

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL**

**PERFILÔMETRO ÓPTICO EXTERNO PARA DUTOS EXPOSTOS À
CORROSÃO**

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

MARYAH ELISA MORASTONI HAERTEL

Florianópolis, 28 de setembro de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL

PERFILÔMETRO ÓPTICO EXTERNO PARA DUTOS

EXPOSTOS À CORROSÃO

Maryah Elisa Morastoni Haertel

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
“MESTRE EM METROLOGIA”
sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior
Dr. Eng., Orientador

Prof. Analucia Vieira Fantin Pezzotta
Dra. Eng., Co-orientadora

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior,
Dr. Eng., Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer
Dr. Ing. - Presidente

Prof. Celso Luiz Nickel Veiga
Dr. Eng.

Prof. Christian Kohler
Dr. Ing.

*Dedico este trabalho à minha mãe, Lúcia,
por estar sempre ao meu lado.*

Agradecimentos a:

Prof. Armando Albertazzi, pela orientação e principalmente pela paciência.

Co-orientadora Analucia Pezzotta, pelas dicas e pelo apoio.

Pedro Bruschinelli, por sua grande ajuda durante o projeto.

Tiago Costa Pinto, pelos valiosos conselhos.

*Fabício Broering, Murilo Rodrigues de Castro, César Augusto de
Carvalho e Ana Maria Bori, pelo empenho e prontidão.*

Rosana Vieira, pelo companheirismo.

Sergio Genilson Pflieger, pelo carinho.

*A todos do LABMETRO e Fundação CERTI que de uma forma ou de outra
contribuíram para a execução deste trabalho.*

CENPES, pelo apoio ao projeto e financiamento.

*Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis e a
Financiadora de Estudos FINEP pelo auxílio recebido através do Programa de
Formação de Recursos Humanos PRH-34 ANP/MCT.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	II
LISTA DE TABELAS.....	IV
LISTA DE ABREVIATURAS.....	V
RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
CAPÍTULO I INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Objetivos do trabalho.....	9
1.2 Estrutura do trabalho.....	9
CAPÍTULO II SISTEMAS DE MEDIÇÃO PARA INSPEÇÃO EXTERNA DE DUTOS.....	10
2.1 Inspeção externa de dutos.....	11
2.2 Sistemas e Técnicas de Medição aplicadas à inspeção externa de corrosão em dutos.....	12
2.3 Características desejáveis para um novo sistema de inspeção externa de dutos.....	18
CAPÍTULO III SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO.....	19
3.1 Princípio de medição.....	20
3.2 Requisitos técnicos e metrológicos do sistema.....	33
3.3 Aspectos construtivos do hardware.....	33
3.4 Aspectos construtivos do software.....	40
CAPÍTULO IV CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO.....	43
4.1 Caracterização do sistema.....	44
4.2 Ensaios com padrões e peças de geometria conhecida.....	50
4.3 Avaliações do desempenho do sistema.....	56
CAPÍTULO V CONCLUSÕES.....	60
5.1 Recomendações para os próximos trabalhos.....	62
REFERÊNCIAS.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Inspeção de duto com transdutor " <i>phased array</i> " [36].	13
Figura 2 (a) À esquerda, inspeção com transdutor TOFD [36] (b) À direita, sistema de inspeção de dutos baseado em LRUT [36].	13
Figura 3 (a) À esquerda, um esquema de funcionamento do transdutor ECT [36] (b) À direita, um transdutor em funcionamento [36].	14
Figura 4 Utilização de sistema a laser guiado por braço mecânico [38].	15
Figura 5 (a) À esquerda, posicionamento do duto em relação ao sistema para detecção de corrosão [30] (b) À direita, procedimento de inspeção com aparelho de raios-X portátil YXLON internacional [39].	16
Figura 6 (a) À esquerda, esquema do sistema de medição (b) À direita, o sistema realizando uma inspeção [40].	17
Figura 7 (a) Sistema Corrosion Mapping Kit [41].	17
Figura 8 Representação de uma parte central, área assinalada com um retângulo na imagem, numa matriz em níveis de cinza.	20
Figura 9 Esquema da técnica de topogrametria – o princípio de medição utilizado.	21
Figura 10 Padrão de projeção senoidal e o gráfico da intensidade dos níveis de cinza dos pixels de uma linha paralela ao eixo y da imagem.	22
Figura 11 Mapa de fase relativo e o gráfico da intensidade dos níveis de cinza dos pixels de uma linha do eixo y da imagem.	24
Figura 12 (a) e (b) Perfil de dois mapas de fase levemente diferentes. (c) Múltiplo adicionado conforme a subtração de (a) e (b). (d) Perfil da fase absoluta final	26
Figura 13 À esquerda, imagem do mapa de fase absoluto e à direita o gráfico da intensidade dos níveis de cinza dos pixels de uma linha paralela ao eixo y da imagem.	26
Figura 14 Modelo pinhole de câmara.	27
Figura 15 Semelhança entre triângulos na formação da imagem	28
Figura 16 Linha epipolar e solução por pontos homólogos com duas câmeras	28
Figura 17 O correto valor de $z(r,\theta)$ será determinado quando o mesmo valor de fase for encontrado nas duas imagens. [19]	29
Figura 18 Imagens de seis dos sete diferentes posicionamentos do padrão bidimensional utilizados para calibração.	30
Figura 19 Sistema de coordenadas global definido pelo posicionamento do padrão de calibração.	31
Figura 20 Visão geral do protótipo desenvolvido.	34
Figura 21 Duas vistas do sistema de iluminação estruturada	36
Figura 22 Perfil real da projeção de franjas do sistema de iluminação estruturada	36
Figura 23 (a) Vista superior do esquema óptico do protótipo, utilizando as câmeras firewire; (b) Vista lateral do esquema óptico.	37
Figura 24 Duas vistas da estrutura do protótipo	38
Figura 25 Alternativas para a estrutura do protótipo	38

Figura 26 Visão do projeto mecânico final do protótipo.....	39
Figura 27 Fotografia do protótipo desenvolvido.....	39
Figura 28 Esquema das etapas executadas pelo software do protótipo.....	40
Figura 29 Interface do software desenvolvido para medição.....	41
Figura 30 Interface do software de visualização dos resultados.....	42
Figura 31 Representação no nível de cinza medido no pixel em cada imagem adquirida na câmera Firewire.....	45
Figura 32 Representação no nível de cinza medido no pixel em cada imagem adquirida na câmera USB.....	45
Figura 33 Representação dos valores medidos versus valores de referência para a câmera Firewire....	46
Figura 34 Representação dos valores medidos versus valores de referência para a câmera USB.....	46
Figura 35 (a) À esquerda parte da imagem adquirida pela câmera Firewire. (b) À direita parte da imagem adquirida pela câmera USB.....	47
Figura 36 Mapas de fase com diferença de 0,5 comprimento de franja entre eles.....	48
Figura 37 Mapas de fase com salto removido (a) à esquerda sem correção (b) à direita com correção.....	49
Figura 38 Imagens resultantes do processamento das imagens de apenas uma câmera durante a medição de um plano: (a) acima à esquerda, mapa de fase relativa; (b) acima a direita subtração de dois mapas de fase relativa gerando o mapa de fase de referência; (c) abaixo a esquerda, mapa de modulação; (d) abaixo a direita, mapa de fase absoluta.....	49
Figura 39 Perfil de dois mapas de fase relativos (a) à esquerda, filtrado e (b) à direita, sem filtro.....	50
Figura 40 Medição do padrão de referência plano no protótipo e na máquina de medir por coordenadas.....	51
Figura 41 Visão bidimensional do plano medido pelo protótipo.....	51
Figura 42 Padrão de referência anelado.....	52
Figura 43 Medição do padrão de referência anelado nos dois sistemas de medição: (a) à esquerda no protótipo, e (b) à direita na máquina de medir por coordenadas.....	52
Figura 44 Visualização tridimensional da medição do padrão anelado.....	53
Figura 45 Perfil do padrão anelado mensurado pelo protótipo e pela máquina de medir por coordenadas.....	53
Figura 46 Visão bidimensional e perfil da medição do tubo com amassamento.....	54
Figura 47 Visão bidimensional e perfil da medição do tubo sem amassamento.....	55
Figura 48 Visualização tridimensional da medição do cilindro com amassamento.....	55
Figura 49 Diagrama de <i>Ishikawa</i> para o processo de medição, pela sua complexidade, o sistema de medição será representado em outra figura.....	56
Figura 50 Diagrama de <i>Ishikawa</i> para o sistema de medição.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Quantidade e extensão de dutos em operação, por função, segundo produtos movimentados, em 31/12/2007 [22].....	8
Tabela 2 Comparação entre os sistemas de inspeção externa de dutos	18
Tabela 3 Comparação entre fontes luminosas para o sistema de iluminação estruturada	35

LISTA DE ABREVIATURAS

ANP – Agência Nacional do Pétroleo, Gás Natural e Biocombustíveis

API – American Petroleum Institute

ASME – American Society of Mechanical Engineers

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONCAWE – Conservation of Clean Air and Water in Europe

DNV – Det Norske Veritas

ECT – Eddy Current Testing

LRUT – Long Range Ultrasonic Technology

NACE – National Association of Corrosion Engineers

NDT - Non-destructive Testing

TOFD – Time of Flight Diffraction

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UKOPA – United Kingdom Onshore Pipeline Operator's Association

HAERTEL, Maryah Elisa Morastoni. **Perfilômetro Óptico Externo para Dutos Expostos à Corrosão**. Florianópolis, 2009. 79p. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Curso de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Universidade Federal de Santa Catarina.

RESUMO

A inspeção em dutos tem caráter fundamental na prevenção de acidentes na distribuição de combustíveis fósseis, visto que a malha dutoviária é considerada a melhor opção para o transporte de petróleo e derivados. A corrosão externa de dutos está entre as principais causas de acidentes com dutos no Brasil e no mundo, fazendo da inspeção externa um poderoso meio para a prevenção de danos ambientais, sociais e econômicos.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver e validar um sistema de medição portátil para a perfilometria externa de dutos. O protótipo foi desenvolvido para se adaptar em qualquer posição da superfície do duto, tendo a capacidade de mensurar uma área de até 300 x 400 mm² em cada posicionamento sobre a superfície. O princípio de medição utilizado é a fotogrametria ativa. Nesse tipo de medição sem contato são utilizadas duas câmeras e um sistema de iluminação estruturada. Como resultado da medição obtém-se a reconstrução tridimensional da área mensurada. A geometria dos defeitos contidos no duto é evidenciada por um software desenvolvido em conjunto com o sistema e apresentada em mapas de cores enfatizando os defeitos e perfis das regiões de maior interesse.

Embora ainda em fase de protótipo de avaliação, idealizado primeiramente para dutos com diâmetro maior que 300 mm, o sistema apresenta resultados promissores em testes realizados em laboratório e ótimas perspectivas para a sua ampla utilização em campo. Utilizando materiais de baixo custo e tecnologia brasileira, o sistema apresenta resultados rápidos e confiáveis que podem ser visualizados logo após a medição.

Palavras-chave: inspeção, corrosão, dutos, perfilometria.

ABSTRACT

Pipeline networks are considered the best option for transporting oil and other fossil fuels products. Regular inspection of pipelines is a need to prevent accidents in pipeline networks. The main cause of pipeline accidents is the external corrosion of pipes, not only in Brazil, but also worldwide. Therefore, external inspection of pipeline surfaces is an effective way to prevent environmental, social and economic damages.

This work is concerned with the development and evaluation of a portable optical measurement system designed to measure the external shape of pipes. The prototype was developed to be adjustable in any position on the pipe surface and to have the capability to measure a maximum area of 300 x 400 mm² from each system position. Active photogrammetry was chosen as the measuring principle, where two cameras and a particularly developed structured illumination projector are used. The measurement result is a tridimensional cloud of points of the measured surface. The pipe's geometrical defects are clearly represented by the software combining an amplified scale and a color scale to emphasize the defect regions.

At the end of this work a preliminary evaluation prototype was built and tested. It was designed for pipelines with diameters greater than 300 mm. The evaluation of the system shows promising results in laboratory and a good chance to be used on field applications. Using low cost materials and innovative elements, the system provides rapid and reliable results that can be visualized in a short time just after the measurement.

Key-words: inspection, corrosion, pipeline, profilometry.

Introdução

Um dos setores de maior crescimento no Brasil é o petrolífero. A existência de petróleo no território brasileiro já era conhecida durante o regime imperial. Porém até o século XX, nenhum poço havia sido perfurado com sucesso. Somente no governo de Getúlio Vargas foram tomadas as primeiras providências na exploração e uso de combustíveis fósseis. Desde então, o interesse no uso e exploração do petróleo brasileiro levou o país a ser um dos maiores produtores de petróleo e investidor em novas tecnologias de extração, transporte e refino [35].

Mesmo assim, o transporte de todo esse recurso ainda possui pouco desenvolvimento se comparado com países europeus. Em 2007, por exemplo, a malha dutoviária nacional era oficialmente composta por 526 dutos, somando 16000 km de extensão para a movimentação de petróleo, gás natural entre outros [22], como pode ser observado na tabela 1. Embora pareçam ser números expressivos, ainda são pequenos se comparados a países como a Argentina, com 28000 km; e Estados Unidos, com 440000 km em 2006 [43].

Tabela 1 Quantidade e extensão de dutos em operação, por função, segundo produtos movimentados, em 31/12/2007 [22].

Produtos movimentados	Dutos em operação		
	Função	Quantidade	Extensão (km)
Total		526	15.951
Derivados	Transferência	275	990
	Transporte	97	4.809
Gás natural	Transferência	59	2.233
	Transporte	28	5.861
Petróleo	Transferência	30	1.983
Outros ¹	Transferência	32	36
	Transporte	5	40

Fontes: ANP/SCM, conforme a Portaria ANP nº 170/1998.

¹ Inclui dutos para movimentação de álcool anidro, álcool hidratado, aguarrás e metanol, etano e propano de insumo para petroquímica, gasolina de pirólise e propileno de insumo para indústria petroquímica.

Para manter intacta toda essa estrutura de dutos são necessárias inspeções periódicas. Amassamentos e mossas podem ser notados em inspeções visuais, porém a avaliação de áreas

corroídas pode requerer inspeções mais detalhadas. Motivado por essa demanda, foi desenvolvido este trabalho de mestrado.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral desse trabalho de mestrado é projetar, construir e validar um sistema de inspeção para superfície externa de dutos. A inspeção de dutos é uma atividade vital para o transporte de combustíveis e é cercada por vários tipos de defeitos que podem aparecer por diversos motivos. Amassamentos, rompimentos e corrosão são alguns dos diversos defeitos.

O foco deste trabalho está na inspeção de corrosão, por ser uma falha de pequeno porte e, portanto, mais difícil de ser detectada visualmente. Porém, se esse tipo de defeito não for analisado e reparado, pode levar ao rompimento do duto.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos:

No Capítulo II, **Sistemas de medição para inspeção externa de dutos**, é fornecida uma visão geral sobre a importância da malha dutoviária, assim como os cuidados para mantê-la funcionando. Os principais sistemas para inspeção externa de corrosão em dutos são apresentados, e são discutidas as características desejáveis para um novo sistema.

No Capítulo III, **Sistema de medição proposto**, é descrito em detalhes o sistema de medição proposto. São apresentados o seu princípio de medição, requisitos operacionais e metrológicos, assim como seu projeto mecânico e software.

No Capítulo IV, **Caracterização do Sistema**, são apresentados os ensaios realizados na construção do protótipo, assim como experimentos para validar seus resultados.

No Capítulo V, **Conclusões**, são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho. Recomendações para os próximos trabalhos também são comentadas.

CAPÍTULO II

Sistemas de Medição para Inspeção Externa de Dutos

A geração de energia é uma das principais demandas atuais das sociedades. Embora uma corrida esteja em curso na busca por formas limpas e renováveis de obter energia, ainda há uma forte dependência da quantidade limitada de combustíveis fósseis existente. O transporte e armazenamento dos combustíveis fósseis em condições adequadas ajudam na continuidade da utilização dessas substâncias com maior eficiência, além de prevenir acidentes e os severos problemas ambientais e sociais gerados com o vazamento dos mesmos.

Nos últimos anos tem-se investido muito em prevenção. A inspeção de cada parte envolvida no processo é de extrema importância nesse contexto. Navios e dutos corroídos podem ser causas de graves problemas ambientais, sem contar a perda de produção para as empresas, produtora e a consumidora final. Em novembro de 2008, viu-se o abastecimento de gás natural em Santa Catarina parar devido ao rompimento de um gasoduto no norte do estado, o que gerou interrupção na produção de empresas de cerâmica no sul do estado por falta do combustível para operar [19]. O rompimento ocorreu pela movimentação do solo ao seu redor, situação que também poderia ter sido evitada caso houvesse a correta inspeção local.

Em janeiro de 2000, formaram-se extensas manchas de óleo nas águas da Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro (RJ), em decorrência de vazamento de 1.300 m³. O problema foi provocado pela corrosão de oleoduto PE II procedente da Refinaria Duque de Caxias (RJ) [25].

Pela portaria 104-00 [21], devem ser inspecionados “construções civis, tanques, vasos, equipamentos, dutos, e acessórios necessários à operação de base de distribuição, de armazenamento e terminal”. Dessa forma evitam-se acidentes com conseqüências econômicas, ambientais e sociais.

A inspeção externa de dutos é um dos meios existentes de avaliação da integridade de dutos. Existem ferramentas capazes de mensurar variados defeitos geométricos, como trincas e amassamentos. Os sistemas baseados em ultra-som ou corrente de Eddy são os mais utilizados. Há sistemas baseados em ondas eletromagnéticas, como laser e EWM-CTM, com

crescente demanda de utilização nos últimos anos. A radiografia industrial evoluiu muito e pode ser utilizada na inspeção de dutos. Há também sistemas híbridos, que utilizam características de mais de um dos sistemas citados acima. Características como a incerteza e resolução de medição, entre outras, devem ser levadas em conta para escolher a ferramenta que melhor se adapta para a inspeção.

2.1 INSPEÇÃO EXTERNA DE DUTOS

O transporte de combustíveis fósseis através de dutos é considerado a forma mais rápida e barata de distribuição. É utilizada em todas as etapas de produção, desde a extração até a chegada ao consumidor final.

Dentre as possíveis causas de vazamentos de combustíveis fósseis em dutos, as que menos diminuíram nos últimos 50 anos no Reino Unido foram: (1) a corrosão externa, (2) a interferência de terceiros e (3) defeitos na solda, sendo essas as principais causas de acidentes na última década [23][24][25].

A corrosão externa pode ser causada por agentes químicos ou orgânicos, como por exemplo, o contato com argila, cascalho e areia do local onde o duto foi instalado. A interferência de terceiros abrange todo tipo de contato externo com o duto, como moedas e amassamentos causados por escavações inapropriadas ou pela ação de rochas presentes no terreno. Já os defeitos de soldagem deixam as conexões entre dutos mais passíveis de rompimento.

Para garantir a segurança do duto, inspeções periódicas se fazem necessárias, a procura de sinais de defeitos e corrosão. Após uma verificação preliminar (visual) é necessária a utilização de equipamentos que avaliem de melhor forma os parâmetros dimensionais e geométricos do defeito encontrado.

A inspeção em dutos é dividida em alguns grupos como corrosão, geometria, vazamento, trinca e revestimentos. Para cada tipo existem técnicas adequadas.

Existem várias normas para a inspeção de dutos. Dentre elas, são frequentemente utilizadas na qualificação de dutos corroídos:

- ASME B31.G – Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines;
- NACE RP0502 – Standard recommended practice pipeline external corrosion direct assessment methodology;

- DNV RPF101 – Corroded pipelines;
- API 1160 – Managing system integrity for hazardous liquid pipelines;

Além de várias recomendações sobre inspeção de associações ligadas à indústria de petróleo e gás, como o CONCAWE e a UKOPA [23][24].

Em geral, o procedimento adotado na inspeção é padronizado e envolve algumas etapas importantes. A estrutura que envolve o transporte de dutos, como válvulas, escadas, luminárias, entre outros, também fazem parte do procedimento. Inicialmente, é realizada inspeção visual das faixas de dutos e seus componentes. Recomenda-se um intervalo de tempo máximo entre duas inspeções consecutivas de dois anos. Caso a inspeção visual evidencie a perda de espessura na parede, então se deve medir a espessura da parede remanescente. Perdas de espessura de até 10% do valor nominal não são reparadas. É aconselhável manter um histórico das medições realizadas para avaliar defeitos ativos, isto é, que continuam a crescer numa taxa constante.

2.2 SISTEMAS E TÉCNICAS DE MEDIÇÃO APLICADAS À INSPEÇÃO EXTERNA DE CORROSÃO EM DUTOS

Para avaliar superfícies com defeitos de corrosão, atualmente são utilizados vários tipos de sistemas de medição. Abaixo se encontram os mais comumente utilizados.

2.2.1 Sistemas baseados em ultra-som

Transdutores *phased array* de ultra-som são utilizados juntamente com a visualização *B-Scan* para mapear defeitos, inclusive decorrentes da corrosão. Neste tipo de transdutor, os vários cristais piezoelétricos são excitados individualmente, inspecionando uma grande variedade de ângulos da superfície [26].

A superfície inspecionada é mapeada a cada 1 mm, produzindo um perfil do defeito. É necessária uma demarcação visual preliminar para que a área de medição contenha parte da superfície sadia, de modo a quantificar a perda de material e a profundidade do defeito. Em geral, possuem incerteza maior que a necessária para medição de todos os tipos de corrosão (cerca de $\pm 0,4$ mm) e a sua área de medição em um posicionamento é correspondente ao tamanho do transdutor (dimensão média de 10 mm x 10 mm, como pode ser notado na figura 1). A autonomia dos sistemas é boa (cerca de 6 horas de utilização contínua), precisando

apenas que a superfície esteja livre de resíduos (como terra, por exemplo). Indicado para perdas maiores que 5% da parede do duto.



Figura 1 Inspeção de duto com transdutor "phased array" [36].

Transdutores TOFD (Time of Flight Diffraction) geralmente são utilizados para a inspeção de trincas. Neste caso, um dos transdutores gera o sinal ultra-sônico e o outro funciona como receptor das ondas refletidas no material [26]. Também são utilizados para encontrar corrosão nos cordões de solda nos dutos [27].



Figura 2 (a) À esquerda, inspeção com transdutor TOFD [36] (b) À direita, sistema de inspeção de dutos baseado em LRUT [36].

Transdutores LRUT (*Long Range Ultrasonic Technology*) foram desenvolvidos para inspeção de superfícies externas. A aplicação típica é a inspeção de corrosão externa e perda de material em dutos. Neste sistema, cada transdutor envia o sinal ultra-sônico e o recebe novamente. O sistema é composto por vários transdutores isolados, divididos pelo tipo de onda que enviam (longitudinais e ondas de torção¹), abrangendo todos os sentidos da superfície do duto [28].

Em todos os casos a inspeção pode ser feita por posicionamento manual, ou automático, dependendo do equipamento utilizado.

¹ Do inglês *Torsional waves*

2.2.2 Sistemas baseados em corrente de Eddy (ECT)

Em materiais condutores, o ECT apresenta-se como alternativa de inspeção, pois utiliza como princípio a indução eletromagnética. O transdutor é percorrido por uma corrente alternada que gera um campo magnético ao seu redor. Quando o transdutor é colocado perto de um material que conduz eletricidade, induz nele uma corrente parasita denominada corrente de Eddy². Imperfeições no material alteram a corrente de Eddy. Alterações na corrente de Eddy modificam o campo magnético e por consequência a corrente elétrica captada pelo transdutor, conforme a Figura 3a.

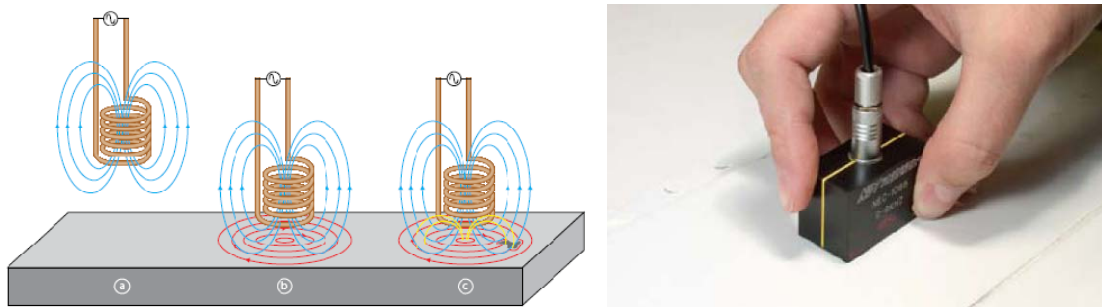


Figura 3 (a) À esquerda, um esquema de funcionamento do transdutor ECT [36] (b) À direita, um transdutor em funcionamento [36].

Há um compromisso entre a incerteza do sistema e quão profundo o transdutor pode medir. Em geral, quanto mais fina a espessura a ser medida, pior a incerteza, variando a partir de 4% do valor medido. Em geral a área a ser medida é pequena, relacionada ao tamanho do transdutor.

A inspeção realizada com esses transdutores possui algumas vantagens. Entre elas a sensibilidade a pequenos defeitos, defeitos na superfície ou perto dela, e a inspeção de formas de grande complexidade. Entre as limitações estão a utilização apenas em materiais condutores elétricos, a necessidade de mais treinamento e perícia ao conduzir a inspeção - mais que outras técnicas [29]. Além disso, há ainda a interferência do tipo de acabamento da superfície e da sua rugosidade na medição; e os defeitos paralelos à direção de medição do transdutor, como a laminação, que podem não ser detectados. O transdutor não precisa estar em contato direto com a superfície, porém deve estar próximo a ela, de forma que o meio que separa o transdutor e o material condutor não seja muito espesso.

² Do inglês *Eddy current*

2.2.3 Sistemas baseados em laser

A triangulação a laser é um método de inspeção bem conhecido, embora sua utilização como equipamento portátil seja recente. A principal diferença entre os aparelhos existentes consiste na forma em que o sistema se localiza. Existem sistemas presos a um braço mecânico, assim como aparelhos totalmente ópticos que se localizam por marcas reflexivas coladas na superfície.

Em geral, os sistemas baseados em laser possuem boa incerteza e resolução, porém exigem local adequado (se for utilizado com braço mecânico) ou preparação da superfície (se for com marcas reflexivas). A portabilidade do sistema com braço mecânico fica reduzida, assim como a sua robustez.



Figura 4 Utilização de sistema a laser guiado por braço mecânico [38].

2.2.4 Sistemas baseados em radiografia

A radiografia tem-se mostrado capaz de ser uma alternativa para a inspeção de corrosão externa de dutos. Recentemente, estudos com diferentes fontes de radiação demonstraram a capacidade do método em detectar e quantificar regiões defeituosas. É o único sistema em que não há necessidade de limpeza ou remoção de crostas da superfície do duto [30]. Em geral é indicada principalmente para a avaliação da espessura da parede. O sistema é limitado quanto à análise e repetitividade do processo, visto que a experiência do operador do sistema é o que define a qualidade da medição. Condições como o tempo de exposição, tamanho e espessura nominal do tubo variam o resultado de acordo com a situação. Além disso, numa mesma radiografia, diferentes operadores podem apontar limites do duto divergentes. Anomalias decorrentes do posicionamento do sistema também são comuns [30].

Há esforços para a elaboração de um procedimento padrão para a utilização da radiografia na inspeção de dutos. O método mais utilizado retira a radiografia convencionalmente e depois a digitaliza, embora haja equipamentos que já realizam a

radiografia digital, principalmente em aplicações na indústria do petróleo e gás. Estudos recentes convergem para a possibilidade da correta detecção da profundidade do defeito [31].

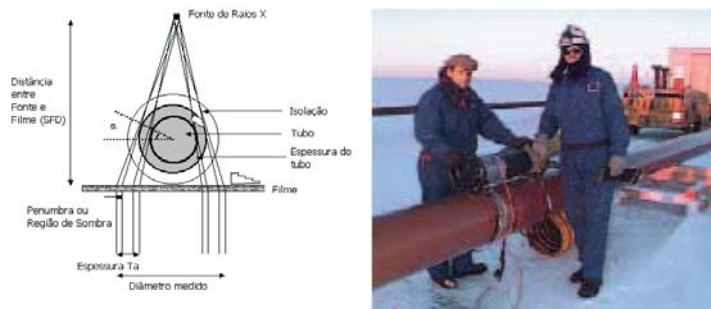


Figura 5 (a) À esquerda, posicionamento do duto em relação ao sistema para detecção de corrosão [30] (b) À direita, procedimento de inspeção com aparelho de raios-X portátil YXLON internacional [39].

Há esforços para a elaboração de um procedimento padrão para a utilização da radiografia na inspeção de dutos. O método mais utilizado retira a radiografia convencionalmente e depois a digitaliza, embora haja equipamentos que já realizam a radiografia digital, principalmente em aplicações na indústria do petróleo e gás. Estudos recentes convergem para a possibilidade da correta detecção da profundidade do defeito [31].

A incerteza do sistema depende muito de vários fatores da medição, sendo que a qualidade dos resultados é dependente da densidade óptica do filme, contraste e resolução utilizados [32]. Outra importante limitação é o risco na utilização de radiações ionizantes em áreas petrolíferas, onde o sistema de radiografia convencional necessita inclusive de uma área de isolamento. A área de penumbra da radiação limita a medição de alguns defeitos, embora hajam um consenso e esforços para que a largura máxima da região de penumbra seja mantida num valor máximo de 1/100 da espessura, pois essa região é característica típica em sistemas radiográficos, e suas dimensões são uma limitação desse sistema, influenciando fortemente na incerteza de medição [33]. É importante que a inspeção seja realizada no exato local da corrosão, existindo uma séria limitação quanto a geometrias ou diâmetros onde há corrosão externa, podendo não ser aplicável em alguns casos [31].

2.2.5 Sistemas baseados em EWM-C™

Semelhante aos transdutores baseados em ultra-sonografia, que utiliza ondas acústicas para a avaliação de defeitos, o EMW-C utiliza ondas eletromagnéticas. É muito utilizada em dutos onde outras tecnologias não podem ser aplicadas.

O sistema envia dois pulsos eletromagnéticos ao longo do segmento a ser analisado do duto, e interpreta as formas de onda recebidas [34]. As ondas percorrem o espaço entre dois

conectores. Nesse sistema é simples medir a corrosão externa abaixo de uma manta de isolamento, porém a inspeção da superfície externa não é simples, visto que são necessários dois acoplamentos do sensor em locais diferentes (figura 6). Ele utiliza o meio entre os sensores como um dielétrico, por isso o material desse meio deve ser conhecido



Figura 6 (a) À esquerda, esquema do sistema de medição (b) À direita, o sistema realizando uma inspeção [40].

2.2.6 Sistemas híbridos

Para obter um melhor desempenho, alguns sistemas combinaram dois princípios de medição, obtendo o melhor de cada um deles. Muitas vezes, é realizada a inspeção com dois sistemas, como laser e ultra-som, a fim de promover uma melhor visão do real estado do duto, medindo superfície e espessura.



Figura 7 (a) Sistema Corrosion Mapping Kit [41].

O “Corrosion Mapping Kit”, fabricado pela AGR Field Operations, combina uma câmera de vídeo ao equipamento de inspeção baseado em ultra-som (figura 7). Dessa forma, podem-se concatenar áreas vizinhas medidas pelo transdutor de ultra-som, com a colocação de marcas refletoras de infravermelho e a sua posterior captação pela câmera. Há um led infravermelho que ilumina toda a área de medição. Dessa forma, posteriormente há possibilidade de uma visão tridimensional da área mensurada, tipo *C – scan*.

2.2.7 Comparação entre os sistemas

Abaixo há uma tabela comparativa entre os sistemas apresentados neste capítulo. Para cada sistema de medição foi selecionado o melhor valor encontrado na literatura técnica para cada uma das características. A faixa de medição representa os diâmetros de dutos onde é possível utilizar o sistema de medição.

Tabela 2 Comparação entre os sistemas de inspeção externa de dutos

	Ultra-som	Corrente de Eddy	Laser	Radiografia	EMW-C™	Híbrido Corrosion Mapping Kit
Faixa de medição	5,08 mm – 111,76 mm (2” – 44”)	A partir de 7,62 mm (3”)	7,62 mm – 111,76 mm (3” – 44”)	A partir de 10,16 mm (4”) ^(a)	5,08 mm – 152,40 mm (2” – 60”)	7,62mm – 111.76 mm (3” – 44”)
Incerteza	± 0,4 mm	4% da espessura	± 0,1 mm	< 1 mm	> 1 mm ^(b)	± 0,4 mm
Resolução	1 mm	< 1 mm	0,025 mm	< 1 mm	> 1 mm ^(b)	1 mm
Resultados em 3D	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
Necessidade de limpeza	Média	Média	Alta	Pouca - Nenhuma	Pouca	Média
Características	Mede a espessura da parede do duto.	Detecta defeitos. Boa sensibilidade a pequenos defeitos e defeitos próximos a superfície ou nela.	Mede a geometria externa. Boa resolução e incertezas.	Localiza defeitos internos e externos. Não necessita limpeza local.	Mensura todo volume da parede do duto (360°) no comprimento onde sistema está apoiado.	Mede a espessura e a geometria externa. É mais indicado para inspeção de corrosão.
Limitação	Possui incerteza maior do que a necessária para mensurar alguns tipos de defeitos, como corrosão.	Utilização apenas em materiais condutores, medição de pequenas áreas de cada vez.	Necessidade de referencial para as medições.	Necessita da interpretação humana. Há dificuldade na inspeção de alguns diâmetros e geometrias.	Difícil inspeção da superfície externa sem manta de proteção, ou qualquer outro meio em volta do tubo.	Incerteza maior que a necessária para mensurar alguns defeitos, como corrosão. Medição mais demorada que as outras.

(a) Dependendo do material do duto. Nesse caso, o material é o aço carbono, com ou sem revestimento, no máximo 15 mm de espessura e até 200°C na superfície de contato [42].

(b) Valores estimados, devido a falta de informação técnica do sistema de medição.

2.3 CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS PARA UM NOVO SISTEMA DE INSPEÇÃO EXTERNA DE DUTOS

Nem todas as demandas da inspeção de dutos são hoje adequadamente atendidas pelos sistemas existentes. Há espaço para o desenvolvimento de novos sistemas de medição. O foco deste trabalho está no desenvolvimento de um novo sistema para medir a geometria externa de dutos, que será útil para a tomada de decisões acerca do trecho analisado.

Com base nas demandas da inspeção externa de dutos e nas características positivas e limitações dos sistemas disponíveis no mercado, é possível apontar as características desejáveis para um novo sistema de medição, que são apresentadas aqui de forma qualitativa:

- **Autonomia:** O sistema deve ser adequado para uso em campo, onde muitas vezes não há uma fonte de energia elétrica próxima.
- **Praticidade:** Deverá ser fácil de instalar e operar, compacto e deve ser capaz de medir a geometria de interesse em poucos minutos. Deve ser robusto e resistente a possíveis impactos decorrentes do seu uso em campo.
- **Incerteza e resolução:** Deve ser compatível com a medição de amassamentos e perdas de material por corrosão na superfície externa do duto de forma que permita uma correta avaliação da espessura remanescente da parede do duto. A resolução e incertezas devem ser adequadas, visto que as marcas de corrosão podem ter apenas poucos milímetros de extensão. Um grande número de pontos medidos se torna interessante, pois esclarece pequenos detalhes da superfície.
- **Tamanho reduzido:** O tamanho do sistema também é uma característica a ser levada em consideração tendo em conta o local onde se encontra o duto. Em alguns casos pode haver uma pequena distância entre o duto e um obstáculo físico não removível (como por exemplo, outro duto).
- **Cálculo de parâmetros:** No software de operação do sistema de medição, é interessante incluir parâmetros como largura, comprimento e espessura do defeito e volume de material removido ou acrescentado. O sistema deve ser capaz de medir grandes áreas concatenando medições parciais, a fim de formar uma só superfície a ser analisada. Os resultados das medições devem ser obtidos na mesma hora, permitindo uma tomada de decisão muito mais rápida.

Com base nas características descritas acima, propõe-se um novo sistema de medição, baseado na fotogrametria ativa, que será detalhado no próximo capítulo.

Sistema de Medição Proposto

3.1 PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

A reconstrução tridimensional de superfícies a partir de múltiplas imagens bidimensionais adquiridas por câmeras apresentou-se como uma formidável escolha para o princípio de medição aqui adotado, visto os ótimos resultados obtidos com essa técnica nos últimos anos [1], oferecendo incertezas compatíveis com os objetivos desse trabalho. O método apresenta como resultado uma densa “nuvem de pontos” extraída da superfície visualizada pelas câmeras, num certo sistema de coordenadas e resolução, definidos no sistema de medição. Outras características marcantes desta técnica são a rapidez da medição e o fato de não haver contato com o mensurando.

A utilização de imagens bidimensionais para retratar o espaço tridimensional já é utilizada de forma ampla no cotidiano. Mesmo assim, está em pleno desenvolvimento, visto as inúmeras aplicações tecnológicas da técnica, facilitando desde exames médicos até a diversão nos cinemas.

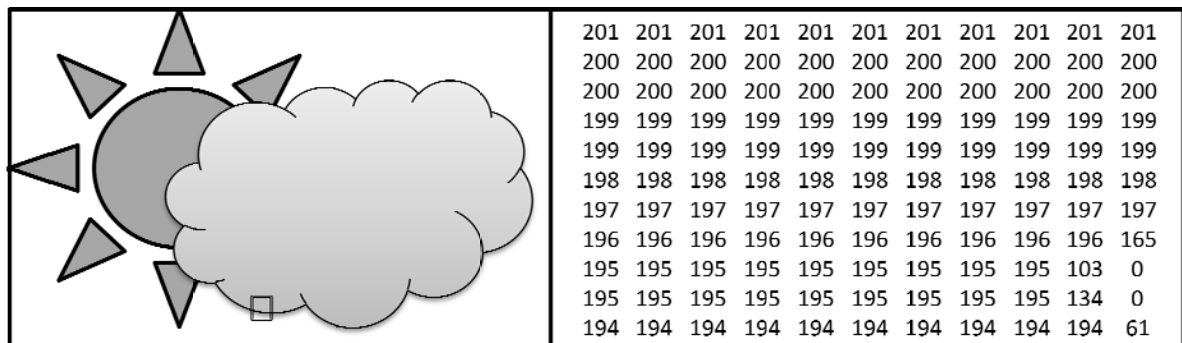


Figura 8 Representação de uma parte central, área assinalada com um retângulo na imagem, numa matriz em níveis de cinza.

A técnica utiliza o fato de que cada imagem capturada pelas câmeras pode ser convertida numa matriz bidimensional de intensidades luminosas, que mostra o quanto de iluminação atingiu cada pixel da câmera. Essa matriz numérica é uma expressão da cena retratada e uma forma fácil de lidar com as referências geométricas da imagem do objeto. Numa imagem em tons de cinza codificada em 8 bits, é possível haver 256 diferentes níveis de cinza nessa matriz, desde o preto representado pelo nível 0 ao branco representado pelo

255, embora o olho humano não consiga identificar diferenças entre todos os níveis, como fica claro na figura 8.

O processo de aquisição das imagens utilizado nesse trabalho emprega duas câmeras monocromáticas diferentes, posicionadas de forma a enxergar o mesmo volume no espaço de diferentes ângulos. Esta configuração permite a medição por triangulação [6] [14] [15]. Objetos de cores monótonas, sem nenhum detalhe ou com excesso de detalhes, reflexivos ou com oclusões, podem apresentar problemas no cálculo da triangulação entre as imagens.

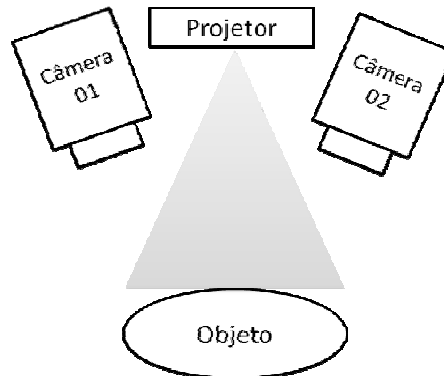


Figura 9 Esquema da técnica de topogrametria – o princípio de medição utilizado.

Para resolver problemas com objetos monótonos e melhorar a eficiência da medição vários métodos foram desenvolvidos. Estes estão basicamente divididos em métodos espaciais e temporais, onde ambos utilizam padrões estruturados projetados sobre o mensurando. Em essência, eles facilitam a determinação dos pontos homólogos nas múltiplas imagens, isto é, pontos em diferentes imagens que correspondem a um mesmo ponto no mensurando [2].

3.1.1 Projeção de franjas senoidais com deslocamento espacial para determinação de pontos homólogos

Um dos métodos mais utilizados para determinação de pontos homólogos é a projeção de franjas, sendo esse o método adotado neste trabalho e será explanado em detalhes. Nele, uma determinada sequência de imagens contendo padrões senoidais regulares é projetada sobre a peça a medir. Esse método utiliza a fase do sinal senoidal das franjas projetadas para localizar pontos homólogos nas imagens adquiridas pelas duas câmeras. Como a projeção das franjas é realizada sobre o mensurando e simultaneamente adquirida pelas duas câmeras, embora as imagens sejam distorcidas pela perspectiva, ambas observam a mesma região da peça medida, conforme pode ser observado na figura 9. Assim, os pontos homólogos das imagens adquiridas pelas duas câmeras terão fases idênticas.

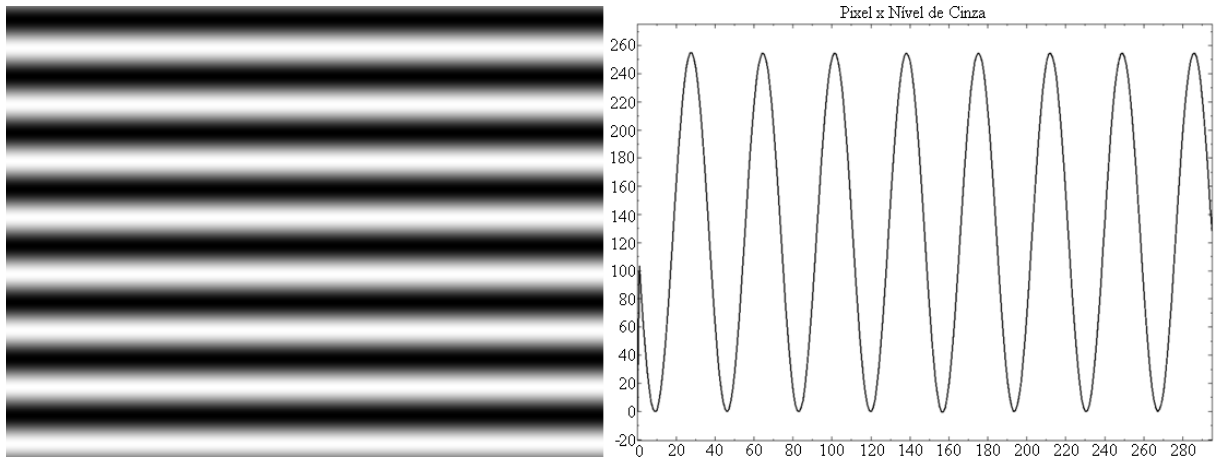


Figura 10 Padrão de projeção senoidal e o gráfico da intensidade dos níveis de cinza dos pixels de uma linha paralela ao eixo y da imagem.

A intensidade de luz recebida por um pixel num sensor de uma das câmeras que capta a imagem do mensurando sobre a qual são projetadas as franjas senoidais é:

$$(1) \quad I_i(x,y) = I_0(x,y) \{1 + M(x,y) \cos[\varphi(x,y) + \Delta_i]\}$$

Onde $I_i(x, y)$ é a intensidade captada no pixel localizado no ponto (x, y) do sensor na imagem i , $I_0(x, y)$ é a intensidade de fundo de luz captada, $M(x, y)$ é a modulação das franjas, Δ_i é uma constante de deslocamento de fase da imagem i , e $\varphi(x, y)$ é a fase das franjas relativa ao ponto (x, y) . Os parâmetros I_0 , M e $\varphi(x, y)$ geralmente são desconhecidos. Embora seja possível determiná-los a partir de uma única imagem, o resultado é melhor quando uma sequência de imagens é utilizada. Para fazê-lo, a quantidade Δ_i é modificada de incrementos conhecidos, produzindo deslocamentos de fase homogêneos nas franjas projetadas. Isto pode ser facilmente obtido de forma digital alterando-se de maneira uniforme a fase das franjas projetadas.

Pelo menos três imagens com deslocamentos de fase distintos são usualmente utilizadas para o cálculo da fase relativa φ de cada ponto (x,y) , visto que na equação (1) há três incógnitas: $I_0(x, y)$, $M(x, y)$ e $\varphi(x, y)$.

$$(2) \quad I_1(x, y) = I_0[1 + M(x, y)\cos(\varphi(x, y) + \Delta_1)]$$

$$(3) \quad I_2(x, y) = I_0[1 + M(x, y)\cos(\varphi(x, y) + \Delta_2)]$$

$$(4) \quad I_3(x, y) = I_0[1 + M(x, y)\cos(\varphi(x, y) + \Delta_3)]$$

Isolando a fase relativa $\varphi(x, y)$ obtém-se [2]:

$$(5) \quad \varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{(I_2(x,y) - I_3(x,y))\cos\Delta_1 - (I_1(x,y) - I_3(x,y))\cos\Delta_2 + (I_1(x,y) - I_2(x,y))\cos\Delta_3}{(I_2(x,y) - I_3(x,y))\sin\Delta_1 - (I_1(x,y) - I_3(x,y))\sin\Delta_2 + (I_1(x,y) - I_2(x,y))\sin\Delta_3} \right]$$

Podem ser utilizadas mais imagens para o cálculo da fase. No caso de se utilizar quatro imagens I_1 , I_2 , I_3 e I_4 , onde as franjas apresentam deslocamentos de fase de 0° , 90° , 180° e 270° respectivamente, a fase da franja pode ser calculada por

$$(6) \quad \varphi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right)$$

A equação (6) pode ser generalizada para um número de imagens igual a $N > 2$ com deslocamentos iguais a $360/N$, chega-se a equação [2][6], onde o parâmetro i é o número da imagem adquirida.

$$(7) \quad \varphi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sum_{i=0}^{N-1} I_{i,360}(x, y) \operatorname{sen}\left(i \frac{360}{N}\right)}{\sum_{i=0}^{N-1} I_{i,360}(x, y) \operatorname{cos}\left(i \frac{360}{N}\right)} \right\}$$

Outra variável de importância é a modulação $M(x, y)$ que está relacionada diretamente com o contraste das franjas projetadas e à confiabilidade da fase medida em cada ponto. Pixels pouco confiáveis podem comprometer os resultados. A modulação pode ser calculada a partir das mesmas quatro imagens defasadas de 90° pela equação (8):

$$(8) \quad M(x, y) = \frac{1}{2} \sqrt{[I_4(x, y) - I_2(x, y)]^2 + [I_1(x, y) - I_3(x, y)]^2}$$

O valor da fase calculada pelo modelo matemático acima assume que tanto a câmera quanto o projetor multimídia sejam lineares, ou seja, que franjas senoidais projetadas pelo projetor sejam vistas como franjas senoidais pela câmera. Caso não-linearidades estejam presentes, erros serão embutidos no valor da fase calculada. Na grande maioria dos casos, quando a projeção é realizada com projetor multimídia, essa distorção do sinal senoidal não ocorre de forma pronunciada, não influenciando significativamente na incerteza de medição.

A utilização de oito ou mais passos na equação (8) atenua o erro causado pela não-linearidade que leva à forma não senoidal das franjas. Isto equivale a isolar o primeiro harmônico, utilizando as componentes em seno e cosseno para o cálculo da fase. Quanto mais passos forem utilizados, isto é, maior o valor de N , mais estreita será a banda de passagem para a determinação do primeiro harmônico.

Uma equação alternativa e computacionalmente mais eficiente de calcular a fase é descrita por Hariharan *et al* [4]. Além de simples, ela é tolerante ao valor do deslocamento de fase entre imagens. A fase é calculada a partir de cinco imagens com deslocamentos relativos contantes, não necessariamente iguais a 90° .

$$(9) \quad \varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right]$$

Recentemente Hariharan *et al* [8] ampliou seu algoritmo, fazendo-o ainda menos sensível a erros no deslocamento. A equação 24 mostra o seu modelo, agora utilizando 8 passos.

$$(10) \quad \varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{5I_2 - 15I_4 + 11I_6 - I_8}{I_1 - 11I_3 + 15I_5 - 5I_7} \right]$$

A equação desenvolvida por Carré [2] é uma variação do algoritmo de quatro passos, onde o valor do deslocamento de fase não precisa ser conhecido, desde que o seu valor seja constante.

$$(11) \quad \varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{[(I_2 - I_3) + (I_1 - I_4)][3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)]}}{(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)} \right]$$

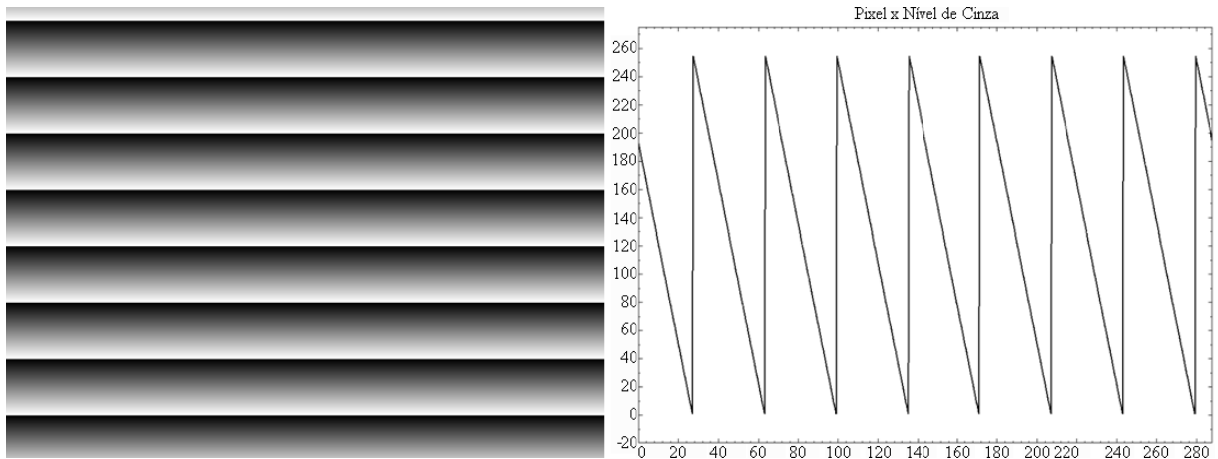


Figura 11 Mapa de fase relativo e o gráfico da intensidade dos níveis de cinza dos pixels de uma linha do eixo y da imagem.

Ao final a aplicação de qualquer uma das equações (5), (6), (8) a (11) ainda não leva ao valor exato da fase. A aplicação da função arcotangente retorna um valor entre 0 e 360°, o que corresponde ao ângulo cônico dentro da primeira volta do ângulo de fase. Quando os valores cônicos dentro da primeira volta são representados através de uma imagem em níveis de cinza eles constituem o denominado mapa de fases relativo, como exemplificado na figura 11. Uma variação de 360° na fase corresponde a uma variação de 256 níveis de cinza na imagem. Como pode ser observado no perfil traçado na figura 11, há uma estrutura tipo “dente de serra” com saltos abruptos equivalentes a 360°. Os saltos de fase ocorrem toda vez que o ângulo de fase ultrapassa um múltiplo inteiro de 360°, isto é, passa para uma nova volta. Para se chegar finalmente ao valor absoluto da fase é necessário remover esses saltos através da adição de um múltiplo inteiro de 360°. Há vários algoritmos para realizar esse processo, que são genericamente denominados de algoritmos de *remoção do salto de fase*.

Uma família de algoritmos pressupõe que a diferença da fase absoluta entre cada dois pontos vizinhos nunca supera 180°. Assim, o algoritmo inicia em um ponto de partida onde a fase absoluta é previamente conhecida ou arbitrada [2]. Utilizando a equação (12) é possível calcular a fase absoluta para o pixel vizinho de forma a garantir que o valor absoluto da

diferença entre eles seja sempre inferior a 180° . Assim, o valor calculado passa a ser referência para determinar a fase absoluta do próximo pixel vizinho. Desta forma, a comparação dois a dois é estendida para todos os pixels da imagem desde que a superfície a ser medida seja contínua e o ruído envolvido na medição seja baixo. Há várias estratégias distintas para definir a sequência de comparações de forma a evitar problemas trazidos pelas regiões na imagem com baixa qualidade (ou baixa modulação) que não serão aqui discutidas por fugir ao escopo deste trabalho [5].

$$(12) \quad \varphi^A(x, y) = \varphi(x, y) - 256 \cdot \text{INT} \left(\frac{\varphi(x, y) - \varphi^R}{256} \right)$$

onde $\varphi^A(x, y)$ é o valor da fase absoluta do ponto (x, y) ; $\varphi(x, y)$ é o valor da fase relativa (primeira volta) do ponto (x, y) e φ^R é o valor da fase de referência normalmente obtida de um ponto vizinho. A função INT [f(x)] utilizada na equação 12, retorna o valor inteiro da função f(x). Observa-se, todavia, que qualquer erro no cálculo do valor da fase entre um par de pixels, o que é comum em imagens ruidosas, será propagado no cálculo dos pixels subsequentes.

Outra possibilidade para a remoção do salto de fase é o método do batimento proposto por Zumbrunn [9], onde se utiliza dois mapas de fase relativa com leve diferença na frequência das franjas. Nele não há dependência da fase absoluta dos pixels vizinhos ou da continuidade do mensurando. Para tal, duas seqüências de franjas defasadas com frequências diferentes são projetadas e as respectivas fases relativas são determinadas. Utiliza-se a subtração de dois mapas de fase relativa (um de cada frequência) como argumento para determinar o múltiplo inteiro que multiplicará 360° para ser somado a cada ponto.

O cálculo da ordem de franja absoluta pode ser feito a partir da equação (12). Neste caso, o valor de referência é calculado a partir da diferença de fases $\varphi^{N+1}(x, y) - \varphi^N(x, y)$ multiplicada por N para a frequência N e por N+1 para a frequência N+1. A fase absoluta final é calculada pela média escalada entre os dois mapas conforme a equação (13).

$$(13) \quad \varphi(x, y) = \frac{\varphi^N(x, y) + \left(\frac{N}{N+1}\right)\varphi^{N+1}(x, y)}{2}$$

onde $\varphi^{N+1}(x, y)$ é a fase absoluta calculada pela equação (12) para a frequência N+1; e $\varphi^N(x, y)$ é a fase absoluta calculada pela equação (12) para a frequência N.

O mapa de fase absoluta obtido não mais tem a estrutura do tipo “dente de serra”, mas é uniforme na direção das franjas projetadas, conforme exemplifica a figura 13.

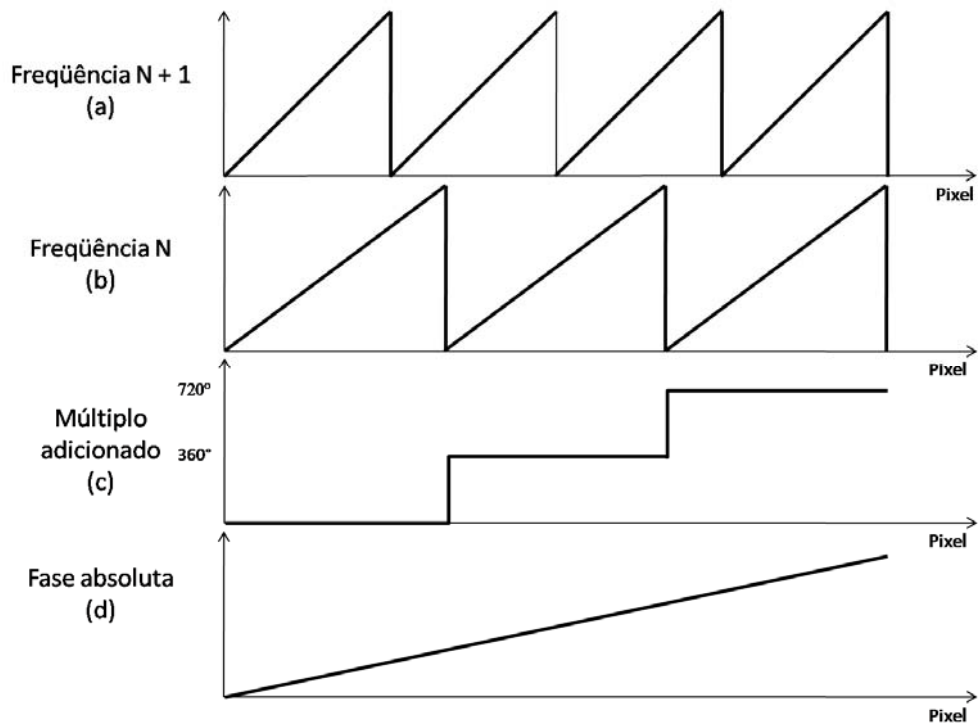


Figura 12 (a) e (b) Perfil de dois mapas de fase levemente diferentes. (c) Múltiplo adicionado conforme a subtração de (a) e (b). (d) Perfil da fase absoluta final

A figura 13 mostra o caso particular de um mapa de fase de uma superfície plana, onde nesse caso a fase varia continuamente ao longo de qualquer linha vertical. As franjas projetadas eram horizontais. Portanto, só há um valor de fase para cada pixel ao longo desta linha. Entretanto, todos os pixels de uma linha horizontal apresentam o mesmo valor de fase. Assim, o valor da fase não será único em toda a imagem. Ainda assim, é possível determinar pontos homólogos utilizando propriedades da geometria epipolar no processo de triangulação dos pontos homólogos, como será discutido na próxima sessão. [2][5][6]

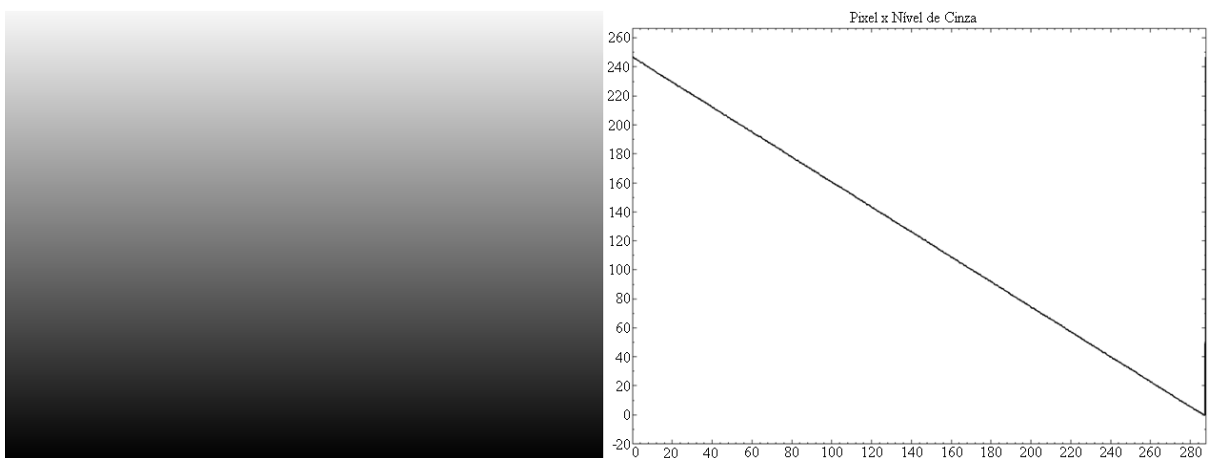


Figura 13 À esquerda, imagem do mapa de fase absoluto e à direita o gráfico da intensidade dos níveis de cinza dos pixels de uma linha paralela ao eixo y da imagem.

3.1.2. Triangulação dos pontos homólogos

Para proceder a triangulação entre as múltiplas imagens do mesmo objeto é necessário determinar a localização dos pontos homólogos nas imagens assim como os parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmeras utilizadas. Nos parâmetros intrínsecos estão embutidas informações sobre a lente, o tamanho, localização e orientação do sensor. Nos extrínsecos, estão embutidas informações sobre a localização e orientação da câmera. Dentre os vários modelos de câmera existentes, o *pinhole* satisfaz adequadamente o sistema [5][6][15]. Nesse modelo, o ponto do objeto Ψ é projetado no plano imagem π através de uma lente, que pode ser simplificada através de um ponto especial, o centro de projeção C , conforme pode ser observado na figura 14. O ponto p é a projeção normal de C sobre o plano imagem π e o eixo formado por esses dois pontos é denominado eixo principal, que é normal ao plano π .

A formação do plano imagem π pode ser explicada utilizando a semelhança entre triângulos, conforme a figura 15. O ponto x possui as coordenadas (u,v) no plano imagem enquanto o ponto X encontra-se em uma posição no espaço dada por (X,Y,Z) . Dessa forma, a relação entre o plano imagem e o plano objeto é dada pela equação (14), que apresenta também parâmetros relativos à correção de coordenadas da imagem, diferenças entre as distâncias focais em x e y , e um fator que considera a inclinação do sensor [10][16]. Esses parâmetros serão apresentados na seção 3.1.3.

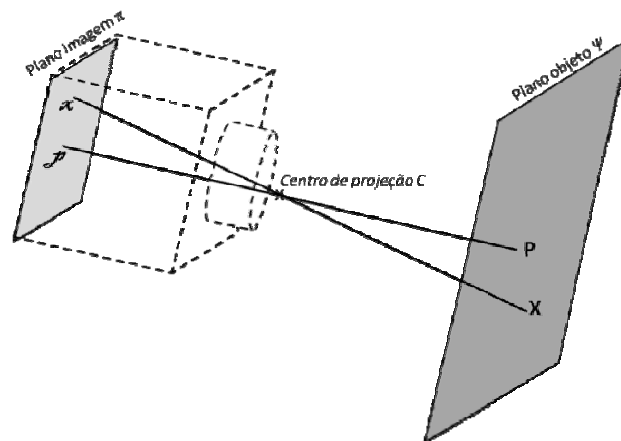


Figura 14 Modelo pinhole de câmera

$$(14) \quad \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -f_x & \tau & u_0 \\ 0 & -f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (R|t) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$(15) \quad \vec{x} = K \cdot \vec{X}$$

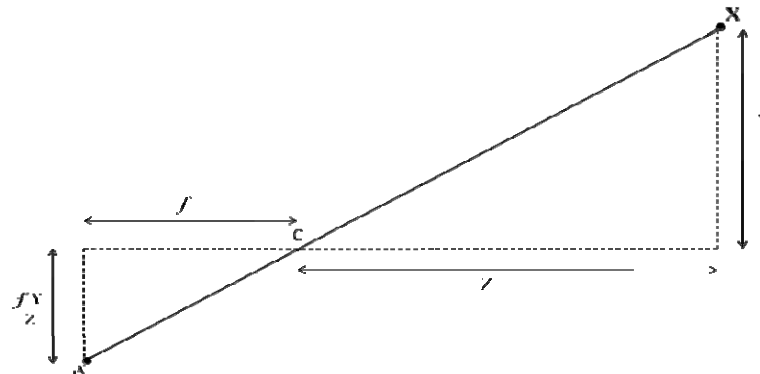


Figura 15 Semelhança entre triângulos na formação da imagem

Reduzindo a equação (14) para a 0 observa-se que existe uma matriz \mathbf{K} com a qual é possível converter as coordenadas de um ponto do objeto para o plano imagem. Essa matriz \mathbf{K} é denominada matriz de calibração e é calculada durante a calibração das câmeras. O processo de calibração será tratado no próximo tópico. A partir da matriz \mathbf{K} também é possível calcular a correspondência entre pontos da imagem e pontos no espaço tridimensional. Para cada ponto numa imagem, é possível determinar a reta que une o ponto da imagem ao centro de projeção C. A utilização de duas ou mais câmeras determina duas ou mais retas, em cuja interseção estará o ponto no espaço [5][6][19].

Supondo uma reta calculada para um plano imagem π_1 conforme a figura 16, a projeção dos pontos sobre esta reta no plano da imagem π_2 formam uma nova linha reta conhecida como linha epipolar. Dado o ponto x_0 no plano imagem π_1 , sabe-se que a posição do seu ponto homólogo no plano imagem π_2 estará sobre a correspondente linha epipolar. Assim, a busca do ponto homólogo deixa de acontecer em um espaço bidimensional e passa a ser ao longo de uma linha, o que reduz drasticamente a complexidade do processo.

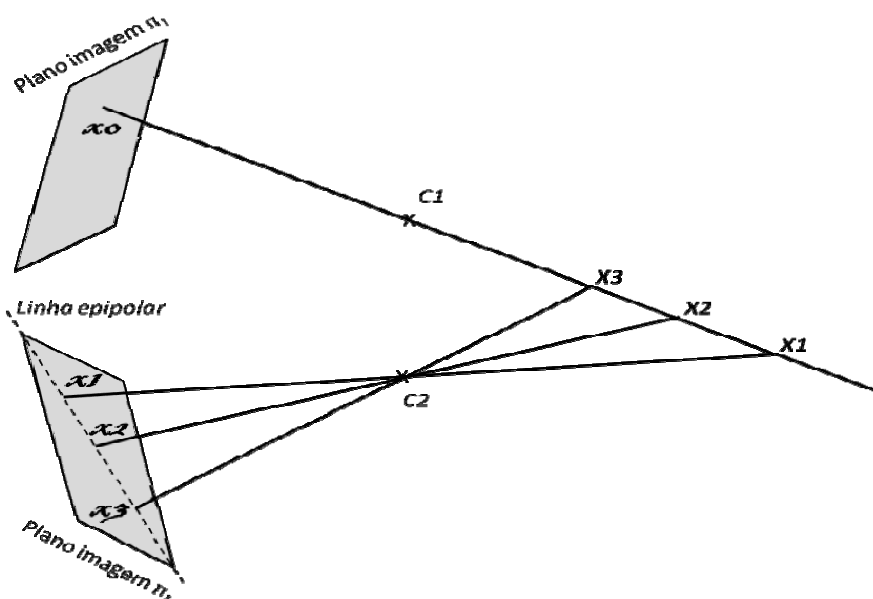


Figura 16 Linha epipolar e solução por pontos homólogos com duas câmeras

Os mapas de fase obtidos a partir das seqüências de franjas projetadas em conjunto com as matrizes de calibração das câmeras fornecem informações suficientes para a reconstrução tridimensional de forma precisa e eficiente. Vários algoritmos foram elaborados para fornecer essa informação [6][19].

A forma clássica inicia com a seleção de um ponto no plano imagem π_1 . O valor da fase absoluta deste ponto é determinado. Com base nas matrizes de projeção, determina-se a respectiva linha epipolar no plano imagem π_2 . Busca-se ao longo dessa linha o ponto homólogo que tem o mesmo valor de fase absoluta encontrado no ponto em π_1 . [2][5][6].

Uma variação é a partir da definição de uma malha tridimensional virtual. Parte-se de cada nó da malha, onde duas coordenadas estão previamente definidas. Busca-se localizar a terceira coordenada. Para isso, considera-se uma linha a partir do nó e paralela ao terceiro eixo. Percorre-se virtualmente esta linha e as posições correspondentes são projetadas nos planos das imagens e os respectivos valores de fase comparados. A posição correta do ponto no espaço resultará na mínima diferença de fase para as múltiplas imagens, como mostra a figura 17[19].

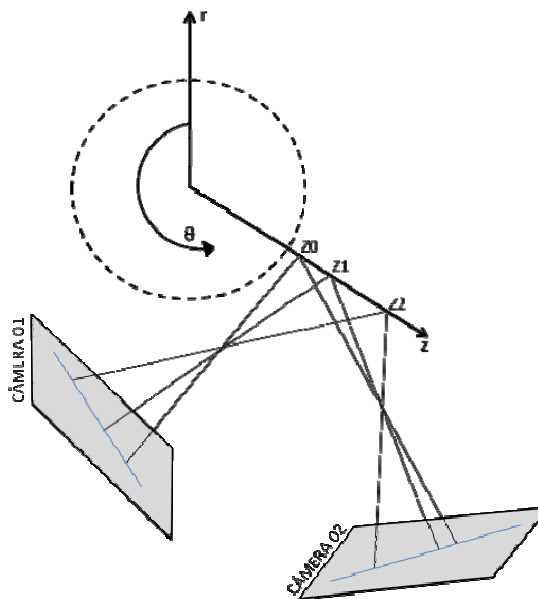


Figura 17 O correto valor de $z(r, \theta)$ será determinado quando o mesmo valor de fase for encontrado nas duas imagens. [19]

Existe uma incerteza implícita no valor de fase calculado e por isso a busca é realizada por valores de mínima diferença de fase. Deve-se levar em conta a fase de toda a “vizinhança” do pixel, pois nesta área o perfil de intensidades deve ser semelhante em ambas as imagens.

Varrendo a imagem de forma estruturada obtém-se uma nuvem densa de coordenadas tridimensionais. Essa nuvem de pontos representará a superfície do objeto visualizada em comum pelas duas câmeras.

3.1.3. Calibração das câmeras

Para o procedimento da calibração das câmeras, diferentes métodos foram desenvolvidos para fins distintos e com diferentes exatidões e esforços computacionais, adequando-se às diversas situações de medição. A escolha do método deve levar em conta o número de câmeras no sistema de medição, faixa de medição proposta, incerteza relativa ao padrão (que deve ser muito menor que a incerteza do sistema para que o método produza resultados satisfatórios). É importante notar que, para um mesmo método básico, existe uma grande variedade de algoritmos diferentes projetados para a resolução do sistema de equações resultantes.

Dentre os vários modelos disponíveis para a calibração de câmeras, como por exemplo, os desenvolvidos por Tsai [11] e Heikkilä [12], escolheu-se o método de Zhang [10], pela facilidade em compor o padrão de calibração e a simplicidade do processo de calibração[17]. O padrão utilizado por Zhang é bidimensional, do tipo tabuleiro de xadrez, de forma que vários posicionamentos do mesmo são necessários para o cálculo. Cerca de sete posicionamentos são utilizados nesse trabalho, fornecendo rotações em torno dos eixos x e y. É conveniente posicionar o padrão em todo o volume visto pela câmera, conforme demonstrado na figura 18, produzindo melhores valores dos seus parâmetros. Softwares como o *MatLab* já possuem o toolbox para calibração de câmeras utilizando o método de Zhang, facilitando o uso do método [16].

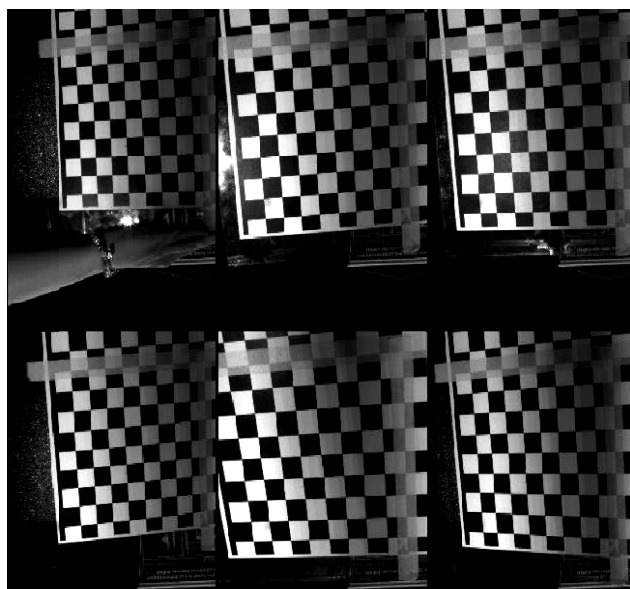


Figura 18 Imagens de seis dos sete diferentes posicionamentos do padrão bidimensional utilizados para calibração.

Para o modelo desenvolvido por Zhang a utilização de mais de duas imagens influencia na incerteza da calibração, assim como o ângulo de rotação do padrão

bidimensional em cada imagem [18]. Porém posicionamentos paralelos não adicionam informações relevantes ao cálculo, somente se for determinado a localização do padrão previamente em cada imagem.

O conjunto de imagens adquiridas do padrão define os parâmetros da câmera. Utilizando apenas uma das imagens adquiridas é realizado o cálculo que define os parâmetros extrínsecos da câmera, definindo um sistema de coordenadas global, conforme a figura 19. Dessa forma, apenas um dos posicionamentos do padrão deve ser igual para as duas câmeras, de modo que ambas possuam o mesmo sistema de coordenadas. Para o cálculo dos parâmetros intrínsecos, todas as imagens são utilizadas, e não precisam ser iguais para as duas câmeras.

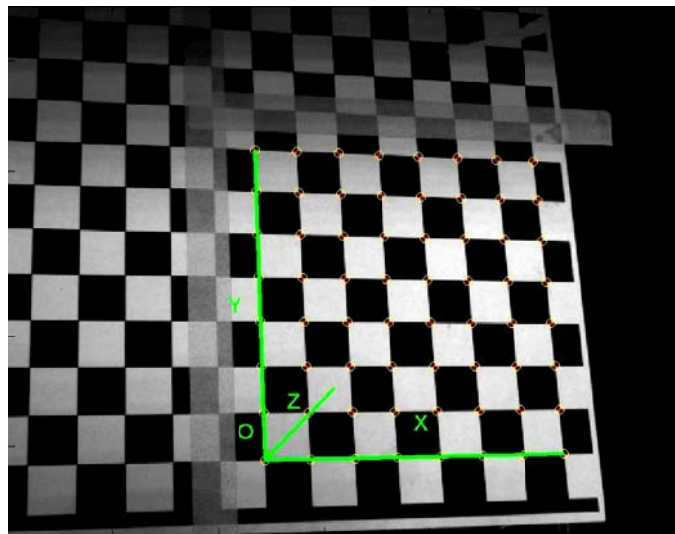


Figura 19 Sistema de coordenadas global definido pelo posicionamento do padrão de calibração.

O objetivo da calibração da câmera é o conhecimento de dois grupos de variáveis:

- (a) Parâmetros intrínsecos, relativos às características ópticas e geométricas do interior da câmera:
 - Distância focal (f) que pode ser diferente nas direções x e y ;
 - Posição central do sensor (u_0, v_0) onde o eixo óptico é ortogonal ao sensor;
 - Coeficiente relativo a imperfeições geométricas do sensor (τ);
 - Coeficientes de distorção da lente (k_i);
- (b) Parâmetros extrínsecos que determinam o posicionamento da câmera em relação a um sistema de coordenadas global:
 - Matriz R relaciona a rotação da câmera em relação à origem do sistema de coordenadas global;

- Vetor t relaciona a translação da câmera em relação à origem do sistema de coordenadas global;

Dessa forma pode-se conhecer a transformação entre um ponto contido no sistema de coordenadas global para a sua localização no plano imagem. Durante a aquisição das imagens de calibração, apenas seus parâmetros extrínsecos devem ser alterados, devido aos diferentes posicionamentos do padrão bidimensional. Os parâmetros intrínsecos devem permanecer constantes, a menos que o foco da câmera seja alterado.

Pela equação 0 sabe-se que a matriz de calibração \mathbf{K} deve ser 3x4 e abranger parâmetros intrínsecos e extrínsecos. Considerando uma matriz A do tipo 3x3 que contenha os parâmetros intrínsecos e $(\mathbf{R}|t)$ uma matriz 3x4 com os parâmetros extrínsecos, obtém-se a equação [10][18].

$$(16) \quad \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{A}(\mathbf{R}|t) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

No padrão plano, $Z=0$, então se pode escrever a seguinte equação, onde s é um fator de escala, m é a coordenada do ponto na imagem, e M , no espaço [10][18]:

$$(17) \quad \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{A}(r_1 \ r_2 \ r_3|t) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$(18) \quad s\vec{m} = \mathbf{A}(r_1 \ r_2|t)\vec{M}$$

Utilizando a solução por autovetores [10][18], se H for definido como uma matriz 3x3 e λ como uma constante escalar, então:

$$(19) \quad (h_1 \ h_2 \ h_3) = \lambda \mathbf{A}(r_1 \ r_2|t)$$

Usando o fato que \vec{r}_1 e \vec{r}_2 são ortonormais,

$$(20) \quad h_1^T A^T A^{-1} h_2 = 0$$

$$(21) \quad h_1^T A^T A^{-1} h_1 = h_2^T A^T A^{-1} h_2$$

Sendo (20) e (21) as equações básicas para obter os parâmetros intrínsecos. Uma vez que a matriz A é conhecida, os parâmetros extrínsecos podem ser calculados conforme as equações (22), (23), (24) e (25).

$$(22) \quad r_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_1$$

$$(23) \quad r_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_2$$

$$(24) \quad r_3 = r_1 \times r_2$$

$$(25) \quad t = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_3$$

3.2 REQUISITOS TÉCNICOS E METROLÓGICOS DO SISTEMA

O sistema de medição desenvolvido neste trabalho está destinado a uma aplicação bem definida. Deve satisfazer requisitos metrológicos e operacionais que serão descritos nesta seção. Dessa forma, com base na análise de sistemas de medição comercialmente disponíveis e entrevistas com os futuros usuários, chegou-se a alguns requisitos operacionais que o sistema deve cumprir:

- Deve permite calcular redução de espessura e volume de material removido ou depositado em um duto com forma cilíndrica;
- Operação baseada em laptop;
- Tempo de medição: até 30 segundos;
- Comprimento máximo do sistema: 500 mm;
- Largura máxima do sistema: 300 mm;
- Altura máxima do sistema: 300 mm;
- Diâmetro nominal externo do duto ≥ 250 mm (10”);

Da mesma forma, o sistema deve ter um comportamento metrológico de acordo com o mensurando definido. A seguir encontram-se os requisitos metrológicos definidos para o sistema:

- Área mensurável por posicionamento: 300x400 mm²;
- Possibilidade de concatenar áreas maiores por software;
- Resolução espacial: 1 mm x 1 mm;
- Incerteza radial (r): $\pm 0,2$ mm;
- Resolução lateral de 0,5 mm/pixel
- Inclinação máxima da superfícies: 45°

O esquema óptico será detalhado na seção 3.3.2.

3.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO HARDWARE

O protótipo PEROLA-E (figura 20) foi concebido basicamente em três partes: um sistema de iluminação estruturada, sistema de aquisição de imagens e o sistema estrutural. O

sistema de iluminação estruturada projetará franjas e proverá a defasagem necessária entre elas com auxílio de um motor de passo. O sistema de aquisição de imagens será composto por duas câmeras que farão a aquisição das imagens necessárias para a reconstrução. O sistema estrutural dará o suporte e rigidez necessária para manter bem definida as posições relativas do sistema de iluminação estruturada e aquisição, além de facilitar o posicionamento do sistema em relação ao duto.

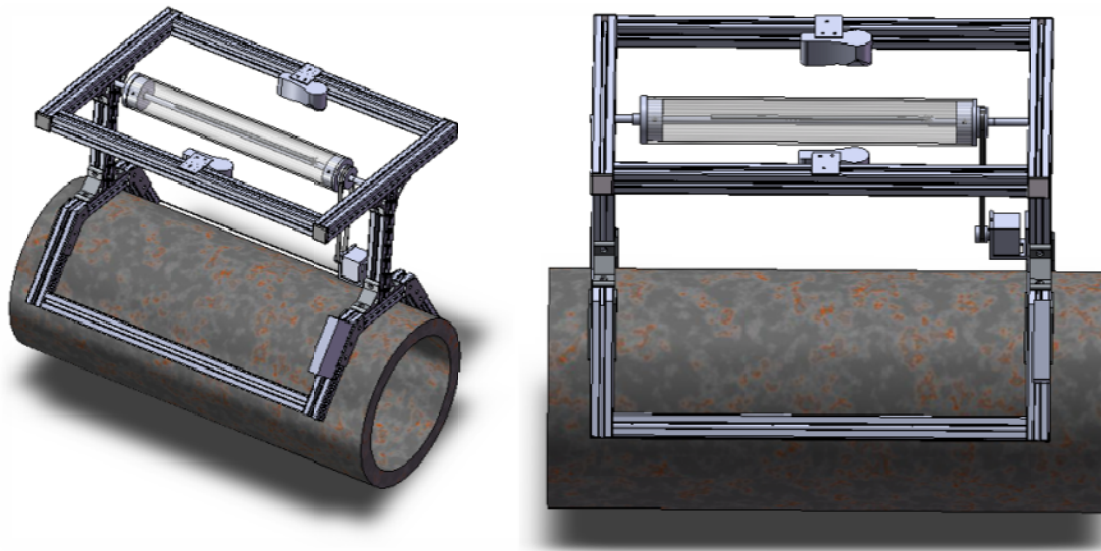


Figura 20 Visão geral do protótipo desenvolvido.

3.3.1. Sistema de Iluminação Estruturada

O aparato projetor é imprescindível para a aplicação do princípio utilizado para a localização dos pontos homólogos. Para o protótipo foram pesquisadas algumas alternativas, visto cumprir com todas as exigências os requisitos técnicos.

Data-show

É o projetor de franjas mais comumente utilizado. Possui boa definição das franjas projetadas, porém é grande (maior que 150 mm x 150 mm), e deve ser mantido mais afastado da superfície projetada, inviabilizando a construção de um protótipo com no máximo 300 mm de altura.

Mini-projetores (Pocket projectors)

Embora seja uma tecnologia recente, também foram levados em consideração. Possuem boa definição das franjas, tamanho e foco reduzido, porém projetam imagens pequenas em pequenas distâncias. Testes demonstraram que na distância de 200 mm do mensurando, a projeção teria aproximadamente (150 mm x 100 mm), apenas parte dos 300 mm x 400 mm necessários.

Sistema de iluminação estruturada

A alternativa escolhida foi construir um sistema que projete as franjas no tamanho e forma necessários para a medição. A escolha foi por um tubo de acrílico com 60 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, com franjas impressas num adesivo transparente colocado no exterior do tubo (N franjas de 1° à 180° e N+1 franjas de 181° à 360°). O deslocamento das franjas será feito por um motor de passo acoplado ao tubo. A definição da fonte luminosa utilizada foi a mais trabalhosa. Abaixo uma tabela indicando o tipo, características e limitações de cada uma das fontes pesquisadas.

Tabela 3 Comparação entre fontes luminosas para o sistema de iluminação estruturada

Fonte Luminosa	Características	Limitações
Halógena Palito	- Fina (15 mm) e comprida (118 mm para 500 W) - Boa iluminação	- Tensão de entrada: 220V - Aquecimento acima de 100°C em menos de 10 minutos
Lâmpada Fluorescente	- Fina (23 mm) e comprida (220 mm) - Tensão de entrada: 6V	- Péssima iluminação, pois é difusa
Tubo de Neon	- Construção artesanal o que a faz ter o tamanho necessário para o projeto	- Tensão de entrada: 5000V - Compromete a segurança em ambientes explosivos
LED alto brilho	- Intensidade luminosa: 4000 mcd - Tensão nominal: 3,2 V	- Pequeno ângulo de abertura: 30° (não cobre a área a ser mensurada)
Power LED 1W	- Tensão nominal: 3,2V - Ângulo de abertura: 100°	- Intensidade luminosa: 20000mcd (satura a câmera)
LED Piranha	- Tensão nominal: 3,5V - Ângulo de abertura: 120° - Intensidade luminosa: 3000 mcd	- nenhuma conhecida

Dessa forma, o sistema de iluminação estruturada foi concebido utilizando um conjunto alinhado de 36 LEDs piranha, de cor branca, dentro do tubo de acrílico, conforme ilustra a figura 21.

A defasagem das franjas geradas pelo tubo de acrílico seria possível com a utilização de um motor de passo. Esse motor é alimentado por 24 V, possuindo um driver de controle com micropasso. A conexão do driver com o computador é feita via porta paralela, sendo o motor acionado diretamente pelo software do protótipo, que também controla as câmeras. O motor de passos possuía defasagens entre os movimentos, ocasionando erros no cálculo da fase. Visto isso, o motor foi substituído por deslocamentos manuais, utilizando uma mesa angulada.

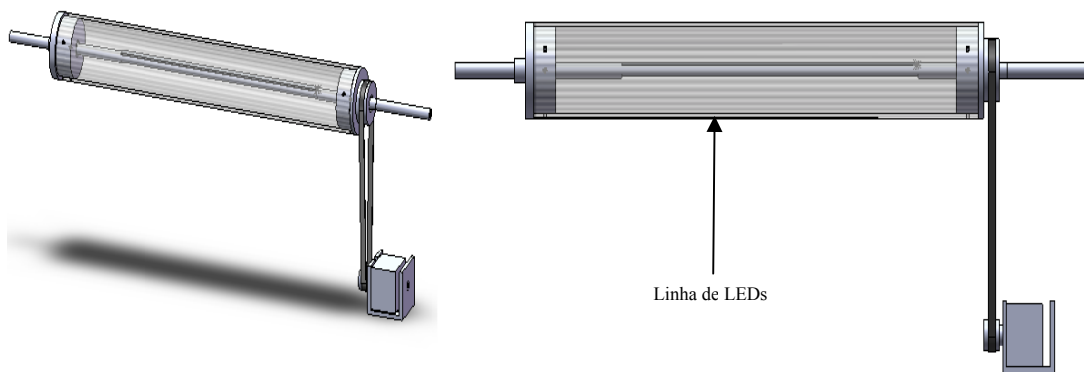


Figura 21 Duas vistas do sistema de iluminação estruturada

É interessante notar que a projeção realizada pelo sistema concebido não possui um perfil completamente senoidal (conforme a figura 22), por isso a escolha do método de cálculo da fase deve ser mais robusto. A figura 22 caracteriza o perfil encontrado ao longo de uma linha horizontal da imagem de um plano iluminado com o sistema de iluminação descrito.

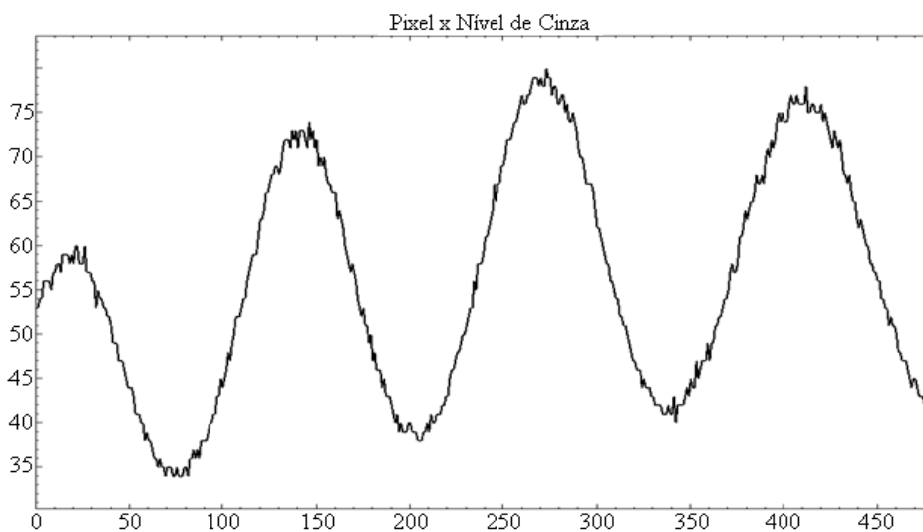


Figura 22 Perfil real da projeção de franjas do sistema de iluminação estruturada

3.3.2. Sistema de Aquisição

A fotogrametria pode ser realizada por duas ou mais câmeras, desde que todas enxerguem a área a ser mensurada. A escolha por duas câmeras foi fundamentada pelo fato de que, mesmo com a pouca distância ao mensurando (menos de 300 mm), algumas câmeras conseguem ter o ângulo de visão adequado. A alternativa seria o uso de quatro câmeras funcionando como dois sistemas distintos, com posterior concatenação dos resultados adquiridos. Porém, percebeu-se que duas câmeras eram o suficiente para a medição da área de 300 mm x 400 mm.

A primeira escolha foi uma câmera tipo webcam USB de baixo custo, que apresentava campo de visão compatível com os objetivos do projeto. No entanto, experimentos realizados (ver no próximo capítulo) demonstraram baixo desempenho e sua incompatibilidade com os requisitos do sistema.

Como substituta foi utilizada uma câmera monocromática firewire (padrão IEEE-1394) em conjunto com uma lente objetiva de 8 mm. A área de visão do conjunto ficou em cerca de 200 mm x 200 mm, menor que a área requisitada. Porém com resultados muito melhores. Para a medição são adquiridas 32 imagens no total, sendo 16 para cada câmera.

Na figura 23 mostra-se o esquema de posicionamento das câmeras firewire para que ambas delimitem a maior área conjunta de observação.

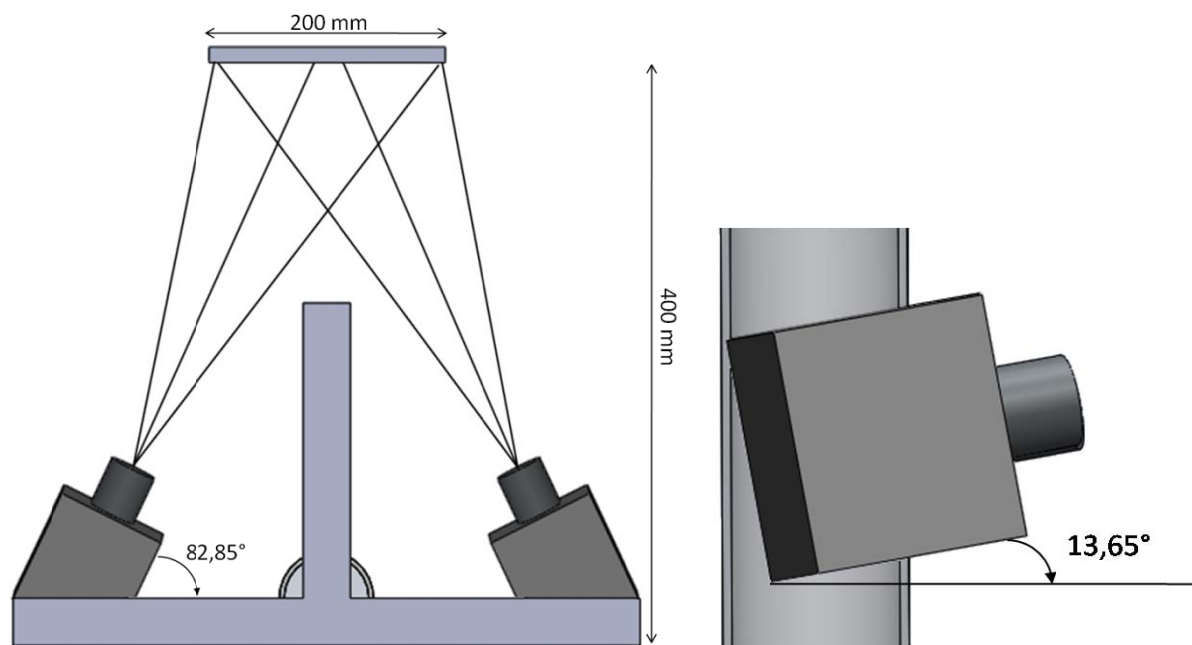


Figura 23 (a) Vista superior do esquema óptico do protótipo, utilizando as câmeras firewire; (b) Vista lateral do esquema óptico.

3.3.3. Sistema Estrutural

Para a melhor fixação em dutos e ângulo de visão das câmeras, desenvolveu-se uma estrutura em T para a fixação dos componentes e uma inferior para apoio e fixação no duto. Conforme a figura 24, as duas estruturas são evidenciadas sozinhas e com os outros componentes do sistema, enfatizando a necessidade de tal forma de estrutura. A utilização de perfis de alumínio de seção quadrada de 30 mm de aresta foi escolhida pela facilidade de inserção de elementos e seu baixo peso. A sua fixação no duto é realizada por meio de cintas, quando necessário.

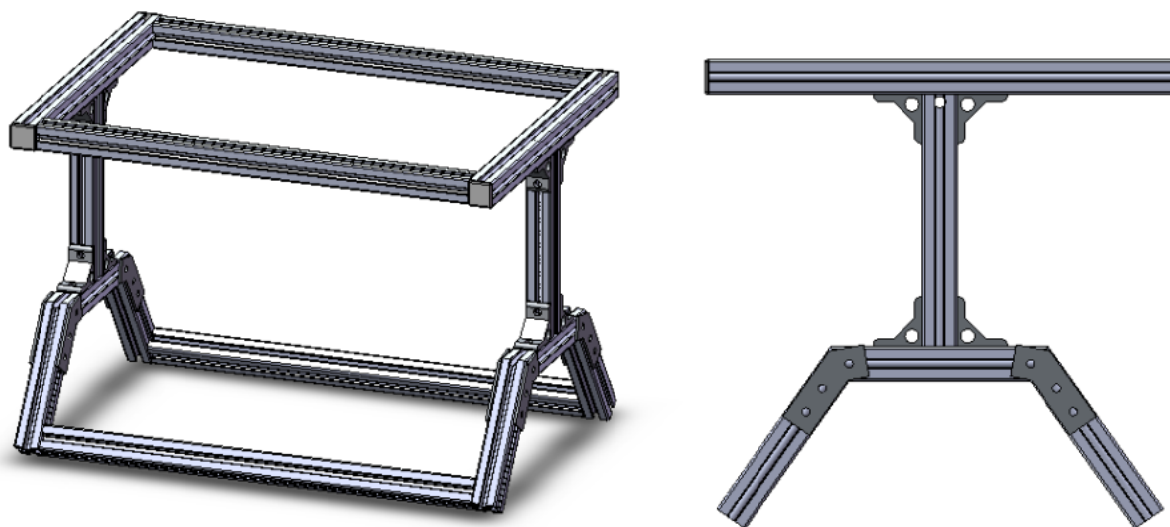


Figura 24 Duas vistas da estrutura do protótipo

Além da estrutura escolhida, foram levadas em consideração outras estruturas mostradas na

figura 25, porém nenhuma teve melhor desempenho e versatilidade para o apoio dos outros sistemas e duto como a escolhida acima.

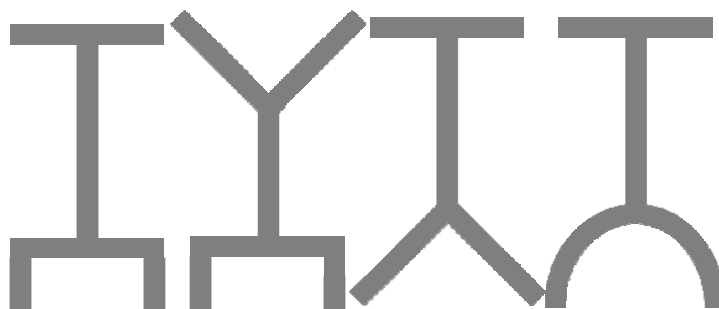


Figura 25 Alternativas para a estrutura do protótipo

3.3.4. Concepção básica definida

Conforme as propostas acima relacionadas, foi desenvolvida a concepção básica do protótipo conforme a figura 26. Os cabos referentes às câmeras, LEDs, motor e *driver* do motor passam por dentro da estrutura.

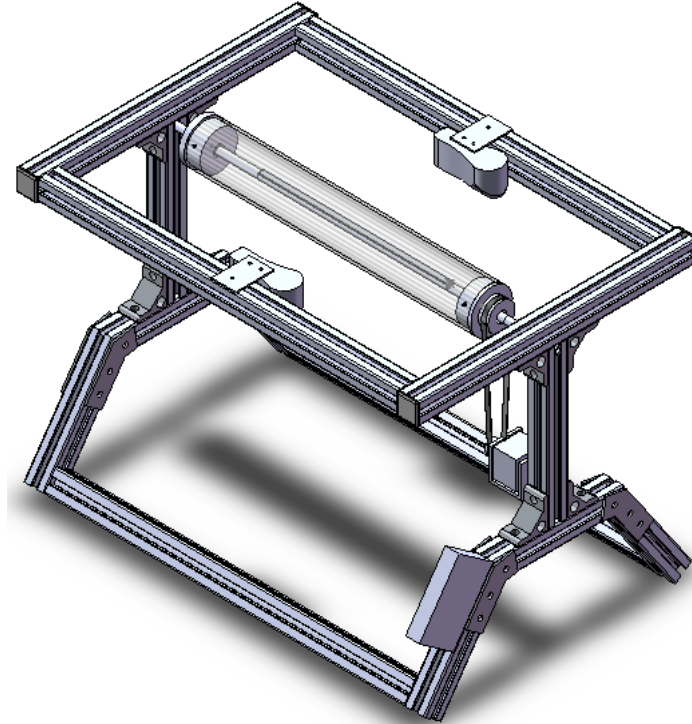


Figura 26 Visão do projeto mecânico final do protótipo

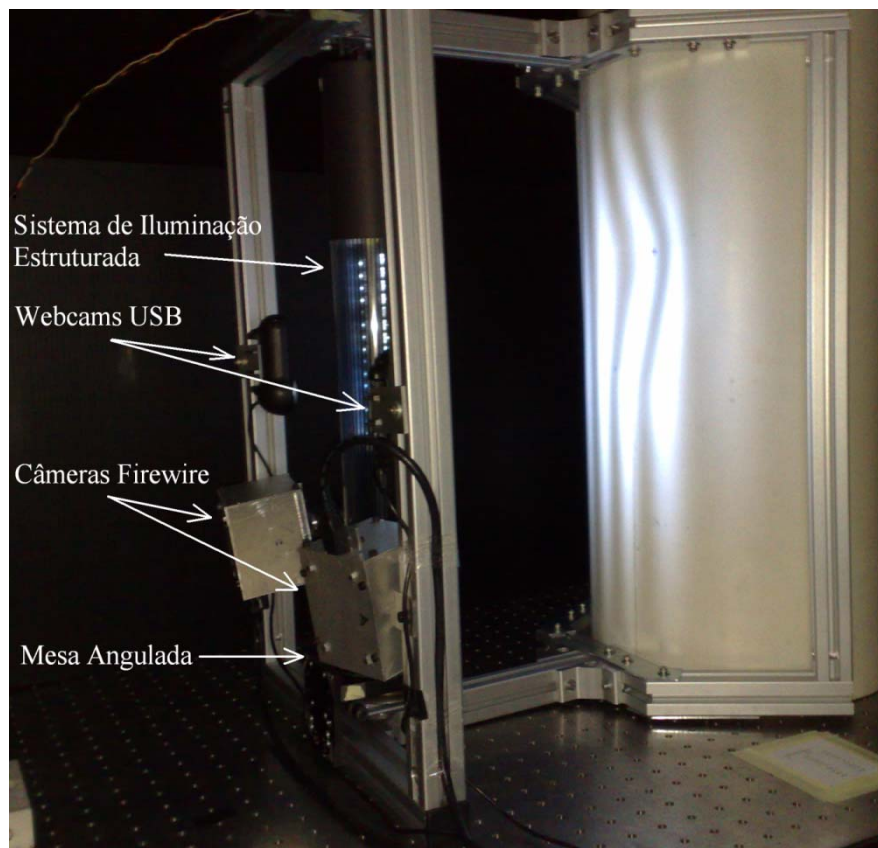


Figura 27 Fotografia do protótipo desenvolvido

3.4 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO SOFTWARE

3.4.1 Software de medição

Acompanhando a portabilidade do sistema, designou-se que toda a operação deve ser realizada em laptop. Dessa forma, obtêm-se em campo os resultados desejados. O software elaborado em conjunto com o protótipo adquire e opera as imagens, calcula as nuvens de pontos e representa os resultados como gráficos tridimensionais em menos de um minuto. As etapas do processamento são apresentadas na figura 28. As imagens adquiridas devem possuir 600 x 800 de resolução, produzindo como resultado nuvens com até 120000 pontos.

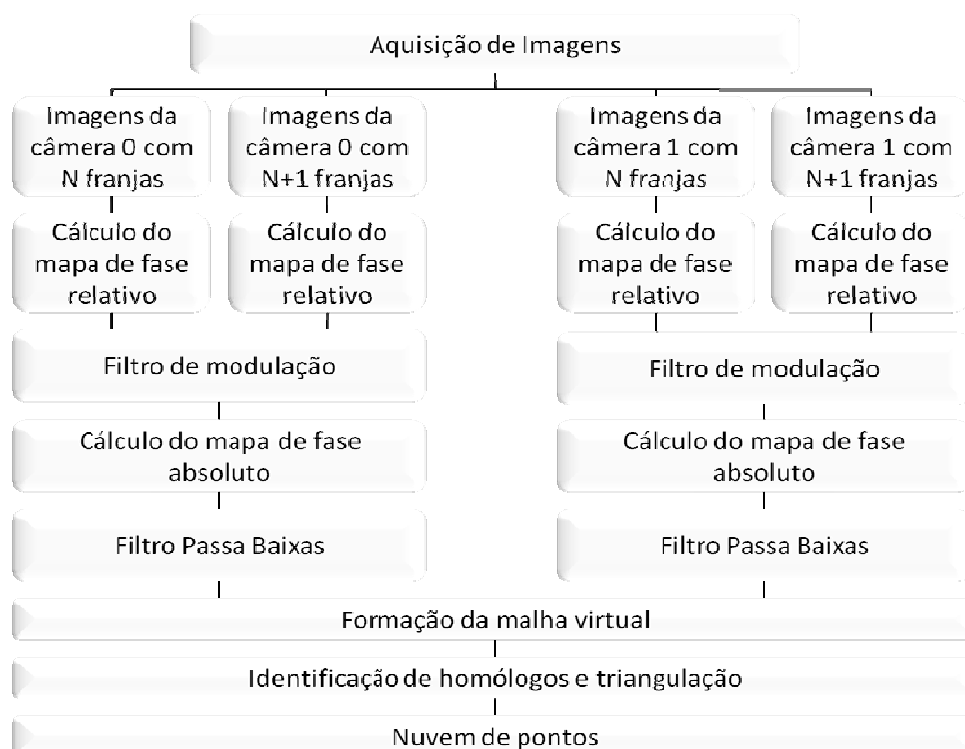


Figura 28 Esquema das etapas executadas pelo software do protótipo

O software adquire e armazena uma imagem por posicionamento do sistema de iluminação estruturada para cada câmera. Inicialmente seria utilizado um motor de passos para movimentar as franjas, porém com a sua utilização percebeu-se um preocupante agravante: os deslocamentos não eram iguais.

O valor da fase para cada pixel, calculado pela equação (13), é representado com ponto flutuante e não mais como o tipo byte, que é o nativo das imagens monocromáticas, pois dessa forma evita-se o problema causado pelo arredondamento numérico.

É realizado o cálculo da modulação para cada conjunto de oito imagens para determinar e marcar pixels ruins. Ao calcular o mapa de fase absoluto, o software utiliza essa

imagem como seleção para bons pixels, não considerando os com valores de modulação inferior a 20, valor este estipulado com base em experimentos previamente realizados no Labmetro.

Devido ao elevado ruído da câmera é aplicado um filtro passa baixas para removê-lo. A utilização do filtro diminui consideravelmente a influência do ruído nas imagens.

A identificação dos pontos homólogos é realizada segundo o método descrito na seção 3.1.2, onde é inicialmente definida uma malha virtual 2D de pontos, e o algoritmo percorre virtualmente a terceira dimensão, projetando sua posição nas imagens e procurando por valores de fase semelhantes. Essa malha virtual de pontos é gerada conforme os valores estipulados do volume de medição e resolução do sistema.

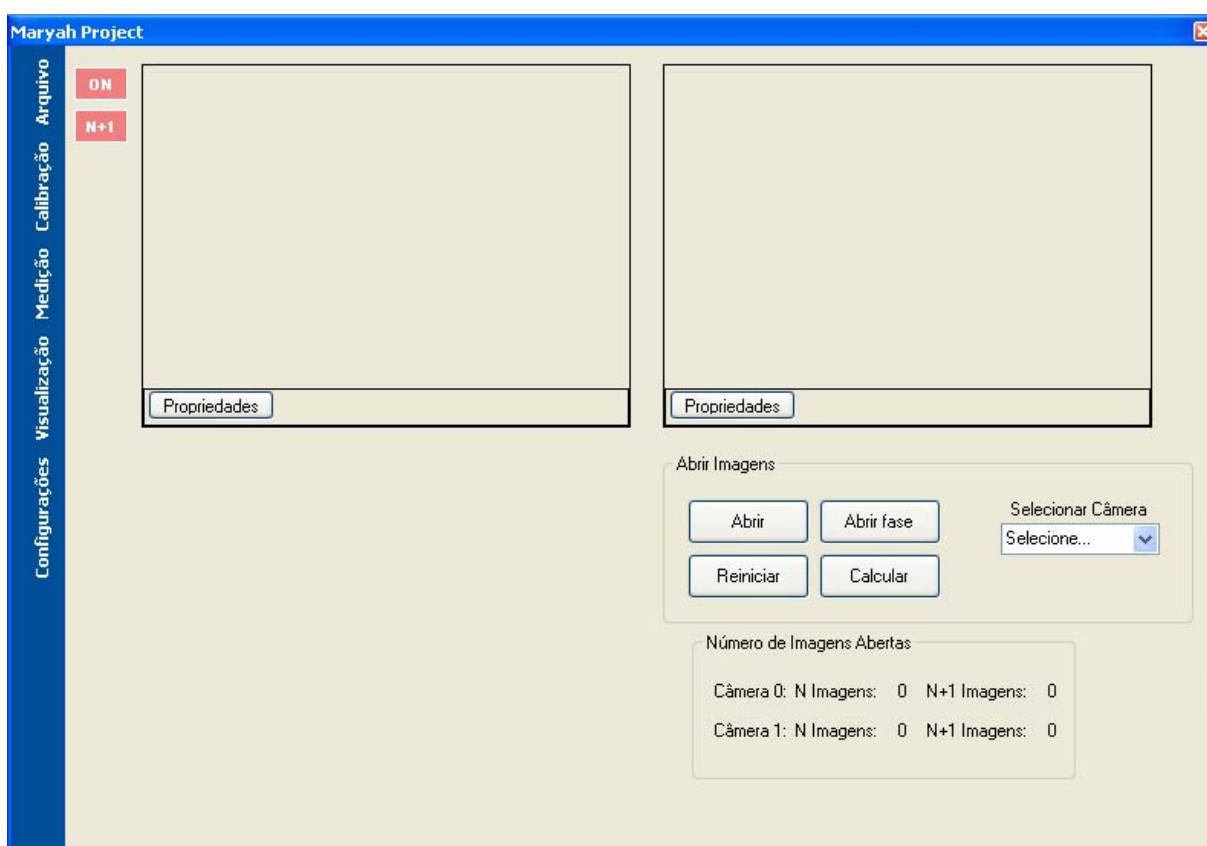


Figura 29 Interface do software desenvolvido para medição

Após percorrer todos os pontos da malha virtual o software conclui o procedimento obtendo a nuvem de pontos medidos. A nuvem de pontos resultante é salva em dois formatos distintos: formato texto (.txt) para poder ser utilizada em qualquer outro software e formato “nuvem de pontos” (.cop) para a utilização no software de visualização escolhido. O formato “nuvem de pontos” possui tamanho muito menor que o formato “texto”, sendo uma vantagem para a visualização.

A interface do software pode ser observada na figura 29.

3.4.2 Software de calibração

Para o procedimento de calibração foi utilizado o toolbox de calibração de câmeras para MatLab, que fornece todos os parâmetros necessários para a matriz de calibração.

Como entrada para esse software usa-se as imagens do padrão de tabuleiro de xadrez bidimensional, a quantidade de retângulos em x e y, e as dimensões em milímetros dos lados dos retângulos em x e y. Como saída, o software fornece os parâmetros intrínsecos em pixels e extrínsecos da câmera em milímetros. O procedimento é feito separadamente para cada uma das câmeras utilizadas. Interessante ressaltar que alguns dos parâmetros da matriz de calibração precisam estar em milímetros, sendo necessário então o conhecimento do tamanho do pixel da câmera utilizada para a conversão.

Alguns ajustes foram feitos no toolbox para que a saída do software apresente a matriz de calibração salva no formato texto, requerido pelo software de medição.

3.4.3 Software de visualização

A visualização dos dados em coordenadas cartesianas e de alguns resultados de medição é realizada utilizando o software RCOP, criado pela parceria entre o Labmetro e a empresa Photonita. A escala de cores auxilia na visualização dos defeitos (figura 30). Em vermelho são apresentados os maiores valores para a coordenada z e em azul, os menores.

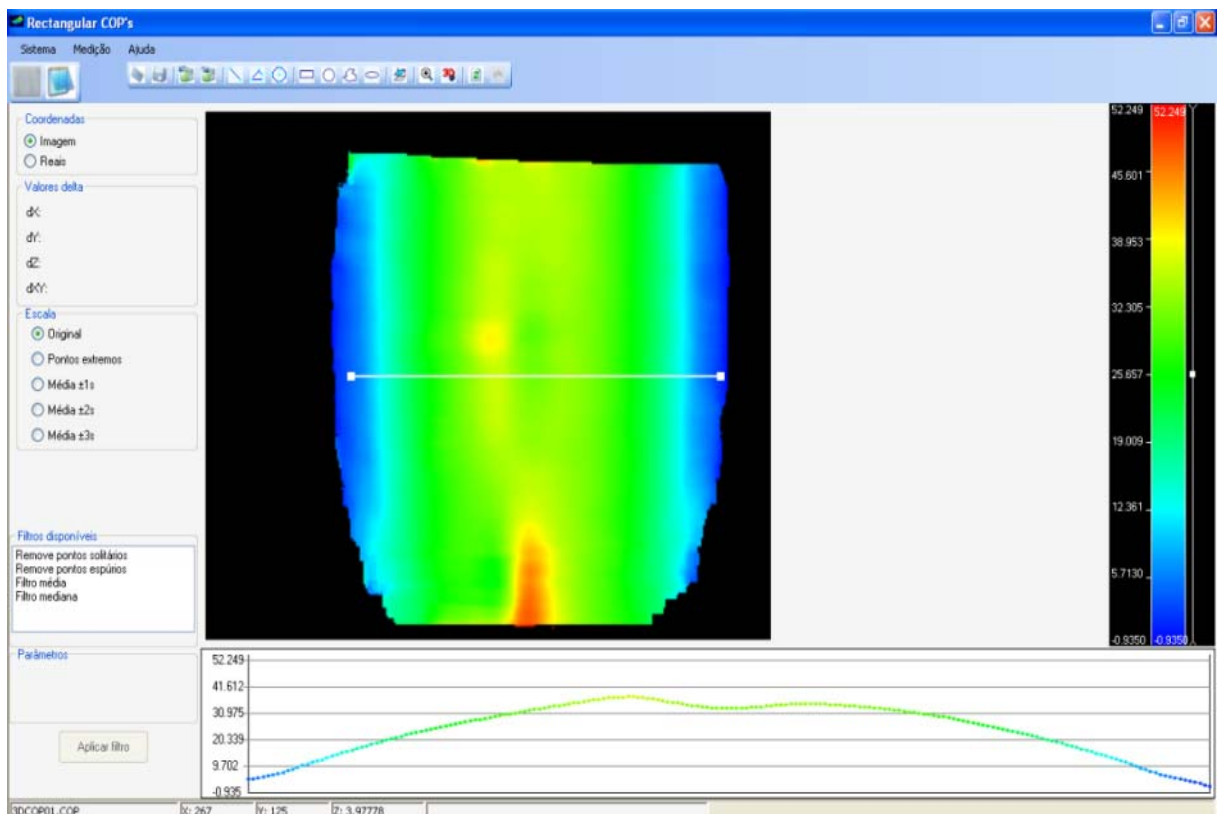


Figura 30 Interface do software de visualização dos resultados.

Caracterização do Sistema Proposto

Não foi possível construir um protótipo do sistema exatamente da forma como foi planejado. Dificuldades de ordem prática, como a escassez de recursos e de tempo para refazer alguns dos módulos, que apresentaram desempenho aquém do esperado, levaram à materialização de uma versão do sistema com algumas limitações. As duas câmeras USB disponíveis apresentam excelente ângulo de abertura e resolução espacial nominal adequada. Na prática, utilizando o *driver* de software disponibilizado pelo fabricante só foi possível adquirir imagens compactadas, o que deteriorava o número de pixels adquiridos para $\frac{1}{4}$ do valor nominal e reduziram o número de níveis de cinza digitalizados. A outra principal limitação está localizada no sistema de acionamento para aplicar a defasagem nas sombras projetadas, cuja resolução resultou muito abaixo da necessária. O desempenho desta versão limitada é avaliado neste capítulo. Na continuidade do projeto, dentro do qual este trabalho está inserido, serão realizadas as modificações necessárias e uma nova avaliação será realizada.

Com o intuito de caracterizar os desempenhos metrológico e operacional do sistema de medição construído foram planejados e realizados alguns experimentos controlados. Em um primeiro experimento foram caracterizadas as curvas de resposta para dois modelos de câmera – duas webcams USB e duas câmeras Firewire –, a fim de avaliar o seu desempenho e determinar suas curvas de correção.

Para caracterizar o desempenho do protótipo construído foram realizadas medições de duas superfícies de referência: uma plana e outra anelada, ambas mensuradas também numa máquina de medir por coordenadas. Também foi mensurado um cilindro intacto e outro deformado, a fim de demonstrar o comportamento do sistema numa condição próxima de sua aplicação fim.

Uma análise das principais fontes de incerteza do sistema também foi realizada, a fim de avaliar seu desempenho metrológico, assim como uma análise comparativa dos requisitos alcançados versus os requeridos para o sistema.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

4.1.1 Avaliação da curva de resposta das câmeras

O pleno conhecimento do comportamento não linear da curva de resposta da câmera é fundamental para o bom desempenho do sistema de medição. A curva de linearidade compara o valor referente à luminosidade captada num pixel com o valor de referência que se pretendia projetar naquele pixel. Esse processo é usualmente realizado para calibração de sistemas fotogramétricos, onde a projeção de franjas é realizada por um projetor multimídia. Com o conhecimento da curva de resposta pode-se adequar o padrão projetado de forma que, quando franjas com perfil idealmente senoidal sejam projetadas elas sejam detectadas pela câmera com um perfil verdadeiramente senoidal.

As características do sistema de projeção utilizado tornam difícil comparar o padrão idealmente projetado com o adquirido pela câmera, visto que na disposição dos elementos internos do sistema de iluminação há variáveis não bem conhecidas, que dificultam a determinação do valor de referência a ser idealmente projetado. Dessa forma, o experimento foi útil para avaliar a utilização de um par de câmeras do tipo webcam USB Logitech QuickCam Pro 9000 1600x1200, que possuíam ângulo de visão adequado ao projeto. O mesmo experimento foi realizado com um par de câmeras firewire Point Grey Dragonfly 640x480, cujo sistema de lentes possuía aproximadamente um terço do ângulo de abertura necessário.

O procedimento utilizado para essa avaliação foi o mesmo para os dois pares de câmeras, que estavam posicionados proximamente, com a aquisição de imagens realizada no mesmo instante. Utilizou-se o protótipo construído para realizar esse experimento, onde as quatro câmeras foram adaptadas de forma que visualizassem o padrão de franjas no mesmo instante e a aquisição sincronizada. Um anteparo plano foi utilizado para a projeção das franjas. Deslocou-se a fase da franja em pequenos incrementos de $1/20$ do período de forma a adquirir 20 imagens num comprimento de onda da franja. Selecionou-se um pixel no centro da imagem e seu valor de luminosidade foi adquirido em cada imagem mantendo desligada a função de auto-ganho das câmeras. Os dados levantados deveriam idealmente apresentar perfil senoidal. Para avaliá-lo, foram determinados os coeficientes da série de Fourier de primeira ordem para construir um perfil de referência. O gráfico dos pontos experimentais versus pontos simulados a partir dos coeficientes da série de Fourier permitiu avaliar a curva de resposta combinada do sistema de projeção e da câmera.

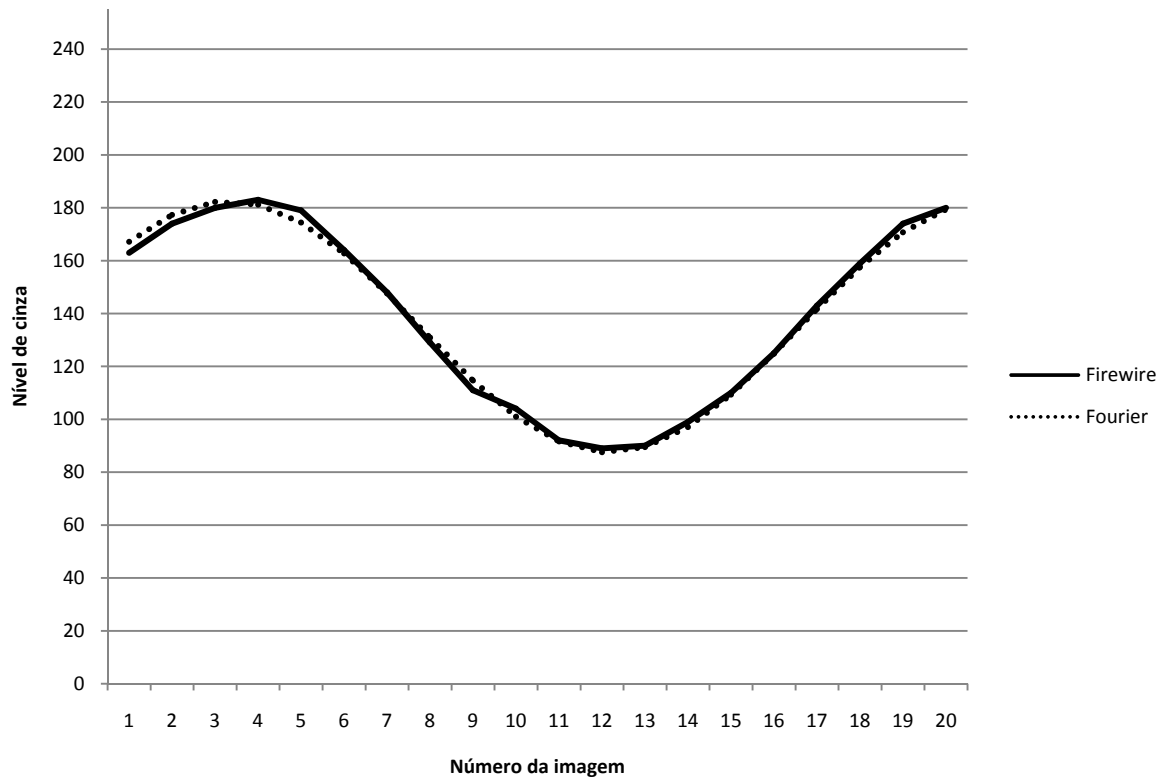


Figura 31 Representação no nível de cinza medido no pixel em cada imagem adquirida na câmera Firewire.

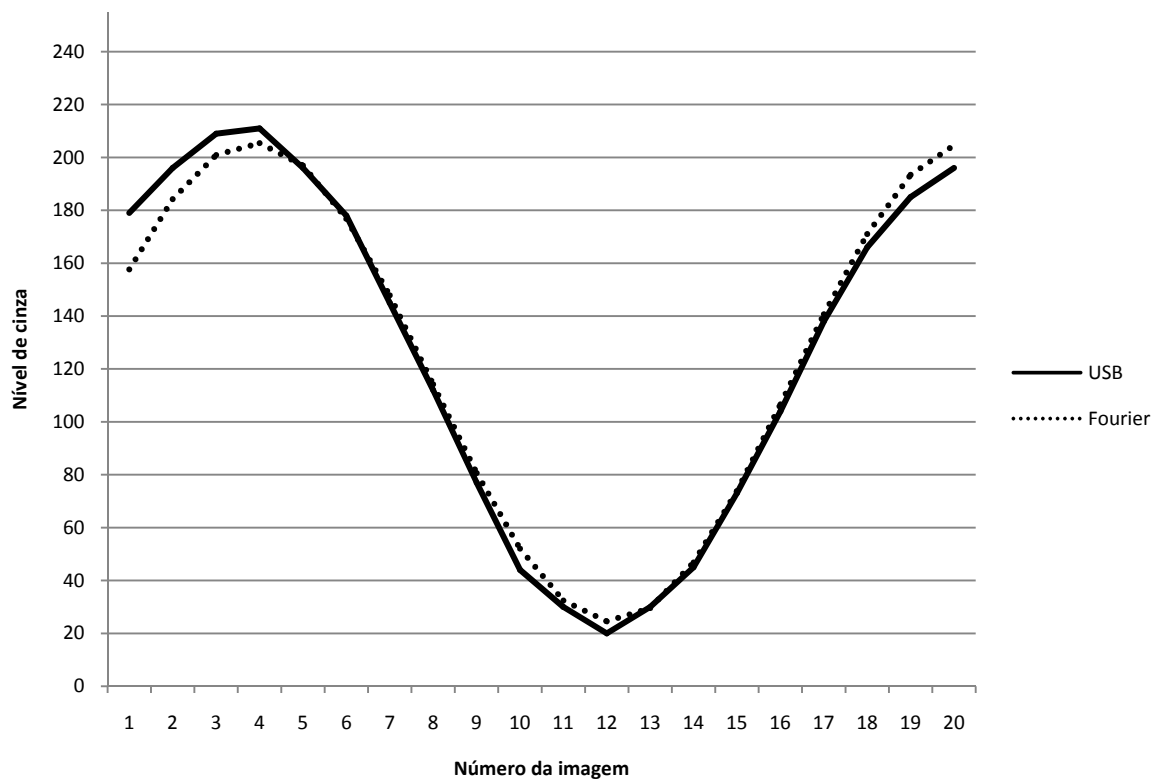


Figura 32 Representação no nível de cinza medido no pixel em cada imagem adquirida na câmera USB.

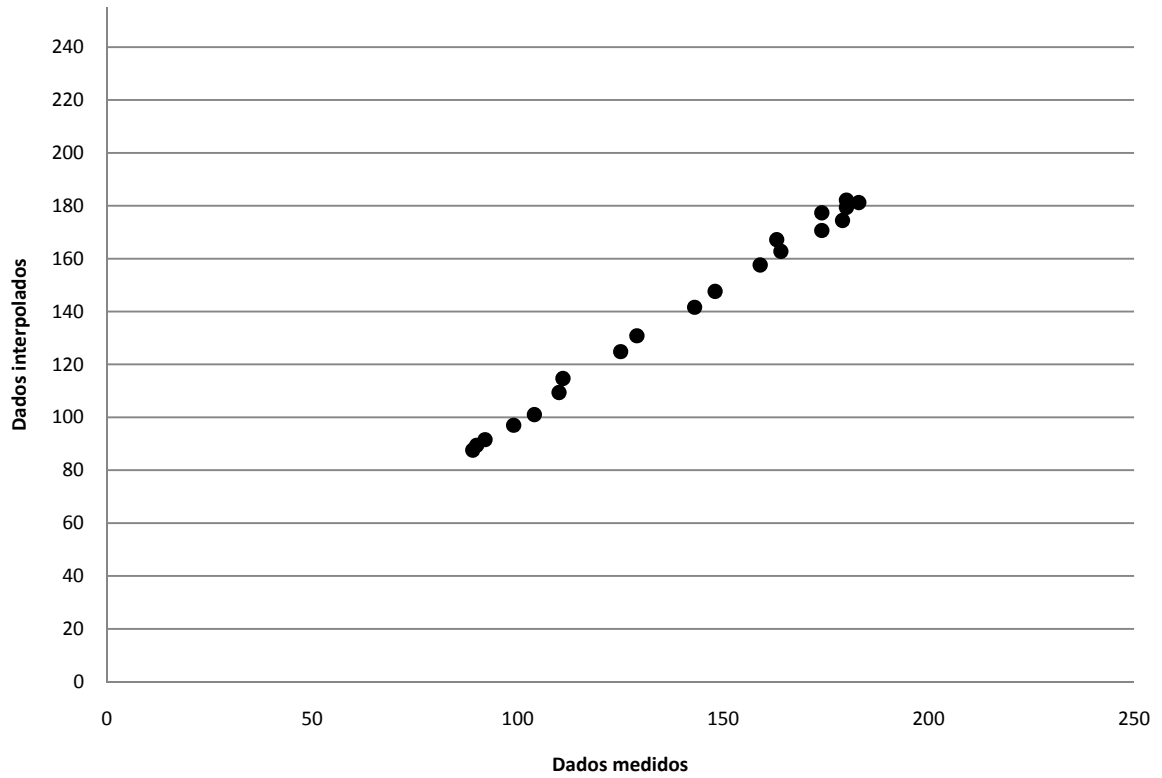


Figura 33 Representação dos valores medidos versus valores de referência para a câmera Firewire.

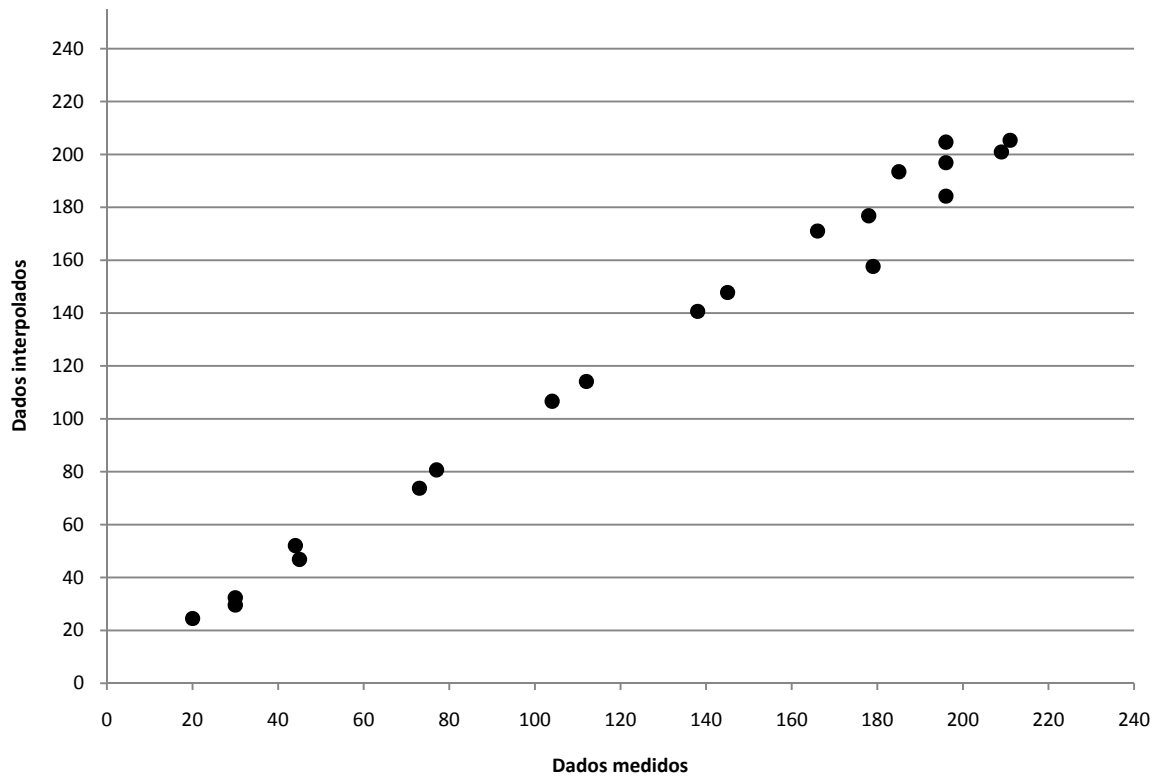


Figura 34 Representação dos valores medidos versus valores de referência para a câmera USB

Nas figura 33 e 34, observa-se a diferença entre o valor medido e o de referência resultante da aplicação dos coeficientes de Fourier, gerando coeficientes lineares diferentes. A câmera firewire tem uma resposta mais linear que a USB. O desvio padrão calculado para a diferença entre os valores medidos e de referência para a câmera USB foi 7,2 níveis de cinza, enquanto que para a câmera firewire ficou em 2,9 níveis de cinza. Também se observa que o ajuste de brilho em cada câmera é diferente para esse mesmo padrão de projeção. No caso da câmera firewire, a regulagem do diafragma é feita manualmente e é muito sensível a pequenos movimentos. Para não obter imagens saturadas, que seriam prejudiciais à medição, optou-se pelo ajuste que apresentou os resultados acima. Isso explica a diferença de sensibilidade à níveis de cinza observados nas figura 33 e 34.

Durante os testes observaram-se outras características negativas no desempenho da câmera USB que levaram à seleção da câmera firewire. Uma análise da imagem adquirida pela USB em sua resolução máxima sem interpolação (1600 x 1200) revelou sensível perda de resolução em função da compressão da imagem, que possivelmente é realizada no hardware da câmera. Não foi encontrada uma forma de evitar essa compressão no software de aquisição, que apresentou uma imagem com resolução sensivelmente mais grosseira, quando comparada com a imagem da câmera firewire. Em contato com o fabricante, obteve-se a resposta de que a câmera comprime as imagens para melhor desempenho em videoconferências. Na figura 35, pode-se notar a diferença entre as imagens.

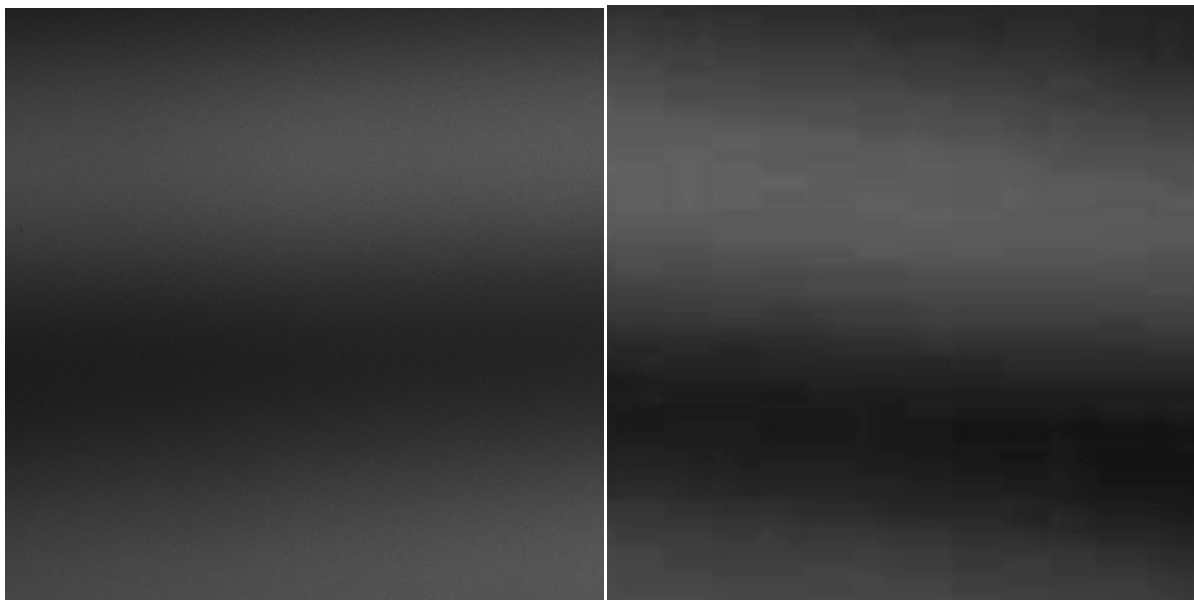


Figura 35 (a) À esquerda parte da imagem adquirida pela câmera Firewire. (b) À direita parte da imagem adquirida pela câmera USB.

A não-linearidade observada na resposta da câmera firewire na faixa de valores analisada não se mostrou muito intensa. Desta forma, não foi adotada nenhuma providência

para melhorá-la. Este ensaio foi útil para selecionar a câmera mais apropriada dentre as opções disponíveis e para eliminar a necessidade de utilização de tabelas ou funções de linearização.

4.1.2 Avaliação da influência da utilização de duas frequências de franjas com diferença menor que uma franja na remoção do salto de fase

Embora a teoria exposta no capítulo 3 onde é citado o método de remoção de salto de fase com o método do batimento não explicita, é de senso comum a utilização no método de duas frequências de franjas com diferença de até uma franja completa, ao longo da imagem na faixa visualizada pela câmera. Isso se deve principalmente ao fato que a utilização de uma diferença entre frequências maior que uma franja geraria como resultado um mapa com a presença de um salto de fase.

Contudo, a utilização de frequências com diferença menor que uma franja completa também gera problemas. Como é possível notar na figura 37 aplicando o algoritmo utilizado para imagens simuladas com N e $N+0,5$ (figura 36) observam-se artefatos presentes na remoção do salto. Esse problema pode ser corrigido aplicando-se, na equação (13) correspondente a diferença de fase, um fator de correção p , igual à diferença fracionária real entre os números de franjas de cada imagem, sendo um número entre 0 e 1. A diferença de fase entre os dois mapas deve ser calculada da mesma forma e usada como valor de referência. O valor de referência utilizado para a remoção de cada mapa também deve ser multiplicado por $\left(\frac{N}{p}\right)$ e $\left(\frac{N+p}{p}\right)$ ao invés da multiplicação por N e $N+1$. Assim, a fase final será calculada por:

$$(26) \quad \varphi(x, y) = \frac{\varphi^N(x, y) + \left(\frac{N}{N+p}\right)\varphi^{N+1}(x, y)}{2}$$

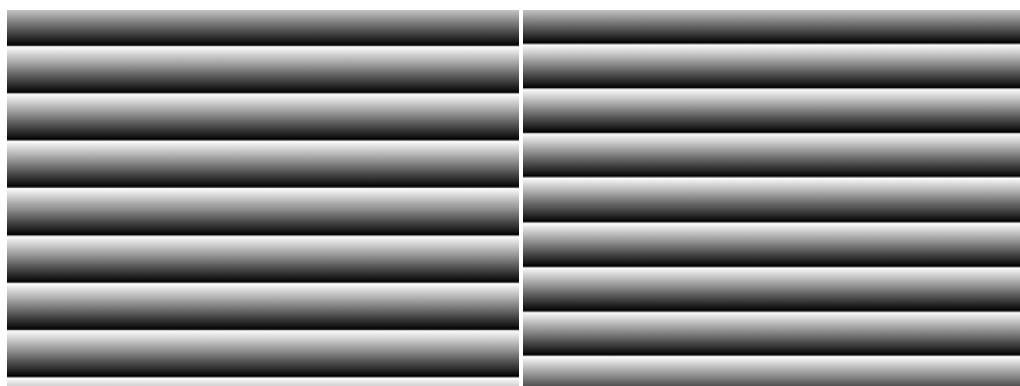


Figura 36 Mapas de fase com diferença de 0,5 comprimento de franja entre eles.

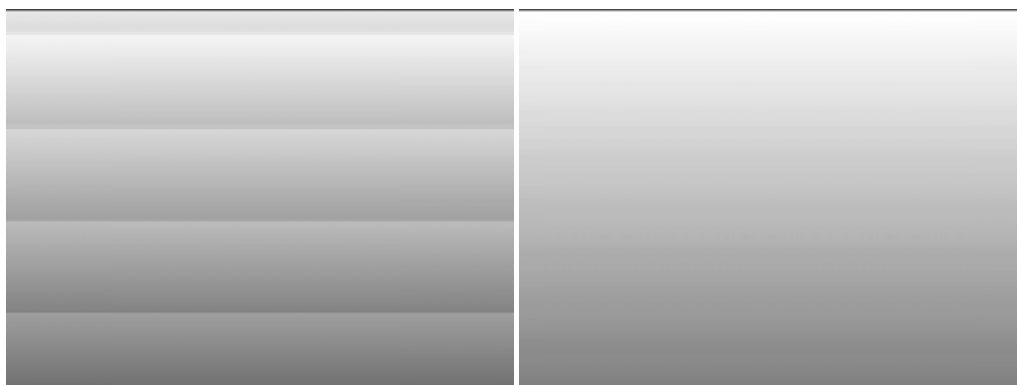


Figura 37 Mapas de fase com salto removido (a) à esquerda sem correção (b) à direita com correção.

4.1.3 Demonstração do processo de medição

O processo de medição possui várias etapas de processamento das imagens que são aqui mostradas. Na figura 38 podem-se observar as imagens que compõem o processo de cálculo para a medição de um plano. Antes do cálculo da subtração dos mapas de fase é realizada a aplicação de um filtro passa-baixas, a fim de eliminar o ruído presente nos mapas [5].

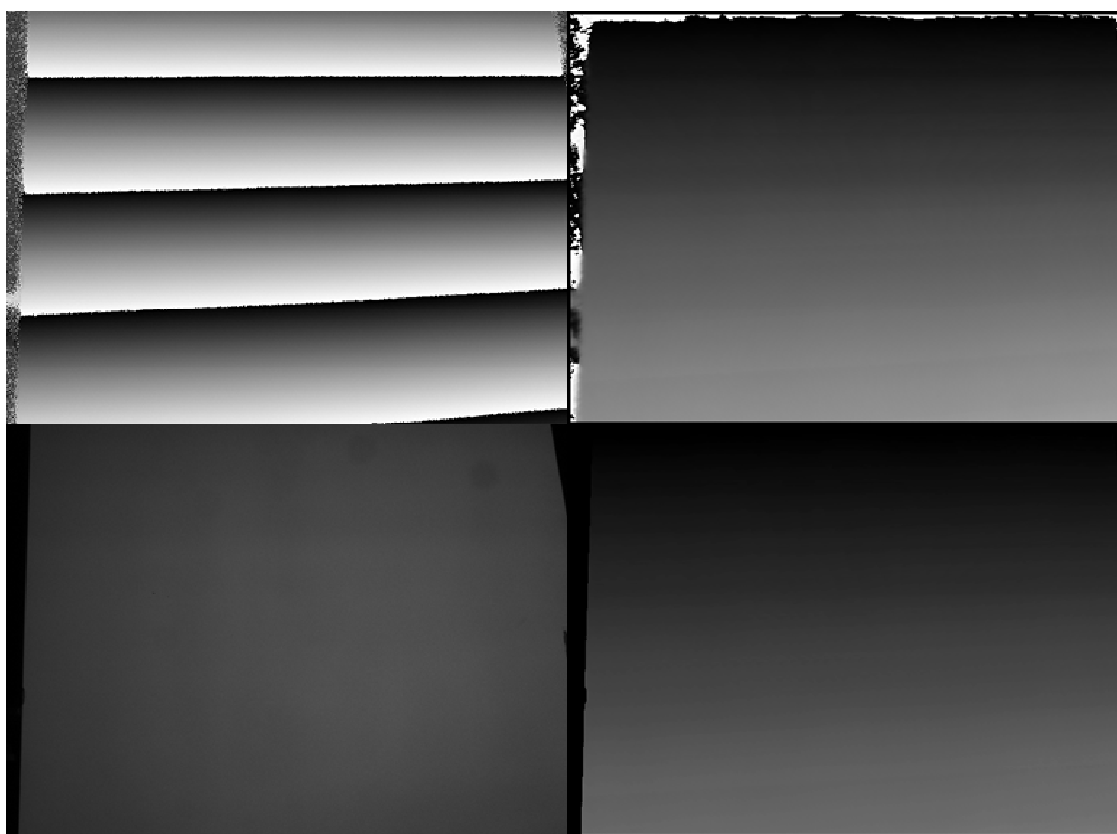


Figura 38 Imagens resultantes do processamento das imagens de apenas uma câmera durante a medição de um plano: (a) acima à esquerda, mapa de fase relativa; (b) acima a direita subtração de dois mapas de fase relativa gerando o mapa de fase de referência; (c) abaixo a esquerda, mapa de modulação; (d) abaixo a direita, mapa de fase absoluta.

Como esse mapa de fase relativa possui descontinuidades, o filtro é aplicado em dois mapas calculados a partir dele: um relativo ao seno da fase relativa, outro relativo ao cosseno da fase relativa. A alta frequência é eliminada no mapa de seno e cosseno. Então, os dois mapas são combinados novamente, formando um mapa de fase relativa filtrado. Na figura 39 observa-se o efeito da aplicação do filtro num perfil de um mapa de fase relativo antes e depois da aplicação.

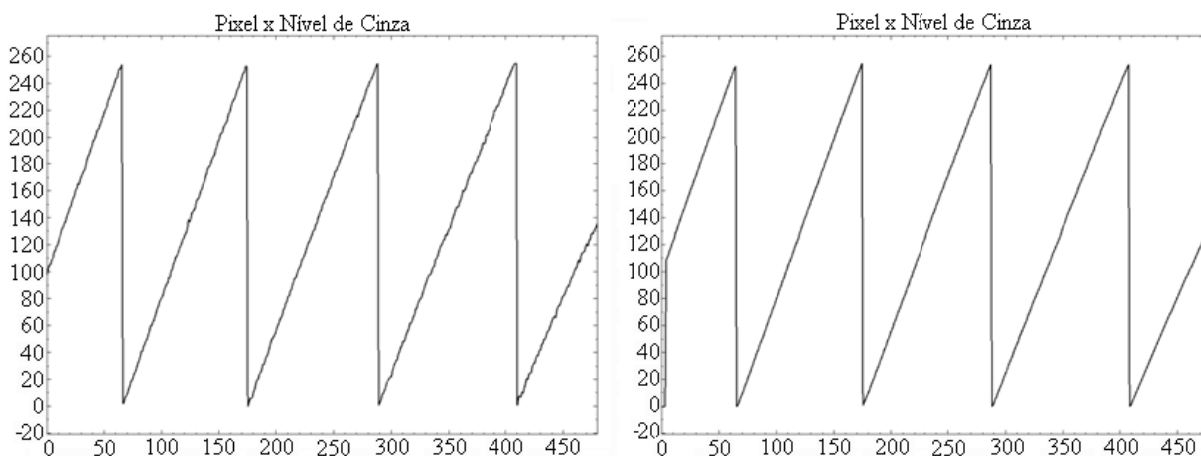


Figura 39 Perfil de dois mapas de fase relativos (a) à esquerda, filtrado e (b) à direita, sem filtro.

4.2 ENSAIOS COM PADRÕES E PEÇAS DE GEOMETRIA CONHECIDA

Ensaaios envolvendo superfícies com geometrias conhecidas fornecem informações sobre o desempenho do protótipo em várias situações diferentes. Foram realizados ensaios com duas superfícies de referência (uma plana e outra anelada) e a medição de um cilindro, para verificação da proximidade dos resultados obtidos com os valores de referência.

4.2.1 Estimativa de planeza e repetitividade na medição de um padrão de referência

Para estimar a repetitividade do protótipo, foram realizadas cinco medições repetidas de uma mesma superfície plana com extensão de 300 mm por 400 mm disposta de forma aproximadamente paralela ao plano XY do sistema de coordenadas global. Uma nuvem de aproximadamente 40000 pontos foi adquirida. Comparando os valores de z obtidos para cada conjunto (x, y) do sistema de coordenadas de cada medição foi calculado o desvio padrão para cada ponto e obtido o valor médio de 0,7 mm, gerando uma incerteza de 2,0 mm com 95% de confiança. O valor obtido foi considerado elevado. Foi, possivelmente, influenciado pelo fato de que as medições foram realizadas com deslocamentos manuais, através de uma mesa angulada, o que piora a repetitividade do processo.



Figura 40 Medição do padrão de referência plano no protótipo e na máquina de medir por coordenadas.

Para a estimativa de planeza, foi utilizado um padrão de referência composto de uma placa de vidro de 5 mm de espessura pintado com tinta fosca na cor branca. Para obter um valor de referência para a comparação, o padrão foi mensurado em uma máquina de medir por coordenadas Mitutoyo modelo Beyond A916, e sua planeza foi estimada com esses dados via método dos mínimos quadrados em 0,1 mm. O mesmo procedimento foi realizado com o protótipo, e via o método dos mínimos quadrados, resultando no valor de 1,2 mm.

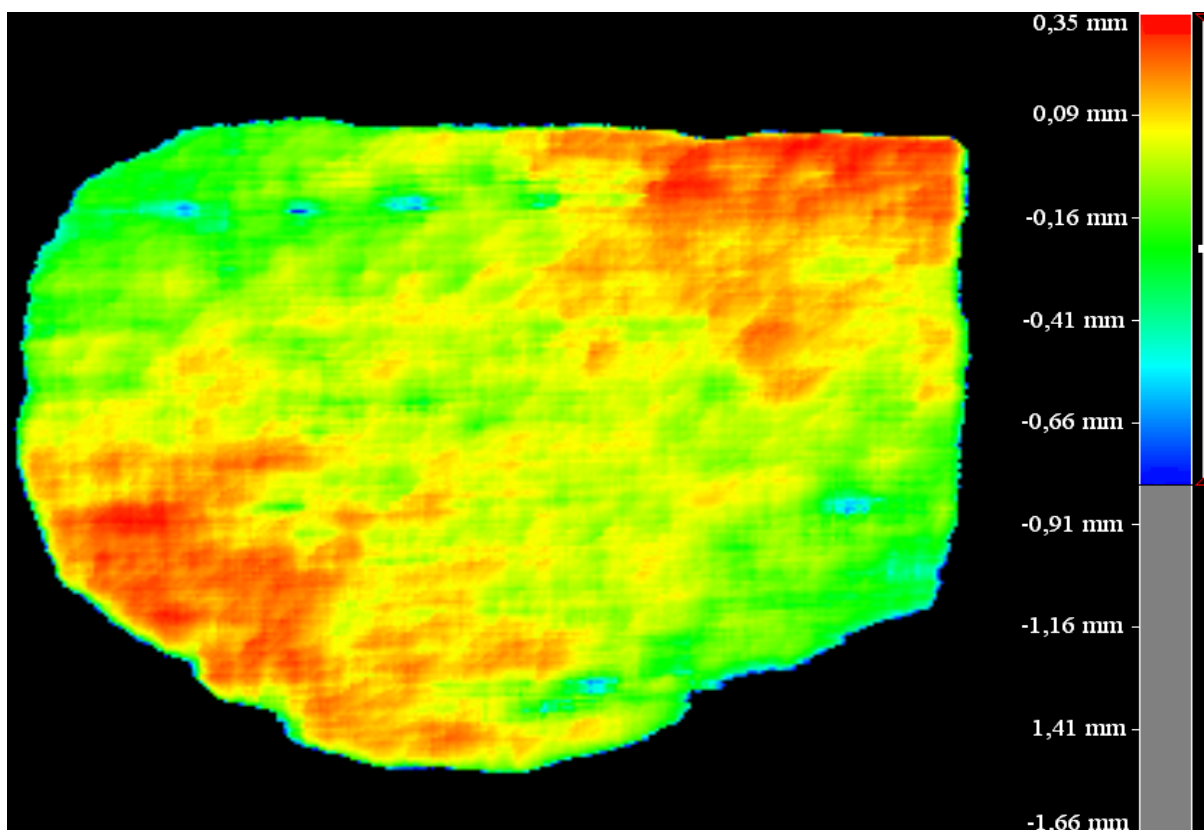


Figura 41 Visão bidimensional do plano medido pelo protótipo

Na medição realizada pelo protótipo foram descartadas as regiões próximas às bordas, pois são regiões onde os dados não são precisos.

4.2.2 Estimativa da incerteza na determinação de perfis em padrão de referência anelado

Para a estimativa de incerteza na determinação de perfis foi confeccionado um padrão de referência denominado “anelado”, onde há várias regiões com valores de raio diferentes e condizentes com os valores mínimo e máximo dos defeitos esperados na superfície externa de dutos (conforme a figura 42). A largura máxima do padrão é 330 mm, altura máxima é 165 mm e comprimento é 655 mm.

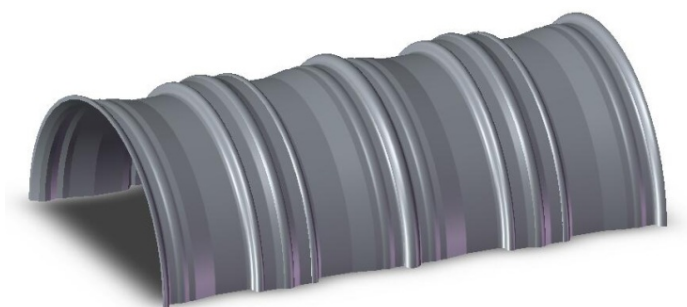


Figura 42 Padrão de referência anelado

Para comparar os resultados, a geometria de um mesmo perfil longitudinal no padrão foi medida na máquina de medir por coordenadas e no protótipo, conforme a figura 43. A posição escolhida para a comparação entre os perfis medidos foi a linha central da superfície do padrão, visto que é a mais simples para fazer a comparação de forma dos dois resultados de medição. Cerca de 350 pontos foram medidos pela máquina de medir por coordenadas ao longo deste perfil e 234 pontos pelo sistema óptico desenvolvido.



Figura 43 Medição do padrão de referência anelado nos dois sistemas de medição: (a) à esquerda no protótipo, e (b) à direita na máquina de medir por coordenadas.

Como podem ser verificados, os resultados do sistema óptico apresentam níveis de erros aleatórios aceitáveis em algumas áreas e muito elevados em regiões localizadas. Há também uma componente sistemática em algumas regiões com inclinações mais íngremes. Calculou-se o desvio padrão para estimar o valor dessa componente aleatória considerando todos os pontos do perfil e chegou-se ao valor de 10,9 mm.

O elevado nível de ruído encontrado em algumas partes do gráfico não foi filtrado no processo, e demonstra pontos espúrios em relação à medição. Decorrem principalmente da baixa modulação em algumas regiões localizadas, provocadas pelo posicionamento da iluminação e das câmeras em relação ao padrão. Esse posicionamento foi escolhido de forma que as câmeras enxergassem a maior área possível, diminuindo a iluminação em alguns pontos do padrão.

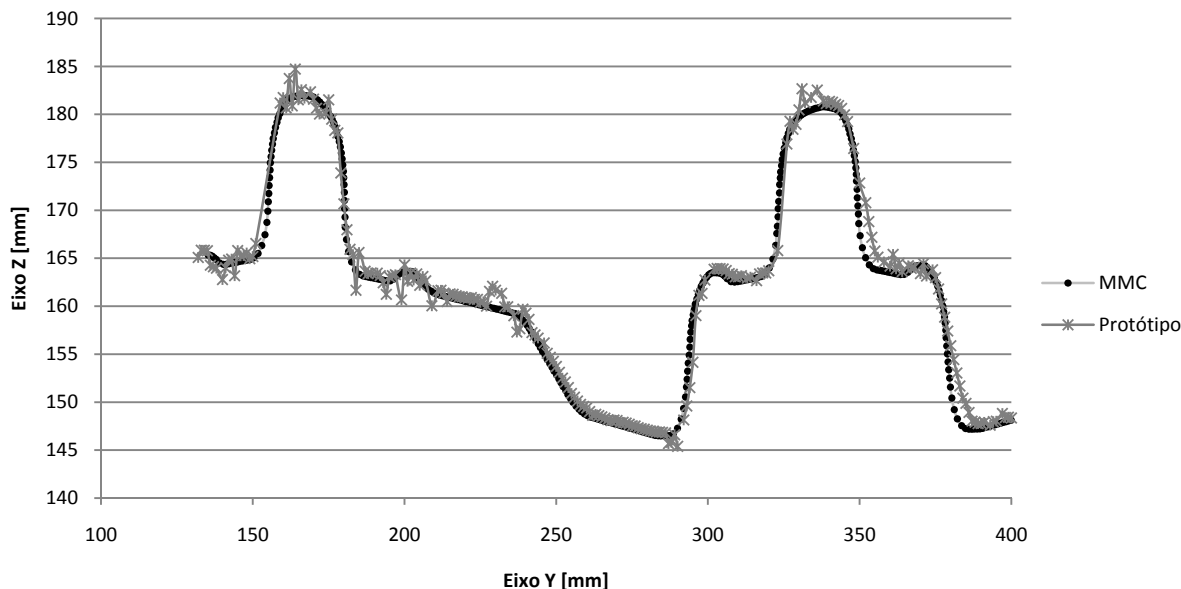


Figura 44 Perfil do padrão anelado mensurado pelo protótipo e pela máquina de medir por coordenadas.

A figura 45 mostra a representação tridimensional de parte da superfície medida. Os valores em milímetros correspondentes à escala de cores adotada são representados na parte direita da figura. Em um único posicionamento só foi possível medir o trecho representado.

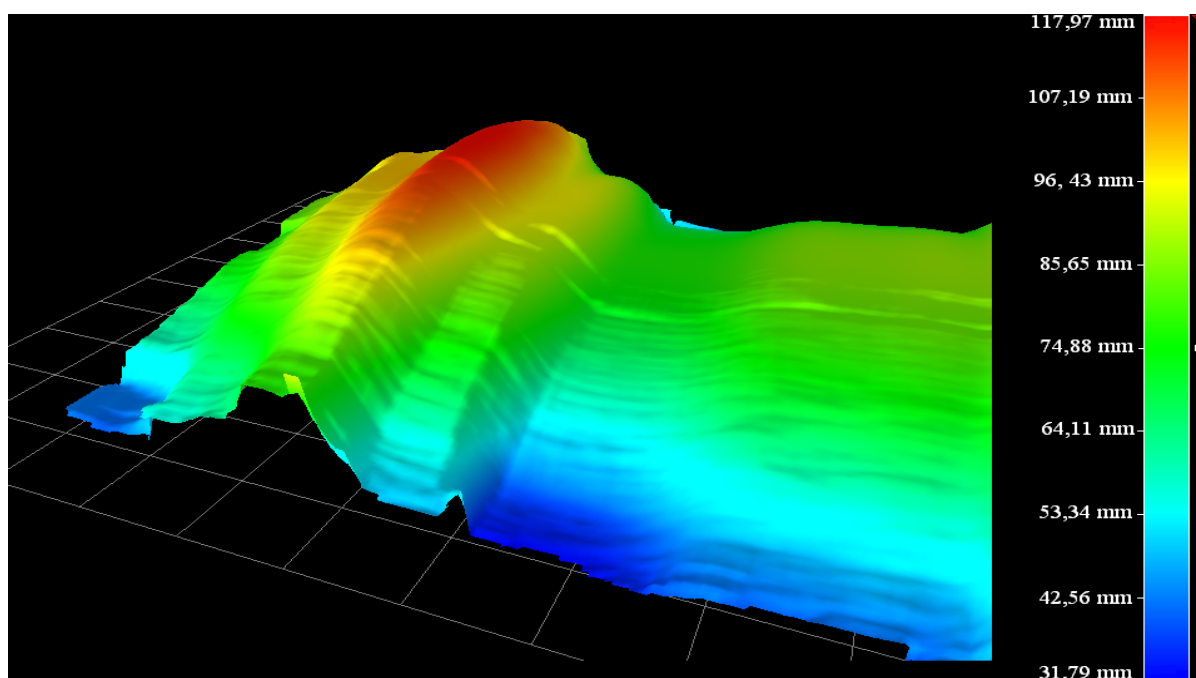


Figura 45 Visualização tridimensional da medição do padrão anelado.

4.2.3 Medição de um cilindro amassado

Foi realizada a medição de um cilindro de PVC com amassamento provocado por calor, a fim de avaliar o comportamento do sistema, conforme exposto pela figura 27. Também foi realizada a medição de outra seção do tubo sem amassamento, para perceber as diferenças entre as duas medições. Os resultados obtidos com as medições do tubo com amassamento foram coerentes com o defeito provocado. Os resultados do tubo sem amassamento mostraram alguns defeitos, provenientes possivelmente da sua construção e transporte. Mesmo assim foram coerentes com a peça a ser medida. Foi medida uma área aproximada de 150 mm por 200 mm.

Na figura 46 observa-se a visão bidimensional do amassamento causado no tubo de PVC. A linha branca horizontal dessa imagem denota o ponto em que o perfil da superfície foi mapeado. Esse perfil encontra-se na parte inferior da figura. A figura 47 mostra a mesma visão bidimensional da figura anterior, porém da parte intacta do tubo de PVC. A linha branca horizontal denota de onde o perfil contido na parte inferior da figura é localizado. A figura 48 mostra a visão tridimensional do tubo amassado.

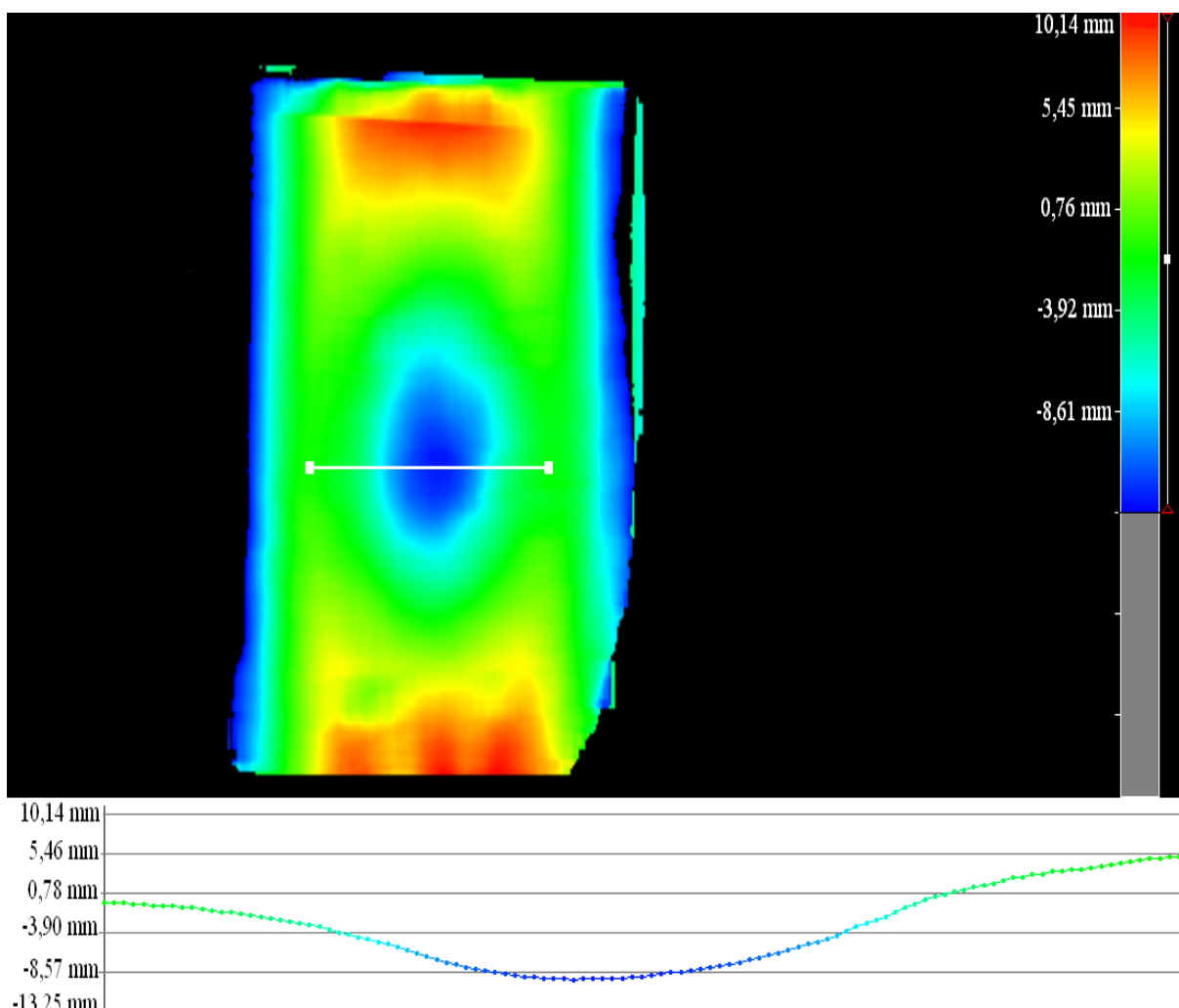


Figura 46 Visão bidimensional e perfil da medição do tubo com amassamento.

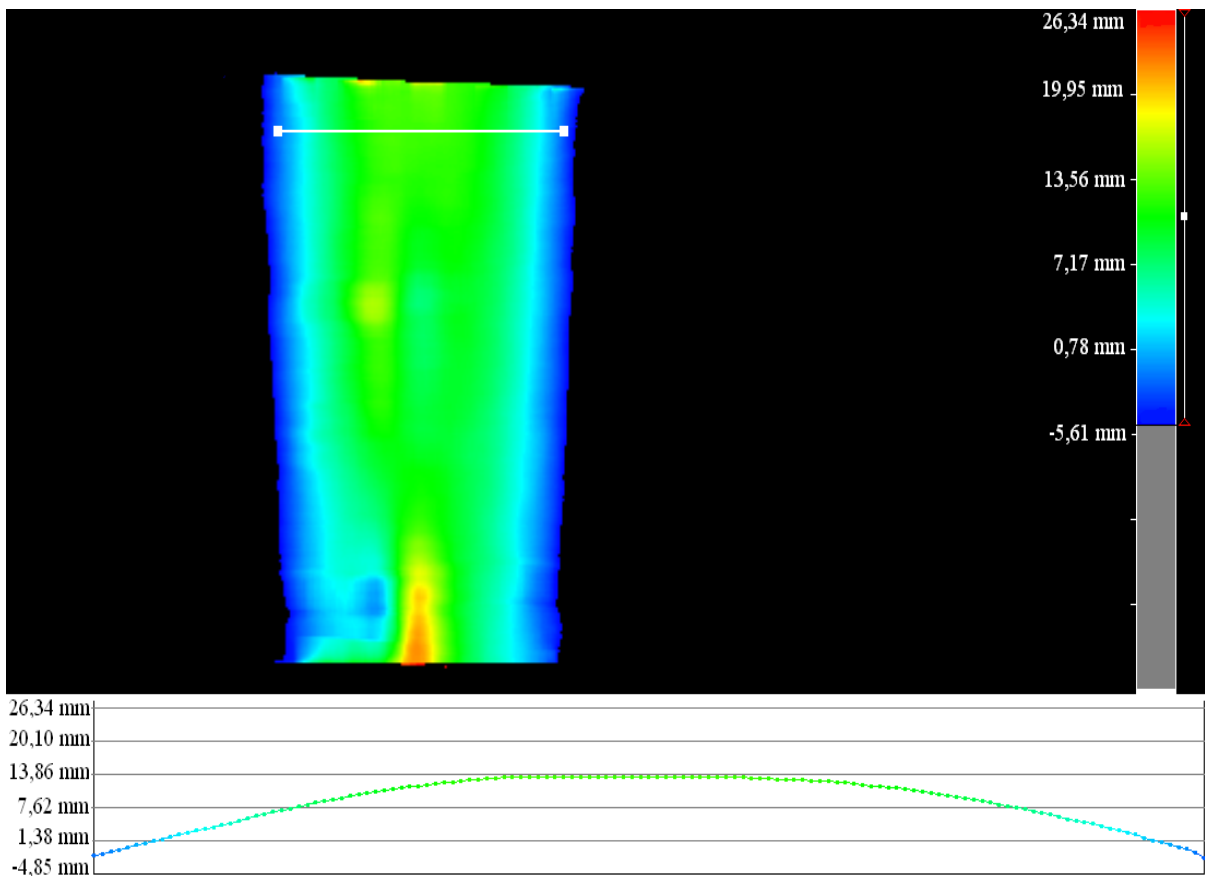


Figura 47 Visão bidimensional e perfil da medição do tubo sem amassamento

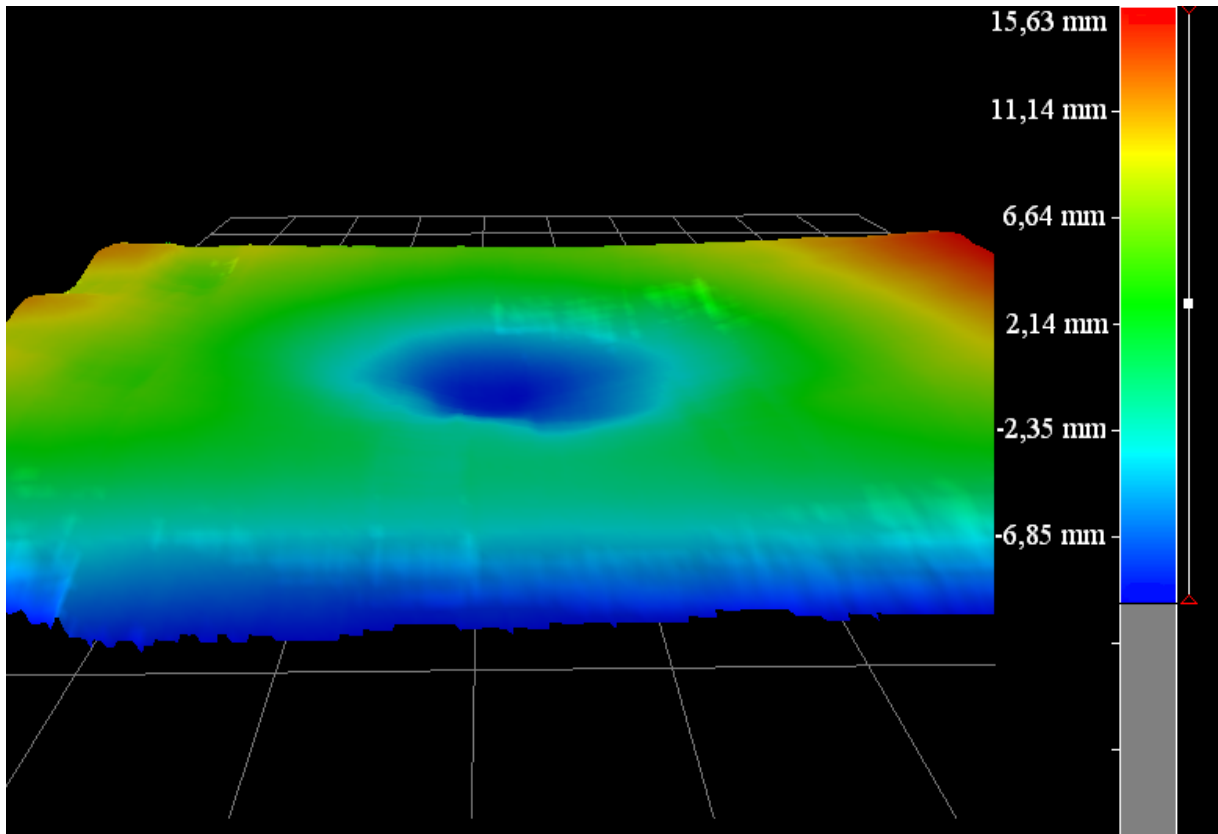


Figura 48 Visualização tridimensional da medição do cilindro com amassamento

4.3 AVALIAÇÕES DO DESEMPENHO DO SISTEMA

4.3.1 Metrológica

As fontes de incerteza mais influentes na medição podem ser visualizadas no diagrama de *Ishikawa*, ou *espinha de peixe*, mostrado na figura 49.

A temperatura pode alterar a geometria do mensurando, porém de maneira pouco notada nesse tipo de medição. A vibração durante o processo de aquisição de imagens pode ocasionar falhas nos mapas de fase, como distorções, surgindo incertezas no resultado final. A poeira pode afetar tanto a câmera quanto o mensurando, porém seu efeito deve ser mínimo nas situações aplicáveis. Quanto às componentes relativas ao mensurando, cuidados como iluminar de forma homogênea toda a superfície pode se tornar difícil dependendo do mensurando, o que pode ocasionar áreas de baixa modulação, prejudicando a medição. Para minimizar as influências do meio ambiente nos ensaios descritos neste capítulo as medições foram realizadas sobre uma mesa óptica isolada de vibrações, em um ambiente limpo, com temperatura e iluminação controlada. A pintura do mensurando com tinta branca fosca melhorou a homogeneidade óptica da superfície medida.

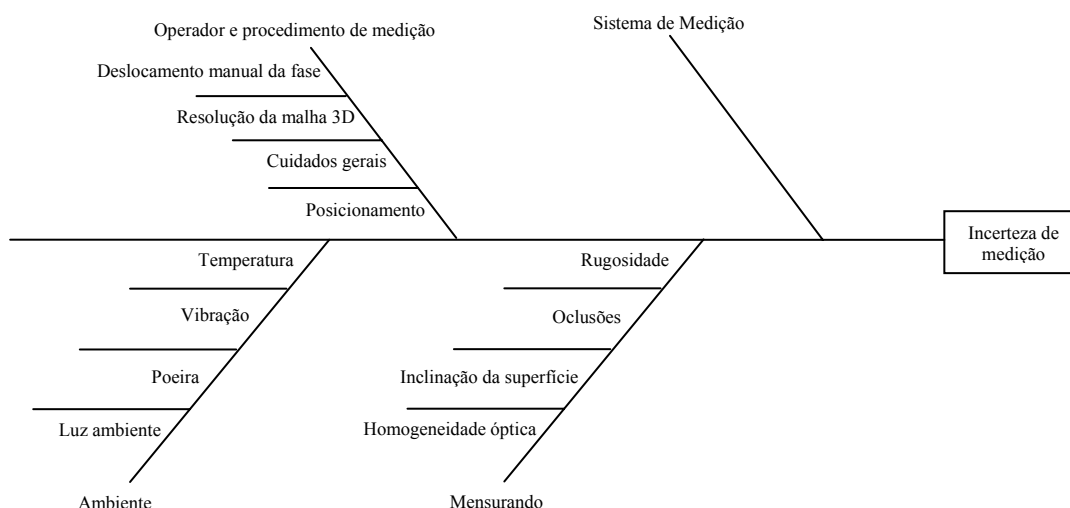


Figura 49 Diagrama de *Ishikawa* para o processo de medição, pela sua complexidade, o sistema de medição será representado em outra figura.

Como foi substituído o motor de passo por uma mesa de deslocamento angular, as componentes de incerteza relativas ao operador e processo de medição passaram a ter uma influência forte no processo de medição. O posicionamento correto do sistema em relação à peça é necessário para que se mantenha constante a frequência de franjas calculada para o

processo, necessário para resultados precisos. A quantidade de franjas projetadas interfere no cálculo da remoção de fase, gerando incertezas no cálculo do valor da fase para cada pixel. O deslocamento do passo precisa ser constante em todas as imagens. Certamente o cuidado com que o operador faz a medição tem impacto sobre a qualidade dos resultados. O ramo “Sistema de Medição” contém muitos itens e será detalhado na figura 50.

Como se pode notar na figura 50, há várias componentes de incerteza relativas ao sistema de medição. Para o ramo *algoritmo e defasagem* algumas observações devem ser realizadas. Qualquer sistema computacional está susceptível a erros decorrentes de aproximações numéricas ruins e de outras não idealidades. O algoritmo utilizado tem um papel forte na minimização desses erros. Algoritmos mais robustos apresentam resultados para o cálculo do ângulo de fase confiáveis mesmo quando o deslocamento de fase entre os passos é diferente de 90°, como é o caso do algoritmo de cinco passos utilizado. Mesmo assim, conforme discutido no capítulo 3 sabe-se que cada algoritmo tem uma incerteza associada e parâmetros ideais de funcionamento que devem ser respeitados.

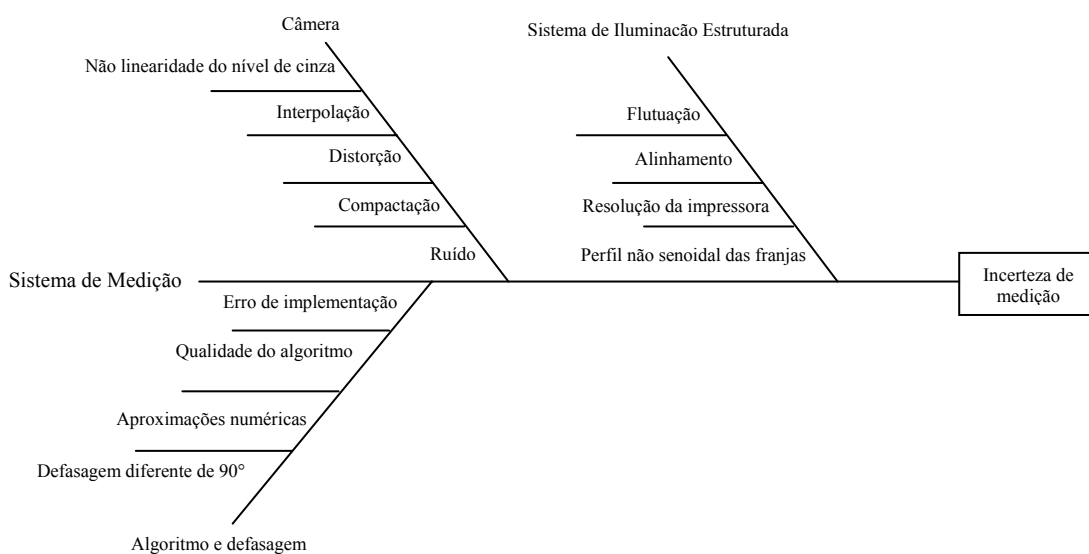


Figura 50 Diagrama de Ishikawa para o sistema de medição.

Em relação ao sistema de iluminação estruturada foram detectados erros de fabricação e posicionamento dos componentes. A escolha por LEDs tornou a flutuação do nível de iluminação uma fonte de incerteza quase desprezível, de forma que, se aliados com uma fonte de bom comportamento, ou seja, que forneça tensão de forma constante e quase invariável, pode-se considerar a sua influência no processo de medição como desprezível. O alinhamento relativo dos LED com os demais componentes é um fator com o qual deve-se tomar cuidado, visto que pequenos desalinhamentos podem causar redução de contraste na projeção. Para

minimizar este efeito, os LEDs devem ser soldados de forma que mais se aproximem de uma linha reta. Outro alinhamento de interesse é aquele entre a linha de LEDs e o eixo do tubo de acrílico, pois a localização pode influenciar no número de franjas projetadas, bem como na diferença de frequência entre as duas projeções, provocando dificuldades no algoritmo de remoção do salto de fase. Experimentos realizados com o protótipo mostraram que a resolução da impressora utilizada para imprimir as franjas tem importância desprezível, no contexto da tecnologia atual de impressão. Apenas defeitos mais grosseiros ou baixa resolução da imagem a ser impressa pode causar problemas na impressão.

O padrão não senoidal das franjas associado com uma diferença entre as frequências de batimento menor que um comprimento de franja influencia de maneira moderada nos resultados. A solução proposta para minimizar a influência do padrão não senoidal das franjas projetadas foi a utilização de algoritmos que extraem do sinal os coeficientes do primeiro harmônico, conforme apresentado na seção 3.1.1 e não utilizam como premissa o fato do perfil das franjas ser perfeitamente senoidal, por isso novamente destaca-se a importância da escolha do algoritmo. Quanto ao problema com a frequência de batimento entre as frequências projetadas, foi experimentalmente determinado um fator de correção, que praticamente resolve esse problema.

Alguns fatores ligados à câmera influenciam diretamente na confiabilidade do resultado final da medição. A interpolação e compactação das imagens utilizadas diminuem a resolução utilizada. A compactação causa perda de resolução em dois aspectos: nos níveis de cinza e espacialmente, resultando no efeito de “quadricular” a imagem (efeito observado no experimento com a câmera USB), provocando erros expressivos no cálculo de fase e, conseqüentemente, no processo de triangulação dos pontos. As distorções dos conjuntos câmera-lente utilizados geram erros sistemáticos. Tais problemas são tratados no momento da calibração das câmeras e corrigidos quando necessário. O maior ou menor nível de ruído depende fortemente do modelo da câmera, porém sempre estará presente. A resposta não linear da câmera pode ser compensada a partir do levantamento da curva de resposta real do sensor levantada experimentalmente. Essa correção é muito utilizada quando são usados projetores multimídia, pois, neste caso, o efeito é intensificado pela combinação das não linearidades da curva de resposta da câmera e do próprio projetor. No caso do sistema desenvolvido, verificou-se que este efeito não é muito influente e que, para o caso das câmeras firewire, não compensa aplicar uma curva de correção.

4.3.2 Operacional

No atual estágio, o protótipo realiza uma medição em aproximadamente 10 minutos. O elevado tempo de medição decorre principalmente do tempo envolvido na defasagem manual das franjas. O projeto original previa o uso de um motor de passo para realizar a defasagem das franjas. A resolução do motor de passos combinada com a razão de transmissão selecionada se mostraram insuficientes. Como não houve tempo hábil para refazer a transmissão, os testes do sistema foram todos realizados com deslocamento manual. O motor de passo que foi substituído por uma mesa angulada de operação manual, o que tornou o processo de aquisição de imagens mais lento e acrescentou outra fonte de erro que não estaria presente num sistema completamente automatizado.

Com as câmeras firewire e lentes utilizadas, a área de medição efetiva ficou reduzida para $150 \times 200 \text{ mm}^2$, cerca de um terço da área de medição inicialmente estipulada, devido a troca de câmeras. Contudo, os parâmetros geométricos do sistema (altura, comprimento e largura) permaneceram na faixa estipulada para a utilização em dutos de 12'' (diâmetro de 304,8 mm).

Apenas experimentos em laboratório foram realizados e, portanto, não foram levantadas outras questões referentes ao desempenho operacional do sistema em campo.

4.3.3 Considerações finais

Conforme descrito no capítulo 3, alguns requisitos foram estipulados para o sistema. Sendo esse um protótipo desenvolvido com limitações orçamentárias e restrições de tempo, apenas alguns requisitos foram atendidos. Os resultados atingidos mostram que o desempenho do sistema está aquém do pretendido, mas também mostram que os conceitos adotados são válidos e, com a substituição das câmeras, sistema de lentes e do sistema de acionamento que desloca a fase das franjas, o sistema terá grande potencial de alcançar as metas de projeto.

No capítulo seguinte são discutidas as possibilidades para o futuro do protótipo assim como alterações necessárias para o cumprimento dos requisitos estipulados.

CAPÍTULO V

Conclusões

O objetivo do trabalho, de projetar, construir e validar um sistema de inspeção de baixo custo para superfície externa de dutos foi atendido. Demandas concretas do setor do petróleo e gás foram levantadas junto aos potenciais usuários, bem como restrições operacionais pertinentes. Com base nelas, o sistema foi projetado. Entretanto, as restrições orçamentárias e de tempo não permitiram ao protótipo construído atender plenamente as metas estabelecidas para o desempenho metrológico e operacional. Mesmo assim, os resultados e análises realizadas permitiram chegar a uma série de conclusões sobre vários aspectos do sistema e das soluções construtivas adotadas, que são descritas na seqüência. São lições aprendidas que irão contribuir para o aperfeiçoamento do sistema ao longo dos próximos passos do projeto. São aqui agrupadas por subsistema.

Subsistema de iluminação estruturada

- A utilização do sistema composto por tubo de acrílico e LED foi validado, sendo uma tecnologia barata, que necessita de baixa tensão para funcionar, projeta as franjas num ângulo suficiente e exige distância razoável de trabalho, ajudando na portabilidade do sistema.
- A utilização do motor de passo selecionado não mostrou os resultados esperados. Houve perda de passo no motor, causando erros na medição. A utilização de um motor de passo com encoder e uma relação de transmissão apropriada devem resolver esse problema.

Subsistema de aquisição

- A utilização de câmeras de baixo custo só será viável se as imagens não sofrerem nenhum tipo de compressão que leve à perda de resolução;
- A aquisição de imagens coloridas requer conversão para níveis de cinza, o que consome tempo computacional;
- A utilização de câmeras melhores ajudará na medição, desde que lentes adequadas à área de medição sejam utilizadas;

Subsistema estrutural

- É possível reduzir a altura do sistema se forem utilizadas lentes adequadas, levando em conta a visão simultânea das câmeras, a profundidade de foco e o custo;
- A estrutura em “T” foi usada neste trabalho para preservar a flexibilidade do protótipo. Uma vez que a configuração final for definida, será possível diminuir as dimensões e o peso do protótipo;
- O projeto de um protótipo multi-diâmetro é viável com a utilização de uma articulação regulável. Com isso amplia-se a utilização do protótipo não só apenas para dutos, mas várias outras superfícies (incluindo superfícies planas), que necessite inspeção externa, como tanques por exemplo;
- O sistema já apresenta a leveza e portabilidade como características, sendo de fácil manuseio e instalação, mas este item pode ser melhorado;

Software

- Utilizou-se coordenadas cartesianas nas medições. Isso dificulta a observação de defeitos em superfícies cilíndricas.
- O cálculo dos parâmetros geométricos não foi implementado neste trabalho.
- A utilização de apenas um software em todas as partes do processo de medição (calibração, medição, processamento e visualização dos resultados) auxilia na facilidade de operação do sistema.

Calibração

- A utilização do método de Zhang para calibração do protótipo é viável. Porém a utilização do *MatLab* pode ser substituída pela implementação do algoritmo de calibração no software do protótipo.
- O padrão tipo “tabuleiro de xadrez” deve ser plano. Mesmo utilizando um vidro de espessura 12 mm, observou-se efeito de curvatura na sua superfície. A utilização de um padrão com melhor planeza e outros métodos de impressão do “tabuleiro de xadrez” na sua superfície podem auxiliar nos resultados das medições.

Com alterações, o protótipo deve obter incertezas menores. A automatização do sistema irá diminuir consideravelmente a incerteza relacionada à repetitividade do sistema. No próximo item, serão relacionadas algumas das alterações necessárias.

Entre as limitações, pode-se citar o fato da superfície a ser mensurada deve ser limpa e de preferência ser clara e fosca, de forma a melhorar as condições de medição. A utilização de tinta spray branco fosco, ou uma pulverização com dióxido de titânio (esse pode ser removido após a medição), são alternativas viáveis dependendo do mensurando. O tempo de medição deve cair sensivelmente quando a medição for completamente automatizada.

As observações realizadas durante experimentos e ensaios feitos com o sistema mostraram que com algumas modificações o protótipo poderá ser usado em medições em campo, sem haver nenhuma limitação importante. A portabilidade do sistema é uma das características de importância para o projeto, e a robustez para uso em campo também está sendo levada em consideração.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS

Para próximos trabalhos, alguns aspectos devem ser melhorados para que o funcionamento do sistema de medição seja compatível com os requisitos fixados. Dentre eles são citados:

- Utilização de motor de passo com encoder em sistema realimentado, para que a defasagem de fase seja constante e de valor igual ao necessário;
- Utilização de lentes grande angular, que conseguem obter um campo de visão de 300 x 400 mm²;
- Utilização de câmeras com maior resolução e melhor desempenho, para melhorar a qualidade dos dados adquiridos,
- Implementação de controle do motor de passo via porta USB, para que a portabilidade do sistema seja mantida, e;
- Implementação do cálculo em coordenadas cilíndricas, e da calibração no software do sistema de medição.

REFERÊNCIAS

- [1] SU, X.; ZHANG, Q. **Dynamic 3-D shape measurement method: A review**. Optics and Lasers in Engineering , 2009.
- [2] GÅSVIK, K. **Optical Metrology**. 3 ed. John Willey & Sons, 2002.
- [3] PAN, B et al. **Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry**. Optical Letters v.34 no. 4, p. 416-418, 2009.
- [4] HARIHARAN et al. **Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm**. Applied Optics, vol.26 no. 13, p. 2504-2506, 1987.
- [5] HOFMANN, A. C. H.. **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.
- [6] FANTIN, A. V. **Medição de Formas Livres por Topogrametria**. 1995. Dissertação (Mestrado) Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. UFSC, Florianópolis, 1995.
- [7] HIBINNO, K. et al. **Phase shifting algorithms for non-sinusoidal wavwforms with phase shift errors**. Optical Review vol.01 no.02 , p. 270-272, 1994.
- [8] SCHIMT, J. ; HARIHARAN, P. **Two-wavelength interferometric profilometry with a phase-step error-compensating algorithm**. Optical Engineering. Vol 45 no. 11, 2006.
- [9] ZUMBRUNN, R. **Automated Fast Shape Determination of Diffuse Reflecting Objects at Close Range by Means of Structured Light and Digital Phase Measurement**. ISPRS Intermission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, 1987, pp. 363–379.
- [10] ZHANG, Z.: **A flexible new technique for camera calibration**. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. vol.22 n.11, p. 1330–1334, 2000.
- [11] TSAI, R.Y.: **A versatile camera calibration technique for high accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses**. IEEE J. Robotics Automat. Vol. 3, n. 4, p. 323–344, 1987.
- [12] HEIKILLÄ, J.: **Geometric camera calibration using circular control points**. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. **22**(10), 1066– 1077, 2000.

- [13] AZEVEDO, T. et al. **Análise do método de calibração de câmeras proposto por Zhang**. 12p. 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. Maputo, 2008.
- [14] FAUGERAS, O. **Three Dimensional Computer Vision: a geometric viewpoint**. The MIT Press, Cambridge: 1993.
- [15] HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry**. Cambridge University Press, 2003.
- [16] CAMERA calibration toolbox for Matlab. Disponível em http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/parameters.html. Acessado em 23/08/2008.
- [17] SUN, W., COOPERSTOCK, J. **An empirical evaluation of factors influencing camera calibration accuracy using three publicly available techniques**. Machine Vision and Applications. V.26, n.1, p.51–67, 2006.
- [18] ZHANG, Z.: **A flexible new technique for camera calibration**. 1998. Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research. Disponível em: <http://research.microsoft.com/~zhang/Calib/>. Acessado em 20/07/2008.
- [19] FANTIN, A. V. ; PINTO, T. L. F. C. ; GONÇALVES JUNIOR, A. A. . **An Efficient Mesh Oriented Algorithm for 3D Measurement in Multiple Camera Fringe**. In: Optical Metrology 2007, 2007. Munique-Alemanha. Proceedings of SPIE, 2007. v. 6616.
- [20] **CERÂMICAS paralisam produção e calculam perdas de R\$130 milhões em SC**. Folha Online 27/11/2008. Disponível em www.folha.com.br. Acessado em 16/01/2009.
- [21] AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Portaria No. 104 de 20.6.2000.
- [22] AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - 2008**. Rio de Janeiro: ANP, 2008.
- [23] CONCAWE. **Performance of European cross-country oil pipelines**. Bruxelas, maio de 2007.
- [24] UKOPA. **Pipeline Product Loss Incidence (1962-2006)**. Leicestershire, agosto de 2007.
- [25] CETESB. **Gerenciamento de Riscos**. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/dutos>. Acessado em 21/01/2009.

- [26] CARNEVAL, R. O. et al. **Uso das Técnicas de END: Ultra-som (TOFD e Phased Array), Radiografia, Partículas Magnéticas e ACFM na Avaliação de Juntas Soldadas com Trincas de Fadiga**. Conferência Panamericana de END, 4., 2007. Buenos Aires, 2007.
- [27] TWI. **TWI Knowledge Summary: Ultrasonic testing**. Disponível em <http://www.twi.co.uk/content/ksndt003.html>. Acessado em 22/01/2009.
- [28] TWI. **Long Range Ultrasonic Technology (LRUT)**. Disponível em http://www.twi.co.uk/content/lrut_index.html. Acessado em 22/01/2009.
- [29] NDT Resouce Center. **Introduction to Eddy Current Testing**. Disponível em http://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc_index.htm. Acessado em 22/01/2009.
- [30] REDOUANE, D. et al. **Evaluation of Corroded Pipelines Wall Thickness Using Image Processing in Industrial Radiography**. In: 15° WCNDT, Roma, 2000.
- [31] DE OLIVEIRA, RODRIGUES, SILVA. **Dispositivo para avaliação da rofundidade de corrosão localizada por inspeção radiográfica**. In: COTEQ – Conferencia sobre tecnologia de equipamento, 6., 2002, Salvador.
- [32] ZIRNHELT, EINA V, INFANZÓN. **Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits: An IAEA Co-ordinated Research Project**. In: 3° PANNDT. Rio de Janeiro, 2003.
- [33] NDT Resouce Center. **Introduction to Radiographic Testing**. Disponível em http://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/cc_rad_index.htm. Acessado em 27/01/2009.
- [34] JONES, P. **EMW Technology Brings New Cost Savings To Corrosion Inspection Industry**. Pipeline & Gas Journal. Vol.228, n.4, p. 73-74, 2001.
- [35] **A História do Petroleo no Brasil**. Disponível em <http://www.brasilecola.com/brasil/historia-do-petroleo-no-brasil.htm>. Acessado em 20/08/2009.
- [36] OLYMPUS NDT. **Ominscan MX (EN200808)**. Especificações técnicas. 14 p. Canadá, 2008. Disponível em <http://www.olympusNDT.com>. Acessado em 12/11/2008.
- [37] PLANT Integrity. **TELETEST EQUIPAMENT**. Disponível em <http://www.plantintegrity.com/equipment.html>. Acessado em 22/01/2009.
- [38] 3D Corrosion. **Corrscan**. Especificações técnicas. 14 p. 2007. Disponível em <http://www.3dcorrosion.com>. Acessado em 10/12/2008.

-
- [39] YXLON International. **Y.Smart**. Especificações técnicas. 4 p. Alemanha, 2007. Disponível em <http://www.yxlon.com>. Acessado em 27/01/2009.
- [40] GEIB, R. **Guidewave technology, electromagnetic wave technology and casing study**. In: NACE ECDA SEMINAR, Houston, janeiro de 2008.
- [41] AGR Field Operations. **Corrosion Mapping Kit**. UT News: junho-julho 2007.
- [42] ARC TEST. **Radiografia Digital**. Disponível em <http://www.arctest.com.br/>. Acessado em 27/01/2009.
- [43] **PARA não chorar o petróleo derramado**. Revista Petro & Química. Vol. 283, abril de 2006. Disponível em http://www.editoravalete.com.br/site_petroquimica/edicoes/ed_283/283_a.html. Acessado em 20/10/2009.