertezas provenientes do alinhamento, da distância, da quantidade de manômetros e do formato do painel.

A fim de atender as necessidades do sistema de calibração automatizado de manômetros, adotou-se como condição de contorno utilizar nos ensaios o instrumento aplicado nos ensaios de vida de compressores herméticos, cuja demanda pela calibração é uma das maiores dentro da indústria de refrigeração.

Para a câmera tem-se como condição de contorno a utilização de um sistema comercial, cuja manutenção, assistência técnica e troca do equipamento sejam facilmente realizadas. Além disso, a mesma deve ser capaz de verificar a variação das propriedades metrológicas de acordo com os requisitos de projetos que serão avaliados.

Por fim, a lente adotada deve possuir grande campo de visão, o que permite realizar a leitura de múltiplos instrumentos numa mesma imagem a partir de sistemas mais compactos.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Tendo em vista o objetivo apresentado, buscaram-se os dados necessários para levantar as fontes de incerteza, que são obtidos através de estudos encontrados na revisão bibliográfica realizada no capítulo dois.

No capítulo três é definido como as características do projeto mecânico influenciam nas fontes de incerteza. A partir disso são obtidos os requisitos para a construção de uma bancada de ensaios, que irá quantificar as incertezas experimentalmente, de acordo com a variação: do alinhamento, da distância entre manômetro e sistema de captura de imagem, da quantidade de manômetros lidos e do formato do painel.

Os procedimentos para realizar os ensaios e os seus resultados são discutidos no capítulo quatro. Esses são utilizados para quantificar as incertezas dos parâmetros avaliados – alinhamento, distância, quantidade de manômetros e do formato do painel – cujos resultados são apresentados no capítulo cinco.

Por fim, no capítulo seis são apresentadas as conclusões sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

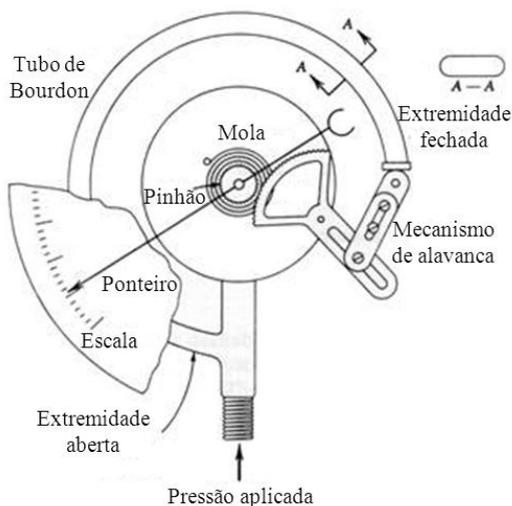
Para realizar a leitura dos manômetros é preciso desenvolver um sistema de visão de máquina capaz de ler os instrumentos. A fim de obter os requisitos de projeto é preciso levantar as características construtivas do manômetro e suas dimensões nominais, o que será realizado através da revisão bibliográfica e da norma vigente.

Além dos requisitos relacionados ao manômetro, é preciso, através da revisão bibliográfica, levantar as informações pertinentes ao projeto do sistema de visão de máquina. Com isso busca-se conhecer as possíveis fontes de incertezas, tipicamente presentes em tais sistemas.

2.1. MANÔMETROS ANALÓGICOS COM INDICAÇÃO POR PONTEIRO

Com o registro original de patente datado de 1849 em nome de E. Bourdon, o tubo de Bourdon é o elemento sensor de uma variedade de manômetros. Apesar de basear-se numa tecnologia com mais de 160 anos, os manômetros com tubo de Bourdon (ilustrado pela figura 1) ainda são amplamente utilizados na indústria (ACHERMAN e MARTINEZ, 2010).

Figura 1 – Manômetro com tubo de Bourdon



Fonte: Adaptado de Figliola e Beasley (2000)

Segundo Acherman e Martinez (2010), o manômetro com tubo de Bourdon é o instrumento de medição de pressão mais utilizado em: sistemas de bombeamento, linhas de refrigeração e linhas de distribuição de vapor, resistindo com sucesso a sua substituição por instrumentos de medição eletrônicos.

Isso se deve ao fato de que esse tipo de manômetro é versátil, podendo ser utilizado em diversos fluidos (*e.g.* óleos, gases), apresenta baixo custo de aquisição e manutenção quando comparado a outros instrumentos de medição, além de apresentar confiabilidade metrológica condizente com a maioria das opções de medidores de pressão (METAS, 2007).

O tubo de Bourdon funciona da seguinte maneira: um sistema mecânico formado por elementos simples, no qual um tubo de secção elíptica, com uma extremidade hermeticamente fechada e outra aberta, é dobrado até atingir a forma desejada².

Quando se pressuriza a parte interna do tubo – através da extremidade aberta que está em contato com o depósito que contém o fluido, cuja pressão se deseja conhecer –, a secção elíptica tende a tornar-se uma secção circular, o que leva o tubo dobrado a se desenrolar.

A extremidade fechada sofre um deslocamento que é traduzido num valor de pressão. Um conjunto – composto de engrenagens, mola e mecanismo de alavanca – fixado à extremidade fechada do tubo de Bourdon e conectado ao ponteiro que converte a deformação do tubo, num deslocamento angular do ponteiro. Esse é proporcional à variação de pressão, a qual é dada pela indicação do ponteiro do manômetro sobre uma escala de valores (FIGLIOLA e BEASLEY, 2000).

2.1.1. Aspectos normativos

A primeira edição da norma ABNT NBR 14105-1 (ABNT, 2011) sob o título “Medidores de pressão” é dividida em três partes. A primeira, intitulada “*Medidores analógicos de pressão com sensor de elemento elástico – Requisitos de fabricação, classificação, ensaios e utilização*”, tem como escopo a classificação, a padronização de dimensões e a definição dos procedimentos de calibração.

² O tubo de Bourdon pode possuir diferentes formas dependendo de sua aplicação, sendo as mais comuns o tubo em “C”, em espiral e hélice. O tubo em espiral – utilizado para baixas pressões – e o tubo em hélice – aplicado em pressões altas – permitem, quando comparados ao tubo em “C”, maior amplitude de movimento, obtendo, assim, respostas mais rápidas (METAS, 2007).

2.1.2. Classificação

A classificação dos manômetros tem como escopo (ABNT, 2011):

Estabelecer os critérios para fabricação, classificação, ensaios e utilização dos manômetros, vacuômetros e manovacuômetros com sensor de elemento elástico para indicação de pressão e/ou vácuo para uso industrial.

Para isso a classificação dos manômetros é realizada de duas maneiras: a primeira – denominada “classificação pelas faixas de escala de pressão” – considera o intervalo de medição e o fluido de trabalho do instrumento para classificá-lo, como mostra a tabela 1, a fim de estabelecer valores da pressão nominais e também atender aos requisitos de segurança determinados pelas normas vigentes.

Tabela 1 – Classificação por intervalo de medição

Fluido	Baixa pressão	Alta pressão
Gás	$\leq 2,5$ MPa	$> 2,5$ MPa
Líquido	$\leq 6,0$ MPa	$> 6,0$ MPa

Fonte: Adaptado de ABNT (2011).

Para medições de pressão de gases até 2,5 MPa, o manômetro é considerado de baixa pressão e, para medições acima desse valor, ele é considerado de alta pressão. Já quando se utiliza fluidos de trabalho líquidos, o limite para que o instrumento de medição seja considerado de baixa pressão é de 6 MPa; acima desse valor ele é considerado de alta pressão.

A segunda maneira, denominada “classificação pela classe de exatidão”, define o valor que o erro máximo admissível pode assumir para classe de exatidão (ABNT, 2011).

O erro máximo, obtido através da verificação ou calibração do manômetro, deve estar dentro do intervalo de tolerância, definido pela norma, que varia de acordo com a região do intervalo de medição: “abaixo de $\frac{1}{4}$ da amplitude de medição”, “entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ da amplitude de medição” e “acima de $\frac{3}{4}$ da amplitude de medição”. Além da região, é

considerado o “erro devido ao atrito”³. Os valores percentuais para cada classe estão ilustrados na tabela 2.

Tabela 2 – Classe de exatidão

Classe de exatidão	Erro máximo admissível			Erro devido ao atrito [%]
	Abaixo de $\frac{1}{4}$ da amplitude de medição [%]	Entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ da amplitude de medição [%]	Acima de $\frac{3}{4}$ da amplitude de medição [%]	
A4	0,10	0,10	0,10	*
A3	0,25	0,25	0,25	0,25
A2	0,50	0,50	0,50	0,50
A1	1,00	1,00	1,00	1,00
A	1,50	1,50	1,50	1,50
B	3,00	2,00	3,00	2,00
C	4,00	3,00	4,00	3,00
D	5,00	4,00	5,00	3,00

*Os manômetros de classe A4 devem manter-se dentro do erro máximo admissível antes e após serem levemente batidos.

Fonte: Adaptado de ABNT (2011).

2.1.3. Aspectos construtivos

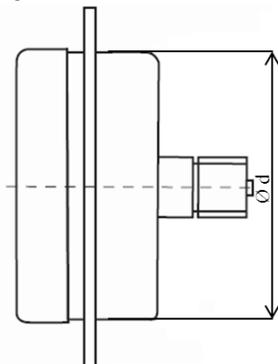
A padronização dos manômetros possui diversos itens, para a presente dissertação, têm-se como relevantes as dimensões relacionadas ao instrumento, ou seja, as características construtivas de três elementos: o invólucro⁴, pertinente para determinar as dimensões do objeto de interesse; o instrumento de medição mostrador, essencial para o reconhecimento de padrões na análise de imagens; e o ponteiro, cujas dimensões auxiliarão na estimativa da incerteza de medição.

Com relação ao invólucro, a norma ABNT NBR 14105-1 (ABNT, 2011) padroniza apenas o diâmetro nominal, que é definido como o diâmetro externo da caixa do manômetro, ilustrado pela figura 2, e que tem seus valores e tolerâncias descritos pela tabela 3.

³ É descrito como erro na indicação ocasionado pelo atrito existente entre o conjunto mecânico engrenagens, mola, mecanismo de alavanca e ponteiro, responsáveis pela conversão do deslocamento do tubo de Bourdon em indicação de pressão.

⁴ Segundo a norma ABNT NBR 14105-1 (ABNT, 2011) invólucro é o conjunto composto por caixa – componente que suporta, protege e envolve o conjunto tubo de Bourdon, engrenagens, mola, alavanca, ponteiro e mostrador –, visor – componente transparente do invólucro que protege o mostrador e ponteiro – e capa ou anel – componente que fixa o visor a caixa.

Figura 2 – Diâmetro nominal do manômetro



Fonte: Adaptado de ABNT (2011).

Tabela 3 – Diâmetros nominais, dimensões e tolerâncias

Diâmetro nominal (mm)	Ø d (mm)
40	40 ± 2
50	50 ± 3
63	63 ± 3
80	80 ± 3
100	100 ± 5
114	114 ± 5
160	160 ± 8
250	250 ± 15
300	300 ± 15

Fonte: Adaptado de ABNT (2011).

Embora a norma não defina outros diâmetros da caixa, ela determina a padronização dos diâmetros nominais em função da classe de exatidão do instrumento de medição, como é visto no quadro 1.

Quadro 1 – Diâmetros nominais em função da classe de exatidão

Diâmetro nominal (mm)	Classificação de exatidão							
	A4	A3	A2	A1	A	B	C	D
40 e 50					X	X	X	X
63				X	X	X	X	X
80				X	X	X	X	X
100 e 114			X	X	X	X		
160		X	X	X	X			
250 e 300	X	X	X	X	X			

Fonte: Adaptado de ABNT (2011).

As marcações de escalas dos manômetros devem possuir a forma de um arco que, normalmente, possui 270° de abertura, mas que pode ser maior quando se utiliza manômetros de classe A4, A3 e A2. A espessura das marcações da escala graduada não pode exceder 1/5 da distância entre as marcações e nem possuir distância entre si inferior a um milímetro. Além disso, as distâncias entre as marcações devem ser tão constantes quanto possível. Por fim, a diferença entre a maior e a menor distância entre as marcações não pode exceder 1/5 da menor distância (ABNT, 2011).

Para finalizar os aspectos normativos, a característica construtiva do ponteiro do manômetro determinada pela norma é o seu comprimento mínimo, cujo valor é determinado de acordo com o diâmetro nominal da caixa, como ilustra a tabela 4.

Tabela 4 – Comprimento mínimo do ponteiro

Diâmetro nominal (mm)	Comprimento mínimo do ponteiro (mm)
40	14
50	18
63	23
80	28
100	36
114	40
160	62
250	95
300	115

Fonte: Adaptado de ABNT (2011).

2.1.4. Calibração

A norma ABNT NBR 14105-1 (ABNT, 2011), estabelece ainda os critérios e procedimentos adotados na calibração do manômetro.

As condições de calibração definem a temperatura, a frequência de calibração, a quantidade mínima de pontos avaliados e do número de ciclos que devem ser adotados durante o processo.

Os requisitos relevantes são: a quantidade mínima de pontos – que varia de acordo com a classe de exatidão do manômetro, como mostra a tabela 5 –, e o número de repetições (ciclos) que, segundo a norma, devem ser, no mínimo, dois.

Tabela 5 – Quantidade mínima de pontos adotados

Classe	Quantidade mínima de pontos
A4, A3 e A2	10
A1, A, B, C e D	5

Fonte: Adaptado de ABNT (2011).

Os requisitos acima devem ser utilizados num método que consiste em atingir a estanqueidade dos manômetros nos seus pontos extremos de medição.

Após a estanqueidade ter sido percebida alivia-se o sistema de pressurização do instrumento e dá-se início às leituras dos pontos de calibração. Esses devem ser atingidos, no manômetro a ser calibrado, através da pressurização do sistema de maneira crescente e seus valores registrados juntamente com os valores indicados pelo instrumento de calibração padrão. A fim de minimizar os erros de atrito antes de registrar cada indicação, deve-se bater levemente no visor do manômetro.

Com o manômetro pressurizado no seu final do intervalo de medição deve-se descarregar o mesmo até que sejam atingidos os pontos de calibração para registros dos valores, como foi realizado anteriormente. Para cada calibração do instrumento esse ciclo deve ser repetido, ao menos, mais uma vez.

Caso seja emitido um certificado de calibração este deve estar em conformidade com os requisitos da norma vigente ABNT NBR IEC 17025:2005 (ABNT, 2005).

Sendo assim, os itens da norma vigente para construção e calibração de manômetros relevantes – ao presente trabalho – foram abordados de maneira resumida, mas o suficiente para ter-se o entendimento de sua importância.

2.2. FONTES DE INCERTEZAS DO SISTEMA DE VISÃO DE MÁQUINA

Visão de máquina ou *machine vision* é o estudo de métodos e técnicas que permitem a construção e utilização de sistemas de visão artificial em aplicações práticas (DAVIES, 2005).

Batchelor (2012, tradução do autor) diz que:

Visão de máquina pode ser definida como a engenharia empregada para desenvolver um sistema de visão artificial, ou seja, ela

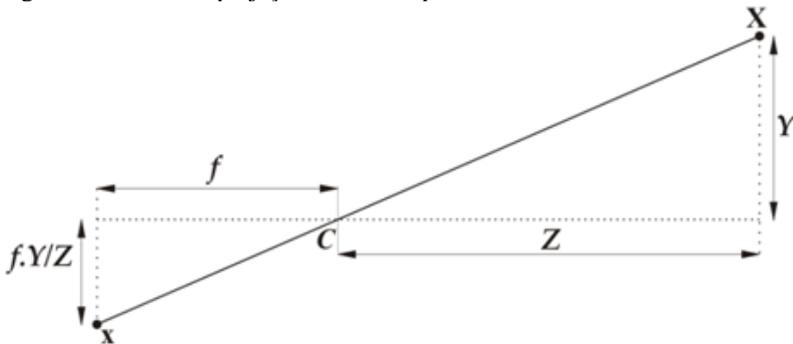
envolve o projeto de um sistema ótico, elétrico, mecânico, além do desenvolvimento do software integrado, no qual se busca examinar objetos naturais, materiais, produtos e processos de fabricação, a fim de detectar defeitos e assim melhorar a qualidade e a eficiência, além de garantir segurança de produtos e processos. Podendo também ser utilizada no controle de máquinas existentes num processo produtivo.

À luz do exposto, as fontes de incertezas da visão de máquina estão associadas à diferença entre o objeto e a sua imagem, que ocorre durante a sua formação.

2.2.1. Distorção de perspectiva

Utilizando um modelo de câmera, pode-se definir uma relação de proporcionalidade entre o objeto e a imagem formada através da projeção do objeto sobre o plano da imagem, como é ilustrado na figura 3

Figura 3 – Pontos de projeção no modelo *pinhole*



Legenda,	X	ponto pertencente ao objeto
	x	ponto pertencente à imagem
	C	centro de projeção do sistema ótico
	f	distância focal no eixo x
	Z	distância centro do eixo ótico ao objeto no eixo x
	Y	distância do eixo ótico ao objeto no eixo y
	$f.Y/Z$	distância do eixo ótico à imagem no eixo y

Fonte: Adaptado de Hofmann (2006)

Dentre os vários modelos de câmeras existentes, o mais utilizado é o modelo *pinhole* (FISHER *et al.*, 2014). Nele o ponto pertencente ao objeto (\mathbf{X}) é projetado na imagem (\mathbf{x}) pela lente do sistema ótico que é simplificada por um orifício disposto no centro de projeção do sistema ótico (C). Dessa maneira, os pontos do objeto projetados sobre o plano da imagem dependem diretamente da sua distância em relação à lente e podem ser obtidos pelas equações 1 e 2.

$$x = -\frac{fX}{Z} \quad 1$$

$$y = -\frac{fY}{Z} \quad 2$$

onde, x : é a coordenada no eixo x da projeção do objeto no plano da imagem

y : é a coordenada no eixo y da projeção do objeto no plano da imagem

X : é a coordenada no eixo x do objeto no espaço

Y : é a coordenada no eixo y do objeto no espaço

Z : é a coordenada no eixo z do objeto no espaço

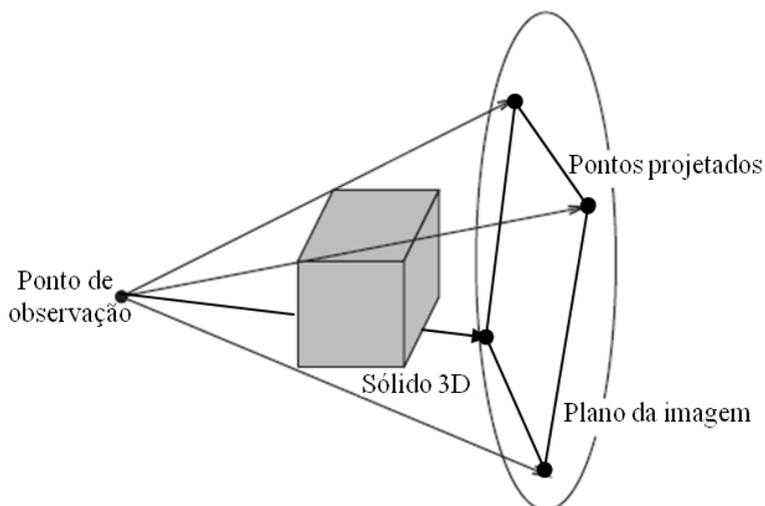
Quando as dimensões dependem diretamente da sua distância em relação à lente, tem-se a projeção em perspectiva (FISHER *et al.*, 2014). Nesse caso os raios paralelos no mundo real tendem a convergir para um ponto denominado de ponto de fuga e a imagem do objeto ocorre de acordo com a projeção em perspectiva (FISHER *et al.*, 2014).

Entretanto, quando o eixo ótico não está alinhado com o centro do objeto, a imagem formada pode apresentar distorções de perspectiva (FISHER *et al.*, 2014). Essas deformam as dimensões de interesse do mensurando, replicando incertezas nas medições (BATCHELOR, 2012).

2.2.2. Paralaxe

A transformação de um espaço de dimensão maior sobre um plano bidimensional, como ilustra a figura 4, é denominada de projeção 2-D (FISHER *et al.*, 2014).

Figura 4 – Projeção 2-D



Fonte: Adaptado de (FISHER *et al.*, 2014)

Assim sendo, quando a projeção 2-D ocorre concomitantemente à distorção de perspectiva, podem-se gerar incertezas devido à projeção do ponteiro sobre o plano das marcações de escala. Devido à projeção, a imagem formada apresenta indicação da pressão diferente em relação ao valor real indicado pelo manômetro. A essa diferença na indicação, dá-se o nome de paralaxe.

Paralaxe é o principal problema para aplicação da visão de máquina em sistemas de medição nos quais os objetos apresentam profundidade (EDMUND OPTICS, 2013).

2.2.3. Distorção de lente

Segundo Batchelor (2012), degradações na qualidade da imagem devido ao sistema ótico são causadas por imperfeições nas lentes. Dentre essas degradações, uma destaca-se devido à sua importância para este trabalho, que é a distorção de lente. Esse tipo de aberração ocorre devido à existência de diferentes distâncias focais para diferentes regiões da lente (HECHT 2002).

A distorção de lente muda a percepção da projeção da forma do objeto na imagem formada, extremamente importante para a maioria das aplicações de visão de máquina, especialmente para aquelas cuja necessidade é caracterizar a forma e medir dimensões dos objetos de interesse (BATCHELOR, 2012).

Como consequência tem-se a formação de incertezas resultantes da não linearidade das imagens geradas, como pode ser visto em Viala e Salmerón (2010) e Hemming (2007).

2.2.4. Resolução

Resolução de medição é a grandeza física que pode ser representada pela diferença entre dois pixels adjacentes (FISHER *et al.*, 2014). Imagens com baixa resolução podem perder informações e formar imagens borradas (NI, 2003).

Para avaliar a resolução do sistema de calibração automatizado de manômetros, utiliza-se a relação pixel/mm. Essa relação é obtida fazendo a correspondência entre a dimensão da imagem e a dimensão do objeto. Portanto, para melhorar a resolução do sistema de captura de imagem, pode-se aumentar a área ocupada pelo objeto na imagem ou pode-se aumentar a resolução da câmera.

Assim sendo, a relação pixel/mm pode gerar fontes de incertezas devido à área que o manômetro ocupa na imagem, ou devido à resolução da câmera como mostram Hemming Fagerlund e Lassila (2007) e Lima, Pereira e Vasconcelos (2008).

2.2.5. Iluminação

O sistema de iluminação é essencial para garantir a qualidade de ferramentas computacionais durante o processamento e a análise da imagem (KOPPARAPU, 2006).

O sistema de iluminação, quando utilizado de maneira inadequada, pode gerar sombras, reflexos e sofrer a influência do meio

externo. Esses, segundo Kopparapu (2006), Jähne (2005), Sablatnig e Hansen (1995) e Hemming, Ikonen e Noorma (2007), podem ser fontes de incerteza.

Outro fator que pode gerar fontes de incerteza relacionada à iluminação, é a instabilidade causada pela mudança na intensidade luminosa. Essa pode causar a variação dos valores de escala de cinza, o que pode variar o número de pixel e inserir incerteza na medição (HEMMING, 2007).

3. PROJETO DA BANCADA PARA QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS

O projeto de mestrado tem como objetivo fornecer os dados necessários para caracterizar, experimentalmente, as fontes de incerteza para apoio ao projeto mecânico de um sistema automatizado de calibração de manômetros.

Sendo assim, é preciso encontrar a relação entre os parâmetros construtivos e as fontes de incerteza. Para isso, identificam-se quais são as possíveis fontes de incerteza de visão de máquina, através de pesquisa realizada na bibliografia disponível. Essas são relacionadas com características do seu projeto mecânico.

Com essa relação obtêm-se os requisitos necessários para construção de uma bancada, cuja função é quantificar experimentalmente as fontes de incertezas de acordo com a variação dos parâmetros do projeto de sistemas de visão de máquina.

3.1. RELAÇÃO DAS FONTES DE INCERTEZAS COM PARÂMETROS CONSTRUTIVOS

A partir da revisão bibliográfica, principalmente, Euromet (2006) e Hemming (2007), pode-se dizer que as principais fontes de incerteza deste projeto de mestrado estão relacionadas aos seguintes parâmetros construtivos do sistema de visão de máquina: desalinhamento, iluminação, manômetro, distância entre manômetro e sistema de captura de imagem e quantidade de manômetros lidos numa imagem e formato do painel.

3.1.1. Características construtivas do manômetro

As incertezas provenientes das características construtivas do manômetro são geradas, principalmente, pela projeção do ponteiro sobre o plano das marcações de escala (projeção 2-D). Isso se deve ao fato de que as marcações da escala do instrumento não estão no mesmo plano de seu ponteiro.

Sendo assim, se o manômetro apresentar discordância entre a posição do centro do mostrador da escala e o centro de rotação do ponteiro, a projeção 2-D gera paralaxe.

Além disso, a paralaxe pode surgir também quando houver a combinação de distorção de perspectiva e projeção 2-D. Entretanto, para isso, o manômetro e o sistema de captura de imagem devem estar

desalinhados ou o centro do instrumento deve estar posicionado fora do eixo óptico.

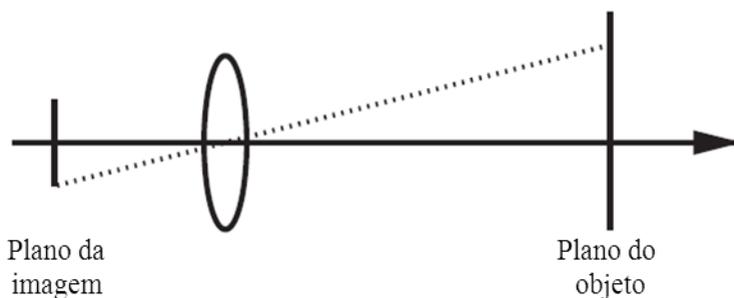
3.1.2. Desalinhamento entre manômetro e sistema de captura de imagem

Para obter uma imagem, cujas proporções e forma sejam fidedignas ao objeto, é preciso que o sistema de captura de imagem e mensurando estejam alinhados. Isso mantém constante a distância média das marcações de escalas ao centro óptico, o que minimiza as incertezas de perspectiva de câmera.

Quando o alinhamento não atende aos requisitos exigidos, podem surgir fontes de incertezas relacionadas à distorção de perspectiva e à projeção 2-D.

Para quantificar as incertezas provenientes do desalinhamento, é preciso realizar a leitura de uma referência alinhada. Para isso, a bancada deve ser capaz de posicionar o centro do manômetro sobre o eixo óptico e alinhar o plano da imagem e o plano do objeto, como ilustra a figura 5, a fim de obter uma referência de alinhamento na qual as distorções de perspectiva sejam as menores possíveis.

Figura 5 – Alinhamento entre plano da imagem e plano do objeto



Fonte: Adaptado de (FISHER *et al.*, 2014)

Depois, é preciso introduzir desalinhamento a fim de realizar novas leituras e compará-las. Dessa forma, a bancada também deve ser capaz de controlar o desalinhamento, de maneira que seja possível quantificar as incertezas de acordo com o ângulo de desalinhamento.

3.1.3. Iluminação

O sistema de iluminação é essencial para garantir a qualidade de ferramentas computacionais durante o processamento e análise da imagem (KOPPARAPU, 2006).

Fatores como: tipos de iluminação – pontual ou estendida; fluorescente ou LED – e de intensidade luminosa devem ser examinados para que não haja a formação de sombras e reflexos, nem influência do meio externo. Esses podem reduzir a eficiência do processamento de imagem, o que poderia gerar incertezas na medição (KOPPARAPU, 2006).

Além disso, é preciso manter as condições de iluminação para cada leitura independente dos parâmetros do projeto mecânico – alinhamento, distância, quantidade de manômetros e formato de painel. Isso permite realizar a comparação dos parâmetros do projeto sem que haja influência do sistema de iluminação.

Sendo assim, o sistema de iluminação deve possuir uma fonte luminosa livre de influências externas, homogênea o suficiente para que não produza reflexos, sombras e regiões de penumbra a ponto de prejudicar a análise da imagem, a fim de que as ferramentas computacionais sejam capazes de realizar a leitura com confiabilidade – e que não sofra mudanças em suas características nas diversas leituras realizadas.

3.1.4. Distância entre manômetro e sistema de captura de imagem

A distância entre o manômetro e o sistema de captura de imagem influencia na resolução do sistema de medição através da relação pixel/mm. Sendo assim, quanto maior for a área ocupada pelo objeto na imagem melhores são a relação e a resolução.

Entretanto, quando se afasta o sistema de captura de imagem do objeto perde-se área útil⁵, o que resulta numa relação pixel/mm pior e, consequentemente, numa resolução pior do sistema de medição.

Isso aumenta a influência da resolução na composição da incerteza instrumental. Sendo assim, é preciso verificar como a variação da relação pixel/mm, dada pela variação da distância entre

⁵ Maior relação da área da imagem ocupada pela imagem do objeto sem que ocorra *vignetting* – vide (BATCHELOR, 2012). Geralmente recomenda-se que a área útil não ultrapasse 95% da área total.

manômetro e sistema de medição, influencia na incerteza da resolução do sistema de medição.

Para avaliar a resolução do sistema de medição como fonte de incerteza estabeleceu-se como procedimento que sejam realizadas leituras do manômetro de maneira que a variação da resolução seja a principal componente da variação da incerteza de medição. Para isso realizam-se leituras nas quais se posiciona o centro do manômetro sobre o eixo ótico, concêntrico ao centro da imagem; e garante-se o alinhamento entre os planos do instrumento e do sistema de captura de imagem.

Sendo assim, a bancada deve ser capaz de variar a distância entre o manômetro e o sistema de captura de imagem de maneira controlada, a fim de quantizar o efeito da distância sobre a incerteza.

3.1.5. Quantidade de manômetros

No presente trabalho deseja-se analisar a influência da leitura de múltiplos manômetros através da inserção de mais instrumentos numa mesma imagem.

Para aumentar a quantidade de manômetros lidos numa mesma imagem deve-se deslocar horizontalmente e verticalmente o manômetro em relação ao centro ótico, o que intensifica a deformação da imagem causada pela distorção da lente e pela distorção de perspectiva.

Dessa forma, para avaliar as incertezas relacionadas à quantidade de manômetros, deve-se posicionar os instrumentos de maneira que seja possível obter a indicação de mais de um manômetro por imagem. Os resultados das leituras serão comparados para quantizar as incertezas de acordo com a quantidade de instrumentos lidos numa mesma imagem.

3.1.6. Formato do painel

Para realizar a leitura dos instrumentos utiliza-se um painel plano, no qual os manômetros estarão posicionados lado a lado o mais próximo possível, em diferentes níveis, representados por uma matriz $(M)_{l \times c}$ de l linhas por c colunas. Assim, cada manômetro, representado pela letra m , tem seu posicionamento dado pela notação $(m_{ij})_{l \times c}$, na qual os subíndices i e j representam, respectivamente, a linha e a coluna onde os instrumentos estão dispostos, como mostra a figura 6.

Figura 6 – Posição dos manômetros no painel

$$M = \begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{cccc} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1j} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{i1} & m_{i2} & \cdots & m_{ij} \end{array} \\ \hline \end{array}$$

Fonte: Autor

Devido às características construtivas do manômetro e à sua posição na imagem, tem-se a limitação do número de manômetros que podem ser lidos numa mesma imagem nos painéis planos.

As limitações dos painéis planos são ocasionadas pela projeção 2-D do manômetro sobre o plano da marcação de escalas. A partir de certo deslocamento, a caixa do manômetro é projetada sobre as marcações da escala, o que obstrui a formação de sua imagem, impossibilitando a leitura do instrumento.

Além disso, tem-se a geração de incertezas de medição causada pela distorção da lente, distorção de perspectiva e projeção 2-D, que pioram as incertezas do resultado de medição devido à paralaxe e deformação da imagem.

Previendo tais fatores, elaborou-se uma alternativa para reduzir esses efeitos indesejados utilizando-se como base os conceitos de projeção ortogonal – vide (FISHER *et al.*, 2014).

Para isso, tenta-se direcionar os raios provenientes do objeto, a fim de que esses incidam com o menor ângulo de incidência sobre a superfície da lente. Ademais, é preciso reduzir o ângulo entre o plano de projeção e o plano do objeto, o que garante menores distorções de perspectiva, mesmo que o centro do manômetro não esteja sobre o eixo ótico do sistema de captura de imagem.

Inspirado na visão de esfera – vide (FISHER *et al.*, 2014) – adotou-se como alternativa um painel em forma de calota. Esse visa manter a superfície da lente perpendicular ao centro do objeto, o que torna o plano de projeção da imagem paralelo ao plano do objeto. Para isso, deve-se direcionar a superfície do manômetro em direção ao

centro de projeção do sistema ótico. Além disso, o painel em calota visa manter constante a distância média das marcações de escalas ao centro de ótico, o que minimiza as incertezas de perspectiva de câmera.

Isso tem como intuito reduzir a influência da paralaxe e da distorção de perspectiva causadas pelo deslocamento vertical ou horizontal do manômetro em relação ao eixo ótico.

Como no painel plano, a representação do painel em calota é realizada por matrizes cuja notação adotada é $(M)_{lxccalota}$. Cada manômetro sobre a matriz de curvas é representado pela notação $(m_{ij})_{lxccalota}$.

Portanto, a bancada deve realizar a leitura a partir da emulação da posição do manômetro sobre os painéis plano e em forma de calota. Para isso é necessário que a bancada realize movimentos de translação e rotação de acordo com a necessidade de cada ensaio.

3.2. BANCADA PARA QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS

A bancada para avaliar as fontes de incerteza do sistema de visão de máquina é composta por cinco conjuntos: um manômetro, um sistema de posicionamento, um sistema de iluminação, um sistema de captura de imagem e um algoritmo.

3.2.1. Manômetro

O manômetro deve atender as especificações da norma ABNT NBR 14105-1 (ABNT, 2011). Devido às diversas aplicações, existem várias opções de manômetro cujas características são variadas. Apesar de o presente trabalho desenvolver soluções no intuito de que as mesmas possam ser aplicadas para a maioria dos manômetros, estabeleceu-se como condição de contorno a utilização de um único modelo de manômetro – semelhantes ao ilustrado pela figura 7 – muito utilizado pela indústria de compressores herméticos de refrigeração em testes de vida (MOSER, 2011). Esses são utilizados em larga escala, o que justifica a escolha.

Figura 7 – Manômetro adotado



Fonte: Autor

Os manômetros utilizados para o estudo de caso possuem as características ilustradas pelo quadro 2. Ademais, padronizou-se o fabricante do instrumento para manter a qualidade dos mesmos e, assim, permitir a comparação entre os resultados dos ensaios.

Quadro 2 – Características normativas do manômetro

Característica	
Classe	Classe A
Diâmetro nominal	(63±3) mm
Intervalo de medição	(-1 a +30) bar
Comprimento máximo do ponteiro	23 mm

3.2.2. Sistema de posicionamento

O sistema de posicionamento tem como função ajustar relativamente o manômetro frente ao sistema de captura de imagem, de acordo com a distância e alinhamento entre seus planos e da posição do centro do manômetro em relação ao eixo ótico.

Sendo assim, é necessário que o sistema de posicionamento seja capaz de realizar movimentos independentes em três eixos. O posicionamento do manômetro no painel plano precisa ser realizado através do deslocamento do mesmo no plano xy . Esse deve ser controlado para que seu valor seja utilizado na estimativa de incerteza relacionada com a posição do manômetro no painel.

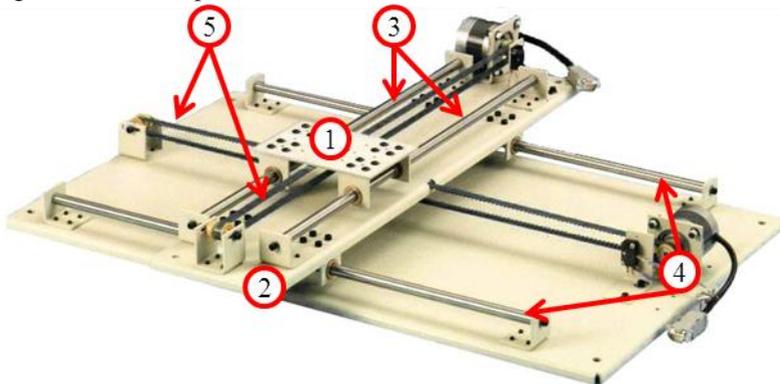
O deslocamento no eixo z tem como objetivos quantificar as incertezas relacionadas à distância entre manômetros e sistema de captura de imagem, e posicionar a câmera na distância adequada para realizar a leitura dos manômetros de acordo com o número de manômetros lidos na mesma imagem e com o formato do painel.

Além dos movimentos de translação nos eixos x , y e z citados acima, a bancada realizará movimentos de rotação em torno dos eixos x e y , para que seja possível quantificar as incertezas relacionadas ao alinhamento entre manômetro e sistema de captura de imagem e ao formato do painel.

Sendo assim, da mesma maneira que no movimento no plano xy , os movimentos de rotação devem ser controlados e registrados já que são utilizados na quantização de incerteza.

Para deslocar o manômetro no plano xy utiliza-se uma mesa de posicionamento linear XY *Arrick Robotics* – similar à mostrada na figura 8 – que utiliza a translação de duas plataformas, uma em relação ao eixo y e outra ao eixo x , ilustradas respectivamente pelos números (1) e (2). Para garantir a direção de seu movimento utilizam-se dois pares de eixos reversos e ortogonais, denotados por (3) e (4). A tração e o sentido do movimento são garantidos por duas correias, uma para cada direção, ilustradas por (5).

Figura 8 – Mesa de posicionamento linear XY



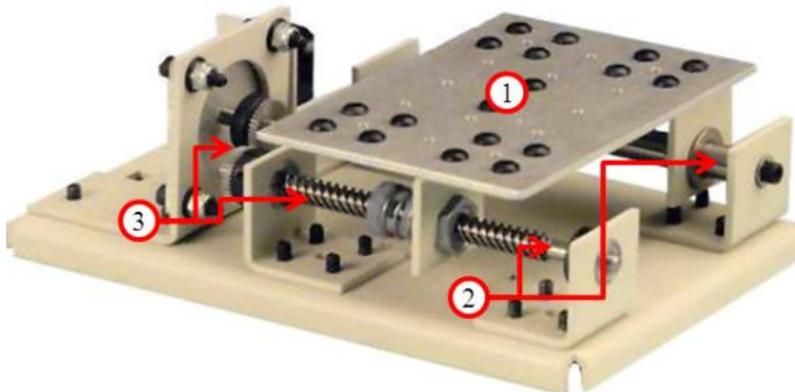
- Legenda, 1 plataforma de translação no eixo y
 2 plataforma de translação no eixo x
 3 eixo para translação no eixo y
 4 eixo para translação no eixo x
 5 correias para translação nos eixos y e x

Fonte: Adaptado de *Arrick robotics*, 2015.

As correias estão acopladas a um conjunto *Maxon Motor* composto por um sistema de redução *GP32C 33:1*, um motor elétrico *EC-140* e um sensor incremental de posicionamento *encoder MR 1024IMP 3K 64P ASIC*. Esses são controlados pelo módulo *EPOS2 24/5* (Maxxon, 2012).

A distância entre a câmera e o manômetro é obtida a partir do deslocamento da câmera no eixo z realizado pela mesa de posicionamento linear *Z Arrick Robotics* similar à figura 9. Para isso a mesa possui uma plataforma – identificada com o número (1) – que está sobre dois eixos – indicados pelo número (2) – cuja função é manter a direção do movimento. Um dos eixos é um fuso roscado, que juntamente com um par de engrenagens formam o conjunto – identificado pelo número (3) – responsável por transmitir à plataforma o movimento de translação sobre o eixo z .

Figura 9 – Mesa de posicionamento Z



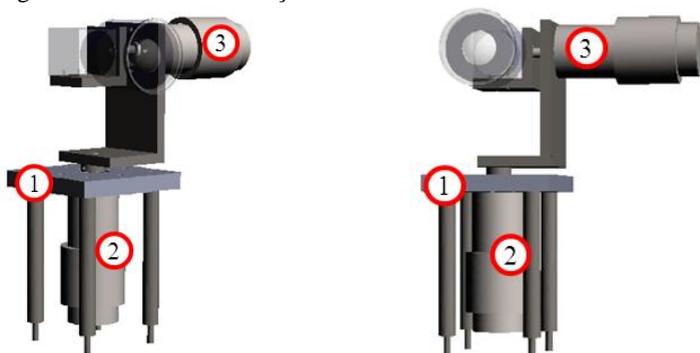
- Legenda, 1 plataforma de translação no eixo z
 2 eixo para translação no eixo z
 3 conjunto de transmissão da translação no eixo z

Fonte: Adaptado de *Arrick Robotics*, 2015.

O conjunto transforma e transmite à plataforma o torque e a rotação gerados por um motor de passo, cuja função é determinar o sentido, velocidade e torque que serão transmitidos à plataforma.

Para atender aos requisitos e exigências para testar o conceito do painel em calota, o sistema de rotação em torno do eixo x e y – ilustrado pela figura 10 – foi projetado.

Figura 10 – Sistema de rotação



a. - Vista em perspectiva

b. - Vista frontal

Legenda, 1 suporte do sistema de rotação da plataforma do eixo z
 2 sistema de rotação em torno do eixo y
 3 sistema de rotação em torno do eixo x

Fonte: Autor

Com o intuito de tornar o projeto mais simples e facilitar sua fabricação, montagem e operação – especificamente obter a posição desejada do manômetro nos painéis –, utilizou-se o conceito de movimento e posicionamento relativos. Sendo assim, ao invés de girar o manômetro em torno de seus eixos x e y, realiza-se rotação tendo a câmera como eixo de referência.

Isso facilita a fabricação e a montagem, pois as soluções são menos restritas quando comparadas ao projeto do sistema de rotação caso o manômetro fosse a referência para o eixo de rotação.

Sendo assim o sistema de rotação é construído em três partes: Suporte (1) – responsável por sustentar o sistema de rotação sobre a mesa de deslocamento linear Z –, Sistema de rotação Y (2) – responsável por realizar o movimento de rotação em torno do eixo y – e Sistema de rotação X (2) – cuja função é realizar o movimento de rotação em torno do eixo x.

Sobre a plataforma da mesa de deslocamento linear Z – indicado por (1) na figura 9 –, está montado o Suporte – que é formado por quatro colunas, nas quais está acoplada uma chapa quadrada, todos fabricados em aço – cuja função é servir de suporte aos dois sistemas de rotação.

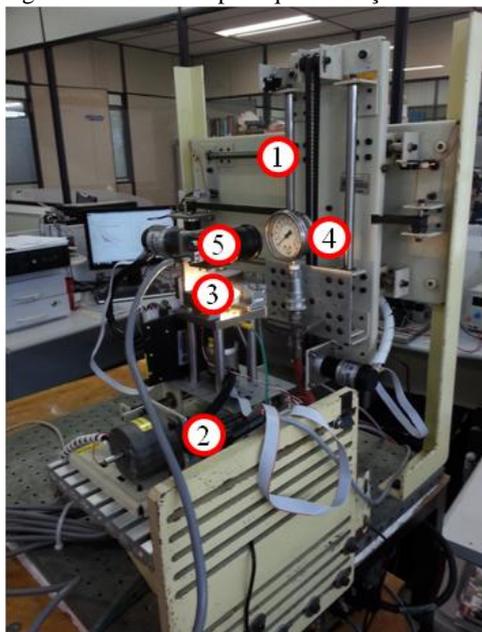
Ao Suporte – especificamente à chapa – está conectado o Sistema de rotação Y através da fixação do conjunto *Maxon* na direção vertical, paralelo às colunas, fixado por parafusos.

O Sistema de rotação Y, além do conjunto *Maxon*, é composto também por uma base de aço retangular – que é montada na horizontal sobre o eixo da redução do conjunto *Maxon*–, cuja função é servir de suporte para o sistema de rotação X. Sobre a base horizontal do sistema de rotação Y, é montada na vertical uma placa de aço, cujas funções são conectar os dois sistemas de rotação e servir de suporte para um conjunto *Maxon* que é responsável por realizar o movimento de rotação em x do sistema.

Além do suporte e do conjunto *Maxon*, faz parte do Sistema de rotação X um perfil metálico em L, cuja função é servir de suporte para câmera, que é fixada ao mesmo por parafusos.

A fim de garantir que os elementos mantivessem suas posições constantes, montou-se os elementos do sistema de posicionamento sobre uma base metálica, como mostra o desenho da figura 11.

Figura 11 – Bancada para quantificação de incertezas



- Legenda, 1 mesa de posicionamento linear XY
 2 mesa de posicionamento Z
 3 sistema de rotação
 4 manômetro
 5 Sistema de captura de imagem

Fonte: Autor

3.2.3. Sistema de iluminação

Após testar diferentes tipos de iluminação e acessórios, como fitas de LED, lâmpadas fluorescentes em espiral, lâmpadas de LED, coberturas, refletores e difusores fabricados com películas de superfície difusora, separou-se o projeto do sistema de iluminação em duas partes: fonte luminosa e isolamento.

A primeira – fonte luminosa – deve fornecer iluminação adequada ao processo de leitura dos manômetros, com intensidade suficiente para permitir ao algoritmo a identificação de todos os objetos de interesse (*e.g.* invólucro, visor, marcações da escala). Essa iluminação deve ser homogênea, a fim de reduzir ao máximo as influências de sombras e penumbras na leitura do manômetro.

Sendo assim, adotou-se como fonte uma lâmpada circular fluorescente com fluxo luminoso de $1,7 \text{ klm}^6$. Essa é fixada de maneira concêntrica ao manômetro, como é ilustrado na figura 12.

Figura 12 – Sistema de iluminação



Legenda, 1 fonte luminosa
2 manômetro
3 sistema de captura de imagem

Fonte: Autor

⁶ É a potência de radiação total emitida por uma fonte de luz, ou é a potência de energia luminosa de uma fonte percebida pelo olho humano. O lúmen pode ser definido como fluxo luminoso emitido segundo um ângulo sólido, de um esterradiano, por uma fonte puntiforme de intensidade invariável em todas as direções e igual a uma candela.

Dessa forma, o posicionamento, juntamente com seu formato circular, fornece a homogeneidade necessária à iluminação, sem a formação de reflexos no visor do manômetro.

A segunda parte é o isolamento, cuja função é reduzir a interferência de fontes externas de luz sobre a formação da imagem, de modo que essa apresente maior estabilidade possível.

Como solução utiliza-se um anteparo, que é produzido com tecido opaco, revestido por um material de grande absorvidade em sua face interna, com superfície de baixa refletividade e difusa. Esse anteparo tem como funções: isolar a bancada de influências de fontes de luz externas, que poderiam formar sombras e penumbras; e reduzir os reflexos no visor do manômetro gerados por fontes externas.

3.2.4. Sistema de captura de imagem

A fim de inserir mais manômetros numa mesma imagem e realizar a leitura simultânea, é necessário garantir um campo de visão amplo, mas sem aumentar a distância de trabalho (dw). Isso permite adaptar o sistema às situações reais, nas quais o espaço físico é limitado e, também, facilitar o projeto do sistema de iluminação.

A lente disponível para o presente trabalho foi a *Rainbow* modelo *H35CSWI* (RAINBOW, 2002) com comprimento focal de 3,5 mm, cujo campo de visão é bem amplo por se tratar de uma lente grande angular. Sendo assim, a lente utilizada possui características adequadas à leitura simultânea de mais manômetros por imagem.

A câmera disponível foi a *Point Grey Flea 2* modelo *FLG2-13S2M* com resolução de (1288 x 964) pixels (PointGrey,2010), cuja aplicação industrial e características comerciais atendem aos requisitos para um sistema de visão de máquina, aplicado para calibração automatizada de manômetros. Além disso, esse equipamento está disponível no mercado – sendo adotado para outros sistemas de visão de máquina – e, portanto, apresenta suporte técnico e fácil manutenção, os quais são requisitos para o presente trabalho de mestrado.

3.2.5. Algoritmo

O algoritmo do projeto de mestrado, desenvolvido em *LabView*, tem como requisitos para seu desenvolvimento a capacidade de realizar as leituras dos manômetros de acordo com o alinhamento, distância, quantidade de manômetros e formato do painel, através da utilização dos sistemas de visão e iluminação adotados.

Para realizar a leitura nas diversas configurações, é preciso reduzir as distorções de lente e de perspectiva. Para isso, ajusta-se a imagem deformada através da calibração de câmeras⁷ utilizando as ferramentas do programa escolhido.

A partir da imagem obtida, o algoritmo deve ser capaz de fornecer a indicação do manômetro. Para isso, realiza-se a identificação da escala, o que define a região de interesse, delimitada pelos contornos do anel do manômetro e do eixo de rotação do ponteiro utilizando a ferramenta “*Find Circular Edge*” do *LabView*. Dentro dessa região realiza-se uma busca por variações de níveis de cinza, a fim de localizar as marcações da escala através da identificação de bordas, utilizando mais uma vez o “*Find Circular Edge*”.

Os pontos encontrados, que em sua maioria pertencem à escala, são interpolados, a fim de obter-se o raio e o centro da circunferência que contorna as marcações das escalas. Essas informações são utilizadas para linearizar o intervalo da escala através da ferramenta “*IMAQ Unrap*”. Além do centro e dos raios interno e externo é preciso fornecer o intervalo do arco que será linearizado, que é 270°, de acordo com a ABNT (2011).

Com as marcações das escalas linearizadas, dá-se início à obtenção da indicação, que é realizada da seguinte maneira:

- utilizando a ferramenta “*IMAQ Peak-Valley Detector*” faz-se a varredura nas linhas da imagem da escala linearizada e conta-se a quantidade de marcações existentes. De acordo com o número de marcações de cada manômetro compara-se o número de escalas encontradas e defini-se a linha da imagem que será analisada.

⁷ Neste trabalho, a calibração de câmeras é utilizada de acordo com as definições de visão computacional e processamento de imagens, não apresentando conotação metrológica.

- identifica-se as coordenadas do ponteiro. Para isso utiliza-se a ferramenta “*IMAQ Peak-Valley Detector*” para realizar uma varredura da imagem abaixo da linha de análise. Essa varredura tem com intuito obter a menor média da escala de cinza na imagem que é gerada pelo ponteiro preto sobre o fundo branco.
- a partir das posições das marcações e do ponteiro, conta-se o número de marcações de escala existentes antes da posição do ponteiro, dada por (N);
- define-se a fração da pressão que é representada pelo posição do ponteiro entre duas marcações. Para isso, utilizam-se as posições das marcações vizinhas – cuja nomenclatura para marcação anterior é (E_a) e (E_p) para marcação posterior – como intervalo para interpolar a posição relativa do ponteiro;
- soma-se a quantidade de marcações na posição relativa e converte-se esse valor em pressão. Isso é realizado multiplicando o mesmo pela menor divisão de escala (D_e) e subtraindo a menor indicação do instrumento (V), como mostra a equação 3.

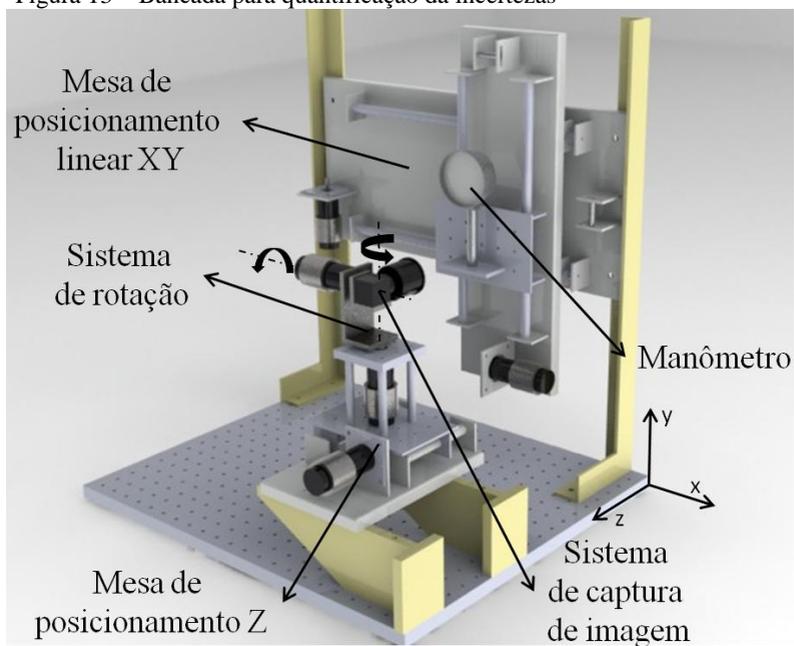
$$I = \left\{ \left[(N - 1) + \left(\frac{P_p - E_a}{E_p - E_a} \right) \right] \cdot D_e \right\} + V \quad 3$$

onde,	I : é a indicação obtida na leitura	[bar]
	N : é o número de escalas encontradas antes do ponteiro	
	P_p : é a posição do ponteiro na imagem	[pixel]
	E_p : é a posição da escala posterior ao ponteiro	[pixel]
	E_a : é a posição da escala anterior ao ponteiro	[pixel]
	D_e : é a menor divisão de escala do manômetro	[bar]
	V : é a menor indicação do manômetro	[bar]

3.2.6. Montagem da bancada para quantificação de incertezas

A conclusão da bancada para definição dos requisitos deu-se com a montagem dos conjuntos sobre uma base metálica a fim de garantir que os elementos mantivessem suas posições constantes. Para ilustrar a bancada montada e seus sistemas de coordenadas utiliza-se a figura 13.

Figura 13 – Bancada para quantificação da incertezas



Fonte: Autor

4. ENSAIOS

A fim de realizar as leituras dos manômetros, é preciso realizar os procedimentos gerais de ensaio, que são: alinhar os planos do manômetro e do sistema de captura de imagem e obter a distância de trabalho.

Após atingir a distância de trabalho desejada e realizar o alinhamento, para os ensaios nos quais são avaliados os números de manômetros ou o formato do painel, é preciso, antes de se realizar a leitura, ou posicionar corretamente o manômetro na imagem de acordo com sua configuração de ensaio no painel plano; ou girar a câmera sobre os eixos x e y para posicionar o manômetro na imagem de acordo com a configuração do painel em calota ensaiado.

Por fim, após realizar os procedimentos gerais de ensaio e emular a posição do manômetro na imagem de acordo com a característica construtiva avaliada, é realizada a leitura dos manômetros. Para isso, primeiro, é necessário definir os pontos de indicação do manômetro. Esses devem fornecer informações pertinentes e abranger as diversas regiões do intervalo de medição.

Os dados serão utilizados para avaliar as influências do alinhamento entre manômetro e sistema de captura de imagem, da distância entre manômetro e sistema de captura de imagem, da quantidade de manômetros lidos numa mesma imagem e do formato do painel sobre o resultado de medição.

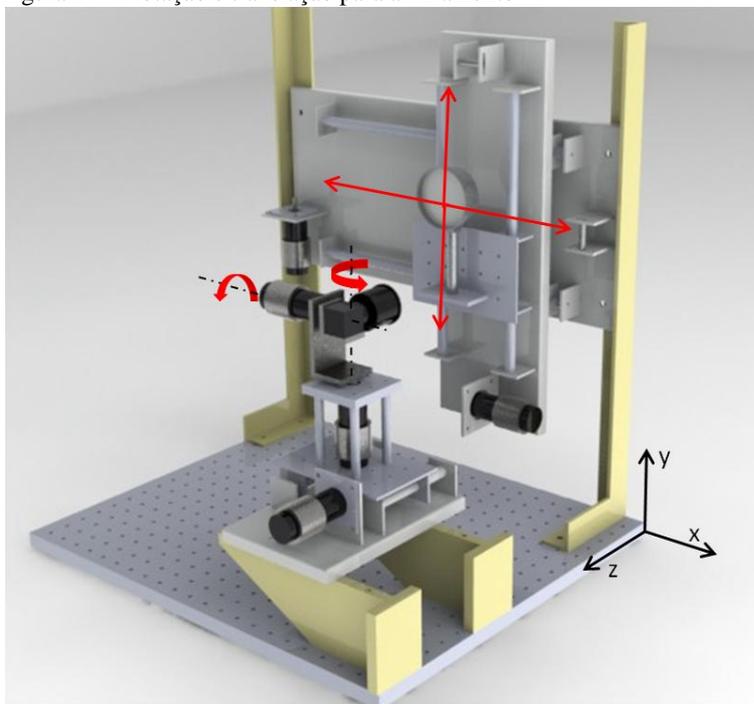
Para cada configuração de ensaios o processo de leitura é realizado ao menos quarenta vezes, a fim de obter um número significativo de dados para avaliar a dispersão das medições. Isso é realizado para obterem-se dados suficientes, a fim de que haja representatividade da população pela amostra e, assim, seja possível quantificar com maior segurança as incertezas associadas às fontes.

4.1. PROCEDIMENTOS GERAIS DE ENSAIO

Como citado anteriormente, os procedimentos gerais de ensaio são: alinhar os planos do manômetro e do sistema de captura de imagem e obter a distância de trabalho.

Para realizar o alinhamento, o plano da imagem deve estar o mais próximo possível da condição de paralelismo em relação ao plano do objeto. Para isso, é realizada a rotação do sistema de captura de imagem na direção x e y e a translação do manômetro sobre os eixos x e y como é ilustrado pela figura 14.

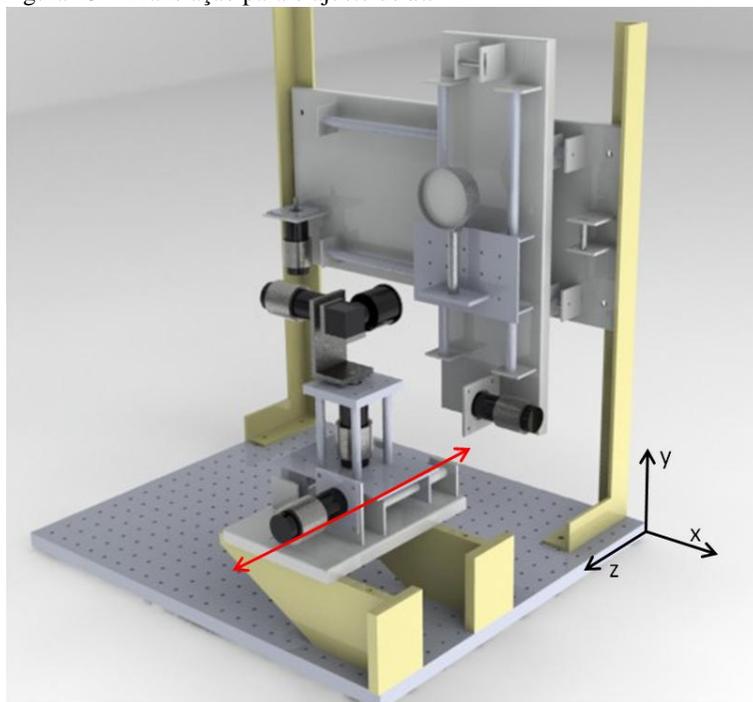
Figura 14 – Rotação e translação para alinhamento



Fonte: Autor

Já para obter-se a distância de trabalho desejada, o sistema de captura de imagem deve ser deslocado no eixo z até atingir-se uma distância frente ao painel de instrumentos o suficiente para abranger os n instrumentos, como pode ser visto na figura 15.

Figura 15 – Translação para o ajuste de dw

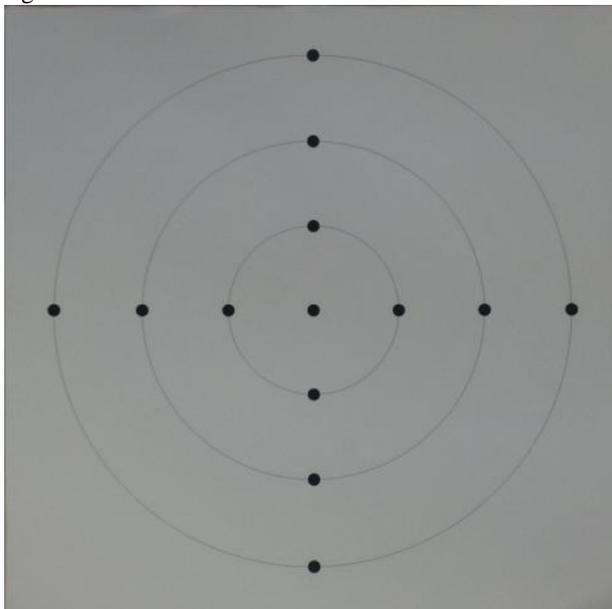


Fonte: Autor

4.1.1. Alinhamento entre os planos do manômetro e do sistema de captura de imagem

Para alinhar o plano da imagem com o plano do objeto, ou seja, com o mostrador do manômetro, deve-se posicionar o gabarito de alinhamento, ilustrado pela figura 16, sobre um suporte no qual se garante que a gabarito esteja paralelo ao visor do manômetro.

Figura 16 – Gabarito de alinhamento



Fonte: Autor

O gabarito é formado por três circunferências concêntricas que têm seus raios iguais a (70, 140 e 210) mm, cuja função é dar uma estimativa ao operador do deslocamento horizontal e vertical permitido aos manômetros, de acordo com tamanho da imagem. Esses diâmetros são adotados, pois são múltiplos do diâmetro do anel do manômetro, que possui aproximadamente 70 mm, o que ajuda na estimativa do operador.

Além das circunferências, o gabarito de alinhamento possui duas fileiras de círculos, uma horizontal e outra vertical, nas quais os círculos que possuem a mesma direção estão espaçados igualmente entre si.

A linha e a coluna de círculos estão posicionadas sobre os eixos de simetria da imagem, cujas dimensões e distâncias são ilustradas no Apêndice E. Isso porque, sobre esses eixos, os gradientes de deformação da imagem são menores, pois a distorção de lente, teoricamente, apresenta componente apenas numa direção, ou em x para linha, ou em y para coluna, o que diminui as influências de distorção de lente.

Para realizar o alinhamento dos planos, são identificadas as posições dos centros do círculo central e dos círculos mais afastados do centro na mesma direção, porém, em sentidos opostos. Calcula-se a diferença entre as distâncias da posição dos centros extremos em relação ao círculo central, cuja nomenclatura utilizada é Δd . Quando a diferença entre as distâncias (Δd) está dentro de um intervalo de $\pm 0,05$ pixels⁸ os planos são considerados alinhados.

Caso contrário, o controle da bancada aciona os motores responsáveis pelos movimentos de rotação, a fim de compensar a diferença nas distâncias. Após a rotação, desloca-se o centro do gabarito até que ele esteja sobre o eixo ótico.

Calcula-se, mais uma vez, a distância entre as diferenças e verifica-se se elas estão dentro do intervalo adotado. O processo é repetido até que a diferença esteja dentro do intervalo de tolerância de $\pm 0,05$ pixels.

Além disso, o suporte é projetado de modo que o círculo central do gabarito possa ser posicionado concêntrico ao centro do manômetro. Isso diminui o deslocamento necessário para posicionar o centro do manômetro sobre o eixo ótico após a retirada do gabarito de alinhamento, o que reduz erros de alinhamento que poderiam ocorrer na translação ao longo dos eixos x e y devido à falta de paralelismo entre os planos da mesa de deslocamento e do sistema de captura de imagem.

Dessa forma, quando as distâncias estão dentro do intervalo de tolerância e o gabarito é retirado, tem-se que o manômetro está posicionado sobre o eixo ótico e seu plano paralelo ao plano do sistema de captura de imagem.

4.1.2. Distância de trabalho

Para realizar os ensaios, é preciso posicionar o sistema de captura de imagem numa distância de trabalho (d_w), na qual a cena da imagem deve abranger todos os manômetros que serão lidos simultaneamente.

Nessa, os n instrumentos devem ocupar uma área útil da imagem. Devido ao formato retangular da imagem, a área útil é obtida quando a dimensão crítica, formada pelos n instrumentos, ocupa 95%

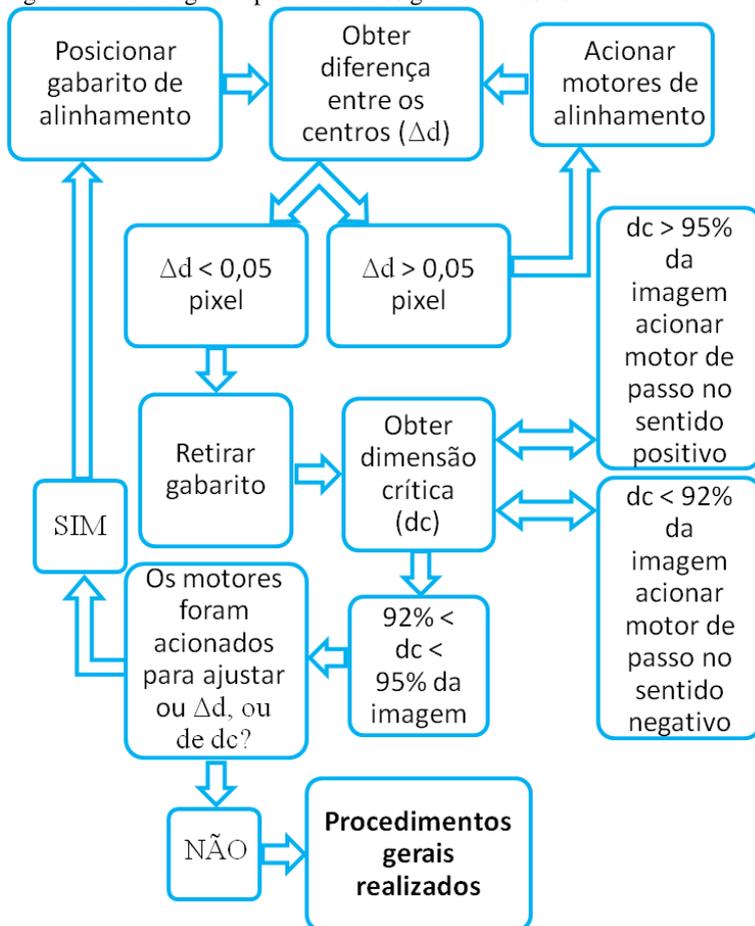
⁸ A tolerância foi adotada empiricamente, a partir de ensaios, nos quais se testaram diferentes intervalos. Dentre esses, as tolerâncias de 0,05 pixel mostraram-se as mais adequadas, levando-se em conta o sistema de posicionamento e seu controle.

da altura ou da largura da imagem, dependendo do número de colunas e linhas da configuração ensaiada. A dimensão crítica, nesse caso, é a maior distância entre as extremidades de uma linha ou coluna de manômetros.

Utilizando as dimensões críticas para cada ensaio, ajusta-se a distância de trabalho por meio do deslocamento no eixo z, até que a área da dimensão crítica ocupe entre 92% e 95% da área da imagem.

Os procedimentos gerais de ensaio são obtidos de acordo com os procedimentos descritos e ilustrados pela figura 17.

Figura 17 – Fluxograma procedimentos gerais de ensaio



4.2. PROCEDIMENTO DE TRANSLAÇÃO DO MANÔMETRO

Para realizar os ensaios utilizando o painel plano, deve-se transladar o manômetro na horizontal e vertical até que ele ocupe a posição de ensaio na imagem.

Dessa forma após o alinhamento, é necessário emular a posição do manômetro na imagem de acordo com sua posição no painel plano. Isso é realizado através do deslocamento do centro do manômetro em relação ao centro da imagem – eixo ótico.

O valor do deslocamento é dado pela distância que o centro do instrumento deve percorrer para alcançar sua posição na matriz de manômetros – painel plano. Essa distância depende da quantidade de instrumentos lidos numa mesma imagem, da posição do manômetro e da distância entre seus centros.

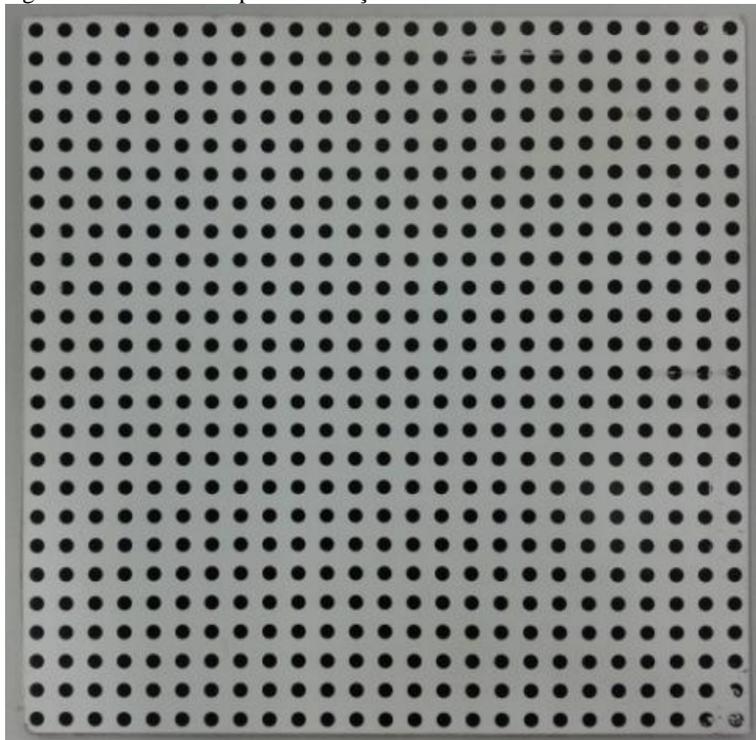
A fim de manter um padrão para a distância entre os manômetros adota-se que o espaçamento entre seus centros, dentro de uma mesma linha ou coluna, deve ser igual a 105% da média dos diâmetros das caixas dos instrumentos, que é denominado de distância d .

Com o valor d definido realiza-se o deslocamento através da atuação dos motores responsáveis por movimentar o instrumento nas direções x e y tendo como controle a posição do centro do manômetro na imagem formada.

Para evitar erros no posicionamento devido à distorção de lente e à distorção de perspectiva durante os deslocamentos, realiza-se a calibração de câmera através de um algoritmo.

Esse utiliza a gabarito 1, ilustrado pela figura 18, para corrigir as distorções na imagem. As informações do gabarito 1 de calibração, processo de construção e dimensões, podem ser encontradas no Apêndice D.

Figura 18 – Gabarito 1 para calibração de câmera



Fonte: Autor

4.3. PROCEDIMENTO DE ROTAÇÃO

No caso de avaliações do painel em calota, depois de garantir a distância de trabalho e o alinhamento entre os planos da imagem e do objeto é preciso emular a posição do manômetro sobre o painel em calota.

Para isso é necessário girar em um determinado ângulo o sistema de captura de imagem em torno dos seus eixos x e y até que o mesmo ocupe sua posição sobre o painel em calota.

O ângulo de deslocamento depende da quantidade de instrumentos lidos simultaneamente na mesma imagem, da posição do manômetro no painel, de suas características construtivas e da abertura do campo de visão do sistema de captura de imagem. A partir desses parâmetros é imposto à câmera um deslocamento angular.

Como a bancada para quantificação de incertezas é um sistema real e está sujeita a imperfeições, é preciso ajustar o deslocamento angular da câmera em torno dos eixos x e y , que à luz do exposto é realizado por um método empírico e iterativo.

Nesse adota-se a compatibilidade de forma e dimensão do manômetro, cujos valores são obtidos através da medição de características físicas do instrumento, como circularidade e diâmetro do anel para ajustar o deslocamento angular.

Após essas medições, são realizados novos ajustes da posição angular e medições, cujos resultados são comparados com aqueles obtidos anteriormente, e assim o processo se repete até que o melhor resultado seja encontrado.

4.4. PROCEDIMENTO DE LEITURA

Para realizar a leitura deve-se definir quais serão os pontos leitura para realização dos ensaios. Os pontos de medição adotados devem contemplar todo intervalo de medição da escala, a fim de garantir os dados para qualquer intervalo de medição onde o ponteiro se encontra.

Sendo assim, adotaram-se oito pontos – mostrados no quadro 3 e ilustrados pela figura 19, para realizar os ensaios de leitura.

Quadro 3 – Pontos de leitura

Pontos	Valores [bar]
1	-1,0
2	0,0 ¹
3	+ 4,0
4	+ 7,0 ² ; + 9,0 ³
5	+ 14,5
6	+ 22,0
7	+ 25,0
8	+ 28,5

¹ Ponto 2 não foi utilizado para os painéis $(M)_{2 \times 3 \text{calota}}$

² Ponto aplicado para os painéis $(M)_{1 \times 1}$, $(M)_{1 \times 2}$, $(M)_{2 \times 3}$ e $(M)_{2 \times 3 \text{calota}}$

³ Ponto aplicado para o painel $(M)_{2 \times 2}$

Para alcançar esses pontos, a fim de que seja possível relacionar os erros existentes no resultado da leitura, exclusivamente ao sistema de captura de imagem, o ideal é posicionar o ponteiro do manômetro

sobre a marcação de escalas⁹, garantindo-lhes a mesma direção. Além disso, o ideal é evitar incertezas devido às características inerentes ao manômetro que são: atrito do ponteiro, histerese, propriedades metrológicas do manômetro e estabilidade do sistema de pressurização.

Como solução para evitar incertezas devido às características inerentes ao manômetro, desmontou-se um manômetro a fim de retirar seu sistema de mola e engrenagens, permitindo, assim, o movimento e o posicionamento manual do ponteiro sem que houvesse resistência desses elementos.

Pois embora o atrito do ponteiro, a histerese, as características metrológicas do manômetro e a falta de estabilidade do sistema de pressurização influenciem na medição da pressão, as suas incertezas não interferem na capacidade do sistema de visão de máquina.

Para obter a mesma direção entre ponteiro e as marcações da escala nos pontos de medição escolhidos, utilizou-se um microscópio ótico para auxiliar o posicionamento do ponteiro do manômetro nos pontos desejados, entretanto as condições de alinhamento no microscópio diferentes das configurações de leitura e a montagem do instrumento na bancada – o qual provocava o deslocamento do ponteiro de sua posição original – fizeram com que essa solução fosse descartada.

Sendo assim, adotou-se como a posição de referência do ponteiro sobre as escalas, a posição obtida através do ajuste do ponteiro sobre a marcação da escala realizado de maneira manual, na qual se utiliza a imagem do manômetro adquirida na configuração de referência como base para verificar visualmente se o alinhamento foi alcançado.

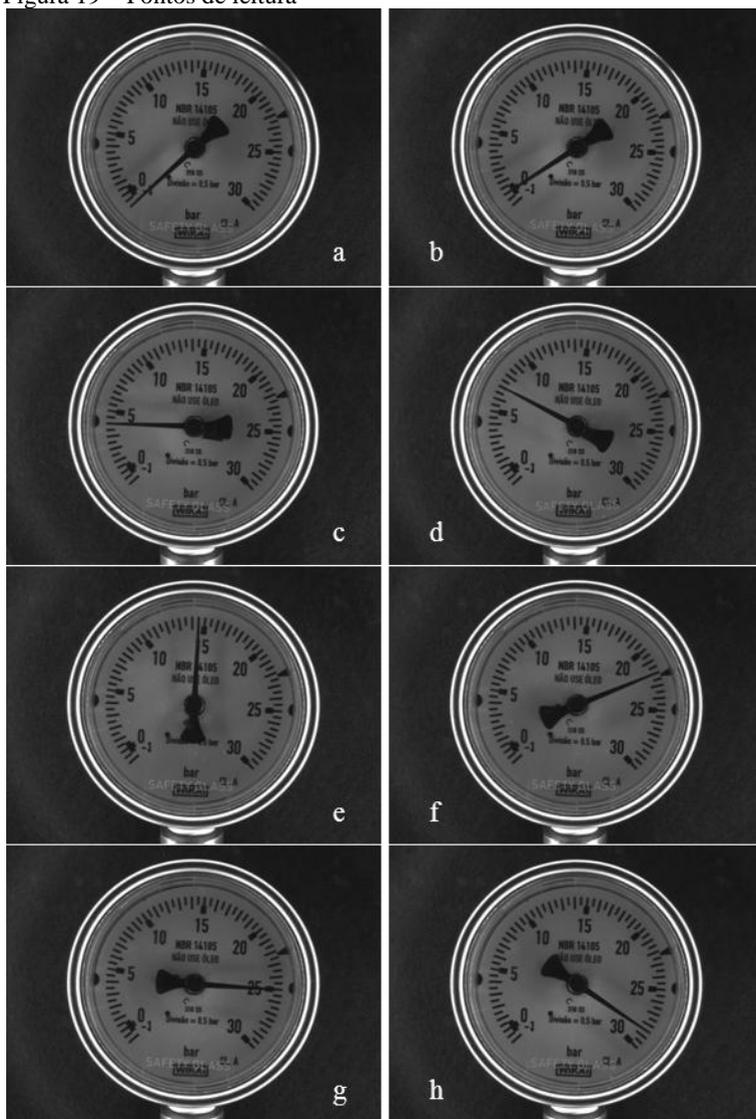
Desse modo, o ponteiro era movimentado até que o mesmo estivesse, visualmente, alinhado com a marcação da posição desejada. Deve-se ressaltar que devido à baixa resolução do sistema de visão humana, erros, principalmente de tendência, são inseridos no resultado de leitura.

Entretanto, por falta de soluções menos influenciáveis e outros sistemas de visão com melhores propriedades metrológicas optou-se por essa solução.

⁹ Como justificativa para esses procedimentos tem-se que a leitura dos pontos sobre as marcações das escalas são adotados pela norma ABNT NBR 14105-1 (ABNT, 2011).

As imagens obtidas e utilizadas como referência de marcação do ponteiro são ilustradas pela figura 19.

Figura 19 – Pontos de leitura



Fonte: Autor

4.4.1. Obtenção da indicação

Na obtenção da indicação utiliza-se o algoritmo descrito no item 3.2.5 para realizar a leitura do manômetro. O algoritmo localiza a caixa do manômetro para obter uma região de interesse.

Utilizando a identificação de bordas define-se a região das marcações da escala e aplica-se a linearização da região (vide item 3.2.5.).

Dessa forma pode-se determinar a indicação do manômetro a partir da posição relativa no intervalo de medição e da posição relativa local entre marcações vizinhas do intervalo de medição.

Contudo, antes de realizar a leitura é preciso ajustar a imagem através da calibração de câmera para evitar incertezas da distorção da lente e da distorção de perspectiva.

Os deslocamentos realizados para posicionar o manômetro nas configurações de ensaio – sejam eles translações ou rotações nos eixos x e y – podem gerar deformações na imagem, devido à composição de lentes entre o sistema de captura de imagem e o visor do manômetro. Essas deformações podem ser fontes de incertezas e, portanto, devem ser minimizadas.

Para isso utilizou-se um gabarito de calibração, no qual os círculos estão posicionados sobre o plano das marcações da escala, como ilustra a figura 20. Isso visa impor aos padrões de calibração as mesmas condições da formação de imagem encontradas nos ensaios, e, assim, reduzir os efeitos de distorção de lente e de distorção de perspectiva causados pela composição do visor do manômetro com as lentes do sistema de captura de imagem.

Figura 20 – Gabaritos para calibração da câmera com composição de lentes



Fonte: Autor

4.5. AVALIAÇÃO

Para quantificar as fontes de incerteza de acordo com as variações dos parâmetros do projeto mecânico, são comparados os resultados obtidos nos ensaios com uma configuração de referência, na qual as influências dos demais efeitos possam ser desconsideradas.

Normalmente seria utilizado um padrão, entretanto devido às dificuldades em construir um e à escassez de estudo para essa aplicação, no presente trabalho não são padrões.

Apesar disso, é possível ter uma indicação de quão pior, ou melhor, são as configurações ensaiadas frente à configuração de referência, cujas condições adotadas são as melhores conseguidas no âmbito deste trabalho.

4.6. ALINHAMENTO ENTRE MANÔMETRO E SISTEMA DE CAPTURA DE IMAGEM

Os ensaios para quantificar as fontes de incerteza devido ao alinhamento são realizados da seguinte forma: primeiro define-se a distância de trabalho, cujo valor é igual a 56,5 mm, na qual é possível realizar a leitura de 1 manômetro.

Em seguida, realizam-se o alinhamento entre o plano da imagem e o plano do objeto no qual ao seu final o centro do manômetro coincide ao centro do eixo ótico. Logo após, é preciso impor o desalinhamento entre o plano da imagem e o plano do objeto de forma controlada. Para isso, gira-se a câmera num ângulo θ ou φ em torno dos eixos x ou y , respectivamente de acordo com a necessidade. Para finalizar o desalinhamento, deve-se posicionar o centro do manômetro sobre o centro da imagem, através de seu deslocamento.

Por fim, realiza-se as leituras do instrumento utilizando os pontos ilustrados pelo quadro 4, cujas indicações adotadas no manômetro são obtidas de acordo com a direção de rotação. Essas indicações representam as situações críticas para o desalinhamento em torno dos eixos.

Quadro 4 – Pontos de leitura desalinhamento

Direção do desalinhamento	Pontos [bar]
Θ	4,0 – 25,0
Φ	14,5

θ Ângulo de desalinhamento na direção x

φ Ângulo de desalinhamento na direção y

Para esses ensaios não é realizada a calibração da imagem utilizando o gabarito na mesma configuração do manômetro. Como nesse caso o objetivo é avaliar de que maneira o desalinhamento interfere no resultado da leitura, não se devem corrigir a distorção de lente, a distorção de perspectiva e a projeção 2-D.

A fim de quantificar as incertezas deve-se comparar os resultados de leitura das configurações desalinhadas com os resultados da configuração de referência. Para essa, adota-se a mesma distância de trabalho da configuração desalinhada, ou seja, na distância de trabalho para realizar a leitura de um manômetro.

Entretanto, o manômetro está alinhado com sistema de captura de imagem de maneira que o ângulo entre o plano da imagem e o plano do objeto seja mínimo, diferentemente do que ocorre nas configurações desalinhadas. Além disso, o centro do manômetro é posicionado sobre o eixo ótico para reduzir as distorções de perspectiva.

Para essas configurações de referência adota-se a nomenclatura de $(m_{ct})_{56,5}$, na qual os índices 56,5 representa a distância de trabalho. Já índice ct significa centro, pois o centro do manômetro coincide com o centro da imagem.

O desalinhamento máximo obtido para os eixos é de $(6^\circ \pm 1,5^\circ)$. Para valores acima disso não é mais possível realizar as leituras de indicação, o que pode ser explicado pelas distorções de lente e de perspectiva, que não são corrigidas pelo processo de calibração da câmera, pois a posição do gabarito de calibração da câmera não condiz com condições do ensaio de desalinhamento.

A média dos resultados obtidos e as suas respectivas incertezas, para o desalinhamento de 6° na direção θ e nos sentidos positivo e negativo, são ilustrados respectivamente nas tabela 6 e tabela 7.

Tabela 6 – Média dos valores de leitura do desalinhamento $+ \theta$

Referência $(m_{ct})_{56,5}$ [bar]	Desalinhamento positivo [bar]
$(4,06 \pm 0,02)$	$(3,99 \pm 0,03)$
$(25,04 \pm 0,02)$	$(25,10 \pm 0,04)$

Tabela 7 – Média dos valores de leitura do desalinhamento $- \theta$

Referência $(m_{ct})_{56,5}$ [bar]	Desalinhamento negativo [bar]
$(4,06 \pm 0,02)$	$(4,13 \pm 0,03)$
$(25,04 \pm 0,02)$	$(24,98 \pm 0,02)$

Nota-se que a tendência para as rotações na direção θ apresentam valores próximos, o que evidencia que seu valor é proporcional à amplitude do ângulo e não do sentido do desalinhamento.

A incerteza instrumental não sofreu grande variação, o que permite concluir que a deformação na imagem – causada pelo ângulo de incidência diferente resultante do desalinhamento – ainda não é suficiente para exercer grande influência no resultado da leitura.

A média dos resultados obtidos e as suas respectivas incertezas, para o desalinhamento de 6° na direção φ e nos sentidos positivo e negativo, são ilustrados respectivamente pelas tabela 8 e tabela 9.

Tabela 8 – Média dos valores de leitura do desalinhamento + φ

Referência (m_{ct}) _{56,5} [bar]	Desalinhamento positivo [bar]
(14,56 ±0,03)	(14,60 ±0,07)

Tabela 9 – Média dos valores de leitura do desalinhamento - φ

Referência (m_{ct}) _{56,5} [bar]	Desalinhamento negativo [bar]
(14,56 ±0,03)	(14,49 ±0,03)

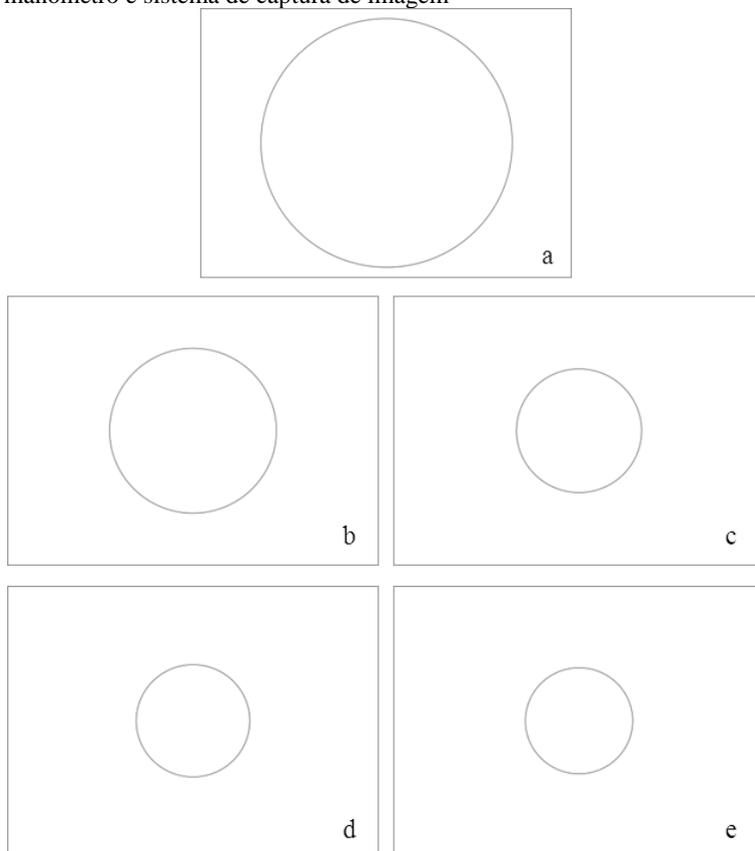
Ao contrário do que ocorre nos ensaios de desalinhamento para a direção θ , nota-se que houve maior variação da tendência e da incerteza nos resultados obtidos quando há rotação na direção φ . A tendência é devido à paralaxe gerada pelo desalinhamento, entretanto sua variação pode ser causada pela deformação da imagem. Essa sofreu maior influência da direção e do sentido do ângulo de rotação, possivelmente devido aos defeitos na lente, à heterogeneidade do visor e à proporção da distorção da lente nessa direção.

4.7. DISTÂNCIA ENTRE MANÔMETRO E SISTEMA DE CAPTURA DE IMAGEM

Nesses ensaios as incertezas geradas pela distorção da lente, distorção de perspectiva e projeção 2-D, devem apresentar menor influência sobre os resultados da leitura. Para isso deve-se posicionar o centro do manômetro com centro ótico do sistema de captura de imagem, já que isso reduz a deformação da imagem e a paralaxe. Além disso, a simetria da imagem em relação ao eixo ótico permite aplicar a calibração de imagens de maneira eficiente.

Sendo assim, para essas configurações adota-se a nomenclatura de $(m_{ct})_{dw}$, na qual o índice dw representa a distância de trabalho adotada pela configuração. Já índice ct , que significa centro, indica que o centro do manômetro coincide com o centro da imagem, como mostra a figura 21.

Figura 21 – Configurações para quantificação de incerteza da distância entre manômetro e sistema de captura de imagem



a – configuração $(m_{ct})_{56,5}$; **b** – configuração $(m_{ct})_{84,5}$; **c** – configuração $(m_{ct})_{113}$; **d** – configuração $(m_{ct})_{124}$; **e** – configuração $(m_{ct})_{132}$;

Fonte: Autor

Para realizar os ensaios é preciso posicionar o painel de manômetros a uma distância de trabalho, tal que a dimensão crítica ocupe 95% da altura ou largura da imagem. O primeiro ensaio realizado utiliza-se a configuração $(m_{ct})_{56,5}$, na qual a distância de trabalho equivale a aproximadamente 56,5 mm, representado pela figura 21.a.

Após posicionar o instrumento na distância de trabalho, realiza-se o alinhamento entre os planos da imagem e do objeto. Em seguida

ajusta-se o ponteiro sobre os pontos de leitura e obtém-se sua indicação.

Depois, repete-se o processo, mantendo-se a indicação, para as demais configurações cujas distâncias de trabalho são aproximadamente 84,5 mm (figura 21.b); 113 mm (figura 21.c); 124 mm (figura 21.d); e 132 mm para (figura 21.e).

A configuração de referência escolhida para quantificar as incertezas referentes à quantidade de manômetro é a configuração $(m_{ct})_{56,5}$.

4.7.1. Leitura na distância de 56,5 – configuração $(m_{ct})_{56,5}$

A configuração $(m_{ct})_{56,5}$ emula um painel plano onde existe apenas um manômetro centralizado na imagem – figura 22 –, no qual, teoricamente, as influências de deformação e paralaxe são as menores possíveis.

Figura 22 – Configuração $(m_{ct})_{56,5}$



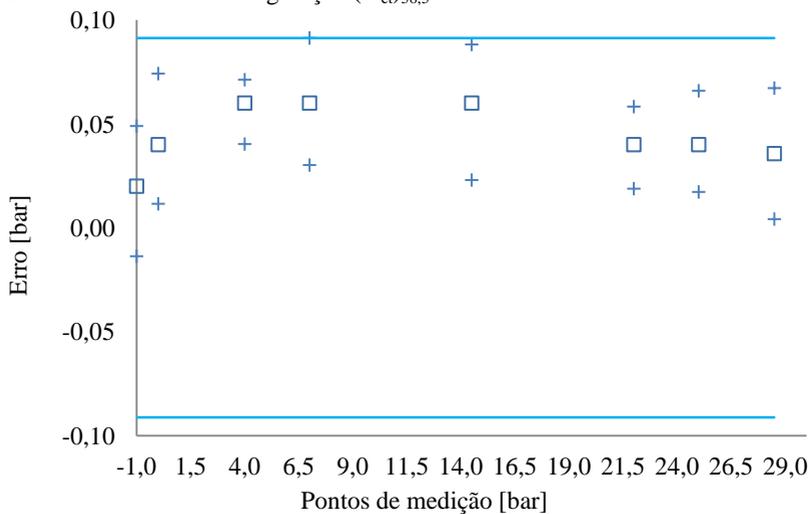
Fonte: Autor

As médias dos valores obtidos em todos os pontos de medição, seu desvio padrão e as curvas de tendência são dados pela tabela 10 e pelo gráfico 1.

Tabela 10 – Leitura configuração $(m_{ct})_{56,5}$

Pontos ensaiados [bar]	Leituras [bar]
-1,00	$-(0,98 \pm 0,03)$
0,00	$(0,04 \pm 0,03)$
+ 4,00	$(4,06 \pm 0,02)$
+ 7,00	$(7,06 \pm 0,03)$
+ 14,50	$(14,56 \pm 0,03)$
+ 22,00	$(22,04 \pm 0,02)$
+ 25,00	$(25,04 \pm 0,02)$
+ 28,50	$(28,54 \pm 0,03)$

Gráfico 1 – Leituras configuração $(m_{ct})_{56,5}$



- Legenda:
- tendência do valor médio
 - limite inferior e superior do erro no ponto de medição
 - limite inferior e superior máximo do erro

4.7.2. Leitura na distância de 84,5 mm – configuração $(m_{ct})_{84,5}$

A configuração $(m_{ct})_{84,5}$ – figura 23 – emula a leitura de um manômetro, cujo centro está concêntrico ao centro da imagem, a uma distância a qual permite se realizar a leitura simultânea de dois manômetros.

Figura 23 – Configuração $(m_{ct})_{84,5}$

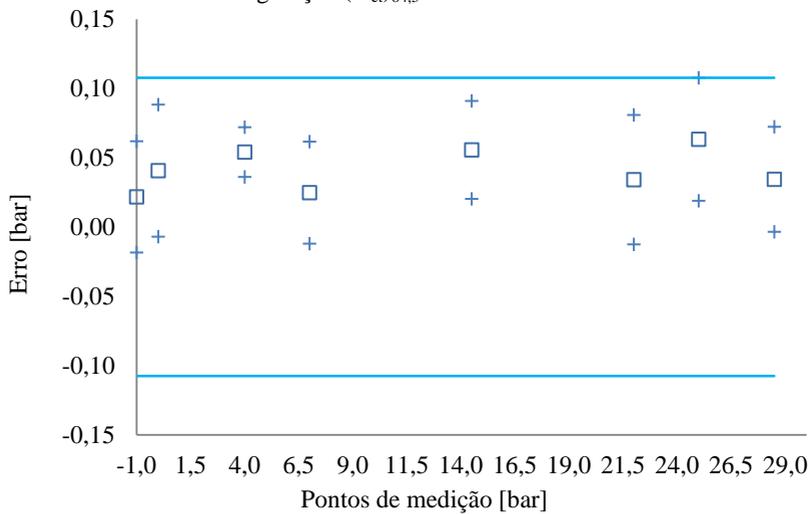


Fonte: Autor

As médias dos valores obtidos em todos os pontos de medição, seu desvio padrão e as curvas de tendência são dados pela tabela 11 e pelo gráfico 2.

Tabela 11 – Leitura configuração $(m_{ct})_{84,5}$

Pontos ensaiados [bar]	Leituras [bar]
-1,00	$-(0,98 \pm 0,04)$
0,00	$(0,04 \pm 0,05)$
+ 4,00	$(4,05 \pm 0,02)$
+ 7,00	$(7,02 \pm 0,04)$
+ 14,50	$(14,56 \pm 0,04)$
+ 22,00	$(22,03 \pm 0,05)$
+ 25,00	$(25,06 \pm 0,04)$
+ 28,50	$(28,53 \pm 0,04)$

Gráfico 2 – Leitura configuração (m_{ct})_{84,5}

- Legenda:
- tendência do valor obtido
 - + limite inferior e superior do erro
 - limite inferior e superior máximo do erro

4.7.3. Leitura na distância de 113 mm – configuração $(m_{ct})_{113}$

A configuração $(m_{ct})_{113}$ – figura 24 – emula a leitura de um manômetro, cujo centro está concêntrico ao centro da imagem, a uma distância a qual permite realizar-se a leitura simultânea de quatro manômetros.

Figura 24 – Configuração $(m_{ct})_{113}$

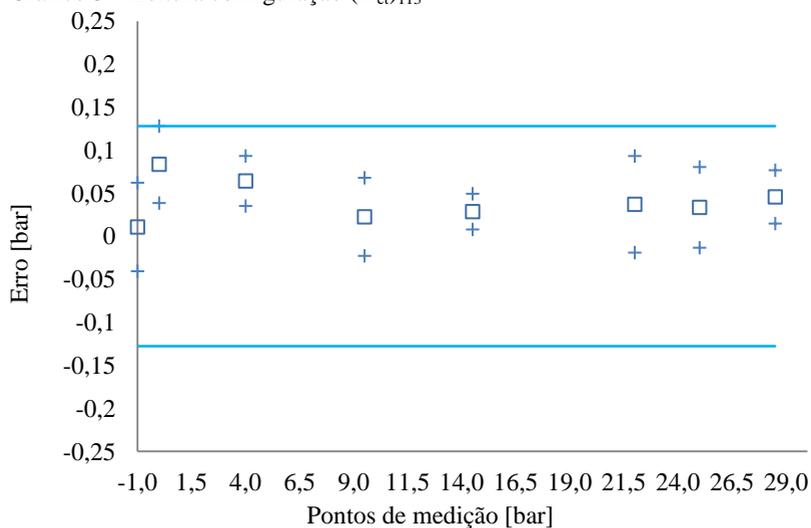


Fonte: Autor

As médias dos valores obtidos em todos os pontos de medição, seu desvio padrão e as curvas de tendência são dados pela tabela 12 e pelo gráfico 3.

Tabela 12 – Leitura configuração $(m_{ct})_{113}$

Pontos ensaiados [bar]	Leituras [bar]
-1,00	$(-0,98 \pm 0,05)$
0,00	$(0,04 \pm 0,04)$
+ 4,00	$(4,05 \pm 0,03)$
+ 7,00	$(7,02 \pm 0,05)$
+ 14,50	$(14,56 \pm 0,02)$
+ 22,00	$(22,03 \pm 0,06)$
+ 25,00	$(25,06 \pm 0,05)$
+ 28,50	$(28,53 \pm 0,03)$

Gráfico 3 – Leitura configuração (m_{ct})₁₁₃

- Legenda:
- tendência do valor obtido
 - + limite inferior e superior do erro
 - limite inferior e superior máximo do erro

4.7.4. Leitura na distância de 124 mm – configuração $(m_{ct})_{124}$

A configuração $(m_{ct})_{124}$ – figura 25 – emula a leitura de um manômetro, cujo centro está concêntrico ao centro da imagem, a uma distância a qual permite realizar-se a leitura simultânea de seis manômetros.

Figura 25 – Configuração $(m_{ct})_{124}$

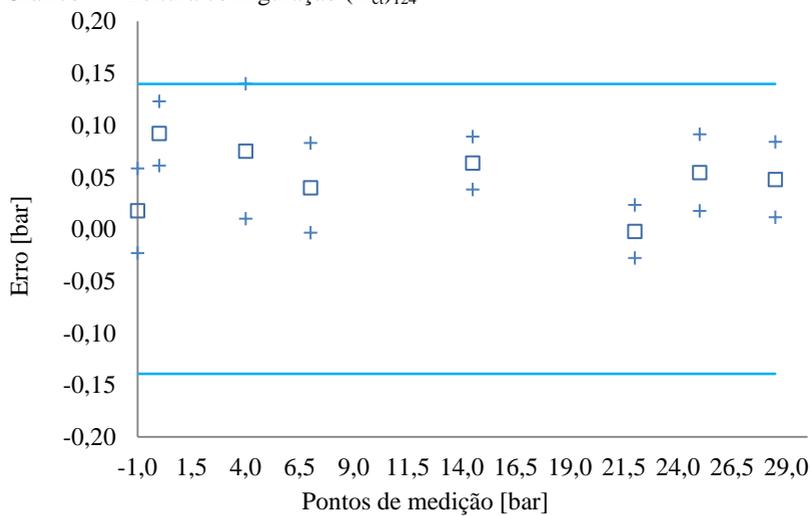


Fonte: Autor

As médias dos valores obtidos em todos os pontos de medição, seu desvio padrão e as curvas de tendência são dados pela tabela 13 e pelo gráfico 4.

Tabela 13 – Leitura configuração $(m_{ct})_{124}$

Pontos ensaiados [bar]	Leituras [bar]
-1,00	$(-0,98 \pm 0,04)$
0,00	$(0,09 \pm 0,03)$
+ 4,00	$(4,07 \pm 0,06)$
+ 7,00	$(7,04 \pm 0,04)$
+ 14,50	$(14,56 \pm 0,03)$
+ 22,00	$(22,00 \pm 0,03)$
+ 25,00	$(25,05 \pm 0,04)$
+ 28,50	$(28,55 \pm 0,04)$

Gráfico 4 – Leitura configuração (m_{ct})₁₂₄

- Legenda:
- tendência do valor obtido
 - + limite inferior e superior do erro
 - limite inferior e superior máximo do erro

4.7.5. Leitura na distância de 132 mm – configuração (m_{ct})₁₃₂

A configuração (m_{ct})₁₃₂ – figura 26 – emula a leitura de um manômetro, cujo centro está concêntrico ao centro da imagem, a uma distância a qual permite realizar-se a leitura simultânea de seis manômetros no painel em calota.

Figura 26 – Configuração (m_{ct})₁₃₂

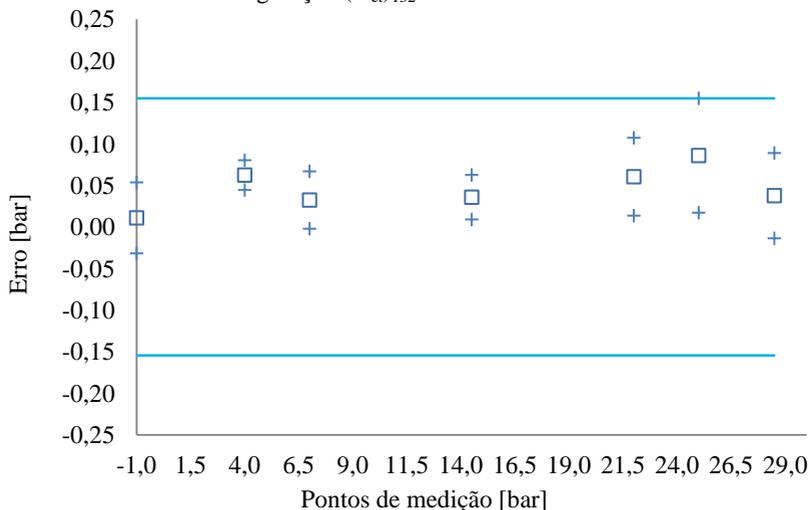


Fonte: Autor

As médias dos valores obtidos em todos os pontos de medição, seu desvio padrão e as curvas de tendência são dados pela tabela 14 e pelo gráfico 5.

Tabela 14 – Leitura configuração (m_{ct})₁₃₂

Pontos ensaiados [bar]	Leituras [bar]
-1,00	-(0,99± 0,04)
4,00	(4,06± 0,02)
7,00	(7,03± 0,03)
14,50	(14,54± 0,03)
22,00	(22,06± 0,05)
25,00	(25,09± 0,07)
28,50	(28,54± 0,05)

Gráfico 5 – Leitura configuração (m_{ct})₁₃₂

Legenda: □ tendência do valor obtido
 + limite inferior e superior do erro
 — limite inferior e superior máximo do erro

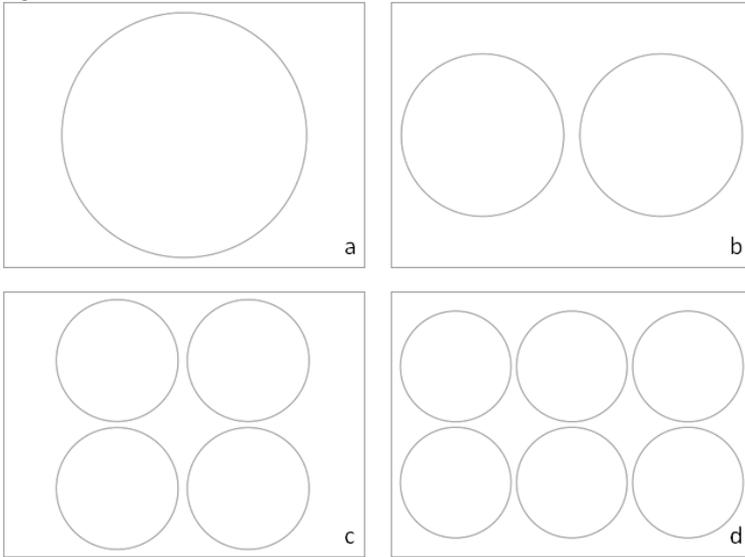
4.8. QUANTIDADE DE MANÔMETROS LIDOS NUMA MESMA IMAGEM

Ao deslocar o manômetro na vertical ou horizontal a projeção 2-D da lateral do instrumento bloqueia a imagem das marcações da escala do manômetro, o que limita em seis a quantidade de manômetros lidos simultaneamente. A partir disso devem-se determinar as configurações de teste para a emulação da posição do manômetro no painel.

Primeiramente, determina-se os painéis planos em forma de matriz¹⁰, que são: um manômetro ($(M)_{1 \times 1}$) uma linha por uma coluna, dois manômetros ($(M)_{1 \times 2}$) uma linha por duas colunas, quatro manômetros ($(M)_{2 \times 2}$) duas linhas por duas colunas e seis manômetros ($(M)_{2 \times 3}$) duas linhas por três colunas – ilustrado pela figura 27.

¹⁰Os painéis com três e cinco manômetros não foram testados, pois as distâncias entre câmera e painel, nessas duas configurações, necessárias para os manômetros estarem contidos na área útil da imagem, possibilitavam a leitura de quatro e seis manômetros respectivamente. Isso torna essas duas configurações ineficientes perante as outras leituras simultâneas e por isso foram desprezadas.

Figura 27 – Painéis de manômetros



a – 1 manômetro $(M)_{1 \times 1}$; **b** – 2 manômetros $(M)_{1 \times 2}$; **c** – 4 manômetros $(M)_{2 \times 2}$; **d** – 6 manômetros $(M)_{2 \times 3}$.

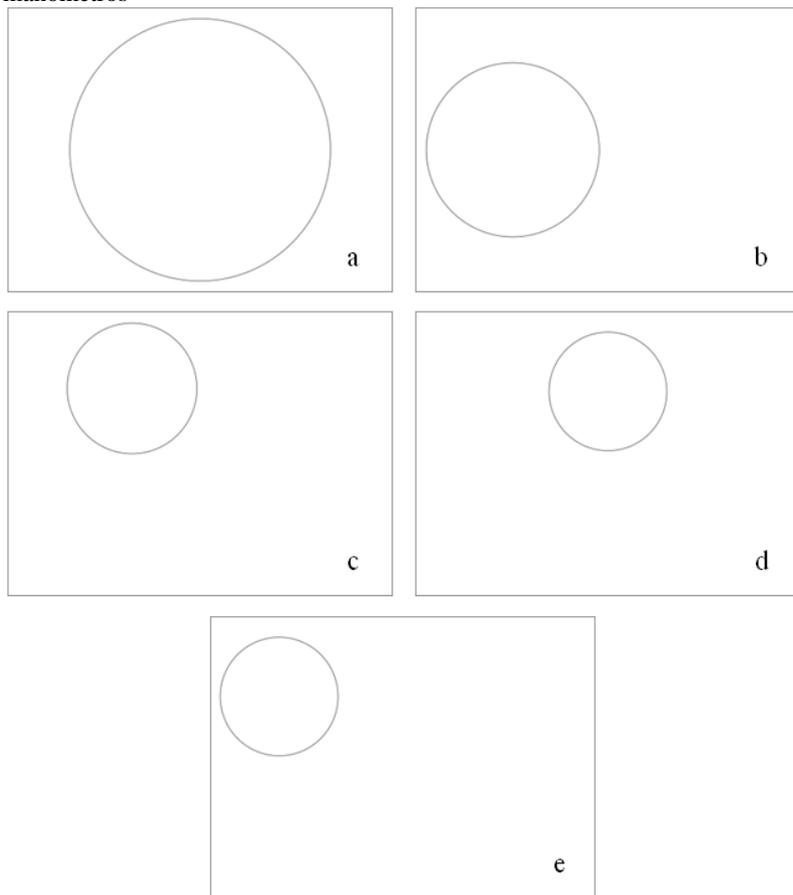
Fonte: Autor

Para um mesmo painel, nota-se que há simetria entre as diferentes posições que o manômetro pode assumir. Essa simetria é dada quando a distância relativa do centro do manômetro ao centro da imagem mantém-se para as diferentes posições.

Desta maneira não é preciso realizar os testes para todas as posições dos painéis, basta testar posições essenciais e fazer a correspondência às demais posições.

Sendo assim as configurações testadas são: para um manômetro $(m_{11})_{1 \times 1}$, para dois manômetros $(m_{11})_{1 \times 2}$, para quatro manômetros $(m_{11})_{2 \times 2}$, para seis manômetros $(m_{11})_{2 \times 3}$, como mostra a figura 28.

Figura 28 – Configurações para quantificação de incerteza da quantidade de manômetros



a – configuração $(m_{11})_{1 \times 1}$; **b** – configuração $(m_{11})_{1 \times 2}$; **c** – configuração $(m_{11})_{2 \times 2}$;
d – configuração $(m_{12})_{2 \times 3}$; **e** – configuração $(m_{11})_{2 \times 3}$

Fonte: Autor

Para realizar os ensaios é preciso definir a distância de trabalho para ensaios com um manômetro. Depois, realiza-se o alinhamento entre o plano da imagem e o plano do manômetro. Em seguida, ajusta-se o ponteiro sobre os pontos de leitura e, por fim, obtém-se sua indicação encerrando o ensaio da configuração $(m_{11})_{1 \times 1}$ – figura 28.a.

Mantendo a mesma indicação do manômetro desloca-se a câmera para a distância de trabalho na qual é possível realizar a leitura

de dois manômetros. Repete-se o alinhamento entre o plano da imagem e o plano do manômetro e, após concluí-lo, desloca-se o manômetro até que o mesmo esteja posicionado de acordo com a configuração $(m_{11})_{1 \times 2}$ – figura 28.b – e obtém-se sua indicação.

Repete-se o processo – distanciar, alinhar e deslocar na horizontal ou vertical de acordo com cada configuração – mantendo a mesma indicação para as demais configurações e por fim obtém-se sua indicação.

As configurações de referência adotadas para avaliar a quantidade de manômetros lidos numa mesma imagem devem ser capazes de quantificar as fontes de incerteza devido ao deslocamento horizontal ou vertical dos manômetros e a maior distância de trabalho necessária para realizar a leitura.

A fim de quantificar a influência do deslocamento horizontal ou vertical, deve-se manter a mesma relação pixel/mm entre a configuração de referência e a configuração de ensaio.

Portanto deve-se adotar configurações nas quais o centro dos manômetros está sobre o eixo ótico, mas numa distância de trabalho similar às configurações ensaiadas.

Sendo assim, os resultados das configurações ilustradas pela figura 28 são apresentados tendo como valor real os resultados das leituras dos manômetros que estão na mesma distância de trabalho, porém alinhados com o centro ótico.

Para quantificar a variação da relação pixel/mm, que se torna pior de acordo com o aumento dos instrumentos numa mesma imagem, a configuração de referência adotada deve estar alinhada com o eixo ótico e possuir a melhor relação pixel/mm possível.

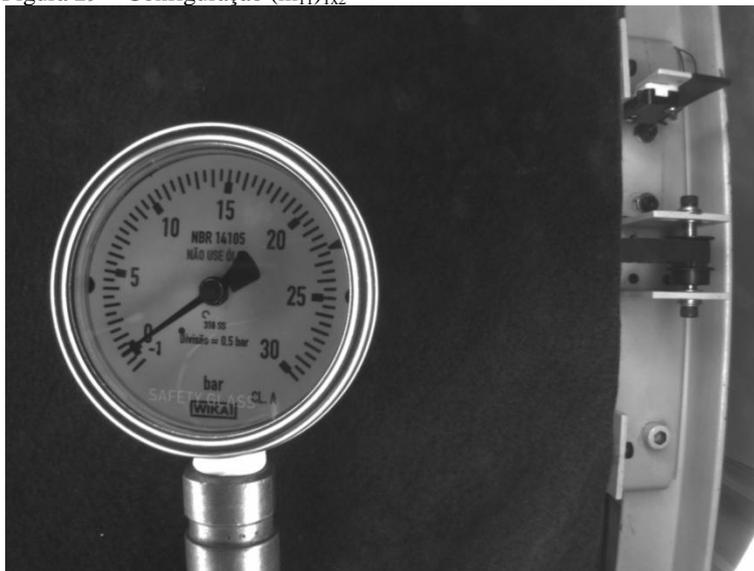
Portanto a configuração de referência escolhida para quantificar as incertezas referentes à quantidade de manômetro é a configuração $(m_{ct})_{54,5}$.

4.8.1. Leitura de 2 manômetros – configuração $(m_{11})_{1x2}$

A configuração $(m_{11})_{1x2}$ – figura 29 – emula a leitura em um painel plano, no qual se pode realizar a leitura simultânea de dois manômetros, cujo centro está deslocado horizontalmente para a esquerda do centro da imagem.

Para essa configuração os valores verdadeiros de medição adotados são aqueles obtidos na configuração $(m_{ct})_{84,5}$.

Figura 29 – Configuração $(m_{11})_{1x2}$



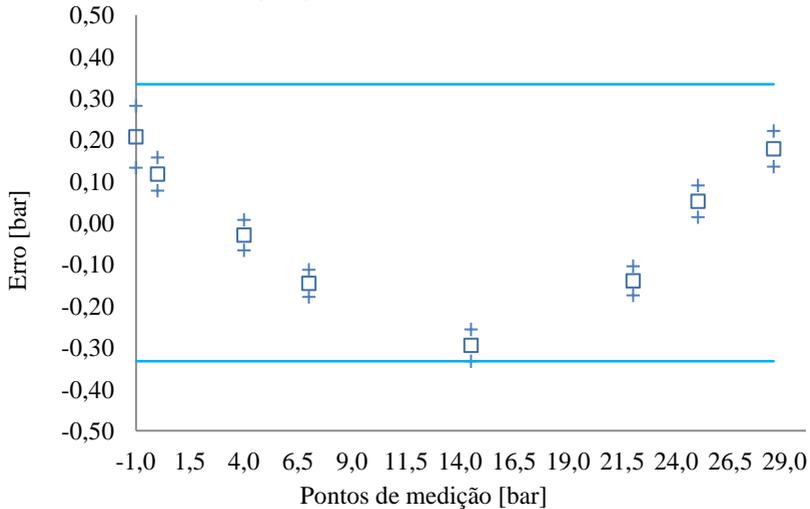
Fonte: Autor

As médias dos valores obtidos em todos os pontos de medição, o seu desvio padrão e as curvas de tendência são dados, respectivamente, pela tabela 15 e pelo gráfico 6.

Tabela 15 – Leitura configuração $(m_{11})_{1 \times 2}$

Pontos ensaiados [bar]	Leituras [bar]
- 1,00	$(-0,77 \pm 0,07)$
0,00	$(0,16 \pm 0,04)$
+ 4,00	$(4,02 \pm 0,04)$
+ 7,00	$(6,88 \pm 0,03)$
+ 14,50	$(14,26 \pm 0,04)$
+ 22,00	$(21,89 \pm 0,03)$
+ 25,00	$(25,11 \pm 0,04)$
+ 28,50	$(28,71 \pm 0,04)$

Gráfico 6 – Leitura configuração $(m_{11})_{1 \times 2}$



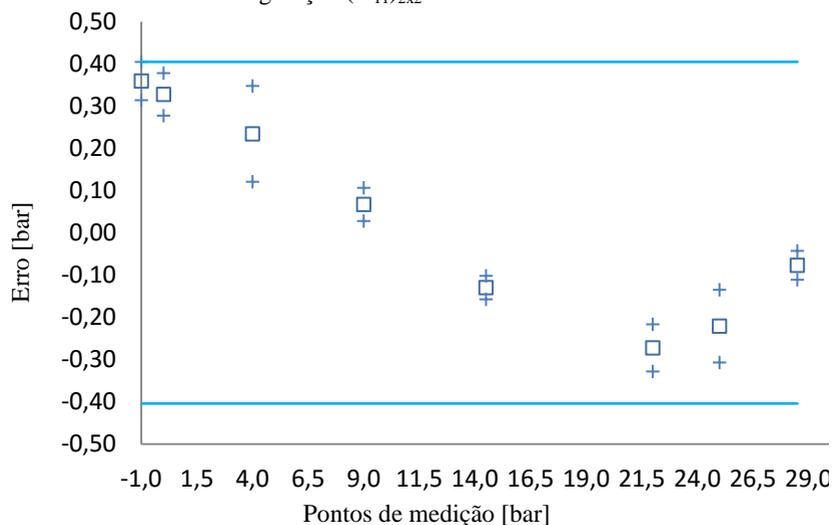
- Legenda:
- tendência do valor obtido
 - limite inferior e superior do erro
 - limite inferior e superior máximo do erro

As médias dos valores obtidos em todos os pontos de medição, o seu desvio padrão e as curvas de tendência são dados pela tabela 16 e pelo gráfico 7.

Tabela 16 – Leitura configuração $(m_{11})_{2 \times 2}$

Pontos ensaiados [bar]	Leituras [bar]
-1,00	$(-0,63 \pm 0,05)$
0,00	$(0,41 \pm 0,05)$
+ 4,00	$(4,30 \pm 0,11)$
+ 7,00	$(9,09 \pm 0,04)$
+ 14,50	$(14,40 \pm 0,03)$
+ 22,00	$(21,76 \pm 0,06)$
+ 25,00	$(24,86 \pm 0,09)$
+ 28,50	$(28,47 \pm 0,03)$

Gráfico 7 – Leitura configuração $(m_{11})_{2 \times 2}$



- Legenda:
- tendência do valor obtido
 - limite inferior e superior do erro
 - limite inferior e superior máximo do erro

4.8.3. Leitura de 6 manômetros – configuração $(m_{12})_{2 \times 3}$

A configuração $(m_{12})_{2 \times 3}$ – figura 31 – emula a leitura em um painel plano, no qual se pode realizar a leitura simultânea de até seis manômetros, cujo centro está deslocado verticalmente para cima em relação ao centro da imagem. Para essa configuração os valores verdadeiros de medição adotados são aqueles obtidos na configuração $(m_{ct})_{124}$. A adoção desses valores tem como intuito separar as incertezas da resolução da visão humana das demais incertezas relacionadas à configuração em questão.

Figura 31 – Configuração $(m_{12})_{2 \times 3}$



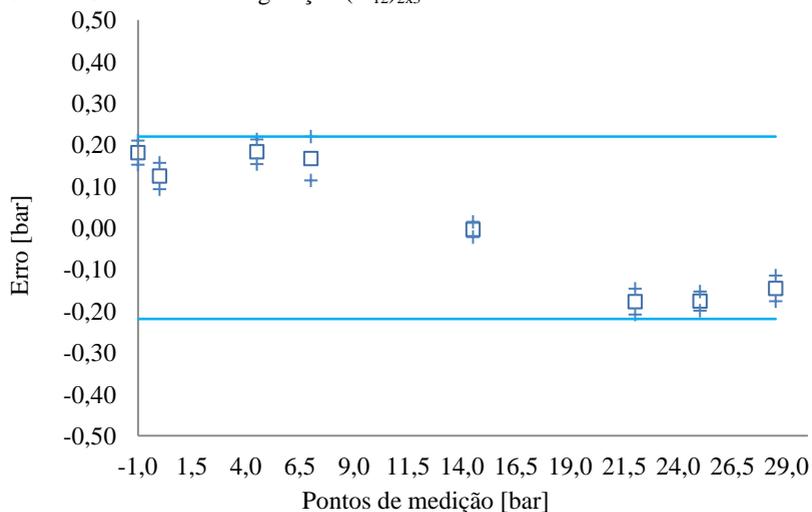
Fonte: Autor

As médias dos valores obtidos em todos os pontos de medição, o seu desvio padrão e as curvas de tendência são dados pela tabela 17 e pelo gráfico 8.

Tabela 17 – Leitura configuração $(m_{12})_{2 \times 3}$

Pontos ensaiados [bar]	Leitura [bar]
-1,00	$(-0,80 \pm 0,03)$
0,00	$(0,22 \pm 0,03)$
+ 4,00	$(4,26 \pm 0,03)$
+ 7,00	$(7,21 \pm 0,05)$
+ 14,50	$(14,56 \pm 0,02)$
+ 22,00	$(21,82 \pm 0,03)$
+ 25,00	$(24,88 \pm 0,02)$
+ 28,50	$(28,40 \pm 0,03)$

Gráfico 8 – Leitura configuração $(m_{12})_{2 \times 3}$

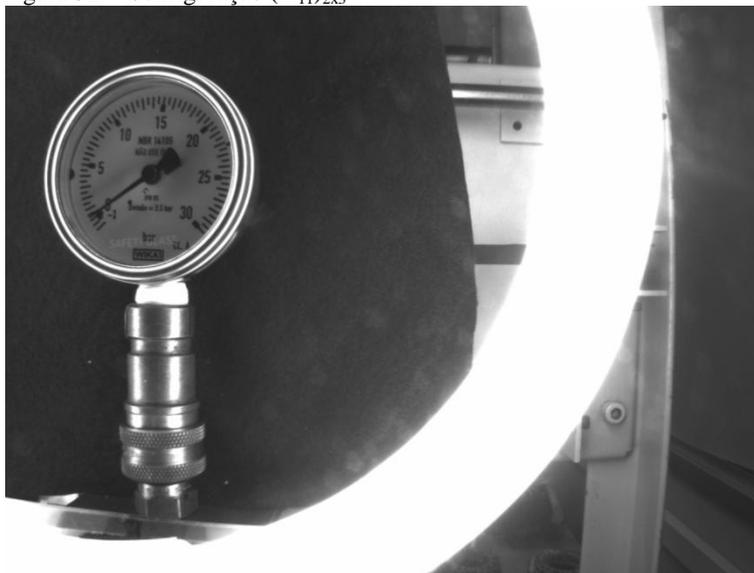


- Legenda:
- tendência do valor obtido
 - + limite inferior e superior do erro
 - limite inferior e superior máximo do erro

4.8.4. Leitura de 6 manômetros – configuração $(m_{11})_{2 \times 3}$

A configuração $(m_{11})_{2 \times 3}$ – figura 32 – emula a leitura em um painel plano, no qual se pode realizar a leitura simultânea de até seis manômetros, cujo centro está deslocado horizontalmente para esquerda e verticalmente para cima em relação ao centro da imagem. Para essa configuração os valores verdadeiros de medição adotados são aqueles obtidos na configuração $(m_{ct})_{124}$. A adoção desses valores tem como intuito separar as incertezas da resolução da visão humana das demais incertezas relacionadas à configuração em questão.

Figura 32 – Configuração $(m_{11})_{2 \times 3}$



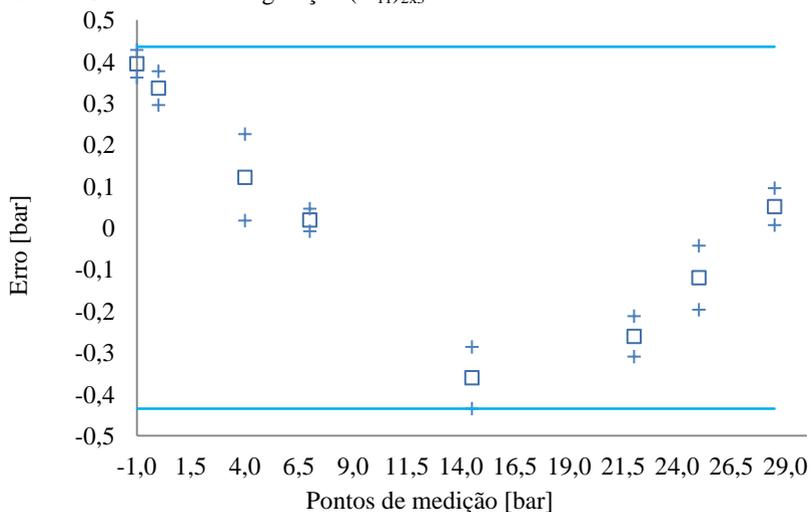
Fonte: Autor

As médias dos valores obtidos em todos os pontos de medição, o seu desvio padrão e as curvas de tendência são dados pela tabela 18 e pelo gráfico 9.

Tabela 18 – Leitura configuração $(m_{11})_{2 \times 3}$

Pontos ensaiados [bar]	Leituras [bar]
-1,00	$(-0,59 \pm 0,03)$
0,00	$(0,43 \pm 0,04)$
+ 4,00	$(4,20 \pm 0,10)$
+ 7,00	$(7,06 \pm 0,03)$
+ 14,50	$(14,20 \pm 0,07)$
+ 22,00	$(21,74 \pm 0,05)$
+ 25,00	$(24,93 \pm 0,08)$
+ 28,50	$(28,60 \pm 0,04)$

Gráfico 9 – Leitura configuração $(m_{11})_{2 \times 3}$



- Legenda:
- tendência do valor obtido
 - + limite inferior e superior do erro
 - limite inferior e superior máximo do erro

4.9. FORMATO DO PAINEL

A fim de realizar a leitura de múltiplos manômetros numa imagem, elaborou-se um painel em forma de calota como suporte dos manômetros. Devido ao formato curvo, nesses painéis os centros dos manômetros estão sempre a uma mesma distância do sistema de captura de imagem e os ângulos de incidência provenientes do objeto são menores.

Para realizar os ensaios é preciso posicionar o painel de manômetros a uma distância de trabalho tal que a dimensão crítica, nesse caso, ocupe 95% – conforme frisado no item 3.1.4 – da largura da imagem, que para a configuração $(m_{ct})_{132}$, equivale a aproximadamente 132 mm.

Após posicionar o instrumento na distância de trabalho, realiza-se o alinhamento entre os planos da imagem e do objeto, posiciona-se o ponteiro sobre a marcação desejada e obtém-se a indicação do instrumento.

Após isso, mantendo a mesma indicação no ponteiro, se posiciona o manômetro na imagem de acordo com a configuração $(m_{11})_{2x3calota}$, a partir de rotações no eixo x e y , como é descrito no item 4.3, e, por fim, obtém-se a indicação do ponteiro. Repete-se o mesmo processo para as demais indicações e concluem-se os ensaios do painel em calota.

Para quantificar as incertezas referentes ao formato do painel, é preciso comparar os resultados obtidos no painel plano e compará-los com seus homólogos no painel em calota.

Tendo em vista que o pior caso seria a leitura de seis manômetros numa mesma imagem, utilizou-se para levantar e quantificar as incertezas a comparação entre os pares de configurações $(m_{ct})_{124}$ e $(m_{ct})_{132}$, $(m_{11})_{2x3}$ e $(m_{11})_{2x3calota}$ e $(m_{ct})_{132}$ e $(m_{11})_{2x3calota}$, nos quais $(m_{ct})_{124}$, $(m_{11})_{2x3}$ e $(m_{ct})_{132}$ são as configurações de referência para esse ensaio.

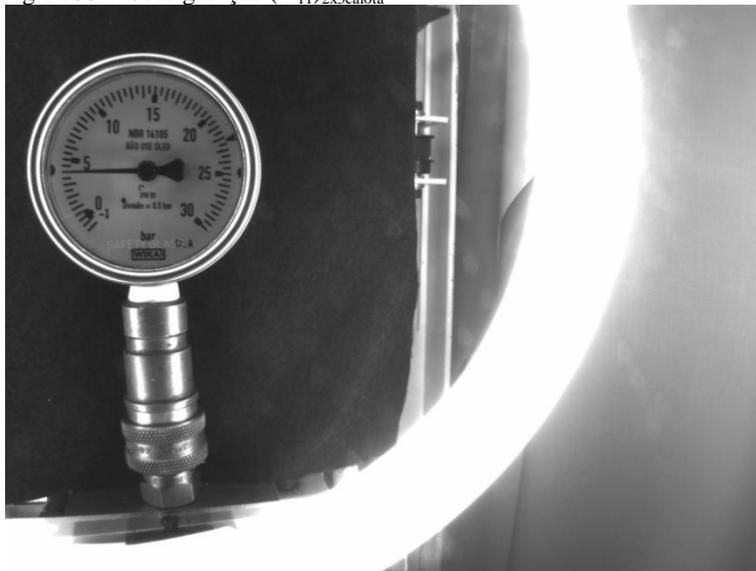
4.9.1. Painel calota para 6 manômetros configuração $(m_{11})_{2 \times 3 \text{calota}}$

A configuração $(m_{11})_{2 \times 3 \text{calota}}$ – figura 33 – emula a leitura em um painel em forma de calota, no qual se pode realizar a leitura simultânea de até seis manômetros, cujo centro está deslocado devido ao ângulo obtido pela da rotação do sistema de captura de imagem nos eixos x e y .

O ângulo de deslocamento é determinado de maneira empírica, ajustando a circularidade do manômetro obtida pelo algoritmo de detecção de bordas e pelos resultados das leituras obtidas em diferentes posições. Esse direcionamento precisa ser ajustado dessa maneira porque devido às imperfeições do sistema ótico e a presença de aberrações – principalmente distorção e curvatura de campo – a calota gerada não tem uma forma perfeita.

Apesar do método, a imagem obtida (figura 33) apresenta qualidade superior à imagem da configuração $(m_{11})_{2 \times 3}$.

Figura 33 – Configuração $(m_{11})_{2 \times 3 \text{calota}}$



Fonte: Autor

Para essa configuração os valores verdadeiros de medição adotados são aqueles obtidos na configuração $(m_{cl})_{132}$. A adoção desses valores tem como intuito separar as incertezas da resolução da

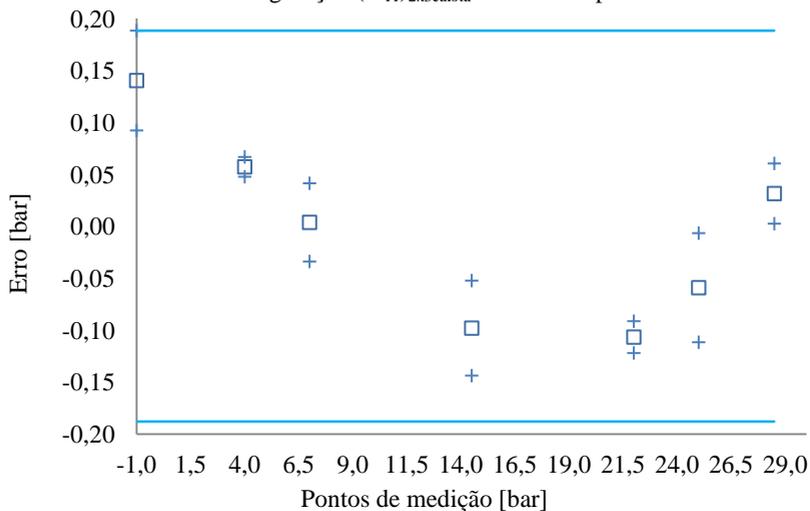
visão humana das demais incertezas relacionadas à configuração em questão.

As médias dos valores obtidos em todos os pontos de medição, o seu desvio padrão e as curvas de tendência são dados pela tabela 19 e pelo gráfico 10.

Tabela 19 – Leitura configuração $(m_{11})_{2 \times 3 \text{calota}}$

Pontos ensaiados [bar]	Leituras [bar]
-1,00	$-(0,85 \pm 0,05)$
0,00	$(4,12 \pm 0,01)$
+ 4,00	$(7,04 \pm 0,04)$
+ 7,00	$(14,44 \pm 0,05)$
+ 14,50	$(21,95 \pm 0,02)$
+ 22,00	$(25,03 \pm 0,05)$
+ 25,00	$(28,57 \pm 0,03)$

Gráfico 10 – Leitura configuração $(m_{11})_{2 \times 3 \text{calota}}$ formato do painel



- Legenda:
- tendência do valor obtido
 - + limite inferior e superior do erro
 - limite inferior e superior máximo do erro

5. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A fim de quantificar as incertezas, é preciso compilar os dados dos ensaios e analisá-los. Isso permite avaliar como a incerteza é influenciada pela variação do alinhamento entre manômetro e sistema de captura de imagem, da distância entre manômetro e sistema de captura de imagem, da quantidade de manômetros lidos numa mesma imagem e do formato do painel.

5.1. INFLUÊNCIA DO ALINHAMENTO

Os ensaios realizados para avaliar o alinhamento do manômetro em relação ao sistema de captura de imagem, descritos no item 4.6, mostraram que o desalinhamento máximo permitido, sem que os parâmetros de identificação dos padrões de imagem sejam modificados, é de 6°.

Utilizando esse desalinhamento obtêm-se as tendências e incertezas de medição de acordo com o sentido do ângulo de desalinhamento em relação à configuração de referência – $(m_{ct})_{56,5}$.

Os resultados obtidos são apresentados pela tabela 20 e pela tabela 21, de acordo com o sentido positivo e negativo do desalinhamento em relação à referência.

Tabela 20 – Comparação do desalinhamento positivo com a referência
Desalinhamento positivo

Leitura [bar]	Tendência [bar]
(3,99 ±0,03)	0,06
(14,60 ±0,07)	0,05
(25,10 ±0,04)	0,06

Tabela 21 – Comparação do desalinhamento negativo com a referência
Desalinhamento negativo

Leitura [bar]	Tendência [bar]
(4,13 ±0,03)	0,07
(14,49 ±0,03)	0,06
(24,98 ±0,02)	0,06

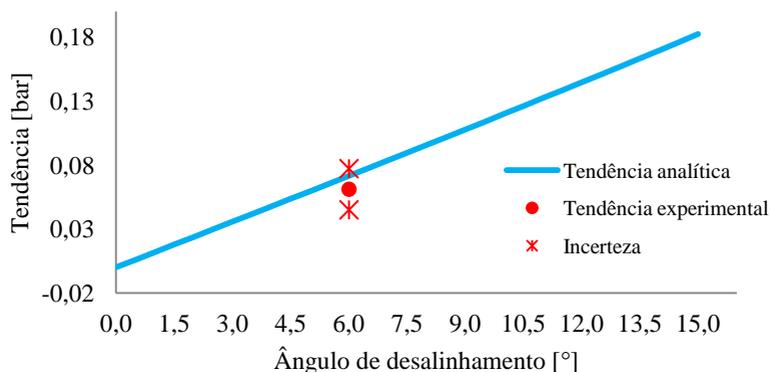
Analisando os resultados, pode-se dizer que a tendência e a incerteza instrumental são quase constantes, o que permite concluir que os resultados do desalinhamento independem do sentido do ângulo.

Nota-se um aumento na tendência instrumental e na incerteza de medição quando comparadas a referência $(m_{ct})_{56,5}$. Isso é devido à distorção de perspectiva e à distorção da lente, que são acentuadas quando o plano do manômetro e o plano do sistema de captura de imagem estão desalinhados.

A distorção de perspectiva, somada à projeção 2-D do ponteiro sobre o plano das escalas, provoca erros de paralaxe. Essa tem como efeito o aparecimento de uma tendência na leitura do manômetro em relação à configuração de referência – $(m_{ct})_{56,5}$.

Ao se comparar esses resultados com a tendência obtida no Apêndice B, nota-se que eles estão bem próximos, como ilustra o gráfico 11.

Gráfico 11 – Comparação entre tendências



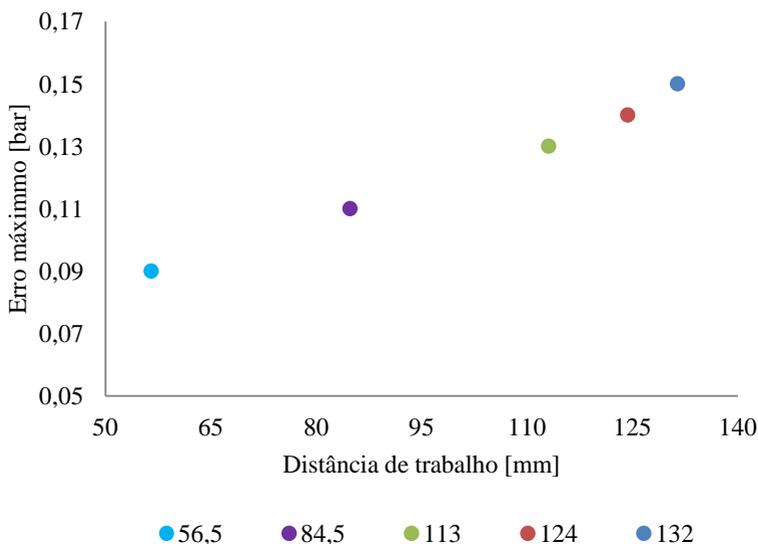
Isso mostra que a tendência obtida nas medições dos manômetros desalinhados é causada principalmente pela paralaxe e que os efeitos de distorção de lente não afetam de maneira relevante os seus valores.

Entretanto, a distorção de lente influi na identificação das marcações da escala e na definição da posição do ponteiro, devido à variação na forma e na dimensão do instrumento, que resultam numa maior incerteza de leitura quando comparadas com as leituras de referência.

5.2. INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE MANÔMETRO E SISTEMA DE CAPTURA DE IMAGEM

A comparação dos resultados dos ensaios, descritos no item 4.7, mostra que a distância entre manômetro e sistema de captura de imagem pode gerar erros que são ilustrados pelo gráfico 12.

Gráfico 12 – Resultados dos ensaios para avaliação da distância entre manômetro e sistema ótico



Na medida em que o manômetro é afastado, os erros de leitura aumentam. Isso se deve à pior relação pixel/mm, já que os demais efeitos de distorção de lente, distorção de perspectiva e paralaxe não influenciam de maneira relevante o resultado final da leitura nesses casos, pois o centro do manômetro está sobre o eixo ótico.

A relação pixel/mm, cuja variação é proporcional à resolução do sistema de medição, é modificada devido à variação da distância entre manômetro e sistema de captura de imagem que altera a área útil da imagem de cada manômetro. A distância entre manômetro e sistema de captura de imagem tem como consequência a variação da resolução do sistema de medição.

Pela figura, nota-se que os erros máximos de leitura pioraram em 60 mbar, quando comparados com a configuração de referência

$(m_{ct})_{56,5}$, enquanto que a resolução teve uma piora de aproximadamente 23 mbar.

A resolução tem grande participação na composição da incerteza do sistema de medição. Isso pode ser comprovado quando se estima a representatividade da incerteza de resolução dentro das incertezas de leitura. Para isso, calcula-se a incerteza da resolução através dos dados obtidos no Apêndice A. Em seguida, compara-se essa incerteza frente à média da incerteza da leitura de cada configuração, obtida nos ensaios do item 4.7. Essa comparação é ilustrada pela tabela 22.

Tabela 22 – Representatividade da incerteza de resolução

Configuração	Incerteza instrumental [mbar]	Incerteza de resolução [mbar]	Relação [%]
$(m_{ct})_{56,5}$	(±30)	(±10)	27
$(m_{ct})_{84,5}$	(±50)	(±20)	38
$(m_{ct})_{113}$	(±60)	(±20)	30
$(m_{ct})_{124}$	(±60)	(±30)	50
$(m_{ct})_{132}$	(±70)	(±35)	50
$(m_{I1})_{23calota}$	(±50)	(±35)	65

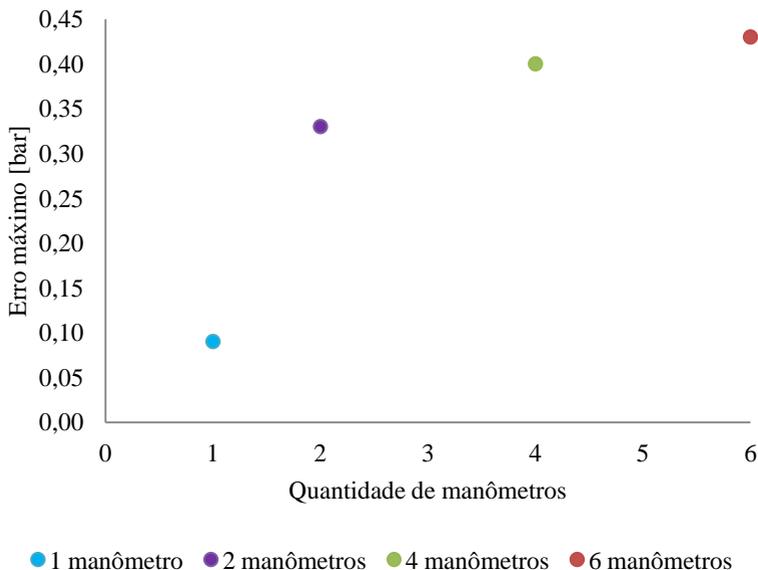
Nota-se que a proporção da incerteza de resolução aumenta de acordo com a distância. Mesmo na menor proporção, a resolução ainda possui grande influência na composição da incerteza.

Sendo assim, para atender as tolerâncias de um sistema de visão de máquina de acordo com a incerteza de resolução é preciso dimensionar corretamente a relação pixel/mm. Para isso deve-se levar em conta a distância de trabalho entre manômetro e sistema de captura de imagem e a resolução da câmera.

5.3. INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE MANÔMETROS

Realizando as medições de acordo com o item 4.8, podem-se quantificar as fontes de incertezas para adição de manômetros numa mesma imagem através da comparação de seus resultados. A combinação dos efeitos da adição de mais instrumentos numa mesma imagem é ilustrada pelo gráfico 13, no qual são mostradas as situações críticas para cada caso.

Gráfico 13 – Resultados dos ensaios para avaliação da quantidade de manômetros



Nota-se que a adoção de mais manômetros lidos numa mesma imagem gera aumento no erro em relação à referência (m_{ct})_{56,5}. Isso se deve ao aumento da distância de trabalho, que piora a incerteza; e ao deslocamento horizontal e vertical dos instrumentos em relação ao eixo ótico, que gera paralaxe e acentua os efeitos da distorção de lente.

É possível observar um salto no erro máximo quando se inicia a leitura simultânea de mais de um manômetro por imagem, o que é ocasionado principalmente por erros de paralaxe. Para as demais configurações há aumento dos efeitos de paralaxes, entretanto em menor proporção.

A paralaxe gera uma tendência em relação às indicações de referência, que pode ser observada através dos ensaios realizados no item 4.8. Comparando esses valores com a tendência encontrada a partir da projeção do ponteiro sobre o plano das marcações é possível quantificar a tendência gerada pela paralaxe. Os valores da tendência obtidos são apresentados pela tabela 23.

Tabela 23 – Tendência devido ao deslocamento

Configurações	Tendência experimental	Tendência analítica
	[mbar]	[mbar]
2 manômetros – $(m_{11})_{12}$	290	220
4 manômetros – $(m_{11})_{22}$	360	220
6 manômetros – $(m_{11})_{23}$	400	400

Ao comparar a tendência dos ensaios com a tendência gerada pela paralaxe, nota-se que ambas apresentam o mesmo comportamento. Além disso, percebe-se que os valores da paralaxe, obtidos analiticamente, representam grande parte da tendência obtida nos ensaios.

A tendência nesse caso é ocasionada principalmente pela paralaxe do ponteiro e pode ser corrigida de acordo com as curvas de tendência do Apêndice B.

Além da tendência pode-se observar uma incerteza instrumental, cujos valores obtidos nos ensaios e as estimativas realizadas no Apêndice C, são ilustrados pela tabela 24.

Tabela 24 – Incerteza instrumental

Painel	Configurações	Incerteza experimental	Incerteza estimadas
		[mbar]	[mbar]
Plano – 2 manômetros	$(m_{ct})_{84,5}$	(± 50)	(± 30)
	$(m_{11})_{12}$	(± 70)	(± 60)
Plano – 4 manômetros	$(m_{ct})_{113}$	(± 60)	(± 40)
	$(m_{11})_{22}$	(± 110)	(± 50)
Plano – 6 manômetros	$(m_{ct})_{124}$	(± 60)	(± 60)
	$(m_{12})_{23}$	(± 50)	(± 120)
	$(m_{11})_{23}$	(± 100)	(± 130)
Calota – 6 manômetros	$(m_{ct})_{132}$	(± 70)	(± 70)
	$(m_{11})_{23calota}$	(± 50)	(± 70)

Nota-se que os resultados das configurações $(m_{11})_{1x2}$, $(m_{11})_{2x2}$, e $(m_{11})_{2x3}$, obtidos nos ensaios, quando comparados às suas respectivas referências – $(m_{ct})_{84,5}$, $(m_{ct})_{113}$ e $(m_{ct})_{124}$ – possuem maior incerteza instrumental. Enquanto que a configuração $(m_{12})_{2x3}$, diferentemente das demais, mantém a mesma incerteza instrumental.

Isso pode ser explicado pela deformação assimétrica da imagem, que influi na identificação das marcações da escala e na definição da posição do ponteiro. Essa deformação assimétrica, cuja

causa é a distorção de lente, é crítica no deslocamento horizontal, o que explica sua baixa influência sobre os resultados da configuração $(m_{12})_{2 \times 3}$, na qual o deslocamento é apenas vertical.

Além disso, é possível afirmar que as incertezas são geradas principalmente por componentes aleatórias do processo de leitura. Isso é comprovado quando se comparam as incertezas obtidas experimentalmente com as incertezas estimadas, que são obtidas através apenas de componentes aleatórias do processo.

No projeto de um sistema de visão de máquina para realizar a calibração automática de manômetros através da leitura de mais instrumentos numa mesma imagem, deve-se considerar a tendência causada pela paralaxe e corrigi-la. Ademais é preciso verificar se as incertezas devido às deformações da imagem, causadas pela distorção de lente, não estão acima dos limites desejados.

5.4. INFLUÊNCIA DO FORMATO DO PAINEL

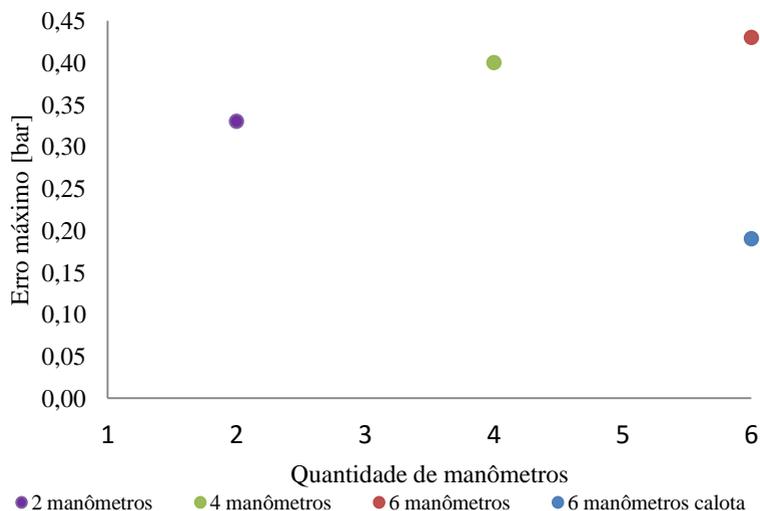
Para avaliar do painel em calota devem-se comparar os seguintes pares de configurações: $(m_{ct})_{124}$ e $(m_{ct})_{132}$; $(m_{ct})_{132}$ e $(m_{11})_{2 \times 3 \text{ calota}}$; e $(m_{11})_{2 \times 3}$ e $(m_{11})_{2 \times 3 \text{ calota}}$.

No primeiro par comparado pode-se observar que a diferença entre eles é dada apenas pela relação pixel/mm, que resulta numa perda de resolução de 2 mbar, cuja influência sobre o resultado de leitura pode ser desconsiderada, mostrando que não há geração de incertezas devido ao afastamento de 8 mm, como foi ilustrado no gráfico 12.

Na comparação entre o segundo par de configurações nota-se que a utilização da calota melhora a eficiência da calibração de câmera, o que reduz os efeitos da distorção da lente e distorção de perspectiva. Isso pode ser comprovado pelas incertezas de medição de $(m_{11})_{2 \times 3 \text{ calota}}$, que não pioraram em relação $(m_{ct})_{132}$.

Para avaliar o painel com formato de calota em relação ao painel plano devem-se comparar os resultados do par $(m_{11})_{2 \times 3}$ e $(m_{11})_{2 \times 3 \text{ calota}}$. Para isso utiliza-se o gráfico 14.

Gráfico 14 – Resultados dos ensaios para avaliação da forma do painel



O gráfico mostra uma diferença de aproximadamente 260 mbar na curva de erros obtidas nos ensaios entre o segundo par de configurações analisados. Como as incertezas de medição entre $(m_{11})_{2 \times 3}$ e $(m_{11})_{2 \times 3 \text{ calota}}$ é no pior caso por volta de 50 mbar e, portanto, não justificam tamanha disparidade, pode-se afirmar que a diferença é causada pela redução da paralaxe no painel em forma de calota que reduz a tendência instrumental, como pode ser visto na tabela 25.

Tabela 25 – Comparação da tendência entre as configurações $(m_{11})_{2 \times 3}$ e $(m_{11})_{2 \times 3 \text{ calota}}$

Pontos [bar]	Tendência	
	$(m_{11})_{2 \times 3}$ [mbar]	$(m_{11})_{2 \times 3 \text{ calota}}$ [mbar]
-1,0	400	140
+ 4,0	120	60
+ 7,0	20	10
+ 14,5	360	100
+ 22,0	260	110
+ 25,0	120	60
+ 28,5	50	30

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fim de dar suporte ao projeto mecânico de um sistema automatizado de calibração de manômetros, caracterizaram-se experimentalmente as incertezas do sistema de visão de máquina de acordo com alinhamento entre manômetro e sistema de captura de imagem, distância entre manômetro e sistema de captura de imagem, quantidade de manômetros lidos numa mesma imagem e formato do painel.

Para realizar a caracterização experimental, construiu-se uma bancada na qual se empregou um mesmo manômetro, uma mesma câmera e uma mesma lente para realizar as leituras dos instrumentos.

Por meio da heurística e da pesquisa bibliográfica, pode-se levantar as possíveis fontes de incerteza e, assim, elaborar a bancada e os ensaios pertinentes para avaliá-las. A partir dos resultados de leitura e da obtenção das propriedades metrológicas, foi possível caracterizar experimentalmente as fontes de incerteza.

A partir dos ensaios, verificou-se que a distorção de lentes e a distorção de perspectiva influíam sobre a capacidade do algoritmo em encontrar os padrões de identificação dos manômetros, o que conseqüentemente impossibilita a leitura do instrumento. Além disso, os efeitos das distorções aumentam a incerteza de leitura, o que pode ser observado quando são utilizadas regiões da imagem que se encontram afastadas do eixo ótico. Isso confirma os resultados dos trabalhos encontrados na revisão bibliográfica.

6.1. CONCLUSÕES

Conclui-se que se conseguiu caracterizar experimentalmente as fontes de incerteza no tocante às características de câmera, de lentes e da posição espacial do par manômetro-sistema de captura de imagem. Isso permitiu fornecer dados para subsídio ao projeto mecânico de um sistema automatizado de calibração de manômetros que combina confiabilidade metrológica e aumento da produtividade.

A partir do presente trabalho pode-se afirmar que:

- o desalinhamento gera erros de paralaxe, cujo comportamento é proporcional ao ângulo de desalinhamento;
- a distância de trabalho influencia quase que linearmente na resolução do sistema de medição, de

acordo com a distância entre sistema de captura de imagem e manômetro;

- a quantidade de manômetros sofre influência da relação pixel/mm, que atua sobre a incerteza de resolução do sistema de medição; da distorção de lente que reflete sobre a incerteza de leitura; mas principalmente da paralaxe, que acentua a tendência da leitura; e
- o formato do painel pode reduzir as incertezas devido à distorção de lente e, principalmente, à paralaxe.

Adicionalmente, conclui-se que – após realizar a calibração de câmera e reduzir os efeitos da distorção de perspectiva e distorção de lente – a paralaxe é a principal componente da incerteza quando se utiliza a leitura de inúmeros manômetros numa mesma imagem. Seria possível aplicar uma correção ao resultado de leitura, pois foi possível gerar uma equação que representasse os valores de projeção de acordo com a posição do manômetro na imagem e de sua indicação para o instrumento utilizado nos ensaios. Entretanto, devido às características construtivas do manômetro – principalmente altura e alinhamento entre os planos do ponteiro e do mostrador – não apresentarem o mesmo comportamento para diferentes instrumentos, não é viável aplicar a correção aos resultados, pois cada manômetro necessitaria de uma curva específica.

Os resultados experimentais demonstraram que o alinhamento teve influência no resultado de medição devido à altura h . E foi possível, através dos estudos realizados, relacionar às incertezas de alinhamento ao erro gerado. Com esses dados é possível selecionar os equipamentos e as configurações de painel que se adequam melhor às necessidades do projeto de um sistema automatizado de calibração de manômetros, evitando possíveis fontes de incerteza, tipicamente presentes nos ensaios.

Assim sendo, o presente trabalho de mestrado alcançou seu objetivo: servir como base teórica, a fim de auxiliar nos projetos de sistemas automatizados de calibração de manômetro.

6.2. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

A bancada para quantificação de incertezas mostrou-se uma excelente ferramenta para avaliar e quantificar fontes de incertezas de sistema de captura de imagem. Dessa forma, a fim de garantir a continuidade do projeto, sugere-se alguns tópicos para trabalhos futuros.

Como futura aplicação, sugere-se que a bancada seja utilizada para dimensionar sistemas de visão de máquina de acordo com as características metrológicas e da aplicação em condições reais de uso. Isso permitiria validar a utilização da visão de máquina em situações nas quais questões ambientais, como espaço, disposição e iluminação, são limitações de projeto.

Além dessas, sugere-se que a bancada para quantificação de incertezas seja utilizada na quantificação da incerteza de outros instrumentos analógicos.

Sugere-se, também, o desenvolvimento de padrões de formas para verificar: a eficiência do algoritmo em corrigir as distorções e identificar os parâmetros de posição; e se as distorções da lente estão dentro de um padrão aceitável. Como exemplo de aplicação, tem-se que um padrão circular poderia ser utilizado para validar a adoção de painéis planos, de acordo com a distorção da lente e da eficiência da calibração da imagem. Isso tornaria a avaliação de cada configuração mais dinâmica.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 17025:2005**: Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14105-1:2011**: Medidores de pressão - Parte 1: Medidores analógicos de pressão com sensor de elemento elástico - Requisitos de fabricação, classificação e utilização. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2011. 42 p.

ACHERMAN, Simón Reif; MARTINEZ, Fiderman Machuca. Eugène Bourdon y la evolución del manómetro. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 32, n. 1, p.1601-1610, 26 mar. 2010.

ALEGRIA, F. Corrêa; SERRA, A. Cruz. Automatic Calibration of Analog and Digital Measuring Instruments Using Computer Vision. **Ieee Transactions On Instrumentation And Measurement**, Lisboa, v. 49, n. 1, p.94-99, fev. 2000.

Arrick Robotics, **Automation Products**. Disponível em <http://www.arrickrobotics.com/xy.html#>, acessado em 2015

ASHRAE, ASHRAE Handbook “**Fundamentals, SI Edition, The American Society of Heating, Ventilation and Air-Conditioning Inc.**”, Atlanta, USA, 2005.

BATCHELOR, Bruce G. (Ed.). **Machine Vision Handbook**. London: Springer, 2012. 2272 p.

DAVIES, E. Roy. **Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities**. 3. ed. London: Morgan Kaufmann Publishers In, 2005. 934 p.

Edmund Optics **Optical aberrations** Disponível em <http://www.edmundoptics.com/technical-resources/center/optics/comparison-of-optical-aberrations/>, acessado em 2015>

EUROMET, **Key Comparison: Calibration Of Line Scales Final Report** University of Maribor Faculty of Mechanical Engineering Laboratory for Production Measurement, (2006)

FIGLIOLA, Richard S.; BEASLEY, Donald E. **Theory and design for mechanical measurements**. 3. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons Inc., 2000.

FISHER, R. B. *et al.* **Dictionary of Computer Vision and Image Processing**. 2. ed. New Delhi: John Wiley & Sons Ltd, 2014.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

Hecht, Eugene. **“OPTICS.”** 4 ed. San Francisco: Addison Wesley, 2002.

HEMMING, B.; LEHTO, H.. Calculation of uncertainty of measurement in machine vision case: a system for the calibration of dial indicators. **IMTC 2001. Proceedings Of The 18th IEEE Instrumentation And Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement In The Age Of Informatics**, [s.l.], p.665-670, 2001. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/imtc.2001.928901.

HEMMING, Björn; LEHTO, Heikki. Calibration of dial indicators using machine vision. **Measurement Science And Technology**, [s.l.], v. 13, n. 1, p.45-49, 23 nov. 2001. IOP Publishing. DOI: 10.1088/0957-0233/13/1/306.

HEMMING, Bjorn; PALOSUO, Ilkka; LASSILA, Antti. Design of a calibration machine for optical two-dimensional length standards. **Optomechatronic Systems III**, [s.l.], p.670-678, 7 out. 2002. SPIE-Intl Soc Optical Eng. DOI: 10.1117/12.467631.

HEMMING, Björn; IKONEN, Erkki; NOORMA, Mart. Measurement of Aperture Areas Using an Optical Coordinate Measuring Machine. **International Journal Of Optomechatronics**, [s.l.], v. 1, n. 3, p.297-311, 7 set. 2007. Informa UK Limited. DOI: 10.1080/15599610701548803.

HEMMING, Björn. **Measurement Traceability and Uncertainty in Machine Vision Applications**. 2007. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology Helsinki University of Technology (Espoo, Finland) on the 17th of December 2007, at 12 noon.

HOFMANN, Allan Charles Henri. **Sistema endoscópico estereoscópico para medição geométrica de uniões soldadas de dutos**. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

INMETRO. **Guia para expressão da incerteza de medição 2008**. Rio de Janeiro: Inmetro, 2008.

INMETRO. **Vocabulário internacional de metrologia 2012: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. 2012.

JÄHNE B., “**Digital Image Processing**”. 6ª ed. Heidelberg: Springer, 2005.

JCGM. Bureau International des Poids et Mesures. **Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement”**: Propagation of distributions using a Monte Carlo method. 2008.

KOPPARAPU, Sunil Kumar. Lighting design for machine vision application. **Image And Vision Computing**, [s.l.], v. 24, n. 7, p.720-726, jul. 2006. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.imavis.2005.12.016.

LANDEIRA, Gabriel. **Automação do Teste de Vida de Compressores Herméticos**. 2013. 51 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

LIMA, Danilo .A.; PEREIRA, Guilherme A. S. ; VASCONCELOS, Flávio H. . A Computer Vision System to Read Meter Displays. **IMEKO, 2008. Proceedings of the 16th IMEKO TC4 Symposium. Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements**, Florença/Itália, 2008, International Measurement Confederation (IMEKO).

LIU, Shuguang; LIU, Mingyuan; WANG, Dongwen. Optimal sequence planning for automobile gauge panel image inspection. **2008 Asia Simulation Conference - 7th International Conference On System Simulation And Scientific Computing**, [s.l.], p.1173-1176, out. 2008. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/asc-icsc.2008.4675544.

MAXON MOTOR, **Online Catalog**, Disponível em <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog/>, 2014.

Metas **La Guía Metas – El Manómetro de Bourdon** Disponível em <http://www.metas.com.mx/guiametas.html> 2015.

MOSER, Diogo Rodrigo. **Automação do Teste de Vida de Compressores Herméticos**. 2011. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SABLATNIG, Robert; KROPATSCH, W.g. Automatic reading of analog display instruments. **Proceedings Of 12th International Conference On Pattern Recognition**, [s.l.], v. 1, p.794-797, 1994. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/icpr.1994.576447.

SABLATNIG, Robert; HANSEN, C. Machine vision for automatic calibration of analog display instruments. **Machine Vision Applications In Industrial Inspection Iii**, [s.l.], p.356-366, 27 mar. 1995. SPIE-Intl Soc Optical Eng. DOI: 10.1117/12.205522.

STEINMEYER, **Online Catalog**, Disponível em http://feinmess-suhl.com/fileadmin/images/download/2013/FMS_Katalog_2013_Praezisionsmesssysteme.pdf, acessado em fevereiro de 2015.

RICOLFE-VIALA, Carlos; SÁNCHEZ-SALMERÓN, Antonio-josé. Robust metric calibration of non-linear camera lens distortion. **Pattern Recognition**, [s.l.], v. 43, n. 4, p.1688-1699, abr. 2010. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.patcog.2009.10.003.

APÊNDICE A – INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO

Resolução é a menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente (INMETRO, 2012).

Resolução do sistema de visão de máquina é a grandeza física que pode ser representada pela diferença entre dois pixels adjacentes (FISHER *et al.*, 2014). Neste trabalho a grandeza física representada é a pressão.

A fim de obter a menor variação da indicação de pressão que o sistema de visão de máquina pode identificar, realizam-se ensaios. Esses são comparados com a resolução obtida através do método analítico, no qual se utiliza a relação pixel/mm do sistema de visão de máquina nas configurações ensaiadas.

Para obter a resolução através de ensaios, é preciso determinar os pontos de leitura que serão adotados. Como a resolução, teoricamente, não varia com a posição do ponteiro do manômetro quando o mesmo está sobre o eixo ótico, adotam as regiões em torno dos pontos 2, 5 e 7, para realizar a leitura, pois, nessas, o ponteiro está na vertical, horizontal e próximo à 45° em relação ao eixo de coordenadas.

Para os ensaios utilizam-se o manômetro concêntrico ao eixo ótico, a fim de reduzir os efeitos das distorções de lente e de perspectiva. Os manômetros são ensaiados nas seguintes distâncias de trabalho: (56,5; 84,5; 113; 124 e 132) mm. Além dessas, utiliza-se a configuração $(m_{11})_{2 \times 3 \text{calota}}$, pois essa utiliza conceitos que visam reduzir a distorção da lente, distorção de perspectiva e projeção 2-D. Dessa forma, nessas configurações a resolução é a principal fonte de incerteza das leituras dessas configurações.

Os ensaios são realizados da seguinte maneira: primeiro ajusta-se a distância de trabalho de acordo com a quantidade de manômetros que serão lidos simultaneamente. Em seguida, realizasse o alinhamento entre os planos do manômetro e do sistema de captura de imagem. No caso da configuração $(m_{11})_{2 \times 3 \text{calota}}$ é ainda preciso girar a câmera em torno dos eixos x e y até posicioná-lo corretamente no painel em calota.

Após posicionar o manômetro aplica-se uma pequena variação de pressão utilizando a balança equalizadora de pressão, até que o sistema de visão de máquina seja capaz de identificá-la.

Para definir a resolução através do método analítico deve-se encontrar a relação pixel/mm da imagem. Para isso, convertem-se as

dimensões do instrumento¹¹; como o diâmetro do anel do manômetro, o comprimento do ponteiro e a abertura do arco das marcações de escalas; para a imagem, a fim de converter a variação de um pixel em pressão. Os resultados experimental e analítico são apresentados na tabela A.1, de acordo com a configuração ensaiada.

Tabela A.1 – Resolução obtida através dos ensaios

Configuração	Experimental [mbar]	Analítico [mbar]
$(m_{ct})_{56,5}$	(±9)	(±12)
$(m_{ct})_{84,5}$	(±18)	(±17)
$(m_{ct})_{113}$	(±17)	(±23)
$(m_{ct})_{124}$	(±33,5)	(±25)
$(m_{ct})_{132}$	(±34,5)	(±27)
$(m_{11})_{23calota}$ ¹²	(±35,5)	(±27)

Nota-se, pelos resultados, que as resoluções analítica e experimental são muito próximas. Entretanto, a resolução analítica apresenta comportamento linear em relação à distância de trabalho, enquanto que a experimental apresenta, na maior parte do tempo, um aumento da resolução, em proporções diferentes de acordo com o valor de dw .

Isso pode ser explicado pela capacidade do algoritmo em identificar a variação de um pixel na imagem, o que ocorre facilmente para distâncias menores. Entretanto com o aumento da distância de trabalho e devido à estratégia adotada para identificar a posição do ponteiro e as escalas, o algoritmo perde a capacidade de identificar a variação de 1 pixel, fazendo com que a resolução experimental piore numa proporção maior em relação à resolução analítica.

¹¹ Os valores utilizados no método analítico são obtidos através, ou da norma ABNT NBR14105-1:2011 (ABNT, 2011), ou de medições realizadas no laboratório.

¹² Deve-se destacar que diferentemente das demais configurações, nas leituras obtidas na configuração (m11)2x3 calota houve variação da resolução de acordo com a posição do ponteiro. Isso se deve à existência de distorções resultantes da lente. Apesar disso, a variação da resolução foi pequena, e não ultrapassou 7 mbar.

APÊNDICE B – INFLUÊNCIA DA TENDÊNCIA INSTRUMENTAL

Tendência instrumental é a diferença entre a média de repetidas indicações e um valor de referência (INMETRO, 2012). À luz do exposto tem-se que a soma dos efeitos de distorção de perspectiva e projeção 2-D do manômetro geram paralaxe que é uma das componentes da tendência.

Sendo assim, no presente trabalho, a tendência pode ser gerada das seguintes formas: pelo ângulo de desalinhamento entre os planos do sistema de captura de imagem e do manômetro; e pela posição do manômetro sobre o plano do painel plano.

B.1 – TENDÊNCIA DEVIDO AO ERRO DE ALINHAMENTO

O desalinhamento entre o manômetro e o sistema ótico pode gerar erros de medição, cuja causa é a paralaxe formada pela combinação da distorção de perspectiva e da projeção 2-D.

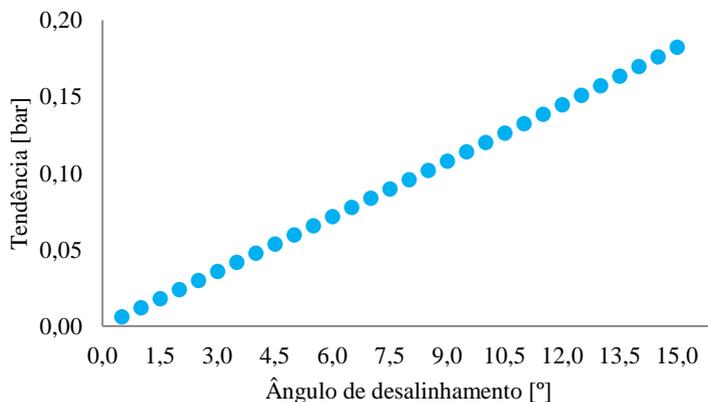
A fim de avaliar os efeitos da paralaxe realiza-se o equacionamento da curva de tendência devido ao desalinhamento entre o plano do objeto e o plano da imagem. Para isso utiliza-se o modelo de projeção 2-D em perspectiva representada pela equação B.1.

$$T_{des.} = (\tan \theta \cdot h) \cdot \left(\frac{pixel}{mm} \right) \cdot \left(\frac{bar}{pixel} \right) \quad B.1$$

onde,	$T_{des.}$:	é a tendência devido ao desalinhamento	[bar]
	θ :	é o ângulo de desalinhamento	[rad.]
	h :	é altura do ponteiro em relação ao plano das escalas	[mm]
	$\left(\frac{pixel}{mm} \right)$:	é a relação pixel/mm	[pixel/mm]
	$\left(\frac{bar}{pixel} \right)$:	é a resolução do sistema de visão de máquina	[bar/pixel]

Os resultados obtidos pela equação B.1., cuja distância h adotada foi de 2,5 mm, são ilustrados pelo gráfico B.1.

Gráfico B.1 – Tendência devido ao desalinhamento entre câmera e manômetro



O valor da tendência para um desalinhamento de 6° , de acordo com o gráfico B1, é de aproximadamente 70 mbar. Ao se comparar esse resultado com os obtidos experimentalmente no item 4.6, nota-se que eles estão bem próximos. Isso mostra que a tendência obtida nas medições dos manômetros desalinhados é causada principalmente pela paralaxe.

A partir dos resultados de leitura, nota-se um aumento na incerteza de medição. Para desalinhamentos, cujo valor do ângulo está acima de 6° , não é mais possível realizar as leituras de indicação.

Isso pode ser explicado pelas distorções de lente e de perspectiva, que não são corrigidas pelo processo de calibração da câmera, pois a posição do gabarito de calibração da câmera não condiz com condições do ensaio de desalinhamento. Isso adiciona incertezas nas identificações das marcações da escala e da posição do ponteiro, ocasionadas pela variação da forma e da dimensão do instrumento.

Para casos extremos de distorções de lente e de perspectiva, não é possível realizar a leitura. Nesses, a região de interesse da imagem não pode ser obtida, pois as dimensões e formas dos parâmetros de identificação estão fora de suas tolerâncias.

B.2 – TENDÊNCIA DEVIDO À POSIÇÃO NO PAINEL

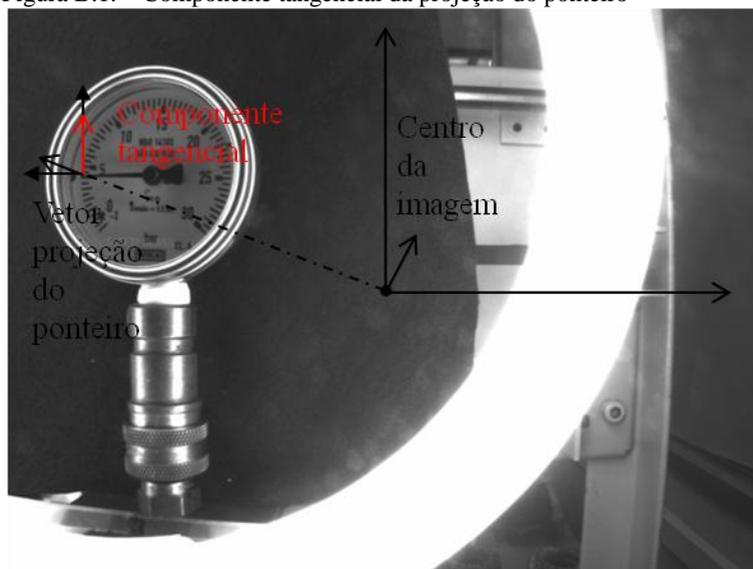
Ao deslocar o manômetro sobre o plano dos painéis planos tem-se que a distorção de perspectiva e da projeção 2-D, que somados geram paralaxe, cuja consequência é a formação de uma tendência.

Essa varia de acordo com a projeção 2-D do ponteiro sobre o plano das marcações de escala, de acordo com a posição do manômetro no painel – distância do centro do manômetro ao eixo ótico –; e a direção e o sentido do ponteiro.

A fim de analisar a paralaxe com os resultados dos ensaios para avaliação da quantidade de manômetros lidos numa mesma imagem – descritos no item 4.8 – criou-se um modelo matemático (teórico) para determinar a tendência de maneira analítica gerada pela posição do ponteiro.

Para obter os efeitos de paralaxe, utiliza-se o modelo de projeção 2-D em perspectiva, de acordo com as hipóteses: as marcações da escala são equidistantes ao centro e concêntricas ao eixo de rotação do ponteiro; o erro de paralaxe é dado apenas pela componente tangencial à trajetória do ponteiro, como mostra a figura B.1.; e a altura h é constante, independente de sua posição.

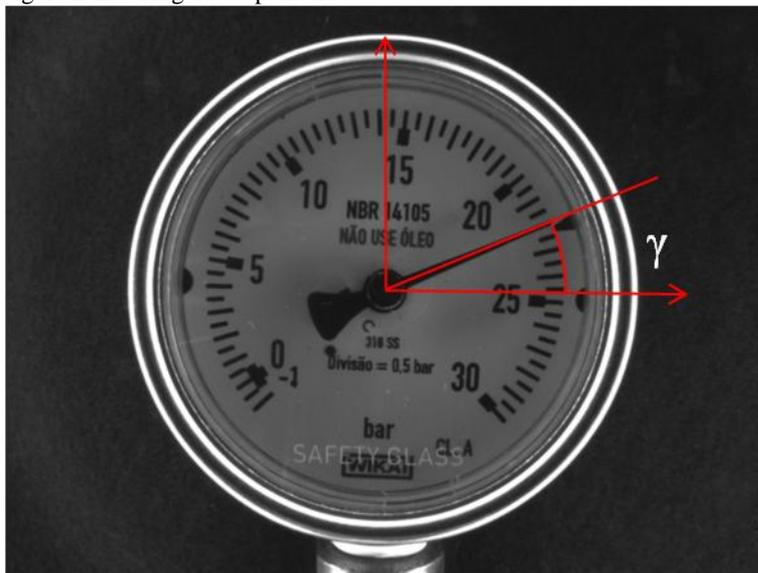
Figura B.1. – Componente tangencial da projeção do ponteiro



Fonte: Autor

Tem-se que o ângulo em relação aos eixos de coordenada situado no centro do manômetro que o ponteiro assume para cada indicação é denotado de γ , como ilustra a figura B.2.

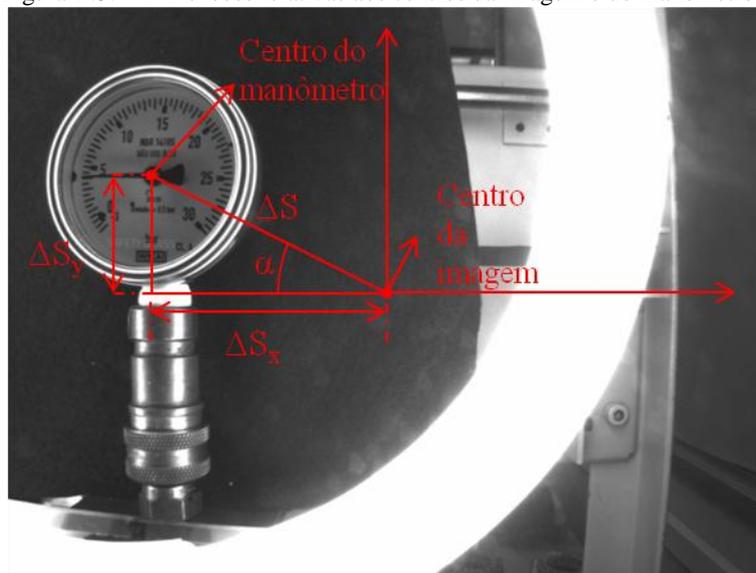
Figura B.2. – Ângulo do ponteiro



Fonte: Autor

Além do ângulo γ , deve-se definir parâmetros relacionados aos centros da imagem e do manômetro, que são: ΔS que é a distância entre os centros, cujo valor é obtido através da raiz quadrada da soma dos quadrados de ΔS_x e ΔS_y , que representam deslocamento do manômetro sobre os eixos x e y respectivamente. E, por fim, defini-se o ângulo em relação ao centro da imagem gerado pela translação do manômetro, que é definido por α . Todos os parâmetros explicados acima são ilustrados pela figura B.3.

Figura B.3. – Dimensões relativas aos centros da imagem e do manômetro



Fonte: Autor

Assim sendo, pode-se aplicar o modelo teórico representado pela equação B.2. aos manômetros, independente de sua posição sobre o painel, desde que os critérios de simetria¹³ sejam obedecidos.

$$T_{pos.} = \cos(90 + \gamma + \alpha) \cdot h \cdot \frac{\Delta S}{dw} \quad \text{B.2}$$

onde,	$T_{pos.}$:	tendência devido ao desalinhamento	[mm]
	γ :	ângulo do ponteiro devido à indicação	[rad.]
	α :	ângulo entre os centros da imagem e do manômetro	[rad.]
	dw :	distância de trabalho	[mm]
	h :	altura do ponteiro em relação ao plano da escala	[mm]
	ΔS :	distância do centro da imagem à extremidade do ponteiro do manômetro	[mm]

¹³ Para um mesmo painel, nota-se que há simetria entre as diferentes posições, que é dada quando a distância relativa do centro do manômetro ao centro da imagem é mantida para as diferentes posições. Além disso, deve-se observar a distância, a direção e o sentido do ponteiro em relação ao centro da imagem.

$$\Delta S = \left\{ [\Delta S_x - r_p \cdot \cos \gamma]^2 + [\Delta S_y - r_p \cdot \sin \gamma]^2 \right\}^{1/2} \quad \text{B.3.}$$

onde,	ΔS :	distância do centro da imagem à extremidade do ponteiro do manômetro	[mm]
	ΔS_x :	distância do centro da imagem ao centro do manômetro no eixo x no plano da imagem	[mm]
	ΔS_y :	distância do centro da imagem ao centro do manômetro no eixo y plano da imagem	[mm]
	r_p :	raio do ponteiro	[mm]
	γ :	é o ângulo do ponteiro assume para uma dada indicação	[rad.]

As tendências obtidas em mm são convertidas em pixel por meio da relação de equivalência de 1 mm na imagem. Esse valor é convertido em pressão (bar) a partir da correlação do comprimento do intervalo de medição da imagem (pixel) e a amplitude de medição do manômetro. Os valores de tendência devido à posição do manômetro no painel obtidos em bar por meio dos métodos analíticos são comparados com os dados experimentais através dos gráficos B2, B3, B4 e B5.

Gráfico B.2 – Tendências configuração $(m_{11})_{1 \times 2}$

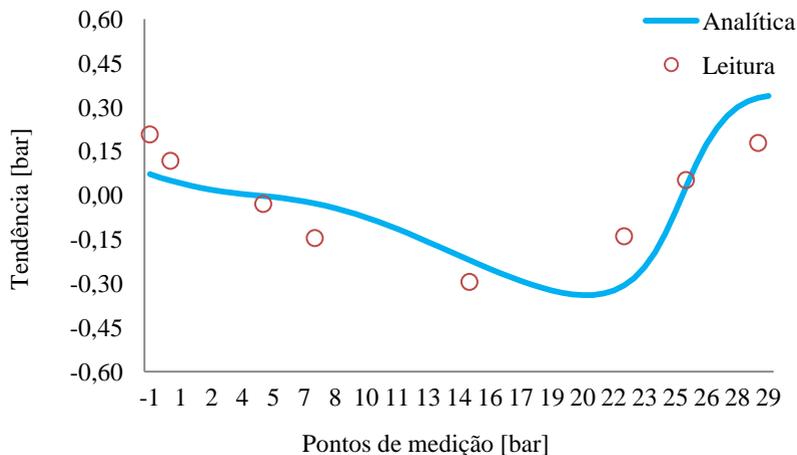


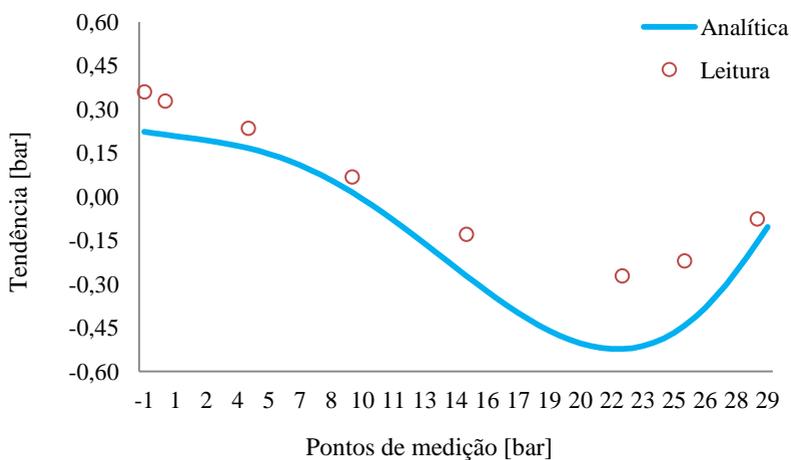
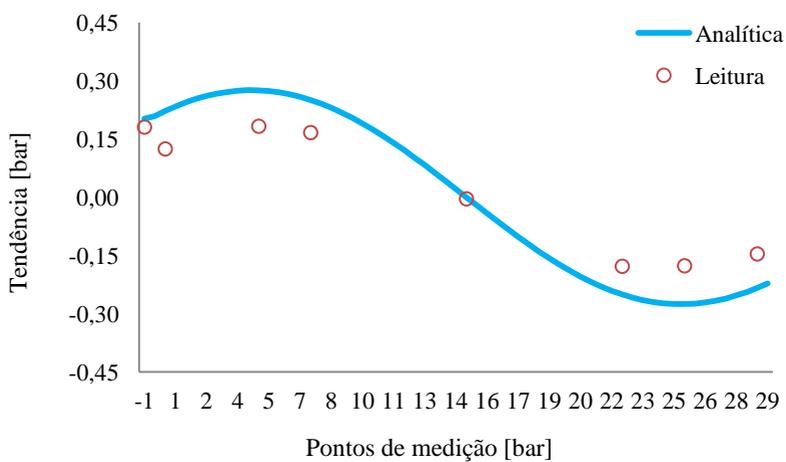
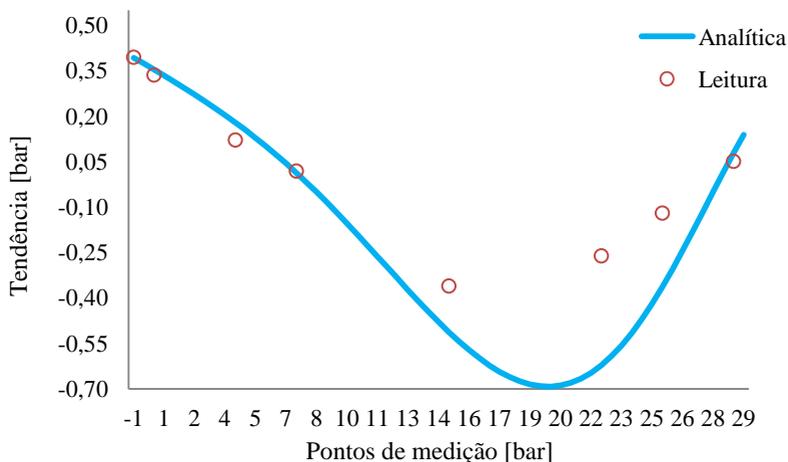
Gráfico B.3 – Tendências configuração $(m_{11})_{2 \times 2}$ Gráfico B.4 – Tendências configuração $(m_{12})_{2 \times 3}$ 

Gráfico B5 – Tendências configuração $(m_{11})_{2 \times 3}$ 

A análise dos gráficos permite afirmar que a paralaxe é a principal componente da tendência quando são realizadas leituras nas quais existem mais de um manômetro na mesma imagem.

A diferença entre os resultados analítico e experimental são causadas pelo modelo matemático, que não é capaz de compensar as não idealidades construtivas do manômetro, cuja variação da altura do ponteiro em relação ao plano das marcações da escala é a variável crítica.

Sendo assim é possível ajustar a curva teórica compensando a diferença da altura h de acordo com a inclinação do plano das marcações da escala. Entretanto seria necessário aplicar esse método para cada manômetro, uma vez que a variação da altura h é diferente para diferentes manômetros, o que tornaria o processo inviável.

APÊNDICE C – ESTIMATIVA DA INCERTEZA

Para realizar a estimativa de incerteza de acordo com a parcela aleatória do processo de medição é preciso assumir que as parcelas sistemáticas podem ser corrigidas.

Para isso adotam-se algumas hipóteses:

- tendências relacionadas à deformação da imagem da escala são minimizadas pelo processo de calibração de câmera e pela estratégia de leitura do algoritmo; e
- a parcela sistemática do erro relativa à paralaxe pode ser compensada utilizando as curvas de tendência, obtidas através do método analítico, apresentados no APÊNDICE B.

Para realizar a estimativa de incerteza deve-se obter a função de medição f utilizada para realizar a leitura do manômetro. A função posição relativa local entre marcações vizinhas do intervalo de medição representada pela equação 4, realiza a contagem das escalas existentes antes da posição atual do ponteiro, a fim de obter o valor indicado e definir entre quais marcações vizinhas o ponteiro se encontra e utilizá-las como o intervalo de interpolação, ou seja, a indicação nesse método é dada pela contagem das escalas anteriores ao ponteiro mais o valor obtido através da posição relativa do ponteiro entre as marcações vizinhas ao mesmo.

$$I = \left\{ \left[(N - 1) + \left(\frac{P_p - E_a}{E_p - E_a} \right) \right] \cdot D_e \right\} + V \quad 4$$

onde, I :	é a indicação obtida na leitura	[bar]
N :	é o número de escalas encontradas antes do ponteiro	
P_p :	é a posição do ponteiro na imagem	[pixel]
E_p :	é a posição da escala posterior ao ponteiro	[pixel]
E_a :	é a posição da escala anterior ao ponteiro	[pixel]
D_e :	é a menor divisão de escala do manômetro	[bar]
V :	é a menor indicação do manômetro	[bar]

Para obter os valores de indicação é preciso definir: o número N de marcações; o intervalo entre duas marcações ($E_p - E_a$); e a posição do ponteiro em relação ao intervalo entre duas marcações ($P_p - E_a$).

Primeiro define-se o intervalo, em pixel, entre duas marcações ($E_p - E_a$ re), que é obtido pela conversão da pressão apresentada pelo intervalo entre escalas (D_e) e a resolução de um pixel do sistema de medição obtida experimentalmente no Apêndice A.

Em seguida, define-se o número de marcações (N) existentes até a posição do ponteiro. Para isso, utilizam-se os resultados dos ensaios realizados nos itens 4.7 e 4.8. Após definir o número N de escalas, é determinada a posição do ponteiro dentro do intervalo entre duas marcações ($P_p - E_a$). Sendo assim, é preciso definir qual o valor de pressão é representado pela posição do ponteiro entre duas marcações de escala. Para determinar esse valor, subtrai-se a indicação de pressão obtidas nos ensaios (I), da parcela representada pelo número de escalas ($(N-1) \cdot D_e$). Esse valor é então convertido em pixel através da resolução do sistema, obtida no Apêndice A, relativa a um pixel. Dessa forma, a posição do ponteiro no intervalo é definida.

Sendo assim, as fontes de incertezas relacionadas ao sistema de medição são as componentes aleatórias provenientes da obtenção das marcações da escala e da posição do ponteiro, os quais são dependentes da análise da imagem.

Além disso, para identificação da posição do ponteiro leva-se em conta na composição da estimativa de incertezas o desalinhamento e a distância entre o plano do ponteiro e o plano das marcações da escala. Ademais a distância do centro de rotação do ponteiro e o centro das marcações da escala fazem parte dessa composição.

Utilizado o sistema de visão de máquina, obtiveram-se, experimentalmente, as incertezas, que são essencialmente da parcela aleatória do processo de medição. Esses dados foram utilizados para estimar a incerteza de leitura através do método Monte Carlo (JCGM, 2008).

Para estimar as incertezas simula-se a localização do ponteiro e das escalas, bem como os parâmetros da posição e alinhamento na equação 4. O resultado dessa simulação é ilustrado através da tabela C1.

Tabela C.1 – Incerteza do sistema de visão de máquina método Monte Carlo

Painel	Configurações	Incerteza estimada [mbar]	Incerteza instrumental [mbar]
Plano – 1 manômetro	$(m_{ct})_{56,5}$	(± 14)	(± 32)
Plano – 2 manômetros	$(m_{ct})_{84,5}$	(± 33)	(± 48)
	$(m_{11})_{12}$	(± 58)	(± 74)
Plano – 4 manômetros	$(m_{ct})_{113}$	(± 39)	(± 87)
	$(m_{11})_{22}$	(± 51)	(± 113)
Plano – 6 manômetros	$(m_{ct})_{124}$	(± 64)	(± 65)
	$(m_{12})_{23}$	(± 125)	(± 53)
	$(m_{11})_{23}$	(± 130)	(± 104)
Calota – 6 manômetros	$(m_{ct})_{132}$	(± 71)	(± 69)
	$(m_{11})_{23calota}$	(± 69)	(± 52)

Nota-se que os valores encontrados apresentam comportamento similar aos determinados experimentalmente, quando são comparadas as configurações de cada painel com as suas respectivas referências, o que permite validar o modelo adotado. Além disso, é possível afirmar que as incertezas obtidas no método experimental são relativas às variáveis aleatórias.

Através da análise dos resultados verificou-se que a variável crítica na estimativa de incerteza é variação da altura entre o ponteiro e o plano das marcações da escala. Além disso, é possível concluir que devido aos valores de incertezas obtidos, o painel em calota sofre menor influência da distorção de lentes, que pode ser observada nas demais configurações que apresentam deslocamento horizontal e vertical.

APÊNDICE D – CONSTRUÇÃO DO GABARITO DE CALIBRAÇÃO DE CÂMERA

As imagens podem sofrer distorções de lente e perspectiva, que poderiam interferir no resultado dos ensaios de duas maneiras. Através de erros da posição do manômetro e do aumento da incerteza de leitura.

A fim de minimizar cada um desses efeitos realiza-se a calibração da câmera, cuja função é encontrar o mapeamento que associe as características entre o objeto no espaço 3-D e o plano da câmera (VIALA E SALMERÓN 2010).

Para isso, pode-se adotar diversos softwares que aplicam a calibração de câmera utilizando parâmetros, que são obtidos através de gabaritos de calibração. Dentre esses parâmetros tem-se: dimensão, forma, distância entre elementos e valores da escala de cinza.

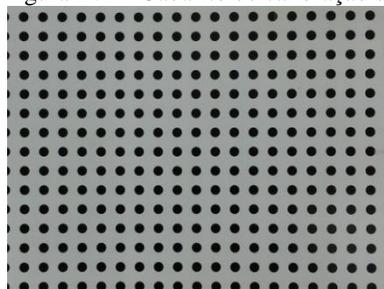
O procedimento de calibração consiste em primeiramente obter no mínimo seis pontos com posições conhecidas no sistema de coordenadas globais (GONZALES E WOODS, 2010). Dessa forma, definiu-se como seis o número mínimo de pontos que deveriam ser utilizados na construção do gabarito.

Para definir a forma utilizou-se como condição de contorno o gabarito adotado pelo programa no qual foi desenvolvido o algoritmo de leitura que no caso foi o LabView. Esse utiliza círculos para realizar a calibração de câmera.

Utilizando no mínimo seis pontos avaliou-se diferentes configurações de gabaritos de calibração da câmera, nos quais se variaram dimensão e distância dos pontos adotados. Através dos resultados da calibração chegou-se a três gabaritos para realizar o processo.

Para ajustar a imagem antes de realizar o alinhamento entre o plano do manômetro e o plano do sistema de captura de imagem, ou, o deslocamento horizontal e vertical utiliza-se o gabarito 1, ilustrado pela figura D.1.a. Enquanto que para reduzir os efeitos das distorções sobre a obtenção da indicação do manômetro utilizam-se os gabaritos 2 e 3, ilustrados respectivamente pelas figuras D.1.b e D.1.c.

Figura D.1 – Gabarito de calibração da câmera



a. Gabarito 1



b. Gabarito 2



c. Gabarito 3

Os gabaritos foram impressos em papel *couchet* fosco para minimizar os reflexos, melhorar a exatidão dos círculos e garantir-lhes melhor nitidez. Além disso, o gabarito 1 foi colado sobre um retângulo de acrílico para lhe garantir rigidez e planicidade, enquanto que os gabaritos 2 e 3 foram colados sobre o plano das marcações de escala do manômetro concêntricas ao eixo de rotação do ponteiro, a fim de reduzir a distorção gerada pela composição entre o visor do manômetro e lente.

Para posicionar o gabarito 1 e garantir o seu paralelismo em relação ao visor do manômetro foram construídos suportes para manter a placa de acrílico na posição correta. Para os gabaritos 2 e 3 é utilizado a mesma estratégia de posicionamento dos manômetros no qual são utilizados como suportes engates rápido.

A fim de quantificar as incertezas do processo de leitura, realizou-se medições dos círculos existentes nos gabaritos, cujos valores são ilustrados na tabela D.1. Para isso utiliza-se o microscópio ótico disponível no laboratório de ótica do Labmetro. Esses valores foram utilizados na estimativa de incerteza e na determinação da resolução do sistema de medição.

Tabela D.1 – Dimensões dos gabaritos de calibração

Dimensões	Gabaritos 1 e 2	Gabarito 3
Diâmetro	$(5,071 \pm 0,026)$ mm	$(2,500 \pm 0,019)$ mm
Distância	$(10,139 \pm 0,028)$ mm	$(4,998 \pm 0,022)$ mm

O gabarito 1 mostrou resultados satisfatórios para as diferentes distâncias de trabalho e foi utilizada para ajustar as distorções de lentes para todos os ensaios. Já o gabarito 2 mostrou resultados satisfatórios para a maioria das configurações, quando não obteve-se o resultado desejado utilizou-se o gabarito 3. As configurações e seus respectivos gabaritos utilizados são ilustrados pelo quadro D.1.

Quadro D.1 – Gabaritos aplicados

Painel	Configurações	Gabarito 2	Gabarito 3
Plano – 1 manômetro	$(m_{ct})_{56,5}$	X	
Plano – 2 manômetros	$(m_{ct})_{84,5}$	X	
	$(m_{11})_{12}$	X	
Plano – 4 manômetros	$(m_{ct})_{113}$	X	
	$(m_{11})_{22}$	X	
Plano – 6 manômetros	$(m_{ct})_{124}$		X
	$(m_{12})_{23}$		X
	$(m_{11})_{23}$		X
Calota – 6 manômetros	$(m_{ct})_{132}$	X	
	$(m_{11})_{23calota}$	X	

APÊNDICE E – CONSTRUÇÃO DO GABARITO DE ALINHAMENTO

Para realizar o alinhamento entre os planos do manômetro e do sistema de captura de imagem, utiliza-se um gabarito na qual existem marcações no formato de círculos. Essas são utilizadas para determinar a distância entre o centro do gabarito até duas marcações equidistantes. Quando a diferença entre essas distâncias estiverem dentro de uma tolerância de 0,05 pixel, que é o menor valor que o algoritmo é capaz de determinar, elas são consideradas alinhadas.

Sendo assim, para avaliar erros devido ao desalinhamento provocados pelas incertezas oriundas do gabarito devem-se obter os diâmetros das marcações existentes no gabarito. Os valores medidos através do microscópio ótico disponível no laboratório de ótica do Labmetro, são ilustrados pela tabela E.1.

Tabela E.1 – Dimensão do círculo

Diâmetro	$(5,109 \pm 0,023)$ mm
----------	------------------------

Utilizando as incertezas do diâmetro do círculo e os dados de calibração da câmera, pode-se estimar a incerteza da medição da diferença entre as distâncias entre o centro do gabarito e as marcações equidistantes, cujos valores encontrados são ilustrados pela tabela E.2.

Tabela E.2 – Incerteza da diferença entre as distâncias

Distância de trabalho [mm]	Incerteza estimada [pixel]	Incerteza estimada [mm]
56,5	$(\pm 0,06)$	$(\pm 0,005)$
84,5	$(\pm 0,06)$	$(\pm 0,007)$
113	$(\pm 0,06)$	$(\pm 0,010)$
124	$(\pm 0,07)$	$(\pm 0,013)$
132	$(\pm 0,06)$	$(\pm 0,011)$

Esses resultados foram utilizados na estimativa de incerteza do ângulo de desalinhamento da bancada.