



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE METROLÓGICA DA TÉCNICA SHADOW MOIRE

ELAINE MARIA RIBEIRO

Belo Horizonte, 06 de março de 2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Elaine Maria Ribeiro

ANÁLISE METROLÓGICA DA TÉCNICA SHADOW MOIRE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica”.

Área de concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Meinhard Sesselmann – UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2006



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha – 31.270 – 901 – Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 – Fax: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E – mail: cpgmec@demec.ufmg.br

ANÁLISE METROLÓGICA DA TÉCNICA SHADOW MOIRE

ELAINE MARIA RIBEIRO

Dissertação defendida e aprovada em 06 de março de 2006, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **“Mestre em Engenharia Mecânica”**, na área de concentração de **“Projeto Mecânico”**.

Prof. Dr. Meinhard Sesselmann - Orientador

Prof. Dr. Juan Campos Rúbio - Examinador

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez - Examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar a oportunidade e força para alcançar meus sonhos.

Ao Ro que tanto me ajudou, incentivou e me deu forças em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis deste trabalho.

Ao meu orientador Professor Meinhard pela paciência, compreensão e ensinamentos.

Aos professores das matérias que cursei que de uma forma ou outra me ajudaram para poder concluir este trabalho.

Aos colegas que sempre estiveram dispostos a me ajudar quando precisei.

Meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE EQUAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	10
RESUMO	11
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Motivação	12
1.2 Objetivos	13
1.3 Sobre este trabalho	14
2 A TÉCNICA DE SHADOW MOIRÉ	15
2.1 O Princípio Ótico	15
2.1.1 Modelo Matemático	16
2.1.2 Frequência da grade (pitch)	19
2.1.3 Fonte de luz e ângulos de Iluminação e observação	21
2.1.4 O Número de ordens de franja	22
2.2 Quantificação de ordens de franja	23
2.2.1 Quantificação através do phase Shifting	23
2.2.1.1 Algoritmo de 3 passos	26
2.2.1.2 Algoritmo de 4 passos	28
2.2.1.3 Algoritmo de 5 passos	29
2.2.2 Quantificação através da contagem de franjas	31
2.2.2.1 Fringe tracking	32
2.2.2.2 Fringe skeletoning ou fringe thinning	33
2.3 Comparação de métodos	35
2.3.1 Fluxograma de Processamento	34
2.4 Sistema de processamento	39
2.4.1 Fluxograma de processamento	39
3 EXPERIMENTO EXEMPLO	40
3.1 Aplicação exemplo	40

4 ANÁLISE DE ERROS	44
4.1 Análise experimental do erro	47
4.2 Calibração do sistema de medição	49
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
6 CONCLUSÕES	54
ABSTRACT	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXO (LISTA DE TERMOS E VARIÁVEIS)	59

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Arranjo do método de shadow moiré com distâncias de câmera e luz no infinito	16
FIGURA 2.2 – Arranjo do método de shadow moiré para distâncias finitas	18
FIGURA 2.3 – Definição de Pitch	19
FIGURA 2.4 A – Fonte de luz e observador na mesma distância da grade	21
FIGURA 2.4 B – Arranjo onde a constante K é igual a 1	21
FIGURA 2.5 A – Fase com saltos	24
FIGURA 2.5 B – Fase reconstruída	24
FIGURA 2.6 – Região com formato de sela	25
FIGURA 2.7 – Interferograma conseguido com fringe tracking	33
FIGURA 2.8 – Detecção de picos de franjas por matriz	34
FIGURA 2.9 – Padrão moiré de costas humana por fringe skeletoning	35
FIGURA 2.10 – Organograma do sistema	39
FIGURA 3.1 – Pêra a ser medida	40
FIGURA 3.2 A – Foto a 0° de deslocamento	41
FIGURA 3.2 B – Foto a 90° de deslocamento	41
FIGURA 3.2 C – Foto a 180° de deslocamento	41
FIGURA 3.2 D – Foto a 270° de deslocamento	41
FIGURA 3.3 A – Seno	41
FIGURA 3.3 B – Seno filtrado	41
FIGURA 3.3 C – Coseno	42
FIGURA 3.3 D – Coseno filtrado	42
FIGURA 3.4 – Fase	42
FIGURA 3.5 A – Perfil em degradê	43
FIGURA 3.5 B – Perfil em tons de cinza	43
FIGURA 3.6 – Perfil da pêra em 3D	43
FIGURA 4.1 – Medição 3D por moiré	47
FIGURA 4.2 – Medição 2D por moiré	47

FIGURA 4.3 – Perfil 3D via software	48
FIGURA 4.4 – Perfil 2D via software	48
FIGURA 4.5 – Diferença em 3D	48
FIGURA 4.6 – Diferença em 2D	48
FIGURA 4.7 – Plano medido em 3D	50
FIGURA 4.8 – Plano medido em 2D	50
FIGURA 4.9 – Plano corrigido em 3D	50
FIGURA 4.10 – Plano corrigido em 2D	50
FIGURA 5.1 – Perfil moiré	52
FIGURA 5.2 – Perfil padrão	52
FIGURA 5.3 – Área perdida	52
FIGURA 5.4 – Reflexo na grade	52

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 2.1 – Equação principal de shadow moiré com distâncias infinitas	17
EQUAÇÃO 2.2 – Simplificação da equação 2.1	17
EQUAÇÃO 2.3 – Equação para shadow moiré com distâncias finitas	19
EQUAÇÃO 2.4 – Equação para definição do valor do pitch	20
EQUAÇÃO 2.5 – Equação para cálculo do número de ordens de franjas	22
EQUAÇÃO 2.6 – Equação da variação da intensidade das franjas	23
EQUAÇÃO 2.7 – Equação principal para detecção para 3 passos	27
EQUAÇÃO 2.8 – Equação principal para detecção para 4 passos	29
EQUAÇÃO 2.9 – Equação principal para detecção para 5 passos	30

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Escala de valores	36
TABELA 2.2 – Tabela de valores úteis	37
TABELA 2.3 – Matriz de decisão	38

RESUMO

A análise de formas tridimensionais é de grande importância para uma vasta variedade de áreas. Diversos métodos vêm sendo empregados para a determinação de perfis em 3D. As técnicas utilizadas diferem de várias formas e apresentam características e margens de erros variadas. Dentre estas técnicas se destacam as técnicas óticas, como a de moiré. O moiré é uma técnica ótica, através da qual se consegue extrair o perfil 3D de forma rápida e com bom nível de incerteza. Uma das formas de moiré muito empregado, chama-se shadow moiré. Neste trabalho foi apresentado o princípio ótico de shadow moiré, abordando suas qualidades e deficiências. Foi realizada ainda uma comparação de diversas técnicas de remoção de salto de fase, onde uma delas foi eleita no final, sendo a mesma utilizada em um experimento exemplo. Uma análise experimental dos erros da técnica foi feita, assim como uma análise detalhada de erros da medição. De forma numérica e prática. Uma discussão detalhada dos diversos parâmetros do sistema estão representados no capítulo final.

Palavras Chave: Formas livres shadow moiré, medição 3D

1) INTRODUÇÃO

1.1) Motivação

A análise de formas tridimensionais é de elevada importância para uma variedade de áreas. Na área de saúde por exemplo a avaliação de profundidade e formas tridimensionais deve ser feita constantemente durante a avaliação e o tratamento de um grande número de patologias (TAKASAKI, 1970), (YEARS et al, 2003), (ANDONIAN, 1984), (ALAN et al., 1988), (KIM et al. 2001), (BATOUCHE et al., 1996), (YOSHINO et al., 1976), etc. Na engenharia mecânica a quantificação do desgaste de peças e mudanças de formas por vários fatores, tais como temperatura ou carga, torna imprescindível a presença de uma análise quantitativa segura. Na engenharia agrícola fazem-se necessários estudos em perfis topográficos de superfícies irregulares como órgãos vegetais, superfície do solo, elementos de máquinas, etc (LINO et. al., 2004).

Inúmeros métodos são utilizados para se medir em 3D, havendo muitas diferenças entre as técnicas, tais como: fenômeno físico usado, restrições quanto ao tamanho e forma do objeto medido, erros encontrados no processo de medição, utilização ou não de contato durante o processo, velocidade de aquisição e processamento de dados, grau de automatização do sistema e, claro, o custo do sistema empregado.

Entretanto é comum em algumas áreas, principalmente na área da saúde, as avaliações serem feitas apenas de forma qualitativa, ou ainda, se quantitativas, não apresentarem dados acerca da incerteza do resultado de medição.

Medições realizadas no corpo humano, onde se tem contato direto com a região medida, muitas vezes tem grandes margens de erro. Isso se deve a pele humana ter uma consistência pouco rígida, e sofrer alterações ao menor toque, o que altera o resultado da medição.

A apresentação de dados experimentais sem estimar suas incertezas ou, pior, sem conhecer suas fontes de erros, torna qualquer técnica pouco confiável.

Na área de saúde assim como em várias outras áreas, o conhecimento dessa incerteza é imprescindível visto que em muitos casos é necessário fazer medições repetidas da mesma

superfície para efeito de comparação. Com o desconhecimento da margem de incerteza fica difícil confiar no resultado da comparação.

Por isso a utilização de uma técnica de medição sem contato, visando interferir o menos possível no que se deseja medir, rápida e com níveis de erro baixos o suficiente para a aplicação específica desejada, se torna necessária (YERAS et al, 2003).

Medições por técnicas óticas são cada vez mais empregadas no controle de qualidade na indústria. Boa parte destas técnicas tem como principal vantagem a não utilização de contato com a superfície medida. Uma outra vantagem importante em relação a técnicas clássicas de medição por contato como, por exemplo, o emprego de máquinas de medir por coordenadas (MMC), é a maior velocidade de medição. Enquanto uma MMC precisa de horas de medição para caracterizar um perfil composto por uma nuvem de milhares de pontos individuais, o mesmo pode ser efetuado em questão de segundos usando técnicas óticas. Isto é possível graças à aquisição e processamento de imagens via computador. Um paciente, por exemplo, não pode esperar horas imobilizado, submetendo-se a uma medição de parte do seu corpo. Por mais este motivo, estas técnicas óticas recebem atenção especial da área de saúde.

Dentro das técnicas óticas, a técnica moiré é especialmente interessante por se tratar de um fenômeno ótico utilizado em um grande número de processos de medição para a obtenção de valores de profundidade, forma, deslocamento, desgaste, vibração entre outros. Uma das formas de se utilizar o moiré na medição de profundidade e reconstrução de formas 3D, é através de uma técnica chamada shadow moiré. As principais vantagens do shadow moiré são simplicidade, baixo custo e margem de erro pequena o suficiente para a área de saúde. (YERAS et al, 2003).

1.2) Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o shadow moiré de forma metrológica, eleger a melhor técnica para quantificação, e realizar um experimento de demonstração empregando a técnica eleita.

A análise da técnica deve incluir:

- Análise do fenômeno físico, com atenção especial ao princípio ótico e ao modelo matemático.
- Caracterizar e estimar as prováveis fontes de incerteza do sistema empregado.

- Estudo sobre diferentes técnicas de quantificação do número de ordem de franja, com a eleição de uma delas.
- Descrição das vantagens e desvantagens da técnica escolhida em relação as demais.

1.3) Sobre este trabalho

Neste trabalho foi realizada uma análise metrológica da técnica de medição ótica chamada shadow moiré.

No capítulo é apresentada a explicação do princípio ótico usado na técnica, assim como do modelo matemático. Uma discussão sobre a frequência da grade física se dá no item 2.1.2. Nesse capítulo são discutidas ainda formas de se posicionar o sistema, e técnicas para a quantificação de franjas, explicando suas características e metodologia utilizada. Vários algoritmos são abordados neste capítulo, visando a quantificação das franjas.

No item 2.4 uma comparação entre alguns métodos de quantificação de fase é feita através de uma matriz de decisão, abordando diversas características dos sistemas.

No capítulo 3 é realizada uma análise de incerteza do sistema eleito no capítulo 2.

O capítulo 4 traz um experimento exemplo, onde é realizada a medição da superfície de uma pêra. As fases do processo são expostas através de fotografias, e é realizada ainda uma análise de erros de forma experimental.

Uma discussão dos resultados é realizada de forma ampla e abrangente no capítulo 5.

O capítulo 6 traz as conclusões do trabalho realizado.

2) A TÉCNICA DE SHADOW MOIRÉ

A técnica consiste na projeção de luz sobre uma grade de referência (grade primária, franjas primárias), com um padrão linear de linhas pretas e intervalos transparentes pré-determinados. O padrão pode ser reto ou curvilíneo, colocado de forma adjacente à superfície do objeto a ser medido. Uma fonte de luz ilumina esta grade, gerando com isso sombras destas linhas (grade secundária, franjas secundárias) na superfície do objeto. Um observador (ou câmera), recebe a luz refletida na superfície, enxergando assim a sobreposição da grade de referência com a sombra destas linhas, o que forma o chamado padrão moiré (POST et. al., 1994). As sombras sofrerão distorções de acordo com a profundidade da superfície.

Os componentes e a confecção dos módulos do sistema podem variar, dependendo de diversos fatores tais como custo, velocidade desejada na aquisição e processamento de imagens, técnicas empregadas para quantificação da fase, entre outros. Formas comuns para a observação e a aquisição do padrão moiré é através de fotos, filmes ou com um computador com uma câmera CCD (YEARS et al, 2003). A grade de referência também pode ser confeccionada de várias formas como impressa em transparência, feitas com fios de nylon, etc.

2.1) O princípio ótico

Ao contrário do que se pensa, a palavra moiré não é o nome de uma pessoa, e sim um fenômeno ótico, que os franceses batizaram desta forma ao observar os desenhos que se formavam nos tecidos trazidos da antiga China (KEPRT et. al., 1998).

Assim como descrito anteriormente, o princípio ótico é relativamente simples. O padrão moiré é formado pela sobreposição de grades, ou melhor, no caso do shadow moiré, pela sobreposição da grade com sua própria sombra. A luz que atinge a superfície do objeto e volta (passa) através dos espaços claros da grade de referência até o observador, forma a luminosidade das franjas de moiré. Por outro lado, em outros pontos, a luz que atinge a superfície do objeto e ao voltar é obstruída pelas barras opacas (negras) da grade de referência, forma as franjas negras de moiré (POST et. al., 1994).

Para facilitar o entendimento de todas as fases do processo, um experimento foi feito e explicado passo a passo no capítulo 3.

2.1.1) Modelo matemático

Em primeiro lugar é importante destacar que temos como finalidade principal medir o deslocamento perpendicular da grade em relação ao objeto, ou o deslocamento do objeto em relação a grade.

Um arranjo do método de shadow moiré é mostrado na 2.1.

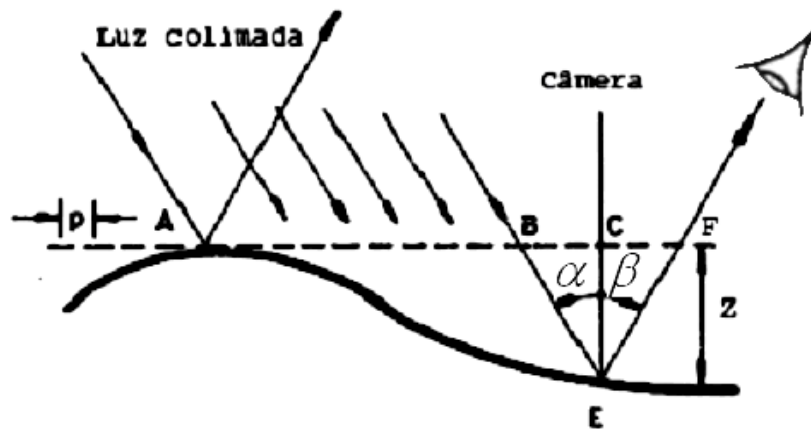


FIGURA 2.1 - Arranjo do método de shadow moiré com distância de câmera e luz no infinito
KEPRT et. al. (1998)

Por questões de simplicidade, considera-se primeiro o modelo com fonte de luz e observador no infinito. Um feixe de luz paralela incide sobre a grade de referência de pitch “p” (sendo o pitch a distância entre linhas adjacentes) em um ângulo α entre a normal e o plano da grade de referência. O perfil a ser medido deve estar logo atrás da grade de referência. As sombras geradas na peça pela grade de referência são observadas através da própria grade de referência pela câmera, a um ângulo β entre a normal e a grade de referência. As linhas contidas em $\overline{AB}$ da grade de referência formam a exata distância entre $\overline{AE}$ na superfície da estrutura. Entretanto, desde que o ponto E coincida com o ponto F no plano da imagem na visão do observador (ou câmera), as linhas contidas em $\overline{AF}$ interferem com as linhas em $\overline{AE}$ (que são as

mesmas como em $\overline{AB}$) para formar as franjas de moiré. Então $\overline{AF}$ e $\overline{AB}$ tem m e n linhas, assim temos $\overline{AF} = mp$, e $\overline{AB} = np$, de maneira que

$$\overline{BF} = \overline{AF} - \overline{AB} = (m - n) p = Np,$$

onde N é a ordem de franja no ponto F. Mas $\overline{BF} = Z (\tan \alpha + \tan \beta)$, onde Z é a distância vertical da grade plana para o ponto E. Obtemos com isso:

$$Z = \frac{Np}{\tan \alpha + \tan \beta}$$

EQUAÇÃO 2.1 – Equação principal de shadow moiré para distâncias infinitas

KEPRT et. al. (1998)

que é a equação do método. Um caso especial de interesse é quando o observador (ou câmera) está normal para a grade plana. Neste caso $\beta = 0$ e tem-se

$$Z = \frac{Np}{\tan \alpha}$$

EQUAÇÃO 2.2 – Simplificação da equação 2.1

KEPRT et. al. (1998)

Esta é a equação que tem sido usada para a maioria dos estudos de shadow moiré. A suposição do observador (ou câmera) estar no infinito não é a única prática. Entretanto, se a estrutura é pequena e o observador (ou câmera) está suficientemente distante, isso pode ser considerado, porém esta consideração não foi encontrada como uma distância exata em nenhum trabalho.

A suposição mostrada onde ambos, a fonte de luz e observador (ou câmera) estão no infinito, limita o método para somente modelos pequenos. Isso ocorre devido à dificuldade para produzir luz com campo suficientemente largo. Outro erro é considerar a luz estando no infinito quando o observador e a estrutura estão numa distância pequena entre eles ao se medir uma estrutura muito larga. Então, há a necessidade de descrever um método onde ambos, a fonte de luz e o observador (ou câmera), assumem uma distância finita da estrutura. Agora, tanto a fonte

$$Z = \frac{Np}{\tan \alpha' + \tan \beta'}$$

EQUAÇÃO 2.3 – Equação para shadow moiré com distâncias finitas

KEPRT et. al. (1998)

2.1.2) Frequência da grade (Pitch)

O pitch de uma grade de moiré é a distância entre os pontos correspondentes nas barras (ou franjas) adjacentes como mostra a fig. 2.3.

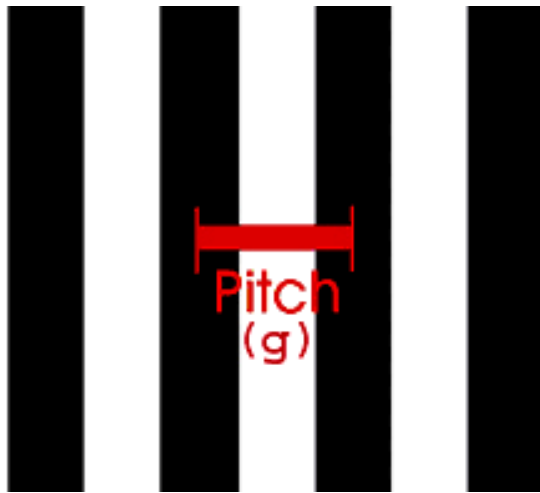


FIGURA 2.3 – Definição de Pitch(g)

Algumas literaturas trazem frequência espacial da grade ao invés de pitch. Frequência é o recíproco do pitch, ou seja, o número de barras por unidade de medida (POST et. al., 1994).

Freqüentemente as barras das grades são chamadas de linhas, então o pitch de uma grade g é a distância entre as linhas adjacentes e a frequência o número linhas por unidades de medida.

A frequência escolhida para cada experimento vai depender de diversas variáveis pois o resultado da medição depende não só da escolha do pitch, mas de todo o arranjo geométrico. Segundo TAKASAKI (1970) se a grade for muito fina pode haver difração da luz, diminuindo a visibilidade do padrão moiré, mas também se a grade for muito grossa, perde-se em definição, diminuindo assim a qualidade da medição.

Segundo POST et. al. (1994), 10 linhas / mm (250 linhas / polegada) é um exemplo comum de frequência f da grade sendo que esta frequência não exceda 40 linhas / mm (1000 linhas / polegada) para o moiré geométrico, porém mais adiante será verificado que esta frequência não serve para shadow moiré.

O autor ainda sugere uma equação para definição do padrão da grade física.

$$Z = 5\% \frac{g^2}{\lambda}$$

EQUAÇÃO 2.4 – Equação para definição do valor do pitch

POST et. al. (1994)

Onde Z é a profundidade máxima a ser medida em milímetros, g é o pitch da grade em milímetros e λ é o comprimento da fonte de luz utilizada em milímetros. Estudos realizados a priori demonstram que esta equação serve para dar uma base para a confecção da grade, mas que muitas vezes seguindo esta equação percebe-se que a região mais profunda a ser medida, se apresentar uma frequência muito alta de franjas, pode dificultar a medição. Isso pode ser corrigido alterando-se o ângulo da fonte de luz, modificando-se assim a frequência do padrão moiré, o que será tratado no próximo capítulo.

Independente do pitch escolhido para a medição, uma observação é comum entre os autores. Quanto menos próxima for a largura das franjas da grade de referência em relação à largura das franjas do padrão moiré, mais fácil será o processo de filtragem da grade de referência posteriormente. Ou seja, em uma das fases do processo de medição com o sistema moiré, a imagem da grade de referência deverá ser retirada, deixando apenas a imagem que guarda o sinal de medição, sendo o padrão moiré. Se a largura das linhas da grade de referência e do padrão moiré forem muito próximas, a dissociação entre elas torna-se muito difícil.

Uma observação importante é que as franjas de moiré tem melhor visibilidade quando a largura das barras e espaços são iguais (POST et. al., 1994).

2.1.3) Fonte de luz e ângulos de iluminação e observação

Segundo POST et. al. (1994) a escolha da fonte de luz para a utilização de moiré envolve três principais variáveis:

- O espectro, ou a banda do comprimento de onda presente na luz.
- A potência utilizada, ou energia por unidade de tempo.
- O tamanho físico, ou a área da região de emissão de luz.

O arranjo de luz colimada é o mais indicado quando se trata de luz no finito, pois se a luz não for colimada pode gerar aberrações, devido aos feixes de luz não serem paralelos. Assim se para que a luz possa ser considerada estando no infinito pode-se usar uma fonte de luz não colimada, considerando que os seus feixes de luz acabarão chegando à superfície do objeto como feixes paralelos (POST et. al. 1994).

As escolhas dos ângulos de observação e iluminação são de grande importância no resultado final da medição, pois tem papel fundamental na qualidade final do padrão moiré na técnica de shadow moiré.

Os ângulos de entrada e saída são α e β respectivamente, e ambos são positivos. POST et. al. (1994) sugerem que seja utilizado um dos dois sistemas demonstrados abaixo:

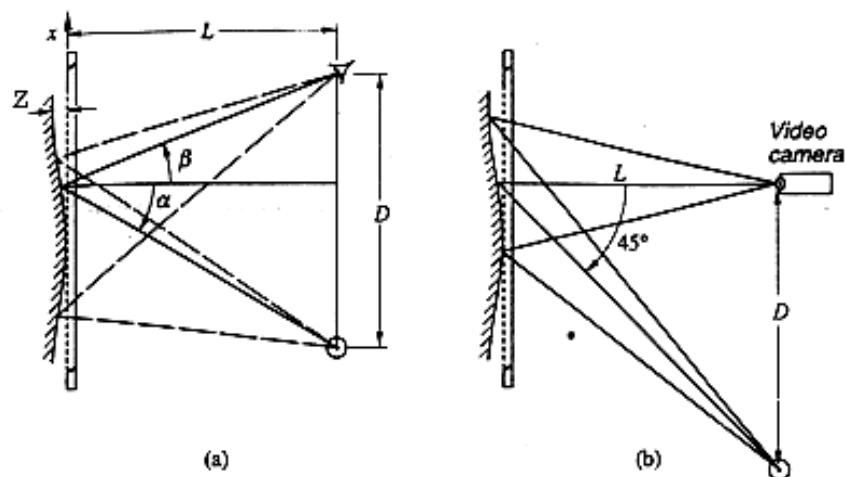


FIGURA 2.4 - Arranjos para shadow moiré sugeridos para diminuição de erros

POST et. al. (1994)

Na fig. 2.4(a) a fonte de luz e o observador estão na mesma distância do plano da grade, então Z é diretamente proporcional a ordem de franja, considerando $Z \ll L$ na prática, então Z é negligenciado.

Na fig 2.4 (b) a constante K é igual a 1, pois L tem a mesma distância que D , com isso o intervalo de contorno do padrão shadow moiré torna-se proporcional ao pitch g da grade de referência. Uma outra vantagem da fig 2.4 (b) é que o observador estando sob a normal, livra a medição de possíveis distorções.

A sensibilidade do sistema se modifica ao se alterar o ângulo de iluminação. Um aumento do ângulo de iluminação eleva também a frequência do padrão moiré observado, pois ao se aumentar esse ângulo, as linhas e espaços do padrão moiré diminuem de espessura. O contrário pode ser conseguido ao se diminuir esse ângulo.

2.1.4) O número de ordens de franja

Uma característica importante que deve ser observada ao se eleger um determinado sistema que utilize moiré, é em relação a qualidade do padrão de franjas moiré que se consegue com esse sistema. A quantidade de franjas vista no padrão moiré pode ser determinante na qualidade final da medição.

Um padrão que apresente uma frequência muito grande de franjas em algumas áreas pode tornar impossível a boa definição das ordens de franja nessa região. Porém, uma sensibilidade ruim do sistema é observada quando ocorre o contrário, ao se obter uma frequência muito pequena de franjas por área.

Até aqui foram discutidas características e arranjos geométricos importantes para extrair o padrão moiré, o qual guarda as informações do perfil em forma de um mapa de franjas moiré. Este mapa de franjas moiré contém o número N de ordem de franja para cada pixel da equação 2.1. O número N de ordem de franja é um valor racional e é calculado a partir de

$$N = \frac{\phi}{2\pi}$$

EQUAÇÃO 2.5 – Equação para cálculo do número de ordens de franja

POST et. al. (1994)

onde ϕ é a fase em radianos. Em outras palavras, uma ordem inteira de franja representa uma fase 2π rad ou 360° . Agora iremos analisar formas de se quantificar o número de ordem de franja N . Como este assunto é bastante abrangente e importante para o desenvolvimento deste trabalho, este tema será abordado em um capítulo a parte.

2.2) Quantificação da ordem de franja

Após a aquisição do padrão moiré do perfil que está sendo medido, o próximo passo para analisar a profundidade depende da quantificação correta da ordem de franja N e fase do padrão extraído. Essa quantificação pode ser feita de várias formas, e depende muito de quantos padrões moiré foram adquiridos e de qual forma. A seleção de uma franja para ser considerada a franja de ordem zero, da qual se iniciará a contagem das demais franjas é uma forma comum utilizada para a definição do perfil final.

Serão apresentados a seguir algumas das técnicas mais frequentemente usadas em combinação com o shadow moiré.

2.2.1) Quantificação através de Phase Shifting

É importante destacar que o método de análise e quantificação do mapa de fase deve ser estabelecido antes do sistema propriamente dito, pois na maioria das vezes há uma relação direta entre o posicionamento do sistema, a forma de aquisição das imagens e o número de imagens capturadas com a técnica de quantificação de fase.

Os processos de medição do formato de superfícies por técnicas interferométricas trabalham de forma geral com números de franjas que cruzam o campo da imagem. Em termos gerais essas franjas têm variação senoidal de intensidade as quais estão relacionadas à grandeza medida, comumente referidas como ângulo de fase θ onde:

$$I = A + B \cos(\theta)$$

EQUAÇÃO 2.6 – Equação da variação de intensidade das franjas

O valor de θ se estende de 2π a $n2\pi$ onde n é o número de franjas, e o valor absoluto de $n2\pi$ só pode ser descoberto se n for determinado.

Para uma análise computacional o processo de quantificação de fase pode ser complexo e variável, entretanto para qualquer medição os saltos de fase devem ser removidos.

Segundo ROBINSOM & RAID (2003) phase unwrapping é o processo pelo qual o valor absoluto do ângulo de fase de uma função contínua que se estende além de 2π (relativo a um ponto inicial predefinido) é recuperado. Esse valor absoluto é perdido quando o termo de fase é coberto por si mesmo com distâncias repetidas de 2π que tenham natureza senoidal das funções de onda usada nas medições de propriedades físicas.

A figura 2.5 ilustra a utilização do phase unwrapping.

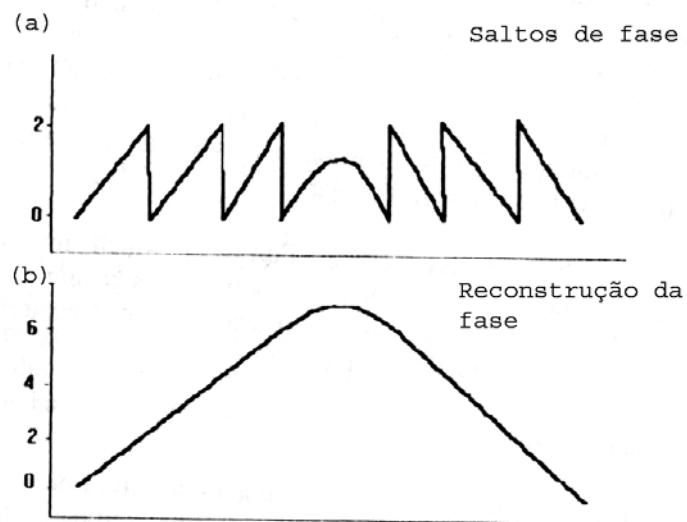


FIGURA 2.5 – Processo de reconstrução da fase
ROBINSOM & RAID (2003)

A figura 2.5(a) ilustra uma situação onde descontinuidades ocorrem a cada mudança de 2π , e a figura 2.5(b) ilustra o perfil após a remoção dos saltos de fase. Partindo do princípio de que o processo para determinação do ângulo de fase θ já removeu ambigüidades do sinal, agora quando uma fase é acrescentada a inclinação da função é positiva e o contrário ocorre ao se diminuir uma fase.

A determinação da fase é um problema geral e clássico, fundamental para a interpretação de todo interferograma envolvendo a interferência de duas funções de onda senoidais. A chave para se criar um algoritmo robusto de phase unwrapping é se preocupar com a correta detecção dos saltos de fase (ROBINSON & RAID, 2003).

Em qualquer padrão moiré, as partes de mesma altura no objeto estão representadas nas franjas como formas de colinas ou selas. O formato de sela aparece comumente nos pontos de intersecção de mesma altura, e deve-se ter muito cuidado ao se interpretar esta região na hora de somar ou subtrair a ordem de franja, principalmente em mapas de franja que não apresentem sinal (ROBINSON & RAID, 2003).

A figura 2.6 ilustra uma região onde o formato de sela pode ser visto.

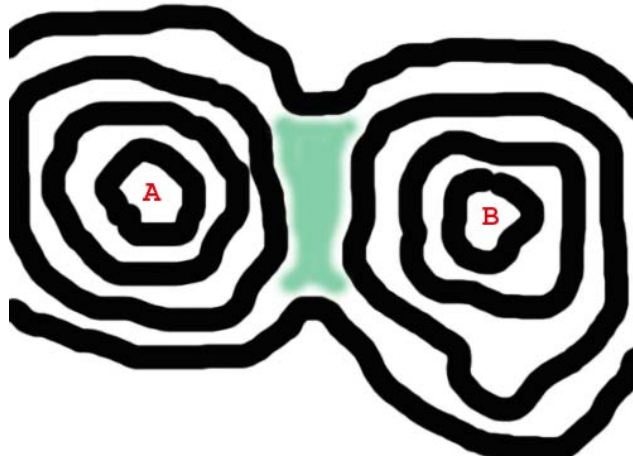


FIGURA 2.6 – Região com formato de sela

Nessa figura (fig. 2.6), a região verde ilustra o formato de sela, que se localiza entre os picos ou vales A e B. Qualquer algoritmo com o propósito de detecção de saltos de fase que realize uma leitura no sentido A para B ou de B para A deve ser cuidadoso ao passar por essa região. Ao atravessar a área que apresenta o formato de sela, o sinal da fase deve mudar, ou seja, se o algoritmo somava fases ao se deslocar de A para B, após passar pelo formato de sela ele deverá então subtrair uma fase a cada salto, o que muda completamente o formato do perfil final.

Para muitas técnicas os algoritmos não são capazes de fazer o reconhecimento dessas regiões de forma totalmente automática, sendo necessário fornecer dados do perfil manualmente, como por exemplo, regiões que devem ser interpretadas como picos ou vales, ou fases que forcem as mudanças de sinal, como no caso das regiões com formatos de sela.

Uma outra importante fonte de erro que ocorre na fase de detecção e resolução dos saltos de fase se dá em função da presença de ruídos.

Um importante aspecto desse tipo de análise é que a fase é determinada independente de cada ponto, ou seja, não é necessária a comparação de dados de outras partes da imagem. Isso

significa que descontinuidades que possam aparecer no padrão de franjas serão corretamente interpretadas e ambigüidades serão resolvidas automaticamente.

Uma grande vantagem ao se utilizar o phase shifting juntamente com o shadow moiré, é que por essa técnica o conhecimento a priori do perfil medido não se faz necessário.

2.2.1.1) Algoritmo de 3 passos

Um mínimo de três posições de dados de franjas gravadas são necessários para reconstruir uma frente de onda e solucionar sua posição (ROBINSON et al, 2003).

Então a fase pode ser calculada de um deslocamento de fase de $\frac{\pi}{2}$ (90 °) por exposição com $\alpha_i = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}$ e $\frac{5\pi}{4}$. As três intensidades medidas de um simples ponto de um interferograma podem ser expressadas por:

$$I_1 = I_0 \left[1 + \gamma \cos \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \right] = I_0 \left[1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \gamma (\cos \theta - \sin \theta) \right]$$

$$I_2 = I_0 \left[1 + \gamma \cos \left(\theta + \frac{3\pi}{4} \right) \right] = I_0 \left[1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \gamma (-\cos \theta - \sin \theta) \right]$$

$$I_3 = I_0 \left[1 + \gamma \cos \left(\theta + \frac{5\pi}{4} \right) \right] = I_0 \left[1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \gamma (-\cos \theta + \sin \theta) \right]$$

A dependência (x,y) têm sido abandonada; entretanto elas ainda estão embutidas. Quando passos discretos são usados, $\gamma = \gamma_0$, e quando a fase é completada com um deslocamento de fase de $\frac{\pi}{2}$ por frame, $\gamma = 0.9\gamma_0$. O complemento da fase produz um efeito muito pequeno para um deslocamento de fase de $\frac{\pi}{2}$ por exposição. Dessa forma, deslocar linearmente o modificador

de fase enquanto se realizam as medições, faz mais sentido do que andar passo a passo e esperar para a referência do feixe de luz se posicionar.

A fase de cada ponto é então simplificado

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} \right)$$

EQUAÇÃO 2.7 – Equação principal para detecção por 3 passos
ROBINSON et. al. (2003)

Onde o numerador e o denominador da equação 2.7 é dado por

$$I_3 - I_2 = \sqrt{2} I_0 \gamma \sin \theta$$

$$I_1 - I_2 = \sqrt{2} I_0 \gamma \cos \theta$$

E a visibilidade da franja detectada é

$$\gamma = \frac{\sqrt{(I_3 - I_2)^2 + (I_1 - I_2)^2}}{\sqrt{2} I_0}$$

Se um deslocamento de α é usado, a medição das três intensidades torna-se

$$I_1 = I_0 [1 + \gamma \cos(\theta - \alpha)]$$

$$I_2 = I_0 [1 + \gamma \cos \theta]$$

$$I_3 = I_0 [1 + \gamma \cos(\theta + \alpha)]$$

A fase pode ser calculada usando

$$\theta = \tan^{-1} \left[\left(\frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} \right]$$

onde o numerador e o denominador são dados por

$$I_1 - I_3 = 2I_0 \gamma \sin \theta \sin \alpha$$

$$2I_2 - I_1 - I_3 = 2I_0\gamma \cos\theta(1 - \cos\alpha)$$

A visibilidade da franja detectada para o deslocamento de fase α geral é

$$\gamma = \frac{\sqrt{[(1 - \cos\alpha)(I_1 - I_3)]^2 + [\text{sen}\alpha(2I_2 - I_1 - I_3)]^2}}{2I_0\text{sen}\alpha(1 - \cos\alpha)}$$

Quando $\alpha = \frac{2\pi}{3}$ (120°). $\gamma = 0.83\gamma_0$ para integrar um deslocamento de fase de $\frac{2\pi}{3}$ e pode ser escrito como

$$\theta = \tan^{-1}\left(\sqrt{3}\frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3}\right)$$

A visibilidade da franja detectada para um deslocamento de fase de $\frac{2\pi}{3}$ é

$$\gamma = \frac{\sqrt{3(I_1 - I_3)^2 + (2I_2 - I_1 - I_3)^2}}{3I_0}$$

2.2.1.2) Algoritmo de 4 passos

Um algoritmo comum para cálculo de fase, é o utilizado em medições por quatro deslocamentos.

As quatro intensidades medidas podem ser expressas por:

$$I_1 = I_0[1 + \gamma \cos\theta]$$

$$I_2 = I_0\left[1 + \gamma \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)\right] = I_0[1 - \gamma \text{sen}\theta]$$

$$I_3 = I_0[1 + \gamma \cos(\theta + \pi)] = I_0[1 - \gamma \cos\theta]$$

$$I_4 = I_0 \left[1 + \gamma \cos \left(\theta + \frac{3\pi}{2} \right) \right] = I_0 [1 + \gamma \sin \theta]$$

onde $\alpha_1 = 0, \frac{\pi}{2}, \pi$ e $\frac{3\pi}{2}$. $\gamma = \gamma_0$ para o passo de fase e $0.9\gamma_0$ quando a fase é completada

$\Delta = \frac{\pi}{2}$. A fase de cada ponto é

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right)$$

EQUAÇÃO 2.8 – Equação principal para detecção por 4 passos

ROBINSON et. al. (2003)

e a franja detectada é calculada de

$$\gamma = \frac{\sqrt{(I_4 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2}}{2I_0}$$

2.2.1.3) Algoritmo de 5 passos

Outra técnica que utiliza deslocamento de fase de $\frac{\pi}{2}$ (90°) para minimizar erros na calibração da fase será descrito agora. Esse algoritmo foi criado visando reduzir a possibilidade de se ter um numerador e um denominador tendendo a zero e com isso visando diminuir a incerteza no cálculo final. Esse algoritmo utiliza cinco intensidades com deslocamentos de fase próximos de α

$$I_1 = I_0 [1 + \gamma \cos(\theta - 2\alpha)]$$

$$I_2 = I_0 [1 + \gamma \cos(\theta - \alpha)]$$

$$I_3 = I_0 [1 + \gamma \cos \theta]$$

$$I_4 = I_0[1 + \gamma \cos(\theta + \alpha)]$$

$$I_5 = I_0[1 + \gamma \cos(\theta + 2\alpha)]$$

Essas equações podem ser combinadas para formar

$$\frac{I_1 - I_4}{2I_3 - I_5 - I_1} = \frac{\sin \alpha \sin \theta}{(1 - \cos 2\alpha) \cos \theta}$$

Quando $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (deslocamento de fase de 90°) a equação anterior pode ser reduzida para $\frac{1}{2} \tan \theta$.

Nessa situação as cinco intensidades podem ser reescritas como

$$I_1 = I_0[1 - \gamma \cos \theta]$$

$$I_2 = I_0[1 + \gamma \sin \theta]$$

$$I_3 = I_0[1 + \gamma \cos \theta]$$

$$I_4 = I_0[1 - \gamma \sin \theta]$$

$$I_5 = I_0[1 - \gamma \cos \theta]$$

onde os deslocamentos de fase são de $-\pi$, $-\frac{\pi}{2}$, 0 , $\frac{\pi}{2}$ e π . O cálculo de fase para essas intensidades é dada por

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right]$$

EQUAÇÃO 2.9 – Equação principal para detecção por 5 passos

Robinson et. al. (2003)

Esse é um cálculo simples que permite boa tolerância para erros de calibração do deslocamento de fase. Para essa técnica a franja detectada é calculada por

$$\gamma = \frac{\sqrt{[2(I_2 - I_4)]^2 + (2I_3 - I_5 - I_1)^2}}{4I_0}$$

2.2.2) Quantificação através da contagem de franjas

Essas são formas tradicionais de análise de interferogramas, as quais geralmente trabalham com a necessidade de identificação e ordenação dos centros das franjas. Isso resulta em uma precisão bem inferior em comparação a precisão obtida na maioria dos dados interferométricos.

O problema na precisão ocorre principalmente, pois mesmo com a mais avançada técnica de processamento de imagem digital, a determinação precisa dos centros das franjas é difícil e sujeita a muitas fontes de erros. Uma outra característica desses métodos é que eles geralmente requerem a ordenação manual das franjas, o que torna impossível a dedução automática de regiões côncavas ou convexas (PERRY et al., 1993).

A localização da franja de ordem zero no padrão moiré pode ser selecionada arbitrariamente pela maior parte dos métodos de contagem de franjas. Após escolher a ordem de franja zero, o problema seguinte é saber se a franja vizinha significa aumento ou diminuição do perfil.

Deve-se destacar que as franjas vizinhas são sempre diferentes para mais ou menos uma ordem de franja, e que ordens de franjas diferentes não se intersectam. Como mencionado anteriormente, o conhecimento ou dedução da geometria, ou o comportamento do objeto a ser medido, muitas vezes é necessário para se medir com vários tipos de moiré. Em alguns métodos é imprescindível o conhecimento prévio do formato do objeto ou do comportamento das franjas a determinados tipos de sobrecarga para uma correta análise das franjas (POST et. al., 1994).

Uma das dificuldades comuns levantadas por PERRY et al. (1993) envolvendo esse tipo de análise ocorre quando o padrão de franjas possui descontinuidades e ou limites internos.

Algumas formas de se medir estruturas utilizando a contagem de franjas serão citadas nos itens seguintes.

2.2.2 1) Fringe tracking

Fringe tracking é uma operação padrão no processamento de imagens digitais.

Essa técnica envolve a procura do lugar da franja máxima ou mínima através do exame dos valores do pixel em todas as direções do ponto de partida (frequentemente determinado manualmente) e movendo o local do pixel na direção adiante, na qual a soma de intensidade é maximizada ou minimizada ou ainda o gradiente é o mínimo. Dessa forma apenas um grupo limitado da imagem inteira é examinado (por exemplo: os pixels que estão próximos ou em volta do centro das linhas das franjas.). (GASVIK, 1995).

Essa é uma técnica que requer pequeno ou nenhum conhecimento do padrão das franjas e tem a principal característica de permitir uma verificação simples do algoritmo de fringe tracking através da comparação de uma representação gráfica da forma das franjas com o interferograma original.

Os métodos de fringe tracking seguem alguns procedimentos (GASVIK, 1995):

- a- filtrar a imagem;
- b- ajustar ou adaptar curvas para os dados de intensidade com o objetivo de interpolação entre os centros das franjas, ou identificar e traçar a intensidade máxima e ou mínima com objetivo de eskeletonizar(transformar em branco ou preto, dependendo dos valores, máximo ou mínimo, escolhido a priori) o padrão e através disso minimizar a quantidade de dados que serão processados.
- c- numerar as franjas de forma interativa ou automática
- d- calcular o valor da medição pelos dados do padrão de franja

Abaixo segue um exemplo de rastreamento do padrão moiré conseguido através do processo de fringe tracking.

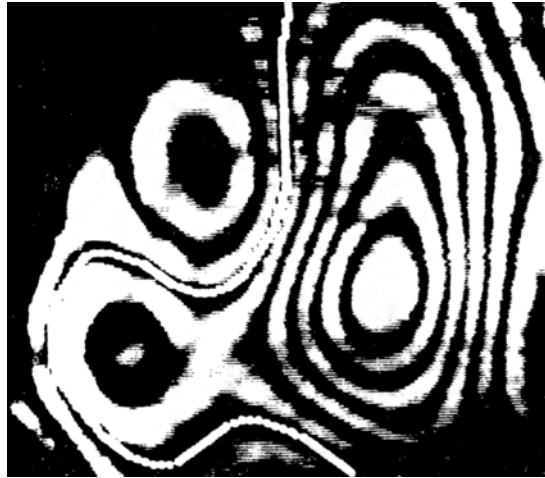


FIGURA 2.7 – Interferograma conseguido com fringe tracking
Gasvik (1995)

2.2.2.2) Fringe skeletonizing ou fringe thinning

As técnicas de thinning e skeletonizing são formas muito semelhantes ao processo de tracking para detectar picos de franjas (ou mínimos), mas ao invés de seguir os picos com um pixel que se desloca, a imagem toda é sujeita a detecção de pico por matriz.

YATAGAI et al (1982) usou uma detecção de pico bidimensional.

Executado localmente com uma matriz de 5/5 pixel como mostrado na figura 2.8(a). Em relação às quatro direções mostradas na figura 2.8(b) às condições de pico são definidas como:

$$P_{00} + P_{0-1} + P_{01} > P_{-21} + P_{-20} + P_{-2-1}$$

$$P_{00} + P_{0-1} + P_{01} > P_{21} + P_{20} + P_{2-1}$$

Para a direção X com expressões similares para a direção e Y e direções XY e YX. Quando as condições de pico são satisfeitas para qualquer das duas ou mais direções o ponto analisado é reconhecido como um ponto no esqueleto de franja (GASVIK, 1995).

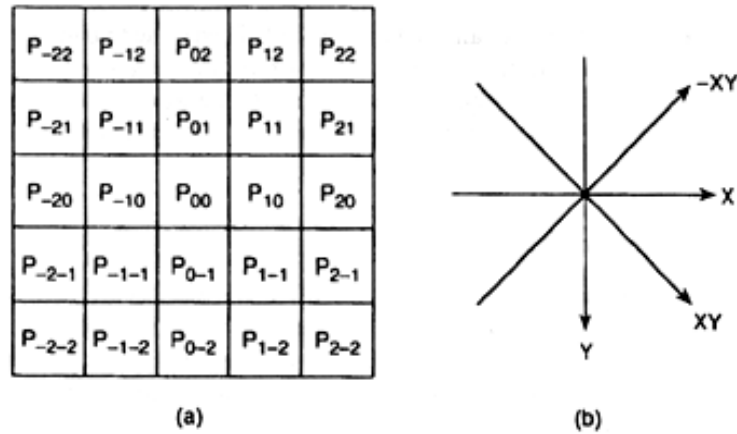


FIGURA 2.8 – Detecção de picos de franjas por matriz

Gasvik (1995)

No fringe skeletoning a imagem é reduzida a um valor 0 onde os picos não existem e a 1 onde o pico é encontrado (ROBINSON et al., 2003).

A figura 2.9 ilustra o rastreamento das franjas pela técnica de fringe skeletoning realizado por Batouche et al. (1996).

No seu trabalho o autor levanta as dificuldades em relação à correta detecção de franjas, e as ambigüidades causadas por franjas de mesma ordem. O trabalho destaca ainda a necessidade de se ter um conhecimento a priori do perfil que está sendo medido. Esse conhecimento é imprescindível, pois em determinada fase do experimento as regiões mais altas do perfil devem ser informadas manualmente ao programa de análise.

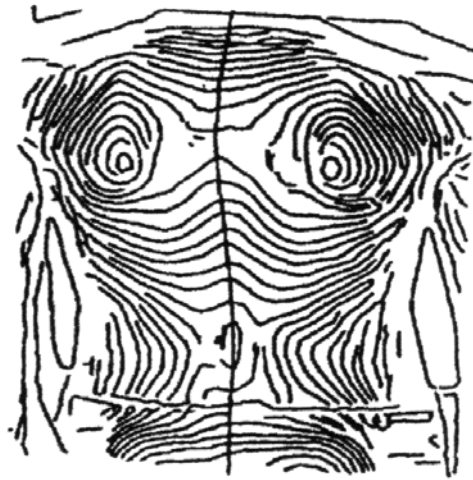


FIGURA 2.9: Padrão moiré de costas humanas conseguido por técnica de fringe skeletoning
Batouche et al. (1996)

2.3) Comparação de métodos

Uma comparação entre alguns métodos comuns utilizados para contagem das franjas e remoção do salto de fase foi realizada levando-se em conta alguns parâmetros. A matriz de decisão foi levantada partindo do pressuposto que se realizaria a medição de alguma parte do corpo humano.

A tabela abaixo representa a pontuação que deve ser utilizada na tabela 2.2 com os respectivos valores úteis de cada item. Após a conclusão da tabela 2.2 com os valores úteis, uma nova tabela, a tabela 2.3 (matriz de decisão) foi criada com o significado de cada valor útil, apresentando ainda o valor final para a eleição da técnica mais adequada, após a multiplicação pelos pesos de cada item.

ESCALA DE VALORES			
<i>Pt.</i>	<i>Análise de valor útil Significado</i>	<i>Pt.</i>	<i>Diretriz VDI 2225 Significado</i>
0	Solução absolutamente não utilizável	0	insatisfatória
1	Solução muito deficiente	1	solução ainda sustentável
2	Solução fraca		
3	Solução sustentável		
4	Solução suficiente	2	suficiente
5	Solução satisfatória		
6	Solução boa com poucas falhas	3	boa
7	Solução boa		
8	Solução muito boa	4	muito boa (ideal)
9	Solução excedendo os requisitos		
10	Solução ideal		

TABELA 2.1 – Escala de valores

PAHL et. al. (2005)

Todos os itens foram considerados com peso 1, com exceção da velocidade geral do processo, da capacidade de automação e da sensibilidade do sistema que tiveram peso 2. Isso se explica pela necessidade destes itens serem de grande importancia para a medição do mensurando em questão. Na medição de corpos vivos é de grande importância a velocidade na medição (visto a dificuldade dos pacientes ficarem longos períodos imóveis), o que depende em grande parte de automação, e ainda a necessidade de uma sensibilidade razoável na medição.

Método	Skeletonizing	Tracking	3 passos	4 passos	5 passos
Custo	5	5	3	3	3
Velocidade geral do processo	2	2	7	6	4
Simplicidade do algoritmo	7	7	7	7	7
Necessidade de conhecimento do perfil a priori	1	1	8	8	8
Sensibilidade do sistema	3	3	7	8	9
Capacidade de automação	2	2	9	9	9

TABELA 2.2 – Tabela de valores úteis

No primeiro item da matriz de decisão, o custo, os processos que utilizam mais de um passo levam desvantagem em função da necessidade de uma guia para a realização dos deslocamentos. Essa guia encarece o projeto.

No segundo item, na velocidade geral do processo, as formas que utilizam deslocamento de fase levam grande vantagem em relação aos processos de tracking e skeletoning, pois não necessitam da interferência humana durante o processo. Nos processos onde não se tem os deslocamentos, e se adquire apenas uma foto, não se tem o sinal, ou seja, não se sabe de forma automática quando o perfil sobe ou desce, e isso deve ser informado manualmente, retardando o processo.

Foi considerado como iguais a simplicidade dos algoritmos, isso se deve pelo fato da enorme velocidade e capacidade de cálculo dos computadores de hoje. Qualquer diferença de tempo para cálculo entre as equações pode ser considerada desprezível. Por esse motivo todas as técnicas receberam a mesma pontuação.

No item “necessidade de conhecimento do perfil a priori”, provavelmente é onde fica mais claro a enorme vantagem do uso dos sistemas com deslocamento de fase. Nos sistemas de

tracking e skeletoning, é imprescindível se conhecer a natureza do perfil medido, o que desvaloriza muito essas técnicas para uma infinidade de medições.

No quesito sensibilidade do sistema, uma maior sensibilidade é assegurada nos processos por deslocamento, pois não se descartam pixels (que é o que ocorre no processo de binarização dos sistemas tracking e skeletoning.), e a sensibilidade aumenta de acordo com o número de fotografias. Quanto mais fotografias forem retiradas maior será a sensibilidade e menor o erro na medição.

No último item, a capacidade de automação, também foi dada uma importância maior visto que em medições em corpos humanos, a realização de medições rápidas e automatizadas se fazem necessárias. Mais uma vez, nos processos que utilizam os deslocamentos de fase, é possível se conseguir o resultado da medição sem interferências durante o processo. Nos outros dois sistemas estudados, a necessidade do conhecimento do perfil a priori, principalmente no que se refere a regiões que apresentam picos e vales, atrasa o processo, pois depende da interferência humana, não permitindo uma completa automatização.

Método	Peso	Skeletonizing	Tracking	3 passos	4 passos	5 passos
Custo	1	2	2	1	1	1
Velocidade geral do processo	2	2	0	6	6	4
Simplicidade do algoritmo	1	3	3	3	3	3
Necessidade de conhecimento do perfil a priori	1	0	0	4	4	4
Sensibilidade do sistema	2	2	2	6	8	8
Capacidade de automação	2	2	2	8	8	8
Total	X	11	9	28	30	28

TABELA 2.3 – Matriz de decisão

Houve portanto uma ligeira vantagem na pontuação do sistema que utiliza 4 deslocamentos de fase em relação aos outros sistemas de deslocamento de fase. Por esse motivo optou-se por esse sistema. Essa decisão foi tomada principalmente por mais dois motivos. Deixa-se de tirar uma foto a mais em relação ao sistema de 5 deslocamentos, o que torna o sistema um pouco mais simples, e ao mesmo tempo tiramos uma foto a mais em relação ao sistema de 3 deslocamentos, o que melhora a sensibilidade do sistema. Por isso opta-se por um meio termo, no que diz respeito aos processos de deslocamento de fase.

2.4) Sistema de processamento

O sistema de processamento de imagem foi todo programado utilizando-se as plataformas matlab e visual basic. O trabalho foi realizado utilizando-se sempre 4 imagens (uma para cada deslocamento de fase) estando todas no formato TIFF e em tons de cinza.

2.4.1) Fluxograma de processamento

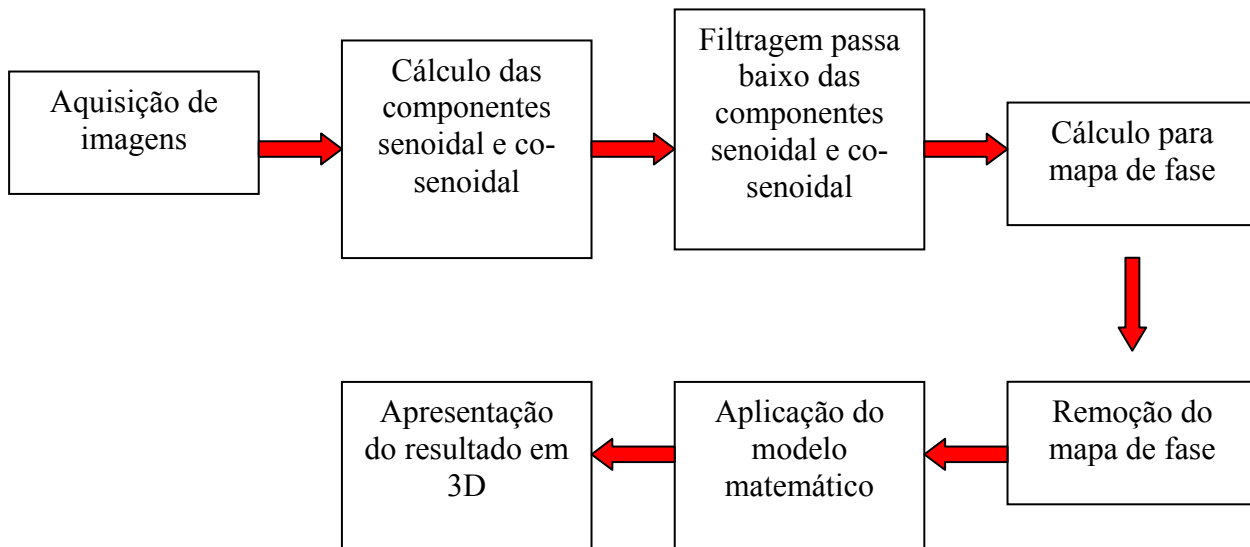


FIGURA 2.10: Organograma do sistema

3) EXPERIMENTO EXEMPLO

3.1 Aplicação exemplo

Neste capítulo foi realizado um experimento exemplo para ilustrar todas as fases do processo escolhido no capítulo anterior para a extração do perfil 3D. Uma pêra (figura 3.1) foi escolhida como objeto de medição exemplo onde todas as etapas foram cuidadosamente ilustradas.

Para todo o processo de medição foi utilizado conforme a técnica eleita anteriormente o algoritmo de deslocamento de 4 passos.

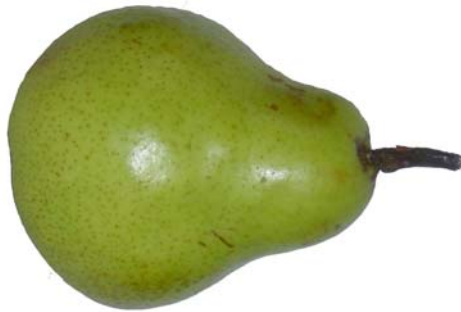


FIGURA 3.1 – Pêra a ser medida

Quatro fotografias foram feitas com deslocamentos de 90° de fase entre elas. As figuras 3.2 (A,B,C e D) demonstram a diferença no posicionamento das franjas de moiré para cada fase de deslocamento (0° , 90° , 180° , 270°). O arranjo utilizado para esse experimento exemplo, foi o seguinte: Da câmera fotográfica até a grade de franjas a distância foi de 1000 mm, da câmera fotográfica até a fonte de luz a distância foi de 250 mm.

O pitch utilizado foi de 1mm, e antes de cada fotografia a grade foi cuidadosamente deslocada, ou seja, após ser retirada a fotografia da pêra a 0° , a grade foi deslocada 90° (ou seja, 1 mm para este arranjo) em direção a máquina fotográfica para a segunda foto ser feita. Esse mesmo deslocamento foi realizado para a obtenção das outras duas fotos.

Após a aquisição das fotos mostradas abaixo, uma série de cálculos foi realizada com as mesmas.

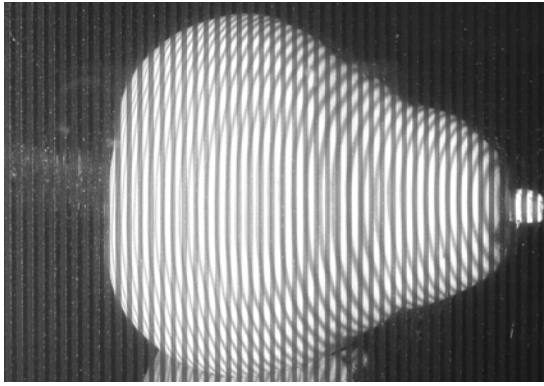


FIGURA 3.2 A) Foto a 0° de deslocamento

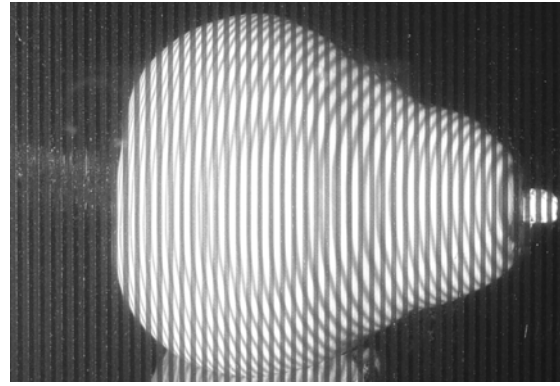


FIGURA 3.2 B) Foto a 90° de deslocamento

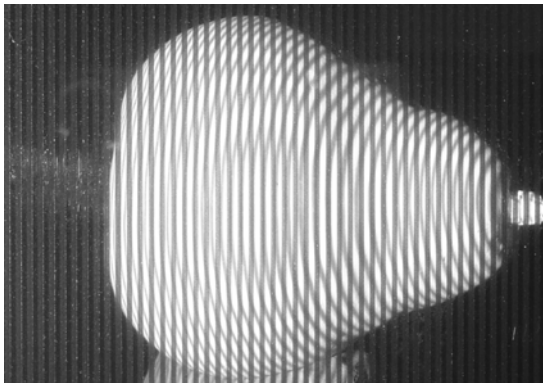


FIGURA 3.2 C) Foto a 180° de deslocamento

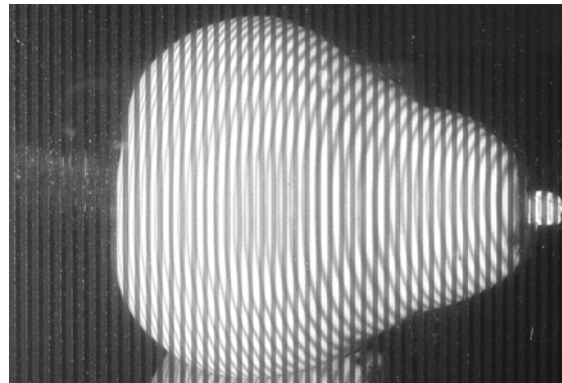


FIGURA 3.2 D) Foto a 270° de deslocamento

Após a subtração das imagens 3.2 D e 3.2 C, obteve-se a imagem 3.3 A. Essa imagem representa a componente senoidal do calculo de fase do perfil da pêra. Após uma filtragem para eliminação de ruídos e de franjas de alta frequência espacial obteve-se a imagem 3.3 B.

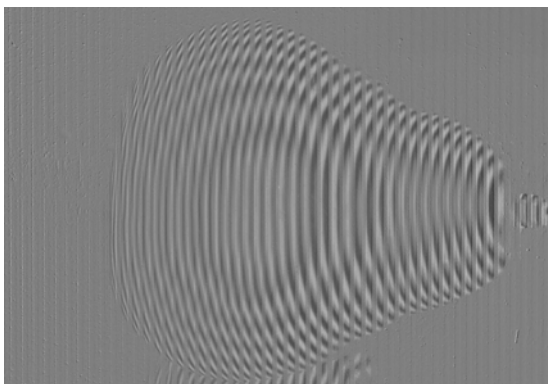


FIGURA 3.3 A) Seno

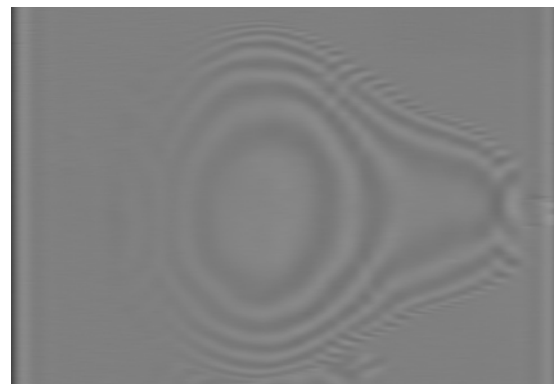


FIGURA 3.3 B) Seno Filtrado

O mesmo foi feito com a figura 3.2A e 3.2C, onde se obteve a figura 3.3.C (componente co-senoidal do calculo de fase do perfil da p ra).Após a filtragem obteve-se a imagem da fig 3.3D.

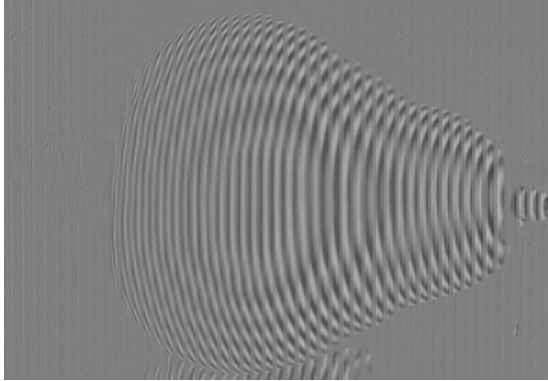


FIGURA 3.3 C) Coseno

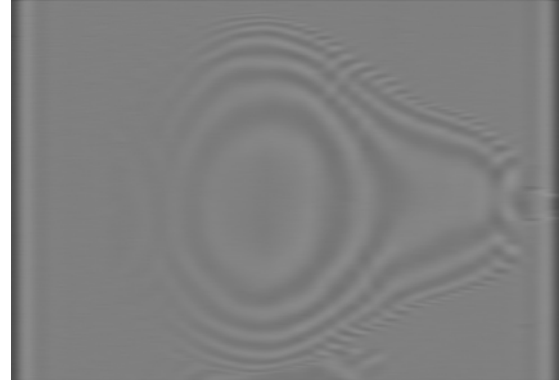


FIGURA 3.3 D) Coseno Filtrado

Finalmente a figura 3.4 demonstra a p ra com saltos de fase porem com variações de tons de cinza.   nesse ponto que o algoritmo escolhido se mostra extremamente eficiente. Ele detecta automaticamente grandes variações nas intensidades de pixels, e com isso ele soma ou subtrai o perfil dependendo do caso, eliminando gradativamente o problema dos saltos de fase sem perder informa   .

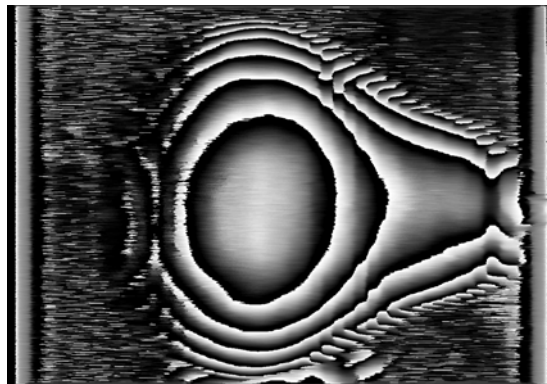


FIGURA 3.4 – Fase

Durante esse processo de resolu    dos saltos de fase, ele passa por duas etapas ilustradas nas figuras seguintes. Na figura 3.5.A ele apresenta o perfil com tons de cinza de forma degrad  , para posteriormente (figura 3.5.B) finalmente apresentar o perfil da p ra apenas em tons de cinza sem saltos de fase.

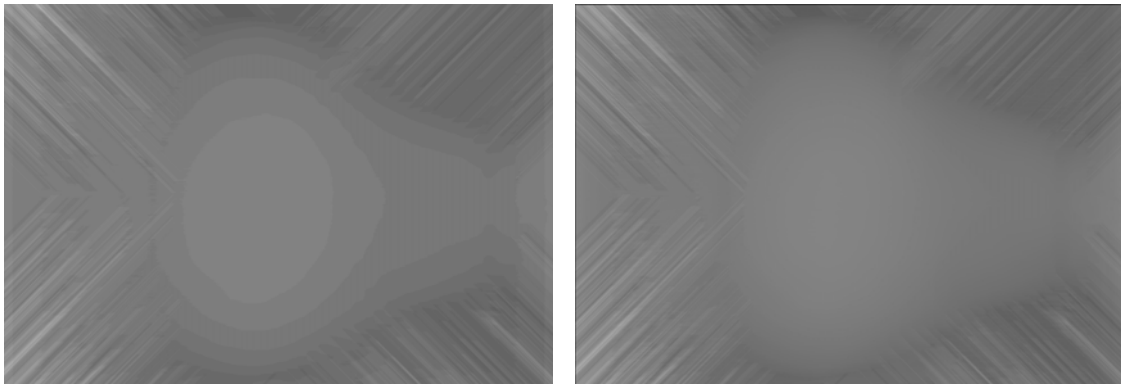


FIGURA 3.5 A) Perfil em degradê

FIGURA 3.5 B) Perfil em tons de Cinza

Com essa informação fica bem simples extrair o perfil em 3D, pois essa informação já está embutida no valor de cada pixel da imagem, e a transformação pra milímetros por exemplo é muito simples.

Isso é ilustrado na figura 3.6, onde o perfil da pêra é ilustrado em diferentes tonalidades de cores em função da profundidade do perfil. Uma tabela ao lado do plot mostra os valores em mm.

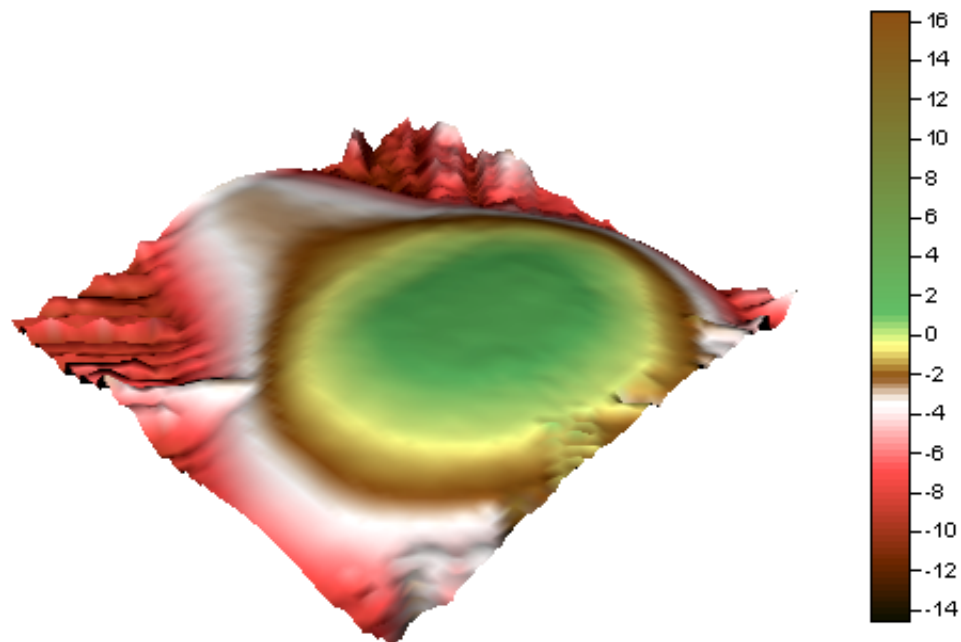


FIGURA 3.6 Perfil da pêra em 3D

4) ANÁLISE DE ERROS

Visando estimar os erros de medição do sistema descrito acima, uma expansão da série de Taylor foi aplicada para a Eq. 2.1, assumindo uma distribuição normal e estatisticamente independente de cada variável do sistema.

Os dados aplicados para a análise do erro foram os mesmos utilizados para a medição da pêra descrito no capítulo anterior.

Mais adiante é considerado que todas as incertezas tem graus de liberdade infinitos, e intervalo de confiança de 95%. Então, a incerteza de medição combinada pode ser simplificada para

$$a = L = (1000 \pm 10)mm$$

$$b = D_o = (0 \pm 2,5)mm$$

$$d = D_s = (250 \pm 2,5)mm$$

$$p = p = (1 \pm 0,01)mm$$

$$\phi = \phi = (6,28 \pm 0,05)rad$$

$$Z = \frac{n.p}{\left(\frac{D_s}{L} + \frac{D_o}{L}\right)} = \frac{\phi.p}{2\pi\left(\frac{D_s}{L} + \frac{D_o}{L}\right)} = \frac{\phi.p}{2\pi\left(\frac{D_s + D_o}{L}\right)}$$

$$Z = \frac{\phi.p.L}{2\pi(D_s + D_o)}$$

Abaixo segue o cálculo para se encontrar a incerteza combinada do sistema.

$$U_{95}^2(Z) = \left(\frac{p.L}{2\pi(D_s + D_o)} \cdot U_{95}(\phi)\right)^2 + \left(\frac{\phi.L}{2\pi(D_s + D_o)} \cdot U_{95}(p)\right)^2 + \left(\frac{\phi.p}{2\pi(D_s + D_o)} \cdot U_{95}(L)\right)^2 +$$

$$\left(\frac{\phi.p.L}{2\pi(D_s + D_o)^2} \cdot U_{95}(D_s)\right)^2 + \left(\frac{\phi.p.L}{2\pi(D_s + D_o)^2} \cdot U_{95}(D_o)\right)^2$$

$$\frac{\partial(Z)}{\partial(\phi)} = \frac{p.L}{2\pi(D_s + D_o)} = \frac{1.1000}{6,28(250+0)} = \frac{1000}{1570} = 0,6369$$

$$\frac{\partial(Z)}{\partial(p)} = \frac{\phi.L}{2\pi(D_s + D_o)} = \frac{6,28.1000}{6,28(250+0)} = \frac{6280}{1570} = 4$$

$$\frac{\partial(Z)}{\partial(L)} = \frac{\phi.p}{2\pi(D_s + D_o)} = \frac{6,28.1}{6,28(250+0)} = \frac{6,28}{1570} = 0,004$$

$$\frac{\partial(Z)}{\partial(D_s)} = \frac{-\phi.p.L}{2\pi(D_s + D_o)^2} = \frac{-6,28.1.1000}{6,28(250+0)^2} = \frac{6280}{392500} = 0,016$$

$$\frac{\partial(Z)}{\partial(D_o)} = \frac{\phi.p.L}{2\pi(D_s + D_o)^2} = \frac{6,28.1.1000}{6,28(250+0)^2} = \frac{6280}{392500} = 0,016$$

$$U_{95}^2(Z) = (0,6369mm / rad.0,314rad)^2 + (4.0,01mm)^2 + (0,004.10mm)^2 + (0,016.2,5mm)^2 + (0,016.2,5mm)^2$$

$$U_{95}^2(Z) = 0,04 + 0,0016 + 0,0016 + 0,0016 + 0,0016$$

$$U_{95}^2(Z) = 0,0464mm$$

$$U_{95}(Z) = \pm 0,2154mm$$

Abaixo segue o cálculo para se encontrar a incerteza relativa do sistema

$$\left(\frac{U_{95}(Z)}{Z}\right)^2 = \left(\frac{U_{95}(\phi)}{\phi}\right)^2 + \left(\frac{U_{95}(p)}{p}\right)^2 + \left(\frac{U_{95}(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{U_{95}(D_s)}{(D_s + D_o)}\right)^2 + \left(\frac{U_{95}(D_o)}{(D_s + D_o)}\right)^2$$

$$\left(\frac{U_{95}(Z)}{Z}\right)^2 = \left(\frac{0,314}{6,28}\right)^2 + \left(\frac{0,01}{1,0}\right)^2 + \left(\frac{10}{1000}\right)^2 + \left(\frac{2,5}{250}\right)^2 + \left(\frac{2,5}{250}\right)^2$$

$$\left(\frac{U_{95}(Z)}{Z}\right)^2 = (0,05)^2 + (0,01)^2 + (0,01)^2 + (0,01)^2$$

$$\left(\frac{U_{95}(Z)}{Z}\right)^2 = 0,0025 + 0,0001 + 0,0001 + 0,0001$$

$$\left(\frac{U_{95}(Z)}{Z}\right)^2 = 0,0028$$

$$\frac{U_{95}(Z)}{Z} = 0,0529$$

Com isso a incerteza relativa do sistema é de 5,3 % do valor medido.

$$\frac{U_{95}(\phi)}{\phi} = 5\% = 0,05$$

$$\frac{U_{95}(L)}{L} = 1\% = 0,01$$

$$\frac{U_{95}(p)}{p} = 1\% = 0,01$$

$$\frac{U_{95}(D_o)}{(D_s + D_o)} = 1\% = 0,01$$

$$\frac{U_{95}(D_s)}{(D_s + D_o)} = 1\% = 0,01$$

4.1 Análise experimental do erro

Neste item, uma análise experimental do erro foi realizada através da medição de um plano inclinado. Uma placa de vidro considerada perfeitamente lisa, pintada de tinta fosca branca, foi inclinada atrás da grade de franjas. A angulação de inclinação foi igual a $6,8086^\circ$. Essa medida da angulação foi realizada se utilizando um paquímetro, sendo que o erro do mesmo foi desconsiderado, visto que o mesmo apresentava um nônio igual 0,002mm.

Assim como no experimento anterior as fotos foram realizadas, obtendo-se a figura 4.1 que representa a placa medida por shadow moiré de forma tridimensional, e a figura 4.2 que representa a medição de forma bidimensional. Ambas as fotos foram conseguidas através do sistema de shadow moiré. A legenda de todas as fotografias se encontra em mm.

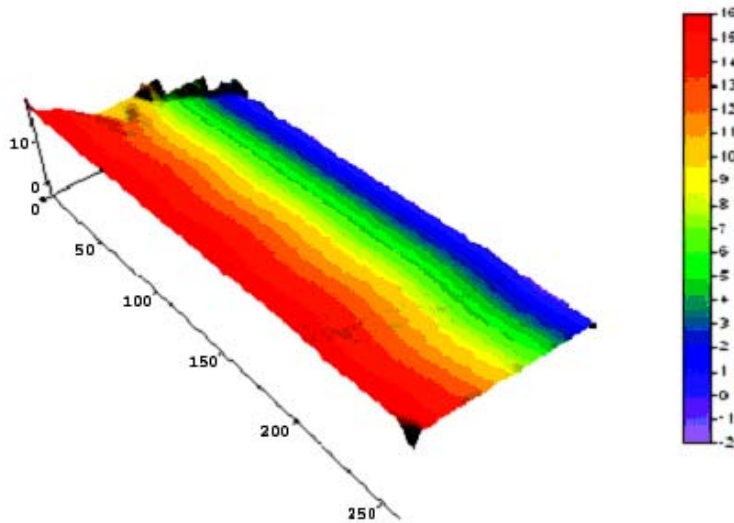


Figura 4.1 – Medição 3D por Moiré

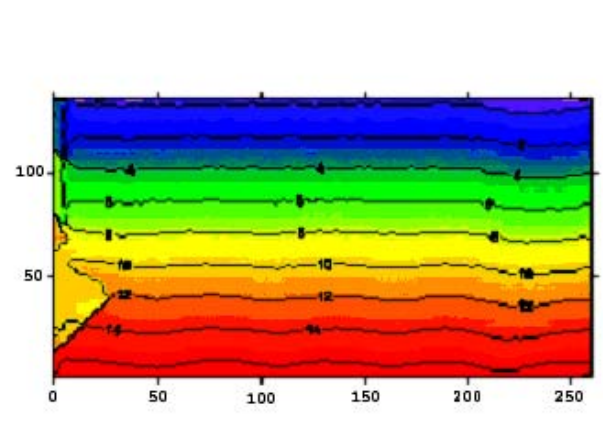


Figura 4.2 – Medição 2D por Moiré

Foi então criado via software um plano “perfeito”, liso, e com a mesma inclinação, tamanho e posição utilizada para a medição por shadow moiré para efeito de comparação. A imagem desse plano virtual é vista de forma 3D através da figura 4.3, e de forma bidimensional através da figura 4.4.

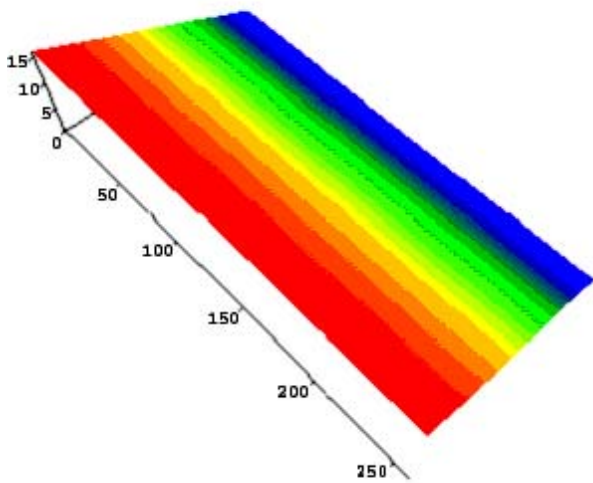


Figura 4.3 –Perfil 3D via software

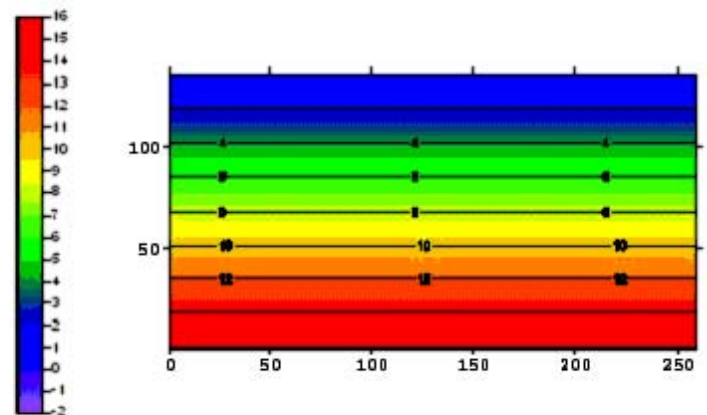


Figura 4.4–Perfil 2D via software

Uma comparação entre o plano criado virtualmente e o plano medido por shadow moiré, foram realizados através de uma subtração dos mesmos, pixel por pixel. O resultado está apresentado de forma 3D na figura 4. 5, e de forma 2D na figura 4.6.

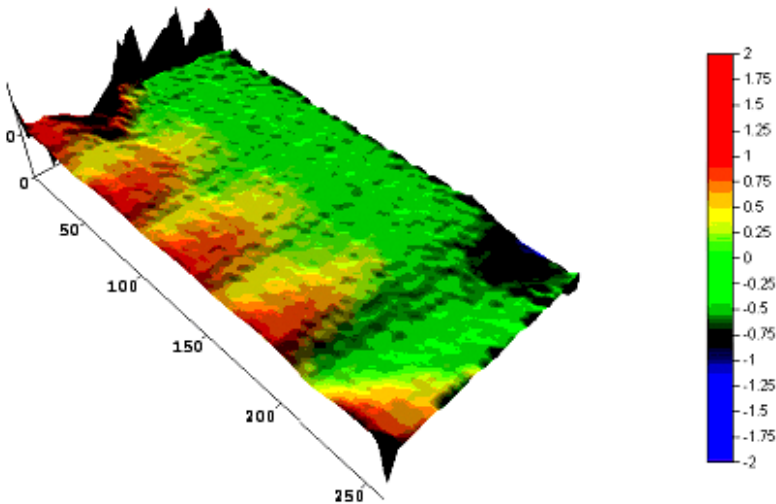


Figura 4.5 –Diferença em 3D

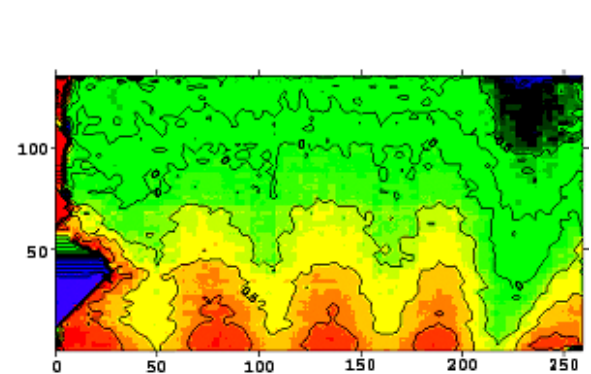


Figura 4.6 –Diferença em 2D

A discussão desses resultados será melhor abordada no capítulo “discussão”.

4.2) Calibração do sistema de medição

Visando uma melhora nos resultados obtidos, foi proposto um sistema para calibração do sistema de medição. Inicialmente foi pensado em se calibrar o sistema através da medição de um plano. Após a aquisição dos valores de um plano conhecido e sem deformidades (uma placa de vidro pintada de branco por exemplo), poderíamos corrigir os resultados obtidos na medição de um outro objeto qualquer (no caso, a medição do plano inclinado) através de um mapa de tendências encontrados na medição do plano (desde que se utilize as mesmas distâncias e pitch da medição do plano).

Entretanto, após realizarmos esse experimento, percebemos que o resultado não foi satisfatório. Isso ocorreu pois a medição do plano apresentou muitos erros. Esses erros foram decorrentes provavelmente de um movimento indesejável do padrão de vidro ao se realizar os deslocamentos, e de uma inclinação indesejável do mesmo, em relação à placa com a grade de referência.

Considerando que esses micro-movimentos são difíceis de se anular, e é muito difícil se assegurar que a placa de vidro está perfeitamente paralela em relação ao padrão primário, foi então resolvido realizar exatamente o contrário. Através do plano inclinado foi realizada uma correção para os erros encontrados no plano reto. Isso foi feito pois os resultados encontrados ao se medir o plano inclinado se apresentaram confiáveis e a imagem resultante da medição por shadow moiré do plano inclinado com melhor qualidade. Ou seja, agora, a imagem conseguida do plano inclinado através de shadow moiré passa a ser o nosso mapa de tendências.

A figura 4.7 mostra o resultado da medição do plano de forma 3D, onde a medição ficou visivelmente corrompida. A figura 4.8 mostra o resultado da mesma medição porém de forma 2D.

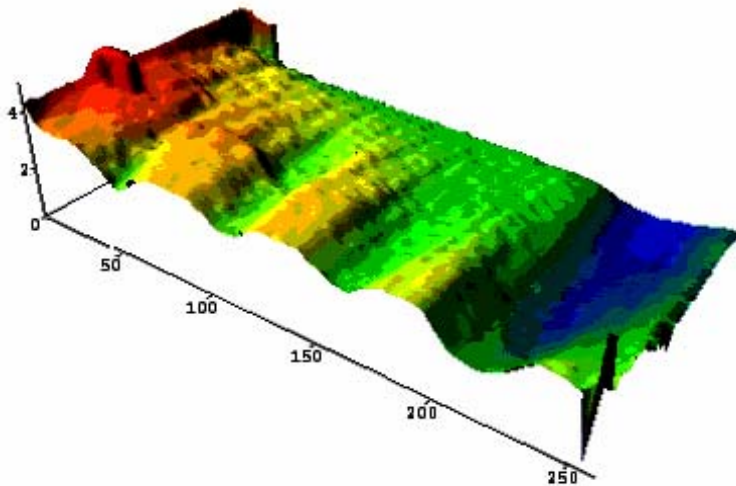


Figura 4.7 –Plano medido em 3D

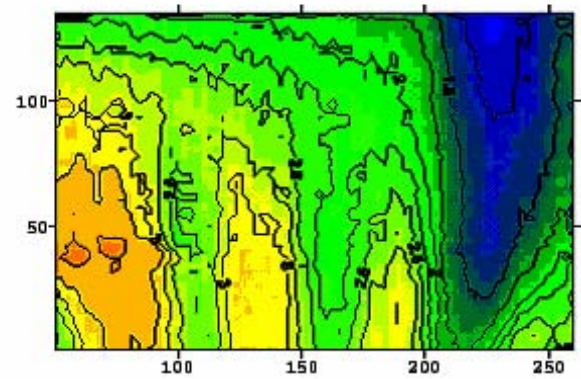


Figura 4.8 – Plano medido em 2D

Após serem feitas as devidas correções com as tendências encontradas na medição do plano inclinado (que foi utilizado como padrão) conseguiu-se uma melhora visível no resultado da medição. O resultado da medição do plano após a correção, está demonstrado abaixo na figura 4.9 de forma 3D, e na figura 4.10 de forma 2D. A escala da medição se encontra em mm.

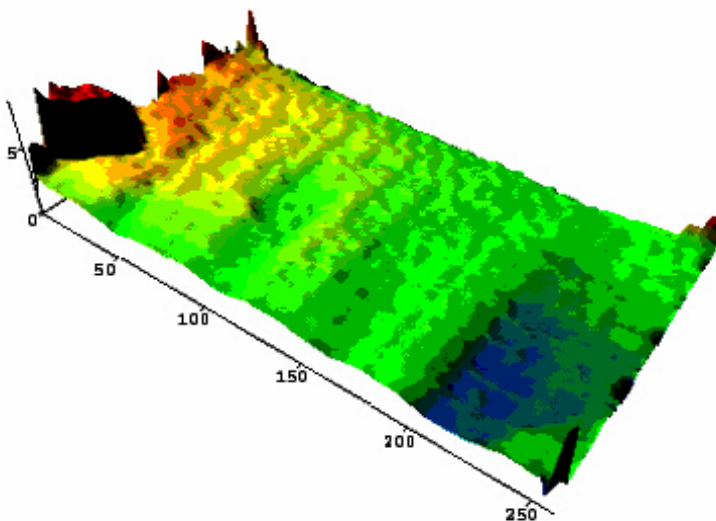


Figura 4.9 –Plano corrigido em 3D

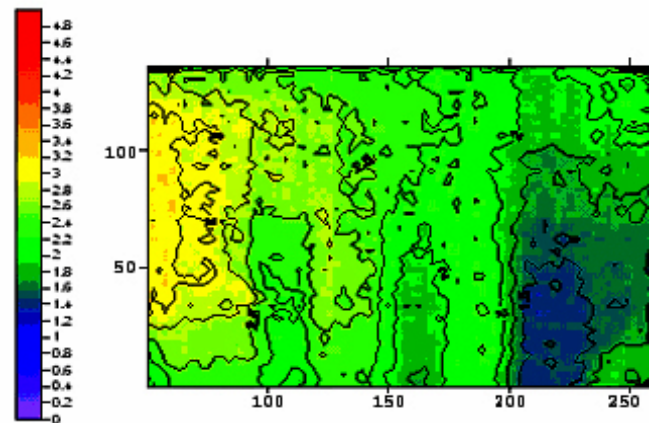


Figura 4.10 – Plano corrigido em 2D

5) DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

É bom iniciar a discussão levantando uma importante questão: O que vai realmente definir a técnica utilizada para a medição que se pretende realizar, vai depender de uma grande quantidade de fatores, tais como preço do sistema, velocidade, automação, resolução desejada, etc. Para este trabalho algumas técnicas comuns de medição foram abordadas, mas sempre levando em conta o princípio de medições para corpos vivos.

Na tabela 2.3 ficou claro através da matriz de decisão, que quando se deseja um resultado mais refinado de medição e que possa ser passível de automação, as técnicas que se utilizam de deslocamento de fase se destacam com grande vantagem. Isso não quer dizer que as outras técnicas sejam ruins, mas para o que foi inicialmente proposto no início do trabalho elas realmente deixam muito a desejar.

A técnica de skeletoning assim como a técnica de tracking contém problemas sérios em relação à capacidade de automação e sensibilidade do sistema. Isso fica claro em BATOUCHE et al (1996), onde o autor levanta essas questões. A dependência do conhecimento a priori do perfil medido torna o processo lento, o qual necessita da incursão manual de pontos de picos e vales no mapa. O que explica a baixa sensibilidade em comparação com o phase-shifting, é que durante o processo grande parte dos dados é perdido ao se aproveitar apenas a região das linhas que guardam o padrão moiré.

Quanto aos resultados conseguidos no capítulo 4, fica claro que melhorias podem ser feitas no processo de aquisição das imagens. Alguns erros na imagem conseguida pelo padrão moiré, e que eleva muito os valores de erros se devem claramente à uma má fixação da transparência das franjas na placa de vidro. Futuros trabalhos podem melhorar consideravelmente a forma de fixação dessas franjas, ou até mesmo produzi-las por um sistema diferente.

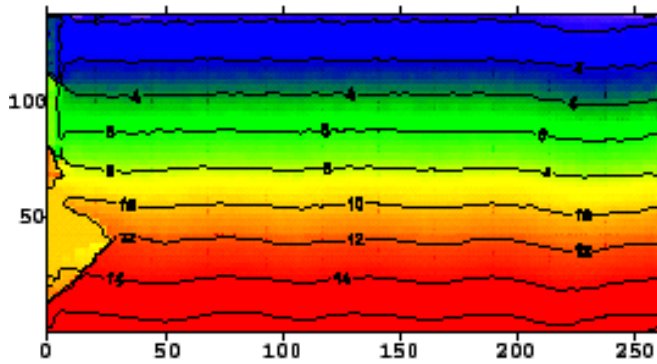


Figura 5.1 –Perfil moiré

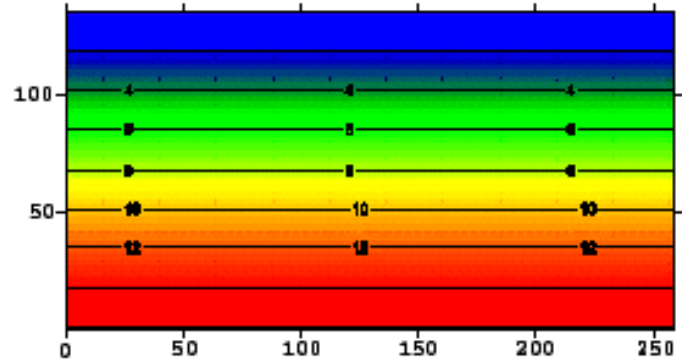


Figura 5.2 –Perfil padrão

A pequena diferença dos dois sistemas fica claramente evidenciado pela presença de uma fina camada de ar dentro do padrão conseguido com moiré. Embora os resultados tenham sido bastante satisfatórios, com uma melhor construção no padrão de franjas podemos melhorar consideravelmente os sistema.

Um outro problema observado, e que provavelmente está relacionado a forma do posicionamento do sistema, é demonstrado na área circular na figura 5.3. Essa região foi afetada pelo reflexo da luz na placa de vidro (figura 5.4), e com isso os dados dessa região foram perdidos. Em futuros experimentos diversos outros posicionamentos devem ser testados, assim como outras formas de grades de moiré para evitar problemas como este.

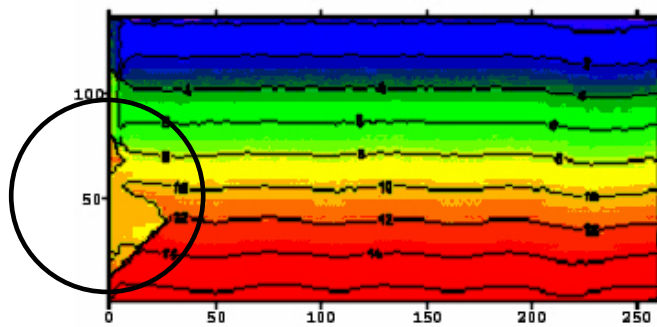


Figura 5.3 – Área perdida

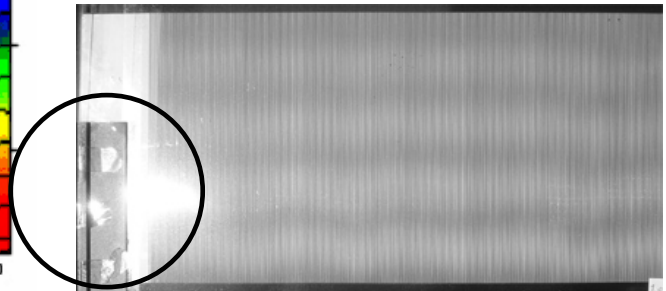


Figura 5.4 – Reflexo na grade

No item 4.2, a calibração realizada obteve bons resultados tendo-se em vista que a medição utilizada como padrão, foi a do plano inclinado, e não a do plano que se encontrava paralelo à grade de franjas. É claro que um sistema de calibração mais elaborado deve ser criado para assegurar melhores resultados. Entretanto a calibração realizada mostrou-se útil pois

seguindo o mesmo princípio do que foi feito (através da utilização das tendências de um padrão para correção), com certeza um sistema mais robusto pode ser criado.

Alguns levantamentos descritos na literatura, como por exemplo na equação 2.4 descrito por POST et. al. (1994), fica claro que mais estudos em relação a shadow moiré devem ser realizados, pois exemplos como esse, podem servir para o moiré puro, entretanto o shadow moiré possui algumas similaridades que devem ser mais bem aprofundadas.

Sugerimos ainda para futuros trabalhos, formas de calibração para o sistema. Isso só não foi realizado neste trabalho pela escassez de tempo. Entretanto sugerimos por exemplo a medição de um plano, posicionado de forma cuidadosa, já com uma grade de franjas com menos erros, e com a sua medição conseguirmos extrair as tendências do sistema para melhorar ainda mais medições realizadas através do mesmo arranjo geométrico.

6) CONCLUSÕES

Com este trabalho fica claro a grande vantagem do sistema que utiliza deslocamento de fase para os demais sistemas, tanto na capacidade de automação, como na diferença no que se refere a quantidade de informações aproveitadas em relação às outras formas tradicionais de medição.

Todos os objetivos previamente determinados no item 1.2 foram realizados, entretanto melhorias podem ser feitas, principalmente na diminuição do índice de incerteza, que hoje se encontra em torno de 5,3% do valor medido.

A utilização do algoritmo de 4 passos teve um ótimo resultado. Foi um sistema que não utilizou muito tempo para ser realizado, e ao mesmo tempo obteve resultados satisfatórios.

Conclui-se ainda que o sistema de shadow moiré pode ser usado para diversas áreas. Mostrou-se capaz de ser usada amplamente dentro das áreas de saúde, por ser uma técnica sem contato, com alta capacidade de automação, e com índices de erros aceitáveis.

Entretanto algumas melhorias devem ser feitas principalmente na elaboração de novas grades de franjas de baixo custo, feitas com outros materiais, e ainda o uso de diferentes valores de pitches.

Sugere-se ainda mais estudos testando diversas sensibilidades para o sistema, a fim de refiná-lo e descobrir possíveis erros, os quais muitas vezes não estão descritos claramente na literatura, ou apenas são citadas de forma muito superficial.

Não há dúvida que o shadow moiré com o deslocamento de fase pode ser usado para uma infinidade de medições, e que vale a pena investir esforços para se aprimorar mais esta técnica ótica.

ABSTRACT

The analysis in three-dimensional ways is of great importance for a vast variety of areas. Several methods have been used for the determination of profiles in 3D. The used techniques differ in several ways and they present characteristics and varied margins of errors.

Among these techniques they stand out the optic techniques, especially the moiré. The moiré is a technique without contact, for which she get to extract the profile 3D in a fast way and with good uncertainty level. One in the ways of very employed moiré, calls her shadow moiré.

In this work the optic beginning of shadow moiré was presented, approaching their qualities and deficiencies. It was still accomplished a comparison of several techniques of removal of phase jump, where one of them was chosen in the end, being the same used in an experiment example.

An experimental analysis of the mistakes of the technique was made, as well as a detailed analysis of mistakes of the measurement. In a numeric and practical way.

A detailed discussion of the several parameters of the system is represented in the final chapter.

Key Words: Free forms, shadow moiré, 3D measurement

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAN, R.; SMITH, J. T.; HARRIS, D.; HOUGHTON, G. R.; JEFFERSON, R. J.. (1988) **A method for analysis of back shape in scoliosis**. Journal of Biomechanics – Vol. 21, nº 6 (pag. 497-509).

ANDONIAN, A. T. (1984) **Detection of stimulated back muscle contractions by moiré topography**. Journal of Biomechanics – Vol. 17, nº 9 (pag. 653-661).

ANGELIS, M.; DE NICOLA, S.; FERRARO, P.; FINIZIO, A.; PIERATTINI, G.. (1998) **Analysis of moiré fringes for measuring the focal length of lenses**. Optical and Lasers in Engineering – Vol. 30 (pag. 279-286).

BATOUCHE, M.; BENLAMRI, R.; KHOLLADI, M. K.. (1996) **A computer vision system for diagnosing scoliosis using moiré images**. Comp. Biol. Med. – Vol. 26, nº 4 (pag. 339-353).

BREQUE, C.; DUPRE, J. C.; BREMAND, F.. (2004) **Calibration of a system of projection moiré for relief measuring: biomechanical applications**. Optical and Lasers in Engineering – Vol. 41 (pag. 241-260).

CHIANG, C.. (1975) **Moiré topography**. Applied Optics – Vol. 14, nº 1 (pag. 177-179).

GASVIK, K. J.. (1995) “**Optical metrology**”. Ed. John Wiley & Sons. New York, USA, (pag. 250-273).

HANRA, A. & VOLPON, J. B.. (1995) **Fotopodometria Moiré quantitativa na avaliação do arco plantar longitudinal medial**. Rev. Bras. de Ortop. - Vol. 30, nº 8, agosto.

KEPRT, J.; VYHNÁNKOVÁ, R.; BARTONEK, L.. (1998) **Shadow moiré topography: Theory and application**. Physica. – Vol. 37 (pag. 137-159).

KIM, H. S.; ISHIDA, K.; ISHIKAWA, S.; OHTSUKA, Y.; SHIMIZU, H.. (2001) **Discriminating spinal deformity employing centroids difference on the moiré images.** Systems and computers in japan – Vol. 32, nº 7(pag. 20-28).

LINO, A. C. L.; FABBRO, I. M.. (2004) **Determinação da topografia de uma fruta pela técnica de moiré de sombra com multiplicação de franjas.** Ciênc. Agrotec. Lavras – Vol. 28, nº 1 (pag. 119-125).

PAHL, G.; BEITZ, .W.; FELDHOUSEN, J.; GROTE, K. H.. (2005) **“Projeto na Engenharia”**. Ed. Edgard Blucher. Tradução da 6ª edição alemã. São Paulo (pag. 80)

PERRY, K. E.; MCKELVIE, J.. (1993) **A comparison of phase shifting and fourier methods in the analysis of discontinuous fringe patterns.** Optical and Lasers in Engineering – Vol. 19 (pag. 269-284).

POST, D.; HAN, B.; IFJU, P..(1994) **High Sensitivity Moiré.** (pag. 117-129) Ed. Springer-Verlag. Nova York.

RASTOGI, P. K.. (1994) **An automatic quantitative approach to additive/subtractive moiré.** Optical and Lasers in Engineering – Vol. 20 (pag. 365-368).

ROBINSON, D. W & REID G. T., (2003), **“Interferogram Analysis”**. Institute of Physics Publishing, Philadelphia, pp. .

RUSS, J. C., (1994), **“The image Processing Handbook”** CRC Press Inc, Flórida, 2ª edition, (pp.112-123)

TAKASAKI, H.. (1970) **Moiré topography.** Applied Optics – Vol. 9, nº 6 (pag. 1457-1472).

TAKASAKI, H.. (1973) **Moiré topography.** Applied Optics – Vol. 12, nº 4 (pag. 845-850).

THEOFILOS, K.; JOHN, S.; NIKOLAUS, R.; GEORGE, S.; DIMITRIOS, K.; KONSTANTINOS, N.. (1999) **Ten-year follow-up evaluation of a school screening program for scoliosis: Is the forward-bending test na accurate diagnostic criterion for the screening of scoliosis.** Spine. – Vol. 24 n° 22 (pag. 2318).

XIE, X.; ATKINSON, J. T.. (1997) **Absolute moiré contouring.** Optical and Lasers in Engineering – Vol. 27 (pag. 149-159).

XIE, X.; ATKINSON, J. T.; LALOR, M. J.; BURTON, D..(1997) **Effects on absolute moiré contouring by using gratings with different period and profile and rotating angles.** Optical and Lasers in Engineering – Vol. 27 (pag. 247-257).

YATAGAY, T & KANOU, T.. (1984) Optical Engineering – Vol. 23 (pag. 357-360).

YEARS, A. M.. (2003) **Moiré topography in odontology.** Optical and Lasers in Engineering – Vol. 40 (pag. 143-152).

YEARS, A. N.; PEÑA, R. G.; JUNCO, R.. (2003) **Moiré topography: alternative technique in health care.** Optical and Lasers in Engineering – Vol. 40 (pag. 105-116).

YOSHINO, Y.; TSUKIJI, M.; TAKASAKI, H.. (1976) **Moiré topography by means of grating hologram.** Applied Optics – Vol. 15, n° 10 (pag. 2414-2417).

ANEXO

LISTA DE TERMOS E VARIÁVEIS

Observador = Câmera

Linhas pretas = Barras opacas = Franjas pretas

Sombras = Grade secundária = Franjas secundárias

Grade de referência = Grade primária = Grade física = Franjas primárias

$g = p = \text{pitch} = \text{distância entre as linhas da grade de referência} = \text{frequência da grade} = \text{frequência espacial da grade}$

$\alpha = \text{ângulo entre a normal e o feixe de luz}$

$\beta = \text{ângulo entre a normal e o ponto de observação (observador)}$

$N = \frac{\phi}{2\pi} = \text{ordem de franja}$

S = ponto de iluminação

O = câmera e/ou observador

E = objeto medido

$f = \text{frequência} = \text{número de barras por unidade de medida}$

$\lambda = \text{comprimento de luz}$

Z = profundidade máxima a ser medida = distância vertical da grade plana para o ponto do objeto

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)