

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

TÉCNICA ÓPTICA DE MOIRÉ VISANDO A APLICAÇÃO NO
ESTUDO DE SUPERFÍCIES IRREGULARES

ANTONIO CARLOS LOUREIRO LINO

Campinas
Janeiro de 2002

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

TÉCNICA ÓPTICA DE MOIRÉ VISANDO A APLICAÇÃO NO
ESTUDO DE SUPERFÍCIES IRREGULARES

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade
de Engenharia Agrícola - UNICAMP para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Agrícola - Área
de Concentração: Máquinas Agrícolas

ANTONIO CARLOS LOUREIRO LINO

ORIENTADOR: PROF. DR. INÁCIO MARIA DAL FABBRO

Campinas
Janeiro de 2002

à minha esposa Teca

aos meus filhos Violeta e Mateus

à minha mãe Ziza

Dedico

*Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, e não tivesse **amor**, seria como o metal que soa ou como o címbalo que retine.*

*E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a **ciência**, e ainda que tivesse toda fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse **amor**, nada seria.*

*E ainda que distribuísse todos os meus bens para sustento dos pobres, e ainda que entregasse o meu corpo para ser queimado, e não tivesse **amor**, nada disso me aproveitaria.*

*O **amor** é sofredor, é benigno; o **amor** não é invejoso; o **amor** não se vangloria, não se ensoberbece,*

*Não se porta inconvenientemente, não busca os seus próprios interesses, não se irrita, não suspeita mal;
Não se regozija com a injustiça, mas se regozija com a verdade;*

Tudo sofre, tudo crê, tudo espera, tudo suporta.

*O **amor** jamais acaba*

1ª Carta do Apóstolo Paulo aos Coríntios

AGRADECIMENTOS

À Deus por sua presença em minha vida.

Ao professor Inácio M. Dal Fabbro, pela amizade, paciência, apoio e orientação.

À minha esposa e filhos pelo apoio, compreensão e incentivo.

À Comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Ao amigo e pesquisador Afonso Peche Filho pelo constante apoio, incentivo e que nunca me deixou desistir.

Aos amigos e pesquisadores Ila Maria Corrêa, Marcio de Morison Valeriano e Hamilton Humberto Ramos pelo apoio.

Aos colegas Jaime Alberti Gomes e Angélica Giarolla Piccini pelo apoio e incentivo.

Aos amigos e pesquisadores Maria Regina Gonçalves Ungaro, Antonio Odair dos Santos, Jener Fernando Leite dos Santos, Roberto da Cunha Melo e Moises Storino, pela amizade e incentivo.

Aos colegas Arnaldo dos Santos, João Batista de Almeida e Denival da Costa Silva pela colaboração e apoio.

Aos pesquisadores e funcionários do CMAA/IAC.

Ao Engenheiro Mecânico Kelson Decoto Regatieri e à empresa Takata-Petri S.A. pela digitalização da superfície do modelo da pêra, com o scanner 3 D laser.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
EPÍGRAFE	iii
AGRADECIMENTOS	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE QUADROS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Justificativa	01
1.2. Objetivos	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	02
2.1. Técnicas perfilométricas	02
2.2. O fenômeno de <i>moiré</i>	04
2.3. A solução analítica das franjas de <i>moiré</i>	05
2.4. As Técnicas de <i>Moiré</i> (TM)	08
2.4.1. A classificação das TM	08
2.4.2. Formação da franjas de <i>moiré</i>	09
2.4.3. A sensibilidade das TM	11
2.4.4. Métodos para melhorar a sensibilidade das TM	12
2.5. Aplicação das TM de sombra	17
2.6. Determinação de cotas das franjas de <i>moiré</i>	20
2.6.1. TM de sombra	21
2.6.1.1. Diferença de cota par iluminação coerente	22
2.6.1.2. Diferença de cota par iluminação não coerente	24
2.6.2. TM de projeção	25
2.7. Erros experimentais	26

3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1. Estudos preliminares da TM de sombra	30
3.1.1. Estudos preliminares da TM de sombra clássica	30
3.1.2. Estudos preliminares da TM de sombra com mudança de fase	34
3.2. Geração dos modelos digitais de superfície semelhante à de uma pêra	38
3.2.1. Geração do modelo digital pelo TM de sombra de multiplicação de franjas	38
3.2.2. Geração do modelo digital pelo TM de sombra com mudança de fase	39
3.2.3. Geração do modelo digital pelo Scanner 3D Laser	40
3.3. Comparação dos modelos de moiré com o laser	41
3.3.1. Geração dos perfis	41
3.3.2. Comparação dos perfis	41
4. RESULTADOS PRELIMINARES	42
4.1. Estudos experimentais com o uso da luz solar	42
4.2. Estudos experimentais com o uso da TM de sombra clássica	43
4.2.1. Estudos experimentais com cone	43
4.2.2. Estudos experimentais com calota	47
4.3. Estudos experimentais com TM de sombra com mudança de fase	49
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1. Modelos digitais da superfície da pêra produzidos pela TM de sombra com multiplicação de franjas	53
5.2. Modelos digitais da superfície da pêra produzidos pela TM de sombra com mudança de fase	56
5.3. Modelos digitais da superfície da pêra produzidos pelo Scanner 3D Laser	58
5.4. Comparação entre os modelos	59
6. CONCLUSÕES	80
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação das Técnicas perfilométricas	2
Figura 2: Classificação das Técnicas perfilométricas óticas	3
Figura 3. Franjas de <i>moiré</i> produzidas pela sobreposição de duas grades	6
Figura 4: Formação das franjas de <i>moiré</i> pela sobreposição de retículos constituídos de linhas paralelas	6
Figura 5: Formação das franjas de <i>moiré</i> pela transmissão da luz através de dois retículos constituídos de linhas paralelas superpostos	8
Figura 6: Multiplicação de Franjas	13
Figura 7: Esquema da multiplicação de franjas	13
Figura 8: Método da mudança de fase	15
Figura 9: Desempacotamento de fases	16
Figura 10: Franjas de <i>moiré</i> , em um manequim	18
Figura 11: Franjas de <i>moiré</i> em uma moeda	18
Figura 12: Topograma de <i>moiré</i> , seções produzidas pelo topograma de <i>moiré</i> e curva CMCT de um paciente com escoliose idiopática	19
Figura 13: Mudança no contorno de <i>moiré</i> e índice de simetria por rinoplastia	19
Figura 14: Formação das franjas no <i>moiré</i> de sombra	22
Figura 15: Sistema experimental para <i>moiré</i> de sombra com iluminação coerente	22
Figura 16: Esquema trigonométrico para a TM de sombra com iluminação coerente	23
Figura 17: Sistema experimental para <i>moiré</i> de sombra com observador e fonte localizados próximos do objeto	25
Figura 18: Sistema experimental para <i>moiré</i> de projeção	26
Figura 19. Precisão e exatidão das medidas	27
Figura 20: Dimensões do cone de aço	30
Figura 21: Arranjo experimental para verificação da consistência do TM de sombra	31
Figura 22: Foto do arranjo experimental	32
Figura 23: Suporte do retículo de <i>moiré</i>	32
Figura 24: Dimensões da calota	34
Figura 25: foto do objeto cone/pirâmide	35
Figura 26: Esquema do objeto cone convexo / pirâmide côncava	35
Figura 27: Arranjo experimental para a TM de sombra com deslocamento de fase	36
Figura 28: Mesa de deslocamento micrométrico	36
Figura 29: As duas metades do modelo da pêra em parafina, uma pintada e a outra não	38
Figura 30: Esquema de funcionamento do digitalizador topográfico ModelMaker	41
Figura 31: Imagens da pêra com as linhas de <i>moiré</i>	42
Figura 32: Imagens do cone com as franjas de <i>moiré</i> para diferentes distâncias	44
Figura 33: Franjas de <i>moiré</i> digitalizadas manualmente através do programa AUTOCAD	46
Figura 34: Modelo digital da superfície do cone (vista lateral)	46
Figura 35: Modelo digital da superfície do cone, com linhas de mesma cota.	47
Figura 36: Imagem da calota com as franjas de <i>moiré</i>	48
Figura 37. Imagens do cone/pirâmide com as linhas de <i>Moiré</i>	49

Figura 38. Imagens do cone/pirâmide filtradas pelo programa Corel PHOTO-PAINT	50
Figura 39. Mapa de fases empacotadas	51
Figura 40: Superfície de contorno em tons de cinza	51
Figura 41: Representação topográfica da superfície de contorno	52
Figura 42: Imagens da pêra com franjas de <i>moiré</i>	53
Figura 43: Imagens filtradas da pêra	54
Figura 44: Processo de multiplicação de franjas de <i>moiré</i>	55
Figura 45: Modelo digital da superfície da pêra	56
Figura 46: Modelo digital gerado pela TM de sombra com mudança de fase	56
Figura 47; Modelo digital da superfície da pêra gerado pelo TM de sombra com mudança de fase	57
Figura 48: Modelo digital da superfície de contorno da pêra, obtido através do Scanner 3D Laser	58
Figura 49: Modelo digital da superfície de contorno da pêra, obtido através do Programa SURFER 32	58
Figura 50: Posicionamento dos perfis que foram usados para fazer a comparação das TM e o Scanner 3D Laser	59
Figura 51: Resultados da comparação do perfil Central da pêra para os TM com multiplicação de franjase laser	61
Figura 52: Resultados da comparação do perfil D05 da pêra para os TM com multiplicação de franjas e laser	62
Figura 53: Resultados da comparação do perfil D10 da pêra para os TM com multiplicação de franjas e laser	63
Figura 54: Resultados da comparação do perfil D15 da pêra para os TM com multiplicação de franjas e laser	64
Figura 55: Resultados da comparação do perfil D20 da pêra para os TM com multiplicação de franjas e laser	65
Figura 56: Resultados da comparação do perfil E05da pêra para os TM com multiplicação de franjas e laser	66
Figura 57: Resultados da comparação do perfil E10 da pêra para os TM com multiplicação de franjas laser	67
Figura 58: Resultados da comparação do perfil E15 da pêra para os TM com multiplicação de franja se laser	68
Figura 59: Resultados da comparação do perfil E20 da pêra para os TM com multiplicação de franjas e laser	69
Figura 60: Resultados da comparação do perfil Central da pêra para os TM com mudança de fase e laser	70
Figura 61: Resultados da comparação do perfil D05 da pêra para os TM com mudança de fase e laser	71
Figura 62: Resultados da comparação do perfil D10 da pêra para os TM com mudança de fase e laser	72
Figura 63: Resultados da comparação do perfil D15 da pêra para os TM com mudança de fase e laser	73
Figura 64: Resultados da comparação do perfil D20 da pêra para os TM com mudança de fase e laser	74

Figura 65: Resultados da comparação do perfil E05 da pêra para os TM com mudança de fase e laser	75
Figura 66: Resultados da comparação do perfil E10 da pêra para os TM com mudança de fase e laser	76
Figura 67 Resultados da comparação do perfil E15 da pêra para os TM com mudança de fase e laser	77
Figura 68: Resultados da comparação do perfil E20 da pêra para os TM com mudança de fase e laser	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Freqüência das linhas para as TM e a sensibilidade de cada uma	11
Quadro 2: Condição experimental para o cone	31
Quadro 3: Condição experimental para a Calota	34
Quadro 4: Diferença de cota entre duas franjas e o seu percentual relativo à altura do cone, para cada condição experimental	44
Quadro 5: Altura do cone real e calculada, e erro absoluto e relativo, para cada condição experimental	45
Quadro 6: Diferença de cota entre duas franjas e o seu percentual relativo à altura da calota, para cada condição experimental	48
Quadro 7: Alturas real e calculada da calota, e erro absoluto e relativo, para cada condição experimental	48
Tabela 8: Comparação entre os modelos digitais da superfície da pêra gerados pelo TM de sombra com multiplicação de franjas e pelo Scanner 3D Laser	77
Tabela 9: Comparação entre os modelos digitais da superfície da pêra gerados pelo TM de sombra com mudança de fase e pelo Scanner 3D Laser	77

RESUMO

Métodos óticos, como as Técnicas de Moiré (TM), têm sido utilizados para a determinação da topografia de objetos (perfilometria) com superfície irregular, como é o caso dos órgãos humano ou animal, ou ainda de produtos industrializados. Essas técnicas são precisas, de fácil aplicação e de baixo custo. Este trabalho tem por objetivo a aplicação de duas Técnicas de *Moiré* de sombra, multiplicação de franjas e mudança de fase, como metodologias para a geração de modelos digitais topográficos de superfícies irregulares. Para tanto se utilizou um modelo de uma pêra confeccionado em parafina, que foi pintado com tinta látex branca fosca, com a finalidade de evidenciar as franjas de moiré. Montou-se um esquema experimental constituído de uma câmera fotográfica digital, um sistema de iluminação, um sistema manual para micro deslocamentos do objeto e um retículo constituído de linhas claras e escuras com espessura de 1,0 mm. Foram tomadas 4 imagens do objeto com as franjas de moiré, sendo que o objeto em estudo foi deslocado (afastado) uma pequena distância do retículo, de maneira que as franjas se deslocassem $\frac{1}{4}$ de fase entre cada uma delas. Utilizando-se estas imagens, após tratamento para a remoção das linhas de *moiré*, gerou-se um modelo digital da superfície da pêra. Para validação, estas técnicas foram comparadas com o outro modelo digital gerado por um Scanner 3D Laser, que serviu como padrão. Os resultados mostram que as TM estudadas obtiveram altas precisão e exatidão quando comparado ao padrão. A TM pode também ser aplicada com resultados satisfatórios na perfilometria de objetos com superfície irregular, tais como órgãos vegetais, fornecendo resultados consistentes e confiáveis. A TM de sombra com multiplicação de franjas é bastante acessível a usuários com poucos recursos, pois embora trabalhosa, é simples de ser executada, e utiliza programas computacionais de uso comum. A TM com mudança de fase é bastante rápida de ser executada, porém exige rotinas computacionais específicas.

Palavras Chaves: Perfilometria, técnicas de *moiré*, mudança de fase.

UTILIZATION OF *MOIRÉ* TECHNIQUES (MT) FOR FRUIT TOPOGRAPHIC DETERMINATION

ABSTRACT

Optical methods, as the *Moiré* Techniques (MT), have been used for investigation of objects topography (perfilometry) with diffuse or irregular surface as human's or animal's bodies, or industrial design. These techniques are easy to use, have high precision and low cost. It can be also applied with satisfactory results in the perfilometry of vegetable parts, as fruits, supplying consistent and reliable results. The objective of this research is the application of two shadow *Moiré* Techniques (MT), classic and with phase shifting, as methodologies for the generation of topographical digital models. It was used a pear model, made in paraffin, painted with opaque white ink, with the purpose of evidencing the *moiré* fringes. Experimental set up with a digital photographic camera, and an illumination system, and grids with period of 0,5 and 1,0 mm. For MT with phase shifting a manual system was used to displace the pear. For classic shadow MT, one image of the pear was taken with the *moiré* fringes that were manual digitalized in the AUTOCAD program and generate a digital model of the pear surface. For MT with phase shifting, 4 images were taken and the pear was moved away a small distance of the grid. The fringes were moved $\frac{1}{4}$ phase among of each photography. Using these images, after removal of the *moiré* lines, a digital model of the pear surface was generated. To validate these techniques they were compared with another digital model generated by a Laser 3D Scanner. The results show that MT was precise and accurate when compared to the Laser 3D Scanner. Classic shadow MT of is simple but with hard operation and becomes quite accessible by using common computational programs. MT with phase shifting is fast, however it demands specific computational routines.

KEY WORDS: Perfilometry, contour, *moiré* techniques, phase shifting.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de técnicas perfilométricas é de grande importância para diversos segmentos da indústria, biologia, medicina e engenharia, principalmente no que se refere a práticas de controle de qualidade, modelagem matemática e diagnósticos clínicos.

Em Engenharia Agrícola depara-se com vários tipos de problemas que envolvem o estudo da topografia de superfícies irregulares. Entre eles pode-se citar o estudo do comportamento mecânico de materiais biológicos, como órgãos vegetais, incluindo análise de forma e volume deste tipo de material.

Entre outras aplicações está o controle de qualidade de operações de preparo de solo, com base na determinação do microrelevo ou rugosidade superficial antes e após a execução. O controle de qualidade de componentes de máquinas, que apresentem possíveis alterações em sua superfície originárias de defeitos de fabricação e desgaste de peças ativas, também podem ser realizado utilizando a determinação da forma destes componentes.

Esta pesquisa justifica-se principalmente em função da oportunidade de gerar conhecimento da aplicabilidade da Técnica de *Moiré* nas atividades ligadas a Engenharia Agrícola.

Assim levantou-se a hipótese de que a Técnica de *Moiré* pode ser aplicada com resultados satisfatórios na geração de Modelos Digitais de Elevação ou Topográficos de superfícies irregulares como órgãos vegetais.

O objetivo geral deste trabalho foi introduzir a utilização das Técnicas de *Moiré* no desenvolvimento de linhas de pesquisa para análise de superfícies irregulares. Como objetivos específicos, adequar metodologias para uso das Técnicas de *Moiré* de sombra, com multiplicação de franjas e com mudança de fase, e gerar Modelos Digitais Topográficos em materiais como órgãos vegetais, elementos máquinas e da superfície do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Técnicas perfilométricas

As técnicas utilizadas para a medição da superfície de contorno ou perfilometria, têm sido utilizadas em um grande número de aplicações na indústria, biologia e medicina, engenharia civil e robótica. Na indústria é uma poderosa ferramenta na manufatura, controle de qualidade, engenharia reversa e na modelagem dos esforços estáticos e dinâmicos a que estão submetidos os componentes mecânicos. Em medicina e engenharia biomédica, é utilizada em diagnósticos, modelagem de movimentos, estudos sobre materiais utilizados em próteses e previsão de resultados cirúrgicos. Na engenharia civil seu uso tem se dado na inspeção de grandes estruturas como pontes, edifícios, estradas e túneis. E finalmente em robótica principalmente em visão de máquina.

HU (2001) classifica as técnicas usadas para a medição do perfil topográfico de objetos em dois grupos: técnicas de contato e técnicas sem contato.

CURLESS (2001) faz uma classificação parecida, porém mais ampla dessas técnicas (Figura 1) e particulariza as técnicas óticas (Figura 2).

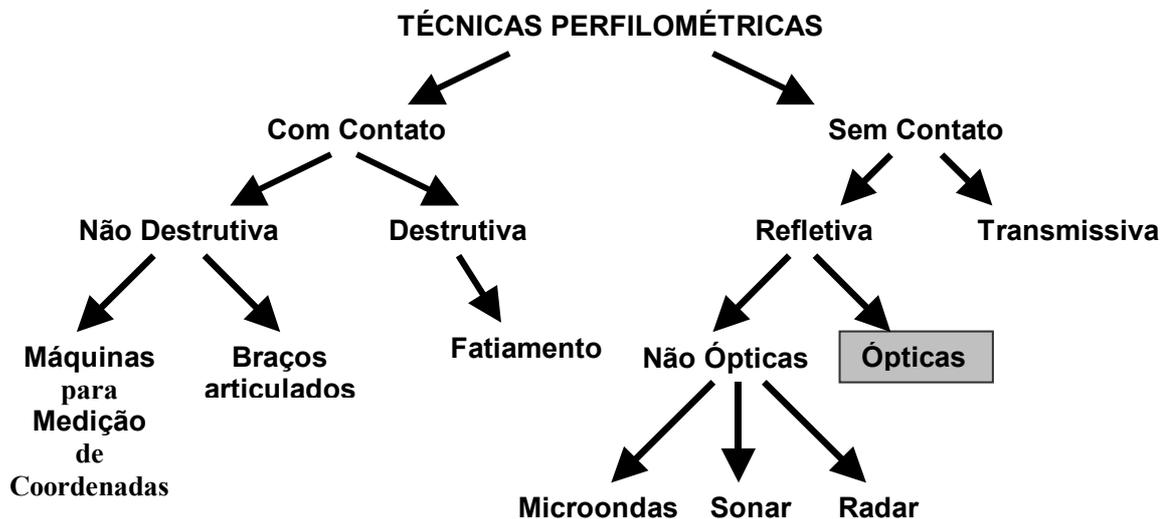


Figura 1: Classificação das Técnicas para aquisição da superfície de contorno
Fonte: CURLESS (2001)

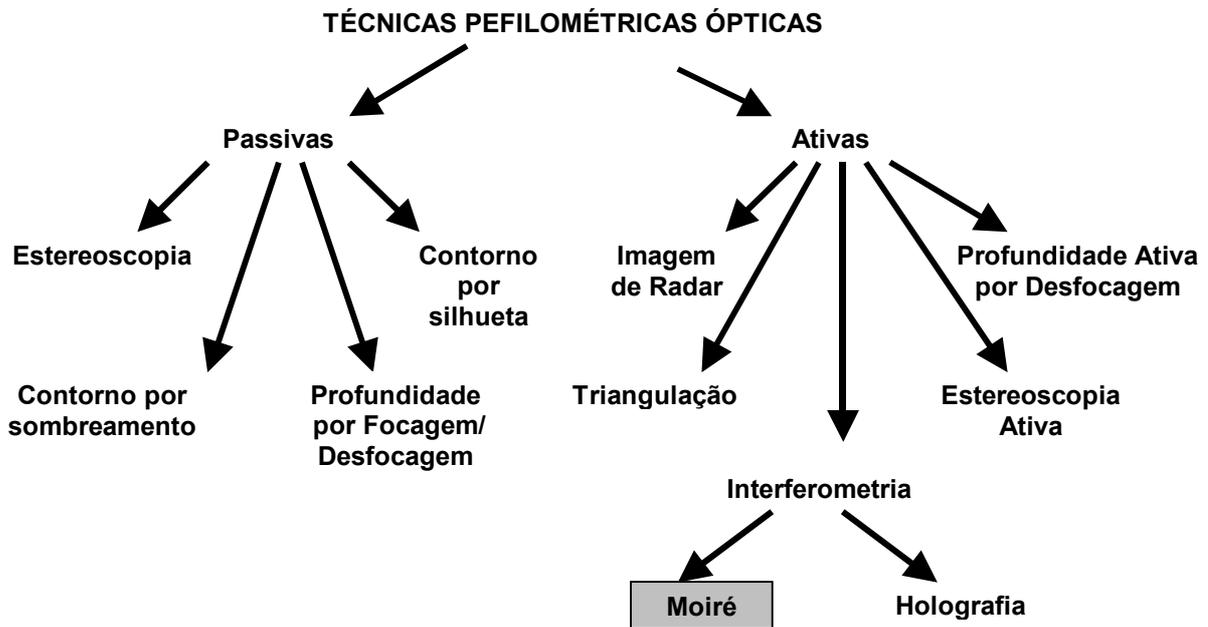


Figura 2: Classificação das Técnicas óticas para aquisição da superfície de contorno.
Fonte: CURLESS (2001)

As técnicas óticas têm como vantagem a rapidez e o fato de não ter contato físico com os objetos em estudo, sendo portanto indicados para o trabalho com materiais biológicos sensíveis, tais como as frutas.

HU (2001) diz que as técnicas óticas podem ser classificadas em dois grupos: técnicas “scanning” e “no scanning”. As técnicas “scanning” são representadas por triangulação, técnicas de luz estruturadas e radar laser. As duas primeiras são baseadas em princípios de triangulação, e o laser radar é baseado a medição do tempo de viagem do pulso de laser. Estes métodos geralmente resultam em complicados sistemas computacionais e normalmente consomem muito tempo para cobrir a superfície toda.

Técnicas “no scanning” típicas incluem estereoscopia e as Técnicas de *Moiré* (TM). Estereoscopia usa duas imagens do objeto sob diferentes perspectivas e identifica pontos comuns nas duas imagens. Esta técnica também computacionalmente intensiva, não permite o seu uso para medições em alta velocidade ou em tempo real.

SU & CHEN (2001) citam ainda outras técnicas óticas para perfilometria, tais como: Perfilometria por Medição de Fase (PMF), Perfilometria por Transformada de Fourier (PTF),

Perfilometria por Medição de Modulação (PMM), Detecção Espacial de Fase (DEF), Triangulação por Laser (TL), Projeção de Franjas de Cores Codificadas (PFCC).

HU (2001) diz que as Técnicas de *Moiré* (TM), de Sombra e Projeção, são as técnicas perfilométricas mais comumente utilizadas devido, principalmente à sua simplicidade e rapidez de medição, e por isso têm sido alvo de freqüentes estudos e vários tipos de aplicações.

Nas TM tradicionais muitas informações contidas entre duas franjas vizinhas são perdidas. Por isso a partir dos anos 70, foram desenvolvidas várias técnicas de medição de fase, que aplicados às TM aumentam grandemente a sua resolução, acurácia e repetitibilidade.

A técnica de medição de fase mais comumente utilizada é a Técnica da Mudança de Fase (Phase shifting), necessita 3 ou 4 imagens, com pequenos deslocamentos das franjas entre elas, para obter o mapa de fase e a superfície de contorno dos objetos estudados. Essa técnica também pode ser aplicada a outras técnicas óticas além das TM.

2.2. O fenômeno de *moiré*

Quando se olha através de duas telas ou grades sobrepostas, nota-se a formação de padrões ou franjas, que são resultado da combinação das linhas dessas telas. Esse fenômeno é chamado de fenômeno ou efeito de *moiré*; e as franjas produzidas são chamadas de padrões ou franjas de *moiré*.

SCIAMMARELLA (1982) cita que a palavra “*moiré*” é de origem francesa que quer dizer "molhado", e denomina um tecido de seda, importado da antiga China. Esse tecido é composto de duas camadas, e quando existe movimento relativo entre estas camadas aparecem padrões semelhantes a ondas, denominadas franjas de *moiré*.

OSTER & NISHIJIMA (1964) dizem que o fenômeno de *moiré* foi estudado primeiramente pelo físico inglês LORD RAYLEIGH (1874) que sugeriu que esse fenômeno poderia ser usado para testar a perfeição de grades de difração.

SCIAMMARELLA (1982), cita ainda que uma das primeiras utilizações científicas do fenômeno de *moiré*, foi o estudo da deformação da mica, feita por MULOT (1925).

CLOUD (1988) cita que D. TOLLENAR em 1945 estudando o fenômeno descobriu que as franjas de *moiré* são na verdade magnificadoras de movimento, e que poderiam dar uma alta sensibilidade a medições de movimentos relativos. O mesmo autor cita ainda vários autores que a partir daí empregaram o fenômeno para estudar deslocamento, deformação e tensão, entre eles WELLER & SHEPARD em 1948, DANTU em 1954. E que subsequentemente, o método foi refinado e aplicado numa grande variedade de circunstâncias por RILEY & DURELLI (1962), THEOCARIS (1969), DURELLI & PARKS (1970).

OSTER et al. (1964) fizeram os primeiros estudos para estabelecer as relações entre grades superpostas e as franjas de *moiré* resultantes.

TAKASAKI (1970) e TAKASAKI (1973) utilizaram a sobreposição de uma grade sobre a sua própria sombra (*moiré* de sombra) para medir o relevo de objetos e pessoas. Nesse caso as franjas de *moiré* formadas são constituídas por um conjunto de pontos de mesma cota, semelhantes às curvas de nível de mapas topográficos.

2.3. A solução analítica das franjas de *moiré*

NISHIJIMA (1964) comenta que as franjas ou padrões de *moiré* são produzidos quando se sobrepõe duas estruturas periódicas, chamadas retículos ou grades (Figura 3). Esses retículos podem constituir-se de linhas paralelas ou radiais, círculos ou elipses concêntricas ou mesmo pontos, espaçados equidistantemente ou não.

Os retículos mais comumente utilizados são constituídos por linhas ou faixas claras (transparentes) e escuras (opacas), paralelas e equidistantes. O centro das faixas (claras ou escuras) é chamado linha de grade, e a distância entre os centros de linhas de grade de duas faixas escuras (ou duas faixas claras) contíguas é o período ou passo (p) do retículo e o inverso do período é a frequência do retículo (f), geralmente dado em linhas por milímetro.

Quando essa superposição ocorre formando um pequeno ângulo de interseção entre as linhas dos dois retículos, pequenos deslocamentos em um dos dois retículos provocará grandes deslocamentos nas franjas de *moiré*, isto é, o deslocamento será magnificado.

NISHIJIMA (1964) e OSTER et al. (1964) apresentaram a seguinte solução geométrica para explicar as franjas de *moiré* produzidas.

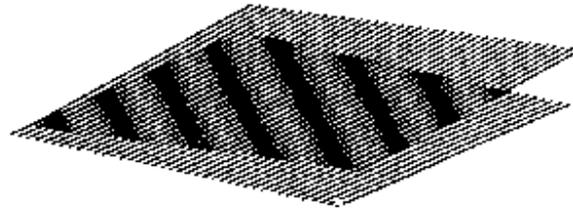


Figura 3. Franjas de *moiré* produzidas pela sobreposição de duas grades.

Considerando o caso de dois retículos, que possuem linhas equidistantemente espaçadas, e um deles (retículo R1), que possui linhas paralelas ao eixo “y”, com período “ p_1 ”, é sobreposto pelo outro (retículo R2), com linhas com linhas com período “ p_2 ”, diferente de “ p_1 ”, formando um ângulo θ entre as linhas dos dois retículos. Observa-se o aparecimento de um terceiro retículo (franjas de *moiré*) formado pela interseção das linhas dos retículos R1 e R2 (Figura 4).

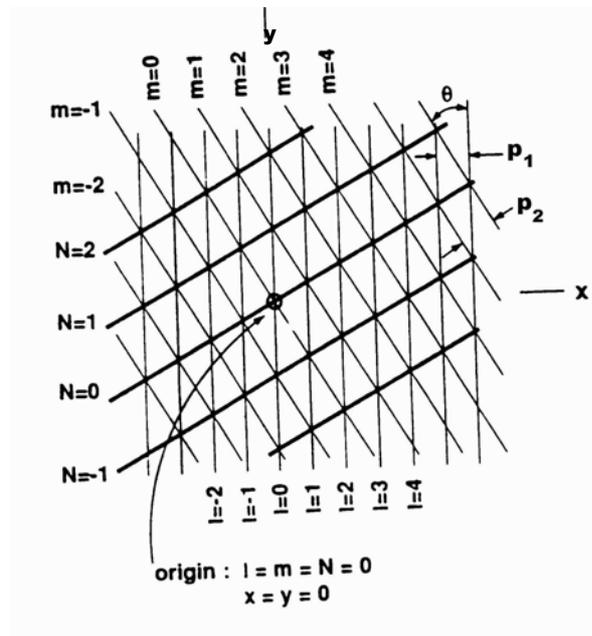


Figura 4: Formação das franjas de *moiré* pela sobreposição de retículos constituídos de linhas paralelas.

Fonte CLOUD (1988)

Um exame da Figura 4 mostra que:

$$\text{sen } \varphi = \frac{p_2 \text{ sen } \theta}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \theta}} \quad 1$$

onde:

φ = ângulo formado entre a franja de **moiré** e o eixo das ordenadas

p_1 = período de R1

p_2 = período de R2

θ = ângulo formado entre as linhas de R1 e R2

e

$$p_m = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \theta}} \quad 2$$

onde:

p_m = período da franja de **moiré**

para retículos idênticos, quando os espaçamentos são iguais, isto é, $a=b$, a Eq. 2 reduz-se a:

$$p_m = \frac{a}{2 \text{ sen } (\theta/2)} \quad 3$$

Um aspecto relevante sobre a formação das franjas de *moiré* é que a visualização dessas franjas se comporta, na maioria das vezes, como ondas senoidais (Figura 5). A intensidade luz observada é na verdade a média da luz transmitida através dos retículos 1 e 2, e onde a luz transmitida é máxima têm-se o centro das franjas claras e onde a luz transmitida tende a zero, tem-se o centro das franjas escuras.

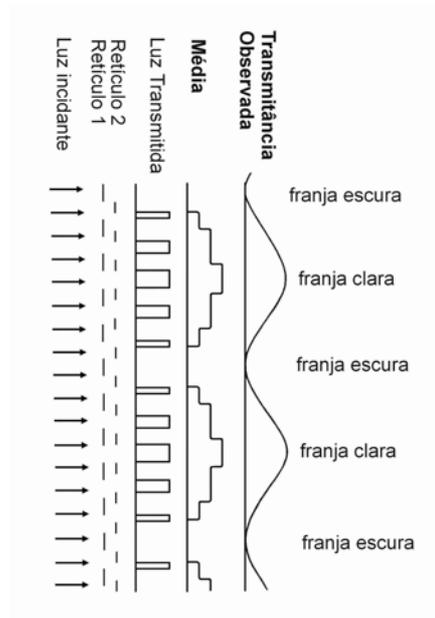


Figura 5: Formação das franjas de *moiré* pela transmissão da luz através de dois retículos constituídos de linhas paralelas superpostos.
 Fonte: CLOUD (1988)

2.4. As Técnicas de *Moiré* (TM)

ASSUNDI & YUNG (1991) definem as Técnicas de *Moiré* (TM) como sendo um conjunto de técnicas versáteis baseadas no fenômeno de *moiré*, usados para medição de deformação no plano e fora do plano, contornos topográficos, inclinação, curvatura e formas dos objetos.

2.4.1. A classificação das TM

Várias tentativas de classificação das TM foram realizadas por vários autores, levando em consideração o período do retículo, a formação das franjas e o tipo de deformação estudada.

ASSUNDI (1998) classifica as TM de acordo com o período do retículo em ou grade:

A. **Técnica do Retículo:** geralmente utiliza retículos com período maior que 1mm.

B. **Técnica de *Moiré*:** utiliza retículos com período variando de 0,1 a 1mm.

C. **Moiré Interferométrico**: utiliza retículos com período menor que 0,1mm.

AJOVALASIT (1998) classifica as **TM** levando em conta o tipo de deformação a ser estudada, e subdividindo-os em 5 tipos distintos:

A. **Moiré geométrico plano**: Fornece os componentes “u” e “v” do deslocamento no plano; é de baixa sensibilidade.

B. **Moiré interferométrico**: De alta sensibilidade e que fornece os componentes “u” e “v” do deslocamento no plano.

C. **Moiré holográfico**: De alta sensibilidade e que fornece os componentes “u” e “v” do deslocamento.

D. **Moiré por reflexão**: Fornece os componentes “ ϕ_x ” e “ ϕ_y ” da rotação

E. **Moiré de Sombra ou de projeção**: É o método que fornece a linha de nível do componente analisado com respeito ao retículo de referência.

Já SCIAMMARELLA (1982) classifica os métodos de *moiré* em três métodos básicos:

A. **Técnica de Moiré ou Técnica de Moiré Intrínseca**: provê o deslocamento dos pontos de uma superfície observada em relação a sua posição inicial.

B. **Moiré de Projeção**: também conhecido como *moiré* de sombra, que prove o deslocamento dos pontos de uma superfície observada em relação a uma superfície de referência.

C. **Moiré de Reflexão**: provê a inclinação dos pontos de uma superfície observada em relação a um estado de referência.

2.4.2. Formação das franjas de *moiré*

ASSUNDI (1998) afirma que todas as **TM** fornecem a mesma informação e podem ser interpretados da mesma maneira. A diferença entre eles reside nos métodos óticos utilizados para formação das franjas de *moiré*. Na “Técnica do Retículo”, esses são analisados individualmente e subtraídos, resultando no padrão visual de *moiré*. A “Técnica de *moiré*” usada sistema ótico geométrico formado pela obstrução da luz pelos dois retículos superpostos

para explicar a formação das franjas de *moiré*. Enquanto que no “*Moiré Interferométrico*”, a difração e a interferência são as bases da formação das franjas de *moiré*.

Para todas as **TM** são necessários dois retículos, um deles segue o contorno do objeto e é chamado de retículo deformado ou retículo do modelo (R_m) e o outro permanece indeformado e serve como referência, por isso é chamado de retículo indeformado ou de referência (R_r). Esses dois retículos podem significar tanto dois retículos fisicamente separados quanto dois registros do mesmo retículo, um antes e outro depois da deformação.

SCIAMMARELLA (1982) comenta que as **TM** também diferem na maneira com que o retículo do modelo (R_m) é gerado. A **TM** no plano (geométrico ou intrínseco) é utilizada para aplicações metrológicas e emprega convencionalmente dois retículos idênticos. O retículo do modelo é aderido ou impresso no objeto e se deforma com o objeto. As franjas podem ser obtidas por dupla exposição fotográfica ou sobreposição de imagens digitalizadas, uma antes e outra após a deformação.

CLOUD (1998) afirma que na **TM** de Projeção, o retículo do modelo é projetado obliquamente à superfície do objeto, modulando ou acompanhando a topografia do mesmo. Para se obter a deformação fora do plano, os retículos do modelo (R_m) e de referência (R_r) são a projeção do mesmo retículo, um antes e outro depois do objeto ser deformada. As franjas são formadas pela sobreposição das duas imagens.

Quando se deseja obter o contorno topográfico de objetos, o R_r é uma imagem do retículo projetado sobre um plano, ou mesmo um retículo virtual, isto é, gerado em computador. A formação das franjas é semelhante ao anterior.

Para a **TM** de Sombra o R_r , cujas faixas claras são transparentes, é colocado à frente do objeto. Quando este é iluminado por uma fonte, a sombra dele é projetada sobre a superfície do objeto (R_m). As franjas de *Moiré* são formadas pela interferência dos dois retículos quando o observador olha através do R_r . Traz como vantagem a observação instantânea das franjas de *moiré*.

Já no **TM** de reflexão o retículo do modelo é a imagem de um retículo visto através da imagem reflexiva do objeto, e a obtenção das franjas é igual aos anteriores.

2.4.3. A sensibilidade das **TM**

A sensibilidade das **TM** depende principalmente do período do retículo, um período menor fornece uma sensibilidade maior, o que é desejável para medições de deformações no plano, quando se necessitam medir deslocamentos muito pequenos.

SCIAMMARELLA (1982) afirma que o período (p) mais comumente usado nas aplicações de trabalhos normais com *moiré* varia de 1 a 40 linhas/mm, porém densidade de linhas maior pode ser utilizada. Franjas produzidas por baixas densidades de linhas podem ser observadas a olho nu utilizando-se luz comum, no entanto para altas densidades de linhas, como o efeito de difração da luz se torna dominante, é necessário usar luz coerente.

ASSUNDI (1998) afirma que a frequência típica dos retículos de *moiré* usados são de 20 a 40 linhas/mm para o *moiré* geométrico plano e de 1000 a 2000 linhas/mm para o *moiré* interferométrico, sendo a sensibilidade típica (deslocamento por ordem de franja) da ordem de 0,5 μm para o *moiré* interferométrico, 25 μm para o geométrico plano e 100 μm para o de sombra. Quadro 1.

Quadro 1. Frequência das linhas para as **TM** e a sensibilidade de cada uma.

TM	Frequência (linhas/mm)	Sensibilidade (μm)
De sombra	< 20	100
Geométrico Plano	20 a 40	25
Interferométrico	1000 a 2000	0,5

Para a **TM** Geométrico, utilizado na medição de deformação, a sensibilidade do método pode ser obtida, para a direção x , pelo uso da própria definição:

$$\varepsilon_{xx} = du/dx = p(dN/dx) \quad 4$$

onde:

ε_{xx} = deformação na direção x .

u = tensão na direção x

p = período do retículo

N = número de franjas de *moiré* produzidas pela deformação do objeto em estudo.

Dependendo do sistema experimental, o maior período da franja (p_m) de *Moiré* utilizado na prática é dado por:

$$\varepsilon_{xx} = p(dN/dx) = p/p_m \quad 5$$

onde: p_m = período da franja de moiré

Se considerarmos uma deformação de 50μ , e $p_m=10$ mm, então:

$$p = \varepsilon_{xx} \cdot p_m = (5 \cdot 10^{-5}) \cdot (10) = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

Ou seja, necessitamos de um retículo com $p = 5,0 \cdot 10^{-4}$ mm ou frequência de 2.000 linhas por milímetro. Retículos com tal densidade de linhas não podem ser produzidos por meios mecânicos, apenas por meios óticos, e é chamado de *moiré* interferométrico. Portanto a **TM** Geométrico deve ser utilizado apenas para medir deformações de materiais macios como plásticos, madeira, borracha etc.

Para as **TM** de Sombra e de Projeção, os ângulos de iluminação e observação em relação à linha normal ao retículo de *moiré*. Aumentando-se esses ângulos, ou apenas um deles, aumenta-se também a sensibilidade.

2.4.4. Métodos para melhorar a Sensibilidade das **TM**

GASVIK (1983) afirma que a sensibilidade das **TM** pode ser aumentada através de vários métodos, tais como interpolação de franjas, multiplicação de franjas, técnicas de grades desencontradas (mismatch techniques).

O método de interpolação de franjas consiste em determinar as franjas de ordem fracionária, como por exemplo, 1/2 franja, 1/4 de franja. Esta franja de ordem fracionária pode ser medida pela intensidade da luz em cada ponto da imagem.

A multiplicação de franjas é um método muito robusto, produz um maior número de franjas de *moiré* e contorna as dificuldades causadas pela variação da intensidade da iluminação ao longo do objeto em estudo, principalmente na **TM** de sombra. Este método consiste em obter duas imagens das franjas de *moiré* (Figuras 6a e 6b). Nelas as franjas de *moiré* estão defasadas uma da outra de π , ou seja meio período da franja de *moiré*, de maneira

que em uma imagem o local onde existe uma franja clara, na outra existirá uma franja escura, isto é, uma imagem é inversa da outra (Figura 6).

Subtrai-se uma imagem da outra e calcula-se o seu módulo, obtendo-se uma imagem com o dobro de franjas de moiré (Figura 6c). Trunca-se (binariza-se) a imagem atribuindo-se 0 (zero) à intensidade luminosa com valores próximos de 0 (escuro) e 255 (por exemplo) para os demais valores (Figura 6d), proporcionando o estreitamento das franjas de *moiré*, o que facilita a sua digitalização, além de eliminar qualquer tipo de ruído.

A Figura 7 demonstra graficamente os passos do processo, a sobreposição das duas imagens, inicial e deslocada de π (Figura 7a), a subtração das mesmas (Figura 7b), o módulo da subtração e localização da região onde ocorreu o truncamento (Figura 7c), a imagem truncada (ou binarizada) (Figura 7d).

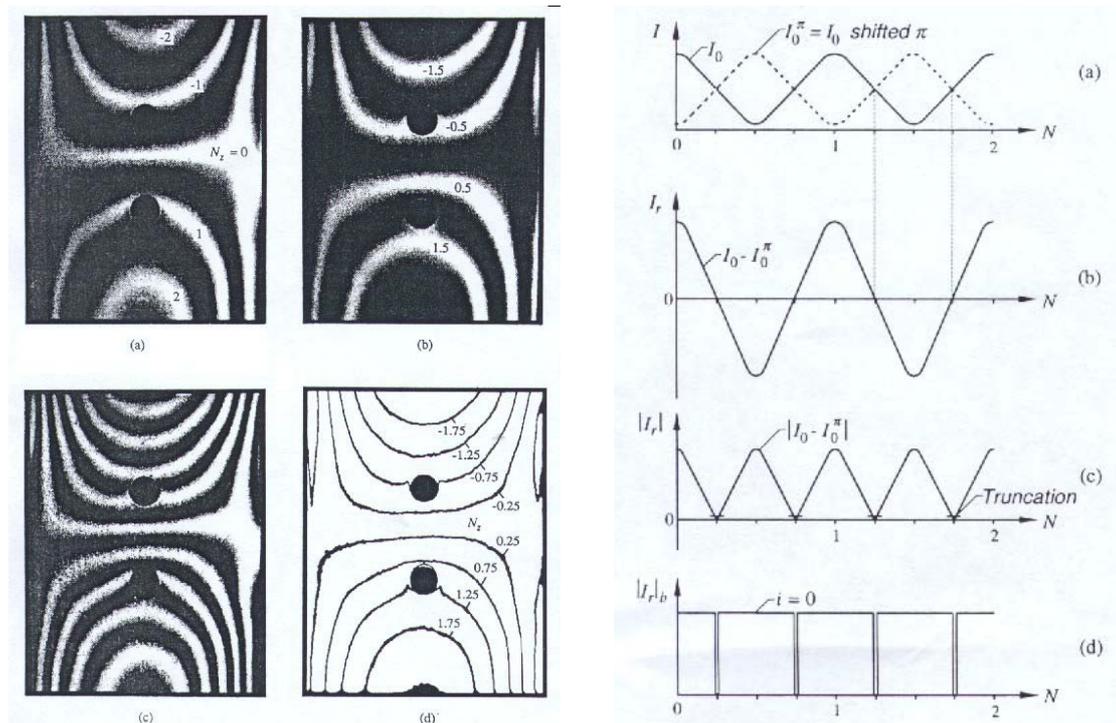


Figura 6: Multiplicação de Franjas (a) Padrão inicial das franjas de moiré. (b) Padrão complementar. (c) Padrão obtido pelo módulo da subtração de (a) e (b). (d) Contornos afinados através de truncamento, relativos às das franjas em (c).

Fonte: POST et al, 1994

Figura 7: Esquema da multiplicação de franjas (a) Sobreposição das duas imagens. (b) Padrão obtido pela subtração de (a) e (b). (c) Módulo da subtração e indicação das regiões de truncamento. (d) Truncamento ou binarização, relativos às das franjas em (c).

Fonte: POST et al, 1994

A técnica de grades desencontradas, não poder ser utilizado em *moiré* de sombra, pois exige que haja diferença entre a retículo do modelo (Rm) e o retículo de referência (Rr). Essa diferença pode ser devida ao fato de os modelos serem de períodos diferentes, terem seus eixos rotacionados um em relação ao outro ou ainda ambos os fatores.

BRUNIG et al. (1974) citado por ONUMA et al. (1996) desenvolveram um método que aplicado à interferometria, pode aumentar grandemente as resoluções espacial e vertical quando comparado à interferometria convencional. Ele utiliza múltiplos interferogramas, nos quais as fases são mudadas ou deslocadas entre um e outro; ele é chamado de Método da Mudança de Fase (Phase shifting).

SU & CHEN (2001) citam que o Método da Mudança de Fase é utilizado por várias técnicas óticas: Perfilometria por Medição de Fase (PMF), Perfilometria por Transformada de Fourier (PTF), Perfilometria por Medição de Modulação (PMM), Detecção Espacial de Fase (DEF), Projeção de Franjas de Cores Codificadas (PFCC).

HU (2001) cita que, além das técnicas óticas, várias outras técnicas de medição de fase têm sido desenvolvidas, destacando a Ressonância Magnética (RM), Interferometria Terrestre por Radar de Abertura Sintética.

DIRCKS et al. (1988) aplicaram o Método da Mudança de Fase à **TM** de sombra, obtendo uma resolução, na prática, no mínimo 10 vezes maior que a simples medição de franjas para um dado arranjo experimental. Além disso é mais rápido e é capaz de determinar automaticamente a concavidade e a convexidade da superfície.

WANG (2001) descrevendo o Método de Mudança de Fase aplicado à **TM** de Sombra diz que são necessárias 4 imagens das franjas de *moiré*. Em cada uma delas as o objeto é aproximado ou afastado do Retículo de referencia (Rr) de maneira a produzir deslocamentos das franjas de *moiré* $1/2\pi$, 1π e $3/2\pi$ de fase. (Figura 8).

A intensidade luminosa em cada uma das imagens é descrita pelas equações:

$$I_1(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos \phi(x, y) \quad 6$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[\pi/2 + \phi(x, y)] \quad 7$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[\pi + \phi(x, y)] \quad 8$$

$$I_4(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[3\pi/2 + \phi(x, y)] \quad 9$$

onde:

$a(x, y)$ = intensidade luminosa do fundo em cada ponto da imagem.

$b(x, y)$ = intensidade de modulação em cada ponto da imagem.

$\cos \phi$ = é a fase a ser determinada.

Resolvendo as 4 equações simultaneamente, pode se obter o termo fase ($\cos \phi$) para cada ponto da imagem:

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{(I_4(x, y)) - (I_2(x, y))}{(I_1(x, y)) - (I_3(x, y))} \right] \quad 10$$

O cálculo da fase feito pelo computador resulta em valores que variam de $-\pi$ a π , por isso imagem resultante, que é chamado de mapa de fases empacotadas, possui descontinuidades. A Figura 8 mostra as 4 imagens de um circuito impresso, com as franjas de fases mudadas de 0 , $1/2\pi$, π e $3/2\pi$

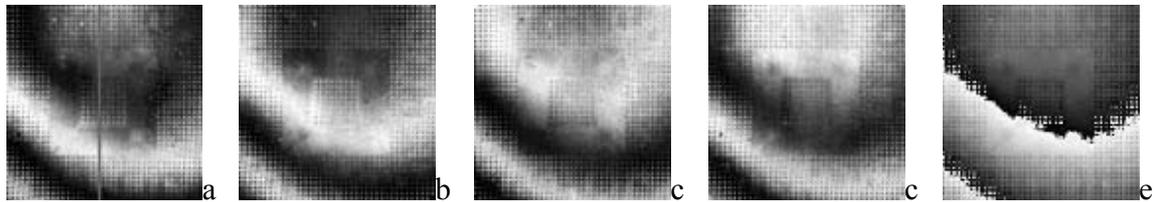


Figura 8: Método da mudança de fase. a. Imagem inicial. b. Imagem com franja de fase mudada $1/2\pi$. c. Imagem com franja de fase mudada π . d. Imagem com franja de fase mudada $3/2\pi$. e. Mapa de fases empacotadas. Fonte: WANG (2001)

Estas descontinuidades são removidas por um processo chamado desempacotamento de fase (Phase unwrapped). A Figura 9 mostra o perfil de um objeto com mapa de fases empacotadas (a) e o mesmo perfil com as fases desempacotadas (b).

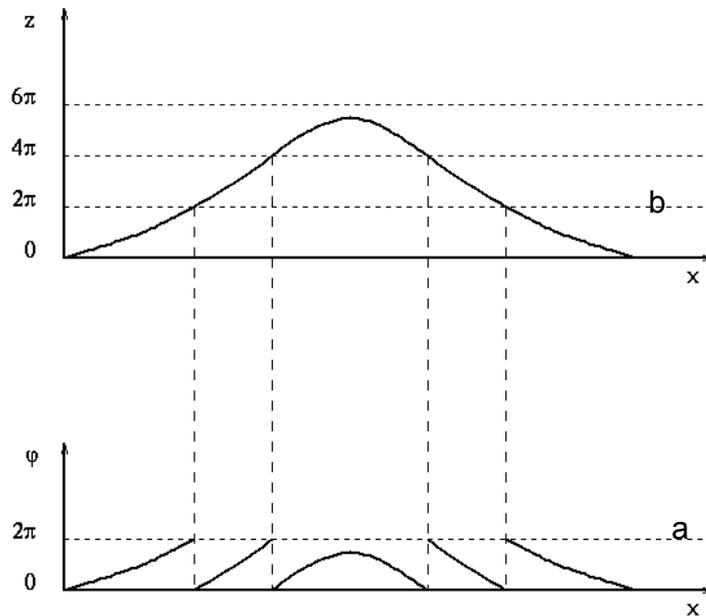


Figura 9: Desempacotamento de fases. a. Mapa de Fases empacotadas de um perfil. b. Fases desempacotadas no mesmo perfil.

SOILLE (2000) cita que o processo de desempacotamento de fase não um processo trivial, pois pode apresentar erros devido a:

- Ruídos eletrônicos e speckle
- Presença de formas arbitrárias como furos, cantos, etc.
- Regiões com baixa modulação
- Mudanças de fase abruptas, devido a descontinuidades maiores que π .

DIRCKS; DECRAEMER (1990) afirmam que a exatidão sistema depende da calibração do arranjo experimental, e que é possível saber perfeitamente a distância entre 2 franjas de *moiré*.

MOORE & TRUAX (1979) afirmam que a exatidão para a **TM** de sombra é no máximo 1/10 do período da franja de *moiré*. Eles desenvolveram um método é chamado “phase locked”, baseado no método de *moiré* de sombra, cuja exatidão é maior que 1/20 do período da franja de *moiré* produzida. Este método gera o perfil 2D do objeto estudado.

SHAPIRA & VOLOSHIN (1992), desenvolveram um método baseado no *moiré* de sombra, que utilizando luz branca, pode medir a geometria de faces e corpos humanos, bem como deformações fora do plano em estruturas carregadas. O resultado obtido mostrou um erro médio menor que 2%.

2.5. Aplicação da TM de sombra

WINDISCHBAUER (1982) afirma que a TM (topografia de *moiré*) é uma moderna ferramenta científica para medição, análise, e descrição matemática de formas tridimensionais de objetos biológicos, pois se trata de um método ótico não invasivo, capaz de minimizar os riscos de doenças e danos.

TAKASAKI (1970) para obter os contornos topográficos de um manequim, utilizou o seguinte arranjo experimental: colocou à frente do manequim um retículo com período de 1mm, construído de linhas de pescar de nylon com diâmetro de 0,45 mm. O manequim foi iluminado com duas lâmpadas de 500W, posicionadas lateral e simetricamente a uma distância de 500 mm da câmera fotográfica. A câmera e as fontes de luz estão localizadas a 2000 mm do retículo. O resultado é visto na Figura 10, onde as franjas de *moiré* possuem cotas distanciadas de aproximadamente 4 mm.

O mesmo autor obteve a linhas de contorno de uma moeda de 25 centavos de dólar americanos, como se pode observar na Figura 11, para um retículo com período de 0,125 mm, iluminação coerente a um ângulo de 45° em relação à perpendicular da superfície do retículo e um ângulo de observação de 0° , obtendo uma distancia entre as cotas das franjas também de *moiré* de 0,125 mm.

TAKASAKI (1973) ainda trabalhando com manequins, concluiu que a exatidão da técnica, quando corrigidos os contornos de *moiré*, é de 0,02%, e que a mesma depende unicamente das distorções da lente da câmera.

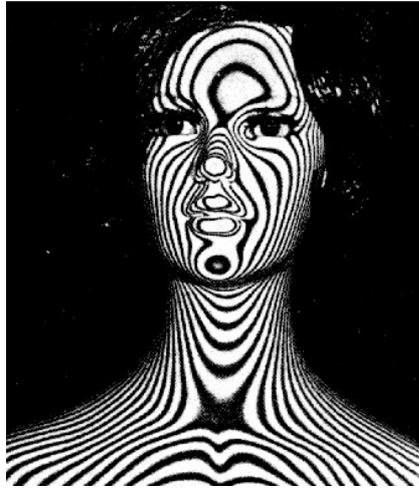


Figura 10: Franjas de *moiré*, em um manequim, com cotas distanciadas de aproximadamente 4 mm.
Fonte: TAKASAKI (1970)



Figura 11: Franjas de *moiré* em uma moeda de US\$ 0,25 com franjas distanciadas de 0,125 mm.
Fonte: TAKASAKI (1970)

WINDISCHBAUER (1982) fazendo uma revisão do “estado de arte” da técnica de *moiré* de sombra aplicado à biologia e medicina, cita os seguintes trabalhos: LOTMAR (1972) testou as funções da retina; SHOUP (1976) determinou o centro de rotação de juntas humanas, KAWARA (1979) mediu a curvatura da córnea humana e MORELAND et al. (1981) utilizou esse método na pesquisa de escoliose da espinha humana.

NEUGEBAUER & WINDISCHBAUER (1982) também usaram o método para pesquisar escoliose da espinha. A partir de uma imagem das costas de um paciente, com as franjas de *moiré*, produziu através de computador um topograma de *moiré* corrigido da mesma. Este topograma possibilitou gerar uma curva de rotação das vértebras (curva CMCT). Esta curva se mostrou equivalente à curva de rotação das vértebras produzidas por imagens de raio X da coluna. (Figura 12)

BATOUCHE et al. (1996) desenvolveu um sistema de visão computadorizada, utilizando imagens de *moiré*, para diagnosticar doenças da coluna de pacientes. Este sistema extrai as franjas de contorno das imagens de *moiré*, localizando alguns elementos anatômicos, coluna e espáduas, com os quais gera a superfície 3D das costas de pacientes e, a partir de parâmetros médicos, produz o diagnóstico.

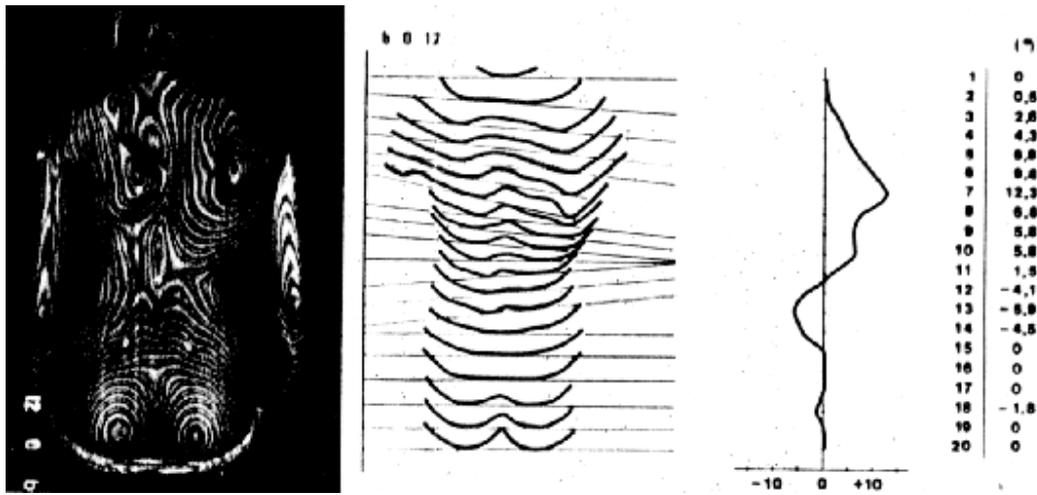


Figura 12: Topograma de *moiré*, seções produzidas pelo topograma de *moiré* e curva CMCT de um paciente com escoliose idiopática.
 Fonte: NEUGEBAUER & WINDISCHBAUER (1982)

KATSUKI et al. (1982) quantificou a simetria do nariz humano usando fotografia de *moiré*. Através das imagens de uma face contendo as franjas de *moiré*, calcularam índices de simetria antes e após cirurgia facial. Comparando-se estas de linhas simetria do nariz entre si e com a linha ideal, pode-se então avaliar os resultado da operação (Figura 13).

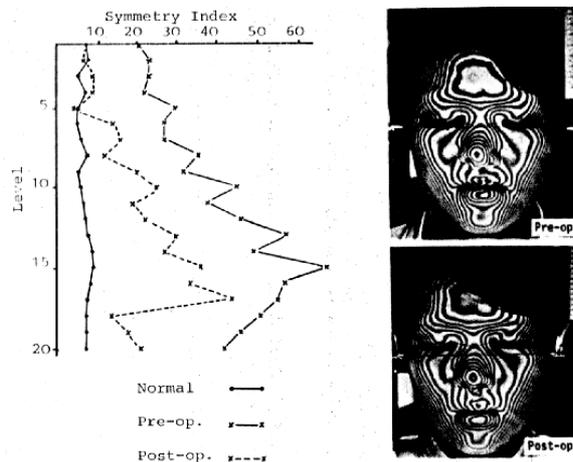


Figura 13: Mudança no contorno de *moiré* e índice de simetria por rinoplastia.
 Fonte: KATSUKI et al. (1982)

DIRCKX, DECRAEMER & DIELIS (1988) desenvolveram um método chamado método da mudança de fase “phase shifting method” baseado em *moiré* de sombra, para a reconstrução de superfícies 3D. Neste arranjo experimental, são tomadas imagens do objeto ou alvo com as franjas de *moiré*; e entre cada imagem o objeto foi aproximado ou afastado do retículo distâncias de fração do período deste retículo. Após a digitalização estas imagens foram subtraídas e através de um programa computacional a reconstrução da superfície do objeto foi obtida.

KERATRON CORNEAL (2000) usa com sucesso a TM para estudar a córnea humana, enquanto que Benostan (1998) usa para estudos de obesidade e Funnell & Decraemer (1998) usaram esta técnica no estudo da topografia de tímpano de gatos.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - INNOVATION DESERVING EXPLORATORY ANALYSIS PROGRAM (2000) desenvolveram um protótipo de um sistema, não convencional e não destrutivo, para avaliação de superfícies de pavimentos usando a TM de sombra associado a um avançado sistema de vídeo controlado por computador e tecnologia de processamento de imagens. Esse protótipo grava as imagens de *moiré* de alta resolução, à medida que transita pela estrada a uma velocidade de 48 a 65 km/h. A imagem é levada uma central onde é analisada e pode determinar o estado do pavimento e a magnitude dos danos que possa ter sofrido.

ASSUNDI et al. (1998), ELETRONIC PAKAGING SERVICES (1998) afirmam que esse método é também utilizado nas linhas de produção industriais para identificar a forma e defeitos dos produtos.

ZWEMER et al (2000) e WANG & HASSELL (2000) usaram a técnica de *moiré* de sombra para inspeção automática de circuitos impressos na linha de produção.

2.6. Determinação de cotas das franjas de *moiré*

As **TM** utilizadas na perfilometria de superfícies são a de sombra e de projeção, sendo que a mais utilizada é a primeira.

AJOVALASIT (1998) diz que, satisfeitas algumas condições relativas à geometria do sistema de iluminação e de observação das franjas de *moiré*, de uma maneira geral para as duas técnicas, a distância “*z*” do retículo de referência é dada por:

$$z = kpN \quad 11$$

onde:

z = distância vertical da superfície do objeto ao retículo de referência.

k = constante que depende do esquema experimental.

p = período do retículo.

N = número de ordem das franjas de *moiré*.

2.6.1. TM de sombra

A formação das franjas de *moiré* se deve à interferência ótica entre o retículo de referência (Rr) e a sua sombra, que é chamada de retículo do modelo (Rm), projetada sobre o componente a analisar.

CLOUD (1988) demonstra a formação das franjas de *moiré* de sombra. O retículo do modelo (Rm) acompanha a topografia do objeto e é observado através do retículo de referência (Rr). Em algumas áreas as linhas de Rm, sob a perspectiva do observador, se encontrarem sob com as linhas de Rr, permitindo a transmissão dos raios luminosos refletido pela superfície do objeto, formado as franjas claras. Em outras áreas as linhas de Rm estão alinhadas com as linhas de Rr, não havendo portanto a transmissão para o observador dos raios luminosos, formando então as franjas escuras. A Figura 14 mostra um ciclo completo, que vai das franjas claras para escuras e de escuras para claras.

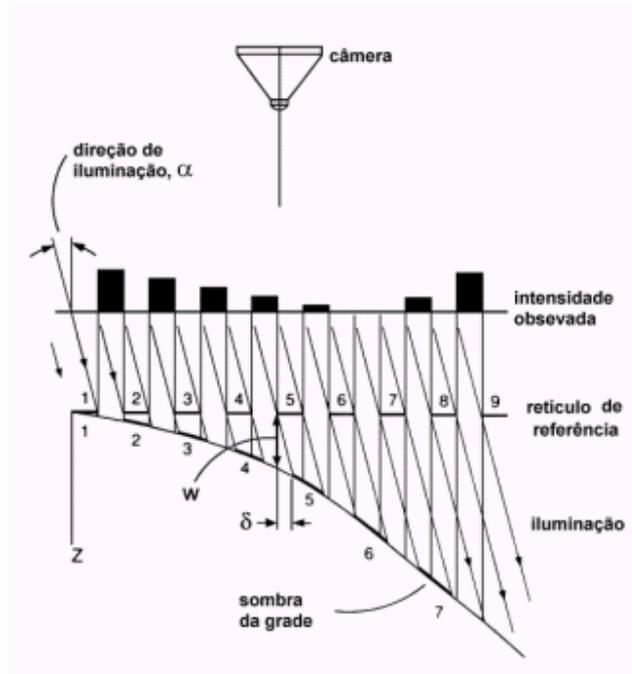


Figura 14: Formação das franjas no *moiré* de sombra. Fonte CLOUD (1998)

2.6.1.1. Diferença de cota para Iluminação coerente.

O esquema experimental, apresentado na Figura 15a, mostra a formação das franjas pela **TM** de sombra com fonte de luz coerente (colimada), isto é, fonte e observador localizados no infinito em relação ao objeto em estudo.

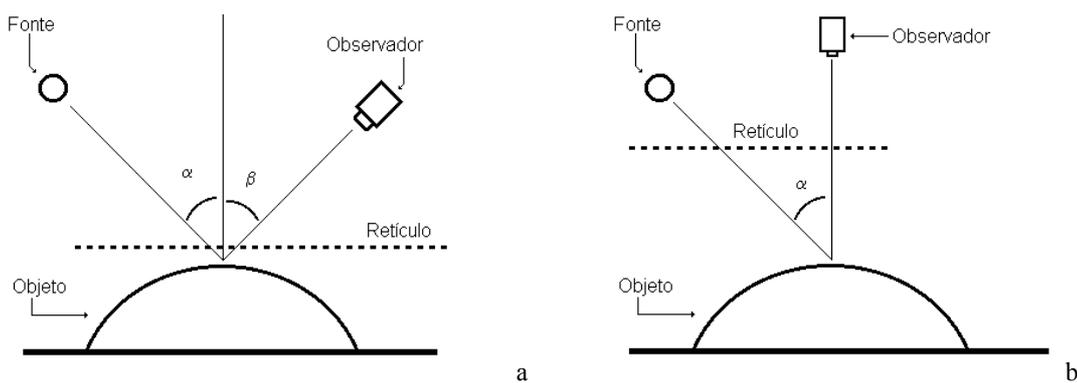


Figura 15: Sistema experimental para *moiré* de sombra com iluminação coerente. a. Com observador localizado a um ângulo em relação à normal ao plano que contém o retículo de referência. b. Com observador localizado perpendicularmente ao plano que contém o retículo de referência.

POST et al. (1994), determinaram para o mesmo esquema experimental a distância de um ponto sobre a superfície de um objeto em estudo até o retículo de referência, através de um simples cálculo trigonométrico. A Figura 16 apresenta as relações trigonométricas para o *moiré* de sombra, de onde se conclui que:

$$Np = z \tan \alpha + z \tan \beta \quad 12$$

e resolvendo esta equação para “z” se obtém:

$$z = \frac{Np}{(\tan \alpha + \tan \beta)} \quad 13$$

para o observador localizado perpendicular ao plano do retículo de referência (Figura 15b), a equação acima fica.

$$z = \frac{Np}{\tan \alpha} \quad 14$$

TAKASAKI (1970) propõe uma outra equação para o caso do observador localizado perpendicular ao plano que contém o retículo de referência (Figura 15b):

$$z = Np \cot \alpha \quad 15$$

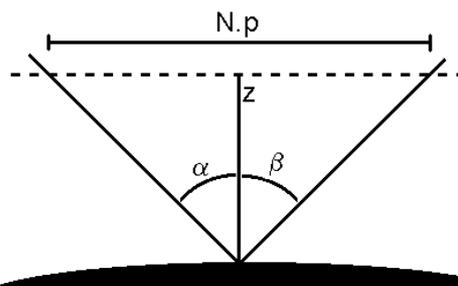


Figura 16: Esquema trigonométrico para a TM de sombra com iluminação coerente

MEADOWS et al. (1970) e WHITEHOUSE (1994), por outros métodos, chegam às equações propostas por POST et al. (1994), e determinaram que a diferença de cota ($\Delta z = z_1 - z_2$) entre dois pontos localizados na superfície a ser analisada, para o observador e fonte de luz localizados no infinito (luz colimada) é dada por:

$$\Delta z = \frac{Np}{(\tan \alpha + \tan \beta)} \quad 16$$

2.6.1.2. Diferença de cota para Iluminação não coerente.

MEADOWS et al. (1970), WHITEHOUSE (1994) e POST et al. (1994) também determinam z para um sistema de iluminação feita com luz não coerente (não colimada), isto é, com o observador e fonte de luz localizados à mesma distância finita do objeto a ser estudado (Figura 17), isto é, $h=h_1+h_2$. Se comparada com a Figura a 15a, por definição conclui-se que:

$$\tan \alpha + \tan \beta = d / h \quad 17$$

substituindo-se na Equação 13, tem-se que:

$$z = \frac{Np}{d/h} \quad 18$$

logo:

$$z = \frac{Nph}{d} \quad 19$$

TAKASAKI (1970) porém propõe a seguinte equação:

$$z = \frac{Nh}{\left(\frac{d}{p} - N\right)} \quad 20$$

e que a equação 2.7 é uma aproximação que só deve ser utilizada quando “ d ” é muito maior que “ p ”.

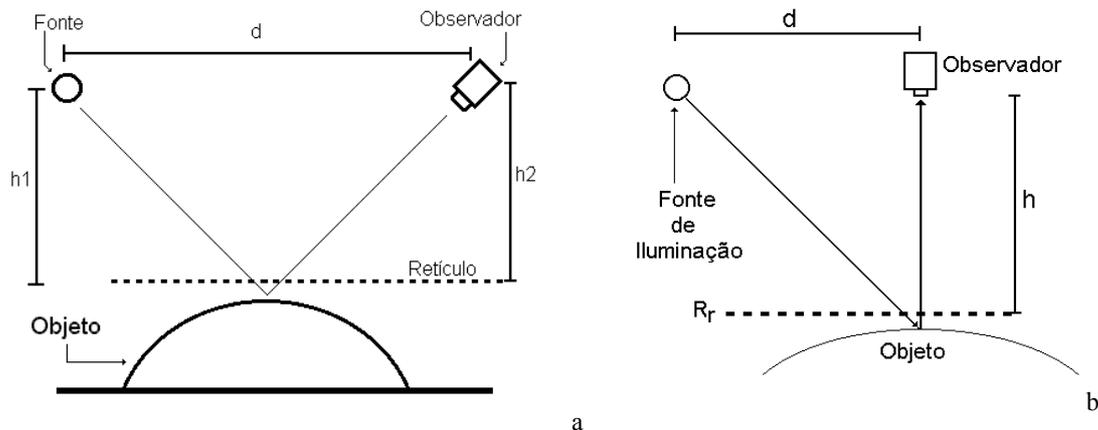


Figura 17: Sistema experimental para *moiré* de sombra com observador e fonte localizados próximos do objeto. a. Com observador localizado a um ângulo em relação à normal ao plano que contém o retículo de referência. b. Com observador localizado normal ao plano que contém o retículo de referência.

MEADOWS et al. (1970) e WHITEHOUSE (1994), por outros métodos, chegaram às mesmas equações propostas por POST et al. (1994), e determinaram que a diferença de cota ($\Delta z = z_1 - z_2$) entre dois pontos localizados na superfície a ser analisada, para o observador e fonte de luz localizados no infinito (luz colimada) é dada por:

$$\Delta z = \frac{Nph}{d} \quad 21$$

2.6.2. TM de projeção

Outro método indicado para o estudo da topografia de superfícies é o *moiré* de projeção, onde o retículo do modelo (R_m) é projetado na superfície do objeto e fotografado (Figura 18). Esta imagem digitalizada é sobreposta à imagem do retículo de referência (R_r). Esse pode ser virtual, isto é, gerado em computador ou uma fotografia do mesmo retículo projetado sobre a superfície plana, onde o objeto está colocado.

CLOUD (1998) determina que a diferença de cota ($\Delta z = z_1 - z_2$) entre dois pontos localizados na superfície a ser analisada é dada por:

$$\Delta z = \frac{Np}{\text{sen } \alpha} \quad 22$$

onde N é o número de ordem da franja, p é o período do retículo e α é o ângulo de projeção da grade sobre o objeto (Figura 18).

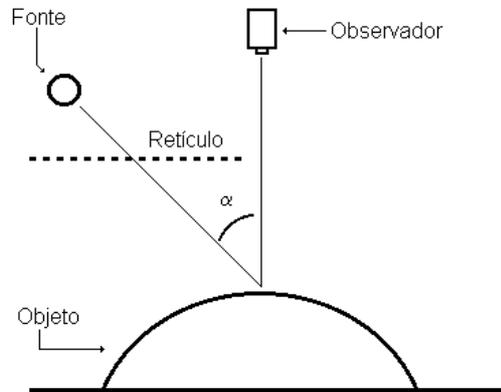


Figura 18: Sistema experimental para *moiré* de projeção.

2.7. Erros Experimentais

CURLESS (2001) propõe parâmetros que nos permitem verificar a qualidade ou consistência das medidas obtidas pelas técnicas experimentais de perfilometria.

- Resolução: Menores mudanças na topografia que o sensor pode captar e quantificar
- Exatidão: Variações estatísticas entre medições repetidas de um valor conhecido.
- Repetibilidade: As medidas podem ser repetidas?
- Sensibilidade ambiental: fatores ambientais que podem influenciar as medições.
- Velocidade: velocidade em que as medidas dos perfis são obtidas pelas técnicas.

Quando se realizam medições há sempre erros que as acompanham. As fontes de erro fazem com que todas as medidas, por mais cuidadosas que sejam, são afetadas por um erro experimental. Esses erros pertencem a dois grandes grupos: erros sistemáticos e erros aleatórios.

Erros Sistemáticos são aqueles que fazem com que as medidas feitas estejam consistentemente acima ou abaixo do valor real. As fontes deste tipo de erro são facilmente identificáveis, e, em princípio, podem ser eliminados ou compensados. Erros deste tipo prejudicam a **exatidão** (em inglês “accuracy”) da medida e podem ser devidos a: utilização de

instrumentos descalibrados, métodos de observação inadequados, efeitos ambientais e simplificação de modelos teóricos.

Erros aleatórios são variações normais das medidas, para cima ou para baixo da média. Este tipo de erro afeta a **precisão** (em inglês “precision”) da medida e nem sempre é possível identificar as suas fontes. Algumas fontes típicas de erros aleatórios são devidas a: julgamento feito pelo observador ao fazer uma leitura abaixo da menor divisão de uma escala (de modo geral, a precisão de um instrumento de científicos é a metade da menor escala) e flutuações ambientais não previsíveis.

WILLMOT et al. (1985) afirmam que a precisão é o grau de dispersão dos valores em torno da média.

A Figura 19 apresenta a diferenciação entre a precisão e a exatidão das medidas, devidas a **erros sistemáticos e aleatórios**.

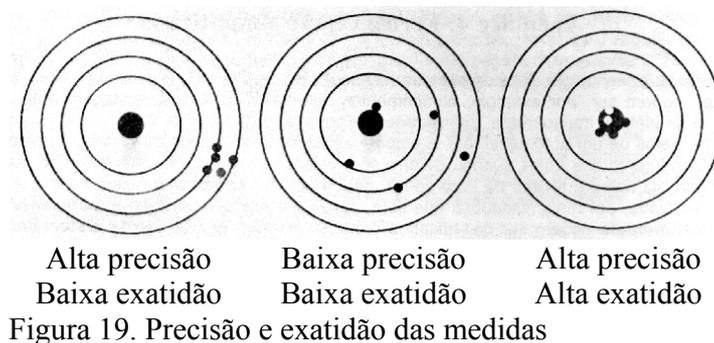


Figura 19. Precisão e exatidão das medidas

WILLMOT et al. (1985) afirmam que quando se relacionam valores obtidos por dois métodos de amostragem, ou ainda, valores observados e estimados, pode se ter informações sobre a precisão e exatidão destes valores, que conjuntamente indicam a consistência dos dados estimados com os medidos.

WILLMOT et al. (1985) declara que a precisão é dada pelo coeficiente de correlação de Pearson (R^2) e indica apenas o grau de dispersão dos dados obtidos, ou seja, quanto eles se ajustam a uma linha de tendência central. Ele considera apenas o erro aleatório. Já a exatidão, erro sistemático, das medidas é quantificada numericamente pelo índice de concordância de

Indicam num gráfico de dispersão, ou 1/1, o quanto esses dados se ajustam uma linha que, partindo da origem, divide o gráfico em duas partes iguais.

O índice de concordância de Willmott (d) é determinado pela seguinte equação:

$$d = \frac{\sum (M - L)^2}{\sum [(M - \bar{L}) + (L - \bar{L})]^2} \quad 23$$

Onde:

d = O índice de concordância de Willmott

M = Valores obtidos pela **TM**

L = Valores obtidos pelo Scanner 3D Laser

\bar{L} = Média dos valores obtidos pelo Scanner 3D Laser

PICCINI (1998) aplicou os índices R^2 e d para testar modelos agrometeorológicos desenvolvidos para estimativa de produtividade do cafeeiro (*Coffea arabida L.*) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo.

Quando se usam valores medidos, portanto afetados por erros, para realizar cálculos para se obter valor de outras grandezas, é necessário se conhecer como o erro original afeta a grandeza final, isto é, como os erros de medida afetam os cálculos.

Para o caso de soma ou subtração de grandezas, o erro do resultado será dado pela raiz quadrada da soma do quadrado dos erros, assim uma soma (ou subtração) do tipo:

$$w = x \pm y \pm z \quad 24$$

será afetada por um erro de valor:

$$\Delta w = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad 25$$

Para o caso de multiplicação ou divisão o **erro relativo** será dado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos **erros relativos** de cada fator, então para uma equação do tipo:

$$w = \frac{x \pm \Delta x}{y \pm \Delta y} \quad 26$$

o erro relativo será dado por:

$$\frac{\Delta w}{w} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad 27$$

3. MATERIAL E MÉTODOS

Na primeira fase do trabalho, que corresponde ao aprendizado da utilização da **TM** de sombra, foram feitos estudos preliminares. Na segunda fase foram gerados os modelos da superfície do modelo da pês, pelas três técnicas: Scanner 3D laser, **TM** de sombra com multiplicação de franjas e **TM** de sombra com mudança de fase.

3.1. Estudos preliminares da **TM** de sombra

Para a correta utilização da **TM** de sombra, fez necessário o aprendizado da técnica e testes com o arranjo experimental, utilizando objetos com dimensões conhecidas.

3.1.1. Estudos preliminares da **TM** de sombra clássica

Para a aprendizado da utilização da **TM** de sombra utilizou-se um cone confeccionado em aço, com 9,16 mm de altura e 30,93 mm de diâmetro. O cone foi pintado com tinta látex, branco fosco, a fim de evidenciar as franjas de moiré. (Figura 20)



Figura 20: Dimensões do cone de aço.

O arranjo experimental, mostrado na Figuras 21 e 22, é constituído de:

- Sistema de Iluminação: lâmpada de projetor de “slides” com 500 W de potência.
- Sistema de aquisição de imagens (observador): câmera fotográfica digital Kodak DC 120 (EASTMAN KODAK COMPANY, 1997).

- Retículo de moiré: com período de 0,5 mm, colocado entre duas placas de vidro de 100x100x3 mm, para evitar a sua deformação e sustentado por um suporte metálico (Figura 23).

O retículo de moiré foi confeccionado em fotolito obtendo-se linhas com maior nitidez do que aquelas impressas em lâminas de transparências para retroprojetores através de impressoras à jato de tinta ou à laser.

A distância do observador (câmera) e da fonte de luz (iluminador) ao retículo é representado por “ h ”, sendo que “ d ” representa a distância entre observador e fonte de luz.

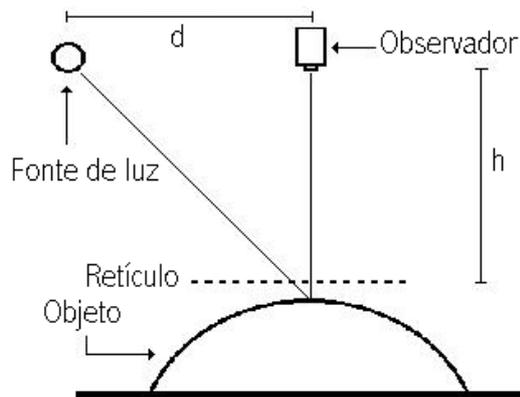


Figura 21: Arranjo experimental para verificação da consistência do TM de sombra

Para se testar a consistência da **TM** de sombra, foram tomadas 5 imagens, correspondentes às 5 condições experimentais descritas no quadro 2.

Quadro 2: Condições experimentais para aplicação da **TM** de sombra para o cone

Condição experimental	h (mm)	d (mm)	p (mm)
1	500	100	0,5
2	500	125	0,5
3	500	150	0,5
4	500	175	0,5
5	500	200	0,5

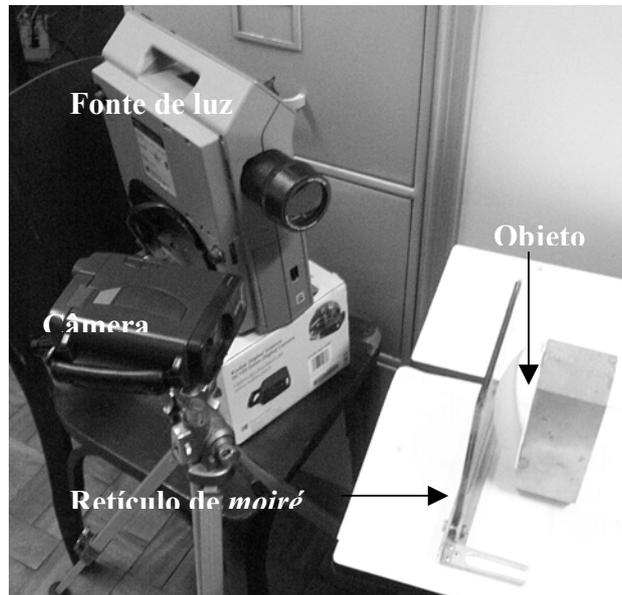


Figura 22: Foto do arranjo experimental

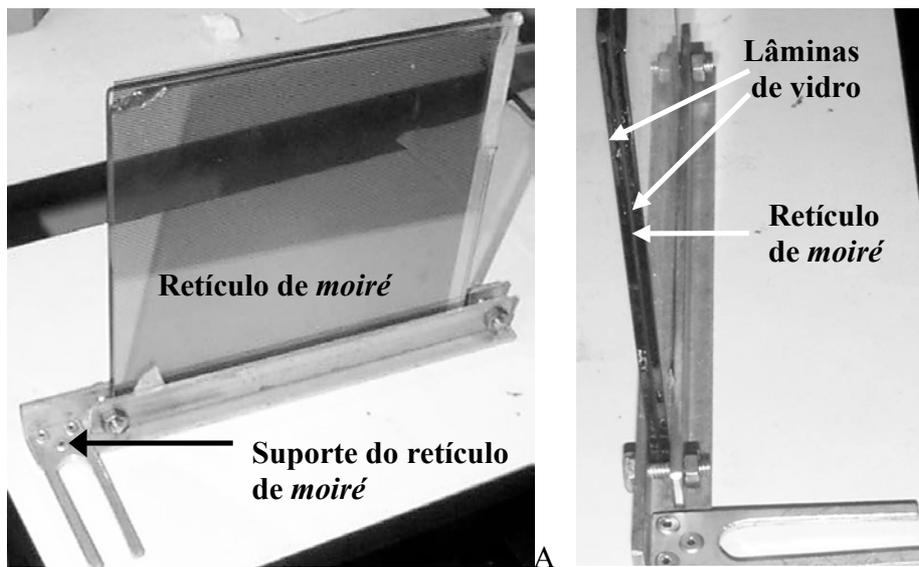


Figura 23: Suporte do retículo de moiré. A. Vista geral. B. Detalhe das lâminas de vidro que sustentam o retículo.

Para se testar a consistência da **TM** de sombra, foram tomadas 5 imagens, correspondentes às 5 condições experimentais descritas no quadro 2.

Quadro 2: Condições experimentais para aplicação da TM de sombra para o cone

Condição experimental	h (mm)	d (mm)	p (mm)
1	500	100	0,5
2	500	125	0,5
3	500	150	0,5
4	500	175	0,5
5	500	200	0,5

Estas imagens foram então transferidas para o computador através do software Kodak Picture Transfer Application (EASTMAN KODAK COMPANY, 1997). Procedeu-se então a contagem das franjas e o cálculo da altura da calota com base nas equações propostas por MEADOWS (1970) e TAKASAKI (1973), equações 19 e 20 respectivamente.

Para a geração do Modelo Digital da superfície de contorno do cone utilizou-se metodologia descrita por VALERIANO (1999), que a utilizou para a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de terrenos a partir da digitalização das curvas de nível de mapas topográficos de elevação.

Uma imagem do cone contendo as franjas de moiré foi importada, como imagem “raster”, para o programa AUTOCAD 2000 (AUTODESK, 1999). As franjas de moiré foram então digitalizadas, criando vetores a espaçamentos de 1 ordem de franja (centro das franjas escuras) e para cada vetor foram atribuídos valores de cota calculados pela equação 19.

Esses vetores foram convertidos para arquivo no formato “.DXF” que contém, linha a linha, as coordenadas x e y e as cotas z dos pontos que compõem as franjas digitalizadas. Este arquivo foi então transformado em arquivo no formato “.DAT” utilizando-se o programa conversor “DXF2DAT”, que possibilita a sua leitura pelo programa SURFER 32 (GOLDEN SOFTWARE, INC, 1995).

Esse arquivo importado para uma planilha eletrônica foi modificado com a finalidade de ajustar as escalas, eixos e pontos de origem das franjas de moiré.

O arquivo “.DAT” modificado é transportado para o programa SURFER 32 (GOLDEN SOFTWARE, INC, 1995), onde foram interpolados pelo método da “krigagem”, gerando um modelo digital da superfície do cone.

Um outro teste foi feito utilizando uma calota parabólica de vidro, pintada com tinta látex, branco fosco, para evidenciar as franjas de *moiré*, com as seguintes dimensões: 30,4 mm de altura e 113,8 mm de diâmetro (Figura 24) e as condições experimentais apresentadas no Quadro 3.

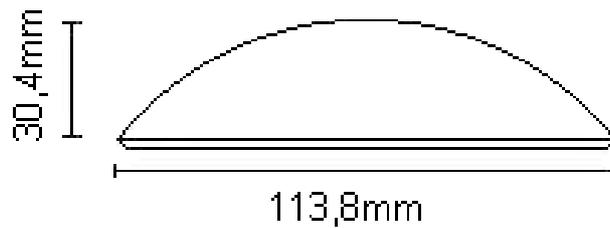


Figura 24: Dimensões da calota.

Quadro 3: Condições experimentais para aplicação da **TM** de sombra para a Calota

Condição experimental	h (mm)	d (mm)	p (mm)
1	650	120	1
2	650	150	1
3	650	180	1
4	650	210	1
5	650	240	1

3.1.2. Estudos preliminares da **TM** de sombra com deslocamento de fase

Para os estudos preliminares da utilização do **TM** de sombra com deslocamento de fase foi confeccionado um objeto de superfície complexa em cartolina branca, por ser de fácil confecção e permitir boa definição das franjas de *moiré*. Ele é constituído de uma folha de cartolina branca com um cone convexo e uma pirâmide côncava (Figuras 24 e 25).

Para a criação de um modelo digital da superfície topográfica do objeto pela **TM** de sombra com deslocamento de fase, foi utilizado um arranjo experimental semelhante àquele citado no item 3.1.1. Acrescentou-se a ele uma mesa de deslocamento micrométrico, utilizada em afiatrix de ferramentas, sobre a qual foi colocado o objeto em estudo e que permite o seu deslocamento ao longo do eixo z, afastando ou aproximando-o do retículo de *moiré* (Figuras

27 e 28). Para esta configuração os parâmetros utilizados foram: $h = 300 \text{ mm}$, $d = 300 \text{ mm}$ e $p = 0,5 \text{ mm}$.

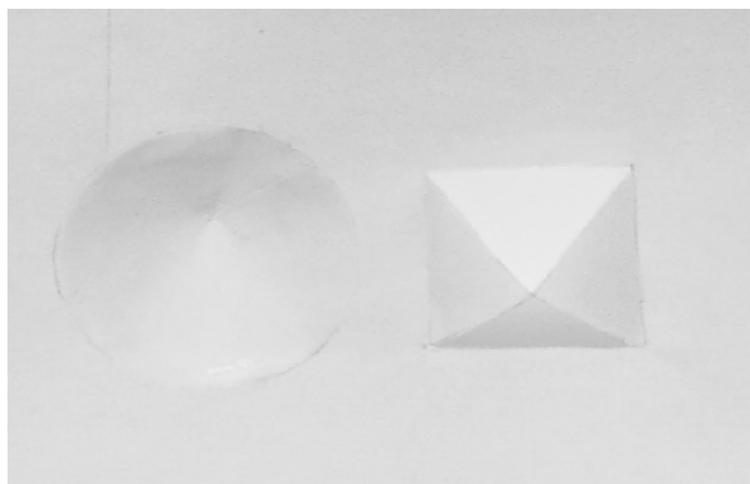


Figura 25: Foto do objeto cone convexo/pirâmide côncava.

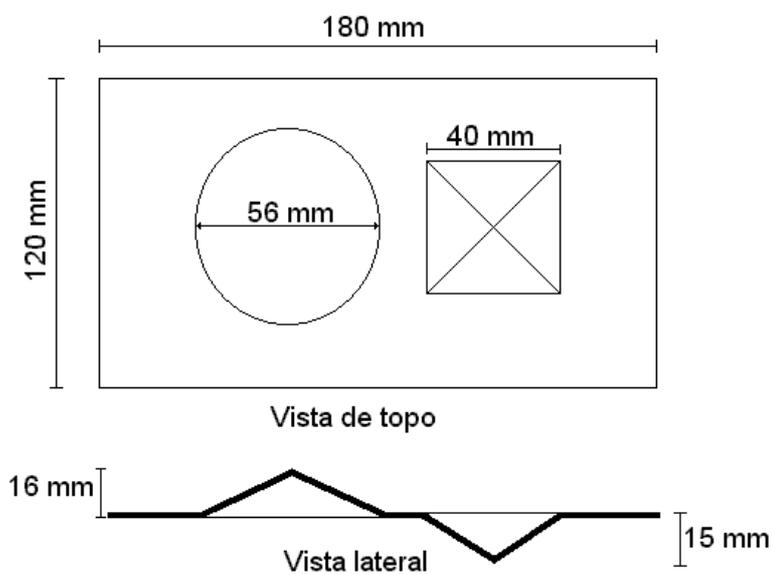


Figura 26: Esquema do objeto cone convexo / pirâmide côncava.

Foram obtidas quatro imagens das franjas de moiré (I1, I2, I3 e I4). Entre elas, a grade é deslocada na direção Z (afastada do retículo de referência) distâncias tais que produziram deslocamentos das franjas de Moiré de 0 , $1/4\pi$, $1/2\pi$ e $3/4\pi$. Como resultado, as

imagens I1 e I3 são inversas entre si, isto é, em uma região da imagem I1, onde existe uma franja escura, na imagem I2 existe uma franja clara. O mesmo ocorrendo com as imagens I2 e I4.

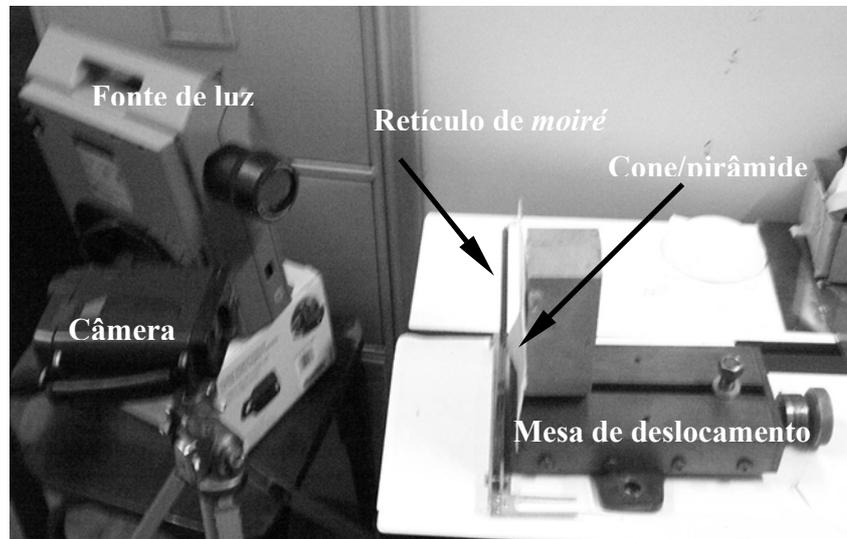


Figura 27: Arranjo experimental para a **TM** de sombra com deslocamento de fase



Figura 28: Mesa de deslocamento micrométrico, utilizada em afiatrix de ferramentas

A distância deslocada pelo objeto entre a aquisição de cada uma das imagens, depende do arranjo experimental. Como neste caso a diferença de cota entre o centro de duas franjas de *moiré*, dadas pela equação proposta por MEADOWS et al. 1970), é de 0,5 mm. Portanto a distância deslocada entre cada uma das imagens é 0,125 mm.

Para utilizar o programa “RISING-SUN *MOIRÉ*” (ZYWANG, 2001), ou mesmo programas o IDRISI 32 (EASTMAN, 1999), as imagens precisam ser transformadas de arquivos do tipo “BMP de 24 bits” para “BMP de 8 bits”, com 256 tons de cinza em um programa de edição de fotos. Foram também equalizadas a fim de diminuir o efeito do reflexo da luz na superfície do objeto, que produzem regiões mais claras, dificultando o reconhecimento automático das franjas de *moiré*. Por fim foram filtradas com filtro de banda baixa a fim de remover as linhas do retículo de *moiré*.

O programa “RISING-SUN *MOIRÉ*” (ZYWANG, 2001), a partir destas imagens gerou o mapa de fases empacotadas dadas pela equação 10 citada por WANG (2001). Com o desempacotamento do mapa de fases (phase unwrapping), obtém-se um modelo digital da superfície do objeto cone convexo/pirâmide côncava.

Este modelo é uma imagem do tipo “raster”, em que as informações são armazenadas em forma de matriz. Nesta imagem as informações sobre a cota de cada elemento da matriz (“pixel”) é dada em 256 níveis de cinza, ou valores que variam de 0 a 255. O valor 0 (cor preta) corresponde às regiões com cotas mais baixas e o valor 255 (cor branca) às regiões com cotas mais elevadas.

A imagem “raster” foi importada para o programa IDRISI 32 (EASTMAN, 1999) onde se corrigiu as suas escalas. Vetorizou-se, isto é, transformou-se o arquivo da forma matricial para a de coordenadas (x,y,z) e exportou-se como arquivo “.DAT”, que contém a descrição de todos os “pixels” em termos de x, y e z.

Este arquivo é então lido através programa SURFER 32 (GOLDEN SOFTWARE, INC, 1995), e gerado um novo modelo digital da superfície da figura. Pelo comando “slice” produz-se o perfil de uma linha que passa pelo centro do topo e pelo centro do vértice da pirâmide.

3.2. Geração dos modelos digitais de superfície semelhante à de uma pêra

Após os estudos preliminares partiu-se para a geração de modelos digitais da superfície semelhante à de uma pêra.

Para tanto, tomou-se um modelo de uma pêra confeccionado em parafina, na escala 1:1, com as dimensões 79,5 x 65,9 x 32,4 mm. A utilização de um espécime “in natura” foi descartado devido à sua alta perecibilidade (Figura 29).

O modelo foi dividido em duas metades e um deles pintado com tinta branca fosca, a fim de proporcionar maior contraste das franjas de moiré e facilitar a digitalização do modelo pelo Scanner 3D Laser.

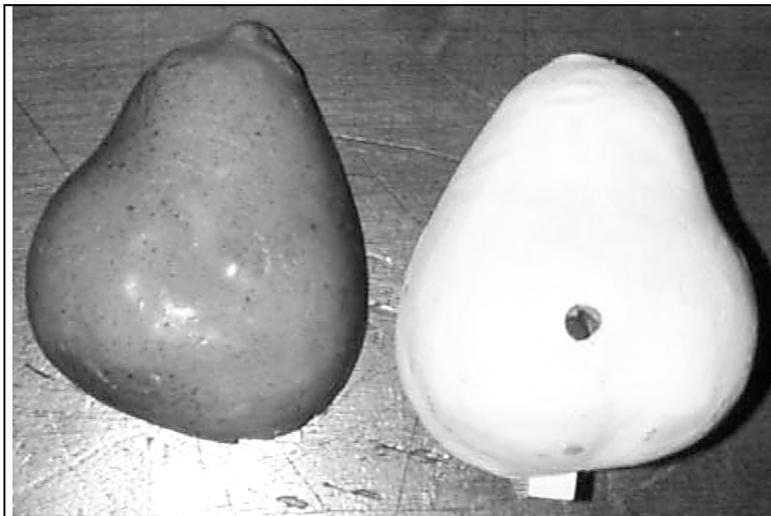


Figura 29: As duas metades do modelo da pêra em parafina, uma pintada e a outra não.

3.2.1. Geração do modelo digital pela TM de sombra de multiplicação de franjas.

Optou-se por gerar um modelo digital da superfície topográfica da pêra pela TM de sombra com multiplicação de franjas, ao invés da TM de sombra clássica, pois aquela possui maior número de franjas para o mesmo arranjo experimental, e portanto maior sensibilidade.

Para a obtenção das imagens de Moiré, utilizou-se o mesmo arranjo experimental já descrito no item 3.1, onde $d=300\text{mm}$, $h=150\text{mm}$ e $p=1\text{mm}$, acrescido de um mecanismo que possibilita o deslocamento da pêra ao longo do eixo z , afastando-a do retículo de Moiré.

São obtidas quatro imagens das franjas de moiré (I1, I2, I3 e I4). Entre elas, a grade é deslocada na direção Z (afastada do retículo de referência) distâncias que produzam

deslocamentos das franjas de Moiré de 0 , $1/4\pi$, $1/2\pi$ e $3/4\pi$. Como resultado, as imagens I1 e I3 são inversas entre si, isto é, se em um local da imagem I1 existe uma franja clara, no mesmo local da imagem I2, a franja é escura. O mesmo ocorrendo com as imagens I2 e I4.

Estas imagens são filtradas no programa de edição de fotos, para a equalização e remoção da grade de Moiré.

As imagens I1 e I3 foram transferidas para o programa IDRISI 32 (EASTMAN, 1999) e subtraídas uma da outra. Calculou-se então o seu módulo da imagem resultante, obtendo-se o dobro de franjas de moiré.

Reclassificou-se (ou binarizou-se) a imagem atribuindo-se o valor 0 (zero) à intensidade luminosa com valores próximos de 0 (escuro) e 1 para os demais valores. A imagem resultante é constituída por linhas delgadas, que correspondem às franjas de Moiré, facilitando a sua digitalização além de eliminar qualquer tipo de ruído.

O mesmo procedimento foi feito para as imagens I2 e I4. As imagens resultantes (I1/I3 e I2/I4) foram mescladas, gerando uma única imagem com um número quatro vezes maior de linhas que uma imagem de Moiré convencional.

Para a geração do modelo digital da superfície da pêra foi utilizado a mesma metodologia utilizada por VALERIANO (1999) e descrita no item 3.1.1.

3.2.2. Geração do modelo digital pelo **TM** de sombra com deslocamento de fase.

Para a geração do modelo digital da superfície topográfica da pêra pelo **TM** de sombra com deslocamento de fase, foram utilizadas as mesmas imagens I1, I2, I3 e I4 utilizadas no método de multiplicação de franjas.

Estas imagens foram filtradas em um programa de edição de fotos para a equalização e remoção da grade de *moiré*.

O Programa “*RISING-SUN MOIRÉ*”, a partir destas imagens gerou o mapa de fases empacotadas dadas pela equação 10 citada por WANG (2001). Com o desempacotamento do mapa de fases (phase unwrapping), obtém-se um modelo digital da superfície da pêra.

Este modelo é uma imagem do tipo “raster” onde as cores variando de 0 a 255, isto é, 256 níveis de cores ou tons de cinza, correspondem às cotas ou aos valores de z.

Para a comparação dos métodos esta imagem é importada pelo programa IDRISI 32 (EASTMAN, 1999), onde é feita a sua vetorização. Este arquivo vetorizado é exportado no formato “.DAT”, que permite a sua leitura pelo programa SURFER 32 (GOLDEN SOFTWARE, INC, 1995), onde é gerado o modelo digital da superfície do contorno da pêra que será comparado com o modelo produzido pelo Scanner 3D laser.

3.2.3. Geração do modelo digital pelo Scanner 3D laser.

Para a geração do modelo digital de referência da pêra utilizou-se um digitalizador 3D laser (“scanner 3D”) marca 3D SCANNERS, modelo ModelMaker, que consiste de um sensor laser acoplado a um braço para medição em múltiplos eixos marca FARO modelo FaroArms Silver (3D SCANNERS, 2001).

3D SCANNERS (2001) cita que este equipamento trabalha pelo princípio da triangulação de linhas de laser projetadas na superfície do objeto. Estas linhas são vistas por uma câmera colocada a um determinado ângulo, de forma que as variações da topografia do objeto podem ser vistas como mudanças de forma da linha de laser. A imagem capturada da linha resultante contém informações sobre a topografia dos objetos. Esta imagem é processada em tempo real, gerando uma nuvem de pontos com as coordenadas x, y, z, a uma taxa de 14000 pontos por segundo (Fig. 30). Este arquivo é então trabalhado pelo software **CopyCAD** desenvolvido pela DELCAM, que faz a triangulação desta nuvem de pontos, gerando um modelo digital da superfície do objeto.

Este sistema trabalho com um intervalo de confiança de $\pm 0,003$ mm, por iso servirá como padrão de referência para comparação com o método de moiré.

A superfície do modelo da pêra em parafina foi digitalizada pelo scanner 3D, produzindo um modelo digital da sua superfície no formato “.IGES”.

Este formato é transformado por um programa conversor para o formato “.DWG” que é lido pelo Programa AUTOCAD. Onde é então gerado um arquivo “.DXF”.

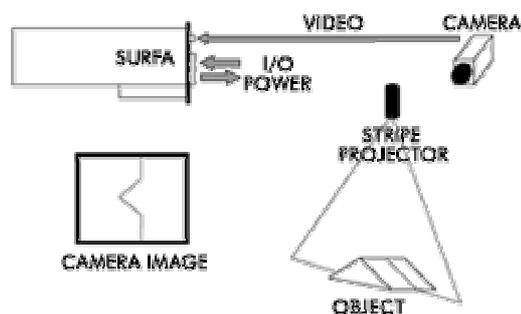


Figura 30: Esquema de funcionamento do digitalizador topográfico ModelMaker
 Fonte: 3D SCANNERS (2001)

Este arquivo foi então transformado em arquivo no formato “.DAT” utilizando-se o programa conversor “DXF2DAT”, que possibilita a sua leitura pelo programa SURFER 32 (GOLDEN SOFTWARE, INC, 1995). Onde foram interpolados, gerando finalmente um modelo digital da superfície da pêra.

3.3. Comparação dos modelos de moiré com o laser

3.3.1. Geração dos perfis

Para a comparação dos métodos foram gerados perfis de 7 seções nos modelos digitais da superfície da pêra. Para a sua geração utilizou-se o comando “Slice” do programa SURFER 32 (GOLDEN SOFTWARE, INC, 1995). O primeiro perfil, paralelo ao eixo “x”, passa pelo centro da pêra e os demais, perpendiculares a este, 3 à esquerda e 3 à direita, distanciados 5 mm entre si.

3.3.2. Comparação dos perfis

Os perfis, no formato “.DAT”, foram transportados para uma planilha eletrônica, onde foram comparados através da correlação entre os valores de z para cada perfil, e feitas as estatísticas (Média, Máximo, Mínimo, Amplitude e Desvio Padrão) das diferenças. Além disso foram calculadas a Correlação e Regressão entre os valores de z para cada ponto e o índice “d” proposto por WILMOT (1985).

4. RESULTADOS PRELIMINARES

Durante a fase de aprendizado da utilização da TM, foram feitos estudos experimentais com a utilização da luz solar como fonte de iluminação e também estudos com a TM de sombra com multiplicação de franjas e TM de sombra com mudança de fase.

4.1. Estudos experimentais com o uso da luz solar

Os teste com a utilização de luz solar como fonte de iluminação são mostrados na figura 25, onde são apresentadas imagens de 5 diferentes vistas da pêra: Topo, frente (ápice), fundo, lados direito e esquerdo. Elas foram obtidas através de iluminação solar, com um ângulo de iluminação de 18° , período do retículo de 0,5 mm, e a câmera Kodak DC120.

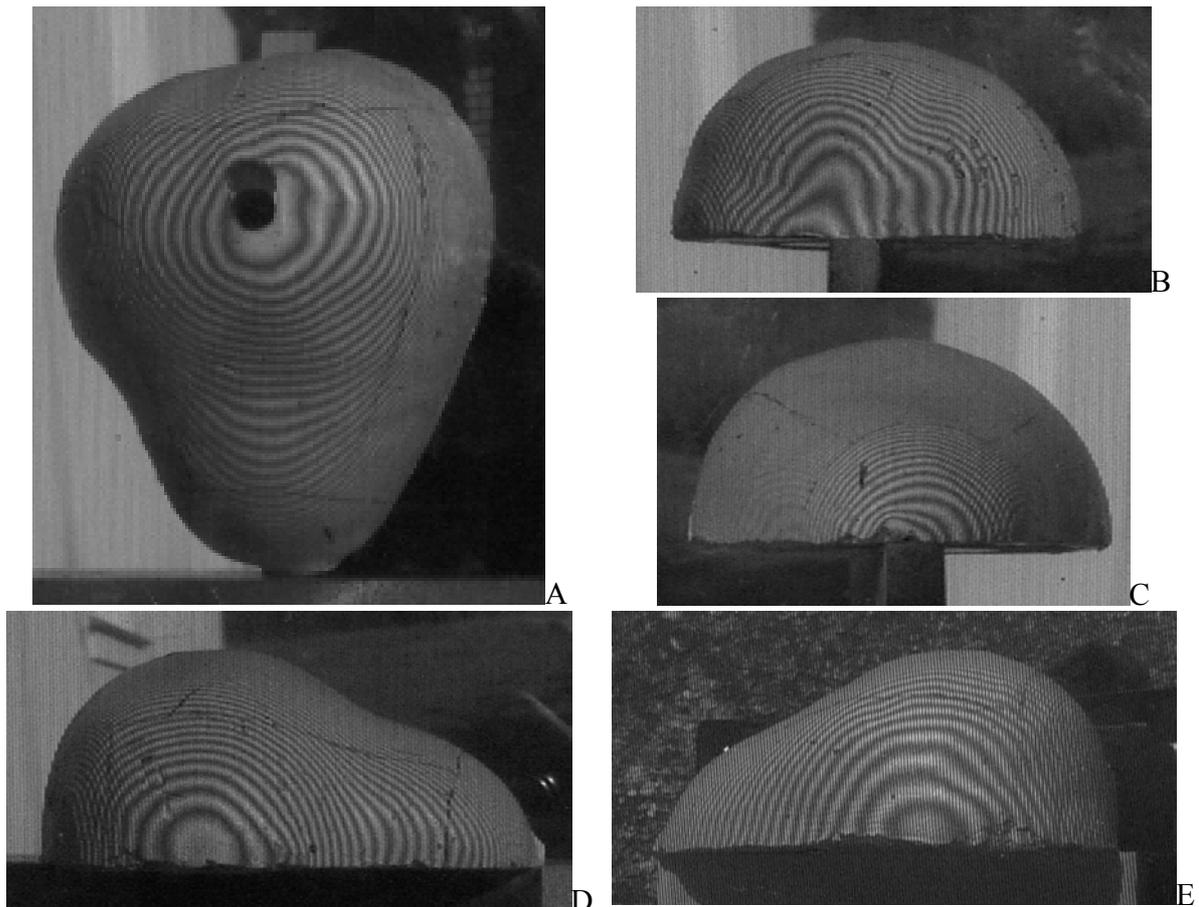


Figura 31: Imagens da pêra com as linhas de moiré. A. Vista de topo. B. Vista posterior. C. Vista anterior. D. Vista lateral direita. E. Vista lateral esquerda

As imagens foram obtidas pelo final da tarde, entre 17 e 18 horas, quando o sol se encontrava próximo ao ocaso, e com as linhas do retículo verticais para compensar a grande variação vertical da posição do sol na abóbada celeste (ângulo vertical). Neste momento a variação lateral do sol é muito pequena ou mesmo desprezível.

Observa-se que franjas estão bastante nítidas, com as linhas do retículo pouco visíveis, isto se deve ao fato de utilizar um retículo com período pequeno, à grande distância da câmera fotográfica e à intensidade luminosa da luz solar que é muitíssimo maior que a luz artificial. Além disso para as condições do ensaio, a luz solar pode ser considerada coerente, isto é os seus raios são paralelos, diminuindo os efeitos de difração da luz.

A grande dificuldade de trabalhar com a luz solar, é que o tempo disponível para o trabalho é bastante reduzido, tornando difícil fazer repetições, caso isto seja necessário.

A utilização da iluminação com luz solar foi descartada, por não atender a dois parâmetros básicos que dão qualidade às medidas obtidas, citados por CURLESS (2001), repetibilidade e sensibilidade ambiental.

4.2. Estudos experimentais com o uso da TM de sombra clássica

Para o aprendizado **TM** de sombra clássica foram utilizados dois objetos com topografia conhecida, um cone e uma calota.

4.2.1. Estudos experimentais com cone

A Figura 32 mostra as imagens do cone com as franjas de *moiré* produzidas pelos diferentes arranjos experimentais, em que distâncias (d) entre o iluminador e a câmera fotográfica foram: A. $d=100\text{mm}$. B. $d=125\text{mm}$. C. $d=150\text{mm}$. D. $d=175\text{mm}$. E. $d=200\text{mm}$.

Observa-se que à medida que a distância entre a câmera fotográfica e o iluminador aumenta, o número de franjas de *moiré* também cresce. Isto significa que a sensibilidade do **TM** de *moiré* de sombra é diretamente proporcional à este parâmetro.

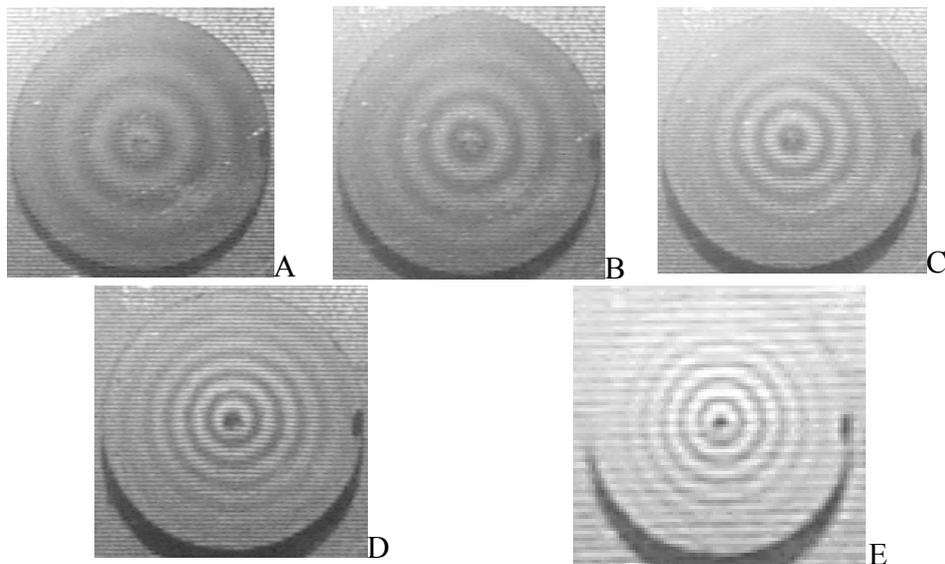


Figura 32: Imagens do cone com as franjas de moiré para diferentes distâncias (d) entre o iluminador e a câmera fotográfica. A.100mm. B. 125mm. C. 150mm. D. 175mm. E. 200mm.

O Quadro 4 mostra o resultado do cálculo das diferenças de cotas entre duas franjas de *moiré* adjacentes para cada condição experimental e o valor percentual em relação à altura do cone, o quanto a diferença de cota entre duas franjas vizinhas representa da altura total do cone. Observa-se que aumentando a distância entre a fonte e o observador, diminui a distância vertical entre duas franjas vizinhas, e portanto a porcentagem relativa à altura do cone. Isto significa que para distâncias entre franjas maiores, erros na determinação de fração de uma franja acarretarão erros maiores no cálculo da altura total do objeto em estudo.

Quadro 4: Diferença de cota entre duas franjas e o seu percentual relativo à altura do cone, para cada condição experimental.

Condição experimental	h (mm)	d (mm)	p (mm)	$\Delta z(\text{mm})$	
				Meadows	Takasaki
1	500	100	0,5	2,50	2,51
2	500	125	0,5	2,00	2,01
3	500	150	0,5	1,67	1,67
4	500	175	0,5	1,43	1,43
5	500	200	0,5	1,25	1,25

O Quadro 5 apresenta os resultados da contagem das franjas de *moiré* e o cálculo das alturas do cone pelas equações propostas por MEADOWS et al.(1970) e TAKASAKI (1970). Para todos os arranjos experimentais e para as duas equações os valores calculados foram menores que o real. Isto se deve ao fato do retículo utilizado ter um período muito elevado ($p = 0,5\text{mm}$), que produziu poucas franjas. Isso significa que, por exemplo, para a condição experimental 5, um erro de $\frac{1}{2}$ franja, produzirá um erro de 0,625 mm, que corresponde a 6,825% da altura do cone.

O uso de um retículo com este período se deve ao fato de períodos maiores produzir ainda menos franjas. Porém o uso de períodos menores, devido à difração da luz branca, produzir franjas apenas nas regiões próximas ao ápice, o que não permitiu a sua contagem em toda a extensão da superfície do cone.

Outro tipo de erro pode ter sido causado pelo pelas medidas de h e d , uma vez que não se conhecia exatamente os focos das lentes da câmera fotográfica e do iluminador.

Os valores da altura calculados pela equação de MEADOWS et al.(1970) e seus respectivos erros, absoluto e relativo, foram sempre menores que os calculados por TAKASAKI (1970). Porém para os desvios padrão da altura e do erro relativos tenderam a ser menores, mostrando variação dos valores quando se utiliza a equação de MEDOWS et al.(1970).

A condição experimental 5 apresentou os maiores erros absoluto e relativo, que parece ser devido à dificuldade de contar as franjas fracionárias com precisão.

Quadro 5: Altura do cone real e calculada, e erro absoluto e relativo, para cada condição experimental.

Condição experimental	Número de ordem das franjas	Altura (mm)			Erro absoluto (mm)		Erro relativo (%)	
		Calculada		Real	Meadows	Takasaki	Meadows	Takasaki
		Meadows	Takasaki					
1	3,5	8,75	8,91	9,16	0,41	0,25	4,48	2,77
2	4,5	9,00	9,16	9,16	0,16	0,00	1,75	0,05
3	5	8,33	8,47	9,16	0,83	0,69	9,02	7,48
4	6	8,57	8,72	9,16	0,59	0,44	6,43	4,79
5	7	8,75	8,91	9,16	0,41	0,25	4,48	2,77

A figura 33 mostra as franjas de *moiré* para a condição experimental 5, com os respectivos valores das cotas, digitalizadas manualmente através do programa AUTOCAD[®]. Pode-se observar que a digitalização manual é imperfeita, o que pode causar erros, embora pequenos, nos resultados.

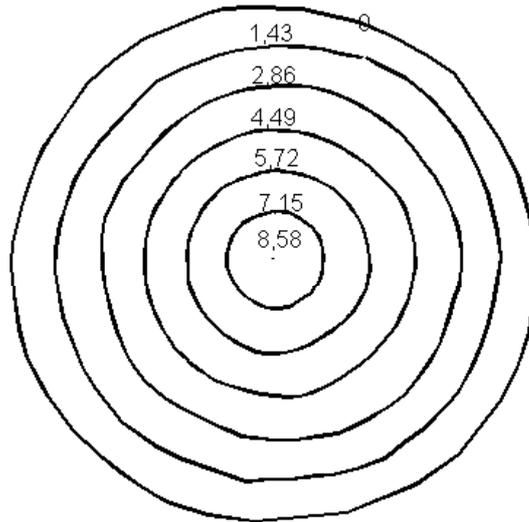


Figura 33: Franjas de *moiré* digitalizadas manualmente através do programa AUTOCAD

As Figuras 34 e 35 nos mostram duas formas de apresentação possíveis do modelo digital da superfície do cone, gerados pela interpolação das linhas de mesma cota (franjas) feita pelo programa SURFER 32(GOLDEN SOFTWARE, INC., 1995).

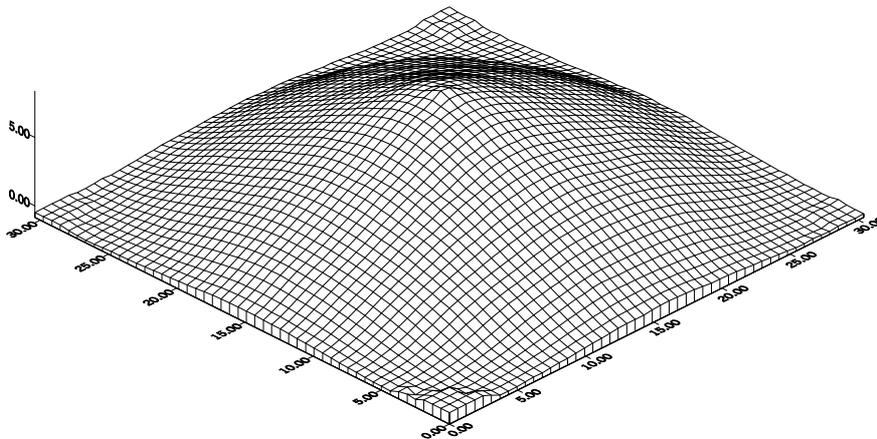


Figura 34: Modelo digital da superfície do cone. (vista lateral)

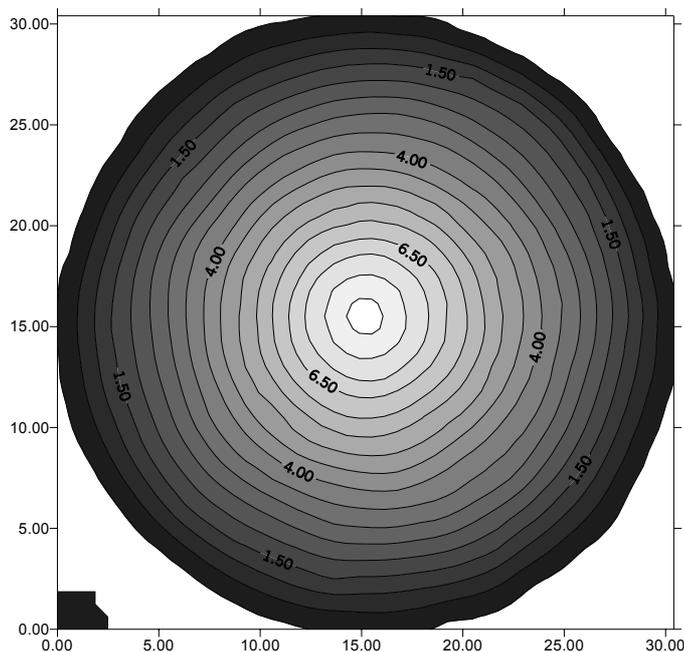


Figura 35: Modelo digital da superfície do cone, com linhas de mesma cota. (vista de topo)

4.2. Estudos experimentais com a calota

A Figura 36 apresenta a calota com as franjas de *moiré* referente à condição experimental número 4.

A Quadro 6 apresenta os valores da diferença de cota entre duas franjas adjacentes e o seu percentual relativo à altura do cone, para cada condição experimental. Nota-se que esses valores são muito altos variando entre 8,49% e 17,00% para a equação proposta por MEADOWS et al. (1970) e de 8,52% a 17,14% para a equação proposta por TAKASAKI (1970).

Estes valores são muito altos, e um erro na contagem de frações de franjas produz grandes erros de medições.

Quadro 7 mostra as alturas real e calculada pelas equações 19 e 20 propostas por MEADOWS et al. (1970) e por TAKASAKI (1970) respectivamente. Mostra também as diferenças ou erros absoluto e relativo, para cada condição experimental.

Os valores da altura da calota observados, para a equação 19 foram maiores que para a equação 20, e os erros absoluto e relativo foram menores, mas o Desvio Padrão foi também maior, mostrando que há uma maior desuniformidade dos resultados calculados por esta equação.

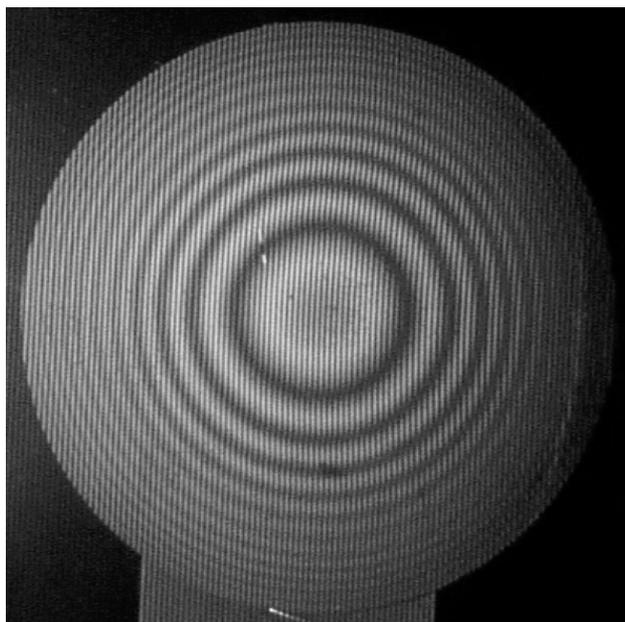


Figura 36: Imagem da calota com as franjas de moiré

Quadro 6: Diferença de cota entre duas franjas e o seu percentual relativo à altura da calota, para cada condição experimental.

Condição experimental	h (mm)	d (mm)	p (mm)	Δz (mm)		% da altura do cone	
				Meadows	Takasaki	Meadows	Takasaki
1	620	120	1,00	5,17	5,21	17,00	17,14
2	620	150	1,00	4,13	4,16	13,59	13,68
3	620	180	1,00	3,44	3,46	11,31	11,38
4	620	210	1,00	2,95	2,97	9,70	9,77
5	620	240	1,00	2,58	2,59	8,49	8,52

Quadro 7: Alturas real e calculada da calota, e erro absoluto e relativo, para cada condição experimental.

Condição experimental	Número de ordem das franjas	Altura (mm)			Erro absoluto (mm)		Erro relativo (%)	
		Calculada		Real	Meadows	Takasaki	Meadows	Takasaki
		Meadows	Takasaki					
1	5,5	28,42	29,78	30,4	1,98	0,62	6,52	2,03
2	7	28,93	30,35	30,4	1,47	0,05	4,82	0,17
3	8,5	29,28	30,73	30,4	1,12	0,33	3,69	1,08
4	10,5	31,00	32,63	30,4	0,60	2,23	1,97	7,34
5	11,5	29,71	31,20	30,4	0,69	0,80	2,28	2,64
Média		29,47	30,94		1,17	0,81	3,86	2,65
Desvpad		0,98	1,08		0,57	0,85	1,88	2,78

4.3. Estudos experimentais com TM de sombra com mudança de fase

A Figura 28 mostr as 4 imagens do objeto constituído que possui um cone (côncavo) e uma pirâmide invertida (convexa). Entre cada uma delas, o objeto foi afastada do retículo uma distância tal, que as franjas se deslocaram $\frac{1}{4}$ de período. O retículo colocado à frente do objeto produz as finas linhas horizontais presentes na imagem, e que precisam ser removidas, pois prejudicam o reconhecimento automático das franjas de moiré pelo programa “RISING-SUN MOIRÉ”(ZYWANG, 2001).

E a Figura 37 mostra as mesmas imagens tratadas por um software para edição de fotos, onde elas foram transformadas de arquivos “BMP 24 bits” para “BMP 8 bits” com 256 tons de cinza, equalizadas e filtradas, onde as linhas do retículo de *moiré* foram removidas, e as franjas de *moiré* evidenciadas.

Nota-se nas imagens das Figuras 37 e 38, que exceto com conhecimento prévio do objeto em estudo, não se consegue distinguir picos e vales, isto é superfícies côncavas e convexas.

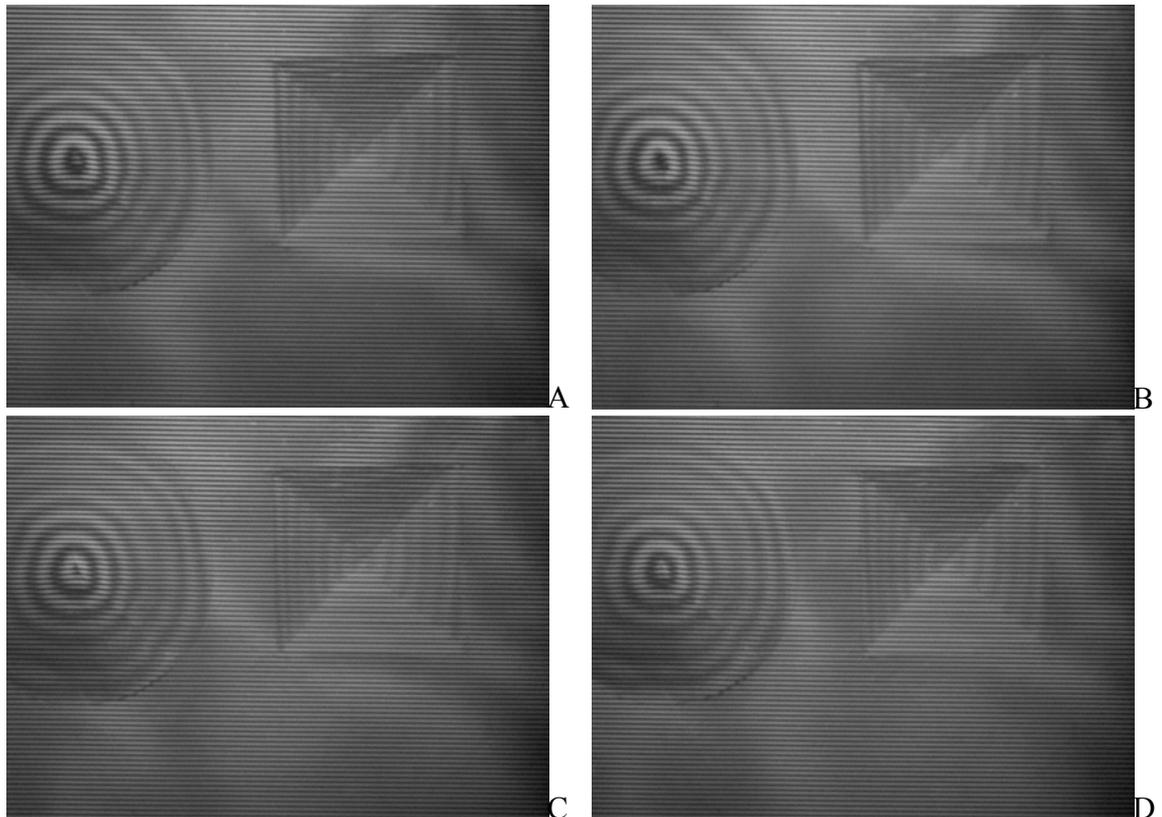


Figura 37. Imagens do cone/pirâmide com as linhas de Moiré. A Imagem inicial. B. Imagem com franjas defasadas $\pi/2$. C. Imagem com franjas defasadas π . D.Imagem com franjas defasadas $3\pi/4$.

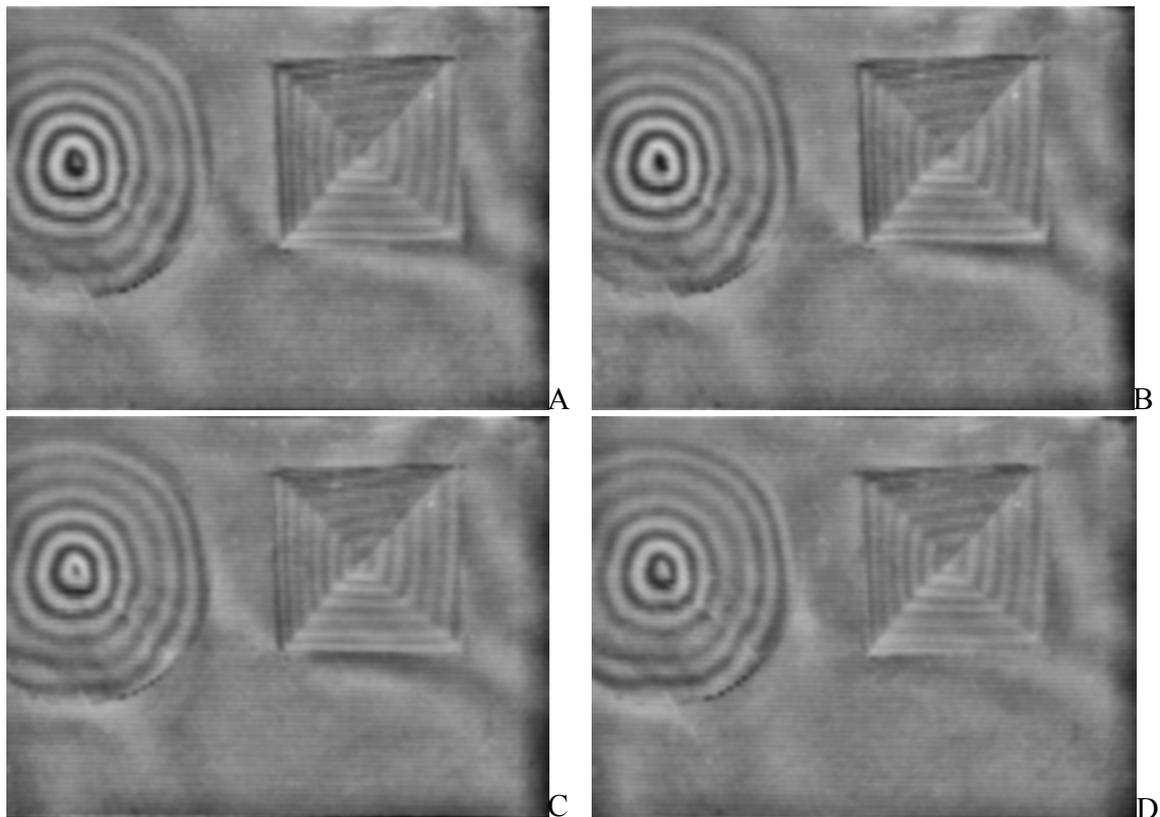


Figura 38. Imagens do cone/pirâmide filtradas pelo programa Corel PHOTO-PAINT. ^a Imagem inicial. B. Imagem com franjas defasadas $\pi/2$. C. Imagem com franjas defasadas π . D. Imagem com franjas defasadas $3\pi/4$.

A figura 39 mostra o mapa de fases empacotas produzido pela aplicação, no programa “RISING-SUN *MOIRÉ*” (ZYWANG, 2001), da equação 10 citada por WANG (2000). Este mapa apresenta a superfície topográfica do objeto com degraus (pulos) de $\frac{1}{2}$ período (π) da franjas de *moiré*.

O mesmo programa faz o desempacotamento do mapa de fases empacotadas, isto é, elimina os degraus, pela soma ou subtração de valores de π , quando comparando um “pixel” com o seu vizinho encontra diferenças com este valor, negativas ou positivas respectivamente.

As Figuras 40 e 41 são duas formas de apresentação do mapa da superfície de contorno do objeto em estudo.

Na Figura 41 a diferença de cota é dada pela variação dos níveis de cinza da imagem; as regiões mais escuras correspondem a locais com cotas próximas de zero (vales) e as mais claras a regiões com cotas mais altas (picos). A Figura 32 por sua vez apresenta o mesmo resultado de uma forma mais didática, que favorece a visualização e compreensão da superfície de contorno do objeto.

É interessante notar que o método de fase deslocada, aplicado neste caso à **TM** de sombra, reconhece automaticamente os picos e vales, não necessitando de conhecimento

prévio da topografia do objeto em estudo. Este fato torna a técnica bastante interessante quando se deseja automatizar a processos industriais

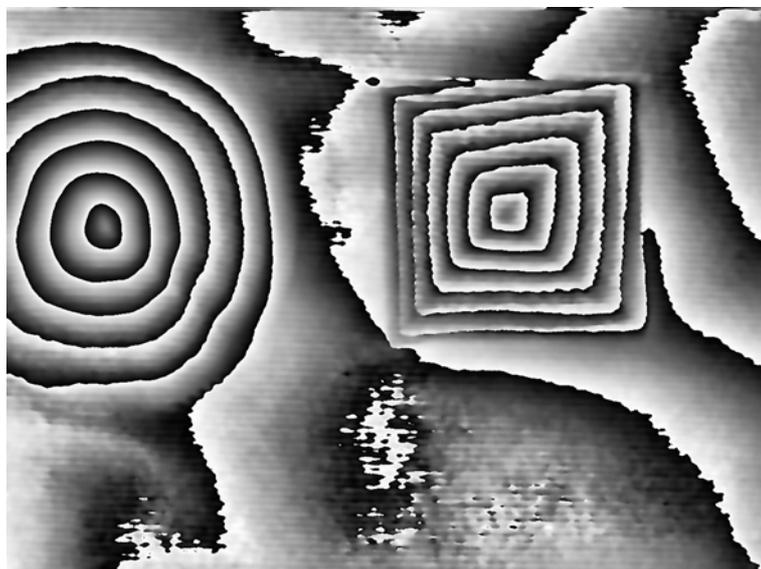


Figura 39. Mapa de fases empacotadas

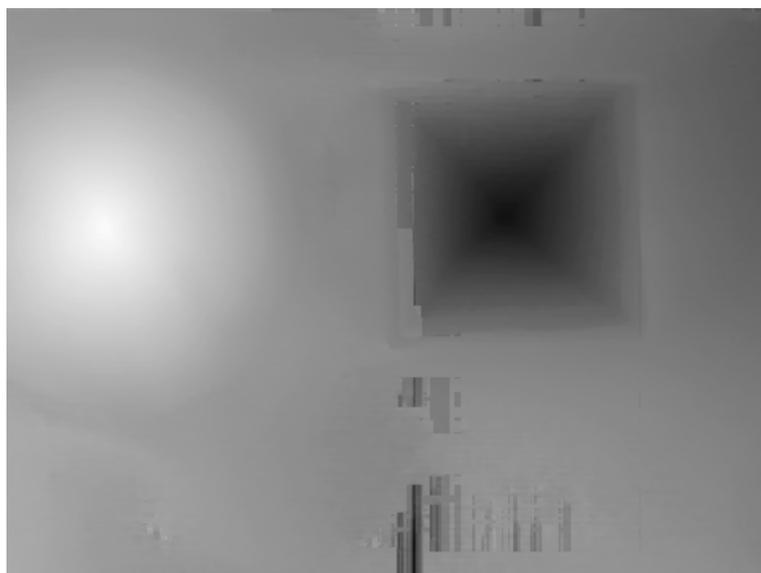


Figura 40: Superfície de contorno em tons de cinza.

Ambas as imagens apresentam ruídos, evidenciados como áreas com coloração contrastante (Figura 40) que se traduzem picos e vales (Figura 41), que não existiam no objeto original.

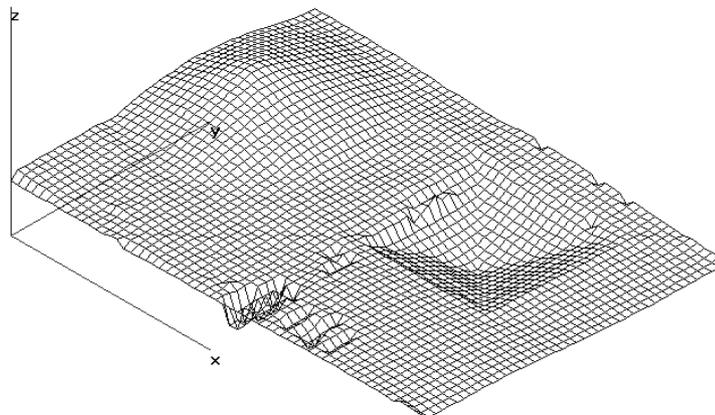


Figura 41: Representação topográfica da superfície de contorno

Isto se deve ao tipo de rotina utilizada pelo software para fazer o desempacotamento do mapa de fases empacotadas, que podem possuir erros fontes, como os da região central inferior da Figura 40, e que provoca este tipo de ruído, como citado por LI et al. (1998) e SOILLE (2000).

Estes autores, afirmam que esta é parte mais sensível a erros do método de fase deslocada, e que muitos estudos tem sido feitos e software desenvolvidos para contornar este tipo de problema.

O programa pede que se assinale a franja de ordem 0 (zero), observou-se durante a sua execução, conforme a franja escolhida para ter este número de ordem, aumentava ou diminuía a quantidade e a magnitude dos ruídos. A escolha da franja que proporcionou os menores ruídos foi feito por tentativa, não se conseguindo, para esta figura, determinar a razão pela qual isto ocorreu.

Outro problema detectado pelo uso do programa foram as escalas, pois parece que ele foi desenvolvido para análise de tensão/deformação, não oferecendo opções para a correção das mesmas. Apesar de aparentemente manter uma proporção entre o eixo z (cota) e os eixos x e y (plano).

Para resolver este problema tornou-se necessário a utilização de outros programas que trabalhando a partir da imagem

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Modelos digitais da superfície da pêsra produzidos pela TM de sombra com multiplicação de franjas

A Figura 42 mostra 4 imagens (A=I1, B=I2, C=I3 e D=I4) da pêsra, em que entre cada uma delas a pêsra foi afastada de modo que as franjas se deslocaram $\frac{1}{4}$ de período. Nota-nas imagens desta Figura que as franjas de *moiré* aparecem apenas no topo da pêsra. Nas regiões onde a declividade da superfície é alta, não há formação das franjas, como observado por GASVIK (1987), indicando que a *TM* de sombra deve ser utilizada apenas onde a superfície do objeto em estudo é relativamente plana, ou para pequenas áreas de cada vez.

A área circular preta no centro da figura, corresponde a um furo feito na mesma, que indica o centro de massa da pêsra, e correspondem às coordenadas (0,0), ou seja a origem, dos eixos x, y.

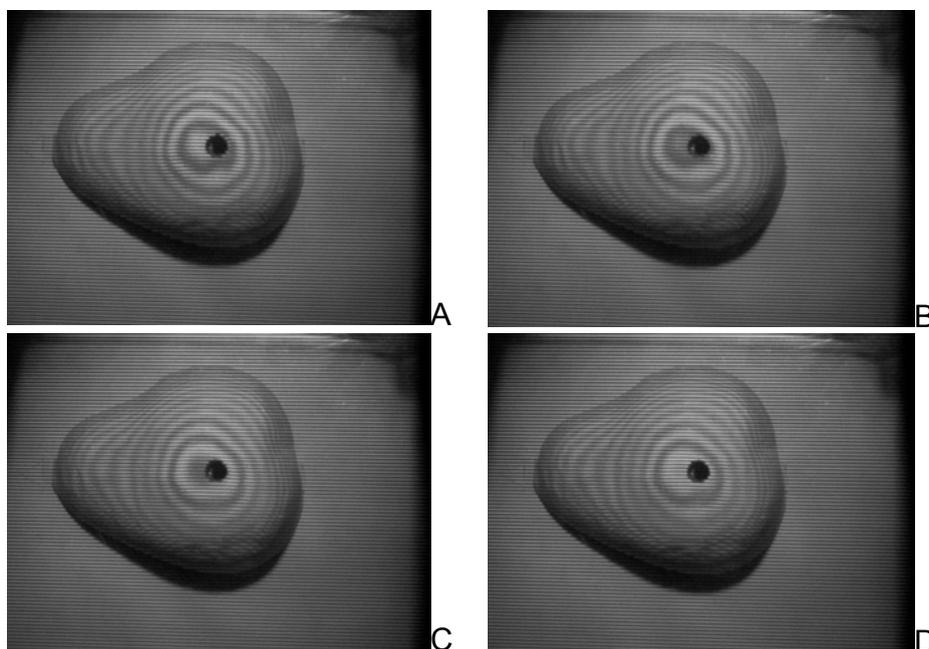


Figura 42: Imagens da pêsra com franjas de *moiré*. A.Imagem inicial. B. Imagem com franjas defasadas $\pi/2$. C. Imagem com franjas defasadas π . D.Imagem com franjas defasadas $3\pi/4$.

A Figura 43 mostra como ficaram as imagens da Figura 42, após a transformação de Bitmap 24 bits para Bitmap 8 Bits, em tons de cinza. Elas foram ainda equalizadas, filtradas par a remoção das linhas de moiré.

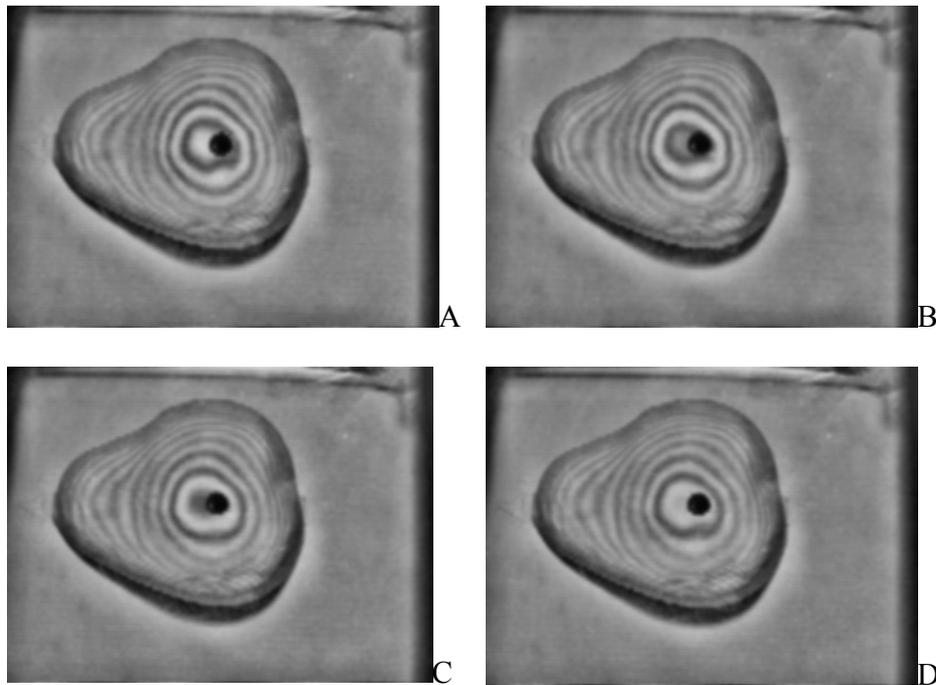


Figura 43: Imagens filtradas da pêra. A.Imagem inicial. B. Imagem com franjas defasadas $\pi/2$. C. Imagem com franjas defasadas π . D.Imagem com franjas defasadas $3\pi/4$.

A Figura 44A mostra a imagem resultante do módulo da subtração das imagens I1 e I3 e a Figura 44B mostra a binarização ou truncamento desta imagem, em que as linhas pretas correspondem a valores de 0 a 15 e o restante corresponde a valores acima de 15. Com isto duplicou-se o número de franjas de *moiré*, eliminou r u idos e equalizou a imagem, isto é, eliminou a influencia do reflexo da iluminação sobre a pêra, que prejudica a digitalização automática das franjas de *moiré*. O mesmo processo foi repetido para as imagens I2 e I5 (Figuras 44C e 44D).

As Figuras 44B e 44D foram mescladas gerando a Figura 38E , que possui o quádruplo de franjas de *moiré* comparas às imagens originais. A Figura 38F franjas de *moiré* dogitalizadas no Programa AUTOCAD.

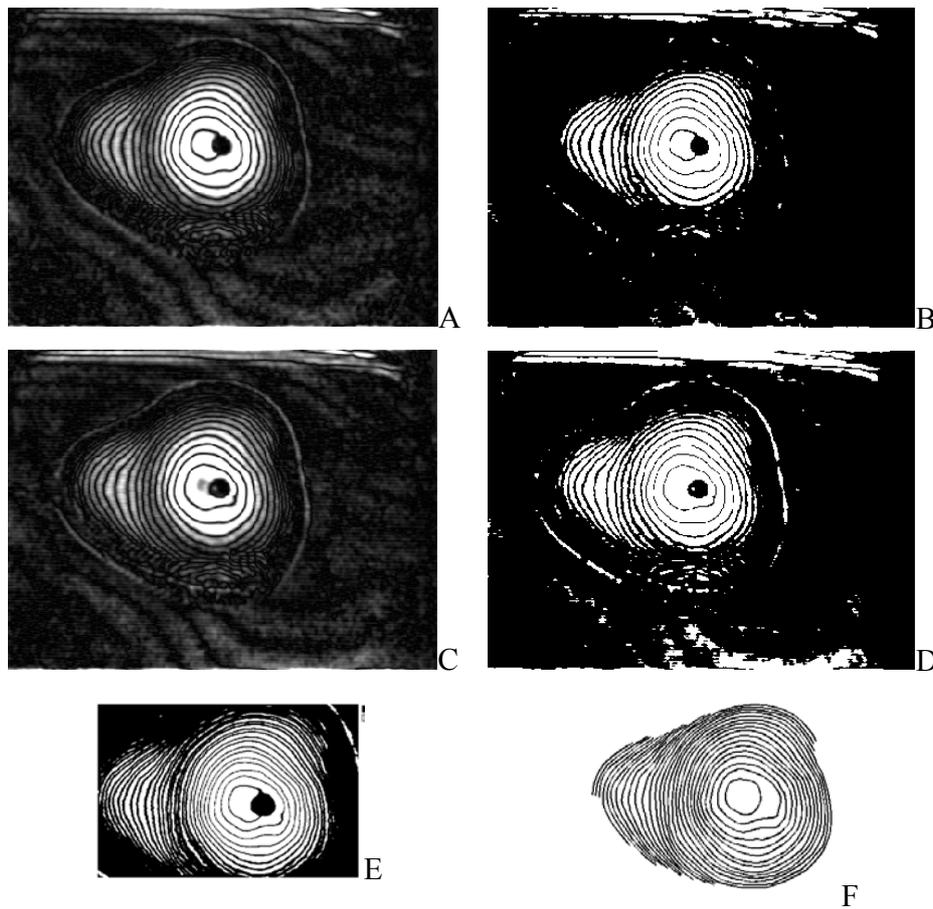


Figura 44: Processo de multiplicação de franjas de *moiré*. A- Subtração de I1 e I3. B- Binarização (I1 e I3). C- Subtração de I2 e I4. D- Binarização (I2 e I4). E- Mesclagem das imagens binarizadas (B eD). F- Franjas de *moiré* digitalizadas

A Figura 45 mostra o modelo digital da superfície da përa. Observa-se que o programa SURFER 32 gerou superfície onde não havia franjas de *moiré*, o que provocou erros no modelo digital. Este é um problema característico do programa utilizado que gera erros sistemáticos. Para tentar diminuir este tipo de erro, apenas a parte central, onde havia franjas inicialmente, foi considerada para fins de comparação.

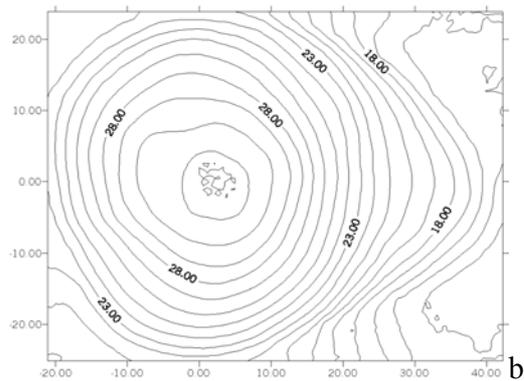


Figura 45: Modelo digital da superfície da pêra.

5.2. Modelos digitais da superfície da pêra produzidos pela TM de sombra com mudança de fase

Para a geração do modelo digital da superfície da pêra pela TM de sombra com mudança de fase, utilizou-se as imagens da Figura 34.

A Figura 46 mostra os passos para a geração do modelo digital da superfície da pêra. Mapa de fases empacotadas (Figura 46A) e Mapa de fases desempacotadas (Figura 46B), gerados pelo programa “*Rising-sun Moiré*”.

Nota-se que na região central da pêra as franjas estão perfeitamente definidas (Figura 40A) gerando uma superfície bem desenvolvida (Figura 46B). Nas bordas e no fundo onde as franjas não existem ou não estão bem definidas, houve o aparecimento de ruídos

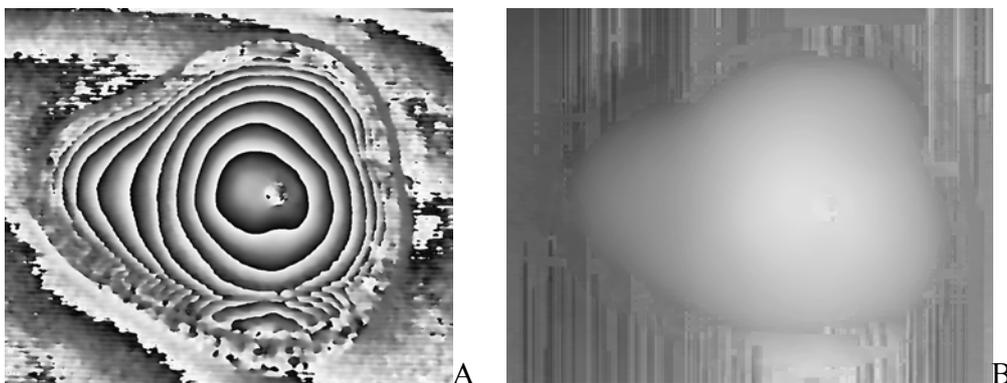


Figura 46: Modelo digital gerado pela TM de sombra com mudança de fase. A- Mapa de fases empacotadas. B- Mapa de fases desempacotadas.

Observa-se na parte central da imagem uma pequena região de ruído, que corresponde ao furo do centro de massa.

A Figura 47A mostra o modelo digital da superfície da pêsco de onde foram eliminados os ruídos das bordas. E a figura 47B o modelo com curvas de nível gerado pelo programa SURFER 32. Esta imagem também possui regiões onde não havendo franjas de moiré o interpolador gerou superfícies que não existem, Por isso foram eliminados da comparação.

Observa-se ainda nesta imagem que cotas estão fora de escala. Isto acontece porque o programa “*Rising-sun Moiré*” foi concebido para trabalhar com tensão/deformação, e portanto com retículos cuja frequência está por volta de 1000 linhas/mm, além disso não possui entrada para parâmetros que calculem automaticamente a cota.

Como esta imagem possui cerca de 250.000 pontos ou “pixels”, cada um deles com valores de x, y e z, não foi possível corrigir estas cotas em planilha eletrônica, pois tal quantidade de dados supera a sua capacidade operacional. Para contornar este problema, a correção das cotas foi feita para cada perfil individualmente durante o processo de comparação.

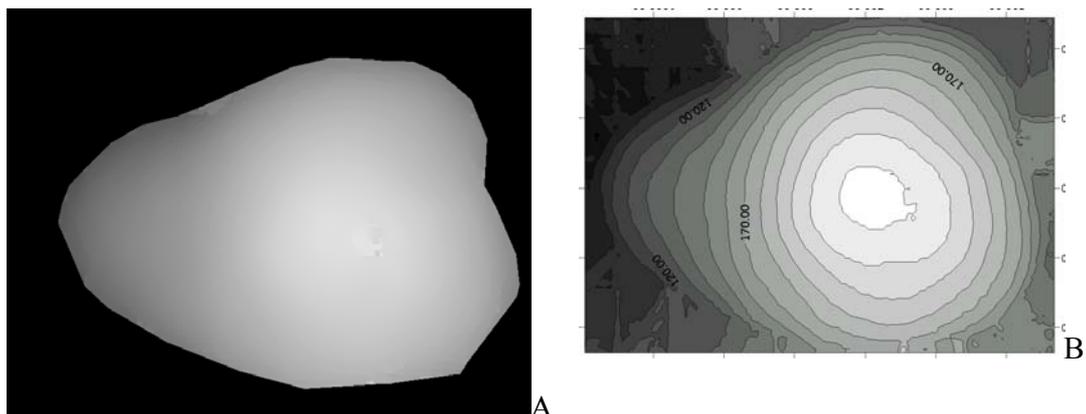


Figura 47; Modelo digital da superfície da pêsco gerado pelo TM de sombra com mudança de fase. A- Remoção dos ruídos do mapa de fases desempacotadas. B- Modelo digital com linhas de nível.

5.3. Modelos digitais da superfície da pêra produzidos pelo Scanner 3D Laser

Através do Scanner 3D Laser obteve-se modelo digital da superfície da pêra (Figura 48), com o qual se gerou um novo modelo no Programa SURFER 32, com o qual se pode fazer a comparação com as **TM** de sombra (Figura 49).

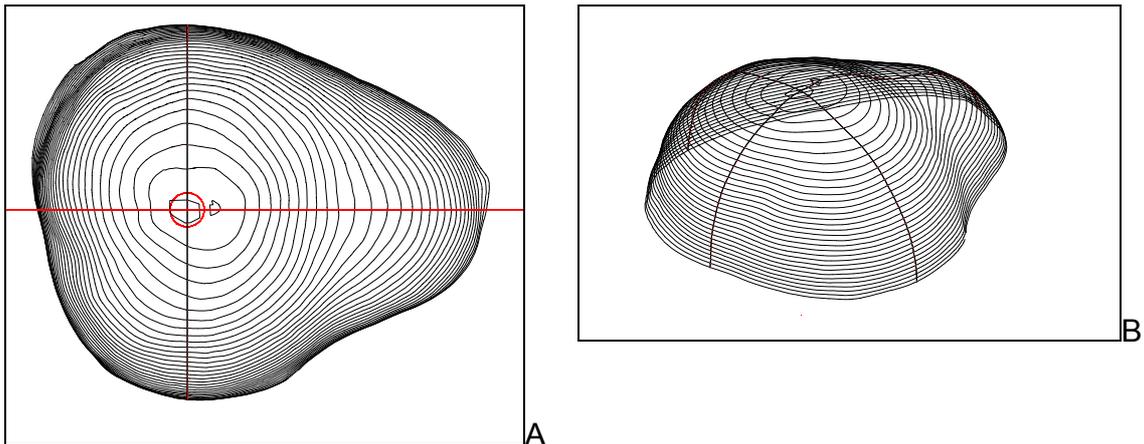


Figura 48: Modelo digital da superfície de contorno da pêra, obtido através do Scanner 3D Laser. A. Vista de topo das linhas de nível. B. Vista oblíqua das linhas de nível.

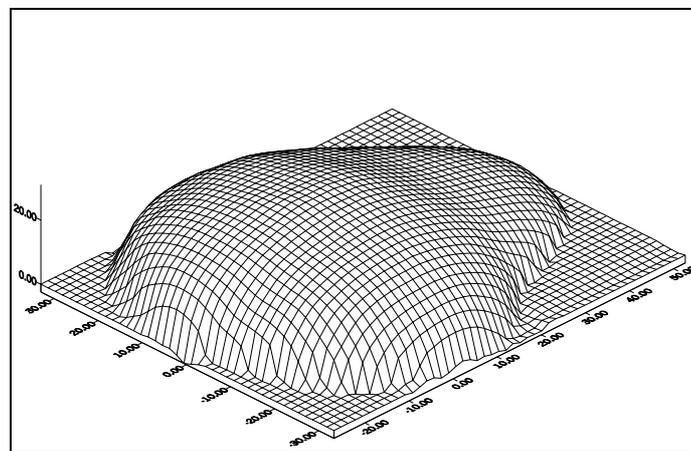


Figura 49: Modelo digital da superfície de contorno da pêra, obtido através do Programa SURFER 32

5.4. Comparação entre os modelos

A Figura 50 mostra as linhas correspondentes aos perfis utilizados para a comparação das TM e do Scanner 3D Laser.

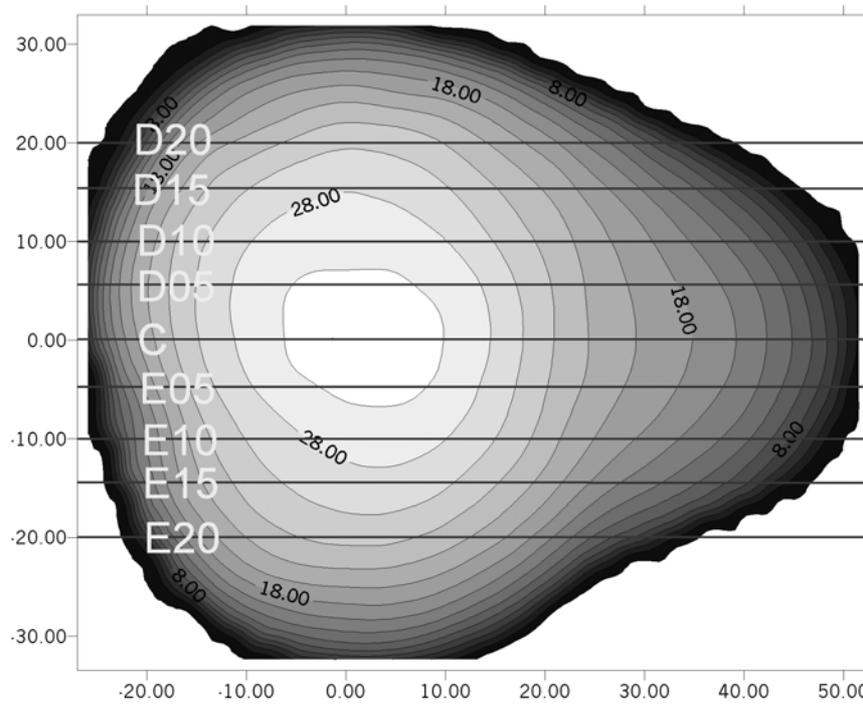


Figura 50: Posicionamento dos perfis que foram usados para fazer a comparação das TM e o Scanner 3D Laser.

As Figuras de 51 a 59 mostram os resultados da comparação entre a TM de sombra com multiplicação de franjas e o Scanner 3D Laser, para cada um dos perfis. Para cada uma delas o gráfico **a** corresponde à superposição do perfil produzido pelos dois métodos. O gráfico **b** mostra a diferença entre os dois perfis, com a escala do eixo z magnificada para melhor visualização e entendimento. E **c** é um gráfico de dispersão, na escala 1/1, com linha de tendência da dispersão e uma linha que, partindo da origem, divide o gráfico ao meio, acompanhados da equação da linha de tendência, do coeficiente de correlação de Pearson (R^2) e o índice de concordância de Willmott (d).

Para todos os perfis o valor de R^2 foi superior a 0,96, ficando a maioria deles acima de 0,99, indicando que os dados tiveram uma alta ajustagem à linha de tendência central, tiveram baixa dispersão, isto significa que os erros aleatórios foram baixíssimos

O índice de concordância de Willmott (d), também apresentou valores elevados acima de 0,94, a maioria acima de 0,99, mostrando que os erros sistemáticos também foram baixíssimos.

Estes valores elevados mostram que a medição feita pela TM de sombra com multiplicação de franjas tem altíssima exatidão (acurácia) e precisão. o que é confirmado pela alta correlação dos dados, baixos valores médios, amplitude e Desvio Padrão das diferenças entre as medições feitas pelos dois métodos. (Quadro 8)

As Figuras de 60 a 68 e o Quadro 9 mostram os resultados da comparação entre a **TM** de sombra com mudança de fase e o Scanner 3D Laser, para cada um dos perfis. Os resultados mostram altos valores para R^2 e para “ d ”, juntamente com baixos valores médios, amplitude e Desvio Padrão, indicando altíssima exatidão e precisão das medições feitas pela TM analisada”.

Os Quadros 8 e 9 mostram ainda que os perfis externos, D20 e E20, o índice de concordância de Willmott (d) apresentou uma tendência de queda dos para as duas **TM**. Isto se deve provavelmente à baixa visualização das franjas de *moiré* causada pelo aumento da declividade da superfície, como comentado por GASVIK (1998). Com o que concorda VALERIANO (1999), que afirma que, para mapas topográficos, o erro da altura é diretamente proporcional à tangente da declividade. Quanto maior a declividade maior será o erro médio da cota z .

Os resultados para o perfil D20 foram um pouco menores comparados ao E20, provavelmente pela existência de ruídos nesta região como mostra a Figura 40A.

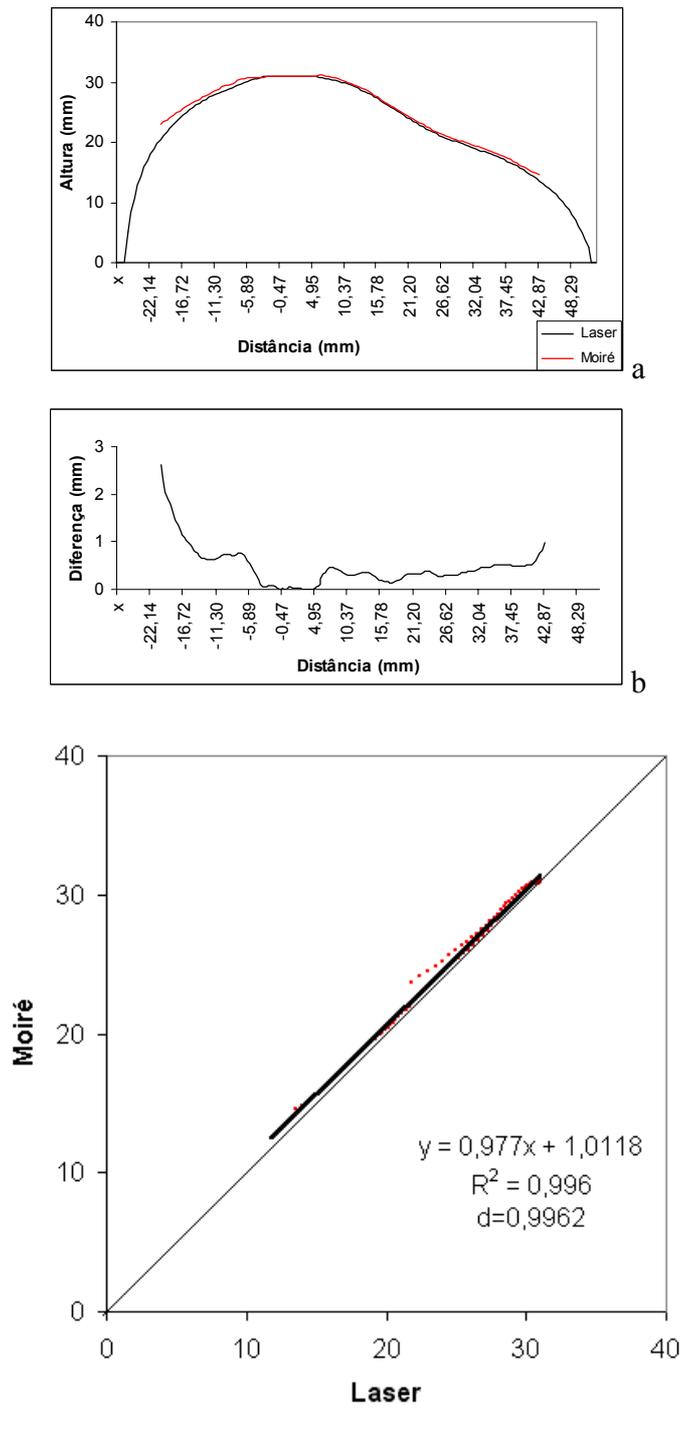


Figura 51: Resultados da comparação do perfil central da pêra entre as TM com multiplica o de franjas e laser. a. Sobreposi o dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

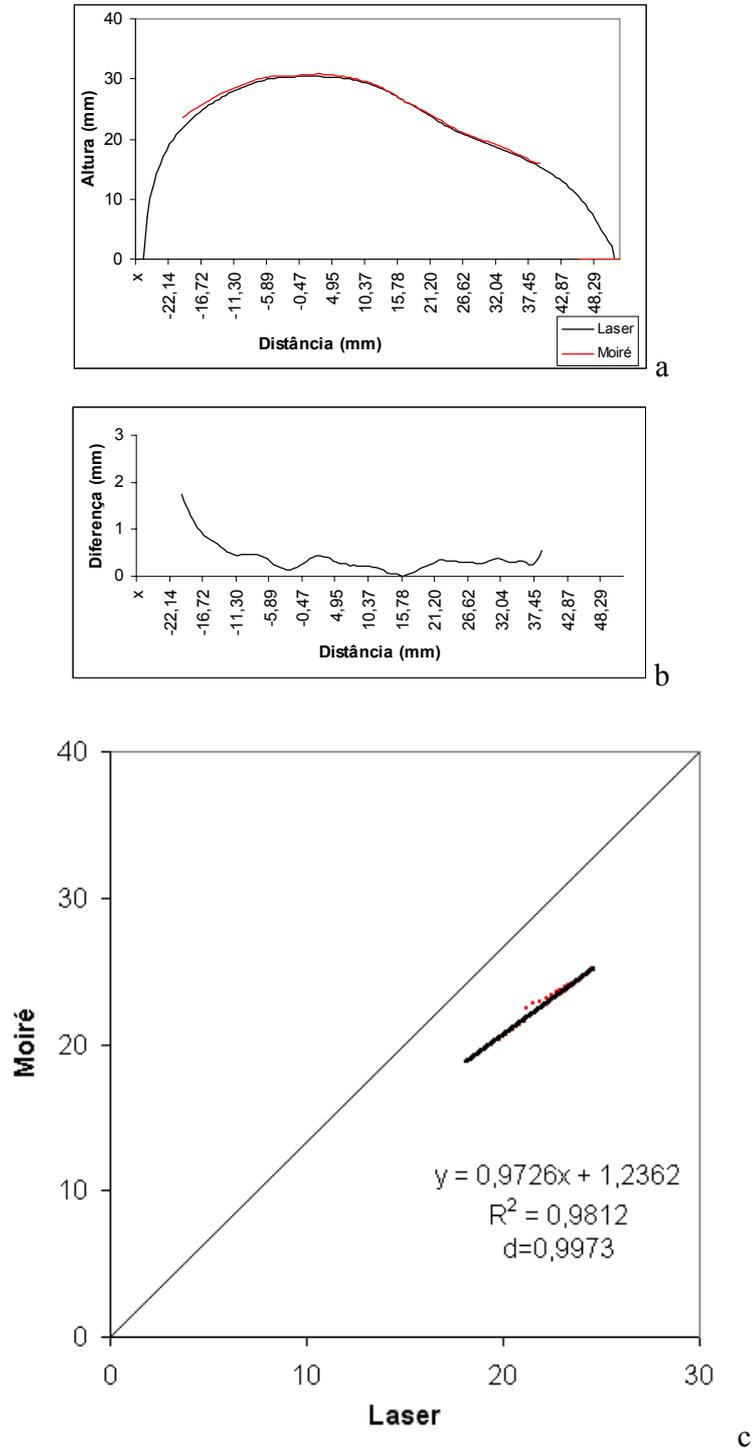


Figura 52: Resultados da comparação do perfil D05 da pêra entre as TM com multiplicação de franjas e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

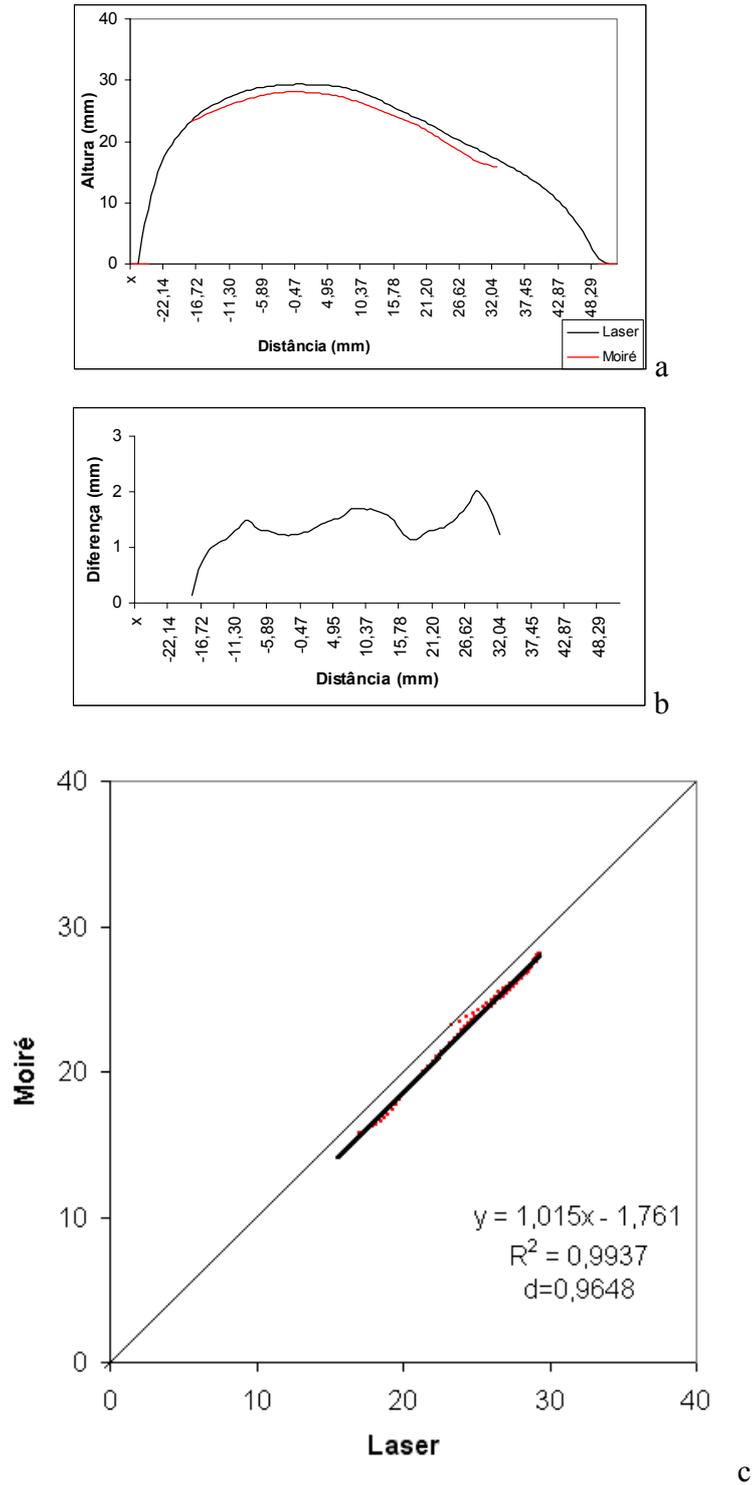


Figura 53: Resultados da comparação do perfil D10 da pãra entre as **TM** com multiplicação de franjas e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

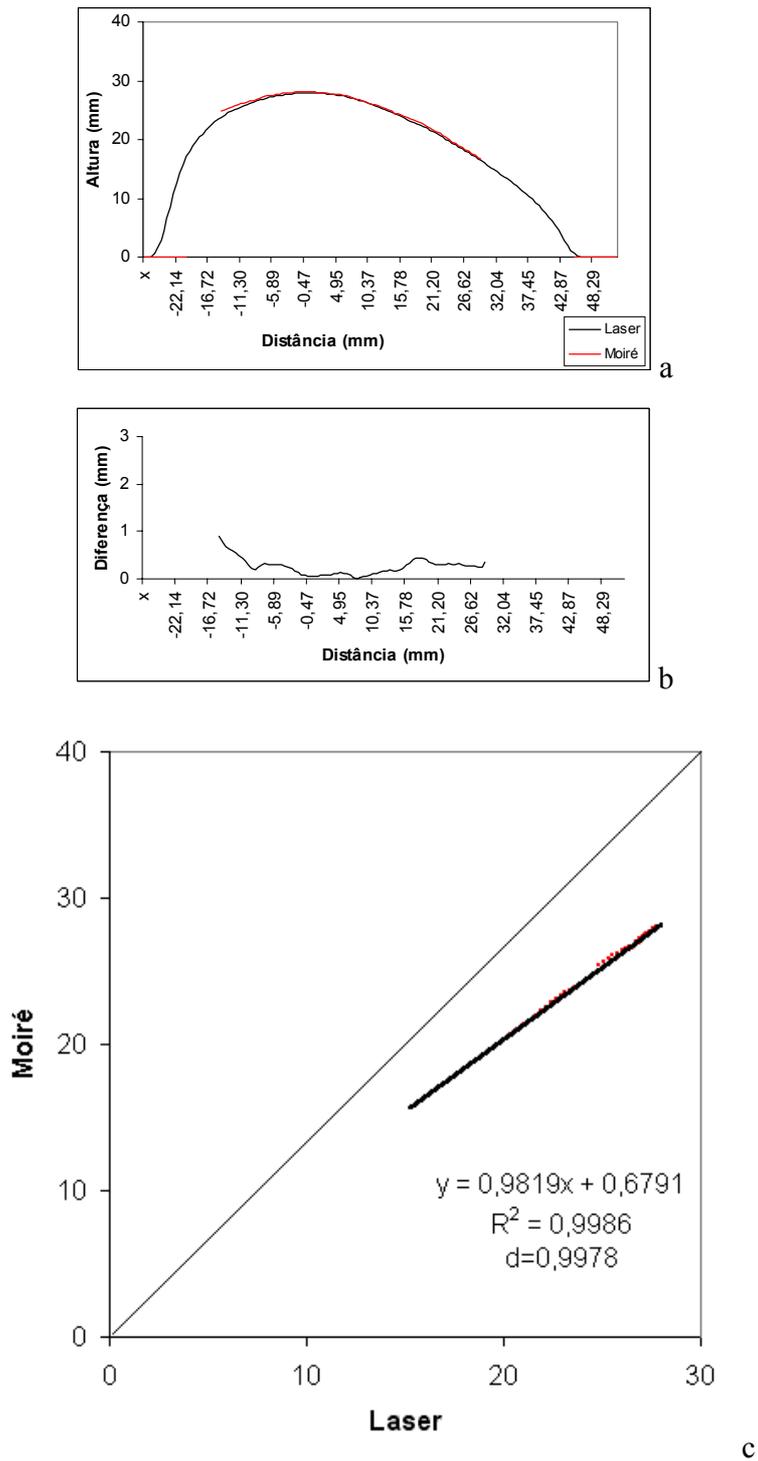


Figura 54: Resultados da comparação do perfil D15 da pêra entre as **TM** com multiplicação de franjas e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

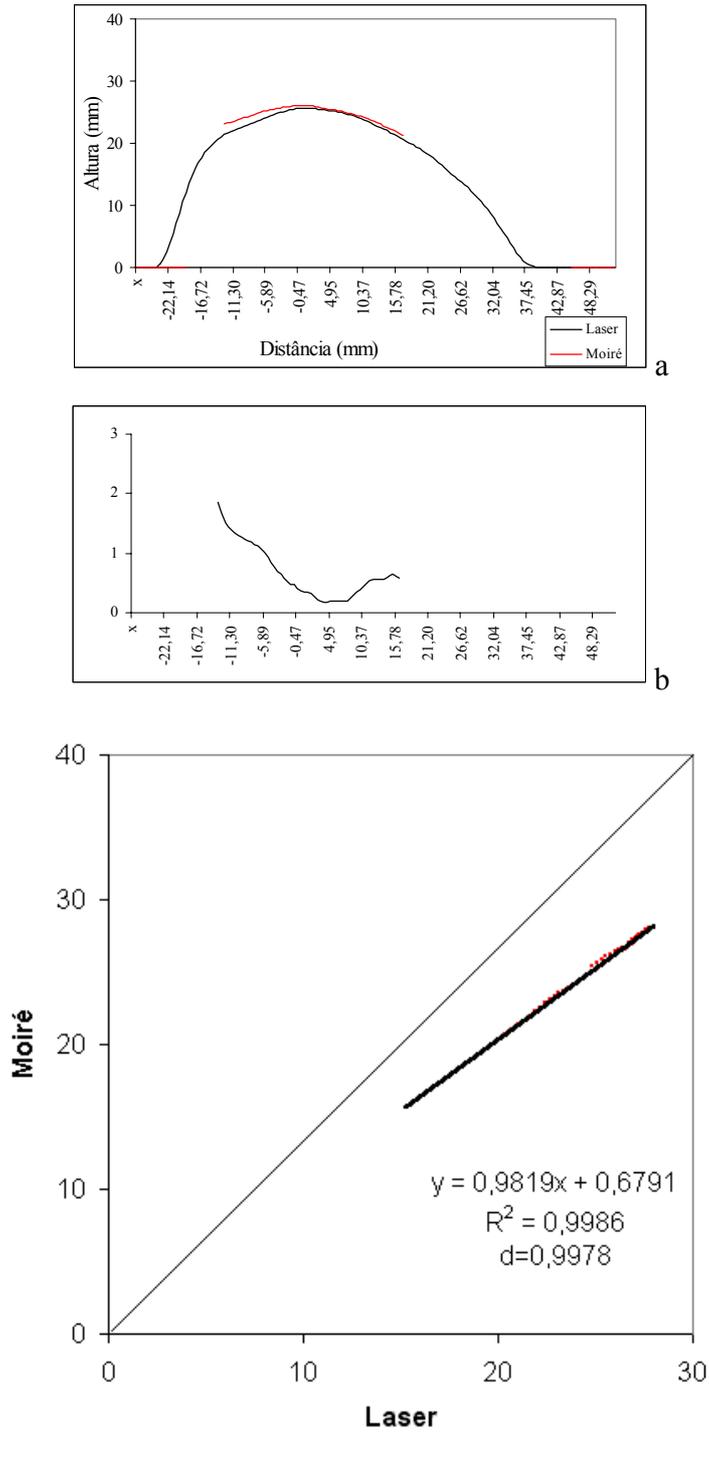
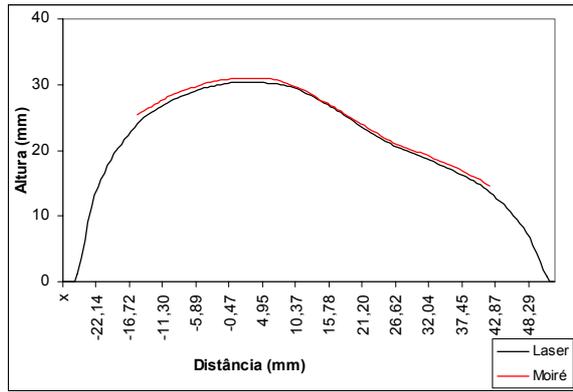
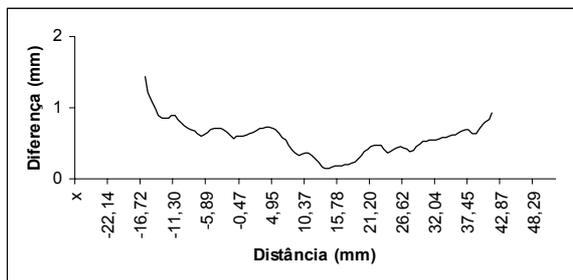


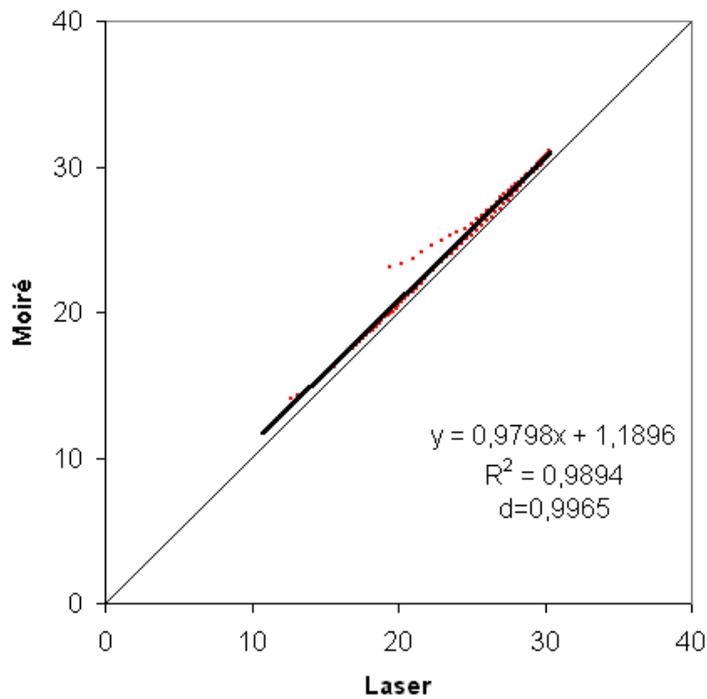
Figura 55: Resultados da comparação do perfil D20 da pêra entre as **TM** com multiplicação de franjas e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.



a



b



c

Figura 56: Resultados da comparação do perfil E05 da pãra entre as **TM** com multiplicação de franjas e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

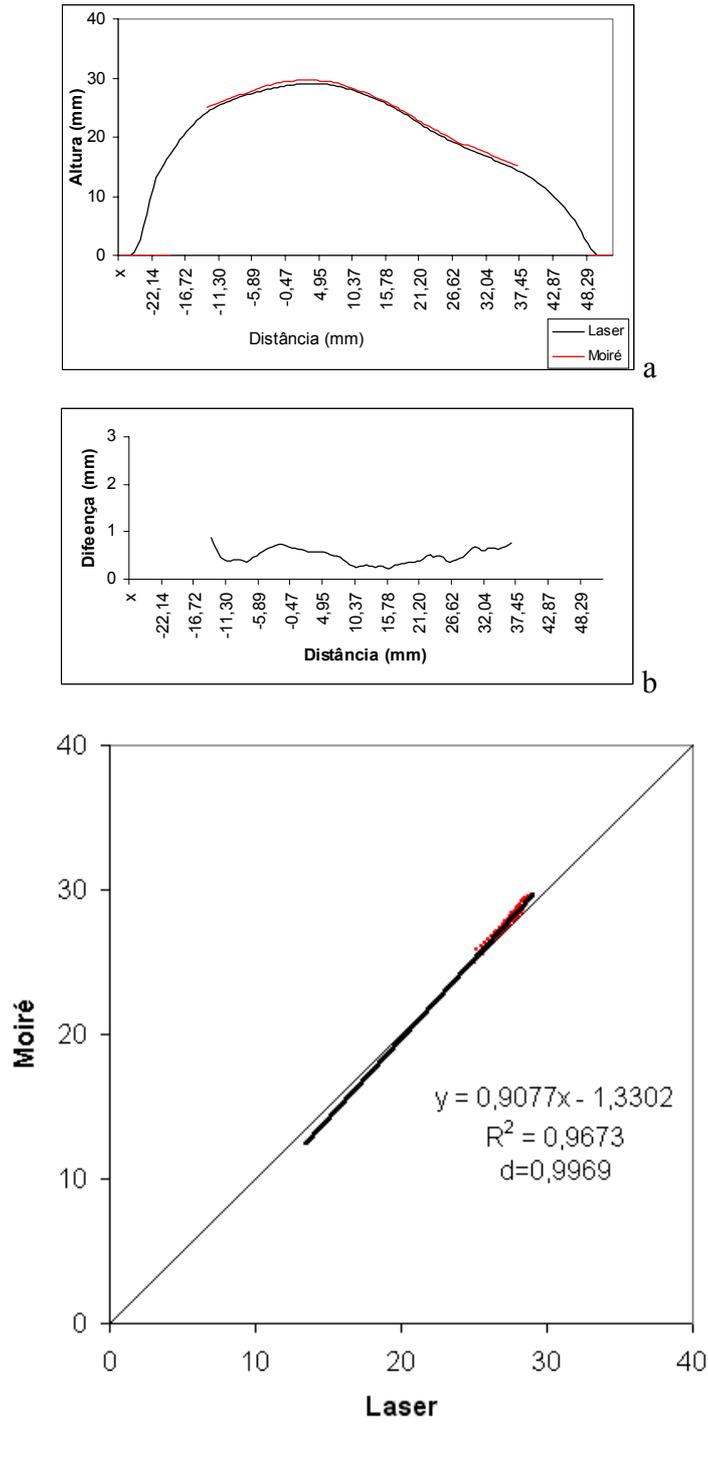


Figura 57: Resultados da comparação do perfil E10 da pêra entre as TM com multiplica o de franjas e laser. a. Sobreposi o dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

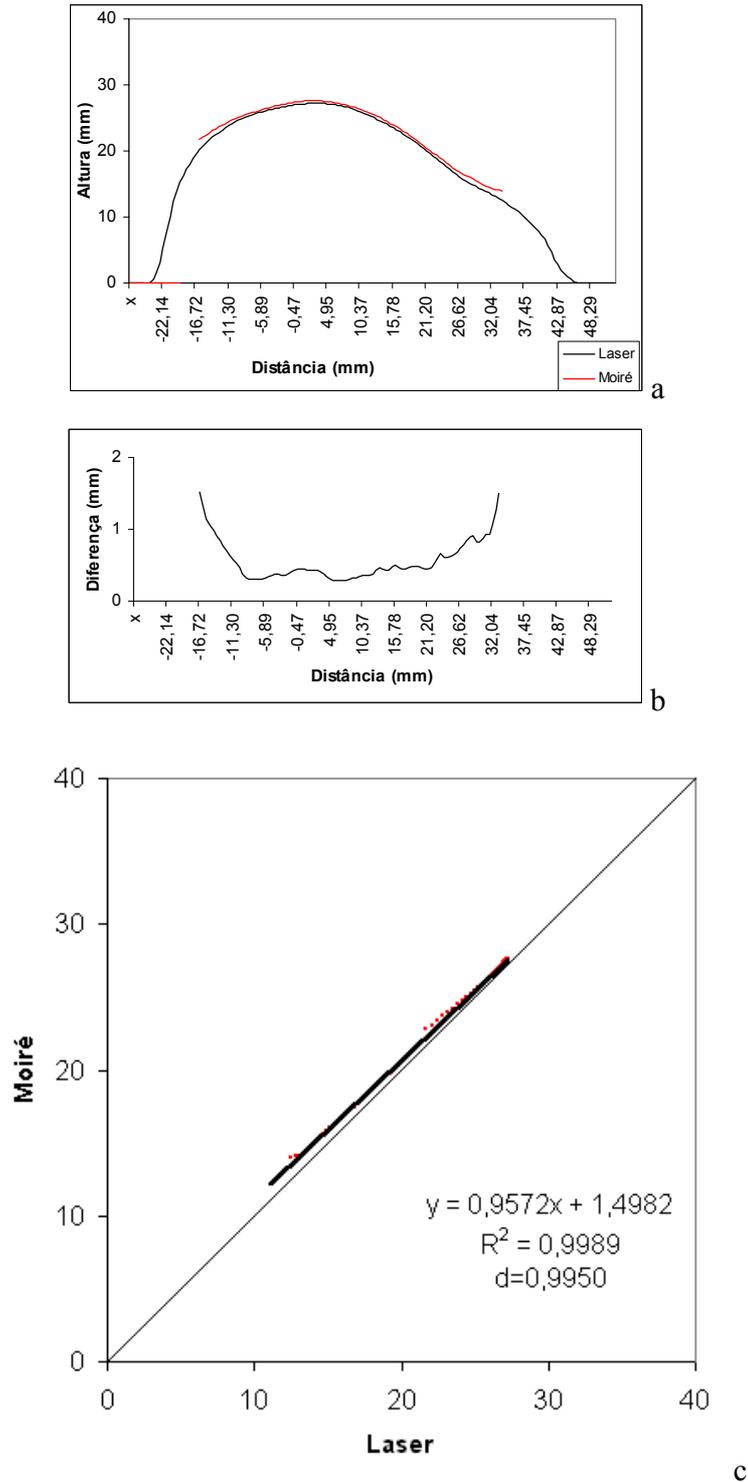


Figura 58: Resultados da comparação do perfil E15 da pêra entre as **TM** com multiplicação de franjas e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

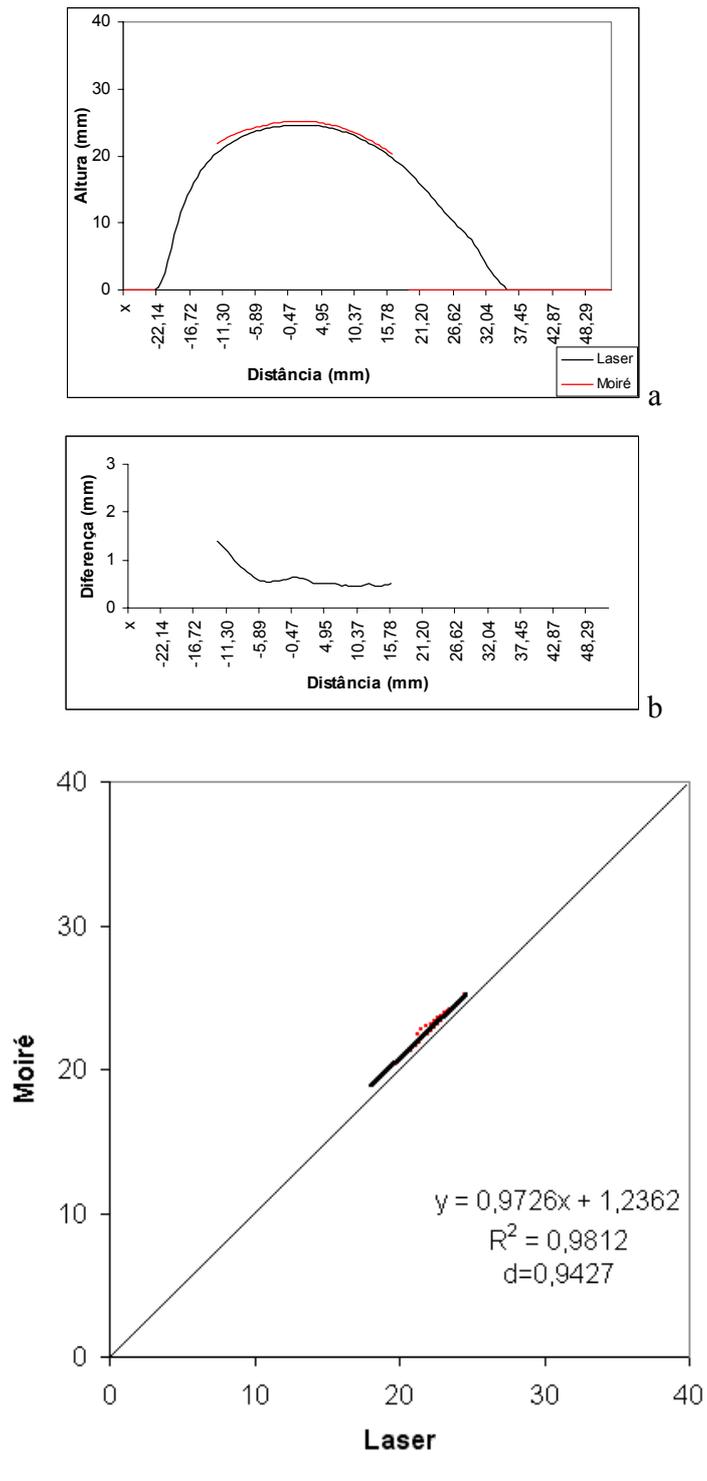


Figura 59: Resultados da comparação do perfil E20 da pêsca entre as **TM** com multiplicação de franjas e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

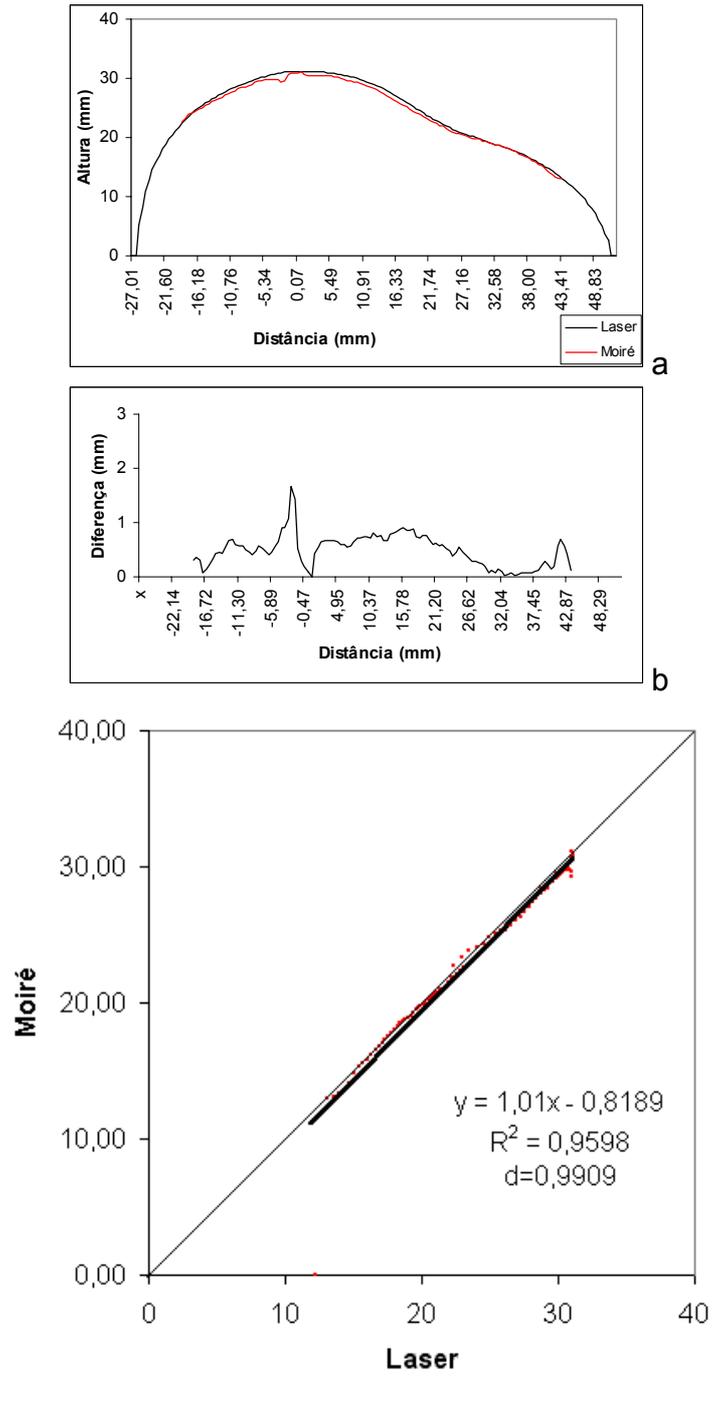


Figura 60: Resultados da comparação do perfil Central da përa entre as **TM** com mudança de fase e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos. Central

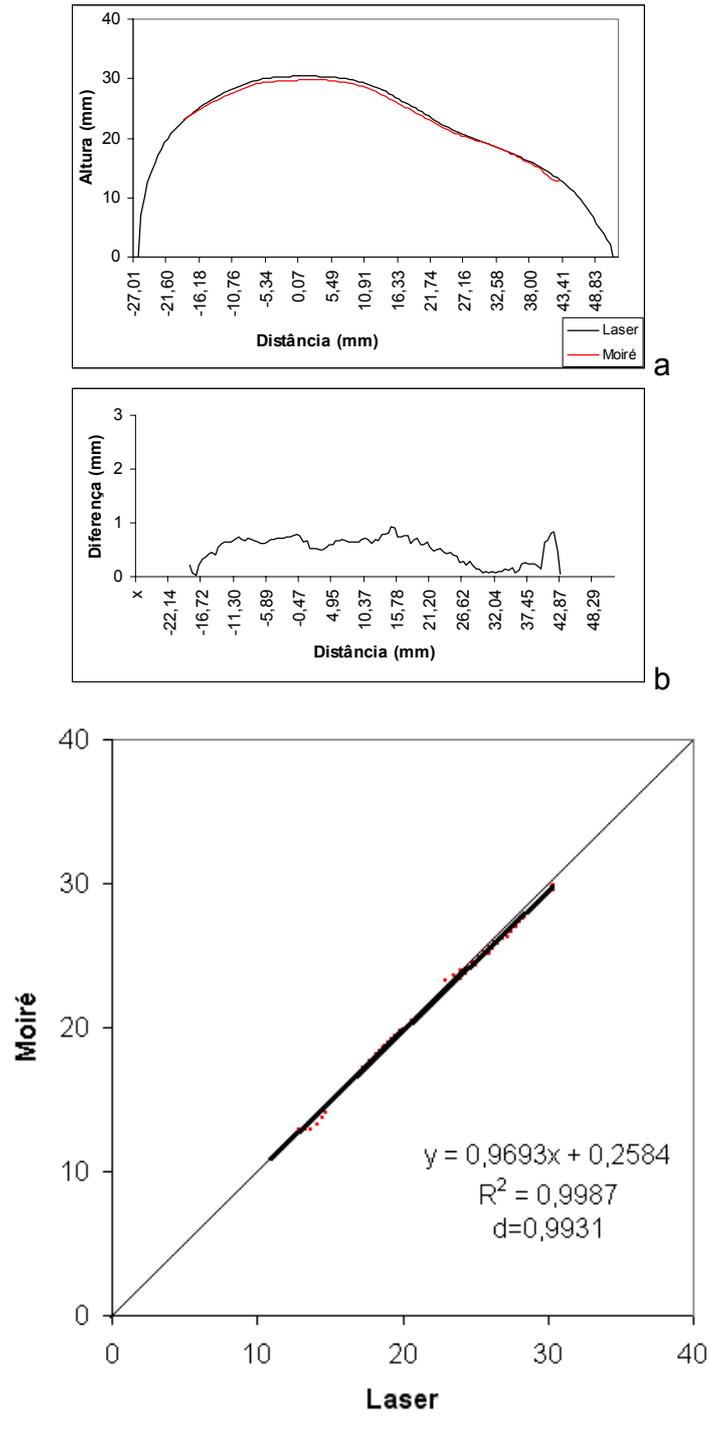


Figura 61: Resultados da comparação do perfil D05 da pêra entre as TM com mudança de fase e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

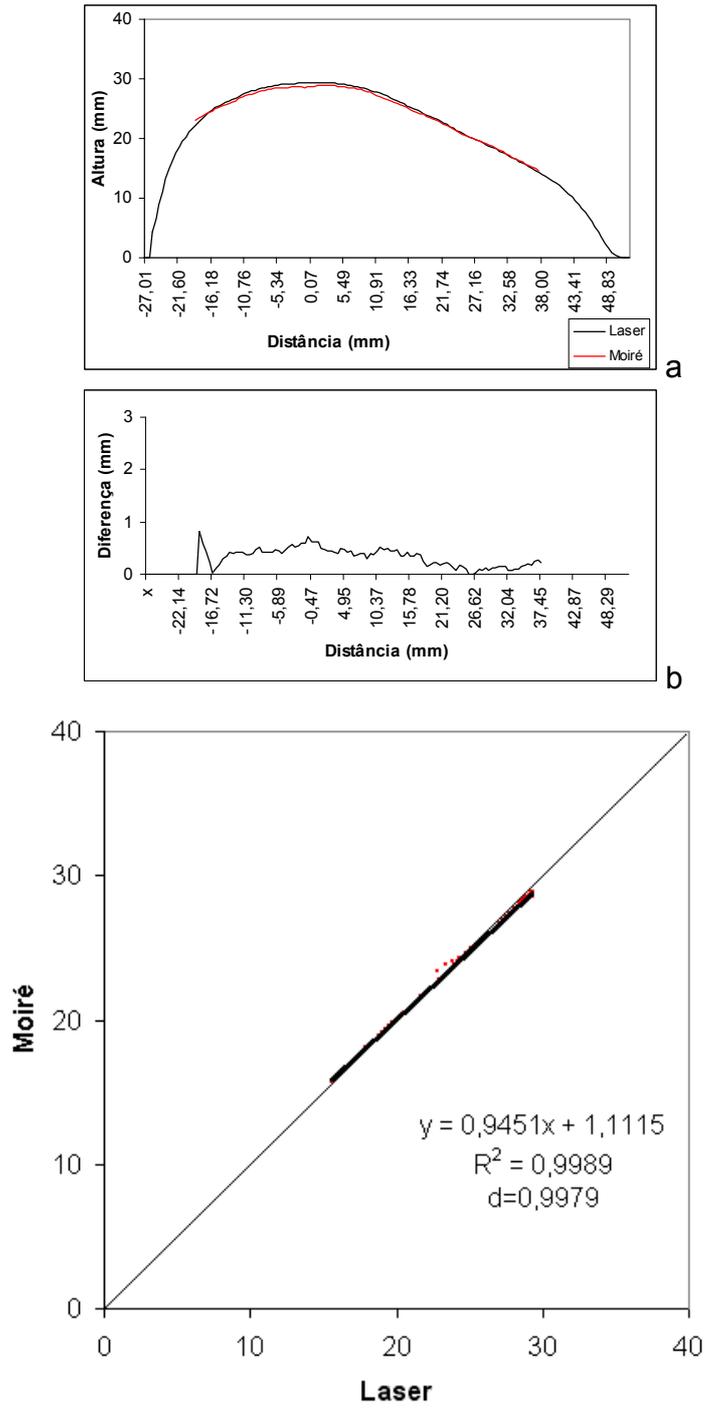


Figura 62: Resultados da comparação do perfil D10 da pãra entre as **TM** com mudança de fase e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

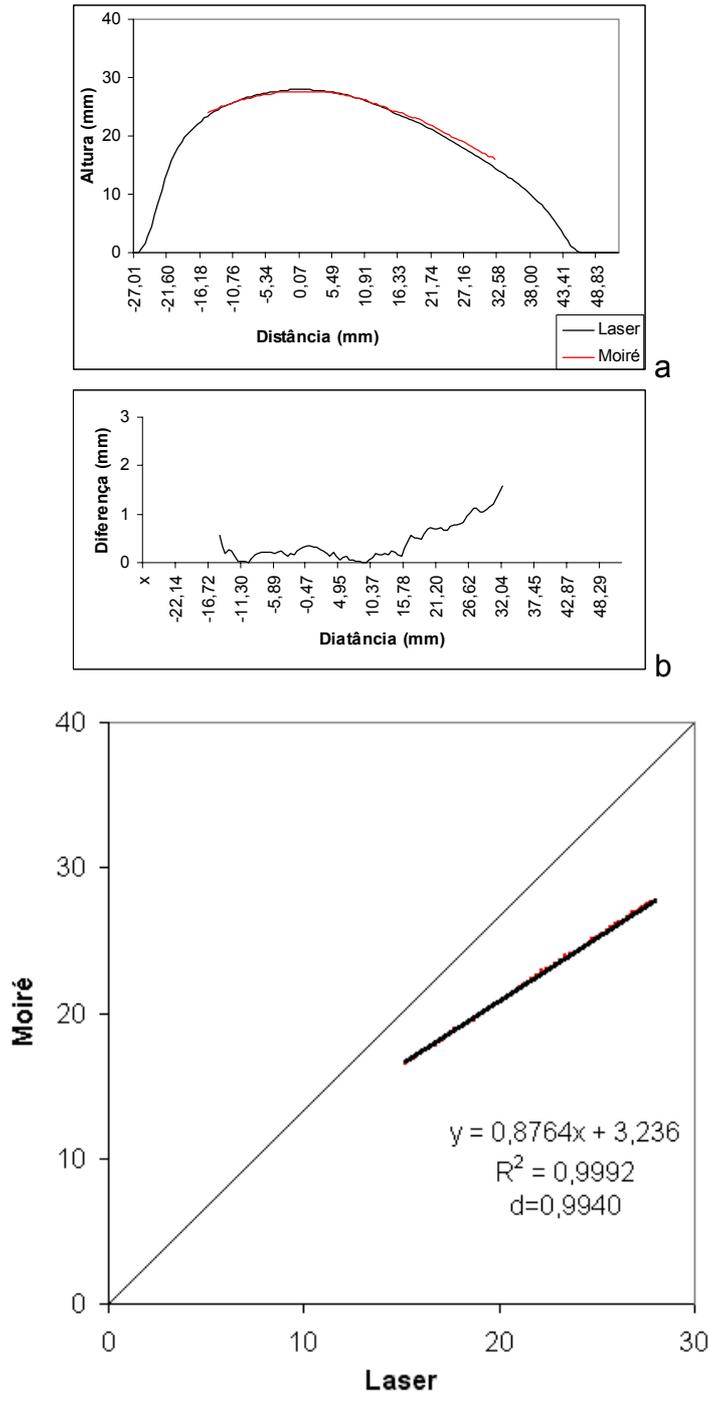


Figura 63: Resultados da comparação do perfil D15 da pêra entre as **TM** com mudança de fase e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

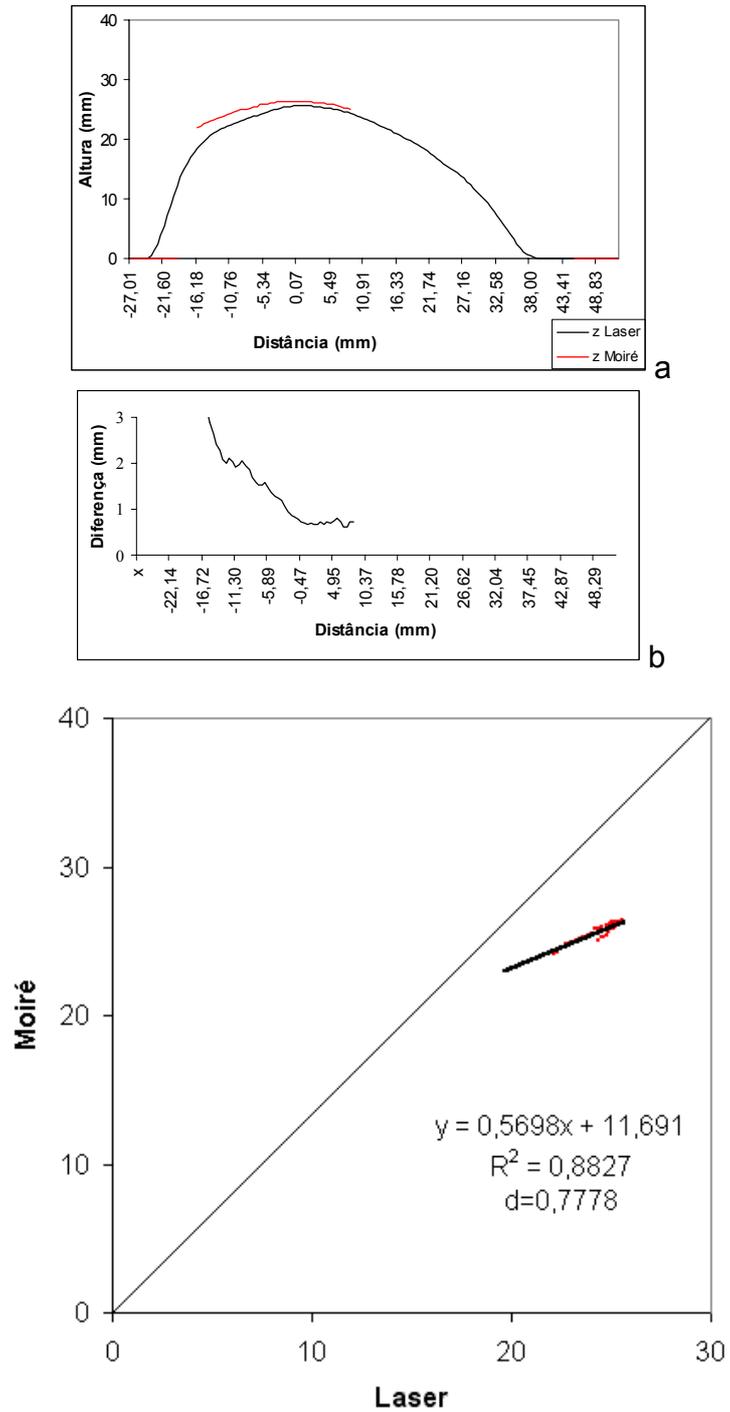


Figura 64: Resultados da comparação do perfil D20 da pêra entre as TM com mudança de fase e laser. a. Sobreposi o dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

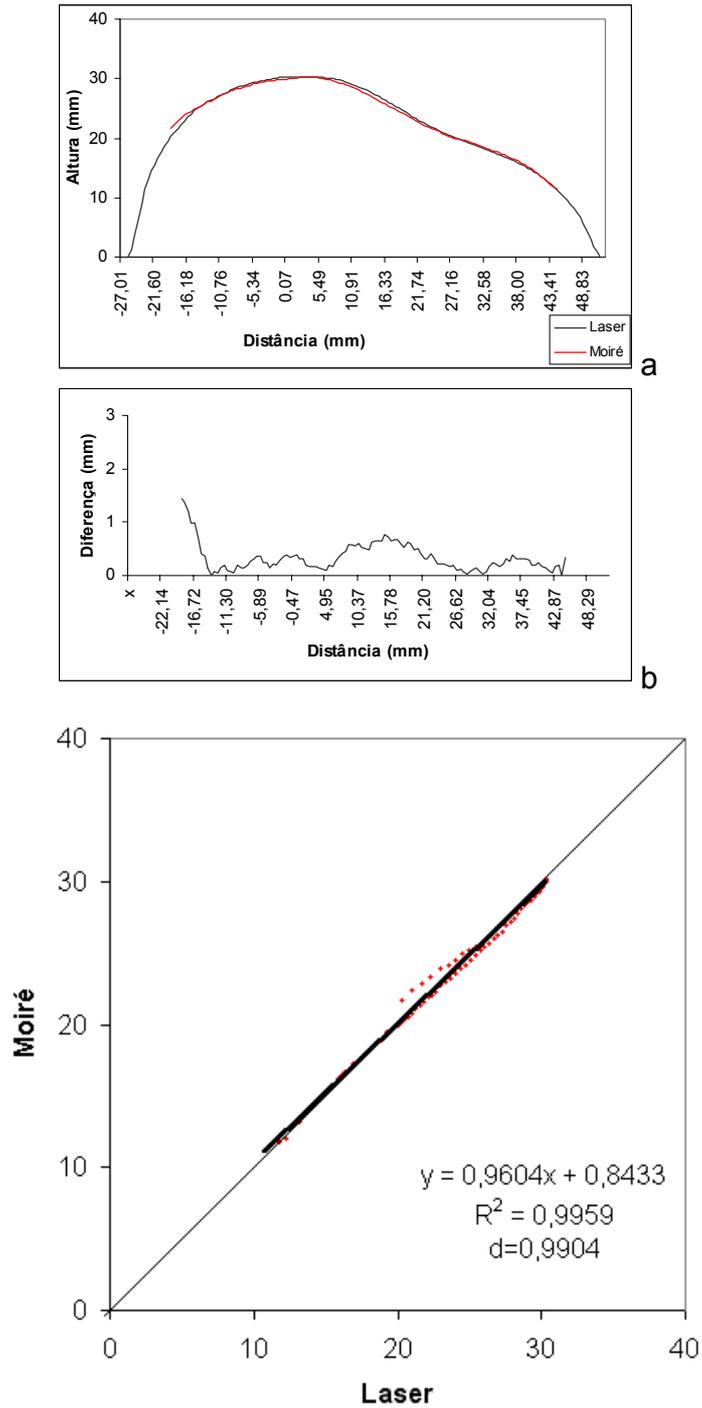


Figura 65: Resultados da comparação do perfil E05 da pãra entre as **TM** com mudança de fase e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

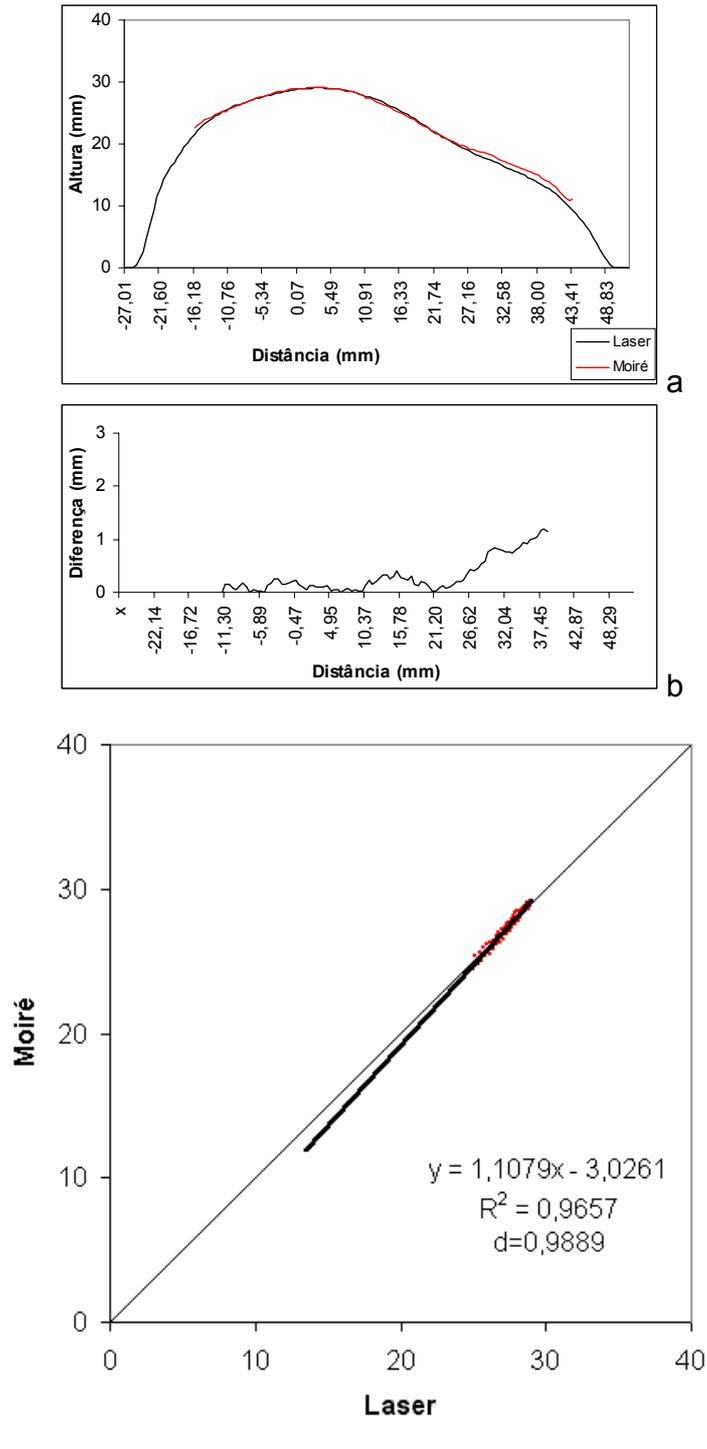


Figura 66: Resultados da comparação do perfil E10 da pêra entre as **TM** mudança de fase e laser. a. Sobreposi o dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

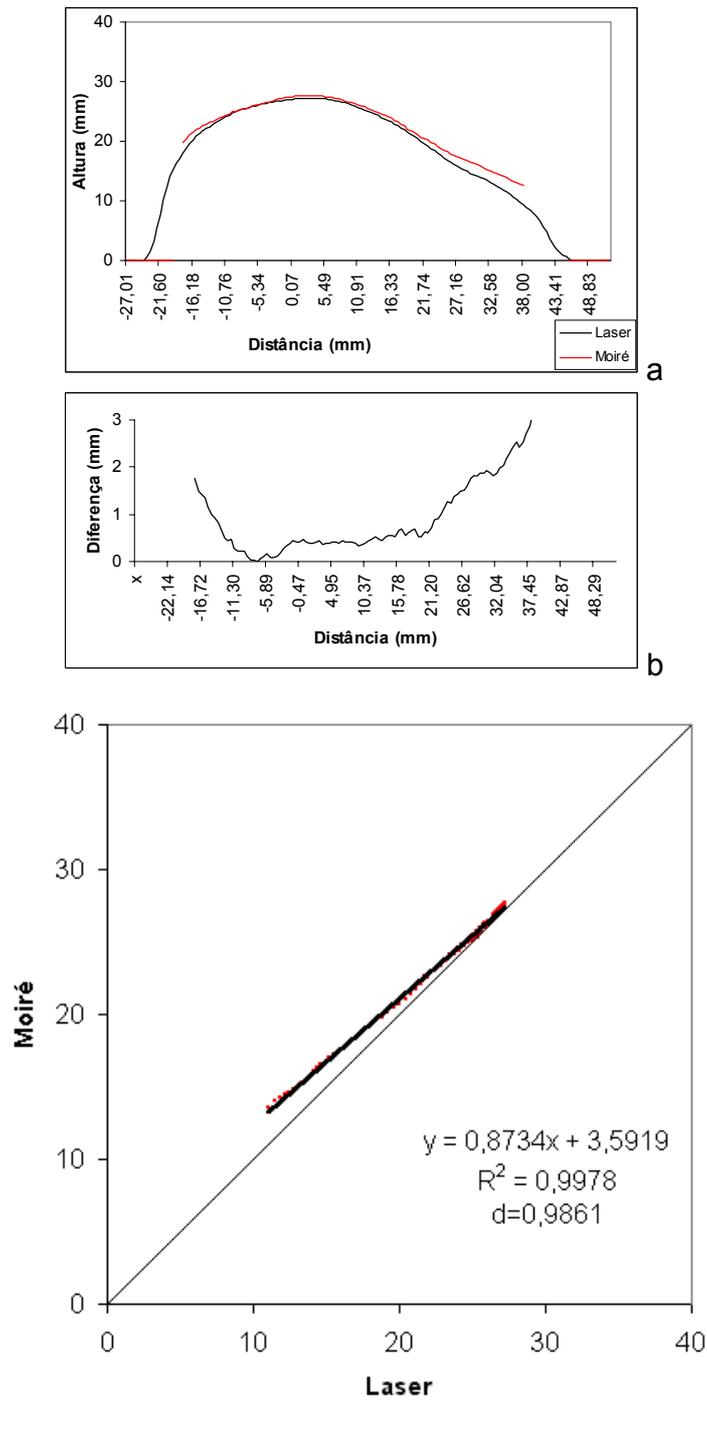


Figura 67: Resultados da comparação do perfil E15 da pêra entre as **TM** com mudança de fase e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

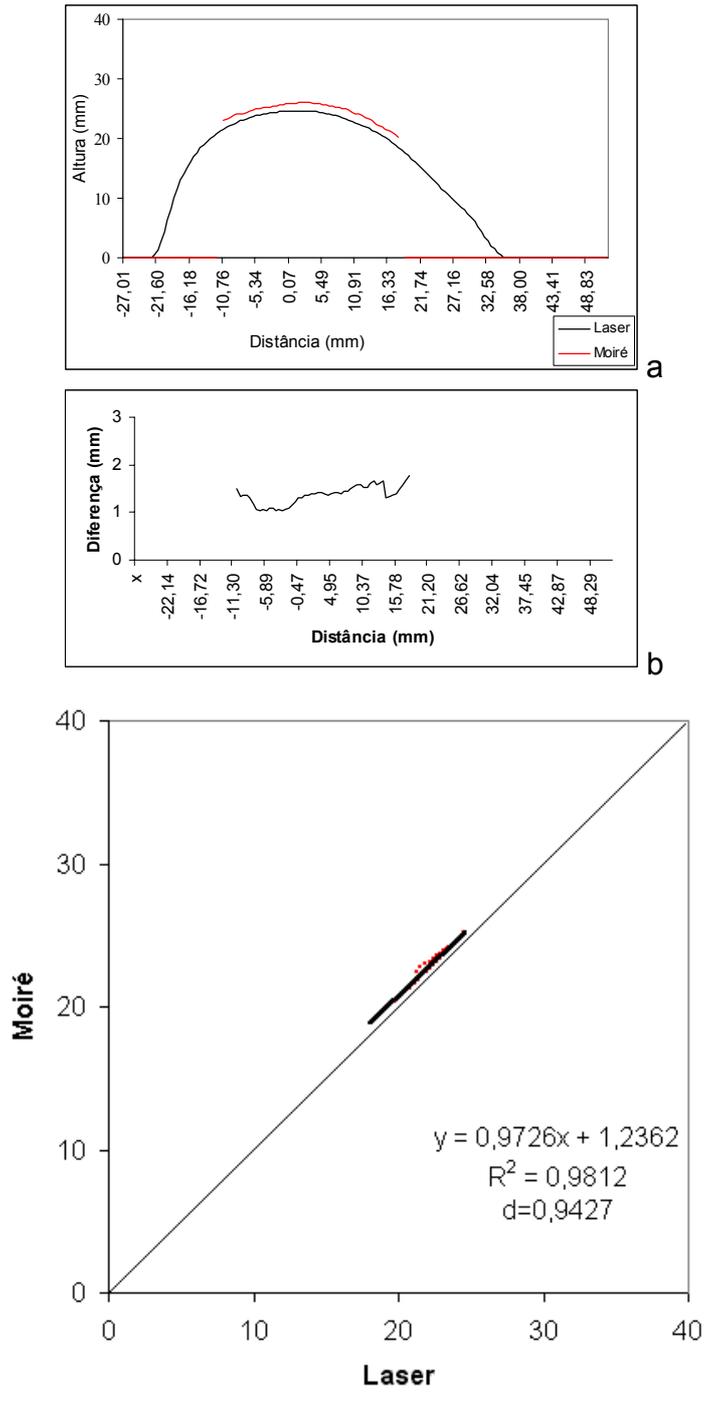


Figura 68: Resultados da comparação do perfil E20 da pãra entre as **TM** com mudança de fase e laser. a. Sobreposição dos perfis. b. Diferença entre os perfis. c. Gráfico de dispersão dos valores obtidos pelos dois métodos.

Tabela 8: Comparação entre os modelos digitais da superfície da pêra gerados pelo **TM** de sombra com multiplicação de franjas e pelo Scanner 3D Laser.

Perfil	E20	Central	D20	Média Geral
Comparação dos valores obtidos pelos métodos				
Correlação	0,9870	0,9980	0,9583	0,9928
R ²	0,9812	0,996	0,9317	0,9820
d	0,9427	0,9962	0,9195	0,9785

Tabela 9: Comparação entre os modelos digitais da superfície da pêra gerados pelo **TM** de sombra com mudança de fase e pelo Scanner 3D Laser.

Perfil	E20	Central	D20	Média Geral
Comparação dos valores obtidos pelos métodos				
Correlação	0,9939	0,9986	0,9859	0,9969
R ²	0,9878	0,9598	0,8827	0,9757
d	0,8370	0,9909	0,7778	0,9507

6. CONCLUSÕES

- A introdução das **TM** de sombra, com multiplicação de franjas e com mudança de fase, determinou satisfatoriamente a topografia de um fruto.
- Estas técnicas permitiram a geração de modelos digitais da superfície da pêra.
- A **TM** de sombra, com multiplicação de franja, mostra-se simples de ser aplicada, apesar de trabalhosa, podendo utilizar programas computacionais de uso comum.
- A **TM** de sombra, com mudança de fase, é bastante rápida, reconhece automaticamente picos e vales, mas necessita do uso de programas computacionais específicos.
- A **TM** de sombra, com mudança de fase, permite a geração automática de Modelos Digitais Topográficos.
- As **TM** de sombra só podem ser utilizadas em superfícies relativamente planas, pois à medida que a inclinação da superfície aumenta, as franjas perdem a nitidez.
- Com base nos resultados obtidos, sugere-se:
 - O desenvolvimento de programas computacionais específicos que possibilitem a aceleração e automatização do processo de geração de Modelos Digitais topográficos.
 - Estudos de novas aplicações das **TM** em Engenharia Agrícola.
 - Estudos de outras técnicas perfilométricas, tais como: *Moiré* de projeção, Perfilometria de Fourier, Projeção de franjas, etc.

6. CONCLUSÕES

- A introdução das **TM** de sombra, com multiplicação de franjas e com mudança de fase, determinou satisfatoriamente a topografia de um fruto.
- Estas técnicas permitiram a geração de modelos digitais da superfície da pêra.
- A **TM** de sombra, com multiplicação de franja, mostra-se simples de ser aplicada, apesar de trabalhosa, podendo utilizar programas computacionais de uso comum.
- A **TM** de sombra, com mudança de fase, é bastante rápida, reconhece automaticamente picos e vales, mas necessita do uso de programas computacionais específicos.
- A **TM** de sombra, com mudança de fase, permite a geração automática de Modelos Digitais Topográficos.
- As **TM** de sombra só podem ser utilizadas em superfícies relativamente planas, pois à medida que a inclinação da superfície aumenta, as franjas perdem a nitidez.
- Com base nos resultados obtidos, sugere-se:
 - O desenvolvimento de programas computacionais específicos que possibilitem a aceleração e automatização do processo de geração de Modelos Digitais topográficos.
 - Estudos de novas aplicações das **TM** em Engenharia Agrícola.
 - Estudos de outras técnicas perfilométricas, tais como: *Moiré* de projeção, Perfilometria de Fourier, Projeção de franjas, etc.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D SCANNERS. **Tecnology**. <<http://www.3dscanners.com/1999/prod8.htm>>, 05/09/2001.

AJOVALIST, A. **Breve guida alla scelta dei metodi de análisis sperimentali delle tensione**. <<http://dmti.unifi.it/aias/articoli/not%2084/ajovalasit.html>>, 10/02/1998.

ASSUNDI, A.; YUNG, K.H. Logical moiré and its application. **Experimental Mechanics**, v.31, n.3, p. 236-242, set., 1991.

ASSUNDI, A.. **Computer aided moiré methods**. <<http://www.ntu.edu.sg/mpe/research/programmes/sensors/sensors/moire/camm.html>>, 15/04/1998.

AUTODESK, INC. **AUTOCAD 2000 user's guide**. San Rafael, Autodesk, Inc. 1999.

BATOUCHE, M.; BENLAMRI, R.; KOLLADI, M.K. A computer vision system for diagnosing scoliosis using moiré images. **Computation in Biology and Medicine**. v. 26, n.4, p. 339-353, mar., 1996.

BENOSTAN. **Moiré topography theory**. 1997. <<http://www.otenet.gr/benostan/MOIRE.html>>, 18/05/1999.

CLOUD, G. **Optical methods of engineering analysis**. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.

CURLESS, B. **SIGGRAPH 99 Course on 3D Photography: Overview of Active Vision Techniques**. <<http://www.cs.cmu.edu/~seitz/course/SIGG99/slides/curless-active.pdf>>, 06/09/2001.

DIRKX, J. J. J.; DECRAEMER, W. F.; DIELIS, G. Phase shift method based on object translation for full field automatic 3-D surface reconstruction from moiré topograms. **Applied Optics**. Washington. v. 27, n.6, p.1164-69, mar., 1988.

DIRKX, J. J. J.; DECRAEMER, W. F. Automatic calibration method for phase shift shadow moiré interferometry. **Applied Optics**. Washington. v.29, n.10, p.1474-76, Abr., 1990.

DURELLI, A. J.; PARKS, V. J. **Moiré analysis of strain**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1970 apud CLOUD, G. **Optical methods of engineering analysis**. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.

ELETRONIC PACKAGING SERVICES. **Shadow moiré**. <<http://www.warpfinder/shadowmoire.html>>, 12/03/2000.

EASTMAN, J.R. **IDRISI 32: Guide to GIS and image processing**, v.1., Worcester, Clark University, 1999.

EASTMAN KODAK COMPANY. **Kodak Digital Science DC120 Zoom Digital Camera: User's guide for camera and software**. Rochester, Eastman Kodak Company, 1997.

FUNNELL, W. R. J., DECRAEMER, W. F. **Moiré shape measurements in eardrum models**. <<http://funsn.biomed.mcgill.ca/~funnell/AudiLab/drumsh.html>>, 10/04/2000.

GASVIK, K. J. Moiré techniques by means of digital image processing. **Applied Optics**. Washington. v.22, n.23, p.3543-48, set., 1983.

GOLDEN SOFTWARE, INC. **SURFER 32 user's guide**. Golden, Golden Software, Inc, 1995.

HU, Q. **3-D Shape measurement techniques**. <<http://www.sinc.sunysb.edu/Stu/qhu/Chapter1.htm>>, 06/09/2001.

KATSUKI, T.; GOTO, M.; KAWANO, Y.; TASHIRO, H. Quantification of symmetry of the nose using an analysis of Moiré photographs of a face. In: **Optical in Biomedical Sciences: Spring Series in Optical Science**. ed. VON BALLY, G.; GREGUSS, P. v. 20, p. 267-269, 1982.

KERATRON CORNEL, **Moiré fringe: Comparing moiré fringes to Placido based topography**. 1999. <http://209.155.2.106/keratron.html> Última atualização em 5 de maio de 2000.

LORD RAYLEIGH, **Phil. Mag.** v 47, p.81 e193, 1874 apud SCHIAMMARELLA, Cesar A. The moiré method – A review. **Experimental Mechanics.** v.44, n.8, p. 418-433, nov., 1982.

LI, J. L.; SU, X. Y.; SU, H. J.; CHA, S. S. Removal of carrier frequency in phase-shifting techniques. **Optics and Laser in Engineering.** v.30, p.107-115, jan., 1998.

MEADOWS, D. M.; JONHSON, W.O. & ALLEN, J. B. Generation of surface contours by moiré patterns. **Applied Optics.** Washington. v.9, n.4, p. 942-47, mar., 1970.

MOORE, D. T.; TRUAX, B.E. Phase-locked moiré fringe analysis for automatic contouring of diffuse surface. **Applied Optics.** Washington. v.18, n.4, p. 91-96, mar., 1979.

MULOT, M. Application of moiré to the study of mica deformation. **Rev. D'Optique.** Washington. v.4., p. 252-259, mai., 1925 apud SCHIAMMARELLA, Cesar A. The moiré method – A review. **Experimental Mechanics.** v.44, n.8, p. 418-433, nov., 1982.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - INNOVATION DESERVING EXPLORATORY ANALYSIS PROGRAM, 2000. **Surface condition assessment and profiler system for pavements using shadow moiré interferometry.** <<http://www.nas.edu/trb/about/nchrp-i12.html>>, 03/02/2000.

NEUGEBAUER, H.; WINDISCHBAUER, G. Moiré topography in scoliosis research. In: **Optical in Biomedical Sciences:** Spring Series in Optical Science. ed. VON BALLY, G.; GREGUSS, P. v. 20, p. 250-253,1982.

NISHIJIMA, Y. Moiré patterns: Their application to refractive index and refractive index gradient measurements. **Journal of the Optical Society of America.** Washington. v.54, n.1, p. 1-5, 1964.

ONUMA, K.; NAKAMURA, T.; KUWASHIMA, S. Development of a new real-time phase shift interferometry for the investigation of crystal growth kinetics. **Journal of Crystal Growth.** Washington. v.167, p. 387-390, 1996.

OSTER, G.; NISHIJIMA, Y. Moiré patterns. **Scientific American Resource Library: Readings in the Physics Sciences and Technology**. Washington. v.3. Offprints 291-326. p. 54-63. 1964.

OSTER, G.; WASSERMAN, M.; ZWERLIG, C. Theoretical Interpretation of Moiré patterns. **Journal Optical Society of America**. Washington. v.54, n.2, p. 169-175, 1964.

PICINI, A. G. **Desenvolvimento e testes de modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade do cafeeiro (*Coffea arabida L.*) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo**. 132 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1998.

POST, D.; HAN, B.; IFJU, P. **High sensitivity moiré: Experimental analysis for mechanics and materials**. New York, Spring-Verlag. 1994.

RILEY, W.F.; DURELLI, A.J. Application of moiré methods to the determination of transient stress and strain distributions. **Journal of Applied Mechanics**. v.29, n.4, 1962 apud CLOUD, Gary **Optical methods of engineering analysis**. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.

SHAPIRA, I.; VOLOSHIN, A. S. fractional moiré fringe analysis by optimization. **Optical Engineering**. v.31, n.4, p. 838-845. jan. 1992.

SU, X.; CHEN, W. Fourier transform profilometry: a review. **Optical and Lasers in Engineering**. v.35, p. 263-284. 2001.

SCHIAMMARELLA, C. A. The moiré method – A review. **Experimental Mechanics**. v.44, n.8, p. 418-433, nov., 1982.

SOILLE, P. Morphological phase unwrapping. **Optical and Lasers in Engineering**. v.32, p. 339-352, jan., 2000.

TAKASAKI, H. Moiré topography. **Applied Optics**. Washington. v.9, n.6, p. 1457-52, out., 1970.

TAKASAKI, H. Moiré topography. **Applied Optics**. Washington. v.12, n.4, p. 845-50, abr., 1973.

THEOCARIS, P.S. **Moiré fringes in strain analysis**. New York: Pergamon Press, 1969 apud CLOUD, Gary Optical methods of engineering analysis. Cambridge, Cambridge University Press, 405p. 1998.

ZWEMER, D.; HASSELL, P.; MAZEIKA, W.; PETERSKI, L.; HOLMES, R. **Shadow moiré based printed wiring board flatness inspection**. <<http://www.warpfinder.com/IPC.pdf>>, 20/07/2000.

VALERIANO, M. de M. **Estimativas de variáveis topográficas por geoprocessamento para modelagem da perda de solo**. 156p. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 1999.

WANG, Y.; HASSELL. P. **Measurement of thermally induced warpage of BGA packages/substrates using phase-stepping shadow**. <<http://www.warpfinder.com/IPC.pdf>>, 20/07/200.

WANG, Y.; **Shadow Moiré sensitivity increase by fringe shifting: phase-stepping** . <<http://www.warpfinder.com/phase.html>>, 03/09/2001.

WINDISCHBAUER, G. Survey on application of Moiré-techniques in medicine and biology. In: **Optical in Biomedical Sciences**: Spring Series in Optical Science. ed. VON BALLY, G.; GREGUSS, P. v.20, p. 245-249,1982.

WILLMOT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K.M., KLINK, D.R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal Geograph Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.

WHITEHOUSE, D.J. **Handbook of surface metrology**. Bristol, IOP Publishing, 1994.

W. ZYWANG, **RISING-SUN MOIRÉ Software**. http://www.glue.umd.edu/~zywang/download_moire.htm> 06/09/2001.

YATAGAI, T.; IDESAWA, M.; SAITO, S. High-precision moiré topography based on scanning techniques. In: **Optical in Biomedical Sciences: Spring Series in Optical Science.** ed. VON BALLY, G.; GREGUSS, P. v,20, p.255-257,1982.