

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO METROLÓGICO DO SISTEMA DE
MEDIÇÃO ESTAÇÃO HOLOGRÁFICA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

WALTER ANTÔNIO KAPP

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL
ABRIL DE 1997

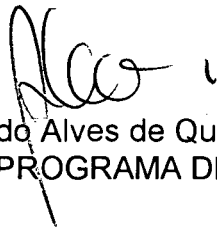
**OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO METROLÓGICO DO SISTEMA DE
MEDIÇÃO ESTAÇÃO HOLOGRÁFICA**

WALTER ANTÔNIO KAPP

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE

“MESTRE EM ENGENHARIA”

Especialidade ENGENHARIA MECÂNICA - Área de Concentração
METROLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO e aprovada em sua forma final pelo
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Abelardo Alves de Queiroz, PhD.
COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng.Mec.
ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr.Ing.



Prof. Frank Hrebabetzky, Ph.D.



Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph.D

A Éthel, minha esposa e Stella minha filha
À minha família
Pelo carinho, apoio e incentivo
durante a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

- À Universidade Federal de Santa Catarina;
- À Fundação CERTI e ao Labmetro pela infra-estrutura oferecida;
- Ao CNPq pelo apoio financeiro;
- Ao PADCT/SINST e FBB pelo financiamento do projeto;
- Ao Professor Armando Albertazzi Gonçalves Jr. pela orientação, dedicação e paciência durante a realização deste trabalho;
- À Danilo José dos Santos e a Detlef Werner Braun, pelo auxílio na parte experimental e fabricação de dispositivos especiais;
- Aos demais colaboradores do CERTI e colegas do Labmetro que, direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho;
- À todos os meus amigos pelo apoio e amizade durante todo o período em que estive em Florianópolis.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 A importância deste trabalho	1
1.3 Como o trabalho está apresentado	2
2. A Estação Holográfica	3
2.1 A técnica de Holografia Eletrônica	3
2.2 Principais módulos da Estação Holográfica	3
2.2.1 O Interferômetro de speckle da Estação Holográfica	3
2.2.2 Determinação da disposição espacial da bancada de medição com HE	7
2.2.3 Exemplos de montagens típicas para medição com Holografia eletrônica usando-se os recursos do SINTHE.	11
2.2.4 Processamento dos padrões de “Speckle” e a quantificação dos deslocamentos, deformações e tensões.....	18
3. Análise teórica das fontes de erros.	22
3.1 Influência do comprimento de onda.....	22
3.2 Influência da disposição espacial.....	24
3.2.1 Medição de deslocamentos	24
3.2.2 Medição de deformações	27
3.2.3 Estimativa de erros	27
3.3 Erros no cálculo da ordem de franja (OF).....	32
3.3.1 Influência da quantização na digitalização de imagens.....	33
3.3.2 Influência do deslocamento de fase.....	48
3.4 Erros devido a ordem de franja zero	50
3.5 Erros devido ao processamento	52
3.5.1 Digitalização	52
3.5.2 Média.....	52
3.5.3 Subtração.....	52
3.5.4 Operação ATAN2	53
3.5.5 Filtragem.....	53
3.6 Sistematização do cálculo de incerteza de medição.....	53
4. Avaliação experimental das fontes de erros	54
4.1 Fatores que influenciam a medição do ângulo de fase.	54
4.1.1 Calibração dos atuadores piezoelétricos para deslocamento de fase.....	54
4.1.2 Calibração da câmera CCD.....	59

4.1.3	Análise de amplitudes de modulação típicas.....	66
4.2	Ensaio de repetibilidade de chaveamento.....	74
4.3	Ensaio de estabilidade de longo termo da OF (drift.).....	76
4.4	Cálculo da incerteza de medição do sistema atual.....	78
4.4.1	Incerteza total.....	78
4.4.2	Análise de importância.....	80
5.	Otimização do desempenho metrológico.....	81
5.1	Otimização de parâmetros e recomendações para utilização dos componentes atuais da Estação Holográfica.....	81
5.1.1	Recomendações de calibração e utilização do PZT.....	81
5.1.2	Recomendações de utilização da câmera CCD.....	83
5.1.3	Recomendações de montagem da bancada.....	84
5.1.4	Recomendações de preparo da superfície do campo de medição.....	85
5.1.5	Recomendações sobre os procedimentos de processamento.....	85
5.1.6	Efeitos da otimização destes parâmetros.....	86
5.2	Especificação de novos componentes.....	87
5.2.1	Novo conversor D/A para controle do dispositivo piezo-elétrico.....	87
5.2.2	Nova Câmera CCD.....	88
5.2.3	Novo Sistema de Processamento de Imagens.....	89
5.2.4	Efeitos esperados em função destes novos componentes.....	91
5.3	Projeto básico de um novo chaveador de fibras ópticas.....	92
5.3.1	Nova concepção de chaveamento.....	92
5.3.2	Efeitos esperados em função destas especificações.....	94
6.	Conclusões.....	95
6.1	Recomendações para evolução do sistema.....	95
6.2	Rastreabilidade metrológica do sistema de medição Estação Holográfica.....	95
6.3	Avaliação geral da Estação Holográfica.....	95
6.4	Avaliação geral do trabalho.....	96
7.	Referências Bibliográficas.....	98

RESUMO

Este trabalho de dissertação é dedicado à avaliação e otimização do desempenho metrológico do sistema de medição denominado Estação Holográfica.

No trabalho é apresentado em detalhes o objeto de estudo, que é a Estação Holográfica, desenvolvida em conjunto pelo Labmetro/UFSC e Fundação CERTI, descrevendo física e funcionalmente cada um de seus componentes.

Na seqüência é apresentado um estudo teórico procurando modelar o funcionamento do sistema, de forma a identificar suas principais fontes de erros. Estas tiveram sua influência teoricamente estimada, e foram analisadas sob o ponto de vista de ordem de importância. As fontes de erros mais significativas são então ensaiadas experimentalmente, de forma a validar os modelos teóricos, permitindo assim, modelar o comportamento e minimizar a influência de cada fonte erro.

Com os modelos teóricos e com os resultados experimentais foi determinada a incerteza de medição original da Estação Holográfica.

A partir das observações teóricas e experimentais são apontadas as vias de otimização do sistema, prevendo-se as melhorias no seu desempenho metrológico. São também sugeridas otimizações funcionais no sistema.

ABSTRACT

This dissertation is dedicated to the evaluation and optimization of the metrological performance of the measurement system named “Holographic Station”.

This work presents in detail the object of the study – the Holographic Station – which was developed in cooperation by Labmetro /UFSC and Fundação CERTI. It describes each component mechanically and functionally.

Below a theoretical study is presented which models the functionality of the system in order to identify its principal sources of errors. They have a theoretically estimated influence and were analyzed according to their relative importance. The most significant error sources were then verified experimentally in dedicated setups in order to validate the theoretical models and minimize the influence of each error.

With these theoretical models and the experimental results, the original measurement uncertainty of the Holographic Station was determined.

Beyond the theoretical and experimental observations, some possible optimizations of the system are indicated, which should improve its metrological performance. Besides that, functional optimizations of the system are proposed.

1. Introdução

1.1 Antecedentes

As equipes de pesquisadores do Labmetro/UFSC e da Fundação CERTI vêm trabalhando com aplicações da holografia em problemas industriais há mais de uma década, com resultados significativos, gerando trabalhos acadêmicos [1] e de grande aplicação na indústria. Inicialmente utilizava-se a holografia convencional, empregando placas fotográficas que, quando devidamente sensibilizadas, geravam hologramas que reproduziam imagens tridimensionais da peça ensaiada. Esta técnica, embora muito interessante e promissora, apresentava dificuldades de ordem prática e econômica, o que limitava sua aplicação industrial.

Em 1987 foi iniciado um projeto pelo PADCT/SINST [2] que procurava tornar viável a aplicação prática desta técnica em laboratórios da indústria. Este projeto gerou algumas soluções inovadoras, que conquistaram um prêmio tecnológico a nível Nacional [3]. Em 1989 uma primeira tese de doutorado foi escrita sobre este assunto [4].

Ainda neste período destaca-se o intercâmbio com o Illinois Institute of Technology nos EUA, através de um programa de pós-doutorado, que teve como resultados a absorção de diversas tecnologias importantes, como: processamento de imagens, emprego de fibras ópticas e, principalmente, a tecnologia do Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), doravante denominada neste trabalho de Holografia Eletrônica. Tal compêndio tecnológico possibilitou um impulso significativo no projeto. O sistema de medição resultante, denominado *Estação Holográfica*, que é o objeto deste trabalho, tornou finalmente viável o emprego de tal tecnologia na indústria. O sistema cujo primeiro protótipo foi concluído em 1992, foi patenteado, recebeu um novo prêmio de invenção a nível nacional e chegou a ser adquirido por uma indústria de vanguarda do setor metal mecânico brasileiro. A evolução da técnica não parou por aí e novos trabalhos acadêmicos se dedicaram a aprimorar e buscar novas aplicações para o sistema [5], [6], [7], [8], [9] e [10], além de inúmeras publicações a nível nacional e internacional. Hoje estão em andamento dois novos projetos: um financiado pelo PADCT/SINST II, que desenvolve módulos especializados para três classes de aplicações específicas [11], sub produtos do projeto original da Estação Holográfica. O outro projeto, financiado pela Fundação Banco do Brasil [12], tem por objetivo o aprimoramento da Estação Holográfica, apoiando desta forma este trabalho.

1.2 A importância deste trabalho

Em muitos dos casos onde a Estação Holográfica esta sendo hoje empregada com sucesso, dificilmente técnicas convencionais seriam viáveis ou mesmo mais simples de serem empregadas. Porém, mesmo assim, sabe-se que o sistema pode ser otimizado. Tarefa esta não trivial por envolver um grande número de variáveis interrelacionadas de forma complexa. Acredita-se porém que este esforço é promissor e os ganhos de desempenho do sistema podem ser significativos.

A maioria dos pesquisadores que utilizam a técnica da holografia eletrônica não dispõe de um sistema específico para este fim. Frequentemente empregam componentes de bancada óptica genéricos. Não foi então possível encontrar na literatura técnica uma referência que aborde, com as particularidades e profundidade necessárias, os conceitos ligados ao desempenho metrológico de um sistema semelhante, mesmo porque os poucos sistemas integrados especificamente para este fim são muito diferentes entre si na sua concepção.

Adicionalmente, os componentes do sistema, isoladamente, são dispositivos muito avançados, e estão ainda num processo muito efervescente de evolução e muitas vezes não foram concebidos originalmente para aplicações metrológicas. Por este motivo, é muito difícil obter dados e especificações técnicas que

levassem à caracterização de seus parâmetros metrológicos, para que, combinados, permitissem avaliar o desempenho metrológico do sistema.

Na atual política de qualidade, em disseminação por todo o meio industrial mundial, países que querem assegurar sua parcela de mercado necessitam cada vez mais de ferramentas para a evolução de seus produtos e que atestem a qualidade dos mesmos. Um sistema de medição novo só pode ser considerado apto para deixar o ambiente dos laboratórios de pesquisa e galgar o estado da aplicação industrial, se, além de apresentar operacionalidade comprovada, puder ainda ser submetido a um procedimento de calibração padronizado, que garanta os resultados da medição. Pelos motivos já expostos, não há ainda uma metodologia estabelecida para calibração de sistemas semelhantes.

Tais fatos, e a percepção de que este sistema de medição é promissor, motivam este trabalho, que está focado na avaliação do desempenho metrológico do hardware da Estação Holográfica.

1.3 Como o trabalho está apresentado

Este trabalho é apresentado em quatro etapas distintas:

A primeira etapa descreve o objeto de estudo deste trabalho, apresentado para o leitor uma visão do que é e como está constituída fisicamente a Estação Holográfica. Fornece também alguns detalhes importantes para o desenrolar do estudo.

A segunda etapa trata em profundidade do modelamento teórico funcional do hardware do sistema de medição, identificando e avaliando teoricamente as fontes de erro do sistema. Serve de base para o planejamento dos experimentos da próxima etapa.

A terceira etapa é a avaliação experimental da Estação Holográfica, tendo por finalidade testar os principais parâmetros de utilização e os componentes envolvidos com as principais fontes de erros já identificadas. Ao final, é estimado o desempenho metrológico original deste sistema de medição. Como resultados, apresentam-se também as metodologias de calibração a serem empregados em futuros procedimentos de calibração que garantam a rastreabilidade do sistema.

Finalmente a quarta etapa trata da otimização do desempenho metrológico da Estação Holográfica. São apontados os parâmetros mais adequados à operação do sistema, indicando os benefícios de sua otimização. São ainda sugeridas especificações mais adequadas para novos componentes do sistema. E, finalmente, o projeto básico de um novo chaveador de fibras ópticas é proposto.

Em anexo ao trabalho, tem-se os seguintes volumes:

No primeiro anexo esta uma revisão dos conceitos de holografia e holografia eletrônica, condensado a partir de uma dissertação de mestrado já existente [9].

No segundo anexo apresenta-se a especificação detalhada dos componentes especificamente projetados para a Estação Holográfica.

2. A Estação Holográfica

Este capítulo descreve o objeto de estudo deste trabalho: a Estação Holográfica (EH). Como se trata de um sistema sofisticado e moderno, o software é praticamente indissociável do seu hardware. Porém, como os objetivos deste trabalho se concentram no hardware, este será melhor detalhado neste capítulo. A complementação das informações aqui apresentadas pode buscada em outras fontes [13], [8] e [6].

2.1 A técnica de Holografia Eletrônica

Os conceitos físicos envolvidos na E.H. estão apresentados em detalhes no Anexo A. Este anexo está fortemente baseado numa dissertação anteriormente apresentada [8].

2.2 Principais módulos da Estação Holográfica

2.2.1 O Interferômetro de speckle da Estação Holográfica

A) A Fonte de luz monocromática

Emprega-se para geração de luz monocromática e coerente um Laser a gás HeNe, em geral com potência superior a 15 mW. O Laser HeNe é normalmente usado em aplicações metrológicas em função de seu comprimento de onda ser bem determinado, ter bom comprimento de coerência e ainda ter um custo relativamente baixo. No sistema em estudo o Laser é de 35 mW, com 950 mm de comprimento da cavidade do ressonador, fabricado pela Spectra Physics.

Características gerais do LASER empregado:

- Comprimento de onda : 632.8 nm
- Potência de saída : 35 mW
- Modo transversal : TEM₀₀
- Razão de polarização : 500:1
- Angulo de polarização : Horizontal ± 5%
- Diâmetro do feixe (1/e²) : 1,25±0,10 mm
- Divergência do feixe : 0,66±0,06 mrad
- Localização da cintura do feixe : Na superfície externa do espelho de
..... saída do ressonador.

B) O Chaveador de fibras ópticas.

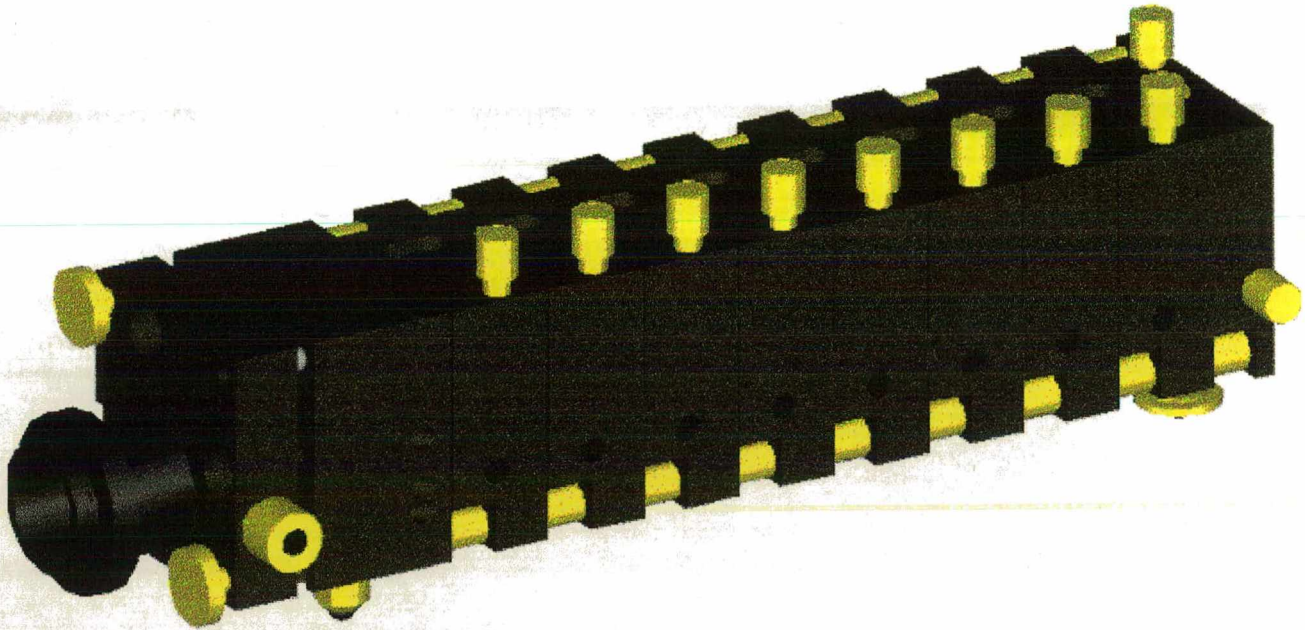


Figura 2.1 Chaveador de Fibras Ópticas

Integra diversas funções do processo de medição com holografia eletrônica, é composto pelos seguintes módulos com as suas respectivas funções:

a) Módulo Divisor e Deslocador de Fase

Tem as seguintes funções:

- Adaptar e fixar o dispositivo chaveador ao LASER. Afim de simplificar o alinhamento óptico do feixe LASER ao chaveador de fibras ópticas, este módulo se acopla diretamente na rosca para acessórios na saída do feixe do LASER, restando apenas o ajuste angular do eixo óptico do chaveador de fibras ópticas por meio de dois parafusos.
- Dividir o feixe LASER em dois ramos paralelos para compor o interferômetro. O feixe é dividido por um semi-espelho dielétrico.
- Deslocar a fase de um dos ramos para o processo de cálculo do mapa de fase. O deslocamento de fase se dá pela variação do caminho óptico, através do deslocamento de um espelho por um micro-deslocador piezo-elétrico (PZT). A Unidade servo-amplificadora realimentada do PZT é comandada por um sinal analógico gerado pela Interface de Controle do PZT

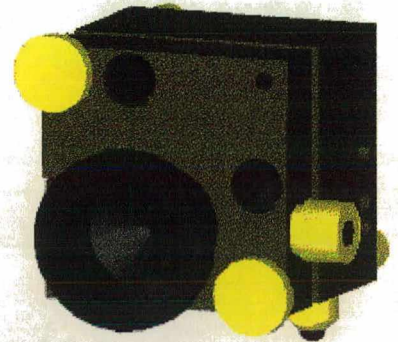


Figura 2.2 Módulo Divisor/Deslocador de Fase

b) Módulos Chaveadores de Fibras Ópticas

São em número de até oito módulos e tem a função de selecionar qual dos ramos divididos do LASER será dirigido à fibra óptica acoplada ao módulo. A seleção é feita por um defletor elástico que assume 3 posições de equilíbrio: duas magneticamente atraídas nas extremidades do curso, com posição definida por batente esférico e uma central em equilíbrio magnético, com posição definida pelo repouso das guias elásticas. Cada uma das posições laterais seleciona qual dos dois ramos do LASER será dirigido para a fibra óptica. A posição central permite que ambos os ramos atravessem para o próximo módulo sem dirigi-los a fibra óptica deste módulo. O controle da posição é realizado através de impulsos eletro-magnéticos dirigidos e quantizados de forma selecionar os movimentos do centro para as extremidades e vice-versa. Os sinais de controle são gerados pela Interface de Controle do chaveador de fibras ópticas.

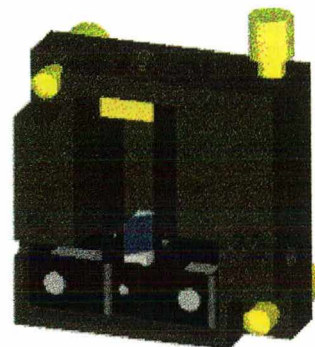


Figura 2.3 Módulo Chaveador

c) Módulo Terminal

Tem a função de fixar as duas fibras terminais e dar um ponto de apoio complementar ao chaveador de fibras ópticas.

Com esta configuração o chaveador de fibras ópticas permite que se selecione qualquer combinação de par de fibras, entre um total de dez fibras acopláveis ao dispositivo (oito acopladas aos módulos chaveadores e duas acopladas ao módulo terminal).

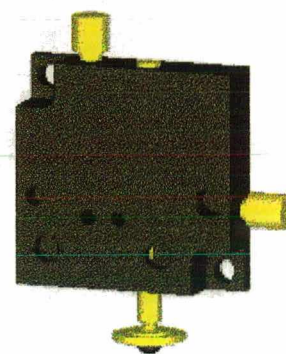


Figura 2.4 Módulo Terminal

d) Módulo de Controle do Chaveador de Fibras Ópticas

É responsável por todas as ações de controle necessárias às funções do chaveador de fibras ópticas, e é dividido nos seguintes sub-módulos

- **Interface de Controle do Chaveador de Fibras Ópticas:** É uma interface eletrônica para o barramento ISA ou compatíveis, dividida funcionalmente a fim de comandar o Módulo Divisor/Deslocador de Fase e os Módulos Chaveadores de modo distinto. Com uma saída em tensão, de 0 a 10 V programável, é gerado o sinal de comando para a Unidade de Controle do PZT. Através de um sinal impulsivo em corrente, quantizado em tempo e amplitude, positivo ou negativo e multiplexado em 8 canais, são controlados os 8 módulos chaveadores.
- **Unidade de Controle do PZT.** É a unidade de controle fornecida pelo fabricante do micro-deslocador piezo-elétrico, com a opção de comando externo por sinal analógico (0 a 10 V) esta é interfaceada à Interface de Controle do chaveador de fibras ópticas.
- **Fonte de alimentação externa.** Serve para suprir a necessidade extra de potência necessária a geração do sinal impulsivo pela Interface de Controle do chaveador de fibras ópticas.
- **Cabos do circuito de controle do chaveador de fibras ópticas.** São três os cabos elétricos necessários para o funcionamento do chaveador de fibras ópticas: Um Cabo BNC-BNC para interligação entre a Placa de Interface ao Controlador e a Unidade de Controle do PZT. Um cabo de 8 canais DB-25 (Régua com 8 conectores RCA) entre a Placa de Interface ao Controlador e os módulos chaveadores, tendo a régua de conectores RCA uma fixação à bancada óptica para evitar danos ao chaveador em caso de acidentes com o cabo. E um par de cabos "banana" "banana" interligando a Interface de Controle do chaveador de fibras ópticas a Fonte de Alimentação Externa.

No anexo B encontram-se as especificações detalhadas deste módulo.

C) A câmera e o sistema de digitalização e quantificação de imagens

Foi especificado um sistema de processamento de imagens disponível no mercado internacional, que: a) atendesse aos requisitos da técnica de medição empregada; b) tivesse um padrão de sinal de vídeo não proprietário; b) fosse compatível com computadores da plataforma Intel 80x86/87, interfaceável a este através do padrão de barramento ISA.

a) Câmera Digitalizadora de Imagens

Câmera digitalizadora de sinal de vídeo, monocromática, baseada em sensor discreto tipo CCD, de alta resolução, alta sensibilidade e de tamanho compacto, saída em sinal analógico de TV padronizado (RS-170).

Características gerais da câmera de processamento de imagens:

- Tecnologia do sensor..... : CCD monocromático
- Resolução mínima do quadro..... : 756 x 240 elementos
- Sensibilidade luminosa mínima : 0,1 Lux
- Padrão do sinal de vídeo..... : RS-170
- Impedância de recepção do sinal..... : 75 Ω
- Linhas do sinal de vídeo : 480 linhas
- Interlaçamento : 2:1

b) Interface de Aquisição e Processamento Inteiro de Imagens

Tem a função de digitalizar, o sinal da câmera, armazená-lo em memória própria, realizar operações lógicas e matemáticas em tempo real com o sinal de entrada e apresentar o resultado em monitor de vídeo.

- Fabricante : Data Translation Inc.
- Procedência..... : USA
- Modelo : DT 2861/60Hz
- Largura de palavra digital..... : 8 bits
- Memória de quadros..... : 4 MB ou 16 páginas
- Frequência do sinal de vídeo..... : 60 Hz
- Interface de comunicação com a placa de processamento: DT-Conect[®]
- Interface de comunicação com o controlador..... : ISA

c) Unidade de Processamento Ponto Flutuante de Imagens

Deve comunicar-se com a placa de aquisição e realizar processamento avançado de imagens em ponto flutuante.

- Fabricante : Data Translation Inc.
- Procedência..... : USA
- Modelo : DT 2878-4
- Largura de palavra digital..... : 8 bits
- Memória de programa : 128 kB
- Memória de dados..... : 4 MB
- Interface de comunicação com a placa de aquisição : DT-Conect®
- Interface de comunicação com o controlador..... : ISA

d) Monitor de Vídeo Analógico

Apresentar os resultados de processamento de imagens das placas e/ou a imagem direta da câmera.

- Tecnologia de imagem..... : Colorida
- Sinal de vídeo de entrada..... : RGB
- Impedância de entrada do sinal..... : 75 Ω
- Resolução do quadro..... : 480 linhas de TV.

2.2.2 Determinação da disposição espacial da bancada de medição com HE

A) Dispositivos de iluminação

Com a finalidade de flexibilizar e facilitar o posicionamento dos pontos iluminadores e do ponto de observação, emprega-se o conjunto de dispositivos para bancada óptica aqui apresentado. Para que se possa posicionar os pontos iluminadores em qualquer local da bancada, sem necessidade de alinhamento de feixes LASER, a luz é conduzida entre o chaveador de fibras ópticas e os pontos de iluminação por meio de fibras ópticas (fibras ópticas tipo "bundle" multi-modo), restando apenas direcionar o fecho luminoso para a região da peça a ser analisada.

Como é necessário conhecer as coordenadas dos pontos iluminadores e do ponto de observação, o conjunto foi concebido de maneira que o ponto iluminador tivesse um lugar geométrico definido em relação a base, independentemente da orientação que fosse dada ao fecho luminoso. A base poderia então ser fixada na furação regular da bancada óptica, usando estes furos como sistema de coordenadas do plano horizontal. Assim resta apenas medir a coordenada vertical, o que é feito através de haste graduada.

Outros acessórios complementares são necessários para:

- Obter sensibilidade fora do plano através de iluminação simples;
- Obter pontos de iluminação simétricos em relação a uma região de medição pequena na peça (pontos iluminadores próximos a peça) com sistema de sensibilidades ortogonais;
- Obter ponto de iluminação na mesma vertical (mesmas coordenadas no plano horizontal);
- Obter ponto de iluminação virtual sob o plano da bancada óptica.

São apresentados a seguir os componentes usados para posicionar os pontos iluminadores sobre bancada óptica:

a) Fibras Ópticas

São condutores do sinal luminoso do chaveador de fibras ópticas aos pontos iluminadores, que, desta forma, eliminam a necessidade de alinhamento de feixes luminosos entre o chaveador e os pontos de iluminação, tornando extremamente rápida e flexível qualquer montagem. Os condutores são fibras ópticas multifibra ("bundle"), multimodo, disponíveis comercialmente.

- Configuração..... : Multi-fibra ("bundle")
- Granulação..... : 100 μ m
- Modo..... : Multi-modo
- Polarização..... : Indefinida
- Revestimento suporte..... : Metálico flexível
- Acoplamento..... : Face plana
- Diâmetro de incidência luminosa..... : 1 à 3 mm
- Diâmetro de fixação dos terminais de acoplamento..... : 4,8 mm
- Comprimento de fixação dos terminais de acoplamento . : 10,0 \pm 0,1 mm

b) Base dos Suportes Padronizados

É o elemento básico da fixação dos suportes à bancada óptica e Sistema de Medição de Coordenadas dos suportes padronizados. Através da fixação por parafusos na furação da bancada são determinadas as coordenadas horizontais do eixo da haste graduada da seguinte maneira: Um parafuso serve de ponto pivô e outro de ponto direcionador. Assim, a base pode ser fixada em 8 direções em torno do ponto pivô (quatro posições alinhadas com a furação e 4 posições diagonais), possibilitando 8 posições em coordenadas horizontais para o eixo da haste graduada. A coordenada vertical é determinada pela graduação da haste, somada a altura mínima do cabeçote e somada à altura de outros possíveis elementos intermediários. No anexo B encontra-se as especificações detalhadas deste módulo.

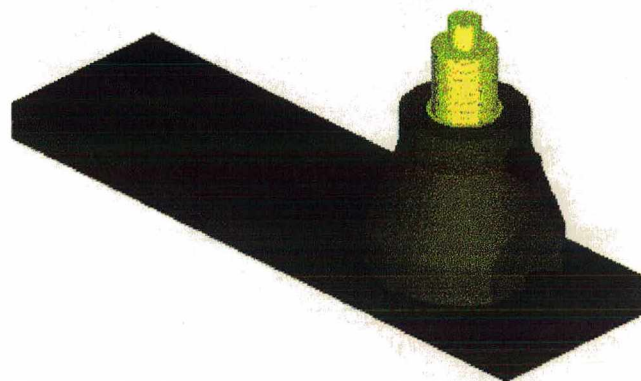


Figura 2.5 Base dos Suportes Padronizados.

c) Cabeçote de Iluminação Terminal

É um dispositivo onde se fixa a extremidade iluminadora da fibra óptica. Foi concebido de forma a dar dois graus de liberdade angular ao fecho luminoso, permitindo dirigir a região iluminada para a região a ser medida, sem no entanto deslocar as coordenadas do ponto iluminador, definido pelo cruzamento do eixo da haste graduada com o eixo de rotação do terminal da fibra na forquilha. Existe ainda a possibilidade acoplamento de elementos ópticos em frente ao ponto de iluminação para controlar a dispersão do fecho luminoso, ou uma máscara limitadora da região de iluminação. No anexo B encontra-se as especificações detalhadas deste módulo.



Figura 2.6 Cabeçote de

d) Cabeçote de Iluminação Intermediário

Tem a mesma função e concepção do componente anterior, adicionando a possibilidade de continuar a montagem de outros componentes sobre este. Assim, pode-se, por exemplo, ter dois pontos de iluminação sobrepostos, com mesmas coordenadas horizontais. As coordenadas deste ponto iluminador são determinadas como o anterior. Para a determinação das coordenadas dos eventuais pontos acima deve-se somar sua altura aos demais dispositivo extensores da montagem. No anexo B encontra-se as especificações detalhadas deste módulo.

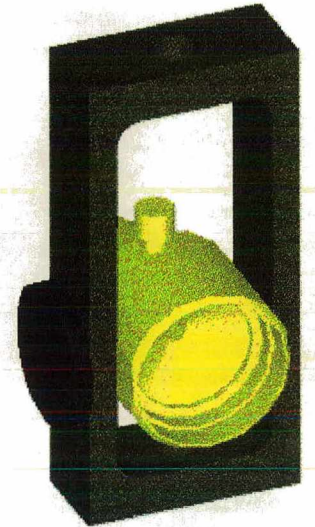


Figura 2.7 Cabeçote de Iluminação Intermediário.

e) Hastes de Extensão

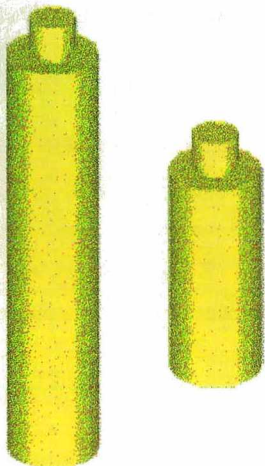


Figura 2.8 Hastes de Extensão

Servem para estender a faixa de coordenadas verticais dos pontos iluminadores e de observação. Tem a mesma bitola da haste graduada e duas opções de altura: uma igual a faixa de medição da haste graduada e outra o dobro. No anexo B encontra-se as especificações detalhadas destes componentes.

f) Anel de Iluminação Ortogonal

Permite fixar sobre uma mesma base padronizada mais dois pontos de iluminação laterais e possibilita visualização pela câmera digitalizadora através do eixo da haste graduada da Base Padronizada. Este recurso se faz necessário quando a região a medir está muito próxima dos pontos iluminadores e se necessita de sistema com vetores de sensibilidade ortogonais. No anexo B encontra-se as especificações detalhadas destes componentes.



Figura 2.9 Anel de Iluminação Ortogonal

g) Espelho de Rebatimento Sob Bancada

Fixado horizontalmente sobre a superfície da bancada óptica é utilizado para refletir a luz oriunda de um ponto de iluminação, criando um ponto de iluminação virtual sob a superfície da bancada. Qualquer tipo de espelho de 1ª superfície apoiado isostaticamente na bancada óptica, pode ser utilizado.

B) Posicionamento da câmera.

Para o ponto observador, definido pelo posicionamento da câmera digitalizadora e pelo ajuste de comprimento focal da objetiva (zoom), foi empregada a mesma filosofia. São compartilhados, inclusive, a mesma base e sistema de elevação. Deve ser considerado que o ajuste de zoom translada o ponto observador sobre o eixo óptico da lente (na direção objeto/câmera), porém este tipo de translação pouco altera o vetor sensibilidade. Assim, para lentes deste tipo, não há como ser definido o ponto de observação em relação ao chassis da câmera. Foi então escolhido como ponto de referência o centro do quadro do sensor da câmera (CCD).

a) Suporte da Câmera Digitalizadora

É composto por uma forquilha e um berço próprio para cada marca de câmera digitalizadora. Para o posicionamento do ponto observador são utilizadas a mesma Base Padronizada e outros acessórios dos pontos iluminadores. O ponto resultante do cruzamento do eixo da haste graduada com o eixo de rotação do berço na forquilha coincide com o centro do sensor e é adotado como ponto do observador. Como todos os parâmetros acima são determináveis, as coordenadas do ponto observador são facilmente calculáveis. No anexo B encontra-se as especificações detalhadas destes componentes.

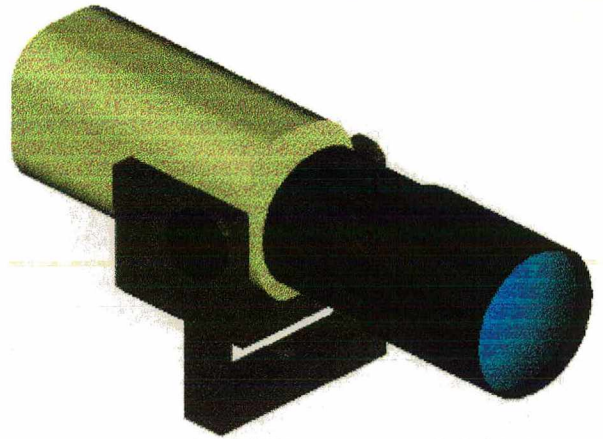


Figura 2.10 Suporte da Câmera Digitalizadora.

b) Semi-espelho de Observação

É usado em configurações que empregam iluminação simples, para obter sensibilidade fora do plano. A função deste componente é sobrepor a imagem do padrão de "speckle" do objeto com o do anteparo de referência. Tem sistema fixação compatível com os demais suportes posicionadores, podendo usar os mesmos componentes para fixação na bancada óptica. Para esta modalidade de iluminação não é necessária a determinação de sua posição, bastando que a fixação seja rígida. Uma das superfícies do semi-espelho deve ter coating anti-reflexivo. No anexo B encontra-se as especificações detalhadas destes componentes.

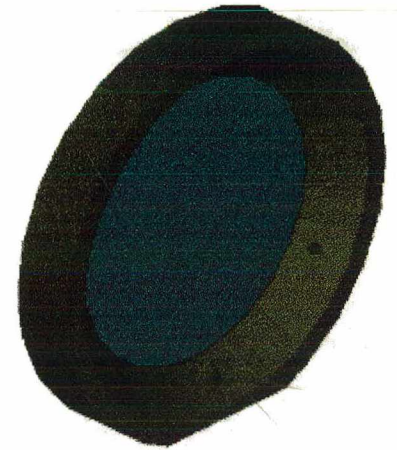


Figura 2.11 Semi-espelho de Observação.

c) Anteparo de Referência

É usado em configurações que empregam iluminação simples para obter sensibilidade fora do plano. A função deste componente é fornecer uma superfície imóvel, para gerar um padrão de "speckle" de referência. Deve ser fixado rigidamente à bancada óptica.

C) Medição das coordenadas da região de interesse na peça.

Como ainda não foram implementados nenhum dos métodos pesquisados no Labmetro para integrar a medição de formas com holografia, como por exemplo técnicas de "Contouring", ainda hoje são usados instrumentos convencionais para medir a região a ser analisada na peça, como escalas, graminhos e paquímetros, sempre referenciados na furação da bancada óptica.

2.2.3 Exemplos de montagens típicas para medição com Holografia eletrônica usando-se os recursos do SINTHE.

A seguir são mostrados alguns exemplos típicos de montagens, empregando-se os dispositivos do SINTHE, para serem obtidas diferentes direções de vetores de sensibilidade.

A) Vetor de Sensibilidade Fora do Plano do Campo de Medição.

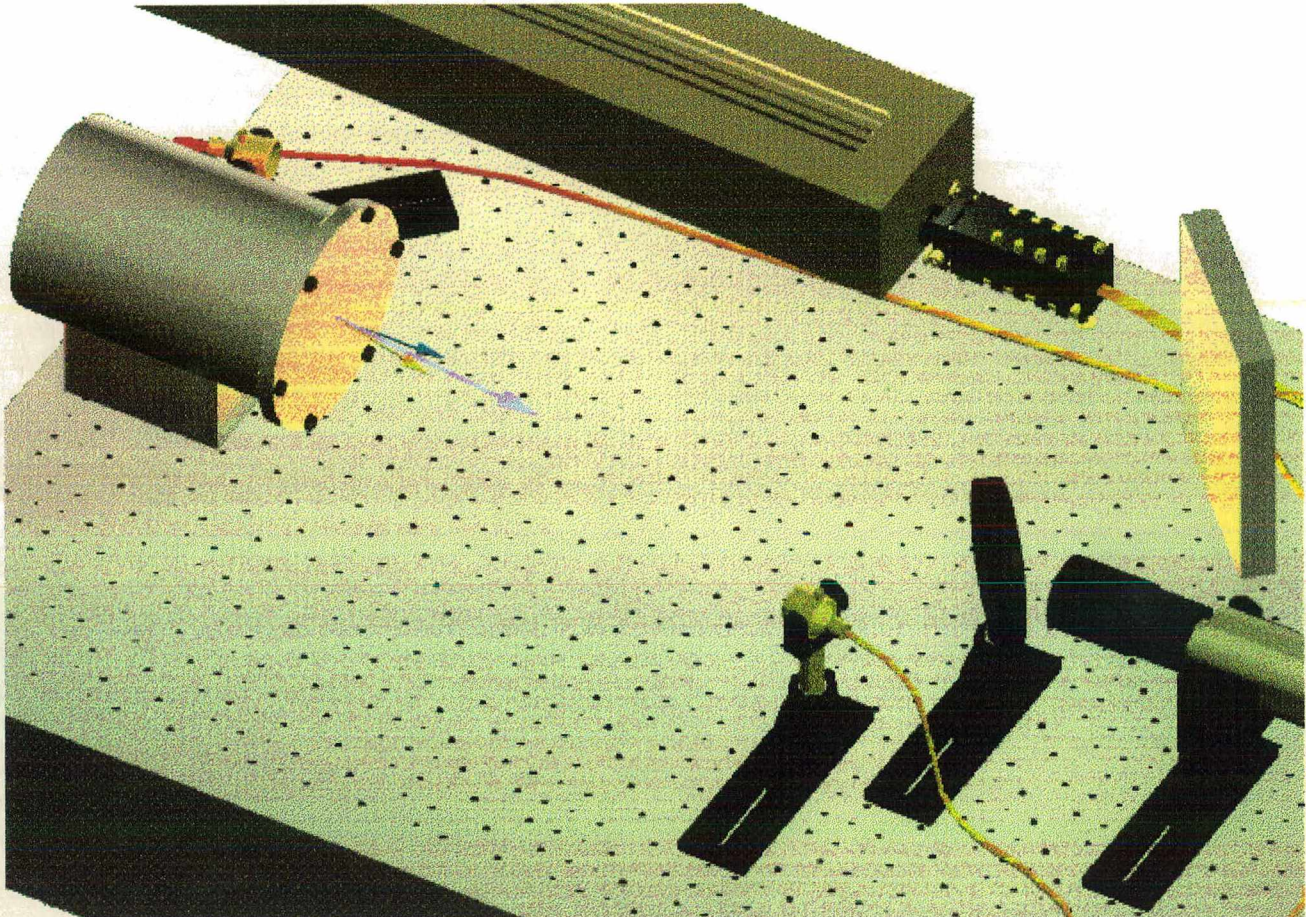


Figura 2.12 Montagem para obtenção de vetor sensibilidade fora do plano, através da iluminação simples.

Para obter sensibilidade fora do plano emprega-se iluminação simples, onde o interferograma é obtido pela soma das imagens dos padrões de “speckle” do Campo de Medição (CCM), com a imagem de um anteparo de referência imóvel, ambos iluminados pelo LASER. O vetor de sensibilidade (\vec{p}) para cada ponto da montagem é obtido pela soma de dois vetores unitários, com origem em cada ponto da peça e direcionados para o ponto iluminador simples (PIS na Figura 2.13) e o ponto observador (PO). Estes dois pontos tem que ter suas coordenadas determinadas, o que é conseguido através dos recursos dos suportes padronizados do SINTHE. Usualmente simplifica-se a determinação do vetor de sensibilidade tomando-se apenas o ponto central do campo de medição (CCM), e considera-se que sua variação não é tão grande ao longo do Campo de Medição (LCC). A Figura 2.12 mostra uma bancada óptica com este tipo de montagem, esquematizada na Figura 2.13.

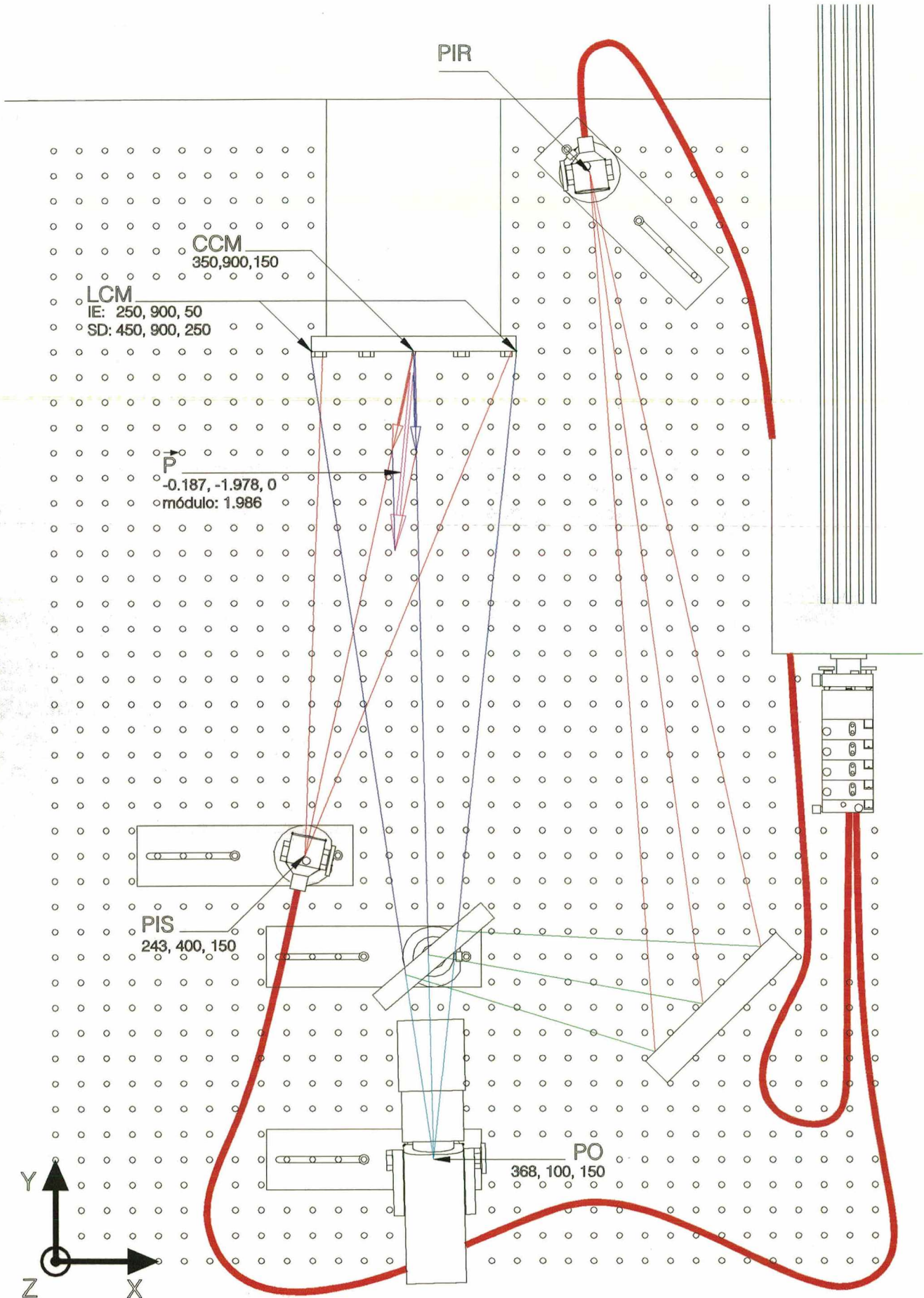


Figura 2.13 Esquema da montagem para obtenção de sensibilidade fora do plano do campo de medição através da iluminação simples.

B) Vetor Sensibilidade Horizontal No Plano do Campo de Medição.

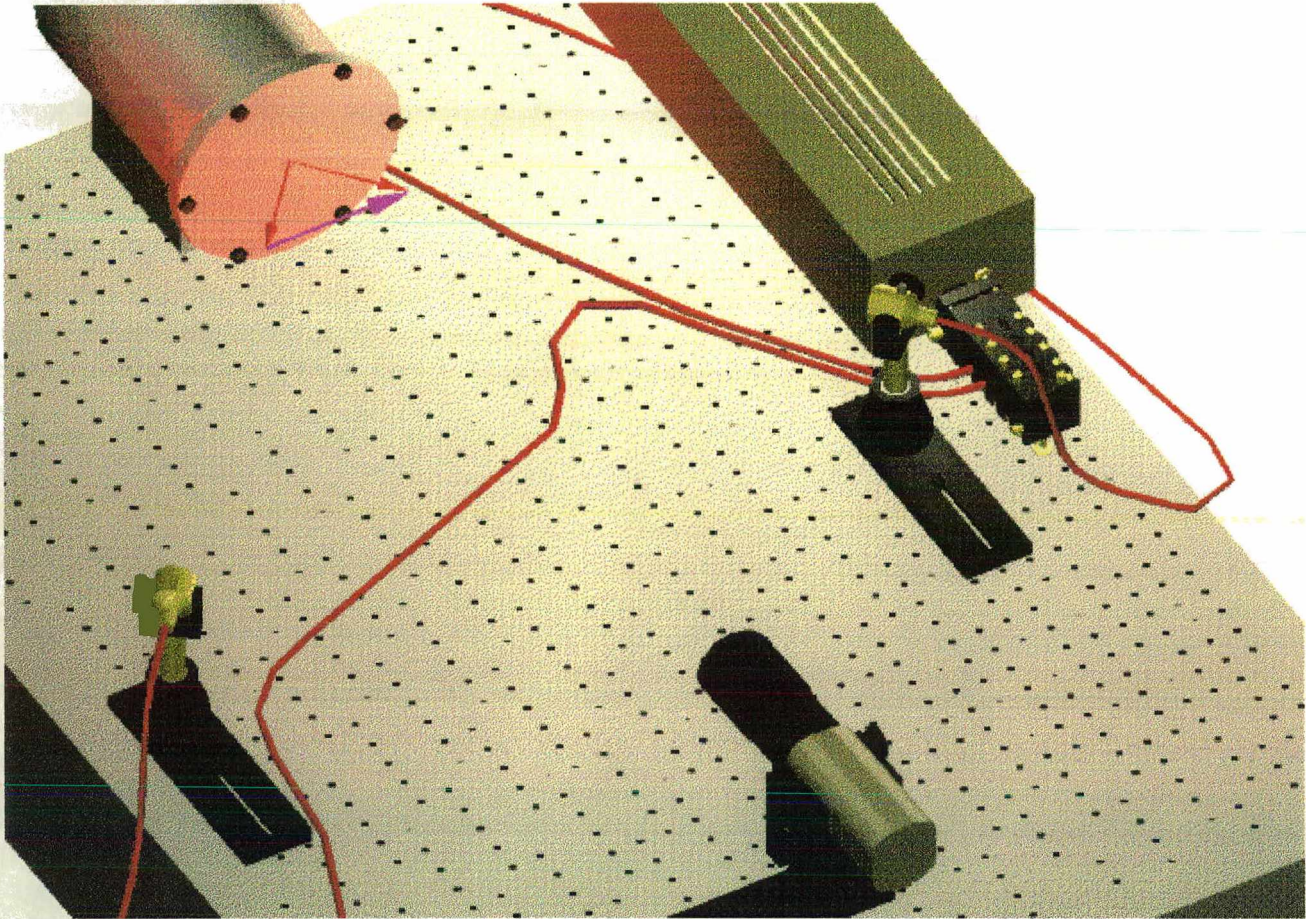


Figura 2.14 Montagem para obtenção de vetor sensibilidade horizontal no plano do campo de medição, através da iluminação dupla horizontal.

Para se obter sensibilidade no plano do campo de medição emprega-se iluminação dupla. Neste caso o interferograma é gerado pelo padrão de “speckle” resultante da dupla iluminação do campo de medição. O vetor de sensibilidade (\vec{p}) para cada ponto desta montagem é calculado pela subtração de dois vetores unitários, com origem no ponto do campo de medição, e direcionados para os pontos iluminadores duplos horizontais (PIDH1 e PIDH2 na Figura 2.15). Estes dois pontos têm que ter suas coordenadas determinadas, o que é conseguido através dos recursos dos suportes padronizados do SINTHE. A Figura 2.14 mostra uma bancada óptica com este tipo de montagem, esquematizada na Figura 2.15.

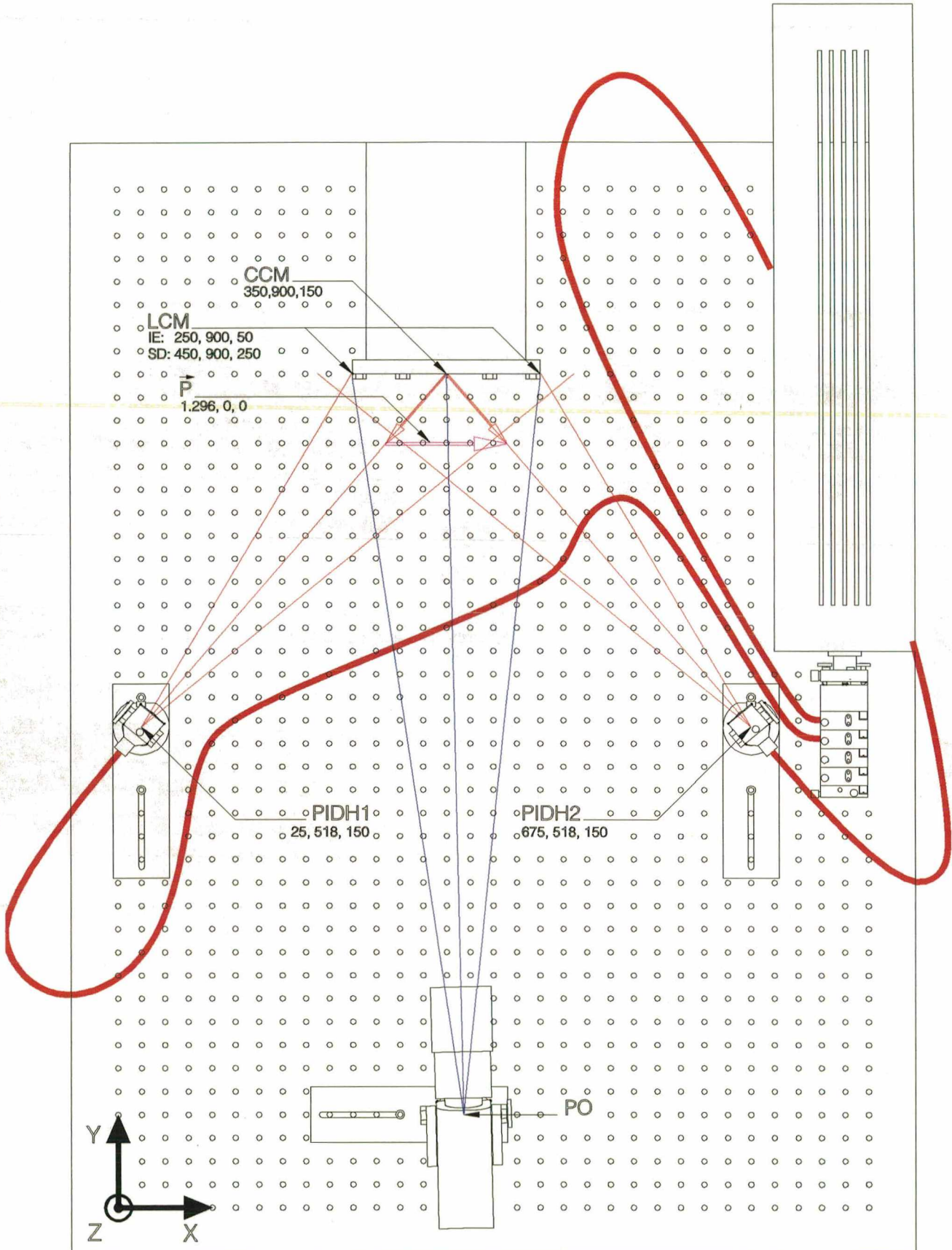


Figura 2.15 Esquema da montagem para obtenção de sensibilidade horizontal no plano do campo de medição através da iluminação dupla horizontal.

C) Vetor Sensibilidade Vertical No Plano do Campo de Medição.

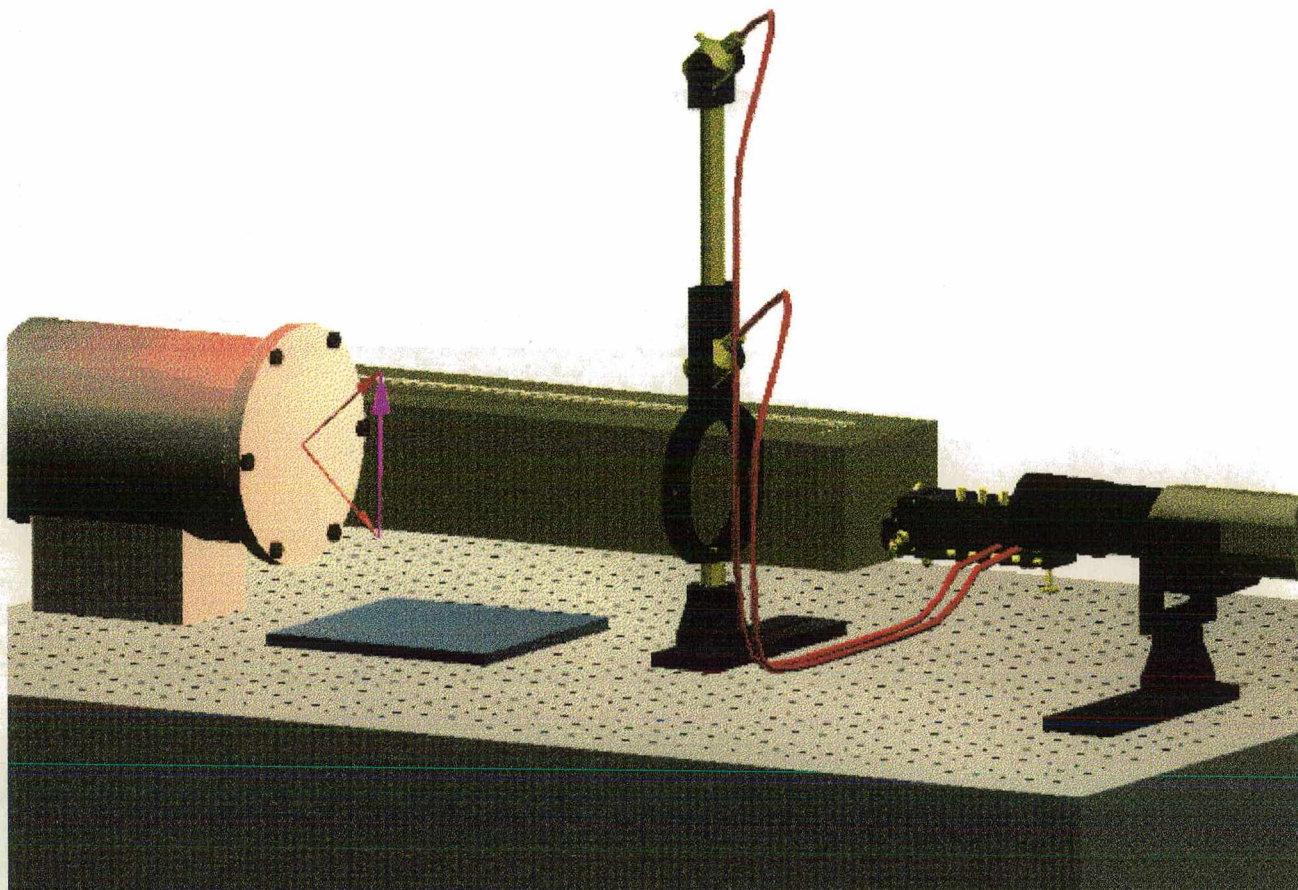


Figura 2.16 Montagem para obtenção de vetor sensibilidade vertical no plano do campo de medição, através da iluminação dupla vertical.

Como na montagem anterior, para se obter vetor sensibilidade no plano do campo de medição emprega-se iluminação dupla. Neste caso o interferograma é gerado pelo padrão de “speckle” resultante da dupla iluminação do campo de medição. O vetor de sensibilidade (\vec{p}) para cada ponto desta montagem é calculado pela subtração de dois vetores unitários, com origem no ponto do campo de medição, e direcionados para os pontos iluminadores duplos verticais (PIDV1 e PIDV2 na Figura 2.17). Estes dois pontos têm que ter suas coordenadas determinadas, o que é conseguido através dos recursos dos suportes padronizados do SINTHE. Esta montagem, em particular, conta com a possibilidade de se sobrepor, em uma mesma base dos suportes padronizados, dois cabeçotes de iluminação. Para isto usa-se a concepção do CII que permite a continuação da montagem dos suportes sobre estes. Outro recurso interessante usado nesta montagem é o direcionamento da luz proveniente de um dos pontos de iluminação através de um espelho plano horizontal, dando origem a um ponto de iluminação virtual, sob o plano da bancada óptica. Desta forma, sua coordenada z é determinada pelo rebatimento deste ponto no plano do espelho. A Figura 2.16 mostra uma bancada óptica com este tipo de montagem, esquematizada na Figura 2.17.

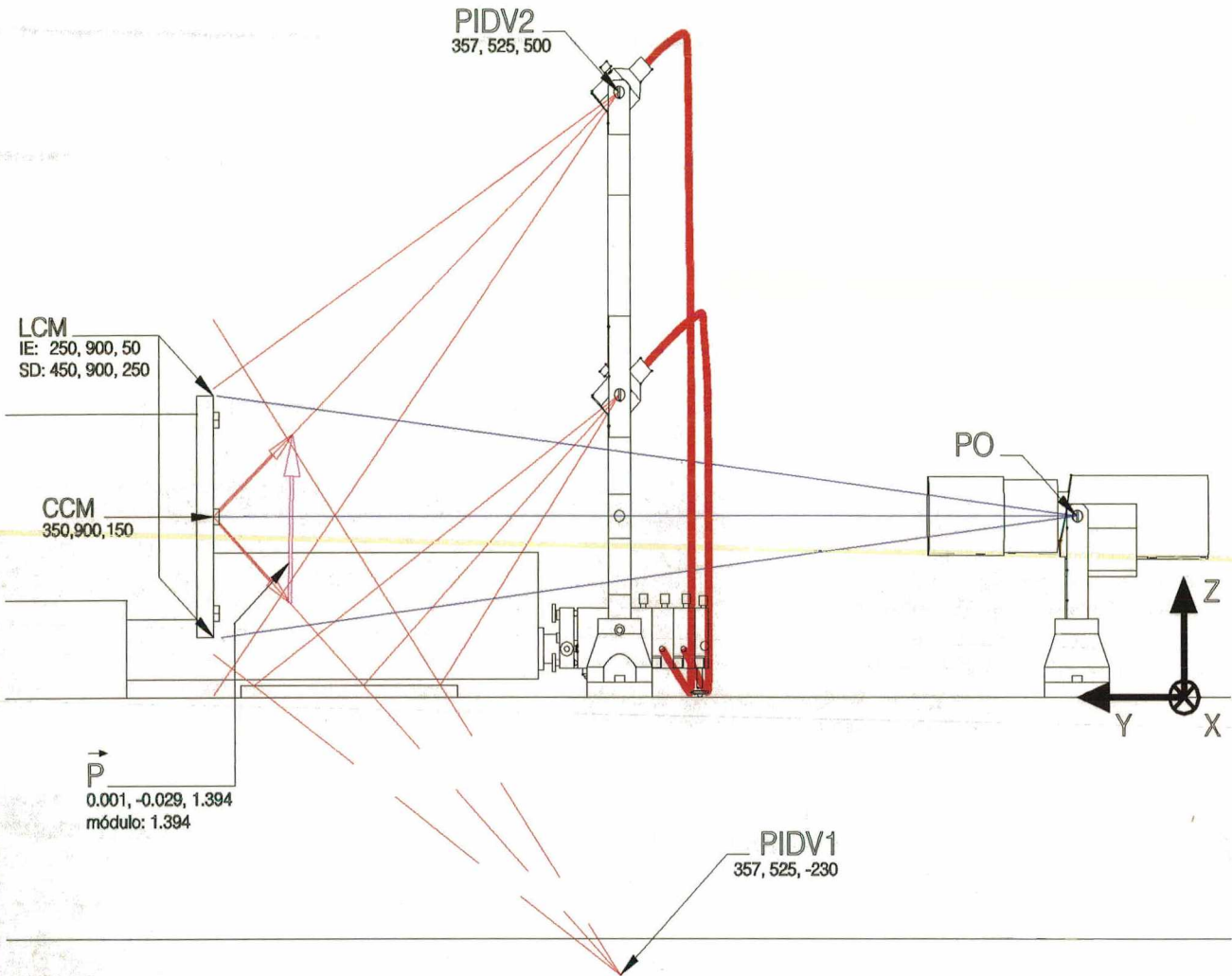


Figura 2.17 Esquema da montagem para obtenção de vetor sensibilidade vertical no plano do campo de medição, através da iluminação dupla vertical.

D) Caso Geral em Três Dimensões.

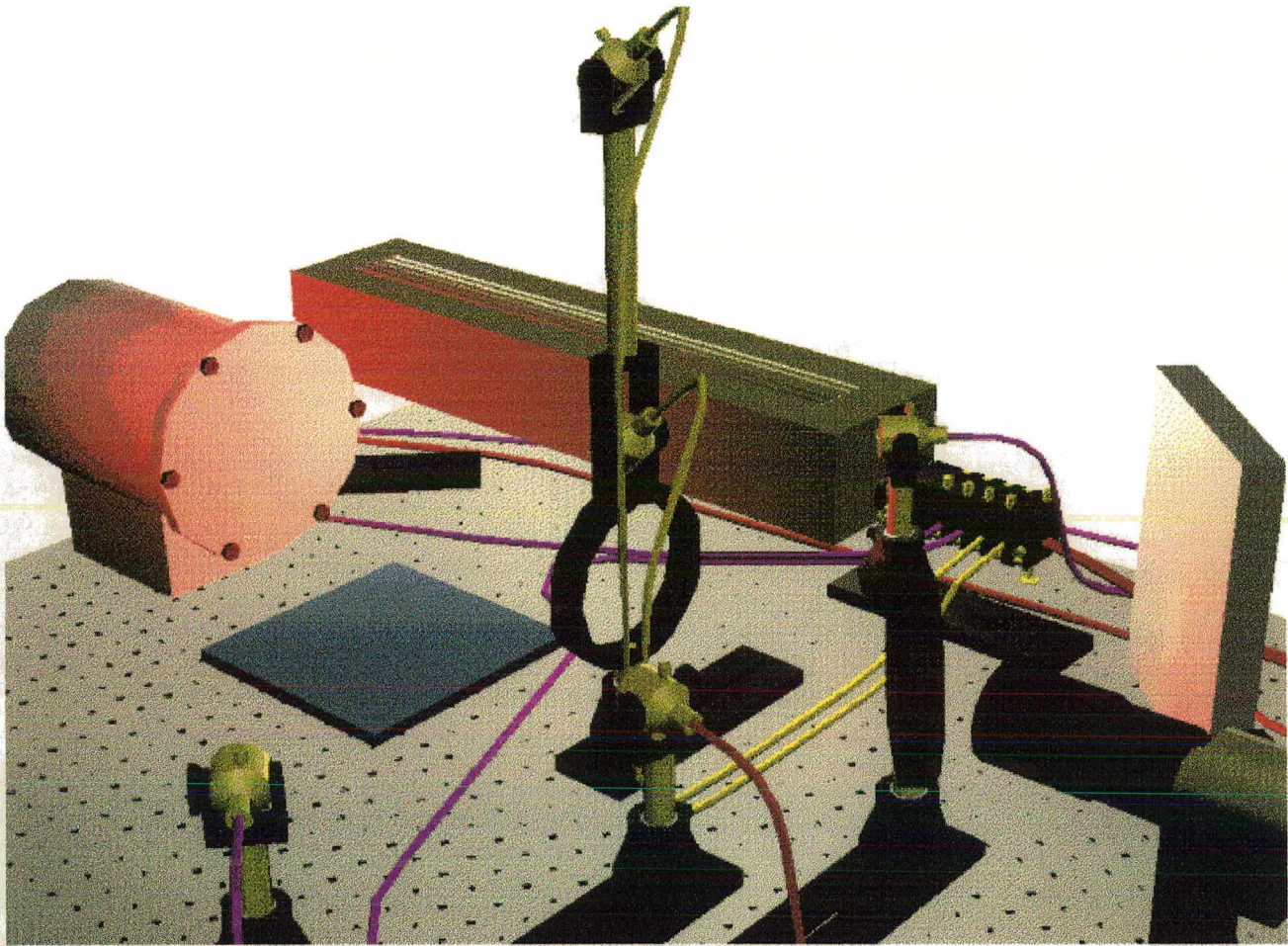


Figura 2.18 Montagem para obtenção de sensibilidade tridimensional através de múltiplas combinações dos pontos iluminadores, através de interferômetros de iluminações simples e duplas, usando o chaveamento de fibras.

No caso geral, para ser obtida sensibilidade adequada para medir campos de deslocamentos tridimensionais, utilizam-se múltiplos pontos iluminadores que, aos pares compõem múltiplos interferômetros. Assim, para que sejam obtidos pelo menos três vetores de sensibilidade linearmente independentes, são necessários um mínimo teórico de quatro pontos iluminadores. Para se obter uma maior separação angular dos vetores sensibilidade, empregam-se, em uma mesma montagem, configurações de iluminações simples e duplas.

Sendo a Holografia Eletrônica, uma técnica de medição diferencial, a informação é obtida pela comparação dos estados inicial e final do campo de medição. Assim, é necessário se obter padrões de “speckles” para cada vetor de sensibilidade nos estados inicial e final. Para ser possível a medição de deslocamentos, deformações e tensões tridimensionais, é necessário o chaveamento dos pontos de iluminação aos pares. Na concepção de chaveador empregada no SINTHE é possível a combinação de qualquer par de fibras entre si. Assim é possível com apenas quatro pontos iluminadores obter-se seis vetores de sensibilidade, com três a três linearmente independentes. Esta redundância matemática é bastante interessante do ponto de vista estatístico, pois permite a aplicação da técnica de mínimos quadrados no processamento dos dados, melhorando em muito os resultados. Na Figura 2.18 é mostrada uma bancada óptica onde são combinadas as montagens dos vetores sensibilidade apresentados nos dos três itens anteriormente explanados e esquematizados nas Figura 2.13, Figura 2.15 e Figura 2.17. Nesta montagem existem 6

pontos iluminadores: PIS, PIR, PIDH1, PIDH2, PIDV1 e PIDV2 e um ponto observador, PO, possibilitando assim 15 vetores de sensibilidade conforme a Tabela 2.1.

CCM	PO	PIS	PIDH1	PIDH2	PIDV1	PIDV2
350; 900; 150	368; 100; 150	243; 400; 150	25; 518; 150	675; 518; 150	357; 525; - 230	357; 525; 500
PIDV2	0,036; -1,731; 0,682	0,223; 0,247; 0,682	0,662; 0,031; 0,682	-0,634; 0,031; 0,682	0,001; -0,029; 1,394	
Módulo	1,861	0,759	0,951	0,932	1,394	
PIDV1	0,036; -1,702; 0,712	0,222; 0,276; - 0,712	-0,661; 0,059; - 0,712	-0,635; 0,059; - 0,712		
Módulo	1,845	0,795	0,973	0,956		
PIDH2	0,670; -1,761; 0,000	0,857; 0,216; 0,000	1,296; 0,000; 0,000			
Módulo	1,885	0,884	1,296			
PIDH1	-0,626; -1,761; 0,000	-0,439; 0,216; 0,000				
Módulo	1,869	0,489				
PIS	-0,187; -1,978; 0,000					
Módulo	1,986					

Tabela 2.1 Vetores de sensibilidade para todas as possíveis combinações da montagem tridimensional apresentada na Figura 2.18

2.2.4 Processamento dos padrões de "Speckle" e a quantificação dos deslocamentos, deformações e tensões

Como o principal objetivo deste trabalho é o hardware da estação holográfica, somente serão explanadas de forma simplificada as etapas do processamento após a etapa de aquisição dos mapas de fase. Esta parte da Estação Holográfica é melhor detalhada no manual de seu software [13] e foi melhor estudada em outra dissertação de mestrado [8]. A etapa de pós processamento onde os deslocamentos são transformados em deformações e tensões, não será abordada neste trabalho. Esta parte do SINTHE é abordada em outra dissertação [6]

A) Subtração ao vivo

Tem a finalidade de gerar franjas em tempo real para que se possa observar qualitativamente o transiente entre os estágios inicial e final dos deslocamento sofridos pela peça no campo de medição. Para que sejam obtidas estas franjas em tempo real, toma-se uma imagem de referência, a seguir, conforme os novos quadros vão sendo digitalizados, a ALU da placa de processamento da interface de aquisição e processamento inteiro de imagens realiza e apresenta a subtração deste quadro de referência com cada novo quadro adquirido. As franjas são assim geradas na imagem ao vivo do padrão de granulado óptico (SP), na taxa de aquisição e processamento da interface de aquisição e processamento inteiro de imagens, que, no caso, é de 15 quadros/s. Para a finalidade de observação qualitativa esta taxa de aquisições e processamento pode ser considerada tempo real, uma vez que a taxa de discernimento de imagens do olho humano é de aproximadamente 12 quadros/s.

Uma importante função da análise quantitativa proporcionada por este recurso é o acompanhamento da evolução da ordem de franja de ordem zero, visando determinar o valor inteiro da OF em um dado ponto, relacionadas a cada vetor sensibilidade. Outras funções importantes são proporcionadas por este recurso como: a) avaliar a densidade de franjas em dado experimento; b) observar defeitos sob a superfície de um corpo [7]; c) fornecer uma noção da forma do deslocamento sofrido pela peça; etc.

B) Cálculo dos mapas de fase

Através do cálculo da fase, para cada pixel da imagem é determinado um valor entre 0 e 255, proporcional à fase entre 0 e 2π , conforme está descrito no item A.3.2 (Anexo A). A imagem resultante do quadro que contém os resultados deste processamento, pixel a pixel, é aqui denominada mapa de fase. Este tem um aspecto de um mapa de franjas, porém não apresenta variação senoidal entre uma franja e outra, mas sim uma variação tipo dente de serra. O valor do degrau do dente de serra é de 256 níveis de cinza e corresponde a 2π radianos, caracterizando uma ambigüidade de $n \times 2\pi$. Na Figura 2.19 pode se observar o aspecto de uma mapa de fase.

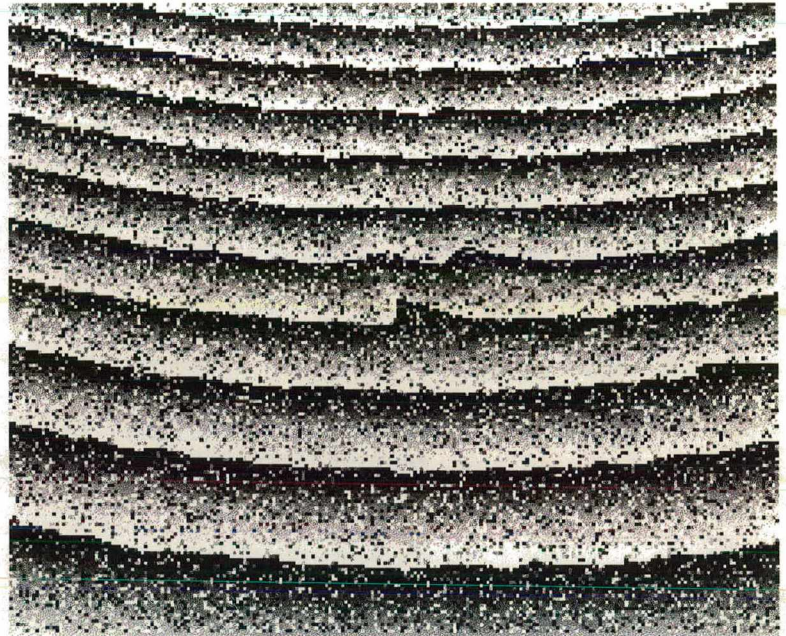


Figura 2.19 Mapa de Fase

No diagrama da Figura 2.20 é mostrado o procedimento de processamento de imagens para se obter o mapa de fase:

- Para o estado inicial adquire-se quatro imagens defasadas de 90° . A defasagem de 90° é conseguida pelo translação do espelho do PZT no módulo divisor e deslocador de fase do chaveador de fibras ópticas em passos de $\lambda/4$. A seqüência de aquisição é: 270° , 90° , 0° e 180° , por questões de eficiência computacional, economizando-se assim quadros de armazenagem temporária. Estas operações são realizadas na ALU da interface de aquisição e processamento inteiro de imagens (DT2861).
- Em seguida, calcula-se a fase de cada pixel no estado inicial através da operação $\text{atan2}(N;D)$, que é uma operação de arco tangente estendida para um contra domínio de $\pm\pi$, usando para isto os sinais do numerador e denominador. O resultado desta operação é um quadro com um mapa de fase de referência, cuja imagem tem um aspecto aleatório, sem nenhuma correlação com a forma do campo de medição, visto que traz a informação da fase inicial dos ‘speckle’. Esta operação é executada na UPPFI (DT2878).
- Em seguida, a peça a medir é submetida ao carregamento de interesse e repetem-se os passos anteriores para se ter o mapa de fase dos ‘speckle’ no estado final.
- Após a subtração dos quadros com a fase inicial e final de cada ‘speckle’, obtém-se então o mapa de fase que se correlaciona com os deslocamentos sofridos pelo campo de medição, segundo o respectivo vetor de sensibilidade.

O mapa de fase apresenta um conjunto completo de informações sobre o deslocamento, possibilitando-se saber o sentido do deslocamento, o valor total do deslocamento pela contagem de franjas e valores interpolados entre franjas.

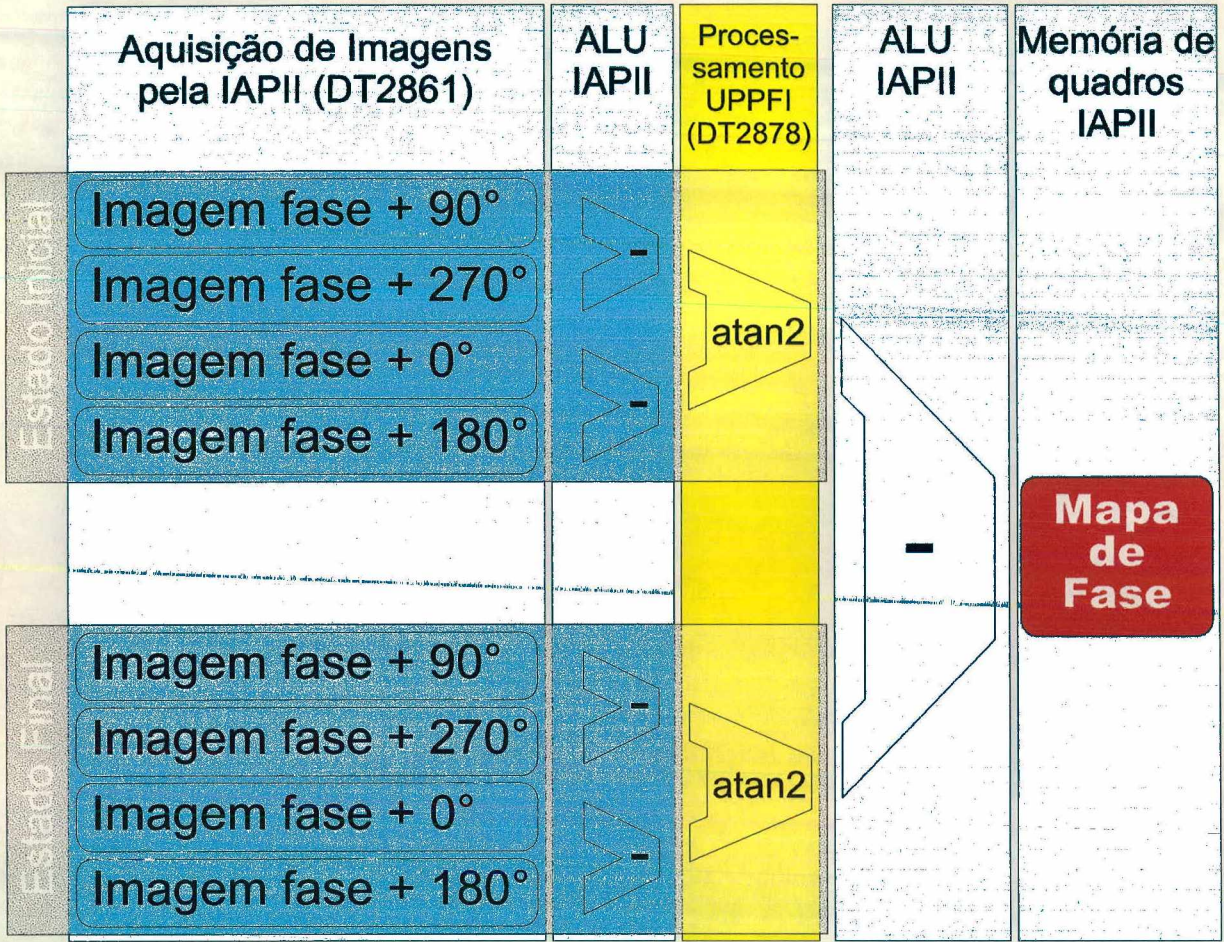


Figura 2.20 Diagrama de aquisição e processamento dos mapas de fase.

C) Filtragem no plano de Fourier

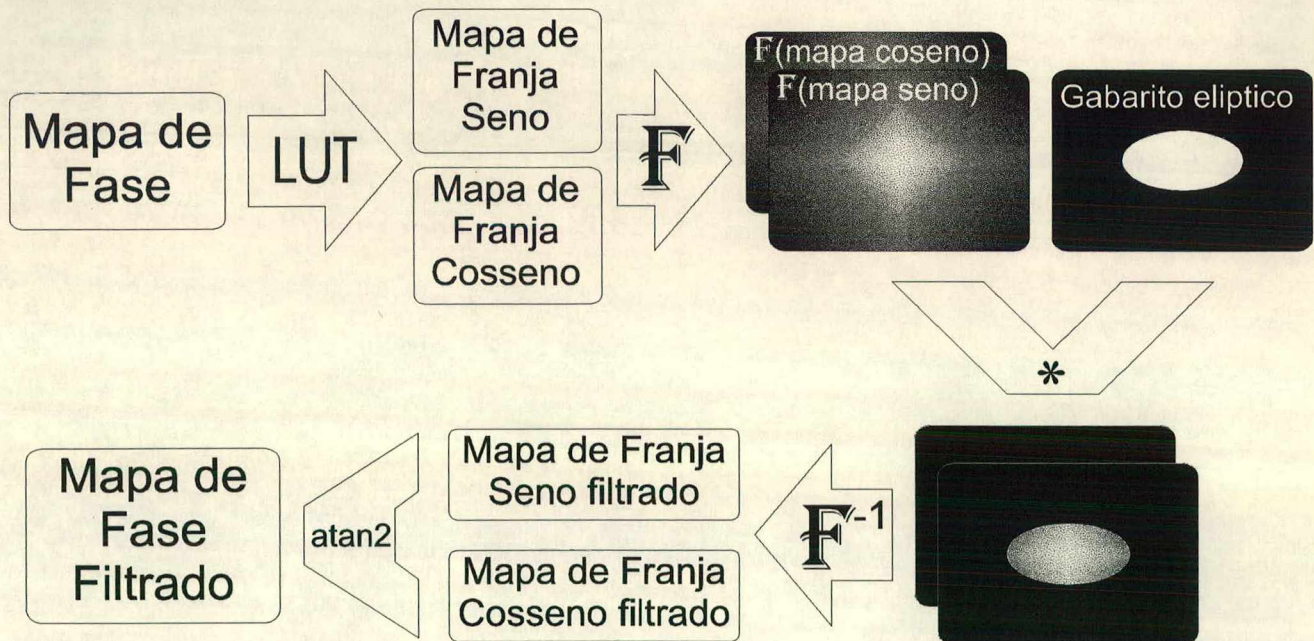


Figura 2.21 Diagrama de filtragem do mapa de fase

Como pode ser visto da Figura 2.19 o mapa de fase típico da holografia eletrônica é bastante ruidoso, necessitando de um tratamento de filtragem para poder ser utilizado na quantificação dos resultados. O procedimento de filtragem do SITHE é realizado no plano de Fourier, conforme mostrado no diagrama da Figura 2.21, e o resultado pode ser visto na Figura 2.22.

D) Remoção do salto de fase

O passo seguinte à filtragem é a remoção do salto de fase através de algoritmo específico, que, utilizando-se de duas páginas de memória do sistema de processamento de imagens, remove o salto de fase, empilhando as quedas de $255 \Rightarrow 0$ para $255 \Rightarrow 256$ e recomeçando assim um novo ciclo. Utiliza-se

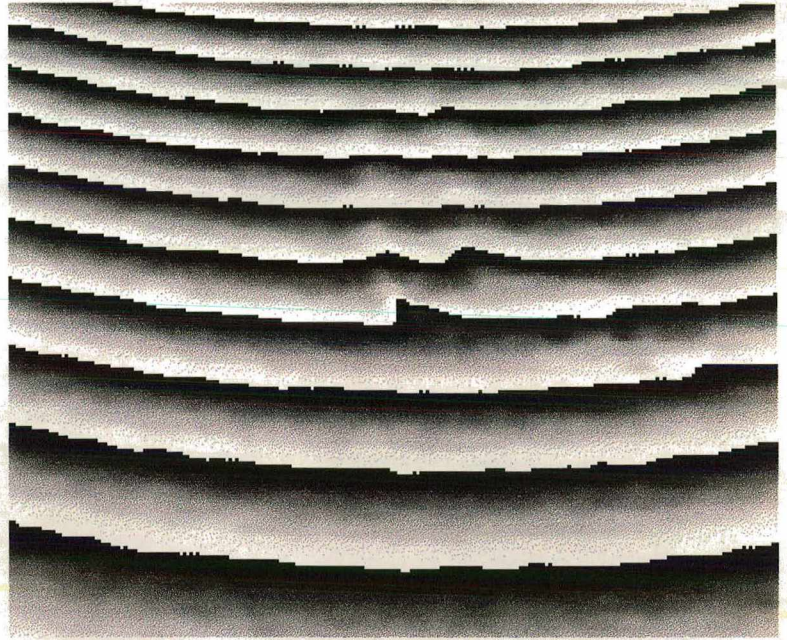


Figura 2.22 Mapa de Fase Filtrado

então uma página para os 8 bits menos significativos e a outra para os 8 bits mais significativos. O resultado é um mapa de fase sem descontinuidade de 16 bits/pixel.

E) Discretização dos mapas de fase com salto removido para cálculo de deslocamentos, deformações e tensões.

Como o número da totalidade dos pontos medidos é definido em função da resolução da memória do SPI, seu volume é muito grande para ser manipulado e transformado em resultados apresentáveis. Define-se então uma malha de discretização de pontos onde os resultados são quantificados.

F) Processamento de resultados 3D.

Após o processamento e discretização de todos os mapas de fase, o programa toma os dados da montagem para determinar cada um dos vetores de sensibilidade e correlaciona-los com os pontos discretizados dos mapas de fase. No caso em que mais de três vetores de sensibilidade linearmente independentes serem usados, a redundância matemática é processada utilizando-se o método de mínimos quadrados, o que reduz os erros aleatórios nos resultados.

3. Análise teórica das fontes de erros.

Este capítulo avalia a influência das principais fontes de erro presentes na medição com a Estação Holográfica

3.1 Influência do comprimento de onda.

O comprimento de onda do LASER é a “escala” do sistema de medição Estação Holográfica. Usualmente emprega-se LASER à gás HeNe, operando em modo longitudinal múltiplo, com $\lambda = 632.8$ nm. Para aplicações especiais dispõem-se de um LASER Ion Ar, operando em modo longitudinal simples, com um dentre os diversos comprimentos de onda sintonizáveis. Outros pesquisadores já empregam sistemas baseados em LASER diodo com modo longitudinal estabilizado (selecionado e mantido). Aqui analisa-se apenas a aplicação usual do HeNe.

Os LASER à gás de cavidade passiva operam em modo longitudinal múltiplo. Sua largura de banda espectral pode ser calculada em função do comprimento da cavidade (L) e da velocidade da luz (c) [14] [15] por:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2 \cdot L} \quad (3.1)$$

Onde:

$\Delta\nu$ é largura de banda espectral do LASER.

Sendo:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (3.2)$$

Onde:

λ é o comprimento de onda

ν é a frequência do LASER

A equação (3.2) ao ser derivada fornece:

$$\Delta\lambda_L = \frac{c}{\nu^2} \cdot \Delta\nu \quad (3.3)$$

Onde:

$\Delta\lambda_L$ é a incerteza do comprimento de onda em função do comprimento da cavidade.

Substituindo os termos de 3.3 por 3.1 e 3.2, chega-se à:

$$\Delta\lambda_L = \frac{\lambda^2}{2 \cdot L} \quad (3.4)$$

Se a equação (3.4) for empregada com as características construtivas do LASER usado na Estação Holográfica obtêm-se:

- $\lambda = 632,8 \text{ nm}$
- $L = 950 \text{ mm}$

Então:

- $\Delta\lambda = 0,2 \text{ pm}$

Então, no que se refere as características do LASER, as variações esperadas para o comprimento de onda são completamente desprezáveis.

Para avaliar a influência da atmosfera no comprimento de onda, analisa-se as variações da velocidade da luz, quando esta percorre meios diferentes do vácuo: Na atmosfera para que ocorra uma variações da ordem de $1/10^6$ na velocidade da luz e, conseqüentemente, no comprimento de onda é necessário que ocorram variações na ordem de [17]:

- $1 \text{ }^\circ\text{C}$
- $338,6 \text{ Pa}$
- 80% na umidade relativa do ar.

Variações do comprimento de onda do Laser HeNe na atmosfera podem ser modeladas pela equação 3.5 [17]:

$$\lambda_{atm} = \lambda_{vacuo} \cdot C(P, T, H)$$

Onde C é função da pressão atmosférica P [Pa], da temperatura T [$^\circ\text{C}$] e da umidade relativa H [%], conforme a equação:

$$C(P, T, H) = \frac{1}{2.87753 \cdot 10^{-9} \cdot P \cdot \left[\frac{1 + 7.5 \cdot 10^{-9} \cdot P \cdot (0.817 - 0.0133 \cdot T)}{1 + 0.003661 \cdot T} \right] - 3.033 \cdot 10^{-9} \cdot H \cdot e^{0.057627 \cdot T} + 1} \quad (3.5)$$

Assim, o comprimento de onda do LASER HeNe para condições normais de pressão, temperatura e umidade para o laboratório em Florianópolis, pode ser calculado com::

- $P = 101.6 \text{ kPa}$
- $T = 23 \text{ }^\circ\text{C} (296 \text{ K})$
- $H = 60\%$ de umidade relativa do ar.
- $\lambda_{vacuo} = 632,991 \text{ nm}$ [17]

Assim:

- $C = 0,999731$
- $\lambda_{atmosfera} = 632,8207 \text{ nm}$

Para se conhecer a influência de variações típicas destes parâmetros ao longo de um ensaio que dure até 1 h, calculam-se os respectivos termos da equação de combinação de erros para a pressão, temperatura e umidade:

$$\Delta C_P = -\frac{2877.5 + 10.5 \cdot T}{10^3 + 7.322 \cdot T + 0.0134 \cdot T^2} \cdot 10^{-9} \cdot \Delta P \quad (3.6)$$

$$\Delta C_T = -\frac{351 \cdot 10^{-9} \cdot P^2 + 10.535 \cdot P + 175 \cdot H \cdot e^{5.76 \cdot 10^{-2} \cdot T} + 1.28 \cdot H \cdot e^{5.76 \cdot 10^{-2} \cdot T} \cdot T + 2.34 \cdot 10^{-3} \cdot H \cdot e^{5.76 \cdot 10^{-2} \cdot T} \cdot T^2}{10^3 + 7.322 \cdot T + 0.0134 \cdot T^2} \cdot 10^{-9} \cdot \Delta T \quad (3.7)$$

$$\Delta C_H = -3.033 \cdot 10^{-9} \cdot e^{5.76 \cdot 10^{-2} \cdot T} \cdot \Delta H \quad (3.8)$$

Considerando as seguintes variações como um máximo admissível ao longo de um experimento no laboratório:

- $\Delta C_P = 500 \text{ Pa}$ $\Delta \lambda_P = 0,84 \text{ pm}$
- $\Delta C_T = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ $\Delta \lambda_T = 1,21 \text{ pm}$
- $\Delta C_H = 20\%$ $\Delta \lambda_H = 0,14 \text{ pm}$

Fazendo a soma quadrática dos desvios de λ em função de cada componente que o afeta tem-se:

$$\Delta \lambda = \sqrt{\Delta \lambda_L^2 + \Delta \lambda_P^2 + \Delta \lambda_T^2 + \Delta \lambda_H^2} \quad (3.9)$$

$$\Delta \lambda = 1.49 \text{ pm}$$

Assim pode-se dizer que o comprimento de onda médio a ser utilizado nesta região é:

$$\lambda = 632,820 \pm 0,002 \text{ nm}$$

3.2 Influência da disposição espacial.

A escolha da disposição dos diversos elementos ativos usados em uma medição com holografia (posição do observador, fontes de luz e peça a medir) influencia consideravelmente as incertezas presentes no resultado da medição. Este item aprofunda a análise destes parâmetros já realizada em trabalhos anteriores [18].

3.2.1 Medição de deslocamentos

Os deslocamentos tridimensionais $d_{u,v,w}$ de um campo de medição sobre a superfície de uma peça são medidos na Estação Holográfica pela técnica da holografia eletrônica (ESPI), conforme está descrito no apêndice A. Será considerado apenas o equacionamento básico para analisar a sensibilidade do sistema e avaliar a significância dos desvios de posição dos pontos importantes da montagem da bancada óptica na incerteza global do sistema.

Neste sistema de medição, basicamente, padrões de franjas são quantificados através de mapas de fase, e estes são relacionados entre si para o cálculo das componentes dos deslocamento de pontos no campo de medição através de diversos vetores de sensibilidade linearmente independentes entre si. Estes vetores de sensibilidade são determinados para cada ponto do campo de medição pelas coordenadas espaciais dos conjuntos de pares de pontos iluminadores duplos e/ou conjunto de pares ponto iluminador simples e ponto observador. As coordenadas destes pontos sobre a bancada óptica são determinadas através de recursos específicos dos suportes especiais do SINTHE, detalhados no capítulo 2.

A) Iluminação simples

Uma montagem típica usando a Estação Holográfica com iluminação simples é mostrada na figura 2.12 e detalhada na figura 2.13. A peça é iluminada por um feixe LASER emitido pela terminação de uma fibra no cabeçote iluminação, e o feixe de referência é enviado à câmera pelo espelho parcial.

Na iluminação simples os pontos importantes para a determinação do vetor de deslocamentos $d = (u,v,w)$ de um ponto genérico $P = (x,y,z)$, que na figura 2.13 está representado pelo centro do campo de medição, são o ponto observador $PO = (x_o, y_o, z_o)$ e o ponto iluminador simples $PIS = (x_1, y_1, z_1)$. O vetor deslocamento é determinado pela equação:

$$\vec{p} \cdot \vec{d} = \lambda \cdot OF \quad (3.10)$$

Onde:

- $\vec{d}_{u,v,w}$: Vetor deslocamento do ponto P
- λ : Comprimento de onda do LASER
- OF: Ordem de Franja
- \vec{p} : É o vetor sensibilidade definido como:

$$\vec{p} = \vec{n}_o + \vec{n}_1 \quad (3.11)$$

Onde:

- \vec{n}_o : É o vetor unitário apontando de P para PO
- \vec{n}_1 : É o vetor unitário apontando de P para PIS

Assim, o vetor sensibilidade pode ter um módulo de até 2 e, no caso, é aproximadamente normal à peça. Logo, este tipo de iluminação resulta em sensibilidade adequada para medição de componentes do deslocamento fora do plano.

B) Dupla iluminação

Um interferômetro com características distintas pode ser obtido pela dupla iluminação do campo de medição, como mostrado nas figuras 2.14 e 2.16', cujas montagens foram detalhadas através das figuras 2.15 e 2.17. Nestas montagens não há feixe de referência. O Padrão de "speckle" de uma iluminação serve como referência para o da outra. Neste caso, o deslocamento ainda é determinado pela equação 3.10, porém o vetor de sensibilidade é determinado da seguinte maneira:

$$\vec{p} = \vec{n}_1 - \vec{n}_2 \quad (3.12)$$

Onde:

- \vec{n}_1 : É o vetor unitário apontando de P para PIDH1
- \vec{n}_2 : É o vetor unitário apontando de P para PIDH2

Assim, o vetor sensibilidade pode ter um módulo de até 2 e, se a iluminação for simétrica, é aproximadamente paralelo à superfície da peça. Logo, este tipo de iluminação resulta em sensibilidade adequada para medição de componentes do deslocamento no plano do campo de medição. A montagem da figura 2.15 é predominantemente sensível à deslocamentos horizontais. Já a montagem da figura 2.17, a deslocamento verticais.

C) Iluminação combinada para sensibilidade tridimensional

Em muitas situações é necessária a medição simultânea das componentes tridimensionais dos deslocamentos sofridos pela peça. Então, uma combinação das montagens da Figura 2.12, Figura 2.14, Figura 2.16 pode ser realizada com o recurso de chaveamento dos pares de iluminação. Obtém-se assim três mapas de fase, um para cada vetor linearmente independente. Uma montagem para sensibilidade tridimensional é mostrada na Figura 2.18.

Um conjunto das três equações do tipo da (3.10), e linearmente independentes, é necessário para o cálculo das componentes tridimensionais do deslocamento. Este sistema de equações pode ser escrito na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} p_{1x} & p_{1y} & p_{1z} \\ p_{2x} & p_{2y} & p_{2z} \\ p_{3x} & p_{3y} & p_{3z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \lambda \begin{Bmatrix} OF_1 \\ OF_2 \\ OF_3 \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

ou

$$[p]\{d\} = \lambda \{OF\} \quad (3.14)$$

Onde:

$[p]$ é a matriz de sensibilidade combinada

$\{d\}$ é o vetor deslocamento

$\{OF\}$ é o vetor ordem de franja.

A solução do sistema 3.14 determina o vetor deslocamento para cada ponto medido no campo de medição da peça.

D) Solução por mínimos quadrados para equações redundantes

A matriz de sensibilidade é calculada através das coordenadas dos pontos sobre a peça, iluminadores e do ponto observador. O vetor ordem de franja é extraído dos mapas de fase medidos para cada par de iluminação. Os erros na determinação destes elementos podem ser fortemente intensificados e propagados quando o sistema de equações 3.14 é resolvido. Caso o determinante da matriz de sensibilidade seja baixo pode ser impossível obter valores confiáveis para o vetor deslocamento.

Uma forma de otimizar a performance metrológica do sistema é a escolha cuidadosa da disposição dos pontos de iluminação e observação de forma a que se tenha um valor alto para o determinante da matriz de sensibilidade. Isto é conseguido quanto mais ortogonais resultarem os vetores de sensibilidade e quanto maior forem os seus módulos.

Outra forma de otimizar o desempenho do sistema é incrementar o número de pares de iluminação, ou formar novas combinações com os pontos de iluminação já disponíveis. Como exemplo cita-se o caso da montagem da figura 2.18, onde, através da combinação múltipla dos pontos iluminadores e ponto observador, é possível obter todos os vetores de sensibilidades relatados na tabela 2.1. Assim, a matriz de sensibilidade não será mais quadrada, o que resulta em um sistema redundante de equações, que pode ser resolvido através de mínimos quadrados, por:

$$[p]^T [p] \{d\} = \lambda [p]^T \{OF\} \quad (3.15)$$

Onde:

$$\{d\} = \lambda \left([p]^T [p] \right)^{-1} [p]^T \{OF\} \quad (3.16)$$

3.2.2 Medição de deformações

Deformações mecânicas podem ser calculadas pelas derivadas das componentes do deslocamento. As derivadas dos deslocamentos podem ser obtidas pela diferenciação direta da equação 3.10:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{d}}{\partial x} \cdot \vec{p} + \vec{d} \cdot \frac{\partial \vec{p}}{\partial x} &= \lambda \frac{\partial OF}{\partial x} \\ \frac{\partial \vec{d}}{\partial y} \cdot \vec{p} + \vec{d} \cdot \frac{\partial \vec{p}}{\partial y} &= \lambda \frac{\partial OF}{\partial y} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Onde:

$\partial OF / \partial x$ e $\partial OF / \partial y$ são as derivadas espaciais do mapa de fase no ponto de interesse.

$\partial p / \partial x$ e $\partial p / \partial y$ são as derivadas espaciais do vetor sensibilidade.

Para resolver os sistema no caso de sobre determinação emprega-se também a técnica de mínimos quadrados, e a solução é dada na equação 3.18 [19]:

$$\begin{aligned} \{d\} &= \lambda \left([p]^T [p] \right)^{-1} [p]^T \{OF\} \\ \left\{ \frac{\partial d}{\partial x} \right\} &= \left([p]^T [p] \right)^{-1} [p]^T \left(\lambda \left\{ \frac{\partial OF}{\partial x} \right\} - \left[\frac{\partial p}{\partial x} \right] \{d\} \right) \\ \left\{ \frac{\partial d}{\partial y} \right\} &= \left([p]^T [p] \right)^{-1} [p]^T \left(\lambda \left\{ \frac{\partial OF}{\partial y} \right\} - \left[\frac{\partial p}{\partial y} \right] \{d\} \right) \end{aligned} \quad (3.18)$$

3.2.3 Estimativa de erros

A) Medição de deslocamentos

Para quantificação dos erros do sistema, será analisado inicialmente o caso mais simples: cálculo de deslocamento quando direção é conhecida. Assim, apenas uma equação (3.10) é suficiente e esta pode ser rescrita como:

$$d = \frac{\lambda OF}{p_x \cdot nd_x + p_y \cdot nd_y + p_z \cdot nd_z} \quad (3.19)$$

Onde p_x , p_y , e p_z são as componentes do vetor sensibilidade, nd_x , nd_y , nd_z são as componentes do um vetor unitário na direção do deslocamento, d é a magnitude do deslocamento. A incerteza na determinação de d (Δd), pode ser estimada a partir de:

$$\Delta d = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial p_x} \Delta p_x\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial p_y} \Delta p_y\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial p_z} \Delta p_z\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial \lambda} \Delta \lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial OF} \Delta OF\right)^2} \quad (3.20)$$

Onde:

- $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ são as incertezas nas componentes do vetor sensibilidade
- $\Delta \lambda$ é a incerteza no comprimento de onda
- ΔOF é a incerteza na ordem de franja

Para quantificar a influência de cada uma das parcelas de erros na medição do deslocamento, será considerada uma montagem típica como a da Figura 2.12, detalhada na Figura 2.13, onde: $P = (350, 900, 150)$ mm; $PO = (368, 100, 150)$ mm; $PIS = (243, 400, 150)$ mm; o vetor $\vec{n}_d = (0, -1, 0)$. Nesta montagem calcula-se $\vec{p} = (-0.187, -1.976, 0)$. Das tolerâncias de fabricação das peças dos suportes padronizados do SINTHE pode-se esperar erros $\Delta x = \pm 0,5$ mm, $\Delta y = \pm 0,5$ mm e $\Delta z = \pm 0,25$ mm. Para medição das coordenadas de um ponto P sobre a peça, pode-se esperar erros de até $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \pm 0,5$ mm, em função da ausência recursos específicos para medir a forma e posição da peça. Da análise de incerteza relativa ao comprimento de onda tem-se $\Delta \lambda = 1,5$ pm. Pode-se por hora assumir ΔOF como sendo de 0,05. Assim, para esta montagem, com um deslocamento tal que se tenha no ponto P $OF = 25$, tem-se então:

- $d = 7.9998$ μm
- $\Delta d(\Delta p) = 1,75$ nm
- $\Delta d(\Delta \lambda) = 0,019$ nm
- $\Delta d(\Delta OF) = 16$ nm
- $\Delta d = 16,1$ nm

Como mostram os resultados acima, a principal fonte de erros é a incerteza na ordem de franja, ou seja, na medição que resulta nos mapas de fase. Esta fonte de erro é uma ordem de grandeza superior aos erros gerados pela incerteza de posicionamento dos pontos ópticos e três ordens de grandeza superior àquela gerada pela incerteza no comprimento de onda do LASER. Desta forma se forem negligenciadas as fontes secundárias, pode-se estimar a incerteza de medição de deslocamentos do sistema como sendo apenas função de ΔOF :

$$\Delta d = \frac{1}{\vec{p} \cdot \vec{n}_d} \lambda \Delta OF \quad (3.21)$$

Um erro de medição mínimo para d pode ser obtido quando \vec{p} e \vec{n}_d forem colineares e para o máximo valor de \vec{p} , que é 2. Assim, um coeficiente de eficiência (η) para a medição 1D pode ser definido por (3.22). η é 100% para condições de medição ótimas e 0% quando não se tem sensibilidade nesta direção.

$$\eta = \frac{\vec{p} \cdot \vec{n}_d}{2} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.22)$$

Combinando as equações (3.21) e (3.22) obtém-se uma estimativa da incerteza da medição do deslocamento 1D:

$$\Delta d = \frac{100 \lambda}{\eta} \frac{\Delta OF}{2} \quad (3.23)$$

Este conceito pode ser estendido para o caso 3D com sobredeterminação:

Seja $[Q]$ a matriz definida por:

$$[Q] = ([P]^T [P])^{-1} [P]^T \quad (3.24)$$

Observe que $[Q]$ é uma matriz retangular com 3 linhas e n colunas, onde n é o número de pares de iluminação. Usando a relação (3.23) a primeira equação do conjunto (3.18) pode ser reescrita como:

$$\{d\} = \lambda [Q] \{OF\} \quad (3.25)$$

De forma explicita, cada componente do deslocamento é calculada por:

$$\begin{cases} u = \lambda (Q_{11} \cdot OF_1 + Q_{12} \cdot OF_2 + \dots + Q_{1n} \cdot OF_n) \\ v = \lambda (Q_{21} \cdot OF_1 + Q_{22} \cdot OF_2 + \dots + Q_{2n} \cdot OF_n) \\ w = \lambda (Q_{31} \cdot OF_1 + Q_{32} \cdot OF_2 + \dots + Q_{3n} \cdot OF_n) \end{cases} \quad (3.26)$$

Pode-se supor que ΔOF é aproximadamente o mesmo para cada mapa de franjas, associado a cada vetor de sensibilidade. Assim, as componentes de incerteza para o deslocamento podem ser estimadas por:

$$\begin{aligned} \Delta u &= \lambda \sqrt{Q_{11}^2 + Q_{12}^2 + \dots + Q_{1n}^2} \Delta OF \\ \Delta v &= \lambda \sqrt{Q_{21}^2 + Q_{22}^2 + \dots + Q_{2n}^2} \Delta OF \\ \Delta w &= \lambda \sqrt{Q_{31}^2 + Q_{32}^2 + \dots + Q_{3n}^2} \Delta OF \end{aligned} \quad (3.27)$$

Para um sistema com $n = 3$, a condição de menor sensibilidade a erros é obtidas quando a matriz de sensibilidade $[p]$ é preenchida com 2 em sua diagonal principal e 0 nos demais elementos. Desta forma $[Q]$ ideal tem 0,5 em sua diagonal principal e 0 nos demais elementos. Então, o menor valor possível para cada raiz das equações 3.26 será 0,5. Pode-se definir um coeficiente de eficiência de medição tridimensional para cada componente do deslocamento pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} \eta_x &= \frac{0.5}{\sqrt{Q_{11}^2 + Q_{12}^2 + \dots + Q_{1n}^2}} \cdot 100 \quad (\%) \\ \eta_y &= \frac{0.5}{\sqrt{Q_{21}^2 + Q_{22}^2 + \dots + Q_{2n}^2}} \cdot 100 \quad (\%) \\ \eta_z &= \frac{0.5}{\sqrt{Q_{31}^2 + Q_{32}^2 + \dots + Q_{3n}^2}} \cdot 100 \quad (\%) \end{aligned} \quad (3.28)$$

No caso em que $n > 3$, o coeficiente de eficiência calculado por 3.28 poderá ser maior do que 100%, o que reflete as vantagens de usar equações redundantes na melhoria da significância dos resultados. Pode-se analisar o exemplo da montagem ilustrada na figura 2.18, se forem tomados apenas os pares principais de iluminação, cujos vetores de sensibilidades aparecem destacados na tabela 2.1, tem-se os seguintes coeficientes de eficiência de medição:

- $\eta_x = 64.8 \%$
- $\eta_y = 97.9 \%$
- $\eta_z = 69.7 \%$

Se para a mesma montagem forem aproveitadas todas as possíveis combinações entre os cinco pontos iluminadores e o ponto observador, tem-se o total de 15 vetores de sensibilidade, conforme está na tabela 2.1, em função de 5 interferômetros de iluminação simples e 10 de iluminação dupla. Desta maneira, sem ter que acrescentar nenhum componente físico extra na montagem, pode-se melhorar os coeficientes de eficiência para:

- $\eta_x = 114.6 \%$
- $\eta_y = 201.4 \%$
- $\eta_z = 120.7 \%$

Os coeficientes de eficiência da montagem são uma ótima referência para sua otimização, uma vez que dependem apenas da geometria do conjunto e número de pares de iluminação.

O erro de medição para cada componente do deslocamento medido pode ser estimado a partir dos coeficientes de eficiência pelas seguintes relações (3.29):

$$\begin{aligned}\Delta u &= \frac{100}{\eta_x} \cdot \frac{\lambda}{2} \Delta OF \\ \Delta v &= \frac{100}{\eta_y} \cdot \frac{\lambda}{2} \Delta OF \\ \Delta w &= \frac{100}{\eta_z} \cdot \frac{\lambda}{2} \Delta OF\end{aligned}\quad (3.29)$$

Assim, para a montagem da figura 2.19, ainda considerando $\Delta OF = 0.05$, seriam estimadas as seguintes incertezas para as componentes do deslocamento:

- $\Delta u = 13,8 \text{ nm}$
- $\Delta v = 7,9 \text{ nm}$
- $\Delta w = 13,1 \text{ nm}$

B) Medição de deformações

Para se obter uma expressão que calcule as derivadas do deslocamento, o valor de $\{d\}$ na segunda e na terceira equação do conjunto de equações (3.18) será substituído pela primeira equação deste conjunto, de forma a se obter a equação (3.30):

$$\begin{aligned}\left\{ \frac{\partial d}{\partial x} \right\} &= \lambda \left([Q] \left\{ \frac{\partial OF}{\partial x} \right\} - [Q] \left[\frac{\partial p}{\partial x} \right] [Q] \{OF\} \right) \\ \left\{ \frac{\partial d}{\partial y} \right\} &= \lambda \left([Q] \left\{ \frac{\partial OF}{\partial y} \right\} - [Q] \left[\frac{\partial p}{\partial y} \right] [Q] \{OF\} \right)\end{aligned}\quad (3.30)$$

Pode-se verificar que a influência de ambas as matrizes $[\partial p/\partial x]$ e $[\partial p/\partial y]$ pode ser negligenciada no cálculo das derivadas se [18]:

- Os pontos de iluminação estão suficientemente longe do campo de medição.
- É adotada uma configuração simétrica para cada um dos pontos iluminadores que compõem o par de iluminação.

Por exemplo, se é adotada uma configuração simétrica para a iluminação e os pontos iluminadores estão a uma distância pelo menos quatro vezes maior que a diagonal maior do campo de medição, a influência de $[Q][\partial p/\partial x][Q]\{FO\}$ e $[Q][\partial p/\partial y][Q]\{FO\}$ é menos que 30 vezes menor do que a influência $[Q]\{\partial OF/\partial x\}$ e $[Q]\{\partial OF/\partial y\}$ respectivamente. Assim 3.30 fica similar à 3.25 e o erro das derivadas do deslocamento pode ser calculado por:

$$\begin{aligned}\Delta \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{100}{\eta_x} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta \frac{\partial OF}{\partial x} \\ \Delta \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{100}{\eta_x} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta \frac{\partial OF}{\partial y} \\ \Delta \frac{\partial v}{\partial x} &= \frac{100}{\eta_y} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta \frac{\partial OF}{\partial x} \\ \Delta \frac{\partial v}{\partial y} &= \frac{100}{\eta_y} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta \frac{\partial OF}{\partial y}\end{aligned}\tag{3.31}$$

Onde η_x e η_y são os coeficientes de eficiência definidos em 3.27, $\Delta \partial OF/\partial x$ e $\Delta \partial OF/\partial y$ são os erros aleatórios estimados para as derivadas da ordem de franja.

Os resultados acima podem ser estendidos para a estimativa dos erros na medição de deformações:

$$\begin{aligned}\Delta \epsilon_x &= \frac{100}{\eta_x} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta \frac{\partial OF}{\partial x} \\ \Delta \epsilon_y &= \frac{100}{\eta_y} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta \frac{\partial OF}{\partial y}\end{aligned}\tag{3.32}$$

$$\Delta \gamma_{xy} = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\left(\frac{100}{\eta_x} \cdot \Delta \frac{\partial OF}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{100}{\eta_y} \cdot \Delta \frac{\partial OF}{\partial x}\right)^2}$$

A equação 3.31 pode ser usada para estimar os erros de medição de deformação na Estação Holográfica na maioria das aplicações, onde pode se considerar que a montagem atende às hipóteses simplificativas. O software da Estação tem condições de avaliar as hipóteses, e no caso de que estas não sejam respeitadas, pode-se aplicar procedimentos de cálculos mais elaborados e massivos a fim de se estimar os reais erros de medição de deformações.

3.3 Erros no cálculo da ordem de franja (OF).

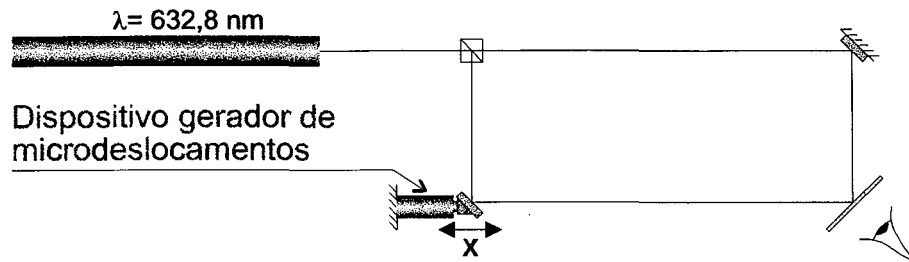


Figura 3.1 Esquema de um interferômetro

A Figura 3.1 mostra o esquema de um interferômetro genérico, que guarda semelhança em termos de sensibilidade de deslocamento de fase com o que está implementada através do CFO, onde o observador percebe a variação da intensidade luminosa da interferência entre os dois feixes em função da variação do caminho óptico. De acordo com a teoria da interferência [16] a intensidade observada pode ser modelada da pela seguinte equação:

$$I = I_0 \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (3.33)$$

Sendo que φ se relaciona com a diferença de caminho óptico (x) da seguinte maneira:

$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{x}{\lambda} = OF \quad (3.34)$$

Agrupando os fatores de deslocamento de fase têm-se:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.35)$$

$$\varphi = kx \quad (3.36)$$

Com base nas equações anteriores chega-se a equação geral de modulação:

$$I = Dc + Am \cos(kx + \phi) \quad (3.37)$$

Onde: Dc: Nível médio do sinal
Am: Amplitude média do sinal
 ϕ : Fase inicial

Para o cálculo da fase em cada ponto da imagem utiliza-se o método do deslocamento de fase em quatro passos[20]. Para tal, quatro imagens são adquiridas, para quatro posições x do espelho da Figura 3.1.

$$x = 0 \quad \therefore \quad I_1 = Dc + Am \cos(\phi) \quad (3.38)$$

$$x = \frac{\lambda}{4} \quad \therefore \quad I_2 = Dc + Am \cos\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right) \quad (3.39)$$

$$I_2 = Dc - Am \sin(\phi)$$

$$x = \frac{\lambda}{2} \quad \therefore \quad I_3 = Dc + Am \cos\left(\frac{\pi}{2} + \phi\right) \quad (3.40)$$

$$I_3 = Dc - Am \cos(\phi)$$

$$x = \frac{3\lambda}{4} \quad \therefore \quad I_4 = Dc + Am \cos\left(\frac{3\pi}{4} + \phi\right) \quad (3.41)$$

$$I_4 = Dc + Am \sin(\phi)$$

Subtraindo-se (3.38) de (3.40) e (3.39) de (3.41) obtém-se:

$$I_1 - I_3 = Dc + Am \cos(\phi) - Dc + Am \cos(\phi) \quad (3.42)$$

$$= 2 \cdot Am \cos(\phi)$$

$$I_4 - I_2 = Dc + Am \sin(\phi) - Dc + Am \sin(\phi) \quad (3.43)$$

$$= 2 \cdot Am \sin(\phi)$$

Dividindo-se 3.43 por 3.42 obtém-se:

$$\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{2 \cdot Am \sin(\phi)}{2 \cdot Am \cos(\phi)} \quad (3.44)$$

$$\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \tan(\phi) \quad \therefore \quad \phi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right)$$

3.3.1 Influência da quantização na digitalização de imagens.

Para se analisar a influência da quantização da intensidade luminosa, deriva-se parcialmente a equação (3.44):

$$\frac{\partial \phi}{\partial I_1} = \frac{-I_4 + I_2}{I_1^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_3 + I_3^2 + I_4^2 - 2 \cdot I_4 \cdot I_2 + I_2^2} \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial I_2} = \frac{-I_1 + I_3}{I_1^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_3 + I_3^2 + I_4^2 - 2 \cdot I_4 \cdot I_2 + I_2^2} \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial I_3} = \frac{I_4 - I_2}{I_1^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_3 + I_3^2 + I_4^2 - 2 \cdot I_4 \cdot I_2 + I_2^2} \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial I_4} = \frac{I_1 - I_3}{I_1^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_3 + I_3^2 + I_4^2 - 2 \cdot I_4 \cdot I_2 + I_2^2} \quad (3.48)$$

Fazendo-se a soma dos módulos das parciais multiplicados pelos desvios:

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \left| \frac{\partial\phi}{\partial I_1} \right| \cdot \Delta I_1 + \left| \frac{\partial\phi}{\partial I_2} \right| \cdot \Delta I_2 + \left| \frac{\partial\phi}{\partial I_3} \right| \cdot \Delta I_3 + \left| \frac{\partial\phi}{\partial I_4} \right| \cdot \Delta I_4 \\ \therefore \Delta I_1 &= \Delta I_2 = \Delta I_3 = \Delta I_4 = \Delta I \\ \therefore \Delta\phi &= \Delta I \cdot \left(\left| \frac{\partial\phi}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial\phi}{\partial I_2} \right| + \left| \frac{\partial\phi}{\partial I_3} \right| + \left| \frac{\partial\phi}{\partial I_4} \right| \right)\end{aligned}\quad (3.49)$$

Como os denominadores de cada fração parcial são idênticos nas equações (3.45), (3.46), (3.47) e (3.48), analisa-se estes separadamente para a simplificação da equação (3.49):

$$I_1^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_3 + I_3^2 + I_4^2 - 2 \cdot I_4 \cdot I_2 + I_2^2 \quad (3.50)$$

Substituindo as equações (3.38), (3.39), (3.40) e (3.41) em (3.50) e avaliando tudo simbolicamente chega-se a:

$$4 \cdot Am^2 \quad (3.51)$$

Assim, pode-se isolar o denominador comum e excluir a função módulo deste

Analisando os numeradores de cada fração parcial são idênticos nas equações (3.45), (3.46), (3.47) e (3.48), observando que em módulo:

$$\begin{aligned}|-I_1 + I_3| &= |I_1 - I_3| \\ |-I_4 + I_2| &= |I_4 - I_2|\end{aligned}\quad (3.52)$$

Assim, aplicando os resultados das simplificações das equações 3.51 e 3.52 em 3.49 tem-se:

$$\Delta\phi = \frac{\Delta I}{2 \cdot Am^2} \left(|I_1 - I_3| + |I_4 - I_2| \right) \quad (3.53)$$

Substituindo as equações (3.38), (3.39), (3.40) e (3.41) em (3.53) e avaliando tudo simbolicamente chega-se à:

$$\Delta\phi = \frac{\Delta I}{Am} \left(|\cos(\phi)| + |\sen(\phi)| \right) \quad (3.54)$$

Para se ter tenha noção da sensibilidade destes erros, calcula-se o limite teórico para um sistema de digitalização de imagens de 8 bits:

- $Am = 2^7 - 1 = 127$
- $\Delta I = 1$

No gráfico da figura 3.2 pode-se ver o limite teórico λ/n ou OF/n , onde n é o fator de interpolação da ordem de franja, que pode ser obtido para um sistema de digitalização de 8 bits. Como a incerteza na medição do ângulo de fase (ϕ), em função da medição de intensidade luminosa, é função do próprio ângulo de fase e, portanto, é cíclica. Desta maneira, foi adotada uma representação polar. Desta representação tira-se o fator de interpolação máximo teórico, que é tomado pelo máximo círculo inscrito na figura do gráfico. Assim conclui-se que o máximo fator de interpolação válido para este sistema de digitalização de 8

bits, ideal, é de $\lambda/550$. Pensando do ponto de vista do processamento digital, a interpolação de fase poderia ter 9 bits, resultando em mapas de fase de 512 níveis de cinza.

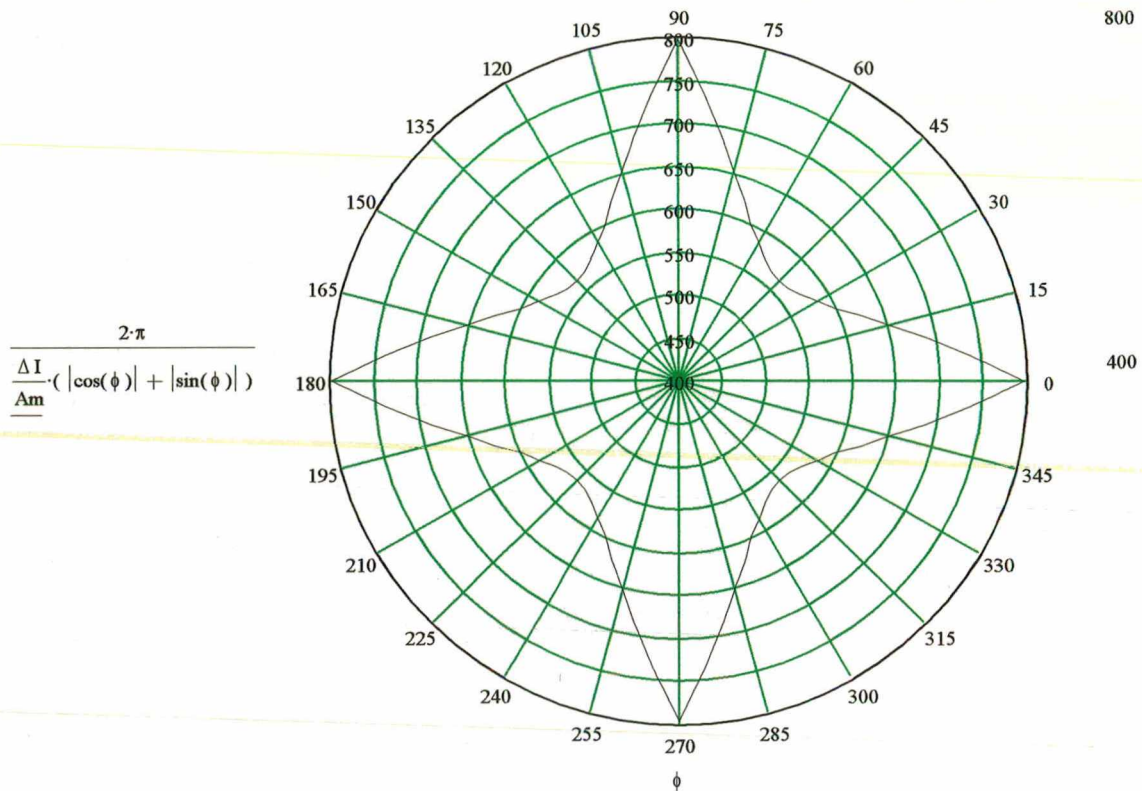


Figura 3.2 Incerteza na determinação da fase em OF/n teórico para um sistema de digitalização de 8 bits.

Como os piores resultados são $n\pi/4$ pode-se simplificar (3.54) para:

$$\Delta\phi = \frac{\sqrt{2}}{Am} \cdot \Delta I \quad (3.55)$$

A) Identificação e descrição dos ajustes da câmera, que podem interferir nos erros de quantização.

a) Princípio de funcionamento do “auto black level” (ABkL).

O ABkL (auto black level) é o sistema de ajuste de nível escuro da câmera. Este sistema ajusta o off-set do sinal de saída da câmera para que o nível do sinal elétrico para o nível luminoso escuro seja próximo de zero, compensando assim as correntes de escuro (‘dark current’) que é um ruído formado pelos elétrons que se acumulam nas células do CCD, não em função de fótons, mas principalmente em função de temperatura e ruídos eletromagnéticos. A câmera analisa o valor das correntes de escuro através de ‘pixels’ encobertos em cada linha de sua matriz. Outro problema do ABkL é a perda de faixa dinâmica do A/D da placa de processamento de imagens em função de uma diferença entre os níveis de referência de zero da câmera e do A/D da placa de aquisição de imagens.

b) Princípio de funcionamento do “auto gain control” (AGC).

O AGC (auto gain control) é um sistema que procura ajustar a faixa dinâmica do sinal de saída de forma a otimizar o contraste da imagem. Assim, o ganho é mantido no máximo até que alguns de seus pixels comecem a saturar. A partir desta situação, o sistema passa a reduzir o ganho até que o seu limite mínimo de ajuste seja atingido. Quando então a faixa de ajuste de ganho acaba, as regiões do quadro começam a saturar de forma visível. Como o sistema de controle de ganho é dinamicamente compatível com a taxa de leitura de quadros, uma certa quantidade de ‘speckle’ hiper modulantes, em relação à intensidade média dos quadros, pode afetar o ajuste de ganho o que pode causar erros de linearidade entre as operações de deslocamento de fase.

B) Fatores que podem influir na amplitude de modulação.

a) Influência da intensidade luminosa média e limitações para sua otimização.

Teoricamente é importante que se tenha um bom aproveitamento da faixa dinâmica do A/D da placa digitalizadora. Assim, em um histograma de intensidade cujo nível médio está abaixo da metade da faixa, a modulação da maioria dos ‘speckles’ ficará abaixo do valor teórico máximo, que é a metade da faixa de operação do A/D. Por outro lado, se o nível DC de um determinado pixel for maior do que a metade da faixa, este poderá ter uma amplitude de modulação pico a pico maior do que a faixa de medição da placa de digitalização, o que resultará num valor errôneo de fase e este pixel será um ponto atípico no mapa de fase.

Como os “speckles” podem apresentar qualquer fase inicial, pode-se esperar qualquer valor para a intensidade média. Porém, é razoável acreditar que em função de outros fatores citados a seguir, a probabilidade de se ter a intensidade zero ou a máxima é menor do que a de se ter a intensidade média.

Como a função estatística que modela o fenômeno depende de diversos fatores, este tipo de influência será observada em um experimento prático.

b) Influência da abertura numérica da lente na amplitude de modulação.

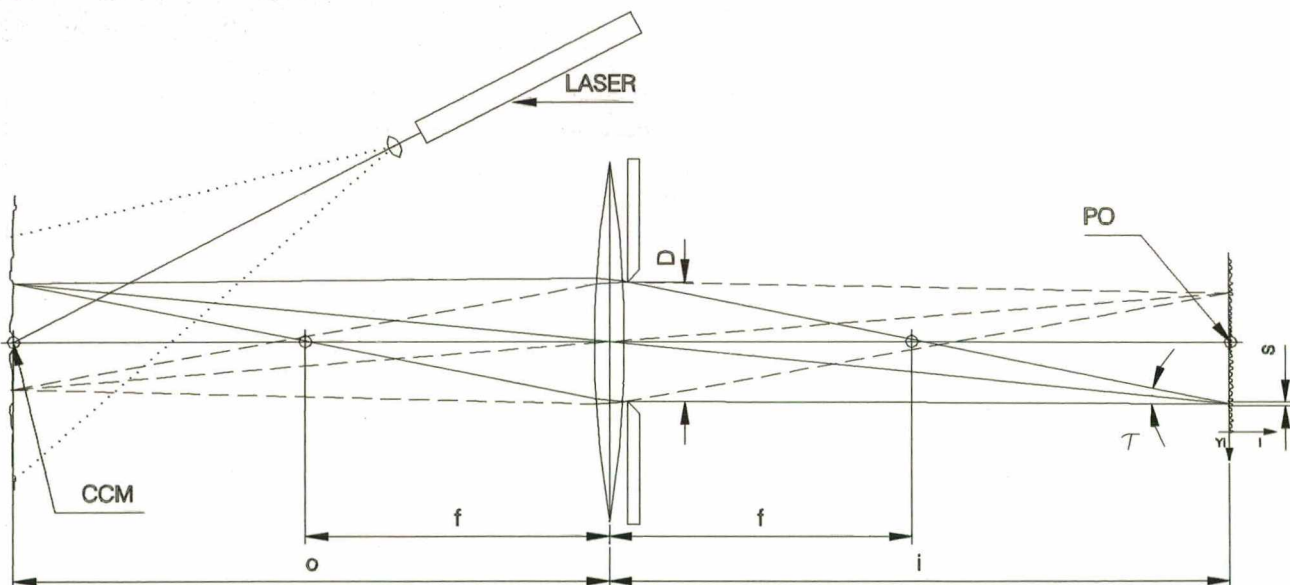


Figura 3.3 A objetiva da câmera e o tamanho do speckle

Conforme está descrito no apêndice A, o fenômeno de formação do ‘speckle’ depende de características do sistema óptico que o observa, seja este a objetiva de uma câmera ou mesmo o olho humano. Para que este ‘speckle’ tenha sua intensidade quantificada a fim de que se possa medir a sua fase, a imagem do mapa

de 'speckle' precisa ser amostrada espacialmente. Para que seja respeitada a teoria de amostragem [22] ajusta-se a objetiva óptica de forma que seja gerado um padrão de speckle com uma frequência inferior à metade da frequência de amostragem do CCD. A objetiva da câmera funciona como um filtro passa-baixas no sinal bidimensional da imagem e o diâmetro de sua íris caracteriza a banda deste filtro. Assim, quanto menor for o diâmetro de abertura da lente, menor será a máxima frequência contida no mapa de 'speckle'. Desta forma calcula-se o período entre dois 'speckle', de intensidade semelhante, em um mapa de 'speckle' para sistemas ópticos da seguinte maneira [Speckle_Metrology], [Optical_Metrology]:

$$s = \lambda \cdot \tau \quad (3.56)$$

Sendo que:

$$\tau = \arctan\left(\frac{D}{i}\right) \quad (3.57)$$

Onde:

D é o diâmetro de abertura da objetiva.

τ é o máximo ângulo entre dois raios ópticos incidindo em um ponto imagem.

s é o menor período possível entre dois "speckles" de intensidade semelhante

i é a distância da objetiva ao plano imagem

λ é o comprimento de onda empregado

Em função dos valores práticos de D e i simplifica-se (3.57) e substitui-se em (3.58) obtendo:

$$s = \lambda \cdot \frac{D}{i} \quad (3.58)$$

Através dos recursos dos suportes padronizados do SINTHE, pode-se obter facilmente a distância entre o CCM e o PO. Assim calcula-se i pela lei das lentes delgadas em função da distância focal (f) e da distância CCM_PO :

$$i = \frac{1}{2} * \left(CCM_PO - \sqrt{CCM_PO^2 - 4 \cdot CCM_PO \cdot f} \right) \quad \text{Para } i \leq o \text{ ou } m \leq 1$$

$$i = \frac{1}{2} * \left(CCM_PO + \sqrt{CCM_PO^2 - 4 \cdot CCM_PO \cdot f} \right) \quad \text{Para } i \geq o \text{ ou } m \geq 1$$
(3.59)

Onde m é a ampliação da imagem:

$$m = \frac{i}{o} \quad (3.60)$$

Onde:

o é a distância entre o objeto e a objetiva.

A ampliação pode ser calculada a partir da posição dos elementos ativos da Estação Holográfica, sendo definida portanto por (3.61). No caso da utilização normal da objetiva a ampliação é sempre menor do que 1. Já no caso da utilização de uma lente macro pode ocorrer a ambiguidade de ampliação ($<$ ou $>$ que 1):

$$m = \frac{CCM_PO - \sqrt{CCM_PO^2 - 4 \cdot CCM_PO \cdot f}}{CCM_PO + \sqrt{CCM_PO^2 - 4 \cdot CCM_PO \cdot f}} \quad \text{Para } i \leq 0 \text{ ou } m \leq 1 \quad (3.61)$$

Levando em conta que a abertura numérica da lente é definida como:

$$f_N = \frac{f}{D} \quad (3.62)$$

Pode-se então definir o menor período dentro do mapa de 'speckle' em função de λ , f_N e m :

$$s = (1 + m) \cdot f_N \cdot \lambda \quad (3.63)$$

Para que se tenha uma noção do tamanho do 'speckle' em uma aplicação prática em função de f_N , consideram-se os seguintes valores típicos:

- $\lambda = 632.8 \text{ nm}$
- $f = 50 \text{ mm}$
- $CCM_PO = 600 \text{ mm}$

Assim calcula-se m :

- $m = 0,101x$

O gráfico da Figura 3.4 mostra o período mínimo de um "Speckle" característico em função da abertura numérica da lente:

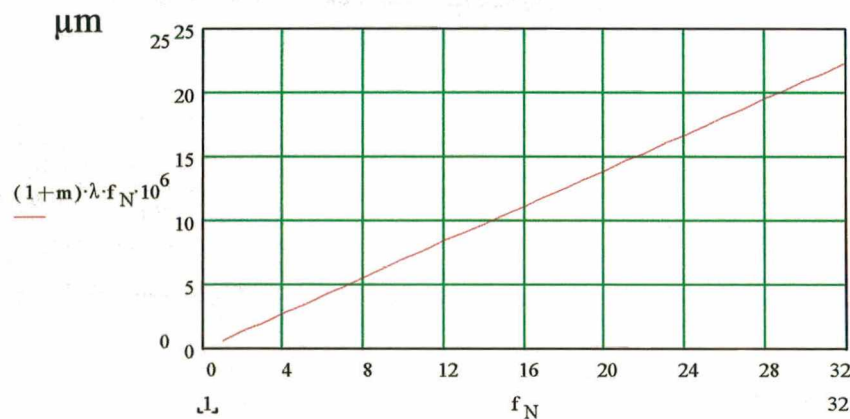


Figura 3.4 Período mínimo do mapa de 'speckle' em função de f_N

Analisando-se agora qual seria um f_N adequado para as câmeras disponíveis no laboratório:

COHU 4810:

- Tamanho horizontal do pixel: $11 \mu\text{m}$
- Tamanho vertical do pixel: $21 \mu\text{m}$

Calcula-se então s com sendo igual a duas vezes a diagonal do pixel:

- $s = 47,4 \mu\text{m}$

Desta forma o f_N para a montagem típica apresentada será:

- $f_N = 68$

CIDTEC 2250D:

- Tamanho horizontal do pixel: 11 μm
- Tamanho vertical do pixel: 11 μm

Calcula-se então s com sendo igual a duas vezes a diagonal do pixel:

- $s = 31,1 \mu\text{m}$

Desta forma o f_N para a montagem típica apresentada será:

- $f_N = 45$

Estas aberturas numéricas não são viáveis na prática, uma vez que não estão disponíveis em lentes comerciais e mesmo que estivessem, não haveria luz suficiente para sensibilizar o CCD operando com uma taxa normal de amostragem temporal. Assim, na prática convive-se com 'aliasing' espacial. Isto é um forte fator de redução de amplitude de modulação, pois, se há mais do que um 'speckle' projetado em um 'pixel', podendo estes ter qualquer amplitude de modulação e qualquer fase em função das interações entre a iluminação e a rugosidade da superfície, estes speckles, quando interferometricamente somados geram um nível Dc diferente da A_m , o que, quando ajustada a sensibilidade média da câmera, resultará em uma modulação baixa em relação a faixa dinâmica do A/D.

Para analisar este efeito recorre-se ao caso em que dois speckles concorrem em um pixel e modulam coerentemente em função do ângulo de fase ω como em um mapa de speckle:

$$I_{s_1}(\omega) = Dc_1[1 + \cos(\omega)] \quad (3.64)$$

$$I_{s_2}(\omega, \phi) = Dc_2[1 + \cos(\omega + \phi)] \quad (3.65)$$

Onde Dc_1 e Dc_2 são os níveis médios de modulação de cada speckle, ϕ é a defasagem entre os pixels e ω é o ângulo de modulação coerente. Somando a intensidade dos speckles tem-se então:

$$I_p(\omega, \phi) = Dc_1[1 + \cos(\omega)] + Dc_2[1 + \cos(\omega + \phi)] \quad (3.66)$$

Para que se tenha sensibilidade sobre a equação 3.66, analisa-se o que ocorre com a intensidade em função da variação de ω na faixa de 0 à 4π e diversos valores de ϕ , através dos gráficos da Figura 3.5. Utilizou-se valores próximos para Dc_1 e Dc_2 para que sejam enfatizados os efeitos da sobreposição, mas manteve-se a soma destes em 128, para que a variação total correspondesse a faixa dinâmica de um sistema típico de digitalização de imagens com A/D de 8 bits.

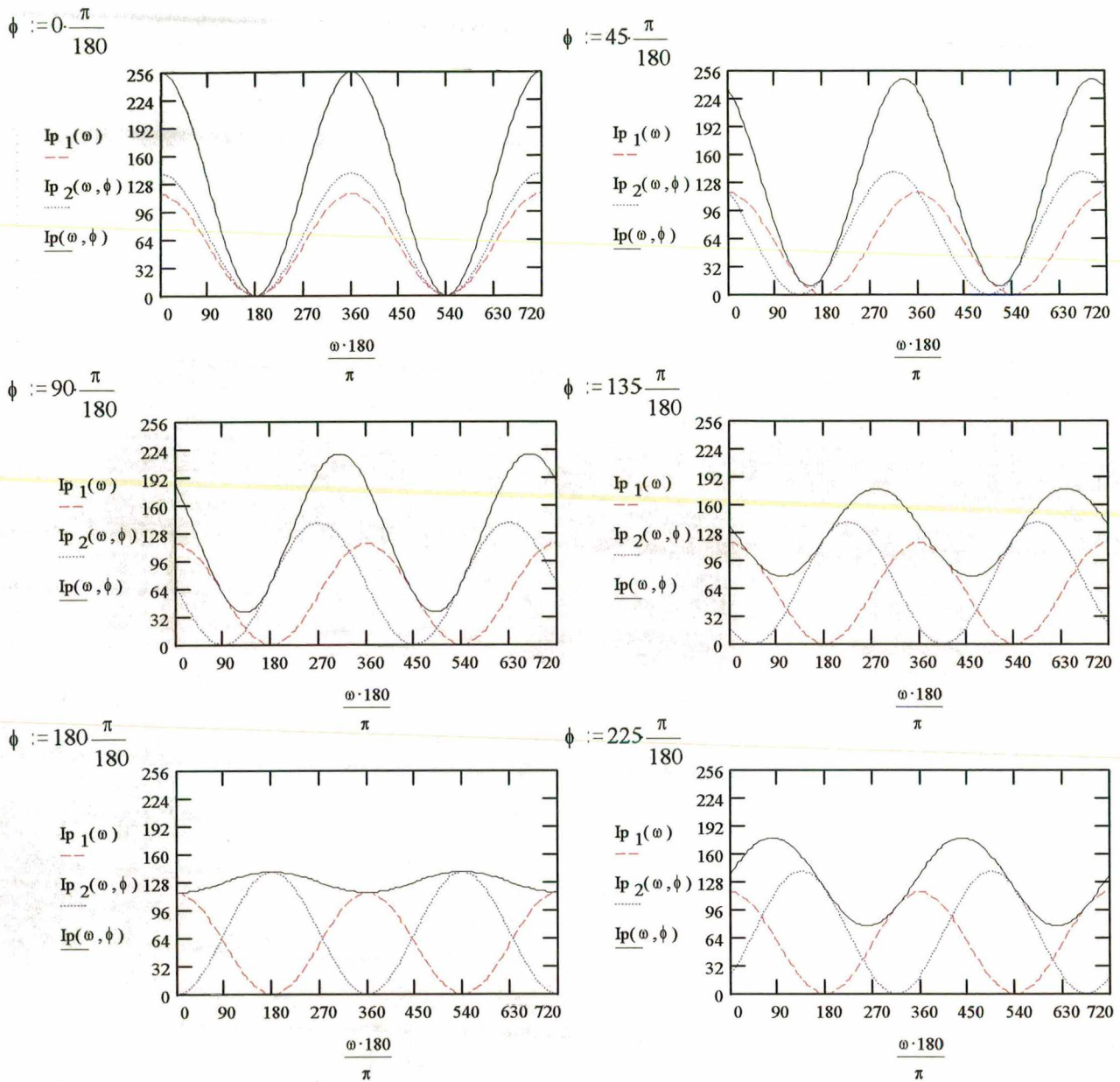


Figura 3.5 Modulação de um pixel em função da modulação de dois speckles nele projetados:

A amplitude de modulação em função de ϕ e da relação $Dc_2/Dc_1 = n$ pode ser definida como:

$$Am(\phi, n) = Am_0 \frac{\sqrt{1 + 2 \cdot n \cdot \cos(\phi) + n^2}}{1 + n} \quad (3.67)$$

Na Figura 3.6 observa-se o comportamento da função de amplitude de modulação do pixel em função da soma de dois speckle com fase ϕ e relação de intensidades n :

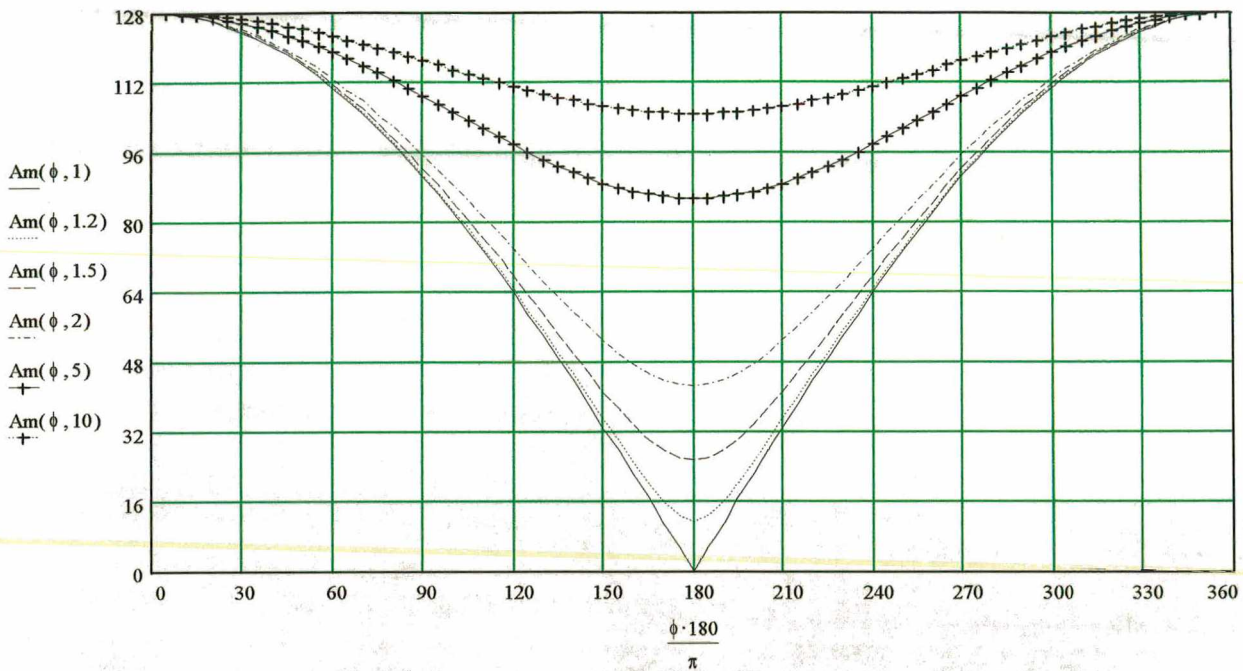


Figura 3.6 Amplitude de modulação do pixel em função da soma de dois speckles.

c) Influência da diferença de intensidade teórica na amplitude de modulação.

Caso os dois feixes do interferômetro tenham a mesma intensidade, cada 'speckle' pode modular com amplitude de modulação igual ao seu nível DC, isto é, entre zero e duas vezes o nível DC. Se um dos feixes do interferômetro tem maior intensidade, o nível DC será dado pelo braço de maior intensidade e a amplitude de modulação será dada pela intensidade do braço menor. Assim, não se têm nunca um cancelamento completo do sinal luminoso, e desta forma também perde-se faixa dinâmica do A/D para este 'speckle'.

Do ponto de vista microscópico, na Estação Holográfica se somam os mapas de speckle resultantes de duas iluminações com ângulos diferentes (dupla iluminação) ou de duas superfícies diferentes (simples iluminação). Assim, idealmente ambas as superfícies deveriam ser iluminadas de forma homogênea. Imaginando a superfície rugosa como uma superfície multifacetada é evidente que não se pode garantir a homogeneidade da iluminação ao longo das múltiplas facetas, principalmente no caso da iluminação mais oblíqua (dupla iluminação).

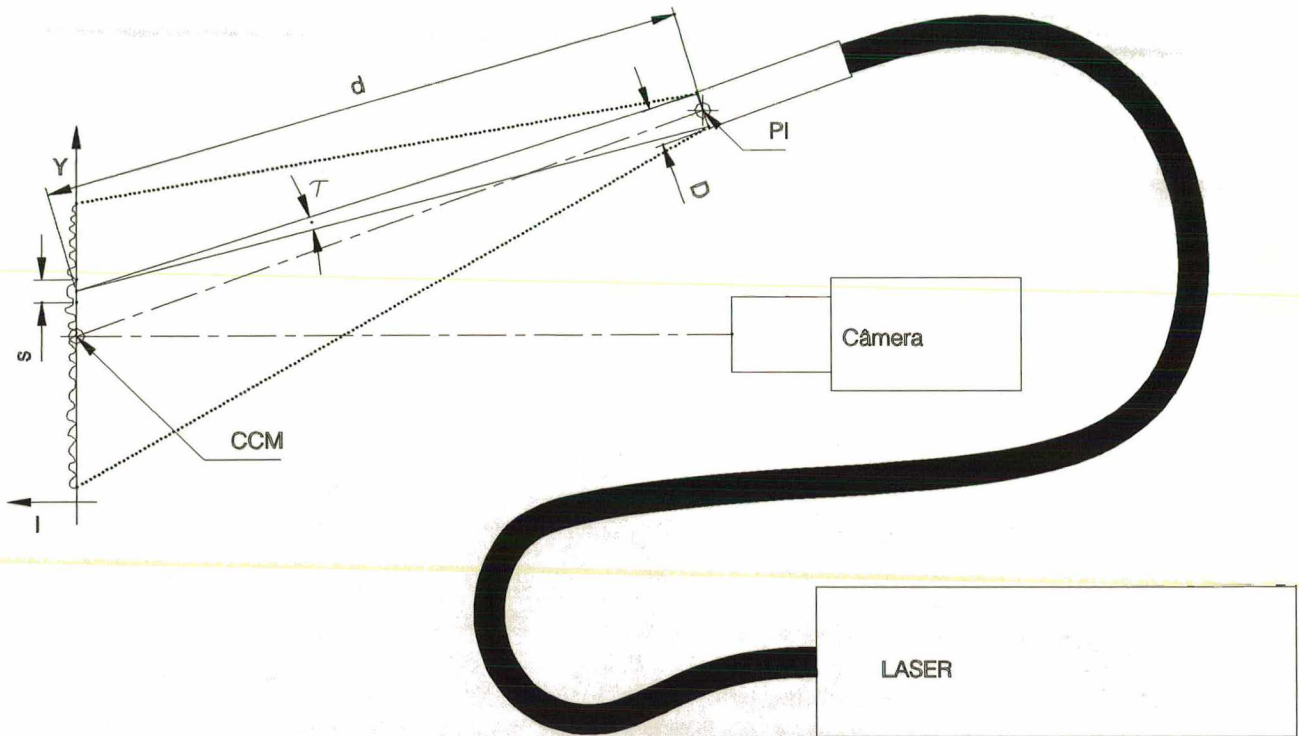


Figura 3.7 O diâmetro da fibra e o tamanho do speckle da iluminação

Também as fontes de iluminação projetam speckles no campo de medição, e por este motivo geram iluminação não homogênea, causando assim uma grande diferença de iluminação ponto a ponto entre os dois braços do interferômetro. Ao analisar sob o mesmo ponto de vista físico da formação do “speckle” no plano de imagem da câmera, pode-se controlar a granulação da iluminação segundo a Figura 3.7.

O período do mapa de speckle da iluminação também é regido pela equação 3.23, só que neste caso:

$$\tau = \arctan\left(\frac{D}{d}\right) \quad (3.68)$$

onde D é o diâmetro de saída da fibra e d é a distância entre um speckle e a fibra. Como $d \gg D$ e se d for a distância PI_CCM , o período mínimo encontrado no mapa de speckles será:

$$s \cong \lambda \cdot \frac{PI_CCM}{D} \quad (3.69)$$

Com os valores usuais de uma montagem têm-se:

- $D = 2,8 \text{ mm}$
- $PI_CCM = 450 \text{ mm}$
- $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

Assim:

- $s = 101,7 \text{ }\mu\text{m}$

Considerando o fator de ampliação da objetiva do exemplo anterior, chega-se a um tamanho de speckle projetado na matriz do CCD de:

- $s_{\text{projetado}} = 10,3 \text{ }\mu\text{m}$

Isto significa que os speckles de iluminação gerados no campo de medição tem período quase que adequado para amostragem pela câmera CCD e que também é o dobro do gerado pela rugosidade da peça / lente, que, para uma abertura $f_N = 8$, seria de $5,6 \mu\text{m}$.

Para que seja eliminada a influência destes speckles de iluminação, apontam-se três alternativas: a) Uso de iluminação completamente homogênea proporcionada por um filtro espacial, b) Uso de fibra mono-modo, ou c) deve-se aproveitar o fenômeno de 'aliasing' para filtrar este sinal. Assim, a fonte de iluminação deve ter um diâmetro " D " de tal forma que se tenha um tamanho de speckle na superfície da peça tal que, quando projetado no CCD, este tenha um período pelo menos duas vezes menor que o período de amostragem do CCD. Assim, este já terá sido filtrado pela lente.

Para as fibras normalmente usadas no SINTHE, cujo diâmetro de saída é de $2,8 \text{ mm}$, a máxima distância que o ponto iluminador deve se situar da região de medição pode ser calculado por:

$$d_{\max} = \frac{D}{\lambda} \cdot \frac{T \cdot \sqrt{2}}{4 \cdot np} \quad (3.70)$$

Onde:

d_{\max} é a máxima distância em relação à superfície medida que deve estar situada a ponta iluminadora da fibra óptica.

D é o diâmetro de saída da fibra iluminadora.

λ é o comprimento de onda do LASER.

T é a maior dimensão da região observada pela câmera.

np é o número de pixels da câmera na direção da maior dimensão da região observada.

Assim, para as seguintes condições:

- $D = 2,8 \text{ mm}$
- $\lambda = 632,8 \text{ nm}$
- $T = 100 \text{ mm}$
- $np = 512 \text{ pixels}$

Tem-se:

- $d \leq 432 \text{ mm}$

Levando em consideração o máximo espalhamento luminoso útil da fibra, pode-se relacionar d_{\max} com T , simplificando 3.70 para:

$$D_{\min} = \frac{\lambda \cdot np \cdot \sqrt{2}}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (3.71)$$

Onde:

α é o ângulo de espalhamento útil da fibra.

Assim, para um ângulo útil característico de 20° , temos:

- $D \geq 2,6 \text{ mm}$

Por outro lado, a influência negativa de uma fonte não pontual sobre a amplitude de modulação se acentua em função da variação do vetor sensibilidade ao longo da extensão da fonte luminosa. Isto faz com que a amplitude de modulação caia com o aumento da ordem de franja.

Para que se possa equacionar este efeito, inicialmente determina-se a expressão vetorial para a incerteza do vetor de sensibilidade, a partir da expressão vetorial que o define, para as situações de iluminação simples e dupla:

- Iluminação simples:

$$\vec{p}_s(P, PO, PI) = \frac{PO - P}{|PO - P|} + \frac{PI - P}{|PI - P|} \quad (3.72)$$

Onde:

P é um ponto sobre a região de medição

PO é o ponto observador

PI é o ponto iluminador

Tomando uma circunferência de diâmetro D , sobre um plano normal ao vetor na direção de PI para P , chega-se ao vetor $\Delta\vec{p}_s$:

$$\Delta\vec{p}_s(P, PI, D) = \frac{D}{\sqrt{2} \cdot |PI - P|^2} \cdot \frac{\sqrt{[(PI - P)_2]^2 + [(PI - P)_3]^2}}{\sqrt{[(PI - P)_1]^2 + [(PI - P)_3]^2}} \quad (3.73)$$

- Iluminação dupla:

$$\vec{p}_d(P, P1, P2) = \frac{P1 - P}{|P1 - P|} - \frac{P2 - P}{|P2 - P|} \quad (3.74)$$

Onde:

P é um ponto sobre a região de medição

$P1$ e $P2$ são os pontos iluminadores

Como na iluminação dupla ambos os pontos são não pontuais, comportado-se como o ponto iluminador simples, pode-se definir:

$$\Delta\vec{p}_d(P, P1, P2, D) = \Delta\vec{p}_s(P, P1, D) + \Delta\vec{p}_s(P, P2, D) \quad (3.75)$$

A influência de $\Delta\vec{p}$ na sensibilidade da medição, é determinada pela sua componente na direção de \vec{p} :

$$\Delta s(p, \Delta p) = \frac{|\vec{p} \cdot \Delta\vec{p}|}{|\vec{p}|} \quad (3.76)$$

A amplitude de modulação pode ser estimada a partir da sobreposição de sensibilidades, em um dado speckle, gerado a partir de duas fontes luminosas, uma em cada lado oposto da borda da circunferência da fibra de iluminação. Assim, a diferença de fase devido a distância das fontes de iluminação pode ser escrita em função da diferença de sensibilidade Δs :

$$\phi = 2\pi \cdot \Delta s \cdot OF \quad (3.77)$$

Em função da diferença de fase (3.77), gerada pela iluminação não pontual, chega-se a uma expressão para a amplitude de modulação:

$$Am_D(\Delta s, OF) = \sqrt{\frac{1 + \cos(2\pi \cdot \Delta s \cdot OF)}{2}} \quad (3.78)$$

Com a função (3.78) calcula-se a máxima OF teórica mensurável, em função de \vec{p} e $\Delta\vec{p}$:

$$OF_{\max}(p, \Delta p) = \frac{1}{2 \cdot \Delta s(p, \Delta p)} \quad (3.79)$$

A OF_{\max} é a ordem de franja com amplitude de modulação igual a zero. Definindo-se o limite prático de 50% para a atenuação da amplitude de modulação chega-se a $OF_{\text{útil}}$, em função de \vec{p} e $\Delta\vec{p}$:

$$OF_{\text{útil}}(p, \Delta p) = \frac{1}{3 \cdot \Delta s(p, \Delta p)} \quad (3.80)$$

Pode-se analisar esta teoria de fontes de iluminação não pontuais, aplicando-a na bancada idealizada na figura 2.19, assim:

Do ponto de vista de homogeneidade de iluminação, o diâmetro da fibra de iluminação deve ser:

Para:

- Diâmetro da região de medição (T) de 200 mm
- Número de Píxeis da Câmera CCD de 512x512.

O diâmetro mínimo para a fibra de iluminação, deve ser de:

- Iluminação simples:
 - Distância do ponto iluminador simples (PIS) ao centro do campo de medição: 511 mm
 - Diâmetro mínimo: 1,66 mm
- Iluminação dupla horizontal:
 - Distância do pto ilum. duplo horizontal 1 (PIDH1) ao centro do campo de medição: 501 mm
 - Diâmetro mínimo: 1,62 mm
 - Distância do pto ilum. duplo horizontal 2 (PIDH2) ao centro do campo de medição: 501 mm
 - Diâmetro mínimo: 1,62 mm
- Iluminação dupla vertical:
 - Distância do pto ilum. duplo vertical 1 (PIDV1) ao centro do campo de medição: 534 mm
 - Diâmetro mínimo: 1,73 mm
 - Distância do pto ilum. duplo horizontal 2 (PIDH2) ao centro do campo de medição: 513 mm
 - Diâmetro mínimo: 1,66 mm

Como o diâmetro da fibra normalmente empregada é de 2.8 mm, este satisfaz a condição de homogeneidade de iluminação.

Agora, analisa-se como se comporta a amplitude de modulação em função de uma iluminação não pontual:

- Iluminação simples:

$$\vec{p}_s = \begin{bmatrix} -0.187 \\ -1.978 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \vec{p}_s = \begin{bmatrix} 3.786 \\ 0.810 \\ 3.872 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta s = 1.163 \cdot 10^3$$

$$OF_{m\acute{a}x} = 430$$

$$OF_{\acute{u}til} = 286$$

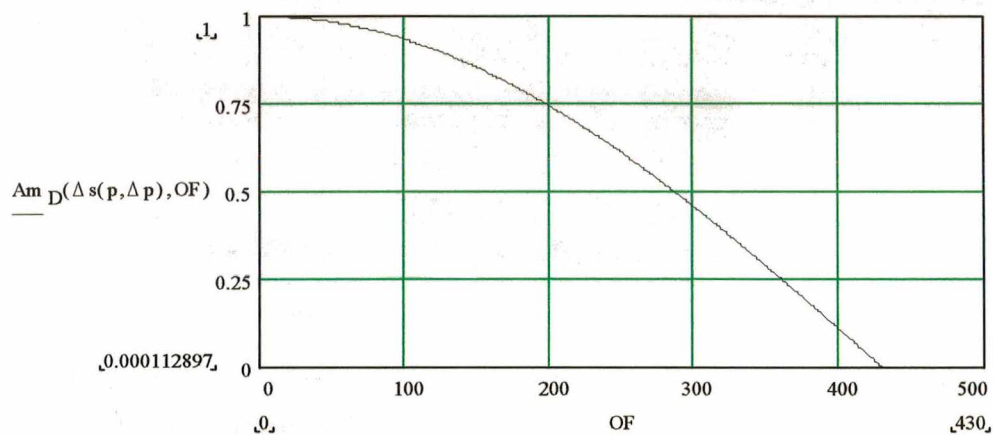


Figura 3.8 Variação da amplitude de modulação devido a fonte de iluminação não pontual, para um caso de iluminação simples

- Iluminação dupla horizontal:

$$\vec{p}_s = \begin{bmatrix} 1.296 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \vec{p}_s = \begin{bmatrix} 6.013 \\ 5.116 \\ 7.895 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta s = 6.013 \cdot 10^3$$

$$OF_{m\acute{a}x} = 83$$

$$OF_{\acute{u}til} = 55$$

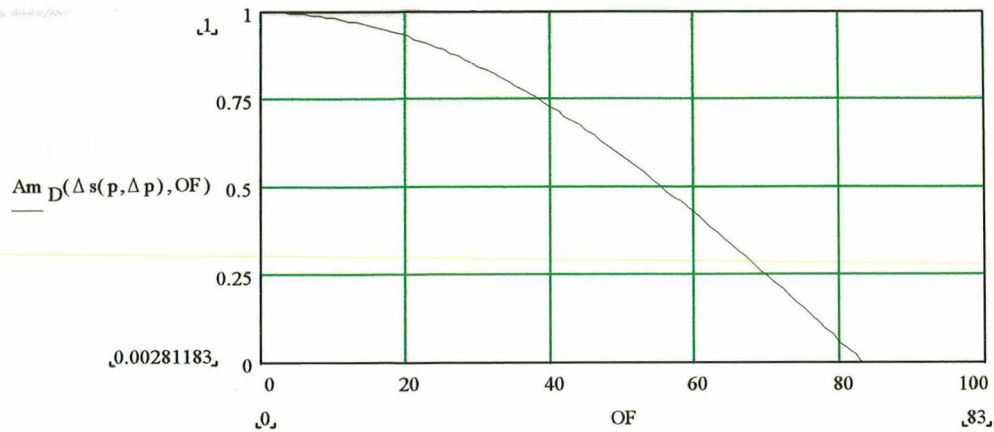


Figura 3.9 Variação da amplitude de modulação devido a fonte de iluminação não pontual, para um caso de iluminação dupla horizontal

• Iluminação dupla vertical:

$$\vec{p}_s = \begin{bmatrix} 0.001 \\ -0.029 \\ 1.394 \end{bmatrix}$$

$$\Delta\vec{p}_s = \begin{bmatrix} 7.567 \\ 5.273 \\ 5.427 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta s = 6.013 \cdot 10^3$$

$$OF_{m\acute{a}x} = 94$$

$$OF_{\acute{u}til} = 63$$

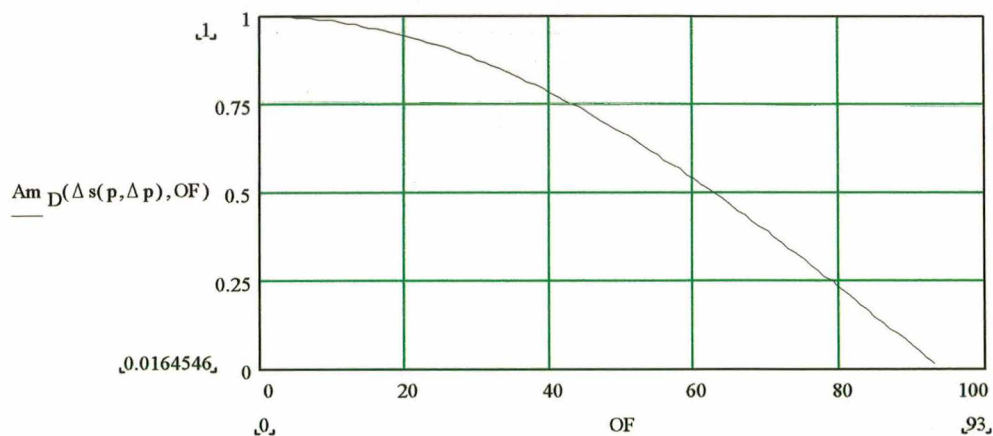


Figura 3.10 Variação da amplitude de modulação devido a fonte de iluminação não pontual, para um caso de iluminação dupla vertical

Assim, pode-se concluir que, no caso de se utilizar uma fonte com dimensão grande o suficiente, o speckle de iluminação por ela formado terá uma granulometria pequena o suficiente para que o CCD enxergue a

$$I_1 = Dc + Am \cdot \cos\left(\phi + \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x_1\right) \quad (3.83)$$

$$I_2 = Dc + Am \cdot \cos\left(\phi + \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x_2\right) \quad (3.84)$$

$$I_3 = Dc + Am \cdot \cos\left(\phi + \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x_3\right) \quad (3.85)$$

$$I_4 = Dc + Am \cdot \cos\left(\phi + \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x_4\right) \quad (3.86)$$

Onde, $x_1, x_2, x_3,$ e x_4 são as posições assumidas pelo espelho que desloca a fase.

Substituindo as equações 3.83, 3.84, 3.85 e 3.86 em 3.44 e obtém-se a função de determinação de fase em função dos passos de deslocamento de fase:

$$\phi = \arctan \left[\frac{\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_4\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_2\right)}{\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_1\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_3\right)} \right] \quad (3.87)$$

Para se analisar a influência dos passos do deslocamento de fase da intensidade luminosa, deriva-se parcialmente a equação 3.87:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_1} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\operatorname{sen}\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_1\right) \cdot \left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_4\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_2\right)\right]}{\left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_1\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_3\right)\right]^2 + \left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_4\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_2\right)\right]^2} \quad (3.88)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_2} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\operatorname{sen}\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_2\right) \cdot \left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_1\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_3\right)\right]}{\left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_1\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_3\right)\right]^2 + \left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_4\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_2\right)\right]^2} \quad (3.89)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_3} = \frac{-2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\operatorname{sen}\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_3\right) \cdot \left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_4\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_2\right)\right]}{\left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_1\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_3\right)\right]^2 + \left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_4\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_2\right)\right]^2} \quad (3.90)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_4} = \frac{-2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\operatorname{sen}\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_4\right) \cdot \left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_1\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_3\right)\right]}{\left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_1\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_3\right)\right]^2 + \left[\cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_4\right) - \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_2\right)\right]^2} \quad (3.91)$$

Substituindo-se os valores de x_1 , x_2 , x_3 e x_4 nas equações 3.87 a 3.90:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \right|_{x_1=0} = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \text{sen}(\phi)^2 \quad (3.92)$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right|_{x_2=\frac{\lambda}{4}} = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \text{cos}(\phi)^2 \quad (3.93)$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right|_{x_3=\frac{\lambda}{2}} = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \text{sen}(\phi)^2 \quad (3.94)$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x_4} \right|_{x_4=\frac{3\lambda}{4}} = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \text{cos}(\phi)^2 \quad (3.95)$$

Fazendo-se a soma dos módulos das derivadas parciais multiplicados pelos respectivos desvios:

$$\Delta \phi = \left| \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \right| \cdot \Delta x_1 + \left| \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right| \cdot \Delta x_2 + \left| \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right| \cdot \Delta x_3 + \left| \frac{\partial \phi}{\partial x_4} \right| \cdot \Delta x_4$$

$$\because \Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = \Delta x_4 = \Delta x \quad (3.96)$$

$$\therefore \Delta \phi = \Delta x \cdot \left(\left| \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \right| + \left| \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right| + \left| \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right| + \left| \frac{\partial \phi}{\partial x_4} \right| \right)$$

$$\Delta \phi = \Delta x \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot \left[\left| \text{sen}(\phi)^2 \right| + \left| \text{cos}(\phi)^2 \right| + \left| \text{sen}(\phi)^2 \right| + \left| \text{cos}(\phi)^2 \right| \right]$$

$$= \Delta x \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.97)$$

Para que se tenha noção da sensibilidade destes erros, calcula-se o limite teórico para o sistema de deslocamento de fase implementado no SINTHE, no qual um D/A de 12 bits para a faixa de 0 a 10 V, controla o PZT para uma faixa de 0 a 15 μm :

- $\lambda = 632,8 \text{ nm}$
- $\Delta x = \frac{15 \mu\text{m}}{2^{12}} = 3,662 \text{ nm}$
- $\Delta \phi = 36,36 \text{ mrad} \Rightarrow \lambda / 172,8$

3.4 Erros devido a ordem de franja zero

Para a medição de deslocamentos absolutos é necessário o conhecimento da ordem de franja absoluta. Nas aplicações à qual se destina a estação holográfica, onde os corpos a serem ensaiados são solicitados mecanicamente e termicamente, a posição da ordem de franja zero nem sempre pode ser predeterminada.

A condição do engaste, a instabilidade atmosférica ou mesmo a falta de um ponto de referência imóvel no campo de medição, trazem dificuldades na determinação da ordem de franja absoluta.

Na medição 1D, caso a aplicação de esforços permita, é possível se tomar a fase inicial de referência e, em seguida, passar para o modo de franja ao vivo para acompanhar a evolução do mapa de fase a medida que é aplicado o carregamento, contado a ordem de franja absoluta.

Já na medição 3D seria necessário para o acompanhamento do carregamento, um chaveamento de fibras rápido e um sistema de gravação das imagens em seqüência, para cada par de fibras chaveadas. Para que em seguida a tomada da fase final o operador pudesse observar o filme do carregamento para cada par de iluminação e assim, determinar a ordem de franja absoluta. Este procedimento traz sérias dificuldades tecnológicas sendo por hora inviável. Justamente na medição 3D é muito importante a determinação da ordem de franja absoluta, de forma que se possa correlacionar os mapas de fase e suas sensibilidades para que, se consiga determinar os deslocamentos tridimensionais.

Outro problema aparente na experimentação em bancada óptica, é a influência do “drift” térmico. Este pode ser avaliado considerando que pode ocorrer uma variação atmosférica entre os dois braços do interferômetro, na ordem de, por exemplo, dez por cento da variação atmosférica admitida ao logo do ensaio. Assim, aplicando-se estes desvios atmosféricos em (3.6), (3.7) e (3.8) tem-se:

- $\Delta C_P = 50 \text{ Pa}$ $\Delta \lambda_P = 0,084 \text{ pm}$
- $\Delta C_T = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ $\Delta \lambda_T = 0,121 \text{ pm}$
- $\Delta C_H = 2\%$ $\Delta \lambda_H = 0,014 \text{ pm}$

Combinando-se estes desvios através da equação (3.9), verifica-se que é possível uma variação no comprimento de onda de até 0,406 pm, entre os braços do interferômetro. A variação da ordem de franja pode ser calculada por:

$$\Delta OF = \frac{cl}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda \quad (3.98)$$

Onde:

cl é o curso livre na atmosfera

$\Delta \lambda$ é a variação do comprimento de onda

ΔOF é a variação na ordem de franja

Admitindo-se:

- Curso livre na atmosfera de 600 mm.

Pode-se esperar com estas variações atmosféricas uma instabilidade na ordem de franja de:

- $\Delta OF = 0,39$

Estas considerações serão avaliadas experimentalmente na próxima etapa deste trabalho.

Outra fonte de erros que afeta o valor da a ordem de franja absoluta é o chaveamento de fibras ópticas, uma vez que para se obter a comutação de fibras ópticas, para aplicações de interferometria, é necessário o posicionamento de espelhos. Como a comutação se dá posteriormente a divisão dos feixes, os erros de posicionamento dos espelhos, geram uma variação no caminho óptico, que afeta diretamente a ordem de franja.

Se pela via experimental existem dificuldades tecnológicas sérias, através de um algoritmo [26] matemático é possível a determinação da ordem de franja absoluta. Esta metodologia se baseia na variação do vetor de sensibilidades ao longo do campo de medição, em função de iluminação próxima (feixe não colimado) e na redundância de sensibilidades (mais de três pares de iluminação independentes). Este algoritmo pode minimizar inclusive os efeitos da instabilidade atmosférica, caso o “drift” térmico seja constante ao longo do campo de medição, ou seja a atmosfera não traga variações consideráveis na forma de onda.

3.5 Erros devido ao processamento

Esta análise será baseada nos recursos e limitações do sistema de processamento de imagens do SINTHE.

3.5.1 Digitalização

O sistema atual digitaliza a imagem com 8 bits de resolução, sem ajustes analógicos prévios de ganho e off-set, dispondo apenas de uma LUT (look-up table) após a digitalização para realizar transformações numéricas. Como normalmente existe necessidade de ajuste, principalmente de off-set, já não se tem um bom aproveitamento da faixa dinâmica do A/D já limitado em 8 bits.

Outro fator limitado pela digitalização de 8-bits é a amplitude de modulação, pois devido aos diversos fatores explicitados anteriormente, esta é apenas uma fração do ideal, e ainda assim, ocorre com diversos níveis de off-set, em função das limitações de iluminação. Assim, uma modulação típica de 5% do ideal terá uma significância de apenas 6 bits. Isto se o nível DC estiver adequado, pois, caso contrario, ocorre saturação do pixel e, em ao menos um dos passos do deslocamento de fase, a intensidade luminosa medida na saturação acarretará um valor falso, gerando assim um ruído espacial no mapa de fase.

Quando é medido um corpo não plano, a não homogeneidade intrínseca da iluminação faz variar bastante o nível DC ao longo do campo de medição, exigindo assim uma ampla faixa dinâmica da digitalização.

A relação sinal/ruído das câmeras analógicas atuais permite a digitalização em 10 bits. Os CCDs de câmeras digitais apresentam sinal/ruído de até 72 db o que permite a digitalização em até 12 bits.

3.5.2 Média

Devido a elevada sensibilidade da técnica, fatores como perturbações atmosféricas e acústicas, além do ruído eletrônico, exigem que na aquisição das imagens seja feita uma média de pelo menos 4 imagens. Em função do comprimento de palavra limitado em 8 bits dos buffers de acumulação e a necessidade de realizar a operação em tempo real, a pseudo-média na verdade é realizada por um algoritmo onde a imagem n tem um peso de $\frac{1}{2}$, a imagem $n-1$ tem um peso $\frac{1}{4}$, a imagem $n-2$ tem um peso $\frac{1}{8}$, e assim por diante... Tornando ineficaz uma média superior a 4 imagens.

3.5.3 Subtração

A ALU (unidade lógica aritmética) em tempo real do sistema de processamento de imagens processa argumentos de 8 bits com resultados em 9 bits, em seguida uma LUT resultado converte o resultado de 9 bits para 8 bits a fim de ser armazenado nos buffers da placa.

No método de determinação de fase através de 4 passos um “speckle” com amplitude modulação superior a 50% do ideal (64 níveis de cinza ou 6 bits) necessariamente gerará diferenças superiores a 8 bits, necessitando uma LUT resultado de atenuação. Como a maioria dos speckles tem modulação menor que 50% do ideal, no SINTHE usa-se uma LUT de 8 bits e os resultados da subtração inferiores a -128 e superiores a 127 são truncados para -128 e 127 respectivamente. Desta forma se preserva a significância na média, porém pontos muito significativos são distorcidos, piorando assim a relação sinal/ruído.

3.5.4 Operação ATAN2

Esta operação é realizada em 32 bits, com ponto flutuante, permitindo assim a utilização de números reais e não acarretando erros significativos ou limitações ao sistema.

3.5.5 Filtragem

Esta operação também é realizada em 32 bits, com ponto flutuante. A filtragem é realizada no plano de Fourier, e a avaliação de erros desta operação foi tratada em outro trabalho [8]. Deve-se apenas constar aqui que, embora os resultados aparentes da filtragem do sinal imagem sejam impressionantes, a confiabilidade destes resultados depende da relação sinal/ruído original.

3.6 Sistematização do cálculo de incerteza de medição.

A incerteza de medição para deslocamentos é estimada pelas equações (3.29), a incerteza de medição para deformações pelas equações (3.31) e a incerteza de medição para tensões pelas equações (3.32). Estas equações se baseiam nos coeficientes de eficiência de medição (3.28), já calculados e fornecidos pelo SINTHE e no ΔOF que pode ser estimado da seguinte maneira, a partir de (3.55) e (3.97):

$$\Delta OF = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}}{Am} \cdot \Delta I\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x\right)^2} \quad (3.99)$$

Onde:

Δx é estimada a partir da calibração do dispositivo microdeslocador piezoelétrico.

ΔI é estimada a partir da calibração da câmera conjuntamente com o sistema de digitalização de imagens.

Am pode ser estimado experimentalmente pelo sistema de processamento de imagens empregando a seguinte equação pixel a pixel:

$$Am = \frac{\sqrt{(I_{270^\circ} - I_{90^\circ})^2 + (I_{0^\circ} - I_{180^\circ})^2}}{2} \quad (3.100)$$

Assim, ΔOF pode ser estimada para todo campo de medição através de uma média no campo de medição nas diversas imagens dos diversos pares de iluminação.

Caso não seja usado nenhum algoritmo para eliminar a incerteza da ordem de franja absoluta, deve-se ainda ser acrescentado uma parcela de incerteza na OF em função da repetibilidade de chaveamento, também levantada experimentalmente e em função da instabilidade atmosférica levantado por um sensor atmosférico de resposta rápida.

4. Avaliação experimental das fontes de erros

Neste capítulo são avaliadas experimentalmente as principais fontes de erros de medição com a Estação Holográfica. Com os resultados aqui apresentados, combinados com os aspectos teóricos mostrados no capítulo 3, torna-se possível determinar a incerteza de medição típica do SINTHE. Também são mostrados procedimentos experimentais, que devem ser repetidos todas as vezes que se empregar um novo componente de hardware, visando informar as características metroológicas destes para as novas rotinas do SINTHE, que irão avaliar a incerteza de medição de cada montagem em particular. Os ensaios aqui realizados também serviram para otimização dos parâmetros de utilização da estação, pois cada ensaio avaliou os componentes na forma com que vinham sendo utilizados e também após as modificações, visando a otimização.

4.1 Fatores que influenciam a medição do ângulo de fase.

4.1.1 Calibração dos atuadores piezoelétricos para deslocamento de fase.

A calibração dos dispositivos microdeslocadores piezoelétricos é necessária para se obter dados confiáveis de incerteza de medição. Para tal foi montado o seguinte experimento:

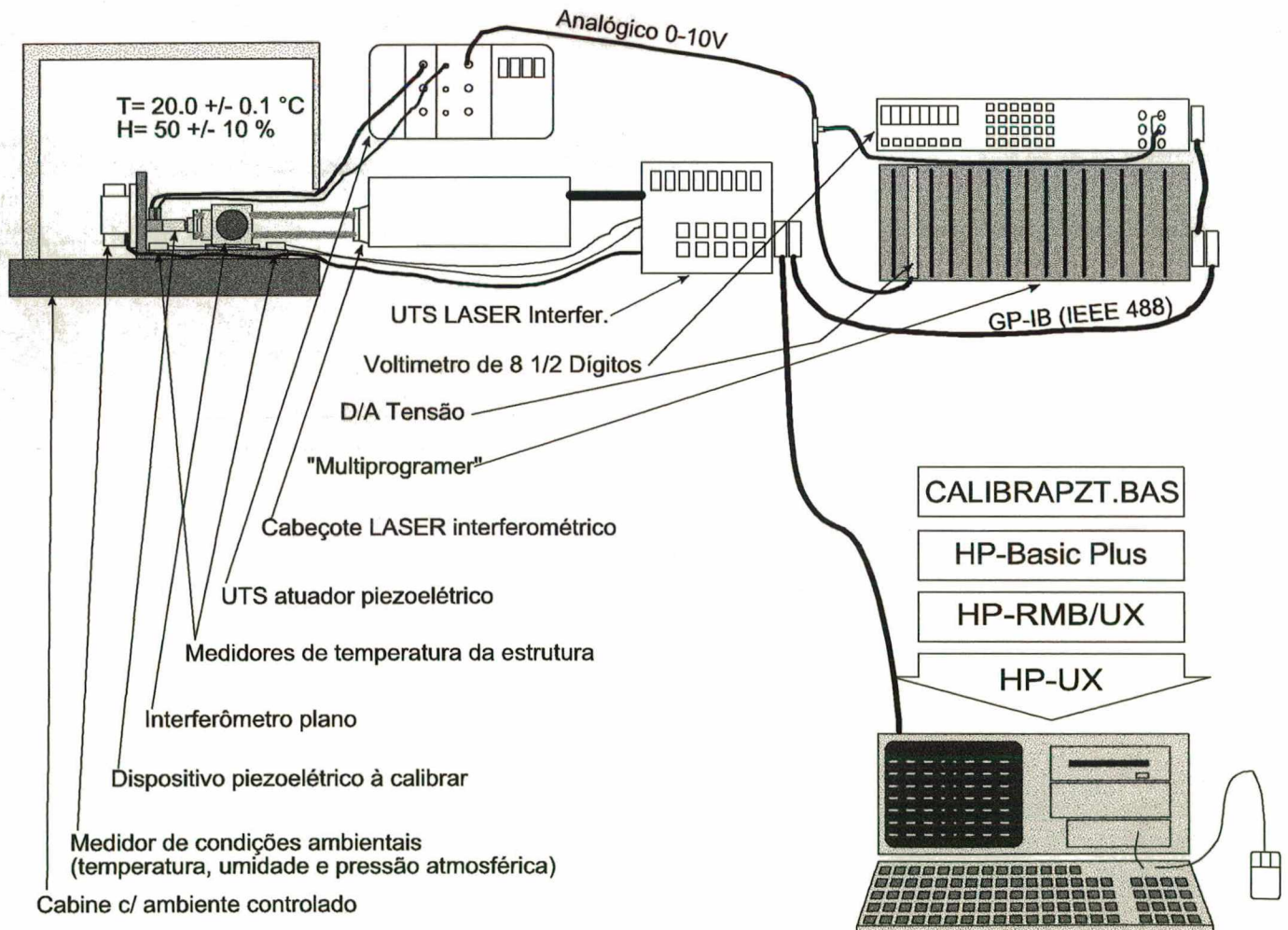


Figura 4.1 Infra-estrutura e leiaute para a calibração dos dispositivos microdeslocadores piezoelétricos

A) Sistema de medição padrão

a) Laser Interferométrico

• Fabricante	Hewlett Packard
• Modelo	5528A
• Resolução	5 nm
• Incerteza de Medição	$\pm 0,1$ ppm (0,00001%) da distância entre interferômetro e refletor

b) Voltímetro

• Fabricante	Hewlett Packard
• Modelo	5528A
• Resolução	8½ dígitos
• Incerteza de Medição	$\pm 0,1$ ppm (0,00001%)

c) Barômetro

• Fabricante	Hewlett Packard
• Modelo	5528A
• Resolução	8½ dígitos
• Incerteza de Medição	$\pm 0,1$ ppm (0,00001%)

d) Cabine de medição de bloco padrão

• Projeto	Fundação CERTI
• Estabilidade de temperatura	$\pm 0,1$ °C
• Estabilidade de umidade	$\pm 10\%$

B) Procedimento do ensaio

A Figura 4.1 mostra a bancada usada na calibração dos atuadores piezoelétricos. Foi utilizado um sistema de medição padrão baseado no interferômetro Doppler-Fizeau, montado na configuração de espelho plano. Todas as partes sensíveis a deslocamentos do padrão e do objeto a calibrar estavam dentro de uma cabine de medição de blocos padrão, com temperatura e umidade controladas. Ainda assim, as condições de temperatura, umidade e pressão foram monitoradas através do sensor atmosférico do LASER e compensados na medição através do software. Para o valor absoluto de pressão e temperatura foram usados sistemas calibrados e rastreados junto ao INMETRO, sendo o sensor de condições ambientais do LASER apenas usado de forma diferencial para registrar e corrigir as variações destas condições durante o ensaio. Para a compensação do comprimento de onda pelo software, foi usada a equação 3.5 e aplicada sobre toda a distância entre o refletor plano e o interferômetro e não apenas sobre o valor medido do curso do dispositivo à calibrar, já que o curso morto é 3 ordens de grandeza maior que o curso de medição. Assim, como o curso morto da montagem era de 3 mm, a incerteza de medição óptica do sistema

é de $\pm 0,3$ nm. Como a interpolação eletrônica do sistema é de 1/32 e como a sensibilidade do caminho óptico é de 4x, tem-se a resolução de 5 nm. Neste caso, como a incerteza é uma ordem de grandeza menor que a resolução do sistema, foram utilizados recursos estatísticos. Para tal, foi desativado um processo de filtragem tipo média móvel sobre a medição e foi utilizada a média de um grande número de medições, assim a resolução informada pelo software era de 1 nm.

Para o sistema de estímulo foi empregado um D/A de tensão de 12 bits, baseado no sistema "multiprogrammer" da HP. Para que se tivesse os valores gerados do D/A como confiáveis, o estímulo também foi calibrado através de um voltímetro padrão de 8½ dígitos.

Todos os sistemas medição foram integrados em um barramento GP-IB e controlados por um sistema baseado em sistema operacional UNIX, que permitiu que as tarefas de medição fossem agendadas para 1 h (madrugada), a fim de se evitar qualquer influência humana sobre o sistema de ar condicionado ou qualquer vibração provinda do tráfego de veículos nas imediações.

Houve uma tentativa de medição do tempo de resposta à transição de um estímulo em degrau de 1 μm . Porém, com a taxa de amostragem do sistema da HP de 40 leituras/s, não foi possível perceber a forma da transição do dispositivo. Até mesmo quando foi aplicado um degrau sobre a faixa completa do dispositivo (15 μm), a esta taxa de aquisição a resposta parecia instantânea. Assim, só se pode concluir que o tempo de transição ao estímulo degrau é inferior a 25 ms.

C) Resultados:

Tensão (V)	Posição (μm)	EL ida (μm)	DM95% (μm)	EL volta (μm)	DM95% (μm)	Histerese (μm)
0,665	-0,023	0,023	0,004	0,021	0,011	-0,001
0,700	0,027	0,015	0,005	0,024	0,009	0,008
0,735	0,077	0,006	0,003	0,024	0,010	0,018
0,765	0,120	0,001	0,004	0,027	0,007	0,027
0,800	0,170	-0,002	0,004	0,033	0,011	0,035
0,835	0,220	-0,007	0,003	0,032	0,009	0,039
0,865	0,263	-0,013	0,007	0,033	0,010	0,046
0,900	0,313	-0,013	0,007	0,039	0,012	0,053
0,935	0,363	-0,009	0,009	0,039	0,009	0,049
0,965	0,405	-0,010	0,009	0,039	0,008	0,050
1,000	0,455	-0,010	0,006	0,046	0,009	0,055
1,035	0,505	-0,005	0,007	0,044	0,008	0,049
1,065	0,548	-0,005	0,008	0,046	0,008	0,051
1,100	0,598	-0,004	0,010	0,050	0,006	0,054
1,135	0,648	0,002	0,008	0,049	0,010	0,047
1,165	0,691	0,002	0,011	0,045	0,010	0,043
1,200	0,741	0,001	0,009	0,043	0,010	0,042
1,235	0,791	0,005	0,009	0,040	0,011	0,035
1,265	0,834	0,007	0,010	0,030	0,007	0,022
1,301	0,884	0,007	0,008	0,023	0,008	0,016
1,336	0,934	0,009	0,009	0,018	0,009	0,009
Incerteza de posicionamento (95%)						0,040

Tabela 4.1 Resultados de calibração de um dispositivo piezo-elétrico

Foram feitos vários ensaios sobre diversas faixas de deslocamento do dispositivo, todas apresentando tendências semelhantes. Na Tabela 4.1 é mostrado o ensaio de uma faixa semelhante à normalmente usada pelo SINTHE. Nota-se pelos resultados da calibração que a dispersão da medição para 95% é, em alguns passos, inferior inclusive à resolução do sistema de medição padrão sem a interpolação estatística.

Percebe-se também uma histerese muito grande, maior inclusive do que faixa de dispersão, como pode se vista na Figura 4.2. Esta histerese é típica dos cristais piezoelétricos [27], porém o dispositivo em questão utiliza controle com realimentação através de extensômetros de resistência elétrica, para que, idealmente tal efeito seja eliminado. Esta histerese não é desprezável em relação ao emprego previsto para o sistema pelo fabricante, uma vez que na opção do sistema com interface de controle digital, esta emprega um D/A de 16 bits, o que daria uma resolução teórica para o sistema de 0,25 nm. Também vale registrar que o dispositivo em questão utiliza de forma desfavorável a ponte Wheatstone na medição de deformação com os extensômetros, uma vez que no dispositivo estão instalados dois extensômetros ativos em braços opostos da ponte, com complementos por resistores de precisão, instalados na placa de controle. Assim, variações de indutância ou ruído sobre os cabos afetam o sistema, podendo comprometer todo o desempenho metrológico do sistema. Outra tendência que se percebe pelos resultados é que a DM da volta é ligeiramente maior que a da ida.

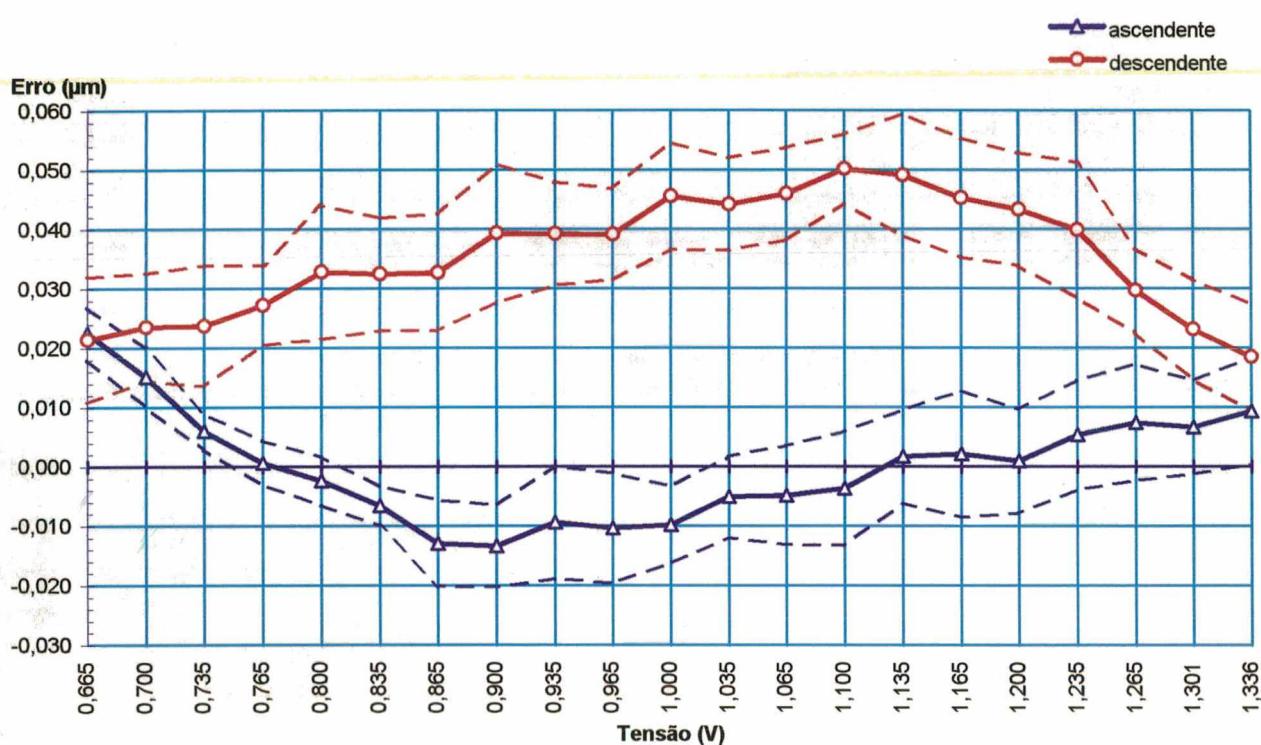


Figura 4.2 Erro de posicionamento do dispositivo piezoelétrico (faixa de 1 a 2 µm)

Com a seqüência das posições utilizadas no procedimento de deslocamento de fase, consultando a curva de erros, determina-se os erros de cada posição, convertidos em erro angular de fase, conforme a Tabela 4.2.

Posicionamento do SINTHE:									
Fase (°)	Tensão (V)	Tens R.180°	Δ Tens (V)	Δ Pos (μ m)	Pos Ef. (μ m)	Pos N. (μ m)	ES (μ m)	DM95% (μ m)	Erro Pos (°)
0°	1,000	-0,219						0,0065	
180°	1,219	0,000	0,219	0,279	1,768	1,768		0,0090	
270°	1,328	0,109	0,109	0,161	1,929	1,923	0,006	0,0084	3,2
90°	1,109	-0,110	-0,219	-0,281	1,648	1,611	0,037	0,0080	21,0
0°	1,000	-0,219	-0,109	-0,163	1,485	1,455	0,030	0,0090	17,1
180°	1,219	0,000	0,219	0,279	1,764	1,768	-0,004	0,0090	-2,1
Comprimento de onda (μ m):				0,6328					
Relação Fase/deslocamento (°/ μ m):				568,9					

Tabela 4.2 Erros de posicionamento no procedimento de deslocamento de fase

Estes erros de deslocamento de fase resultarão em um erro varável na determinação da fase absoluta de cada pixel, conforme mostrado na Figura 4.3:

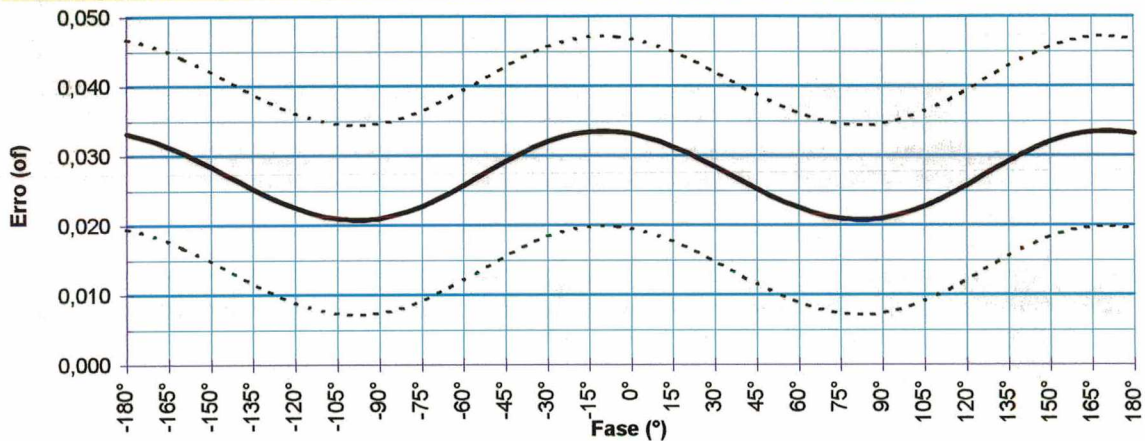


Figura 4.3 Comportamento dos erros na determinação da fase absoluta em função de erros de histerese no deslocamento.

A medição é normalmente efetuada a partir da subtração dos mapas de fase absolutos (condição final menos a inicial). A parcela DC dos erros é eliminada e a parcela de amplitude de modulação atinge nos piores casos o dobro. A Tabela 4.3 extrai os erros do gráfico da Figura 4.3 e propaga estes erros pela operação de subtração, chegando a valores de erros para cada píxel.

Resultados:		Antes da subtração	Após a subtração
ES	DC	0,027	0,000
(OF)	AM	0,006	0,013
DM 95% (OF)		0,014	0,019
IM (OF)		0,047	0,032

Tabela 4.3 Inferência dos erros de deslocamento de fase na Ordem de Franja

Assim, o erro na ordem de franja, causado apenas pela influência dos erros de posicionamento do dispositivo de micro deslocamento piezoelétrico, é de $\lambda/30$, para o procedimento original de posicionamento empregado pelo SINTHE.

4.1.2 Calibração da câmera CCD.

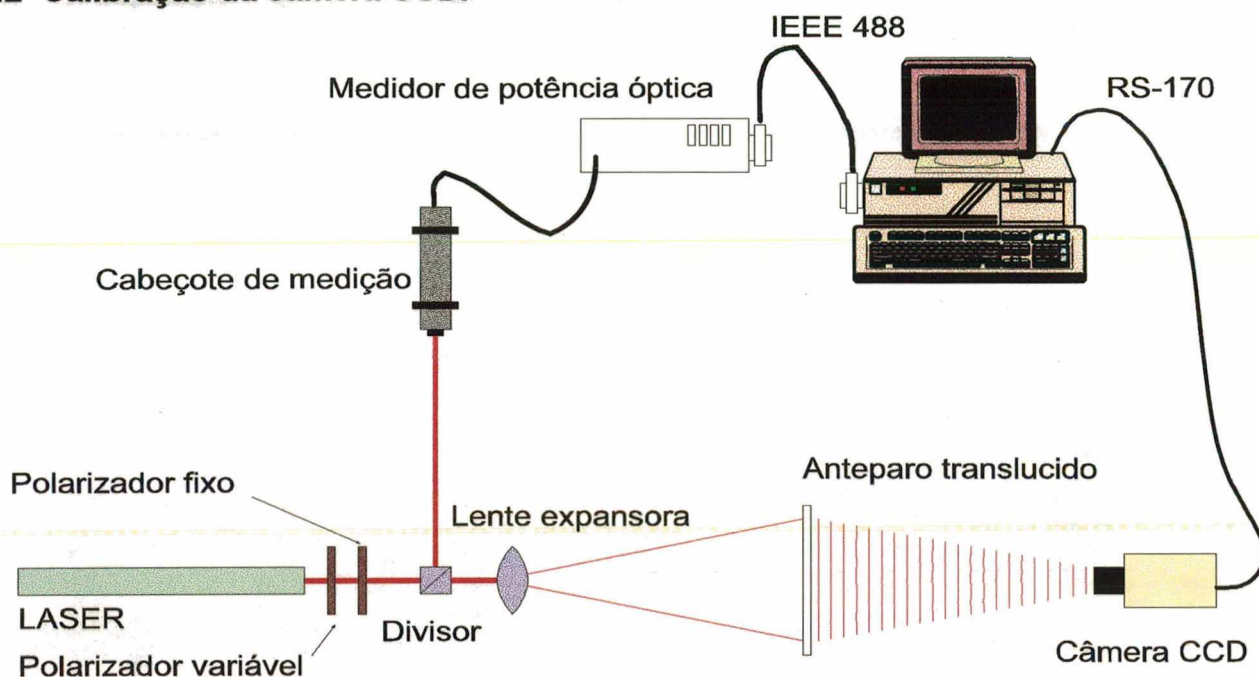


Figura 4.4 Bancada de ensaio de linearidade da medição de intensidade da câmera CCD

A) Sistema de medição Padrão:

a) Medidor de Potência Óptica

• Fabricante	Hewlett Packard
• Modelo	8152A/81520A
• Resolução	0,01 pW
• Incerteza de Medição	$\pm 0,5$ pW

B) Procedimento do ensaio:

Com a bancada de ensaio descrita na Figura 4.4, comparou-se a intensidade de uma região com iluminação homogênea da imagem captada pela câmera, com a medida pelo medidor de potência óptica.

Foram realizados ensaios avaliando a influência dos seguintes recursos da câmera que influenciam na linearidade e na dispersão da medição de intensidade luminosa: controle automático de nível de escuro (ABkL) e controle automático de ganho (AGC) para a faixa de 0 à 6 db.

C) Resultados:

a) Ensaio com a câmera regulada com ganho de 0 dB e ABkL ligado

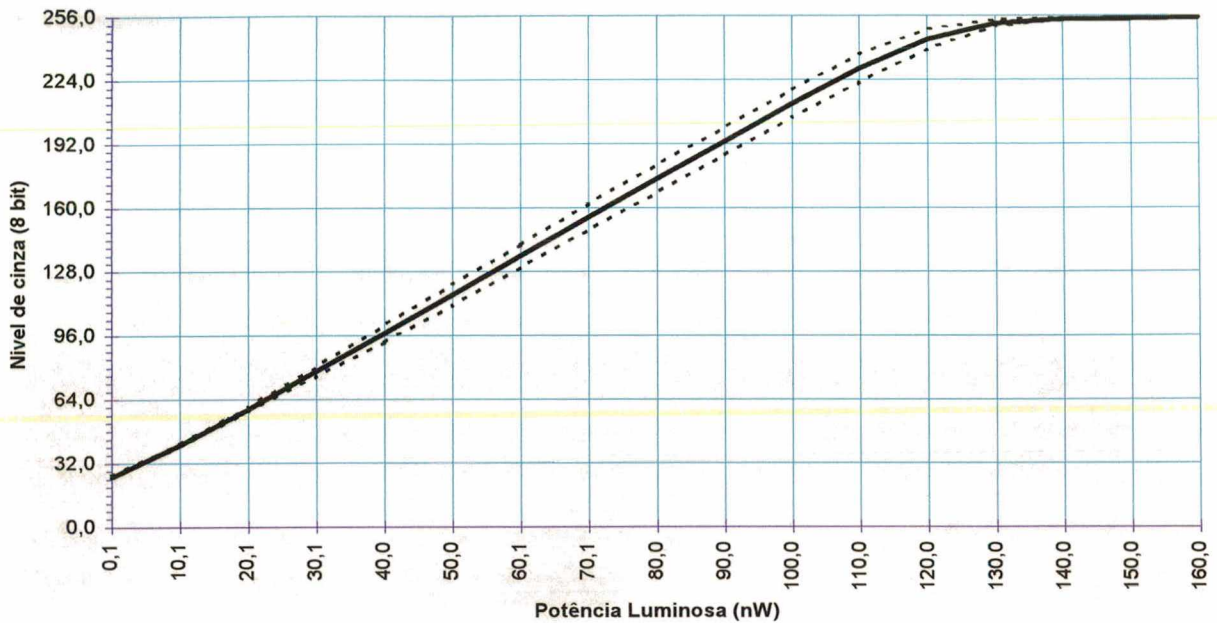


Figura 4.5 Curva característica de resposta da C6amera COHU 4810, com ganho 0 dB e ABkL ligado.

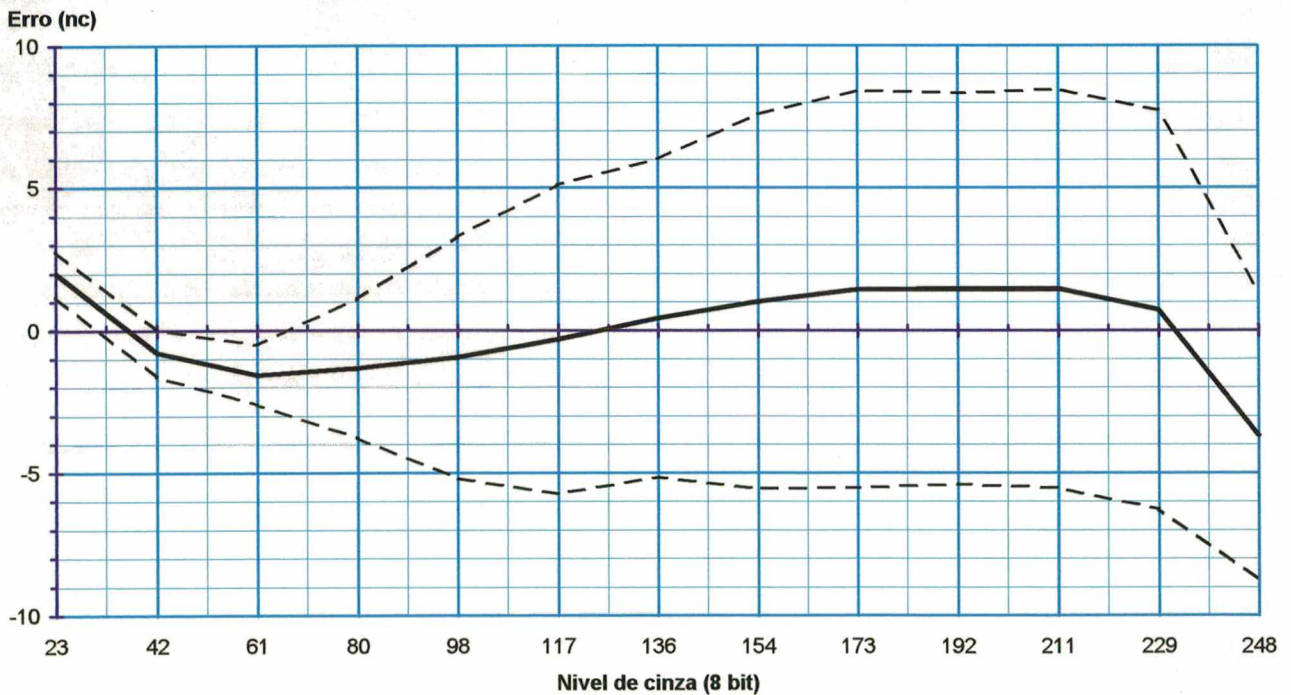


Figura 4.6 Erro de linearidade da câmera com ganho 0 db e ABkL ligado

b) Ensaio com a câmara regulada com ganho de 6 db e ABkL ligado

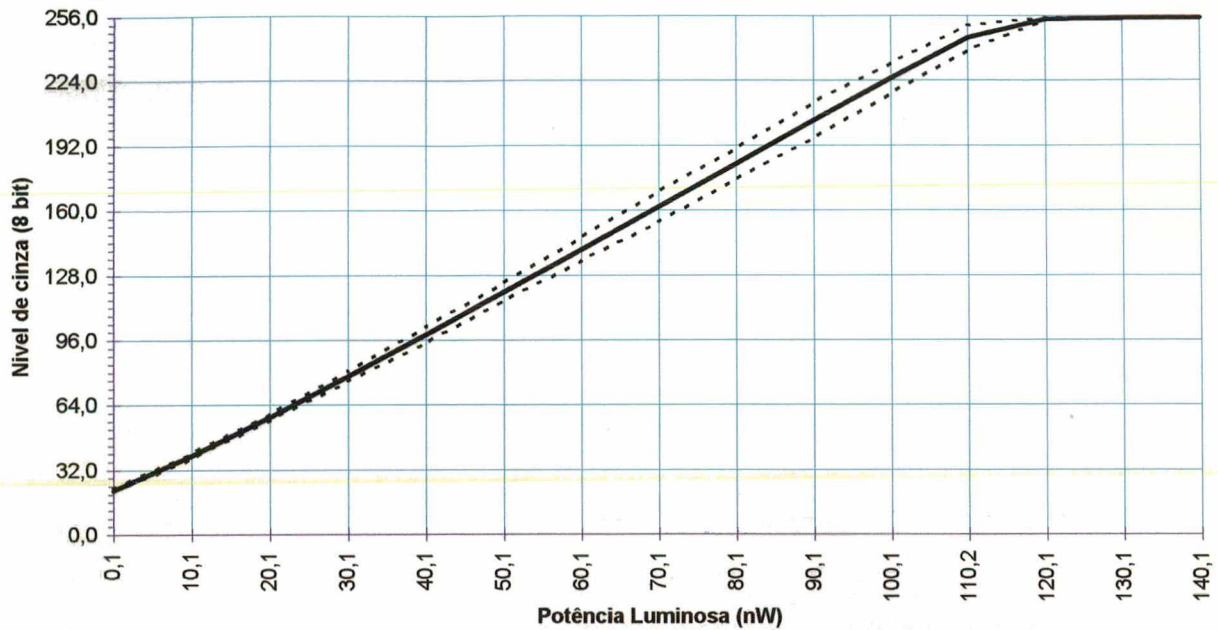


Figura 4.7 Curva característica de resposta da câmara COHU 4810, com ganho 6 db e ABkL ligado

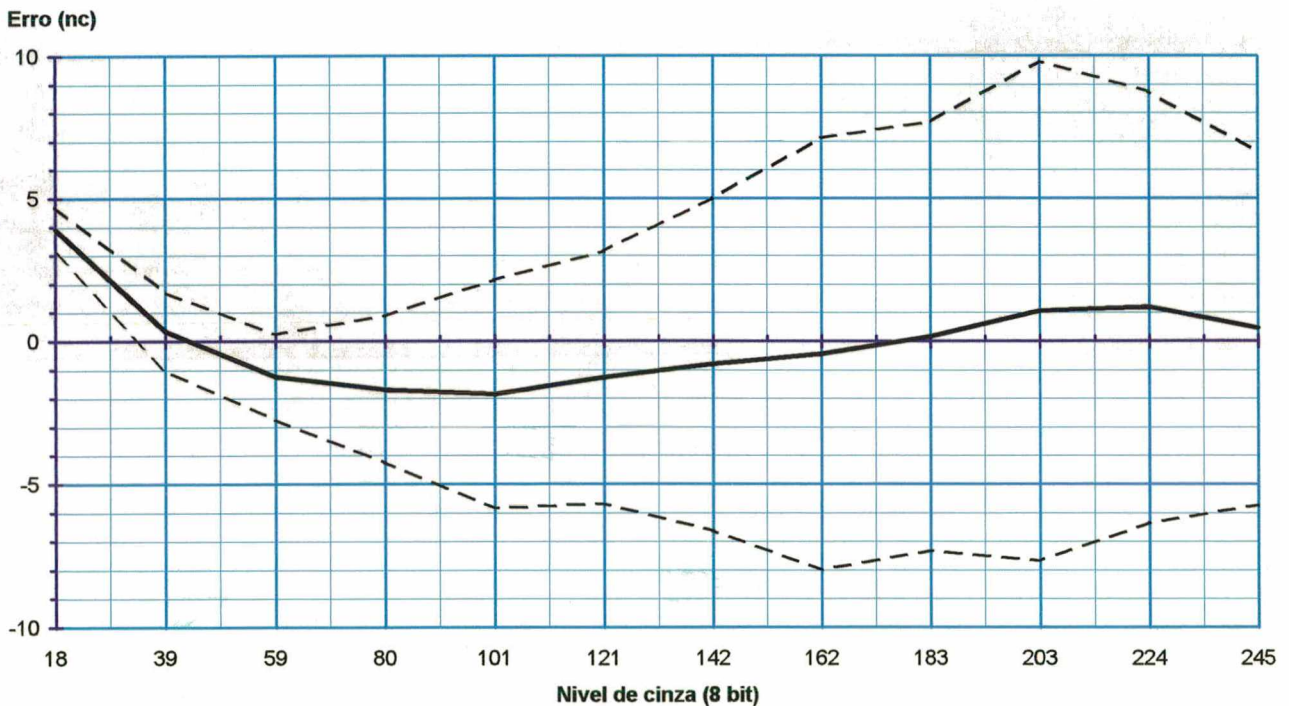


Figura 4.8 Erro de linearidade da câmara com ganho 6 db e ABkL ligado

Comparando-se o gráfico da Figura 4.6 com o da Figura 4.8, observa-se que a linearidade da câmara não é afetada pelo ajuste do ganho, apenas a parcela aleatória aumenta.

c) Ensaio com a câmera regulada com AGC ligado e Nível de escuro manualmente ajustado para 0 nc com a lente fechada.

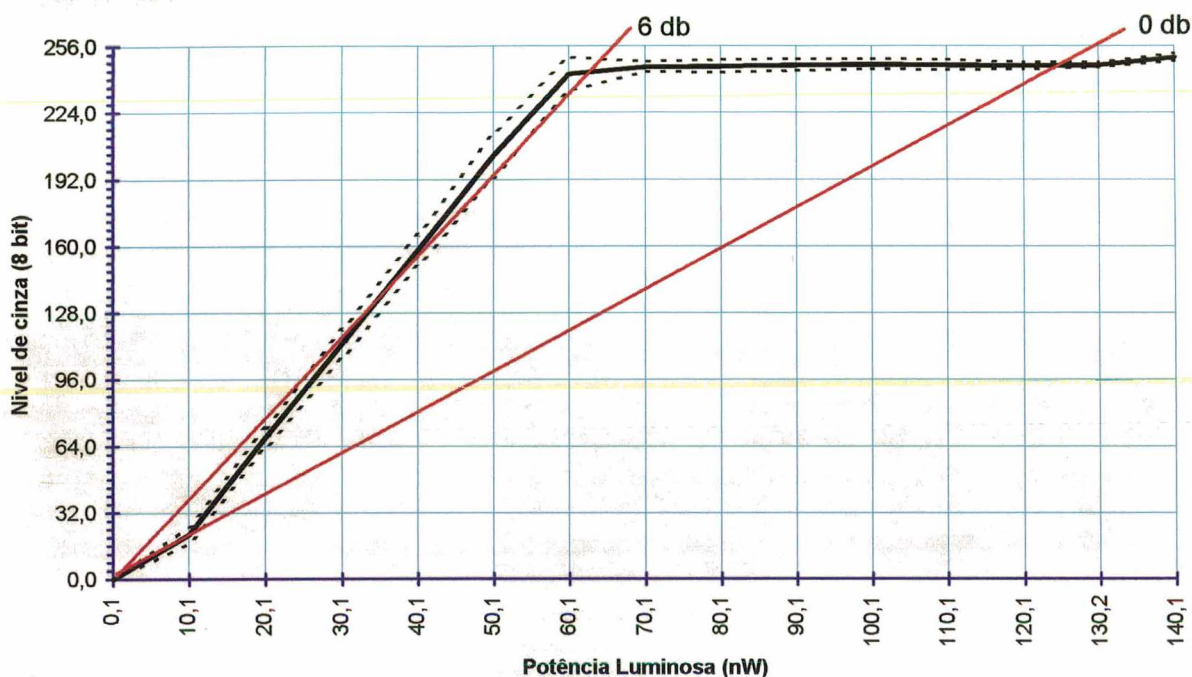


Figura 4.9 Curva característica de resposta da câmera COHU 4810, com AGC ligado 0 db e ABKL desligado

No Figura 4.9 observa-se o efeito do controle de ganho automático. Este recurso tenta posicionar o nível RMS do sinal no meio de sua faixa dinâmica, com a finalidade de melhorar o contraste da imagem. Assim, no ensaio, até o nível RMS do sinal da câmera atingir o meio da faixa dinâmica do sinal, o ganho permanece em 6 db. Quando o sinal RMS da imagem no anteparo atinge o nível médio da faixa dinâmica, o AGC começa então a atenuar o ganho, até este atingir o limite inferior de 0 db, quando o sinal de imagem satura. O nível de sinal medido não estava no meio da faixa enquanto o AGC atuava porque a janela de amostragem estava situada na região mais clara da imagem, no meio do anteparo translúcido.

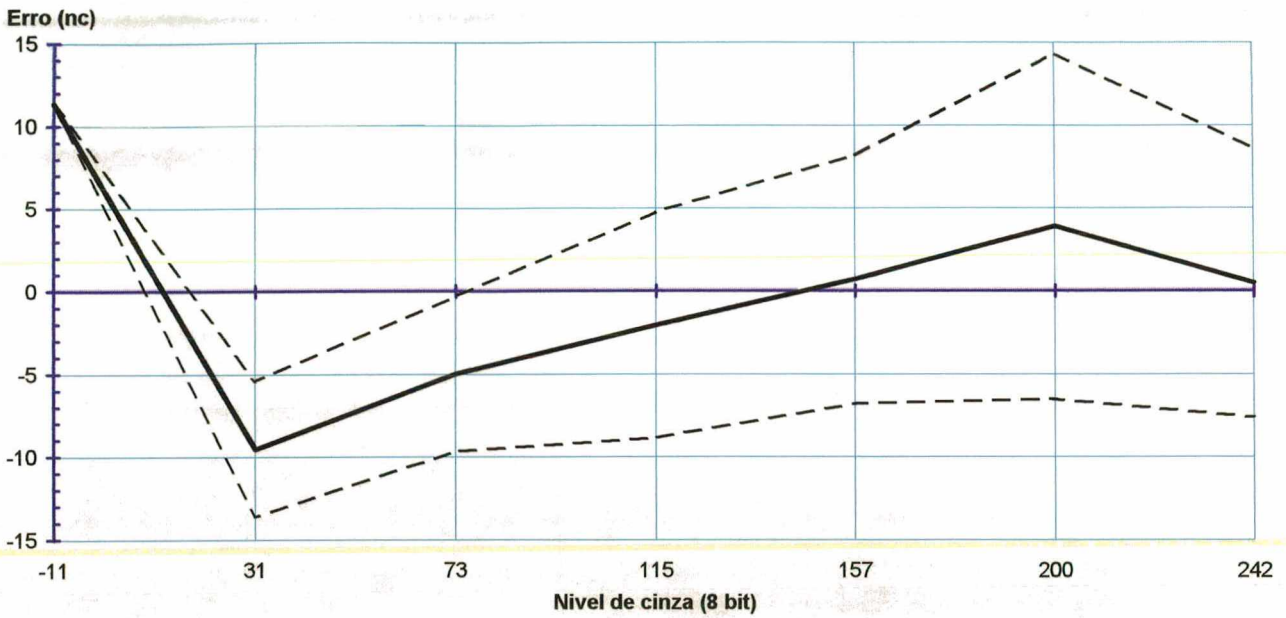


Figura 4.10 Erro de linearidade da câmera com AGC ligado e ABkL desligado

d) Resultados combinados dos ensaios com AGC e ABkL ligados

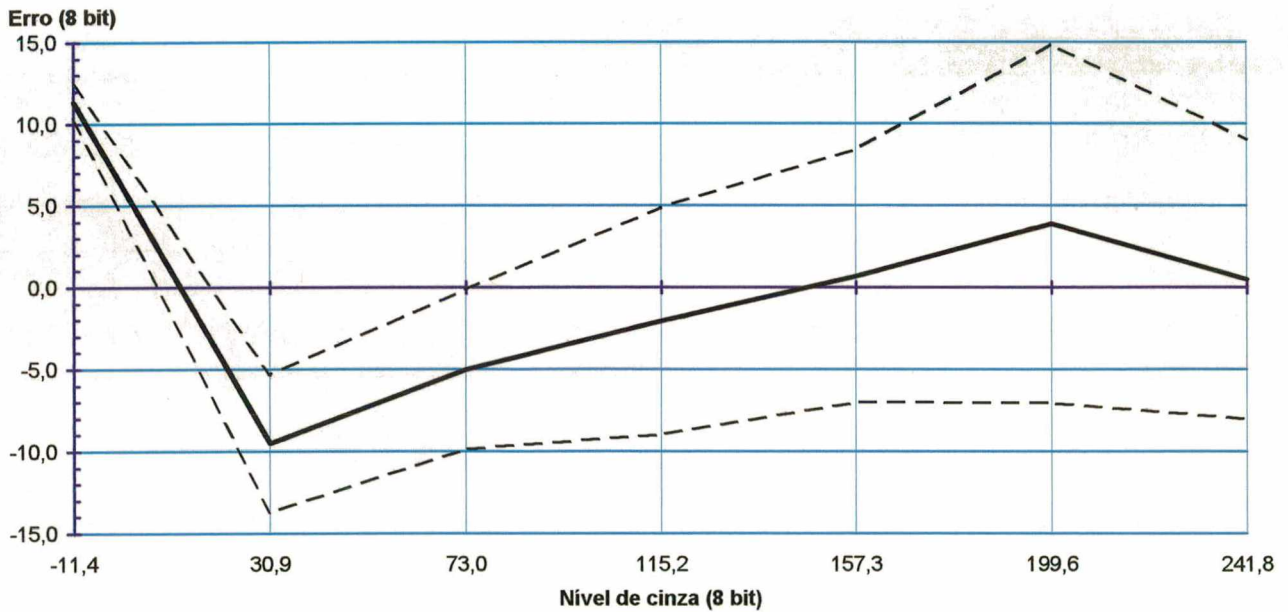


Figura 4.11 Erro de linearidade da câmera com AGC ligado e ABkL ligado

e) Ensaio com a câmera regulada com ganho de 6 db e Nível de escuro manualmente ajustado para 0 nc com a lente fechada.

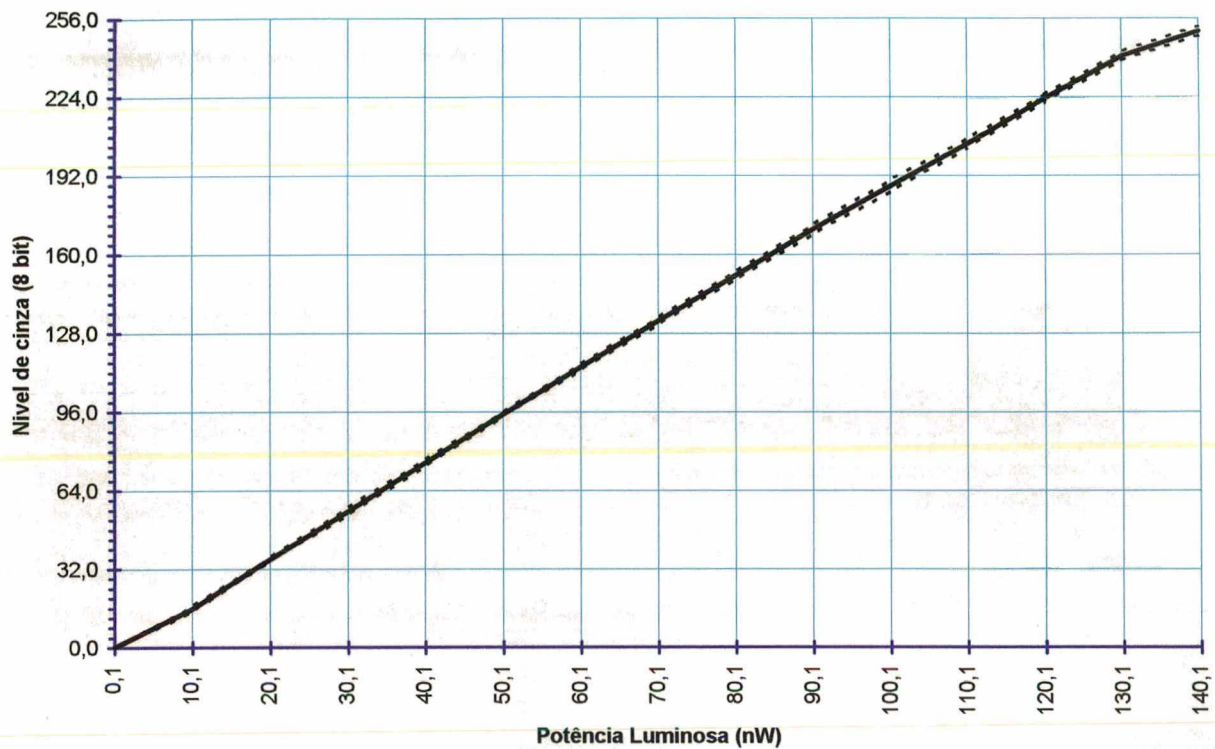


Figura 4.12 Curva característica de resposta da câmera COHU 4810, com ganho fixo em 6 db e ABKL desligado

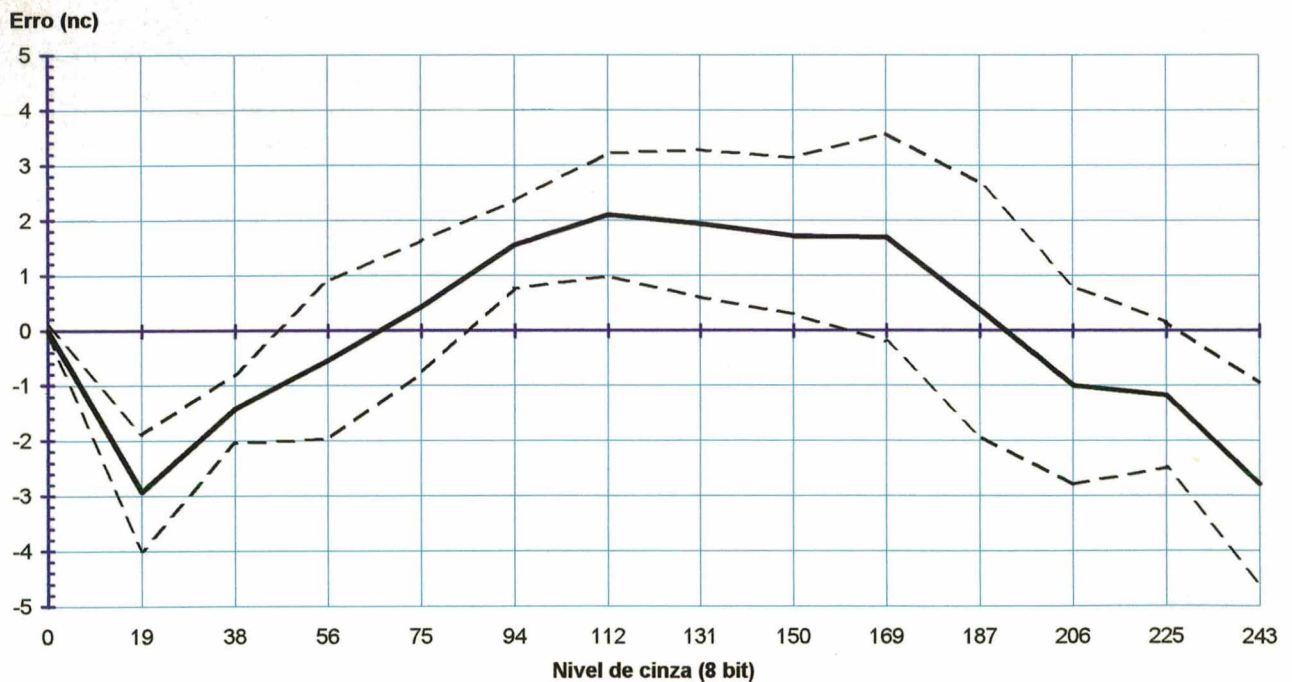


Figura 4.13 Erro de linearidade da câmera com ganho fixo em 6 db e ABKL desligado

f) Resumo geral dos resultados

Comparando-se os resultados dos ensaios, com os recursos de ABkL e AGC ligados e desligados, percebe-se que:

- Metrologicamente o desempenho da câmera é muito melhor sem estes recursos acionados, conforme mostrado na Tabela 4.4;
- O recurso de AGC afeta tanto a linearidade quanto a dispersão da medição, pois apesar do nível médio do sinal ser aproximadamente constante, devido a característica aleatória da fase entre os speckles, ainda assim é um fator de instabilidade no ganho;
- O ajuste de nível de escuro ABkL afeta o offset do sinal em função do sinal de referência fornecido por píxeis encobertos. Este sinal depende basicamente das corrente termo-elétricas e ruídos internos dos circuitos da câmera.

Assim, o ideal é fixar todos os ajustes automáticos da câmera para melhorar seu desempenho como sistema de medição.

Resumo dos resultados do teste:											
Ensaio:		E1CC		E2CC		E5CC		Combinado		E4CC	
Ajuste da lente	Comprim. focal (mm):	50		50		50		50		50	
	Abertura numérica:	2		2,8		2,8		2,8		2,8	
Area do CCD	colunas:	224	288	224	288	256	272	256	272	256	272
	linhas	208	272	208	272	256	260	256	260	256	260
	pontos:	4096		4096		64		64		64	
Ajuste eletrônico	ganho (dB):	0		6		AGC		AGC		6	
	Nível de escuro (nc 8 bit):	ABkL		ABkL		0		ABkL		0	
Resultados	EL (nc 8 bit)/(%):	2,8	1,1%	2,9	1,1%	10,4	4,1%	10,4	4,1%	2,5	1,0%
	DM 95% (nc 8 bit)/(%):	7,0	2,7%	8,7	3,4%	10,4	4,1%	11,0	4,3%	2,3	0,9%
	IM: (nc 8 bit)/(%):	7,7	3,0%	9,1	3,6%	11,5	4,5%	12,0	4,7%	2,8	1,1%

Tabela 4.4 Tabela resumo dos ensaios da linearidade de medição de intensidade luminosa da câmera COHU 4810.

4.1.3 Análise de amplitudes de modulação típicas.

Para a medição de amplitudes de modulação típicas, em função de diversos parâmetros, foi utilizada a seguinte bancada:

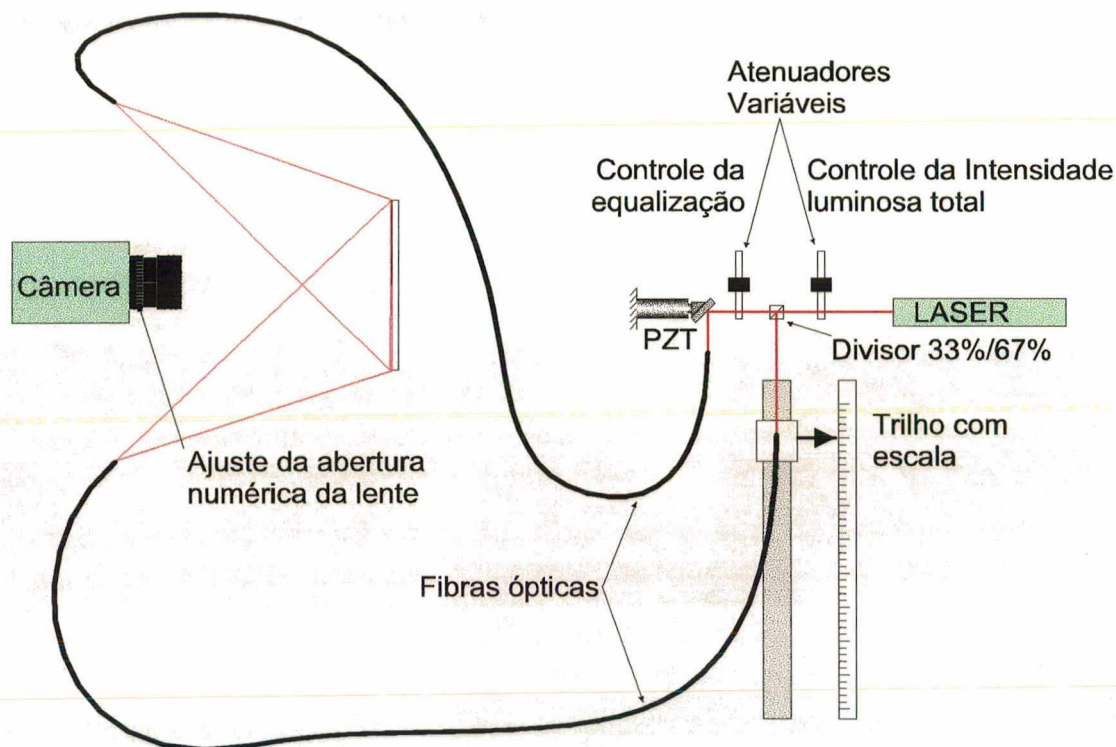


Figura 4.14 Bancada de ensaio da amplitude de modulação.

A) Sistema de medição padrão

Para estes ensaios foram empregados os componentes básicos do SINTHE, utilizando uma rotina que, através do deslocamento de fase, calcula a amplitude de modulação.

B) Ensaio de amplitude de modulação em função da intensidade luminosa média:

a) Procedimento do ensaio

Neste ensaio mediu-se a amplitude de modulação de cada pixel do mapa de "speckle" em função da intensidade luminosa incidente no anteparo. A intensidade foi controlada pelo atenuador variável antes do divisor. As posições de medição foram referenciadas pela posição do pico do histograma de intensidade do SINTHE. A câmera, o interferômetro e o sistema de processamento de imagens tiveram os demais parâmetros fixos, segundo a Tabela 4.5.

b) Resultados

Ajuste de parâmetros do ensaio				
Iluminação	Intensidade média (nc 8 bits):			
	Nº de pontos saturados:			
	Relação de intensidade (%/%):		50	50
	Diferença de caminho óptico (mm):		0	
Tipo de Superfície:			Branca pintado	
Lente	Lente (mm):		50 mm	
	Abertura da lente:		5,6	
Janela do	Linhas		176	368
	Colunas		80	270
CCD	Pontos		36480	
	Student		1,960	
Amplitude de modulação x Intensidade média				
Intensidade (nc 8 bits)	Ampl. Modul. (nc 8 bits)	Desvio Padrão (nc 8 bits)	Faixa DM 95% (nc 8 bit)	
50	11,5	7,43	0,0	26,1
75	15,3	11	0,0	36,9
100	20,2	14,8	0,0	49,2
125	28,5	21,2	0,0	70,1

Tabela 4.5 Parâmetros e resultados do ensaio de amplitude de modulação em função da intensidade luminosa

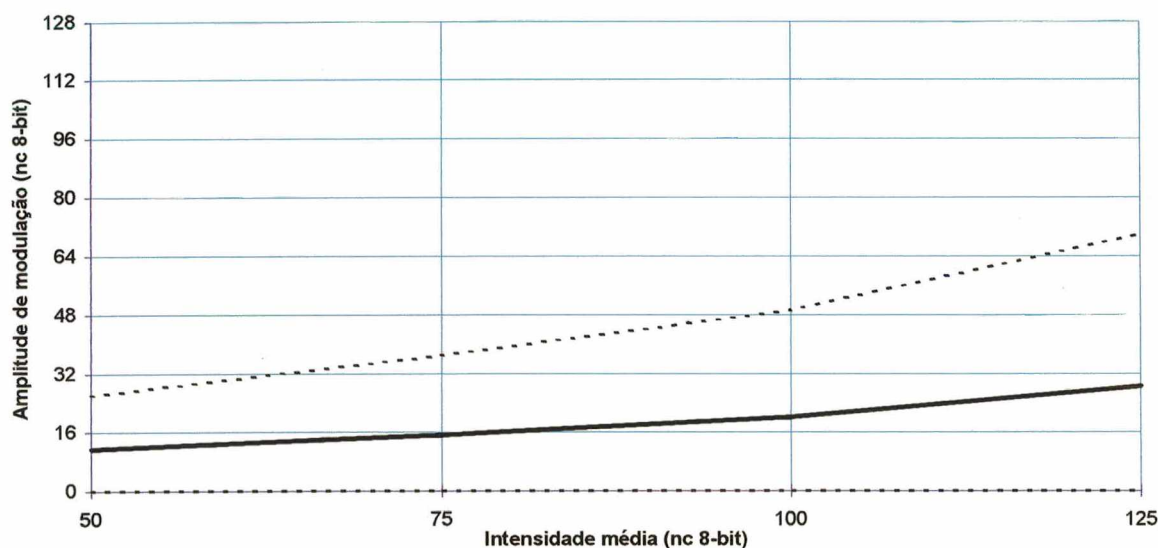


Figura 4.15 Amplitude de modulação em função da intensidade luminosa

Observa-se que a amplitude de modulação aumenta conforme o aumento da intensidade luminosa. É uma consequência de um melhor aproveitamento da faixa dinâmica. Mesmo que alguns pontos fiquem saturados, o sistema na média apresenta melhores resultados.

C) Ensaio de amplitude de modulação em função da razão de intensidade luminosa:

a) Procedimento do ensaio

Neste ensaio mediu-se a amplitude de modulação de cada pixel do mapa de speckle em função da razão entre a intensidade luminosa dos dois braços do interferômetro. A razão entre as intensidades foi controlada pelo atenuador variável após o divisor, as posições de medição foram referenciadas pela medição da luz de cada braço do interferômetro incidente no anteparo, medidos por um medidor de

potência luminosa. A câmera, o interferômetro e o sistema de processamento de imagens permaneceram com os demais parâmetros fixos, segundo a Tabela 4.6.

b) Resultados

Ajuste de parâmetros do ensaio						
Iluminação	Intensidade média (nc 8 bits):			100		
	Nº de pontos saturados:			525		
	Relação de intensidade (%/%):			0		
	Diferença de caminho óptico (mm):			0		
Tipo de Superfície:			Branca pintado			
Lente	Comprimento focal (mm):			50		
	Abertura numérica:			11		
Janela do CCD	Linhas	176	368			
	Colunas	80	270			
CCD	Pontos			36480		
	Student			1,960		
Amplitude de modulação x relação de intensidades						
Rel. de Inten. (% %)	Ramo ã desloc. ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Ramo desloc. ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Ampl. mod. (nc 8 bits)	Desv. Pad. (nc 8 bits)	DM 95% (nc 8 bit)	
10 90	55,3	6,14	18,6	13,7	0,0	45,5
15 85	55,8	9,05	23,5	16,87	0,0	56,6
20 80	53,7	13,9	26,95	18,78	0,0	63,8
25 75	52,2	17,4	29,8	20,37	0,0	69,7
30 70	49	21	31,6	21,6	0,0	73,9
35 65	47,2	25,42	32,3	21,87	0,0	75,2
40 60	41,7	27,8	33,6	22,49	0,0	77,7
45 55	40,3	32,97	33,85	22,59	0,0	78,1
50 50	36,7	36,7	33,9	22,59	0,0	78,2

Tabela 4.6 Ensaio de amplitude de modulação em função da equalização da intensidade luminosa dos braços do interferômetro.

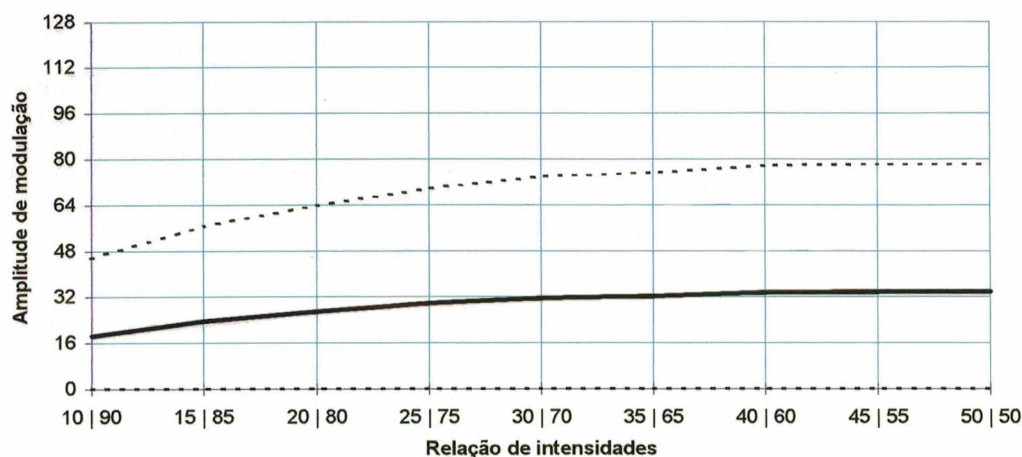


Figura 4.16 Amplitude de modulação em função da equalização da intensidade luminosa dos braços do interferômetro.

Os resultados mostram que, apesar do que se poderia esperar, do ponto de vista teórico, este não é um parâmetro muito sensível, conforme mostra o Figura 4.16. Isto porque a amplitude de modulação típica é bem inferior a metade da faixa dinâmica do A/D da placa digitalizadora de imagens.

D) Ensaio de amplitude de modulação em função da diferença de caminho óptico:

a) Procedimento do ensaio

Neste ensaio mediu-se a amplitude de modulação de cada pixel do mapa de speckle em função da diferença de caminho óptico entre os braços do interferômetro. A diferença de caminho óptico foi gerada pelo deslocamento da extremidade de incidência do feixe na fibra, fixada em um trilho com escala para medir o deslocamento. A câmera, o interferômetro e o sistema de processamento de imagens permaneceram com os demais parâmetros fixos, segundo a Tabela 4.7.

b) Resultados

Ajuste de parâmetros do ensaio						
Iluminação	Intensidade média (nc 8 bits):	100				
	Nº de pontos saturados:	525				
	Relação de intensidade (%/%):	50	50			
	Diferença de caminho óptico (mm):					
Tipo de Superfície:		Branca pintado				
Lente	Comprimento focal (mm):	50				
	Abertura numérica:	11				
Janela do CCD	Linhas	176	368			
	Colunas	80	270			
CCD	Pontos	36480				
	Student	1,960				
Amplitude de modulação x relação de intensidades						
Difer. de CO (mm)	Amplitude de mod. (nc 8 bits)	Desvio Padrão (nc 8 bits)	Ptos Hiper modul. (%)	DM 95% (nc 8 bit)	(nc 8 bit)	
0	42,1	27	1,5	0,0	95,0	
50	36,9	25,7	1,2	0,0	87,3	
100	32,1	21,97	0,5	0,0	75,2	
150	23,1	16,68	0,4	0,0	55,8	
200	14,9	11,25	0,15	0,0	37,0	
250	8,45	7,15	0,05	0,0	22,5	
300	5,2	5,47	0,05	0,0	15,9	
350	4,1	4,1	0	0,0	12,1	
400	4,7	4,87	0	0,0	14,2	
450	4,15	4,32	0	0,0	12,6	
500	6,15	5,86	0	0,0	17,6	
550	6,1	5,01	0	0,0	15,9	
600	4,6	4,18	0	0,0	12,8	
650	5,5	5,05	0	0,0	15,4	

Tabela 4.7 Parâmetros e resultados do ensaio de amplitude de modulação em função da diferença de caminho óptico.

Os resultados mostram que este é um parâmetro importante, e que a teoria do comprimento de coerência representa perfeitamente este fenômeno. A comprimento de coerência teórico para este LASER é de 302 mm e pelo resultado do experimento, representado na Figura 4.17, pode-se considerar 1/3 deste valor, ± 100 mm, como sendo a parcela de melhor rendimento e $\frac{1}{2}$ do comprimento de coerência, ± 150 mm, como o limite útil.

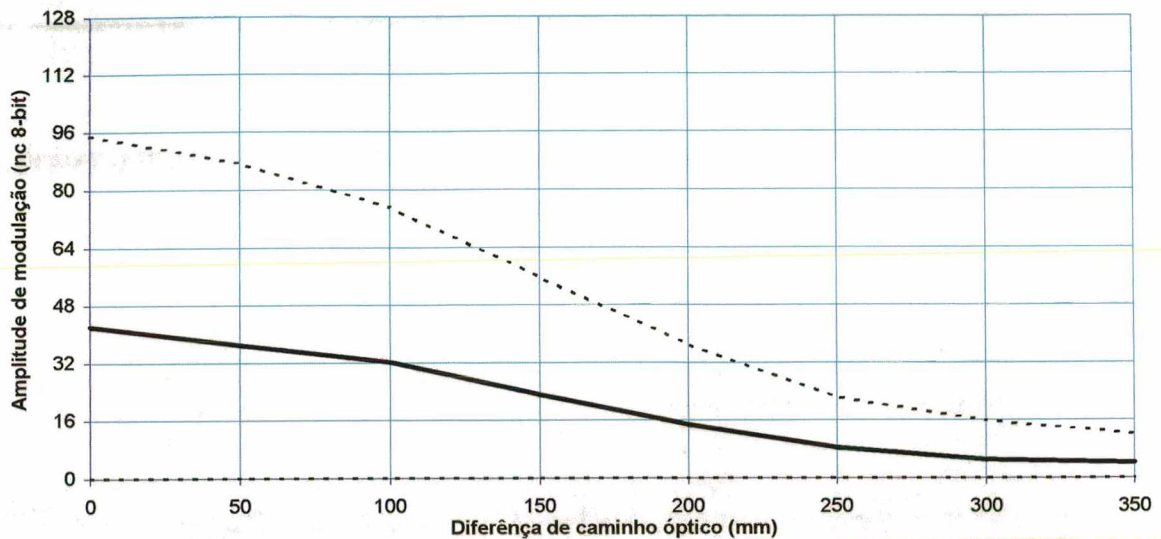


Figura 4.17 Amplitude de modulação em função da diferença de caminho óptico

E) Ensaio de amplitude de modulação em função da rugosidade superficial:

a) Procedimento do ensaio

Neste ensaio mediu-se a amplitude de modulação de cada pixel do mapa de speckle em função da rugosidade superficial da peça. Uma peça de alumínio, representada na Figura 4.14 pelo anteparo, teve sua superfície lixada sucessivamente por uma lixa cada vez mais fina. Para cada acabamento superficial, a rugosidade foi medida por um rugosímetro laser e foi feito um novo ensaio de amplitude de modulação. A câmera, o interferômetro e o sistema de processamento de imagens permaneceram com os demais parâmetros fixos, segundo a Tabela 4.8.

b) Resultados

Ajuste de parâmetros do ensaio					
Iluminação	Intensidade média (nc 8 bits):		100		
	Nº de pontos saturados:		2000		
	Relação de intensidade (%/%):		50	50	
	Diferença de caminho óptico (mm):		0		
Tipo de Superfície:		Alumínio lixado			
Lente	Comprimento focal (mm):		50		
	Abertura numérica:		11		
Janela do CCD	Linhas		80	432	
	Colunas		40	464	
CCD	Pontos		149248		
	Student		1,960		
Amplitude de modulação x relação de intensidades					
Rugosidade Ra (μm)	Lixa nº	Ampl. mod. (nc 8 bits)	Desv. Pad. (nc 8 bits)	DM 95% (nc 8 bit)	
2,63	80	31,1	23,2	0,0	76,6
1,37	120	32,8	23,65	0,0	79,2
1,23	240	31,9	23,94	0,0	78,8
0,724	400	33,6	24,73	0,0	82,1
0,547	600	35,4	24,75	0,0	83,9
0,471	1200	38,8	26,07	0,0	89,9

Tabela 4.8 Parâmetros e resultados do ensaio de amplitude de modulação em função da rugosidade superficial.

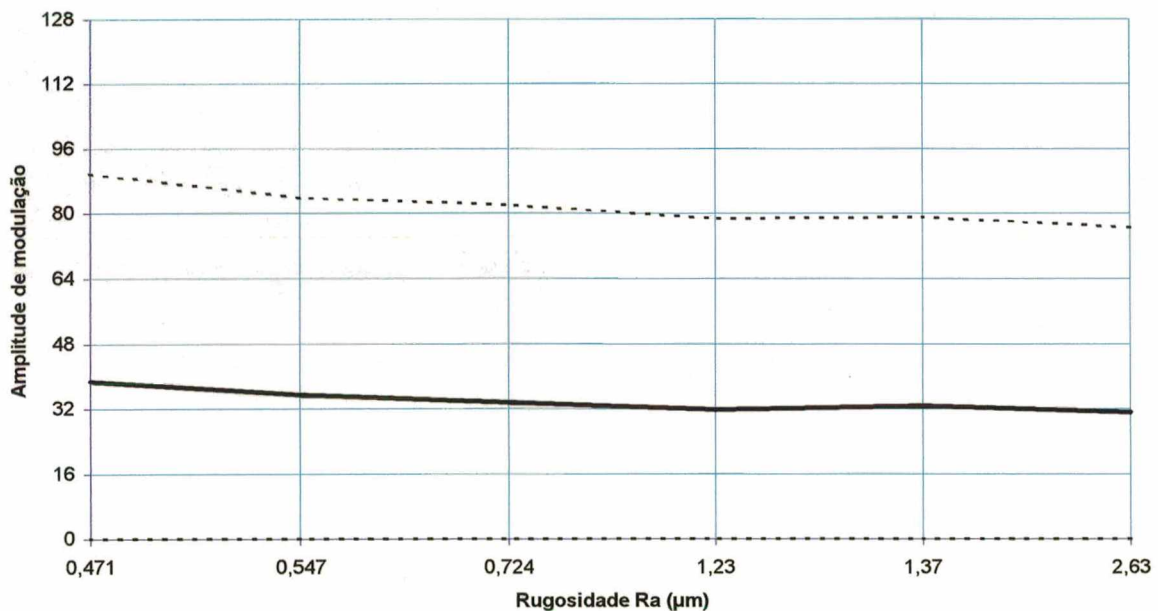


Figura 4.18 Amplitude de modulação em função da rugosidade superficial

Percebe-se pelos resultados do gráfico da Figura 4.18, que este não é um fator importante. Embora a teoria relacione o contraste do mapa de speckle com a rugosidade, porém o contraste não tem ligação direta com a amplitude de modulação.

F) Ensaio da amplitude de modulação em função do tipo de superfície:

a) Procedimento do ensaio

Neste ensaio mediu-se a amplitude de modulação de cada pixel do mapa de “speckle” em função do tipo de superfície da peça. Diversas peças de materiais e acabamentos superficiais diferentes foram usadas como anteparo, e para cada um foi feito um novo ensaio de amplitude de modulação. A câmera, o interferômetro e o sistema de processamento de imagens permaneceram com os demais parâmetros fixos, segundo a Tabela 4.9.

b) Resultados

Ajuste de parâmetros do ensaio									
Iluminação	Relação de intensidade (%/%)			50	50				
	Diferença de caminho óptico(mm)			0					
Lente	Comprimento focal (mm)			50					
	Abertura numérica			8					
Amplitude de modulação x Tipo de superfície									
Superfície	Intes. Lum. (nc 8 bits)	n° ptos saturados	Colunas	Linhas	pontos	Ampl. mod. (nc 8 bits)	Desv. Pad. (nc 8 bits)	DM95%	(nc 8bit)
Aço Oxidado Irregular	50	100	160	384	48 336	64512	17,2	13,89	27,2
Aço Lixado (lixa 80)	100	700	160	384	48 336	64512	27,4	18,695	36,6
Alumínio Lixado (lixa 600)	100	600	128	416	32 232	57600	24,9	18,02	35,3
Branca pintado	125	1000	80	432	48 308	91520	32,4	20,35	39,9
Prateada pintado	125	650	160	384	48 336	64512	26,0	17,42	34,1
PVC laminado branco opaco	125	0	112	400	120 380	74880	30,7	17,43	34,2
Polipropileno leitoso translúcido	125	0	112	400	26 380	101952	24,4	13,485	26,4

Tabela 4.9 Parâmetros e resultados do ensaio de amplitude de modulação em função do tipo de superfície

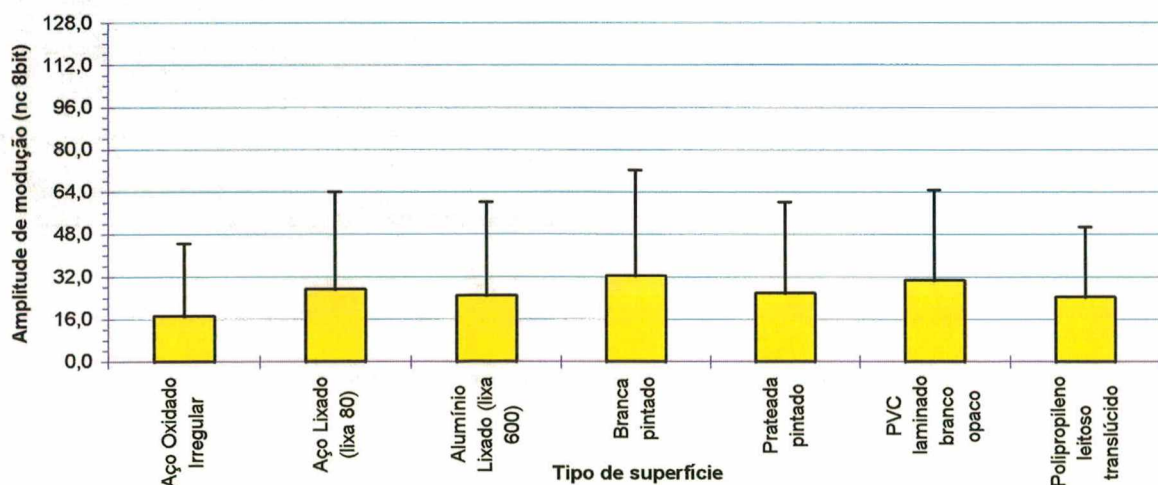


Figura 4.19 Amplitude de modulação em função do tipo de superfície

Percebe-se que as superfícies de melhor homogeneidade e emissividade apresentaram melhores resultados. A melhor superfície foi a pintada com spray branco fosco. Assim, sempre que a peça a ser ensaiada permitir, recomenda-se aplicar este tratamento superficial.

G) Ensaio de amplitude de modulação em função da abertura numérica da lente:

a) Procedimento do ensaio

Neste ensaio mediu-se a amplitude de modulação do mapa de speckle em função da abertura numérica da lente da câmera CCD. Foi realizado um ensaio amplitude de modulação para cada “*f stop*” da lente. A câmera, o interferômetro e o sistema de processamento de imagens permaneceram com os demais parâmetros fixos, segundo a Tabela 4.10.

b) Resultados

Ajuste de parâmetros do ensaio				
Iluminação	Intensidade média (nc 8 bits):	100		
	Nº de pontos saturados:	525		
	Relação de intensidade (%/%):	50	50	
	Diferença de caminho óptico (mm):	0		
Tipo de Superfície:		Branca pintado		
Lente	Comprimento focal (mm):	50		
	Abertura numérica:			
Janela	Linhas	176	368	
do	Colunas	80	270	
CCD	Pontos	36480		
	Student	1,960		
Amplitude de modulação x abertura numérica				
Abertura num. (f/)	Ampl. Modul. (nc 8 bits)	Desvio Padrão (nc 8 bits)	Faixa DM 95% (nc 8 bit)	
1,4	9,6	6,33	0	22,007
2	11	8,2	0	27,072
2,8	12	9,76	0	31,13
4	14	10,94	0	35,443
5,6	17,25	12,78	0	42,299
8	24,2	17,05	0	57,618
11	31,55	21,24	0	73,181
16	38,75	25,45	0	88,633

Tabela 4.10 Parâmetros e resultados do ensaio de amplitude de modulação em função da abertura numérica da lente da câmera CCD.

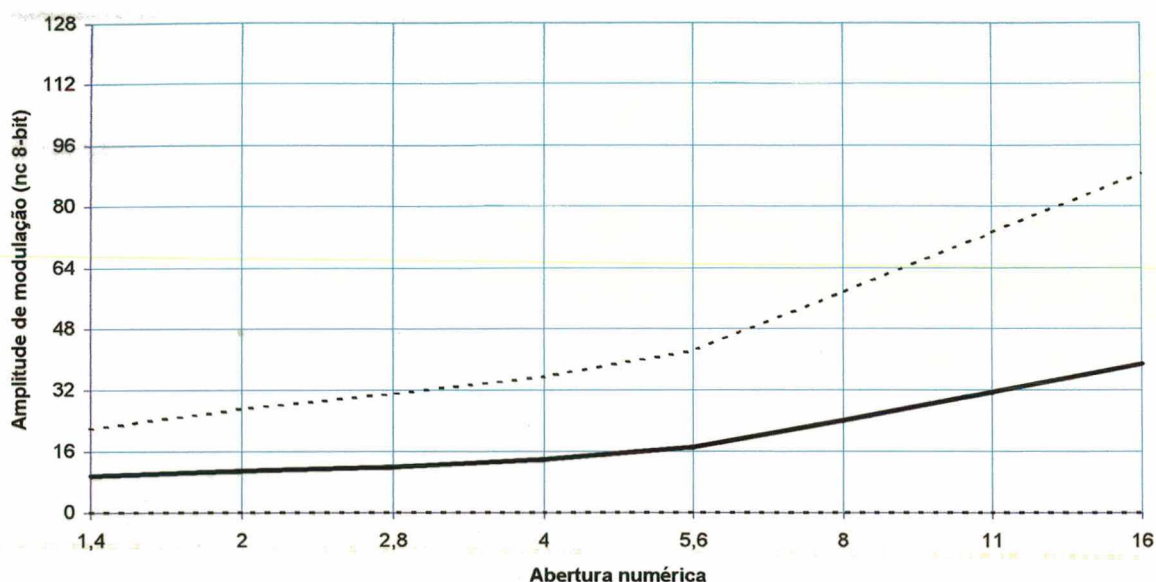


Figura 4.20 Amplitude de modulação em função da abertura numérica da lente da câmera CCD

Os resultados mostram um forte dependência da amplitude de modulação em função da abertura numérica. Isto se explica teoricamente porque o tamanho do speckle é menor que o tamanho do pixel do CCD, para esta câmera, mesmo com a abertura numérica de 1/16. Assim para as aberturas numéricas menores, vários speckles são digitalizados por um único pixel, e em função da aleatoriedade de fase entre estes, a amplitude de modulação do pixel acaba caindo em função do número de speckles concorrentes.

4.2 Ensaio de repetibilidade de chaveamento.

A) Sistema de medição padrão

Para estes ensaios foram empregados os componentes básicos do SINTHE, com o chaveador de fibras ópticas montado diretamente no LASER e utilizou-se um programa específico para medir fase e contraste.

B) Procedimento do ensaio

Neste ensaio foi montado um interferômetro de dupla iluminação horizontal sobre um anteparo com ajuste de guinamento, para que fossem geradas franjas portadoras, através de subtração ao vivo. Um programa de processamento do mapa de franjas extraia em tempo real a fase e o contraste das franjas e estes valores eram guardados no disco a intervalos regulares. Ao longo deste monitoramento de fase e contraste foram efetuados diversos chaveamentos e, em seguida, os arquivos gravados em disco foram processados.

C) Resultados

A Tabela 4.11 mostra os resultados dos ensaios onde o efeito foi mais pronunciado. O gráfico da Figura 4.21 mostra o comportamento da fase em um destes ensaios. Os valores da tabela são sempre a diferença de fase entre dois pontos adjacentes do gráfico: antes do chaveamento e após. Desta forma, pode-se fazer um processamento conjunto de todos os ensaios mostrados na Tabela 4.11. O resultado é apresentado na última coluna.

Do ponto de vista dos requisitos de projeto o sistema atende ao que foi solicitado, ou seja, repetibilidade de $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Do ponto de vista da medição de fase, isto significa 62° , é muito.

Este efeito era amenizado, no procedimento de utilização recomendado para o chaveador, usando a seguinte estratégia de chaveamento: a) começar o ensaio, tomando-se as imagens de referência usando as fibras da extremidade do chaveador; b) deixar chaveados os pares que vão sendo utilizados; c) quando se tomam as imagens finais, usava-se em ordem inversa os pares de iluminação, procedendo então o deschaveamento das fibras. Assim, era evitado o salto de fase entre a imagem de referência e imagem final, apesar do impacto do chaveamento dos módulos adjacentes causarem um ligeira diminuição no contraste das franjas, conforme esta mostrado no gráfico da Figura 4.22. Este procedimento também limita o número de combinações possíveis entre fibras, para formação dos pares de iluminação.

Chaveamento	Ensaio 1 (°)	Ensaio 2 (°)	Ensaio 3 (°)	Ensaio 4 (°)	Ensaio 5 (°)	Resultado
1	7	6	-15	2	-12	
2	9	26	-72	49	44	
3	-6	-3	25	48	6	
4	47	30	-12	-34	19	
5	-38	5	-79		-2	
6	8	-3	20		-4	
7	-8	59	-24		-6	
8	16	-9	-10		18	
9	-7	26	-36		72	
10	12	13	4		2	
11	51	-39	2		18	
12	-46	-3	2		-31	
13	11	12	-61		41	
14	4	19	-10		-35	
15	73	-3	15		80	
16	-22	47	-10		10	
17	-28	16	-40		-8	
18	-3	4	-10		22	
19		31	-5		9	
20		3	-5		15	
21		4	8		32	
22		23	17		-15	
23		-22			-19	
24					14	
25					36	
26					-46	
27					35	
Média (°)	4,4°	10,5°	-13,5°	16,3°	10,9°	4,1°
Desv. Pad.(°)	30,2°	21,4°	28,5°	40,0°	29,6°	29,3°
Repetib. (°)	68°	55°	73°	144°	72°	62°
Repetib. (µm)	0,120 µm	0,096 µm	0,128 µm	0,253 µm	0,126 µm	0,109 µm

Tabela 4.11 Ângulo de fase da imagem em função da repetibilidade do chaveamento.

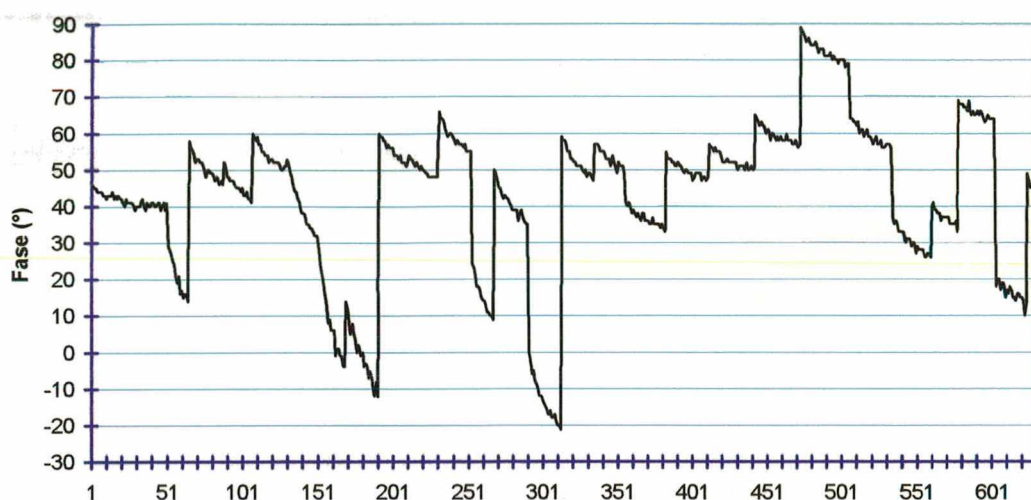


Figura 4.21 Estabilidade de fase com o chaveamento

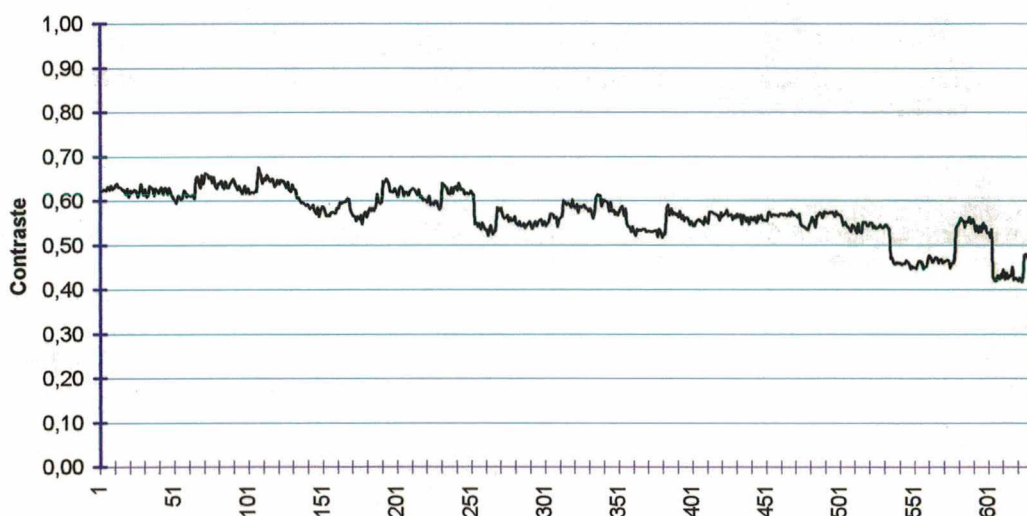


Figura 4.22 Estabilidade do contraste sob impactos de chaveamento

4.3 Ensaio de estabilidade de longo termo da OF (drift.)

A) Sistema de medição padrão

Para estes ensaios foram empregados os componentes básicos do SINTHE, e seu próprio software para o processamento e análise da estabilidade da atmosfera na região da bancada.

B) Procedimento do ensaio

Neste ensaio simplesmente observou-se um corpo fixo, com uma configuração de iluminação simples. Tomou-se um mapa de fase a cada 20 s. Em seguida, subtraiu-se cada mapa de fase da primeira imagem, gerando assim mapas da diferença de fase para a peça a cada 20 s. Idealmente esperava-se variações de fase nulas para todos os mapas de diferenças fase. Adicionalmente foram calculados $\Delta OF/\Delta x$ e $\Delta OF/\Delta y$ para avaliar se a influência da atmosfera deformava significativamente a frente de onda.

C) Resultados

Tempo (s)	OF	DM95%	DOF/Dx	DM95%	DOF/Dx	DM95%
20	0,20	0,012	0,0006	0,0055	0,0000	0,0040
40	0,14	0,017	0,0006	0,0050	0,0003	0,0041
60	0,07	0,016	0,0002	0,0044	-0,0007	0,0041
80	0,06	0,016	0,0008	0,0045	0,0000	0,0042
100	0,02	0,010	0,0003	0,0035	0,0000	0,0041
120	-0,05	0,012	0,0001	0,0036	0,0003	0,0035
140	0,05	0,010	0,0002	0,0038	0,0001	0,0040

Tabela 4.12 Resultados do ensaio de estabilidade da OF de longo termo

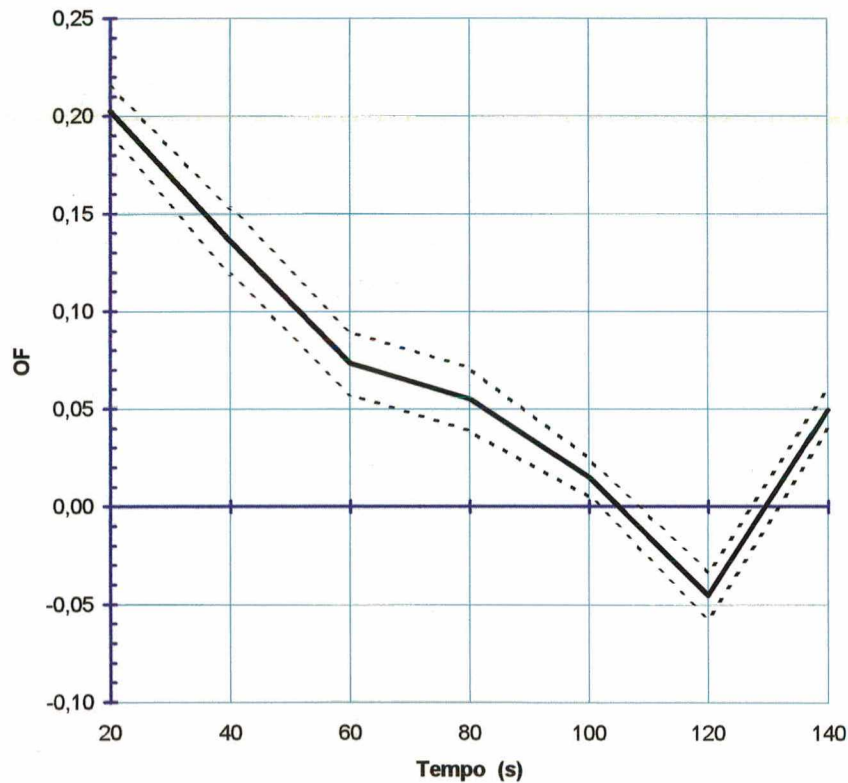


Figura 4.23 Resultados do ensaio de estabilidade da OF de longo termo

Os resultados mostram que a instabilidade atmosférica é significativa, chegando neste caso a $\lambda/4$, conforme o gráfico da Figura 4.23 e a Tabela 4.12. Este deslocamento paralelo da OF costuma ser chamado de “*drift*” térmico ou atmosférico.

Considerando uma variação atmosférica entre uma braço e outro do interferômetro igual a 10% da esperada absolutamente para a atmosfera, conforme está no item 3.1, e considerando que cada braço do interferômetro de simples iluminação percorre um trecho diferente de 1,5 m na atmosfera livre tem-se: $1,5 / 632,8 \times 10^{-9} * 0,1 \times 10^{-6}$, o que equivale a $0,24\lambda$. Este ensaio confirma a teoria e a estimativa de variação de 0,1 ppm no comprimento de onda entre braços do interferômetro ao longo de uma bancada óptica desprotegida. Mais promissores são os resultados da Figura 4.24, que mostram que não ocorre uma deformação significativa na forma de onda, por influência da atmosfera, permitindo assim que sejam usados algoritmos insensíveis ao “*drift*” [26].

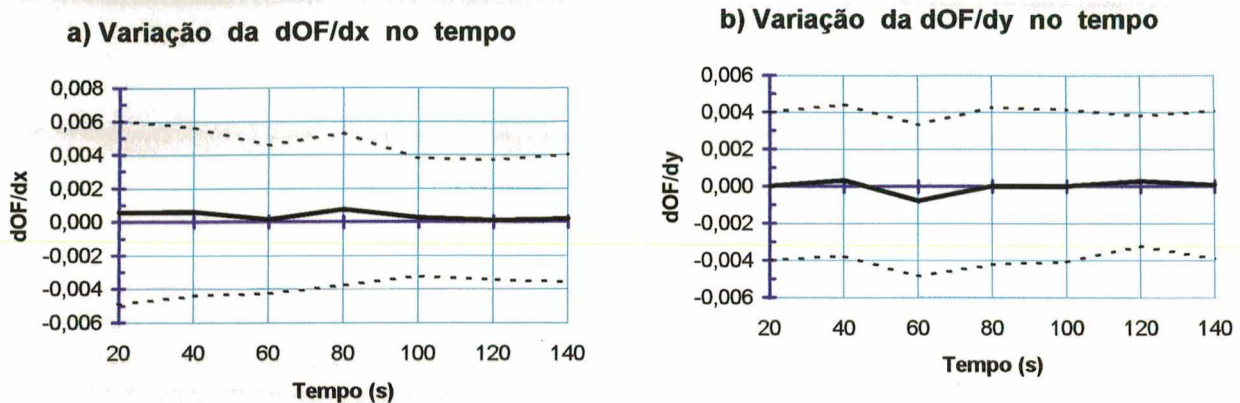


Figura 4.24 Estabilidade da derivada da ordem de franja em função do tempo.

4.4 Cálculo da incerteza de medição do sistema atual.

4.4.1 Incerteza total

O cálculo da incerteza total será apresentado primeiramente sem as influências do chaveamento e “drift” atmosférico, já que na maioria das vezes é possível realizar o chaveamento sem deschavear as fibras entre a imagem de referência e final. Vários recursos poderiam ser usados para minimizar a influência atmosférica.

Serão tomados os valores para a utilização típica do sistema SINTHE sem nenhuma otimização de parâmetros, mesmo as já ensaiadas neste capítulo. Assim:

- Diferença de caminho óptico de até 100 mm
- Centro do histograma em torno de 100 nc e sem permitir muitos pontos saturados
- PZT com o programa de posicionamento e metodologia de calibração originais
- Lente com abertura de $f_n = 8$.
- Superfície pintada de branco
- Câmera com AGC ligada
- Câmera com ABkL ligado

A) Sem os erros de chaveamento e “drift” térmico

Aqui será avaliada a incerteza de medição apenas em função da incerteza de medição de fase da estação.

a) Incerteza na OF

A partir dos resultados das calibrações tem-se:

- $\Delta x = 40$ nm
- $\Delta I = 12,0$ nc
- $A_m = 24,2$ nc

Aplicando-se estes valores na equação 3.99 obtém-se:

- $\Delta OF_x = 0,032$ (devido ao deslocamento de fase, calculado na Tabela 4.3)

- $\Delta OF_I = 0,112$ (devido a incerteza da câmera e baixa amplitude de modulação)
- $\Delta OF = 0,116$ ou $OF/8,6$

b) Deslocamentos

Utilizando uma bancada típica como a esquematizado no capítulo 2 figura 2.18, com todas as possíveis combinações de pares de iluminação (tabela 2.1), tem-se os seguintes coeficientes de eficiência:

- $\eta_x = 114,6 \%$
- $\eta_y = 201,4 \%$
- $\eta_z = 120,7 \%$

Utilizando as equações 3.29, determina-se a seguinte incerteza de medição média para os deslocamentos:

- $\Delta u = 32 \text{ nm}$
- $\Delta v = 18 \text{ nm}$
- $\Delta u = 30 \text{ nm}$

B) Com os erros de chaveamento e “drift” térmico

a) Incerteza na OF

Somando-se quadraticamente a incerteza anterior às incertezas devido ao chaveamento e ao “drift” térmico chega-se a seguinte incerteza para a ΔOF :

- $\Delta OF_c = 0,17$ (devido a repetibilidade no chaveamento de fibras)
- $\Delta OF_I = 0,25$ (devido a perturbação atmosférica)
- $\Delta OF = 0,32$ ou $OF/3,1$

b) Deslocamentos

- $\Delta u = 89 \text{ nm}$
- $\Delta v = 51 \text{ nm}$
- $\Delta u = 84 \text{ nm}$

4.4.2 Análise de importância.

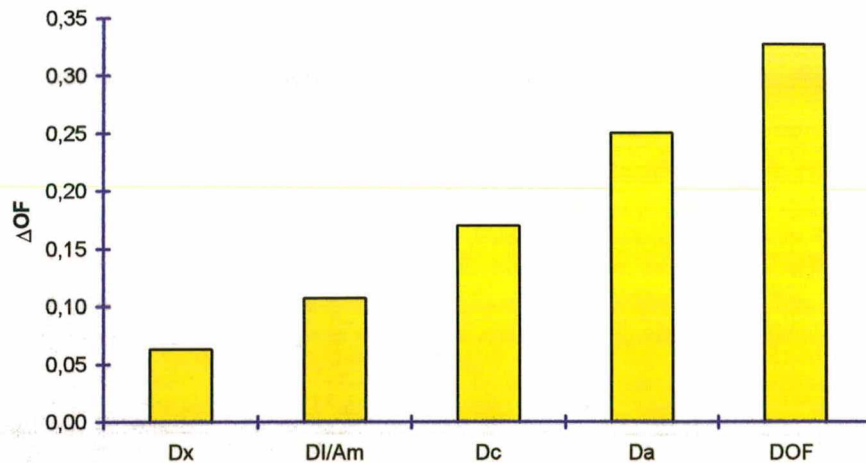


Figura 4.25 Análise de importância das componentes de erros

Onde:

- Dx ⇒ Erros devido ao deslocamento de fase
- DI/AM ⇒ Erros devido a relação entre a incerteza de medição (linearidade) da câmera CCD e a amplitude de modulação
- Dc ⇒ Erros devido a repetibilidade de chaveamento
- Da ⇒ Erros devido às influências atmosféricas
- DOF ⇒ Erro total somado quadraticamente

A Figura 4.25 nos mostra a ordem de importância das componentes de erro, trazendo em sua última coluna o somatório quadrático destas fontes. Os erros devido às condições ambientais e ao chaveamento são os mais importantes. Para estes erros já haviam cuidados e recomendações, inclusive no manual do SINTHE [13]. Erros que, no modelamento matemático já eram desprezáveis, nem foram levados em consideração nesta análise.

Mesmo sem considerar as influências externas (chaveamento e ambiente), o erro esperado para ΔOF era de 0,05 (OF/20), o valor típico encontrado foi de 0,116 (OF/8,6). Mesmo assim os resultados experimentais mostram que uma simples otimização de parâmetros pode fazer o desempenho do sistema superar OF/20.

5. Otimização do desempenho metrológico

Conforme o modelamento matemático do capítulo 3, confirmado pelos resultados experimentais do capítulo 4, a principal fonte de erro é a instabilidade atmosférica, seguida pela repetibilidade do chaveador de fibras ópticas. Estes erros podem ser minimizados pela utilização de algoritmos especiais [26]. Em seguida, por ordem de importância, vem a incerteza na medição da intensidade luminosa dos “speckles”, que é função da linearidade da medição de intensidade luminosa pela câmera e da amplitude de modulação. Por último, mas ainda significativa, é a incerteza de posicionamento do dispositivo piezoelétrico, usado na operação de deslocamento de fase. As demais fontes de erros estudadas neste trabalho se mostraram de segunda ordem, sendo portanto desprezáveis para incertezas de medição superiores a 5 nm.

Com a finalidade de minimizar os efeitos destas fontes de erros, as ações a serem tomadas foram divididas em três níveis: a) sugestões a nível de procedimentos, onde não é necessária a substituição de nenhum componente do hardware da estação; b) especificações de novos componentes, disponíveis no mercado, para atualização do hardware atual da estação; e, finalmente: c) o reprojeto do chaveador de fibras ópticas, buscado otimizar seu desempenho metrológico e funcional.

5.1 Otimização de parâmetros e recomendações para utilização dos componentes atuais da Estação Holográfica

5.1.1 Recomendações de calibração e utilização do PZT

Observando-se os resultados da calibração do dispositivo PZT, destacam-se as seguintes peculiaridades de seu comportamento metrológico: a) apresenta elevada histerese, que é a principal responsável pela incerteza de posicionamento do dispositivo; b) apresenta também uma elevada repetibilidade, tanto que, mesmo considerando uma dispersão de posicionamento para 95%, ainda assim as regiões de dispersão no posicionamento de ida e retorno não se interceptam; finalmente c) também em função da histerese, o dispositivo apresenta duas sensibilidades distintas, uma no começo no curso, de comprimento pequeno, e outra no restante do curso. Estas duas sensibilidades tem comportamento idêntico, tanto para valores crescentes quanto para decrescentes, compondo o paralelogramo da histerese. Considerando estes trechos em separado para a utilização, percebe-se que ambos tem excelente linearidade. O primeiro trecho de sensibilidade apresenta dispersão menor, porém este é insuficiente para a função de deslocamento de fase. Reprocessando os dados de calibração para posicionamento em um único sentido, no segundo trecho, obtém-se o resultado apresentado na Figura 5.1.

Com base nestes resultados, redefine-se a estratégia de posicionamento dos quatro passos no deslocamento de fase, para utilizar o posicionamento apenas num sentido, desprezando o primeiro trecho de sensibilidade. Assim, sempre que o próximo passo corresponder a deslocamentos inferiores ao atual, deve-se proceder um recuo suficientemente grande para eliminar a histerese e retornar ao segundo trecho de sensibilidade.

Com base nos resultados de calibração, para operar o PZT no segundo trecho de sensibilidade, deve-se utilizar o dispositivo, conforme o esquema da Figura 5.2, onde o ponto do passo 0° tem um deslocamento do zero de no mínimo 235 mV (300 nm), e quando se posiciona no retorno, para os passos dois e três (90° e 0° respectivamente), utiliza-se um recuo adicional de no mínimo 235 mV, a fim de eliminar a histerese e garantir o retorno ao segundo trecho de sensibilidade.

Desta maneira a incerteza de posicionamento do PZT, em função de seu erro de linearidade e dispersão de medição, cai de 40 nm (pico a pico) para 8,7 nm (RMS).

Linearidade do PZT no segundo trecho de sensibilidade

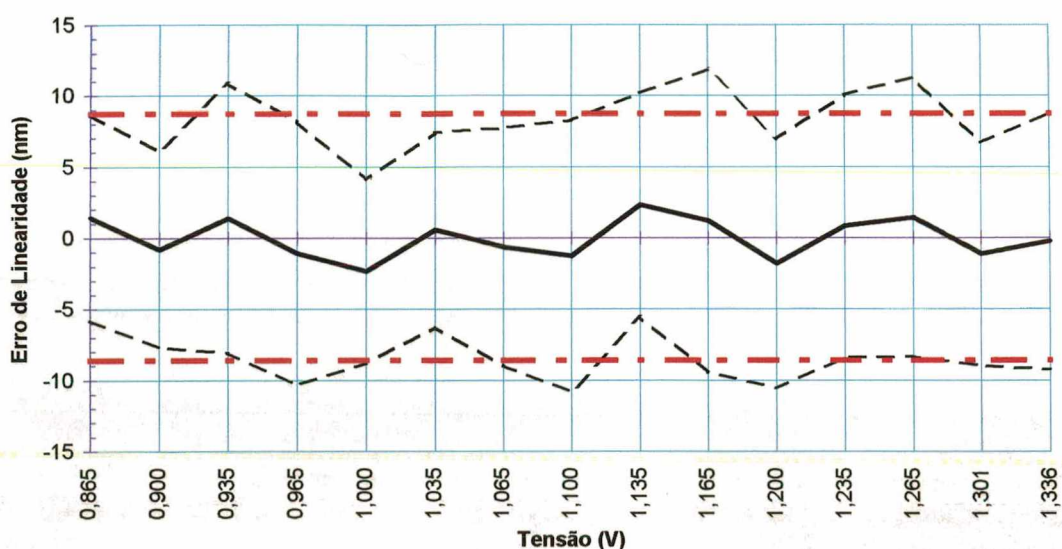


Figura 5.1 Resultado da calibração de posicionamento de ida do dispositivo de microposicionamento piezoelétrico no segundo trecho de sensibilidade.

Quanto à forma de calibração do dispositivo micro deslocador, para a determinação de sua incerteza de medição, deve ser empregada a infra-estrutura usada neste trabalho. Para ajuste da sensibilidade apenas, pode-se empregar a metodologia atual de autocalibração da Estação Holográfica, o que permite que a sensibilidade seja ajustada para as condições ambientais de emprego normal do sistema. O procedimento usual é o de se fazer modular uma região do campo de medição, em situação de imobilidade, através do deslocamento progressivo do dispositivo micro posicionador (superior a 10 ordens de franja), e, desta forma, calcular um período médio. Isto é válido devido à elevada linearidade (desprezando-se o primeiro trecho) do PZT, conforme pôde-se atestar em sua calibração. Este procedimento deve ser empregado levando em conta as seguintes considerações:

- Deve-se esperar uma condição de acomodação das fibras ópticas, para se ter melhor estabilidade do sinal interferométrico ao longo do ensaio.
- Deve-se empregar o par de iluminação de maior sensibilidade.
- Deve-se empregar, sempre que possível, um interferômetro de iluminação simples, devido à melhor coerência espacial, o que possibilita maiores ordens de franja com boa amplitude de modulação.
- Deve-se descartar o primeiro período de modulação em função deste poder apresentar sensibilidade diferente.
- Sugere-se o processamento através de algoritmo FFT. Este procedimento permite a perfeita identificação do período de modulação, separando influências devido ao "drift" atmosférico, que são de muito mais baixa frequência e não constantes.

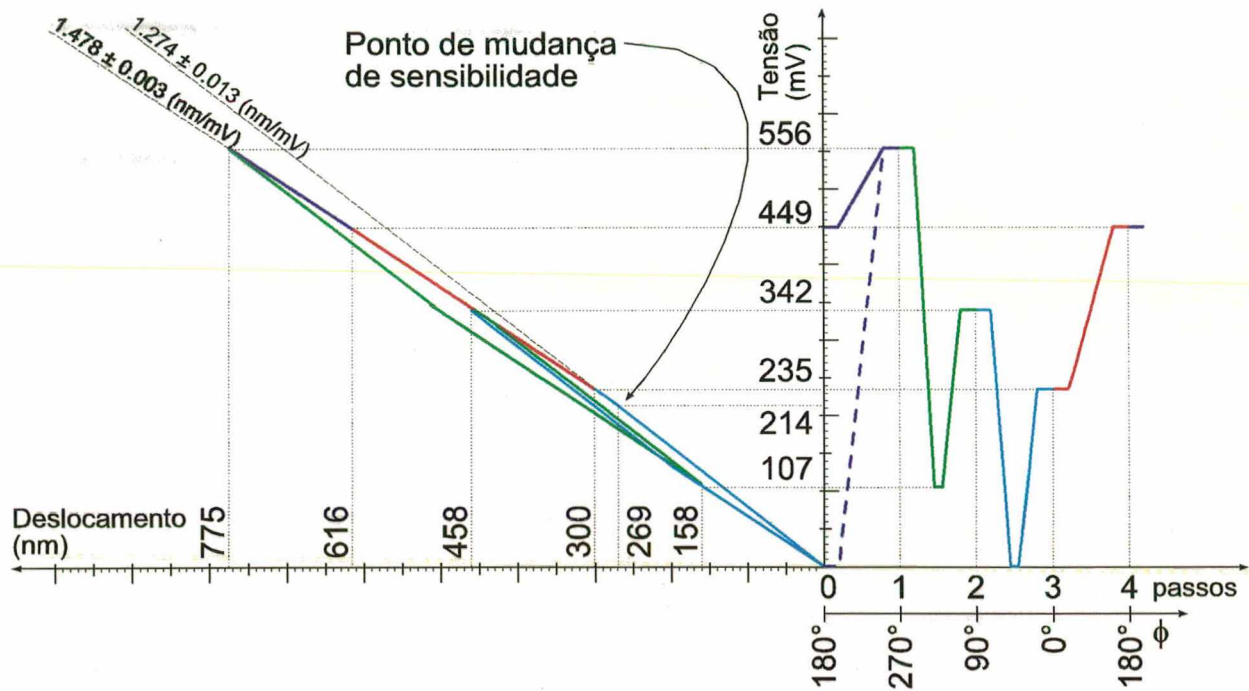


Figura 5.2 Estratégia de posicionamento com dispositivo atuador piezoelétrico, a fim de evitar histerese

5.1.2 Recomendações de utilização da câmera CCD

A) Ajustes eletrônicos da Câmera CCD

Conforme os resultados da calibração da linearidade da câmera CCD, no item 4.1.2 do capítulo 4, os ajustes de ganho automático (ACG) e ajuste automático no nível de sinal para escuro (ABkL), interferem negativamente na linearidade da câmera, assim devem ser mantidos desligados. Estes ajustes devem ser realizados manualmente conforme as seguintes recomendações:

- O ajuste de ganho da câmera deve ser mantido no máximo. Este ajuste no máximo ganho piora um pouco a relação sinal ruído, porém a amplitude de modulação é favorecida mais significativamente. Isto porque a abertura numérica da lente deve ser a menor possível, requerendo portanto sensibilidade elevada da câmera.
- Deve ser ajustado manualmente o nível escuro da câmera, através do potenciômetro específico, com a lente fechada, observando-se o valor medido pelo sistema de processamento de imagem, até que este seja igual a zero, para todo o campo útil do CCD.

Com estes ajustes a incerteza de medição da câmera, em função de sua linearidade ponderada em 50% da sua faixa dinâmica, cai de 4,7% (12 níveis de cinza 8 bits) para 1,1% (2,8 níveis de cinza 8 bits)

B) Ajustes da lente da Câmera CCD

O modelamento matemático no capítulo 3, confirmado pelos experimento de avaliação da amplitude de modulação (capítulo 4), mostraram que a abertura numérica ideal da câmera não está disponível nas lentes comerciais. Estas possuem f_n com paradas definidas até no máximo 32, para a faixa de comprimento focal normalmente empregada. A intensidade de luz disponível no LASER HeNe, normalmente empregado, não é suficiente para estas aberturas. Assim, na prática tem-se que conviver com o fenômeno de sub-amostragem espacial ("Aliasing") do "speckle", que causa atenuação na amplitude de modulação.

Idealmente deve-se utilizar o mínimo que a lente possibilita (para a grande maioria dos casos onde a ampliação da lente é em torno de $0,1x$), entretanto se recomenda utilizar f_n não menos que 11.

5.1.3 Recomendações de montagem da bancada

A) Expansão do feixe na entrada da fibra

O feixe do LASER deve ser expandido para ser igual ao diâmetro na entrada da fibra de iluminação. Assim se consegue uma homogeneidade luminosa melhor no campo de medição e um padrão de “speckle” semelhante para as diversas fibras. Desta maneira se otimiza a homogeneidade da iluminação

A partir da resolução espacial do CCD, determina-se o diâmetro mínimo necessário para a fibra de iluminação, conforme a equação 3.71. Deve-se então posicionar o ponto iluminador o mais próximo possível, dependendo das características da peça a ser medida, de forma a concentrar todo o feixe de iluminação útil proporcionado pela fibra no campo de medição. Otimizando assim a intensidade e a homogeneidade da iluminação.

Por outro lado, em função da fonte luminosa ser não pontual, conforme a distância da fonte luminosa diminui, os efeitos da coerência espacial se intensificam, atenuando a amplitude de modulação com o aumento da ordem de franja. Assim deve-se atentar para a limitação da ordem de franja máxima aproveitável, em função do tipo de iluminação (simples ou dupla) e do módulo do vetor sensibilidade Item 3.3.1,B),c) do Capítulo 3.

B) Tamanho do volume de medição em função comprimento de coerência do LASER

Em função de limitações do comprimento de coerência temporal, pode-se definir um volume máximo de medição. Este volume pode ser estimado tomando-se como parâmetro a diagonal principal de um paralelepípedo hipotético, que envolve todo o campo de medição. Caso o campo de medição seja plano, o paralelepípedo se torna um retângulo, mas a diagonal principal continua sendo o parâmetro de definição. Esta diagonal principal é definida pelo dobro do comprimento de coerência útil, que é a metade do comprimento de coerência teórico. Assim, qualquer que seja a forma do campo de medição, este deve estar contido dentro de um paralelepípedo cuja diagonal principal seja igual ao comprimento de coerência do LASER empregado. O comprimento de coerência do LASER de cavidade passiva, como o HeNe, pode ser calculado pela equação 3.82. Este tipo de LASER, por razões construtivas, pode ter um comprimento de coerência de no máximo 630 mm. Quando é necessário um volume de medição maior, pode-se empregar tipos de LASER com modo freqüencial ativamente estabilizado, sendo assim o comprimento de coerência é definido pela equação 3.81. Como exemplos deste tipo de LASER, tem-se os Ar Ion, com cavidade estabilizada por um dispositivo selecionador de modos chamado “Étalon” e o LASER diodo eletronicamente estabilizado com cavidade externa. Com estes artifícios é normal se ter comprimentos de coerência temporais de até 50 m.

C) Quantidade e posicionamento dos pares de iluminação.

Na medição 3D devem ser usados pelo menos três vetores de sensibilidade, linearmente independentes. Isto já é conseguido com três pontos de iluminação para a peça e um de referência, combinando-se iluminação simples e dupla. Porém, com estes pontos apenas, não se consegue uma configuração ótima para os vetores de sensibilidade principais, que, idealmente, deveriam ser aproximadamente colineares com os eixos de coordenadas. Com a finalidade de se conseguir pelo menos um vetor de sensibilidade com módulo máximo e alinhado com cada eixo do sistema de coordenadas empregado, são necessários pelo menos cinco pontos de iluminação para a peça e um ponto de iluminação de referência. Assim dois pares de iluminação dupla são dispostos em cruz a fim de se ter vetores de sensibilidade ortogonais paralelos ao plano do campo de medição. O quinto ponto de iluminação é posicionado o mais ortogonal possível a

peça, compondo com o ponto observador um sistema de simples iluminação, para que seu vetor de sensibilidade seja o mais ortogonal possível aos demais vetores principais. Pontos adicionais de iluminação podem ser acrescentados para que, através do sistema de equações redundantes resultante, se tenha uma melhoria estatística dos resultados.

Também deve-se procurar dispor os pares de iluminação dupla com o máximo ângulo possível entre si, a fim de se otimizar o módulo dos vetores de sensibilidade. Isto é muito importante, pois a iluminação dupla é muito mais afetada por erros de posicionamento dos pontos de iluminação e pela coerência espacial (fonte não pontual) do interferômetro. No caso da iluminação simples, deve-se procurar iluminação o mais ortogonal possível ao campo de iluminação, mas não há grandes preocupações, uma vez que os módulos dos vetores de sensibilidade são sempre bons, em geral próximos de dois (máximo). É muito difícil se ter um vetor sensibilidade, com módulo menor que um, na iluminação simples e impossível se ter sensibilidade zero. Já na iluminação dupla é impossível se ter vetor sensibilidade com módulo igual a dois (máximo) e muito difícil de se ter módulo superior a 1,5.

Um aspecto muito importante é a equiparação dos caminhos ópticos. Na hipótese de se usar fibras ópticas de iluminação de mesmo comprimento, e as distâncias do divisor de feixe às entradas das fibras serem iguais, resta apenas posicionar os pontos de iluminação equidistantes do campo de medição. Uma consideração importante é posicionar todos os pontos de iluminação a uma mesma distância, a fim de ser possível a combinação de qualquer dos pontos de iluminação dois a dois na formação dos pares de iluminação. A fim de se estimar o volume de medição, as diferenças de caminho óptico devem ser subtraídas do comprimento de coerência temporal do LASER na estimativa da diagonal principal do paralelepípedo.

Na montagem da bancada também deve ser levado em consideração o máximo aproveitamento da intensidade luminosa. Os fachos luminosos devem ser empregados de forma mais concentrada possível, procurando-se iluminar apenas a área do campo de medição, mas preservando a homogeneidade da intensidade luminosa.

5.1.4 Recomendações de preparo da superfície do campo de medição

A superfície de medição deve ser preparada de forma a se otimizar a sua emissividade difusa, procurando um máximo aproveitamento da intensidade luminosa incidente. Assim, a textura ideal para a superfície é a fosca. Quanto a cor, o ideal é uma que apresente boa emissividade ao comprimento de onda empregado. Assim, para o HeNe, uma superfície vermelha é tão boa quanto a branca, porém, como também é necessária uma boa visualização da superfície com luz branca, a cor branca é universal e portanto ideal. Poderia se pensar no prateado ou alumínio fosco para a superfície, porém estas cores metálicas tem uma parcela razoável de reflexão especular, o que diminui o aproveitamento da luz incidente. Assim, sempre que for possível, deve-se pintar o corpo de prova com uma fina camada de tinta branca fosca.

Quanto a rugosidade da superfície, esta deve ser tão baixa quanto necessário para que as sombras geradas na iluminação dupla sejam bem menores que a parcela do campo de medição correspondente a um pixel. Deste ponto de vista, qualquer superfície lixada, ou usinada lisa já tem rugosidade suficientemente baixa, para a holografia eletrônica. Quanto a superfícies espelhadas, a consideração é a mesma quanto ao aproveitamento da emissividade difusa, ou seja, precisam de uma camada difusora, que possa ser removida a fim de que o ensaio seja não destrutivo.

5.1.5 Recomendações sobre os procedimentos de processamento

São apresentadas aqui algumas sugestões de procedimentos de operação do software SINTHE, e também de rotinas acrescentáveis a estes que não dependem de alteração do hardware.

A) Utilização do máximo possível de combinações de pares de iluminação

Com os mínimos pontos de iluminação sugeridos no item 5.1.3 consegue-se, além dos três vetores de sensibilidade principais, uma combinação de mais dois vetores de sensibilidade com a iluminação simples e mais um vetor de sensibilidade com a iluminação dupla. Se for considerada a montagem que envolve os cinco pontos de iluminação da peça e um de referência, sugerido também naquele item, é possível obter um total de quinze combinação de vetores de sensibilidade distintos. Assim consegue-se coeficientes de eficiência de medição superiores a 100%, conforme demonstrado no capítulo 3 para este mesmo exemplo. Levando em consideração que o chaveador possibilita qualquer combinação de pares de iluminação entre suas 10 fibras, poderia se ter até 45 vetores de sensibilidade.

Em função da relação sinal ruído, inerente à técnica de holografia eletrônica, e das limitações na otimização da incerteza de medição da ordem de franja, discutidas neste trabalho, é desejável o aproveitamento de um grande número de combinações de vetores de sensibilidade. O uso de um chaveador automatizado não eleva consideravelmente o tempo de aquisição. Com atual capacidade dos recursos computacionais disponíveis, o tempo de processamento e o volume de memória necessários não são proibitivos.

B) Informação de um mapa de amplitude de modulação durante a etapa de otimização da montagem e ajustes de parâmetros

Como a amplitude de modulação pode ser calculada com os recursos da Estação Holográfica, é interessante, durante a etapa de otimização da montagem, que seja indicado um histograma da amplitude de modulação, assim como já é indicado o histograma de iluminação e o os coeficientes de eficiência de medição. Com esta informação pode-se otimizar os parâmetros que afetam a amplitude de modulação. Uma outra informação interessante é apresentar um mapa de amplitude de modulação, com graduação colorida sobre a imagem, para que se possa ter noção da incerteza de medição por região do campo de medição, permitindo se otimizar a amplitude de modulação para a região de maior interesse.

C) Informação das Incertezas de medição

Com informações a partir da calibração da câmera e do PZT, com os coeficientes de eficiência de medição, em função da geometria da montagem, e com o cálculo da amplitude de modulação, pode se determinar a incerteza de medição de uma dada montagem. Esta informação também pode ser indicada como um valor médio ou como um mapa sobre o campo de medição.

D) Determinação da ordem de franja absoluta pelo algoritmo de Stetson.

Os principais erros do Sistema de Medição Estação Holográfica são, o “*drift*” atmosférico e em seguida a repetibilidade do chaveador. Também a maior dificuldade operacional do sistema é a determinação da ordem de franja absoluta. Com a aplicação do algoritmo de determinação da ordem de franja absoluta [26] resolve-se simultaneamente estes problemas. Este algoritmo baseia-se na variação do vetor de sensibilidade ao longo do campo de medição, e na redundância dos vetores de sensibilidade, para obter uma parcela aditiva constante para todo o campo de medição em cada mapa de fase. A viabilidade deste procedimento foi evidenciada experimentalmente na avaliação do “*drift*” atmosférico, no capítulo 4, onde foi observado uma variação praticamente nula das derivadas da ordem de franja, ao longo do período em que se acompanhou um “*drift*” atmosférico considerável.

5.1.6 Efeitos da otimização destes parâmetros

Com estas recomendações, são eliminados os erros devido ao “*drift*” atmosférico e devida a repetibilidade de chaveamento de fibras. São minimizadas as incertezas de medição da câmera e do dispositivo de

deslocamento de fase piezoelétrico e é maximizada a amplitude de modulação, conseguindo-se desta forma os seguintes parâmetros para o cálculo da incerteza de medição pela equação 3.99:

a) Incerteza na OF

A partir dos resultados das experimentais temos:

- $\Delta x = 8,7 \text{ nm}$
- $\Delta I = 2,8 \text{ nc}$
- $A_m = 42 \text{ nc}$

Aplicando-se estes valores na equação 3.99 obtém-se:

- $\Delta OF_x = 0,014$
- $\Delta OF_I = 0,015$
- $\Delta OF = 0.0203$ ou $OF/49.3$

b) Deslocamentos

Utilizando uma bancada típica como a esquematizado no capítulo 2, figura 2.19, com todas as possíveis combinações de pares de iluminação (tabela 2.1), tem-se os seguintes coeficientes de eficiência:

- $\eta_x = 114.6 \%$
- $\eta_y = 201.4 \%$
- $\eta_z = 120.7 \%$

Utilizando as equações 3.29, determina-se a seguinte incerteza de medição média para os deslocamentos:

- $\Delta u = 5.6 \text{ nm}$
- $\Delta v = 3.2 \text{ nm}$
- $\Delta w = 5.3 \text{ nm}$

5.2 Especificação de novos componentes

O Sistema de Medição Estação Holográfica baseia-se fortemente em recursos avançados de informática e opto eletrônica. Desde que o seu projeto original foi formulado em 1987, houveram muitas evoluções nestas áreas tecnológicas. Como a especificação dos atuais componentes do sistema é de 1991, já é tempo de se rever a especificação destes componentes que sofreram evoluções, com melhoria de desempenho e redução de custo. Além disso ocorreu neste período o amadurecimento de novas tecnologias e o surgimento de novas tendências, principalmente em informática.

5.2.1 Novo conversor D/A para controle do dispositivo piezo-elétrico

Com a otimização no emprego do micro deslocador piezoelétrico, a resolução do D/A que controla o dispositivo, passou a ser insuficiente, requerendo, ou uma limitação da faixa, empregando o D/A de 12 bits para uma faixa de apenas 1 V, ou então a utilização de um D/A de 16 bits em toda a faixa de deslocamento do PZT. Como a opção de se restringir a faixa de utilização do sistema inviabiliza o procedimento de auto-calibração da sensibilidade pelo sistema, a melhor opção é a utilização do D/A de 16 bits. O fabricante do sistema de micro posicionamento, empregado na Estação Holográfica, oferece a opção de uma interface

digital, no padrão RS-232 ou IEEE 488, com resolução de 16 bits. Esta opção já integrada no gabinete do controlador do sistema, comunicando-se no padrão RS-232, interface também disponível no computador da estação, é a escolha lógica para atualização deste sistema.

Considerando como incerteza de posicionamento, devido a limitação de resolução do D/A, a metade do último bit significativo, tem-se para uma faixa de 15 μm e 12 bits, uma incerteza de posicionamento do PZT de 1,83 nm. Para um D/A de 16 bits este erro cairia para desprezáveis 0,11 nm. Considerando que este erro é proporcional, na hipótese de otimizá-lo, poderia ser estimada a melhoria na incerteza de posicionamento como a simples subtração desta parcela otimizada. Desta maneira, a incerteza de posicionamento do PZT, em função de seu erro de linearidade e dispersão, diminui de 8,7 nm (RMS) para 7,0 nm (RMS).

5.2.2 Nova Câmera CCD

A) Características do CCD

a) Relação sinal ruído

Para a aplicação em holografia, a resolução na medição de intensidade luminosa é um fator importante. A digitalização da intensidade luminosa em até 12 bits é viável em câmeras com interface digital, porém a relação sinal ruído intrínseca ao CCD deve ser de 72 dB.

b) Tamanho e aspecto dos píxeis

Como para a Estação Holográfica devem ser satisfeitos tanto requisitos relacionados à sensibilidade luminosa e resolução espacial, o tamanho do CCD não é muito crítico. Um "pixel" de maior área, portanto mais sensível, requer uma abertura numérica também maior, atenuando o sinal luminoso projetado no CCD. O fator mais importante acaba sendo a forma do "pixel", já que a abertura da íris da lente é aproximadamente circular. O melhor aproveitamento da área em relação a amostragem dos "speckles" é para "píxeis" com aspecto de forma quadrado.

c) Número de elementos ativos do CCD

O número de elementos ativos do CCD é definido em função dos números de linhas e colunas de "píxeis" que o compõem. O usual são os CCD no padrão RS-170, com linhas de 500 a 800 "píxeis" e 480 linhas, em países com rede de alimentação de 60 Hz ou no padrão CCIR, com aproximadamente o mesmo número de "píxeis" por linhas e 525 linhas para países com rede de alimentação em 50 Hz. Estes CCD apresentam um aspecto de forma de aproximadamente 2/3 e são os mais comuns em função de sua larga utilização em televisão, sendo conseqüentemente de baixo custo. Para aplicações científicas, entretanto, é mais adequado que estes tenham um número de linhas e colunas em número de potência de 2 (256, 512, 1024, ...), a fim de facilitar o processamento, reduzindo-se assim os erros devido a truncamento e sub-amostragem espacial.

O tamanho ideal para a aplicação em holografia é o CCD de 512x512, que permite uma digitalização de padrões de "speckle" com até 50 franjas no campo de visão. Um CCD de maior resolução, com por exemplo 1024x1024, não possibilitaria um maior número de franjas na imagem, em função da coerência espacial versus a homogeneidade de iluminação limitarem o número de franjas em torno dos mesmos 50. Estas limitações são solucionáveis através de iluminação pontual, com o emprego de filtros espaciais, porém, a perda da praticidade da iluminação por fibras ópticas torna esta aplicação restrita a poucos casos especiais. Esta câmera consome também quatro vezes mais memória e tempo de processamento, além de ter um custo ainda proibitivo.

d) Tecnologias alternativas

Uma tecnologia alternativa ao CCD, é o CID (Charge Injection Device), onde a carga associada a cada "pixel" é transferida para uma camada capacitiva interior da pastilha de silício, em vez de ser transferida de "pixel" para "pixel", linha à linha, até uma região escura onde a carga é transferida seriada e sincronizadamente como sinal de vídeo. Desta forma, é possível minimizar os efeitos de "blur" e "blooming" do CCD, que são ofuscamentos em função de sobrecarga luminosa de uma dada região da imagem que interfere sobre toda uma coluna e em pixels vizinhos. Esta imunidade à ofuscamento é útil em peças não planas que apresentem pontos isolados muito luminosos.

B) Opção analógica

É a forma mais usual e barata de se transferir sinais de vídeo. Para os CCDs fora dos padrões de vídeo, existe a opção de transferência analógica sincronizada não entrelaçada, suportado por muitos sistemas de processamento de imagens, para os recursos de "slow scan", onde pode-se programar a taxa de aquisição e o sincronismo através de sinais adicionais fornecidos pelos sistemas.

Para a aplicação em holografia é interessante que a relação sinal ruído seja próxima de 60 dB, que possibilita a digitalização do sinal em 10 bits.

C) A opção digital

Desta forma o sinal deixa de ser portado em uma interface analógica padronizada, passando para interfaces ainda não padronizadas. Um aspecto positivo desta tecnologia é a elevada taxa de transferência. O interfaceamento digital da câmera traz evidentes vantagens na relação sinal ruído, porém como a escala de utilização destas câmeras ainda são muito restritas, seu custo ainda é muito elevado. Do ponto de vista metrológico o maior custo da interface digital só é compensado se a câmera digital tiver uma resolução de 12 bits, com uma linearidade à intensidade luminosa compatível.

5.2.3 Novo Sistema de Processamento de Imagens

A alteração mais significativa a nível de componente da estação, é sem dúvida o sistema de processamento de imagens, que deixa de empregar sistemas baseados em processadores específicos, como unidades lógicas aritméticas específicas e processadores de ponto flutuante baseados em DSP. As funções de hardware do novo sistema adotado se restringem à aquisição e visualização de imagens, deixando todas as tarefas de processamento para o processador do computador hospedeiro. Isto se torna possível, para esta aplicação, devido a evolução não só em termos de velocidade no processador do PC, mas principalmente devido à evolução do barramento de periféricos do PC, que possibilita a transferência em tempo real de imagens. Isto traz vantagens significativas no custo do sistema, já que o custo das placas de processamento de imagens foram reduzidos de US\$ 12.000,00 para US\$ 2.000,00, além destas já acumularem a função de placa gráfica do sistema, dispensando inclusive o dispendioso monitor de TV profissional. Tecnicamente o desempenho do sistema é superior, pois em termos de velocidade de processamento o sistema é equivalente e suficiente para a aplicação à que se destina, e ainda apresenta as seguintes vantagens técnicas: a) maior flexibilidade de interfaceamento com câmeras com diversos padrões de comunicação; b) maior resolução de digitalização, c) barramento de 16 bits, e d) capacidade ilimitada de expansão de memória que é feita a baixo custo no PC.

A) Capacidade de interface de câmeras

O sistema adotado é capaz de capturar imagens de câmeras de qualquer formato até a resolução de 1024x1024, nos seguintes padrões de interfaces:

Analógicos

- RS-170
- CCIR
- Analógico sincronizado, não entrelaçado
- “Slow-scan”

Digitais

- Barramento TTL
- Barramento diferencial no padrão RS-422

B) Ajustes analógicos do sinal

O sistema dispõe de ajuste programável de ganho e off-set, na aquisição analógica, para que se otimize a faixa dinâmica do A/D, sem necessidade de ajustes ópticos, já empregados na otimização da amplitude de modulação, nem necessidade de ajustes manuais na câmera.

C) Digitalização

O sistema é capaz de digitalizar sinais analógicos com até 10 bits de resolução, e deve ser capaz de aceitar sinais digitais com até 12 bits de resolução. Isto permite que se tenha uma ampla faixa de variação no nível DC do modulação dos “speckles”, com uma pequena parcela de speckles modulando na saturação, ainda mantendo uma boa significância para a faixa de modulação destes “speckles”. Este recurso permite que se obtenha bons resultados em peças não planas, com dupla iluminação, onde é muito difícil de se equalizar a intensidade dos braços do interferômetro ao longo de todo o campo de medição.

D) Tamanho e quantidades dos páginas de imagem

O sistema permite operações e transferências de quadros com até 16 bits de largura de palavra, permitindo que no processo de aquisição sejam adquiridas várias imagens, somando-as em vez de se fazer uma falsa média. Isto também favorece a significância da faixa de amplitude de modulação além de eliminar ruídos de frequência elevada.

E) Interface ao computador

O sistema atual tem interface no padrão ISA, com 16 bits de dados e 24 bits de endereçamento. Este antigo sistema, além de não ter capacidade de transferência de imagens em tempo real, apresenta a séria limitação devida a sua arquitetura de memória empregada. Utiliza o endereçamento de memória do PC, que, limitado pelo endereçamento do barramento, faz com que seja impossível para o PC hospedeiro ter mais do que 8 MB de memória própria, inviabilizando sua utilização com os atuais sistemas operacionais, tornando o sistema limitado ao ambiente MS-DOS, já obsoleto e inaceitável para um sistema hoje em desenvolvimento.

Com o lançamento de sua quinta geração de processadores, a Intel especificou um novo barramento computacional, independente de arquitetura de processador e de alta performance, denominado PCI. Este barramento não apresenta limitações de endereçamento de memória, já que a especificação contempla conectores de 32 e 64 bits. O usual atualmente é o barramento de 32 bits, que tem uma taxa de transferência de até 133 MB/s, atendendo plenamente ao requisito de capacidade de transferência para processamento de imagens.

A arquitetura da nova placa de processamento, por acumular a função de placa gráfica do computador, permite que seja apresentado o sinal de vídeo em tempo real da câmera, sem congestionar o barramento.

5.2.4 Efeitos esperados em função destes novos componentes

Com a substituição destes componentes, são possíveis melhorias na incerteza de posicionamento do PZT e na amplitude de modulação. Esta última não ficaria mais limitada ao máximo de 25%, da faixa dinâmica do A/D, em função do truncamento após a operação de subtração (LUT result 9 bit para 8 bit), necessário no antigo sistema limitado a oito bits. Assim seria razoável supor como viável uma modulação média de até 25% da faixa dinâmica do A/D, em função de todas as recomendações quanto a otimização deste parâmetro. Quanto a incerteza da câmera, nenhum dado de fabricante especifica o erro de linearidade, mas em função da melhora na relação sinal ruído pode-se supor melhorias, com uma incerteza provável inferior à 1%.

a) Incerteza na OF

A partir de estimativas do comportamento metrológico tem-se:

- $\Delta x = 7,0 \text{ nm}$
- $\Delta I = 1\%$
- $A_m = 25\%$

Aplicando-se estes valores na equação 3.99 obtém-se:

- $\Delta OF_x = 0,011$
- $\Delta OF_I = 0,009$
- $\Delta OF = 0.0142$ ou $OF/70.3$

b) Deslocamentos

Utilizando uma bancada típica como a esquematizado no capítulo II figura 2.19, com todas as possíveis combinações de pares de iluminação (tabela 2.1), tem-se os seguintes coeficientes de eficiência:

- $\eta_x = 114.6 \%$
- $\eta_y = 201.4 \%$
- $\eta_z = 120.7 \%$

Utilizando as equações 3.29, determina-se a seguinte incerteza de medição média para os deslocamentos:

- $\Delta u = 3.9 \text{ nm}$
- $\Delta v = 2.2 \text{ nm}$
- $\Delta u = 3.7 \text{ nm}$

5.3 Projeto básico de um novo chaveador de fibras ópticas.

5.3.1 Nova concepção de chaveamento

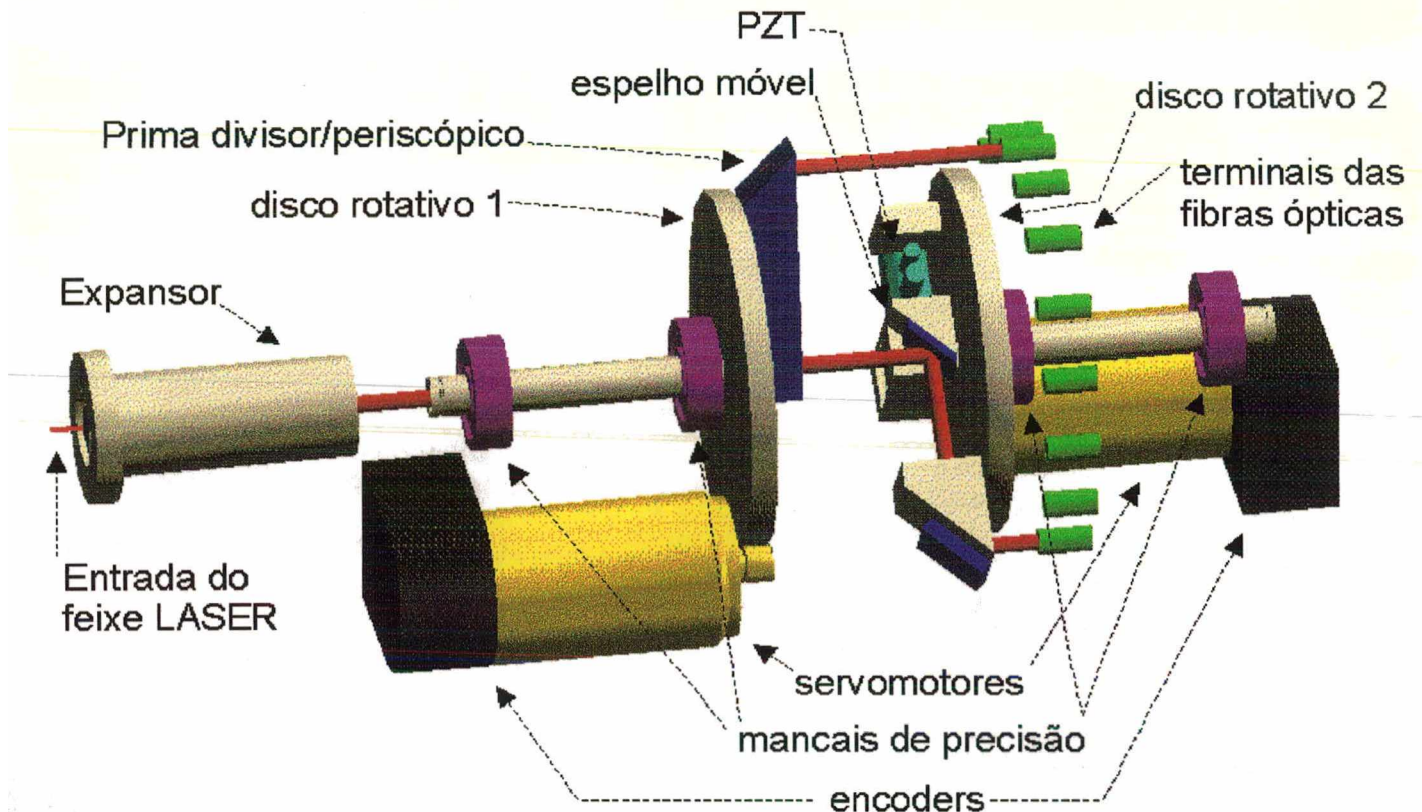


Figura 5.3 Concepção do novo chaveador de fibras ópticas

A Figura 5.3 mostra uma nova concepção para o chaveador de fibras ópticas. Nesta concepção, também é possível a combinação entre qualquer par de fibras ópticas através de dois discos rotativos que suportam pares de espelhos em situação periscópica, funcionando assim como os dois ponteiros de um relógio.

Os pares de espelhos que compõem um periscópio sobre cada um dos discos, têm a importante característica óptica de serem invariantes quanto ao comprimento do caminho óptico: Deslocamentos paralelos em x , y e z e o deslocamento angular i (rotação em torno do eixo do disco), não alteram o comprimento do caminho óptico. Logo, a precisão de posicionamento angular é definida apenas pela granulometria da fibra óptica de iluminação, bastando um quinto do diâmetro das fibrilas que compõem o "bundle". Para o caso das fibras utilizadas no SINTHE, que tem $100\ \mu\text{m}$ de diâmetro, a repetibilidade de posicionamento rotativo (angular) deve ser de $20\ \mu\text{m}/(\text{raio da circunferência das fibras})$. Quanto aos graus de liberdade angular j e k (perpendiculares ao eixo dos discos), não contemplados pela invariância angular dos periscópios, a sua influência é de segunda ordem (função cosseno) e ainda pode ser minimizada pelas seguintes ações: a) utilização de mancais de rolamento de elevada precisão (P5 ou P4), que apresentam baixo erro de batimento radial; b) montagem dos rolamentos sob interferência externa a fim de eliminar folgas radiais e pressionados um contra o outro, por conjuntos de molas prato, a fim de eliminar folgas axiais; c) posicionamento distanciado do par de mancais a fim de minimizar o erro angular do eixo causado pelos batimentos dos rolamentos; d) ajuste de montagem do ângulo de referência entre os rolamentos de forma a casar os erros de batimento angular e desta forma minimizar os erros j e k , e, finalmente: e) limitar-se a faixa de operação angular de forma a posicionar os discos nas posições frente às fibras, sem dar uma volta completa, garantido a repetibilidade dos erros em relação às posições pré estabelecidas.

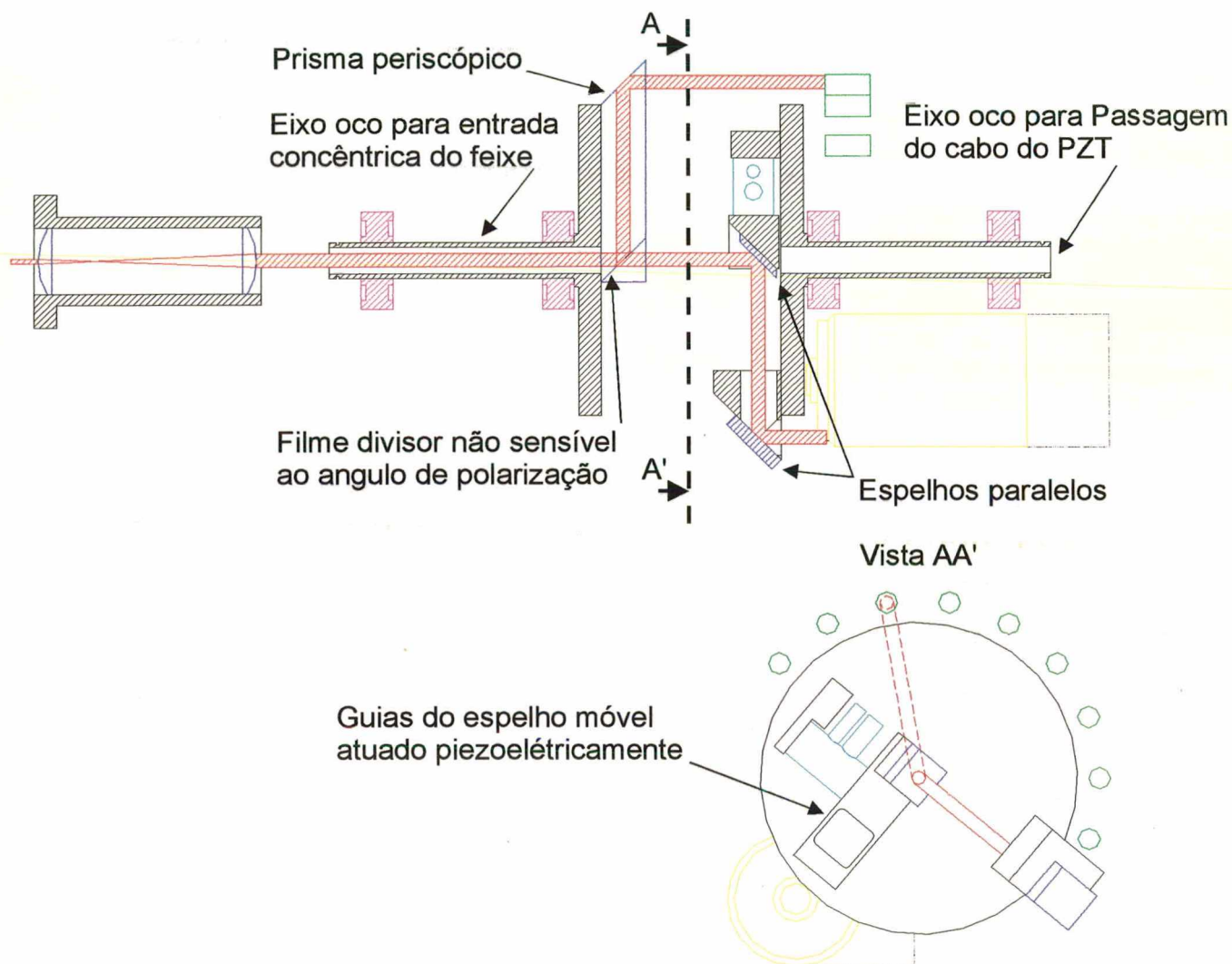


Figura 5.4 Esboço esquemático da nova concepção do chaveador de fibras ópticas

O prisma periscópico do primeiro disco tem também a função de dividir o feixe do LASER, na proporção de 50%, sem causar translação do feixe transmitido, devendo ser do tipo cúbico. O filme do divisor deve ser de tal forma invariante à posição angular em relação ao ângulo de polarização do feixe LASER, para manter constante tanto a razão de divisão de intensidade do feixe quanto os planos de polarização dos feixes divididos.

Conforme observa-se na Figura 5.4, o segundo disco tem o primeiro espelho do periscópio montado sobre uma guia elástica para garantir a qualidade do deslocamento deste espelho, deixando ao PZT apenas a função de atuar o deslocamento. O segundo espelho, como está dissociado em forma do primeiro espelho, deve ter graus de liberdade de ajuste de paralelismo em relação ao primeiro.

Com esta disposição rotativa, com o feixe entrando concêntrico com os discos e as fibras estando todas no mesmo plano, garante-se a equalização dos caminhos ópticos dentro do chaveador.

O cabo do PZT sai do segundo disco pelo furo concêntrico ao eixo. Fins de curso optoeletrônicos, seguidos por barreiras mecânicas, limitam a faixa angular de posicionamento dos discos. Um dos fins de curso serve também ao processo de referenciamento de inicialização da escala angular de posicionamento integrada aos servo motores.

O conjunto deve ser rigidamente fixado à bancada óptica, garantindo a estabilidade das fibras ópticas. O LASER deve ser orientado, com recursos apropriados de alinhamento, em relação ao chaveador fixo na

bancada. Os discos devem se balanceados e também a inércia do rotor do motor deve ser idêntica a inércia da carga, refletida em seu eixo, garantido controlabilidade e aproveitando ainda, a situação contra-rotativa do motor em relação a carga, que possibilita o cancelamento das reações de torque, minimizando assim qualquer excitação vibratória em função do movimento em aceleração ou desaceleração.

O chaveador deve ter ainda um expansor para se aproveitar todo o diâmetro da fibra de iluminação, otimizando assim a homogeneidade da região iluminada sobre a peça.

5.3.2 Efeitos esperados em função destas especificações

As maiores vantagens desta nova concepção são:

- Melhor confiabilidade de funcionamento, uma vez que esta concepção emprega conceitos tecnologicamente consagrados.
- Maior estabilidade de correlação das fibras, em função do não impacto e ausência de vibrações.
- Melhor qualidade no movimento do espelho deslocador de fase, possibilitando uma provável incerteza de posicionamento deste abaixo de 5 nm.
- Aproveitamento do diâmetro das fibras por homogeneização da iluminação.
- Maior facilidade de fabricação, montagem e manutenção, com conseqüente redução de custo.

6. Conclusões.

6.1 Recomendações para evolução do sistema.

Este trabalho proporcionou o melhor conhecimento do comportamento metrológico da Estação Holográfica. Como se trata de um sistema precursor na introdução da técnica holográfica no meio laboratorial, os pesquisadores que a desenvolveram basearam-se em muitas publicações, onde eram recomendados determinados parâmetros operativos para o sistema. Assim, neste trabalho, todos os parâmetros operativos foram avaliados teórica e praticamente, e os resultados serviram para a evolução da metodologia de operação do sistema. Também os componentes originais foram ensaiados e tiveram sua adequabilidade avaliada. Estes ensaios revelaram quais os parâmetros realmente importantes para a escolha de componentes, e, mesmo que estas especificação não sejam explicitamente declaradas na ficha técnica do seu catálogo, sabe-se agora com quais características típicas estas se relacionam. Com o conhecimento do comportamento do atual sistema, podem ser mais facilmente avaliadas as melhorias aportadas por um componente, bastando para isso ensaiá-lo segundo metodologias empregadas neste trabalho.

O Capítulo 5 tratou especificamente da evolução do sistema, avaliando a cada passo a melhoria alcançada, seja pela evolução dos parâmetros operativos do sistema, ou pela atualização tecnológica dos componentes que compõem o sistema. Cabe aqui ainda informar de que estas recomendações foram seguidas e poderão ser avaliadas no âmbito do projeto financiado pela Fundação Banco do Brasil [12].

6.2 Rastreabilidade metrológica do sistema de medição Estação Holográfica.

Este trabalho avaliou metrologicamente a Estação Holográfica, identificando quais parâmetros operativos e componentes são relevantes na propagação do erro de medição. Os procedimentos desenvolvidos permitem, de forma inédita em sistemas semelhantes, a apresentação de resultados com a sua respectiva Incerteza de Medição. Para tal, é suficiente conhecer determinados erros, provenientes de alguns componentes apenas, que podem ser ensaiados com padrões convencionais, disponíveis em muitos laboratórios de referência metrológica.

Assim, este trabalho traz subsídios para que seja desenvolvido procedimentos formais de calibração para o Sistema de Medição de Microdeslocamentos, Deformações e Tensões denominado Estação Holográfica.

6.3 Avaliação geral da Estação Holográfica

Num primeiro enfoque teórico identificou-se que a principal fonte de erro do sistema era realmente oriunda da medição da ordem de franja. Este trabalho avaliou primeiramente qual era o desempenho metrológico original do sistema, com os parâmetros operativos e componentes usuais do sistema. Chegou-se ao seguinte comportamento metrológico original:

Desconsiderando os erros de chaveamento e influências ambientais externas, pois em algumas aplicações (necessitando de medição 1 D apenas) não era necessária a operação de chaveamento e a influência ambiental dependia muito da capacidade de isolamento de cada laboratório, chegou-se a uma incerteza de medição para a ordem de franja de $OF/8,6$. Este valor, para uma montagem de bancada óptica típica e LASER HeNe, corresponde a uma incerteza de medição de deslocamentos na direção fora do plano da região de medição da peça da ordem de 20 nm, e, para medições paralelas ao plano da região de medição da peça, da ordem de 30 nm.

Se forem consideradas as influências atmosféricas e de chaveamento, como em muitas aplicações acontecia, a incerteza de medição para a ordem de franja era de: $OF/3,1$, que para a mesma montagem

típica e o mesmo LASER, era obtida uma incerteza de medição de deslocamentos de 50 nm e 90 nm respectivamente para as direções fora e no plano da região de medição da peça.

Observou-se que as principais fontes de erros, o chaveamento e o “drift” térmico eram muito difíceis de serem minimizados através de dispositivos físicos. Porém é possível praticamente se eliminar a influência destas fontes de erros, através de uma metodologia de processamento, proposta por Stetson [26], e considerada como perfeitamente viável para aplicação na estação holográfica. A otimização na medição da ordem de franja passou a ser o aspecto mais crítico para que o sistema atinja o desempenho desejado inicialmente.

Surpreendentemente, concluiu-se que apenas com a otimização dos parâmetros operativos foi possível atingir uma incerteza de medição da ordem de OF/50, possibilitando uma incerteza de medição de deslocamentos, em condições de bancada semelhantes, de 3,2 nm e 5,5 nm respectivamente para medições fora e no plano de medição.

Com a atualização na especificação dos componentes, estima-se (pois estes ainda não foram ensaiados) que pode-se atingir incríveis OF/70, para a incerteza de medição na ordem de franja, possibilitando uma incerteza de medição de deslocamentos, em condições semelhantes, de 2,2 nm e 3,8 nm respectivamente para medições fora e no plano de medição. Tal incerteza de medição, se for verificada na prática, nunca foi citada por nenhum autor, nem mesmo como resolução para um sistema que emprega tecnologia semelhante.

Frente a uma incerteza de medição possível tão reduzida para a ordem de franja, outras fontes de erros, consideradas de segunda ordem, nesta situação passam a ser mais significativas. Ainda assim, pode-se dizer, sem exagero, que o sistema de medição Estação Holográfica é capaz de uma incerteza de medição de deslocamentos de 5 nm. Este resultado é muito significativo, pois iguala o desempenho metrológico deste sistema, ao desempenho do sistema de medição LASER Interferométrico de segunda geração.

Com este desempenho metrológico, com um chaveador de fibras ópticas confiável e com o novo software, em desenvolvimento que contempla as sugestões deste trabalho, pode-se dizer que o sistema de medição Estação Holográfica atingiu a maturidade necessária para utilização industrial. Tornou-se portanto um sistema de medição robusto, confiável e de elevado desempenho, estando pronto para o repasse como um produto inovador e de auto impacto a nível mundial. Esta tecnologia permite ainda interessantes derivações para aplicações específicas.

6.4 Avaliação geral do trabalho.

Este trabalho permitiu o estudo detalhado de um produto metrológico inovador com muitos desafios a nível de possibilidades de medição devido a sua elevada resolução que o coloca a frente de muitos padrões de medição clássicos.

Porém, com um estudo teórico aprofundado, percebeu-se que se trava de um sistema metrologicamente robusto, e que, a partir de ensaios bem definidos em alguns componentes fundamentais do sistema, poderia se chegar a resultados conclusivos quanto a sua incerteza de medição. A partir destes estudos, e, com ciência dos recursos disponíveis no Laboratório de Metrologia da UFSC, pode-se planejar os experimentos corretos que identificaram as características metrológicas do sistema.

Mesmo que neste trabalho não tenha sido necessário o mesmo grau de criatividade que foi necessária aos criadores de um sistema de medição tão impressionante tecnologicamente, o trabalho aqui realizado foi um esforço necessário para o futuro deste sistema tão promissor.

Este trabalho permitiu identificar as principais deficiências do sistema, mesmo que estas tenham sido resolvidas brilhantemente por outro autor [26], o trabalho tem o mérito de atestar a viabilidade desta

solução e ainda otimizar as demais fontes de erros significativas, dedicando-se basicamente a medição de fase. Torna-se, portanto, uma possível fonte de consulta para outras tecnologias de medição que se baseiam na medição de fase, como vários outros tipos de Interferômetros. Espera-se desta forma, que se tenha contribuído para evolução de uma tecnologia avançada.

Em conjunto com outros trabalhos, que avaliaram os software do sistema [8] e que avaliaram a medição de deformações e tensões [6], se pode ter noção das possibilidades desta tecnologia. Este conjunto de resultados serve para que se continue a desenvolver esta ferramenta, com muitas possibilidades ainda inexploradas.

Com estudos semelhantes a este, comprova-se que mesmo em países com pouca tradição em tecnologia avançada e com recursos limitados, é possível com alguma criatividade e principalmente dedicação, aproveitar bem estes recursos e conseguir resultados significativos.

7. Referências Bibliográficas

- [1] ALBERTAZZI Jr, A **“Automatização da Medição de Deslocamentos pela Holografia Interferométrica”** Dissertação de Mestrado - CPGEM/UFSC 1984
- [2] ESTAÇÃO Automática de Medição de Deslocamentos, Deformações e Tensões por Princípios Holográficos. CERTI. 1989 (Projeto FINEP/PADCT)
- [3] ALBERTAZZI Jr, A., Kawasaki, A. I., Kapp, W. A. **“Dispositivo Padrão de Microdeslocamentos”** Trabalho vencedor do Prêmio Yeaham Numata de Tecnologia - 1988
- [4] ALBERTAZZI Jr, A **“Medição de Microdeslocamentos Tridimensionais e Deformação pela Holografia Interferométrica Autocalibrada”** Tese de Doutorado, Engenharia Mecânica - UFSC - abril 1989.
- [5] COUTINHO, G. S. **“Técnicas Híbridas para Análise de Tensões Combinando Elementos Finitos e Holografia Eletrônica - Uma Contribuição”** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - UFSC, 1993.
- [6] ASSUITI, C. H. **“Metodologia Integrada para Medição da Forma Geométrica, Deslocamentos, Deformações e Tensões em Superfícies não Planas Através da Holografia Eletrônica”** Dissertação de Mestrado - CPGEM/UFSC, 1994
- [7] SOUZA, A.R. - **“Desenvolvimento de uma Técnica de Ensaio Não Destrutivo Utilizando Holografia Eletrônica para detecção de Defeitos em Cilindros Revestidos com Borracha”** Dissertação de Mestrado - CPGEM/UFSC, 1994
- [8] ULIANA, P.B. **“Tratamento de Imagens Geradas por Holografia Eletrônica”** Dissertação de Mestrado - PPGEE/UFSC, 1994
- [9] SANCHES TRONCOSO, L. H. **“Sistema Ativo de Estabilização para Medição com Holografia Eletrônica”** Exame de qualificação - CPGEM/UFSC, 1994
- [10] RODACOSKI, M.R. **“Medição de Tensões Residuais Localizadas através do Método do Furo Cego e Holografia Eletrônica ESPI”**. Exame de Qualificação - CPGEM/UFSC, 1995
- [11] MÓDULOS Aplicativos para Estação Holográfica. CERTI. 1995 (Projeto FINEP/PADCT)
- [12] EVOLUÇÃO da Estação de Medição por Holografia Eletrônica. CERTI 1994 (Projeto FBB)
- [13] GONÇALVES Jr, A.A. **SINTHE 3.0C**: Instruções de utilização. CERTI/LABMETRO. 1993
- [14] W. Demtröder **“Laser Spectroscopy”** Editora Springer-Verlag, 1981, 3ª Edição corrigida 1988, ISBN 3-540-10343-0 / ISBN 0-387-10343-0
- [15] Spectra-Physics **“Model 127 Stabilite™ Helium-Neon Laser”** Manual de instruções
- [16] D. Halliday, R. Resnick **“Física”** Volume 4, Editora LTC, 1978, 4ª Edição, ISBN 85-216-0302-9c
- [17] Hewlett Packard **“5528A Laser Measurement System”** Manual do Usuário, peça número 05528-90019, micro ficha número 05528-90020, 1988
- [18] Albertazzi Jr, A. **“ESPI Displacement and Strain Measurement Error Estimation Using a Measurement Efficiency Coefficient”** - IMEKO
- [19] Albertazzi Jr, A. **“Determination of Displacement, Strains and Rotations from Holographic Interferometry Using a 2D Fringe Order Function”** Simpósio do SPIE de 1991, aplicações em interferometria, San Diego, Califórnia, EUA, Julho de 1991.
- [20] Creath, K. **“Phase-shifting Speckle Interferometry”** Appl. Optics 24 (18) 3035-8-1985.

- [21] Albertazzi Jr, A. **“Generalized Least Squares Approach to Compute Displacements, Strains and Rotations from Combined Single and/or Double Illumination Holographic Interferometry”** Simpósio do SPIE de 1993, Interferometria II: Conferência de aplicações, San Diego, Califórnia, EUA, Julho de 1993.
- [22] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky e I. T. Young **“Signals and Systems”** Editora Prentice-Hall International, 1983, ISBN 0-13-811175-8
- [23] Vários, Editado por R. K. Erf **“Speckle Metrology”** Editora Academic Press, 1978
- [24] K. J. Gåsvik **“Optical Metrology”** Editora Wiley, Segunda Edição, 1995, ISBN 0-471-95528-0
- [25] Coherent **“The Coherent INNOVA 300 Series Ion Laser”** Manual de operação, Peça número 0161-331-00, 1989,90, Revisão C setembro/90
- [26] Stetson, K. A. **“Use of sensitivity vector variations to determine absolute displacements in double exposure hologram interferometry”** Applied Optics / Vol. 29, Nº 4 / 1 fevereiro 1990
- [27] Physik Instrumente - **“Manual de operação P864 / P810.10 / E808”** Alemanha, 1990
- [28] Gabor, D. **“A New Microscopic Principle”**, Nature 161, 177-8 mai/1948.
- [29] Gabor, D. **“Microscopy by Reconstructed Wave-fronts”**, Proc. Roy. Soc. 197A,454-87, jul/49
- [30] Matsumoto, T., Iwata, K., Nagata, R. **“Measuring Accuracy of Treedimensional Displacement in Holographic Interferometry”** Appl. Optics 12 (5), 961-7-1973.
- [31] Wykes, C., Jones, R. **“Holographic and Speckle Interferometry”** Cambride University Press, 1989.
- [32] Vest, C. M. **“Holographic Interferometry”** Jonh Wiley and Sons, 1979.
- [33] Sciammarela, C. A., Bhat, G., Longinow, N., Zhao, M. **“High Accuracy Micromechanics Displacement Measure Optical Technique”**, The winter Annual Meeting of the Americam Society of Mechanical Engineers, San Francisco, CA, 121-132, 1989.
- [34] Stetson, K. A. **“Theory and Applications of Eletronic Holography”** Proceedings of the International Conference on Interferometry and Speckle Metrology, pg. 294, 1990.
- [35] Gonçalves A. A., Kapp, W.A., Manzolli, A. **“Um Sistema Prático para Aplicação da Holografia Eletrônica na Análise Experimental de Tensões”** Anais COBEM, 1991.
- [36] Chiang, P., Beatty, A. A. **“Subjective LASER Speckle Method and its Application on Solid Mechanics Problems”** Optical Engineering vol 21 (3) pag 379 - 1982

ANEXOS

A. A técnica de Holografia Eletrônica

Neste anexo, transcrito parcialmente de uma outra dissertação de mestrado [8], são apresentados os princípios fundamentais nos quais as técnicas de Holografia Convencional e Holografia Eletrônica estão baseadas. Desta forma serão abordados vários aspectos relacionados com a Holografia desde os modelos matemáticos até os aspectos referentes a terminologia adotada

A.1 Interferência entre duas ondas

O fenômeno da interferência entre ondas é o princípio fundamental por trás das técnicas interferométricas de medição

O princípio da superposição de ondas, que é válido para a óptica linear, estabelece que quando duas ou mais ondas se interceptam em um ponto a amplitude resultante naquele ponto será dada pela soma vetorial das amplitudes das ondas originais

Por simplicidade do equacionamento, considera-se ondas com a mesma frequência e polarizadas na mesma direção. Neste caso, a notação vetorial pode ser dispensada e as duas ondas podem ser definidas por:

$$O = A e^{j(\omega t + \phi)} \quad (\text{A.1})$$

$$R = B e^{j(\omega t + \psi)} \quad (\text{A.2})$$

Onde:

- O e R \Rightarrow frentes de onda;
- ω \Rightarrow frequência angular da onda luminosa;
- ϕ e ψ \Rightarrow fases arbitrárias das frentes de onda;
- A e B \Rightarrow amplitudes das frentes de onda.

Se A , B , ϕ e ψ são funções da posição espacial. Como a frente de onda e o lugar geométrico onde o valor da fase é constante, a posição espacial não precisa ser explicitada na equação (A.2).

Pelo princípio da superposição de ondas, a amplitude no ponto de intersecção das duas ondas será dada por:

$$T = O + R \quad (\text{A.3})$$

Onde T representa a amplitude total da onda resultante.

Substituindo as expressões de O e R na equação (A.3), obtém-se:

$$T = A e^{j(\omega t + \phi)} + B e^{j(\omega t + \psi)} \quad (\text{A.4})$$

$$T = (A e^{j\phi} + B e^{j\psi}) e^{j\omega t} \quad (\text{A.5})$$

A equação (A.5) expressa a amplitude total resultante da superposição de duas ondas que se interceptam. Quando, em um dado ponto, é efetuada a medida da intensidade luminosa (1), esta será proporcional ao quadrado da amplitude de T .

Tem-se portanto:

$$I = T T^* = A^2 + B^2 + AB \left[e^{j(\phi-\psi)} + e^{-j(\phi-\psi)} \right] \quad (\text{A.6})$$

Onde T^* é complexo conjugado de T .

Desenvolvendo a equação (A.6), obtém-se:

$$I = A^2 + B^2 + 2 AB \cos(\phi - \psi) \quad (\text{A.7})$$

Definindo:

$$I_0 = A^2 + B^2, \quad I_1 = 2 AB \quad (\text{A.8})$$

Substituindo (A.8) em (A.7), tem-se:

$$I = I_0 + I_1 \cos(\phi - \psi) \quad (\text{A.9})$$

Nota-se aqui que a intensidade resultante depende da diferença de fase entre as ondas incidentes, e pode variar entre um valor máximo ($I_0 + I_1$) quando a diferença de fase for de $2n\pi$ radianos e um valor mínimo ($I_0 - I_1$), quando a diferença de fase for múltipla de $(2n + 1)\pi$ radianos, sendo n um número inteiro. Este fenômeno é conhecido como interferência entre ondas luminosas.

A.2 Medição com Holografia Convencional

A.2.1 Holografia

Em 1948, Dennis Gabor publicou [28] [29] um trabalho no qual apresentava os princípios de uma nova técnica que permitia a reconstrução de frentes de ondas complexas. Devido a inexistência de uma fonte monocromática com as características necessárias para a aplicação prática desta técnica a mesma permaneceu como uma curiosidade da Física por mais de uma dezena de anos. Dada a possibilidade de reconstrução de toda a frente de onda Gabor batizou esta técnica de Holografia (do grego holos = todo)

A Holografia é uma técnica através da qual é possível gravar e reconstruir uma frente de onda monocromática que apresente uma complexidade muito elevada. Como resultado, a frente de onda reconstruída pode exibir uma notável fidelidade em relação a onda original, podendo ser mesmo considerada indistinguível desta última.

Somente no início da década de 1960, com o advento do laser, começaram a aparecer os primeiros trabalhos práticos sobre Holografia. Desde então, a Holografia Interferométrica tem sido usada como uma importante ferramenta em vários campos da mecânica experimental, podendo-se citar:

- a) Medição de micro deslocamentos;
- b) Medição de deformações mecânicas;
- c) Análise experimental de tensões;
- d) Determinação do fator de intensificação de tensões;
- e) Determinação de propriedades dos materiais;
- d) Determinação de modos e amplitudes de vibrações.

A.2.2 Holograma

O holograma é composto por um filme fotográfico exposto por meio de uma técnica apropriada. Quando o holograma é iluminado por um feixe de laser, é gerada uma frente de onda com as mesmas características da frente de onda do objeto que gerou o holograma. Um observador ao captar a frente de onda gerada através do holograma visualizará o objeto original com uma perfeita noção de tridimensionalidade.

A Figura A.1 ilustra o processo de gravação de um holograma. O raio emitido pela fonte de luz monocromática normalmente um laser, é dividido em duas partes por um divisor de feixe. Um dos raios é expandido e direcionado para o objeto que reflete a luz formando uma frente de onda de elevada complexidade que se propaga na direção do filme fotossensível. A outra parte do laser é expandida e direcionada diretamente para o mesmo filme. A interferência entre as ondas gera um padrão estacionário que impressiona fotograficamente o filme.

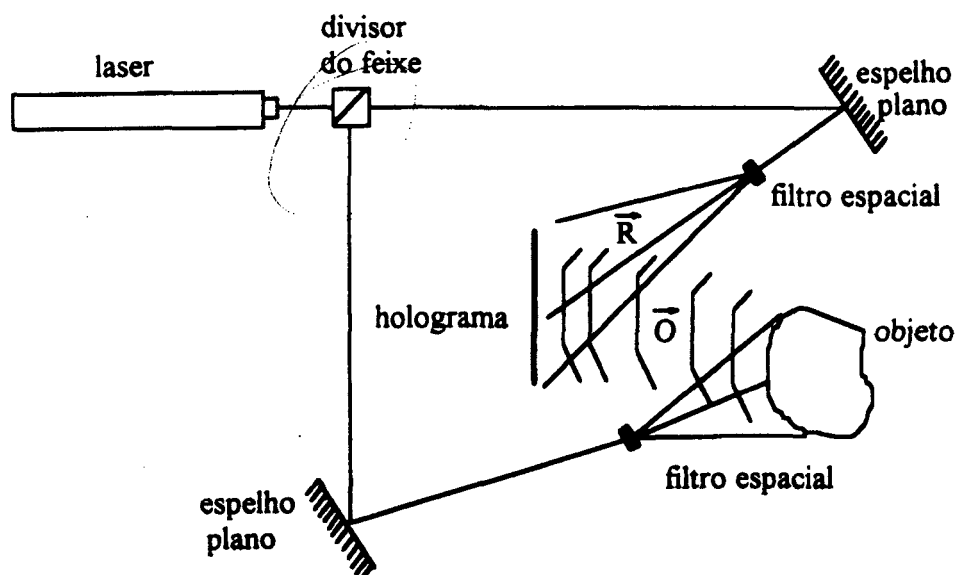


Figura A.1 Gravação de um holograma

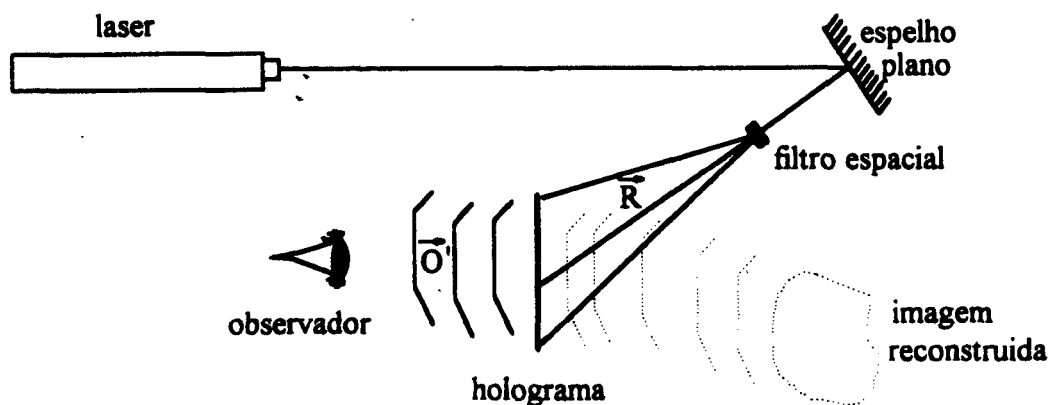


Figura A.2 Reconstrução de um holograma

Para demonstrar analiticamente que qualquer frente de onda pode ser reconstruída por meio da Holografia utilizaremos a equação de onda caracterizada pela notação complexa.

A equação de onda que se propaga em um meio homogêneo no sentido positivo do eixo Z é dada por:

$$\vec{O} = A e^{j(\alpha z - \omega t + \phi)} \vec{k} \quad (\text{A.10})$$

Onde:

- $\phi = \phi(x, y) \Rightarrow$ fases arbitrárias da frente de onda;
- $A = A(x, y) \Rightarrow$ amplitudes das frentes de onda;
- $\omega = 2\pi c/\lambda \Rightarrow$ frequência angular da onda luminosa;
- $\alpha = 2\pi/\lambda \Rightarrow$ frequência espacial da onda luminosa;
- $\vec{k} \Rightarrow$ vetor unitário na direção do eixo Z;
- $c \Rightarrow$ velocidade da luz;
- $\lambda \Rightarrow$ comprimento de onda.

Considerando que a onda será analisada no plano $z=0$ e utilizada uma única fonte de radiação (ω é constante e o fator $e^{j\omega t}$ aparecerá como fator multiplicativo para todas as ondas), toda a informação estará contida na amplitude e na fase da onda. Assim sendo, a equação (A.10) pode ser simplificada para:

$$\vec{O} = A e^{j\phi} \vec{k} \quad (\text{A.11})$$

Para geração do holograma uma onda de referência R é adicionada à onda O , gerando uma onda resultante T :

$$\vec{R} = A e^{j\psi} \vec{k} \quad (\text{A.12})$$

$$\vec{T} = \vec{O} + \vec{R} = A e^{j\phi} \vec{k} + B e^{j\psi} \vec{k} \quad (\text{A.13})$$

Supondo que um filme fotográfico seja colocado no plano $z=0$, a intensidade luminosa (I) atuante neste filme será dada por:

$$I = \vec{T} \vec{T}^* \quad (\text{A.14})$$

Pela equação de interferência de onda (A.7) têm-se:

$$I = A^2 + B^2 + 2AB \cos(\phi - \psi) \quad (\text{A.15})$$

Demonstra-se a seguir que utilizando um onda de referencia R para iluminar o holograma a onda O é reconstruída. Quando a onda de referência atravessa o holograma, a amplitude da mesma é modulada de acordo com intensidade luminosa registrada no holograma como segue:

$$\vec{O}_1 = I \cdot \vec{R}$$

$$\vec{O}_1 = \left[A^2 + B^2 + AB e^{j(\phi-\psi)} + AB e^{-j(\phi-\psi)} \right] B e^{j\psi} \vec{k} \quad (\text{A.16})$$

A equação (A.16) pode ser dividida em três componentes distintas:

$$\vec{O}_1 = \left[B(A^2 + B^2) e^{j\psi} + AB^2 e^{j\phi} + AB^2 e^{-j(\phi-2\psi)} \right] \vec{k} \quad (\text{A.17})$$

A interpretação de cada uma destas componentes é dada a seguir:

$B(A^2 + B^2)e^{j\psi} \vec{k} \Rightarrow$ parcela da onda de referência que não sofreu difração

$AB^2 e^{j\phi} \vec{k} \Rightarrow$ imagem verdadeira composta pela onda reconstruída que está multiplicada por um fator constante;

$AB^2 e^{-j(\phi-2\psi)} \vec{k} \Rightarrow$ imagem conjugada composta pela interação das fases e amplitudes de ambas as ondas

A.2.3 Holografia Interferométrica

A Holografia permite a reconstrução da frente de onda com um grau de fidelidade tão elevado, que a mesma pode ser comparada interferometricamente com a frente de onda original do objeto[30]. As ondas superpostas interferem entre si, e ao ocorrerem deslocamentos no objeto que mudem a frente de onda original, padrões de interferências, denominados mapas de franja serão gerados

A interferência pode ser obtida tanto por dupla exposição, na qual duas ondas são registradas no mesmo holograma ou por exposição em tempo real, na qual o holograma é revelado e reposicionado. Neste último caso, a frente de onda gerada pelo holograma é comparada diretamente com a frente de onda gerada pelo objeto, gerando padrões de interferência em tempo real.

Considerando que as ondas geradas tanto pelo holograma quanto pelo objeto têm a mesma fase e amplitudes proporcionais, quando estas ondas são somadas no ponto de observação ocorre uma interferência construtiva com a intensificação de todos os pontos da imagem.

Ao serem realizados deslocamentos microscópicos no objeto, as fases da onda serão diferentes da fase do holograma como ilustrado na Figura A.3:

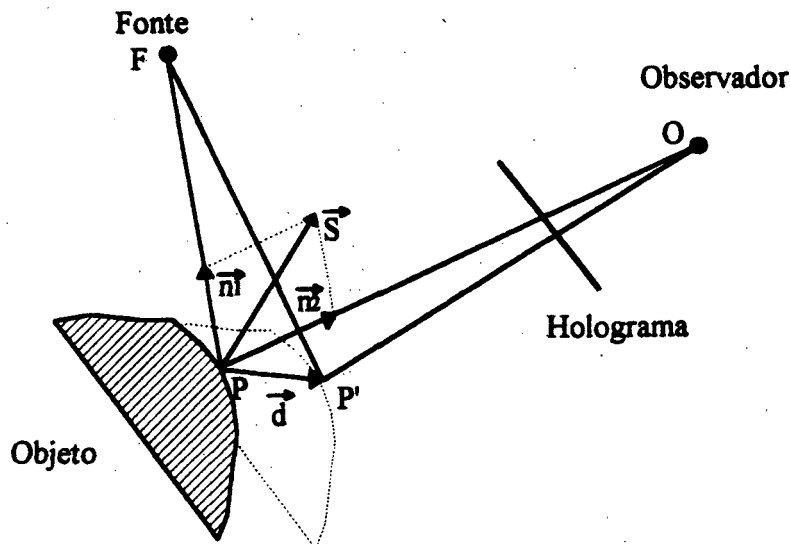


Figura A.3 Variação do caminho óptico devido ao deslocamento do objeto

Inicialmente o feixe luminoso percorre o caminho óptico $\overline{FP} + \overline{PO}$. Com o deslocamento do objeto o feixe passa a percorrer o caminho óptico $\overline{FP'} + \overline{P'O}$. A diferença Δd entre os caminhos é dada por:

$$\Delta d = (\overline{FP'} + \overline{P'O}) - (\overline{FP} + \overline{PO}) \quad (\text{A.18})$$

Como o deslocamento \vec{d} é muito pequeno se comparado aos caminhos ópticos envolvidos, pode-se considerar que os seguimentos \overline{FP} e \overline{FP}' são praticamente paralelos. Desta forma a diferença de comprimento dos segmentos \overline{FP}' e \overline{FP} será causada somente pela componente do vetor \vec{d} , na direção do vetor unitário \vec{n}_1 .

O módulo deste deslocamento pode ser facilmente calculado através do produto vetorial:

$$\overline{FP}' - \overline{FP} = -\vec{d} \cdot \vec{n}_1 \quad (\text{A.19})$$

Pelo mesmo princípio, através do vetor unitário \vec{n}_2 calcula-se:

$$\overline{P'O} - \overline{PO} = \vec{d} \cdot \vec{n}_2 \quad (\text{A.20})$$

substituindo (A.19) e (A.20) em (2.18), tem-se:

$$\Delta d = \vec{d} \cdot \vec{n}_2 + \vec{d} \cdot \vec{n}_1 = \vec{d}(\vec{n}_2 + \vec{n}_1) \quad (\text{A.21})$$

$$\Delta d = \vec{d} \cdot \vec{p} \quad (\text{A.22})$$

onde \vec{p} é denominado vetor de sensibilidade.

O vetor de sensibilidade é portanto um parâmetro geométrico que define o quanto a fase da frente de onda irá variar em consequência do deslocamento sofrido pela superfície iluminada

O valor do vetor de sensibilidade pode ser calculado a partir das coordenadas da peça e do sistema óptico associado (pontos de iluminação e observação), em relação a um dado sistema de referência.

Desta forma, para uma variação de caminho óptico Δd a variação de fase entre as frentes de ondas será dada por:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi \Delta d}{\lambda} \quad (\text{A.23})$$

Onde:

$\Delta\phi = \Delta\phi(x, y) \Rightarrow$ defasagem entre as duas frentes de onda;

$\Delta d = \Delta d(x, y) \Rightarrow$ variação do caminho óptico de cada ponto

Pela equação da interferometria (A.9), um plano de gravação de imagem perpendicular ao ponto de observação irá registrar a seguinte intensidade luminosa:

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y)) \quad (\text{A.24})$$

Onde I_0 representa a intensidade média de iluminação e I_1 representa o fator de modulação das franjas.

Caso o deslocamento dos pontos do objeto não seja uniforme (deslocamentos devido a aplicação de esforços mecânicos) o valor $\Delta\phi(x, y)$ não será o mesmo para todos os pontos da imagem, desta forma será obtida uma imagem com regiões mais claras e mais escuras que são denominadas Franjas Interferométricas. Esta imagem recebe a denominação de Mapa de Franjas, sendo que a Figura A.4 mostra um típico Mapa de Franjas.



Figura A.4 Mapa de franjas

A.3 Medição com Holografia Eletrônica

A.3.1 O Padrão de Granulado Óptico (“Speckle”)

A imagem de uma peça iluminada pela luz do laser aparenta ter uma textura granular, composta por pontos claros e escuros. Estes “grãos” são denominados “speckles”, que significa “mancha” em inglês. O “speckle” pode ser visto tanto a olho nú quanto por instrumentos ópticos.

O processo de formação do “speckle” pode ser descrito com o auxílio da Figura A.5. A luz do laser ao incidir em uma superfície rugosa é refletida em várias direções. Um observador que capte esta luz irá verificar a interferência entre os raios provenientes dos diversos pontos da superfície iluminada, pontos escuros serão gerados pela interferência destrutiva e os pontos claros pela interferência construtiva dos raios.

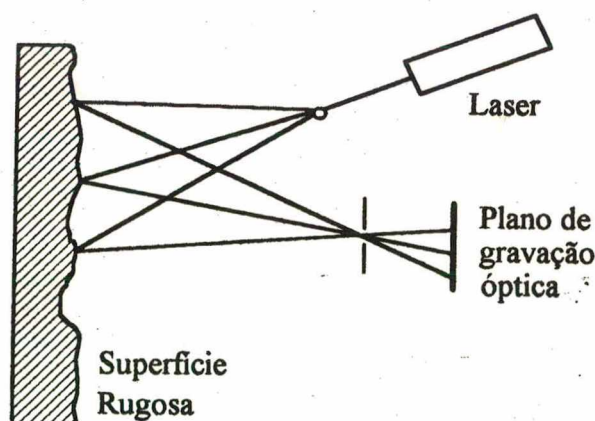


Figura A.5 Processo de formação do “speckle”

O observador irá perceber portanto um padrão granular aleatório denominado padrão de “speckle” (Figura A.6). A natureza aleatória deste padrão é uma consequência da rugosidade da superfície iluminada.

O fenômeno de formação de “speckle” em imagens de objetos iluminados com laser normalmente prejudica o processo holográfico pois os mesmos se comportam como um “ruído óptico” que perturba a visualização das imagens.

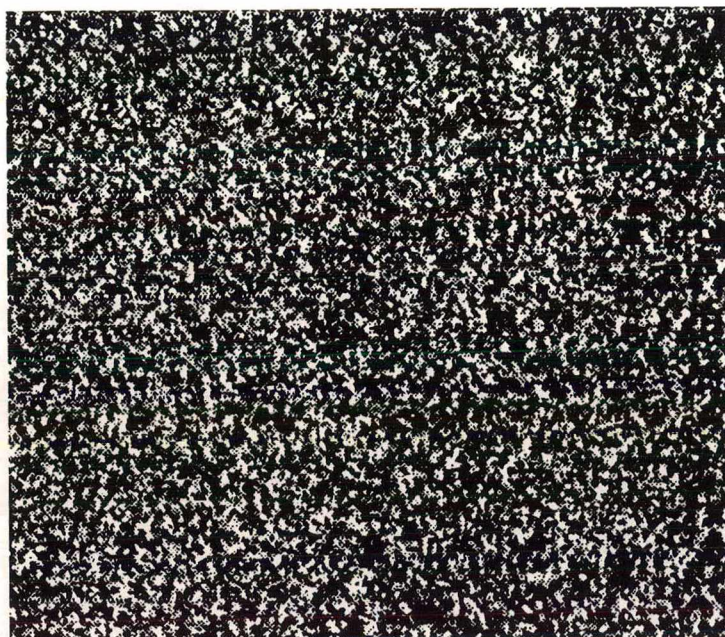


Figura A.6 Padrão de “speckle”

Wykes [31] demonstra que cada “speckle” será formado pela interferência dos raios difundidos por uma pequena região da superfície denominada região de influência. Desta forma, aplicando-se uma carga na superfície, as deformações geradas sobre uma dada região de influência irão gerar variações na intensidade do “speckle” associado a mesma .

As dimensões de cada “speckle” e das regiões de influência associadas aos mesmos são dependentes das características do sistema óptico utilizado. Quando não há um sistema óptico para a visualização da superfície, os “speckles” se formam devido a interferência generalizada que ocorre entre os raios luminosos provenientes dos inúmeros pontos da referida superfície. Um estudo mais detalhado da teoria do “speckle” pode ser encontrado em [32].

A.3.2 Variação da Fase do Speckle

O fenômeno de formação do “speckle” permite a geração de mapas de fase muito semelhantes aos gerados através da holografia. A medição de deslocamentos e deformações na superfície de uma peça pode também ser explicada graças a mudança na fase de cada “speckle” desta superfície, em consequência do deslocamento sofrido pela peça. Este processo pode ser descrito mais facilmente com o auxílio da Figura A.7.

Um feixe de luz coerente partindo de uma fonte F, incidindo na superfície no ponto P e dirigindo-se ao observador O, descreve o caminho óptico dado por $(\overline{FP} + \overline{PO})$.

Quando o objeto é deslocado e o ponto P passa para a posição P', o feixe passa a descrever o caminho $(\overline{FP'} + \overline{P'O})$ De forma análoga à holografia interferométrica, a equação da variação de fase do “speckle” é dada por:

$$\Delta\phi = 2\pi(\vec{d} \cdot \vec{p})/\lambda \quad (\text{A.25})$$

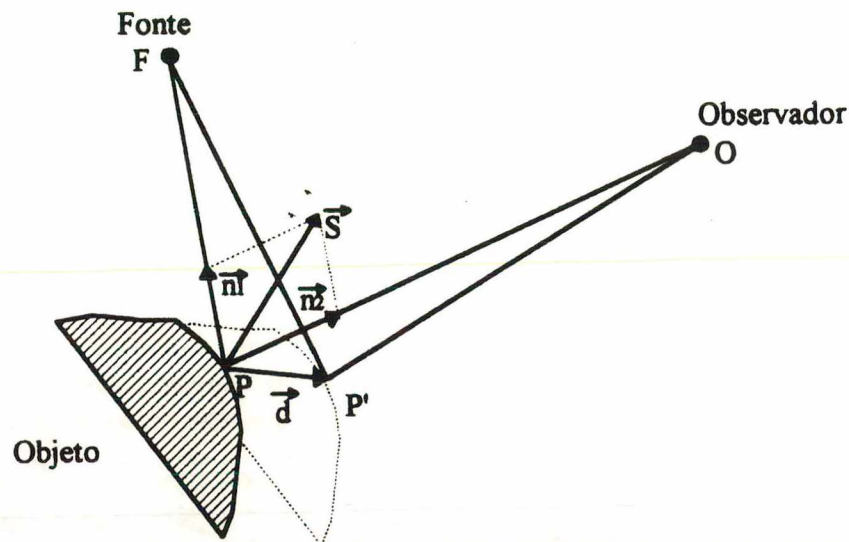


Figura A.7 Variação da fase do “speckle” devido a mudança do caminho óptico decorrente do deslocamento do objeto

A equação (A.25) mostra que a variação de fase do “speckle” está diretamente relacionada com a componente do deslocamento na direção do vetor de sensibilidade.

Para que o observador possa visualizar esta variação de fase é necessário que ao feixe de luz proveniente do objeto seja adicionado um feixe de referência. A interferência entre os dois feixes irá gerar uma variação na intensidade dos “speckes” que será função da variação de fase dos mesmos.

Para que as franjas sejam geradas é necessário que as intensidades dos “speckes” relativas ao objeto antes e depois do deslocamento sejam subtraídas. Como a subtração de intensidades não pode ser realizada diretamente sobre um filme fotográfico, é necessário que seja utilizado um sistema de aquisição de imagens.

A.3.3 O Interferômetro de padrão de “speckle” (“ESPI”)

Por ser bastante recente não existe ainda a nível internacional, uma unanimidade quanto à denominação da técnica que utiliza a variação de fase dos “speckes” como princípio de determinação de deslocamentos.

Alguns autores [20] utilizam a denominação *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI), outros [20] [33] utilizam o termo *TV Holography*. Há ainda autores que usam a denominação de *Digital Speckle Pattern Interferometry* (DSPI). Neste trabalho adota-se a denominação de *Electronic Holography* [34] ou Holografia Eletrônica [35], por considerarmos esta denominação mais representativa haja visto que os resultados obtidos com esta técnica (que depende da aquisição de imagens através de sistemas eletrônicos) são equivalentes aos obtidos por meio da Holografia convencional.

A Holografia Eletrônica é, portanto, uma técnica onde os padrões de “speckle” da superfície a ser medida interferem com um padrão de referência e são captados por uma câmera de vídeo.

Duas ou mais imagens deste padrão de interferência são obtidas em instantes diferentes e referentes à configuração original e a configuração com deformação da superfície a ser medida. O padrão das franjas é obtido através do processamento digital destas imagens.

A intensidade para imagem da superfície original (sem deformação) é dada por:

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos(\phi_i(x, y)) \quad (\text{A.26})$$

Onde $I_0(x,y)$ representa a intensidade de iluminação média e $I_1(x,y)$ representa o fator de modulação dos “speckles”.

Considerando que a intensidade média $I_0(x,y)$ e o fator de modulação $I_1(x,y)$ permanecem constantes após a superfície ser deformada a intensidade da imagem obtida após o deslocamento é dada por:

$$I_f(x,y) = I_0(x,y) + I_1(x,y) \cos(\phi_f(x,y)) \quad (\text{A.27})$$

Onde a variação da fase é dada por:

$$\Delta\phi(x,y) = \phi_f(x,y) - \phi_i(x,y) \quad (\text{A.28})$$

Subtraindo as imagens $I_f(x,y)$ e $I_i(x,y)$ obtém-se:

$$I(x,y) = I_f(x,y) - I_i(x,y) \quad (\text{A.29})$$

Aplicando as equações (A.26) e (A.27) em (A.29), tem-se:

$$I(x,y) = I_1(x,y) \left[\cos(\phi_f(x,y)) - \cos(\phi_i(x,y)) \right] \quad (\text{A.30})$$

Observa-se das equações (A.28) e (A.30) que:

$$\begin{aligned} I(x,y) = 0 & \quad , \Delta\phi(x,y) = 2n\pi, \quad n = 0,1,2, \dots ; \\ I(x,y) = 2 I_1(x,y) & \quad , \Delta\phi(x,y) = (2n+1)\pi, \quad n = 0,1,2, \dots \end{aligned}$$

Desta forma será obtido um mapa de franjas semelhante ao obtido por meio de Holografia Interferométrica convencional mostrado na Figura A.4

A.3.4 O Mapa de Fase

Uma imagem contendo uma variação de fase é denominada mapa de fase e pode ser representada por:

$$\Delta\phi(x,y) = \Delta\phi(x,y) - 2\pi N(x,y) \quad (\text{A.31})$$

Onde:

- $\Delta\phi(x,y) \Rightarrow$ módulo 2π da variação da fase causada pelo deslocamento do objeto;
- $N(x,y) \Rightarrow$ número de voltas inteiras associadas ao ângulo de fase;
- $\Delta\phi(x,y) \Rightarrow$ variação completa da fase

O número de voltas $N(x,y)$ deve ser determinado pela aplicação de algoritmos de remoção de saltos de fase (unwrapping). O problema de remoção de salto de fase foi abordado, com mais detalhes no capítulo 7 da dissertação do qual este texto foi extraído [8].

A.3.5 Vetor de Sensibilidade

O vetor de sensibilidade \vec{S} é de fundamental importância para a holografia interferométrica, pois somente os módulos das componentes dos deslocamentos na direção de \vec{S} são medidos [5]. Desta forma, para determinação de deslocamentos tridimensionais são necessários três mapas de fase obtidos através de três vetores de sensibilidades linearmente independentes. Para variar o vetor de sensibilidade dois tipos de configuração de iluminação podem ser utilizados:

- i) iluminação simples
- ii) iluminação dupla

A.3.6 Iluminação Simples

Esta configuração possibilita a obtenção de um vetor de sensibilidade normal à superfície iluminada. Somente um feixe de luz ilumina a peça a ser medida enquanto que outro feixe, denominado de feixe de referência ilumina um dos braços do interferômetro (espelho parcial) onde ocorre a superposição entre o feixe proveniente da peça com o feixe de referência.

O vetor \vec{S} será dado pela soma vetorial de dois vetores unitários, um na direção da fonte de iluminação e outro na direção do observador (plano óptico de gravação). Como pode ser observado na Figura A.8, pode-se obter um vetor resultante aproximadamente normal à superfície do objeto.

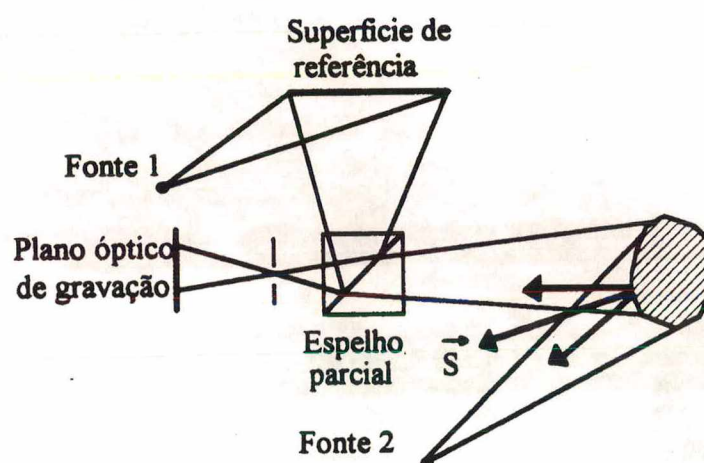


Figura A.8 Iluminação simples

A.3.7 Iluminação Dupla

Esta configuração possibilita obtenção de vetores de sensibilidade em um plano (x,y) paralelo à superfície a ser medida, através da utilização de duas fontes de iluminação, como mostra a Figura A.9.

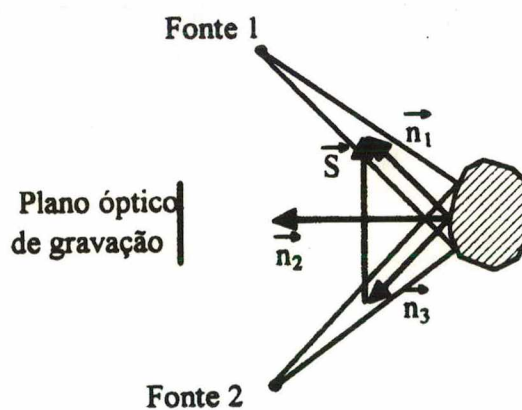


Figura A.9 Iluminação dupla

Por se tratar de um sistema linear, a influência de cada fonte luminosa pode ser considerada separadamente, sendo que cada caminho óptico terá uma variação distinta em função do deslocamento da superfície:

$$\Delta d_1 = \vec{d} \cdot (\vec{n}_2 - \vec{n}_1) \quad (\text{A.32})$$

$$\Delta d_2 = \vec{d} \cdot (\vec{n}_2 - \vec{n}_3) \quad (\text{A.33})$$

Onde:

$\Delta d_1 \Rightarrow$ variação do caminho óptico que vai da fonte 1 ao observador;

$\Delta d_2 \Rightarrow$ variação do caminho óptico que vai da fonte 2 ao observador.

A variação total do caminho óptico será dada por:

$$\Delta d = \vec{d} \cdot \vec{S} = \Delta d_1 - \Delta d_2 \quad (\text{A.34})$$

$$\Delta d = \vec{d} \cdot (\vec{n}_2 - \vec{n}_1 - \vec{n}_2 + \vec{n}_3) \quad (\text{A.35})$$

$$\Delta d = \vec{d} \cdot (\vec{n}_3 - \vec{n}_1) \quad (\text{A.36})$$

Desta forma o vetor de sensibilidade será dado por:

$$\vec{S} = (\vec{n}_3 - \vec{n}_1) \quad (\text{A.37})$$

É importante salientar que, devido ao problema de ambigüidade da fase, a determinação do sentido do vetor de sensibilidade dado pela equação (A.37) depende do método utilizado na aquisição e tratamento do mapas de franjas e mapas de fase.

Como foi exposto no Capítulo 3 da dissertação da qual este texto foi extraído [8], para os métodos que atuam sobre mapas de franjas (método do Esqueleto e método da Transformada de Fourier), a determinação do sentido do vetor de sensibilidade deve ser realizada com base em parâmetros experimentais. Já para os métodos que atuam sobre os mapas de fase (método do Deslocamento de Fase) o sentido do vetor de sensibilidade pode ser determinado de forma analítica.

Como os vetores n_1 e n_3 são unitários, o valor dos mesmos pode ser facilmente obtido a partir das coordenadas da peça e do sistema óptico associado.

A Figura A.10 mostra que a orientação do vetor de sensibilidade no plano (x,y) é dada pelas coordenadas das fontes luminosas projetadas neste plano.

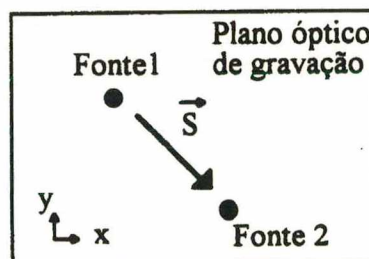


Figura A.10 Vetor de sensibilidade no plano (x,y)

A.4 Determinação de Deslocamentos Tridimensionais através da Holografia

Para um dado objeto, deseja-se obter o valor de deslocamento de uma região da superfície do mesmo devido a aplicação de uma carga. O deslocamento será medido para um conjunto de pontos desta superfície, projetados em um plano óptico de gravação [4] (um filme fotográfico ou uma array CCD), que consideraremos como sendo um ponto de referência (x,y) .

O deslocamento do conjunto de pontos da superfície pode ser representado por uma matriz de vetores de deslocamentos $\vec{d}(x,y)$, onde a coordenada (x,y) representa o ponto de projeção da superfície da peça no plano de referência [36].

Com o objeto em repouso são adquiridas três imagens com três iluminações distintas. Cada iluminação gera um vetor de sensibilidade, sendo que através do adequado posicionamento das fontes luminosas são obtidos os seguintes vetores de sensibilidade:

$\vec{S}_x \Rightarrow$ vetor paralelo ao eixo x do plano de referência (x,y) ;

$\vec{S}_y \Rightarrow$ vetor paralelo ao eixo y do plano de referência (x,y) ;

$\vec{S}_z \Rightarrow$ vetor normal ao plano de referência (x,y) .

Este conjunto de vetores de sensibilidade forma uma base para o espaço tridimensional. Na prática nem sempre se consegue vetores paralelos aos eixos do sistema de referência, entretanto sendo os vetores linearmente independentes, uma mudança de base sempre pode ser aplicada

Aplicando-se uma carga no objeto, os pontos da superfície irão se deslocar e três novas imagens são adquiridas, uma para cada vetor de sensibilidade. Desta forma três mapas de fase serão obtidos:

$$I_x(x,y) = I_{1x}(x,y) \left[\cos(\phi_{fx}(x,y)) - \cos(\phi_i(x,y)) \right] \quad (\text{A.38})$$

$$I_y(x,y) = I_{1y}(x,y) \left[\cos(\phi_{fy}(x,y)) - \cos(\phi_i(x,y)) \right] \quad (\text{A.39})$$

$$I_z(x,y) = I_{1z}(x,y) \left[\cos(\phi_{fz}(x,y)) - \cos(\phi_i(x,y)) \right] \quad (\text{A.40})$$

Os valores dos deslocamentos de fase segundo cada vetor de sensibilidade ($\Delta\phi_x(x,y)$, $\Delta\phi_y(x,y)$ e $\Delta\phi_z(x,y)$) são determinados, e o deslocamento $\vec{d}(x,y)$ pode ser calculado com base nas seguintes equações:

$$\Delta\phi_x(x,y) = 2\pi(\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_x) / \lambda \quad (\text{A.41})$$

$$\Delta\phi_y(x,y) = 2\pi(\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_y) / \lambda \quad (\text{A.42})$$

$$\Delta\phi_z(x,y) = 2\pi(\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_z) / \lambda \quad (\text{A.43})$$

Isolando-se os produtos vetoriais, e considerando a ambigüidade da fase:

$$\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_x = \lambda \left[\Delta\phi_x(x,y) / 2\pi + N_x(x,y) \right] \quad (\text{A.44})$$

$$\vec{d}(x,y) \cdot \vec{S}_y = \lambda \left[\Delta\phi_y(x,y) / 2\pi + N_y(x,y) \right] \quad (\text{A.45})$$

$$\vec{d}(x, y) \cdot \vec{S}_z = \lambda \left[\Delta\phi_z(x, y) / 2\pi + N_z(x, y) \right] \quad (\text{A.46})$$

Onde N_x , N_y e N_z representam o número de voltas inteiras da fase, e são determinados pela utilização de um algoritmo de remoção de saltos de fase

Os vetores de sensibilidade formam uma base no espaço, e em relação a esta base os mesmos são unitários e ortogonais. Desta forma é válida a seguinte equação:

$$\vec{d}(x, y) = (\vec{d}(x, y) \cdot \vec{S}_x) \vec{S}_x + (\vec{d}(x, y) \cdot \vec{S}_y) \vec{S}_y + (\vec{d}(x, y) \cdot \vec{S}_z) \vec{S}_z \quad (\text{A.47})$$

Com base no valor dos vetores de sensibilidade, obtêm-se uma matriz de transformação de base, que multiplicada aos vetores de deslocamento, converte os vetores de deslocamento obtidos pela equação (A.47), para uma nova base que pode ser a base de referência adotada no experimento.

Da equação (A.47) fica claro que sendo conhecidos os vetores de sensibilidade, o cálculo dos deslocamentos depende somente da determinação da variação da fase em cada ponto com a eliminação das ambigüidades.

B. Detalhamento dos componentes especificamente projetados para a Estação Holográfica

B.1 O Chaveador de fibras ópticas.

O dispositivo tem então as seguintes características básicas:

- Número de canais : de 2 à 10
- Diâmetro máximo do Feixe LASER..... : 1,5 mm
- Excentricidade máxima permitida ao feixe laser : 0,5 mm
- Desalinhamento máximo permitido ao feixe laser : 15 mrad
- Atenuação máxima de potência óptica : -2 dB
- Massa do conjunto : 1,3 kg
- Momento aplicado na rosca de acoplamento do laser..... : 1,63 Nm
- Razão de divisão de feixe : $50 \pm 5 \%$
- Resolução de deslocamento de fase : 11.6 mrad
- Faixa de operação no deslocamento de fase : 0π à $47,41\pi$ rad
- Repetibilidade de caminho óptico no chaveamento..... : 100 nm
- Diâmetro de acoplamento das fibras ópticas..... : $4,8 \pm 0,1$ mm
- Interface com o controlador : ISA
- Fonte de alimentação externa adicional : 24 V / 2 A.
- Dimensões:

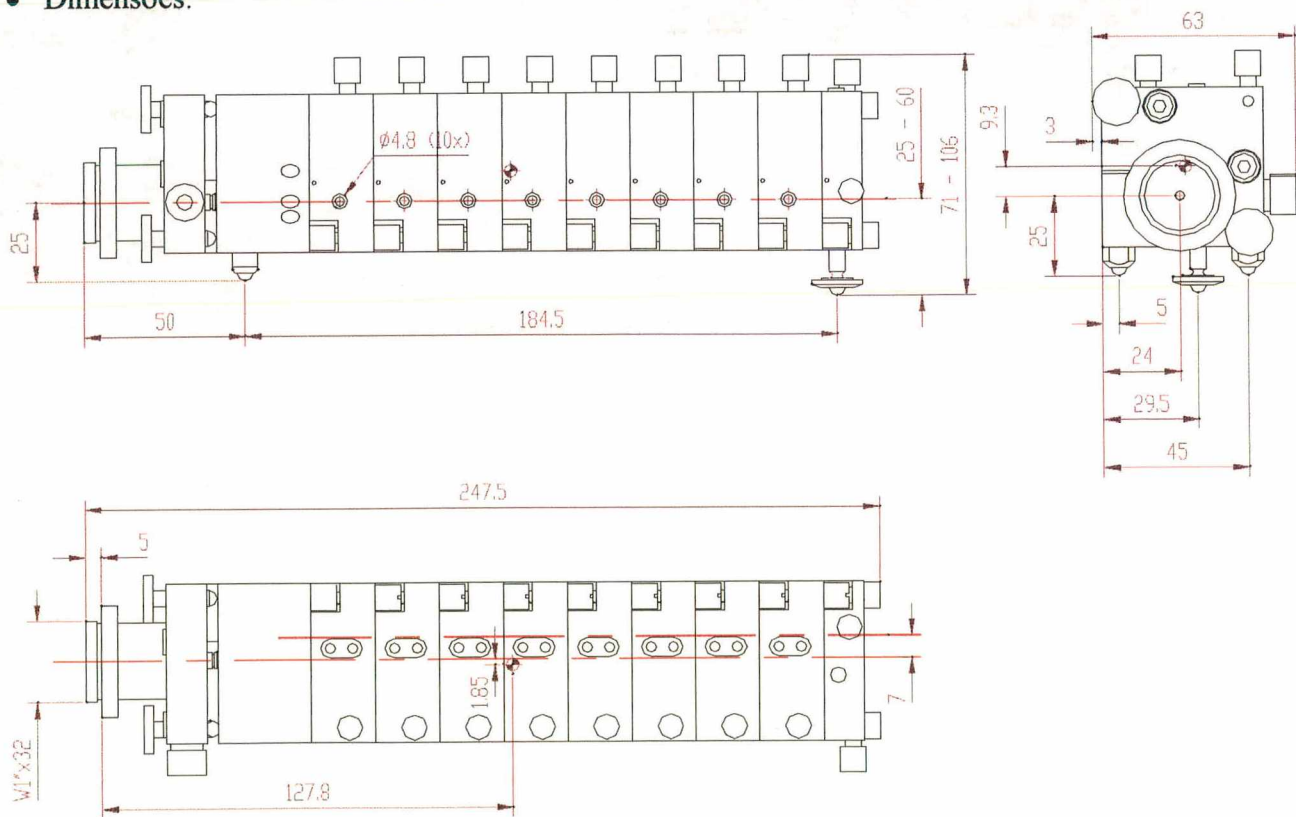


Figura B.11 Dimensões do Chaveador de Fibras Ópticas.

B.2 Dispositivos de iluminação

B.2.1 Base dos Suportes Padronizados (BSP)

Características:

- Massa..... : 1,1 kg
- Dimensões:

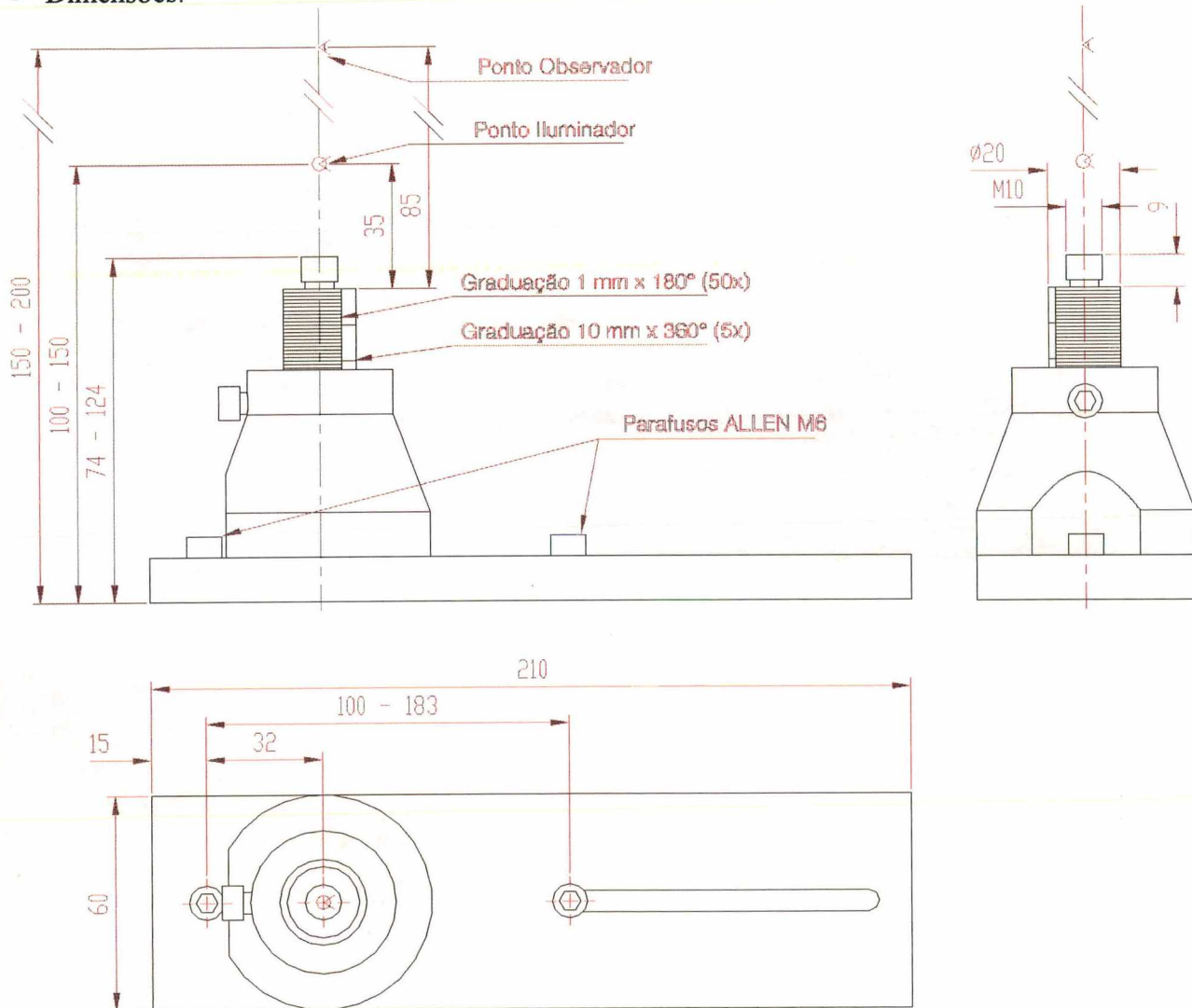


Figura B.12 Dimensões das bases dos suportes padronizados.

B.2.2 Cabeçote de Iluminação Terminal (CIT)

- Massa..... : 0,28 Kg
- Dimensões:

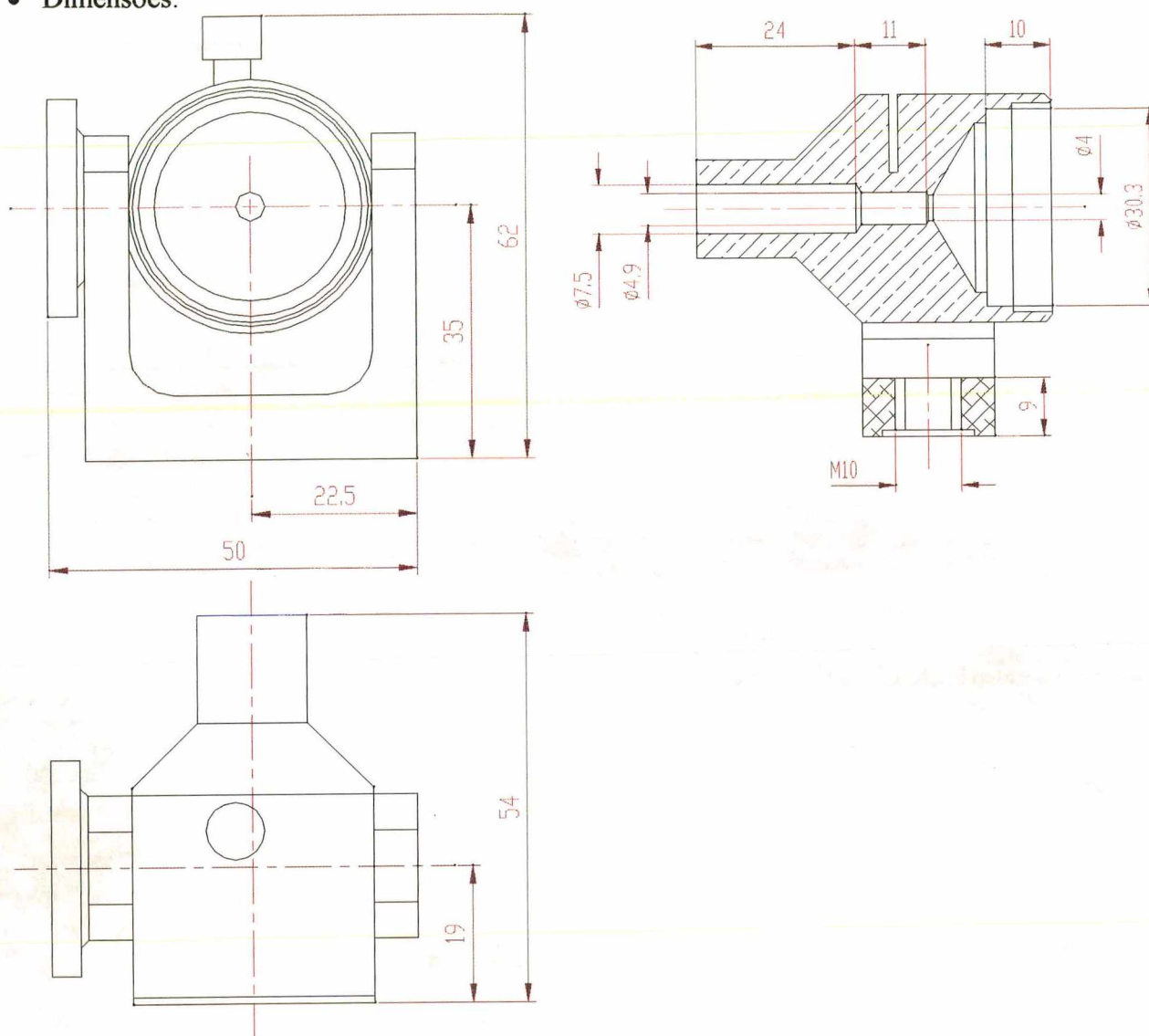


Figura B.13 Dimensões dos Cabeçotes de Iluminação Terminal

B.2.4 Hastes de Extensão (HE5 e HE10)

- Massa (50 mm) : 0,14 Kg
- Massa (100 mm)..... : 0,27 Kg
- Dimensões:

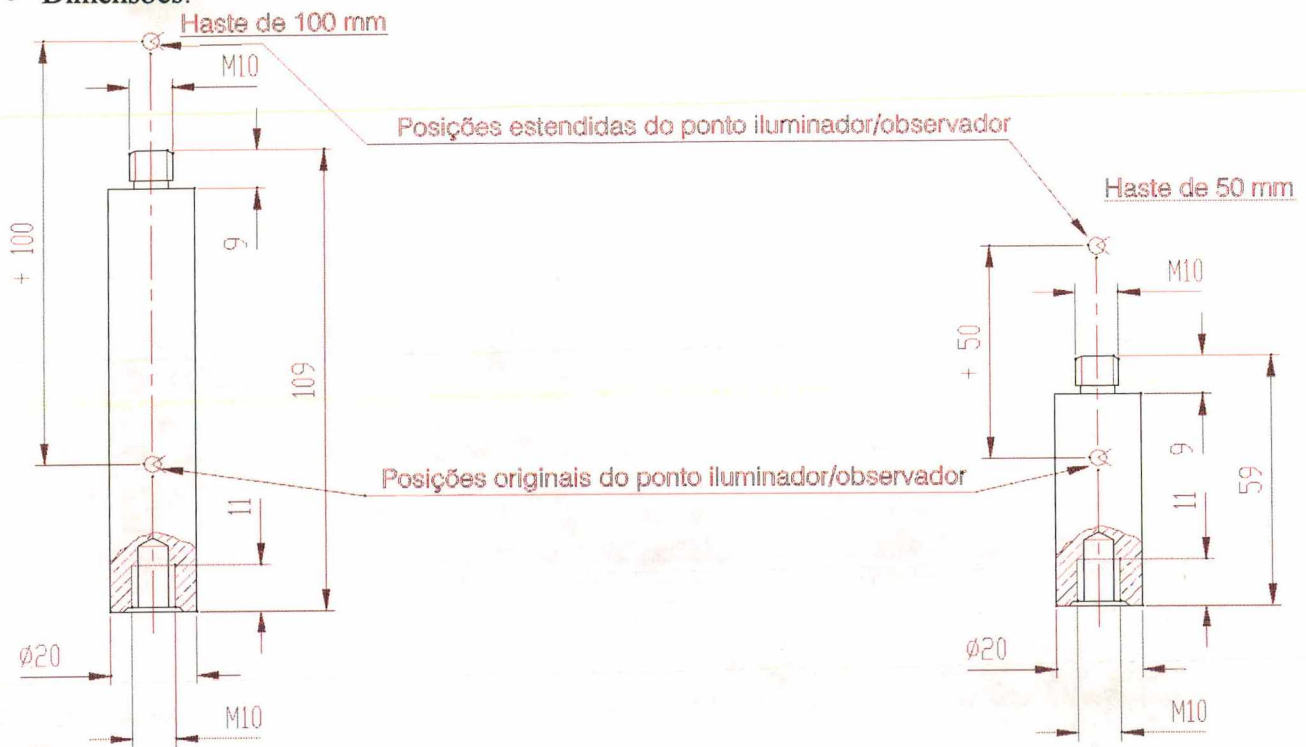


Figura B.15 Dimensões das Hastes de Extensão

B.2.5 Anel de Iluminação Ortogonal (AIO)

- Massa..... : 0,29 Kg
- Dimensões:

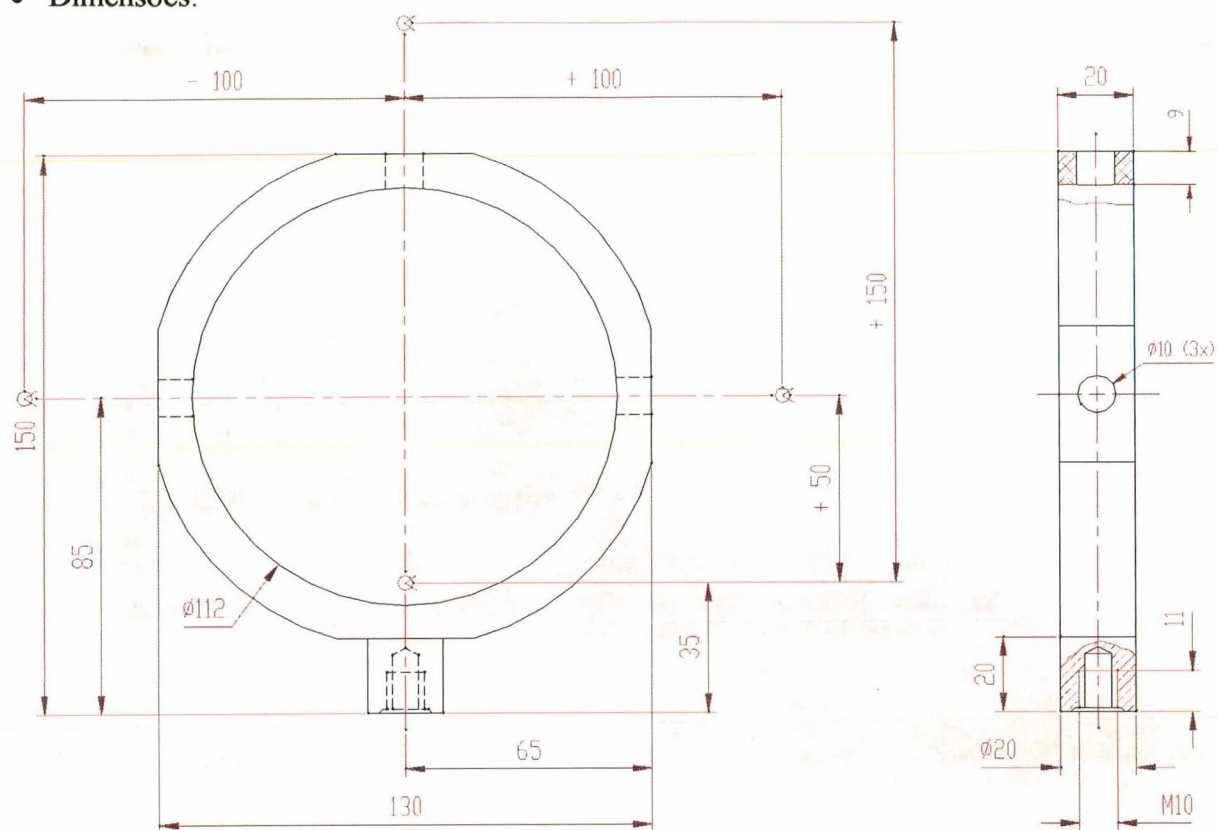


Figura B.16 Dimensões do anel de iluminação Ortogonal

B.3 Dispositivos de Observação

B.3.1 Suporte da Câmera Digitalizadora (SCD)

- Compatibilidade : COHU mod. 48xx
- Massa : 0,50 Kg
- Dimensões:

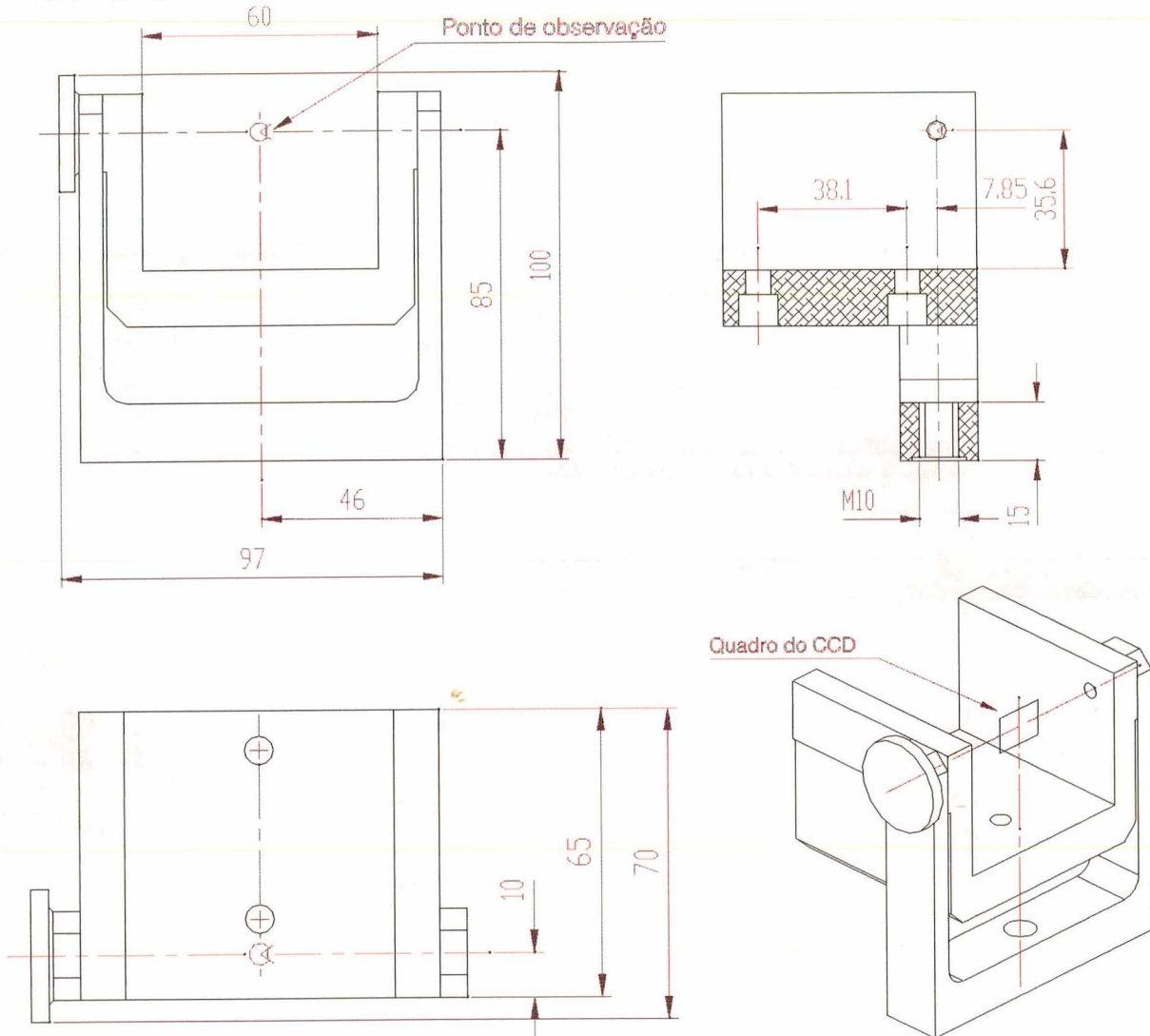


Figura B.17 Dimensões do suporte da Câmera digitalizadora.

B.3.2 Semi-espelho de Observação (SEO)

- Massa.....: 0,45 Kg
- Dimensões:

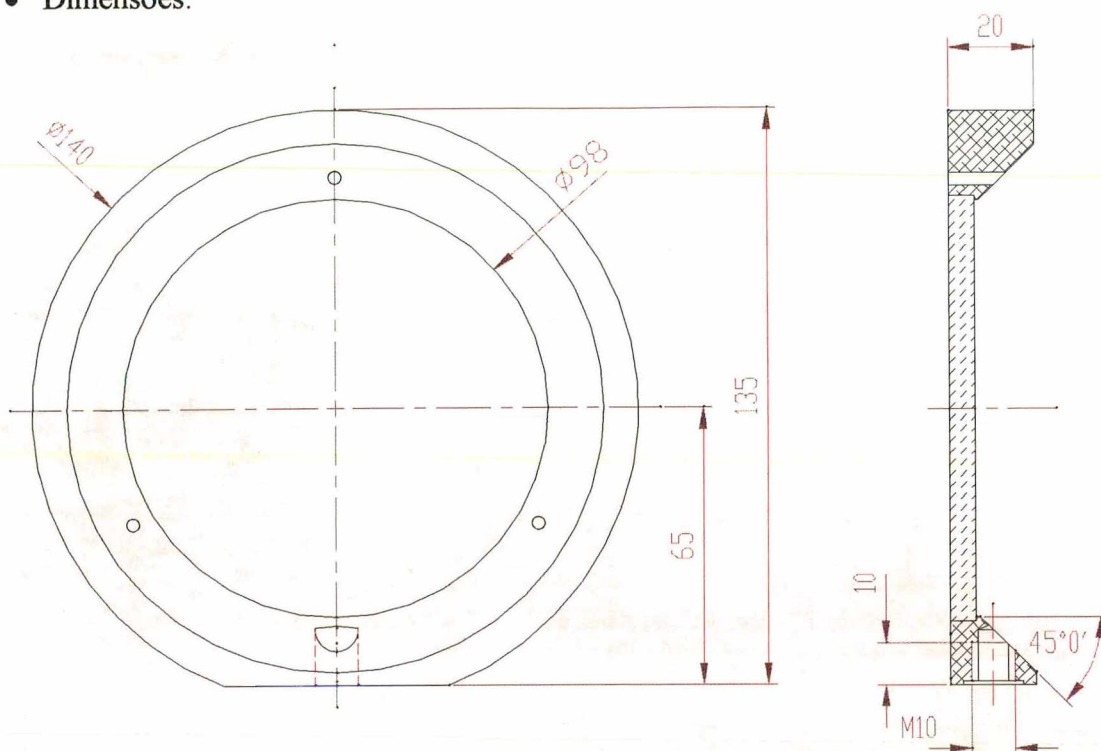


Figura B.18 Dimensões do Semi-espelho de observação