

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ÓPTICO
POR TRIANGULAÇÃO CÔNICA PARA
INSPEÇÃO DO PERFIL INTERNO DE DUTOS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para
obtenção do grau de Mestre em Metrologia

Pedro de Deus Vieira Buschinelli

Florianópolis, 17 de maio de 2007

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ÓPTICO POR TRIANGULAÇÃO CÔNICA PARA INSPEÇÃO DO PERFIL INTERNO DE DUTOS

Pedro de Deus Vieira Buschinelli

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
“MESTRE EM METROLOGIA”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.
ORIENTADOR

Profa. Analucia Vieira Fantin Pezzotta, Dra. Eng.
CO-ORIENTADORA

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.
COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Antonio Carlos Zimmermann, Dr. Eng. (UFSC)
Presidente

Prof. Celso Luiz Nickel Veiga, Dr. Eng. (UFSC)

Eng. Claudio Soligo Camerini, M. SC. (CENPES/PETROBRAS)

Prof. Matias Roberto Viotti, Dr. Ing. (UFSC)

Dedicatória:
Dedico este trabalho a meus pais, que me auxiliaram e motivaram nos dias difíceis.

Agradecimentos a:

*Prof. Armando Albertazzi
pela orientação, paciência e motivação.*

*Co-orientadora Analucia Pezzotta
pelas dicas e ajuda com os algoritmos matemáticos.*

*Allan Hofmann, ex-mestrando do Pós-MCI,
por sua humildade, paciência e grande ajuda durante todo o projeto*

*Thiago Costa Pinto, doutorando do Pós-MCI
pelas ajudas com LabView, e também pelas
dicas e auxílio em metrologia óptica.*

*Fabrcio Broering, técnico do laboratório de óptica
pela grande ajuda na montagem de experimentos.*

*Rosana, secretária do LabMetro
pelo bom humor, auxílio na compra de equipamentos e
resolução de problemas burocráticos.*

*Wagner e Sunada, LMP da UFSC
pela fabricação do espelho cônico e
ajuda no acabamento do acrílico.*

*Dionísio e Fernando, ferramenteiros da Certi
pelo auxílio com os serviços de fabricação.*

*Thiago Freitas, Ricardo Gondo,
Ricardo Donada e Felipe Longo; estagiários do Projeto
pelo empenho e prontidão.*

*ANP através do PRH34
pelo apoio financeiro.*

RESUMO

Garantir a integridade da rede de dutos de transporte e distribuição é um fator de extrema importância na indústria do petróleo e gás (P&G). Para tal, são utilizadas sofisticadas ferramentas robotizadas de inspeção *in-line* (durante operação) conhecidas como *pigs*. No Brasil existem esforços por parte da Petrobras para o desenvolvimento de *pigs* com tecnologia nacional, tendo em vista que existem mais de 30 mil quilômetros de dutos espalhados somente em território brasileiro. Novas formas de inspeção vêm sendo desenvolvidas no mundo, sendo a óptica uma delas, a qual possui vantagens como custo reduzido, elevada velocidade, alta resolução e pequena incerteza de medição.

Este trabalho apresenta, desenvolve e avalia uma nova concepção de sensor óptico apropriado para medir o perfil interno de seções de dutos. O sistema se baseia na triangulação através de espelhos cônicos (que nesse trabalho nomeia-se de triangulação cônica), o que permite a medição absoluta de todo o perímetro da seção (360°) sem partes móveis/giratórias e a partir da análise de uma única imagem. A qual é então processada pelo *software*, que fornece o resultado de medição de forma gráfica, representando de maneira clara a secção da superfície interna do duto medida.

No instrumento construído e testado em laboratório, algumas limitações inerentes ao atual estágio de protótipo ficaram evidentes nos experimentos. Apesar disso, os resultados atingidos são altamente promissores e satisfatórios para a aplicação almejada.

ABSTRACT

It is extremely important to guarantee the integrity of the transmission and distribution pipelines net in the Oil and Gas industry (O&G). Sophisticated robotized equipments, known as pigs, are used to perform in-line inspection inside the pipe. Because of the existence of about 30 thousand kilometers of pipelines in the Brazilian territory, it's quite understandable that a great effort has been made, in special with the support from Petrobras, in order to develop pigs with national technology. Among the new kinds of inspection technologies that have been developed around the world, optical techniques have advantageous features like low cost, high speed, high resolution and small uncertainty.

This work is concerned with the development and evaluation of a new kind of optical sensor adequate to measure the inside geometry of pipelines. The system is based on the principle of laser triangulation with conical mirrors (in this work named as conical triangulation). This concept allows the measurement of the whole perimeter (360°) of one section of the pipe, without any movable components, and by analyzing just one image. The *software* processes this image and returns the measurement result as a graphics, clearly representing the geometry of the internal section of the pipe.

The laboratory tests carried on the optical pig sensor prototype brought very promising results. Some limitations become evident after controlled experiments and are discussed in this work. They were interpreted as typical for equipments in its initial development stage. However, the results already obtained are satisfactory for the desired application.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Chama após a ruptura de um gasoduto no Novo México – EUA em 2000. Nota-se no canto inferior esquerdo da chama a estrutura de 25 metros de altura da ponte de passagem [1].	22
Figura 2 - Vista da cratera criada pela explosão, a secção que falta entre as setas foi arremessada pela explosão e dividida em três partes [1].	22
Figura 3 – Acidentes com linhas de transporte nos EUA devido à corrosão (1990 a 2006). CE: Corrosão Externa, CI: Corrosão Interna [2].	25
Figura 4 – Percentual devido a corrosão do total do prejuízo no ano (1990 a 2006) [2].	25
Figura 5 – Princípio de medição MFL: sensor de detecção de perda de material [4].	27
Figura 6 – Princípio de medição MFL: o sensor de discriminação apenas detecta defeitos internos [4].	27
Figura 7 - Um disco (a) com defeitos usinados (b) é utilizado para simular a movimentação do sensor (c) ao longo da superfície [9].	31
Figura 8 – Esquema básico do Optopig [10].	33
Figura 9 – Concepção do módulo da câmera do Optopig [10].	33
Figura 10 – Vista dos sensores do Optopig. (a) Oito câmeras a 45°, (b) laser.	33
Figura 11 – Comparação entre a representação do defeito pelo Optopig e MFL [5].	34
Figura 12 – Esquemático de medição por triangulação laser com plano de luz.	37
Figura 13 – Diagrama de blocos básicos de um sistema de triangulação laser.	37
Figura 14 – Detecção do centro de luminosidade da linha do laser.	39
Figura 15 – Exemplo do uso de filtro <i>threshold</i> .	40
Figura 16 – Esquema do princípio da Triangulação laser (1D).	41
Figura 17 – Técnica de triangulação – semelhança de triângulos.	41
Figura 18 – Exemplo de uma função de calibração polinomial de segundo grau.	43

Figura 19 – O diâmetro do laser define o menor obstáculo a ser medido [13].	44
Figura 20 – Erros de medição devido à forma da superfície [12].	46
Figura 21 – Esquema da tecnologia de medição giratória (Spiral Scan) [18].	47
Figura 22 - Foto do OMC laser <i>Profiler</i> no interior do duto com ilustração da linha do laser [20].	48
Figura 23 – Foto do PIRAT dentro da tubulação [23].	50
Figura 24 – Foto de perfil do PIRAT [22].	50
Figura 25 – Vista em corte do sensor óptico do PIRAT [22].	51
Figura 26 – Esquema da secção do duto demonstrando a faixa de medição e possíveis defeitos.	53
Figura 27 – Sistema de coordenadas polares.	54
Figura 28 – Concepções idealizadas para o projeto.	56
Figura 29 – Reflexão em um espelho cônico [25].	58
Figura 30 – Representação da área útil do CCD.	58
Figura 31 – Esquema em corte do sistema (modelagem 2D).	59
Figura 32 – Modelo do sistema (parâmetros conhecidos em azul).	64
Figura 33 – Função de calibração teórica $R(yp)$ na faixa de medição estipulada.	66
Figura 34 – Curvas ajustadas à função de calibração teórica.	66
Figura 35 – Câmera Scorpion, padrão IEEE-1394.	67
Figura 36 – Lente de comprimento focal de 25 mm.	68
Figura 37 – Foto do laser.	69
Figura 38 – Vista explodida do projeto do sistema de visão.	71
Figura 39 – Vista do sistema de visão montado.	72
Figura 40 – Vista explodida do projeto do sistema dos espelhos.	73
Figura 41 – Vista em corte do projeto do sistema dos espelhos.	73

Figura 42 – Vista explodida de um dos dois suportes do subsistema de iluminação.	74
Figura 43 – Vista em corte do subsistema de iluminação.	74
Figura 44 – Vista em corte do projeto do protótipo com ilustração do plano do laser e duto.....	74
Figura 45 – Projeto final do protótipo.	75
Figura 46 – Foto do protótipo montado.	75
Figura 47 – Fluxograma das etapas realizadas pelo <i>software</i> do protótipo.	77
Figura 48 – Imagem adquirida de um anel do padrão de calibração com 151,68 mm de diâmetro.	79
Figura 49 – Linha remanescente mesmo utilizando filtro <i>threshold</i>	80
Figura 50 – Filtro “Remove Fantasmas”.....	80
Figura 51 – Imagem de um anel e “linhas fantasmas”.	81
Figura 52 – Esquema da análise da imagem (linha de ângulo α em destaque).	82
Figura 53 – Resultado de medição em <i>pixels</i> traçado em dois gráficos.....	84
Figura 54 – Comparação entre os métodos de mínimos quadrados e absolutos no ajuste de melhor círculo.	85
Figura 55 – Perfil da secção medida representado pelo <i>software</i>	86
Figura 56 – Planos focais sagital e tangencial.	88
Figura 57 – Imagens nos planos focais tangencial e sagital.	88
Figura 58 - Imagem obtida da secção A4 do padrão com dois objetos (abertura máxima do diafragma).	89
Figura 59 - Imagem obtida da secção de um anel padrão com dois objetos (abertura mínima do diafragma).	90
Figura 60 – Imagem obtida da secção de um anel padrão com dois objetos após ajuste da espessura da linha do laser com o filtro espacial.....	91
Figura 61 – Bancada de medições.....	92
Figura 62 – Vista isométrica do projeto do padrão de calibração.....	92

Figura 63 – Projeto do padrão de calibração e nome dos anéis.	93
Figura 64 – Filtros utilizados no tratamento da imagem durante a calibração.	94
Figura 65 – Esquema mostrando padrão centrado com o sistema e imagem resultante obtida.	95
Figura 66 – Diagrama de blocos da seqüência de calibração.	96
Figura 67 – Imagem do protótipo e padrão escalonado. Setas indicam deslocamento do padrão escalonado no eixo x e y.	96
Figura 68 – Esquema da calibração realizando deslocamentos no eixo x.	97
Figura 69 – Regiões sensibilizadas da faixa de medição.	97
Figura 70 – Pontos obtidos para cada uma das 26 posições da mesa no eixo x utilizando filtros de imagem específicos para calibração.	99
Figura 71 - Pontos obtidos para cada uma das 26 posições da mesa no eixo x utilizando os filtros normais de medição.	99
Figura 72 – Esquema do cálculo do raio (r) em relação ao deslocamento Δx . Onde s_0 é a posição do centro do sistema; p_0 a posição inicial e p_1 final do centro do padrão.	101
Figura 73 – Raio em milímetros para as 26 posições da mesa.	102
Figura 74 – Pontos de calibração obtidos (em torno de 36 mil).	103
Figura 75 – Curva geral de calibração traçada sobre a nuvem de pontos.	105
Figura 76 – Curvas de calibração das regiões 0° e 180°	106
Figura 77 – Detalhe do início (a) e final (b) das curvas de calibração mostradas na figura 76.	106
Figura 78 – Diagrama de Ishikawa para o processo de medição.	107
Figura 79 – Erro de deslocamento angular.	109
Figura 80 – Erros obtidos com uma curva de calibração geral (filtros de calibração).	110
Figura 81 – Erros obtidos com duas curvas de calibração combinadas (filtros de calibração).	110
Figura 82 – Divisão da área de medição em região 1 e 2, respectivamente afetada e não afetada pelas linhas “fantasmas”.	111

Figura 83 – Erro de medição dividido em regiões 1 e 2.	112
Figura 84 – Esquemático do erro devido à inclinação entre sistema e mensurando.	113
Figura 85 – Gráfico da influência de cada fonte de incerteza analisada (região 1).	116
Figura 86 - Gráfico da influência de cada fonte de incerteza analisada (região 2).	117
Figura 87 – Erro de medição do anel A1b.	118
Figura 88 – Erro de medição do anel A4b.	118
Figura 89 – Erro de medição do anel A3 em três posições distintas em Z.	120
Figura 90 – Projeto do gabarito com algumas cotas (valores em milímetros).	121
Figura 91 – Resultado de medição do gabarito em coordenadas polares (valores em milímetros).	121
Figura 92 – Resultado de medição do gabarito em coordenadas cartesianas.	122
Figura 93 – Erro de medição da chapa.	122
Figura 94 – Vista em corte do resultado de medição 3D das secções A4b à A3 do padrão escalonado (valores em milímetros).	124
Figura 95 - Resultado de medição 3D do gabarito (valores em milímetros).	124
Figura 96 – Protótipo durante a medição de uma das secções do duto.	125
Figura 97 – Detalhe dos defeitos artificiais do duto D1, D3, D5 e D6.	126
Figura 98 - Resultado de medição 3D de uma secção do duto de 16 mm com escala de cores falsas (valores em milímetros).	126
Figura 99 – Visão planifica da medição 3D do duto (escala de cores na figura 98).	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Acidentes com a linha de transporte de gás discriminados por causa nos EUA em 2006 [2].....	24
Tabela 2 – Especificações de um <i>pig</i> MFL da GE (General Electric) [6].....	28
Tabela 3 – Especificações de um <i>pig</i> de ultra-som [3].....	30
Tabela 4 – Características do <i>pig</i> espinho [9].	32
Tabela 5 – Especificações do Optopig [11].	34
Tabela 6 - Comparação entre os métodos de medição de corrosão.....	35
Tabela 7 – Sensor laser (Alta precisão) [21].	48
Tabela 8 – Sensor laser (Média precisão) [21].....	48
Tabela 9 – Características do OMC laser <i>Profiler</i> LP 15/50 [20].....	49
Tabela 10 – Característica do PIRAT [22].....	50
Tabela 11 - Comparação entre concepções de STL para medição do perfil interno de dutos.....	55
Tabela 12 – Resolução radial para diferentes CCDs.	60
Tabela 13 – Resolução circunferencial para diferentes CCDs.	61
Tabela 14 – Parâmetros definidos do sensor CCD.	62
Tabela 15 – Parâmetros do projeto.	65
Tabela 16 – Características dos espelhos cônicos.	68
Tabela 17 – Tempos de processamento.	86
Tabela 18 – Resultado de medição do padrão (valores em milímetros).	93
Tabela 19 – Exemplo de raios obtidos em <i>pixels</i>	98
Tabela 20 – Raios calculados em milímetros.....	102
Tabela 21 – Coeficientes da curva de calibração geral, a partir de todos os pontos.	104
Tabela 22 – Coeficientes das duas regiões analisadas.	106

Tabela 23 – Erro em milímetros para as duas calibrações.	111
Tabela 24 – Erro devido à inclinação relativa: sistema/mensurando.....	113
Tabela 25 – Correção do raio do padrão (componente sistemática).....	113
Tabela 26 – Fontes de incerteza do raio do padrão (componentes aleatórias).....	114
Tabela 27 – Fontes de incerteza da mesa micrométrica	114
Tabela 28 – Balanço de incertezas estimadas na calibração (região 1).	115
Tabela 29 - Balanço de incertezas estimadas na calibração (região 2).	116
Tabela 30 – Incerteza expandida obtida para as regiões 1 e 2 da faixa de medição.....	116
Tabela 31 – Resumo do resultado de medição dos 7 anéis. Valores em milímetros.....	118
Tabela 32 – Medições do anel A3 com deslocamentos transversais. Valores em milímetros.....	119
Tabela 33 - Medições do anel A3 com deslocamentos longitudinais (eixo Z). Valores em milímetros.....	120
Tabela 34 – Descrição dos defeitos artificiais no duto (valores em mm).....	126

LISTA DE ABREVIATURAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
CCD	<i>Charge Coupled Device</i> (Dispositivo de Acoplamento de Carga)
CCTV	<i>Closed Circuit Television</i> (Circuito Fechado de Televisão)
CENPES	Centro de Pesquisas da Petrobras
EC	Espelho Cônico
FM	Faixa de medição
LC	Lente Cônica
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MFL	<i>Magnetic Flux Leakage</i> (Fuga de Fluxo Magnético)
MMC	Máquina de Medir por Coordenadas
OMC	<i>Optical Metrology Center</i>
OpenCV	<i>Open Computer Vision Library</i> (Biblioteca Aberta de Computação Visual)
P&G	Petróleo e Gás
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
PHMSA	<i>Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration</i>
PIRAT	<i>Pipe Inspection Real-time Assessment Technique</i> (Técnica de Inspeção e Avaliação de Dutos em tempo Real)
QTT	<i>Quest TruTec</i>
STL	Sistema de Triangulação LASER
VM	Valor Medido
VMM	Valor Medido Médio
VVC	Valor Verdade Convencional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2 A INSPEÇÃO DE DUTOS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS	21
2.1 ACIDENTES COM DUTOS.....	21
2.2 TIPOS DE DEFEITOS	22
2.3 PIGS DE INSPEÇÃO	25
2.3.1 Pig Magnético (MFL).....	27
2.3.2 Pig de Ultra-Som.....	28
2.3.3 Pig de Contato Mecânico	30
2.3.4 Pig Óptico	32
2.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS	34
3 MEDIÇÃO POR TRIANGULAÇÃO LASER	36
3.1 PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO	36
3.1.1 Emissor	38
3.1.2 Detecção.....	38
3.1.3 Processamento	38
3.2 MODELO MATEMÁTICO.....	40
3.3 CALIBRAÇÃO	42
3.3.1 Calibração da Profundidade (Z).....	42
3.3.2 Calibração da Largura (Y).....	43
3.3.3 Calibração do Comprimento (X).....	43
3.4 PRINCIPAIS FONTES DE INCERTEZA	43
3.4.1 Fonte de laser	44
3.4.2 Características do Mensurando	45
3.5 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DUTOS POR TRIANGULAÇÃO LASER	46
3.5.1 QTT (Quest TruTec) Laser Spiral Scan	46
3.5.2 Sensor Laser da OMC	47
3.5.3 PIRAT (<i>Pipe Inspection Real-time Assessment Technique</i>)	49
4 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	52

4.1 REQUISITOS TÉCNICOS E FUNCIONAIS	52
4.1.1 Características Técnicas.....	52
4.1.2 Sistema de Coordenadas.....	54
4.2 DEFINIÇÃO E ESCOLHA DA CONCEPÇÃO	54
4.3 MODELAGEM DO SISTEMA.....	57
4.3.1 Geração do Plano de Laser	57
4.3.2 Definição da Área Útil do CCD.....	57
4.3.3 Modelo 2D.....	58
4.3.4 Resolução Radial (profundidade).....	59
4.3.5 Resolução Circunferencial	60
4.3.6 Definição da Resolução do CCD	61
4.3.7 Modelagem Matemática.....	62
4.4 COMPONENTES	66
4.4.1 Câmera	67
4.4.2 Lente Objetiva.....	67
4.4.3 Espelhos Cônicos (EC's)	68
4.4.4 Laser	68
4.4.5 Tubo de Acrílico	69
4.4.6 Computador	70
4.5 PROJETO MECÂNICO	70
4.5.1 Sistema de Visão	70
4.5.2 Sistema de Espelhos	72
4.5.3 Sistema de Iluminação.....	73
4.5.4 Projeto Completo	74
4.6 MONTAGEM.....	75
5 SOFTWARE DE MEDIÇÃO	76
5.1 ESTRUTURAÇÃO	76
5.2 IMPLEMENTAÇÃO	77
5.2.1 Aquisição	78
5.2.2 Filtragem da Imagem	79
5.2.3 Cálculo dos Raios em <i>Pixels</i>	82
5.2.4 Cálculo do Resultado de Medição	84
5.2.5 Correção da Translação.....	84
5.2.6 Filtragem dos Pontos Calculados	85
5.2.7 Visualização do Resultado Final de Medição.....	85

5.2.8 Tempos de Processamento	86
6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	87
6.1 AJUSTES DO SISTEMA.....	87
6.1.1 Ajustes relacionados à Imagem	87
6.1.2 Ajuste da Linha do Laser	90
6.2 BANCADA DE CALIBRAÇÃO.....	91
6.3 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO.....	93
6.3.1 Alinhamento do Sistema	94
6.3.2 Calibração com Secções Circulares	95
6.3.3 Calibração com Mesa Micrométrica e um Padrão Circular	95
6.4 AVALIAÇÃO DE INCERTEZA.....	106
6.4.1 Fontes de Incerteza de Maior Influência	108
6.4.2 Balanço das Incertezas Estimadas na Calibração	114
6.5 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO.....	117
6.5.1 Medição de Anéis do Padrão Escalonado	117
6.5.2 Medição de Gabarito.....	120
6.5.3 Medição de Duto com Defeitos Artificiais.....	122
6.6 MEDIÇÃO 3D A PARTIR DA CONCATENAÇÃO DE SECÇÕES SEQUENCIALMENTE MEDIDAS	123
6.6.1 Medição 3D do Padrão Escalonado.....	123
6.6.2 Medição 3D do Gabarito	124
6.6.3 Medição 3D de Duto com Defeitos Artificiais	124
7 CONCLUSÕES	128
7.1 PRINCÍPIO/TECNOLOGIA	128
7.2 PROTÓTIPO.....	128
7.3 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	130
REFERÊNCIAS.....	132

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

O transporte e a distribuição do gás natural, petróleo e derivados (P&G) é feito, em sua grande parte, por dutos metálicos que operam dia e noite incessantemente interligando regiões produtoras, unidades de refino e consumidores. Esses dutos podem ser aéreos, subterrâneos ou marítimos, enfrentando as mais diversas ações do meio e do próprio insumo sobre sua estrutura.

Além de ser a maneira mais segura e econômica de transporte de P&G, os dutos contribuem também para aumentar a segurança nas estradas e diminuir a poluição causada pelo tráfego pesado dos caminhões: só o oleoduto que interliga São Sebastião ao Planalto Paulista, por exemplo, possibilita retirar das estradas aproximadamente três mil caminhões por dia.

Com o intuito de garantir a eficiência e segurança da rede de dutos, as empresas responsáveis necessitam fazer inspeções periódicas à procura de sinais de corrosão e defeitos. Isso é feito mediante a utilização de sofisticados equipamentos conhecidos como *pigs*¹ de inspeção, que são ferramentas altamente especializadas para detecção de defeitos na tubulação. Os *pigs* se deslocam pelo interior dos dutos, freqüentemente impulsionados pelo próprio fluido que está sendo transportado, o que viabiliza a inspeção com os dutos em operação, tendo em vista que o corte do transporte do insumo geraria enormes prejuízos à empresa responsável.

¹ A tradução para pig é literal, porco. Existe mais de uma explicação para a origem desse nome, uma delas seria que como os primeiros pigs a serem utilizados foram os de limpeza, essas ferramentas teriam sido assim apelidadas porque ao término das operações elas saíam dos dutos com uma grande quantidade de resíduos de sujeira. Outra explicação é que os primeiros pigs eram feitos de arame e usados para limpeza de esgotos, quando próximos à saída da tubulação, faziam um enorme barulho que se assemelhava a um porco gritando.

Existem diversos tipos de soluções utilizadas nos *pigs* para a inspeção de corrosão em dutos (perfilagem), as mais difundidas são as com sensores magnéticos e de ultra-som. Todavia, novos métodos de perfilagem interna vêm sendo desenvolvidos, como o por contato mecânico (*pig* espinho) e óptico (Optopig), sendo o último ainda muito pouco conhecido no Brasil até mesmo entre técnicos e engenheiros de inspeção.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho se insere no contexto de um programa de parceria entre a UFSC e a Petrobrás/CENPES, que tem por objetivo de longo prazo desenvolver o primeiro *pig* óptico nacional. Esta dissertação possui como objetivo específico o desenvolvimento e avaliação do conceito de um sistema óptico capaz de medir secções da superfície interna de dutos com incerteza, resolução e faixa de medição adequada para detecção de áreas corroídas e pequenos amassamentos.

O sistema desenvolvido nesta dissertação utiliza como princípio de medição a triangulação laser, modificada pela introdução de espelhos cônicos, o que viabiliza o uso de apenas uma câmera e um laser para medir, a partir de uma única imagem, a seção interna do duto ao longo de 360°. Essa configuração possui vantagens como simplicidade, compactidade, alta resolução e, adequada velocidade e incerteza de medição para a tarefa de inspeção.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está subdividido em 7 capítulos os quais são brevemente descritos a seguir:

O capítulo 2 deixa clara a necessidade e importância da inspeção de dutos de P&G no Brasil e no mundo. Apresenta também as principais tecnologias de inspeção de dutos.

No capítulo 3 o princípio de medição óptico por triangulação laser é explanado, possibilitando ao leitor se familiarizar com esse tipo de medição, mostrando seu princípio, fontes mais comuns de incerteza, forma de análise da

imagem e como é efetuada a calibração. Três sistemas de medição de dutos por triangulação laser são expostos na parte final desse capítulo.

A modelagem e análise teórica do sistema, assim como seu projeto mecânico e montagem são abordados no capítulo 4. Em seqüência, no capítulo 5, expõe-se o *software* de medição desenvolvido, descrevendo suas funções e comportamento.

A calibração e análise do desempenho do sistema desenvolvido no presente trabalho são tratados no capítulo 6. Por fim, no capítulo 7, são expostas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2 A INSPEÇÃO DE DUTOS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS

Uma vez instalado, um duto ideal deveria operar indefinidamente. No entanto, dutos reais sofrem degradações provocadas por vários fatores. Dessa forma, é necessário inspecioná-los periodicamente para assegurar sua integridade. Este capítulo apresenta as principais motivações e meios hoje utilizados para realizar a inspeção de dutos.

2.1 ACIDENTES COM DUTOS

Acidentes com dutos de P&G podem ser catastróficos, gerando enormes danos ambientais, humanos e econômicos. Existem diversos relatos de acidentes documentados que poderiam ter sido evitados com inspeções adequadas. Como exemplo, cita-se o grave acidente em uma linha de gás no Novo México – EUA, onde houve a ruptura de um duto de gás de 762 milímetros (30 polegadas) de diâmetro da *El Paso Natural Gas Company*. A ruptura resultou de uma severa corrosão interna, fazendo com que a parede do duto não suportasse a pressão do gás e explodisse. As figuras 1 e 2 dão uma idéia das proporções da catástrofe. Havia doze pessoas acampando a aproximadamente 200 metros do local, todas morreram [1].



Figura 1 - Chama após a ruptura de um gasoduto no Novo México – EUA em 2000. Nota-se no canto inferior esquerdo da chama a estrutura de 25 metros de altura da ponte de passagem [1].



Figura 2 - Vista da cratera criada pela explosão, a secção que falta entre as setas foi arremessada pela explosão e dividida em três partes [1].

2.2 TIPOS DE DEFEITOS

Inúmeros defeitos podem causar a ruptura e/ou o mau funcionamento de uma linha de P&G. Os mais importantes são:

Corrosão (Externa e Interna): Ocorre devido a agentes orgânicos, químicos e eletroquímicos. A corrosão interna também pode ter como agente o próprio insumo transportado pelo duto, como exemplo pode-se citar os dutos de petróleo, os quais são afetados pela água salgada que acaba sendo carregada junto com o óleo. Além disso, por ocorrer no interior do duto, a corrosão interna pode ser considerada como um “inimigo invisível”, principalmente em dutos expostos, onde é possível ver a superfície externa, transmitindo uma falsa impressão de que a parede da tubulação está “sadia” quando a mesma não apresenta danos por corrosão externa e/ou amassamentos.

Amassamentos: Podem ocorrer devido a choques com máquinas de escavação, máquinas de perfuração “bate-estaca”, deslizamentos de terra, rochas, etc. Prejudicam o escoamento, geram tensões concentradas e fragilizam a parede do duto.

Defeitos de soldagem: Deixam as conexões entre os dutos frágeis, atuando como ponto concentrador de tensões e de maior chance de rompimento.

A tabela 1 ilustra dados fornecidos pela PHMSA (*Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration*) listando os acidentes que ocorreram nos EUA com dutos de transporte de gás discriminados por causa. Nota-se que, somente em 2006, os prejuízos devidos à corrosão somam mais de nove milhões de dólares.

A PHMSA faz parte do departamento de transporte dos EUA (DOT – *Department of Transportation*), e é responsável perante a indústria e consumidores pelo transporte seguro e adequado de materiais perigosos por todos os meios de transporte possíveis, incluindo a rede de dutos do país. No Brasil, o órgão que faz esse papel é a ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres) que tem entre as suas atribuições: "promover levantamentos e organizar cadastro relativos ao sistema de dutovias do Brasil e às empresas proprietárias de equipamentos e instalações de transporte dutoviário". A ANTT não fornece nenhum tipo de dado sobre os acidentes já ocorridos no Brasil com dutos de transporte de P&G.

Tabela 1 – Acidentes com a linha de transporte de gás discriminados por causa nos EUA em 2006 [2].

Causa	Acidentes	% do total de acidentes	Prejuízo [Dólar]	% do total do prejuízo	Mortes	Feridos
Corpo do duto	3	2,5	\$332.191,00	0,7	0	0
Solda de topo (Butt weld)	8	6,7	\$1.482.204,00	3,2	0	0
Carro, caminhão ou outro veículo não vinculado a escavação	9	7,5	\$719.926,00	1,6	0	1
Componente	5	4,2	\$2.557.910,00	5,6	0	0
Corrosão Externa	9	7,5	\$1.177.870,00	2,6	0	0
Corrosão Interna	11	9,2	\$8.076.216,00	17,7	0	0
Movimento de terra / deslizamentos	2	1,7	\$72.600,00	0,2	0	0
Solda de filete (Fillet weld)	0	0,0	\$0,00	0,0	0	0
Fogo/Explosão como causa primária	0	0,0	\$0,00	0,0	0	0
Chuvas/Inundações	1	0,8	\$60.000,00	0,1	0	0
Ventos fortes	0	0,0	\$0,00	0,0	0	0
Operação incorreta	4	3,3	\$210.766,00	0,5	0	1
Conexão	3	2,5	\$175.230,00	0,4	0	0
Descargas atmosféricas	1	0,8	\$14.400,00	0,0	0	0
Mau funcionamento de controle	7	5,8	\$915.912,00	2,0	0	0
Outros (Miscellaneous)	12	10,0	\$7.190.604,00	15,7	0	0
Sem dados (No data)	2	1,7	\$137.729,00	0,3	0	0
Dano devido a escavação	3	2,5	\$288.491,00	0,6	0	0
Solda de costura do duto	2	1,7	\$326.500,00	0,7	0	0
Ruptura de duto já danificado	0	0,0	\$0,00	0,0	0	0
Lacre/embalagem de bomba rompido ou vazando	3	2,5	\$11.612.966,00	25,4	0	0
Temperatura	0	0,0	\$0,00	0,0	0	0
Dano por escavação por terceiros	14	11,7	\$2.112.262,00	4,6	1	0
(Threads stripped, broken pipe coupling)	4	3,3	\$248.150,00	0,5	0	0
Desconhecidos	16	13,3	\$7.944.467,00	17,4	1	1
Vandalismo	1	0,8	\$60.900,00	0,1	0	0
TOTAL	120	-	\$45.717.294,00	-	2	3

Os gráficos das figuras 3 e 4, traçados a partir de dados encontrados em [2], ilustram o histórico nos EUA do número de acidentes e o percentual do total do prejuízo no ano devido à corrosão em dutos de transporte de gás. Esses dados são mais uma justificativa forte de que a inspeção de dutos é um problema que merece atenção e, que necessita de investimentos em pesquisas para o aprimoramento dos sistemas de inspeção e avanço da tecnologia. Fato esse, que possibilitaria obter dados mais precisos sobre a situação da estrutura dos dutos e, conseqüentemente, reduzir o número de acidentes.

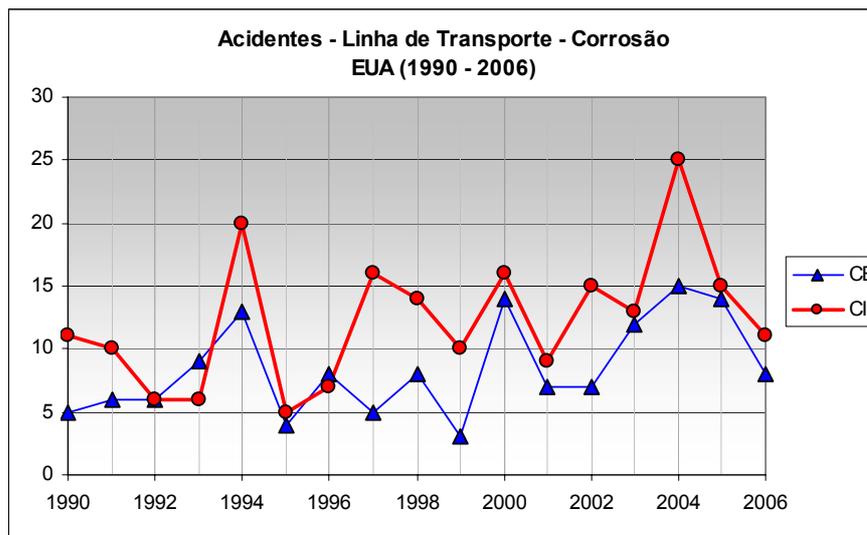


Figura 3 – Acidentes com linhas de transporte nos EUA devido à corrosão (1990 a 2006). CE: Corrosão Externa, CI: Corrosão Interna [2].

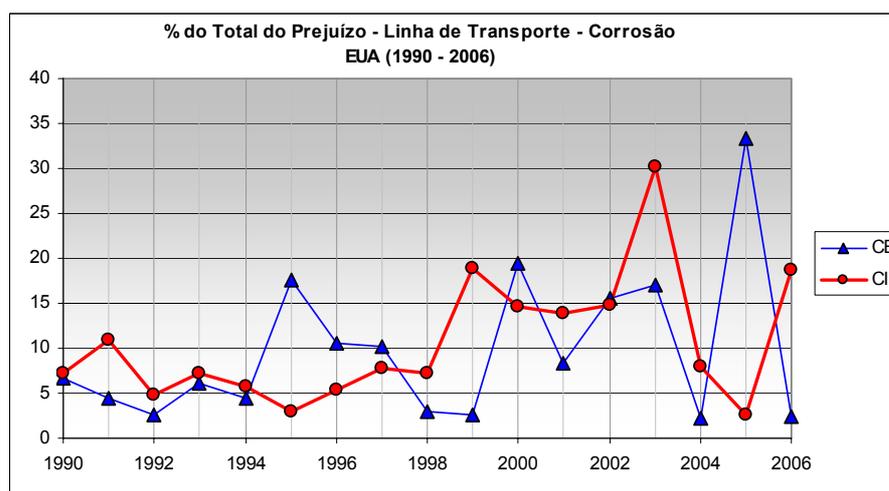


Figura 4 – Percentual devido a corrosão do total do prejuízo no ano (1990 a 2006) [2].

2.3 PIGS DE INSPEÇÃO

Pigs são dispositivos que são inseridos em dutos e viajam livremente por ele, arrastados pelo próprio deslocamento do material que é transportado pelo duto, como gás, petróleo e derivados. Existem diversos tipos de *pigs* para diferentes finalidades. Esses podem ser usados desde para uma simples limpeza do duto a uma inspeção detalhada de seu interior. Os *pigs* destinados à inspeção, também conhecidos como *in-line inspection tools* (ferramentas de inspeção em linha/produção) ou *pigs* inteligentes, são dispositivos robóticos que possuem a função de avaliar o interior do duto. Esse tipo de inspeção teve sua origem em torno de 45 anos atrás, e já evoluiu muito até os dias de hoje, utilizando diversos princípios

de medição e sistemas extremamente especializados e complexos. Esses *pigs* são capazes de verificar a espessura, geometria (detectar amassamentos), sinais de corrosão, vazamentos, e outros defeitos ao longo do duto que possam prejudicar seu escoamento e/ou colocar em risco sua operação [3].

Antes de um *pig* de inspeção ser inserido na tubulação, por ser uma ferramenta muito cara e devido ao grande risco de que ele fique “entalado”², são necessárias etapas de limpeza e verificação da geometria interna do duto:

- Limpeza do duto: São utilizados *pigs* de limpeza para remoção de resíduos da tubulação.
- Remoção de pedaços de metal soltos no duto: Uso de *pig* magnético de limpeza, o qual possui poderosos eletroímãs que atraem qualquer resíduo metálico solto na tubulação.
- Verificação do estado do duto: Visa detectar ovalizações, a presença de válvulas mal fechadas ou qualquer outro agente que possa trancar e/ou danificar o *pig* na passagem pela tubulação. Geralmente são utilizados *pigs* com um corpo fino e com uma chapa de alumínio de diâmetro próximo ao da tubulação. Verificando o estado dessa chapa após a passagem do *pig* pode-se ter uma idéia da situação interna da tubulação.
- Medição da geometria interna do duto: Uso de *pigs* geométricos, que efetivamente medem a geometria interna do duto, os quais são sensíveis o suficiente para detectar amassamentos.

Após a realização desses procedimentos e a garantia de que a tubulação está apta para a inspeção detalhada, o *pig* de inspeção é inserido.

A seguir são listadas as principais tecnologias utilizadas para a inspeção detalhada de dutos, dando uma breve descrição de suas características e princípio de funcionamento.

² Os engenheiros responsáveis pela inspeção têm temor só de pensar que o *pig* possa ficar preso na tubulação, pois se isso acontecer, além de ser muito caro a remoção do sistema da tubulação, geralmente é necessário cortar o suprimento a inúmeras empresas que não operam sem o insumo fornecido pelo duto.

2.3.1 *Pig* Magnético (MFL)

Sem sombra de dúvidas o *pig* MFL, do inglês *Magnetic Flux Leakage* (Fuga de Fluxo Magnético) é a ferramenta mais difundida para inspeção de corrosão de dutos. Utiliza alterações no campo magnético para detectar mudanças na espessura do duto. Pode ser usado tanto em dutos de óleo como de gás. No entanto, sua sensibilidade diminui com o aumento da espessura do duto. Possui pouca tolerância à variação do diâmetro interno, sendo que ovalizações e amassamentos por ventura existentes na linha podem impossibilitar a sua passagem.

Princípio de funcionamento do sensor MFL:

O sensor é equipado de um sistema de bobinas que produz um potente campo magnético paralelo à parede do duto. Um sensor de efeito Hall detecta a variação das linhas de fluxo magnético quando este passa por uma parte do duto com defeito interno e/ou externo (figura 5). Geralmente esses sistemas possuem um segundo sensor, conhecido como sensor de discriminação, cuja função é indicar se o defeito é interno ou externo (figura 6). Isso é possível, pois o segundo sensor apenas detecta defeitos internos.

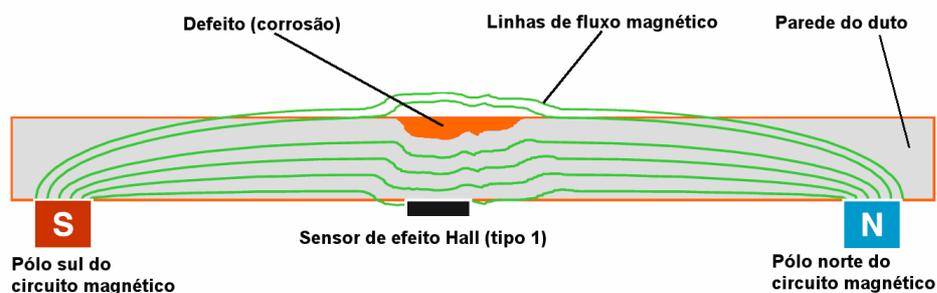


Figura 5 – Princípio de medição MFL: sensor de detecção de perda de material [4].

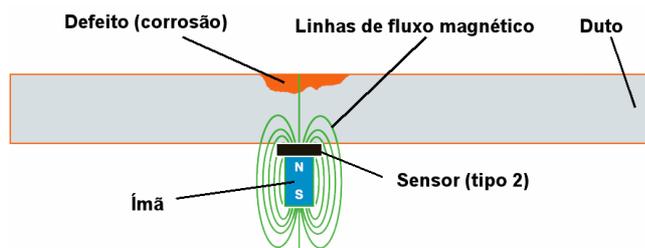


Figura 6 – Princípio de medição MFL: o sensor de discriminação apenas detecta defeitos internos [4].

Principais Características [4] [5]:

- Medições indiretas: a interpretação dos resultados depende da experiência do técnico;
- Pode ser usado tanto em dutos de gás como de óleo;
- Detecta defeitos internos e externos;
- A perda de material é fornecida de forma relativamente grosseira em termos do comprimento, largura e profundidade;
- Dificilmente detecta rachaduras (trincas);
- Deixa magnetização residual no duto;
- Extremamente pesado.

Especificações Gerais:

Tabela 2 – Especificações de um *pig* MFL da GE (General Electric) [6].

Parâmetro	Especificação do <i>Pig</i> de Ultra-Som
Velocidade recomendada	0 a 5 m/s
Espessura máxima	6,35 – 27,94 mm (dependendo do diâmetro do duto e velocidade do equipamento)
Pressão máxima	213 bar
Faixa de temperatura	0 a 40 °C
Incerteza da profundidade	± 10% da espessura (t)
Incerteza axial	± 10 mm
Incerteza de largura	± 15 mm

2.3.2 *Pig* de Ultra-Som

Outro sistema muito utilizado para inspeção de corrosão de dutos é o *pig* equipado com sensores ultra-sônicos. Esses *pigs* podem medir tanto corrosão externa quanto interna com excelente nível de detalhes, além disso, possuem a grande vantagem de detectar trincas. No entanto, esses sistemas possuem uma limitação importante, pois para esse tipo de sensor é necessário um fluido homogêneo para o acoplamento acústico, o que dificulta muito sua aplicação em gasodutos³. Quando a inspeção por ultra-som em uma linha de gás é extremamente

³ Pesquisas vêm sendo realizadas e já existem protótipos capazes de atuar em gasodutos em alta pressão [7].

necessária, pode-se preencher uma secção da tubulação com água, permitindo assim que a inspeção seja realizada. Todavia esse tipo de procedimento é altamente indesejado, pois necessita cessar o transporte do insumo, gerando enormes prejuízos a empresa [3].

Princípio de funcionamento do sensor:

Transdutores são utilizados para medir a distância entre eles e a parede interna da tubulação usando a técnica de pulso-eco. Um transdutor emite um pulso de ultra-som, que se propaga pelo fluido dentro da tubulação até ser refletido na parede interna do duto. Após emitir o pulso, o transdutor passa a funcionar como receptor para transformar o eco que retorna a ele em um sinal elétrico. Pode-se assim medir o tempo de vôo do pulso de ultra-som, ou seja, o tempo transcorrido entre o disparo do transdutor e a chegada do primeiro eco.

A especificação do transdutor de ultra-som deve levar em conta a resolução axial desejada e a atenuação acústica do meio. Quanto maior a frequência do transdutor, menor o comprimento de onda e, portanto, melhor a resolução axial. Por outro lado, a atenuação acústica aumenta exponencialmente com a frequência [8].

Principais Características [3] [5] [8]:

- Fornece uma medição detalhada do formato e dimensão do defeito;
- Requer líquido para fazer o acoplamento acústico entre o sensor de ultra-som e a parede do duto;
- Para ser usado em dutos de gás, o *pig* pode ser imerso em um fluido entre membranas. Caso seja um duto de gás em alta pressão, isso não é necessário;
- Detecta defeitos internos e externos;
- Pode detectar trincas (rachaduras).

Especificações Gerais:

Tabela 3 – Especificações de um *pig* de ultra-som [3].

Parâmetro	Especificação do <i>Pig</i> de Ultra-Som
Velocidade recomendada	0,2 a 2,0 m/s
Espessura máxima	50 mm
Pressão máxima	120 bar
Faixa de temperatura	-10 a 50 °C
Comprimento do dispositivo	3200 mm
Massa do dispositivo	700 kg
Inspeção máxima	375 km @ 1,5 m/s
Espaçamento circunferência do sensor	8 mm
Incerteza da profundidade	± 0,5 mm
Incerteza axial	± 20 mm
Incerteza angular	± 10 °

2.3.3 *Pig* de Contato Mecânico

O *pig* de contato mecânico, também conhecido como “*pig* espinho” ou “*pig* palito”, utiliza o contato mecânico como meio de medição. Em uma linguagem simples, o *pig* possui algumas dezenas de hastes que são arrastados ao longo da superfície interna do duto e assim descrevem seu interior.

Esse sistema vem sendo desenvolvido pelo CENPES em conjunto com a PUC-Rio. Tem como motivação produzir uma ferramenta de baixo custo, que seja capaz de superar as limitações encontradas em *pigs* MFL e de ultra-som como a tolerância a grandes variações de diâmetro e a necessidade de fluído de acoplamento [9].

Princípio de funcionamento do sensor de contato mecânico:

A medição do ângulo da haste é feita através de um sensor de campo magnético, do tipo Hall, posicionado entre dois ímãs de polaridades opostas. O conjunto é posicionado no eixo do sensor e qualquer mudança de inclinação decorrente de alterações no perfil da superfície, significa uma alteração no campo magnético estabelecido pelos ímãs, o que é prontamente detectado pelo sensor Hall e convertido em ângulo [9]. A figura 7 abaixo ilustra um sensor com haste sendo testado em laboratório.

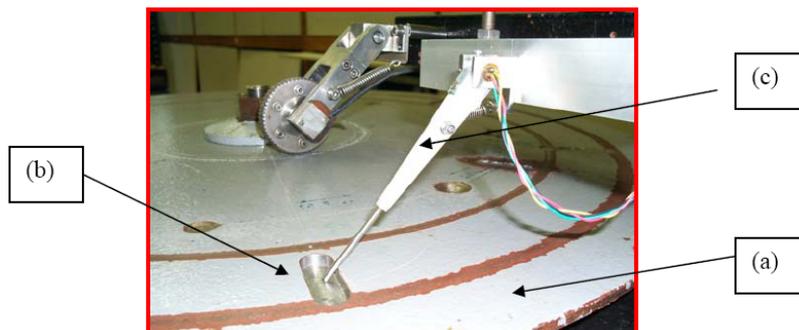


Figura 7 - Um disco (a) com defeitos usinados (b) é utilizado para simular a movimentação do sensor (c) ao longo da superfície [9].

Principais Características:

- Adapta-se a uma grande faixa de diâmetros, permitindo a inspeção de dutos multi-diâmetros;
- Possui um grande espectro de medições, permitindo o uso em dutos com grandes espessuras;
- É independente do líquido que está sendo transportado, podendo inspecionar tanto oleodutos como gasodutos;
- É robusto sendo menos exigente em relação à limpeza;
- O método de medição é simples, podendo atingir elevada precisão sob as condições de trabalho;
- Sistema relativamente simples e de menor custo;
- Não detecta trincas (rachaduras);
- Limitado a inspeção da parede interna do duto.

Especificações Gerais:

Tabela 4 – Características do *pig* espinho [9].

Parâmetro	Especificação do <i>pig</i> espinho
Faixa de diâmetro	4 a 7 " (101,6 a 177,8 mm)
Velocidade de medição	0,5 m/s @ Resolução de 1 mm
Incerteza da profundidade	± 0,5 mm

2.3.4 *Pig* Óptico

Pigs com sensores ópticos, também conhecidos como Optopigs, ainda são pouco utilizados na inspeção de dutos. Devido à necessidade de um meio com certa visibilidade (pequena turbidez), seu uso se limita aos dutos que transportam gases ou líquidos transparentes. Por ser uma medição simplesmente visual, que usa apenas a luz como método de medição, os *pigs* ópticos possuem vantagens como medição mais detalhada (ver figura 11) e que não deixa magnetização residual como no caso dos *pigs* MFL.

Durante a presente pesquisa se encontrou apenas um fornecedor de *pigs* ópticos, a *Pipecare*. A eletrônica do *pig* foi desenvolvida pela empresa Norueguesa Norsk Elektro Optikk AS. O projeto mecânico e a estrutura multi-diâmetro, pela Statoil e suas sub-contratadas: FTL Seal Ltd e Pipeline Pigging Technology Ltd.

Princípio de funcionamento do sensor:

A partir da triangulação da posição dos planos de luz emitidos pelo laser que são capturados no CCD da câmera, é possível calcular a distância da câmera à parede duto. O sistema é dotado de oito sensores ópticos por triangulação laser que estão dispostos ao redor do *pig*. A fusão dos dados obtidos por estes sensores gera o resultado de medição de cada secção do duto em 360°.

O esquema do corpo do *pig*, com os sensores, baterias e disco rígido pode ser visto na figura 8. As figuras 9 e 10 dão uma noção de como os sensores estão dispostos ao redor do *pig* e de como se dá sua passagem ao longo do duto.

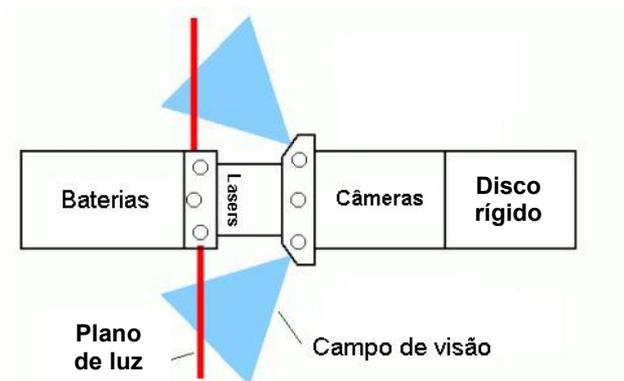


Figura 8 – Esquema básico do Optopig [10].

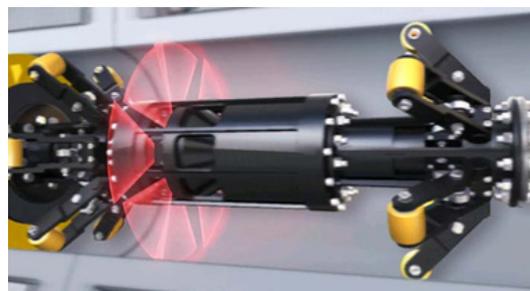


Figura 9 – Concepção do módulo da câmera do Optopig [10].

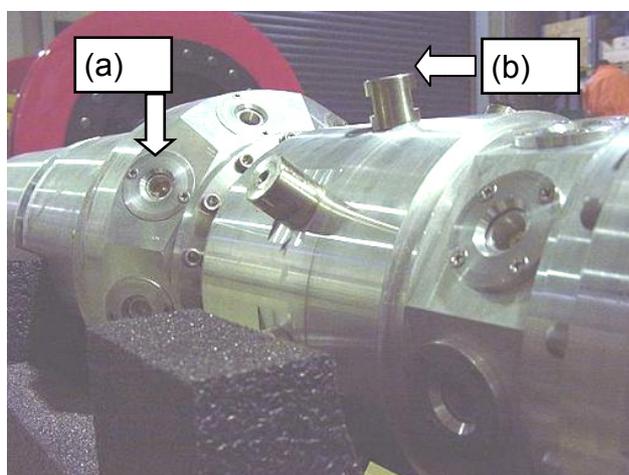


Figura 10 – Vista dos sensores do Optopig. (a) Oito câmeras a 45°, (b) laser.

Principais Características:

- Possibilita visualização do defeito, o que ajuda na interpretação de irregularidades;
- Capaz de fornecer as dimensões do defeito com boa exatidão;
- Requer fluido transparente, líquido ou gasoso;
- Limitado à inspeção da geometria interna do duto.

A figura 11 mostra de forma simples a diferença entre a capacidade de medição do Optopig e de um *pig* MFL. Pode-se notar que devido ao *pig* óptico fornecer uma medição mais detalhada, ele é capaz de detectar a região com maior perda de material (d_1). Já o *pig* magnético, fornece apenas uma “caixa” que representa a perda de metal calculada, indicando apenas (d_2).

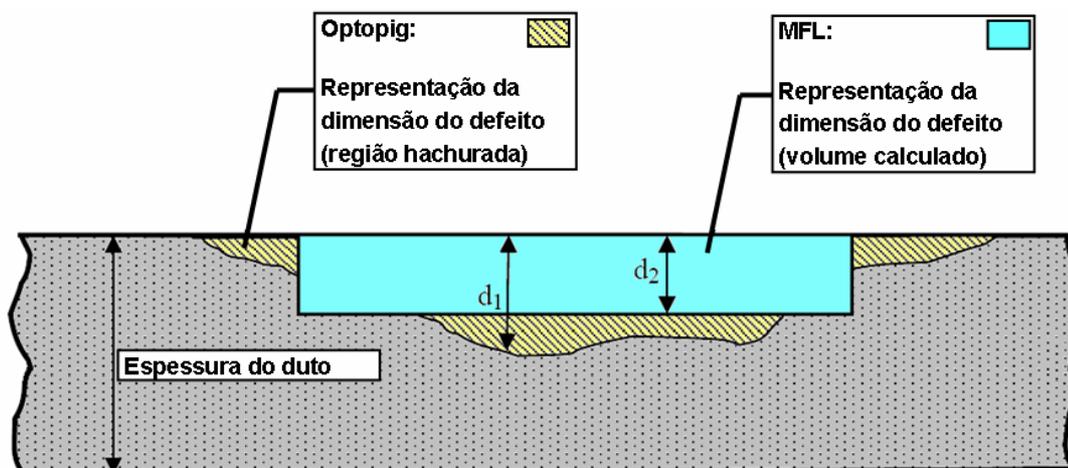


Figura 11 – Comparação entre a representação do defeito pelo Optopig e MFL [5].

Especificações Gerais:

Tabela 5 – Especificações do Optopig [11].

Parâmetro	Especificação do Optopig
Massa	1150 kg (configurado para uma inspeção de 42")
Pressão máxima	200 bar
Temperatura	a 50 °C (suporta maiores temperaturas para curtas inspeções)
Raio da menor curva	3D (3 vezes o diâmetro do duto)
Inspeção máxima	1000 km (padrão). Para maiores distâncias necessita baterias extras
Velocidade máxima	5 m/s (resolução de 1 mm) e 10 m/s (resolução de 2 mm)
Faixa de diâmetros	10" a 42" (254 mm a 1066,8 mm)
Resolução da imagem	1x1 mm (dependendo das configurações do sistema)
Profundidade mínima de perda de material	1 mm (sob uma área de 5x5 mm)
Incerteza da profundidade	± 1 mm

2.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

Pôde-se verificar nas sessões anteriores as várias soluções propostas pelo homem para verificar defeitos devido à corrosão na superfície de dutos na indústria do petróleo e gás. A tabela 6 tem o intuito de comparar esses sofisticados métodos de medição, dando uma visão mais geral sobre o assunto, possibilitando assim uma comparação mais clara entre eles. Não há um sistema que seja superior aos demais em todos os aspectos.

Tabela 6 - Comparação entre os métodos de medição de corrosão.⁴

Princípio	MFL	Ultra-Som	Óptico	Mecânico
Incerteza na espessura	± 10% de t	± 0,5 mm	± 1 mm	± 0,5 mm
Espessura máxima	18 mm	-	-	-
Diâmetro mínimo	101,4 mm (4")	?	254 mm (10")	101,4 mm (4")
Detecção de defeitos externos	✓	✓	✗	✗
Faixa de diâmetro tolerada	☹	☹	😊	😊
Detecção de trincas	😊	😊	☹	☹
Inspeção de Oleodutos	😊	😊	😊	😊
Inspeção de Gasodutos	😊	😊	😊	😊
Exigências de Limpeza	☹	☹	☹	😊
Custo	☹	☹	😊	😊
Velocidade de medição	😊	😊	😊	☹
Massa	☹	😊	😊	😊

t – Espessura do duto

⁴ Deve-se notar que essa tabela é baseada nas referências utilizadas nesse trabalho, sendo assim, é possível que existam equipamentos com incertezas um pouco menores, e/ou pigs MFL com espessura máxima um pouco maior, etc.

3 MEDIÇÃO POR TRIANGULAÇÃO LASER

A triangulação laser é uma das técnicas ópticas mais utilizadas tanto em medições 2D como 3D. Apesar de esta tecnologia existir há mais de duas décadas, sua velocidade de medição e exatidão evoluíram muito nos últimos anos devido principalmente ao aprimoramento dos equipamentos do sistema (*hardware*), como lasers de melhor qualidade, menor preço e tamanho e o desenvolvimento de sensores do tipo CCD (*Charge Coupled Device*). Esses sensores diferem basicamente na estrutura de iluminação, a qual geralmente consiste na projeção de um ou mais pontos ou uma ou mais linhas e no tipo de sensor: usualmente sensores lineares (*linear array*) ou CCDs [12].

Sensores de triangulação laser (STL) se enquadram na categoria de dispositivos de medição de altura ou perfil sem contato. Um sensor de triangulação é capaz de prover a mesma informação que um sensor diferencial, mas sem a necessidade de tocar no mensurando [13].

3.1 PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

A triangulação laser inicia com a projeção de luz estruturada sobre a superfície a ser medida. A figura formada pela luz estruturada na superfície do mensurando é capturada por uma câmera e a imagem obtida é então processada. Com a projeção de um feixe de laser forma-se a imagem de um ponto luminoso, o que torna possível obter informações unidimensionais (1D) do objeto, pois a variação da posição do ponto na imagem depende apenas da variação de uma coordenada. Medições bidimensionais (2D) podem ser feitas utilizando a projeção de um plano de luz resultando numa linha na imagem da câmera ao invés de apenas um ponto. Esse tipo de sensor que projeta um plano de laser é comumente conhecido como sensor óptico do tipo “Folha de Luz”.

A figura 12 ilustra, de forma simples e clara, o princípio da triangulação laser, onde a partir da imagem obtida da projeção de um plano de luz perpendicular à superfície do objeto é possível medir sua altura e largura, que no esquema são representadas respectivamente pelas coordenadas Z e Y (j e i na imagem analisada). A triangulação laser é limitada a medições 2D, pois pode-se medir no máximo uma secção por vez onde a linha do laser atinge o objeto. Sendo assim, é necessário medir várias secções do objeto para poder compor dados 3D, o que pode ser feito movimentando relativamente o sensor em relação ao mensurando. Tomando como exemplo o esquema da figura 12, poderiam ser feitos movimentos do objeto no eixo X usando e sua posição indicada por um medidor de deslocamento, tornando assim possível medir outras secções. Unindo essas secções, a nuvem de pontos 3D do mensurando pode ser construída.

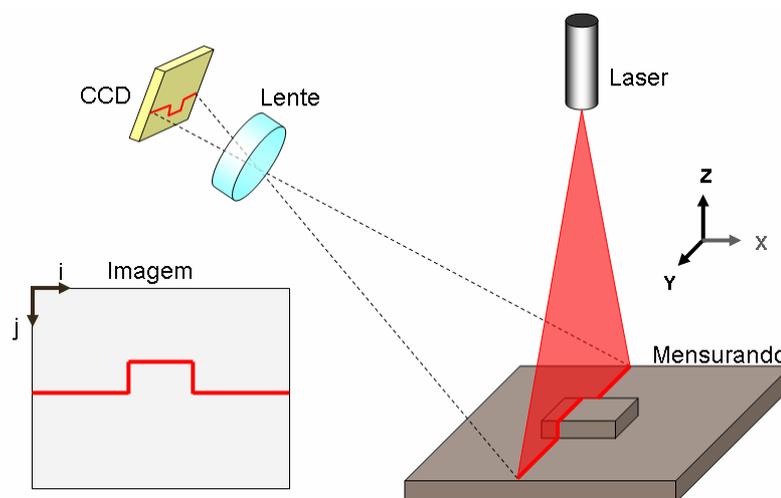


Figura 12 – Esquemático de medição por triangulação laser com plano de luz.

Um sistema de triangulação laser pode ser dividido em três partes com as funções de: emissão, detecção e processamento (figura 13), as quais são explanadas a seguir.



Figura 13 – Diagrama de blocos básicos de um sistema de triangulação laser.

3.1.1 Emissor

O emissor é geralmente um laser diodo o qual projeta um padrão de luz estruturada que incide no objeto a ser medido. Existem diversos tipos de lasers usados em sistema de triangulação, variando parâmetros como o comprimento de onda e intensidade para diferentes tipos de aplicações.

O feixe de laser projetado nunca é perfeitamente colimado, possuindo um ponto de foco onde seu diâmetro é mínimo. Esse ponto geralmente coincide com o centro da faixa de medição e a distância dele à carcaça do sistema é conhecida como *stand-off* (ver). No entanto, pode-se encontrar referências que definem o *stand-off* como a distância do sensor ao início da faixa de medição, e não ao centro.

3.1.2 Detecção

O receptor/detector captura a imagem do laser sobre o objeto e a envia para a unidade responsável pelo processamento. Conjuntos câmera-lente variam muito com a aplicação. Quando se utiliza apenas um feixe de laser (medições 1D) geralmente são usadas câmeras lineares (*array cameras*), que possuem um sensor de 1 *pixel* em uma dimensão, e muitos na outra, formando uma “trilha” de *pixels*. Para aplicações onde é projetado um plano de laser (medições 2D) necessita-se de câmeras capazes de fornecer uma imagem com resolução 2D adequada, nesse caso sensores do tipo CCD são os mais empregados.

3.1.3 Processamento

Em um sistema de triangulação laser a exatidão da medição depende da correta interpretação da figura formada pela luz do laser sobre o objeto medido. O método mais utilizado na análise da imagem é a detecção do centro da linha do laser. Geralmente optam-se por métodos estatísticos como média, mediana, centro ou pico de luminosidade como representação do centro da linha [12]. Dentre todos esses métodos, a detecção do centro de luminosidade da linha a partir da equação do centróide (ver equação (1)) é um dos mais utilizados e é descrito a seguir.

A figura 14 ilustra de forma simplificada a imagem adquirida por um sensor laser de folha de luz e o perfil da intensidade de luz para uma determinada linha vertical de posição i na imagem.

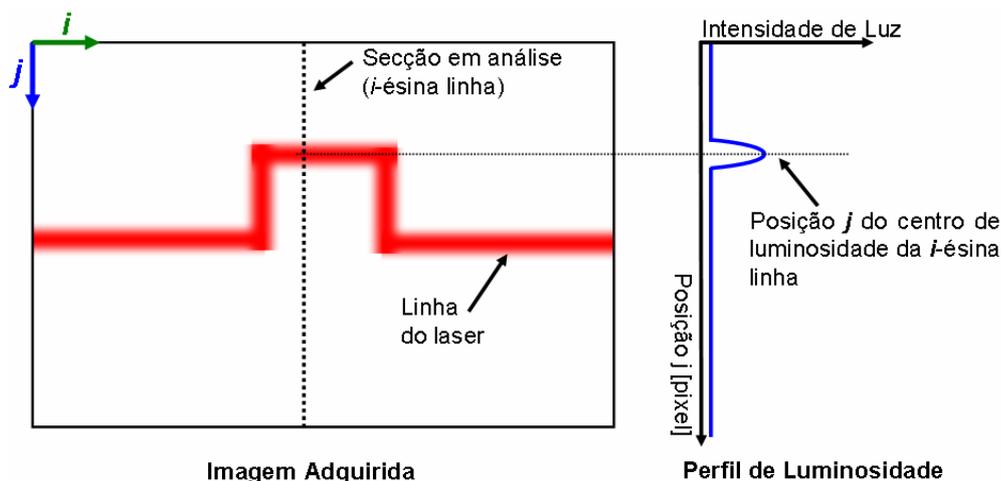


Figura 14 – Detecção do centro de luminosidade da linha do laser.

O centro de luminosidade da i -ésima linha é encontrado através da fórmula do centróide [14]:

$$C_i = \frac{\sum_{j=0}^{j=j_{\text{máx}}} P_{ij} \cdot j}{\sum_{j=0}^{j=j_{\text{máx}}} P_{ij}} \quad (1)$$

Onde:

- C_i : posição do centro de luminosidade da i -ésima linha;
- P_{ij} : Intensidade luminosa do *pixel* de posição (i,j) .

Com isso são gerados binômios contendo a linha e seu respectivo centro de luminosidade (i, C_i) para todas as linhas da imagem a nível de *pixel* ou subpixel.

Apesar de parecer muito simples a detecção do centro da linha do laser, existe uma série de problemas que podem acarretar em um resultado incorreto de sua posição. As principais fontes de incerteza encontradas na detecção correta do centro da linha do laser são tratadas no tópico 3.2.

Filtro *Threshold* (limiar)

Uma ferramenta muito utilizada no tratamento de imagens de sistema de triangulação laser é o filtro *threshold* (ou filtro de limiar). Esse filtro tem o objetivo de descartar informações indesejadas na imagem que podem ser causadas por diversos motivos, como possíveis imperfeições no feixe de laser utilizado, influência

de outras fontes de luz, reflexão em superfícies transparentes, *speckle*⁵ (ver tópico 3.4.1), etc. Todos os *pixels* com intensidade de luz menor do que a definida pelo filtro (ver figura 15) são desconsiderados (são transformados em pontos pretos – intensidade nula). Com isso é possível eliminar (ou pelo menos amenizar) ruídos e informações indesejadas contidas na imagem.

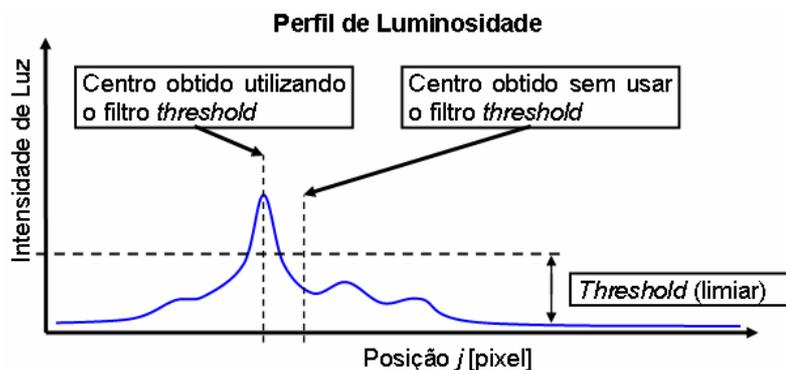


Figura 15 – Exemplo do uso de filtro *threshold*.

3.2 MODELO MATEMÁTICO

A modelagem matemática de um STL é feita de forma a encontrar a equação que relaciona a posição do *pixel* na imagem com a localização do objeto no espaço. Uma vez modelado o sistema, seus parâmetros podem ser determinados através de uma calibração.

Como exemplo, a seguir é ilustrado o equacionamento de um STL capaz de realizar medições 1D (ver figura 16).

A partir da figura 17 pode-se encontrar as seguintes relações:

$$\begin{aligned}x &= r \cdot \text{sen}(\alpha) + b \\ y &= r \cdot \text{cos}(\alpha)\end{aligned}$$

Através da semelhança de triângulos:

$$\frac{d}{dl} = \frac{x}{y}$$

Substituindo x e y , chega-se a relação geométrica:

⁵ *Speckle* é o nome dado ao padrão óptico granular formado pela reflexão difusa de um feixe de luz coerente em uma superfície rugosa.

$$dl = \frac{d \cdot r \cdot \cos(\alpha)}{r \cdot \sin(\alpha) + b} \quad (2)$$

Onde:

- dl : distância de um ponto pertencente à superfície do mensurando em relação ao centro óptico da lente [mm];
- d : distância horizontal entre a lente de projeção do laser e a lente de visualização da imagem [mm];
- r : distância entre a lente de visualização e o elemento fotosensível do CCD [mm];
- b : deslocamento do ponto visualizado no elemento fotosensível do CCD [mm];
- α : ângulo de triangulação [°].

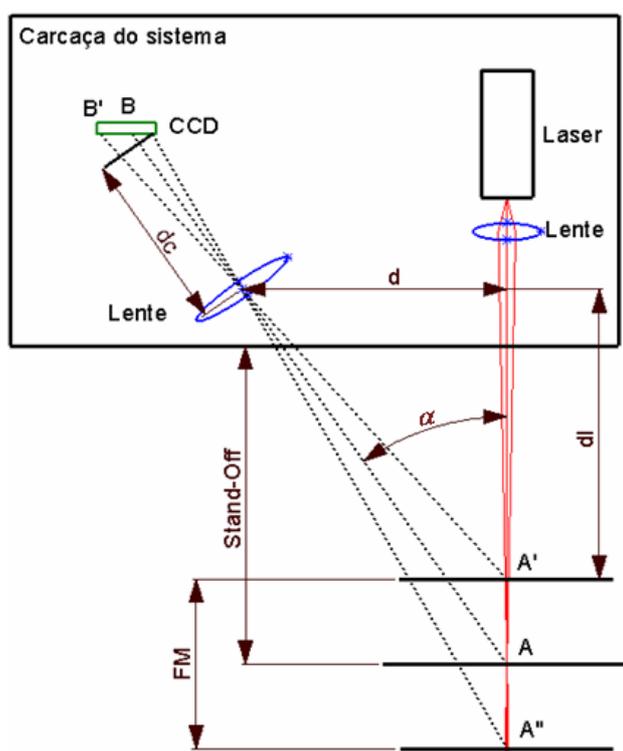


Figura 16 – Esquema do princípio da Triangulação laser (1D).

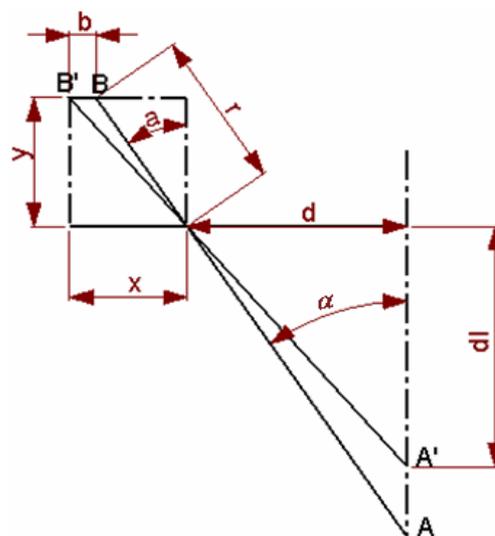


Figura 17 – Técnica de triangulação – semelhança de triângulos

3.3 CALIBRAÇÃO

O objetivo da calibração é possibilitar o cálculo das dimensões reais do mensurando a partir dos valores em *pixels* encontrados na imagem adquirida pelo sistema.

A calibração pode ser usada para encontrar parâmetros do sistema como o centro óptico, orientação e posição da câmera e a posição e orientação do plano de luz gerado pelo laser [15]. No entanto, devido a imperfeições encontradas na prática, o modelo matemático pode se tornar a maior fonte de incertezas, ou seja, para utilizar uma calibração desse tipo, necessita-se de um modelo matemático muito bem elaborado e que considere todas as imperfeições relevantes. Sendo assim, muitas vezes é feita uma calibração almejando encontrar curvas que diretamente relacionem deslocamentos reais em milímetros com deslocamentos em *pixel* da linha do laser na imagem obtida, sendo o modelo matemático útil para a compreensão do funcionamento do sistema.

A calibração varia dependendo do tipo do sensor de triangulação, se ele usa a projeção de um plano ou linha de laser, e se o objetivo é realizar medições em 1D, 2D ou 3D, etc. Sendo assim, será explanado a seguir uma forma de realizar a calibração de um sensor destinado a obter medições 3D a partir da projeção de um plano de laser e o uso de uma câmera, abrangendo assim a calibração de todas as dimensões.

3.3.1 Calibração da Profundidade (Z)

Note na figura 12 que a variação da altura do objeto em Z equivale a uma variação da posição da linha em *pixel* na imagem no sentido j . Sendo assim, para obter a função de calibração da profundidade, deve-se realizar deslocamentos conhecidos em Z por toda a faixa de medição e obter a respectiva posição do centro de luminosidade do laser na imagem. Dessa forma é possível encontrar uma função que melhor se ajusta aos pontos obtidos (veja a figura 18), sendo que geralmente polinômios de segundo ou terceiro grau descrevem suficientemente bem o comportamento de sensores desse tipo.

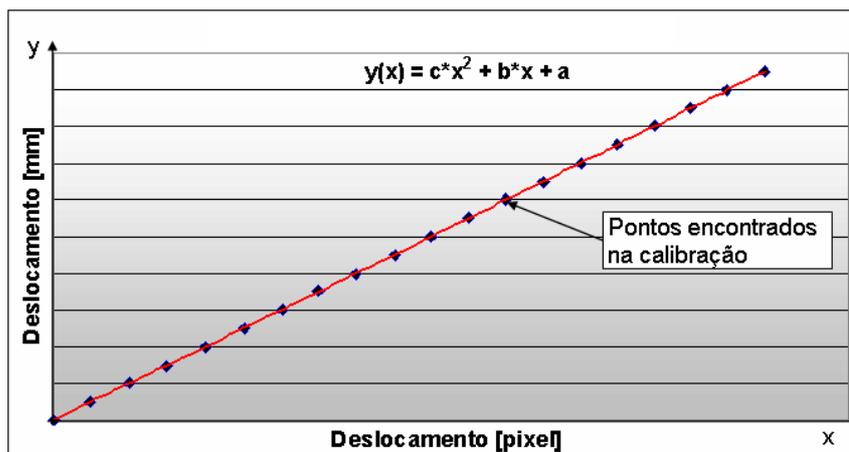


Figura 18 – Exemplo de uma função de calibração polinomial de segundo grau.

3.3.2 Calibração da Largura (Y)

Para calibrar a coordenada Y, é necessário utilizar um objeto com dimensão conhecida. A partir de medições do comprimento desse objeto em *pixel* em diferentes posições ao longo do eixo Z, é possível encontrar uma curva de correção que retorna a dimensão do objeto em milímetros dependendo de sua distância em relação ao sensor (Z).

A função de calibração seria um valor constante (apenas uma relação) se o tamanho da imagem do objeto não aumentasse/diminuísse quando este se aproxima/distancia da câmera.

3.3.3 Calibração do Comprimento (X)

Para a calibração da terceira coordenada, é necessário calibrar o sistema que desloca o sensor: sabendo sua posição pode-se por fim construir a nuvem de pontos do objeto unindo as secções 2D medidas em cada ponto do eixo X.

3.4 PRINCIPAIS FONTES DE INCERTEZA

Os métodos de detecção do centro da linha do laser (ver 3.1.3) fornecem a resposta correta quando a superfície do mensurando é perfeitamente plana e de cor única, mas podem gerar erros quando a superfície do objeto modifica drasticamente a figura de luz projetada [12].

Existem métodos, como o citado por Curles e Levoy [12], que almejam detectar a forma da superfície analisando as mudanças da imagem ao longo do tempo. Esse tipo de análise é válida quando a influência da superfície é a principal fonte de incerteza do sistema.

Além da forma da superfície, outras fontes de incerteza como imperfeições na câmera, aberrações na imagem devido à forma da lente, fonte de laser e *speckle*, devem ser consideradas.

3.4.1 Fonte de laser

- **Speckle:** O termo *speckle* se refere ao padrão granular que pode ser observado quando um feixe de luz de grande coerência (por exemplo lasers) reflete em uma superfície cuja rugosidade é maior do que o comprimento de onda da fonte o que gera interferência entre os raios refletidos [16]. Existem aplicações que utilizam esse fenômeno como princípio de medição, por exemplo, a interferometria [17]. No entanto o *speckle* é uma das principais fontes de ruído em sistemas de medição por triangulação laser, pois dificultam a detecção precisa do centro da linha.

O tamanho dos grãos formados pelo *speckle* é inversamente proporcional à abertura do diafragma da lente. Sendo assim, quanto mais aberto o diafragma menor o tamanho dos grãos. Em contrapartida, o comprimento focal diminui com o aumento da abertura do diafragma.

- **Diâmetro do Feixe de laser:** O diâmetro do feixe de laser influencia na dimensão do menor objeto possível de ser medido. Pode-se ver na figura 19 que os dois primeiros objetos podem ser medidos sem problemas. Já o terceiro, por possuir uma dimensão menor que a do feixe do laser, acaba inviabilizando a medição.

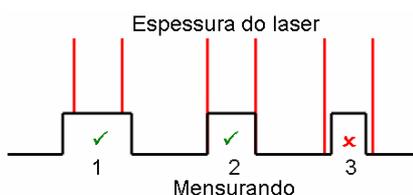


Figura 19 – O diâmetro do laser define o menor obstáculo a ser medido [13].

3.4.2 Características do Mensurando

Características do mensurando podem influenciar a forma como a luz incidente no objeto é visualizada pelo sensor, distorcendo assim a curva de luminosidade. Ao se processar a imagem, o centro de luminosidade da linha ou ponto é artificialmente deslocado, acarretando um erro de medição. A figura 20 ilustra situações onde a forma do objeto acaba deformando a curva de luminosidade da imagem. Note que o ponto determinado pelo sensor se encontra fora da superfície exemplificando o erro de medição ocorrido em cada caso.

A influência do objeto pode ser dividida em três casos básicos:

- **Rugosidade da Superfície:** Se a superfície é muito lisa (polida), a luz do laser quase não tem componente reflexiva difusa, mas reflete predominantemente como num espelho, dificultando drasticamente a visualização do laser na superfície do objeto. Veja o caso (a) na figura 20;
- **Cor da superfície:** uma superfície clara reflete muito mais luz do que uma superfície escura. Mudanças de cor influenciam a imagem obtida. A cor da superfície também gera um erro semelhante ao do caso (a) da figura 20, sendo que nessa situação a luz não é captada pelo sensor por ser absorvida pela cor escura da superfície ao invés de ser fortemente refletida como no caso acima (rugosidade);
- **Forma do Objeto:** Descontinuidades do objeto, regiões de sombra e pontas também deslocam o centro obtido da linha do laser. Veja o caso (b), (c) e (d) na figura 20.

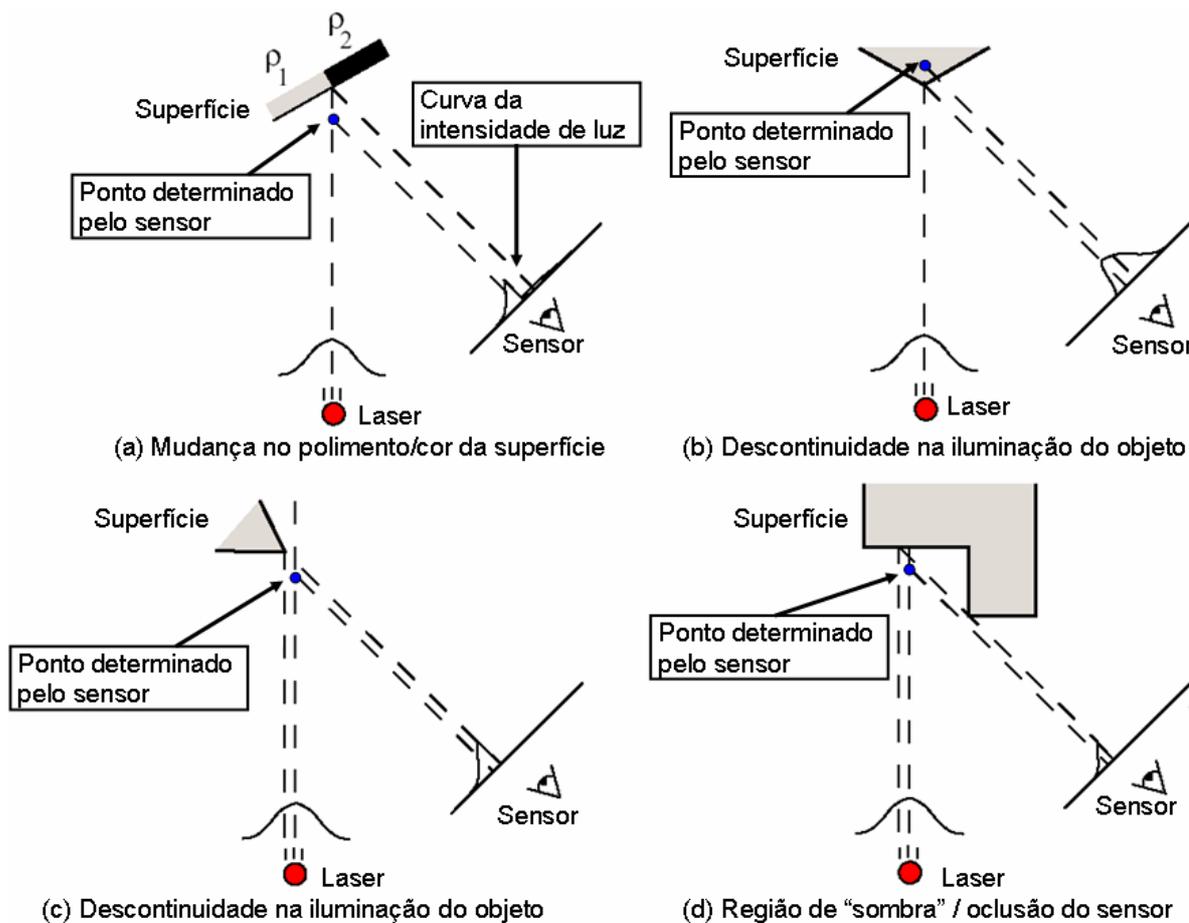


Figura 20 – Erros de medição devido à forma da superfície [12].

3.5 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DUTOS POR TRIANGULAÇÃO LASER

Assim como o Optopig (ver item 2.3.4), que é uma ferramenta especialmente concebida para medições de dutos de gás onde é submetida a um ambiente hostil, existem outros sistemas de inspeção de dutos por triangulação laser para diferentes aplicações. É interessante notar que todos os sistemas de inspeção de dutos encontrados, com exceção do Optopig, são giratórios. Estes são brevemente explicados nos itens a seguir.

3.5.1 QTT (Quest TruTec) Laser Spiral Scan

Esse sistema é preso em cabos tensionados e assim deslocado no interior de um vaso. Utiliza um sensor de distância por triangulação laser giratório, possibilitando a medição do interior do duto, conforme ilustra a figura 21 [18].

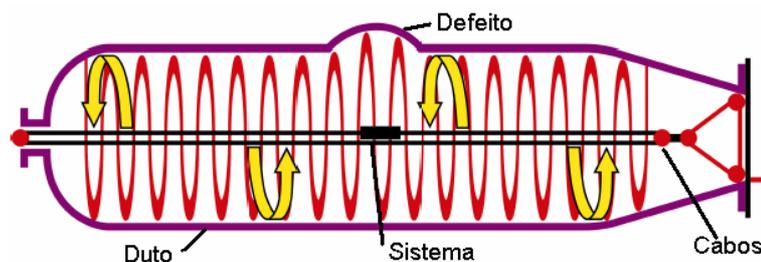


Figura 21 – Esquema da tecnologia de medição giratória (Spiral Scan) [18].

Características fornecidas pelo fabricante:

- É possível repetir a medição usando o sistema de cabos centrado;
- Resolução: 3 mm;
- Não depende da assistência de operadores;
- Possui *software* de visualização fácil de usar.

Aplicação:

- Tambores de coque;
- Vasos de pressão;
- Vasos revestidos com tijolos ou refratários.

3.5.2 Sensor Laser da OMC

O protótipo do sistema foi desenvolvido pela OMC (Optical Metrology Center) em parceria com o governo da Inglaterra e as empresas Thames Water e Subterra com o objetivo inicial de inspecionar dutos de água e esgoto. O tempo gasto com o desenvolvimento foi em torno de um ano e com um custo de aproximadamente 100 mil euros [19].

O sistema utiliza um sensor de triangulação laser 1D que gira 360° enquanto percorre o interior do duto. O ângulo do sensor é obtido através de um *encoder* óptico e um inclinômetro é usado para garantir que todas as medições sejam referenciadas na vertical independentemente do ângulo de inclinação do sistema. Um odômetro é utilizado para obter o deslocamento ao longo do duto.

Uma foto do sistema pode ser vista na figura 22. Nota-se que ao invés de cabos para realizar o deslocamento (ver item 3.5.1), o sistema utiliza um “carrinho”.

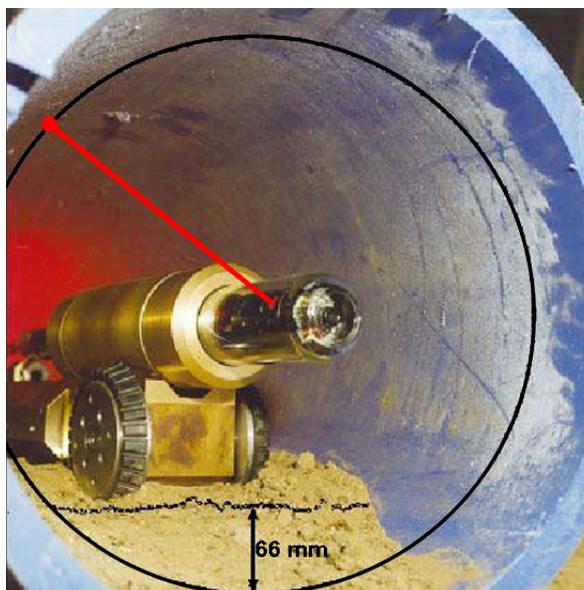


Figura 22 - Foto do OMC laser *Profiler* no interior do duto com ilustração da linha do laser [20].

O primeiro sensor desenvolvido (LP 15/50) provia de uma faixa de medição relativamente grande, cobrindo diâmetros de 150 a 500 mm. Essa grande faixa de medição tem um custo: a incerteza de medição cresce para dutos de grandes diâmetros. Sendo assim, com o objetivo de reduzir a incerteza do sensor, foram desenvolvidos cabeçotes de medição para faixas de medições específicas, esses podem ser vistos nas tabelas 7 e 8 [21]. A tabela 9 expõe as principais características do sistema LP 15/50 como um todo.

Tabela 7 – Sensor laser (Alta precisão) [21].

FM [mm]	2	10	20	50	100	200
Incerteza [mm]	± 0,002	± 0,008	± 0,016	± 0,040	± 0,080	± 0,20

Tabela 8 – Sensor laser (Média precisão) [21].

FM [mm]	5	10	20	50	100	200*
Incerteza [mm]	± 0,010	± 0,020	± 0,14	± 0,10	± 0,20	± 0,80

* Sensor usado no LP 15/50

Tabela 9 – Características do OMC laser *Profiler* LP 15/50 [20].

Parâmetro	Especificação
Tamanho	100 mm diâmetro x 387 mm comprimento
Massa	20 kg
Faixa de diâmetro	Máximo 128 a 528 mm. Típico: 140 a 480 mm
Resolução	0,1 mm
Incerteza radial	± 0,1 a 0,8 mm (depende da distância)
Incerteza angular	± 0,1 °
Comunicação	2 x RS232
Alimentação	24 V / 1 A
Laser	Classe II. Potência < 1 mW

Aplicações:

- Dutos de esgotos;
- Dutos de água;
- Tubulações em geral.

3.5.3 PIRAT (*Pipe Inspection Real-time Assessment Technique*)

O sistema PIRAT - sigla em inglês para *Pipe Inspection Real-time Assessment Technique* (técnica de inspeção e avaliação de dutos em tempo real) – é um sistema desenvolvido pela empresa Australiana⁶ CSRIO para realizar inspeções de esgotos [22].

É equipado com um sensor laser e um sensor de ultra-som que é usado quando o duto está inundado. O sistema também possui uma câmera CCTV (*Closed Circuit TeleVision*), sensores de movimento, cabo de alimentação, controle e transferência de dados e se desloca pelo duto seguindo comandos do operador através de controle remoto.

A foto da figura 23 ilustra o sistema realizando a inspeção em um duto. Já na foto da figura 24 pode-se ver a câmera e as luzes na frente do veículo (direita) e na traseira da ferramenta o sensor laser acoplado.

⁶ A situação de 10% a 15% do sistema de esgoto da Austrália é crítica, onde um defeito pode gerar sérias consequências e a inspeção é uma prioridade [22].

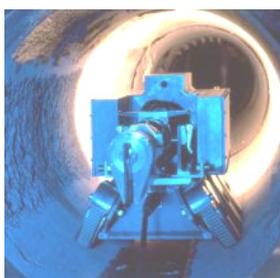


Figura 23 – Foto do PIRAT dentro da tubulação [23].

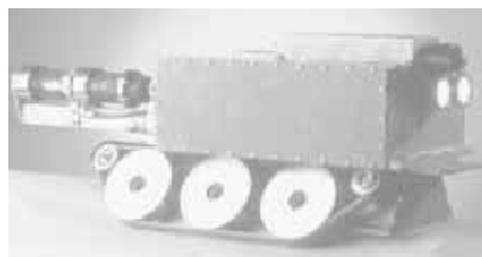


Figura 24 – Foto de perfil do PIRAT [22].

O sensor do PIRAT usa um prisma que gira em torno do eixo do sistema e faz com que o laser seja projetado perpendicularmente ao seu eixo em todo perímetro do duto (ver figura 25). É importante notar que a câmera e o laser ficam estáticos, ao contrário dos sistemas da QTT e OMC (itens 3.5.1 e 3.5.2) onde os sensores é que giram.

A rotação do prisma é feita de forma sincronizada com a taxa de atualização de 50 Hz da câmera, sensibilizando todo o CCD o que possibilita uma medição completa por imagem obtida.

A tabela 10 ilustra as principais características do PIRAT:

Tabela 10 – Característica do PIRAT [22].

Parâmetro	Especificação
Tamanho	900 mm de comprimento
Massa	90 kg
Velocidade de medição	0,1 m/s (dutos de 600 mm de diâmetro) 0,35 m/s (máxima)
Faixa de diâmetro	400 a 880 mm
Resolução radial	1,5 mm
Resolução do perímetro	4 mm
Comunicação	400 Mb/s
Alimentação	1 kW / 240 V (ac)
Laser	785 nm / 20 mW

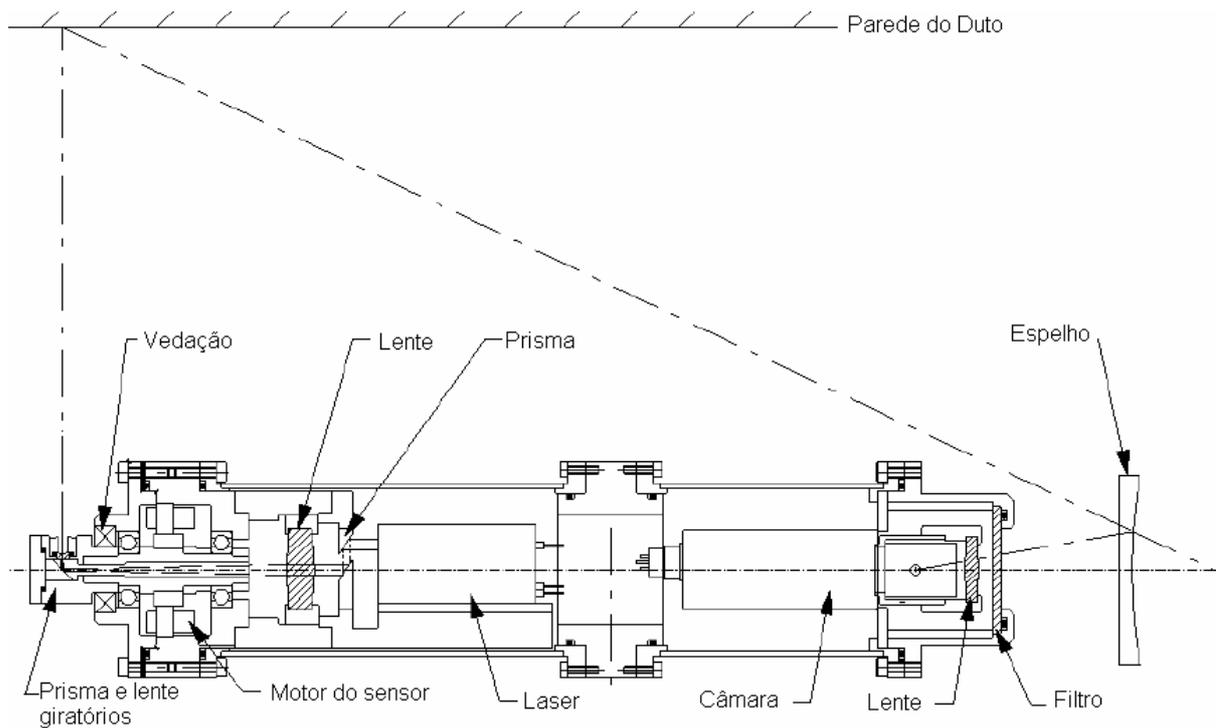


Figura 25 – Vista em corte do sensor óptico do PIRAT [22].

4 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

O processo de desenvolvimento do protótipo foi conduzido em seis etapas principais:

- Definição dos requisitos técnicos e funcionais;
- Definição e escolha da concepção;
- Modelagem do sistema;
- Seleção e aquisição dos componentes;
- Projeto mecânico;
- Montagem do sistema.

4.1 REQUISITOS TÉCNICOS E FUNCIONAIS

O sistema desenvolvido e avaliado nesse trabalho foi concebido almejando atingir requisitos previamente definidos com base em necessidades típicas da indústria do petróleo e gás. Os requisitos fixados são também consonantes com sistemas comerciais de inspeção interna de dutos como *pigs* MFL, ultra-som e principalmente o Optopig.

4.1.1 Características Técnicas

Por conveniência o diâmetro interno nominal do duto a ser medido foi fixado em 152 mm (6"), Este valor coincide com o de outro trabalho de mestrado anteriormente desenvolvido para o qual já existiam vários elementos e padrões que puderam ser aproveitados. É importante destacar que o mesmo princípio de medição pode ser usado para dutos de praticamente qualquer diâmetro.

A faixa de medição fixada é suficiente para abranger não só defeitos a nível de corrosão, como também pequenos amassamentos. A incerteza definida como uma das metas do projeto se compara à de sistemas encontrados no mercado, os quais já são desenvolvidos há anos.

Como o foco do presente trabalho está na medição de seções transversais internas do duto, não foram estabelecidas especificações relacionadas a parâmetros na direção do eixo do duto (coordenada Z), como a forma e velocidade de deslocamento do sensor e sobre a medição de deslocamento axial.

A figura 26 resume as características metrológicas estabelecidas para o sistema.

Metas Definidas para o sistema:

- Diâmetro nominal interno do duto: 152,4 mm (6 ");
- Espessura nominal do duto: 7,0 mm;
- Faixa de medição radial: 65 a 85 mm;
- Incerteza radial: $\pm 0,3$ mm;
- Faixa de medição angular: 360°;
- Resolução circunferencial: 0,5° (não pior que 0,75 mm).

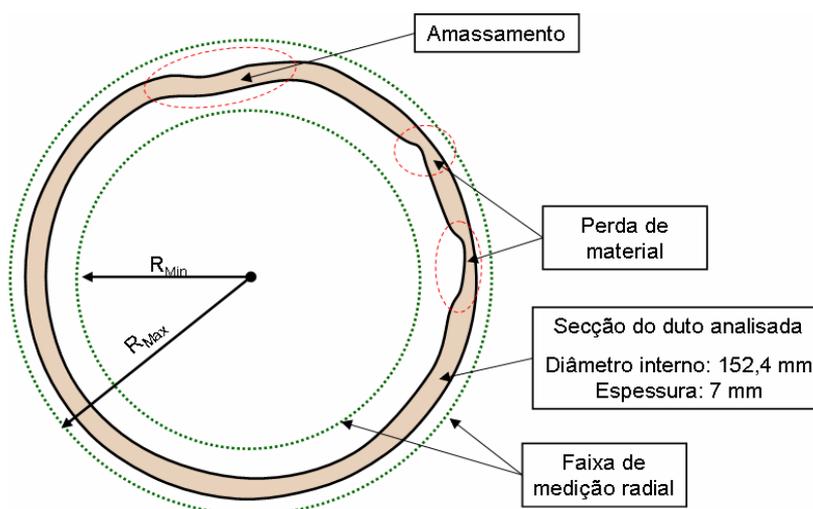


Figura 26 – Esquema da secção do duto demonstrando a faixa de medição e possíveis defeitos.

4.1.2 Sistema de Coordenadas

O sistema fornece resultados da medição de cada seção em coordenadas polares que, aliadas com o deslocamento axial (direção Z), permitirá a medição em coordenadas cilíndricas. Este sistema de coordenadas facilita a análise dos dados e a representação do resultado de medição. A figura 27 ilustra o sistema de coordenadas.

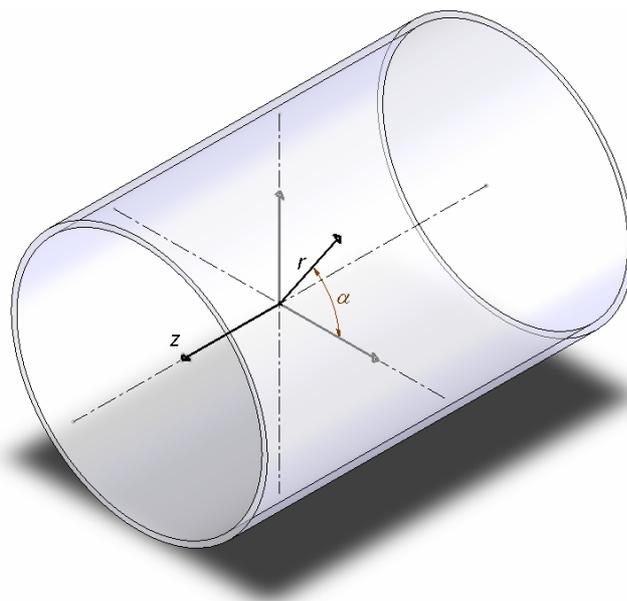


Figura 27 – Sistema de coordenadas polares.

4.2 DEFINIÇÃO E ESCOLHA DA CONCEPÇÃO

Algumas concepções de sistemas de triangulação laser para medição interna de dutos foram citadas nos capítulos 2 e 3. Essas são brevemente comparadas na tabela 11:

Tabela 11 - Comparação entre concepções de STL para medição do perfil interno de dutos.

Tipo de concepção	Vantagens	Desvantagens
STL do tipo folha de luz espalhados ao redor da ferramenta (ex: Optopig)	<ul style="list-style-type: none"> • Robustez • Velocidade de medição 	<ul style="list-style-type: none"> • O uso de vários STL do tipo folha de luz multiplica tarefas como: calibração, análise de imagem, etc. • Necessita fazer a fusão dos dados obtidos pela análise das imagens para assim reconstituir todo o perímetro da superfície medida.
Sensor linear giratório (ex: sensor OMC)	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicidade do modelo de cálculo • Possibilidade do uso de sensor linear (<i>pixel array</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Partes móveis podem ser fontes de incerteza e se deteriorar com desgaste. • Velocidade do sistema é limitada pela velocidade de giro do sensor
Sensor linear com prismas giratórios (ex: PIRAT)	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade do uso de sensor linear (<i>pixel array</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Partes móveis podem ser fontes de incerteza e se deteriorar com desgaste. • Velocidade do sistema é limitada pela velocidade de giro dos prismas

Foi idealizada uma concepção diferente das já citadas nesse trabalho. Esse é um sistema sem partes móveis que utiliza apenas uma câmera e um laser. A idéia é projetar um plano de laser perpendicular ao eixo do duto e que ilumine todo perímetro da secção analisada simultaneamente. Isso é possível projetando um ponto ou um círculo de laser colimado em um espelho cônico com ângulo de 45°, que é defletido radialmente. A câmera visualiza integralmente esse anel e toda a secção pode ser medida de uma vez. Dessa forma é possível conceber um sistema robusto, sem partes giratórias e que é capaz de realizar a medição de uma secção com a análise de apenas uma imagem.

É importante notar que, com o uso de uma câmera e uma lente objetiva comum, o aproveitamento do CCD é baixo, pois grande parte do sensor visualiza o interior do duto ao invés de sua parede. Para solucionar esse problema é necessário desviar o caminho óptico do sistema para a parede do duto. Isso pode ser feito com o auxílio de uma lente cônica ou um espelho cônico. Dessa maneira foram propostas e analisadas as três configurações ilustradas na figura 28.

- A) Espelho cônico e câmera oposta ao laser:** Essa concepção possui como desvantagem a obstrução de uma parte da imagem devido à passagem do cabo da câmera.
- B) Espelho cônico e câmera de frente para o espelho:** O problema encontrado na concepção A é eliminado.
- C) Lente cônica:** O uso de uma lente cônica traz como vantagens: não inverte a imagem e por ficar mais próxima à câmera, facilita o alinhamento.

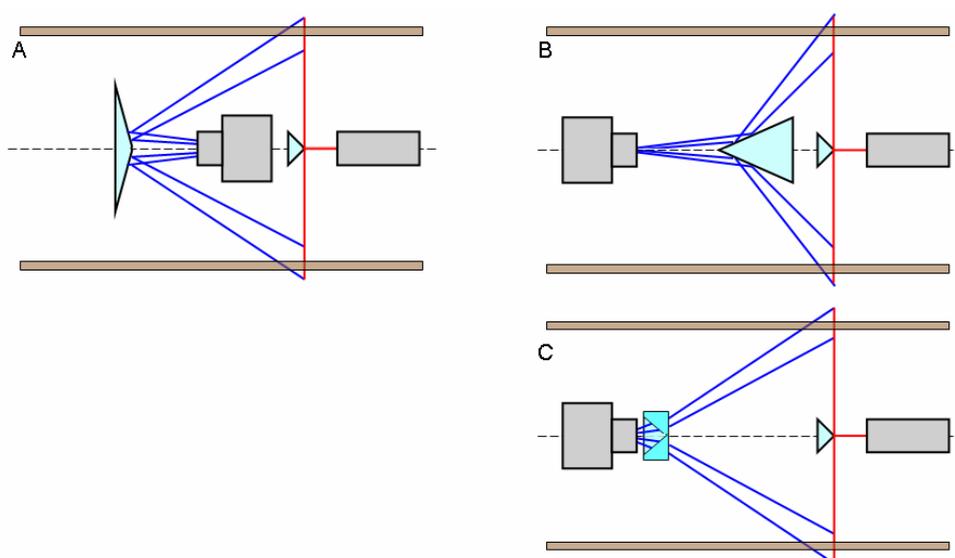


Figura 28 – Concepções idealizadas para o projeto.

O protótipo foi inicialmente concebido de forma que suportasse tanto um espelho cônico (EC) como uma lente cônica (LC) (concepções B e C da figura 28). No entanto, devido a questões logísticas (custo e tempo de entrega), o sistema com LC não pôde ser suficientemente testado, ficando assim o desenvolvimento e avaliação do sistema restrito apenas ao uso de um EC.

Todavia, alguns testes chegaram a ser feitos com uma LC (45°) a qual ficou temporariamente disponível de um outro projeto [24]. A imagem obtida com a LC não possui o efeito de inversão causado pelo espelho cônico. Como consequência, a variação da resolução angular é reduzida (esse efeito é melhor explicado no tópico 4.3.2), pois o perímetro do duto em milímetros é diretamente proporcional ao perímetro em *pixels* no CCD. Além disso, o uso de uma LC possibilita a utilização de uma área útil um pouco maior do CCD. No entanto, o astigmatismo e aberrações cromáticas causados pela lente cônica parecem ser mais severos do que os causados pelo espelho cônico, fato que degrada a qualidade da imagem e da

medição. Apesar disso, mais testes devem ser efetuados em trabalhos futuros de forma a verificar a viabilidade do uso de uma LC no sistema.

4.3 MODELAGEM DO SISTEMA

Definida a concepção, o sistema foi modelado com o intuito de verificar sua resolução, comportamento, requisitos de componentes e de projeto mecânico.

4.3.1 Geração do Plano de Laser

Para geração do plano de luz com o laser, o qual deve iluminar toda a superfície interna do duto na seção analisada, foram utilizados um espelho cônico com ângulo de 45° e um laser diodo. Com o auxílio de um sistema de alinhamento (ver item 4.5.3) é possível direcionar o feixe de laser para o vértice do espelho, obtendo assim o plano desejado.

4.3.2 Definição da Área Útil do CCD

A imagem capturada pelo CCD será proveniente da reflexão da superfície interna do duto em um espelho cônico. Sendo assim, é necessário compreender a forma como o espelho cônico reflete o espaço ao seu redor. Pode-se ver na figura 29 como essa reflexão ocorre, onde um desenho aparentemente sem forma definida quando refletido no espelho forma a imagem de um guarda-chuva. Essa figura ilustra uma característica importante dos espelhos cônicos: a grande concentração de dados em sua ponta, que torna a imagem muito compacta. Devido a esse efeito, deve-se descartar a região central da imagem refletida no espelho cônico. Foi então decidido descartar a região circular compreendendo o primeiro terço interno da imagem refletida no espelho cônico, cujo diâmetro corresponde a $1/3$ da menor dimensão do CCD.



Figura 29 – Reflexão em um espelho côncavo [25].

A área útil do CCD é restrita a um anel, com o maior e o menor diâmetro limitados respectivamente pela menor dimensão do sensor (A_{CCD}) e por $D1_{CCD}$. Essa região pode ser vista na figura 30.

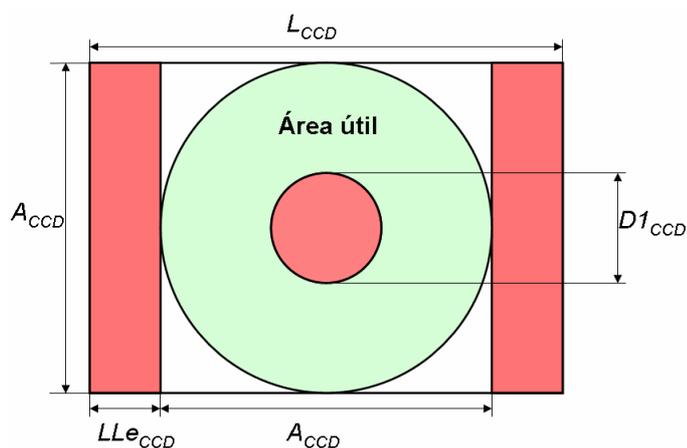


Figura 30 – Representação da área útil do CCD.

$$D1_{CCD} = \frac{A_{CCD}}{3} \quad (3)$$

Onde:

- A_{CCD} : Altura do CCD;
- L_{CCD} : Largura do CCD;
- $D1_{CCD}$: Diâmetro da região descartada;
- LLe_{CCD} : Largura lateral excluída.

4.3.3 Modelo 2D

Tendo em vista a simetria axial do sistema, foi utilizado um modelo 2D (vista em corte) do mesmo. Este modelo, mostrado na figura 31, possibilitou o

dimensionamento do protótipo, auxiliando a definição de parâmetros como: distâncias entre os componentes, comprimento focal da lente, ângulo e dimensão dos espelhos. Note que o caminho óptico destacado (linha laranja) mostra que o ponto de início da faixa de medição (FM), que corresponde ao menor raio mensurável na parede do duto, é projetado no *pixel* localizado na periferia do CCD.

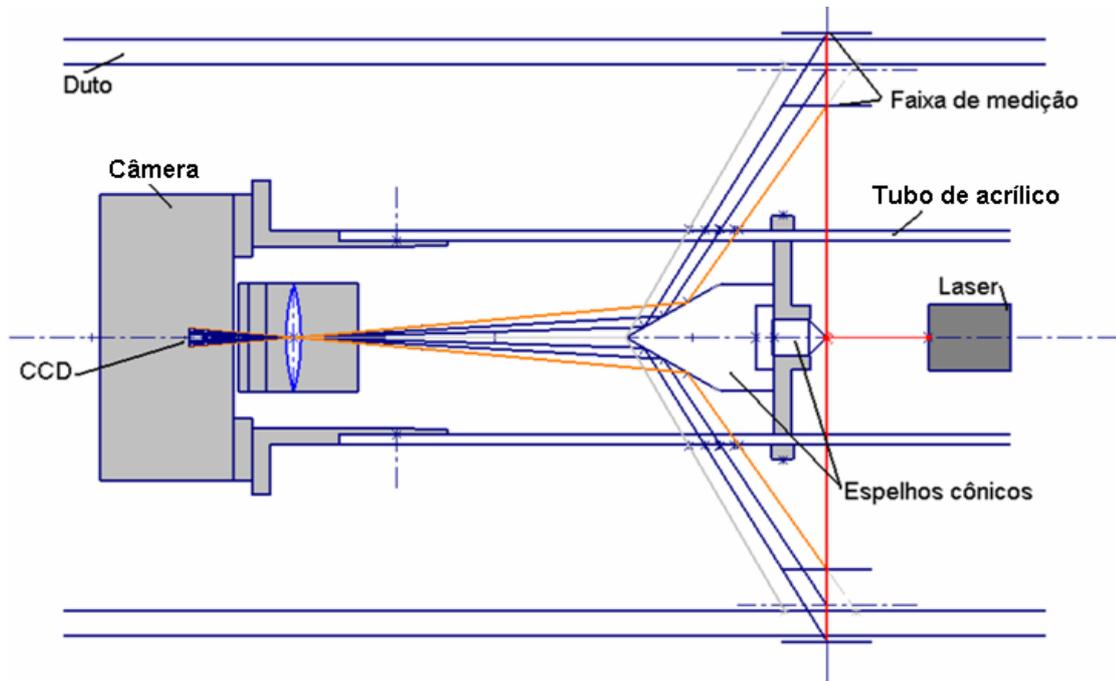


Figura 31 – Esquema em corte do sistema (modelagem 2D).

4.3.4 Resolução Radial (profundidade)

Os cálculos das resoluções (radial e angular) auxiliaram na escolha do CCD adequado para a aplicação.

A resolução radial bruta em milímetros pode ser calculada dividindo a faixa de medição pelo número de *pixels* utilizados, sendo assim:

$$Res_{rad} = \frac{FM_{mm}}{FM_{pixels}} \quad (4)$$

Sendo que o número de *pixels* disponível é:

$$FM_{pixels} = \frac{A_{CCD} - DI_{CCD}}{2} = \frac{A_{CCD} - \frac{A_{CCD}}{3}}{2} = \frac{A_{CCD}}{3}$$

$$FM_{pixels} = \frac{A_{CCD}}{3} \quad (5)$$

Substituindo (5) em (4):

$$Res_{Rad} = \frac{3 \cdot FM_{mm}}{A_{CCD}} \quad (6)$$

Onde:

- Res_{Rad} : Resolução radial;
- FM_{mm} : Faixa de medição em milímetros;
- FM_{pixel} : Faixa correspondente na imagem em *pixels*.

É importante ressaltar que a análise da imagem utiliza cálculos sub-*pixels*, o que melhora ainda mais a resolução do sistema. A tabela 12 ilustra o cálculo da resolução bruta para diferentes CCDs.

Tabela 12 – Resolução radial para diferentes CCDs.

CCD [pixels]	A_{CCD} [pixels]	Resolução radial
1600x1200	1200	0,05 mm
800x600	600	0,1 mm
640x480	480	0,125 mm

4.3.5 Resolução Circunferencial

A resolução circunferencial pode ser expressa em unidades de ângulo ou de comprimento. Quando expressa em termos angulares é sempre constante. Quando expressa em comprimento, a resolução circunferencial varia em função do diâmetro do duto medido. Quanto maior o diâmetro do duto em milímetros, menor será o diâmetro em *pixels* da imagem resultante devido à reflexão no espelho cônico. Assim, a pior resolução do sistema é atingida quando se está medindo uma seção no valor máximo da faixa de medição. A tabela 13 ilustra o cálculo da resolução circunferencial bruta para diferentes CCDs.

A resolução circunferencial máxima ($Res_{Ang.Max}$) é calculada dividindo o maior perímetro em milímetros pelo menor perímetro em *pixels*:

$$Res_{Ang.Max} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot R_{Max}}{\pi \cdot DI_{CCD}} \quad (7)$$

Simplificando a equação e substituindo (3) em (7):

$$Res_{Ang.Max} = \frac{6 \cdot R_{Max}}{A_{CCD}} \quad (8)$$

Dessa mesma forma, a menor resolução pode ser calculada, substituindo valores mínimos por máximos e vice-versa:

$$Res_{Ang.Min} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot R_{Min}}{\pi \cdot A_{CCD}} \quad (9)$$

$$Res_{Ang.Min} = \frac{2 \cdot R_{Min}}{A_{CCD}} \quad (10)$$

Onde:

- $Res_{Ang.Max}$: Resolução circunferencial máxima;
- $Res_{Ang.Min}$: Resolução circunferencial mínima;
- R_{Max} : Raio máximo/final da faixa de medição (85 mm);
- R_{Min} : Raio mínimo/início da faixa de medição (65 mm).

Tabela 13 – Resolução circunferencial para diferentes CCDs.

CCD	A_{CCD}	$D1_{CCD}$	$Res_{Ang.Min}$	$Res_{Ang.Max}$
1600x1200	1200	400	0,108 mm	0,425 mm
800x600	600	200	0,217 mm	0,850 mm
640x480	480	160	0,271 mm	1,06 mm

4.3.6 Definição da Resolução do CCD

Optou-se por um CCD com resolução mínima de 1200 *pixels* garantindo que o CCD não seja o fator limitante da resolução do sistema. Sendo assim, selecionou-se uma câmera com resolução de 1600 x 1200 *pixels* e tamanho de *pixel* de 4,4 μm (mais detalhes na descrição dos componentes, item 4.4.1).

Sendo assim, pôde-se definir alguns parâmetros referentes ao sensor, os quais são listados na tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros definidos do sensor CCD.

Descrição	Variável	Valor
Altura do CCD	A_{CCD}	1200 pixel
Largura do CCD	L_{CCD}	1600 pixel
Diâmetro	$D1_{CCD}$	400 pixel
Faixa de medição em <i>pixels</i>	FM_{pixel}	400 pixel
Resolução radial	Res_{Rad}	0,05 mm
Resolução circunferencial mínima	$Res_{Ang.Min}$	0,108 mm
Resolução circunferencial máxima	$Res_{Ang.Max}$	0,425 mm

4.3.7 Modelagem Matemática

Com o objetivo de avaliar o comportamento do sensor, um modelo matemático foi desenvolvido. É importante notar que nessa análise o sistema foi considerado perfeitamente alinhado, isto é, todos os componentes ópticos são coaxiais. Do contrário, o equacionamento geral do mesmo seria de grande complexidade, necessitando levar em conta possíveis deslocamentos para cada um dos componentes (câmera, espelhos e laser). A refração no acrílico também foi desconsiderada, a qual pouco influencia no comportamento geral do sistema.

Mesmo desprezando um possível desalinhamento, o modelo matemático resultante já é capaz de fornecer uma boa estimativa da relação dos valores medidos em *pixel* com a distância da parede do duto ao eixo central do sensor em milímetros.

Equacionamento:

O modelo matemático foi equacionado com base nas leis de reflexão, no modelo da câmera “*pinhole*” e com as relações trigonométricas. Foi elaborado em função de vários parâmetros geométricos e de acordo com a figura 32.

A partir da análise da figura 32 a distância da parede do duto ao eixo central do sensor (R) pode ser calculada por:

$$R = z_4 \cdot \tan(\alpha_4) \quad (11)$$

Para encontrar o valor de z_4 e α_4 foram utilizadas as seguintes relações:

$$\alpha_1 = \text{atan}\left(\frac{y}{f}\right) \quad (12)$$

$$\alpha_2 = \theta_E - \alpha_1 \quad (13)$$

$$\alpha_3 = \pi - \theta_E \quad (14)$$

$$\alpha_4 = \theta_E + \alpha_2 \quad (15)$$

$$H_E = \frac{D_{EC}}{2} \cdot \frac{1}{\tan(\theta_E)} \quad (16)$$

$$x_2 = D_{EC} - H_E \quad (17)$$

Aplicando a lei dos senos no triângulo formado pelos lados: x_2 , x_3 e uma parcela da parede do espelho:

$$x_3 = \frac{x_2 \cdot \text{sen}(\alpha_3)}{\text{sen}(\alpha_2)} \quad (18)$$

$$r_1 = x_3 \cdot \text{sen}(\alpha_1) \quad (19)$$

$$z_1 = x_3 \cdot \cos(\alpha_1) \quad (20)$$

$$z_2 = D_{CEC} - z_1 \quad (21)$$

$$z_3 = \frac{r_1}{\tan(\alpha_4)} \quad (22)$$

$$z_4 = z_2 + z_3 + D_{EL} \quad (23)$$

Substituindo as relações na função (11), e considerando os parâmetros geométricos do sistema como conhecidos, obtém-se a seguinte função expandida:

$$R(y) = \left[D_{EC} + D_{EL} + \frac{\left(D_{CEC} - \frac{D_{EC}}{2} \cdot \frac{1}{\tan(\theta_E)} \right) \cdot \text{sen}(\theta_E)}{\text{sen}\left(\theta_E - \text{atan}\left(\frac{y}{f}\right)\right)} \cdot \left(\frac{\text{sen}\left(\text{atan}\left(\frac{y}{f}\right)\right)}{\tan\left(2 \cdot \theta_E - \text{atan}\left(\frac{y}{f}\right)\right)} - \cos\left(\text{atan}\left(\frac{y}{f}\right)\right) \right) \right] \cdot \tan\left(2 \cdot \theta_E - \text{atan}\left(\frac{y}{f}\right)\right) \quad (24)$$

Sendo assim, o valor de R depende somente de y , considerando D_{CEC} , D_{EC} , D_{EL} , θ_E e f como constantes definidas no projeto.

Onde:

- D_{CEC} : Distância do centro óptico da lente ao fim do espelho cônico da câmera;
- D_{EC} : Diâmetro do espelho cônico da câmera;
- D_{EL} : Distância entre o fim do espelho cônico da câmera e o plano de laser;
- θ_E : Ângulo do espelho cônico da câmera em graus;
- H_E : Altura do espelho cônico;

- f : Distância do CCD ao centro óptico da lente;⁷
- y : Distância do centro do CCD ao ponto em que o caminho óptico o atinge;
- R : Distância do eixo do sistema à parede do duto;
- $x_2, x_3, r_1, z_1, z_2, z_3, z_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$: Parâmetros auxiliares.

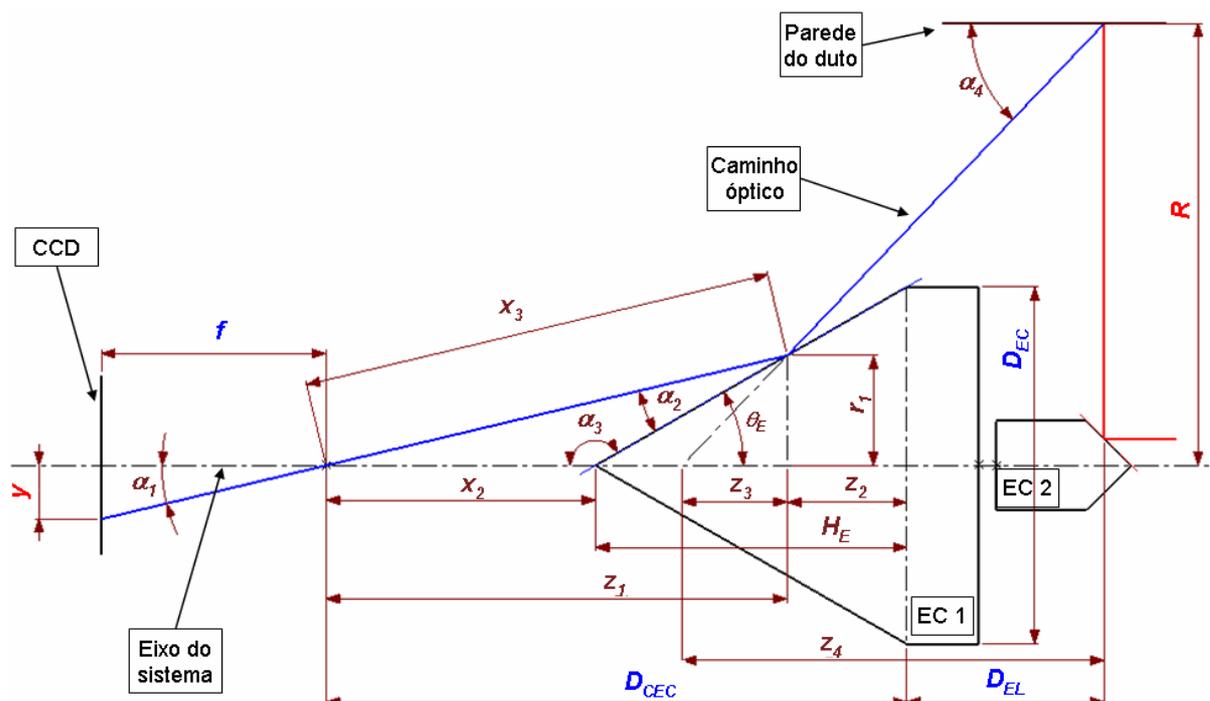


Figura 32 – Modelo do sistema (parâmetros conhecidos em azul).

Gráfico de Calibração Teórico:

O gráfico de calibração teórico é obtido traçando a função $R(y)$ em função de y variando do início ao final da faixa de medição. Para traçar um gráfico típico de $R(y)$ foram fixados valores para os cinco parâmetros apresentados na equação (24). Esses valores foram definidos em função das características geométricas e ópticas desejadas para o sistema (ver tabela 15).

⁷ f é o valor do comprimento focal da lente quando a mesma está focando um objeto no infinito. Como nesse caso o objeto não está no infinito, o valor real de f é provavelmente um pouco maior do que 25 mm.

Tabela 15 – Parâmetros do projeto.

Descrição	Variável	Valor
Distância do centro óptico da lente ao fim do espelho cônico da câmera	D_{CEC}	117,0 mm
Diâmetro do espelho cônico da câmera	D_{EC}	30,0 mm
Distância entre o fim do espelho cônico da câmera e o plano de laser	D_{EL}	28,5 mm
Ângulo do espelho cônico da câmera	θ_E	30°
Distância do CCD ao centro óptico da lente	f	25 mm

O menor lado do CCD definido no projeto possui resolução de 1200 *pixels*. Dessa forma, conforme definido no item 4.3.2, a área de medição disponível possui um raio mínimo e máximo de 200 e 600 *pixels* respectivamente. Para se traçar o gráfico da variação em milímetros devido à variação em *pixels*, deve-se converter o valor de y de *pixels* para milímetros. Para isso, basta multiplicar o parâmetro de entrada que está em *pixels* (yp) pelo tamanho de cada *pixel* (4,4 μm). Por exemplo, o primeiro ponto do gráfico na posição 200 *pixels* deve ser passado para função como 0,88 mm:

$$y = yp \cdot (\text{Tamanho de 1 Pixel}) = 200 \cdot 4,4 = 880 \mu\text{m} = 0,88 \text{ mm}$$

A função $R(y)$ pode ser vista na figura 33 onde yp varia de 200 a 600 *pixels*, o que equivale à variação de y de 0,088 a 2,640 milímetros. Fica evidente no gráfico o efeito de inversão causado pelo espelho cônico.

Na figura 34 procura-se mostrar a ordem do polinômio que melhor se ajusta aos pontos obtidos. Nota-se que tanto a curva de segunda ordem quanto a de terceira representam muito bem a função teórica (o erro da equação linear fica evidente nas extremidades das restas do gráfico da figura 34). A escolha da função de terceira ordem foi feita com base em experimentos exploratórios, que serão descritos no capítulo 6. A curva de terceira ordem representou melhor os pontos obtidos. Um dos fatores que pode explicar isso é a refração no acrílico que não foi considerada no equacionamento, a qual insere não linearidade ao sistema além de deslocar um pouco a faixa de medição.

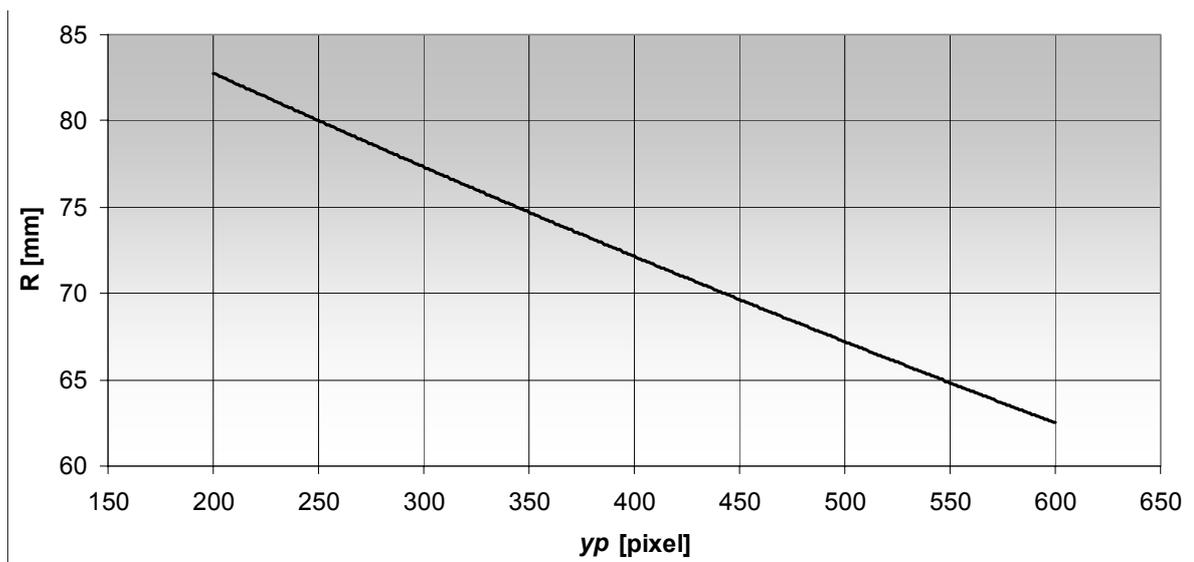


Figura 33 – Função de calibração teórica $R(y_p)$ na faixa de medição estipulada.

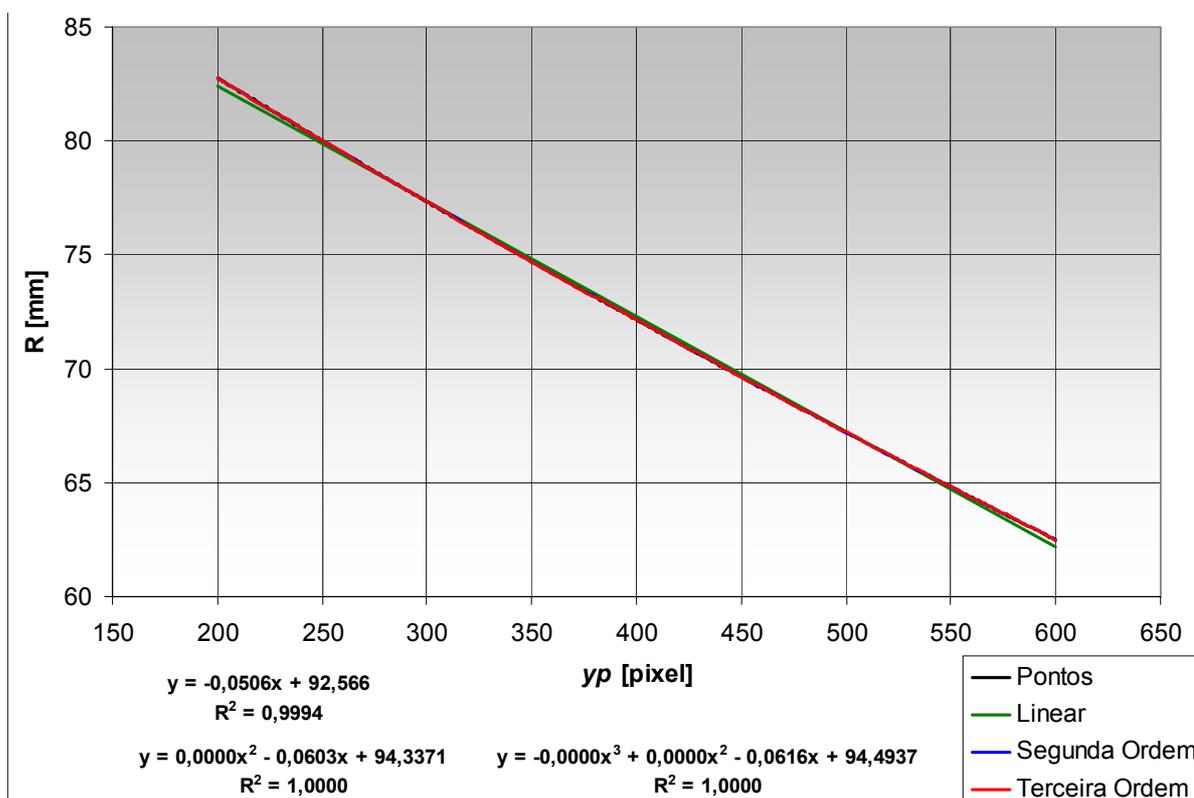


Figura 34 – Curvas ajustadas à função de calibração teórica.

4.4 COMPONENTES

Os componentes utilizados no protótipo são listados a seguir, indicando seus fabricantes e principais características.

4.4.1 Câmera

Como detector do sistema foi selecionada a câmera Scorpion da Pointgrey (ver figura 35), a qual além de ser compacta possui resolução, interface de comunicação e pontos de fixação adequados para o sistema.

Câmera Scorpion – Principais Características:

- Modelo: SCOR-20SO;
- CCD: 1/1,8”;
- Resolução máxima: 1600 x 1200 *pixels*;
- Tamanho do pixel: 4,4 μm x 4,4 μm ;
- Interface de comunicação: Firewire (IEE-1394);
- Dimensões: 40 x 50 x 50 mm;
- Padrão de encaixe da lente: CS-Mount.



Figura 35 – Câmera Scorpion, padrão IEEE-1394.

4.4.2 Lente Objetiva

Como definido durante a modelagem do sistema, a lente escolhida possui comprimento focal de 25 mm (ver figura 36). Além disso, possui dimensões reduzidas, o que facilita seu uso no sistema devido a restrições de espaço do projeto.



Figura 36 – Lente de comprimento focal de 25 mm.

Lente Objetiva – Principais Características:

- Fabricante: Edmund Optics;
- Modelo: Compact Fixed Focal Length 25 mm;
- Comprimento Focal: 25 mm;
- Massa: 40 g;
- Tamanho máximo de CCD: 2/3";
- Diâmetro: 30,5 mm;
- Comprimento: 25,5 mm;
- Padrão de encaixe: C-Mount.

4.4.3 Espelhos Cônicos (EC's)

O espelho cônico do laser foi importado enquanto o da câmera foi fabricado dentro da Universidade Federal de Santa Catarina pelo LMP (Laboratório de Mecânica de Precisão). A tabela 16 contém informações sobre ambos.

Tabela 16 – Características dos espelhos cônicos.

	Câmera	Laser
Ângulo da ponta [°]	60,0 ± 0,1	90,0 ± 0,1
Diâmetro máximo [mm]	30,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1
Base de fixação [mm]	15,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1
Fabricante	LMP/UFSC	Edmund Optics

4.4.4 Laser

O laser escolhido (ver figura 37) é um laser diodo operando no vermelho, compacto, alimentado por corrente contínua e com potência suficiente para sensibilizar o sensor de forma adequada mesmo quando incide sob superfícies mais

escuras, como no caso dos dutos que podem se apresentar na cor marrom (material oxidado).

A seleção do laser foi também atrelada à seleção de uma rede difrativa especial qual deveria gerar um círculo de laser. Esse círculo seria então colimado e projetado no espelho cônico do laser para formar o plano de luz. No entanto, a rede difrativa enviada pelo fabricante gerava ao invés de um, diversos círculos e um feixe central. Além disso, a qualidade da imagem gerada pela rede não era boa o suficiente. Sendo assim, optou-se por remover a rede difrativa e direcionar um feixe de laser na ponta do espelho, o que produziu um plano de luz de melhor qualidade e menor espessura.

O ponto projetado pelo laser diodo possui um perfil de intensidade elíptico, acarretando em um eixo de maior intensidade de luz. Todavia, esse efeito é amenizado com o auxílio de um filtro espacial formado com um anteparo fixado sobre a superfície externa do tubo de acrílico com uma fenda de $(0,5 \pm 0,2)$ mm. A espessura da linha do laser incidente no duto ficou em torno de 0,3 a 0,7 mm.

Laser – Principais Características:

- Fabricante: StockerYale;
- Tipo: SNF laser;
- Comprimento de onda: 660 nm;
- Potência: 50 mW.



Figura 37 – Foto do laser.

4.4.5 Tubo de Acrílico

Para fixação dos componentes utilizou-se um tubo de acrílico transparente com 60 mm de diâmetro e parede de 3 mm de espessura, o qual possibilita a visão de 360° da parede interna do duto.

Acrílico – Principais Características:

- Fabricante: Acriltec;
- Comprimento: 300 mm;
- Diâmetro externo nominal: 60 mm;
- Espessura nominal da parede: 3 mm.

4.4.6 Computador

Foi utilizado um computador pessoal (PC) comum para processamento das imagens através do programa desenvolvido para o projeto.

Computador Utilizado – Principais Características:

- Frequência do Processador: 3,2 Ghz;
- Memória RAM: 1 Gb;
- Disco rígido: 80 GB (7200 RPM);
- Sistema operacional: Windows XP SP2.

4.5 PROJETO MECÂNICO

Tendo como base o modelo 2D do sistema, o projeto mecânico foi desenvolvido almejando suportar os componentes da melhor maneira possível, permitindo o alinhamento relativo e mantendo o conjunto rígido. Pode-se dividir o projeto mecânico em três partes principais: sistema de visão, sistema de espelhos e sistema de iluminação. Essas são explanadas a seguir.

4.5.1 Sistema de Visão

O principal componente projetado para o sistema de visão é o flange, a qual suporta o conjunto câmera lente. No projeto do flange também foi prevista a possibilidade de fixar uma lente cônica e um filtro em seu interior, o qual é utilizado para amenizar a distorção cromática causada pela lente cônica. A figura 38 ilustra a

vista “explodida” do sistema da câmera, discriminando cada um dos componentes. Já na figura 39 pode-se ver o sistema montado.

Componentes do sistema de visão referentes à figura 38:

- A) Câmera;
- B) Adaptador C / CS Mount e espaçador⁸ de 0,5 mm;
- C) Lente;
- D) Adaptador flange-câmera;
- E) Flange;
- F) Lente cônica;
- G) Anel de proteção da lente cônica;
- H) Filtro;
- I) Anel de fixação do filtro e lente cônica;

* Componentes utilizados somente para a configuração com lente cônica.

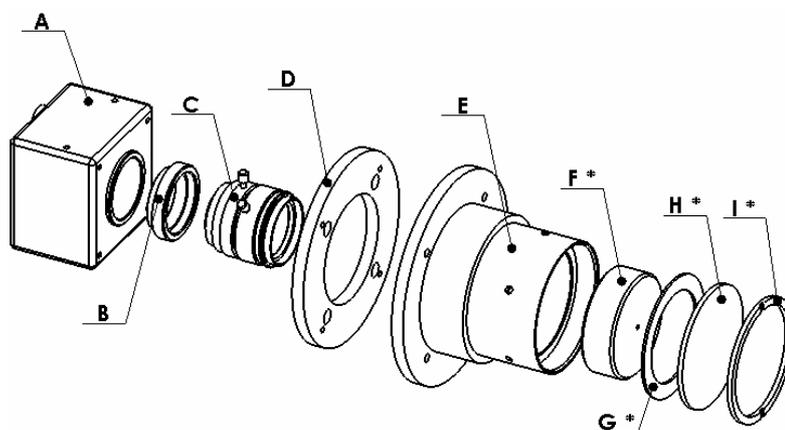


Figura 38 – Vista explodida do projeto do sistema de visão.

⁸O sistema foi testado com diversos espaçadores (0,5; 1; 1,5 e 5 mm) e o de 0,5 mm foi o que resultou em um melhor foco da linha de LASER.

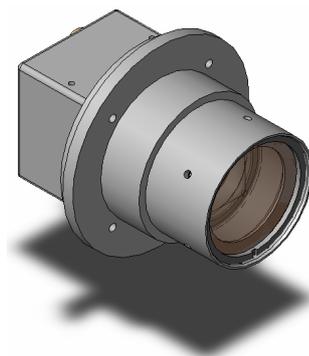


Figura 39 – Vista do sistema de visão montado.

4.5.2 Sistema de Espelhos

O sistema de espelhos se localiza no centro do protótipo. É formado por um componente principal que suporta o espelho cônico da câmera e do laser. As figuras 40 e 41 ilustram respectivamente a vista explodida e montada desse sistema.

Componentes do sistema de espelhos referentes à figura 40:

- A) Espelho cônico da câmera;
- B) Suporte dos espelhos;
- C) Anel para fixação do espelho cônico do laser;
- D) Espelho cônico do laser;
- E) Parafusos de fixação do espelho cônico da câmera.

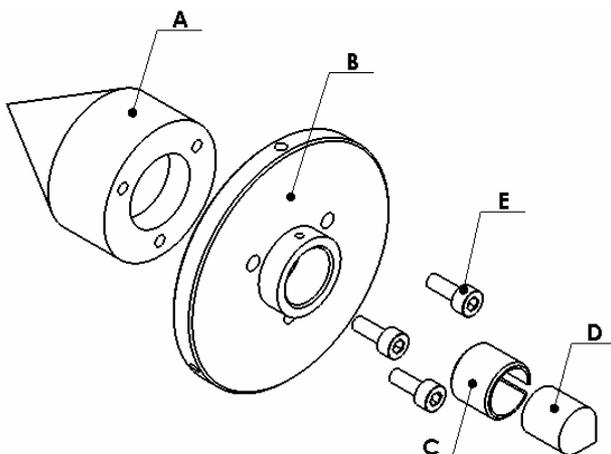


Figura 40 – Vista explodida do projeto do sistema dos espelhos.

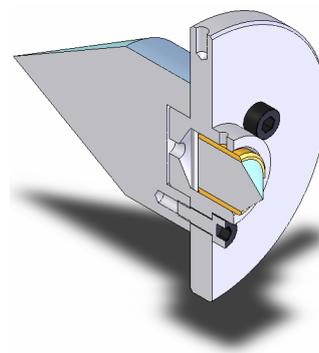


Figura 41 – Vista em corte do projeto do sistema dos espelhos.

4.5.3 Sistema de Iluminação

Para a iluminação foi desenvolvido um sistema de suporte e posicionamento do laser de forma a facilitar seu alinhamento em relação ao espelho cônico, possibilitando assim a geração do plano de laser desejado. Esse sistema consiste de dois anéis de alumínio que possuem quatro furos para fixação no acrílico e outros quatro para o alinhamento do laser. Em cada anel são utilizados dois pinos com molas que pressionam o laser contra um parafuso. Esse parafuso possui uma fenda em sua ponta e possibilita alterar a posição do laser. A figura 42 mostra a visão explodida do sistema de alinhamento do laser discriminando cada um dos componentes. Na figura 43, pode-se ver na vista em corte do subsistema de iluminação, a forma como os componentes se encaixam.

Componentes do sistema de iluminação referentes à figura 43:

- A) Anel principal de fixação;
- B) Parafusos com corte para o aperto;
- C) Porca para travar o pino deslizante;
- D) Parafuso de limitação dos pinos de contato deslizante;
- E) Mola;
- F) Pinos com contato deslizante com o anel.

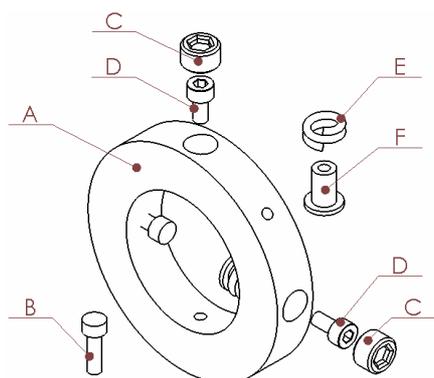


Figura 42 – Vista explodida de um dos dois suportes do subsistema de iluminação.

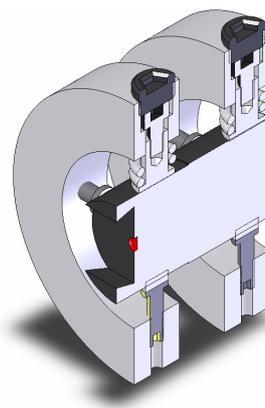


Figura 43 – Vista em corte do subsistema de iluminação.

4.5.4 Projeto Completo

Todos os subsistemas são fixados no tubo de acrílico formando assim o sistema final, adicionando somente a flange de suporte que se encontra montado no tubo de acrílico no lado oposto ao da câmera. Pode-se ver na figura 44 a imagem em corte do projeto final do protótipo em conjunto da concepção artística de um duto e um plano de laser.

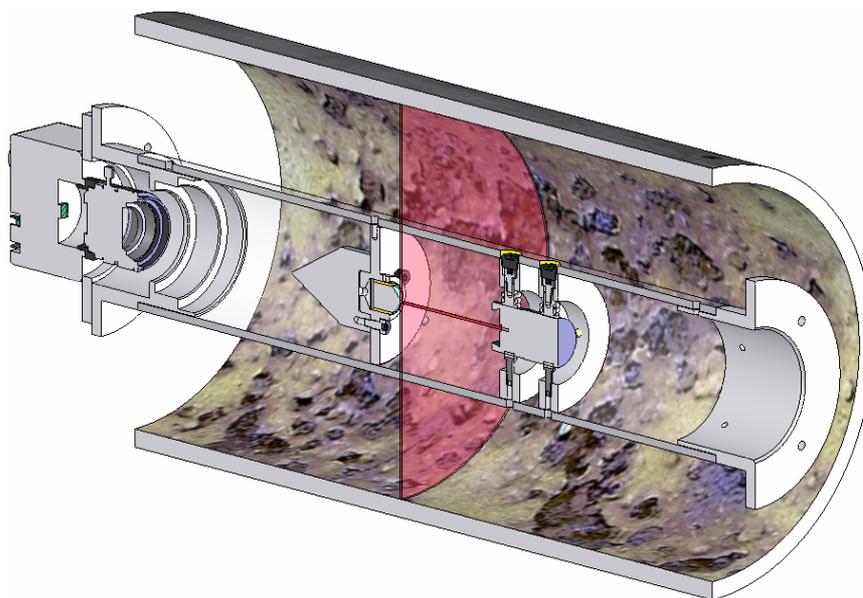


Figura 44 – Vista em corte do projeto do protótipo com ilustração do plano do laser e duto.

4.6 MONTAGEM

Como última etapa do desenvolvimento do *hardware*, foi feita a montagem do protótipo, integrando as partes metálicas construídas com os componentes comprados.

As figuras 45 e 46 confrontam uma imagem do projeto mecânico desenvolvido no *software* SolidWorks com uma foto do protótipo montado.

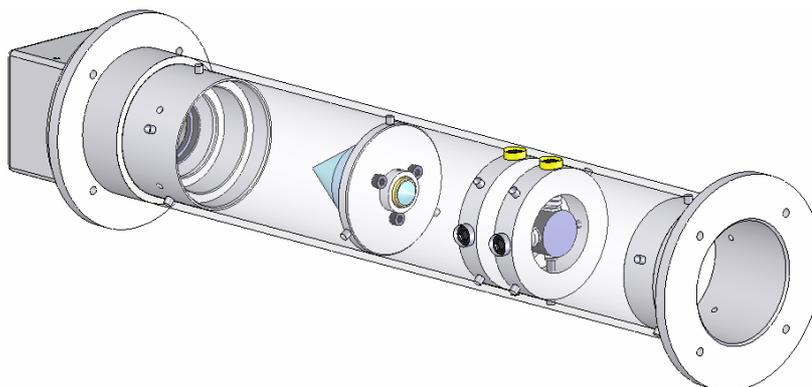


Figura 45 – Projeto final do protótipo.



Figura 46 – Foto do protótipo montado⁹.

⁹ A capa preta sobre o subsistema de espelhos é um filtro espacial o qual foi utilizado para melhorar a qualidade da linha do laser.

5 SOFTWARE DE MEDIÇÃO

O *software* de medição realiza as funções de aquisição e análise da imagem, sendo capaz de fornecer um gráfico 2D que descreve de forma clara, o perfil da secção iluminada pelo laser.

5.1 ESTRUTURAÇÃO

O diagrama de blocos da figura 47 descreve a estrutura geral do *software*, sendo cada uma das etapas descritas no tópico seguinte.

Note que são indicados nos blocos dos filtros o tamanho da máscara e o número de iterações realizadas.

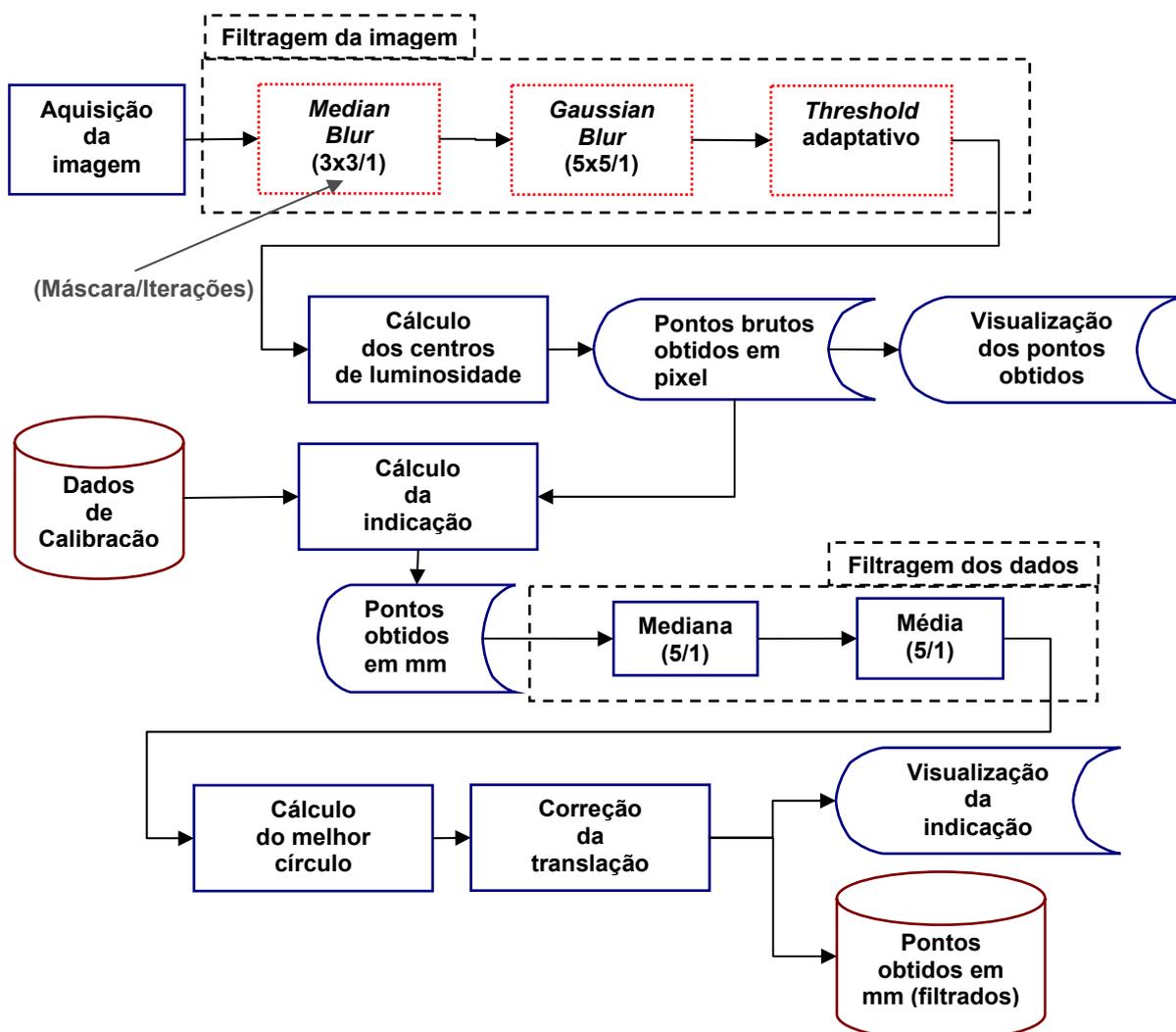


Figura 47 – Fluxograma das etapas realizadas pelo *software* do protótipo.

5.2 IMPLEMENTAÇÃO

Desenvolvido em linguagem C#, o *software* conta com o auxílio de bibliotecas internas criadas no LabMetro e na Photonita¹⁰, assim como a Biblioteca Aberta de Computação Visual (OpenCV¹¹). A seguir são expostas as etapas realizadas desde a aquisição da imagem ao resultado final de medição.

¹⁰ A PHOTONITA LTDA é uma empresa de alta tecnologia, 100% brasileira, que desenvolve, produz e comercializa sistemas ópticos avançados.

¹¹ A biblioteca OpenCV (Open Computer Vision Library) é uma compilação de algoritmos para a resolução de diversos problemas de computação visual.

5.2.1 Aquisição

O primeiro passo na medição é a aquisição da imagem. O *software* expõe os controles da câmera para o ajuste de parâmetros como ganho e *shutter*¹², possibilitando assim a obtenção de uma imagem com ênfase somente na linha do laser como pode ser visto na figura 48.

Com os parâmetros da câmera ajustados, a imagem é então adquirida e salva em uma variável no *software*, sendo que esse processo leva menos de dois segundos para ser realizado. Também é possível, se desejado, salvar a imagem em um arquivo para análises posteriores. O formato da imagem salva é o PNG (*Portable Network Graphics*) de 8 bits, o qual possibilita a armazenagem da imagem *sem perda de informação*, mas que ao contrário do formato BMP (*bitmap*), compacta informações redundantes como grandes regiões com a mesma tonalidade.

Existe uma opção no *software* para inserir na imagem fora da região de medição (canto direito inferior da figura 48), dados como: data e hora da aquisição, valor do *shutter*, ganho, etc, facilitando análises posteriores.

¹² Tempo de exposição do sensor da câmera para a obtenção de uma imagem.

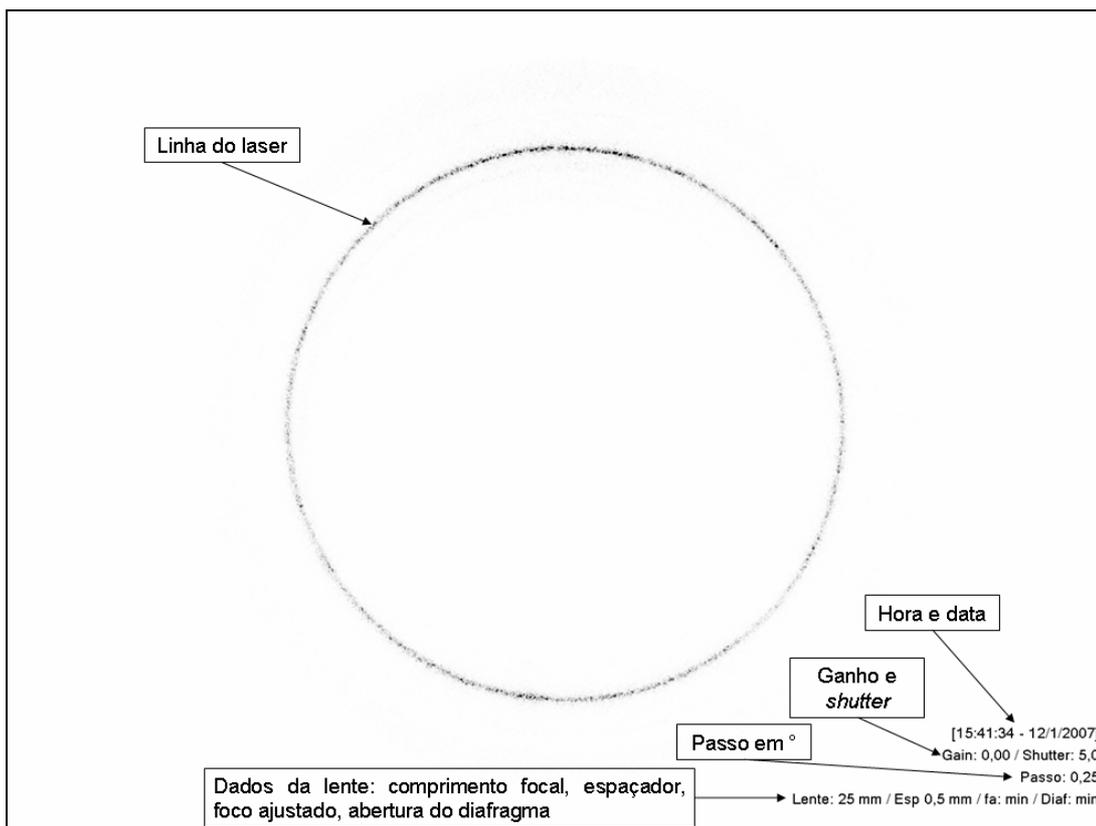


Figura 48 – Imagem adquirida de um anel do padrão de calibração com 151,68 mm de diâmetro.¹³

5.2.2 Filtragem da Imagem

Diversas seqüências de filtros foram testadas de forma a atenuar o granulado do *speckle*. Os melhores resultados foram obtidos aplicando os seguintes filtros listados a baixo.

Remove Fantasmas: Filtro desenvolvido durante o projeto devido ao problema da formação de linhas secundárias “fantasmas” da linha do laser. A figura 51 ilustra as linhas fantasmas formadas ao redor da linha de laser principal.

O filtro varre cada um dos vetores de luminosidade (obtidos da mesma forma que no item 5.2.3) e procura por uma região de 30 *pixels* com o maior valor de média. Todo resto do vetor fora dessa região de maior média é então desprezado, eliminando assim a linha secundária (veja as figuras 49 e 50). Os resultados obtidos na medição de peças circulares ou ovaladas foram positivos, ficando nítida a melhoria mesmo a partir de uma simples análise visual dos pontos calculados. No

¹³ Note que as imagens obtidas pelo sistema mostradas no presente trabalho tiveram suas cores invertidas (negativo da imagem original), facilitando assim a visualização da linha além de evitar um desperdício desnecessário de tinta ao imprimir a imagem.

entanto, o filtro não lida muito bem com as partes da imagem onde existem traços com grandes variações do valor do raio. Devido a esse problema, o filtro *remove fantasmas* foi incorporado somente para a seqüência de imagens usadas durante a calibração do sistema.

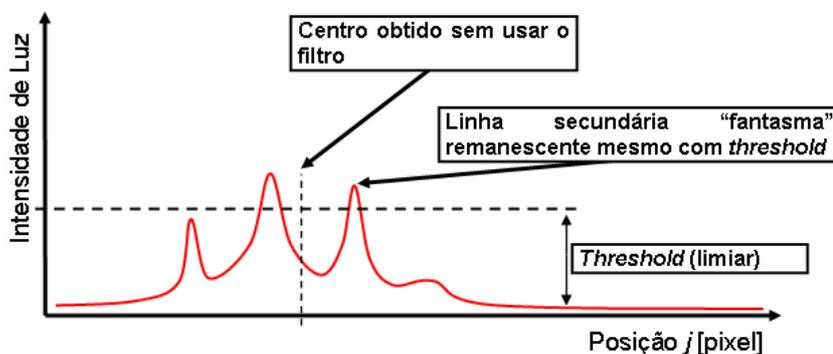


Figura 49 – Linha remanescente mesmo utilizando filtro *threshold*.

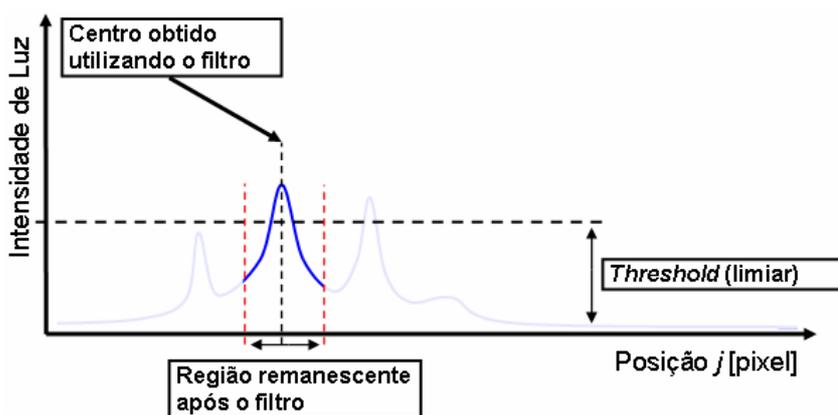


Figura 50 – Filtro “Remove Fantasmas”.

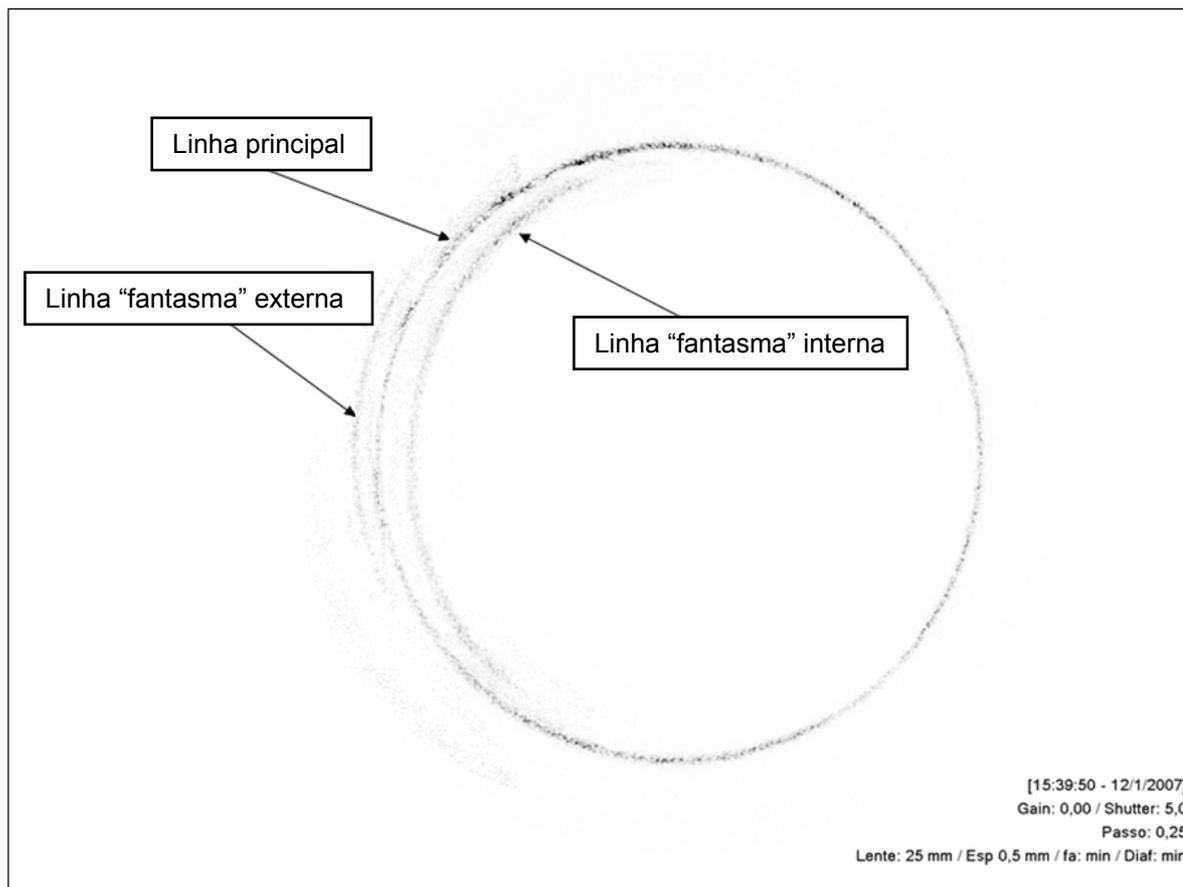


Figura 51 – Imagem de um anel e “linhas fantasmas”.

De forma a averiguar a origem de tal aberração, foram feitos dois experimentos. No primeiro, removeu-se o tubo de acrílico supondo que reflexões secundárias fossem a fonte do problema. Todavia, pôde-se verificar que as linhas fantasmas continuavam presentes. No segundo, foi projetada uma linha de laser no espelho e seu reflexo foi visualizado na superfície do duto. Nesse caso, pôde-se notar que quando o feixe de laser se aproximava da ponta do espelho, formavam-se figuras múltiplas. Dessa forma, conclui-se que as linhas “fantasmas” são provenientes da difração provocada por pequenas estrias presentes na região da ponta do espelho, sendo essas decorrentes de limitações do processo de fabricação.

Median Blur: Esse filtro captura regiões quadradas ao redor de cada *pixel* e ordena os valores de intensidade. O valor central (mediana) é selecionado como valor do *pixel* central. Dessa maneira, valores de intensidade discrepantes acabam ficando em uma das extremidades da lista, sendo então excluídos da imagem.

Como indicado no diagrama das figuras 47 e 64, a máscara utilizada para medição é de 3x3 *pixels*, e para a calibração de 7x7.

Gaussiang Blur: Funciona como um passa baixas com formato de uma curva gaussiana.

5.2.3 Cálculo dos Raios em *Pixels*

Obtenção do Vetor de Luminosidade

A imagem obtida é varrida radialmente analisando raios com origem no centro da imagem e com o ângulo variando de 0 a 360° com um passo de 0,25°, o que resulta em 1440 pontos por imagem. Na figura 52 pode-se ver um esquema da imagem obtida e uma das 1440 linhas analisadas em destaque.

É criado um vetor contendo a posição do pico de luminosidade para cada uma das linhas analisadas. Se a coordenada de determinado *pixel* não for um número inteiro, uma interpolação é feita obtendo assim um valor do pico de intensidade de luz com resolução subpixel.

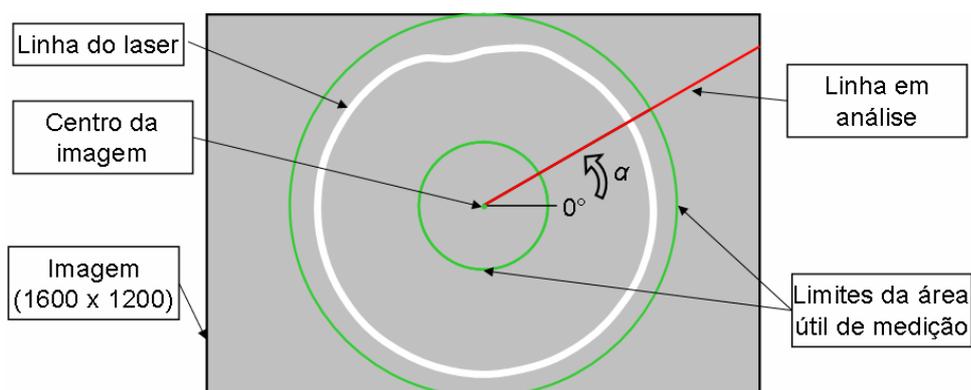


Figura 52 – Esquema da análise da imagem (linha de ângulo α em destaque).

Threshold Adaptativo

Optou-se pelo uso de um *threshold* adaptativo, o qual seleciona um limiar diferente para cada linha, baseando-se no desvio padrão da intensidade de luz. Pontos cuja luminosidade esteja abaixo do limiar são eliminados da imagem.

Partindo da equação do desvio padrão da amostra:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (25)$$

O valor do *threshold* é definido como:

$$TH = \bar{x} + 2 \cdot s \quad (26)$$

Sendo:

- *TH*: Limiar do *threshold*;
- *s*: Desvio padrão da luminosidade dos pontos da linha analisada;
- *N*: Total de pontos analisados na linha;
- x_i : Intensidade de luz do *i*-ésimo pixel;
- \bar{x} : Intensidade de luz média.

Centro de Luminosidade

Após a filtragem por *threshold*, calcula-se o centro de luminosidade para cada uma das linhas com o auxílio da equação do centróide (1) definida no capítulo 3.

Visualização da Medição em *Pixels*

Os pontos obtidos tanto em *pixels* como em milímetros, são expostos em dois gráficos (ver figura 53). O primeiro é de coordenadas polares e traça uma linha colorida entre cada ponto de medição calculado, no caso do resultado em *pixels*, traça sobre a própria imagem obtida. O segundo gráfico é de coordenadas cartesianas, sendo que no eixo das abscissas tem-se o ângulo e no das ordenadas o respectivo valor do raio.

Nesses gráficos é possível selecionar com o mouse ângulos específicos, sendo mostrado pelo *software* o respectivo valor em *pixels* encontrado.

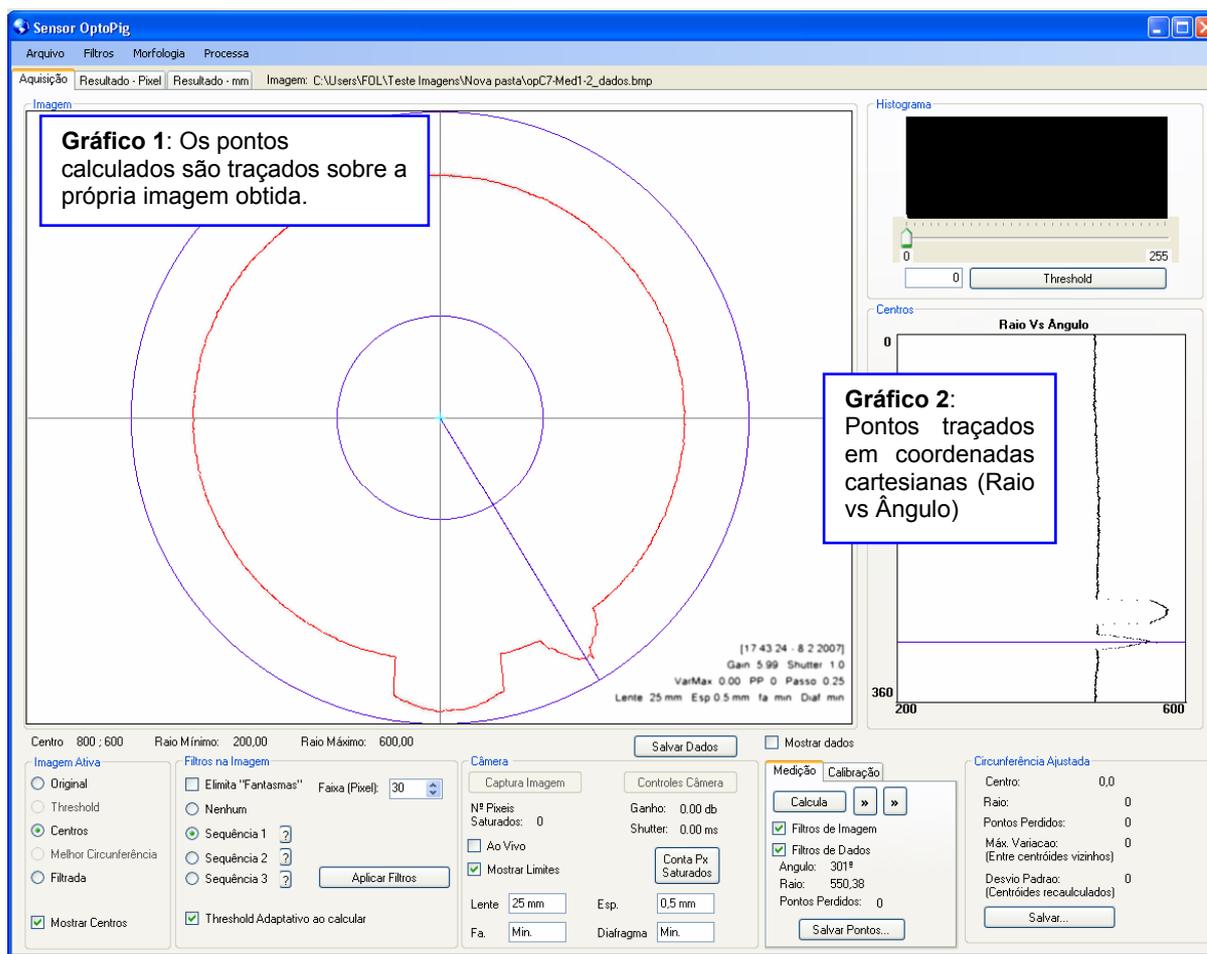


Figura 53 – Resultado de medição em *pixels* traçado em dois gráficos.

5.2.4 Cálculo do Resultado de Medição

Com o auxílio do polinômio cujos coeficientes são determinados pela calibração, é possível converter para milímetros os dados obtidos em *pixels*.

A forma como é feita a calibração e seu resultado podem ser visto no tópico 6.3 do próximo capítulo.

5.2.5 Correção da Translação

Com o intuito de manter o sistema de coordenadas sempre no centro do duto, é feita a correção da translação do sistema re-referenciando os pontos obtidos em milímetro ao centro de um círculo perfeito que melhor se ajusta aos pontos calculados. Para encontrar o melhor círculo, utiliza-se o método do mínimo erro absoluto, implementado com o auxílio do algoritmo de minimização multidimensional simplex [26]. Esse método é mais vantajoso que o dos mínimos quadrados por ser

insensível a pontos espúrios, ou seja, em termos práticos, considera somente a parte sadia do duto para encontrar o melhor círculo. A figura 54 ilustra a comparação de um círculo ajustado a uma nuvem de pontos utilizando o método dos mínimos quadrados (MMQ) e dos mínimos absolutos (MMA).

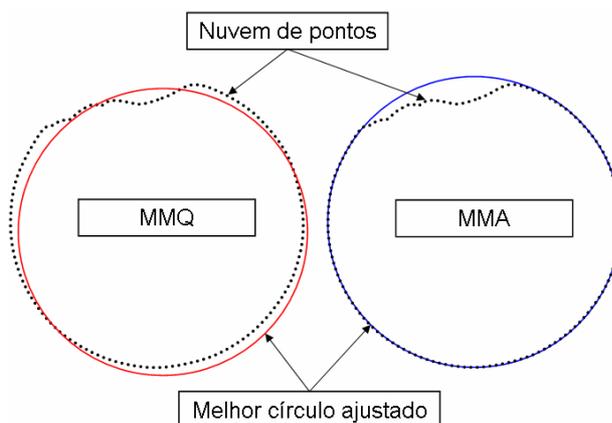


Figura 54 – Comparação entre os métodos de mínimos quadrados e absolutos no ajuste de melhor círculo.

5.2.6 Filtragem dos Pontos Calculados

Sobre os raios calculados, são aplicados novos filtros de forma a remover pontos espúrios e atenuar o ruído restante proveniente do *speckle*. Esses filtros são listados a seguir sendo que ambos utilizam uma região de cinco pontos para realizar o cálculo:

Mediana: Os pontos obtidos em *pixels* são submetidos a um filtro de mediana para remoção de pontos espúrios.

Média: Em seqüência ao filtro de mediana, os pontos obtidos são submetidos a um filtro de média.

5.2.7 Visualização do Resultado Final de Medição

Assim como o resultado de medição em *pixels*, o resultado em milímetros é apresentado em dois gráficos conforme ilustra a figura 55. Também é possível visualizar o resultado referenciado no centro da imagem ou transladado utilizando o centro do melhor círculo.

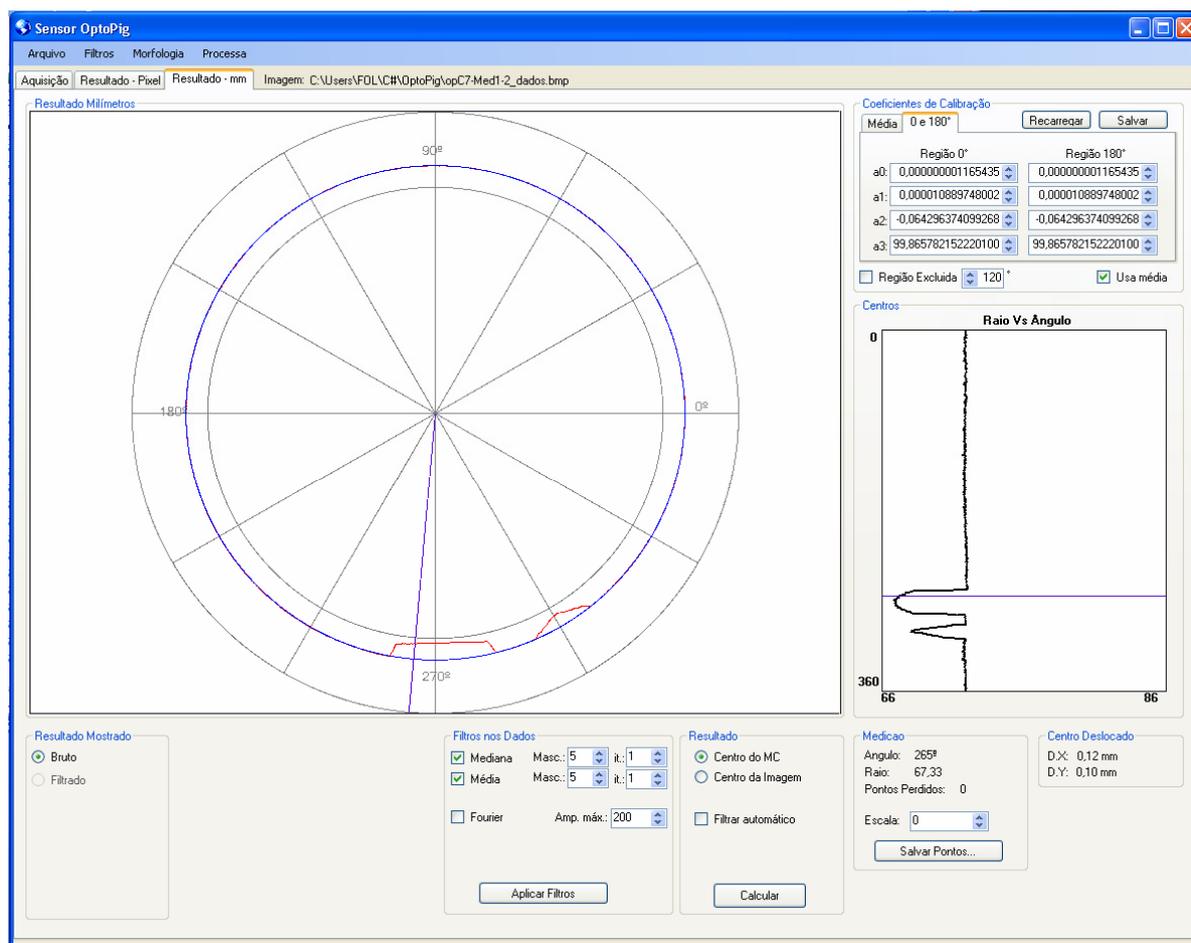


Figura 55 – Perfil da secção medida representado pelo software.

5.2.8 Tempos de Processamento

A tabela 17 mostra os tempos de processamentos típicos obtidos com o software de medição.¹⁴ O tempo total estimado foi de aproximadamente 5 s. Deve-se lembrar que a otimização da velocidade de medição não foi o foco do presente trabalho, sendo que a mesma pode ser melhorada com uma câmera de maior velocidade, algoritmos otimizados e um melhor *hardware* de processamento.

Tabela 17 – Tempos de processamento.

Descrição	Tempo [s]
Aquisição de uma imagem	1,0
Filtragem da imagem	1,3
Cálculo dos centros e apresentação na tela	1,0
Cálculo dos valores em milímetros, filtragem dos raios e apresentação na tela do software	1,5
Tempo total de uma medição	4,8

¹⁴ Os tempos foram obtidos com o software rodando em um computador Pentium 4 3,2 GHz, com 1 GB de memória RAM e no sistema operacional Windows XP.

6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

O principal resultado da calibração do sistema é estabelecer uma forma de calcular os valores dos raios medidos em milímetros a partir dos raios medidos em número de *pixels* na imagem. Para tal, foi montada uma bancada especialmente desenhada para posicionar o sistema corretamente alinhado com um padrão de anéis escalonados, a qual possibilita a realização de deslocamentos controlados, gerando valores de referência para a calibração. Além disso, a mesma bancada também foi utilizada nos experimentos¹⁵ de validação do sistema.

Antes de iniciar a calibração foram realizados ajustes no sistema para otimizar seu desempenho nas condições ensaiadas.

Nos tópicos a seguir, são descritas as etapas de ajuste do sistema, procedimentos e resultados da calibração e os experimentos de validação.

6.1 AJUSTES DO SISTEMA

Os ajustes do sistema foram feitos basicamente em dois grupos, os quais são explanados a seguir.

6.1.1 Ajustes relacionados à Imagem

Um dos maiores problemas encontrados no ajuste da imagem foi o astigmatismo causado pelo espelho cônico. Essa aberração faz com que o plano focal da imagem sagital se desloque do plano focal tangencial (ver figura 56). O efeito interessante causado pelo astigmatismo pode ser melhor compreendido analisando a figura 57, que mostra o foco de cada um dos planos de imagem. É

¹⁵ Todos os experimentos foram realizados dentro das instalações do laboratório de metrologia óptica do LabMetro/UFSC.

possível focar os círculos no plano focal tangencial, e raios no sagital, mas não ambos ao mesmo tempo [16].

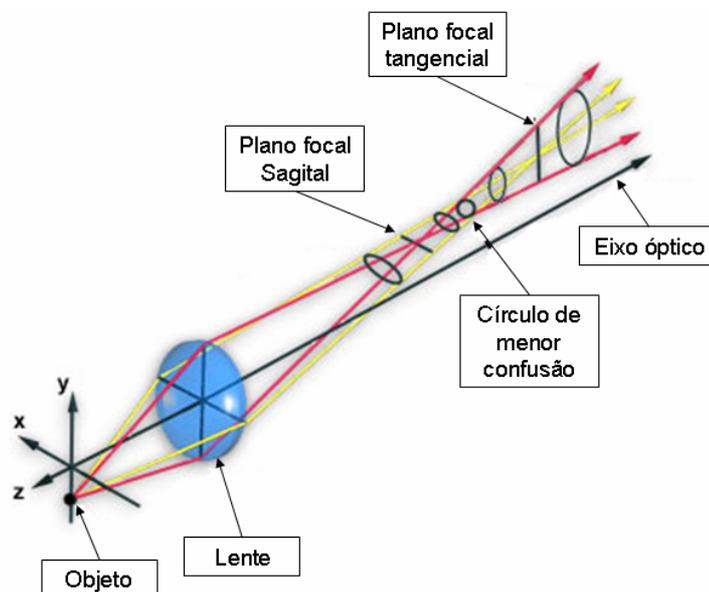


Figura 56 – Planos focais sagital e tangencial.

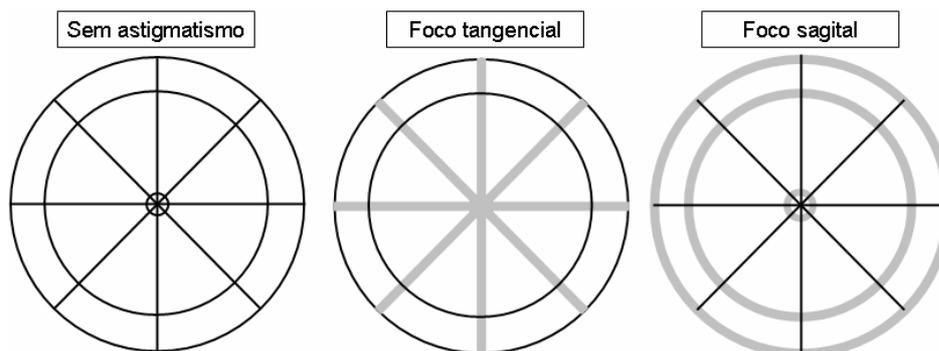


Figura 57 – Imagens nos planos focais tangencial e sagital.

O astigmatismo poderia, a princípio, ser minimizado com o desenvolvimento e fabricação de lentes especiais para o sistema. Porém, devido aos elevados tempos e custos de desenvolvimento e fabricação, optou-se pela otimização da imagem por outros meios.

Verificou-se que a abertura do diafragma tem um efeito forte sobre o astigmatismo. No entanto, mesmo com sua abertura no mínimo, o efeito não era anulado. Além disso, como já citado anteriormente, o tamanho do *speckle* aumenta com o fechamento do diafragma. Dessa forma, foram feitos experimentos buscando um ponto ótimo entre o nível de astigmatismo residual e o tamanho do *speckle*. Concluiu-se que, devido à severidade do astigmatismo, seria melhor manter o

diafragma no mínimo mesmo pagando o ônus de ter um forte ruído *speckle* na imagem.

As figuras 58 e 59 ilustram imagens obtidas durante experimentos para verificar a melhor combinação: tamanho do *speckle*/astigmatismo. Quando o diafragma tem sua abertura máxima e o *speckle* é mínimo (figura 58), o defeito simulado no anel medido (parte inferior) fica totalmente borrado devido ao astigmatismo. Já na figura 59, onde o diafragma tem sua abertura mínima, a linha que descreve o defeito simulado fica bem mais nítida. No entanto, pode-se notar no detalhe, um granulado devido ao *speckle* bem mais acentuado.

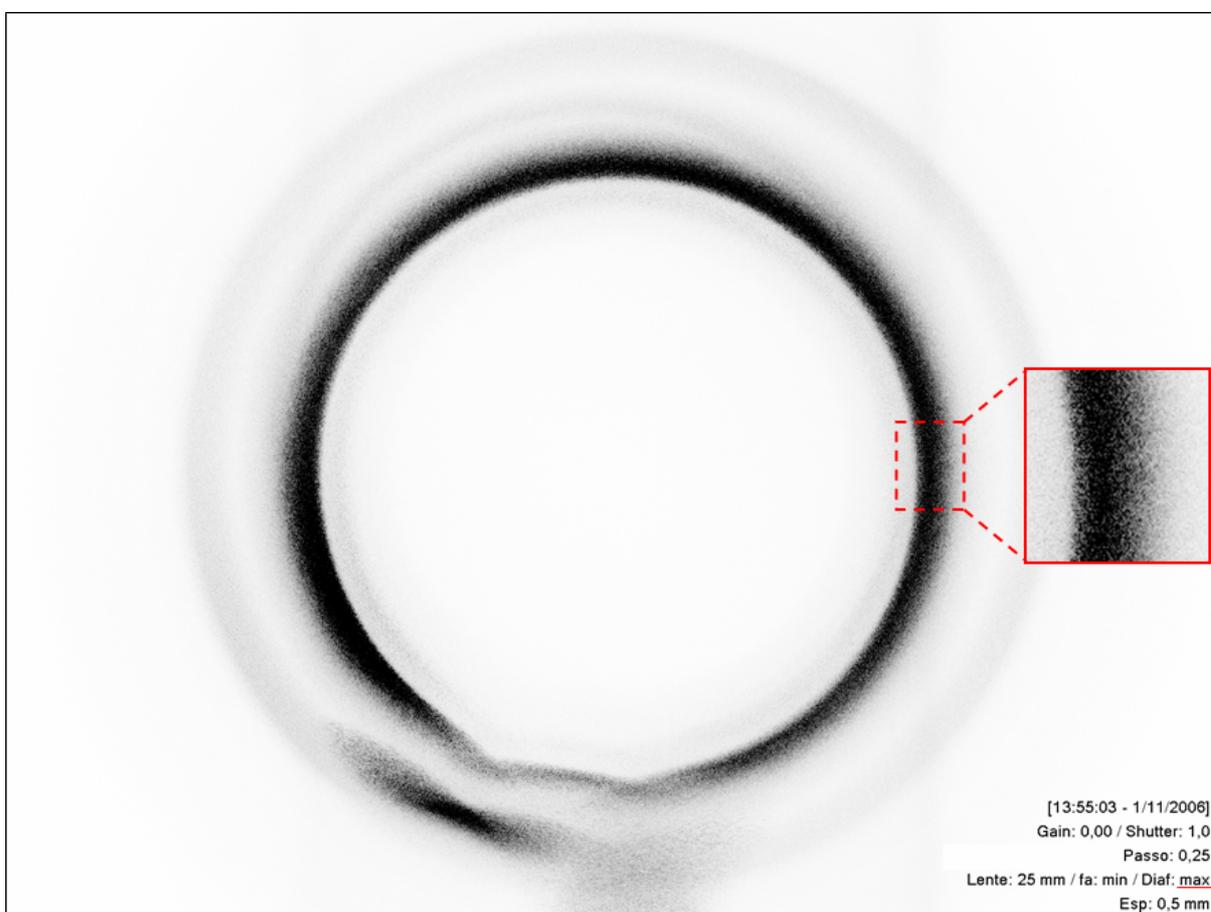


Figura 58 - Imagem obtida da secção A4 do padrão com dois objetos (abertura máxima do diafragma).

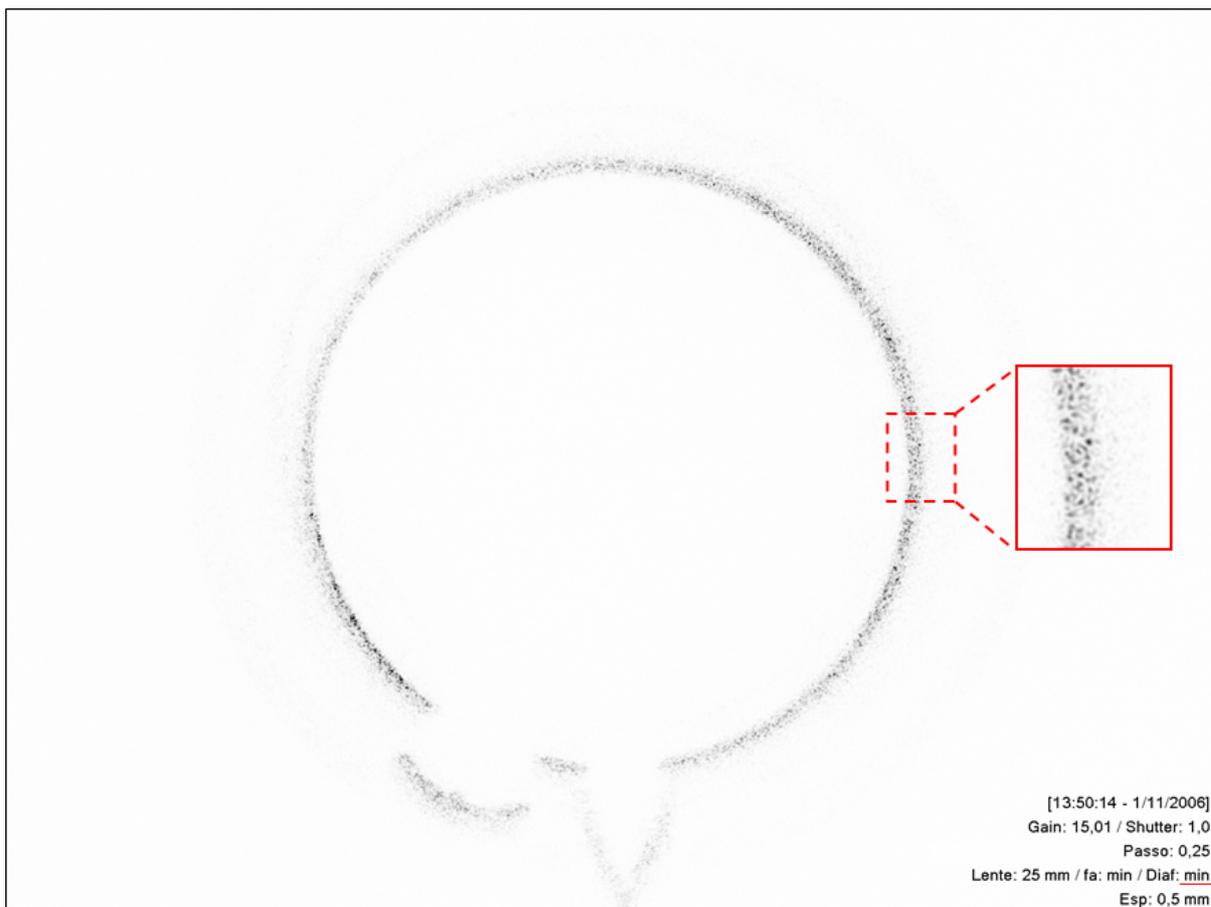


Figura 59 - Imagem obtida da secção de um anel padrão com dois objetos (abertura mínima do diafragma).

6.1.2 Ajuste da Linha do Laser

Devido ao problema com o tamanho do *speckle* e astigmatismo citados nos tópicos anteriores, notou-se que, além da necessidade da projeção do feixe de laser corretamente na ponta do espelho cônico de 90° , (o que foi feito com o auxílio do sistema de alinhamento e da imagem obtida pela câmera) era conveniente reduzir a espessura da linha do laser obtida. Caso contrário, as metas de incerteza do projeto poderiam não ser atingidas. Como solução, foi idealizado um filtro espacial na parte exterior do tubo de acrílico, que fez o papel de obstruir linhas secundárias de laser causadas pelas reflexões múltiplas nas paredes do tubo de acrílico, e principalmente, a redução na espessura da linha obtida. A mudança no aspecto da linha de laser obtida pode ser verificada comparando a linha nas imagens das figuras 59 e 60.

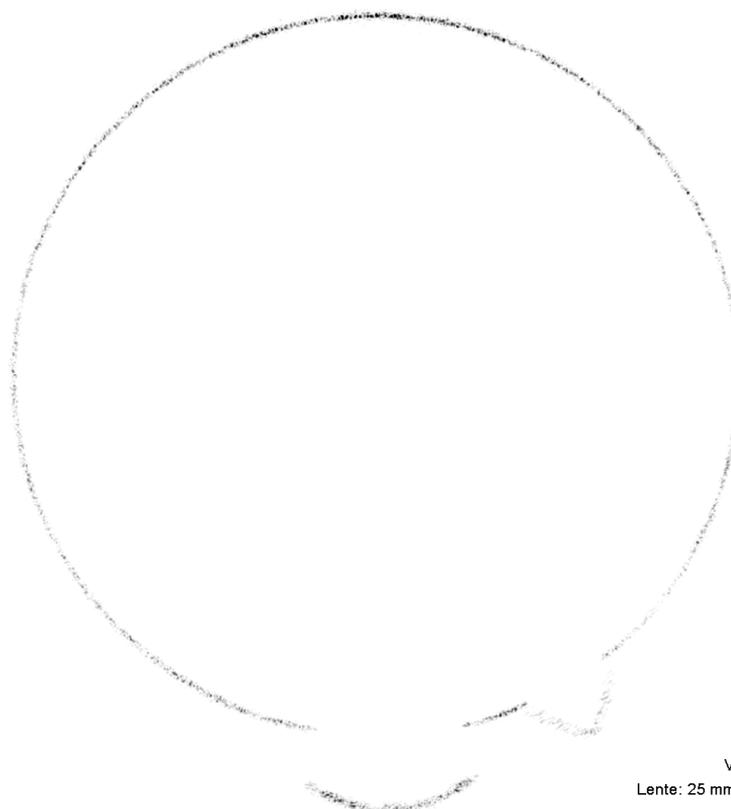


Figura 60 – Imagem obtida da secção de um anel padrão com dois objetos após ajuste da espessura da linha do laser com o filtro espacial.

6.2 BANCADA DE CALIBRAÇÃO

Foi montada uma bancada (figura 61) onde o sistema de medição é fixado sobre suportes, e o mensurando é posicionado com o auxílio de duas mesas micrométricas. Essas possibilitam realizar deslocamentos controlados horizontais (eixo x) e longitudinais (eixo z). Além disso, a altura dessas mesas pode ser modificada por um suporte de ajuste fino (eixo y).

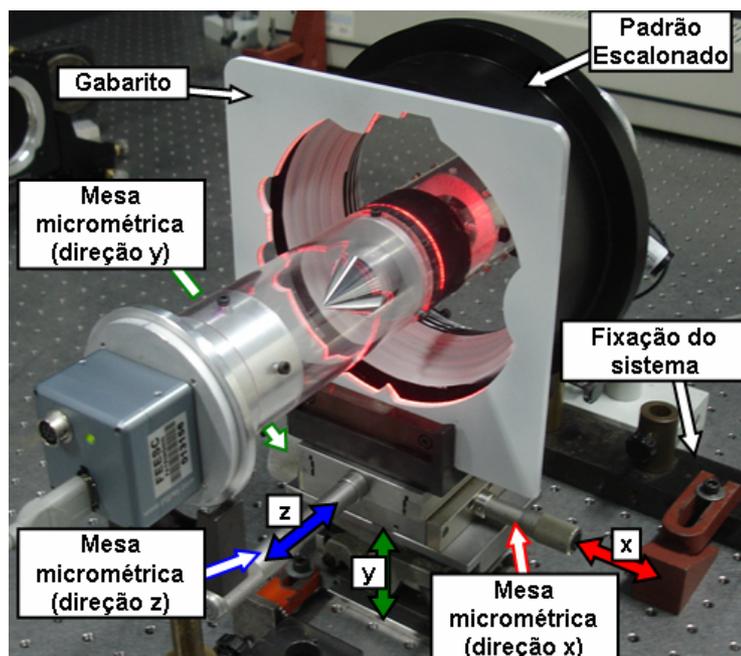


Figura 61 – Bancada de medições.

Padrão Escalonado

Como padrão de calibração, foi utilizado um corpo cilíndrico de alumínio com sua parte interna formada por 1 anel central com 10 mm de comprimento axial, e outros 8 anéis marginais com diâmetros distintos. O comprimento axial dos anéis marginais é de 5 mm, sendo que cada um deles possui um chanfro com diâmetro 1 mm maior do que seu respectivo anel marginal e comprimento de 2 mm. Esse corpo cilíndrico teve metade de sua parte interna (parte utilizada nos experimentos) pintada de branco de forma a evitar a reflexão total da luz no metal (ver figura 62).

Os anéis do padrão escalonado foram medidos em uma máquina de medir por coordenadas (MMC). O resultado dessa medição é exposto na tabela 18; já as cotas nominais e nomenclatura dada para os anéis podem ser vistos na figura 63.

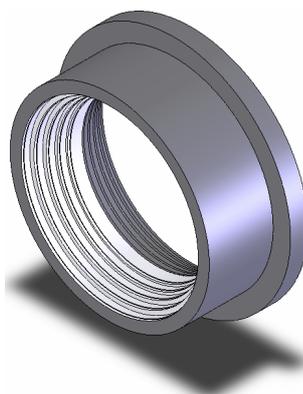


Figura 62 – Vista isométrica do projeto do padrão de calibração.

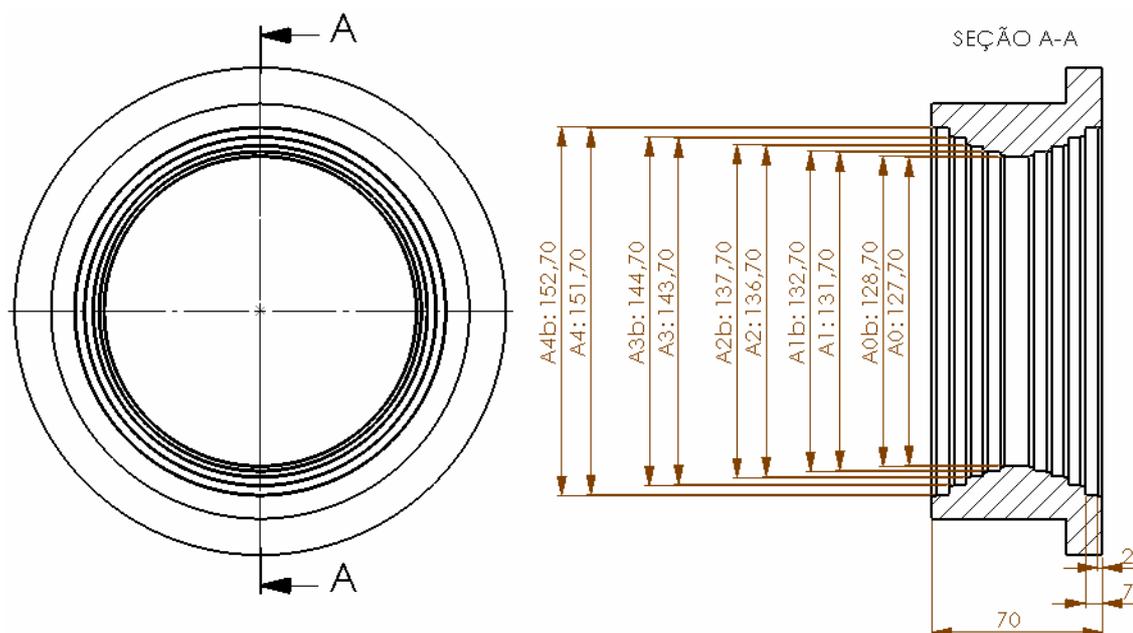


Figura 63 – Projeto do padrão de calibração e nome dos anéis.

Tabela 18 – Resultado de medição do padrão (valores em milímetros).

Anel	Medida nominal	Tolerância	Medida encontrada	Desvio
A0	127,70	$\pm 0,050$	127,674	-0,026
A0b	128,70	$\pm 0,010$	128,706	0,006
A1	131,70	$\pm 0,050$	131,681	-0,019
A1b	132,70	$\pm 0,010$	132,692	-0,008
A2	136,70	$\pm 0,050$	136,660	-0,040
A2b	137,70	$\pm 0,010$	137,710	0,010
A3	143,70	$\pm 0,050$	143,656	-0,044
A3b	144,70	$\pm 0,010$	144,704	0,004
A4	151,70	$\pm 0,050$	151,681	-0,019
A4b	152,70	$\pm 0,010$	152,707	0,007

Incerteza de medição: 0,001 mm

Temperatura: $20,0 \pm 0,1$ °C

6.3 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

Para calibração do sistema foram idealizados dois procedimentos. O primeiro mede secções circulares de diferentes diâmetros do padrão escalonado. O segundo mede uma secção circular do mesmo padrão, mas realizando deslocamentos transversais conhecidos e perpendiculares ao eixo do sistema.

Como a peça medida nessa etapa é um anel, torna possível o uso de filtros digitais passa-baixas com frequências de corte mais baixas, os quais não seriam adequados para a medição de uma peça com defeitos, pois poderiam acobertá-los. Além disso, como explicado no capítulo 5, o filtro “tira fantasma” não identifica

corretamente a linha do laser em regiões que possuam traços muito inclinados em relação à tangente do círculo. O tratamento da imagem na calibração foi alterado com o intuito de minimizar a influência de problemas como as linhas “fantasmas” e o *speckle*. Conforme o diagrama da figura 64, a imagem é primeiramente submetida ao filtro “tira fantasmas”, com uma máscara de 30 *pixels*. Em seqüência, assim como no tratamento da imagem na medição, são utilizados os filtros *Median Blur* e *Gaussian Blur*, mas com alterações na máscara e no número de iterações.

Após a obtenção dos coeficientes da calibração, as imagens foram novamente analisadas. Desta vez voltaram a ser empregados os filtros normalmente utilizados para as medições. Os erros dos pontos medidos em relação ao valor verdade convencional (VVC) foram calculados e analisados, permitindo assim avaliar o comportamento real do sistema na condição normal de uso.

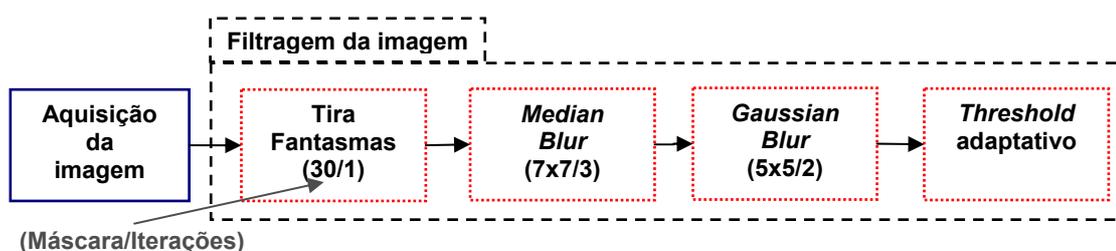


Figura 64 – Filtros utilizados no tratamento da imagem durante a calibração.

6.3.1 Alinhamento do Sistema

Antes de iniciar qualquer procedimento de calibração é necessário alinhar o sistema com o padrão de anéis escalonados na bancada. Isso é feito em duas etapas: alinhamento angular e transversal.

Alinhamento Angular

Considerando o eixo do sistema perpendicular ao plano de laser, é verificado o alinhamento da linha do laser com a borda de um dos anéis do padrão até que toda a linha do laser coincida com a borda.

Alinhamento Transversal

São feitas medições a partir da imagem da câmera até que o centro do melhor círculo ajustado aos pontos medidos coincida com o centro da imagem

(posição 800 x 600 pixel) com um erro de no máximo 0,20 pixel, o que equivale a aproximadamente 0,01 mm ($0,05 \cdot 0,20$).

A figura 65 ilustra o esquema do sistema centralizado com o padrão e o aspecto da imagem adquirida.

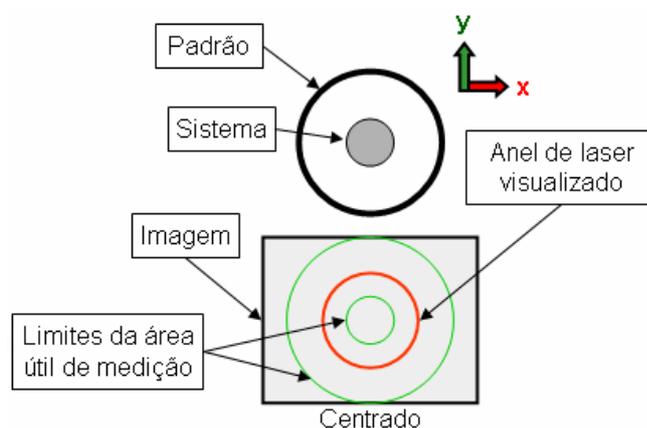


Figura 65 – Esquema mostrando padrão centrado com o sistema e imagem resultante obtida.

6.3.2 Calibração com Secções Circulares

Esse método de calibração utiliza o padrão escalonado. Um círculo perfeito é ajustado à nuvem de pontos obtida na medição. O valor do raio desse círculo em *pixels* é relacionado com o raio real da secção em milímetros.

De posse dos valores dos raios das secções em milímetros e os respectivos raios em *pixels*, pode-se obter a curva de calibração.

Um dos problemas de realizar a calibração dessa forma decorre das limitações do padrão escalonado utilizado. Ele não possui secções com raios distribuídos de forma suficiente para que seja possível abranger e calibrar toda a faixa de medição do sistema. Sendo assim, foi idealizada outra forma de calibrar o sistema, a qual é explanada a seguir.

6.3.3 Calibração com Mesa Micrométrica e um Padrão Circular

Para essa calibração, mediu-se um dos anéis do padrão (anel A4) em diferentes posições transversais. O padrão foi submetido a deslocamentos transversais perpendiculares ao eixo do sistema e na direção x (ver figura 67).

O diagrama de blocos da seqüência de calibração pode ser visto na figura 66, sendo que cada uma das seis etapas é descrita a seguir.

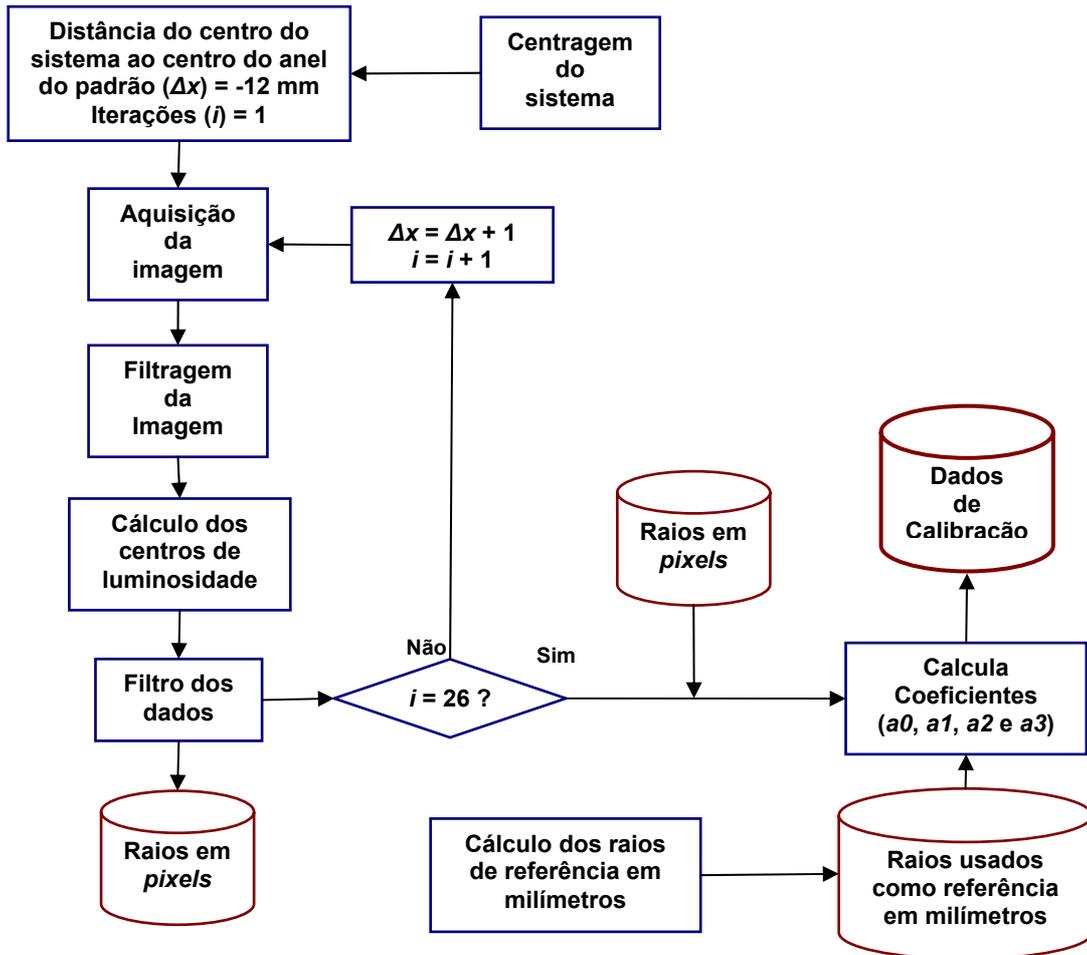


Figura 66 – Diagrama de blocos da seqüência de calibração.

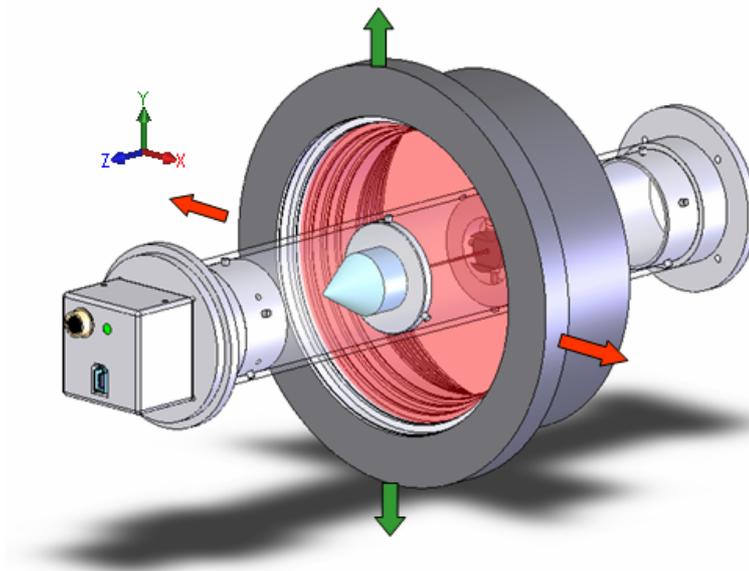


Figura 67 – Imagem do protótipo e padrão escalonado. Setas indicam deslocamento do padrão escalonado no eixo x e y.

1) Deslocamento do padrão em passos conhecidos e aquisição da imagem

Devem ser realizados deslocamentos conhecidos do padrão e, para cada posição, uma imagem é obtida e o deslocamento do padrão anotado. Foram feitas 26 medições em posições diferentes da mesa micrométrica no eixo x de forma a abranger toda a faixa de medição de determinadas regiões (ver figura 69). A figura 68 ilustra as imagens obtidas para diferentes posições do padrão.

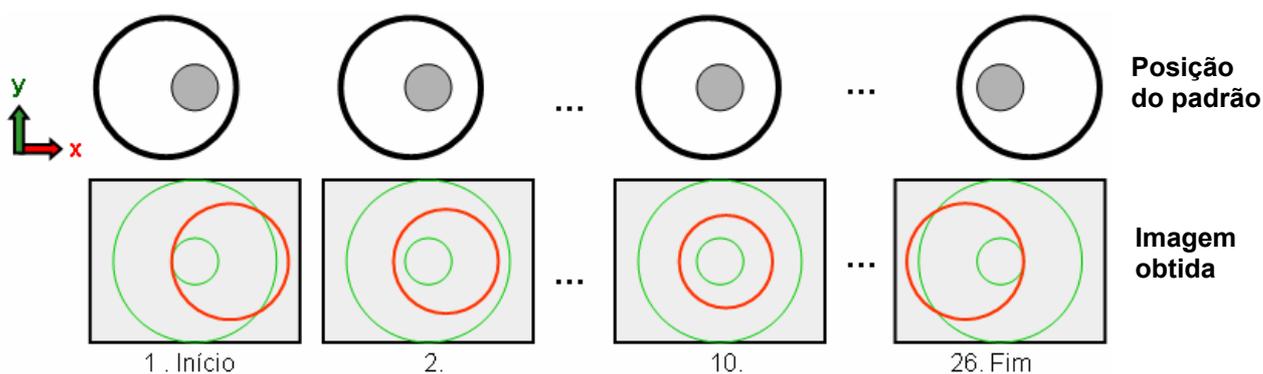


Figura 68 – Esquema da calibração realizando deslocamentos no eixo x.

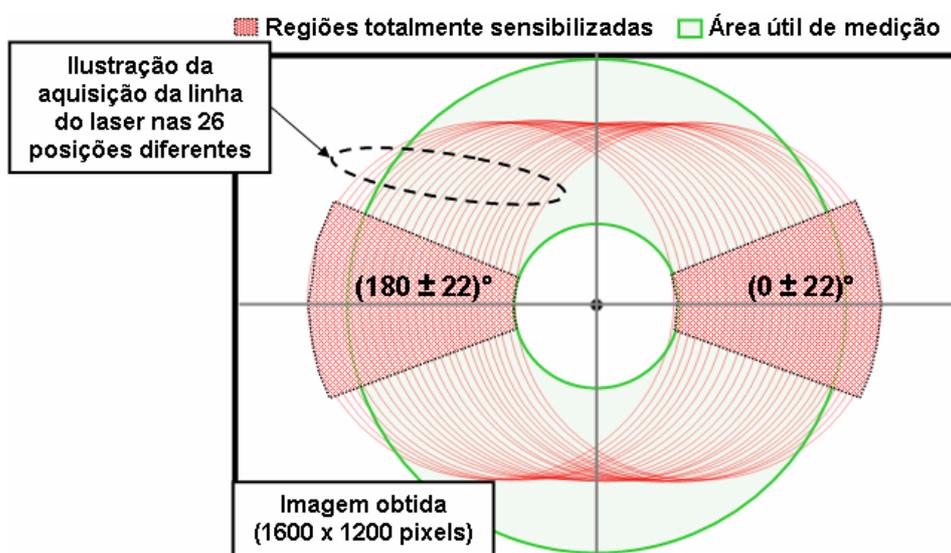


Figura 69 – Regiões sensibilizadas da faixa de medição.

2) Filtragem da Imagem

As imagens obtidas são então filtradas utilizando os filtros configurados para calibração conforme descritos na figura 64.

3) Cálculo dos centros de luminosidade

São feitos os cálculos dos centros de luminosidade para cada uma das 26 posições da mesa micrométrica. O resultado pode ser visto no gráfico da figura 70, no qual cada linha representa uma das posições da mesa e possui os valores em *pixels* do centro de luminosidade da linha do laser nos 1440 ângulos analisados. O gráfico da figura 71 ilustra os pontos obtidos apenas com o uso dos filtros de imagem normais, no qual fica evidente o aumento do erro devido às linhas “fantasmas” na região de raios menores do que 370 *pixels*.

A variação em *pixels* nos ângulos 90 e 270 graus é pequena devido ao sentido do deslocamento (eixo x), ou seja, a distância da peça ao sistema muda pouco nesses ângulos. Em contrapartida, a variação é máxima nos ângulos de 0 e 180 graus, sendo que existe um intervalo de ângulos ao redor dessas duas regiões extremas que abrange toda faixa de medição em *pixels*. Esses intervalos foram determinados como sendo de $\pm 22^\circ$, delimitados nos gráficos pelos pares de linhas verticais tracejadas. A tabela 19 exemplifica raios obtidos em *pixel* pelo sistema.

Tabela 19 – Exemplo de raios obtidos em *pixels*.

	Posição 1	Posição 2	Posição 3	...	Posição 13	...	Posição 25	Posição 26
α	$\Delta x = -12$	$\Delta x = -11$	$\Delta x = -10$	...	$\Delta x = 0$	...	$\Delta x = 12$	$\Delta x = 13$
0,00	635,05	614,99	595,47	..	402,64	..	190,32	187,95
0,25	635,03	615,01	595,24	...	402,64	...	190,36	188,06
0,50	634,99	615,05	595,11	..	402,46	..	190,39	188,27
0,75	634,88	615,11	594,92	...	402,29	...	190,46	188,35
1,00	634,77	615,12	594,74	..	402,10	..	190,46	188,52
1,25	634,66	614,94	594,64	...	401,93	...	190,42	188,78
1,50	634,71	614,75	594,71	..	401,75	..	190,38	187,73
1,75	634,88	614,50	594,78	...	401,76	...	190,35	185,42
.
.
.
359,00	634,55	614,42	595,17	...	402,49	...	189,33	178,85
359,25	634,62	614,64	595,16	..	402,54	..	189,40	179,03
359,50	634,67	614,78	595,13	...	402,50	...	189,43	179,01
359,75	634,76	615,02	595,08	..	402,44	..	189,49	179,00

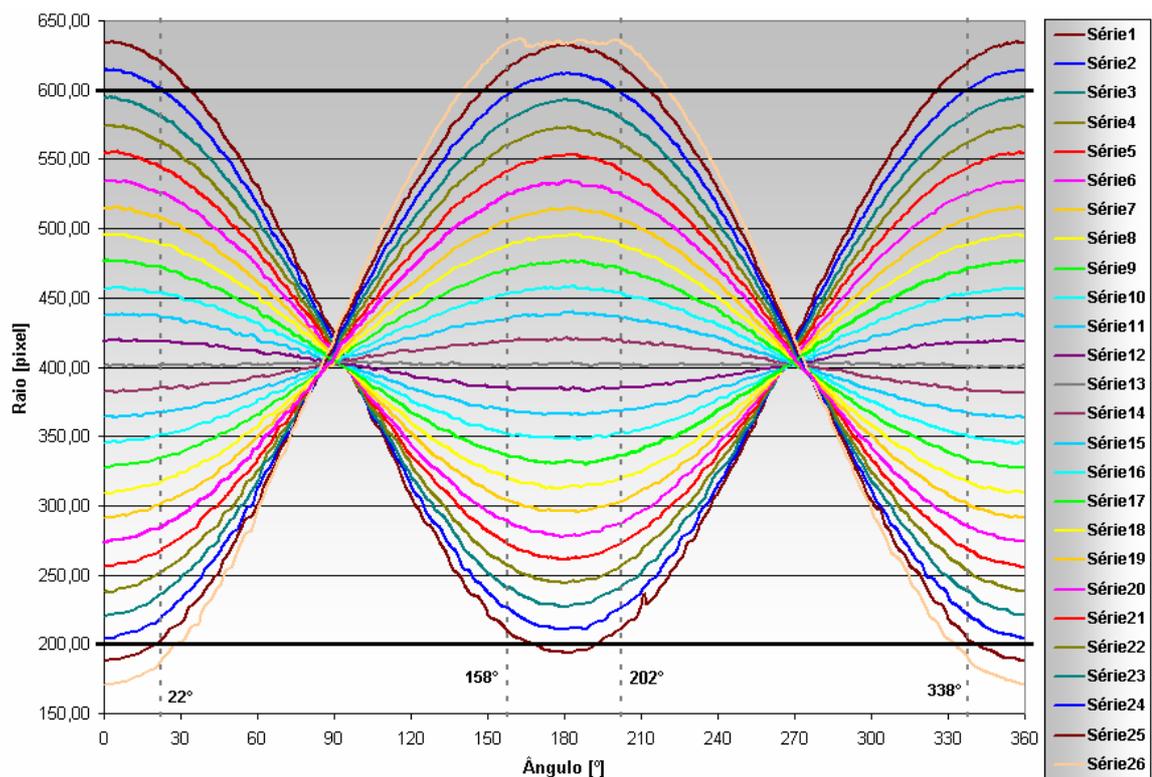


Figura 70 – Pontos obtidos para cada uma das 26 posições da mesa no eixo x utilizando filtros de imagem específicos para calibração.

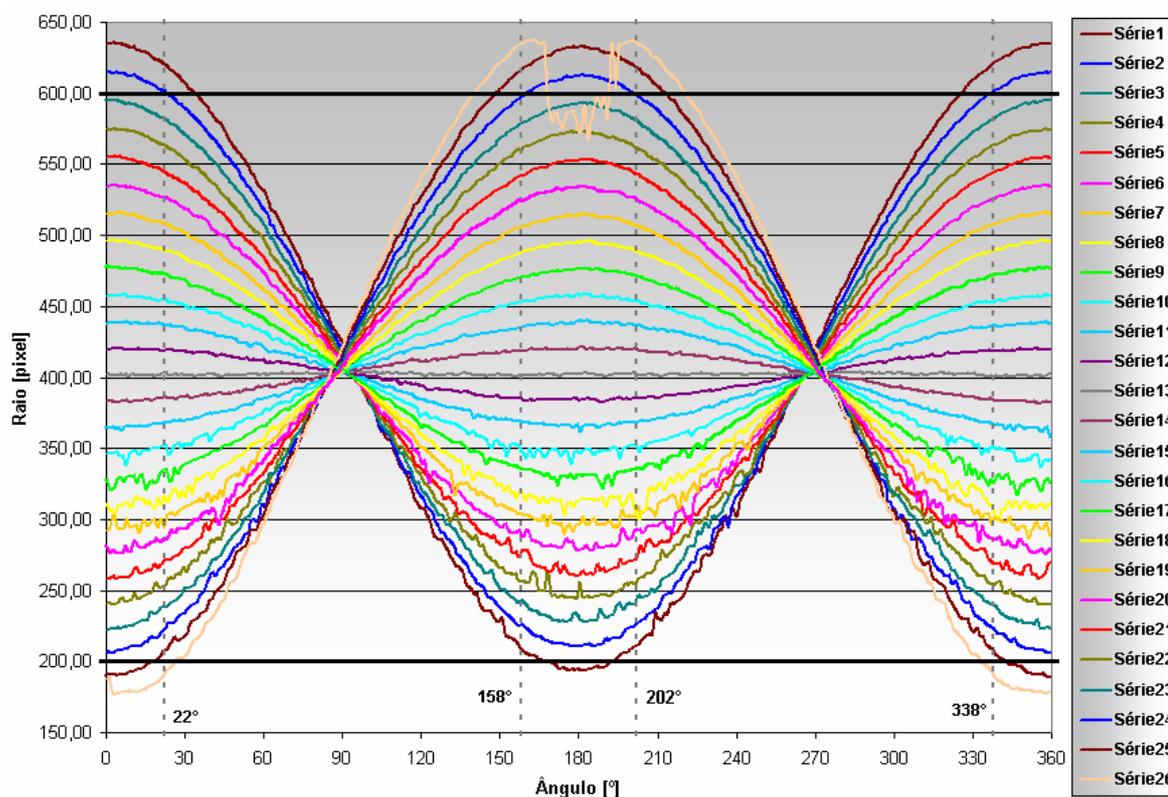


Figura 71 - Pontos obtidos para cada uma das 26 posições da mesa no eixo x utilizando os filtros normais de medição.

4) Filtragem dos dados

Primeiramente os pontos espúrios são removidos, excluindo aqueles que ultrapassam a faixa de medição em *pixel* (200 a 600). Em seqüência, os pontos obtidos em *pixel* são submetidos a um filtro de mediana seguido por um de média, ambos tendo uma “máscara” de 5 pontos.

5) Cálculo da variação do raio padrão em milímetros para cada ângulo

A variação do raio em milímetros para os ângulos de 0° e 180° é a mesma que a variação da posição da mesa micrométrica. No entanto, para todos os outros ângulos, a variação do raio é diferente da variação da mesa, o que torna necessário calcular a variação do raio em milímetros para cada ângulo. Para isso, deve-se encontrar a relação da variação do raio (distância do centro do sistema à parede do duto) com o deslocamento da mesa micrométrica. Essa relação pode ser obtida a partir da análise da figura 72 descrita a seguir:

Pela lei dos senos tem-se que:

$$\frac{\text{sen}(\alpha)}{r_0} = \frac{\text{sen}(\gamma)}{\Delta x}$$

$$\text{sen}(\gamma) = \frac{\Delta x}{r_0} \cdot \text{sen}(\alpha)$$

$$\gamma = \text{asen}\left(\frac{\Delta x}{r_0} \cdot \text{sen}(\alpha)\right) \quad (27)$$

$$\alpha + \beta + \gamma = \pi$$

$$\beta = \pi - \alpha - \gamma \quad (28)$$

$$\frac{\text{sen}(\beta)}{r} = \frac{\text{sen}(\alpha)}{r_0}$$

$$r = r_0 \cdot \frac{\text{sen}(\beta)}{\text{sen}(\alpha)} \quad (29)$$

Substituindo (27) e (28) em (29), o raio em milímetros para cada ângulo e variação da mesa é dado por:

$$r(\alpha, \Delta x, r_0) = r_0 \cdot \frac{\text{sen}\left(\pi - \alpha - \text{asen}\left(\frac{\Delta x}{r_0} \cdot \text{sen}(\alpha)\right)\right)}{\text{sen}(\alpha)} \quad (30)$$

Onde:

- r : Raio medido no ângulo α ;
- r_0 : Raio da secção do padrão analisada;
- α : Ângulo em análise;
- Δx : Distância do centro do padrão ao centro do sistema.

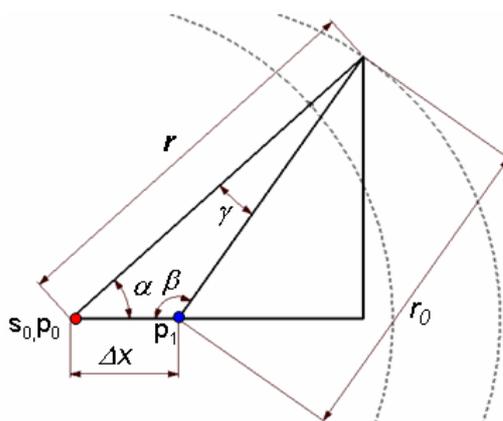


Figura 72 – Esquema do cálculo do raio (r) em relação ao deslocamento Δx . Onde s_0 é a posição do centro do sistema; p_0 a posição inicial e p_1 final do centro do padrão.

Como resultado, obtém-se a tabela 20 a qual contém os valores de raios em milímetros, que são usados como referência (VVC) de calibração para os raios em *pixel* obtidos na análise das imagens. O gráfico desses raios pode ser visto na figura 73.

Tabela 20 – Raios calculados em milímetros.

	Posição 1	Posição 2	Posição 3	...	Posição 13	...	Posição 25	Posição 26
α	$\Delta x = -12$	$\Delta x = -11$	$\Delta x = -10$	...	$\Delta x = 0$	...	$\Delta x = 12$	$\Delta x = 13$
0,00	63,841	64,841	65,841	..	75,841	..	87,840	88,840
0,25	63,841	64,841	65,841	...	75,840	...	87,840	88,840
0,50	63,841	64,841	65,841	..	75,841	..	87,840	88,840
0,75	63,841	64,841	65,841	...	75,841	...	87,839	88,839
1,00	63,842	64,842	65,842	..	75,841	..	87,838	88,838
1,25	63,843	64,843	65,843	...	75,841	...	87,837	88,837
1,50	63,844	64,844	65,843	..	75,841	..	87,836	88,835
1,75	63,845	64,845	65,845	...	75,841	...	87,834	88,833
.
.
.
359,00	63,842	64,842	65,842	...	75,841	...	87,838	88,838
359,25	63,841	64,841	65,841	..	75,841	..	87,839	88,839
359,50	63,841	64,841	65,841	...	75,841	...	87,840	88,840
359,75	63,841	64,841	65,841	..	75,841	..	87,840	88,840

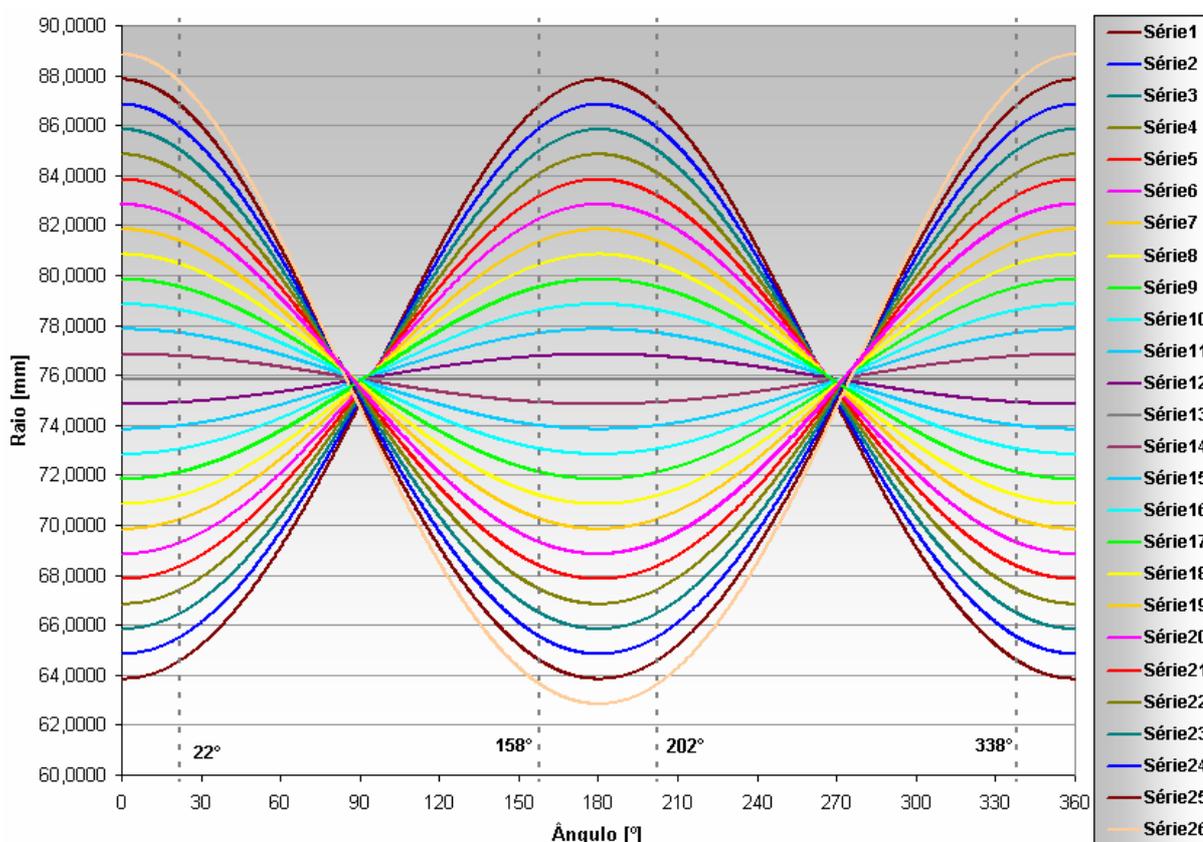


Figura 73 – Raio em milímetros para as 26 posições da mesa.

6) Cálculo dos coeficientes do polinômio

Nessa etapa os dados dos raios em *pixel* e em milímetros são combinados, formando um conjunto de 26 pontos para todos os ângulos em que o valor em *pixel* não ultrapassa os limites da faixa de medição. Como resultado, obteve-se uma nuvem de aproximadamente 36 mil pontos (figura 74).

A curva de calibração é representada por um polinômio de terceira ordem conforme descrito na equação (31):

$$PC(x) = a_0 \cdot x^3 + a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot x + a_3 \quad (31)$$

Onde:

- $PC(x)$: Retorna o valor do raio obtido em milímetros;
- a_0 , a_1 , a_2 e a_3 : Coeficientes do polinômio de calibração.
- x : Valor do raio em *pixel*.

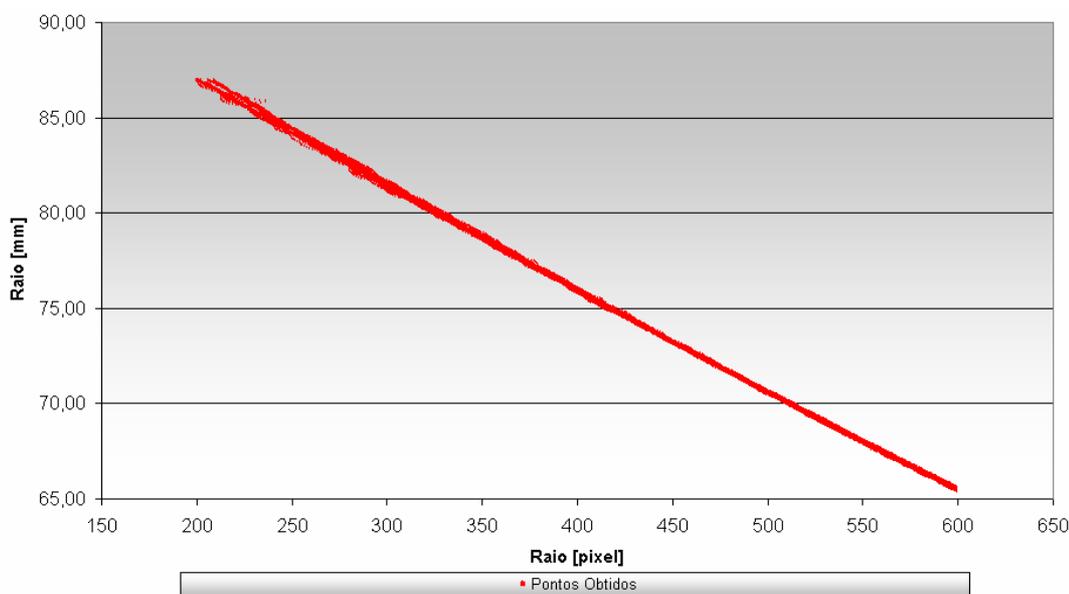


Figura 74 – Pontos de calibração obtidos (em torno de 36 mil).

É possível encontrar uma curva de calibração para cada um dos ângulos separadamente. No entanto, deve-se notar que apenas uma parcela deles é totalmente abrangida (gráficos das figuras 70 e 71), ou seja, polinômios calculados fora dessa região não poderiam ser usados em toda faixa de medição, pois precisariam ser extrapolados.

Para obtenção dos coeficientes do polinômio de calibração deve-se resolver o sistema da equação (32):

$$\begin{bmatrix} x_1^3 & x_1^2 & x_1^1 & x_1^0 \\ x_2^3 & x_2^2 & x_2^1 & x_2^0 \\ x_3^3 & x_3^2 & x_3^1 & x_3^0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^3 & x_n^2 & x_n^1 & x_n^0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$X_{(n \times 4)} \cdot A_{(4 \times 1)} = Y_{(n \times 1)}$$

Cuja solução pelo método dos mínimos quadrados é:

$$A = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (33)$$

Onde:

- i : Posição da mesa, varia de 1 a n^{16} ;
- x_i : Valor em *pixel* do raio para a posição i da mesa;
- y_i : Valor do raio de referência (raio em milímetros para a posição i da mesa);
- X : Matriz constituída pelos valores medidos em *pixels*;
- Y : Matriz constituída pelos valores de referência (raios em milímetros);
- A : Matriz com os coeficientes do polinômio.

Polinômio Geral (média)

Primeiramente optou-se por encontrar o polinômio que melhor se adequaria a todos os pontos obtidos. Resolvendo o sistema da equação (32), obteve-se como resultado os coeficientes da tabela 21. A figura 75 mostra a curva traçada sobre os pontos.

Tabela 21 – Coeficientes da curva de calibração geral, a partir de todos os pontos.

-	a_3 [mm/pixel ³]	a_2 [mm/pixel ²]	a_1 [mm/pixel]	a_0 [mm]
Geral	$2,0857506 \cdot 10^{-9}$	$8,2857195 \cdot 10^{-6}$	$-6,1849174 \cdot 10^{-2}$	99,2129

¹⁶ Nessa calibração foram obtidos pontos em 26 posições diferentes do padrão, sendo assim n é no máximo 26, podendo ser menor devido à remoção de pontos que se encontram fora da faixa de medição.

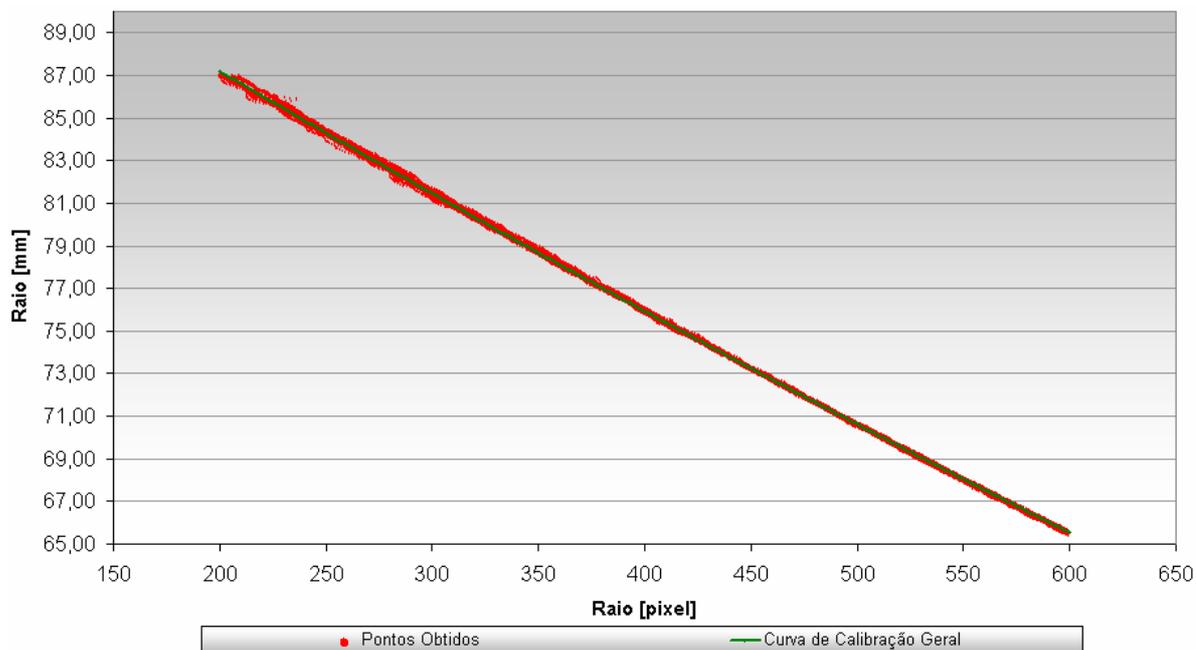


Figura 75 – Curva geral de calibração traçada sobre a nuvem de pontos.

Polinômios das regiões totalmente abrangidas (0° e 180°)

Como segunda análise, calculou-se duas curvas de calibração sendo a primeira a que engloba os pontos na região de $(348 \sim 22)^\circ$ e a segunda na região de $(158 \sim 202)^\circ$. Os coeficientes obtidos podem ser visto na tabela 22. Os gráficos na figura 76, juntamente com o do polinômio calculado com dados das duas regiões (em verde).

Considerou-se então que os ângulos de 0° e 180° possuem distintas funções de calibração. Para todos os outros ângulos intermediários é feita uma interpolação linear para determinação dos coeficientes do polinômio a ser usado. Por exemplo, para o ângulo de 60° os coeficientes o polinômio obtido para 0° são multiplicados por 0,6500 (65,00%) e os obtidos para 180° por 0,3500 (35,00%).

É perceptível a diferença entre as curvas obtidas, sendo que a máxima distância entre elas se encontra no início da faixa de medição em *pixels* e é da ordem de 0,5 mm (ver figura 77). O principal motivo para tal efeito seria o desalinhamento interno de componentes, tornando a sensibilidade do sistema diferente para cada ângulo.

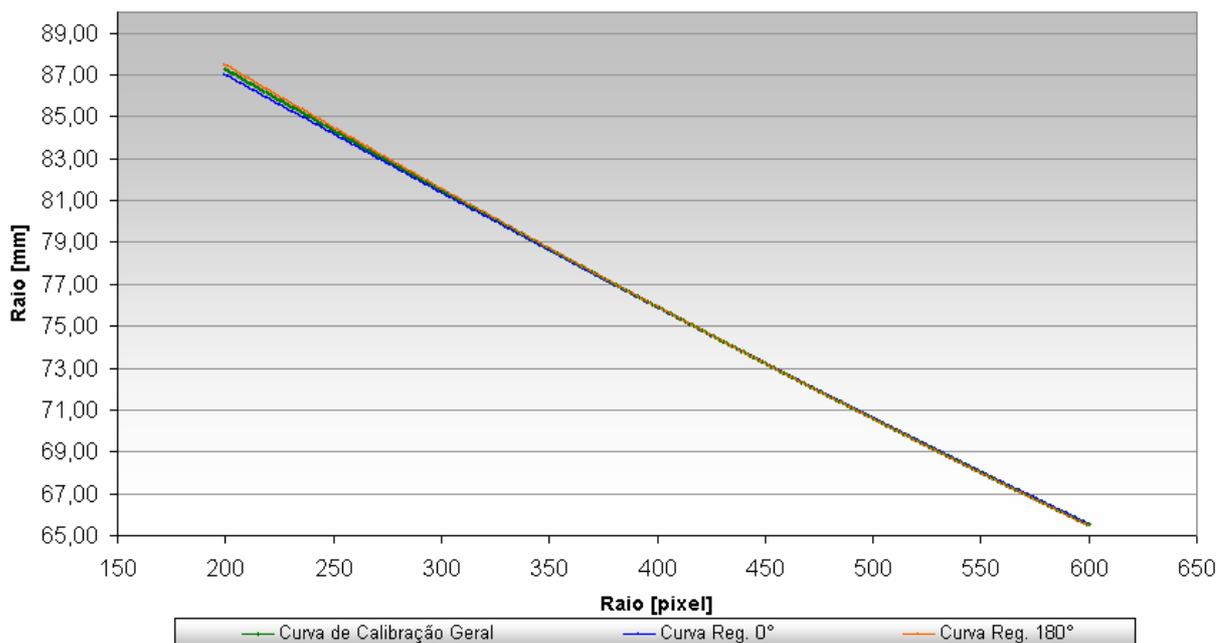


Figura 76 – Curvas de calibração das regiões 0° e 180°.

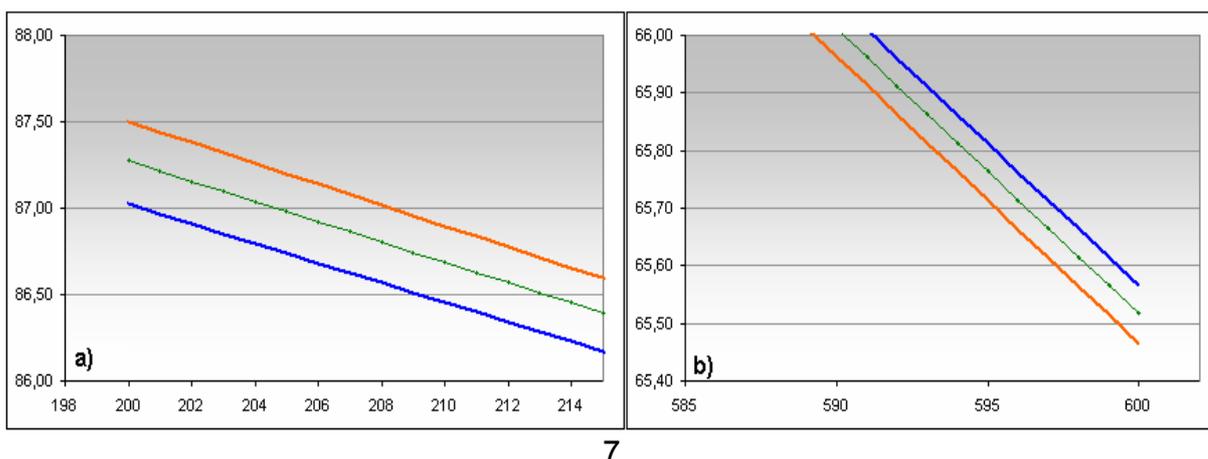


Figura 77 – Detalhe do início (a) e final (b) das curvas de calibração mostradas na figura 76.

Tabela 22 – Coeficientes das duas regiões analisadas.

Ângulo [°]	a_3 [mm/pixel ³]	a_2 [mm/pixel ²]	a_1 [mm/pixel]	a_0 [mm]
0 ± 22	$4,56420726 \cdot 10^{-9}$	$3,84976067 \cdot 10^{-6}$	-0,0590936379	98,642076
180 ± 22	$-9,10696093 \cdot 10^{-9}$	$1,47117536 \cdot 10^{-5}$	-0,0663742277	100,197319

6.4 AVALIAÇÃO DE INCERTEZA

As principais fontes de incerteza do processo de medição foram listadas no diagrama de Ishikawa, ou espinha de peixe, da figura 78. Como já citado anteriormente, baseado nos experimentos realizados, pode-se concluir que as fontes de incerteza predominantes são o ruído *speckle*, os “fantasmas” da linha do laser na imagem, o astigmatismo e os desalinhamentos de componentes.

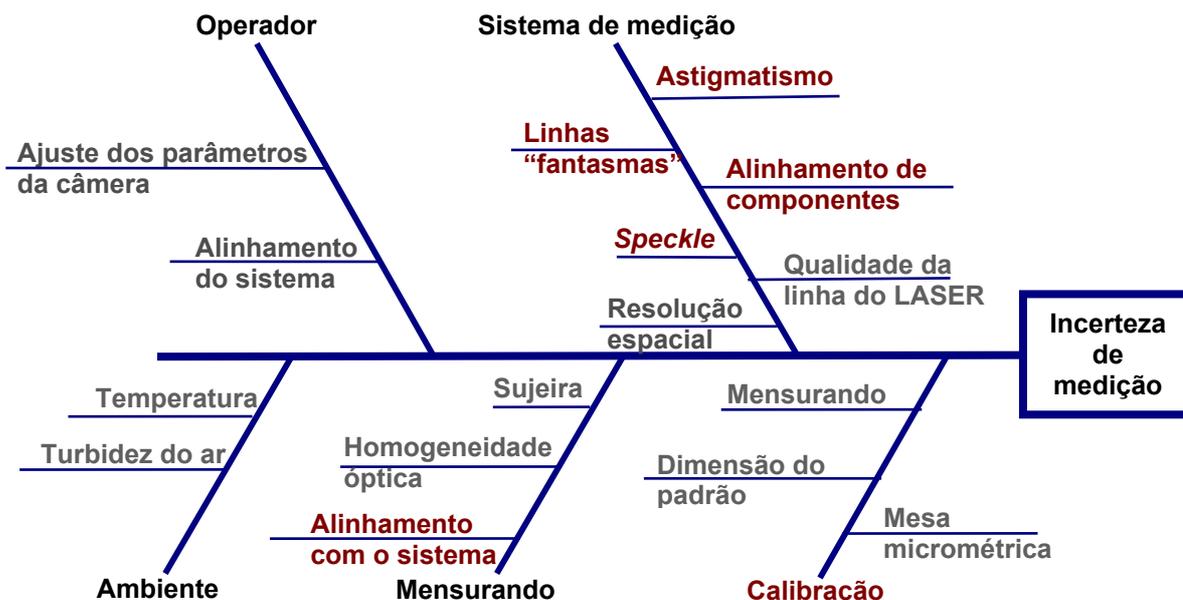


Figura 78 – Diagrama de Ishikawa para o processo de medição.

Operador

Cabe ao operador ajustar o sistema corretamente no interior do duto além de verificar se os parâmetros da câmera (ganho e *shutter*) estão possibilitando obter uma linha de laser adequada para medição.

Ambiente

A variação da temperatura influencia na dimensão da peça a ser medida e nos componentes do sistema, mas, em uma ordem de grandeza que pode ser desprezada para essa aplicação. A turbidez do ar (visibilidade) deve ser suficiente para a captação adequada pela câmera da linha do laser sobre o objeto a ser medido.

Mensurando

Em relação ao mensurando, pontos de sujeira excessiva, ferrugem, etc podem gerar regiões de grandes contrastes, o que pode prejudicar a medição. Além disso, um desalinhamento acentuado pode influenciar o resultado de medição.

Calibração e Sistema de medição

Durante a calibração, fontes de incerteza como a dimensão do padrão e desalinhamento do mensurando foram consideradas no balanço de incertezas. No entanto verificou-se que sua influência é pequena em relação à dos problemas como *speckle*, astigmatismo e desalinhamento da câmera. Essa análise é descrita no tópico a seguir.

6.4.1 Fontes de Incerteza de Maior Influência

Dentre os parâmetros citados no diagrama de Ishikawa para o sistema de medição, existem algumas fontes de incerteza de maior influência, as quais são descritas a seguir e seu valor é quantificado quando possível para compor o balanço da incerteza estimada na calibração:

Astigmatismo

Este efeito é muito intenso e deteriora as medições de regiões onde são necessários focos sagitais, como, por exemplo, as regiões onde há variações bruscas do raio, como é o caso dos triângulos e início das regiões circulares na medição do gabarito (tópico 6.5.2).

Linhas “fantasmas”

A detecção do centro de luminosidade acaba sendo afetada quando a imagem da linha do laser é visualizada com “linhas fantasmas” (em torno de raios de 250 e 375 *pixels*). Nessa região os “fantasmas” na imagem chegam a apresentar intensidade de luz semelhante à da linha principal, tornando ineficiente o uso de filtro *threshold*. Tentando atenuar esse problema, desenvolveu-se o filtro *Remove Fantasma*, o qual foi explicado anteriormente no tópico 5.2.2.

Alinhamento de Componentes do Sistema

O erro de alinhamento mais perceptível decorreu de pequenas variações da posição da câmera no flange, as quais geravam erros que só foram notados na medição do gabarito (tópico 6.5.2). Formas como triângulos e círculos apareciam

angularmente deslocadas no resultado de medição, mas o valor do raio na região circular era corretamente medido. Por isso, esse tipo de erro nunca seria detectado na medição de um anel padrão.

Esse erro pode ser mais bem compreendido analisando a figura 79, onde apenas nas regiões que se desviam do anel pode-se notar o erro de deslocamento.

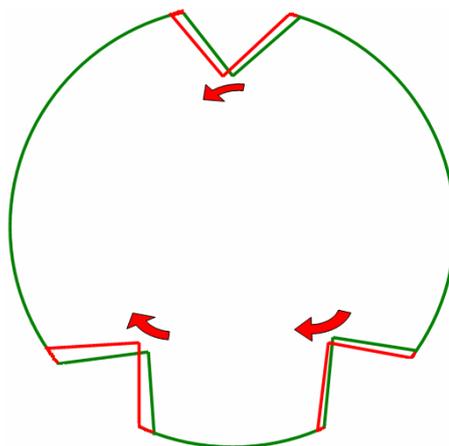


Figura 79 – Erro de deslocamento angular.

Speckle

Ficou claro nos experimentos que o erro aleatório tem como principal componente o ruído *speckle*. Filtros para tentar amenizá-lo foram descritos no capítulo 5. Esse efeito fica embutido na componente aleatória do sistema (erro tipo A) e é verificado a seguir na análise do erro da nuvem de pontos da calibração.

Análise das Incertezas do Sistema Calibrado

Para avaliação das incertezas do sistema, inicialmente calculou-se a diferença entre o valor determinado em milímetros usando o polinômio de calibração e o valor verdadeiro convencional. Sendo assim:

$$Erro = PC(p_i) - Rmm_i \quad (34)$$

Onde:

- PC(): Polinômio de calibração;
- p_i : Raio em *pixels* do i -ésimo ponto;
- Rmm_i : Distância do centro do sistema ao padrão do i -ésimo ponto.

a) Análise do Erro Utilizando os Filtros de Calibração

Através de uma simples análise visual das figuras 80 e 81, já é possível verificar a redução dos erros ao usar duas curvas de calibração ao invés de apenas uma geral. Ou seja, a dispersão no final da faixa de medição em milímetros, como já citado anteriormente, tem como principal causa a diferença de comportamento do sensor entre as regiões dos ângulos de 0° e 180° .

Para cada nuvem de pontos foi calculado o desvio padrão e a média, estes são expostos na tabela 23. Pode-se notar que os valores dos erros máximos e mínimos são consequência de pontos espúrios.

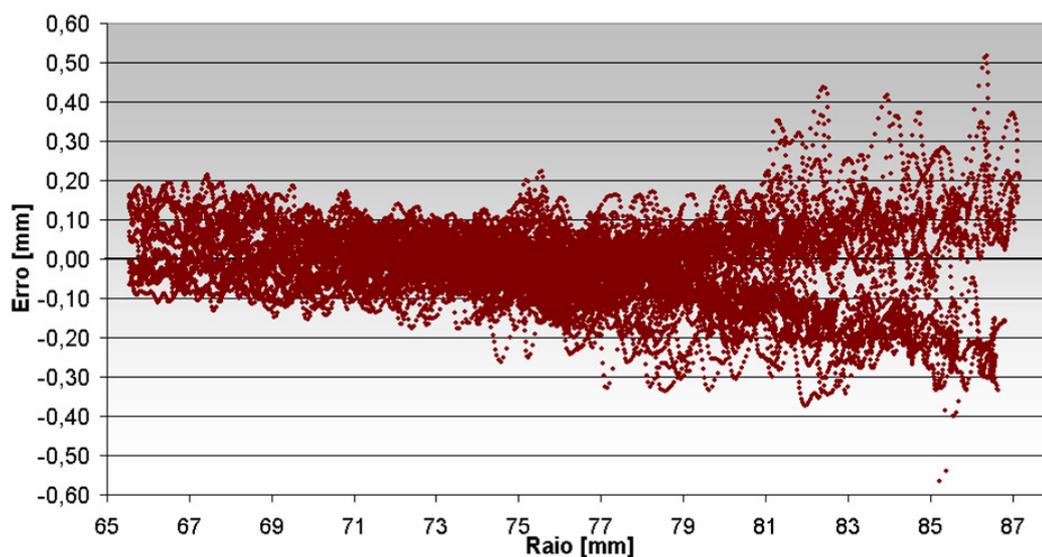


Figura 80 – Erros obtidos com uma curva de calibração geral (filtros de calibração).

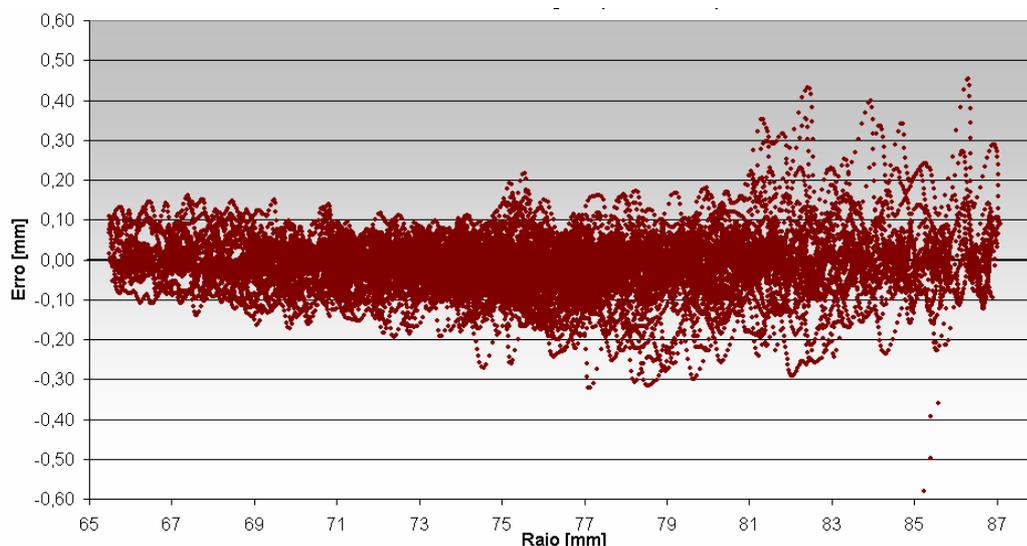


Figura 81 – Erros obtidos com duas curvas de calibração combinadas (filtros de calibração).

Tabela 23 – Erro em milímetros para as duas calibrações.

Calibração	Erro Médio	Desvio Padrão	Erro Máximo	Erro Mínimo
Geral	-0,010	0,088	0,516	-0,805
Combinadas	0,011	0,063	0,633	-0,455

b) Análise do Erro Utilizando os Filtros de Medição Normais

Quando feita a análise do erro do sistema utilizando os filtros normais de medição, nota-se que a influência das linhas “fantasmas” se torna muito intensa. Como este efeito ocorre apenas para raios menores que 370 *pixels* (maiores que 77,5 mm) conforme pode ser visto no gráfico da figura 83 e, na ilustração sobre uma imagem adquirida na figura 82, dividiu-se a faixa de medição em duas regiões:

Região 1: compreende o final da faixa de medição em milímetros (77 ~ 86) mm, é representada pela cor vermelha no gráfico.

Região 2: compreende (66 ~77) mm, e está livre de linhas “fantasmas”, é representada na cor azul.

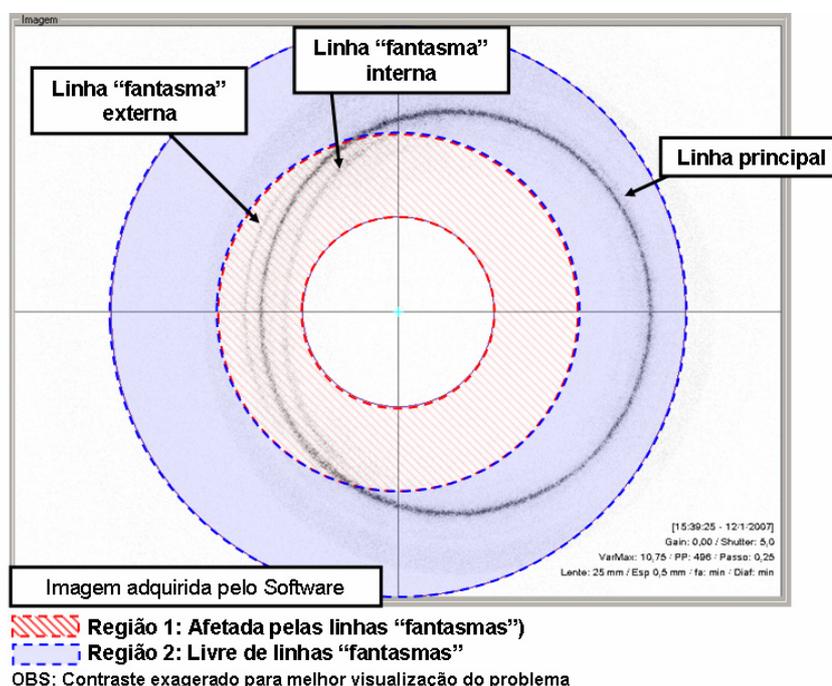


Figura 82 – Divisão da área de medição em região 1 e 2, respectivamente afetada e não afetada pelas linhas “fantasmas”.

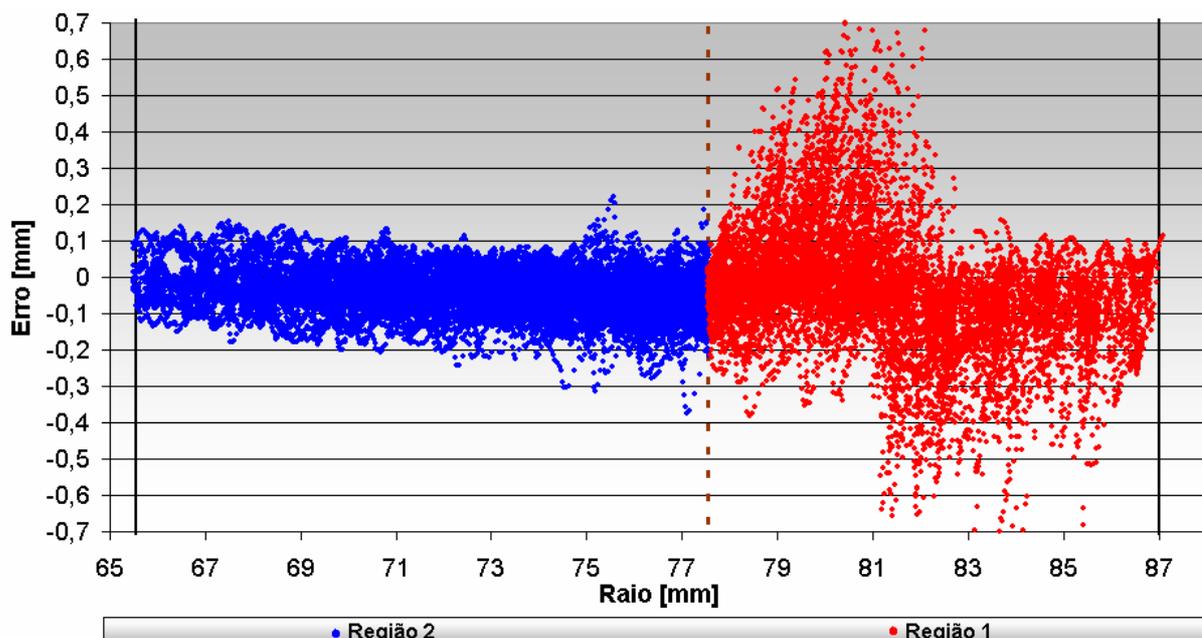


Figura 83 – Erro de medição dividido em regiões 1 e 2.

Inclinação relativa

A inclinação relativa entre o sistema de medição e o mensurando faz com que o valor medido seja maior do que seria quando estão alinhados. Caso o eixo de inclinação não coincida com o centro do plano de laser, a inclinação também gera translação, mas este efeito pode ser desconsiderado, pois o mesmo aumenta o raio em um lado e diminui no outro. Sendo assim, conforme ilustra a figura 84, foi considerado para a análise o centro de inclinação coincidente com o centro do plano do laser.

Considerando uma inclinação máxima de 2° e que o erro máximo é causado no final da faixa de medição (87 mm) obteve-se o resultado indicado na tabela 24. Analisando a figura 84, temos que o erro devido à inclinação é dado por:

$$E_{\text{inc}} = r2 - r1 \quad (35)$$

$$r2 = \frac{r1}{\cos(\theta)}$$

$$E_{\text{inc}}(r1, \theta) = r1 \cdot \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \quad (36)$$

Onde:

- $r1$: Raio medido com o sistema alinhado;

- r_2 : Raio medido com o sistema inclinado;
- θ : Ângulo de inclinação entre o sistema e o mensurando;
- E_{Inc} : Erro de inclinação.

Tabela 24 – Erro devido à inclinação relativa: sistema/mensurando.

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
E_{Inc}	Erro de inclinação	0,053	mm

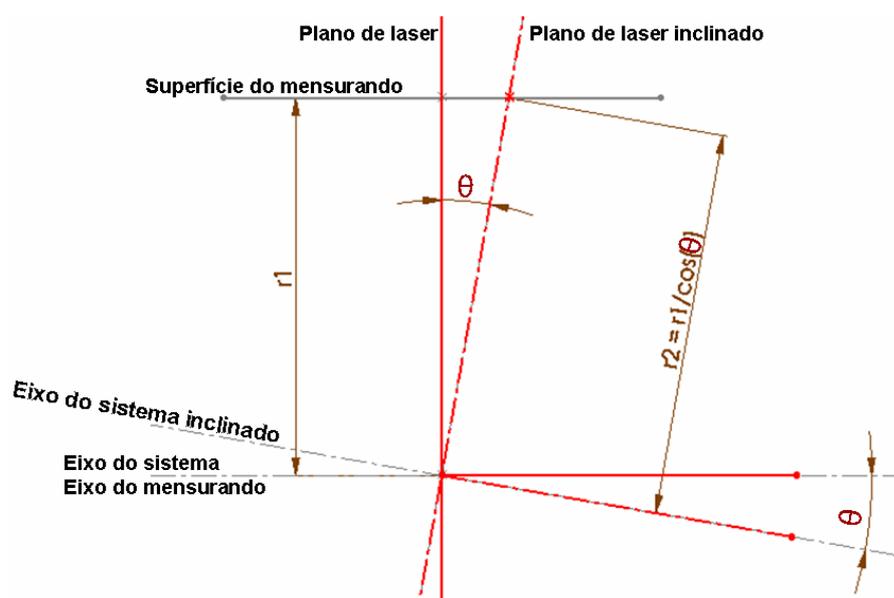


Figura 84 – Esquemático do erro devido à inclinação entre sistema e mensurando.

Raio do Padrão Pintado

O raio do padrão foi medido por uma MMC com incerteza de 0,006 mm. No entanto, o padrão foi pintado de branco para uma melhor reflexão da linha do laser. Sendo assim, em função da espessura da tinta, considerou-se uma correção para os valores do raio de $(-0,04 \pm 0,03)$ mm (ver tabelas 25 e 26). Nota-se que a componente devido à incerteza da MMC é praticamente desprezível.

Tabela 25 – Correção do raio do padrão (componente sistemática).

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
C_{Pad}	Correção do raio do padrão	-0,040	mm

Tabela 26 – Fontes de incerteza do raio do padrão (componentes aleatórias).

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
UC_{Pad}	Incerteza da correção do padrão	0,030	mm
U_{MMC}	Incerteza da MMC	0,001	mm
U_{Pad}	Incerteza do padrão $U_{PAD} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{UC_{Pad}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{MMC}}{2}\right)^2}$	0,0306	mm

O sistema desenvolvido pode ser usado em duas classes de aplicações. Na primeira, há interesse em medir o valor absoluto do raio. Na segunda, o interesse é sobre as variações do raio, o que denuncia defeitos na seção medida. Para a primeira, esta fonte de incertezas deve ser considerada. Para a segunda, tem influência praticamente zero.

Mesa Micrométrica

Como é utilizada uma mesa micrométrica no deslocamento do padrão, é necessário considerar sua resolução, assim como a qualidade do parafuso micrométrico. Estes são listados na tabela 27.

Tabela 27 – Fontes de incerteza da mesa micrométrica

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
Re_{Mesa}	Resolução da mesa micrométrica	0,001	mm
U_{PMesa}	Incerteza expandida do parafuso da mesa micrométrica	0,002	mm

6.4.2 Balanço das Incertezas Estimadas na Calibração

Com os parâmetros descritos acima foram feitos dois balanços de incerteza, representando respectivamente as regiões 1 e 2 da faixa de medição, sendo que os filtros utilizados são os mesmos normalmente usados para as medições.

O primeiro termo considerado no balanço de incertezas, e o único que difere entre o balanço da região 1 e 2, é a repetitividade do sistema (Re). Esta foi estimada baseada no desvio padrão da curva de erros dos pontos obtidos durante a calibração.

O segundo termo é a resolução espacial (R), que apesar de ser a nível de sub-pixel, foi considerado o valor calculado na definição do CCD para o sistema, que é de 0,05 mm.

O terceiro termo é a inclinação do sistema, que foi calculada para um ângulo de 2° e raio de 87 mm.

O quarto termo é o raio do padrão escalonado pintado (R_{PAD}).

O quinto e o sexto (R_{mm} e PM) decorrem da influência da mesa micrométrica utilizada na calibração.

O sétimo é último termo considerado representa o erro sistemático residual (ESR), que pode ser notado na curva de erros da figura 83. Como o mesmo não é corrigido, fez-se uma consideração conservadora, tomando-o como uma distribuição retangular ao invés de um erro sistemático.

Os balanços de incerteza das regiões 1 e 2 são apresentados respectivamente nas tabelas 28 e 29. A tabela 30 mostra a incerteza expandida obtida para cada região, e seu valor percentual em relação à espessura da parede do duto e a faixa de medição.

Tabela 28 – Balanço de incertezas estimadas na calibração (região 1).

Filtros de Imagem: Padrões para medição			Unidade: mm			
Fontes de Incerteza		Efeito sistemático	Efeito aleatório			
Símbolo	Descrição	Correção	a	Distribuição	u	v
Re	Tipo A / Repetitividade	-	-	Normal	0,1693	11790
R	Resolução espacial	-	0,025	Retangular	0,0144	∞
Inc	Inclinação do sistema	-	0,0530	Normal	0,0265	∞
MMC	Raio do Padrão	-0,04	0,03	Retangular	0,0173	∞
Rmm	Res. Mesa micrométrica	-	0,001	Retangular	0,0006	∞
PM	Parafuso micrométrico	-	0,004	Retangular	0,0023	∞
ESR	Erro sistemático residual	-	0,05	Retangular	0,0289	∞
Tp	Temperatura	-	-	-		
C_c	Correção combinada	-0,04				
u_c	Incerteza combinada			Normal	0,18	1,4E+04
U_c	Incerteza expandida			Normal	0,35	

Tabela 29 - Balanço de incertezas estimadas na calibração (região 2).

Filtros de Imagem: Padrões para medição			Unidade: mm			
Fontes de Incerteza		Efeito sistemático	Efeito aleatório			
Símbolo	Descrição	Correção	a	Distribuição	u	v
Re	Tipo A / Repetitividade	-	-	Normal	0,0570	23899
R	Resolução espacial	-	0,0250	Retangular	0,0144	∞
Inc	Inclinação do sistema	-	0,0530	Normal	0,0265	∞
MMC	Raio do Padrão	-0,04	0,0300	Retangular	0,0173	∞
Rmm	Res. Mesa micrométrica	-	0,0010	Retangular	0,0006	∞
PM	Parafuso micrométrico	-	0,0040	Retangular	0,0023	∞
ESR	Erro sistemático residual	-	0,0500	Retangular	0,0289	
Tp	Temperatura	-	-	-		
C_C	Correção combinada	-0,04				
u _C	Incerteza combinada			Normal	0,07	4,0E+02
U_C	Incerteza expandida			Normal	0,15	

Tabela 30 – Incerteza expandida obtida para as regiões 1 e 2 da faixa de medição.

Região	Incerteza Expandida 95,45%	Em relação à espessura da parede do duto	Em relação à faixa de medição
1	$\pm 0,35$ mm	± 5 %	± 2 %
2	$\pm 0,15$ mm	± 2 %	± 1 %

Nota-se nos gráficos das figuras 85 e 86 que a fonte de incerteza predominante é o erro aleatório do sistema (erro tipo A). Na região 1, a influência é de 65,2%, no entanto, na região 2, como não existe o problema com as linhas “fantasmas”, a dispersão dos pontos diminui muito, sendo que a repetitividade resultante nesta região influencia 38,7% na incerteza final da região.

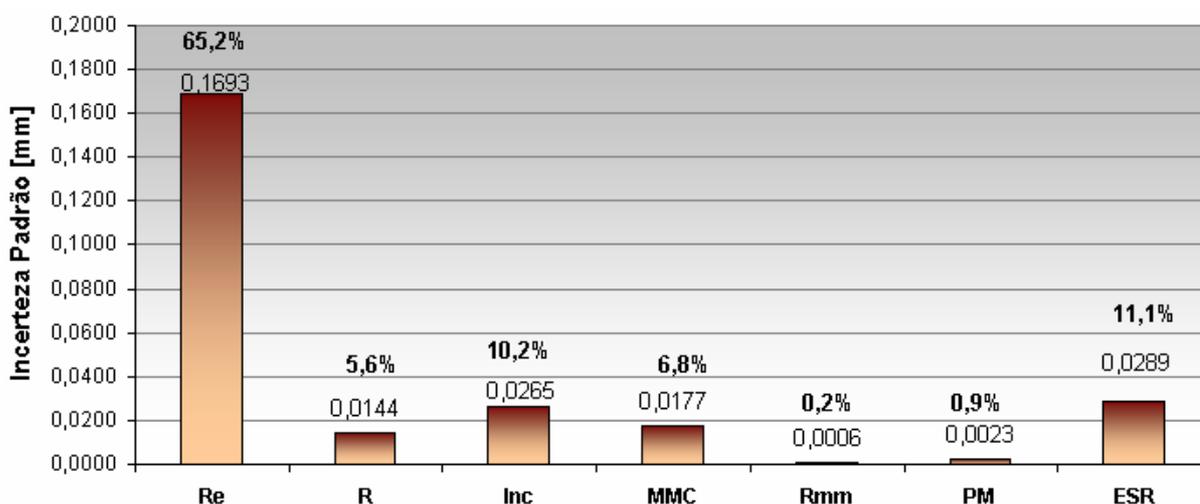


Figura 85 – Gráfico da influência de cada fonte de incerteza analisada (região 1).

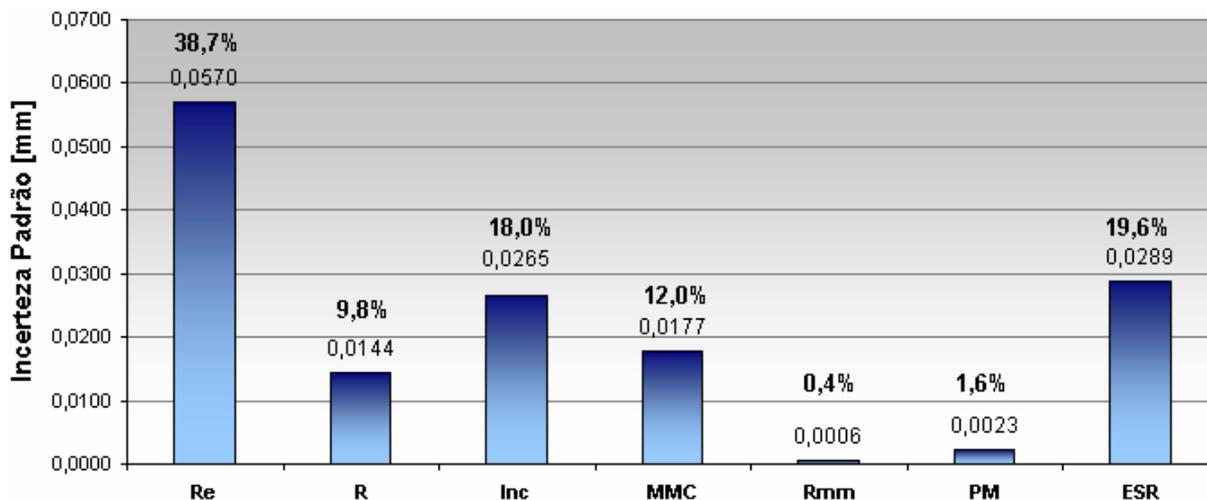


Figura 86 - Gráfico da influência de cada fonte de incerteza analisada (região 2).

6.5 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO

Os ensaios de avaliação visam verificar a capacidade de medição do sistema, além de avaliar a obtenção da linha do laser em diferentes superfícies com regiões de cores escuras, claras, polidas e de grande contraste.

6.5.1 Medição de Anéis do Padrão Escalonado

Todos os anéis do padrão escalonado que se encontram dentro da faixa de medição do sistema (anel A1b ao A4b) foram medidos. A tabela 31 mostra o resumo dos resultados obtidos. Pode-se notar que o erro médio¹⁷ negativo nos anéis representa o erro sistemático residual não corrigido, sendo que o mesmo diminui para anéis de maior diâmetro (anel A3 em diante). O gráfico das figuras 87 e 88 mostra o erro obtido para os anéis A1b e A4b respectivamente. Nota-se que existe um erro sistemático nos ângulos de 90° e 270°, dando para perceber uma componente fundamental somada à parcela do erro de maior frequência.

¹⁷ Valor verdadeiro convencional (VVC) menos o valor médio medido (VMM).

Anéis Centrados

Tabela 31 – Resumo do resultado de medição dos 7 anéis. Valores em milímetros.

Anel	VVC	VMM	Erro	Desv. Pad. (s)	|Erro|+2-s
A1b	66,3460	66,2822	-0,064	0,036	0,14
A2	68,3300	68,2774	-0,053	0,040	0,13
A2b	68,8550	68,7874	-0,068	0,042	0,15
A3	71,8280	71,7836	-0,044	0,039	0,12
A3b	72,3520	72,3113	-0,041	0,040	0,12
A4	75,8405	75,8438	0,003	0,043	0,09
A4b	76,3535	76,3407	-0,013	0,046	0,11

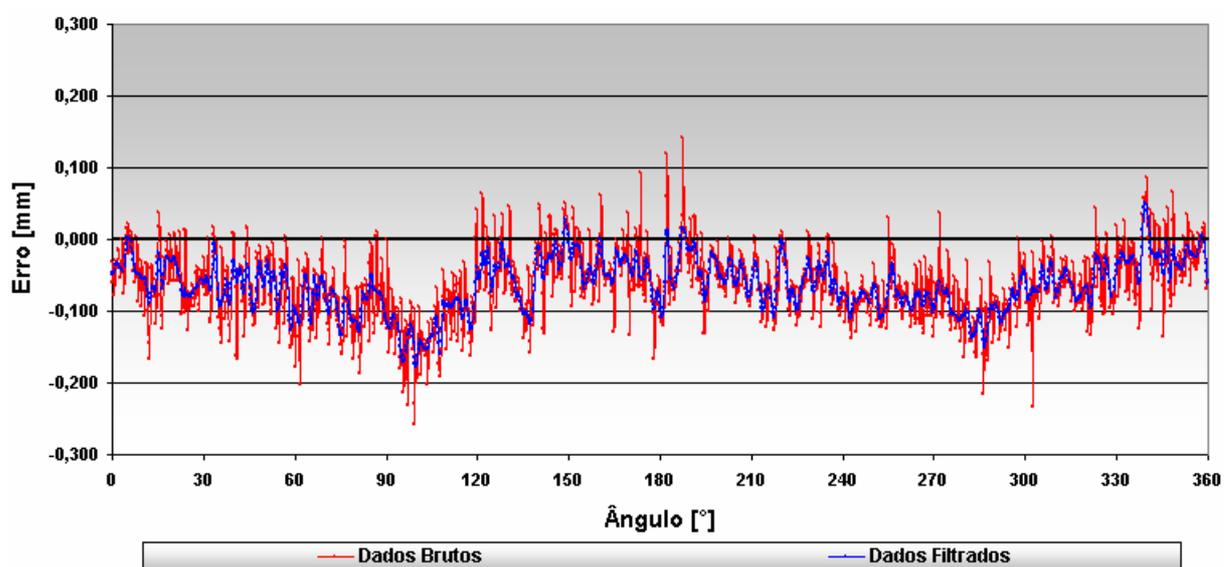


Figura 87 – Erro de medição do anel A1b.

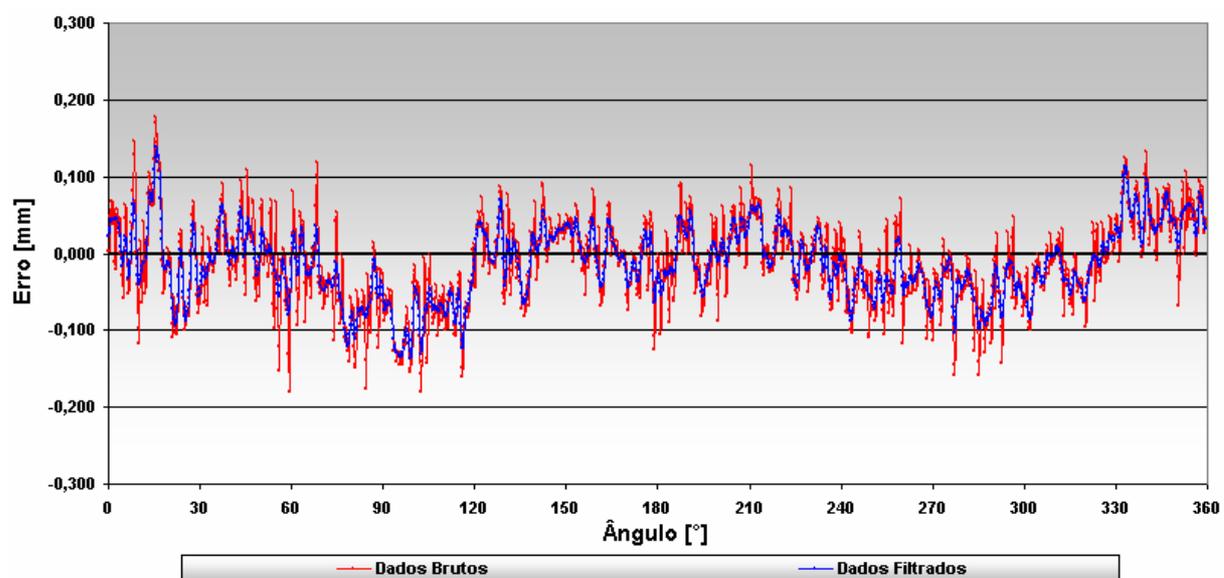


Figura 88 – Erro de medição do anel A4b.

Anéis Deslocados Transversalmente

De forma a verificar a influência de deslocamentos transversais entre o eixo do sistema de medição e do melhor círculo da secção medida, foram feitos deslocamentos forçados no eixo x e y (indicados nas primeiras duas colunas da tabela 32) com o auxílio das mesas micrométricas da bancada. Nota-se nos resultados de medição ilustrados na tabela 32 que o anel do padrão escalonado foi muito bem medido em todas as posições.

Pode-se concluir que existem dois problemas fundamentais causados por deslocamentos transversais. O primeiro decorre de quando uma peça que bem centrada utilize apenas a região 2 da faixa de medição e que, quando deslocada passe a utilizar também a região 1, a qual possui maior incerteza devido ao problema com linhas “fantasmas”. O segundo, é que deslocamentos transversais poderiam tirar alguma parte do mensurando da região de medição.

Tabela 32 – Medições do anel A3 com deslocamentos transversais. Valores em milímetros.

Δx	Δz	VVC	VMM	Erro	Desv. Pad. (s)	|Erro|+2-s
0	0	71,8280	71,7825	-0,045	0,035	0,12
5	0	71,8280	71,8203	-0,008	0,043	0,09
-5	0	71,8280	71,7564	-0,072	0,045	0,16
0	5	71,8280	71,8293	0,001	0,046	0,09
0	-5	71,8280	71,7509	-0,077	0,036	0,15
4	4	71,8280	71,7351	-0,093	0,035	0,16
-4	-4	71,8280	71,8506	0,023	0,047	0,12

Medição de um Anel com Deslocamentos Longitudinais (eixo Z)

De forma a verificar a parcela do *speckle* no erro aleatório mediu-se o anel A3 em três posições diferentes. Isso foi feito realizando deslocamentos controlados de 0,5 mm na direção do eixo Z. Os resultados das medições podem ser vistos na tabela 33. O gráfico da figura 89 contém o erro de medição para as três posições. Nota-se que a componente de mais baixa frequência aparece em todas as três medições (valor do raio é menor nas regiões próximas a 90° e 270°).

Imagens obtidas em uma mesma posição resultam em medições idênticas, uma vez que o *speckle* permanece inalterado e o processamento da imagem é sempre o mesmo.

Tabela 33 - Medições do anel A3 com deslocamentos longitudinais (eixo Z). Valores em milímetros.

Δz	VVC	VMM	Erro	Desv. Pad. (s)	$|\text{Erro}|+2\cdot s$
0,0	71,8280	71,7819	-0,046	0,036	0,12
0,5	71,8280	71,7854	-0,043	0,033	0,11
1,0	71,8280	71,7839	-0,044	0,038	0,12

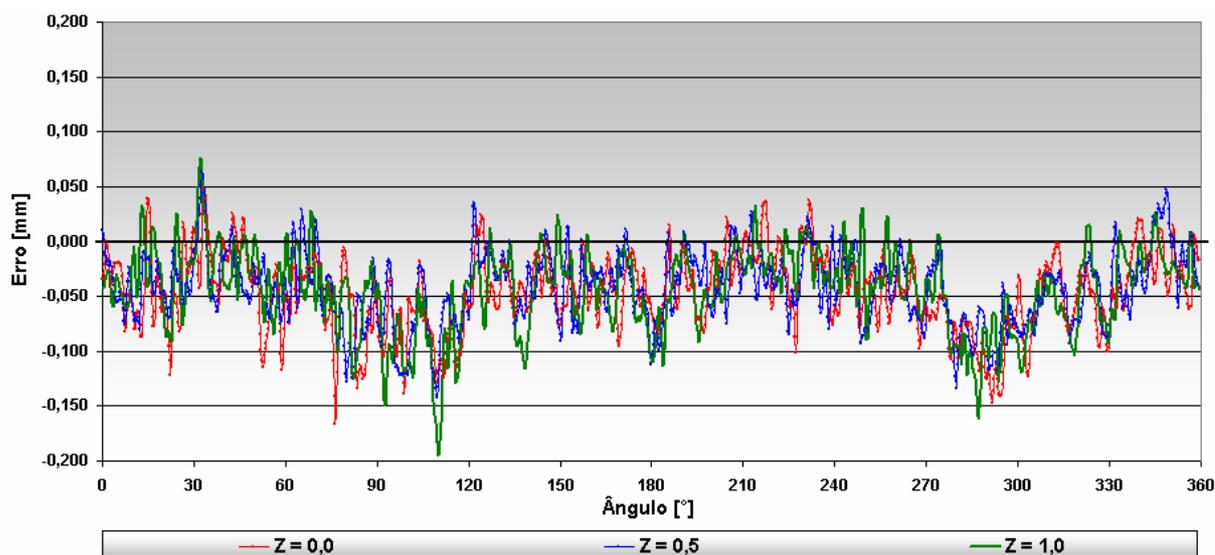


Figura 89 – Erro de medição do anel A3 em três posições distintas em Z.

6.5.2 Medição de Gabarito

Com o objetivo de verificar e comprovar a capacidade de medição do sistema, foi projetada uma placa de alumínio com um corte central que simula uma secção de duto com formas bem definidas, como triângulos e regiões circulares (ver figura 90). Para comparar o resultado de medição do sistema, a parte interna da chapa foi medida também por uma MMC na Fundação CERTI.

Os pontos brutos e filtrados obtidos em milímetros são comparados com os medidos com a MMC no gráfico das figuras 91 e 92.

O gráfico de erro (figura 93) mostra que as regiões que necessitam do foco sagital são prejudicadas devido ao astigmatismo. Soma-se a esse erro o problema com linhas “fantasmas” nas regiões de raios maiores do que 77 mm. Além disso, devido a problemas de alinhamento da câmera, nota-se o efeito de deslocamento angular nas regiões com traços com maior gradiente da componente.

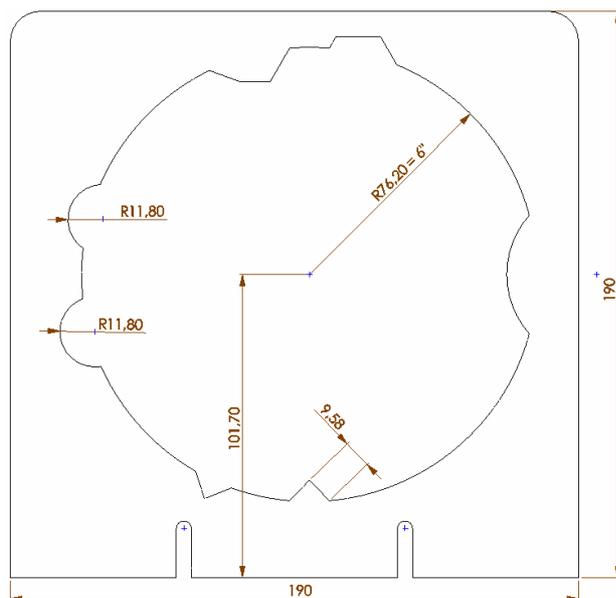


Figura 90 – Projeto do gabarito com algumas cotas (valores em milímetros).

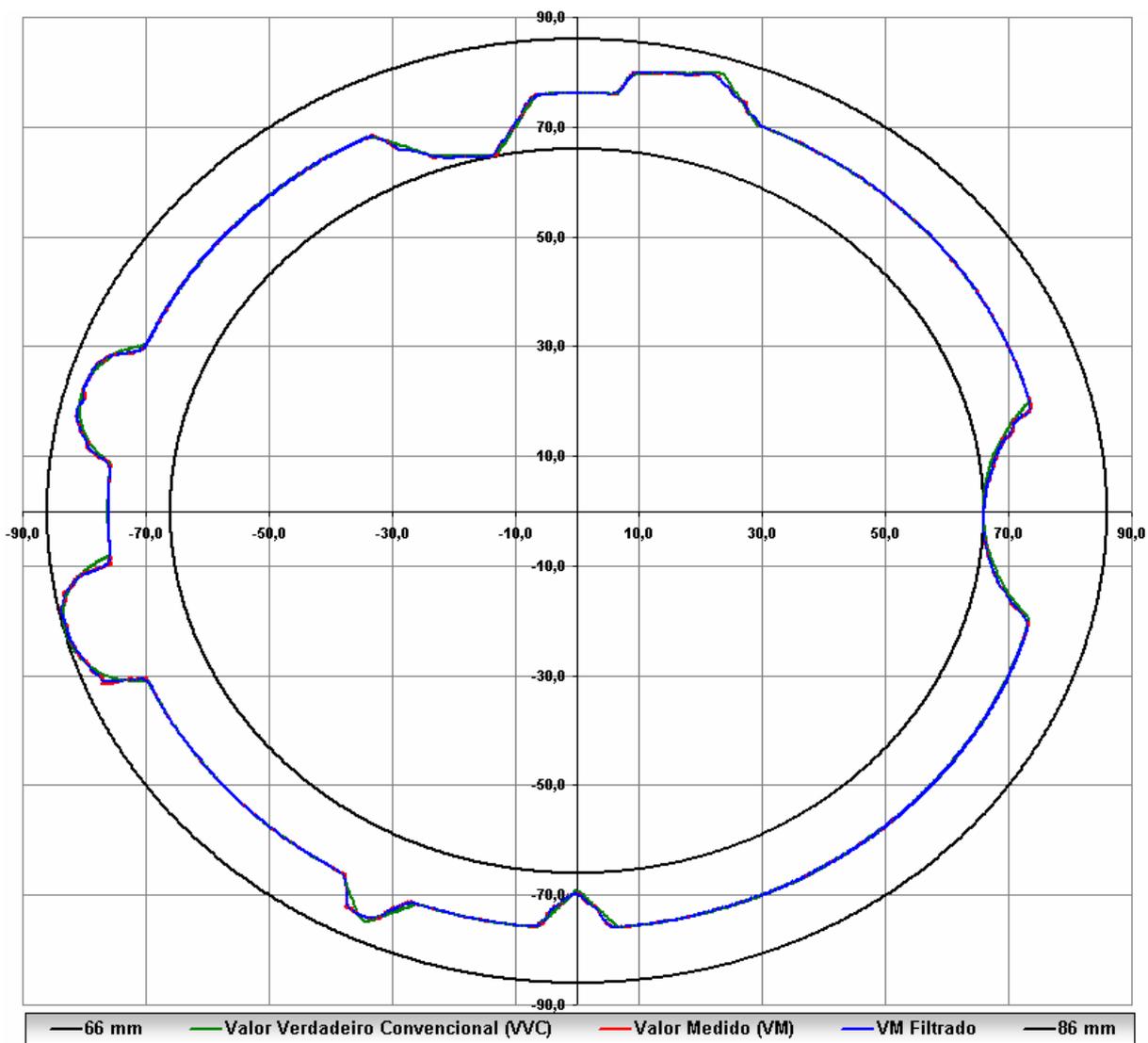


Figura 91 – Resultado de medição do gabarito em coordenadas polares (valores em milímetros).

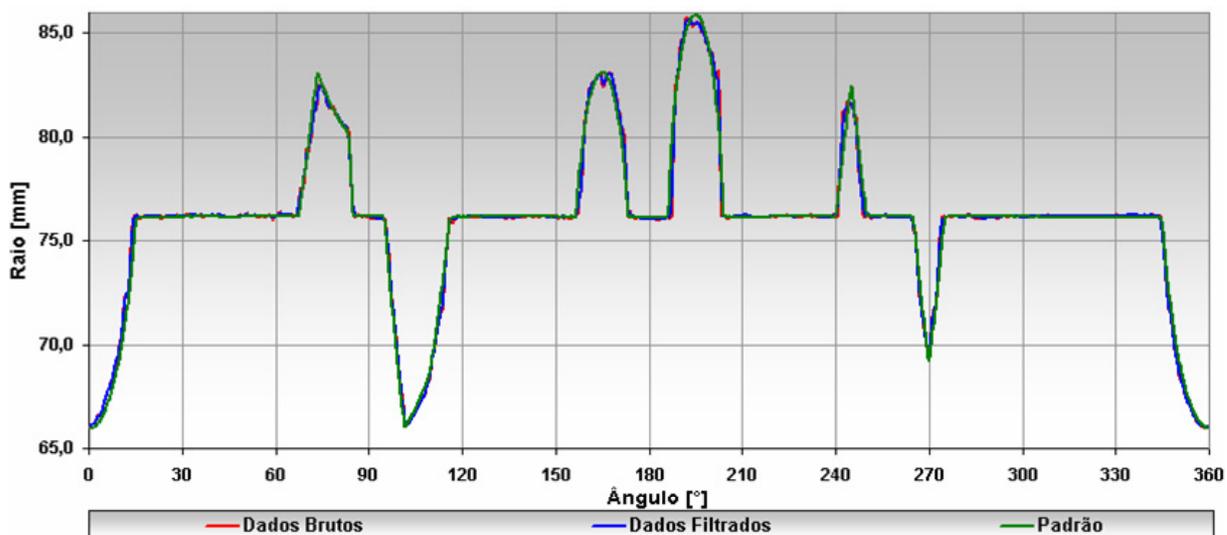


Figura 92 – Resultado de medição do gabarito em coordenadas cartesianas.

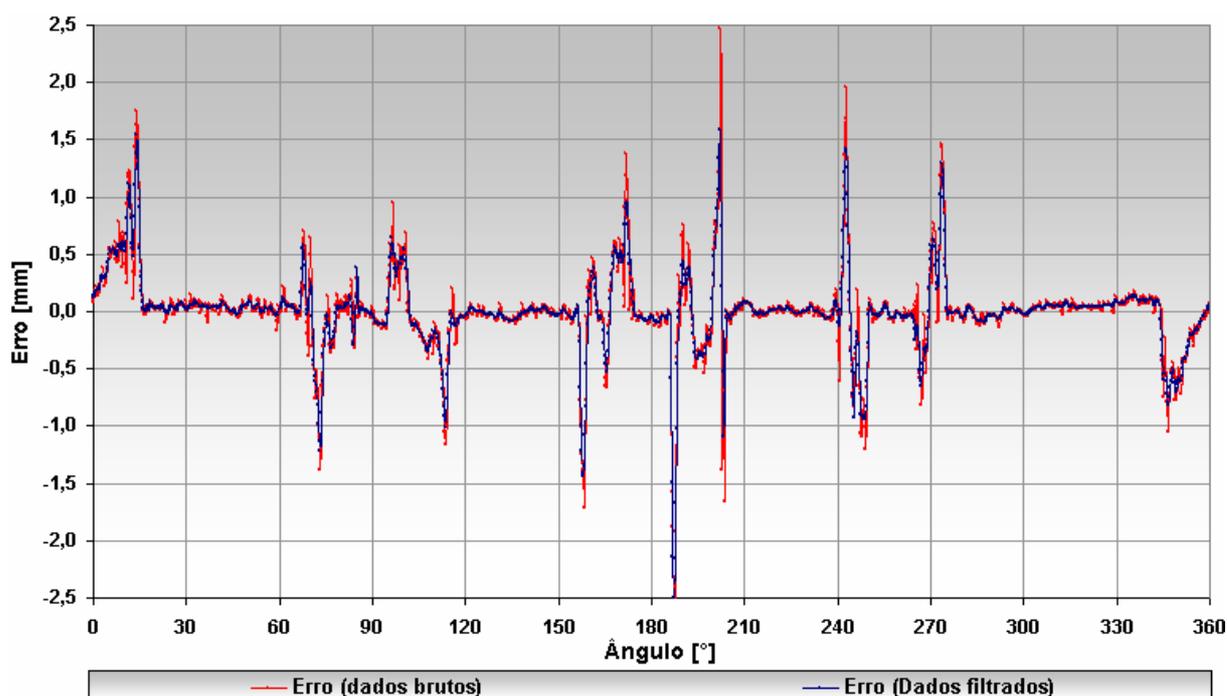


Figura 93 – Erro de medição da chapa.

6.5.3 Medição de Duto com Defeitos Artificiais

Como a forma do duto não é perfeita, a análise de apenas uma seção individual não é a melhor forma de detectar defeitos por corrosão, mesmo sendo esta comparada a uma parte sadia, pois pequenos amassamentos e/ou imperfeições do próprio duto podem confundir a análise do resultado de medição. Sendo assim, na secção a seguir (6.6.3) são feitas análises de várias secções equiespaçadas

axialmente e sequencialmente medidas, resultando em uma nuvem de pontos 3D do mensurando, facilitando assim, a análise das condições da superfície interna do duto.

De forma a verificar se o sistema conseguiria “enxergar” a linha do laser sob superfícies escuras, algumas imagens foram capturadas utilizando o duto com uma cartolina preta. Verificou-se que, com pequenos ajustes nos controles da câmera (*shutter* e ganho), a linha do laser era perfeitamente visualizada.

Outra constatação é que grandes contrastes de cores (ou de regiões rugosas e polidas) dificultam a medição, pois uma parte da linha fica sempre saturada ou com muito pouca intensidade de luz.

6.6 MEDIÇÃO 3D A PARTIR DA CONCATENAÇÃO DE SECÇÕES SEQUENCIALMENTE MEDIDAS

Foram feitas medições das mesmas peças analisadas no tópico anterior, mas realizando deslocamentos conhecidos no eixo z com passo de 1 mm. Os resultados das medições foram inseridos no *software* de visualização 3D de cilindros CYLO [27].

Deve-se notar que para a obtenção de uma nuvem de pontos 3D adequada são necessários algoritmos de fusão de dados. Como o presente trabalho teve seu foco na confecção e avaliação do sistema para medições de secções individuais, as imagens 3D obtidas podem conter erros de deslocamentos transversais do sistema de coordenadas entre secções. Tais imagens são aqui apresentadas apenas para mostrar as potencialidades do sistema em atender as funções idealizadas para o *pig* de perfilagem óptico.

6.6.1 Medição 3D do Padrão Escalonado

Foram medidas 12 secções do padrão escalonado a passos de 1 mm, tendo início no anel A4b e fim no anel A3. A figura 94 mostra o resultado de medição em corte para uma melhor percepção dos “degraus” do padrão.

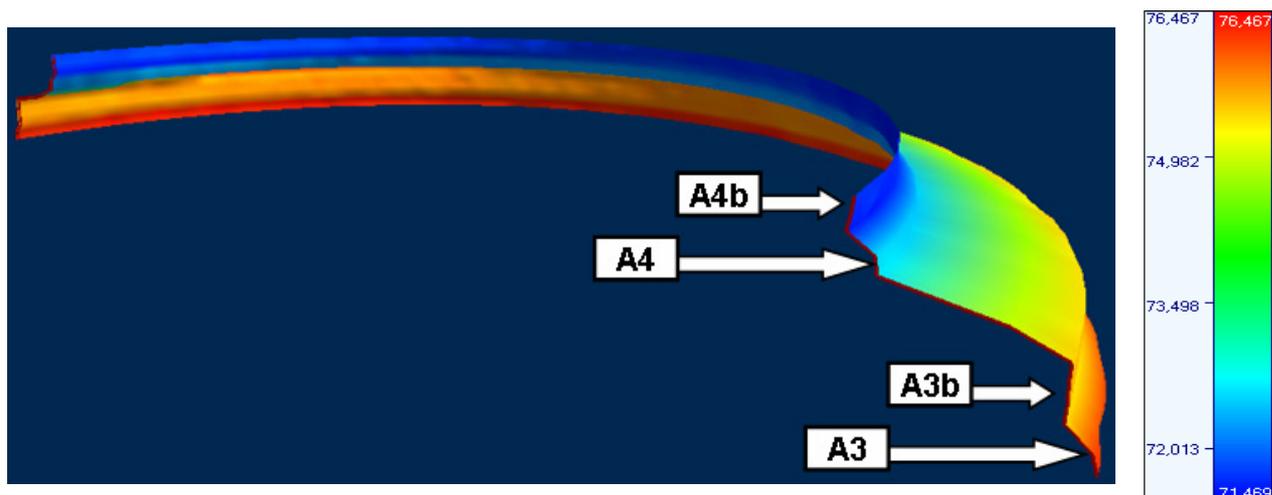


Figura 94 – Vista em corte do resultado de medição 3D das secções A4b à A3 do padrão escalonado (valores em milímetros).

6.6.2 Medição 3D do Gabarito

O gabarito possui secções praticamente com as mesmas dimensões, tendo como única variação o erro da ferramenta utilizada para sua confecção. O resultado pode ser visto na figura 95.

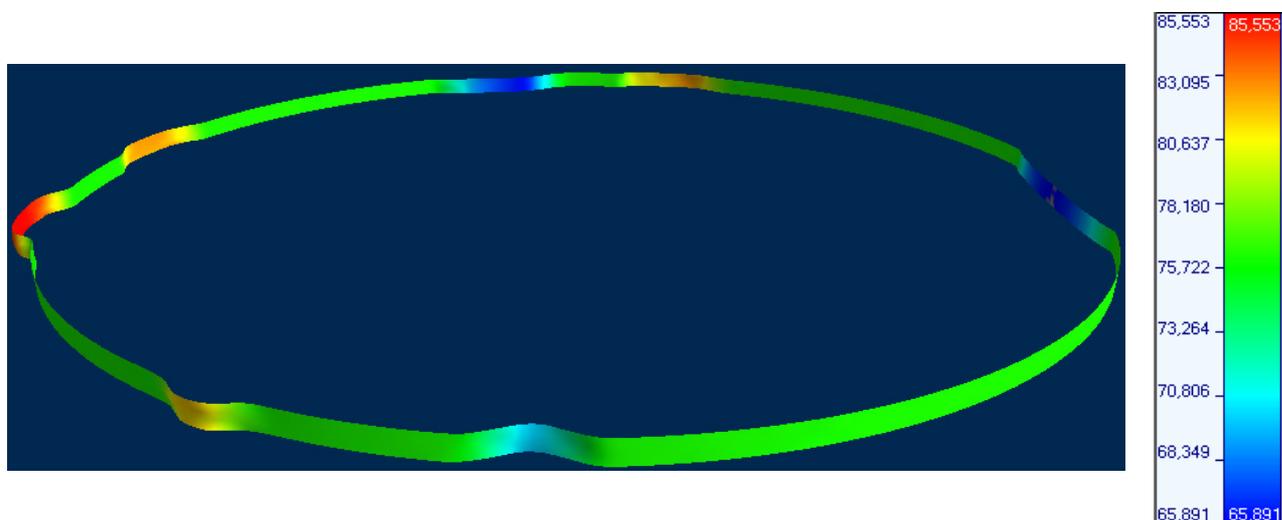


Figura 95 - Resultado de medição 3D do gabarito (valores em milímetros).

6.6.3 Medição 3D de Duto com Defeitos Artificiais

Uma das medições mais importantes para a validação do sistema é a avaliação da nuvem de pontos 3D do duto com defeitos artificiais, que mostra claramente a capacidade do sistema em detectar defeitos com profundidades menores do que 1 mm. A tabela 34 ilustra a profundidade máxima dos 6 defeitos etiquetados.

Pode-se ver o sistema posicionado dentro do duto na figura 96. A figura 97 mostra em detalhes fotos dos quatro defeitos artificiais mais perceptíveis no duto. Foi utilizada uma fonte de planos de laser para dar uma melhor noção de profundidade do defeito na foto. O resultado de medição 3D pode ser visto na figura 98. A escala utilizada na imagem 3D é exagerada para uma melhor visualização dos defeitos, pois como os mesmos variam de 2 mm (região com partes amarelas no canto direito da imagem) a menos de 1 mm, é difícil a visualização em escala normal.

A visão planificada da medição é mostrada na figura 99. Pode-se notar que a região entre os defeitos D4 e D5, possui coloração verde por toda a extensão medida, ou seja, o raio é constante, o que pode indicar uma possível deformação natural do duto, e por ser muito suave, não foi considerado um defeito por corrosão.

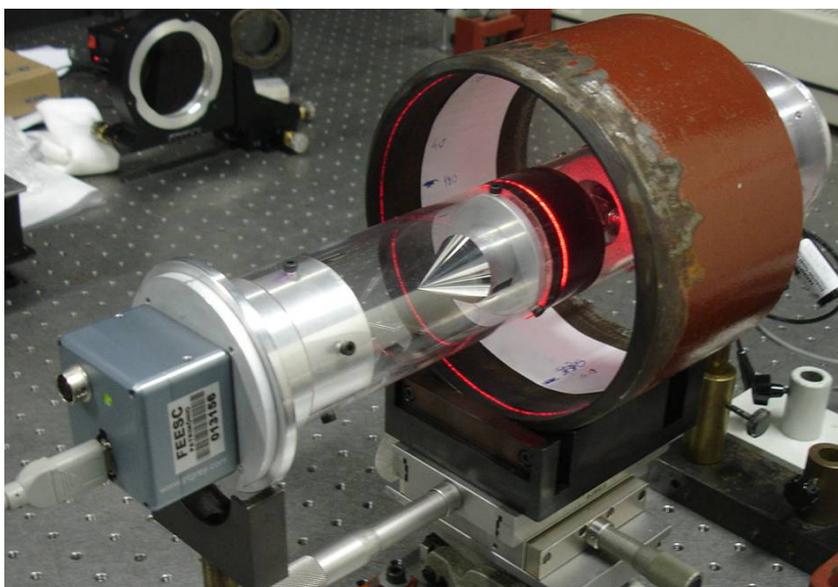


Figura 96 – Protótipo durante a medição de uma das secções do duto.

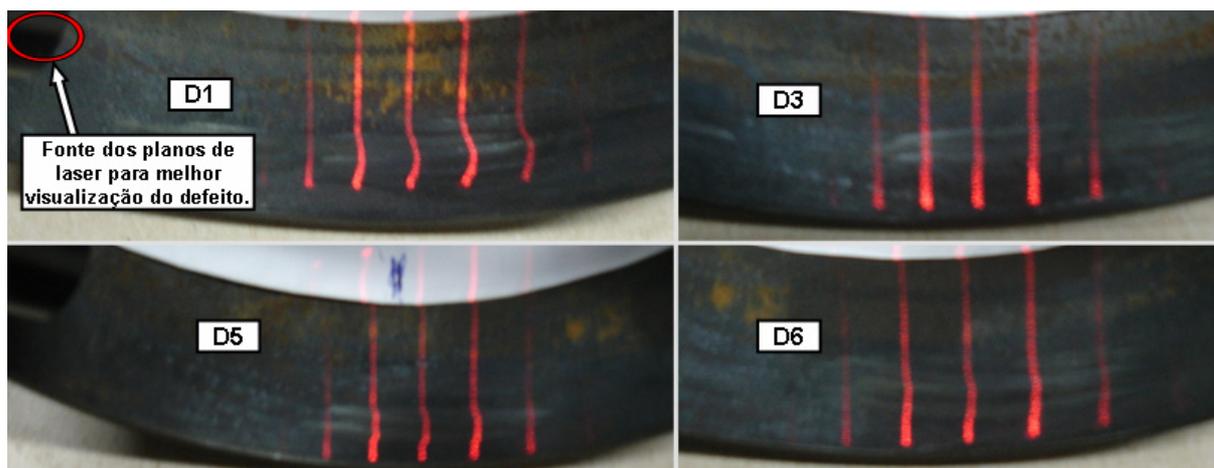


Figura 97 – Detalhe dos defeitos artificiais do duto D1, D3, D5 e D6.¹⁸

Tabela 34 – Descrição dos defeitos artificiais no duto (valores em mm).

Defeito	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Profundidade Máxima	2,4	0,5	0,7	0,3	1,1	0,5

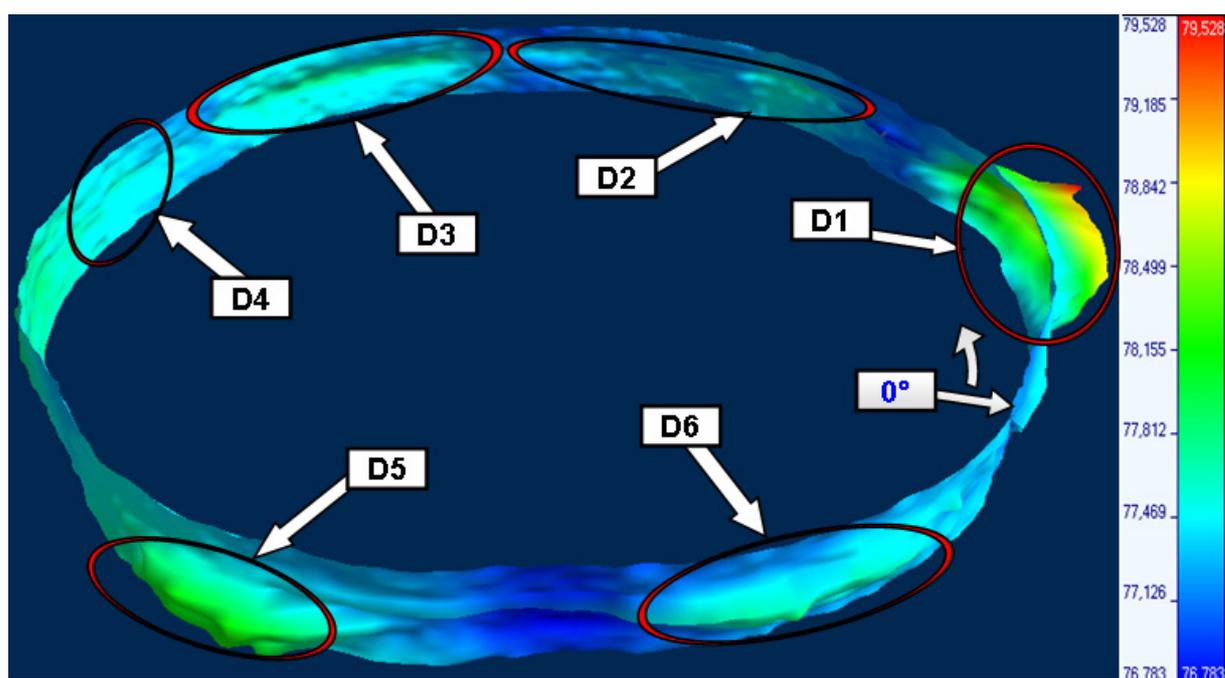


Figura 98 - Resultado de medição 3D de uma secção do duto de 16 mm com escala de cores falsas (valores em milímetros).

¹⁸ Note que os planos de LASER utilizados para as fotos não tem relação alguma com o sistema de medição. São utilizados simplesmente para dar uma melhor noção de profundidade dos defeitos na foto.

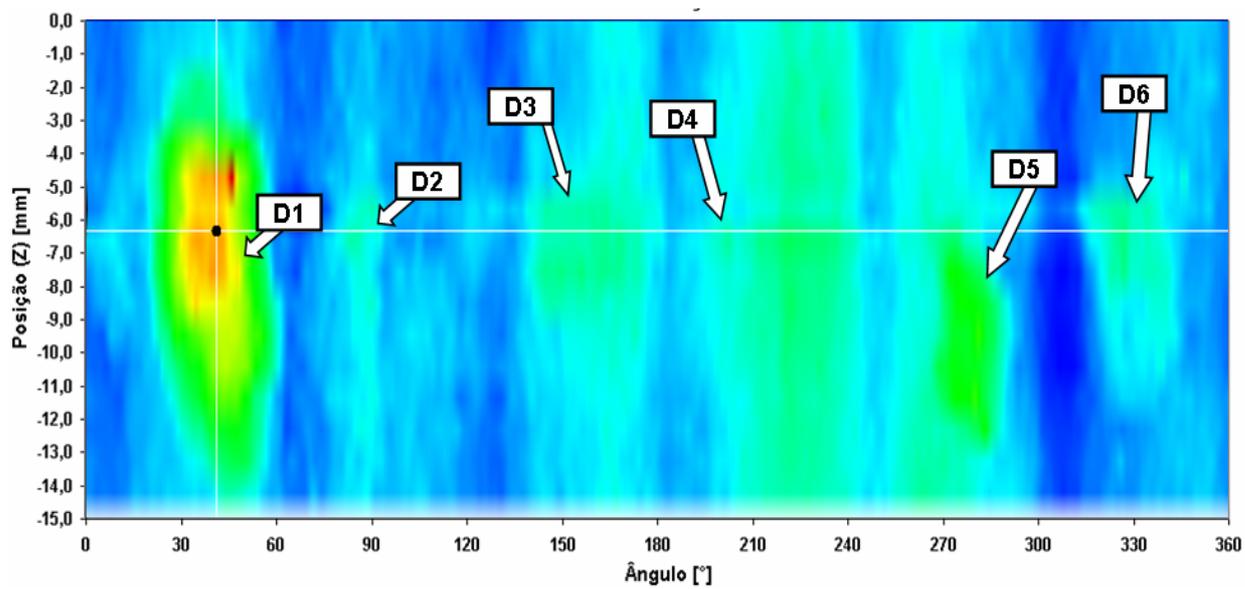


Figura 99 – Visão planifica da medição 3D do duto (escala de cores na figura 98).

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve o objetivo de desenvolver e avaliar um sistema de triangulação laser com espelhos cônicos, capaz de realizar a medição panorâmica (360°) da superfície interna de dutos de 6”.

A partir da comparação dos resultados obtidos com sistemas de inspeção de dutos descritos no trabalho, verifica-se que o desempenho do protótipo desenvolvido é compatível com a aplicação almejada.

7.1 PRINCÍPIO/TECNOLOGIA

O princípio utilizado mostrou-se capaz de atingir incertezas da ordem de décimos de milímetro (0,2 a 0,4 mm). No entanto, ainda existem problemas encontrados no estado atual do protótipo que limitam seu desempenho, especialmente os decorrentes das linhas “fantasmas” e do astigmatismo.

É importante notar que com pequenas mudanças nos parâmetros do *hardware*, o mesmo princípio pode ser utilizado para medições de regiões cilíndricas de outros diâmetros, o que aumenta muito sua gama de aplicações.

7.2 PROTÓTIPO

A partir da análise dos experimentos de validação do sistema, pode-se verificar que o mesmo mostrou-se capaz de realizar a função de detecção de amassamentos e defeitos por corrosão da ordem de meio milímetro.

A faixa de medição compreende raios de 66 a 87 mm. A incerteza expandida, obtida com nível de confiabilidade de 95% para a medição do raio, foi estimada como $\pm 0,35$ mm (5,0% da espessura e 1,8% da faixa de medição) para a região da faixa de medição afetada pelas linhas “fantasmas” e, com variações suaves do raio

(foco tangencial predominante). Todavia, a outra parcela da faixa de medição, que não contém as linhas fantasmas, apresentou uma incerteza de $\pm 0,15$ mm (2,2% da espessura e 0,8% da faixa de medição). Ou seja, somente eliminando o problema com linhas fantasma a incerteza geral do sistema cai mais de 50%.

Como pior caso possível, nota-se que regiões com grandes mudanças angulares (foco sagital), o efeito do astigmatismo e do deslocamento angular se tornam predominantes. Como consequência, o erro de medição aumenta, podendo chegar a mais de 1 mm em alguns pontos. No entanto, deve-se notar que a parcela causada por deslocamentos angulares apenas desloca o mensurando angularmente, ou seja, o resultado de medição radial não é afetado. Isso não impediria a detecção de um suposto defeito no duto, pois o mesmo seria apenas deslocado angularmente. Sendo assim, o astigmatismo é a maior fonte de incertezas da medição de regiões com necessidade de focos sagitais.

Para a redução da incerteza de medição, primeiramente deve-se focar no astigmatismo, tendo como umas das soluções: o uso de lentes específicas; re-projeto da parte óptica do sistema; uso de um espelho cônico com um ângulo menor ou, substituição do espelho por uma lente cônica.

Para correção do erro de deslocamento angular, pode-se calibrar o sistema angularmente corrigindo o desalinhamento e distorções do sistema de visão.

Conforme constatado durante o trabalho, como as pequenas estrias na ponta do espelho são a causa das linhas “fantasmas”, é necessário realizar a substituição do espelho cônico da câmera por outro de melhor qualidade.

Após a redução dessas fontes de incerteza dominantes, deve-se focar na redução do efeito *speckle*, onde se espera que com a correção do astigmatismo seja possível utilizar uma maior abertura do diafragma. Como consequência disso, o efeito *speckle* deve diminuir consideravelmente. Pode-se também melhorar o sistema de projeção do laser, obtendo uma linha de menor espessura e constante. Como última opção, verificar a viabilidade da projeção do plano de luz com luz branca ao invés de laser. Com estas melhorias acredita-se ser possível atingir incertezas da ordem de 0,1 mm em toda a faixa de medição.

O tempo total de processamento de uma medição foi de aproximadamente cinco segundos. Todavia, considerando que o processamento das imagens é feito

após o sistema adquirir todas as imagens no percurso a ser medido, a velocidade de processamento não restringe a velocidade com que o sistema teria que percorrer um duto. Sendo assim, sua velocidade no interior do duto é limitada apenas pelo tempo de aquisição e armazenamento de cada imagem, o qual ficou em torno de um segundo para o *hardware* utilizado. Deve-se lembrar que com a aquisição de uma câmera de alta velocidade, algoritmos otimizados e um melhor *hardware* de processamento, a velocidade de aquisição pode ser suficientemente reduzida para que o sistema faça a inspeção de dutos com velocidade de até 5 m/s com resolução de uma secção por milímetro.

Comparando o protótipo desenvolvido com o sensor do *pig* de inspeção de corrosão em gasodutos (Optopig), pode-se concluir que a triangulação cônica traz vantagens como aquisição de apenas uma imagem por secção medida (Optopig precisa de oito) e simplicidade. No entanto é importante lembrar que ainda são necessárias outras etapas de desenvolvimento, para possibilitar testes simulando uma corrida real de um *pig* equipado com o sensor.

Em síntese, é possível concluir que o sistema desenvolvido tem um excelente potencial para utilização como elemento central de um *pig* de perfilagem óptico. Além de viabilizar a medição com elevada resolução e velocidade, é um sistema robusto, por não envolver partes móveis, e com grande potencial de compactação. Acredita-se ser possível desenvolver sistemas para operar em dutos com dimensões a partir de 50 mm (2") de diâmetro, bem como ser possível a operação em dutos de grandes dimensões (acima de 50").

7.3 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Existem ainda diversos estudos e trabalhos a serem desenvolvidos até que se possa realmente ter um produto pronto para o uso em gasodutos. Além disso, o protótipo desenvolvido e toda sua descrição e análise podem ser usados para diversas outras aplicações.

A seguir são listadas e descritas sugestões de trabalhos futuros:

- Indexação da posição e visualização 3D;

- Técnicas de fusão de dados para a integrações de anéis medidos gerando uma representação 3D do duto;
- Desenvolvimento de *software* para que com o uso de técnicas de realidade virtual, por exemplo usando óculos 3D, se possa analisar melhor o resultado de medição. Isso Possibilita, por exemplo, avaliar melhor secções críticas obtidas na inspeção de um duto;
- União do protótipo com um sistema de indexação da posição com o uso de *encoders* para permitir a sincronização da imagem capturada com o deslocamento do sistema.
- Aumento da velocidade de medição e autonomia;
 - Desenvolver *software* otimizado para capturar e salvar rapidamente as imagens obtidas;
 - Tornar o sistema autônomo (armazenamento de imagens e fonte de alimentação interna);
- Desenvolvimento de *Software* para Análise dos Dados de Medição
 - *Software* que encontre no banco de dados de imagens as regiões com defeitos. Uma vez que essa tarefa é inviável para uma pessoa fazer, pois são milhares de imagens por quilômetro de duto percorrido.
- Desenvolvimento do corpo completo do *pig* para inspeção de gasodutos.

REFERÊNCIAS

- [1] NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD (EUA). **Pipeline Accident Report: Natural Gas Pipeline Rupture and Fire Near Carlsbad, New Mexico.** Washington, 2000. 66 p. Disponível em:
<<http://www.nts.gov/publictn/2003/PAR0301.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2006.
- [2] PIPELINE AND HAZARDOUS MATERIALS SAFETY ADMINISTRATION (EUA). **Pipeline Statistics:** Contains average and summary statistics (1986-2006) for Natural Gas and Liquid Pipelines as well as annual statistics for 1990-2006. Washington, 2006. Disponível em:
<<http://www.phmsa.dot.gov/reference/statistics.html>>. Acesso em: 10 fev. 2006.
- [3] REBER, K. Beller, M. Willems, H. et al. **A new generation of ultrasonic in-line inspection tools for detecting, sizing and locating metal loss and cracks in transmission pipelines.** In: ULTRASONICS SYMPOSIUM, 1996. Proceedings, Piscataway: IEEE, 2002. v. 1, p. 665-671.
- [4] NGKS INTERNATIONAL CORP. (Canadá). **Magnetic Flux Leakage Inspection Tool (MFL).** Markham, 2005. Disponível em:
<<http://www.ngksint.com/services/mfl/mfl.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2006.
- [5] DET NORSKE VERITAS (Noruega). **Optopig Verification Test:** Independent Comparison of Optopig Inspection Findings Versus Actual Fabricated Faults. Høvik, 2003. 24 p.
- [6] GENERAL ELETRIC (Itália). **MagneScan Triax provides greater insight into pipeline defects.** Florença, 2006. Disponível em:
<http://www.geoilandgas.com/businesses/ge_oilandgas/en/prod_serv/serv/pipeline/en/downloads/mfl_3.0_fs_us.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2006.
- [7] TEITSMA, Albert et al. **Technology Assessment for Delivery Reliability for Natural Gas - Inspection Technologies:** RFEC. National Energy Technology Laboratory. Margatown. 12 nov 2004. Disponível em:

<http://www.netl.doe.gov/scngo/NaturalGas/TD&S/Status_Assessments/42266-041201Technology%20Assesment%20Reliability.pdf>. Acesso em: 8 dez 2005.

[8] FURUKAWA, Celso Massatoshi; ADAMOWSKI, Julio Cezar; CAMERINI, Claudio S. **Pig de Inspeção**. Disponível em: <<http://www.poli.usp.br/Pig/index.html>>. Acesso em: 8 dez. 2005.

[9] CAMERINI, Claudio Soligo et al. **Novo Método para a Perfilagem da Corrosão Interna em Dutos**. In: CONTEC - CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 8., 2005, Salvador. **TT240**. Salvador: Anais, 2005. p. 1 - 10.

[10] NORSK ELEKTRO OPTIKK AS (Noruega). **Pipeline Inspection: Optopig**. Disponível em: <<http://www.optopig.com/research/pipeline>>. Acesso em: 8 dez. 2005.

[11] PIPECARE (Noruega). **Optopig Fact Sheet**. Haugesund, 2000. 2 p. Disponível em: <[http://www.pipecare.com/pipecare/svg03063.nsf/Attachments/Optopig+Fact+Sheet.pdf/\\$FILE/Optopig Fact Sheet.pdf](http://www.pipecare.com/pipecare/svg03063.nsf/Attachments/Optopig+Fact+Sheet.pdf/$FILE/Optopig%20Fact%20Sheet.pdf)>. Acesso em: 8 dez. 2006.

[12] CURLESS, Brian; LEVOY, Marc. **Better Optical Triangulation through Spacetime Analysis**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 5., 1995, Boston. Proceedings... Boston: IEEE, 1995. p. 987 - 994.

[13] KENNEDY, William P. **The Basics of Triangulation Sensors**. Disponível em: <<http://archives.sensorsmag.com/articles/0598/tri0598>>. Acesso em: 10 dez. 2006.

[14] NEROSKY, Luiz Augusto Rodrigues. **Medição de Formas Livres Através da Integração de um Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” em um Braço de Medição**. 2001. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, Florianópolis, 2001.

[15] ACOSTA, David; GARCÍA, Olmer; APONTE, Jorge. **Laser Triangulation for shape acquisition in a 3D Scanner Plus Scanner**. In: ELECTRONICS, ROBOTICS AND AUTOMOTIVE MECHANICS CONFERENCE, 2006. 2006, Cuernavaca. Proceedings... Cuernavaca: IEEE, 2006. v. 2, p. 14 - 19.

- [16] HECHT, Eugene. **Optics**. 3. ed. [S. L.]: Addison Wesley, 1997. 694 p.
- [17] ALBERTAZZI, Armando et al. **Detecção de Falhas de Adesão Entre Mantas Poliméricas e Dutos Usando Interferometria de Deslocamento Lateral**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO, 36., 2006, São Paulo. Proceedings... São Paulo: Conaend, 2006. p. 1 - 15.
- [18] QUEST TRUE TEC (EUA). **Laser/Video Scan**. Disponível em: <<http://www.questtrutech.com/Default.aspx?tabid=62>>. Acesso em: 15 dez. 2006.
- [19] OPTICAL METROLOGY CENTRE (Inglaterra). **OMC Project Description: Sewer Profiling**. Disponível em: <http://www.optical-metrology-centre.com/Downloads/Projects/Project_Description-Sewer_Profiling.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2006.
- [20] OPTICAL METROLOGY CENTRE (Inglaterra). **OMC Laser Profiler 15/50**. Disponível em: <http://www.optical-metrology-centre.com/Downloads/Products/OMC_Product_Guide_Profiler.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2006.
- [21] OPTICAL METROLOGY CENTRE (Inglaterra). **OMC introduces a family of sensors for its profiling system**. Disponível em: <http://www.optical-metrology-centre.com/Downloads/News/OMC_Family_of_Sensors.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2006.
- [22] KIRKHAM, Robin et al. **PIRAT: A System for Quantitative Sewer Pipe Assessment**. In: THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBOTICS RESEARCH, 11., 2000, Australia. The International Journal of Robotics Research. [S. L.]: Sage, 2000. v. 19, n. 11, p. 1033 - 1053. Disponível em: <<http://ijr.sagepub.com/cgi/reprint/19/11/1033.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2006.
- [23] KIRKHAM, Robin. **PIRAT: Sewer Inspection System**. Disponível em: <<http://vision.cmit.csiro.au/project/pirat/>>. Acesso em: 22 dez. 2006.

- [24] HOFMANN, Allan Charles Henri. **Sistema Endoscópico Estereoscópico para Medição Geométrica de Uniões Soldadas de Dutos**. 2006. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, Florianópolis, 2006.
- [25] **Sténopé**: The Representation of Space. Disponível em: <<http://myweb.tiscali.co.uk/artofanamorphosis/stenope.html>>. Acesso em: 19 jan. 2007.
- [26] PRESS, W. et. al. **Numerical Recipes in C**. Cambridge University Press, 1992.
- [27] PONT, Alex Dal. **Desenvolvimento de um Interferômetro de Luz Incoerente para Medição de Formas de Cilindros**. 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, Florianópolis, 2001.