

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**APLICAÇÃO DE *MOIRÉ* DE PROJEÇÃO COM  
DESLOCAMENTO DE FASE NA CONSTRUÇÃO DE  
MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE ORGÃOS  
VEGETAIS**

**ANTONIO CARLOS LOUREIRO LINO**

CAMPINAS  
DEZEMBRO DE 2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**APLICAÇÃO DE *MOIRÉ* DE PROJEÇÃO COM  
DESLOCAMENTO DE FASE NA GERAÇÃO DE  
MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE ORGÃOS  
VEGETAIS**

Tese de Doutorado apresentada à  
Faculdade de Engenharia Agrícola -  
UNICAMP para obtenção do título de  
Doutor em Engenharia Agrícola – Área  
de Concentração: Máquinas Agrícolas.

**ANTONIO CARLOS LOUREIRO LINO  
ORIENTADOR: INÁCIO MARIA DAL FABBRO**

CAMPINAS  
DEZEMBRO DE 2008

L649a Lino, Antonio Carlos Loureiro  
Aplicação de moiré de projeção com deslocamento de fase na geração de modelos digitais topográficos de órgãos vegetais / Antonio Carlos Loureiro Lino. -- Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Inacio Maria Dal Fabbro.  
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

I. Metodo moiré. 2. Produtos agricolas - Classificação. I. Dal Fabbro, Inacio Maria. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Titulo.

Titulo em Inglês: Applications of projection moiré technique with phase shifting to agricultural engineering problems

Palavras-chave em Inglês: Moiré techniques, Shape determination, Agricultural products selection and sorting

Área de concentração: Máquinas agrícolas

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Mikiya Muramatsu, Eduardo Acedo Barbosa, Celina de Almeida, Kil Jin Park

Data da defesa: 22/12/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da Tese de Doutorado defendida por Antonio Carlos Loureiro Lino, aprovada pela Comissão Julgadora em 22 de dezembro de 2008, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



---

Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro – Presidente e Orientador  
Feagri/Unicamp



---

Prof. Dr. Mikiya Muramatsu – Membro Titular  
Instituto de Física/USP



---

Prof. Dr. Eduardo Acedo Barbosa – Membro Titular  
FATEC



---

Dra. Celina de Almeida – Membro Titular  
Feagri/Unicamp



---

Prof. Dr. Kil Jin Park – Membro Titular  
Feagri/Unicamp

à minha esposa Teca  
aos meus filhos Violeta e Mateus  
à minha mãe Ziza

**Dedico**

## **EPIÍGRAFE**

"Porque melhor é a sabedoria do que os rubis; e tudo o que mais se deseja não se pode comparar com ela". (Provérbios 8:11)

"A sabedoria é a coisa principal; adquiere, pois a sabedoria, emprega tudo o que possuis na aquisição de entendimento". (Provérbios 4:7)

"Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquiere conhecimento". (Provérbios 3:13)

"Porque o SENHOR dá a sabedoria; da sua boca é que vem o conhecimento e o entendimento". (Provérbios 2:6)

"O temor do SENHOR é o princípio da sabedoria, e o conhecimento do Santo a prudência". (Provérbios 9:10)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por sua presença em minha vida.

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

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

Ao Pr. Narciso de Souza, meu mentor espiritual, pela sabedoria que me tem transmitido.

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.

Aos amigos e pesquisadores Antonio Odair dos Santos e Ila Maria Corrêa pelo apoio.

Aos pesquisadores e funcionários do CEA/IAC.

Aos colegas, Denival da Costa Silva, Cristina Aparecida Andreo e Daniel Rodrigues da Silva.

Ao Tecnólogo em Computação da FATEC/Jundiaí, André Vinícius Favrin Franco, pelo auxílio na confecção de rotinas computacionais.

Aos Cientistas da Computação da Universidade Federal de Lavras, Ricardo Marques da Costa e Bruno da Silva Oliveira, pelo auxílio na confecção de rotinas computacionais.

À FAPESP pelo apoio financeiro.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>XVI</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>2</b>
2.1. TÉCNICAS PERFILOMÉTRICAS ÓPTICAS.....	2
2.1.1. TÉCNICAS PASSIVAS .....	2
2.1.1.1. ESTEREOSCOPIA .....	3
2.1.1.2. SILHUETA.....	3
2.1.2. TÉCNICAS ATIVAS .....	4
2.1.2.1. DISTANCIÔMETROS A LASER .....	4
2.1.2.2. TRIANGULAÇÃO .....	5
2.1.2.3. PROJEÇÃO DE LUZ ESTRUTURADA .....	5
2.1.2.4. PROJEÇÃO DE LUZ CODIFICADA .....	6
Multiplexação temporal por códigos binários .....	7
Multiplexação temporal por códigos múltiplos .....	7
Codificação matemática.....	8
Codificação por vizinhança espacial .....	9
Codificação direta.....	9
2.1.2.5. DESLOCAMENTO DE FASE. ....	10
2.1.2.6. PROJEÇÃO DE FRANJAS COM DESLOCAMENTO DE FASE.....	12
2.1.2.7. “ELECTRONIC SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY” (ESPI).....	13
2.1.2.8. TRANSFORMADA DE FOURIER .....	14
2.1.2.9. ESTEREOSCOPIA ATIVA .....	15
2.2. TÉCNICAS DE <i>MOIRÉ</i> (TM) .....	15
2.2.1. O FENÔMENO DE <i>MOIRÉ</i> .....	15
2.2.2. AS TÉCNICAS DE <i>MOIRÉ</i> (TM).....	16
2.2.3. TÉCNICA DE <i>MOIRÉ</i> DE SOMBRA COM DESLOCAMENTO DE FASE ( <i>PHASE SHIFING</i> ) .....	19

2.2.4. TM DIGITAL.....	20
2.2.5. REMOÇÃO OU FILTRAGEM DOS RETÍCULOS .....	22
2.3. GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE 360 <sup>0</sup> .....	25
2.4. SELEÇÃO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS .....	26
2.4.1. DETERMINAÇÃO DO VOLUME.....	26
2.4.2. INSPEÇÃO TRIDIMENSIONAL.....	27
2.4.3. GERAÇÃO DE MDT DE 360 <sup>0</sup> DE FRUTAS E HORTALIÇAS.....	29
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	31
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1. ENSAIOS PRELIMINARES .....	34
3.1.1. <i>MOIRÉ</i> DE PROJEÇÃO COM DESLOCAMENTO DE FASE.....	34
3.1.1.1. <i>ENSAIOS VIRTUAIS</i> .....	34
3.1.1.2. <i>ENSAIOS EXPERIMENTAIS</i> .....	35
3.1.2. FILTRAGEM OU REMOÇÃO DOS RETÍCULOS .....	36
3.1.3. CORREÇÃO DAS DIMENSÕES DOS OBJETOS.....	37
3.1.3.1. <i>CORREÇÃO DE ESCALA DAS COORDENADAS “X” E “Y”</i> .....	37
3.1.3.2. <i>CORREÇÃO DE ESCALA DAS COTAS</i> .....	37
3.2. CONSTRUÇÃO DE MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS .....	38
3.2.1. MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE CORPOS SIMÉTRICOS .....	39
3.2.2. MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE CORPOS ASSIMÉTRICOS (ÓRGÃOS VEGETAIS).....	39
3.3. METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE FRUTAS E HORTALIÇAS.....	39
3.3.1. TESTE DA METODOLOGIA COM OBJETOS DE FORMA REGULAR.....	39
3.3.2. ENSAIOS COM PRODUTOS AGRÍCOLAS.....	40
3.4. MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE 360 <sup>0</sup> .....	40
3.4.1. MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE 360 <sup>0</sup> DE OBJETOS DE FORMA SIMÉTRICA .....	41
3.4.2. MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE 360 <sup>0</sup> DE FRUTOS .....	41
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>42</b>
4.1. TESTES PRELIMINARES .....	42
4.1.1. <i>MOIRÉ</i> COM DESLOCAMENTO DE FASE .....	42
4.1.1.1. <i>ENSAIOS VIRTUAIS</i> .....	43
4.1.1.2. <i>ENSAIOS EXPERIMENTAIS</i> .....	45

4.1.2. FILTRAGEM OU REMOÇÃO DOS RETÍCULOS .....	47
4.1.3. CORREÇÃO DE ESCALA DAS COTAS .....	52
4.2. CONSTRUÇÃO DE MODELO DIGITAL TOPOGRÁFICO.....	54
4.2.1. MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE CORPOS SIMÉTRICOS .....	54
4.2.2. MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE CORPOS ASSIMÉTRICOS (ÓRGÃOS VEGETAIS) .....	55
4.3. METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE FRUTAS E HORTALIÇAS .....	58
4.3.1. ENSAIO DA METODOLOGIA COM OBJETOS COM FORMA REGULAR.....	58
4.3.1.1. <i>ENSAIO COM CILINDRO</i> .....	58
4.3.1.2. <i>ENSAIO COM ESFERA</i> .....	60
4.3.1.3. <i>ENSAIO COM CUBO</i> .....	61
4.3.2. ENSAIOS COM PRODUTOS AGRÍCOLAS.....	63
4.3.2.1. <i>FRUTO DE TOMATEIRO (LYCOPERSICON ESCULENTUM)</i> <i>ÍNTEGRO.</i> .....	63
4.3.2.2. <i>FRUTO DE TOMATEIRO (LYCOPERSICON ESCULENTUM)</i> <i>DEFECTIVO.</i> .....	65
4.3.2.3. <i>FRUTO DE GOIABEIRA (PSIDIUM GUAJAVA L.) COM INJURIA</i> <i>MECÂNICA.</i> .....	66
4.3.2.4. <i>BATATA (SOLANUM TUBEROSUM L.) COM INJURIA</i> <i>MECÂNICA. PRIMEIRO CASO.</i> .....	69
4.3.2.5. <i>BATATA (SOLANUM TUBEROSUM L.) COM INJURIA</i> <i>MECÂNICA. SEGUNDO CASO.</i> .....	71
4.4. MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE 360 <sup>o</sup> .....	73
4.4.1. MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE 360 <sup>o</sup> DE OBJETOS DE FORMA SIMÉTRICA .....	73
4.4.2. MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS DE 360 <sup>o</sup> DE FRUTOS .....	74
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>76</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>
<b>APENDICE 1: ROTINAS ASSOCIADAS AO PROGRAMA IMAGEJ.....</b>	<b>89</b>
<b>APENDICE 2: ROTINAS ASSOCIADAS AO PROGRAMA SCILAB/SIP.....</b>	<b>91</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação das técnicas perfilométricas para a extração da superfície tridimensional. ....	3
Figura 2. Princípio da triangulação laser, onde o objeto é deslocado. ....	5
Figura 3. Esquema experimental para luz estruturada. A. Linha simples. B. múltiplas linhas. ....	6
Figura 4. Padrão de luz estruturada projetada por multiplexação temporal por códigos binários.....	7
Figura 5. Padrão de luz estruturada projetada por multiplexação temporal por códigos múltiplos. ....	8
Figura 6. Padrão de luz estruturada projetada por codificação matemática. A. Linhas coloridas. B. pontos coloridos.....	8
Figura 7. Padrão de luz estruturada projetada por codificação por vizinhança espacial. A. padrões periódicos. B. estrutura complexa baseada em fendas, com corte aleatórios. ....	9
Figura 8. Padrão de luz estruturada projetada por codificação direta. A. Tons de Cinza. B. Padrão arco-íris.....	10
Figura 9. Mapa de fases empacotadas com a fase variando de $-\pi$ a $\pi$ . A. Vista de topo. B. Perfil de uma linha horizontal que passa pelo ápice do cone. ....	11
Figura 10. MDT do cone em tons de cinza. A. Vista de topo. B. Perfil de uma linha horizontal que passa pelo ápice do cone.....	12
Figura 11. Quatro padrões de grades senoidais com franjas com fase deslocada de $\pi/2$ . ....	12
Figura 12. Processo para obtenção de MDT por transformada de Fourier. ....	14
Figura 13. Franjas de <i>moiré</i> produzidas pela sobreposição de duas grades. ....	16
Figura 14: Retículos mais utilizado para produzir franjas de <i>moiré</i> . A. Linhas. B. Quadrado. C. Circular.....	16
Figura 15. Esquema experimental para a TM de sombra.....	17
Figura 16. Esquema experimental para <i>moiré</i> de projeção. ....	18
Figura 17: <i>Moiré</i> de projeção com deslocamento de fase. A. Arranjo experimental. B. Deslocamento de fase entre os dois pares de grade.....	21
Figura 18: Esquema experimental de <i>moiré</i> de sombra com deslocamento de fase. ....	21
Figura 19: Localização geométrica e amplitude do impulso no espectro 2D de uma imagem periódica. ....	23
Figura 20: Grades senoidais (a) e (b) e a sua sobreposição (c), no domínio da imagem. Espectro (domínio da frequência) das mesmas grades vistas de topo (d) e (e) e a sua convolução (f), e as suas respectivas vistas laterais (g), (h) e (i).....	24
Figura 21. Contribuição isolada destes novos pares de impulsos, no domínio da imagem, para a superposição (3c). (a) devido às diferenças de frequências $f_1-f_2$ e $f_2-f_1$ , e (b) devido às diferenças de frequências $f_1+f_2$ e $-f_2-f_1$ .....	24
Figura 22. Arranjo experimental (A) e cilindro deformado resultante (B). ....	26
Figura 23. Arranjo do sistema de cálculo do volume de peixes por triangulação.....	28
Figura 24. Silhuetas de produtos agrícolas: abacate, melão e abóbora, da esquerda para a direita.....	29
Figura 25. Modelos tridimensionais “wire-frame” dos mesmos produtos. ....	30

Figura 26. Geração de MDT de pimentão. A. Pimentão real. B. MDT. ....	30
Figura 27: Arranjo experimental utilizado nos testes práticos .....	32
Figura 28: Retículos Ronchi. A. Retículos $R_1$ , $R_2$ , $R_3$ e $R_4$ defasados entre si de $\frac{1}{4}$ de período. B. Retículo $R_d$ deformado em programa de tratamento de imagem.....	35
Figura 29: Retículos senoidais $S_1$ (A), $S_2$ (B) e franja de <i>moiré</i> $S_R$ (C) produzida pela diferença dos dois retículos. ....	36
Figura 30: Dimensões do prisma triangular. ....	38
Figura 31: Franjas de <i>moiré</i> . A, B, C e D – Franjas de <i>moiré</i> defasadas de $\frac{1}{4}$ de período entre si. ....	43
Figura 32: Franjas de <i>moiré</i> filtradas. A, B, C e D – Franjas de <i>moiré</i> defasadas de $\frac{1}{4}$ de período entre si. ....	44
Figura 33: “Phase shifting” das franjas de <i>moiré</i> . A – Mapa de fases empacotadas. B –Modelo Digital Topografico (MDT) da superfície virtual.....	44
Figura 34: MDT por malhas de contorno da superfície virtual. ....	44
Figura 35: Grade de $G_1$ , projetada sobre o plano de referência com a calota (Ic).....	45
Figura 36: Imagens das retículo $G_1$ (A), $G_2$ (B), $G_3$ (C) e $G_4$ (D) projetadas sobre o plano de referência. ....	46
Figura 37: Franjas de <i>moiré</i> formadas pela diferença da imagem (Ic) e as imagens retículo $G_1$ (A), $G_2$ (B), $G_3$ (C) e $G_4$ (D) projetadas sobre o plano de referência.....	46
Figura 38: Franjas de <i>moiré</i> filtradas para a remoção dos retículos.....	46
Figura 39: MDT da calota, em tons de cinza (A) e colorido com vista lateral (B). ....	47
Figura 40: FFT dos retículos da Figura 30. A. Retículo $S_1$ . B. Retículo $S_2$ . C. Da franja de <i>moiré</i> $S_1$ geradas pela diferença entre os dois retículos. ....	48
Figura 41: Imagem tridimensional da FFT das franjas de <i>moiré</i> . ....	48
Figura 42: Imagem da Transformada de Fourier (B), cortada pela Máscara.(A). Franja de <i>moiré</i> obtida através da Transformada Inversa de Fourier (C). ....	48
Figura 43: MDT de um prisma triangular gerado <i>moiré</i> de projeção, filtrado por filtro gaussiano, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno(B). ....	49
Figura 44: MDT de um prisma triangular gerado <i>moiré</i> de projeção, filtrado por filtro gaussiano, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno(B). ....	49
Figura 45: MDT de um prisma gerado <i>moiré</i> de projeção, filtrado por filtro média, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno(B).....	50
Figura 46: MDT de um prisma triangular gerado <i>moiré</i> de projeção, filtrado por filtro de média, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno(B). ....	50
Figura 47: MDT da calota, filtrado por FFT, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno(B). ....	51
Figura 48: MDT de um prisma triangular gerado <i>moiré</i> de projeção, filtrado por filtro gaussiano, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno(B). ....	52
Figura 49: MDT do prisma.....	53
Figura 50: Variação da altura do prisma. ....	54

Figura 51: Construção do MDT de um cubo visto de uma das arestas. Retículo projetado sobre o cubo (A). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C). .....	55
Figura 52: Construção do MDT de um cilindro. Retículo projetado sobre o cilindro (a). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C). .....	55
Figura 53: Construção do MDT de uma esfera. Retículo projetado sobre a esfera (A). mdt em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C). .....	55
Figura 54. Construção do MDT de um tubérculo de batata ( <i>Solanum tuberosum</i> ). retículo projetado sobre o tubérculo (A). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C). .....	56
Figura 55: Construção do MDT de um fruto da macieira ( <i>Malus spp</i> ). retículo projetado sobre a fruta (A). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C). .....	56
Figura 56. Construção do MDT de um fruto da pereira ( <i>Pirus communis</i> ). retículo projetado sobre a fruta (A). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C). .....	57
Figura 57. Construção do MDT de um fruto da laranjeira ( <i>Citrus sinensis</i> ). retículo projetado sobre a fruta (A). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C). .....	57
Figura 58: A. Imagem do cilindro. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. MDT por malhas de contorno da RDI. D. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI. ....	58
Figura 59: Perfil do cilindro, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas. ....	59
Figura 60: A. Imagem da esfera. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. Topografia da RDI. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI. ....	60
Figura 61: Perfil da esfera, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas. ....	60
Figura 62: A. Imagem de um cubo. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. Topografia da RDI. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI. ....	62
Figura 63: Perfil do cubo, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas. ....	62
Figura 64: A. Imagem do tomate salada. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. MDT por malhas de contorno da RDI. D. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI. ....	64
Figura 65: Perfil do tomate, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas. ....	64
Figura 66 A. Imagem do tomate com defeito. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. MDT por malhas de contorno da RDI. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI. ....	65
Figura 67. Perfil do fruto de tomateiro ( <i>Lycopersicon esculentum</i> ) defectivo, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas. ....	65
Figura 68. A, imagem do fruto de goiabeira ( <i>Psidium guajava L.</i> ). B, franjas projetadas com RDI demarcada. C, topografia da RDI. D, linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI. ....	67
Figura 69. Perfil do fruto de goiabeira, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas. ....	67
Figura 70. Perfil do fruto de goiabeira ( <i>Psidium guajava L.</i> ), curva polinomial ajustada e diferença entre ambas. ....	68
Figura 71. A. Imagem da batata. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. Topografia da RDI. D. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI. ....	70

Figura 72. Perfil da batata fora da área lesionada, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.....	70
Figura 73. Perfil da batata dentro da área lesionada, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.....	70
Figura 74: A. Imagem da batata lesionada. B. Franjas projetadas. C. MDT. D. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI.....	71
Figura 75: Perfil da batata fora da área lesionada, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.....	72
Figura 76: Perfil da batata dentro da área lesionada, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.....	72
Figura 77: Perfil da batata fora da área lesionada, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.....	72
Figura 78: Processo para a reconstituição 3D de um cubo.....	73
Figura 79: Representação 3D da reconstituição de um cilindro.....	74
Figura 80: Representação 3D de uma lata amassada. A. Perspectiva. B. Lateral. ....	74
Figura 82: A. Grade projetada sobre a superfície da fruta do pessegueiro ( <i>Prunus persica</i> ). B. Sua representação 3D. ....	75
Figura 82: A. Grade projetada sobre a superfície da fruta da goiabeira ( <i>Psidium guajava</i> ). B. Sua representação 3D. ....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões dos prismas .....	38
Tabela 2: Estatísticas das diferenças e a correlação entre as linhas de perfil 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 e 50 e a linha central de perfil da MDT.....	50
Tabela 3: Estatísticas das diferenças e a correlação entre as linhas de perfil 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 e 50 e a linha central de perfil da MDT.....	51
Tabela 4: Estatísticas das diferenças e a correlação entre as linhas de perfil 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 e 50 e a linha central de perfil da MDT.....	52
Tabela 5: Resultado das alturas dos prismas pelas duas equações.....	53
Tabela 6: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil do cilindro e seu coeficiente de correlação. ....	59
Tabela 7: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada. ....	59
Tabela 8: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil e seu coeficiente de correlação.....	61
Tabela 9: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada da esfera. ....	61
Tabela 10: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil e seu coeficiente de correlação.....	62
Tabela 11: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial de uma esfera. ....	63
Tabela 12: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil e seu coeficiente de correlação.....	64
Tabela 13: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada de uma esfera. ....	64
Tabela 14: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil de seu coeficiente de correlação. ....	66
Tabela 15: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada de uma esfera. ....	66
Tabela 16: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil e seu coeficiente de correlação.....	67
Tabela 17: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada de uma esfera. ....	68
Tabela 18: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para os perfis da face 2 do fruto de goiabeira ( <i>Psidium guajava L.</i> ) e seu coeficiente de correlação.....	68
Tabela 19: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para os perfis da face 3 do fruto de goiabeira e seu coeficiente de correlação.....	68
Tabela 20: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para os perfis da face 4 do fruto da goiabeira e seu coeficiente de correlação.....	69

Tabela 21: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil e seu coeficiente de correlação.....	70
Tabela 22: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada de uma batata com injúria mecânica. ....	71
Tabela 23: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para os perfis da face 3 da goiaba e seu coeficiente de correlação. ....	72

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

$p$  = período ou passo dos retículos (mm).

$I$  = Imagem capturada ou tratada.

$N$  = Número de ordem das franjas de *moiré*.

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

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

$x$  = Coordenada de um ponto em uma imagem (pixels).

$y$  = Abscissa de um ponto em uma imagem (pixels).

$Z(x, y)$  ou  $z$  = Cotas ou mapa de profundidade da superfície (mm).

$S$  = Sensibilidade da montagem, razão entre o passo do retículo e a distância à lente de projeção;

$lp$  = Distância entre o projetor LCD e o centro da superfície do objeto em estudo (mm).

### Letras Gregas

$\Delta z$  = Diferença entre duas cotas (mm).

$\alpha$  = Ângulo de iluminação (graus).

$\beta$  = Ângulo de observação (graus).

$\theta$  = Ângulo de projeção para TM de projeção (graus).

$\pi$  = Número Pi = 3,1416...

$\phi$  ou  $\varphi$  = Diferença de fase ( $\varphi(x, y) = 2\pi\psi(x, y)$ ).

$\psi$  = Função de modulação ou ordem de franja.

## LISTA DE ABREVIATURAS

CCD = Charge-Coupled Device

DLP = Digital Light Processing

DP = Desvio Padrão

EMC = Eletronic moiré Contouring

ESPI = Electronic Speckle Pattern Interferometry

FFT = Transformada Rápida de Fourier

IAC = Instituto Agronômico de Campinas

LCD = Liquid Crystal Display (“Monitor de Cristal Líquido”)

MDT = Modelo Digital Topográfico

PIXEL = Picture Elements

RDI = Região de Interesse

TM = Técnicas de *moiré*

## RESUMO

A reconstituição do contorno topográfico com geometria simétrica ou assimétrica é uma necessidade fundamental para a ciência e para o desenvolvimento tecnológico. A aplicação do levantamento da topografia dos objetos é refletida em vários campos da ciência como biologia, ortopedia, próteses e órteses humanas, diagnósticos médicos, predição de resultados cirúrgicos, medicina veterinária, controle de qualidade e inspeção industrial, engenharia reversa, modelagem matemática, mecânica dos sólidos, *composites*, projetos estruturais, elementos de máquinas, robótica e visão de máquina. Este trabalho devota especial atenção a problemas de Engenharia Agrícola tais como definição dos contornos topográficos de animais e produtos vegetais, projetos de elementos de máquinas agrícolas, arquitetura de plantas, interações máquina-solo e máquina-planta, contato pneu-solo, seleção e classificação de produtos agrícolas, determinação de propriedades mecânicas de solo e vegetais, estudos sobre práticas de preparo do solo projetos de embalagens para produtos agrícolas e outros. Entre os métodos perfilométricos mostrados na literatura as técnicas de *moiré* são consideradas as mais rápidas, de baixo custo, de fácil aplicação e exequíveis. A técnica denominada *moiré* de projeção com deslocamento de fase, devido aos constantes desenvolvimentos, é a que tem aplicabilidade quando comparada às outras técnicas de *moiré* do gênero. Este trabalho inclui vários exemplos práticos da sua aplicação em vários problemas em Engenharia Agrícola. Determinação da topografia de objetos simétricos, determinação de injúrias mecânicas e modelos com coordenadas 3D, são igualmente apresentados. Aplicação de *software* tais como *ImageJ*, *Rising Sun Moiré*, *SCILAB/SIP*, *Excell* e rotinas são apresentadas e igualmente discutidas. As conclusões mostram a exequibilidade do método proposto na ciência da Engenharia Agrícola.

Palavras chaves: técnicas de *moiré*, deslocamento de fase, perfilometria, seleção e classificação de produtos agrícolas.

# APPLICATIONS OF A PROJECTION *MOIRÉ* TECHNIQUE WITH PHASE SHIFITING TO AGRICULTURAL ENGINEERING PROBLEMS.

## ABSTRACT

Shape definition of bodies exhibiting symmetric, non symmetric or irregular geometry is of fundamental necessity for science and technology developments. Applications of objects shape survey is reflected on several science fields as biology, human prosthesis and orthesis, medical diagnosis, prediction of surgical results, orthopedics, veterinary medicine, industrial quality control, reverse engineering, mathematical modeling, solid mechanics, composites, structural design and inspection, machine elements, static and dynamic problems, machine vision and robotics. This research work devotes special attention to agricultural engineering problems as the shape definition of animal as well as vegetable agricultural products, design of farm machinery elements, plant architecture, plant and soil - machine mechanical interactions, soil – tire contact area determination, products selection and sorting, soil and vegetable mechanical properties determination, soil tillage and agricultural practices studies, product packing design and so forth. Amongst the shape survey methods exhibited by the pertinent literature, the *moiré* methods are here considered feasible, of low cost, of easy application and speedy. Projection *moiré* with phase shifting technique has been selected to be considered a developed procedure when compared with remaining *moiré* methods, presenting also recent developments. This research work includes a variety of practical examples on several agricultural engineering subjects. Shape determination of symmetric bodies, determination of mechanical injuries proportions on agricultural products and three dimensional coordinates model are presented as well. Employed softwares included *ImageJ*, *RisingSun Moiré*, *SCILAB/SIP*, *Excell* and routines. The conclusions refer to the feasibility of the proposed method to the agricultural engineering science.

Keywords: *moiré* techniques, shape determination, agricultural products selection and sorting

# 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 microrrelevo 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 pode 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* de projeção com deslocamento de fase pode ser aplicada com resultados satisfatórios na reconstrução tridimensional de órgãos vegetais.

O objetivo geral deste trabalho foi aplicar a técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase na reconstrução tridimensional de superfícies irregulares, tais como superfícies de frutos, tubérculos, e outros órgãos vegetais como órgãos vegetais, tais como frutos e tubérculos.

Os objetivos específicos são

1. Estudar os *softwares* que trabalham com tratamento de imagens e com interferometria (deslocamento de fase).
2. Estudar e propor a técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase para gerar Modelos Digitais Topográficos (MDT) de órgãos vegetais.
3. Desenvolver rotinas computacionais que propiciem a automatização do processo de geração de Modelos Digitais Topográficos (MDT) de objetos.
4. Estudar a aplicação desta técnica em seleção de órgãos vegetais.
5. Gerar Modelos Digitais Topográficos (MDT) de 360° de órgãos vegetais.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1. TÉCNICAS PERFILOMÉTRICAS ÓPTICAS**

Técnicas perfilométricas são utilizadas para a extração da superfície tridimensional ou contorno topográfico de objetos. Essas técnicas permitem analisar objetos ou ambiente do mundo real coletando dados sobre a suas formas. Os dados coletados podem gerar modelos digitais Topográficos passíveis de serem usados numa grande variedade de aplicações, entre elas projetos industriais, engenharia reversa e prototipagem, visão de máquina, documentação de objetos de arte. Cada uma dessas técnicas tem suas próprias limitações, vantagens e custos.

Normalmente essas técnicas criam uma nuvem de pontos na superfície do objeto, que podem ser usados para extrapolar a forma do objeto, através de um processo chamado reconstrução, gerando o Modelo Digital Tridimensional (MDT) deste objeto.

CURLESS (2005) apresenta na Figura 1 um quadro sinótico bastante detalhado das técnicas perfilométricas. As técnicas perfilométricas ópticas 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 e hortaliças.

As técnicas ópticas podem ser divididas em passivas e ativas.

#### **2.1.1. Técnicas passivas**

Técnicas para extração da superfície tridimensional de objetos se caracterizam por não emitirem nenhum tipo de radiação por si própria, mas detectam apenas a radiação ambiente refletida. A maioria delas detecta a luz visível, pois é aquela que esta disponível no ambiente. Outros tipos de radiação podem ser usados, como por exemplo, infravermelho.

Estes técnicas são de baixo custo porque em muitos casos não necessitam de programas computacionais específicos. As principais técnicas passivas são a estereoscopia e silhueta.

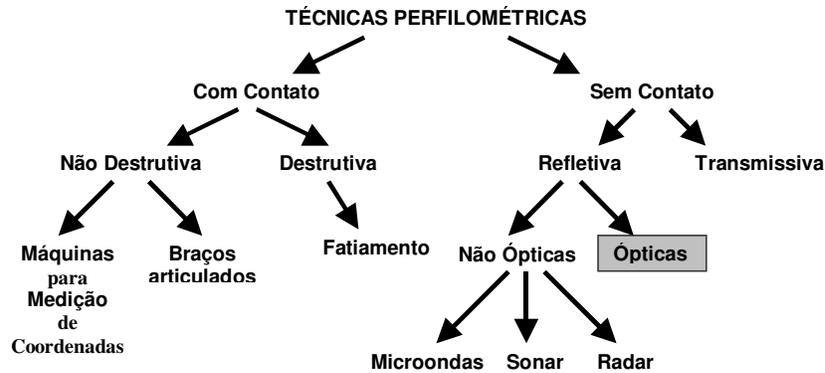


Figura 1. Classificação das técnicas perfilométricas para a extração da superfície tridimensional.  
 Fonte: CURLESS (2005)

### 2.1.1.1. Estereoscopia

O princípio de funcionamento dos sistemas estereoscópicos é semelhante à visão humana, em que cada olho visualiza uma cena de um ângulo diferente, ou seja, cada olho tem uma perspectiva diferente da cena, o cérebro consegue perceber a profundidade ou tridimensionalidade. Da mesma forma um programa ao analisar duas imagens obtidas de ângulos diferentes, pode determinar as coordenadas de pontos através da sua posição relativa nas imagens e assim reconstituir a topografia da cena ou objeto. Este ângulo varia conforme o tipo de sistema estereoscópico, distância do objeto à câmera e tipo de equipamento.

CLARKE et al. (1993), comparando três tipos de Scanner 3D, *moiré* de sombra, fotogrametria estereoscópica e triangulação concluíram que fotogrametria é a mais flexível delas. Porém o que consome maior tempo computacional. Mas tem a seu favor alta acurácia.

### 2.1.1.2. Silhueta

Nesta técnica as linhas de contorno são criadas por uma seqüência de fotografias obtidas do redor de um objeto tridimensional contra um fundo contrastante. Estas silhuetas são obtidas e intersectadas para formar a aproximação da casca visual (“*Visual Hull*”) do objeto. Neste tipo de técnica algumas concavidades do objeto não são detectadas. Além disso, quanto maior a complexidade do objeto e a exatidão desejada, maior número de imagens são necessárias, chegando a uma centena em alguns casos para gerar o MDT de objetos (ZHENG, 1994; LAURENTINI, 1994; SINHA e POLLEFEYS, 2004 e AZEVEDO et al., 2007). O alto número de imagens torna inviável, atualmente, o seu uso em linhas de seleção de frutas.

CHEUNG et al. (2003) desenvolveram um método que combina silhueta e fotogrametria estereoscópica, obtendo resultados com grande acurácia.

## 2.1.2. Técnicas ativas

Scanners ativos emitem algum tipo de radiação e detecta a sua reflexão de maneira a sondar o objeto ou ambiente. Possíveis tipos de radiação incluem luz, ultra-som ou raio-X. Mas dentro do escopo desta obra nos ateremos à projeção de luz branca e laser.

### 2.1.2.1. Distanciômetros a laser

Os distanciômetros a laser usam um feixe laser para determinar a distância de um objeto refletivo. O tipo mais comum opera pelo princípio do tempo de voo, através do envio de um estreito pulso laser até a superfície do objeto e a medição do tempo necessário para o pulso ser refletido pelo alvo e retornar ao emissor. Desde que a velocidade da luz “*c*” é conhecida, o tempo de ida e volta determina a distância do sensor à superfície do objeto. Se “*t*” é o tempo de ida e vinda, então a distância é igual a:

$$s = (ct)/2 \dots\dots\dots 1$$

onde *s* é a distância do objeto ao emissor/receptor laser, *c* é a velocidade da luz e *t* é o tempo de voo.

A acurácia deste tipo de dispositivo depende da precisão com que o tempo “*t*” pode ser medido. São necessários aproximadamente 3,3 picosegundos para a luz viajar 1mm.

Este tipo de dispositivo detecta apenas a distância de um ponto na direção do feixe de laser. Para se medir o objeto inteiro, é necessário redirecionar o feixe a cada medição, que pela rotação do dispositivo ou do uso de espelhos. Este último é mais comumente usado devido a sua leveza, permitindo maior rapidez com grande acurácia. Este tipo de sistema permite obter de 10.000 a 100.000 medições por segundo.

A uma taxa de aquisição de 10.000 pontos por segundo, quando se trabalha em baixa resolução, isto toma menos que um segundo. Mas quando se deseja trabalhar com alta resolução, requerem-se milhões de pontos, que pode tomar alguns minutos para a sua realização. Este problema pode causar distorções devido ao movimento. Devido ao tempo envolvido entre cada *scanning*, qualquer movimento do objeto ou do *scanner* causará distorção nos dados coletados. Este tipo de scanners não pode ser utilizado para objetos em movimento.

Este tipo de dispositivo é mais eficiente para medir longas distâncias até mesmo da ordem de quilômetros. Sendo indicado para grandes estruturas, tais como edifícios ou feições geográficas. Sua acurácia está na ordem de milímetros.

### 2.1.2.2. Triangulação

A triangulação é provavelmente o método mais antigo para a medição de profundidade de pontos no espaço e é provavelmente uma das técnicas mais comuns (FERNANDES, 2007). Normalmente utiliza um feixe de laser para sondar o objeto. Pontos são iluminados na superfície do objeto e através de uma câmera colocada a um determinado ângulo este ponto é localizado. Dependendo da distância que a superfície do objeto se encontra, o ponto aparece em diferentes lugares na imagem. Esta técnica é chamada triangulação porque o emissor de laser, a câmera e o ponto do laser na superfície do objeto formam um triângulo. O comprimento de um lado, que é a distância entre a câmera e o emissor laser, é conhecido. O ângulo de emissão do laser também é conhecido. O ângulo de visão da câmera pode ser determinado através da localização do ponto laser na imagem capturada. Com estes três componentes pode-se determinar as dimensões do triângulo e a localização do ponto laser na superfície do objeto (Figura 2). Em muitos casos ao invés dos pontos faz-se a varredura com uma linha laser para aumentar a velocidade de aquisição de dados (BERNARDINI e RUSHMEIER, 2002).

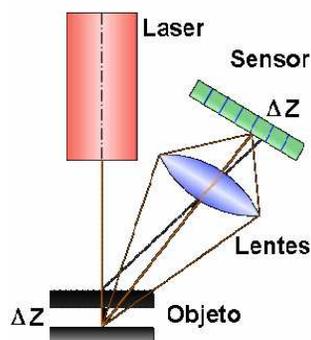


Figura 2. Princípio da triangulação laser, onde o objeto é deslocado.  
Fonte: WIKIPEDIA (2007).

### 2.1.2.3. Projeção de luz estruturada

Nas técnicas de projeção de luz estruturada, um padrão de luz é projetado sobre o objeto e analisa a deformação deste padrão na superfície do objeto. Este padrão pode ser mono ou bidirecional. Um exemplo de monodirecional é uma linha, que pode ser projetada por um dispositivo do tipo projetor LCD, ou por varredura laser. Uma câmera deslocada lateralmente do projetor olha e analisa e com uma técnica similar à triangulação calcula a distância de cada ponto da linha. No caso de uma linha simples, é feita a varredura através do objeto para obter a informação de uma linha de cada vez (Figura 3A).

Um exemplo de um padrão bi-dimensional é um retículo. Uma câmera é usada para analisar a deformação do padrão e um complexo algoritmo é usado para calcular a distância de cada

ponto do padrão. A razão da complexidade é a ambigüidade (Figura 3B), isto é, quando o mesmo é tem as mesmas em duas ou mais imagens.

A vantagem desta técnica é a velocidade. Em vez de esquadrinhar um ponto cada vez, esquadrinha múltiplos pontos de uma só vez. Isto reduz ou elimina o problema da distorção devido ao movimento. Alguns sistemas existentes são capazes de esquadrinhar objetos em movimento.

FERNANDES (2007) afirma que a técnica está sujeita a uma série de limitações físicas devido às propriedades ópticas dos materiais, oclusão e ruído, que dificultam a extração da forma das superfícies. Dependendo da potência do projetor e do espaçamento do padrão luminoso, o sistema fica restrito a objetos de pequeno porte próximos à câmera e a ambientes pouco iluminados. O espaçamento das linhas projetadas e a distância da câmera em relação ao objeto também afetam a resolução do modelo gerado.

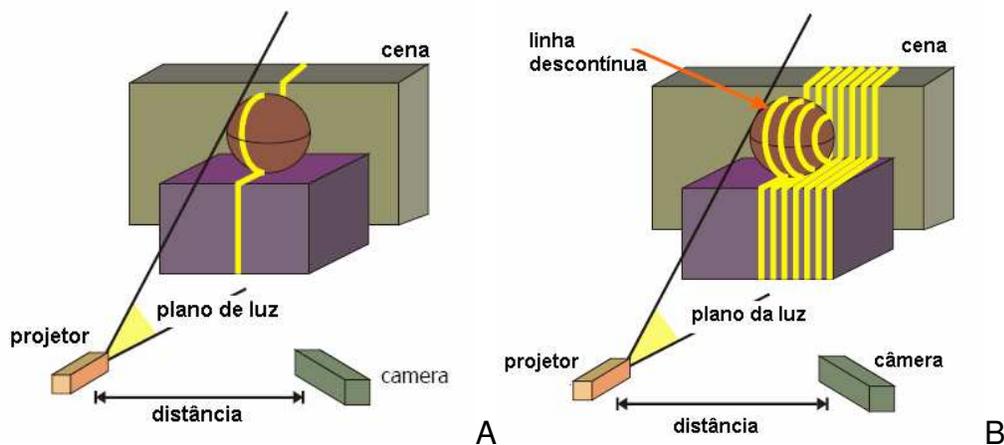


Figura 3. Esquema experimental para luz estruturada. A. Linha simples. B. múltiplas linhas.  
Fonte: FORSTER (2006).

Luz estruturada é ainda uma área muito ativa da pesquisa e muitos trabalhos científicos são publicados a cada ano (SCALCO e TOMMASELLI, 2001; RONCHINI et al., 2001; SCHARSTEIN e SZELISKI, 2003; BRONSTEIN et al., 2003; SADLO et al., 2005 e FORSTER, 2006).

#### 2.1.2.4. Projeção de luz codificada

Trata-se de um conjunto de técnicas que se baseia na projeção de padrões codificados, tais como pontos, listras, grades, que são projetados sob determinado ângulo, na superfície de um objeto a ser estudado. Estes padrões são deformados pela topografia do objeto, e capturados

por uma câmera. Estes padrões são então comparados com padrão original, num processo chamado decodificação, o qual permite encontrar um grande número de correspondências.

### **Multiplexação temporal por códigos binários**

A projeção de luz estruturada por multiplexação temporal por códigos binários consiste na projeção seqüencial de uma série de padrões binários codificados. A estrutura mais comum é uma seqüência de faixas que aumentam a sua largura a cada projeção (Figura 4).

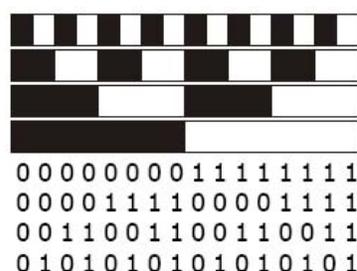


Figura 4. Padrão de luz estruturada projetada por multiplexação temporal por códigos binários.  
Fonte: SALVI e PAGÉS (2008).

Cada ponto da superfície do objeto é identificado por código, por exemplo: 1010010, que corresponde à seqüência de padrões projetados, que contém informações sobre a topografia do objeto.

SALVI et al. (2004) citam como vantagens desta técnica a alta resolução, alta acurácia (da ordem de  $\mu\text{m}$ ), robustez quando utilizados em objetos coloridos, desde que sejam usados padrões binários, como os da Figura 4. Porém, tal técnica necessita de objetos estáticos e de um grande número de padrões.

### **Multiplexação temporal por códigos múltiplos**

A multiplexação temporal por códigos múltiplos é semelhante à anterior, porém utiliza padrões com intensidade variável, tais como níveis de cinza e cores, em vez de binários. Isto reduz o número de padrões projetados pelo aumento de número de intensidades (Figura 5).

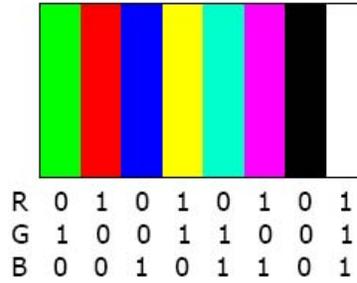


Figura 5. Padrão de luz estruturada projetada por multiplexação temporal por códigos múltiplos.  
 Fonte: SALVI e PAGÉS (2008).

### Codificação matemática

Um outro grupo emprega padrões são codificados matematicamente, como por exemplo seqüências de De Bruijn, que são usados para definir padrões de faixas coloridas (codificação em um único eixo) ou padrões de retículos (codificação em dois eixos). Para decodificar uma determinada faixa é necessário identificar apenas uma das janelas (vizinhança) a que ela pertence.

ZHANG et al. (2002) utilizaram esta técnica para desenvolver um sistema de aquisição de contorno topográfico de faces humanas em movimento com excelente performance (Figura 6A). Ainda pode se utilizar padrões, tais como pontos em tons de cinza ou colorido, codificados como matrizes, que é a extensão bidirecional de uma seqüência de De Bruijn, onde cada janela aparece apenas uma vez. A Figura 6B mostra uma matriz de projeção codificada constituída por pontos coloridos.

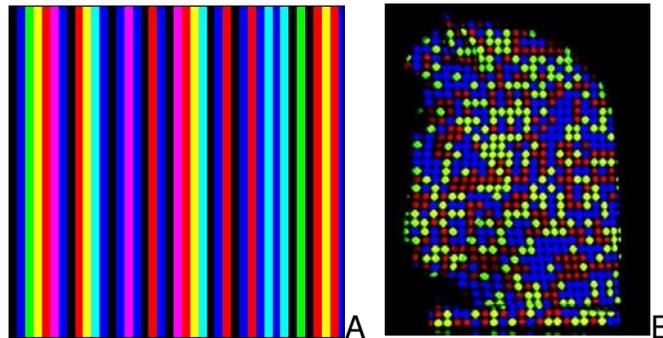


Figura 6. Padrão de luz estruturada projetada por codificação matemática. A. Linhas coloridas. B. pontos coloridos. Fonte: SALVI e PAGÉS (2008).

## Codificação por vizinhança espacial

É um conjunto de técnicas onde são codificados um conjunto de pontos com a informação contida em uma vizinhança, chamada janela, ao redor deles. A codificação é feita em um único padrão ao invés de vários. O tamanho da vizinhança é proporcional ao número de pontos codificados e inversamente proporcional ao número de cores usadas. O objetivo é obter um sistema que utilize apenas uma imagem, podendo trabalhar com objetos em movimento.

Problemas podem aparecer uma vez que a vizinhança nem sempre pode ser reconhecida e falsas correspondências podem aparecer.

A princípio estas técnicas que usavam esquemas de codificação sem base matemática, mas surgiram problemas porque a codificação não é ótima, produzindo ambigüidades quando diferentes regiões do padrão são idênticas. A estrutura do padrão é muito complexa para um bom processamento de imagem (Figura 7).

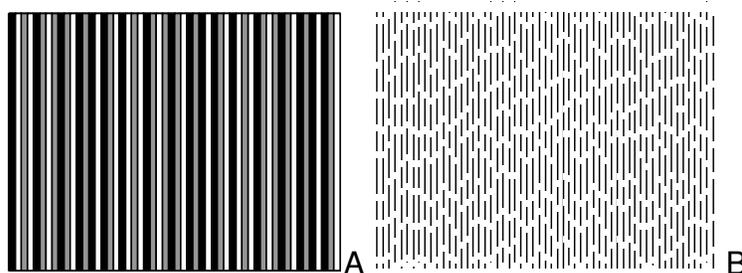


Figura 7. Padrão de luz estruturada projetada por codificação por vizinhança espacial. A. padrões periódicos. B. estrutura complexa baseada em fendas, com corte aleatórios.

Fonte: SALVI e PAGÉS (2008).

## Codificação direta.

Na técnica de projeção de luz com codificação direta cada pixel é identificado pela sua própria intensidade/cor. Como a codificação é normalmente condensada em um único padrão, o espectro das intensidades de cores é muito largo.

As vantagens deste método são o reduzido número de padrões, e a alta resolução que, teoricamente, pode ser obtida. Porém, é muito dependente das propriedades reflexivas dos objetos, não linearidades na resposta espectral da câmera e do espectro do projetor. Também tem baixa acurácia, da ordem de 1 mm.

Na codificação direta por tons cada ponto codificado do padrão é identificado pelo seu nível de intensidade. Porém, requer que cada faixa seja projetada usando um único comprimento de

onda (Figura 8A). Também necessita de câmeras com grande profundidade por pixel (acima de 11 bits) para poder diferenciar todas as intensidades projetadas.

Tem como vantagem condensar a codificação em um único padrão, podendo, portanto trabalhar com objetos em movimento. Porém, está sujeita a erros de decodificação, devido a descontinuidades na superfície e também devido à dificuldade de identificar intensidades/cores quando se trabalha com superfícies não neutras. Na codificação direta por cores cada ponto codificado do padrão é identificado pela sua cor (Figura 8B).

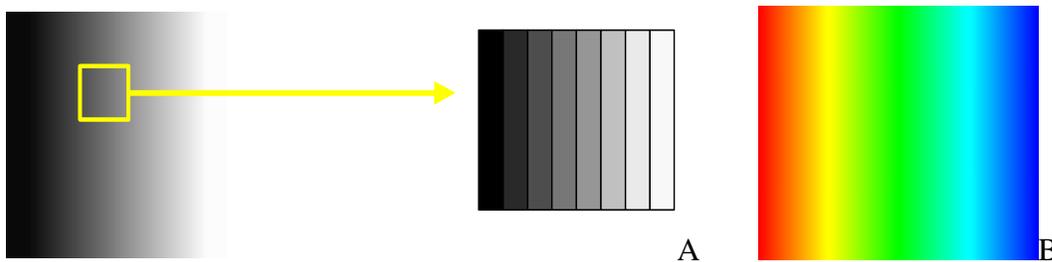


Figura 8. Padrão de luz estruturada projetada por codificação direta. A. Tons de Cinza. B. Padrão arco-íris. Fonte: SALVI e PAGÉS (2008).

#### 2.1.2.5. Deslocamento de fase.

O deslocamento de fase (*phase shifting*) são técnicas interferométricas descritas por CREATH (1988) e desenvolvidas com o objetivo de aumentar as resoluções espaciais e verticais. São utilizadas como auxiliares às técnicas de *moiré*, projeção de franjas, ESPI. Elas utilizam múltiplos interferogramas ou imagens (de 3 a 5), constituídos por franjas. As fases dessas franjas são deslocadas uma fração de período entre uma imagem e outra.

Quando se utilizam 4 imagens deslocadas de  $\pi/2$ , a intensidade luminosa em cada uma das imagens é descrita pelas equações:

$$I_1(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos \phi(x, y) \quad 2$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[\pi/2 + \phi(x, y)] \quad 3$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[\pi + \phi(x, y)] \quad 4$$

$$I_4(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[3\pi/2 + \phi(x, y)] \quad 5$$

Onde  $a(x, y)$  é a intensidade luminosa do fundo em cada ponto da imagem,  $b(x, y)$  é a 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 (Função 6):

$$\phi(x, y) = \arctan \left[ \frac{(I_4(x, y)) - (I_2(x, y))}{(I_1(x, y)) - (I_3(x, y))} \right] \quad 6$$

Para 3 imagens deslocadas de  $\pi/3$ , o termos fase pode ser obtido pela Função 7.

$$\phi(x, y) = \arctan \left[ \frac{(I_3(x, y)) - (I_2(x, y))}{(I_1(x, y)) - (I_2(x, y))} \right] \quad 7$$

E Para 5 imagens deslocadas de  $\pi/5$ , o termos fase pode ser obtido pela Função 8.

$$\phi(x, y) = \arctan \left[ \frac{2(I_2(x, y)) - (I_4(x, y))}{2(I_3(x, y)) - (I_5(x, y)) - (I_5(x, y))} \right] \quad 8$$

As imagens produzidas por estas equações possuem descontinuidades, isto é, valores que variam de  $-\pi$  a  $\pi$ , e por isso são chamadas de mapa de fases empacotadas (Figura 9). O desempacotamento das fases é feito por algoritmos específicos, que vão comparando um *pixel* com o seu vizinho, e quando se encontra uma diferença de  $-\pi$  ou  $\pi$ , acrescenta-se ou subtrai-se este valor ao vizinho, de maneira a reconstituir a topografia do objeto em estudo (Figura 10).

WYANT (2007) citou algumas vantagens destas técnicas, quando comparadas às técnicas por elas auxiliadas, e são: alta acurácia, rapidez, bons resultados mesmo com baixo contraste das franjas.

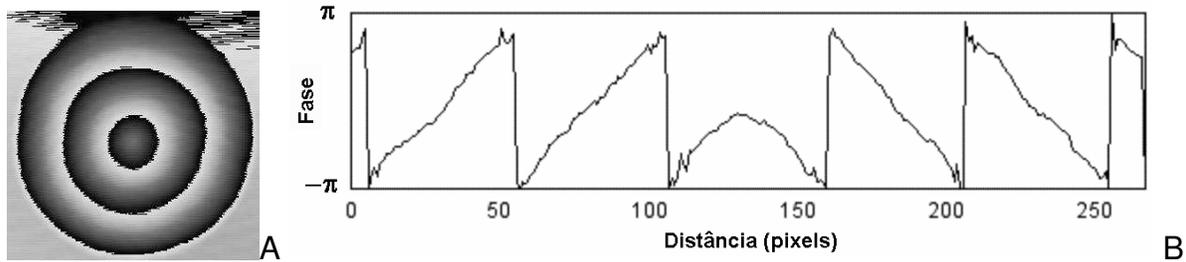


Figura 9. Mapa de fases empacotadas com a fase variando de  $-\pi$  a  $\pi$ . A. Vista de topo. B. Perfil de uma linha horizontal que passa pelo ápice do cone.

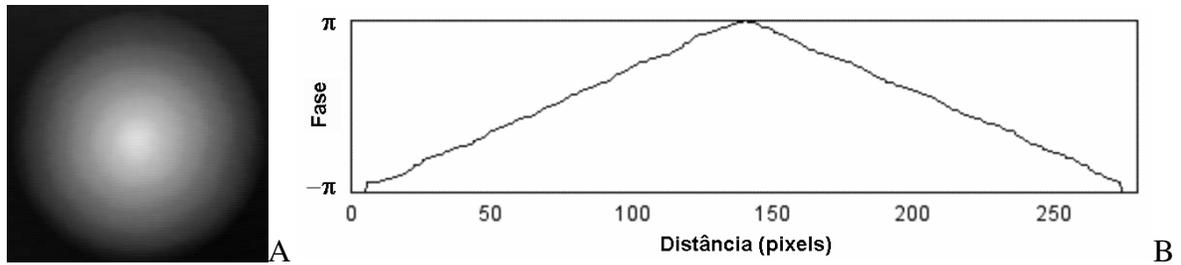


Figura 10. MDT do cone em tons de cinza. A. Vista de topo. B. Perfil de uma linha horizontal que passa pelo ápice do cone.

### 2.1.2.6. Projeção de franjas com deslocamento de fase

Nos métodos de projeção de franjas com deslocamento de fase, três a quatro retículos constituídos de franjas senoidais são projetadas na superfície do objeto a ser estudado através de projetores LCD, ou interferômetros. Entre um retículo e outra as franjas estão defasadas  $\pi/3$  entre si, para o primeiro caso e  $\pi/4$  (Figura 11) para o segundo caso. Captura-se a imagem desses retículos deformada pela topografia do objeto. Calcula-se a fase das imagens obtendo-se o mapa de fases empacotadas, e após procede-se o desempacotamento do mesmo. Posteriormente, esses mesmos retículos são projetados em um plano de referência colocado no lugar do objeto estudado. Calcula-se o mapa de fases empacotadas e procede-se o seu desempacotamento. Então a topografia do objeto é obtida pela subtração dos dois.

QUAN et al. (1999), projetaram franjas senoidais produzidas pela interferência de duas ondas esféricas geradas por laser de He-Ne. HUANG et al. (1999) utilizaram um projetor do tipo DLP (Digital Light Processing), para projetar as franjas sobre chapas metálicas, e determinar a corrosão das mesmas com grande acurácia. QUAN et al. (2001), utilizando um microscópio de longa distância acoplado ao projetor LCD, obtiveram o micro relevo de objetos muito pequenos.

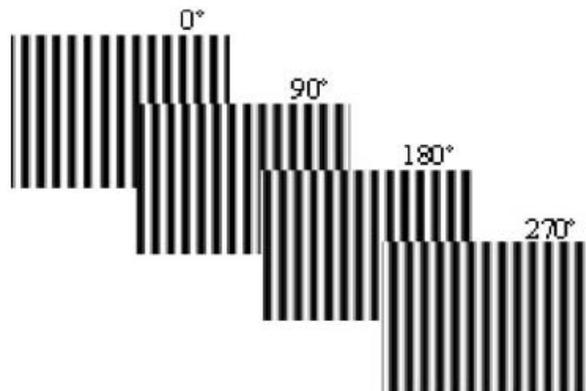


Figura 11. Quatro padrões de retículos senoidais com franjas com fase deslocada de  $\pi/2$ .  
Fonte: QUAN et al, (2001).

Esta técnica pode ser facilmente implementada sendo muito mais rápida que técnicas perfilométricas a laser (YEN e TSAI, 2004). É uma técnica muito simples, não possui peças móveis e é de baixo custo (VECHIO et al., 2006a). Além disso, tem alta acurácia, e facilidade de adaptação a objetos de vários tamanhos e texturas variando apenas o período das franjas projetadas (HUANG et al., 1999; HU et al., 2006). Porém, necessita de três a quatro imagens o que inviabiliza a sua utilização em objetos em movimento, como é o caso de frutos e hortaliças em linhas de seleção.

Para melhor contornar este problema, desenvolveu-se uma variação desta técnica em que se projetam padrões de retículos senoidais com cores codificadas no espectro RGB, de modo que, com apenas uma imagem, e aplicando a técnica de deslocamento de fase se obtinham o MDT de objetos. Porém, os resultados podem ser influenciados pela coloração do objeto, sendo, portanto indicada apenas para objetos com coloração neutra (HUANG et al., 2005; ZHANG et al. 2006; ZHANG et al. 2007).

#### **2.1.2.7. “Electronic Speckle Pattern Interferometry” (ESPI)**

ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) estuda os efeitos de interferência entre padrões *speckle* gerados na superfície de um objeto. O *speckle* é um padrão aleatório resultante da interferência de raios de luz coerentes espalhados numa superfície rugosa, cuja dimensão é maior que o comprimento de onda da luz. A diferença de fase responsável por esse padrão de interferência depende da diferença de caminho óptico entre as ondas geradas por variações de profundidades na superfície. Quando o objeto é deslocado, ocorre alteração do *speckle*, que também pode ser gravado pelo sistema. Esses padrões podem ser superpostos pelo sistema eletrônico gerando um terceiro padrão de interferência que tem a forma de um *moiré* ou mapa de franjas de dimensões macroscópicas. O padrão *moiré* surge da interferência entre duas ondas provenientes de um mesmo ponto do objeto localizado em diferentes pontos espaciais por causa do suposto movimento. A diferença de fase entre padrões *speckle* depende da diferença de caminho óptico entre as ondas provenientes desses diferentes pontos espaciais. O sistema ESPI pode detectar deslocamentos mínimos da ordem de metade do comprimento de onda da luz utilizada.

PAOLETTI e SPAGNOLO (1994) obtiveram a forma tridimensional de objetos, iluminando-o com um feixe de laser através de fibras óticas. Através de um pequeno deslocamento lateral da fibra ótica obtiveram dois padrões de *speckle*, antes e depois do deslocamento. Subtraindo os dois padrões produziram franjas, que tratadas pelo método da Transformada Rápida de Fourier (FFT), produziram a Modelo Digital Tridimensional (MDT) do objeto.

TONG et al. (1997), obtiveram franjas de *especke* pela subtração de padrões de *speckle*. Um cristal piezo-elétrico de quartzo foi utilizado para gerar franjas deslocadas, que foram tratadas pela técnica de deslocamento de fase, produzindo resultados com acurácia satisfatória.

BARBOSA e LINO (2007) utilizando um diodo laser multimodo, através de arranjo experimental, produziram franjas de interferência na superfície do objeto estudado, que

correspondem à sua topografia, cuja imagem foi capturada por uma câmera CCD (Charge-Coupled Device). Variando o modo do laser, produziram-se franjas deslocadas, que foram tratadas pela técnica de deslocamento de fase. Os autores utilizaram também uma pêra, cujo relevo foi digitalizado, mostrando que a técnica pode ser usada em seleção de frutas e verduras.

CURLESS (2005) citou que uma das desvantagens desta técnica é que ela adiciona ruídos que podem diminuir a sua acurácia.

### 2.1.2.8. Transformada de Fourier

A perfilometria da Transformada de Fourier foi proposta por TAKEDA e MUTOH (1983) e se tornou uma das técnicas ópticas mais populares. Nela um retículo de Ronchi ou senoidal é projetado na superfície de um objeto, resultando em um retículo deformada. Uma imagem dela é obtida e processada por um computador. Este processo consiste em fazer a Transformada de Fourier desta imagem, filtrá-la, dividir a parte real da imagem pela parte imaginária e então fazer a transformada inversa. Depois se calcula o arco tangente da imagem resultante, obtendo-se o mapa de fases empacotadas. Fazendo o desempacotamento, obtém-se o MDT do objeto em estudo (AREVALILLO et al. 1999; HU, 2001 e SU e SHEN, 2001). A Figura 12 mostra o processo de obtenção do MDT pela técnica perfilométricas da Transformada de Fourier.

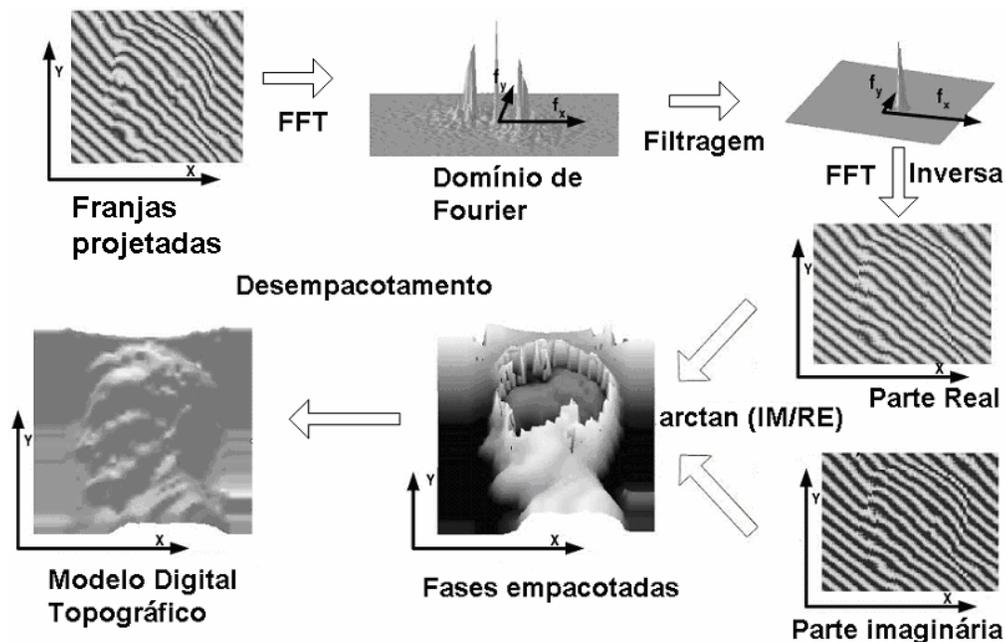


Figura 12. Processo para obtenção de MDT por transformada de Fourier.  
 Fonte: AREVALILLO et al. (1999).

### **2.1.2.9. Estereoscopia ativa**

A estereoscopia ativa é uma técnica mista, que associa a estereoscopia passiva à projeção de luz estruturada. Ela utiliza duas ou mais câmeras para capturar a imagem de uma cena ou objeto. Como nem sempre é fácil para os softwares encontrar pequenas diferenças entre as imagens, principalmente quando elas são muito complexas ou extremamente simples (monocromáticas). Uma maneira de contornar este problema é projetar na cena padrões de luz conhecidos com a finalidade de marcar o objeto.

Os padrões utilizados podem ser os mesmos já descritos em projeção com luz estruturada (NAFTEL e MAO, 2002; ZHANG et al., 2004; ALVES, 2005).

Esta Técnica possui uma acurácia muito elevada, maior que estereoscopia passiva e projeção de luz estruturada.

## **2.2. TÉCNICAS DE *MOIRÉ* (TM)**

Dada a importância que as TM tem para o escopo deste trabalho, nesta seção do trabalho é apresentada a importância da técnica, o fenômeno que origina, bem como a descrição de suas variantes que podem ser utilizadas na geração MDTs de órgãos vegetais.

HU (2001) afirma 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, tendo sido alvo de freqüentes estudos e apresentando 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 aplicadas às TM aumentam grandemente a sua resolução, acurácia e repetibilidade.

A técnica de medição de fase mais comumente utilizada é a Técnica do Deslocamento de Fase (*Phase shifting*), a qual necessita 3 ou 5 imagens, com pequenos deslocamentos das franjas entre elas, com a finalidade de gerar o mapa de fase e a superfície de contorno dos objetos em estudos. Essa técnica também pode ser aplicada a outras técnicas óticas além das TM.

### **2.2.1. O fenômeno de *moiré***

Quando se olha através de duas retículas ou retículas sobrepostos, nota-se a formação de padrões ou franjas, os quais são resultados da combinação das linhas desses retículos. Esse

evento é denominado fenômeno ou efeito de *moiré* e as franjas geradas são chamadas de padrões ou franjas de *moiré*, conforme ilustra a Figura 13.

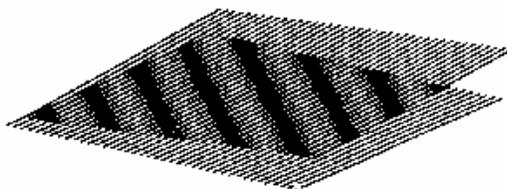


Figura 13. Franjas de *moiré* produzidas pela sobreposição de dois retículos.

Os retículos mais utilizados são constituídos por linhas ou faixas claras (transparentes) e escuras (opacas), paralelas e equidistantes (Figura 14A). O centro das faixas (claras ou escuras) é denominado linha do retículo, e a distância entre os centros de linhas de retículo de duas faixas escuras (ou duas faixas claras) contíguas são denominadas período ou passo ( $p$ ) do retículo sendo o inverso do período a frequência do retículo ( $f$ ), geralmente expressa em linhas por milímetro. Também podem ser utilizados retículos quadrados e circulares, como os mostrados nas Figuras 14B e 14C.

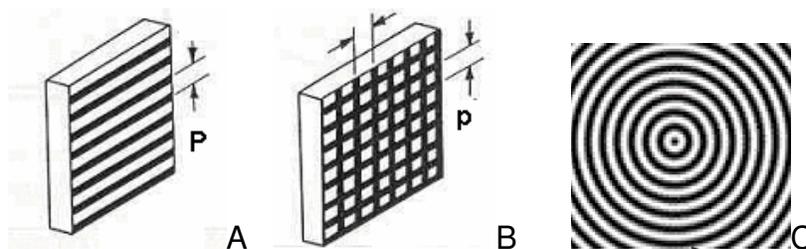


Figura 14: Retículos mais utilizado para produzir franjas de *moiré*. A. Linhas. B. Quadrado. C. Circular. Fonte: POST et al. (1994); ESTAÑA et al. (2004).

### 2.2.2. As Técnicas de *Moiré* (TM)

As técnicas de *moiré* (TM) formam um conjunto de técnicas versáteis baseadas no fenômeno de *moiré*, empregados na medição de deformações no plano e fora do plano, contornos topográficos, inclinação, curvatura e formas dos objetos (ASSUNDI e YUNG, 1991). As TM mais empregadas são as de Projeção e a de Sombra. Na TM de sombra um retículo constituído de faixas claras (transparentes) e escuras é colocado à frente do objeto em estudo. Quando esse é iluminado por uma fonte, a sua sombra é projetada sobre a superfície do objeto. As franjas de *moiré* são formadas pela interferência entre o retículo e a sua sombra. Essas franjas são linhas de mesma cota e correspondem às curvas de nível de um mapa topográfico. Essa técnica traz como vantagem a observação instantânea das franjas de *moiré*. TAKASAKI (1970 e

1973) utilizou a TM 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.

A diferença de cota ( $\Delta z = z_2 - z_1$ ) entre dois pontos localizados na superfície a ser analisada, para o observador e fonte de luz localizados no infinito (luz colimada) é dada pela Função 9 (MEADOWS et al., 1970):

$$\Delta z = \frac{Np}{(\tan \alpha + \tan \beta)} \quad 9$$

onde:  $N$  é a ordem da franjas,  $p$  é o período do retículo e  $\alpha$  e  $\beta$  são os ângulos formados entre a normal ao plano e o observador e a normal ao plano e a fonte de luz conforme o esquema experimental apresentado na Figura 15.

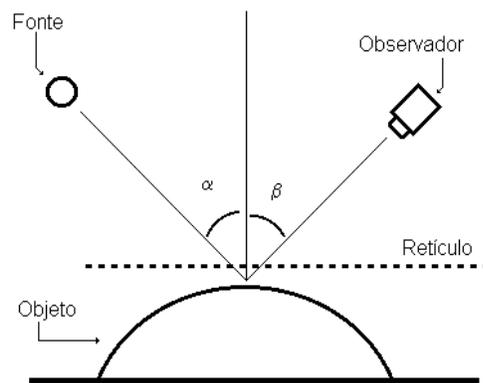


Figura 15. Esquema experimental para a TM de sombra. Fonte: LINO (2002).

Esta técnica tem alta acurácia e permite visualizar instantaneamente as franjas de *moiré* (LINO, 2002), sendo uma técnica interessante para o estudo de fenômenos dinâmicos. Porém não possibilita a automatização do processo, pois não é possível reconhecer automaticamente picos e vales, o que a inviabiliza para uso em linhas de produção. Outro problema é que à medida que aumenta a distância entre o objeto e o retículo de referência, a sombra do retículo fica menos nítida prejudicando a visualização das franjas de *moiré*.

Na TM de projeção, um retículo é projetado obliquamente à superfície do objeto. Esse é deformado, modulando ou acompanhando a topografia do mesmo. Obtém-se uma imagem desse retículo. O mesmo retículo é então projetado sobre a superfície de um plano colocado no mesmo lugar do objeto estudado e obtendo-se sua imagem. As franjas são formadas pela sobreposição das duas imagens. Essas franjas correspondem a linhas de mesma cota. CLOUD (1998) cita que a diferença de cota ( $\Delta z = z_2 - z_1$ ) entre dois pontos localizados na superfície a ser analisada é dada pela Função 10:

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

10

onde:  $N$  a ordem da franja,  $p$  é o período do retículo e  $\alpha$  = ângulo de projeção do retículo sobre o objeto (Figura 16).

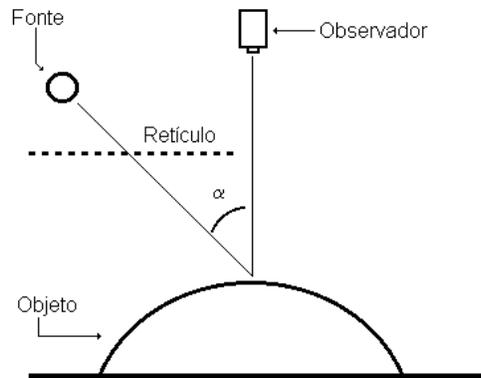


Figura 16. Esquema experimental para *moiré* de projeção. Fonte: LINO (2002).

VECHIO et al. (2006b) utilizaram a Função 11, para o cálculo das cotas ou do mapa de profundidade para a técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase.

$$\Delta z(x, y) = \frac{S.l_p.\psi}{\text{sen}\theta} \left[ 1 + \frac{x.\text{sen}\theta}{l_p} \right]^2 \quad 11$$

onde:  $\Delta z(x, y)$  é o mapa de profundidade da superfície;  $S$  é a sensibilidade da montagem dada pela razão entre o passo do retículo com  $\theta = 0$  da superfície do objeto e a distância à lente de projeção;  $l_p$  é a distância entre o projetor LCD e o centro da superfície do objeto em estudo;  $\theta$  é o ângulo de projeção;  $x$  é a coordenada na direção do comprimento do objeto  $[-x_{\text{max}} \leq x \leq x_{\text{max}}]$  e  $\psi$  é a função de modulação ou ordem de franja.

A TM de projeção não pode ser visualizada instantaneamente, pois necessita de duas imagens para a visualização das franjas. Também tem menor acurácia que *moiré* de sombra, pois a frequência dos retículos projetados está relacionada com a resolução da câmera e do projetor. Com a introdução de câmeras digitais de alta resolução e projetores do tipo LCD (Liquid Crystal Display), esta técnica tem se tornado mais viável e vem crescendo a sua utilização.

Porém, as duas TM, sombra e projeção, são muito trabalhosas para gerar o MDT dos objetos. Após capturar a imagem é necessário digitalizar cada uma das franjas, dando cotas a cada uma delas, exigindo um conhecimento prévio do objeto a ser analisado, e então fazer a

interpolação. Quando a superfície dos objetos apresenta rampas íngremes, a frequência das franjas de *moiré* se aproxima da frequência do retículo de referência, prejudicando também a visualização das franjas, principalmente para *moiré* de sombra.

### 2.2.3. Técnica de *moiré* de sombra com Deslocamento de Fase (*Phase shifting*)

O deslocamento de fase é uma técnica auxiliar que foi introduzida nas TM com o objetivo de melhorar a resolução e permitir a automatização do processo de geração dos MDT, uma vez que ela reconhece automaticamente picos e vales.

DIRKX et al. (1988) aplicaram o deslocamento de fase à TM de sombra, obtendo uma resolução, na prática, no mínimo 10 vezes maior que a TM de sombra convencional. Além disso, é mais rápido e capaz de determinar automaticamente a concavidade e a convexidade, ou seja, picos e vales, da superfície. WANG (2001), LINO (2002), SMITH NETO e MAGALHÃES JUNIOR (2006) e SMITH NETO et al. (2006), aplicando o método de deslocamento de fase à TM de sombra utilizaram 4 imagens das franjas de *moiré*. Em cada uma delas o objeto é aproximado ou afastado do retículo de referência ( $R_r$ ) de maneira a gerar as franjas de *moiré* deslocadas  $\pi/2$ ,  $\pi$  e  $3\pi/2$  de fase.

O cálculo da fase feito pelo computador resulta em valores que variam de  $-\pi$  a  $\pi$ ; por isso a imagem resultante, que é chamada de mapa de fases empacotadas, possui descontinuidades. Estas descontinuidades são removidas pelo processo de desempacotamento de fase (*phase unwrapping*).

LINO (2002), também trabalhando com TM de sombra, utilizou o *RisingSun Moiré*, que é um programa específico para fazer o cálculo das fases, gerando o mapa de fases empacotadas, e também para o desempacotamento de fases gerando o MDT de uma modelo de pêra reproduzido em cera.

SMITH NETO e MAGALHÃES JUNIOR (2006) e SMITH NETO et al. (2006) desenvolveram algoritmos para programa MATLAB, com a finalidade de fazer o cálculo das fases e o desempacotamento.

Apesar da sua alta acurácia esta técnica exige a movimentação, ou do objeto ou do retículo de referência, entre uma imagem e outra, o que inviabiliza a sua utilização em linhas de produção, ficando restrito apenas ao uso científico.

#### 2.2.4. TM digital

Geralmente as técnicas perfilométricas baseadas no fenômeno de *moiré* (*moiré* topográfico) são classificadas em três categorias básicas: *moiré* de sombra, *moiré* de projeção e *moiré* digital, de acordo com o arranjo óptico do sistema (PENG et al., 1995). Denomina-se *moiré* digital à geração e/ou análise automatizadas de franjas de *moiré* produzidas pelos métodos de *moiré* de sombra e *moiré* de projeção. Uma das primeiras tentativas de automatizar a técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase foi levada a cabo por RODRIGUEZ-VERA (1994). Embora as operações tivessem sido feitas eletronicamente e não digitalmente, os resultados obtidos serviram de base para futuros trabalhos. Este autor propôs uma técnica de *moiré* de projeção denominada *moiré* topográfico eletrônico (*Electronic Moiré Contouring - EMC*). Essa técnica codifica as informações topográficas obtidas pela projeção de um retículo com franjas lineares sobre a superfície a ser medida. Esse retículo é deformada de acordo com a topografia do alvo. A decodificação é feita eletronicamente pela subtração de duas imagens capturadas que contêm as informações codificadas entre dois estados do alvo ou entre o alvo e um plano de referência. As três imagens do retículo projetadas sobre o objeto e capturadas estão defasadas de  $120^{\circ}$  entre si através pela translação lateral do projetor. O mapa de fases é gerado pela Função 7.

PENG et al. (1995) propuseram uma técnica de *moiré* digital de projeção de franjas, baseada na decodificação dos padrões de franja utilizando um algoritmo de *spatial carrier phase-stepping* combinado com uma máscara gerada por computador, para extrair as informações sobre a topografia do objeto em estudo. Projetaram-se retículos circulares sobre o plano de referência, tomando-se sua imagem (retículo de referência). De igual forma procedeu-se sobre o objeto em estudo, obtendo-se sua imagem (imagem do objeto). Utilizando-se o algoritmo *spatial carrier phase-stepping* gerou-se um mapa de fases empacotadas dessas imagens. Essas imagens foram subtraídas de uma máscara (retículo de linhas paralelas) gerada por computador (primeira demodulação). As imagens demoduladas dos retículos de referência e do objeto foram subtraídas entre si (segunda demodulação), gerando um novo mapa de fases empacotadas. Este, por sua vez, foi desempacotado, gerando-se um mapa de fases contínuas, o qual é a representação digital da topografia do objeto em estudo. Deslocamentos de fase são introduzidos digitalmente de maneira que apenas uma imagem do retículo deformado e outra do retículo de referência sejam necessárias.

CHOI e KIM (1998) propuseram um método de projeção de *moiré* no qual os retículos de projeção (do objeto) e de visualização (de referência) estão impressas em uma mesma lâmina de vidro. Iluminando-se o retículo de projeção, esta é projetada na superfície do objeto, e ao observá-la através do retículo de visualização, formam as franjas de *moiré*. Múltiplos interferogramas foram obtidos utilizando-se de um conjunto de pares de retículos em seqüência, sendo que cada par de retículos foi construído para se obter um determinado deslocamento de fase entre si (Figura 17A e 17B). BUYTAERT e DIRCKX (2008) utilizaram uma técnica semelhante, porém em vez de usarem retículos gravados em lâminas de vidro, eles foram gerados em dois moduladores de luz de cristal líquido, um colocado em frente à fonte de luz e outro em frente à câmera. Estas duas técnicas, embora totalmente automatizadas,

necessitam de 3 a 5 imagens para serem levadas a cabo, tornando-a difícil o seu emprego em linhas de produção.

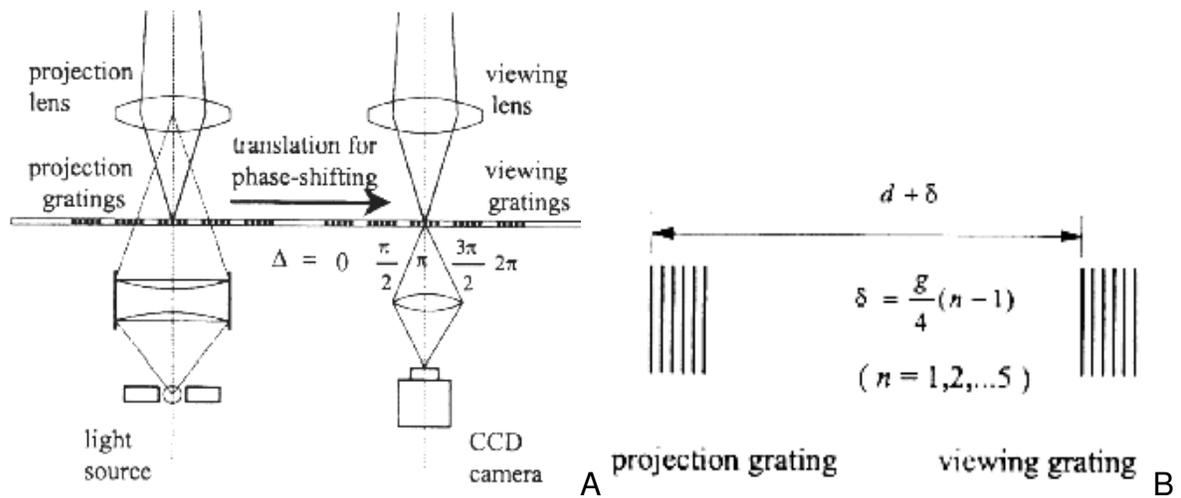


Figura 17: *Moiré* de projeção com deslocamento de fase. A. Arranjo experimental. B. Deslocamento de fase entre os dois pares de retículo. Fonte: CHOI e KIM (1998).

DEGRIECK et al. (2001) propuseram uma técnica denominada de *moiré* digital de sombra com deslocamento de fase (*Digital Phase-Shift Shadow Moiré*), no qual a sombra de um retículo é projetada sobre a superfície do objeto, sendo capturada a sua imagem (Figura 18). Cria-se então, digitalmente, um retículo de referência com o mesmo passo, porém sem deformação e faz-se a interferência da mesma com a imagem capturada, produzindo-se assim as franjas de *moiré*. Fazem-se vários deslocamentos de frações de período do retículo de referência na direção x, pela interferência com a imagem capturada, gerando-se outras franjas de *moiré* com fases deslocadas. Essa técnica pode ser totalmente automatizada, porém necessita de um retículo físico para que a sua sombra seja projetada na superfície do objeto.

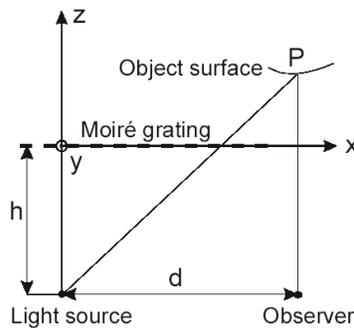


Figura 18: Esquema experimental de *moiré* de sombra com deslocamento de fase. Fonte: DEGRIECK et al. (2001).

### 2.2.5. Remoção ou filtragem dos retículos

Filtragem digital é um conjunto de técnicas destinadas a corrigir e realçar uma imagem. A correção é a remoção de características indesejáveis, e a melhoria/realce é a acentuação de características. Uma vez que nas TM, as franjas de *moiré* são geradas pela interferência de dois retículos, e faz-se necessário remover ou filtrar estes retículos a fim de realçar as franjas.

Chama-se de convolução o processo de calcular a intensidade de um determinado *pixel* em função da intensidade de seus vizinhos. O cálculo é baseado em ponderação, isto é, utilizam-se pesos diferentes para *pixels* vizinhos diferentes. A matriz de pesos é chamada de *kernel* da convolução. Para obter o novo valor do pixel, multiplica-se o *kernel* pelo valor da imagem original em torno do pixel, elemento a elemento, e soma-se o produto, obtendo-se o valor do pixel na nova imagem.

Normalmente usam-se filtros passa-baixa (*smoothing*), pois estes suavizam a imagem atenuando as altas frequências, como é o caso dos retículos utilizados nas técnicas de *moiré*. Estes tendem a minimizar ruídos e apresentam o efeito de “borramento” da imagem, isto é, diminui a sua definição e nitidez, o que é um efeito desejável, uma vez que as franjas de *moiré* produzidas se comportam como uma senóide, que são “alisadas” por este tipo de filtro. Segundo FACON (2005), os tipos mais comuns de filtros passa-baixa são o filtro da média, gaussiano.

O mesmo autor cita ainda outro tipo de filtragem por convolução, a Transformada Rápida de Fourier (FFT), que trabalha do domínio das frequências espaciais. Ela é uma ferramenta matemática de grande aplicação na solução dos problemas de processamento digital de imagens (sinais bidimensionais), pois, muitas vezes, é conveniente se expressar o deslocamento do domínio do tempo ou espaço ( $x, y$ ) para o domínio da frequência, facilitando, assim, o seu processamento. Na prática, quando se quer trabalhar uma imagem no domínio da frequência, por exemplo, simplesmente faz-se a transformada de Fourier da referida imagem e a multiplica pela função de transferência de um filtro (convenientemente escolhido de acordo com a aplicação). No entanto, muitas vezes, é mais simples anular os coeficientes dos componentes de frequência que se deseja filtrar e tomar-se, em seguida, a transformada inversa obtendo-se, assim, a imagem filtrada (processada). Quando se anulam os coeficientes da transformada de Fourier a partir de um certo valor, obtém-se um filtro passa-baixa, ou até um certo valor, tem-se um filtro passa-alta, ou entre dois valores de frequência, um filtro passa-faixa ou rejeita-faixa.

FONSECA NETO (2006) e PENTEADO et al. (1998) empregaram a transformada de Fourier para filtrar ruídos periódicos em imagens termais obtidas por satélites. AMIDROR (2000) afirmou que a transformada de Fourier tem a habilidade de permitir analisar uma função ou imagem nos domínios espacial e de frequência espacial, e não somente a imagem em si mesma, mas a sua representação espectral. A FFT acumula as vantagens oferecidas pelos dois domínios. Quando se trata de imagens periódicas, como é o caso de retículos e sua superposição (fenômeno de *moiré*), o espectro de imagem no plano  $u-v$  consiste de impulsos, os quais representam a frequência na decomposição das séries de Fourier de imagens

periódicas. Impulsos robustos indicam pronunciados componentes periódicos na imagem original, de acordo com a frequência e direção do impulso. Cada impulso no espectro 2D é caracterizado por três propriedades principais: o rótulo (que é o índice no desenvolvimento da série de Fourier), a localização geométrica (ou localização do impulso) e a amplitude (Figura 19). A localização geométrica de qualquer impulso está associada ao vetor frequência  $f$  no plano do espectro, podendo ser expresso tanto em coordenadas polares como em cartesianas. Em relação à imagem original a localização geométrica determina a frequência  $f$  e a direção  $\theta$  de componentes periódicos da imagem, e o impulso representa a intensidade desse componente periódico nessa imagem.

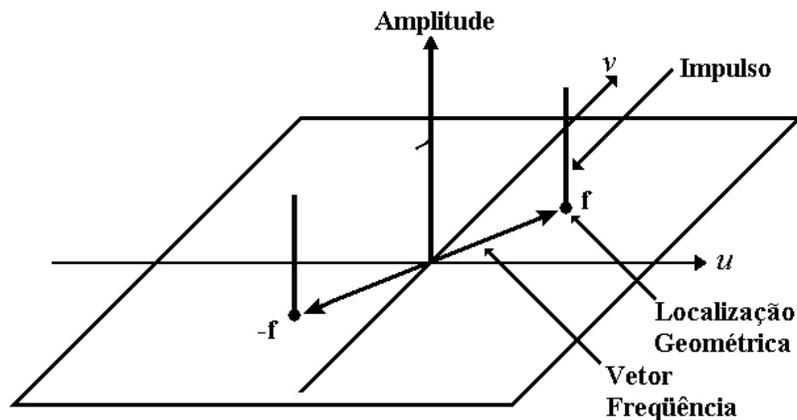


Figura 19: Localização geométrica e amplitude do impulso no espectro 2D de uma imagem periódica.  
 Fonte: AMIDROR (2000).

LINO et al. (2006), utilizaram a FFT para filtrar imagens com franjas de *moiré*, gerados pela TM de projeção com deslocamento de fase, e concluíram que ela é mais eficiente que o filtro Gaussiano, principalmente próximo às bordas, onde este último gera deformidades.

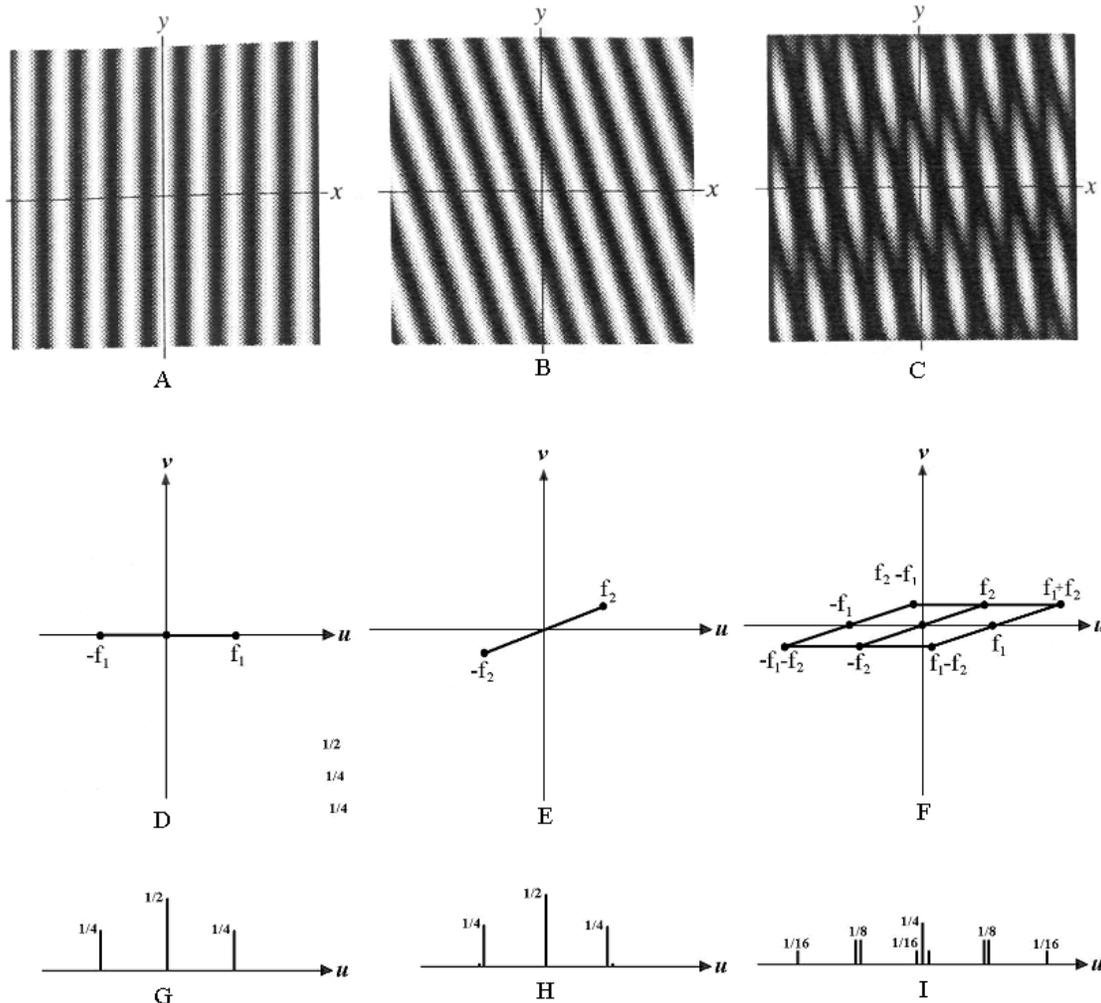


Figura 20: Retículos senoidais (A) e (B) e a sua sobreposição (C), no domínio da imagem. Espectro (domínio da frequência) dos mesmos retículos vistos de topo (D) e (E) e a sua convolução (F), e as suas respectivas vistas laterais (G), (H) e (I). Fonte: AMIDROR (2000)

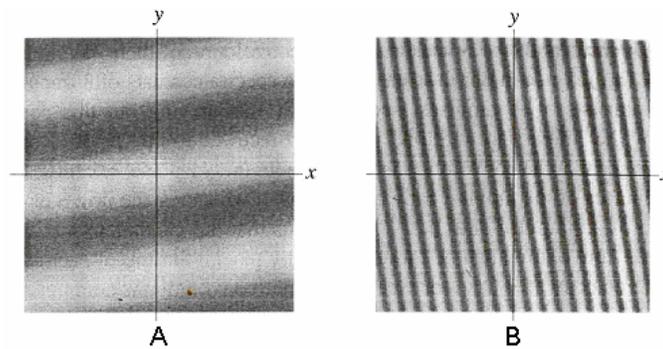


Figura 21. Contribuição isolada destes novos pares de impulsos, no domínio da imagem, para a superposição (3C). A. Devido às diferenças de frequências  $f_1-f_2$  e  $f_2-f_1$ . B. Devido às diferenças de frequências  $f_1+f_2$  e  $-f_2-f_1$ . Fonte: AMIDROR (2000).

### 2.3. Geração de Modelos Digitais Topográficos de 360°

Nesta parte da revisão estaremos apresentando metodologias que permitem a confecção de Modelos Digitais Topográficos (MDT) completo ou de 360° de objetos. Este tipo de MDT é interessante para alguns tipos de aplicações, tanto científica como industriais.

HALIOUA et al. (1985) desenvolveram um método de perfilometria de 360° em que um retículo senoidal com linhas horizontais foi projetado na superfície do objeto e deformado pelo seu contorno topográfico. A imagem deste retículo foi capturada por uma câmera TDI (*Time-Delay Integration*), que captura apenas poucas linhas da imagem. Através de um método de medição de fase, pôde-se calcular a distância de um ponto até uma linha de referência. Como este objeto gira em torno do próprio eixo a passos constantes, pôde-se calcular a distância de qualquer ponto na superfície do objeto a um cilindro de referência virtual. O 3D completo do objeto foi obtido através da sua rotação de 360°.

ASSUNDI et al. (1994) projetaram uma linha vertical, produzida por um diodo laser, coincidente com o eixo de um objeto em rotação e capturou-se a imagem com uma câmera CCD (*Charge-Coupled Device*), como mostrado na Figura 22A. Conhecendo-se a deformação da linha e o fator de calibração obteve-se o perfil periférico. O perfil periférico completo foi obtido girando o cilindro uma volta completa. Os dados foram então transportados para um sistema de coordenadas cilíndricas ou cartesianas (Figura 22B).

Semelhantemente SAJAN et al. (1998) projetaram linhas na superfície de um cilindro em rotação através de diodo laser. Capturaram a imagem com uma câmera TDI alinhada com o eixo de rotação do cilindro, a qual é capaz de capturar 250.000 linhas por segundo. As linhas capturadas foram adicionadas umas às outras formando uma imagem plana que corresponde aos 360° do objeto. Esta imagem foi tratada pela técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*), obtendo assim os contornos topográficos dos 360° do cilindro. Para se obter o perfil 3D, basta fazer a rotação de cada coluna desta imagem em torno do próprio eixo.

D'ACQUISTO et al. (2002) desenvolveram uma metodologia par gerar o MDT de 360° de objetos, baseada em *moiré* de sombra, foram feitas oito imagens a 45° do objeto a ser estudado, para se obter os MDTs dos oito lados. Este é colocado sobre um bloco de referência, também com oito faces e com dimensões conhecidas. Baseado nele pode-se reconstruir integralmente o objeto em estudo.

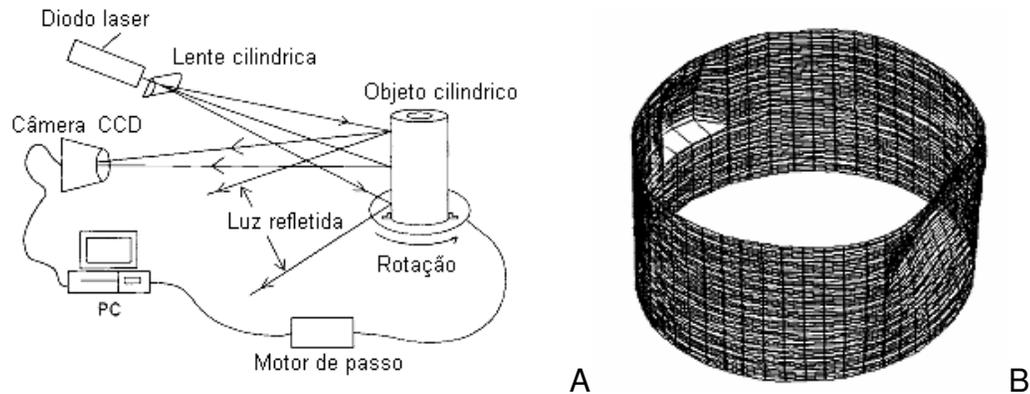


Figura 22. Arranjo experimental (A) e cilindro deformado resultante (B).  
 Fonte: ASSUNDI et AL (1994).

## 2.4. SELEÇÃO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

Neste seção apresenta-se o estado de arte das técnicas utilizadas na seleção de frutas, hortaliças e outros alimentos, através de perfilometria, isto é, através, da topografia destes produtos.

Nos últimos anos tem crescido o uso de processamento e análise de imagens na inspeção e seleção de frutos, hortaliças e outros tipos de alimentos. Basicamente dois parâmetros são usados: cor e forma. A cor pode informar sobre o grau de amadurecimento, presença de doenças, e áreas lesadas por danos mecânicos que possam favorecer a mudança na cor deste tipo de material.

Os atributos físicos de produtos frescos, como área superficial, volume, densidade e massa têm sido usados para calcular a perda de água, a transferência de calor, a qualidade de aplicação de pesticidas taxa de respiração, etc. (LEE, 2006). Também são usados para avaliação de crescimento de frutos e qualidade, através do tamanho e da forma. Podem ainda ser usados também para indicar o índice de maturidade ideal para a colheita (HAHN e SANCHEZ, 2000).

### 2.4.1. Determinação do volume

JARIMOPASA et al. (2005) citaram que os métodos comumente usados para determinar o volume de materiais agrícolas são: deslocamento de água, visão computacional, diâmetro médio geométrico e métodos elétricos. Eles desenvolveram e testaram um dispositivo eletrônico para determinar o volume de frutos e verduras. Este dispositivo apresentou resultados com coeficiente de deteminação  $R^2$  de 0,999, 0,957 e 0,990 para melancias, pepinos e goiabas, respectivamente.

Muitos autores têm realizado trabalhos no sentido de estimar o volume de frutas, hortaliças e de alimentos utilizando imagens digitais, através do seu contorno.

FORBES (2000) calculou o volume de frutas e hortaliças através de imagens digitais, onde, através de espelhos, simulava uma única ou múltiplas câmeras. Através de várias técnicas de processamento de imagens extraiu a silhueta, que foram usadas para testar e treinar algoritmos que estimaram o volume. Estes algoritmos se baseavam em programação linear e em redes neurais artificiais. Os resultados mostraram que para frutos com forma aproximadamente esférica, como a laranja, apenas uma imagem é suficiente para estimar o volume com grande grau de acurácia. Mas para produtos com formas muito irregulares como batata, obtiveram resultados insatisfatórios tanto com uma, quanto com múltiplas imagens.

HAHN e SANCHEZ (2000) desenvolveram um protótipo para determinar o volume de frutos e verduras não regulares, baseado em uma câmera CCD, que girava ao redor do produto. Ela fornecia 2 imagens a  $90^\circ$ , que após serem tratadas por um algoritmo, permitiam determinar o seu volume. Testadas em cenouras, obtiveram um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,98, entre o volume real e calculado.

CHAROENPONG et al. (2004) apresentaram um sistema para determinação do volume de mangas, através das imagens de 3 silhuetas (topo, lado e frente). Considerando que a manga têm uma forma muito próxima da elipse, aplicaram um modelo matemático, que calculou o volume com um  $R^2$  de 0,994, quando comparado com o método padrão de deslocamento de água.

WULFSOHN et al. (2004) descreveram um estimador que combinava o método de Cavalhieri, com equações de área para estimar o volume de objetos convexos axialmente, tais como frutas e verduras, através de imagens de suas projeções.

#### **2.4.2. Inspeção tridimensional**

Embora a indústria de processamento de alimentos use sistemas de visão bidimensional para seleção e classificação, o aumento de velocidade de aquisição de imagens permite o surgimento de novas aplicações. Entre elas, a determinação das feições topográficas dos produtos, o que não pode ser obtido perfeitamente mesmo quando se faz uso de múltiplas câmeras. Por isso a indústria agora começa a adotar, juntamente com o sistema tradicional de inspeção (bidimensional), sistemas de inspeção tridimensional para a aquisição da topografia dos alimentos processados, frutas e hortaliças, permitindo obter informações sobre o volume, a altura e os contornos topográfico (HARDIN, 2006).

ZHU et al. (2007) desenvolveram um método para localizar a região do cálice/pecíolo da maçã, pois muitas vezes, na seleção desta fruta por análise de imagens bidimensionais, ela é confundida com defeitos. Para tanto capturaram a imagem da fruta com uma câmera infravermelho próximo, e reconstituíram a topografia por uma técnica tridimensional chamada Forma por Sombreamento (SFS - *Shape for Shading*). Apesar de esta técnica não reconstituir

perfeitamente a topografia da maçã, pôde reconhecer esta região do fruto com mais de 90% de confiança.

DAVIES et al. (2001) desenvolveram um sistema para avaliar a qualidade de produtos de panificadoras industriais composto de câmeras para medir o comprimento dos pães, balança eletrônica e um perfilômetro baseado em triangulação laser composto por uma outra câmera e um projetor de linha laser. O sistema produziu acurados perfis tridimensionais de vários tipos e tamanhos de pães além de reduzir drasticamente o tempo de medição quando comparado com a medição manual.

STORBECKA e DAANB (2001) projetaram e testaram um sistema para reconhecer a espécie de peixes através do volume. Para tanto utilizaram a técnica de triangulação, que projetava uma linha laser sobre os peixes que se deslocam em uma esteira (Figura 23). O sistema conseguiu classificar corretamente cerca de 98% dos peixes.

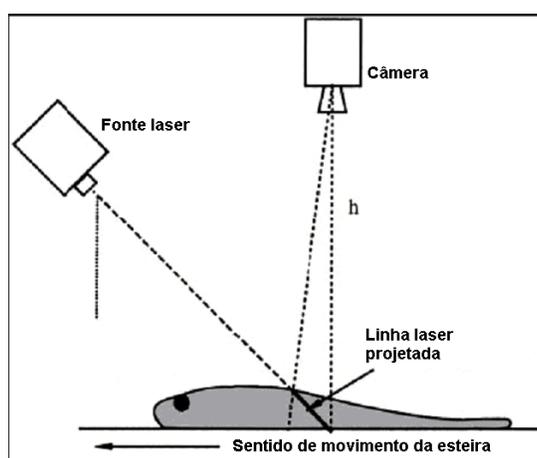


Figura 23. Arranjo do sistema de cálculo do volume de peixes por triangulação.  
Fonte: STORBECKA e DAANB (2001).

TILLET et al. (2000) desenvolveram um sistema tridimensional estereoscópico para estimar o peso de peixes vivos através de modelo de distribuição dimensional para capturar a forma típica e a variabilidade de salmão visto lateralmente. Obtiveram resultados com erro de 5% na estimativa do comprimento. MARTINEZ-DE-DIOS et al. (2003), utilizando também um sistema tridimensional estereoscópico estimaram o peso de peixes em fazendas de peixes. O sistema reconhece os indivíduos e através da relação comprimento/peso, muito bem conhecida em aquicultura, e calcula o seu peso.

SUN et al. (2007) também utilizaram estereoscopia para medir a espessura de grãos de trigo, e também a presença ou ausência de dobras em sua superfície.

### 2.4.3. Geração de MDT de 360° de frutas e hortaliças.

Também foram desenvolvidos vários trabalhos com o objetivo de gerar modelos topográficos completos de frutas, hortaliças e alimentos.

JANCSÓK et al. (2000) geraram modelos em Elementos Finitos para estudar a resposta à vibração em frutos não esféricos, como pêra. Para tanto capturaram imagens de 50 frutos em duas direções perpendiculares e extraíram o contorno por meio de tratamento de imagens digitais. Com elas geraram no programa MATLAB, utilizando descritores de Fourier, um MDT de 360°, o qual foi levado par o programa ANSYS, onde se gerou uma malha de Elementos Finitos para fazer as análises. JANCSÓK et al. (2002), utilizando a mesma metodologia geraram MDTs de 360° de morangos a partir de imagens obtidas de 8 diferentes direções.

LEE et al. (2006) também desenvolveram um protótipo para o cálculo de volume e área superficial de objetos irregulares, tais como frutas e hortaliças, através de uma série de silhuetas obtidas ao girar-se o “specimen” a intervalos regulares fixos. Um modelo tridimensional *wire-frame* pôde ser reconstruído integrando-se as silhuetas (Figuras 24 e 25). O volume e área superficial puderam então ser estimados a partir deste modelo. Concluíram que o método era fácil, acurado e robusto, além de ser não destrutivo.

IMOU et al. (2006) desenvolveram um método, denominado método da intersecção de volume, em que nove espelhos foram colocados ao redor de morangos. Foi feita uma única imagem em que apareciam o morango e as suas nove imagens refletidas nos espelhos. Com as imagens refletidas reconstruiu-se o modelo tridimensional. Quando comparado com dados obtidos por um perfilômetro laser, os resultados mostram um erro muito baixo.

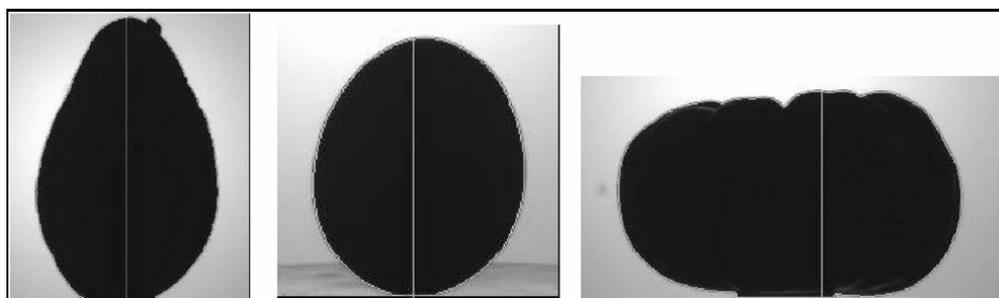


Figura 24. Silhuetas de produtos agrícolas: abacate, melão e abóbora, da esquerda para a direita.

Fonte: LEE et al. (2006)

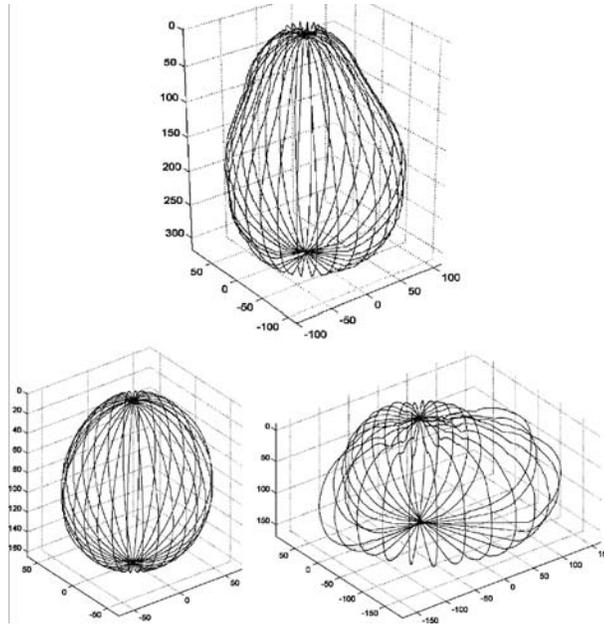


Figura 25. Modelos Topográficos “wire-frame” dos mesmos produtos.  
 Fonte: LEE et al. (2006).

GOÑI et al. (2007) desenvolveram um método para a reconstrução tridimensional de gêneros alimentícios. Produtos foram fatiados e foram obtidas imagens digitais da seção transversal destas fatias. A reconstituição tridimensional foi feita através da interpolação das diversas seções, e criados elementos finitos. Para pedaços de carne e de maçã *red delicious*, o volume obtido por este método apresentou um erro inferior a 2%. Porém, este método exige a destruição do objeto em estudo. Buscando contornar este problema GOÑI et al. (2008) utilizaram ressonância magnética, em vez do “fatiamento” físico, mantendo a integridade física do produto, mas tornando a técnica economicamente inviável em linhas de seleção.

NOORDAM (2007) citaram que a empresa GREEN VISION desenvolveu um sistema de alta velocidade para seleção de pimentão, baseado na análise de forma tridimensional. A técnica usada pelo sistema foi a triangulação laser (Figura 26).

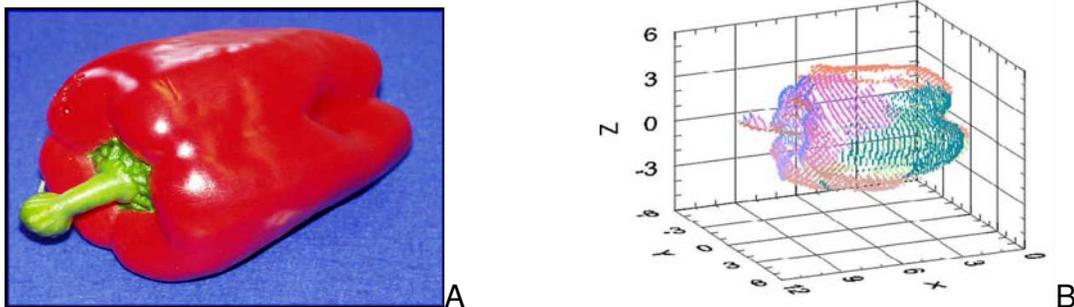


Figura 26. Geração de MDT de pimentão. A. Pimentão real. B. MDT.  
 Fonte: NOORDAM (2007).

## 2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Várias técnicas utilizadas na perfilometria tridimensional têm sido desenvolvidas e estudadas. Algumas, devido à sua complexidade, outras às dificuldades de implantação e ainda outras que são inadequadas para trabalhar com produtos vivos ou com grande variação de cor, dificilmente poderiam ser utilizadas em linhas de seleção de frutas, hortaliças e produtos de origem animal.

As técnicas baseadas na silhueta ou contornos têm sido muito estudadas para se obter o MDT. Elas podem ser usadas para calcular volume e área superficial de produtos de origem vegetal e animal, visando a sua seleção e classificação. Mas, apesar da sua simplicidade, elas muitas vezes não conseguem distinguir pequenos defeitos, mesmo quando se utilizam múltiplas câmeras (HARDIN, 2006).

Já a estereoscopia começa a ser estudada, e mostra um grande potencial, mas apresenta como inconveniente o fato de necessitar de contrastes na superfície do objeto, mas tal técnica pode ser melhorada em sua eficiência, se for incrementada a projeção de luz estruturada.

A técnica de triangulação a laser hoje é a mais difundida para a utilização em seleção de produtos frutas, hortaliças e alimentos de origem animal. Apresenta como vantagem a alta acurácia, pois é sensível a pequenas concavidades. Porém exige um maior tempo para a captura das imagens, pois a linha laser tem que percorrer toda a superfície a ser estudada. Além disso, quando utilizada para gerar MDT de 360°, exige um aparato que encarece muito a sua utilização.

Já as técnicas de *moiré* de projeção com deslocamento de fase apresentam um grande potencial de utilização, devido à sua rapidez de aquisição da imagem, uma vez que necessitam apenas de uma imagem para gerar o MDT. Acrescenta-se a isso o fato de apresentar grande acurácia e simplicidade.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada e discutida a metodologia utilizada. Na primeira parte estão declarados os pré-testes que serviram de base para este trabalho, que é o desenvolvimento da técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase, e a construção de MDTs (Modelos Digitais Topográficos). A técnica foi aplicada à seleção de frutos e hortaliças e na construção de MDT completo ou de 360°.

Este trabalho foi realizado no Centro de Engenharia e Automação, do Instituto Agronômico (IAC), localizado em Jundiaí - SP. O arranjo experimental foi constituído por um computador com processador AMD Atlon XP, de 2,08 GHz, com 512 MB de memória RAM, ao qual se acoplou um projetor LCD e uma câmera CCD. Sendo este projetor da marca NEC, modelo VT560, com resolução de 1024 colunas por 768 linhas. A câmera CCD, marca SAMSUNG, modelo SDC-312, colorida, com resolução de 640 colunas por 480 linhas, acoplada a uma placa de captura de imagens marca Data Translation, modelo DT3130. Para a captura e tratamento das imagens utilizou-se o software Global Lab Image2 da Data Translation.

A Figura 27 mostra o arranjo experimental utilizado, que são: um microcomputador destinado a gerar os retículos a serem projetadas pelo projetor LCD sobre o objeto em estudo.

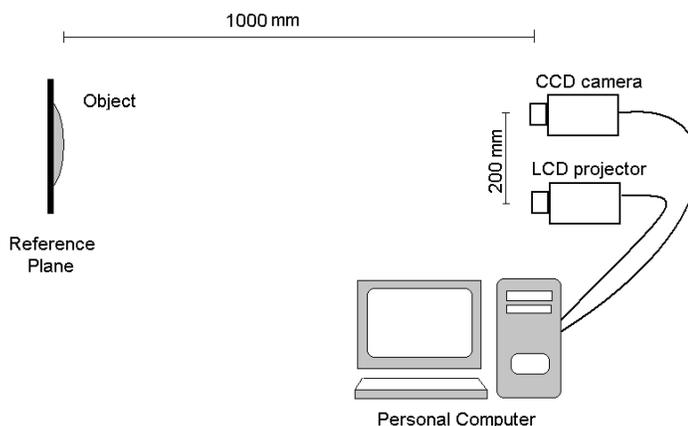


Figura 27: Arranjo experimental utilizado.

Durante este trabalho foram utilizados vários softwares destinados a geração de imagens a serem projetadas, a captura destas imagens projetadas e ainda ao tratamento das mesmas.

Os retículos a serem projetados foram confeccionados no programa Microsoft *Paint*. Para os testes virtuais eles foram tratados no Adobe *Photoshop*, que é um *software* de análise de imagens proprietário.

O software *Rising Sun Moiré* é um software desenvolvido por ZHAOYANG WANG, para trabalhar com a técnica de *moiré* interferométrico, com e sem deslocamento de fase e pode também ser empregado em *moiré* topográfico. Resulta em uma imagem onde a topografia é representada em escala de tons de cinza ou na forma de malha contorno, que é mais didático. Mas a imagem em tons de cinza necessita ser levada a outro programa para transformar suas cotas para a escala métrica.

O software *IDEA - Interferometrical Data Evaluation Algorithms* (Graz University of Technology, 2006) foi desenvolvido para a avaliação de informações de fase em interferogramas. Ele trabalha tanto com *Phase-stepping*, avaliações no domínio de Fourier, determinação de fase de interferogramas de *Speckle* e hologramas digitais. Ele gera o mapa de fases empacotadas e faz o desempacotamento (*unwrapping*) por três métodos. Além disso, trata imagens, através de filtragem, soma ou multiplicação de constantes e subtração de imagens.

Quando comparados entre si o *Rising Sun Moiré* leva vantagem na rapidez, na simplicidade de operação e na apresentação dos resultados. Já o *IDEA* é mais robusto, e os resultados são apresentados apenas em tons de cinza, mas é possível extrair a fase, o que facilita a transformação das cotas para a escala métrica. Ambos têm a vantagem de serem gratuitos, porém têm como desvantagem o fato de não permitir a operação por linhas de comando, impossibilitando a automatização do processo.

Uma vez que um dos objetivos era tornar automáticas as operações de captura e tratamento das imagens, o que não era possível com os *softwares* acima citados, buscaram-se outras alternativas, chegando a alguns *softwares* de domínio público com código fonte aberto, também chamados de *softwares* livres.

Um dos softwares estudados foi o *ImageJ*, que é um processador de imagem criado por Wayne Rasband do *National Institute of Health*, em *Bethesda*, Md, USA. A letra J do seu nome faz referência à linguagem Java, na qual foi desenvolvido, sendo, portanto um programa multiplataforma, rodando tanto em *Windows*, *MAC OS* e *Linux*. Ele exhibe, edita, analisa, processa, salva e imprime imagens de 8-bit, 16-bit e 32-bit. Consegue ler diversos formatos, incluindo: TIFF, PNG, GIF, JPEG, BMP, DICOM e FITS. É capaz de medir distâncias e ângulos, o valor da área e do pixel selecionado pelo usuário e criar gráficos estatísticos. Também suporta funções de processamento, tais como operações aritméticas e lógicas entre imagens, manipulação de contraste, análise de Fourier, reconhecimento de margem e possui vários tipos de filtros. Além das operações através dos seus menus, ele permite a operação por linhas de comando, podendo ser aberto e rodado a partir de outro programa ou rotina computacional. As capacidades deste programa podem ser estendidas através de *macros* e *plugins*. *Macros* são rotinas, fáceis de escrever, não necessitando de conhecimento de Java, e que facilitam a automatização das operações. *Plugins* são programas externos, escritos em Java, e que podem criar novas operações não existentes no programa original (ABRÀMOFF, 2004).

Utilizou-se ainda o *SCILAB* (SCILAB ORG, 2006), que é um *software* científico para computação numérica, semelhante ao *Matlab*, e que fornece um poderoso ambiente computacional aberto para aplicações científicas. Desenvolvido desde 1990 pelos

pesquisadores do INRIA (*Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique*) e do ENPC (*École Nationale des Ponts et Chaussées*), é agora mantido e desenvolvido pelo Consorcio *SCILAB* desde sua criação em Maio de 2003. Distribuído gratuitamente via Internet desde 1994, o *SCILAB* é atualmente usado em diversos ambientes industriais e educacionais pelo mundo. Ele possui um *toolbox*, também gratuito, chamado *SIP - SCILAB Image Processing* (FABBRI, 2003), para processamento e análise de imagens. Ele realiza filtragem, “desfocagem”, detecção de bordas, limiarização, manipulação de histogramas, segmentação, morfologia matemática e processamento de cores. Pode ainda importar e exporta imagens em vários formatos incluindo BMP, JPEG, GIF, PNG, TIFF, XPM e PCX. O *SCILAB/SIP* transforma e trata as imagens como matrizes, permitindo corrigir individualmente as unidades e escalas e referenciá-las para um único sistema de coordenadas. Além disso, o *toolbox SIP* traz já algumas rotinas para interferometria, que permite automatizar o empacotamento e o desempacotamento de fases. Uma grande vantagem é o fato de ser programável através de rotinas tornando automático qualquer parte do processo, até mesmo a projeção dos retículos e a captura automática das imagens. Uma vez programado, permite ainda abrir outros programas, como o *ImageJ*, que sejam mais eficientes em certas operações, obtendo assim maior rapidez e eficiência.

### **3.1. ENSAIOS PRELIMINARES**

Nesta parte estão apresentados os pré-testes que serviram de base para este trabalho, que é o desenvolvimento da técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase e a sua aplicação na construção de MDTs (Modelos Digitais Topográficos), com ensaios virtuais e práticos para validar a metodologia, bem como a filtragem dos retículos e a correção das dimensões.

#### **3.1.1. *Moiré* de projeção com deslocamento de fase**

O desenvolvimento desta técnica passa por duas etapas - na primeira foram feitos ensaios virtuais, para a geração de MDT teórico, e na segunda foram feitos ensaios práticos para estudar a sua aplicação em objetos regulares e em frutas e hortaliças.

##### **3.1.1.1. Ensaios virtuais**

Para a realização dos ensaios virtuais, foi gerado no programa *Paint* um retículo de Ronchi ( $R_1$ ), constituída de linhas claras e escuras com espessura de 4 “pixels”. A partir desta, foram gerados outros três retículos com as suas linhas defasadas de  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  de período em relação à

$R_1$ , ( $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ , respectivamente), conforme mostra a Figura 28A. Com o programa *Photoshop*, para tratamento de imagens, distorceu-se o retículo  $R_1$ , gerando o  $R_d$  (Figura 28B). Procedendo-se, no mesmo programa, a diferença entre  $R_d$  e  $R_1$  e posterior filtragem, resultou nas franjas de *moiré* ( $M_1$ ), as quais mostram a diferença entre os dois retículos. Aplicando-se o mesmo tratamento para  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ , em relação a  $R_d$ , obtiveram-se franjas de *moiré*  $M_2$ ,  $M_3$  e  $M_4$ , defasadas  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  de período em relação à  $M_1$ . Utilizando-se o programa *Rising Sun Moiré*, o qual utiliza a Função 1, obteve-se o mapa de fases empacotadas das franjas de *moiré*. Procedendo-se o desempacotamento, obteve-se a representação topográfica das diferenças dos retículos  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  com  $R_d$  em tons de cinza, onde o escuro representam regiões de menor cota (depressão) e o claro regiões de maior cota (topo).

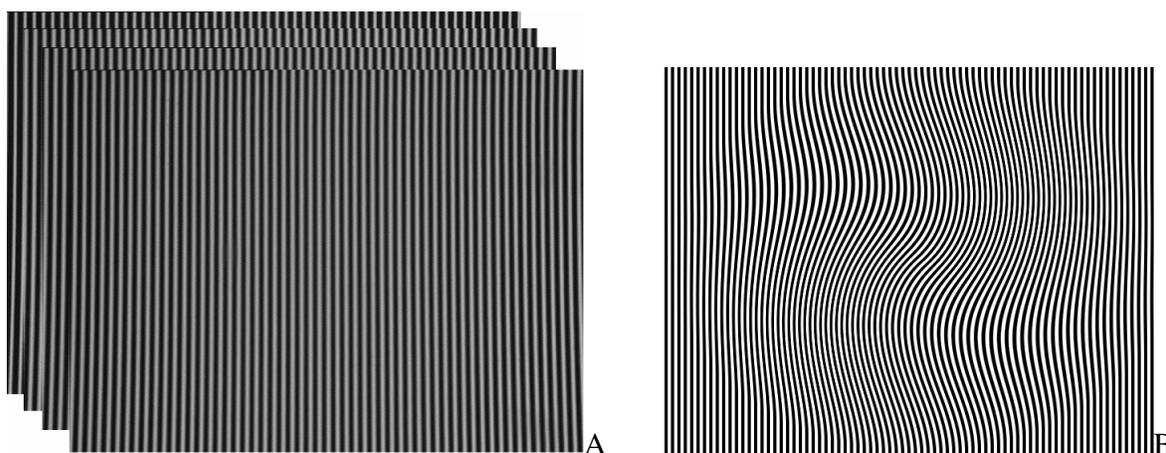


Figura 28: Retículos Ronchi. A. Retículos  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  defasados entre si de  $\frac{1}{4}$  de período. B. Retículo  $R_d$  deformado em programa de tratamento de imagem.

### 3.1.1.2. Ensaio experimentais

Com o objetivo de testar a aplicabilidade da técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase projetaram-se os retículos  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  através do projetor LCD, sobre um plano de referência. As suas imagens ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_4$ ) foram capturadas através da câmera CCD, e armazenadas no PC, conforme arranjo experimental mostrado na Figura 27.

Colocou-se na superfície do plano de referência uma calota com 280 mm de diâmetro e 45,5mm de altura. Projetou-se sobre essa o retículo  $R_1$ , cujas linhas foram deformadas pela topografia da calota. Essa imagem foi armazenada no PC ( $I_c$ ). Utilizando-se a mesma metodologia aplicada no teste teórico, isto é, fazendo-se a diferença entre a imagem  $I_c$  e cada uma das imagens  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_4$ , obtiveram-se as imagens das franjas de *moiré* defasadas de  $\frac{1}{4}$  de período entre uma imagem e a seguinte, respectivamente. Após a filtragem para a remoção dos retículos obteve-se, através do programa *Rising Sun Moiré*, o MDT da calota, em tons de cinza onde áreas escuras indicam regiões de cotas baixas e áreas claras regiões de cotas altas.

Neste período passou-se a trabalhar com *softwares* para análise de imagens de fonte aberta, gratuitos e rodam por linhas de comando, como o *ImageJ* e o *SCILAB*. Desenvolveu-se também para o *SCILAB*, rotinas computacionais que projetavam os retículos e capturavam a imagem automaticamente, diminuindo o tempo de aquisição e facilitando o trabalho.

### 3.1.2. Filtragem ou remoção dos retículos

As técnicas de *moiré* se baseiam no fenômeno de *moiré*, que é resultado da interferência entre retículos, e que geram os padrões de *moiré*. Estes retículos necessitam serem removidos a fim de evidenciar estes padrões. Para isso testaram-se alguns tipos de filtros: Média, Gaussiano e Transformada Rápida de Fourier (FFT). Os dois primeiros são nativos do programa *ImageJ*.

A comparação entre os métodos foi realizada utilizando uma imagem de franjas de *moiré* de 640x480 *pixels*, com 10 repetições, computando-se o tempo necessário para se fazer a filtragem e obter-se o resultados das mesmas.

Já para a filtragem através da FFT, foi confeccionado digitalmente um retículo senoidal  $S_1$  (Figura 29A), que foi então girado  $5^\circ$  no sentido anti-horário  $S_2$  (Figura 29B). Através do programa *ImageJ*, processou-se a diferença entre estas duas imagens, gerando-se a franja de *moiré*  $S_R$  (Figura 29C) e sendo então calculada a FFT das respectivas imagens.

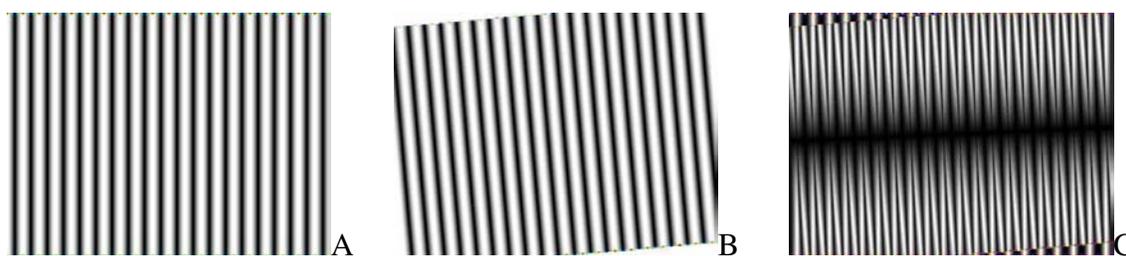


Figura 29: Retículos senoidais  $S_1$  (A),  $S_2$  (B) e franja de *moiré*  $S_R$  (C) produzida pela diferença dos dois retículos.

Gerou-se uma máscara binária (com valores “zero” e “um”) com as dimensões da imagem da FFT da franja de *moiré*. Foi atribuído o valor “um” à região central, em torno do impulso correspondente ao fenômeno de *moiré*, e “zero” ao restante da imagem. Fez-se a multiplicação da imagem da FFT da franja de *moiré* pela máscara. Fazendo-se a FFT inversa da imagem resultante, obteve-se a imagem das franjas de *moiré* com os retículos filtrados, isto é, removidos. Para facilitar a sua aplicação gerou-se, para o programa *ImageJ*, uma rotina computacional chamada macro, que permitiu a automação deste procedimento.

Para se comparar com o anterior utilizou-se os filtros de Média e Gaussiano, que já fazem parte do *Menu* do programa *ImageJ*. Ambos com um núcleo (*kernel*) de 6x6.

Para se comparar os métodos foram 8 obtidas linhas horizontais de perfil do MDT, respectivamente as linhas 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 50 da imagem, de cima para baixo, que foram comparadas com a linha central da imagem. Para esta comparação foram calculados a Amplitude, a Média, o Desvio Padrão, e o Coeficiente de Correlação ( $R^2$ ), da linha central com cada uma das outras linhas.

### 3.1.3. Correção das dimensões dos objetos

Uma vez que o MDT de objetos é construído a partir de imagens bidimensionais, cujo elemento básico é o *pixel*, e as cotas na maioria dos casos em tons de cinza, é necessário corrigir as escalas da imagem para a escala real dos objetos. Isto é feito em duas etapas, na primeira corrigimos as coordenadas “x” e “y”, e na segunda as cotas ou coordenada “z”.

#### 3.1.3.1. Correção de escala das coordenadas “x” e “y”

As coordenadas “x” e “y” dos objetos nas imagens são dadas em *pixels*, portanto é necessário transformá-la para a escala métrica. Para tanto, depois de montado o arranjo experimental, obtiveram-se a imagem de um objeto com dimensões conhecidas, neste caso utilizou-se uma esfera com 74,05 mm de diâmetro. Contando os *pixels* correspondentes ao diâmetro, tanto na horizontal como na vertical, calcula-se o fator de correção para as duas dimensões. Gerou-se uma rotina para o SCILAB, que, “clitando” com o “mouse” nas extremidades superior, inferior, esquerda e direita da esfera, fornecia os fatores de correção horizontal e vertical, que, para o arranjo experimental em questão, deveriam ser aplicados a todas as imagens.

#### 3.1.3.2. Correção de escala das cotas

Projetaram-se os retículos  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ , através do projetor LCD, sobre um plano de referência e capturou as suas imagens ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_4$ ) as armazenou no PC, conforme arranjo experimental mostrado na Figura 27. A seguir colocou-se na superfície do plano de referência prismas triangulares (Figura 30), cujas dimensões são apresentadas na Tabela 1. Projetou-se sobre ele o retículo  $R_1$ , cujas linhas foram deformadas pela sua topografia. Essas imagens foram capturadas e armazenada no PC ( $I_p$ ).

Confeccionou-se uma rotina no programa SCILAB que gerava o MDT de cada um dos prismas. Ela calculava a diferença entre a imagem  $I_p$  e cada uma das imagens  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_4$ , obtiveram-se as imagens das franjas de *moiré* defasadas de  $\frac{1}{4}$  de período entre uma imagem e

a seguinte, respectivamente. Filtrava estas imagens para a remoção dos retículos, calcula o mapa de fases através da Função 6, e fazia o desempacotamento gerando MDT de cada prisma.

As cotas dos MDTs foram calculadas pela Função 10 (CLOUD, 1998) e pela Função 11 (VECHIO et al, 2006b), para verificar qual apresentava valores mais próximos do real. A partir dos resultados obtidos calculou-se um fator de correção para as cotas, que será aplicado a todos os objetos.

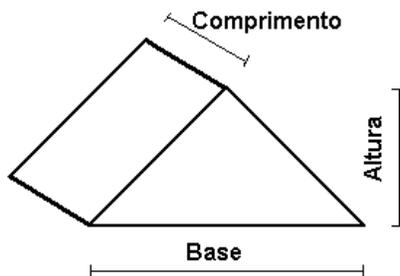


Figura 30: Dimensões do prisma triangular.

Tabela 1: Dimensões dos prismas.

<i>Prisma</i>	<i>Comprimento (mm)</i>	<i>Base (mm)</i>	<i>Altura (mm)</i>
1	30,10	42,00	21,00
2	35,90	49,80	24,90
3	40,10	56,00	28,00
4	44,00	62,00	31,00
5	50,10	70,00	35,00
6	60,10	82,00	41,00
7	65,15	91,00	45,50

### 3.2. CONSTRUÇÃO DE MODELOS DIGITAIS TOPOGRÁFICOS

Para a construção dos Modelos Digitais Topográficos de corpos simétricos e assimétricos utilizou-se a mesma rotina já descritas na seção anterior.

### **3.2.1. Modelos Digitais Topográficos de corpos simétricos**

Para aprendizado e teste da metodologia, gerou-se primeiramente o MDT de corpos simétricos. O cilindro e a esfera foram escolhidos porque muitas frutas e órgãos vegetais possuem seção semelhante à deles, e o cubo, cuja forma praticamente não é encontrada no reino vegetal, servindo como exemplo de um produto fora do padrão.

### **3.2.2. Modelos Digitais Topográficos de corpos assimétricos (órgãos vegetais)**

Para o estudo da geração do MDT de órgãos vegetais *in natura*, usou-se um *tubérculo* de batata (*Solanum tuberosum*), frutos da macieira (*Malus spp*), da pereira (*Pirus communis*), e da laranjeira (*Citrus sinensis*). Estas foram escolhidas porque suas cascas apresentam diferenças na cor, textura e reflexão da luz projetada.

## **3.3. METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE FRUTAS E HORTALIÇAS**

Para a seleção de frutas e hortaliças levou-se em consideração que a superfície de um órgão vegetal para serem considerados dentro do padrão não poderiam apresentar discontinuidades, tais como as devidas à má formação ou a injúrias mecânicas. Neste caso o perfil poderia ser descrito por uma função polinomial de segundo grau ou função quadrática, que é uma função contínua, caso contrário, isto é, quando existirem discontinuidades, esta função não descreveria tão bem este perfil. A partir desta premissa desenvolveu-se uma metodologia que ajusta uma curva gerada por função quadrática às linhas de perfil da superfície deste tipo de material. Fazendo-se a correlação entre a curva ajustada e a linha de perfil, pode-se verificar através do coeficiente de correlação  $R^2$ , a qualidade do ajuste, e portanto a existência ou não de discontinuidades.

Para agilizar o processo foram geradas macros no software ImageJ, que traçavam as linhas de perfil no MDT e salvava os valores do perfil em “TXT”.

### **3.3.1. Teste da metodologia com objetos de forma regular.**

Para os teste iniciais obteve-se o MDT de um cilindro, de uma esfera e de um cubo. Sendo que a seção transversal dos dois primeiros assemelha-se à de frutas e verduras, e o cubo, cujas

arestas lhe conferem uma seção diferente da de frutas e verduras, servindo como contraprova, isto é, de frutas e verduras com má formação ou que sofreu injúria mecânica. Projetaram-se os retículos sobre esses objetos e sobre o plano de referência, conforme metodologia já descrita. Essas imagens foram cortadas segundo uma Região de Interesse (RDI) específica para cada objeto, utilizando-se o software ImageJ, com a finalidade de evitar regiões que poderiam gerar MDT com grandes imprecisões e diminuir o tempo de processamento. Através do mesmo software procedeu-se a subtração e filtragem das imagens as quais foram processadas pelo programa RisingSun Moiré gerando o MDT da RDI desses objetos. O relevo é representado em tons de cinza, variando de 0 a 255, onde 0 (preto) corresponde às regiões com menor cota e 255 (branco) às regiões com maior cota. Foram traçadas linhas sobre as imagens dos MDT, e obtidos os perfis das mesmas, pelo programa ImageJ, os quais foram salvos em arquivos com extensão “TXT”. Esses arquivos foram abertos em planilha de cálculos do tipo Excel, onde gerou-se um gráfico com a linha de perfil do objeto, calculou-se a linha de tendência.

### **3.3.2. Ensaaios com produtos agrícolas.**

Foram levados a cabo estudos de caso utilizando-se as seguintes frutas e hortaliças “in natura”:

- Fruto de tomateiro (*Lycopersicon esculentum*) sem defeito;
- Fruto de tomateiro (*Lycopersicon esculentum*) defectivo;
- Fruto de goiabeira (*Psidium guajava L.*) com injúria mecânica;
- Batata (*Solanum tuberosum L.*) com injúria mecânica. Primeiro caso;
- Batata (*Solanum tuberosum L.*) com injúria mecânica. Segundo caso;

O fruto do tomateiro defectivo tinha uma má formação congênita; o fruto da goiabeira havia sofrido uma lesão por impacto, provavelmente na própria gôndola do supermercado onde foi adquirido. Já nos tubérculos de batata foram feitos, um furo e um corte.

### **3.4. Modelos Digitais Topográficos de 360º**

Para a geração do MDT de 360º ou completo do objeto, gerou-se nova rotina no SCILAB, que reduzia a escala das imagens dos quatro MDTs dos objetos em estudo, para diminuir o tempo computacional. A rotina transformou as imagens dos MDTs para uma matriz com três colunas, que correspondiam às coordenadas X, Y e Z dos objetos, tendo com ponto de origem a linha que passava pelo centro do goniômetro onde estavam posicionados os objetos. Também fez a correção das coordenadas e das cotas, colocando-as em um mesmo sistema de unidades, no caso o milímetro. Além disso, fez-se a rotação dos eixos e colocou-se os quatro lados em um

mesmo sistema de coordenadas, cuja origem é o centro da base do objeto, gerando o uma única matriz que é o MDT do objeto completo.

#### **3.4.1. Modelos Digitais Topográficos de 360° de objetos de forma simétrica**

Para testar esta metodologia, utilizou-se primeiramente um cubo com arestas de 65,15mm, e fotografaram-se quatro arestas do mesmo com o vértice voltado para a câmera, e aplicando-se a metodologia, gerou-se o seu MDT de 360°.

Da mesma maneira para um cilindro com altura de 69,10 mm e diâmetro de 75,25 mm, gerando o volume do cubo.

Para testar a sensibilidade a deformidades na superfície, utilizou-se uma lata de conserva com altura de 80 mm e diâmetro de 72 mm, que foi amassada e então aplicada a metodologia para a geração do seu MDT de 360°.

#### **3.4.2. Modelos Digitais Topográficos de 360° de frutos**

A seguir, aplicou-se a mesma metodologia para frutos *in natura*. Gerou-se o MDT de 360° de um fruto do pessegueiro (*Prunus persica*) e de um fruto da goiabeira (*Psidium guajava*).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo foi dividido em quatro partes. A primeira, denominada de pré-testes, mostra as fases que permitiram o aprendizado e desenvolvimento das técnicas que se tornaram imprescindíveis para a conclusão deste trabalho. Esta consiste no desenvolvimento da técnica de *moiré* com deslocamento de fase através de testes virtuais, seguidos de testes práticos onde se utilizaram retículos projetados para gerar o MDT de objetos reais. Em seguida, estudou-se a melhor maneira efetuar-se a filtragem ou a remoção dos retículos de *moiré*.

Já a segunda parte mostra a aplicação destas metodologias para gerar o MDT de objetos com formas simétricas, tais como cubos, cilindros e esferas, e de corpos com formas assimétricas como frutas e hortaliças *in natura*.

Na terceira parte desenvolveu-se uma metodologia baseada na TM de projeção para seleção de frutas e hortaliças, as quais foram testadas primeiramente com um cilindro, cuja seção circular é bastante comum na natureza, e um cubo, cuja forma é incomum na natureza, representado um fruto ou hortaliça não defectivos e defectivos, respectivamente.

E por fim, na quarta parte, gerou-se MDTs de 360° de objetos e órgãos vegetais.

### 4.1. TESTES PRELIMINARES

Como pré-testes primeiramente foi estudada a técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase, pois até então esta técnica, tal como ela é apresentada neste trabalho, ainda não havia sido encontrada na literatura.

#### 4.1.1. *Moiré* com deslocamento de fase

Para os estudos iniciais da técnica *moiré* de projeção com deslocamento de fase foram efetuados testes com retículos virtuais e, em seguida, aplicou-se tal técnica a objetos reais, como uma calota.

#### 4.1.1.1. Ensaio virtuais

Quando os retículos  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  (Figura 28A), defasados de  $\frac{1}{4}$  de período entre si e gerados em computador, foram subtraídos, *pixel a pixel*, do retículo  $R_d$  (Figura 28B), que é o  $R_1$  deformado, produziram as franjas de *moiré*, que também são defasadas de  $\frac{1}{4}$  de período entre si, como mostram a Figuras 31A, 31B, 31C e 31D. Mostrando-se ser possível obter o deslocamento de fases de franjas de *moiré* através da interferência de um retículo com outras defasadas com a mesma fração de período que se deseja obter.

As Figuras 32A, 32B, 32C e 32D mostram as mesmas imagens filtradas para a remoção dos retículos, permanecendo apenas as franjas de *moiré*. Essas, depois de tratadas, deram origem ao mapa de fases empacotadas (Figura 33A), o qual, após o desempacotamento, gerou o MDT em tons de cinza e (Figura 33B), bem como através de malha de contorno (Figura 34).

A técnica de *moiré* (TM) com deslocamento de fase gerou uma superfície virtual, na qual os picos e vales são automaticamente reconhecidos, mostrando a potencialidade desta técnica em gerar os contornos topográficos de objetos.

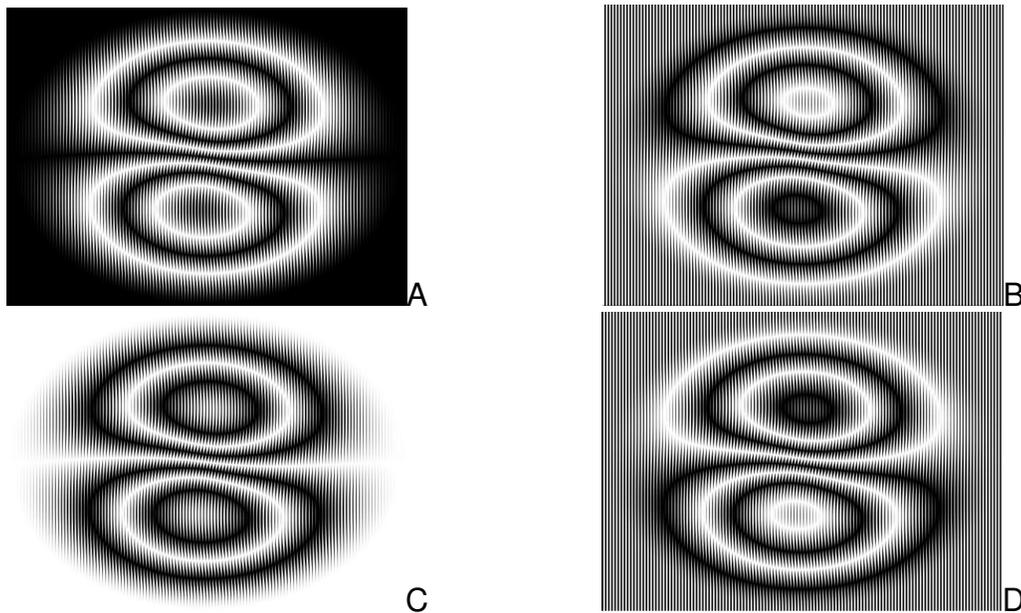


Figura 31: Franjas de *moiré*. A, B, C e D – Franjas de *moiré* defasadas de  $\frac{1}{4}$  de período entre si.

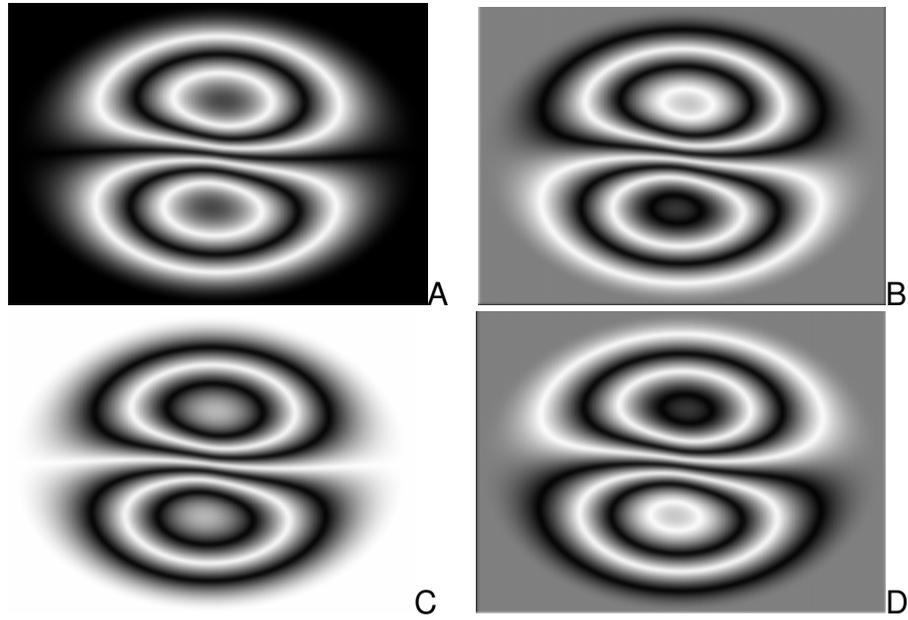


Figura 32: Franjas de *moiré* filtradas. A, B, C e D – Franjas de *moiré* defasadas de  $\frac{1}{4}$  de período entre si.

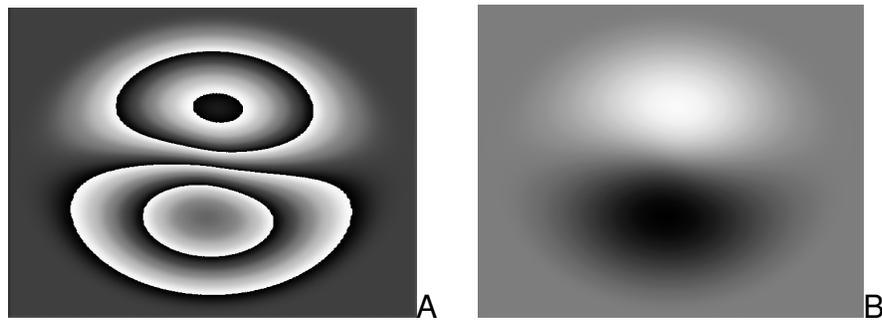


Figura 33: “Phase shifting” das franjas de *moiré*. A – Mapa de fases empacotadas. B – Modelo Digital Topográfico (MDT) da superfície virtual.

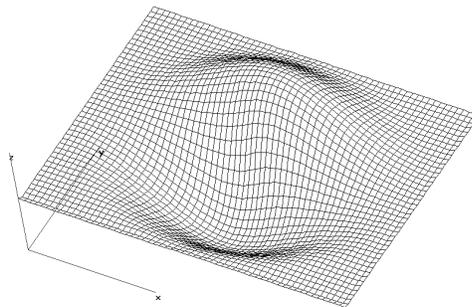


Figura 34: MDT por malhas de contorno da superfície virtual.

#### 4.1.1.2. Ensaios experimentais

Neste ensaio prático foi testada a aplicabilidade da técnica de *moiré* com deslocamento de fase, desenvolvida na fase anterior, em *moiré* de projeção aplicada a objetos reais, no caso uma calota esférica.

A Figura 35 mostra a imagem ( $I_c$ ) do retículo  $G_1$  projetada sobre a calota colocada sobre o plano de referência. As Figuras 36A, 36B, 36C e 36D mostram as imagens das retículo  $G_1$  ( $I_1$ ),  $G_2$  ( $I_2$ ),  $G_3$  ( $I_3$ ),  $G_4$  ( $I_4$ ), respectivamente, projetadas sobre o plano de referência. As Figuras 37A, 37B, 37C e 37D correspondem às franjas de *moiré* obtidas pela subtração das imagens  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_4$  pela  $I_c$ . As Figuras 38A, 38B, 38C e 38D, ilustram as mesmas imagens, porém filtradas, para a remoção das retículo, evidenciando as franjas de *moiré*. Essas imagens após tratadas pelo programa *RisingSun Moiré* geraram o MDT da calota. A Figura 39A mostra o MDT da calota em tons de cinza, onde as cores claras indicam regiões com cotas mais altas e as escuras indicam regiões mais baixas. A Figura 39B ilustra essa superfície através de linhas topográficas. Nota-se uma pequena saliência na lateral da calota, a qual foi captada pelo processo experimental, evidenciando a sensibilidade do método. A metodologia permitiu reconhecer picos e vales automaticamente, o que a torna muito interessante para ser aplicada em sistemas de seleção automatizados.

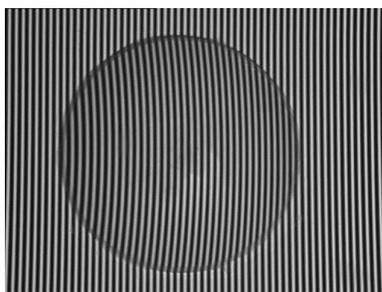
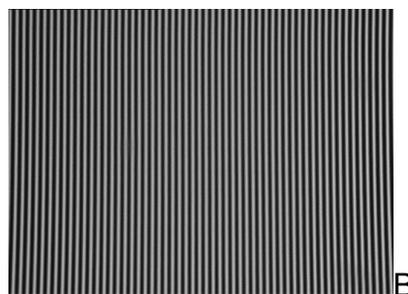
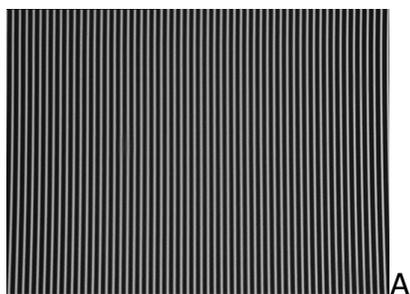


Figura 35: Retículo de  $G_1$ , projetada sobre o plano de referência com a calota ( $I_c$ ).



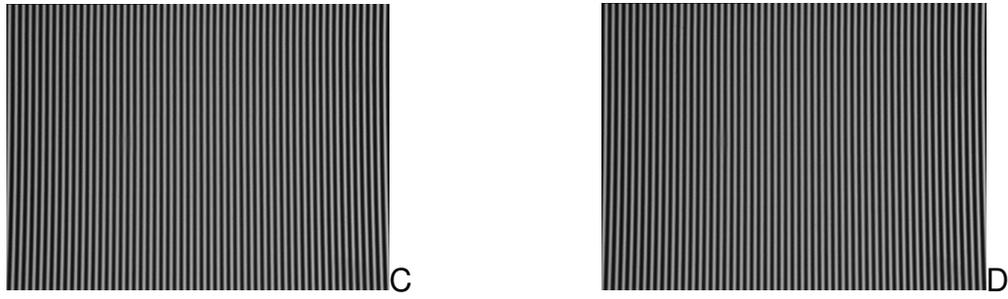


Figura 36: Imagens das retículo  $G_1$  (A),  $G_2$  (B),  $G_3$  (C) e  $G_4$  (D) projetadas sobre o plano de referência.

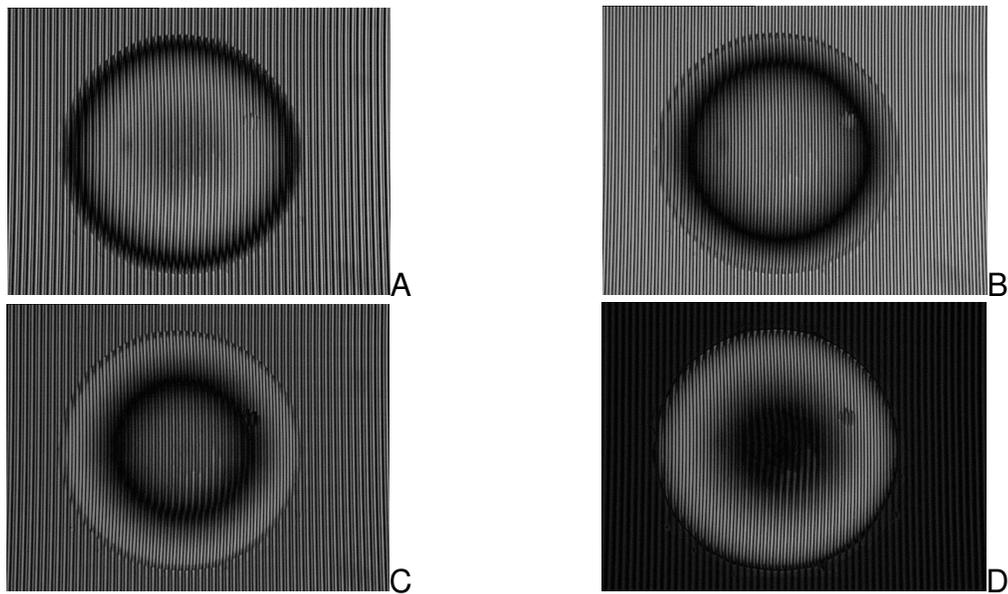


Figura 37: Franjas de *moiré* formadas pela diferença da imagem ( $I_c$ ) e as imagens retículo  $G_1$  (A),  $G_2$  (B),  $G_3$  (C) e  $G_4$  (D) projetadas sobre o plano de referência.

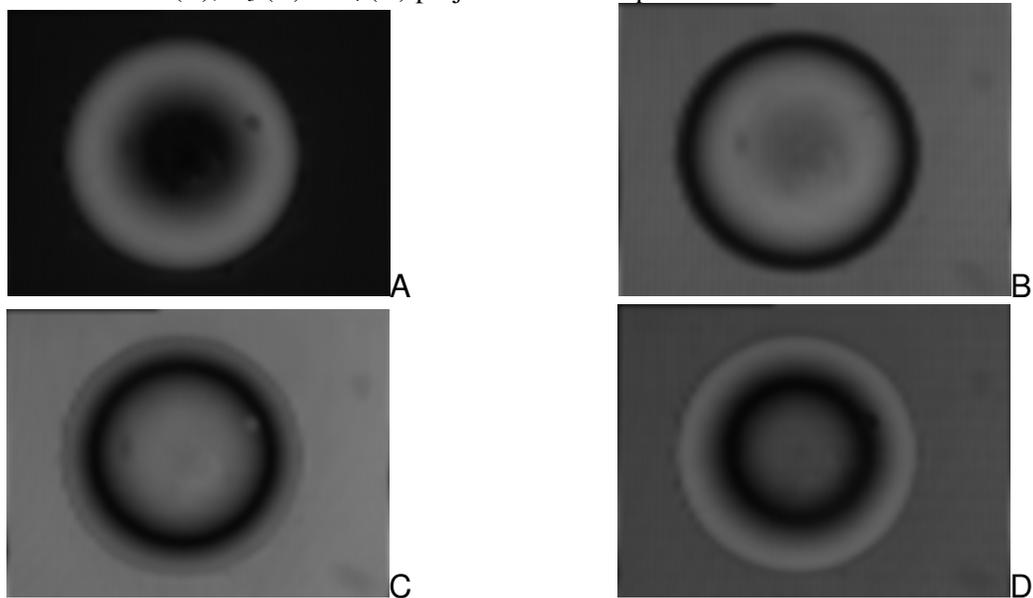


Figura 38: Franjas de *moiré* filtradas para a remoção dos retículos.

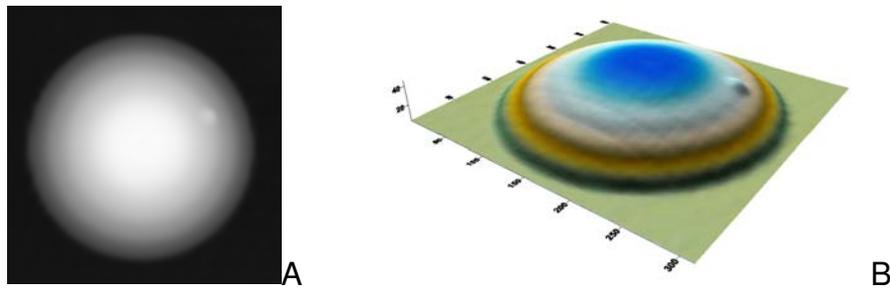


Figura 39: MDT da calota, em tons de cinza (A) e colorido com vista lateral (B).

A técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase mostrou que é possível gerar o MDT de um objeto, projetado apenas um retículo sobre este objeto e os outros retículos, defasados entre si de  $\frac{1}{4}$  de sua frequência sobre uma superfície de referência. Assim como outras técnicas baseadas no deslocamento de fase, ela apresenta grande sensibilidade a ponto de reconhecer a pequena saliência na superfície da calota. Tem ainda como vantagem o reconhecimento de picos e vales sem a necessidade de conhecimento prévio do objeto para a sua reconstituição topográfica, o que mostra a sua capacidade de gerar automaticamente os contornos topográficos de objetos. Diferentemente de outras técnicas baseadas no deslocamento de fase, ela necessita da aquisição de apenas uma imagem para gerar o MDT, uma vez que as imagens dos retículos projetados no plano de referência foram obtidas anteriormente e já estavam armazenadas no computador. Estas características permitem a sua utilização na inspeção de peças em linhas de produção, bem como na classificação e seleção de frutos e hortaliças.

#### 4.1.2. Filtragem ou remoção dos retículos

Uma vez que os programas de tratamento de imagens já possuem em seu *menu* filtros como Média e Gaussiano, nesta seção será apresentado o processo da Transformada Rápida de Fourier (FFT), que por não ser automático, demandou estudos para o aprendizado da técnica.

As Figuras 40A, 40B e 40C mostram as imagens das FFT dos retículos senoidais  $S_1$  (Figura 29A) e  $S_2$  (Figura 29B) e da franja de *moiré*  $S_R$  produzidas pela diferença entre os dois (Figura 29C). Já a Figura 41 mostra uma representação tridimensional da FFT da franja de *moiré* (Figura 29C) onde se destacam os três picos centrais, que são a amplitude (central) e os dois impulsos que correspondem às franjas de *moiré* produzidas.

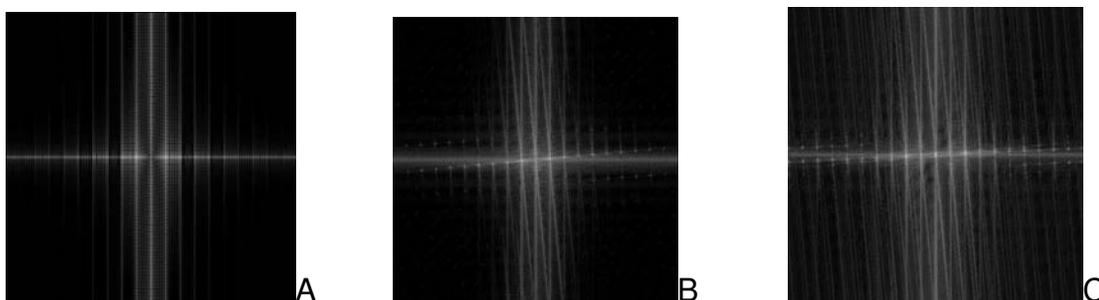


Figura 40: FFT dos retículos da Figura 30. A. Retículo  $S_1$ . B. Retículo  $S_2$ . C. Da franja de *moiré*  $S_1$  geradas pela diferença entre os dois retículos.

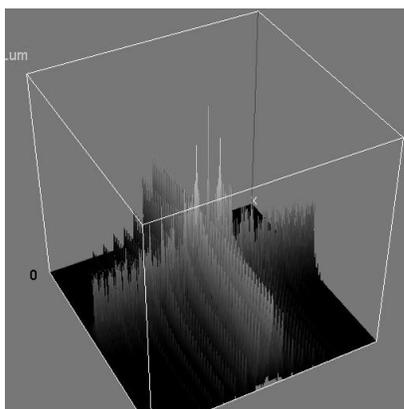


Figura 41: Imagem tridimensional da FFT das franjas de *moiré*.

Na Figura 42A vê-se a máscara binária (com valores “zero” e “um”) com as mesmas dimensões da imagem da FFT da franja de *moiré*. Foi atribuído o valor “um” à região central, em torno do impulso correspondente ao fenômeno de *moiré*, e “zero” ao restante da imagem. A Figura 42B mostra o resultado da multiplicação da FFT das franjas de *moiré* pela máscara binária, em que somente a região central que contém as informações sobre as franjas de *moiré* permanece e o resto das informações é apagado. A Figura 42C mostra que ao fazermos a transformada inversa de Fourier obteve-se a franja de *moiré* filtrada, isto é, com os retículos removidos.

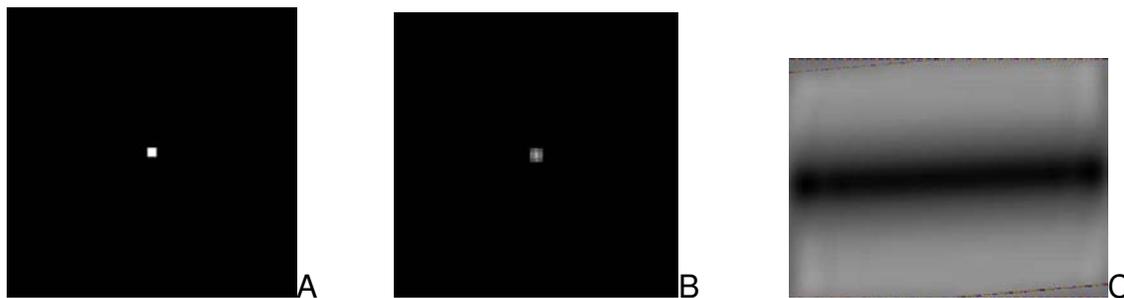


Figura 42: Imagem da Transformada de Fourier (B), cortada pela Máscara.(A). Franja de *moiré* obtida através da Transformada Inversa de Fourier (C).

As Figuras 43A e 43B mostram o MDT de um prisma triangular gerado por *moiré* de projeção com deslocamento de fase, no qual os retículos foram removidas com o *software ImageJ*, utilizando o filtro “Gaussiano”. O tempo médio de 10 repetições requerido para realizá-la foi de 0,1562 segundos.

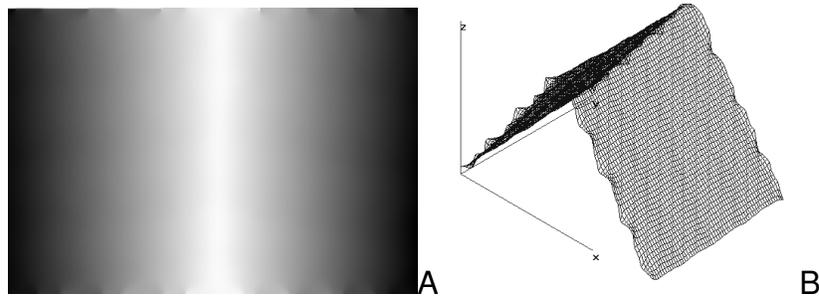


Figura 43: MDT de um prisma triangular gerado *moiré* de projeção, filtrado por filtro gaussiano, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno(B).

Observa-se que as extremidades do MDT do prisma estão deformadas, como se estivessem sido entortadas, causando erros na reconstituição da topografia. Isto é uma característica deste tipo de filtro, pois a filtragem não ocorre em *pixels* próximos à borda da imagem. A Figura 44A apresenta o perfil da segunda linha de cima superposta ao da linha central do prisma. Ela mostra uma discrepância muito grande entre os dois perfis. Já as Figuras 44B e 44C apresentam, respectivamente, os perfis das 10<sup>a</sup> e 20<sup>a</sup> linhas sobrepostas ao perfil da linha central, com pequeníssima discrepância, confirmando aquilo que pode ser observado nas Figuras 43A e 43B, de que o erro diminui à medida que se afasta das bordas.

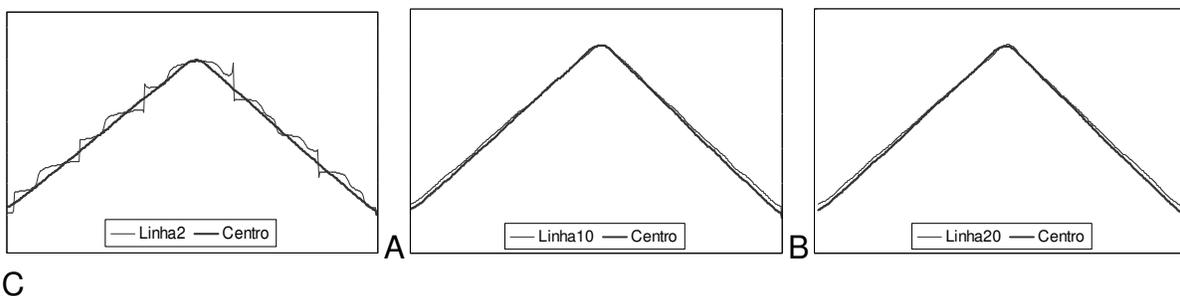


Figura 44: MDT de um prisma triangular gerado *moiré* de projeção, filtrado por filtro gaussiano, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno(B).

A Tabela 2 mostra as estatísticas das diferenças e a correlação entre linhas 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 e 50, do MDT do prisma (Figura 43A), a partir do topo, e a linha central. A amplitude e a média das diferenças diminuíram ao afastar-se da borda superior, e o valor do  $R^2$  aumentou, confirmando o que se observou na Figura 43, que este filtro causa deformação nas bordas do MDT. Observou-se também que a partir da 10<sup>a</sup> linha as estatísticas mantiveram-se praticamente constantes, mostrando que, a partir desta, as variações são devidas a causas aleatórias.

Tabela 2: Estatísticas das diferenças e a correlação entre as linhas de perfil 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 e 50 e a linha central de perfil da MDT.

	Linha 2	Linha 4	Linha 8	Linha 10	Linha 12	Linha 16	Linha 20	Linha 50
Amplitude	64	28	21	14	14	14	15	14
Média	-5,3033	-5,3616	-5,4247	-4,0164	-4,0630	-4,0685	-4,0794	-1,7370
DP	9,8320	6,7460	4,9657	3,4013	3,2633	3,1832	3,3700	2,7530
R <sup>2</sup>	0,9924	0,9960	0,9980	0,9997	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998

As Figuras 45A e 45B mostram o MDT de um prisma triangular gerado por *moiré* de projeção com deslocamento de fase, no qual os retículos foram removidas com o *software ImageJ*, utilizando o filtro média. O tempo médio de 10 repetições requerido para realizá-la foi de 0,1671 segundos.

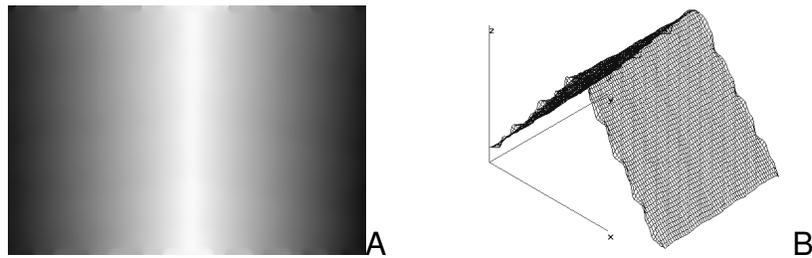


Figura 45: MDT de um prisma gerado *moiré* de projeção, filtrado por filtro média, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno (B).

Semelhantemente ao filtro Gaussiano, o MDT gerado a partir do filtro de Média apresenta as extremidades do prisma deformadas. A Figura 46A apresenta o perfil da segunda linha de cima superposta ao da linha central do prisma. Ela mostra uma discrepância muito grande entre os dois perfis, como se observa na Figura 45. Já as Figuras 46B e 46C apresentam, respectivamente, os perfis da 10<sup>a</sup> e 20<sup>a</sup> linhas sobrepostas ao perfil da linha central, em que o perfil destas linhas fica “liso”, porém a diferença com a linha central aumenta à medida que se aproxima da base.

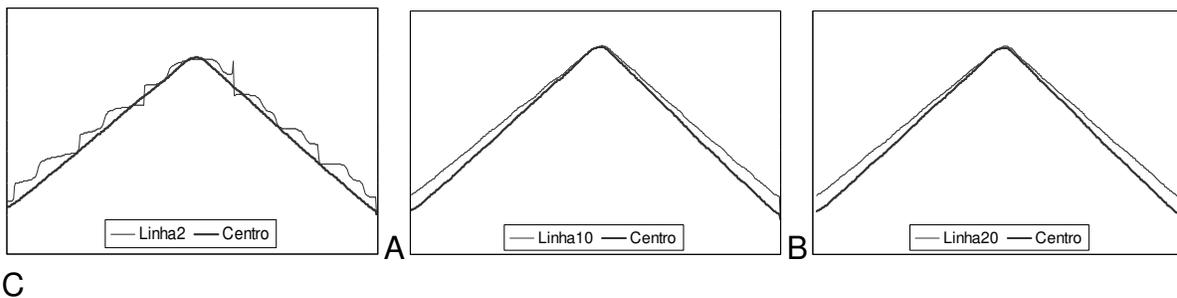


Figura 46: MDT de um prisma triangular gerado *moiré* de projeção, filtrado por filtro de média, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno(B).

A Tabela 3 mostra as estatísticas das diferenças e a correlação entre as linhas 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 e 50, do MDT do prisma (Figura 45A), a partir do topo, e a linha central. A amplitude e a média das diferenças diminuíram ao afastar-se da borda, e o valor do  $R^2$  aumentou, confirmando o que se observou na Figura 45, que este filtro causa deformação nas bordas superiores e inferiores MDT. Semelhantemente ao filtro Gaussiano, para o filtro de Média as estatísticas tenderam a estabilizar-se ao afastar-se da borda.

Tabela 3: Estatísticas das diferenças e a correlação entre as linhas de perfil 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 e 50 e a linha central de perfil da MDT.

	Linha 2	Linha 4	Linha 8	Linha 10	Linha 12	Linha 16	Linha 20	Linha 50
Amplitude	54	36	31	29	27	27	28	26
Média	-12,6175	-12,6521	-12,7534	-12,8767	-12,9562	-12,9479	-12,9425	-10,8466
DP	10,6381	9,2982	8,5133	7,8955	7,6333	7,5607	7,7692	7,2006
Correlação	0,9932	0,9959	0,9978	0,9993	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997

Já as Figuras 47A e 47B mostram o mesmo prisma, porém para a filtragem, também feita no *ImageJ*, utilizou-se o filtro FFT. Neste caso os erros foram sensivelmente reduzidos. Este filtro embora demande maior tempo computacional, com média de 1,6875 segundos, para 10 repetições, o que pode ser um problema em linhas de produção, em que as decisões têm que ser tomadas em tempo real, porém tem a seu favor maior precisão, principalmente na bordas.

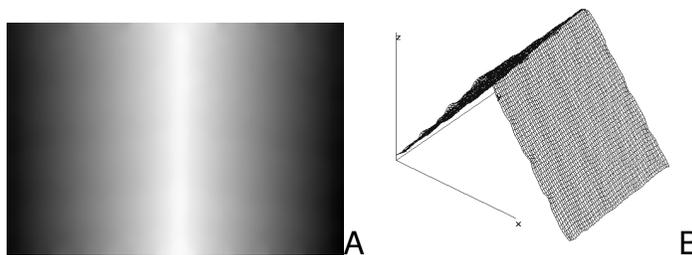
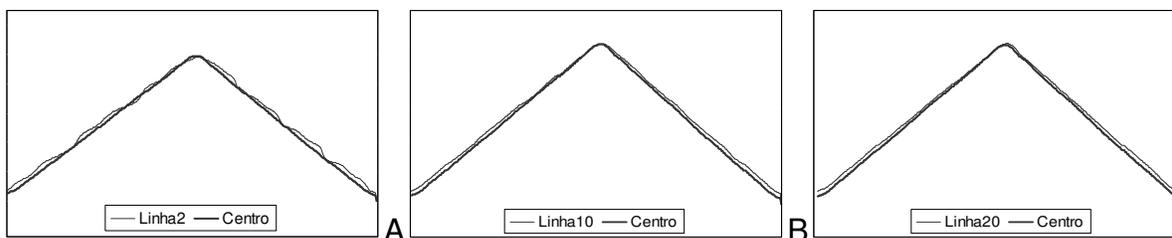


Figura 47: MDT da calota, filtrado por FFT, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno(B).

As Figuras 46A, 46B e 46C apresentam, respectivamente, os perfis da 2<sup>a</sup>, 10<sup>a</sup> e 20<sup>a</sup> linhas superiores superpostas ao da linha central do prisma. Observa-se um bom ajuste delas em relação à linha central. Tal fato é confirmado pela Tabela 4, onde as estatísticas das diferenças as linhas 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 e 50, a partir do topo com a linha central do prisma e a correlação destas linhas com a linha central são apresentadas. A amplitude e o Desvio Padrão das diferenças diminuíram ao afastar-se da borda, porém elas foram menores quando comparado aos outros dois filtros, confirmando o que se observou nas Figuras 47A e 47B. O valor do  $R^2$  aumentou, das bordas para o centro, porém com valores superiores àqueles obtidos com os outros filtros.



C  
 FIGURA 48: MDT de um prisma triangular gerado *moiré* de projeção, filtrado por filtro gaussiano, em tons de cinza (A) e através de malhas de contorno(B).

Tabela 4: Estatísticas das diferenças e a correlação entre as linhas de perfil 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 e 50 e a linha central de perfil da MDT.

	Linha 2	Linha 4	Linha 8	Linha 10	Linha 12	Linha 16	Linha 20	Linha 50
Amplitude	20	16	13	12	11	11	12	10
Média	-5,3306	-5,4000	-5,4137	-5,4466	-5,4931	-5,4986	-5,5096	-3,1671
DP	4,6195	3,8652	3,3128	2,9200	2,6969	2,5838	2,7302	2,0784
Correlação	0,9985	0,9991	0,9995	0,9996	0,9997	0,9998	0,9998	0,9999

Pode-se concluir que quando se usa o filtro FFT, o erro nas regiões das bordas se torna menor, porém o tempo gasto foi 10 vezes maior, dificultando, mas não impedindo, o seu uso em linhas de seleção, onde os cálculos têm que ser feitos em tempo real. Porém, nos três casos houve uma estabilização dos resultados a partir da 10<sup>a</sup> linha, mostrando que as primeiras linhas poderiam ser utilizadas como bordaduras, viabilizando o uso dos outros filtros.

O filtro Gaussiano e o filtro de média exigiram tempos computacionais 10 vezes menor quando comparados ao FFT e próximos entre si. Porém o primeiro apresentou, a partir da linha 10, menores diferenças próximo à base, como pode ser observado quando se comparam as Figuras 44B e C e as Figuras 44B e C, respectivamente; isto pode ser confirmado pelas menores amplitudes e desvio padrão, e maiores  $R^2$  (Tabelas 2 e 3).

#### 4.1.3. Correção de escala das cotas

Neste capítulo apresentam-se os resultados das duas equações utilizadas para corrigir a escala das cotas.

Através de rotina do SILAB/SIP gerou-se o MDT da superfície dos prismas e utilizou-se as equações para corrigir as cotas. A Figura 49 mostra o MDT de um dos prismas, onde apenas o eixo (cotas) foi corrigido. O resultado para todos os prismas é mostrado na Tabela 5.

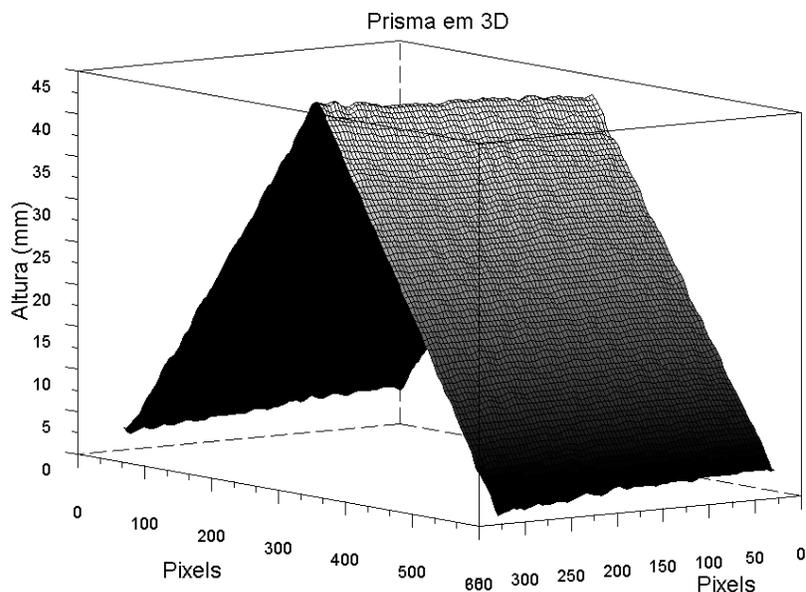


Figura 49: MDT do prisma.

Observa-se que os valores das alturas obtidos pelas duas equações foram maiores que os valores medidos. E que os valores obtidos pela Função 10 foram menores que os obtidos pela Função 11. As diferenças não foram constantes para as duas equações.

A Figura 50 mostra a variação da altura de cada prisma, medida e calculada por cada uma das equações. Observa-se que a variação da altura calculada pelas equações é constante entre si, tendendo a aumentar ligeiramente (superestimando) com o aumento das dimensões do prisma. Esta superestimação compromete a acurácia da técnica, criando um viés de 3,02mm para a Função 10 e 3,58mm para a Função 11. Optou-se por usar a Função 10 para calcular o fator de correção de cota, devido à sua simplicidade, aplicando este fator único a todos os casos.

Tabela 5: Resultado das alturas dos prismas pelas duas equações.

Cubo	Altura real (mm)	Função 10 ( $\Delta z$ )			Função 11 ( $\Delta z$ )		
		Altura (mm)	Diferença	Diferença%	Altura (mm)	Diferença	Diferença%
1	21,00	22,31	1,31	-6,24%	22,53	1,53	-7,29%
2	24,90	25,64	0,74	-2,97%	25,93	1,03	-4,14%
3	28,00	29,94	1,94	-6,93%	30,33	2,33	-8,32%
4	31,00	34,29	3,29	-10,61%	34,78	3,78	-12,19%
5	35,00	39,81	4,81	-13,74%	40,45	5,45	-15,57%
6	41,00	45,26	4,26	-10,39%	46,14	5,14	-12,54%
7	45,50	50,26	4,76	-10,46%	51,32	5,82	-12,79%
Média da diferença (viés)			3,02			3,58	

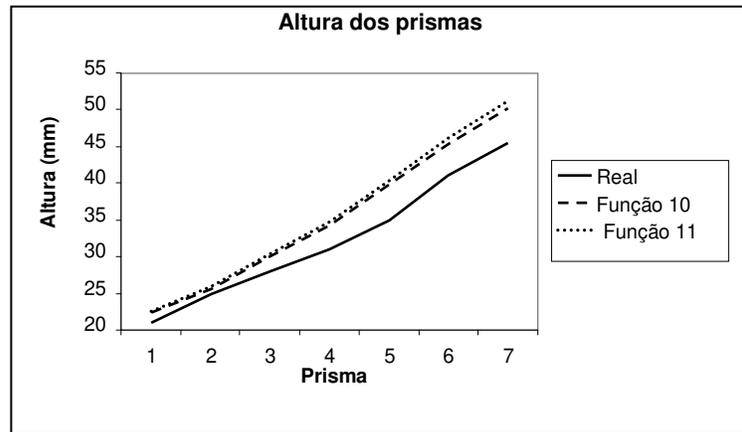


Figura 50: Variação da altura do prisma.

## 4.2. CONSTRUÇÃO DE MODELO DIGITAL TOPOGRÁFICO

Nesta seção são apresentados os MDT, de objetos simétricos e assimétricos, construídos pela metodologia proposta, isto é, técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase.

### 4.2.1. Modelos Digitais Topográficos de corpos simétricos

Para o desenvolvimento e teste da metodologia foram construídos MDTs de corpos simétricos.

As Figuras 51, 52 e 53 mostram os MDTs de um cubo visto a partir de uma de suas arestas, de um cilindro e de uma esfera. As Figuras 51A, 52A e 53A apresentam o retículo projetado nas superfícies dos respectivos objetos. Os seus MDTs, em tons de cinza, onde as partes claras representam as regiões de maior cota e as escuras de menor cota, são apresentados nas Figuras 51B, 52B e 53B. E as suas representações tridimensionais por malhas de contorno nas Figuras 51C, 52C e 53C.

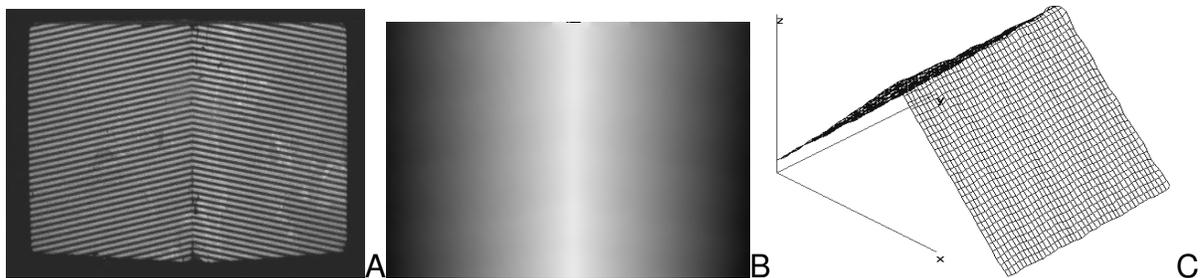


Figura 51: Construção do MDT de um cubo visto de uma das arestas. Retículo projetado sobre o cubo (A). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C).

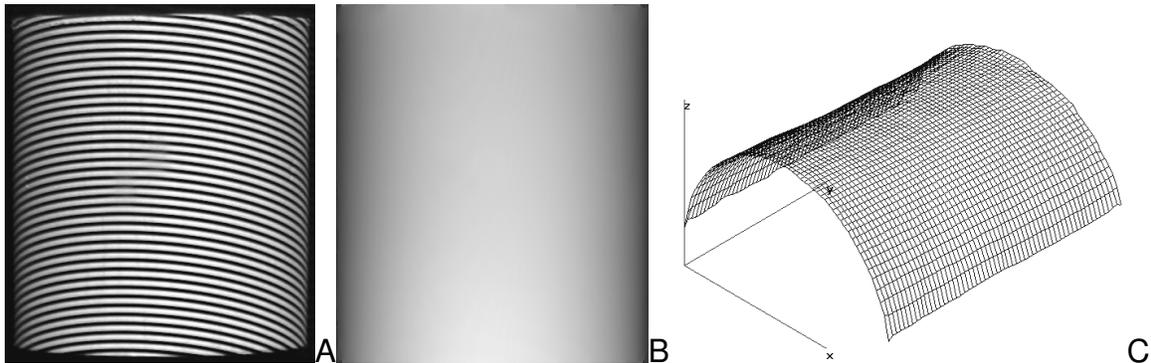


Figura 52: Construção do MDT de um cilindro. Retículo projetado sobre o cilindro (a). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C).

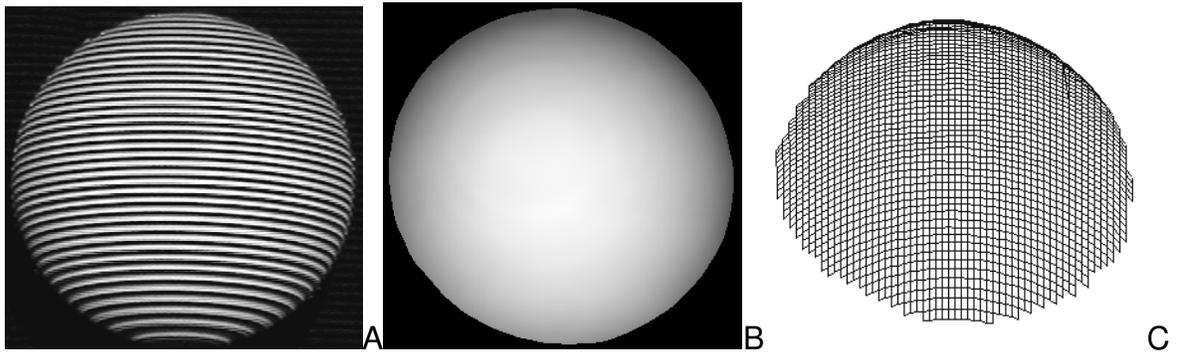


Figura 53: Construção do MDT de uma esfera. Retículo projetado sobre a esfera (A). mdt em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C).

A metodologia foi capaz de construir MDTs de objetos simétricos, sem muitas dificuldades, o que se deveu ao fato deles estar pintado com tinta fosca, o que não permitiu o aparecimento de regiões com reflexo que poderiam causar erros.

#### 4.2.2. Modelos Digitais Topográficos de corpos assimétricos (órgãos vegetais)

O próximo passo foi gerar MDTs de objetos não simétricos, isto de frutas e hortaliças, in natura, sem o recobrimento com tintas difusas.

Num primeiro momento aplicamos a metodologia a frutas e hortaliças com superfícies difusas ou semidifusas, que causam pouco ou nenhum reflexo da luz incidente.

A Figura 54 mostra o MDT de um tubérculo de batata (*Solanum tuberosum*). A Figura 54A apresentam o retículo projetado nas superfícies do tubérculo. O seu MDT, em tons de cinza, é apresentado na Figura 54B. E a sua representação tridimensional por malhas de contorno na Figura 54C.

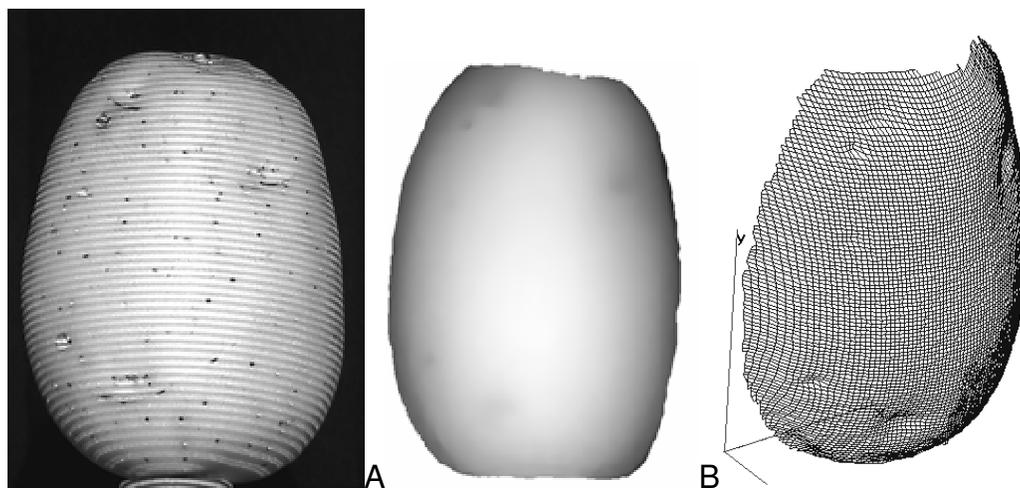


Figura 54. Construção do MDT de um tubérculo de batata (*Solanum tuberosum*). retículo projetado sobre o tubérculo (A). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C).

A Figura 55 mostra o MDT de um fruto da macieira (*Malus spp*), variedade Granny Smith. A Figura 55A apresenta o retículo projetado nas superfícies da fruta. O seu MDT, em tons de cinza, é apresentado na Figura 55B. E a sua representação tridimensional por malhas de contorno na Figura 55C.

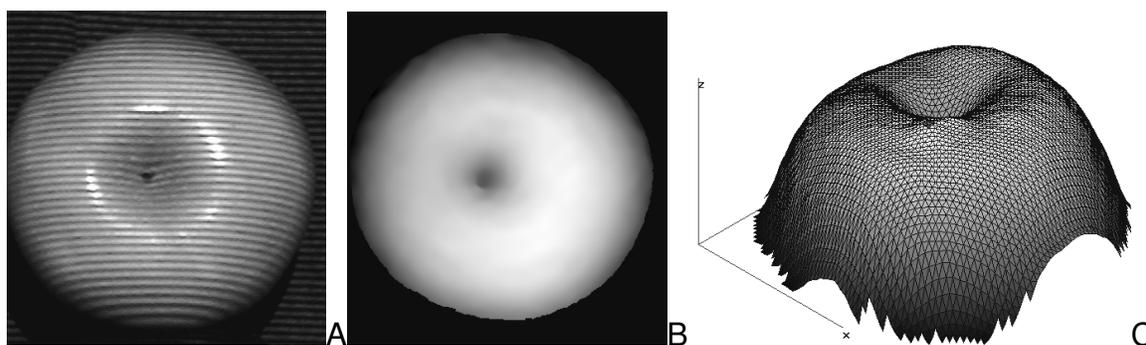


Figura 55: Construção do MDT de um fruto da macieira (*Malus spp*). retículo projetado sobre a fruta (A). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C).

A Figura 56 mostra o MDT de um fruto da pereira (*Pirus communis*), variedade Willians. A Figura 56A apresenta o retículo projetado nas superfícies da fruta. O seu MDT, em tons de

cinza, é apresentado na Figura 56B e a sua representação tridimensional por malhas de contorno na Figura 56C.

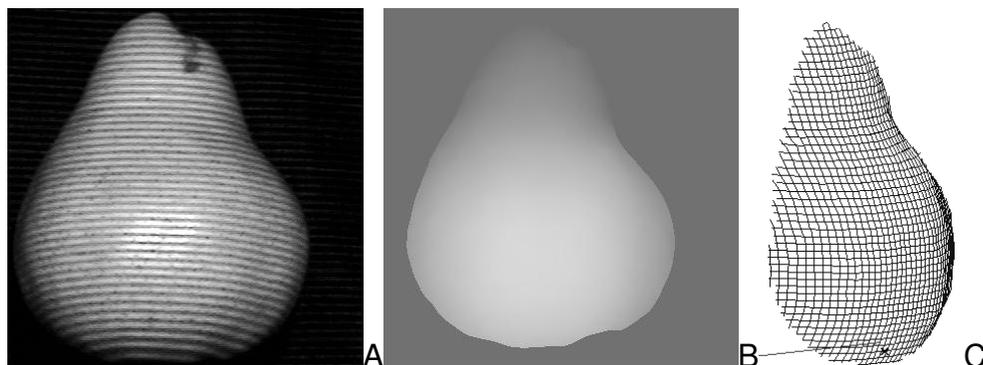


Figura 56. Construção do MDT de um fruto da pereira (*Pirus communis*). retículo projetado sobre a fruta (A). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C).

A Figura 57 mostra o MDT de um fruto da laranjeira (*Citrus sinensis*). A Figura 57A apresentam o retículo projetado nas superfícies da fruta. O seu MDT, em tons de cinza, é apresentado nas Figuras 57B. E a sua representação tridimensional por malhas de contorno nas Figuras 57C.

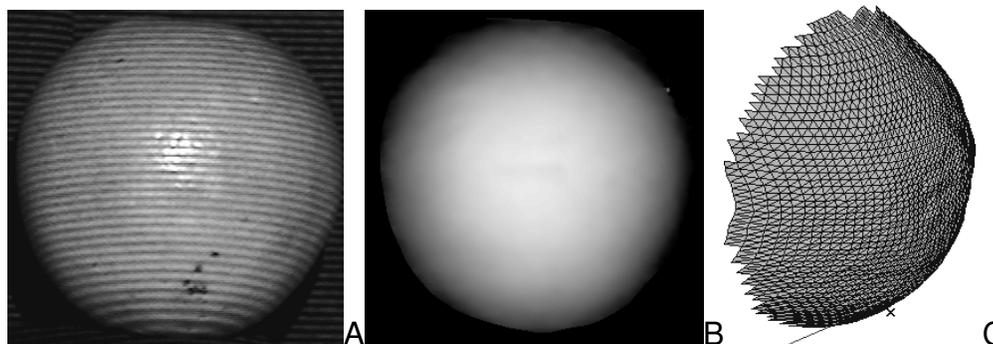


Figura 57. Construção do MDT de um fruto da laranjeira (*Citrus sinensis*). retículo projetado sobre a fruta (A). MDT em tons de cinza (B) e a sua representação tridimensional por malhas de contorno (C).

O reflexo da luz projetada na casca da fruta ou tubérculo pode causar erros ou distorção no MDT. Por isso aqueles que têm a casca difusa apresentam maior facilidade para construir o MDT. Aquelas que têm a casca com reflexão especular exigem um tratamento mais elaborado da imagem, outra opção, a ser testada nos próximos trabalhos é capturar as imagens utilizando câmeras com lentes polarizadas.

### 4.3. METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE FRUTAS E HORTALIÇAS

Nesta parte do trabalho propomos esta técnica como metodologia para a seleção de frutas e hortaliças. Não foi feita a correção das cotas (eixo z) do MDT para unidade métrica, deixando-a em tons de cinza, que variam de 0 a 255, uma vez que para esta aplicação a graduação em tons de cinza é suficiente para selecionar este tipo de material.

#### 4.3.1. Ensaio da metodologia com objetos com forma regular.

A metodologia foi testada com três objetos de forma regular, um cilindro, uma esfera e um cubo.

##### 4.3.1.1. Ensaio com Cilindro

O resultado do teste do cilindro é mostrado na Figura 58. A Figura 58A mostra a imagem de um cilindro, a Figura 51B mostra a imagem as franjas projetadas na sua superfície do cilindro e a região de interesse (RDI) demarcada, a Figura 58C mostra o MDT por malhas de contorno da RDI, e a Figura 58D mostra a imagem do MDT da RDI com as linhas de perfil traçadas.

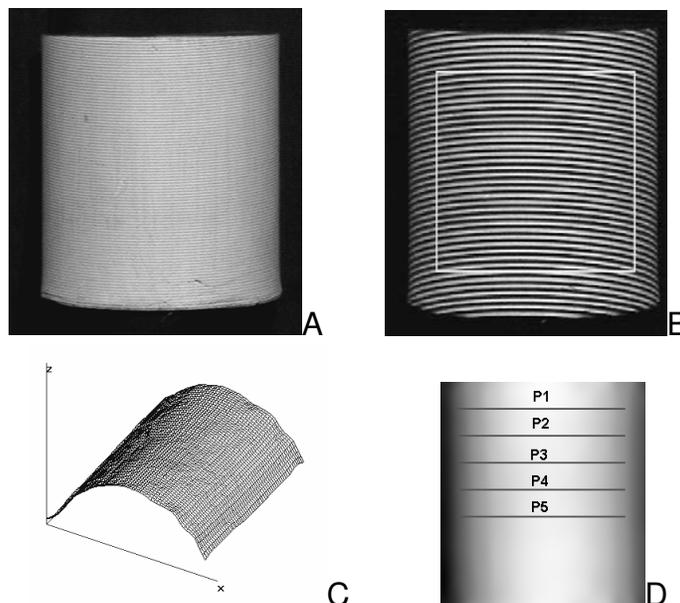


Figura 58: A. Imagem do cilindro. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. MDT por malhas de contorno da RDI. D. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI.

A Figura 59 mostra que houve altíssima coincidência entre perfil P5 (linha contínua) e o perfil teórico (linha tracejada) gerado pela função de ajuste, e que a diferença entre ambas (linha pontilhada) foi baixa. O ajuste foi muito bom para todos os perfis, exibindo  $R^2$  acima de 0,99 (Tabela 6), conforme comprovam os baixos valores da média, máximo e DP das diferenças entre o perfil e a curva ajustada (Tabela 7). Mostrando que para superfícies curvas, a função polinomial de segundo grau ajusta-se às linhas de perfil geradas a partir do MDT.

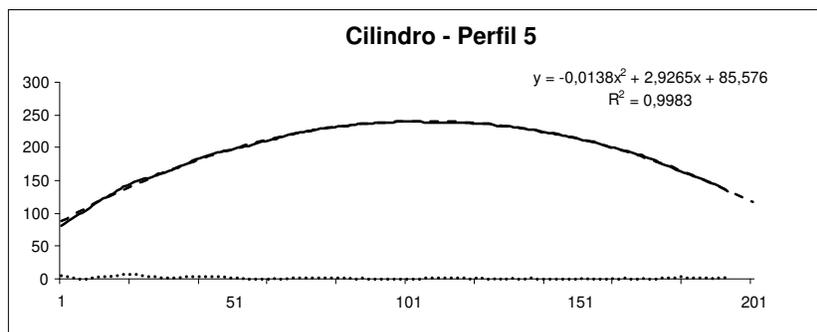


Figura 59: Perfil do cilindro, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.

Tabela 6: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil do cilindro e seu coeficiente de correlação.

Perfil	Função	$R^2$
1	$y = -0,014x^2 - 2,8914x + 100,57$	0,9963
2	$y = -0,0139x^2 + 2,861x + 97,52$	0,995
3	$y = -0,0138x^2 + 2,8626x + 92,511$	0,9958
4	$y = -0,0135x^2 + 2,9265x + 90,385$	0,9969
5	$y = -0,0132x^2 + 2,9265x + 85,576$	0,9983

Tabela 7: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada.

Perfil	Média	Máximo	DP
	(Tons de cinza)		
1	3,04	7,82	1,57
2	2,76	6,56	1,68
3	2,28	8,07	1,95
4	2,28	7,52	1,66
5	1,63	7,44	1,52

### 4.3.1.2. Ensaio com Esfera

A Figura 60 mostra o teste com a esfera, sendo a Figura 60A a imagem da esfera, a Figura 60B as franjas projetadas na esfera e com a região de interesse (RDI) demarcada, a Figura 60C o MDT por malhas de contorno da RDI, e a Figura 60D o MDT em tons de cinza do da RDI com as linhas de perfil marcadas.

A Figura 61 indica que houve alta coincidência entre o perfil P5 (linha contínua) e o perfil teórico (linha tracejada) gerado pela função de ajuste, e que a diferença entre ambas (linha pontilhada) foi baixa. O ajuste foi muito bom para todos os perfis, exibindo  $R^2$  acima de 0,98 (Tabela 8), conforme comprovam os baixos valores para a média, máximo e DP das diferenças entre o perfil e a curva ajustada (Tabela 9).

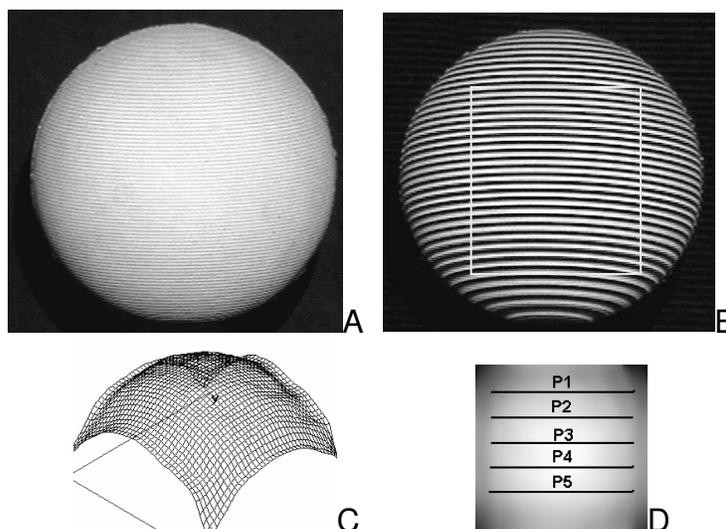


Figura 60: A. Imagem da esfera. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. Topografia da RDI. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI.

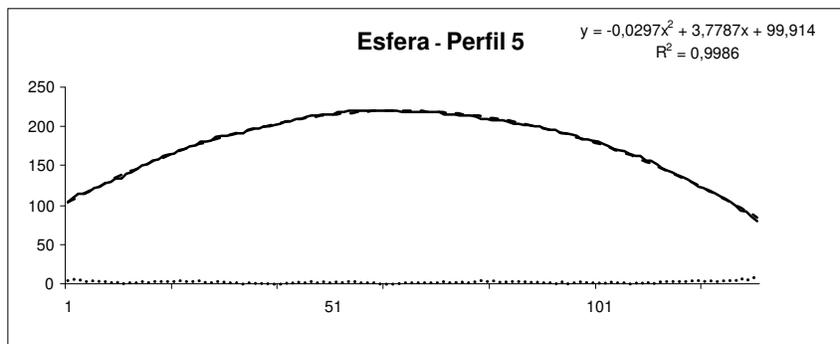


Figura 61: Perfil da esfera, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.

Tabela 8: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil e seu coeficiente de correlação.

Perfil	Função	R <sup>2</sup>
1	$y = -0,0167x^2 + 2.0419x + 134.39$	0,988
2	$y = -0.0139x^2 + 1.6737x + 181.97$	0,9902
3	$y = -0.0141x^2 + 1.7697x + 194.33$	0,9935
4	$y = -0,0298x^2 + 3.7297x + 135.98$	0,9921
5	$y = -0,0297x^2 + 3.7787x + 99.914$	0,9986

Tabela 9: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada da esfera.

Perfil	Média	Máximo	DP
	(Tons de cinza)		
1	2,26	6,13	1,54
2	1,66	4,40	1,25
3	1,26	5,19	1,43
4	3,65	8,69	2,17
5	2,40	9,21	1,52

#### 4.3.1.3. Ensaio com Cubo

Aplicamos a técnica a um cubo (Figura 62) com o intuito de mostrar uma contraexemplo, pois frutas e verduras com arestas são pouco comuns. A Figura 62A mostra a imagem de um cubo, com a sua aresta voltada para o observador, na Figura 62B, vê-se as franjas projetadas no cubo e a RDI demarcada, e na Figura 62C o MDT por malhas de contorno da RDI, já na Figura 62D o MDT da RDI com as linhas de perfil traçadas.

A Figura 63 indica que houve baixa coincidência entre o perfil P2 (linha contínua) e o perfil teórico (linha tracejada) gerado pela função de ajuste, e que a diferença entre ambas (linha pontilhada) foi mais alta do que para o cilindro e a esfera. O ajuste não foi tão bom quanto nos casos anteriores, com todos os R<sup>2</sup> abaixo de 0,94 (Tabela 10), como comprovam os valores mais altos para a média, máximo e DP das diferenças entre o perfil e a curva ajustada (Tabela 11).

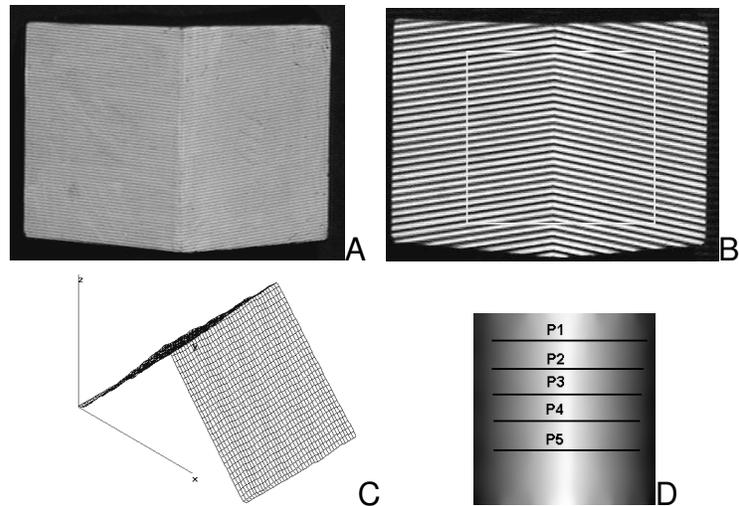


Figura 62: A. Imagem de um cubo. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. Topografia da RDI. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI.

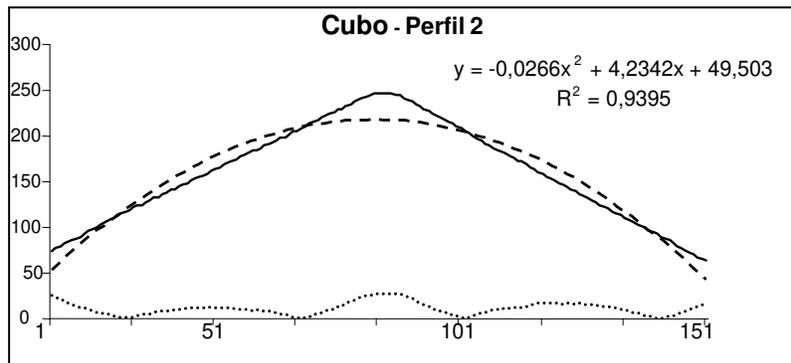


Figura 63: Perfil do cubo, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.

Tabela 10: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil e seu coeficiente de correlação.

Perfil	Função	$R^2$
1	$y = -0,0266x^2 + 4,2471x + 49,072$	0,9386
2	$y = -0,0266x^2 + 4,2342x + 49,503$	0,9395
3	$y = -0,0265x^2 + 4,2213x + 47,566$	0,9395
4	$y = -0,0541x^2 + 8,5957x - 160,34$	0,9352
5	$y = -0,0266x^2 + 4,2351x + 45,938$	0,936

Tabela 11: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial de uma esfera.

Perfil	Média	Máximo	DP
	(Tons de cinza)		
1	11,43	29,67	6,94
2	11,35	28,31	6,87
3	11,32	30,39	7,05
4	23,94	30,19	14,6
5	11,70	29,64	7,09

Para perfis contínuos, como é caso da maioria das frutas e verduras, há um ajuste muito bom destes com as curvas polinomiais de segunda, mostrado pelo alto  $R^2$ ; já quando existem discontinuidades nestes perfis, como exemplificado pela aresta do cubo, o ajuste não é tão bom, como nos mostra um  $R^2$  mais baixo. Isto indica que as curvas polinomiais de segunda, podem reconhecer discontinuidades causadas por danos mecânicos ou má formação na superfície de deste tipo de material biológico, e que o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) pode ser usado como parâmetro para seleção na maioria das frutas e legumes.

#### 4.3.2. Ensaio com produtos agrícolas.

A mesma metodologia foi utilizada identificar frutos e hortaliças sem defeitos e defectivos, isto é, mal formados ou que sofreram danos mecânicos.

##### 4.3.2.1. Fruto de tomateiro (*Lycopersicon esculentum*) íntegro.

A Figura 64A mostra a imagem de um fruto de tomateiro (*Lycopersicon esculentum*) sem defeito, isto é, considerado dentro do padrão. A Figura 64B a mostra as franjas projetadas na sua superfície e RDI demarcada, e na Figura 64C o MDT por malhas de contorno da RDI. Já a figura 64D o MDT em tons de cinza da RDI com as linhas de perfil marcadas. A Figura 65 indica que houve alta coincidência entre o perfil P4 (linha contínua) e o perfil gerado pela função (linha tracejada) e que a diferença entre ambas (linha pontilhada) foi baixa à semelhança do cilindro e da esfera. O ajuste foi tão bom quanto nestes casos, com todos os  $R^2$  abaixo de 0,989 (Tabela 12). Embora os valores para a média e valores máximos sejam mais altos que para o cilindro e a esfera, contudo para o DP das diferenças entre o perfil e a curva ajustada estão próximos a estes casos (Tabela 13).

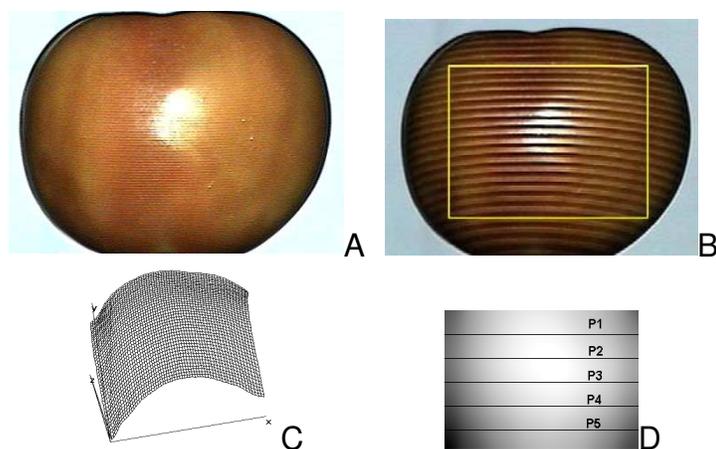


Figura 64: A. Imagem do tomate salada. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. MDT por malhas de contorno da RDI. D. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI.

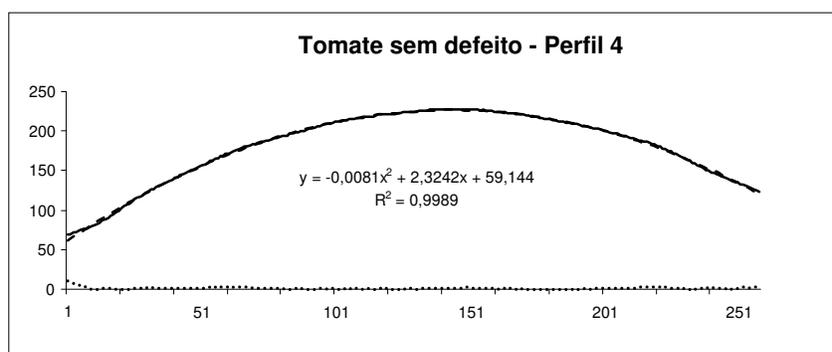


Figura 65: Perfil do tomate, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.

Tabela 12: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil e seu coeficiente de correlação.

Perfil	Função	R <sup>2</sup>
1	$y = -0,0076x^2 - 2,0706x + 99,32$	0,9898
2	$y = -0,0073x^2 + 2,0507x + 105,92$	0,9947
3	$y = -0,0075x^2 + 2,1675x + 88,959$	0,9984
4	$y = -0,0081x^2 + 2,3242x + 59,144$	0,9989
5	$y = -0,0088x^2 + 2,5127x + 19,302$	0,9985

Tabela 13: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada de uma esfera.

Perfil	Média	Máximo	DP
	(Tons de cinza)		
1	3,47	8,76	2,07
2	2,46	8,92	1,62
3	1,73	5,04	1,31
4	1,44	10,86	1,25
5	2,38	14,70	1,76

#### 4.3.2.2. Fruto de tomateiro (*Lycopersicon esculentum*) defeitivo.

As Figuras 66A, B, C e D mostram respectivamente, um fruto de tomateiro (*Lycopersicon esculentum*), defeitivo e, portanto fora de padrão, encontrado em gôndola de supermercado, a sua imagem com as franjas projetadas e com a região de interesse (RDI) demarcada, o MDT por malhas de contorno da RDI e MDT, em tons de cinza da RDI com as linhas de perfil marcadas. A Figura 67 mostra que houve baixa coincidência entre o perfil P3 (linha contínua) e o perfil gerado pela função (linha tracejada) e que a diferença entre ambas (linha pontilhada) foi alta quando comparada com o fruto sem defeito. O ajuste não pode ser considerado bom, pois valores de  $R^2$  variaram de 0,91 para o perfil P1, até 0,10 para o perfil P3 (Tabela 14). Os valores da média, vapores máximos e DP da diferença entre os perfis e as curvas de tendência são altos, mostrando que a função não conseguiu acompanhar o perfil defeituoso (Tabela 15). Para o fruto em estudo o baixo valor do  $R^2$ , inferior a 0,91, indica que o mesmo tem forma fora do padrão e, portanto deve ser rejeitado.

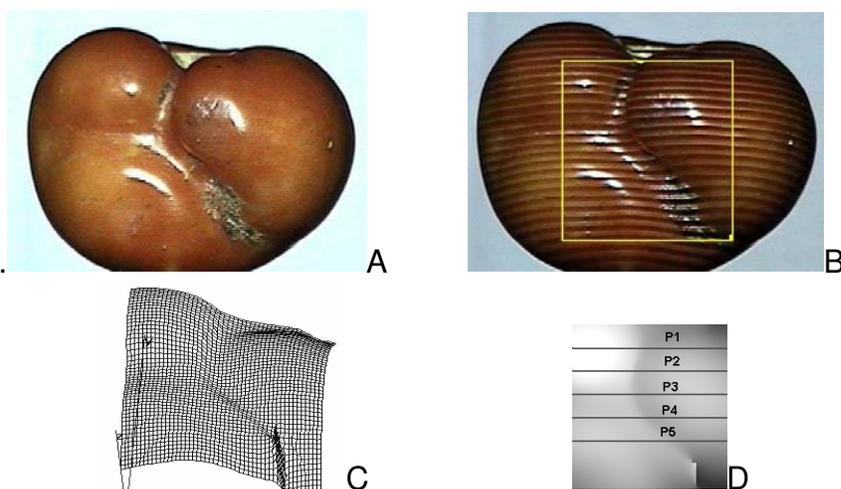


Figura 66 A. Imagem do tomate com defeito. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. MDT por malhas de contorno da RDI. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI.

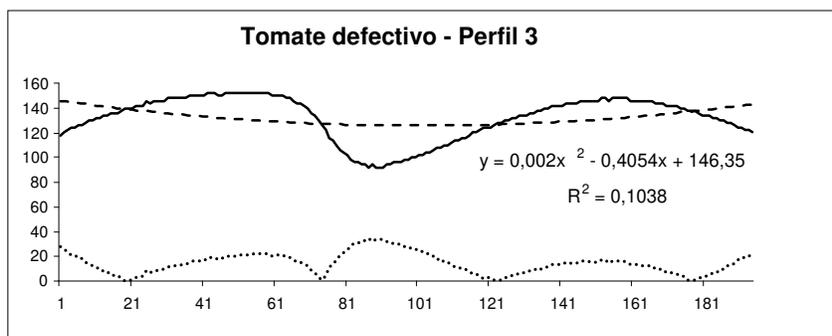


Figura 67. Perfil do fruto de tomateiro (*Lycopersicon esculentum*) defeitivo, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.

Tabela 14: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil de seu coeficiente de correlação.

Perfil	Função	R <sup>2</sup>
1	$y = 0,0035x^2 - 2,0173x + 289,72$	0,9066
2	$y = 0,0048x^2 - 1,6552x + 259,39$	0,7845
3	$y = 0,002x^2 - 0,4054x + 146,35$	0,1038
4	$y = 0,0026x^2 - 0,654x + 149,02$	0,3534
5	$y = -0,002x^2 - 0,1814x + 150,93$	0,9003

Tabela 15: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada de uma esfera.

Perfil	Média	Máximo	DP
	(Tons de cinza)		
1	20,11	55,32	13,62
2	19,07	49,38	11,81
3	14,45	34,27	8,35
4	12,52	29,49	7,34
5	8,10	22,93	6,09

A técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase mostrou-se capaz de identificar regiões deformadas devido à má formação em frutos do tomateiro.

#### 4.3.2.3. Fruto de goiabeira (*Psidium guajava* L.) com injúria mecânica.

As Figuras 68A, B, C e D mostram respectivamente, um fruto de goiabeira (*Psidium guajava* L.) lesionado por golpe mecânico, encontrada em gôndola de supermercado, a mesma fruta com as franjas projetadas e com a RDI demarcada, o MDT por malhas de contorno da RDI e MDT em tons de cinza da RDI com as linhas de perfil marcadas. A Figura 63 indica que houve baixa coincidência entre perfil P4 (linha contínua) e o perfil gerado pela função (linha tracejada), e que a diferença entre ambas (linha pontilhada) foi alta quando comparada ao cilindro e à esfera. Os valores de R<sup>2</sup> variaram de 0,98 para o perfil P1, até 0,28 para o perfil P4 (Tabela 16). O alto valor de R<sup>2</sup> para o perfil P1 é explicado pelo mesmo encontrar-se na extremidade da lesão, exibindo, portanto, um sulco mais raso. Já o perfil P4, por encontrar-se na parte mais profunda da lesão exibiu um menor R<sup>2</sup>. Os valores da média, valores máximos e DP da diferença entre os perfis e as curvas acompanham essa tendência (Tabela 17).

Foi realizado o mesmo procedimento para as outras quatro faces ou lados do mesmo fruto. A Figura 70 indica que houve alta coincidência entre o perfil P3 da face 3 (linha contínua) e o

perfil gerado pela função (linha tracejada) e que a diferença entre ambas (linha pontilhada) foi muito baixa. Os valores de  $R^2$  permaneceram todos acima de 0,99 (Tabelas 18, 19 e 12), mostrando que ele não foi afetado pela rugosidade característica da casca do fruto.

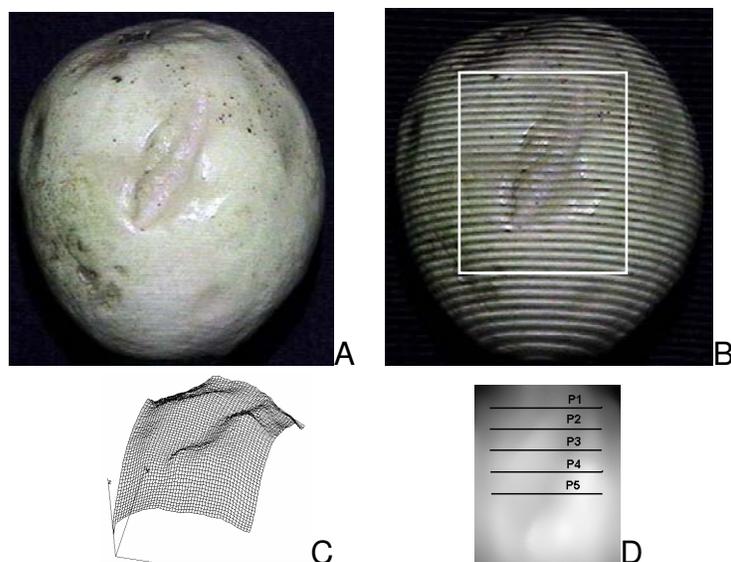


Figura 68. A, imagem do fruto de goiabeira (*Psidium guajava L.*). B, franjas projetadas com RDI demarcada. C, topografia da RDI. D, linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI.

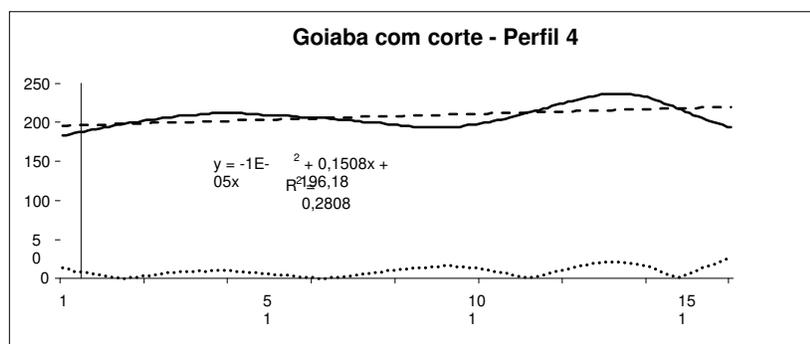


Figura 69. Perfil do fruto de goiabeira, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.

Tabela 16: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil e seu coeficiente de correlação.

Perfil	Função	$R^2$
1	$y = -0,0071x^2 + 1,087x + 125,1$	0,9766
2	$y = -0,0067x^2 + 0,9897x + 155,24$	0,8183
3	$y = 0,0042x^2 - 0,5586x + 174,61$	0,4959
4	$y = 0,00001x^2 - 0,1814x + 196,18$	0,2808
5	$y = -0,0018x^2 - 0,0287x + 200,29$	0,6267

Tabela 17: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada de uma esfera.

Perfil	Média	Máximo	DP
	(Tons de cinza)		
1	2,02	6,32	1,65
2	5,04	15,21	4,34
3	8,17	20,95	5,73
4	9,34	26,05	6,01
5	7,92	23,78	5,50

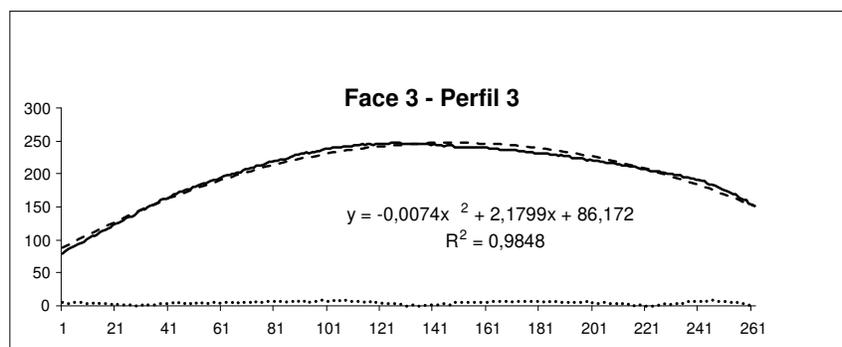


Figura 70. Perfil do fruto de goiabeira (*Psidium guajava* L.), curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.

Tabela 18: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para os perfis da face 2 do fruto de goiabeira (*Psidium guajava* L.) e seu coeficiente de correlação.

Perfil	Função	R <sup>2</sup>
1	$y = -0,0073x^2 + 1,9232x + 25,048$	0,9974
2	$y = -0,0068x^2 + 2,0266x + 32,572$	0,9908
3	$y = -0,0066x^2 + 2,0133x + 44,676$	0,9955
4	$y = -0,0068x^2 + 2,0131x + 47,561$	0,9966
5	$y = -0,0066x^2 + 1,8181x + 54,773$	0,9965

Tabela 19: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para os perfis da face 3 do fruto de goiabeira e seu coeficiente de correlação.

Perfil	Função	R <sup>2</sup>
1	$y = -0,0086x^2 + 2,2033x + 66,836$	0,9974
2	$y = -0,0085x^2 + 2,4567x + 66,852$	0,9934
3	$y = -0,0074x^2 + 2,1799x + 86,172$	0,9948
4	$y = -0,0072x^2 + 2,0653x + 90,025$	0,9951
5	$y = -0,0073x^2 + 1,8817x + 90,777$	0,9913

Tabela 20: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para os perfis da face 4 do fruto da goiabeira e seu coeficiente de correlação.

Perfil	Função	R <sup>2</sup>
1	$y = -0,0078x^2 + 2,057x + 60,064$	0,9916
2	$y = -0,00735x^2 + 2,1681x + 68,172$	0,9907
3	$y = -0,0071x^2 + 2,156x + 80,994$	0,9953
4	$y = -0,0072x^2 + 2,1493x + 84,325$	0,9965
5	$y = -0,0071x^2 + 1,942x + 92,03$	0,9966

A técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase mostrou-se capaz de identificar regiões deformadas devido a danos mecânicos em frutos da goiabeira.

#### 4.3.2.4. Batata (*Solanum tuberosum L.*) com injúria mecânica. Primeiro caso.

As Figuras 71A, B, C e D mostram a região de interesse (RDI) de uma batata (*Solanum tuberosum L.*) lesionada por corte, sendo respectivamente imagem da batata, a mesma imagem com as franjas projetadas, a imagem da topográfica, e a imagem do modelo digital Tridimensional (MDT) da RDI com as linhas de perfil marcadas. A linha de perfil P1 se encontra fora da área lesionada e a P2 dentro da área lesionada. A Figura 72 mostra que para o perfil P1 (linha contínua) houve alta coincidência com o perfil gerado pela função (linha tracejada) e que a diferença entre ambas (linha pontilhada) foi baixa, com R<sup>2</sup> de 0,99 (Tabela 16), comparável às do cilindro e da esfera. Os valores da média, valores máximos e DP da diferença entre este perfil e a curva são baixos, mostrando que houve uma alta correlação entre ambos (Tabela 20). A Figura 73 mostra que o perfil real P2 (linha contínua) teve pouca coincidência com o perfil gerado pela função (linha tracejada) e que a diferença entre ambas (linha pontilhada) foi alta, com R<sup>2</sup> acima de 0,37 (Tabela 21), comparável às do fruto de tomateiro lesionado. Os valores da média, valores máximos e DP da diferença entre esse perfil e a curva possuem valores altos, indicando que houve uma baixa correlação entre ambos (Tabela 22). Isso indica que batatas que possuem R<sup>2</sup> acima de 0,95 podem ser aceitas como dentro do padrão.

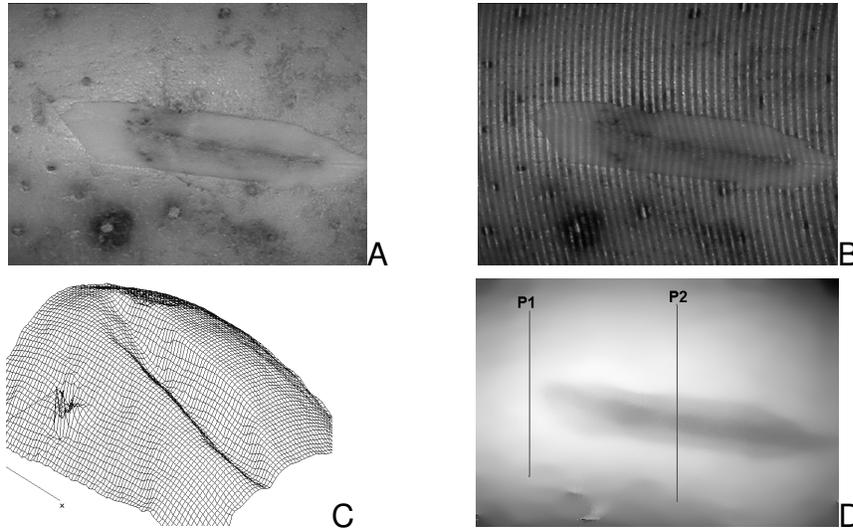


Figura 71. A. Imagem da batata. B. Franjas projetadas com RDI demarcada. C. Topografia da RDI. D. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI.

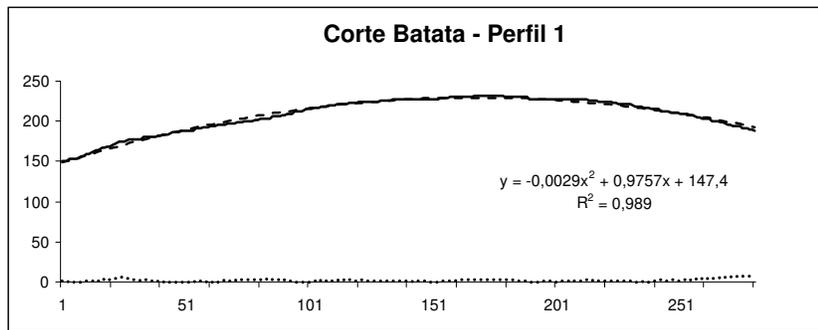


Figura 72. Perfil da batata fora da área lesionada, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.

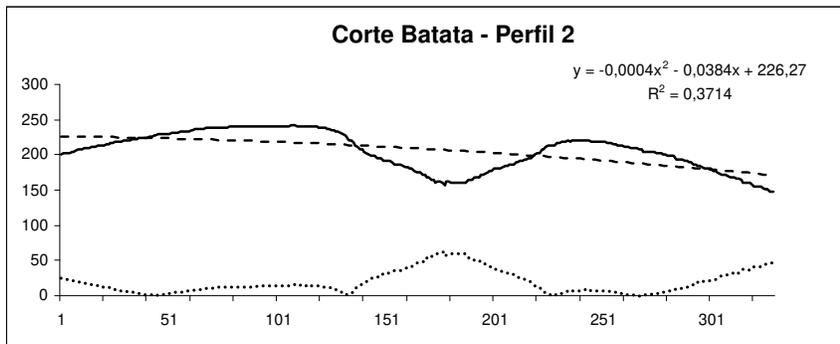


Figura 73. Perfil da batata dentro da área lesionada, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas

Tabela 21: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para o perfil e seu coeficiente de correlação.

Perfil	Função	R <sup>2</sup>
1	$y = -0,0029x^2 + 0,9757x + 127,40$	0,989
2	$y = -0,0004x^2 + 0,0384x + 226,27$	0,3714

Tabela 22: Estatísticas da diferença entre as linhas de perfil e a curva polinomial ajustada de uma batata com injúria mecânica.

Perfil	Média	Máximo	DP
	(Tons de cinza)		
1	1,79	5,29	1,13
2	19,67	62,54	16,43

#### 4.3.2.5. Batata (*Solanum tuberosum L.*) com injúria mecânica. Segundo caso.

As Figuras 74A, B, C e D mostram a região de interesse (RDI) de uma batata lesionada (furo), sendo respectivamente imagem da batata, sem e com franjas projetadas, o MDT por malhas de contorno e o MDT em tons de cinza as linhas de perfil marcadas. A linha de perfil P1 está fora da área lesionada e a P2 dentro dessa área. As Figuras 75 e 76 mostram que os perfis P1 e P3 fora da área lesionada (linhas contínuas) tiveram alta coincidência entre os perfis gerados pelas equações de ajuste (linhas tracejadas) e que a diferença entre ambas (linhas pontilhadas) foi baixa, com  $R^2$  de 0,99 (Tabela 23), comparável às do cilindro e da esfera. Já na Figura 77 pode-se observar que houve um ajuste muito bom, permanecendo o valor de  $R^2$  em torno de 0,15. Isto demonstra que o  $R^2$  é um bom indicador de lesões mecânicas sofridas por batatas.

A técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase mostrou-se capaz de identificar regiões deformadas devido a danos mecânicos em tubérculos de batata. Portanto ela tem potencial para ser utilizada para selecionar frutos defectivos, isto é, mal formados ou deformados por danos mecânicos.

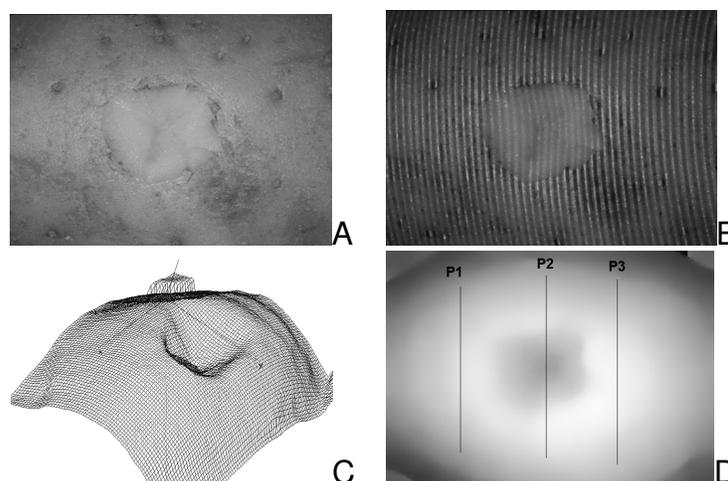


Figura 74: A. Imagem da batata lesionada. B. Franjas projetadas. C. MDT. D. Linhas de perfil marcadas sobre o MDT da RDI.

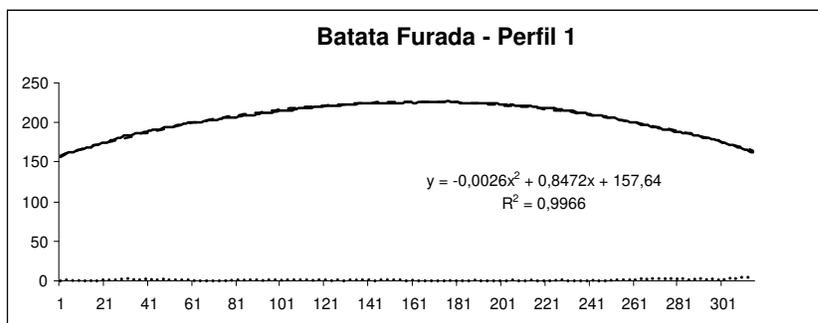


Figura 75: Perfil da batata fora da área lesionada, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.

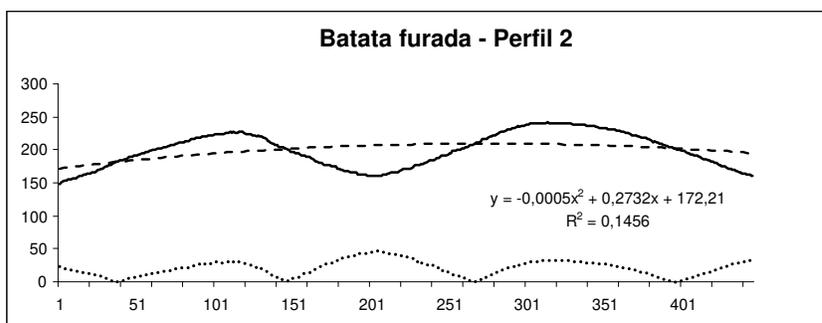


Figura 76: Perfil da batata dentro da área lesionada, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.

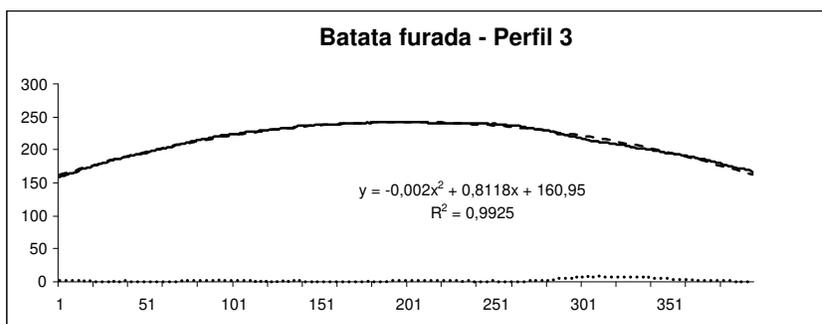


Figura 77: Perfil da batata fora da área lesionada, curva polinomial ajustada e diferença entre ambas.

Tabela 23: Função polinomial de segunda ordem da curva ajustada para os perfis da face 3 da goiaba e seu coeficiente de correlação.

Perfil	Função	R <sup>2</sup>
1	$y = -0,0026x^2 + 0,8472x + 157,64$	0,9966
2	$y = -0,0004x^2 + 0,0384x + 226,27$	0,1456
3	$y = -0,002x^2 + 0,8118x + 160,95$	0,9925

#### 4.4. Modelos Digitais Topográficos de 360°

Nesta parte do trabalho a técnica proposta foi empregada na geração do MDT de 360° de objetos, bem como de frutos e hortaliças.

##### 4.4.1. Modelos Digitais Topográficos de 360° de objetos de forma simétrica

Para testar a técnica gerou-se a MDT de 360° de objetos de forma regular como um cubo e um cilindro, e ainda uma lata amassada, para ver a sua sensibilidade.

A Figura 78 apresenta os passos do processo de geração do 3D de 360° de um cubo, onde a Figura 78A mostra o retículo projetado sobre a superfície do cubo, a Figura 78B as franjas de *moiré* filtradas para a remoção dos retículo, a Figura 78C o MDT e a Figura 78D a representação 3D da reconstituição do volume total do cubo formado pela união dos de quatro lados deste cubo; em que o vértice se encontra no centro do MDT. Observa-se uma perfeita união destes lados.

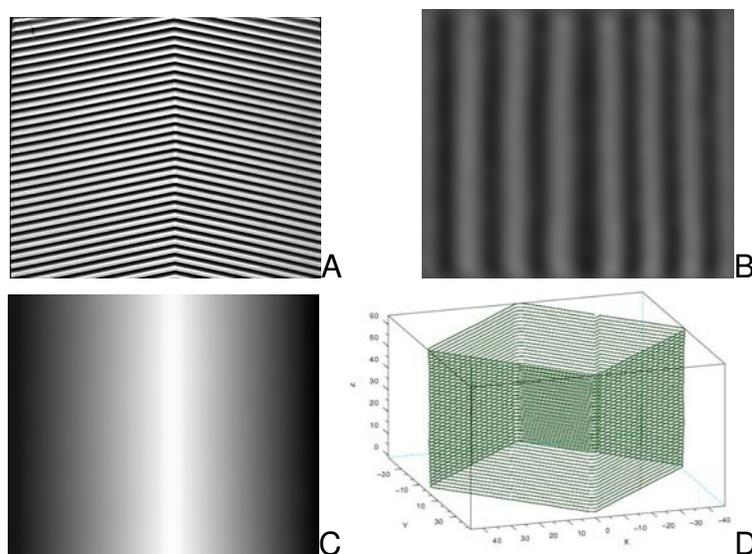


Figura 78: Processo para a reconstituição 3D de um cubo.

A Figura 79 apresenta a reconstituição 3D de um cilindro, pelo mesmo processo anterior.

A Figura 80 mostra a representação 3D de uma lata amassada, em perspectiva (Figura 80A) e lateralmente (Figura 80B). Pode-se observar que o método foi sensível em exibir a superfície amassada.

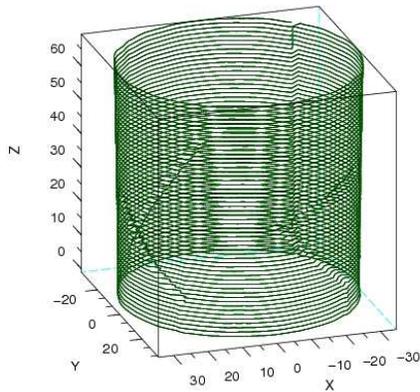


Figura 79: Representação 3D da reconstituição de um cilindro.

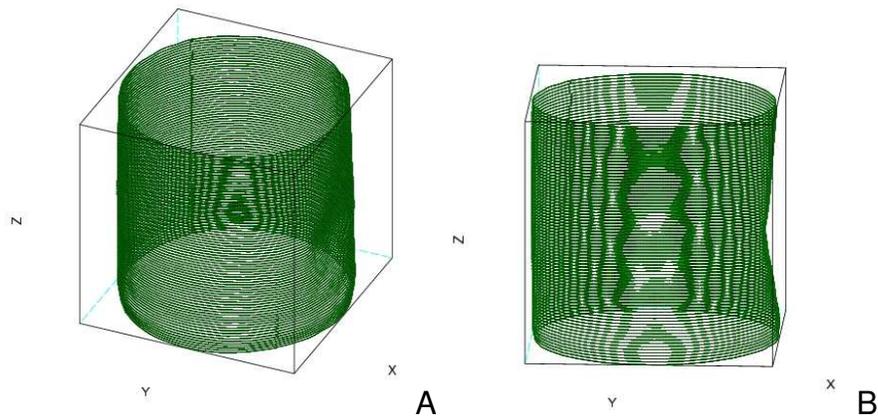


Figura 80: Representação 3D de uma lata amassada. A. Perspectiva. B. Lateral.

A técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase mostra-se como uma ferramenta capaz de gerar o MDT de 360° de objetos de forma regulares, ainda que este apresente deformações.

#### 4.4.2. Modelos Digitais Topográficos de 360° de frutos

Uma vez testada a técnica, e mostrada a sua capacidade de gerar a MDT de 360° de objetos de forma regular, testou-se com frutos “in natura”, um fruto do pessegueiro (*Prunus Persica*) e um fruto da goiabeira (*Psidium guajava*).

A Figura 81 mostra os retículos projetados sobre a fruta do pessegueiro (Figura 81A) e a sua a representação de 360° (Figura 81B).

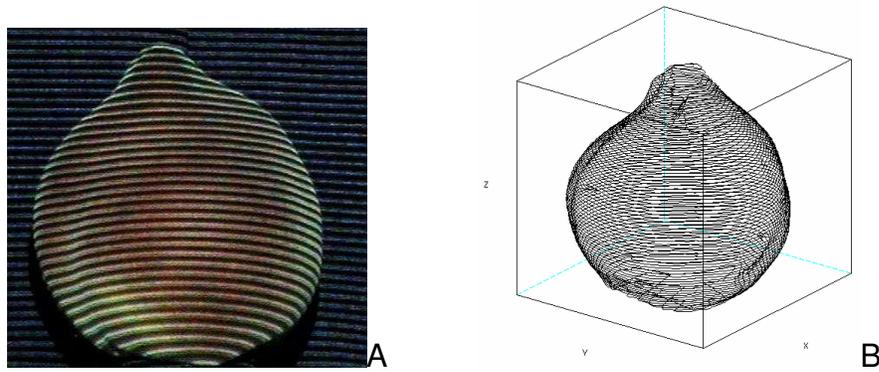


Figura 81: A. Retículo projetada sobre a superfície da fruta do pessegueiro (*Prunus persica*). B. Sua representação 3D.

A Figura 82 mostra os retículos projetadas sobre a fruta da goiabeira (Figura 82A) e a sua a representação 3D (Figura 82B). Nota-se que esta fruta havia sofrido um dano mecânico que resultou em afundamento da casca, com exposição da polpa, porém o método foi sensível para identificar este dano.

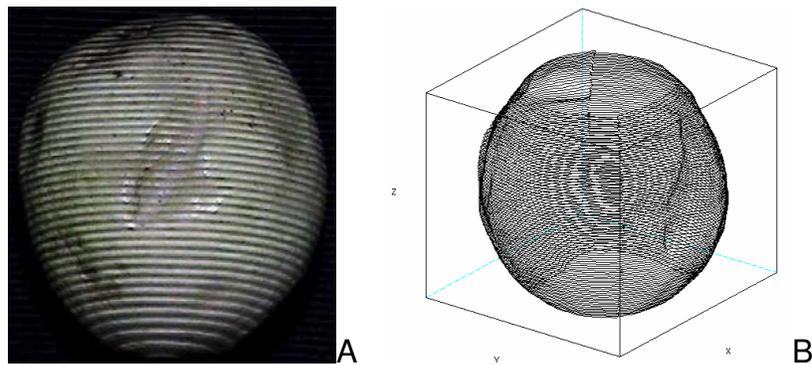


Figura 82: A. Retículo projetada sobre a superfície da fruta da goiabeira (*Psidium guajava*). B. Sua representação 3D.

A técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase mostra-se como uma ferramenta capaz de gerar o MDT de 360° de frutos *in natura*.

## 5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais da tese debaixo de títulos que correspondem aos respectivos objetivos específicos.

1. Estudar os *softwares* que trabalham com tratamento de imagens e com interferometria (deslocamento de fase).

O software *ImageJ* é apresenta funcionalidades adequadas para o processamento e análise de imagens, tais como operações algébricas entre imagens, e por constantes, filtragens e outras operações necessárias para o desenvolvimento da TM de projeção com deslocamento de fase. Também pode ser operado por linhas de comando, o que permite a automatização de todas as suas funções. Porém, não permite trabalhar com interferometria, fazendo com que ele necessite de outro software para fazer este tipo de operação.

Os *softwares Rising Sun Moiré e IDEA* apresentam facilidade de operação, são também intuitivos e rápidos, apresentando o MDT resultante em escala de cinza, o que exige a sua correção para a escala métrica pelo uso de outro software, sendo que o *IDEA* pode apresentar os resultados em número de fases, o que facilitaria esta correção. Porém, eles não trabalham por linhas de comando e, portanto não permitem a automatização do processo.

O *SCILAB* pode ser programado para realizar todo o processo de geração do MDT, desde a projeção e captura da imagem até a reconstrução tridimensional de objetos, possuindo boas rotinas interferométricas já desenvolvidas. Porém, é menos amigável e mais lento em algumas operações quando comparado com o *ImageJ*. Bons resultados foram obtidos com a operação conjunta de ambos.

2. Estudar e propor a técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase para gerar Modelos Digitais Topográficos de órgãos vegetais.

A TM de projeção com deslocamento de fase mostrou ser uma ferramenta capaz de gerar MDTs de órgãos vegetais como frutas e hortaliças *in natura*, com rapidez e acurácia, após a correção do viés, sugerindo o estudo da viabilidade de seu uso em linhas de seleção, estudos acadêmicos e outras aplicações em Engenharia Agrícola.

### 3. Estudar a aplicação desta técnica em seleção de órgãos vegetais.

Esta técnica mostrou-se capaz de servir de base para sistemas de seleção e classificação de frutas e hortaliças através da forma, pois permite reconhecer deformações congênitas ou danos devidos a danos mecânicos, como por exemplo:

- Injúria mecânica em frutos da goiabeira e em tubérculos de batata.
- Deformações congênitas em frutos do tomateiro.

Deve-se ressaltar que o uso proposto nesta tese de técnicas de regressão não somente permite uma comparação entre a linhas de perfil quanto a sua integridade em relação às funções polinomiais de segunda ordem cônicas como também permite a criação de uma escala (através do valor numérico do  $R^2$ ) de grau de deformação ou não integridade que pode ser aplicada em mecanismos de seleção atuantes no *packing house*.

### 4. Gerar Modelos Digitais Topográficos (MDT) de 360° de órgãos vegetais.

Esta técnica mostrou-se capaz de ser utilizada para gerar MDTs de 360° tanto de objetos simétricos quanto de órgão vegetais. Deve-se ressaltar que esta capacidade demandou a ampliação das funcionalidades dos *softwares SCILAB* e *ImageJ* através de rotinas computacionais completares.

### 5. Desenvolver rotinas computacionais que propiciem a automatização do processo de geração de Modelos Digitais Topográficos (MDT) de objetos.

Não se desenvolveu uma rotina única que realiza o processo completo, mas sim várias rotinas, cada uma realizando uma parte do processo, indicando que é possível automatizar todo o processo. Algumas dessas rotinas são:

- Para a geração das franjas de *moiré* foram desenvolvidas macros que fazem a diferença entre imagens e filtragem automaticamente.
- Para a seleção de órgãos vegetais foram desenvolvidas outras macros que traçam e salvam como um conjunto de dados as linhas de perfil.
- Para a geração de MDT de 360° foram feitos *scripts* para o *SCILAB* que reduzem o tamanho da matriz da imagem e conseqüente o tempo de processamento computacional. Estes *scripts* também transformam esta matriz resultante em outra de 3 colunas correspondentes às coordenadas espaciais  $X_i$  (x, y, z), rotacionando-as em incrementos de

90° até a obtenção da composição do objeto completo, composição esta referenciada a um único eixo centrado na origem.

## 6. Referências Bibliográficas

ABRÀMOFF, Michael David; MAGALHÃES, Paulo. J.; RAM, Sunanda. J. Image processing with ImageJ. **Biophotonics International**, Berkshire Common, v.11, n.7, jul., 2004.

ALVES, Gabriel Tavares Malizia **Um estudo das técnicas de obtenção de forma a partir de estéreo e luz estruturada para engenharia**. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro 2005.

AMIDROR, Isaac. **The theory of the *moiré* phenomenon**. Dordrecht: Kluwer Academics Publishers, 2000.

AREVALILLO HERRAEZ, M.; BURTON, David R.; LALOR, Michael J. Accelerating fast Fourier transform and Filtering operations in Fourier fringe analysis for accurate measurement of three-dimensional surfaces. **Optics and Lasers in Engineering**, Oxford, v. 31, p. 135-145, fev,1999.

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

ASUNDI, Anandi K.; CHAN, C.S.; SAJAN, M.R. 360-deg profilometry: new techniques for display and acquisition. **Optical Engineering**, Bellingham, v. 33, n. 8. p. 2760-2769, ago, 1994.

AZEVEDO, Teresa C. S.; TAVARES, João Manuel R. S.; VAZ; Mário A. P. Obtenção da forma tridimensional de estruturas anatómicas externas a partir de imagens. In: Encontro Nacional De Biomecânica, 2, 2007, Évora. <[http://paginas.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/artigos/TA\\_Biomecanica2007\\_ap.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/artigos/TA_Biomecanica2007_ap.pdf)>, 05/05/2007.

BARBOSA, Eduardo A.; LINO, Antonio Carlos Loureiro. Multi-wavelength Electronic Speckle Pattern Interferometry for Surface Shaping. **Applied Optics**, v. 46, n. 14, p. 2624-2631, mai., 2007.

BERNARDINI, Fausto; RUSHMEIE, Holly. The 3D Model Acquisition Pipeline. **Computer Graphics forum**, v. 21, n. 2, p. 149-172, jun., 2002.

BRONSTEIN, Alexander M.; BRONSTEIN, Michael M.; GORDON, Eyal; KIMMEL, Ron. **High-Resolution Structured Light Range Scanner with Automatic Calibration.** <[www.cs.technion.ac.il/users/wwwb/cgi-bin/tr-info.cgi/2003/CIS/CIS-2003-06](http://www.cs.technion.ac.il/users/wwwb/cgi-bin/tr-info.cgi/2003/CIS/CIS-2003-06)>, 25/08/2003.

BUYTAERT, Jan A.N.; DIRCKX, Joris J.J. *Moiré* profilometry using liquid crystals for projection and demodulation. **Optics Express**, v. 16, n. 1, p. 179-193, jan., 2008.

CHAROENPONG, Theekapun; KAMHOM, Pinit; CHAMNONGTHAI, Kosin; KRAIRIKSH, Monai. Volume Measurement of Mango by Using 2D Ellipse Model. In: IEEE ICIT04 - International Conference on Industrial Technology, 2004, Hammamet. **Proceedings...** Washington: IEEE Computer Society, v.3, p. 1438-1441, 2004.

CHEUNG, German. K.M.; BAKER, Simon; KANADE, Takeo Visual Hull Alignment and Refinement Across Time: A 3D Reconstruction Algorithm Combining Shape-From-Silhouette with Stereo. IEEE CVPR03 - Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003, Madison. **Proceedings...** Washington: IEEE Computer Society, v. 2, p. 375-382, 2003.

CHOI, Yi-Bae; KIM, Seung-Woo Phase-shifting grating projection *moiré*. **Optical Engineering**, v. 37, n. 3, p. 1005-1010, mar., 1998.

CLARKE, T.A.; ROBSON, S.; CHEN, J. A comparison of three methods for the 3-D measurement of turbine blades. In: ISMTII 1993 - International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, 2, 1993, Wuhan. **Proceedings...** SPIE v. 2101, p. 1-12, 1993.

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

CREATH, Katherine. Phase-Measurement Interferometry Techniques, in: WOLF, Emil **Progress in Optics XXVI**, ed. Amsterdam: North Holland Publ., p. 349-393, 1988.

CURLESS, Brian. Overview of Active Vision Techniques. **SIGGRAPH 2000 Course on 3D Photography.** <[www.cs.cmu.edu/~seitz/course/Sigg00/slides/curless-active.pdf](http://www.cs.cmu.edu/~seitz/course/Sigg00/slides/curless-active.pdf)>, 06/09/2005.

D'Acquisto, L; Fratini, L; Siddiolo, A. M. A modified *moiré* e technique for three-dimensional surface topography. **Measurement Science & Technology**, Bristol, v. 13, n. 4, p. 613-622, abr, 2002.

DAVIES, Roger; HELENO, Paulo; CORREIA, Bento A. B.; DINIS, João. VIP3D – An application of image processing technology for quality control in the food industry. In: ICIP 2001 - International Conference on Image, 2001, Thessaloniki. **Proceedings**, Washington: IEEE Signal Processing Society, v. 1, p. 293-296, 2001.

DEGRIECK, Joris; VAN PAEPEGEM, Wim; BOONE, Peter. Application of Digital Phase-shift shadow *moiré* to micro deformation measurements of curved surfaces. **Optics and Lasers in Engineering**, Oxford, v. 36, n.1, p. 29-40, jul, 2001.

DIRKX, Joris. J. J.; DECRAEMER, Willem. 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., 1998.

ESTAÑA, R.; SEYFRIED, J.; SCHMOECKEL, F.; THIEL, M.; BUERKLE, A.; WOERN, H. Exploring the micro and nanoworld with cubic centimetre-sized autonomous microrobots. **Industrial Robot: An International Journal**, Bradford, v.31, n. 2, p. 159-178, 2004.

FABBRI, Ricardo **Desenvolvimento de um pacote de processamento de imagens para o SCILAB**. 34p. Monografia - São Carlos, Instituto de Ciências matemáticas e de Computação - USP, mai, 2003.

FACON, Jaques. Processamento e análise de imagens. <<http://www.ppgia.pucpr.br/~facon/IndexPrincipalBrMaterialMestrado.htm>>, 10/06/2008.

FERNANDES; Leandro Augusto Frata. **Estudo de Métodos para Extração de Formas e Realização de Medidas a Partir de Imagens**. <[http://www.inf.ufrgs.br/~laffernandes/fernandes\\_TI\\_1159.pdf](http://www.inf.ufrgs.br/~laffernandes/fernandes_TI_1159.pdf)>, 10/04/2007.

FONSECA NETO, João. **Aplicação da Transformada de Fourier no processamento digital de imagens**. <<http://www.infonet.com.br/users/jfonseca/PDI-FOURIER.PDF>>, 13/05/2006.

FORBES, Keith. **Volume Estimation of Fruit from Digital Profile Images**. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). University of Cape Town. Cape Town, 2000.

FORSTER, Frank. A High-Resolution and High Accuracy Real-Time 3D Sensor Based on Structured Light. 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, Third International Symposium (3DPVT06), 3, 2006, Chapel Hill. **Proceedings...** Washington: IEEE Computer Society, p. 208-215, 2006.

GAMA PENTEADO, A. H. D. da; COSTA, A. P.; SOUZA FILHO, C. R. de Filtragem de ruídos periódicos com transformadas de Fourier e o realce da decorrelação em imagens termais do sensor GEOSCAN MKII coletadas sobre o “greenstone belt” do rio Itapicuru, Bahia – Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9, 1998, Santos, **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 443-54, 1998.

GOÑI, Sandro M.; PURLIS, Emmanuel; SALVADORI, Viviana O. Three-dimensional reconstruction of irregular foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, n. 82, p. 536 – 547, out, 2007.

GOÑI, Sandro M.; PURLIS, Emmanuel; SALVADORI, Viviana O. Geometry modelling of food materials from magnetic resonance imaging. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, n. 88, p. 561 - 567, out, 2008.

Graz University of Technology. IDEA - Interferometric Data Evaluation Algorithms. <<http://optics.tu-graz.ac.at/idea/idea.html>> 10/09/2006.

HAHN, F.; SANCHEZ, S. Carrot Volume Evaluation using Imaging Algorithms. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 75, n. 3, p. 243-249, mar, 2000.

HALIOUA, Maurice; KRISHNAMURTHY, Ravi S.; LIU, Hsin-Chu; CHIANG; Fu-Pen. Automated 360° profilometry of a 3-D diffuse objects. **Applied Optics**, Washington, v. 24, n.13, p. 2193-96. jul, 1985.

HARDIN, Winn. 3D, Advanced Technologies Make Food Inspection Palatable. **Machine Vision on Line**, Ann Arbor, < <http://www.machinevisiononline.org/>>, 10/10/2006.

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

HU; Yingsong; XI, Jiangtao; CHICHARO, Joe; YANG; Zongkai. Improved Three-step Phase Shifting Profilometry Using Digital Fringe Pattern Projection. International Conference on

Computer Graphics, Imaging and Visualisation (CGIV'06).2006, Sidney. **Proceedings...** Washington, IEEE Computer Society. p.112-118, 2006.

HUANG, Peisen S.; JIN, Feng; CHIANG, Fu-Pen. Quantitative evaluation of corrosion by a digital fringe projection technique. **Optics and Lasers in Engineering**. Oxford, v. 31, n.5, p. 371-80, mai.,1999.

HUANG, Peisen S.; HU, Qingying; JIN, Feng; CHIANG, Fu-Pen **Color-encoded fringe projection and phase shifting for 3-D surface contouring**. <[me.eng.sunysb.edu/~mec579/OptMet98.pdf](http://me.eng.sunysb.edu/~mec579/OptMet98.pdf)>, 15/05/2005.

IMOU, K.; KAIZU, Y.; MORITA, M.; YOKOYAMA S. Three-dimensional shape measurement of strawberries by volume intersection method. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 49, n.2, p.449-456, 2006.

JANCSÓK, Pál T.; NICOLAÏ, Bart M.; CLIJMANS, L., DE BAERDEMAEKER, Josse. Random geometrical model generation for stochastic finite element analysis of fruits. In: EurAgEng Conference, 2000, Warwick. **Proceedings...** , Warwick: EurAgEng (European Society of Agricultural Engineers), paper n. 00-PH004, CDROM, 2000.

JANCSÓK, Pál T., SCHEERLINCK, Nico; VERBOVEN, Pieter; NICOLAÏ, Bart M.; De BAERDEMAEKER, Josse. **Shape modelling for stochastic FE computation of cooling processes of agricultural products**. AGENG2002 - International Conference on Agricultural Engineering, 2002, Budapest. **Proceedings...** Budapest: Scientific Society of Mechanical Engineering, EurAgEng (European Society of Agricultural Engineers), paper n. 02-PH-011, CDROM, 2002.

JARIMOPASA, B.; NUNAKA, T.; NUNAK, N. Electronic device for measuring volume of selected fruit and vegetables. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam , v. 35, n. 1, p. 25-3, jan., 2005.

LAURENTINI, Aldo. The visual hull concept for silhouette-based image understanding. **Pattern Analysis and Machine Intelligence**, IEEE Transactions. Washington, v.16, n. 2, p. 150-162, fev, 1994.

LEE, Dah-Jye; XU, Xiaoqian; EIFERT, Joseph D.; ZHAN, Pengcheng. Area and volume measurements of objects with irregular shapes using multiple silhouettes. **Optical Engineering**. Bellingham, v. 45, n. 2, fev, 2006.

LINO, Antonio Carlos Loureiro **Técnica óptica de *moiré* visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares**. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002.

LINO, Antonio Carlos Loureiro Lino; DAL FABBRO, Inácio M.; RODRIGUES, Silvestre. Fourier transform assisted phase shift *moiré* technique. In: International Conference on Information Systems in Sustainable Agriculture, Agroenvironment and Food Technology (HAICTA 2006), 2006, Volos. **Annals...** Volos: University of Thessaly, v. 3. p. 784-791, 2006.

MARTINEZ-DE-DIOS, J. R., SERNA; C.; OLLERO; A. Computer vision and robotics techniques in fish farms. **Robotica**, Cambridge, v. 21, p. 233–243, jun., 2003.

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.

NAFTEL, Andrew; MAO, Zhifang. **Acquiring dense 3d facial models using structured-light assisted stereo correspondence**. <[http://www.co.umist.ac.uk/research/tech\\_reports/trs\\_2002\\_004\\_ajn.pdf](http://www.co.umist.ac.uk/research/tech_reports/trs_2002_004_ajn.pdf)>, 10/05/2007.

NOORDAM, J.C. **Innovative Applications in the Agro and Food industry**. <<http://greenvision.wur.nl/>>, 20/05/2007.

PAOLETTI, D.; SPAGNOLO, G.S. Fast Fourier transformed electronic speckle contouring for diffuse surfaces profilometry. **Optics and Lasers in Engineering**, Oxford, v. 20, p. 87-96, 1994.

PENG, X.; GAO, Z.; ZHOU, S. M. Surface contouring by a new type of digital *moiré* technique. **Optik**, Amsterdam, v. 100, n. 2, p. 63-67, jul., 1995.

POST, Daniel; HAN, Bongtae; IFJU, Peter. **High sensivity *moiré*: Experimental analysis for mechanics and materials**. New York: Spring-Verlag, 1994.

QUAN, C.; TAY, C.;J.; SHANG, H.M. Fringe projection technique for the 3-D shape measurement of a hydroformed shell. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 89-90, p. 88-91, mai, 1999.

QUAN, C.; HE, X. Y.; WANG, C. F.; TAY, C. J.; SHANG, H. M. Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting. **Optics Communication**. v. 189, n. 9, p. 21-29, mar, 2001.

ROCCHINI, C.; CIGNONI, P.; MONTANI, C.; PINGI, P.; SCOPIGNOY R. A low cost 3D scanner based on structured light. **Computer Graphics Forum**. v. 20, n. 3, p. 299-308, 2001.

RODRIGUEZ-VERA, Ramón. Three-dimensional gauging by electronic *moiré* contouring. **Revista Mexicana de Física**, Cidade do México, v. 40, n. 3, p. 447-458, 1994.

SADLO, Filip; WEYRICH, Tim; PEIKERT, Ronald; GROSS, Markus. **A Practical Structured Light Acquisition System for Point-Based Geometry and Texture**. Proceedings of the Eurographics Symposium on Point-Based Graphics, 2005, Long Island. **Proceedings** Long Island: IEEE, p. 89-98, 2005.

SAJAN, M. R.; TAY, C. J.; SHANG, H. M.; ASUNDI, Anand. TDI Imaging—A tool for profilometry and automated visual inspection. **Optics and Lasers in Engineering**, Oxford, v. 29, n. 6, p. 403-411, jun., 1998.

SALVI, Joaquim; PAGÈS, Jordi; BATLLE, Joan. Pattern codication strategies in structured light systems. **Pattern Recognition**, Amsterdam, v. 37, n. 4, p. 827-49, abr, 2004.

SALVI, Joaquim; PAGÈS, Jordi. Tutorial on Coded Light Projection Techniques. [http://eia.udg.es/~qsalvi/Tutorial\\_Coded\\_Light\\_Projection\\_Techniques\\_archivos/v3\\_document.html](http://eia.udg.es/~qsalvi/Tutorial_Coded_Light_Projection_Techniques_archivos/v3_document.html), 30/05/2008.

SCALCO, Patrícia Andréia Paiola; TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia. Determinação automática de correspondência em um sistema de reconstrução com luz estruturada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 7, n. 2, p.41-62, 2001.

SCHARSTEIN, Daniel; SZELISKI, Richard. High-Accuracy Stereo Depth Maps Using Structured Light. In CVPR 2003 - IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003, Madison. **Proceedings...** Madison, IEEE Computer Society, v. 1, p. 195-202, 2003.

SCILAB ORG. **Software livre para cálculo científico** <<http://www.scilab.org/events/leaflet/prospecto-br.pdf>> 02/08/2006.

SINHA, Sudipta N.; POLLEFEYS, Marc. Visual-Hull reconstruction from uncalibrated and unsynchronized video streams. 3DPVT'04 - International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 2, 2004, Thessaloniki. **Proceedings...** Thessaloniki: IEEE Computer Society, p. 349 - 56, 2004.

SMITH NETO, Perrin; FONSECA, Eric dos Anjos; FREITAS, Gabriel Henrique Faria. Application of Digital Shadow *moiré* to Measurements of Human Body Profilometry. In: International Conference on Mechanics and Materials in Design, 5, 2006, Porto. **Anais...** Leça do Balio: Mechanics and Materials in Design, INEGI-Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, v. 1, . 63-71, 2006.

SMITH NETO; Perrin; MAGALHÃES JUNIOR; Pedro Américo Almeida Determination of human body profile using digital shadow *moiré* experimental technique. In: Cilamce -2006, Iberian Latin America Congress on Computational Methods in Engineering, 27, 2006, Belém. **Anais...** Belém:Universidade Federal do Pará, CD ROM, 2006.

STORBECKA, Frank; DAANB, Berent. Fish species recognition using computer vision and a neural network. Fisheries Research, Amsterdam, v. 51, p. 11-15, abr., 2001.

SU, Xianyu; CHEN; Weijing. Fourier transform profilometry: a review. **Optics and Lasers in Engineering**, Oxford, v.35, p. 263-284, mai., 2001.

SUN, Changming; BERMAN, Mark; COWARD, David; OSBORNE, Brian. Thickness measurement and crease detection of wheat grains using stereo vision. **Pattern Recognition Letters**, v. 28, p. 1501-1508, 2007.

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

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

TAKEDA, M. & MUTOH, K. Fourier transform profilometry for automatic measurement of 3D object shape. **Applied Optics**. Washington. v.22, p.3977-82, dez., 1983.

TILLET, Robin, MCFARLANE, Nigel; LINES, Jeff. Estimating Dimensions of Free-Swimming Fish Using 3D Point Distribution Models. **Computer Vision and Image Understanding**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 123-141, jul., 2000.

TONG, Jingwei; ZHANG, Dougsheng; LI, Hongqi, XU, Guanghui. Automatic analysis of three-dimensional displacement Field using ESPI. **Optics and Laser in Engineering**, Oxford, v.26, p. 515-529, abr., 1997.

<sup>1</sup>VECCHIO, Sara Del; CAMPOS, Inácio Loiola Pereira; PINOTTI, Marcos; SESSELMANN, Meinhard. Medição do perfil tridimensional de contornos livres a partir da técnica de *moiré* de projeção. In: CONEM 2006. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 4, 2006, Recife, **Anais...** Rio de Janeiro - RJ. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, CDROM

<sup>2</sup>VECCHIO, Sara Del; GONÇALVES JR., Armando A.; SESSELMANN, Meinhard, PINOTTI, Marcos **Measurement of a human face moulded on plaster by fringe projection technique**. In: 4º Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, 2006, Caxambu. **Anais...** Caxambu: Sociedade Latino Americana de Biomateriais, Engenharia de Tecidos e Órgãos Artificiais, v. 1, p. 1-9, 2006.

YEN, H.-N.; TSAI; D.-M. A fast full-field 3D measurement system for BGA coplanarity inspection. **Int J Adv Manuf Technol**, London, v. 24, p. 132-139, jul., 2004.

ZHANG, LI; CURLESS, BRIAN; SEITZ; STEVEN M. Rapid Shape Acquisition Using Color Structured Light and Multi-pass Dynamic Programming. In: 3DPVT02 - IEEE International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission. 2002, Padova. **Proceedings...** Washington: IEEE Computer Society, p. 24-36, 2002.

ZHANG, LI; SNAVELY, Noah; CURLESS, Brian; SEITZ, Steven M. Spacetime Faces: High Resolution Capture for Modeling and Animation. In SIGGRAPH2004, Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 31, 2004, Los Angeles, **Proceedings...** Association for Computing Machinery, p.548-558, 2004.

ZHANG, Zonghua; TOWERS, Catherine E.; TOWERS, David P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency Selection. **Optics Express**. v. 14, v. 14, p. 6444-55, jul., 2006.

ZHANG, Zonghua; TOWERS, Catherine E.; TOWERS, David P. Phase and colour calculation in colour fringe projection. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 9, n. 5, S81–S86, jun, 2007.

ZHENG, Jiang Yu. Acquiring 3-D models from sequences of contours. **Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions**. v. 16, n. 2, p. 163-78, fev, 1994.

ZHU, Bin; JIANG, Lu; TAO, Yang. Automated 3D Surface Reconstruction and Analysis of apple Near-Infrared data for the application of apple stem-end/calyx identification. In: 2007 ASABE Annual International Meeting, 2007, Minneapolis. **Proceedings...** St. Joseph: ASABE, 2007.

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

WIKIPEDIA. **3D scanner**. <[http://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_scanner](http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner)>, 20/05/2007.

WULFSOHN, D.; H . GUNDERSEN, J. G.; VEDEL JENSEN, E. B.; NYENGAARD, J. R. Volume estimation from projections. **Journal of Microscopy**, New York, v. 215, n. 2, p. 111-120, ago, 2004.

WYANT, James C. **Phase-Shifting Interferometry**. <[http://www.optics.arizona.edu/jcwyant/Short\\_Courses/SPIEOpticalTesting/Part2.pdf](http://www.optics.arizona.edu/jcwyant/Short_Courses/SPIEOpticalTesting/Part2.pdf)>, 20/05/2007

## APENDICE 1: Rotinas associadas ao programa ImageJ.

Abaixo é mostrada uma rotina ou macro gerado para o corte das imagens segundo a RDI. A RDI é marcada apenas na primeira imagem, as outras são cortadas automaticamente. Em um a outra versão a RDI também é marcada automaticamente.

```
//Rotina para cortar as imagens segundo RDI
//Indica caminho para abri e salvar imagens
caminho1="E:\\Area SIP\\Imagens\\Originais\\";
caminho2="E:\\Area SIP\\Imagens\\Tratadas\\";
//Abre imagem inicial e marca a RDI
open(caminho1+"Objeto10.bmp");
run("Restore Selection");
run("Crop");
saveAs("bmp",caminho2+ "Objeto10.bmp");
//Abre as imagens e corta a RDI e salva em outro diretório
open(caminho1+"Objeto11.bmp");
run("Restore Selection");
run("Crop");
saveAs("bmp",caminho2+ "Objeto11.bmp");
open(caminho1+"Plano1.bmp");
run("Restore Selection");
run("Crop");
saveAs("bmp",caminho2+ "Plano1.bmp");
open(caminho1+"Plano2.bmp");
run("Restore Selection");
run("Crop");
saveAs("bmp",caminho2+ "Plano2.bmp");
open(caminho1+"Plano3.bmp");
run("Restore Selection");
run("Crop");
saveAs("bmp",caminho2+ "Plano3.bmp");
open(caminho1+"Plano4.bmp");
run("Restore Selection");
run("Crop");
saveAs("bmp",caminho2+ "Plano4.bmp");
//Fecha imagens abertas
close();close();close();close();close();close();close();
//Fecha ImageJ
run("Quit");
//Fim
```

A rotina ou macro abaixo detalhado gera as 4 imagens das franjas de *moiré*, subtrai a imagem do objeto das imagens dos planos de referência e filtra cada uma delas por FFT para a remoção das grades.

```
//Gera Franjas de Moiré de Projeção, fazendo a filtragem das grades por FFT
//Feito por Lino
//30/08/2006
//Indica o caminho e a imagem do objeto (fruta) a ser tratado.
caminho="E:\\Area SIP\\Imagens\\Tratadas\\";
objeto="Objeto11.bmp";
//Cria uma máscara binária para a filtragem por FFT
newImage("Untitled", "8-bit Black", 256, 256, 1);
makeRectangle(116, 122, 24, 12);
run("Create Mask");
```

```

run("Divide...", "value=255.000");
//Abrir as grades de referência, transforma em tons de cinza (8 bits)
// e faz uma desfocagem leve
open(caminho+"Plano1.bmp");
run("8-bit");
run("Gaussian Blur...", "radius=3");
open(caminho+"Plano2.bmp");
run("8-bit");
run("Gaussian Blur...", "radius=3");
open(caminho+"Plano3.bmp");
run("8-bit");
run("Gaussian Blur...", "radius=3");
open(caminho+"Plano4.bmp");
run("8-bit");
run("Gaussian Blur...", "radius=3");
//Abre a imagem da fruta e faz uma desfocagem leve
open(caminho+objeto);
rename("Objeto11.bmp");
run("8-bit");
run("Gaussian Blur...", "radius=3");
//Moiré 11
//Cria as franjas de Moiré
//Subtrai imagem fruta da imagem do plano de referência 1
imageCalculator("Difference create", "Plano1.bmp","Objeto11.bmp");
//Faz a FFT
run("FFT");
//Corta a imagem FFT (filtragem)
imageCalculator("Multiply", "FFT of Result of Plano1","Mask");
//Faz a FFT inversa
run("Inverse FFT");
//Salva imagem resultante
saveAs("bmp", caminho+"Moire11.bmp");
close();
//Moiré 12
//Cria as franjas de Moiré
imageCalculator("Difference create", "Plano2.bmp","Objeto11.bmp");
run("FFT");
imageCalculator("Multiply", "FFT of Result of Plano2","Mask");
run("Inverse FFT");
saveAs("bmp", caminho+"Moire12.bmp");
close();
//Moiré 13
//Cria as franjas de Moiré
imageCalculator("Difference create", "Plano3.bmp","Objeto11.bmp");
run("FFT");
imageCalculator("Multiply", "FFT of Result of Plano3","Mask");
run("Inverse FFT");
saveAs("bmp", caminho+"Moire13.bmp");
close();
//Moiré 14
//Cria as franjas de Moiré
imageCalculator("Difference create", "Plano4.bmp","Objeto11.bmp");
run("FFT");
imageCalculator("Multiply", "FFT of Result of Plano4","Mask");
run("Inverse FFT");
saveAs("bmp", caminho+"Moire14.bmp");

```

```
//Fecha as abertas
close();close();close();close();close();close();close();close();close();close();close();
//Fim
```

## APENDICE 2: Rotinas associadas ao programa SCILAB/SIP.

A rotina abaixo gera o MDE (3D) da superfície de um objeto (corpo vegetal) através da técnica de *moiré* de projeção com deslocamento de fase (Phase shifting). Esta foi desenvolvida para a plataforma Linux, utilizando comandos UNIX. Essa abre o ImageJ e roda uma macro que gera as franjas de *moiré* e gerando, então o MDE. Já está disponibilizada uma outra versão para o WindowsXP.

//Esta rotina gera o MDE (3D) da superfície de um objeto através de Moiré de Projeção.

//Faz o “deslocamento de fase” (Phase shifting).

//Autores: Lino e André – 03/04/2006

stacksize(4e7); //Aloca maior espaço de memória

chdir('/home/lino/Area\_SIP/Macros'); //Muda diretório

unix('./RunMacroImageJ.sh Moire.txt'); // Executa o ImageJ com o nome da macro definido

chdir('/home/lino/Area\_SIP/Imagens');

//Lê as imagens

moire1 = gray\_imread('Moire11.bmp');

moire2 = gray\_imread('Moire12.bmp');

moire3 = gray\_imread('Moire13.bmp');

moire4 = gray\_imread('Moire14.bmp');

// Phase shifting

empacotada=normal(imphase('bucket4a',0,moire4,moire3,moire2,moire1)); //Mapa de fases

clear moire1; //apaga imagem

clear moire2;

clear moire3;

clear moire4;

topo=unwrapl(empacotada,0.5,0,"h"); //desempacotamento do mapa de fases

topo\_normal=normal(topo); //normaliza a imagem desempacotada

clear topo;

xset("window",3);xbasc();imshow(topo\_normal); //plota MDE em tons de cinza

xset("window",4);xbasc();plot3d1(1:10:linha,1:10:coluna,255\*topo\_normal(1:10:\$,1:10:\$));

imwrite(topo\_normal, 'z1.bmp'); //Salva a imagem do MDE

clear topo\_normal;

//fim

Esta foi rotina criada para automatizar a captura das imagens utilizadas no processo. Esta projeta a grade se *moiré* sobre o plano de referência ou do objeto (corpo vegetal) e captura a imagem. Permite também escolher se a imagem a ser capturada é do plano de referência ou do objeto. Quando se opta por plano de referência essa projeta 4 imagens da grade, cada uma delas defasadas de  $\frac{1}{4}$  de período uma da anterior e salva como Plano1.jpg, Plano2.jpg, Plano3.jpg e Plano4.jpg, respectivamente. Se a opção for *objeto*, essa irá capturar primeiro a imagem do objeto sem franjas e após a imagem com a grade 1 projetada sobre esse. Poderá, ainda, capturar de 1 a 6 lados do objeto.

// Projeta 4 franjas defasadas de  $\frac{1}{4}$  de período e captura a imagem

//Lino, André, Bruno e Ricardo

function retardar() // Delay

for a=1:1000

for b=1:500

end

end

endfunction;

stacksize(4e7); //aloca maior espaço de memória

```

chdir('/home/lino/Area_SIP/Imagens'); //Muda diretório
l1=list('Escolha',1,['Objeto','Grade']); // Define grade de referência ou objeto
resp=x_choices('Tipo de imagem',list(l1));
unix('xawtv&');
retardar;
if resp==1 // Objeto
  faces=7;
  while faces > 6; faces=evstr(x_dialog(['Quantas faces? (maximo 6)],..
    '4')); end
  for i=0:faces-1
    unix("display /home/lino/Area_SIP/grades/h0.jpg&");
    retardar;
    name0='Objeto'+string(1+i)+0.jpg';
    unix('xawtv-remote snap jpeg full /home/lino/Area_SIP/Imagens/'+name0);
    retardar;
    unix('killall display');
    unix("display /home/lino/Area_SIP/grades/h1.jpg&");
    retardar;
    name1='Objeto'+string(1+i)+1.jpg';
    unix('xawtv-remote snap jpeg full /home/lino/Area_SIP/Imagens/'+name1);
    unix("display /home/lino/Area_SIP/grades/h2.jpg&");
    retardar;
    name2='Objeto'+string(1+i)+2.jpg';
    unix('xawtv-remote snap jpeg full /home/lino/Area_SIP/Imagens/'+name2);
    unix("display /home/lino/Area_SIP/grades/h3.jpg&");
    retardar;
    name3='Objeto'+string(1+i)+3.jpg';
    unix('xawtv-remote snap jpeg full /home/lino/Area_SIP/Imagens/'+name3);
    unix("display /home/lino/Area_SIP/grades/h4.jpg&");
    retardar;
    name4='Objeto'+string(1+i)+4.jpg';
    unix('xawtv-remote snap jpeg full /home/lino/Area_SIP/Imagens/'+name4);
    retardar;
    unix('killall display');
    if i<>faces-1
      x_message(['Reposicione o objeto para a face '+string(i+2)]);
    end
  end;
elseif resp==2 // Grade
  for i=0:3
    name='Grade'+string(1+i)+'.jpg';
    unix("display /home/lino/Area_SIP/grades/h"+string(1+i)+".jpg&");
    retardar;
    unix('xawtv-remote snap jpeg full /home/lino/Area_SIP/Imagens/'+name);
    retardar;
    unix('killall display');
  end;
else
  unix('killall xawtv');
  abort;
end;

```