UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS

Avaliação da Aplicação do "Speckle" Dinâmico no Monitoramento da Qualidade da Laranja

Autor: Giovanni Francisco Rabelo
Orientador: Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

CAMPINAS, Fevereiro 2000

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Rabelo, Giovanni Francisco
R112a Avaliação da aplicação do "Speckle" dinâmico no monitoramento da qualidade da laranja / Giovanni Francisco Rabelo.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Inácio Maria Dal Fabbro.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Speckle. 2. Laranja - Qualidade. I. Dal Fabbro, Inácio Maria. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Sagrado Coração de Jesus, me proteja e me defenda
com o poder da sua Santa e Divina Graça
e que o Espírito Santo me cubra de luz e me guie
na Verdade de Deus
com a sua imensa misericórdia
e eu, para sempre, saberei dizer:
GRAÇAS A DEUS

A meus pais, Antonieta e Rubens,
Dedico.

AGRADECIMENTOS

A DEUS pela graça da vida.

A CAPES pelo apoio financeiro, através do Programa PICD, o qual foi impressindível para a realização deste trabalho.

Á Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Engenharia pelo incentivo à formação de seus Docentes e pela oportunidade concedida.

Ao Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro que, com sua experiência e visão, demonstrou muito entusiasmo e confiança na orientação deste trabalho e principalmente pela sua amizade.

Aos membros do comitê de orientação Prof. Dr. Antônio Carlos de Oliveira Ferraz e Prof. Dr. Nélson Luis Cappelli pelas constantes trocas de informações e direcionamento dos experimentos.

Aos Professores Dr. Héctor Jorge Rabal, Prof. Dr. Marcelo Ricardo Trivi e Prof. Ricardo Arizaga pela orientação durante a realização dos experimentos e acolhida em La Plata, Argentina.

Ao Dr. Mário Gallardo, diretor do Centro de Investigaciones Ópticas de La Plata, Argentina e a Reitoria da UFLA que, pelo convênio firmado entre as duas Instituições, ofereceram a oportunidade do intercâmbio de pesquisadores.

Ao Prof. Roberto Alves Braga Júnior, pela iniciativa do convênio UFLA/CIOp, pela amizade, e pelas importantes contribuições, além de assumir as atividades didáticas da área durante minha ausência.

Ao Prof. Dr. Antônio José da Silva Maciel pelo incentivo e pelas valiosas sugestões na condução da pesquisa.

À Coordenadoria da Pós-graduação da FEAGRI, na pessoa da Profa. Dra. Raquel Gonçalves, à secretária Marta e, em especial, à amiga e secretária Ana Paula Montagner pela dedicação e presteza.

Aos Professores Dr. Daniel Furtado Ferreira, Dr. Júlio Sílvio Sousa Bueno Filho, Dra. Thelma Sáfadi e ao amigo Telde Natel Custódio, pela colaboração nas análises estatísticas.

Ao Prof. Lucas Monteiro Chaves pela colaboração nos fundamentos matemáticos.

Aos Professores Dr. Antônio Tavares da Costa Júnior, Dr. Fortunato Silva de Menezes e Dr. Gilberto Lage pela assistência nos fundamentos de óptica física envolvidos nos experimentos.

Ao Prof. Dr. Cláudio Sverzut, grande incentivador e amigo, pelas valiosas contribuições.

Ao Prof. Dr. Mikiya Muramatsu pela contribuição na definição da configuração experimental, pelas constantes trocas de informações e incentivo.

Aos Professores Paulo Roberto Clemente, Dr. Luiz Carlos de Oliveira Lima e Dr. Eduardo Valério de Barros Villas Boas, pelas críticas, sugestões e por disponibilizarem os equipamentos de suas responsabilidades para a realização desta pesquisa.

Ao amigo e Professor Tomás de Aquino Ferreira, pelas correções, sugestões, companheirismo e por incentivar e acreditar na importância deste trabalho.

Ao experiente Professor e amigo, Dr. Antônio Marciano da Silva pelo incentivo e apoio nas horas difíceis.

À Renata Silva Mann pela colaboração nos fundamentos de citologia e a Adriano de Souza por sua contribuição nos ensaios de laboratório.

Aos amigos Admilson, Calábria, Carlão, Helbert, Marcelo Concha, Eduardo Teixeira, Rodrigo, Alexandre, Brenner, Volpato, Margarete, Néri, Claudinho, Regina Longo, Mococa, Natasha, Conceição, Tião, Renato Laurente, Pedrão, Cal, Miller e Eliane pela agradável convivência em Campinas.

À minha família, em especial a Adriana e Letícia pelo constante apoio nas horas mais difíceis e pelo desconforto familiar provocado pela necessidade de minha ausência durante a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
EPÍGRAFE	i
DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
SUMÁRIO	v
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS, GRÁFICOS E MATRIZES	x
LISTA DE EQUAÇÕES	xvii
RESUMO	xxiv
SUMMARY	xxv
1- INTRODUÇÃO	**1**
2 - OBJETIVOS	**3**
2.1 - Geral	3
2.2 - Específicos	3
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	**4**
3.1 - Considerações Iniciais	4
3.2 - A origem da Citricultura	4
3.3 - A produção de Laranja no Brasil	5
3.4 - Seleção de Laranjas	9
3.5 - Atributos de Qualidade de Laranjas	13
3.6 - Anatomia da Laranja	17
3.7 - O processo de Industrialização da Laranja	19
3.8 - Comportamento Mecânico dos Materiais Biológicos	22
3.9 - Métodos para Determinação da Firmeza de Frutos	25
3.10 - Métodos Ópticos para Estudo de Materiais Biológicos	33
3.11 - Ondas Luminosas Monocromáticas	37
3.12 - Interação da Luz com a Matéria	41
3.13 - Composição e Estrutura do Tecido Vegetal	43
3.14 - Interação da Luz com o Tecido Vegetal	49
3.15 - Propriedades do "Speckle"	54
3.16 - Métodos para Tratamento de Imagens	56
3.16.1 - Módulo de dispersão de intensidades	69
3.16.2 - Cumulantes estatísticos	81

4 - MATERIAL E MÉTODOS **85**
4.1 - Considerações Iniciais 85
4.2 - A Configuração Óptica Experimental 86
4.2.1 - Configuração utilizando feixe laser normal 88
4.2.2 - Configuração utilizando feixe laser normal e polarizador 89
4.2.3 - Configuração utilizando feixe laser normal e filtro neutro 87
4.2.4 - Configuração utilizando feixe laser normal, filtro neutro e campânula 90
4.3 - Ensaios de Resposta em Freqüência 91
4.4 - Os Equipamentos e Reagentes Utilizados 92
4.5 - Os Aplicativos Computacionais 93

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO **95**
5.1 - Considerações Iniciais 95
5.2 - Ensaios Utilizando Feixe Laser Normal 97
5.3 - Ensaios Utilizando Feixe Laser Normal e Polarizador 107
5.4 - Ensaios de Umidade Monitorada 117
5.5 - Ensaios Físico-Químicos 119
5.6 - Ensaios de Variação Diária do Biospeckle 122
5.7 - Ensaios de Tempo de Exposição 124
5.8 - Ensaios de Resposta em Frequência 125

6 - CONCLUSÕES **132**

7 - FUTUROS TRABALHOS **134**

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS **135**

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS RECOMENDADAS **140**

ANEXOS **143**
Anexos A.1, A.2, A.3 143
Anexos A.4, A.5, A.6 144
Anexos A.7, A.8, B.1 145
Anexos B.2, B.3, C.1 146
Anexos C.2, C.3, C.4 147
Anexos C.5, C.6, D.1, E.1 148
Anexos E.2, E.3, E.4, E.5 149

LISTA DE TABELAS

Número e Descrição	Pág.
Tabela 3.1 - Estimativa do número total de plantas (Estado de São Paulo e parte do Triângulo Mineiro)	6
Tabela 3.2 - Número de plantas pôr variedade (Região de atuação do FUNDECITRUS)	6
Tabela 3.3 - Exportações de suco concentrado de laranja (ton.): Estado de São Paulo	8
Tabela 3.4 - Exportações de laranja *in natura* em milhões de caixa (40,8 Kg): Estado de São Paulo	9
Tabela 3.5 - Classificação de laranjas para consumo *in natura*	10
Tabela 3.6 - Classes de laranjas para consumo *in natura*	11
Tabela 3.7 - Tipos de laranja para consumo *in natura*	12
Tabela 3.8 - Rendimento médio de laranjas	21
Tabela 3.9 - Diâmetro, número e partes constituintes de uma célula vegetal	47
Tabela 5.1 - Caracterização dos tratamentos (grupos ou tempo decorrido da colheita)	97
Tabela 5.2 - Valores médios da variável cumulante estatístico B1 em função dos grupos, para cada ponto de tomada de imagem do “biospeckle” de laranjas	105

Tabela 5.3 - Valores médios do módulo de dispersão de intensidades (MDI) em função dos grupos, para cada ponto de tomada de imagem do "biospeckle" de laranjas 106

Tabela 5.4 - Valores dos cumulantes B1 em função dos tratamentos (feixe normal e com 90 graus do eixo de polarização) e dos pontos de tomada da imagem do "biospeckle" (A, B, C, D) para os 12 frutos da laranja pêra (Citrus sinensis Osbeck) 114

Tabela 5.5 - Valores dos módulos de dispersão de intensidades (MDI) em função dos tratamentos (feixe normal e com 90 graus do eixo de polarização) e dos pontos de tomada de imagem do "biospeckle" (A,B,C,D) para os 12 frutos da laranja pêra (*Citrus sinensis* Osbeck) 115

Tabela 5.6 - Valores médios da variável cumulante estatístico B1 em função da presença de componente especular (polarização normal), para cada ponto de tomada de imagem do "biospeckle" de laranjas (*Citrus sinensis* Osbeck) 116

Tabela 5.7 - Valores médios da variável módulo de dispersão de intensidades em função da presença da componente especular (polarização normal), para cada ponto de tomada de imagem do "biospeckle" de laranjas (*Citrus sinensis* Osbeck) 116

Tabela 5.8 - Estimação de parâmetros para umidade 118

Tabela 5.9 - Valores médios e agrupamentos de Tukey para as variáveis: módulo de dispersão de intensidades (MDI), ^{O}Brix, força de penetração e grau de maturação, em função dos diferentes cultivares de laranja 120

Tabela 5.10 - Estimativas dos coeficientes de correlação e respectivos níveis de significância entre os diversos fatores avaliados para quatro cultivares de laranja (cidreira, natal, lima e bahia) 121

Tabela 5.11 - Valores médios e agrupamento pelo teste de Tukey do módulo de dispersão de intensidades e do cumulante B1 em função dos dias decorridos da colheita da laranja, variedade bahia para um ponto da região equatorial 123

Tabela 5.12 - Valores Médios do módulo de dispersão de intensidades e agrupamento pelo teste de Scott-Knott em função do tempo de exposição ao laser 124

Tabela 5.13 - Valores médios e agrupamento de Tukey das variáveis: massa, força, ^{O}Brix, acidez total e firmeza em função dos dias decorridos da colheita da laranja, variedade pêra e estimativas dos coeficientes de correlação entre períodos e as variáveis. 125

LISTA DE FIGURAS, GRÁFICOS E MATRIZES

Número e Descrição	Pág.
Figura 3.1 - Mapeamento de propriedades produtoras de laranja no Estado de São Paulo e Minas Gerais (Fonte - FUNDECITRUS, 1998).	7
Gráfico 3.1 - Distribuição de árvores por variedade (fonte: FUNDECITRUS, 1998).	8
Figura 3.2 - Corte equatorial de uma fruta cítrica	18
Figura 3.3 - Representação fasorial do campo elétrico	39
Figura 3.4 - Representação da resultante do campo elétrico	39
Figura 3.5 - Corte transversal do pericarpo de uma laranja. Fonte: ERICSON, 1989	48
Figura 3.6 - Tecido vegetal enfocando a luz. Fonte: BONE, 1985	50
Figura 3.7 - Distribuição angular de dispersão da luz verde. Fonte: JOYCE, 1992	53
Figura 3.8 - Representação gráfica de um sinal aleatório $f_1(t)$	59
Figura 3.9 - Representação gráfica da função correlação positiva	59
Figura 3.10 - Representação gráfica de uma distribuição típica da função autocorrelação	60

Número e Descrição	Pág.
Figura 3.11 - Representação gráfica de uma distribuição típica da correlação cruzada	62
Figura 3.12 - Padrão STS de um produto com baixa atividade	67
Figura 3.13 - Padrão STS de um produto com alta atividade	67
Figura 3.14 - Representação gráfica das funções de autocorrelação dos padrões STS apresentados nas Figuras 3.12 e 3.13	68
Figura 3.15 - Simulação de STS alta atividade	72
Matriz 1 - Matriz de intensidades referente a Figura 3.15	72
Matriz 2 - Matriz de ocorrências da Figura 3.15	73
Figura 3.16 - MOM da Figura 3.15	74
Figura 3.17 - Simulação de STS baixa atividade	75
Matriz 3 - Matriz de intensidades referente a Figura 3.17	75
Matriz 4 - Matriz de ocorrências da Figura 3.17	76
Figura 3.18 - MOM da Figura 3.17	76
Figura 3.19 - STS baixa atividade	77

Número e Descrição	Pág.
Figura 3.20 - MOM baixa atividade	77
Figura 3.21 - STS alta atividade	78
Figura 3.22 - MOM alta atividade	78
Figura 3.23 - Reapresentação da MOM da Figura 3.15	79
Figura 3.24 - Reapresentação da MOM da Figura 3.17	80
Figura 4.1 - Configuração experimental básica dos ensaios	87
Figura 4.2 - Configuração experimental para eliminar a componente especular	88
Figura 4.3 - Configuração experimental para controle de intensidade	89
Figura 4.4 - Fotografia da configuração experimental dos ensaios com umidade monitorada	91
Figura 5.1 - Representação gráfica de uma laranja mostrando os pontos de tomada das imagens (A e B - região equatorial, C - inserção do pedúnculo e D - Extremidade inferior	98
Figura 5.2 - Representação gráfica da autocorrelação das três laranjas do grupo I (14 dias)	99
Figura 5.3 - Representação gráfica da autocorrelação das três laranjas do grupo II (7 dias)	99

Figura 5.4 - Representação gráfica dos 20 primeiros pontos da autocorrelação das três laranjas do grupo I (14 dias) 99

Figura 5.5 - Representação gráfica dos 20 primeiros pontos da autocorrelação das três laranjas do grupo II (7 dias) 99

Figura 5.6 - Representação gráfica da autocorrelação das três laranjas do grupo III (4 dias) 100

Figura 5.7 - Representação gráfica da autocorrelação das três laranjas do grupo IV (2 dias) 100

Figura 5.8 - Representação gráfica dos 20 primeiros pontos da autocorrelação das três laranjas do grupo III (4 dias) 100

Figura 5.9 - Representação gráfica dos 20 primeiros pontos da autocorrelação das três laranjas do grupo IV (2 dias) 100

Figura 5.10 - STS e MOM da laranja 1 - ponto A - (14 dias) 101

Figura 5.11- STS e MOM da laranja 2 - ponto A - (14 dias) 101

Figura 5.12- STS e MOM da laranja 3 - ponto A - (14 dias) 101

Figura 5.13 - STS e MOM da laranja 4 - ponto A - (7 dias) 102

Figura 5.14 - STS e MOM da laranja 5 - ponto A - (7 dias) 102

Figura 5.15 - STS e MOM da laranja 6 - ponto A - (7 dias) 102

Número e Descrição	Pág.

Figura 5.16 - STS e MOM da laranja 7 - ponto A - (4 dias) 103

Figura 5.17 - STS e MOM da laranja 8 - ponto A - (4 dias) 103

Figura 5.18 - STS e MOM da laranja 9 - ponto A - (4 dias) 103

Figura 5.19 - STS e MOM da laranja 10 - ponto A - (2 dias) 104

Figura 5.20 - STS e MOM da laranja 11 - ponto A - (2 dias) 104

Figura 5.21 - STS e MOM da laranja 12 - ponto A - (2 dias) 104

Figura 5.22 - Representação gráfica da autocorrelação da laranja 10 p/a 4 pontos de tomada de imagem 108

Figura 5.23 - Representação gráfica da autocorrelação da laranja 10 p/a 4 pontos de tomada de imagem a 90 graus 108

Figura 5.24 - Representação gráfica dos 20 primeiros pontos da autocorrelação da laranja 10 p/a 4 pontos de tomada de imagem 109

Figura 5.25 - Representação gráfica dos 20 primeiros pontos da autocorrelação da laranja 10 p/a 4 pontos de tomada de imagem 0 90 graus 109

Figura 5.26 - STS e MOM da laranja 10 (2 dias) - ponto A 110

Figura 5.27- STS e MOM da laranja 10 (2 dias) - ponto A - 90 graus 110

Figura 5.28 - STS e MOM da laranja 10 (2 dias) - ponto B 111

Figura 5.29 - STS e MOM da laranja 10 (2 dias) - ponto B - 90 graus 111

Figura 5.30 - STS e MOM da laranja 10 (2 dias) - ponto C 112

Figura 5.31 - STS e MOM da laranja 10 (2 dias) - ponto C - 90 graus 112

Figura 5.32 - STS e MOM da laranja 10 (2 dias) - ponto D 113

Figura 5.33 - STS e MOM da laranja 10 (2 dias) - ponto D - 90 graus 113

Figura 5.34 - Representação gráfica e equação de regressão dos valores de módulo de dispersão de intensidades (MDI) em função dos níveis de umidade 118

Figura 5.35a - Representação gráfica e equação de regressão dos valores de massa dos frutos em função dos dias decorridos da colheita. 127

Figura 5.35b - Representação gráfica e equação de regressão da força de compressão dos frutos em função dos dias decorridos da colheita. 128

Figura 5.35c - Representação gráfica e equação de regressão de ^{O}Brix dos frutos em função dos dias decorridos da colheita. 128

Figura 5.35d - Representação gráfica e equação de regressão da firmeza dos frutos em função dos dias decorridos da colheita. 129

Figura 5.35e - Representação gráfica e equação de regressão da acidez dos frutos em função dos dias decorridos da colheita. 130

Figura 5.35f - Representação gráfica e equação de regressão da firmeza dos frutos em função da força de compressão 131

LISTA DE EQUAÇÕES

Nº	Descrição	Equação	Pág.
(3.1)	Firmeza de acordo com NELSON, MOHSENIN, 1968	$FIRM=E/(1-\nu^2)$	26
(3.2)	"Stifness" de acordo com ABBOT et al, 1968	$S = (f_n^2).m$	29
(3.3)	Índice de Firmeza de acordo com GALILI et al (1997)	$(FI = f^2 m^{2/3})$	31
(3.4)	Descrição do campo elétrico	$E(z,t) = a\cos[2\pi(\nu t - z/\lambda)]$	37
(3.5)	Descrição do campo elétrico	$E(z,t) = a\cos[\omega t - kz]$	37
(3.6)	Representação exponencial complexa do campo elétrico	$E(z,t) = \mathrm{Re}\{a\exp[(i\omega t - kz)]\}$	38
(3.7)	Separação da variação temporal e espacial do campo elétrico (parte real)	$E(z,t) = \mathrm{Re}\{a\exp(-ikz)\exp(i\omega t)\}$	38

Nº	Descrição	Equação	Pág.
(3.8)	Separação da variação temporal e espacial do campo elétrico (parte real)	$E(z,t) = \mathrm{Re}\{a\exp(-i\varphi)\exp(i\omega t)\}$	38
(3.9)	Parte real da variação temporal do campo elétrico	$E(z,t) = \mathrm{Re}\{A\exp(i\omega t)\}$	38
(3.10)	Energia luminosa que atravessa uma área unitária	$\langle E^2 \rangle = \lim_{T\to\infty} \int_{-T}^{T} E^2 dt = \frac{a^2}{2}$	40
(3.11)	Intensidade óptica	$I = A^2 = AA^* = \lvert A \rvert^2$	41
(3.12)	Complexo conjugado de A	$A^* = a\exp(i\varphi)$	41
(3.13)	Variação da intensidade da luz com a espessura do meio	$dI_\lambda = -\mu_\lambda I_\lambda dz$	42
(3.14)	Intensidade da luz em função da espessura do meio	$I_{\lambda,z} = I_{\lambda,0}\exp(-\mu z)$	43
(3.15)	Coeficiente de transmissão espectral	$\tau_\lambda = \frac{I_{\lambda,z}}{I_{\lambda,0}} = \exp(-\mu z)$	43

Nº	Descrição	Equação	Pág.
(3.16)	Distribuição angular da radiação dispersa	$\beta(\phi) = \left(1 + \cos^2 \phi\right)$	51
(3.17)	Seção eficaz da dispersão	$S = \pi r^2 k(y,n)$	52
(3.18)	Parâmetro que considera o raio da partícula e comprimento da onda	$y = \frac{2\pi r}{\lambda}$	52
(3.19)	Coeficiente de transporte	$\mu_{tr} = \mu_s^{'} + \mu_\lambda$	52
(3.20)	Coeficiente de dispersão	$\mu_s^{'} = (1-g)\mu_s$	52
(3.21)	Diâmetro do grão de "speckle"	$d = 2.44\left(\frac{\lambda.z}{D}\right)$	54
(3.22)	Diâmetro da área iluminada em função da profundidade	$D = D_0\left[1 - \exp\left(-\frac{T}{T_0}\right)\right]$	55
(3.23)	Contraste de uma imagem	$contraste = \frac{\sigma^2}{\langle I \rangle^2}$	56

Nº	Descrição	Equação	Pág.
(3.24)	Função autocorrelação temporal	$\phi_{11}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) f_1(t+\tau) dt$	58
(3.25)	Autocorrelação para "lag" igual a zero	$\phi_{11}(0) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T f_1^2(t)\ dt$	60
(3.26)	Transformada inversa da densidade espectral $S_{11}(\omega)$	$\phi_{11}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{11}(\omega) e^{j\omega t} d\omega$	61
(3.27)	Densidade espectral como a Transformada da autocorrelação $\phi_{11}(\tau)$	$S_{11}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_{11}(\tau) e^{-j\omega t} d\tau$	61
(3.28)	Autocorrelação para "lag" igual a zero	$\phi_{11}(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{11}(\omega) d\omega$	61
(3.29)	Correlação cruzada	$\phi_{12}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) f_2(t+\tau) dt$	62
(3.30)	Transformada inversa da densidade espectral cruzada	$\phi_{12}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{12}(\omega) e^{j\omega t} d\omega$	63
(3.31)	Densidade espectral cruzada como a transformada da autocorrelação	$S_{12}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_{12}(\tau) e^{-j\omega t} d\tau$	63

Nº	Descrição	Equação	Pág.
(3.32)	Coeficiente de correlação normalizado	$\mu = \frac{\langle (I_o - \langle I_o \rangle)(I_t - \langle I_t \rangle) \rangle}{\sigma_o \sigma_t} = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(I_{o,i} - \langle I_o \rangle)(I_{t,i} - \langle I_t \rangle)}{\sigma_o \sigma_t}$	64
(3.33)	Variância da intensidade	$\sigma_t^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(I_{t,i} - \langle I_t^2 \rangle)$	64
(3.34)	Esperança matemática ou valor médio da intensidade	$\langle I_t \rangle = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(I_{t,i})$	64
(3.35)	Esperança matemática ou valor médio da correlação temporal	$R_1(\tau) = \langle I(t) I(t+\tau) \rangle$	64
(3.36)	Autocorrelação normalizada	$\gamma_1(\tau) = R_1(\tau) / \langle I^2(t) \rangle$	64
(3.37)	Coeficiente de correlação tempoespacial	$C_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{N}[I(k,i) - \mu]\,[I(k,i+j) - \mu]}{\left\{\sum_{k=1}^{N}[I(k,i) - \mu]^2 \sum_{k=1}^{N}[(k,i+j) - \mu]^2\right\}^{1/2}}$	65
(3.38)	Valor médio do coeficiente de correlação tempoespacial	$C_j = \sum_{i=1}^{M/2} C_{ij}$	65

Nº	Descrição	Equação	Pág.
(3.39)	Autocorrelação da intensidade do "speckle"	$\gamma(t) = \frac{1}{\langle I^2 \rangle} \int_{-\infty}^{\infty} I(\tau).I(\tau - t)d\tau$	66
(3.40)	Probabilidade de u ser igual a x	$p_u(x) = \Pr ob[u = x] = \frac{número\ de\ elementos\ com\ nível\ x}{número\ total\ de\ elementos}$	70
(3.41)	Probabilidade de u_1 ser igual a x_1 e u_2 ser igual a x_2	$p_u(x_1, x_2) = p_{u1,u2}(x_1, x_2) = \Pr ob[u_1 = x_1, u_2 = x_2]$	70
(3.42)	Probabilidade de u_1 ser igual a x_1 e u_2 ser igual a x_2	$p_u(x_1, x_2) = \frac{número\ de\ pares\ de\ elementos\ com\ níveis\ u_1 = x_1, u_2 = x_2}{número\ total\ de\ pares\ de\ elementos\ da\ imagem}$	70
(3.43)	Matriz de ocorrências	$COM = \lfloor N_{ij} \rfloor$	71
(3.44)	Matriz de ocorrências modificada	$M_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_j N_{ij}}$	73
(3.45)	Módulo de dispersão de intensidades	$MDI = \sum_{ij} M_{ij}(i - j)^2$	79
(3.46)	Função geradora dos cumulantes estatísticos	$K(t) = \log_e \{M(t)\}$	82

Nº	Descrição	Equação	Pág.
(3.47)	Função geradora dos momentos	$M(t) = e^{K(t)}$	82
(3.48)	Expansão em série da função geradora dos cumulantes estatísticos	$K(t) = k_1 t + k_2 \frac{t^2}{2!} + \ldots + k_r \frac{t^r}{r!} + \ldots$	82
(3.49)	Função temporal utilizada como função característica	$G'(t) = \exp\left[\sum_1^{\infty} \frac{k_n}{n!}(it)^n\right]$	83
(3.50)	Autocorrelação descrita por cumulantes proposta por ROMERO, 1999.	$G(\tau) = A + (1-A)\exp\left\{-\left(B_1\tau + B_2\tau^2 + B_3\tau^3 + \Lambda + B_n\tau^n\right)\right\}$	83
(3.51)	Relação entre os coeficientes B da equação 3.50 e os cumulantes	$B_i = \frac{k_i i^n}{n!}$	83

RESUMO

Devido à importância sócio-econômica da citricultura no Brasil, à busca pela melhoria da qualidade dos produtos e disputa por um mercado consumidor interno e de exportação, este trabalho avaliou novas tecnologias aplicadas no monitoramento de qualidade de laranjas. Dois métodos que estão surgindo como ferramentas de medição não destrutivas e não invasivas foram estudados. Um se baseia na resposta do fruto à excitação mecânica e o outro, na interpretação de um fenômeno óptico que ocorre ao se incidir luz coerente sobre o fruto. Como um método óptico de análise apresenta a vantagem de não ter contato com os espécimes, este trabalho se concentra na avaliação da aplicação das propriedades da incidência do laser no monitoramento da qualidade de frutos. A luz laser, ao incidir sobre um material que exibe algum tipo de atividade, dá origem a um fenômeno referido na literatura como "biospeckle" ou "speckle" dinâmico. Este fenômeno é resultado de alterações na fase da luz incidente, produzidas por movimentos de pontos dispersores e mudanças no índice de refração. Os padrões de espalhamento da luz laser em laranjas foram medidos através da quantificação da variação temporal do "speckle". Para quantificação dessa variação, a função autocorrelação temporal e a matriz de ocorrências foram utilizadas. Dessas, foram obtidos dois parâmetros, os cumulantes estatísticos, calculados a partir da função autocorrelação e o módulo de dispersão de intensidades, calculado a partir da matriz de ocorrências modificada. Essas variáveis foram consideradas como indicadores de qualidade e senescência dos espécimes e foram comparadas com outras variáveis tais como: sólidos solúveis totais, acidez total titulável, força de penetração e com o tempo de estocagem. Nos ensaios de medição de resposta à excitação acústica, a freqüência de ressonância central dos espécimes foi utilizada no cálculo de um índice de firmeza, para comparação com os outros atributos de qualidade. Ambas as técnicas não são utilizadas até o presente momento como testes de rotina, sendo objeto de estudos de trabalhos de pesquisa recentes. Existe uma complexidade envolvida nos ensaios e na fisiologia dos materiais que exige o aprimoramento das técnicas, a utilização de equipamentos mais rápidos e também, um controle mais eficiente das condições ambientais para que, em médio prazo, seja possível a construção de equipamentos de seleção utilizando o "biospeckle" e a resposta à excitação mecânica.

SUMMARY

Due to socioeconomic importance of Brazilian citrus fruit production, to constant search for the improvement of the quality of the products and it argues for the internal consuming market and of export, this work presents a study of new technologies that can be applied in tests of maturity of oranges. It was performed the evaluation of two methods that arise as new nondestructive and noninvasive measuring tools. The first bases on frequency response of fruits to mechanical excitement and, the other bases in the interpretation of an optic phenomenon that occurs when the fruit is illuminated with coherent light. Due to the advantage of an optic method do not touch the specimens; this work is concentrate on evaluating the application of the properties of incidence of laser light in monitoring fruits quality. When laser lights reaches an object that exhibits some type of activity, creates a phenomenon referred in the literature as biospeckle or dynamic speckle. The phenomenon appears due to changes in the phase of the incident light, produced by movements of the scatters and changes in refractive index. The speckle patterns of light scattered in oranges fruits were measured through the quantification of the temporal variation of biospeckle. For the quantification of that variation, the autocorrelation function and the modified concurrency matrix were used. From these functions two parameters were obtained: the statistical cumulants, calculated from the autocorrelation function and the intensity dispersion modulus, calculated from the modified concurrency matrix. These variables were used as quality and senescence indicators for the specimens and were compared with others parameters, for example: total soluble solids, total acidity, the penetration force and the storage period. In the frequency response tests, central resonance frequency was used to calculate a firmness index, which was compared with other quality characteristics. These techniques, until the present moment, are not used as routine tests; therefore, both have been studied and related in the recent researches works. There are some complexity of the experiments and physiology of material that demand the improvement and optimization of the techniques, the use of faster equipment's and also, a more efficient control of the environmental conditions so that, in medium period, be possible the construction of sorter equipment using biospeckle and frequency response to mechanical excitement.

1 - INTRODUÇÃO

De todas as árvores frutíferas, uma das mais conhecidas, cultivadas e estudadas em todo o mundo é a laranjeira. Atualmente, o maior volume de produção, proveniente de uma citricultura estruturada, está localizado nas regiões de clima tropical e subtropical, destacando-se como os principais produtores mundiais de *citrus* o Estado de São Paulo, no Brasil, e Flórida, nos Estados Unidos da América do Norte. No Brasil, a citricultura ocupa um lugar de destaque na fruticultura devido à geração de empregos diretos e indiretos, à grande área cultivada e, também, devido à parcela do PIB gerado por essa cultura.

O crescimento da produção mundial da laranja e o desenvolvimento da industrialização de suco aumentaram a concorrência, e assim, a aceitação dos frutos passou a depender fundamentalmente da qualidade, que é um fator importante na cadeia de comercialização. As condições de colheita, de transporte e de armazenamento de frutas cítricas, de uma forma geral, não podem ser controladas pela indústria, ficando, normalmente a cargo dos produtores. Dependendo dessas condições, pode ocorrer o comprometimento da qualidade dos frutos. A perda da qualidade é freqüentemente refletida na rigidez ou firmeza que é a expressão do comportamento do fruto na relação força/deformação. Sabe-se que os equipamentos de extração de suco são regulados para operação com frutos firmes e, quando um fruto macio chega até o extrator, ocorre um embuchamento e entupimento dos canais de sucção, o qual gera uma interrupção da produção, resultando em prejuízos significativos. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de estudar as propriedades mecânicas de *hortifrutis*, visando desenvolver equipamentos de medição de firmeza e correlacionar essas propriedades com o grau de maturação. Alguns métodos empregados nessas pesquisas utilizam equipamentos baseados no método desenvolvido em 1925 por Magness e Taylor, tal como o penetrômetro, de fácil operação, entretanto, com a desvantagem de ser um método destrutivo. Dessa forma, as recentes pesquisas vêm buscando estudar técnicas não destrutivas para a avaliação da qualidade de produtos vegetais, enfocando principalmente o

monitoramento da qualidade dos produtos em “shelf-life" (vida-de-prateleira), visando principalmente disponibilizar frutos armazenados na entressafra.

Como técnica não destrutiva, tem sido utilizada a medição de freqüências naturais na avaliação da firmeza de frutos quando excitados por impacto ou excitados dinamicamente. Os métodos que empregam visão artificial (“machine vision") e processamento de imagens também ocupam um lugar de destaque em pesquisas mais recentes. Esses métodos são utilizados para avaliar a variação das propriedades ópticas da superfície dos frutos de acordo com o grau de maturação. Entretanto, através do uso da luz laser, consegue-se um melhor desempenho desses métodos, uma vez que esse tipo de luz tem maior penetração no fruto, permitindo uma avaliação de alterações internas e não somente superficiais.

A luz laser, ao incidir e penetrar em um material biológico sofre interferências de raios que se interceptam construtiva e destrutivamente, formando uma figura de interferência que se modifica continuamente com uma dinâmica dependente da atividade da amostra. Esse fenômeno é conhecido como “speckle” dinâmico, “speckle” temporal ou “biospeckle”. Desde a descoberta desse fenômeno, muitos esforços têm sido empenhados para sua exploração como ferramenta não destrutiva na medição de atividade biológica desses materiais. As propriedades estatísticas do “biospeckle” e um modelo matemático de sua descrição ainda não foram bem estabelecidos, devido à complexidade envolvida na constituição, e na atividade biológica de uma forma geral. Independentemente disso, é possível quantificar a variação temporal do “biospeckle”, possibilitando a obtenção de informações capazes de estimar a atividade biológica do material sob estudo.

Considerando a tendência da pesquisa em desenvolver ensaios não destrutivos para avaliar a qualidade de *hortifrutis*, neste trabalho foi desenvolvido um estudo das variações fisiológicas de laranjas, considerando as variações temporais do “speckle” dinâmico e, também, as variações da resposta em freqüência, quando submetidas a um impacto não destrutivo, baseando-se no fato de que quando mais firme for o fruto, mais elevadas serão suas freqüências naturais. A quantificação da variação temporal do “biospeckle” foi utilizada para diferenciar o comportamento de espécimes de laranja quando submetidos à luz laser. Para essa quantificação foram utilizadas técnicas modernas de tratamento digital de imagens.

2 - OBJETIVOS

2.1 - Geral

Avaliar duas técnicas como possíveis ferramentas para a determinação das alterações fisiológicas em frutos: a primeira, baseada em uma configuração básica referente à aplicação da técnica do "speckle" dinâmico ("biospeckle") e a segunda baseada na resposta dos frutos a exictação acústica.

2.2 - Específicos

- Analisar o "speckle" dinâmico de laranjas (*Citrus sinensis* Osbeck).
- Quantificar a variação temporal do "speckle" dinâmico para vários cultivares de laranjas.
- Avaliar o "speckle" dinâmico em vários pontos dos espécimes.
- Avaliar o efeito da componente especular do "speckle" dinâmico para vários pontos dos espécimes.
- Comparar as mudanças no "speckle" dinâmico com as alterações fisiológicas (senescência) de laranjas (*Citrus sinensis* Osbeck).
- Comparar as mudanças no índice de firmeza calculado a partir das freqüências naturais da laranja (*Citrus sinensis* Osbeck) com suas alterações fisiológicas (senescência).

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Considerações Iniciais

Devido à importância econômica da produção de laranja e de suco no Brasil, novos processos de classificação e seleção podem ser desenvolvidos e implementados, a partir do momento que os pesquisadores se empenharem nos estudos das propriedades mecânicas e conhecerem todo o processo produtivo, de forma que os produtos vegetais brasileiros possam atingir um padrão de qualidade aceito mundialmente. Nesse sentido, se faz necessário conhecer um pouco da origem, da produção histórica e da produção atual de laranja, bem como algumas de suas características fisiológicas e propriedades mecânicas.

3.2 - A Origem da Citricultura

Existem registros da existência de laranja como alimento no vale do Yang Tsé, na China, há quatro mil anos. A esse fruto, os persas deram o nome de "nêrang", originada do sânscrito "narangah", que significa alimento. Segundo Hasse (1987), citado por ABECITRUS (1998), não se conhece com precisão a trajetória da laranja pelo mundo. Sabe-se que esse fruto foi levado da Ásia para o norte da África e de lá para o sul da Europa, onde teria chegado na Idade Média. Da Europa foi trazido para as Américas na época dos descobrimentos, por volta de 1500 DC.

Na primeira metade do século XIX o Brasil foi alvo de interesse dos pesquisadores europeus, surgindo na época muitos estudos e publicações sobre a flora brasileira. Muitos viajantes mencionaram a existência de laranjeiras selvagens no interior do Brasil, levando muitos a acreditar que a laranja era uma fruta nativa. Na realidade, a boa adaptação da laranja ao clima e ao solo brasileiros produziu uma variedade particular, reconhecida internacionalmente como a laranja bahia,

baiana ou laranja de umbigo, que teria surgido por volta de 1800 (Hasse, 1987, citado por ABECITRUS, 1998). No ano de 1873, os técnicos em citricultura de Riverdale, Califórnia, receberam três mudas de laranja bahia, de onde saíram as mudas que se espalharam pelos EUA e outras partes do mundo com o nome de Washington Navel (ABECITRUS, 1998).

De acordo com essa mesma fonte, uma geada ocorrida nos Estados Unidos da América no ano de 1962 provocou a falta de suco, transformando o Brasil em um promissor pólo alternativo para os mercados norte-americanos e europeus, culminando na criação de pequenas fábricas no interior do Estado de São Paulo. No ano de 1961 e de 1962, iniciaram-se algumas exportações experimentais de suco de laranja, mas, oficialmente, considera-se que a indústria brasileira de cítricos voltada para a exportação nasceu em 1963, quando o país exportou mais de cinco mil toneladas de suco, arrecadando mais de dois milhões de dólares. Devido ao desenvolvimento da indústria de processamento de frutos cítricos e ao crescimento das exportações, o Brasil tornou-se o maior produtor mundial de laranjas com mais de um milhão de hectares de plantas cítricas em seu território. A maior parte da produção brasileira se destina à indústria de suco, concentrada no Estado de São Paulo, responsável por 70% da produção de laranja (400 milhões de caixas por ano) e 98% da produção brasileira de suco (ABECITRUS, 1998). Os principais países produtores de frutas cítricas que ocupam uma posição de destaque no mundo incluem o Brasil, os Estados Unidos, a África do Sul, México, e China.

3.3 - A Produção de Laranja no Brasil

Em 1995 o FUNDECITRUS (Fundo Paulista de Defesa da Citricultura) cadastrou as propriedades existentes na região de sua atuação, alcançando um total de 110.000 propriedades produtoras de *citrus*. Através das informações prestadas pelos proprietários de pomares e por meio de levantamentos realizados nas propriedades, foram obtidos dados sobre o número de plantas cítricas e as variedades presentes em cada propriedade. Nos anos subsequentes o processo de

quantificação foi repetido e novas propriedades foram cadastradas, levantando-se dados de acréscimo ou decréscimo para todo o parque citrícola o que é apresentado na Tabela 3.1.

A Tabela 3.2 apresenta a estimativa de número de plantas por variedade na região de atuação do FUNDECITRUS.

Tabela 3.1 - Estimativa do número total de plantas (Estado de São Paulo e parte do Triângulo Mineiro)

CATEGORIA	Nº DE PLANTAS	PERCENTUAL
Produtivas	171,6 milhões	81,45
Não Produtivas	39,1 milhões	18,55
TOTAL	210,7 milhões	100,00

Fonte: FUNDECITRUS, 1998

Tabela 3.2 - Número de plantas por variedade (Região de atuação do FUNDECITRUS)

VARIEDADE	Nº DE PLANTAS	%
Hamlin	14,3 milhões	6,79
Natal	53,9 milhões	25,58
Pêra	80,1 milhões	38,02
Valência	36,5 milhões	17,32
Limões	6,1 milhões	2,90
Tangerinas	11,6 milhões	5,51
Outras	8,2 milhões	3,89

Fonte: FUNDECITRUS, 1998

A Figura 3.1 apresenta um mapa atualizado até o ano de 1998 do maior centro produtor de laranja do Brasil, segundo o FUNDECITRUS (1998).

A distribuição de número de árvores por variedade está representada pelo gráfico 3.1, onde se observa que a produção de laranja pêra (*Citrus sinensis* Osbeck) ocupa um lugar de destaque.

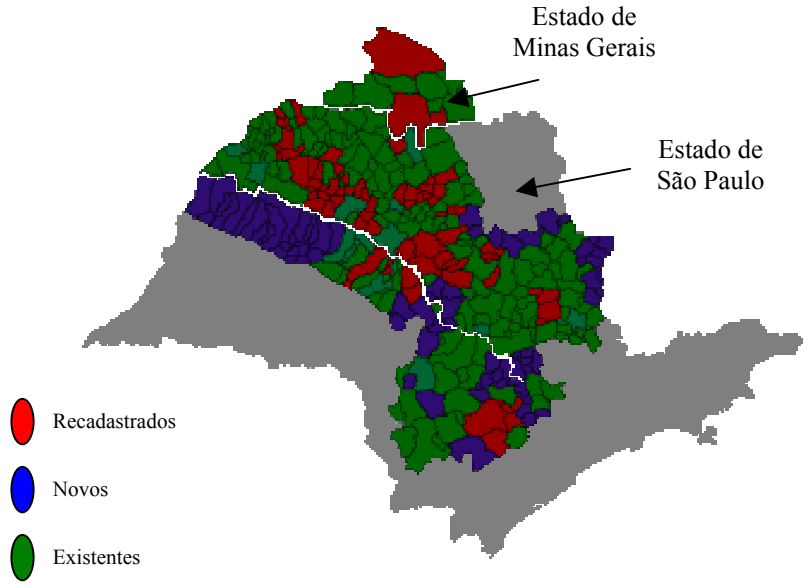

Figura 3.1 - Mapeamento de propriedades produtoras de laranja no Estado de São Paulo e Minas Gerais. (Fonte: FUNDECITRUS, 1998)

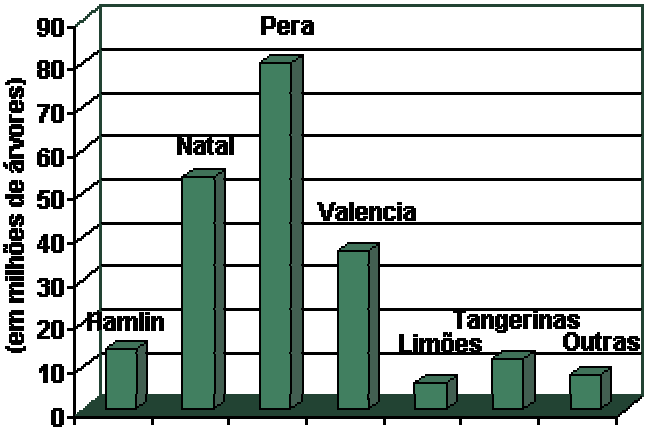

Gráfico 3.1 - Distribuição de árvores por variedade
(Fonte: FUNDECITRUS, 1998)

Os dados referentes às exportações de suco concentrado em toneladas, bem como os principais compradores internacionais são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Exportações de suco concentrado de laranja (ton.): Estado de São Paulo

Mês	União Européia	Nafta	Ásia	Mercosul	Outros	Total
Jan	71.396	4.298	13.199	282	2.834	92.009
Fev	35.520	11.550	12.538	127	1.790	61.526
Mar	75.228	10.548	14.249	240	2.004	102.269
Abr	84.932	12.280	986	172	2.493	100.863
Mai	89.796	10.600	6.109	154	2.387	109.046
Jun	83.384	11.145	10.959	274	3.048	108.810
Jul	79.518	200	19.196	248	1.676	100.838
Total	519.774	60.621	77.236	1.497	16.232	675.361

Fonte: ABECITRUS, 1998

A Tabela 3.4 apresenta os dados de exportação de laranja *in natura* desde o ano de 1990 até o ano de 1998.

Tabela 3.4 - Exportações de laranja *in natura* em milhões de caixas (40,8 Kg): Estado de São Paulo

Ano Safra	Exportação
90/91	1,9
91/92	2,7
92/93	2,0
93/94	2,5
94/95	3,3
95/96	3,2
96/97	1,9
97/98	1,7

Fonte: ABECITRUS, 1998

3.4 - Seleção de Laranjas

A laranja se espalhou pelo mundo sofrendo alterações genéticas e dando origem a novas variedades. Durante a maior parte desse período, a citricultura foi sofrendo mutações experimentais sem controle, de forma que o cultivo das sementes resultava em modificações aleatórias do sabor, aroma, cor e o tamanho dos frutos (ABECITRUS, 1998).

De acordo com ABECITRUS (1998), somente no início do século XX, os Estados Unidos da América passaram a desenvolver pesquisas de melhoramento da citricultura. Entretanto, grande parte dos estudos era voltada para o melhoramento do aspecto, tamanho e sabor dos frutos, como também para o aprimoramento genético visando a obtenção de árvores mais resistentes às doenças e às variações climáticas.

Em 1981, o Ministério da Agricultura do Brasil, através da SECRETARIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, estabeleceu normas e padrões de qualidade de laranjas, classificando-as em grupos, classes e tipos. A Tabela 3.5 apresenta a classificação por grupos com as respectivas variedades.

Tabela 3.5 - Classificação de laranjas para consumo *in natura*

Grupos	VARIEDADES
Grupo I	bahia, baianinha, hamlin, pêra, natal, valência, seleta, folhas murcha e mimo do céu.
Grupo II	barão e russas
Grupo III	lima (do céu e serra d' água) e piralima.

Fonte: COSTA, 1994

Independentemente da variedade, as laranjas podem ser classificadas em 13 classes, definidas em função do maior diâmetro equatorial do fruto ou pelo número máximo de frutos por caixas do tipo “M” , confeccionada de madeira ou material similar com comprimento de 540 mm, largura de 290 mm e altura de 290 mm. A Tabela 3.6 apresenta a classificação por classe (Ministério da Agricultura do Brasil, 1981, citado por COSTA, 1994).

Tabela 3.6 - Classes de laranjas para consumo *in natura*

Classes	**Diâmetro Eq. (mm)**	**Nº Frutos por Caixa**	**Diagrama**		
			Filas	Nº Frutos / Fila	Camadas
1	< 92	45 a 56	2 x 2	4x3 ou 5x5	4
2	88 a < 92	64 a 72	2 x 2	4x4 ou 4x5	4
3	85 a < 88	80 a 88	2 x 2	4x5 ou 5x6	4
4	81 a < 85	96 a 104	2 x 2	6x6 ou 7x6	4
5	76 a < 81	112 a 126	3 x 2	4x5 ou 5x5	5
6	73 a < 76	137 a 150	3 x 2	5x6 ou 6x6	5
7	70 a < 73	162 a 175	3 x 2	7x6 ou 7x7	5
8	65 a < 70	187 a 200	3 x 2	8x7 ou 8x8	5
9	60 a < 65	216 a 234	3 x 3	6x8 ou 7x6	6
10	57 a < 60	252 a 270	3 x 3	7x7 ou 8x7	6
11	54 a < 57	288 a 306	3 x 3	8x8 ou 9x8	6
12	51 a < 54	324 a 342	3 x 3	9x9 ou 10x9	6
13	48 a < 51	360 a 378	3 x 3	10x10 ou 11x10	6

Fonte: COSTA, 1994

Para a classificação da qualidade, as laranjas são divididas em três tipos, conforme apresentado na Tabela 3.7, de acordo com suas características quanto à apresentação de defeitos (Ministério da Agricultura do Brasil, 1981, citado por COSTA, 1994).

Tabela 3.7 - Tipos de laranja para consumo *in natura*

Fatores de Qualidade (Defeitos)	**Valor Percentual por Tipo de Laranja**		
	Extra	Especial	Primeira
Danos mecânicos	1	5	10
Podridões	1	2	3
Leprose	1	2	3
Oleocelose rasa	1	3	5
Manchas de pragas e/ou doenças	5	10	20
Frutos murchos	0	1	2
Frutos passados	0	0	0
Tolerância máxima permitida	7	15	30

Fonte: COSTA, 1994

De acordo com o Ministério da Agricultura do Brasil (1981), citado por COSTA (1994), quando houver interesse do comprador e/ou do vendedor, ou mesmo do próprio Ministério da Agricultura, a laranja também poderá ser classificada quanto ao teor de suco por peso da amostra, e quanto à relação entre a acidez e a percentagem de sólidos solúveis, ou seja, a relação acidez/^{O}BRIX e também quanto à coloração do fruto. Quanto ao teor mínimo de suco em relação ao peso da amostra deve-se adotar o seguinte:

- 40% para laranjas pertencentes ao grupo I
- 35% para laranjas pertencentes aos grupos II e III

A relação acidez por sólidos solúveis deve ser usada somente para laranjas pertencentes aos grupos I e II. Independente do tipo a que pertença, a relação mínima de acidez/ ^{O}BRIX deve ser de 1:6,5. Quanto à coloração, essa deverá ser uniforme e de acordo com as características próprias da variedade, não sendo permitida a coloração artificial do fruto.

3.5 - Atributos de Qualidade da Laranja

Qualidade é um termo genérico de difícil definição e quantificação, pois é variável entre produtos e, mesmo que se considere um único produto, a qualidade pode depender da finalidade da comercialização, bem como da exigência do comprador. Nesses termos, os requisitos de qualidade relacionam-se com o destino dos produtos, os quais podem ser armazenados, consumidos *in natura* ou processados. Fatores culturais também podem interferir na definição de qualidade, por exemplo pode-se citar o consumo de abacate *in natura* pelos brasileiros, que normalmente o consomem na forma de pasta adicionando açúcar, enquanto que os europeus preferem consumir esse tipo de fruto em saladas na forma sólida. Em geral o consumidor tem papel preponderante e utiliza um julgamento subjetivo para a qualidade e aceitação do produto, principalmente no consumo *in natura*.

Do ponto de vista da ciência dos alimentos, a qualidade de um produto é composta por características que diferenciam unidades individuais, as quais determinam o grau de aceitabilidade do produto pelo comprador. Dessa forma, devem ser considerados os atributos físicos, sensoriais e a composição química, bem como devem ser realizadas associações entre medidas objetivas e subjetivas, para um melhor entendimento das transformações que ocorrem, afetando ou não a qualidade do produto (CHITARRA e CHITARRA, 1990).

Os frutos normalmente são selecionados pelo consumidor considerando uma correlação de alguns atributos com a qualidade. Esses atributos dizem respeito a aparência, sabor, odor, textura e valor nutritivo, tendo importância variada de acordo com os interesses de cada segmento da cadeia de comercialização, ou seja, desde o produtor até o consumidor.

A aparência e a firmeza são os atributos principais para os comerciantes, assim como a resistência à doenças é fator primordial para os geneticistas. Já os consumidores dão ênfase à aparência e às características sensoriais como sabor, cor, tamanho, forma, ausência de defeitos, coloração, textura, aroma, embora outras características como valor nutritivo e segurança (referente a ausência de resíduos químicos) sejam também atributos de qualidade.

As mudanças nas cores dos frutos durante seu amadurecimento são freqüentemente correlacionadas pelo consumidor com a maturação, doçura e qualidade, de forma que a escolha dos produtos recai sempre nos produtos mais coloridos (CHITARRA e CHITARRA, 1990). Sob o ponto de vista da ciência, nem sempre há uma correlação direta entre a cor e qualidade. Alguns cultivares de laranja sofrem reverdecimento depois de colhidos, produzindo uma aparência de fruto verde, embora se encontrem completamente maduros. Embora as transformações das cores nos frutos sejam utilizadas como guia de maturidade pelo consumidor, não são inteiramente confiáveis, pois sofrem influência de fatores que não têm relação com a maturação. Por exemplo, nos frutos como o mamão, a cor é um indicador bastante confiável de maturidade devido ao aparecimento de traços amarelos na região apical, indicativo da época adequada para colheita (CHITARRA e CHITARRA, 1990).

De acordo com CHITARRA (1990), nos produtos processados, a cor é um importante atributo de qualidade. Por exemplo, os sucos de laranja de algumas variedades podem apresentar sabor e aroma ideais, entretanto a cor pode apresentar-se fraca, por influência da estação de colheita, o que pode provocar a rejeição do suco.

A textura é o atributo de qualidade mais importante, pois a estrutura do tecido interfere na liberação de compostos presentes no produto perceptíveis pelo paladar. A maioria dos frutos se torna macia durante o processo de amadurecimento, se constituindo em o principal atributo de qualidade, o qual freqüentemente dita sua vida útil (SEYMOUR *et al*, 1993). Esse atributo é uma combinação de sensações derivadas dos lábios, língua, mucosa da boca, dentes e ouvido. Cada área é sensível à pequenas diferenças de pressão e apresenta respostas diferentes a cada atributo ou característica do produto. O conjunto das impressões obtidas na mastigação é responsável pela aceitação ou rejeição do produto (CHITARRA e CHITARRA, 1990). A textura é definida como o conjunto de propriedades do alimento, compostas por características físicas perceptíveis pelo tato, que se relacionam com a deformação, desintegração e fluxo do alimento sob a aplicação de uma força. Essas características são avaliadas objetivamente por funções de força, tempo e deformação (CHITARRA e CHITARRA, 1990).

As substâncias pécticas são os principais componentes químicos dos tecidos, responsáveis pelas mudanças de textura dos frutos e hortaliças. As pectinas correspondem quimicamente a uma cadeia linear de ácido poligalacturônico (polímero do ácido galacturônico), unido por ligações α, 1-4 de ácido galacturônico, no qual os grupos carboxílicos podem estar parcialmente esterificados com metanol. Quando os grupos carboxílicos ácidos se encontram ligados ao cálcio, formam o pectato de cálcio, o qual é insolúvel em água e também designado como protopectina, predominante nos frutos imaturos. Com o amadurecimento, há liberação de cálcio e solubilização da protopectina das paredes celulares. Ocorre então a modificação da textura e o tecido se torna gradualmente macio. Essas transformações ocorrem durante o amadurecimento e durante o armazenamento (CHITARRA e CHITARRA, 1990). A decomposição das moléculas poliméricas como protopectinas, celuloses, hemiceluloses e amido, amaciam as paredes celulares, pois diminuem a força coesiva que mantém as células unidas.

A avaliação da textura pode ser promovida por métodos subjetivos através da compressão do produto com o polegar ou por um painel de análise sensorial. As avaliações sensoriais fazem associação do paladar, olfato e tato. A combinação das sensações ou interação desses sentidos serve como expressão da qualidade na mente do provador. Os métodos objetivos correspondem a uma expressão numérica das características da firmeza com o auxílio de penetrômetros, pressurômetros, prensas, dentre outros.

É muito difícil atingir uma padronização dos produtos para comercialização no mercado interno e para exportação. Para evitar que os produtos tenham seu valor comercial muito reduzido, devido a essa falta de padrão, o produtor pode fazer uma seleção durante a própria colheita, excluindo aqueles produtos que apresentam defeitos. Em geral, os defeitos mais comuns encontrados em produtos agrícolas são:

- esmagamento : é provocado pelas ações mecânicas do granizo, vento, transporte e por outros meios.

- ferimentos e cortes : são causados também pelas ações mecânicas do granizo, vento, transporte e excesso de manuseio durante a colheita.

- oleocelose rasa : é uma lesão mecânica com mais de um centímetro ou no máximo três manchas, cuja soma das superfícies ultrapasse a um centímetro de diâmetro.

Alguns outros tipos de defeitos, tais como, podridão, manchas provocadas por pragas, manchas decorrentes de doenças, leprose, frutos murchos e frutos passados, resultam no descarte dos frutos e produtos vegetais de uma forma geral. Tais defeitos também favorecem a multiplicação de microorganismos que afetam os frutos sadios adjacentes. Alguns desses defeitos são provocados por excesso de manuseio e sobrecarga imposta aos produtos durante a condução de armazenamento e transporte, portanto, podem ser minimizados.

O armazenamento a frio de frutos cítricos é efetuado para sua preservação durante o transporte a longas distâncias, de forma que sua qualidade não seja muito alterada de quando colhido (COSTA, 1994). O armazenamento em atmosfera controlada é uma prática importante utilizada em combinação com refrigeração, onde são retardadas: a atividade respiratória, o amarelamento, o amolecimento e as alterações de qualidade, mantendo-se a atmosfera com concentração maior de CO_2 e menor de O_2 do que na atmosfera normal. Hoje em dia, mais da metade das maçãs produzidas nos Estados Unidos da América do Norte e do *citrus* em Israel são estocadas sob condições de atmosfera controlada, antes da comercialização.

Uma outra forma de armazenamento é conhecida como atmosfera modificada. Nesse caso, não se preocupa com o controle dos gases, sendo um procedimento mais simples que consiste do envolvimento do produto em filmes polímeros de espessura predefinida de forma a permitir o

acúmulo de CO_2 a níveis mais elevados dentro da embalagem, e as taxas de O_2 são limitadas pela permeabilidade dessa embalagem (PANTASTICO, 1975).

3.6 - Anatomia da Laranja

De acordo com ALBRIGO e CARTER (1977) e também com ROTH (1977), as frutas cítricas anatomicamente são ovários superiores compostos de 6 a 20 carpelos unidos que formam os lóculos. O pericarpo exterior aos lóculos é dividido em exocarpo (flavedo ou casca exterior), mesocarpo (albedo ou pele interior) e endocarpo (lóculo ou membrana de segmentos). As vesículas de suco , que são as partes comestíveis do fruto nascem da superfície epidérmica do endocarpo e crescem para preencher a cavidade do lóculo ou segmento (ROTH, 1977), também citado por SEYMOUR *et al*, (1993).

O flavedo ou exocarpo, o qual é a parte colorida da pele, contém pigmentos em cloroplastos ou cromoplastos e glândulas de óleo.

O albedo ou mesocarpo é a parte branca da casca e consiste de células despigmentadas, cujo tecido contém um grande espaço de ar, formando uma esponja natural, o mesmo ocorrendo com o núcleo. Juntos, o flavedo e o albedo formam o que se denomina a casca do fruto a qual contém mais pectina do que as outras partes. A maior concentração de glicosídeos não-saborosos, a limonina e a pectina solúveis em água são inversamente correlacionados ao sabor do suco processado. Esses componentes são encontrados em maior quantidade nos sucos que contêm alta taxa de casca extraída através de processo de esmagamento (ALBRIGO e CARTER, 1977).

O endocarpo é a parte mais complexa das frutas cítricas, o qual dá origem às vesículas de suco, as quais são classificadas como emergentes com formação elíptica única ou ramificada em hastes não vasculares.

A coloração das frutas cítricas é devida à presença de clorofila nos frutos verdes e à presença de carotenos nos frutos amarelos e nas laranjas. Esses pigmentos são localizados no

flavedo e nas vesículas. O flavedo contém mais de 70% desse pigmento e de acordo com GROSS, (1977), os *citrus* contêm um dos padrões mais complexos de carotenos da fruticultura. A Figura 3.2 ilustra a anatomia de uma fruta cítrica em corte equatorial.

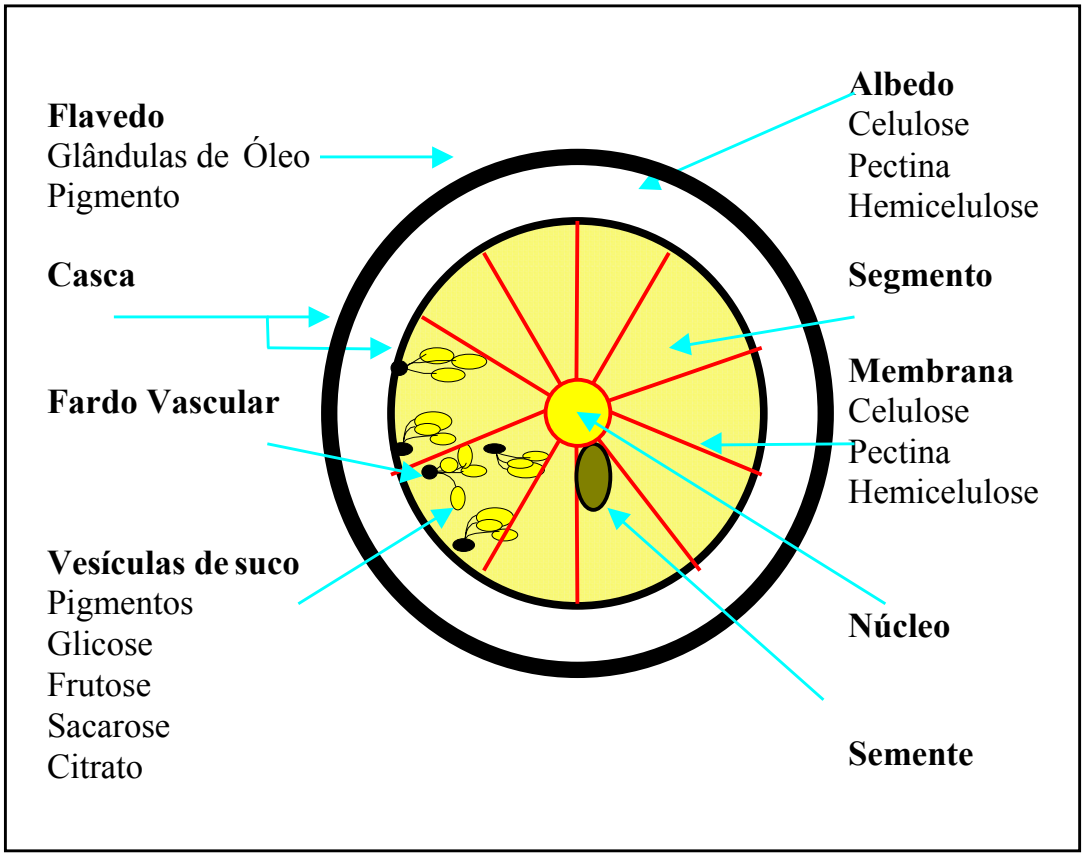

Figura 3.2 - Corte equatorial de uma fruta cítrica

3.7 - O Processo de Industrialização da Laranja

A indústria cítrica brasileira processa cerca de 210 milhões de caixas de laranjas (40,8 kg de frutas por caixa), correspondendo aproximadamente a 700 mil toneladas de suco concentrado a 65 ^{O}BRIX por safra (BRAGA, 1997). O pico de produção de laranja no Brasil é de julho a novembro. O processo de industrialização de laranja é dividido em seis etapas, a saber: recebimento da fruta, extração do suco, preparação, evaporação, estocagem e preparação dos subprodutos (CARGILL, 1998). O produtor entrega a laranja a granel, em caminhões de 15 toneladas. Ao chegar na indústria, o caminhão é pesado; uma amostra da fruta é retirada para análise de sólidos solúveis e acidez. Após a determinação desses índices, o caminhão é descarregado e os frutos seguem para os silos de estocagem, permanecendo nos depósitos apenas o tempo necessário para se manter o equilíbrio do fluxo de produção. As laranjas devem ser processadas em 24 horas para garantir a qualidade do produto final (CARGILL, 1998).

Após ser liberada para o processamento, a laranja é transportada para o lavador, onde jatos de água quente clorada são utilizados para esterilização das cascas e remoção de detritos que à ela normalmente se aderem. Em seguida a laranja segue em correias transportadoras para os equipamentos de extração de suco. Nesse trajeto, são retirados pelos operários os frutos de baixa qualidade, atividade realizada de forma subjetiva.

A extração de suco é feita de forma individual a uma velocidade, normalmente de 500 frutas por minuto em cada máquina. Da extratora saem quatro fluxos de produtos que serão tratados separadamente, quais sejam: suco com poupa, membranas e sementes, a casca e emulsão de óleo. O suco sai da extratora contendo polpa que deve ser removida através de filtros especiais antes da evaporação e concentração. Os evaporadores, retiram parte da água do suco fresco, produzindo assim o concentrado de suco de laranja. O suco é evaporado através de calor e vácuo até uma

concentração de 66% em teor de açúcar, seguindo por bombeamento para uma câmara de alto vácuo, sendo resfriado em seguida por vaporização a 15 ^{O} C.

Após a pasteurização, o suco concentrado vai para o ”blender”, onde é resfriado e homogeneizado de acordo com os padrões qualitativos, sendo adicionados de volta os aromas naturais que foram retirados no processo de concentração em tanques de mistura. Após a homogeneização, amostras são retiradas para avaliação de qualidade e o suco segue para os tambores de 266 kg a -8 ^{O} C ou para os tanques de 1200 ton. a -18 ^{O} C.

Em geral, nas indústrias de processamento de laranja, a fruta é aproveitada de maneira integral. Paralelamente ao processo de produção de suco, são obtidos diversos subprodutos da laranja: óleo essencial, óleo destilado, D´ Limonene, essências aromáticas, polpa congelada, polpa seca, “pellets” e álcool cítrico. As aplicações dos subprodutos de laranja são diversas, destacando-se seu uso pelas indústrias de alimentos, bebidas, cosméticos, tintas e vernizes, ceras, resinas e ração animal. De acordo com CARGILL (1998), os principais subprodutos do processamento de laranjas são:

- polpa cítrica: É obtida através da secagem da casca da laranja e dos demais resíduos sólidos provenientes do processamento a qual é muito utilizada como ingrediente na fabricação de ração para animais.

- óleo e essências aromáticas: O óleo da casca da laranja é obtido for filtragem, centrifugação e do processo de evaporação sendo utilizado na fabricação de perfumes e aromatização de alimentos e bebidas. No processo de secagem da casca também se recupera óleo denominado D’ Limonene pobre em componentes aromáticos, e alto valor comercial, usado principalmente como solvente ou na fabricação de resinas.

- polpa da laranja: A polpa filtrada logo após a extração é pasteurizada, congelada e utilizada para reintegrar o suco, o que torna sua aparência de suco fresco recém extraído.

- álcool cítrico: As destilarias transformam o melaço extraído do bagaço da laranja em álcool etílico hidratado, anidro ou retificado, empregado na fabricação de bebidas alcoólicas.

A Tabela 3.8 apresenta o rendimento médio da laranja, bem como de seus subprodutos, de acordo com a ABECITRUS, (1998).

Tabela 3.8 - Rendimento médio de laranjas

SUBPRODUTO	RENDIMENTO MÉDIO %
Suco Concentrado	44,81
Células Congeladas	2,67
Óleos Essenciais	1,79
D'limonene	0,92
Líquidos Aromáticos	0,57
Farelo	49,24

Fonte: ABECITRUS, 1998

3.8 - Comportamento Mecânico dos Materiais Biológicos

As propriedades mecânicas dos frutos e vegetais são bons indicadores do seu grau de maturação. Uma das propriedades que pode ser correlacionada com qualidade e grau de maturação desses produtos é a firmeza, cuja denominação é encontrada na literatura como ”firmness”.

As pesquisas sobre as propriedades mecânicas dos materiais biológicos envolvem temas de interesse tais como, injúrias mecânicas, distribuição de tensão e de deformação específica, teoria de ruptura, dentre outros. Os principais objetivos desses estudos são o desenvolvimento e aprimoramento de embalagens e o desenvolvimento de equipamentos de classificação e seleção de produtos vegetais bem como o aprimoramento dos processos de colheita. A determinação das constantes elásticas dos materiais biológicos é fundamental para o desenvolvimento desses estudos.

LAURENTE (1997) utilizou espécimes de borracha natural de diferentes formas, tamanho e dureza, submetidos a diferentes condições de carregamento na determinação do módulo de elasticidade (“Young modulus”, E), da constante de Poisson (ν), do módulo de elasticidade transversal (G) e do módulo volumétrico (K). Nesse trabalho o autor faz um estudo da influência da geometria na determinação das constantes. As constantes elásticas fornecem informações básicas sobre as propriedades mecânicas dos materiais e são determinadas através de ensaios de impacto e de compressão. Esses ensaios são aplicados a espécimes cilíndricos com cargas uniaxiais, triaxiais e diametrais; ensaios em espécimes cúbicos envolvendo cargas biaxiais e triaxiais, e espécimes esféricos com cargas diametrais.

A constante de Poisson (ν) foi determinada para espécimes cilíndricos de maçã, livres e para cilindro restringido (MORROW, 1965, HUGES, SEGERLIND, 1972, também citados por DAL FABBRO, 1979) comparando-se a carga e as deformações axiais. Os dados de compressão radial dos espécimes foram interpretados usando a Teoria de Contato de Hertz, obtendo-se os valores do módulo de elasticidade.

Fridley *et al* (1968), citados por MARTINS (1993) realizaram ensaios em espécimes inteiros de pêssegos e pêras comprimidos entre placas planas e paralelas, correlacionando deformação e distribuição de carga preditos por modelos.

SHERIF (1976) utilizou o método de Lobo Carneiro, conhecido como "Brazilian Test", para analisar os fenômenos envolvidos na relação tensão/deformação, quando são aplicadas cargas diametrais em espécimes cilíndricos. Nesse trabalho é relatado o estudo de aplicações de cargas diametrais em espécimes esféricos e semi-esféricos, e cargas uniaxiais em espécimes cilíndricos para determinação da distribuição de tensão e deformação para diversas geometrias. Também são determinados os pontos de máxima tensão e de máxima deformação através de modelos de elementos finitos.

O comportamento elástico de materiais biológicos foi mencionado por FERRAZ (1987) no estudo das propriedades mecânicas do internódio da cana-de-açúcar, no qual o autor descreve a deformação e o deslocamento em meios contínuos por seus gradientes. Nesse trabalho o autor também utiliza o método de Lobo Carneiro para determinar o módulo de elasticidade.

SHAHABASI (1979) estudou a distribuição de tensão em esferas em contato. Seguindo o mesmo caminho, VÉLEZ PASOS (1987) estudou a distribuição de tensão em laranjas estocadas a granel, formando dois arranjos, um bidimensional e outro tridimensional, contidas em um recipiente, tratados como uma treliça. Os nós dessa treliça coincidiam com o centro das laranjas e cada ramo era formado por duas laranjas em contato. A Teoria de Contato de Hertz foi utilizada para a determinação das forças nas barras imaginárias que ligavam os centros de duas laranjas em contato. Através desse estudo, o autor conseguiu determinar o empilhamento máximo de forma a minimizar as injúrias mecânicas sofridas pelos frutos.

Nos últimos anos uma aproximação mais completa vem substituindo a teoria de elasticidade no estudo do comportamento de produtos vegetais. O material biológico é então tratado como um meio multifase, constituído por gases, sólidos e líquidos. De acordo com MOHSENIN, 1970, MASE, 1970, CHRISTENSEN, 1971 e FLÜGGE, 1975 os tecidos vegetais, quando submetidos a um carregamento, apresentam além da relação tensão/deformação, um comportamento

viscoso, onde o tempo de aplicação da carga influencia o comportamento do material. Em conseqüência disso, os materiais biológicos não apresentam constantes elásticas e sim funções viscoelásticas.

Nessa linha de pesquisa, muitas investigações constataram a existência da dependência do tempo no comportamento elástico de materiais biológicos. TIMOSHENKO (1971) afirma que os materiais elásticos apresentam deformação linearmente dependente da carga aplicada. Os materiais viscoelásticos diferem dos elásticos por incluírem o parâmetro tempo na relação tensão/deformação, ou seja, seu comportamento depende da taxa de aplicação da carga, ou da taxa de deformação imposta (MASE, 1970, FLUGGE, 1975, CHRISTENSEN, 1982).

As funções viscoelásticas podem ser lineares ou não lineares. Essas funções temporais descrevem o comportamento mecânico dos materiais biológicos e são representadas por: E(t); G(t); K(t); ν(t), as quais, combinadas entre si, formam funções φ(t) e ϕ(t), respectivamente "creep function" e "relaxation function". Existem dois ensaios básicos para a determinação desses parâmetros viscoelásticos: "creep test" e "relaxation test". De acordo com MASE (1970) em um ensaio de relaxação ("relaxation test") o corpo de prova é submetido a um degrau de deformação específica e a tensão é medida no decorrer do tempo. Para o "creep test", aplica-se um degrau de tensão e mede-se a deformação do corpo de prova durante o tempo de ensaio.

MORROW e MOHSENIN (1965) relataram que o comportamento viscoelástico não linear da maçã pode ser descrito através de relações constitutivas lineares. A razão de Poisson, dependente do tempo, pode ser determinada indiretamente a partir da constante elástica de Poisson pelo princípio da correspondência elástico-viscoelástico (De BAERDEMAEKER, 1975), citado por LINARES (1996) e também por LAURENTI (1997).

DAL FABBRO (1979) estudando o comportamento elástico e viscoelástico linear e não linear utilizou espécimes cúbicos e cilíndricos de maçãs, propondo uma teoria de ruptura específica para material biológico.

Uma das maneiras de analisar o relacionamento viscoelástico dos materiais biológicos é através dos modelos analógicos de Maxwell e Kelvin, que são representados pela associação de

elementos elásticos e elementos viscosos, ou seja, molas e amortecedores arranjados de forma a representar o comportamento mecânico do material. Hamann (1967), citado por PALERMO (1998) utilizou o modelo de Kelvin para obter uma expressão da função "creep", impondo um carregamento volumétrico em maçãs. Com os dados obtidos experimentalmente, calculou as funções "dinamic relaxation" e "shear relaxation", através da relação entre o "complex moduli" e a "relaxation function".

Chen *et al* (1972), citado por PALERMO (1998) relataram que em estudos com modelos analógicos o comportamento viscoelástico dos materiais agrícolas pode ser representado pelo modelo generalizado de Maxwell, de forma que a determinação dos parâmetros viscoso e elástico é conseguida através da resolução de um sistema de equações diferenciais não lineares.

De acordo com PALERMO (1998) os tecidos vegetais submetidos à compressão apresentam um comportamento mecânico de difícil caracterização no que se refere aos seus parâmetros viscoelásticos e vários trabalhos têm sido realizados para se conseguir uma caracterização mais próxima da realidade.

3.9 - Métodos para Determinação da Firmeza de Frutos

Nos últimos anos, uma atenção especial para o estudo das propriedades mecânicas dos materiais biológicos tem sido dispensada. Os estudos visam fornecer elementos para promover projetos de embalagens mais eficientes de forma a interferir o menos possível na qualidade dos produtos. Através do conhecimento do comportamento mecânico de produtos agrícolas, pode-se determinar a época ideal para a colheita, para o transporte, armazenamento e comercialização. As propriedades físicas e bioquímicas dos frutos, responsáveis por sua qualidade, são influenciadas pelas condições climáticas, maturação e tratamentos químicos pré e pós-colheita (COSTA, 1994).

A capacidade de um fruto manter sua integridade quando submetido a situações adversas na colheita, transporte e armazenamento, é caracterizada principalmente por sua rigidez ou firmeza, a qual é responsável pela resistência oferecida às deformações elásticas ou plásticas. Uma deformação é considerada plástica se essa se mantém depois de retirada a força que a provocou. Deformações plásticas em produtos vegetais são denominadas de injúrias mecânicas e contribuem para a perda de sua qualidade.

A firmeza do fruto decai com o tempo e freqüentemente, maturidade e firmeza são descritas pelo comportamento da fruta à força/deformação e esse comportamento é estudado com o objetivo de desenvolver equipamentos de testes capazes de simular a seleção tátil. De acordo com NELSON, MOHSENIN (1968), a firmeza ou "firmness" pode ser descrita como uma característica elástica de materiais biológicos, definida por:

$$FIRM=E/(1-\nu^2) \qquad (3.1)$$

em que,
E - módulo de elasticidade
ν - constante de Poisson

Essa constante é válida para frutos esféricos e é proveniente da equação de Hertz. Toma-se essa equação como uma constante única, devido à dificuldade de se estimar muito precisamente a constante de Poisson (ν) para frutos esféricos.

Existem atualmente muitas propostas para avaliação da qualidade de produtos vegetais, sendo algumas baseadas em métodos destrutivos e outras em métodos não destrutivos. De acordo com CHEN (1991) alguns métodos estão em um estágio de desenvolvimento mais avançado que outros. Os métodos se baseiam na medição de uma ou mais propriedades físicas e sua eficiência

depende certamente da correlação entre a medida da propriedade física e o atributo de qualidade de interesse.

Sabe-se que o grau de maturação de um produto vegetal, na maioria das vezes, não pode ser identificado considerando-se apenas a aparência externa. Em certos casos, a identificação, a classificação e a seleção de produtos podem ser feitos considerando a cor como atributo identificador. Entretanto, existem produtos cuja coloração não os diferencia e nem tampouco os qualifica, como é o caso do abacate, melão, melancia e outros. Assim, deve-se buscar a técnica de seleção adequada para cada tipo de produto. São vários os processos que permitem o estudo do comportamento mecânico e determinação de parâmetros que auxiliam na classificação de frutos e vegetais, como por exemplo:

- Separação por densidade
- Ensaios de penetração
- Ensaios de compressão
- Análise da resposta em freqüência a uma força de impacto
- Determinação das freqüências naturais através de processos ressonantes
- Análise da resposta em freqüência à excitação acústica
- Análise da resposta à excitação ultra-sônicas
- Análise de reflectância superficial
- Visão artificial
- Visão laser (“laser vision”)

De acordo com PELEG (1985), um processo relativamente simples de classificação de frutos é a separação por densidade em que os frutos são imersos em um líquido de densidade conhecida e separados em vários níveis conforme sua densidade. Esse é um processo bastante utilizado na separação de café nas categorias verde, cereja e côco.

BRAGA (1997) realizou um estudo experimental das propriedades hidrodinâmicas de laranjas, constatando que as laranjas sadias apresentavam um padrão de orientação do eixo definido pela columela central com o nível da água, enquanto que frutos estragados permaneciam totalmente submersos. Embora o objetivo do trabalho tenha sido estudar o transporte de laranjas em canais hidráulicos, nota-se que esse processo poderia ser adotado para separação de frutos em pelo menos duas categorias.

Magness e Taylor (1925), citados por MIZRACH *et al* (1992) e por Lee *et al* (1997), desenvolveram um teste que se tornou uma referência como teste de medição de firmeza, baseado na compressão de produtos vegetais por um cilindro de 0,79 centímetro de diâmetro.

Foram realizados testes de compressão em tomates, utilizando duas placas paralelas por MOHSENIN, GOHLICH (1962) e em *citrus* por Sarig (1972), citado por MIZRACH *et al* (1992), demostrando uma relação linear entre a deformação e a força aplicada.

Mehlschau *et al* (1981), citado por CHEN (1991), desenvolveram um medidor de deformação para detectar o grau de maturidade de pêras baseado na medição da deformação resultante da compressão de duas esferas de aço em lados opostos do fruto, ao ser aplicado uma força de valor fixo.

MIZRACH *et al* (1992) utilizaram um pino instrumentado de 3 mm de diâmetro simulando um polegar para avaliar a firmeza de laranjas e tomates.

Foi desenvolvida por NAHIR *et al,* (1986) uma máquina experimental para selecionar tomates através da medição da resposta do fruto à força de impacto baseada na queda livre de uma altura de 70 mm. Já DELWICHE *et al* (1989) desenvolveram um sistema de separação de pêssegos e pêras em três categorias, dura, firme e macia, baseado na relação entre o pico da força de impacto e o quadrado do tempo necessário para a força atingir o pico máximo, F/t^2.

Bryan *et al* (1978), citados por MARTINS (1993), utilizaram um método de separação de laranjas danificadas de laranjas intactas, baseado na diferença das distâncias do ricochete quando as laranjas eram soltas de uma altura predefinida contra um tambor de aço em movimento rotativo.

NAHIR *et al* (1989), também citados por MARTINS (1993), realizaram um experimento para monitorar a vida-de-prateleira ("shelf life") de *citrus* através da determinação da força de impacto. Foi utilizado o modelo teórico de Maxwell para explicar o fenômeno do impacto de uma laranja sobre uma superfície plana. Os autores concluem que a rigidez média dos frutos decresce com o tempo de armazenamento.

ABBOTT *et al* (1968) excitaram através de um "shaker" frutos intactos seguros por seus pedúnculos e observaram que uma maçã, submetida à uma excitação mecânica de vibração, apresentava uma série de freqüências de ressonância e que a segunda freqüência era associada à "flexural vibration" e fortemente influenciada pelo tamanho do fruto e pela firmeza. Nesse trabalho, foi mostrado que a firmeza era altamente correlacionada com o coeficiente de rigidez dado pela equação (3.2).

$$S = (f_n^2).m \qquad (3.2)$$

em que,

S - índice de firmeza do fruto
f_n - segunda freqüência natural do fruto [Hz]
m - massa do fruto em gramas [g]

FINNEY (1970) constatou uma alta correlação entre os índices de firmeza calculados a partir da resposta em freqüência de frutos intactos excitados por um "shaker" comercial e a firmeza obtida por um teste de compressão padrão (MT). FINNEY (1971) concluiu que o módulo de Young, calculado através de testes de vibração, era correlacionado com o grau de maturação para banana, maçã, pêssego e pêra.

STEPHENSON *et al* (1973), PELEG e HINGA (1989) relataram resultados satisfatórios ao separarem tomates vermelhos de tomates verdes através da análise da resposta em freqüência.

Perry (1977), citado por CHEN (1991), desenvolveu uma unidade para testar a firmeza de forma não destrutiva, através da aplicação de jatos de ar de baixa pressão simultaneamente em pequenas áreas em lados opostos de pêssegos para gerar uma deformação indicativa de maturidade.

Yamamoto *et al* (1980, 1981), citados por CHEN (1991), desenvolveram uma técnica para avaliação da textura de melão e maçã de forma não destrutiva, baseada na resposta acústica dos frutos. Um pêndulo esférico de madeira foi utilizado para provocar o impacto no fruto e o sinal sonoro emitido foi gravado. Através da aplicação da Transformada de Fourier do sinal, as freqüências de ressonância foram determinadas. Os autores concluíram que as freqüências naturais do melão e da maçã decaem com o tempo de armazenamento. Também foi mostrado que as freqüências naturais e os índices de firmeza, expressos como função da freqüência natural, da massa e da densidade do fruto, eram correlacionados com a firmeza e com as avaliações sensoriais de forma altamente significativa.

Salveit *et al* (1985), citado por CHEN (1991), não obtiveram resultados conclusivos ao tentar utilizar métodos acústicos para determinar o grau de maturidade de tomates verdes.

SHMILOVITCH *et al* (1997) afirmaram que não ocorrem mudanças visíveis em abacates que possam determinar seu estado de maturação e que os índices aceitáveis são as quantidades de óleo e o peso da matéria seca. Entretanto, os autores comentam que esses testes são destrutivos e consomem muito tempo de laboratório, e enfatizam a necessidade de desenvolver outros tipos de testes que preservem os espécimes.

MIZRACH e FLITSANOV (1997) apresentaram um sistema ultra-sônico não destrutivo capaz de determinar a variação da firmeza com o tempo de armazenamento para duas variedades de abacate (Ettinger e Fuerta) durante o processo de amadurecimento. Os frutos eram submetidos a uma onda mecânica de 50 kHz e sua atenuação de amplitude era medida. Os resultados da medição não destrutiva foram comparados com testes fisiológicos destrutivos, obtendo-se uma correlação alta entre o coeficiente de atenuação com a porcentagem de matéria seca.

GALILI *et al* (1997) apresentaram uma proposta de ensaio não destrutivo, utilizando medição de resposta à excitação acústica como identificador da firmeza de sete variedades de maçã (Fuji, Braeburn, Gala, Granny Smith, Jonagold, Red Delicious e Golden Delicious) e para uma variedade de pêra (D'Anjou). Foram realizadas duas repetições para cada um dos quarenta frutos e o índice proposto de firmeza foi calculado de acordo com a equação 3.3, baseado no princípio de que os corpos mais macios apresentam freqüências naturais mais baixas do que os corpos mais rígidos.

$$(FI = f^2 m^{2/3}) \qquad (3.3)$$

em que,

FI - índice de firmeza

f - primeira freqüência natural [Hz]

m - massa do fruto [g]

Esse trabalho culminou no desenvolvimento de um protótipo de medição de firmeza denominado FIRMALON, fabricado pela empresa Israelense ESHET EILON AGRO SYSTEMS.

ABBOTT e MASSIE (1993) mediram o coeficiente de rigidez ("stiffness") de frutos através da resposta à excitação acústica. Os autores relatam que a correlação entre a freqüência de ressonância e a firmeza, medida por um penetrômetro tipo (MT) era baixa, entretanto essa correlação era alta, quando grupos com distintos graus de maturação eram considerados. Os autores concluíram que não se pode esperar uma alta correlação entre a firmeza medida pelo penetrômetro e a freqüência de ressonância, pois essa primeira é baseada na força de cisalhamento enquanto que as características vibracionais e acústicas estão relacionadas com a elasticidade.

Sarkar e Wolfe (1983), citado por CHEN (1991), concluíram que a estabilidade de sucos de laranja pode ser avaliada por técnicas ultra-sônicas e que a medição de reflectância pode ser utilizada para caracterizar a textura da casca de laranja, enquanto que o fenômeno "back-scatter" possibilita a detecção de fissuras em tomates. Entretanto, CHEN (1991) afirma que a utilização de técnicas ultra-sônicas na avaliação de qualidade da estrutura interna de frutos e vegetais não obteve sucesso, pois as ondas ultra-sônicas de alta freqüência não penetram profundamente nesses produtos, devido a sua porosidade.

Como se observa, hoje em dia a pesquisa tem caminhado para a adoção de métodos não destrutivos na avaliação de qualidade de frutos e vegetais, de forma que os espécimes avaliados são preservados.

De acordo com CHEN (1991), os métodos baseados em medição de densidade, de firmeza, de impacto e vibração de baixa freqüência são lentos. Entretanto, seja qual for o método, sua exatidão está intimamente ligada com a correlação entre a grandeza física medida e os atributos de qualidade.

Apesar dos pesquisadores terem desenvolvido relações entre propriedades físicas e atributos de qualidade para muitos produtos agrícolas, a variabilidade da estrutura e da composição de produtos de mesma natureza interfere sobremaneira na correlação entre propriedades físicas e esses fatores de qualidade.

Peleg (1987), citado por MARTINS (1993), comenta que baseado nos defeitos encontrados em produtos vegetais, é possível substituir os métodos de classificação visual e separação manual por métodos de classificação utilizando visão artificial de forma mais rápida e eficiente.

A disponibilidade de sistemas de aquisição de dados mais rápidos e o desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais em tempo real renovaram o interesse dos pesquisadores em desenvolver técnicas de medição de resposta a excitações mecânicas e processos de visão artificial.

3.10 - Métodos Ópticos para Estudo de Materiais Biológicos

A combinação de sistemas de aquisição e processamento digital de imagem modernos constitui uma ferramenta importante para os pesquisadores desenvolverem novas técnicas para avaliação da qualidade de produtos vegetais de forma não destrutiva. Técnicas recentes, que utilizam uma fonte de luz laser e um sistema de aquisição e processamento de imagens, têm sido referidas na literatura como visão artificial ou "machine vision" e ainda como "laser vision".

O laser como fonte de luz para auxiliar nos processos de identificação de alterações fisiológicas em frutos e sementes ofereceu um novo impulso nos processos de visão artificial, que até então, eram limitados à percepção das alterações superficiais. Um sistema de visão artificial laser, consiste de uma fonte de luz laser, uma câmara, um monitor, um processador digital de imagens e um microcomputador. São vários os tipos de lasers disponíveis, mas, normalmente, as características de interesse que os diferenciam são: a potência, o comprimento de onda bem definido, o diâmetro do raio, a polarização, a divergência e, principalmente, a coerência.

As características especiais da luz laser têm despertado os pesquisadores para a potencialidade de sua aplicação em investigações científicas e na indústria. A elevada intensidade e a grande direcionalidade da luz laser a torna interessante para um grande número de aplicações (ZERBINO, 1996).

DUPRAT *et al* (1995) utilizaram um laser de diodo de 1 mW de potência e comprimento de onda de 670 nm para avaliar o grau de maturação de espécimes de uma variedade de maçãs (Golden Delicious). O laser incidia diretamente na superfície do fruto e uma câmara capturava a imagem da área iluminada. Nesse trabalho os autores mostraram que o tamanho dessa área iluminada na imagem ("spot" luminoso) aumentava à medida que os frutos iam amadurecendo. Também é relatado nesse trabalho que existe uma correlação negativa não linear entre o "spot" e o índice de firmeza medido por um penetrômetro. Em outras palavras, quanto maior era o "spot", menor era a firmeza, ou seja, maior era o grau de maturação.

TU *et* al (1995) usaram um diodo laser de 3 mW de potência e 670 nm de comprimento de onda para monitorar a maturidade de tomates e maçãs, através da análise da intensidade de cada elemento da imagem capturada por uma câmara. O número de elementos da imagem cuja intensidade luminosa ultrapassava um valor predefinido, era utilizado como indicador de maturidade.

Os autores demonstraram o potencial de utilização da luz laser como forma de classificação de frutos.

Outra técnica que vem surgindo como forma de avaliação de atividades biológicas se baseia em um fenômeno óptico de interferência que ocorre quando a luz laser incide sobre uma superfície onde se desenvolve um processo dinâmico. Esse fenômeno é conhecido como "biospeckle" ou "speckle" dinâmico. De acordo com DAINTY (1975), esse fenômeno é bem conhecido em estudos de óptica, e ocorre quando a luz laser se dispersa sobre uma superfície incidente, a qual exibe algum tipo de atividade. Pode ser notado; quando se ilumina, com luz coerente, materiais biológicos como, por exemplo, a madeira, os frutos, as sementes, ou em fenômenos não biológicos como no caso da evaporação de líquidos.

Se o objeto difusor se move os grãos individuais do padrão de "speckle" também se movem e alteram sua forma. Isso permite supor que os padrões de "speckle" dinâmicos contêm informações sobre o movimento do objeto. Esse fenômeno está presente em alguns materiais biológicos e em alguns fenômenos que envolvem materiais não biológicos como a secagem de uma pintura. A aparência visual do fenômeno é similar a um líquido em ebulição, sendo, portanto muitas vezes denominado de "boiling speckle" ou simplesmente "biospeckle".

Para efeito de simplificação, o "speckle" pode ser descrito como um granulado ou salpicado luminoso. Em algumas aplicações esse fenômeno é indesejado como um ruído, que prejudica os trabalhos que utilizam, por exemplo, processos de interferometria laser.

Por ser dinâmico, o "biospeckle" deve ser analisado com técnicas de processamento de imagem, e tratamento estatístico, uma vez que a observação visual permite apenas a identificação da existência do fenômeno, mas não permite quantificá-lo (RABAL *et al*, 1998).

A atividade do "biospeckle" tem sido extensamente estudada e têm sido propostas muitas formas para medir, por exemplo, a atividade de espécimes biológicos, fluxo sangüíneo e outras aplicações em medicina (DAINTY, 1970, ASAKURA *et al* ,1981, OULAMARA *et al*, 1989, RUTH, 1988).

XU *et al* (1995) realizaram alguns experimentos com "speckle" em placas de metal, tomate, batata, maçã e laranjas, demonstrando a possibilidade de correlacionar padrão de "speckle" com as atividades biológicas de frutos e vegetais.

Segundo RABAL *et al* (1998), a utilização do "speckle" na área biológica tem sido uma linha de grande potencial, pouco explorada e as aplicações existentes foram desenvolvidas de forma superficial bem como ainda não se conseguiu identificar a real viabilidade de sua utilização.

Desde que foi descoberto, muitos trabalhos têm sido realizados no sentido de explorar esse fenômeno como uma ferramenta não destrutiva de medição, e muitas abordagens vêm sendo desenvolvidas (OULAMARA *et al*, 1989, RABAL *et al*, 1995).

Uma forma de se utilizar o "speckle" como ferramenta de medição de atividade de material seja biológico ou não biológico, é a medição da movimentação dos grãos de "speckle", ou em outras palavras, a medição da duração ou do tempo de vida de um grão de "speckle".

OULAMARA *et al* (1989) e AIZU e ASAKURA (1991) utilizaram um processo para medir o tempo de vida de um grão de "speckle" denominado FWHM (largura na metade da altura máxima). Esse processo consiste na determinação do instante onde a função autocorrelação da história temporal do "speckle" atinge metade do valor máximo. Entretanto, esse processo é pouco preciso, pois depende apenas de um único ponto da função autocorrelação. Recentemente foi sugerido por RABAL *et al* (1996) a inclusão de um número maior de pontos dessa curva para reduzir a variabilidade das medidas em um processo denominado WER (largura do retângulo equivalente).

ROMERO (1999) utilizou um método denominado cumulantes estatísticos para caracterizar a atividade de padrões de "speckle" que variam com o tempo. Nesse trabalho, o autor descreve

experimentos nos quais os cumulantes estatísticos permitem estabelecer valores de medida da atividade do "speckle", para um difusor sólido rotativo, para espécimes de cebola e para um processo de secagem de pintura.

ARIZAGA *et al* (1999) propuseram a utilização de outro método para caracterizar a evolução temporal do "speckle" baseado no número de ocorrências da transição de intensidades de de elementos ("pixels") vizinhos na imagem do "speckle". O processo foi denominado de "concurrency matrix" em Inglês e matriz de co-ocorrencia em Espanhol. Neste trabalho a técnica será referida como matriz de ocorrências. De acordo com as citações dos autores, esse método foi baseado nas ocorrências de intensidade em um domínio espacial utilizada por Kruger *et al* (1974), Zobrist *et al* (1975) e por Haberacker *et al* (1985). O processo sugere a medição da dispersão de intensidade ao redor da diagonal principal da matriz de ocorrências. Esse conceito é similar ao utilizado em espectroscopia de correlação de fóton, denominada "photon structure function" ou simplesmente função estrutura (CHU, 1991).

ARIZAGA *et al* (1999) aplicaram o processo de medição, baseado na matriz de ocorrências em simulações numéricas de "speckles" ideais e apresentam uma situação experimental em monitoramento de secagem de pintura, comparando-se os resultados com um método já estabelecido denominado medidas gravimétricas, o qual utiliza processos ópticos para medição da perda de peso de uma amostra. Os resultados demonstraram uma alta correlação (r^2=0,9923) entre esses dois processos, com uma repetibilidade que se encontra entre 97% e 98%, dependendo da atividade da amostra.

BRAGA JÚNIOR *et al* (1998) realizaram alguns experimentos com luz laser em sementes de soja, e relataram resultados promissores no estudo de viabilidade de sementes utilizando "speckle" dinâmico. A incidência da luz laser sobre a semente produz padrões de "biospeckle" frenéticos e lentos, dependendo da atividade da semente, o que pode ser comparado com um processo clássico de reação química para avaliação da viabilidade de sementes. Segundo os autores, as imagens do "biospeckle" devem ser coletadas rapidamente para acompanhar suas mudanças temporais, o que força a necessidade, em alguns casos, de um equipamento de aquisição de imagens

muito rápido. Como várias imagens devem ser capturadas, e armazenadas para o acompanhamento do movimento, se faz necessário também uma alta capacidade de memória do microcomputador.

Nos itens subseqüentes deste trabalho, encontra-se uma descrição mais detalhada do fenômeno "biospeckle", principal elemento desse estudo, com suas principais propriedades, bem como as formas utilizadas para quantificação.

3.11 - Ondas Luminosas Monocromáticas

O campo elétrico variável em qualquer ponto de um feixe luminoso de amplitude **a** , comprimento de onda **λ**, e freqüência **ν**, e propagando em uma direção **z** pode ser descrito como:

$$E(z,t) = a\cos\left[2\pi\left(\nu t - z/\lambda\right)\right] \tag{3.4}$$

$$E(z,t) = a\cos\left[\omega t - kz\right] \tag{3.5}$$

em que,

$E(z,t)$ - intensidade do campo elétrico

$\omega = 2\pi\nu$ - freqüência angular

$k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ - número da onda

λ - comprimento de onda
t - tempo

z - espaço

Por razões de facilidade de manipulação matemática, é utilizada a representação exponencial complexa.

$$E(z,t) = \mathrm{Re}\{a\exp[(j\omega t - kz)]\} \tag{3.6}$$

em que,

Re{ } - parte real da expressão entre colchetes.

A equação 3.6 pode ser expressa separadamente em duas partes, uma que considera um fator variando com o tempo e o outro variável com o espaço, ou seja,

$$E(z,t) = \mathrm{Re}\{a\exp(-jkz)\exp(j\omega t)\} \tag{3.7}$$

$$E(z,t) = \mathrm{Re}\{a\exp(-j\varphi)\exp(j\omega t)\} \tag{3.8}$$

$$E(z,t) = \mathrm{Re}\{A\exp(j\omega t)\} \tag{3.9}$$

em que,

$\varphi = \dfrac{2\pi z}{\lambda}$

$E(z,t)$ - intensidade do campo elétrico

$\omega = 2\pi\nu$ - freqüência angular

$k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ - número da onda

λ - comprimento de onda

t - tempo

z - espaço

No diagrama da Figura 3.3 a representação corresponde à projeção no eixo real de um vetor de comprimento **a** inicialmente formando um ângulo **φ** com o eixo real e girando no sentido anti-horário a uma taxa **ω**, ou seja, um fasor.

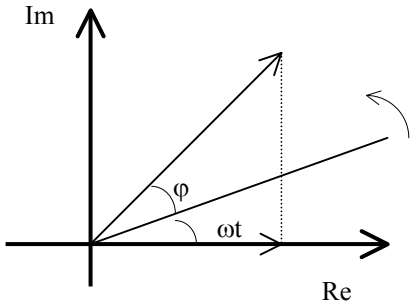

Figura 3.3 - Representação fasorial
do campo elétrico

A vantagem desse tipo de representação é que a amplitude complexa resultante de duas ou mais ondas de mesma freqüência pode ser obtida através da soma vetorial, desprezando-se o tempo, conforme representado na Figura 3.4.

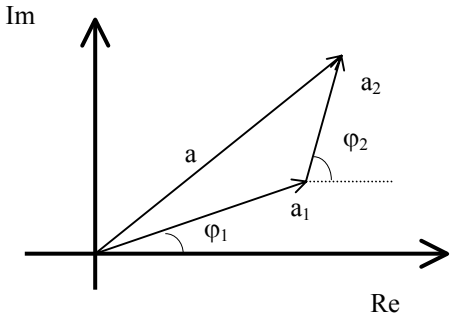

Figura 3.4 - Representação da resultante do
campo elétrico

A interação do campo elétrico das ondas eletromagnéticas com a matéria é muito mais forte do que a interação do campo magnético com a matéria, por isso, convencionou-se considerar apenas o campo elétrico, ignorando-se o campo magnético.

De acordo com YOUNG (1977), não há necessidade de se manter a natureza vetorial do campo elétrico, a não ser que seja importante conhecer os efeitos da polarização. Dessa forma, geralmente descreve-se as ondas luminosas como uma equação escalar.

De acordo com JAIN (1989), não existem detectores capazes de responder diretamente a campos elétricos na faixa da luz visível, mas existem aqueles que respondem à potência luminosa conhecidos como "square law detector". Dessa forma, o importante para eles não é a amplitude e fase do campo e sim seu valor em módulo, o qual é denominado intensidade, embora segundo YOUNG (1977) deveria chamar-se irradiância.

A energia que atravessa uma área unitária normal à direção de propagação de um feixe, em unidade de tempo, é proporcional à média temporal do quadrado do campo elétrico, dado por:

$$\left\langle E^2 \right\rangle = \lim_{T\to\infty} \int_{-T}^{T} E^2 dt = \frac{a^2}{2} \qquad (3.10)$$

em que,

a - amplitude do campo elétrico

E - intensidade do campo

t - tempo

Por convenção, o fator multiplicador (1/2) é ignorado e a intensidade óptica é definida como:

$$I = A^2 = AA^* = |A|^2 \tag{3.11}$$

em que,

A^* - complexo conjugado de A, ou seja,

$$A^* = a\exp(j\varphi) \tag{3.12}$$

em que,

a - amplitude do campo elétrico

$$\varphi = \frac{2\pi z}{\lambda}$$

λ - comprimento de onda
z - espaço

3.12 - Interação da Luz com a Matéria

A matéria é constituída de átomos e moléculas. Em materiais como vidro, plástico e tecidos vegetais, dielétricos, poucos elétrons de cada átomo têm relevância nos fenômenos ópticos. Esses elétrons são denominados elétrons ópticos.

De acordo com HECHT (1987), o campo elétrico oscilante da luz que ilumina esse tipo de material força os elétrons ópticos a vibrarem em uma freqüência próxima à freqüência da luz incidente. Esses elétrons excitados emitem luz. Em outras palavras, pode-se dizer que os elétrons ópticos absorvem a luz que vem em uma determinada direção e a reemitem em direções que não são necessariamente a mesma direção de incidência. Esse fenômeno de absorção seguida pela irradiação é denominado "scattering" (HECHT, 1987). Traduzindo para a língua portuguesa, "scattering" significa espalhamento ou dispersão.

A reflexão da luz é, em realidade, um espalhamento produzido por um grande número de centros de dispersão, muito próximos entre si, em comparação com o comprimento de onda. A refração é um fenômeno semelhante. A sobreposição da luz incidente e da luz emitida por todos os elétrons ópticos, sob ação da própria luz incidente, tem como efeito uma redução na intensidade da luz enquanto ela se propaga pelo material. A absorção segundo a Lei de Lambert e também as Leis de Bouguer e de Beer estabelecem uma proporcionalidade entre a quantidade de radiação monocromática incidente e a quantidade de radiação que é absorvida em um determinado caminho da luz. Em outras palavras, a intensidade da luz $\mathbf{I_\lambda}$ sofre uma variação $\mathbf{dI_\lambda}$ ao atravessar uma espessura **dz** do material, de forma que se pode relacionar essas quantidades de acordo com:

$$dI_\lambda = -\mu_\lambda I_\lambda dz \tag{3.13}$$

em que,

μ_λ - coeficiente de absorção espectral de Lambert (com dimensão de inverso de comprimento)

z - espessura do material

λ - comprimento de onda

Integrando ambos os lados da equação 3.13, obtém-se:

$$\int_{I_{\lambda,0}}^{I_{\lambda,z}} \frac{dI_\lambda}{I_\lambda} = -\mu_\lambda \int_0^z dz$$

$$\frac{\ln\left(I_{\lambda,z}\right)}{\ln\left(I_{\lambda,0}\right)} = \mu_\lambda \, z$$

ou seja,

$$I_{\lambda,z} = I_{\lambda,0} \exp(-\mu z) \tag{3.14}$$

O coeficiente de transmissão espectral é definido por:

$$\tau_{\lambda} = \frac{I_{\lambda,z}}{I_{\lambda,0}} = \exp(-\mu z) \tag{3.15}$$

em que,

μ_λ - coeficiente de absorção espectral de Lambert (com dimensão de inverso de comprimento)

z - espessura do material

λ - comprimento de onda

O coeficiente de absorção é determinado pelo grau de amortecimento dos elétrons ópticos e pela freqüência da luz incidente. Desse modo, um material com uma espessura igual a **z** será transparente à luz se o inverso do coeficiente de absorção μ_λ (com dimensão de comprimento) for muito maior do que a espessura **z**. Por outro lado, o mesmo material deixa de ser transparente se sua espessura for muito maior do que $1/\mu_\lambda$. Isso explica por que uma lâmina delgada de madeira se apresenta transparente e uma lâmina espessa de vidro pode ser opaca à luz.

3.13 - Composição e Estrutura do Tecido Vegetal

Todo material biológico apresenta uma estrutura constituída por células que agregadas formam os tecidos. As células dos produtos vegetais variam em tamanho, organização, função e em resposta depois da colheita. Elas diferenciam das células animais pela presença de uma parede celular rígida e pela presença de vacúolos.

A parede celular dos tecidos vegetais é rígida e fina podendo atingir 30ηm de espessura, existindo uma parede primária e uma parede secundária. A parede primária é constituída de fibras de celulose as quais são encapsuladas em um cimento polisacarídeo e proteínas que vão se enrijecendo a medida que a célula se desenvolve e se deterioraram e se quebram à medida que a célula vai envelhecendo. É a parede celular que oferece o suporte mecânico às seções individuais protegendo a membrana da célula contra rupturas mecânicas ou osmóticas, mantendo firme sua posição. A rigidez e a estrutura de um tecido vegetal se devem grande parte à presença dessas paredes.

O componente de maior tamanho na parede primária é a celulose, a qual forma a arquitetura geral da parede contendo hemicelulose, pectina, proteínas estruturais e não estruturais, assim como outras substâncias orgânicas e inorgânicas como ceras em células epidérmicas.

A celulose é composta de cadeias largas de resíduos de glucose ordenadas em fibras chamadas micelas. Essas micelas se ordenam em microfibras as quais dão lugar ao esqueleto da parede celular, cuja estrutura é bastante estável, sofrendo pouca alteração após a colheita.

A pectina se encontra na lamela média, a qual corresponde a área compreendida entre as paredes celulares primárias, e atua como agente de cimentação que mantém a união das células. Essa também se encontra dispersa entre as microfibras de celulose junto com a hemicelulose. Após a colheita ou durante o amadurecimento de produtos vegetais grande parte da pectina é solubilizada, resultando em uma alteração da força de união entre as células, e, portanto afetando sua estrutura como um todo (CHITARRA e CHITARRA, 1990).

A parede celular secundária se forma no interior da parede celular primária e oferece uma rigidez muito maior à célula devido à presença de lignina. Pode conter celulose e hemicelulose, porém muito pouca pectina. A maioria dos vegetais comestíveis contém poucas células com parede celular secundária. Abaixo da parede celular se encontra a membrana citoplasmática a qual separa o interior da célula, o citoplasma, de seu exterior. Grande parte das reações anabólicas e catabólicas, assim como a transferência de energia, ocorre no citoplasma, bem como os sistemas de armazenamento, processamento e transferência de informações. Dentro do citoplasma das células eucariotas existem várias organelas e estruturas citoplasmáticas. Elas provêem meios para o

compartilhamento de área dentro das células com funções específicas. Existem organelas como o núcleo, mitocôndrias, plastídeos, microcorpos e dictossomas, e ainda estruturas citoplasmáticas como os microtúbulos, ribossomas e o retículo endoplasmático.

A membrana citoplasmática separa a célula do meio que a rodeia constituindo-se de uma fina camada de aproximadamente 7,5ηm de largura localizada logo abaixo da parede celular. Essa membrana é composta de uma bicapa lipídica viscosa e apresenta, dispersada em sua superfície e interior, as proteínas encarregadas das funções de transporte, catálises e outras.

As organelas como o núcleo, mitocôndrias, cloroplastos e plastídeos são rodeados por duas membranas internas. Os vacúolos e microcorpos estão rodeados por membranas semipermeáveis.

O citoplasma contém as proteínas, carbohidratos, aminoácidos, lipídeos, ácidos nucléicos e outras substâncias hidrosolúveis. Geralmente se considera como parte do citoplasma o citoesqueleto, ribossomas e o retículo endoplasmático. As enzimas específicas essenciais para o amadurecimento e outras alterações pós-colheita são sintetizadas no citoplasma.

As mitocôndrias são organelas ou estruturas pequenas que assumem, em geral a forma alongada e ocasionalmente a forma esférica, com dimensões variáveis, normalmente de 1μm a 5μm de diâmetro e 3μm de comprimento. O número de mitocôndrias por célula varia com o tipo de célula, com a idade e com a espécie, atingindo normalmente algumas centenas podendo chegar a 2000 mitocôndrias. Sua função principal é a respiração celular. O incremento do número de mitocôndrias ocorre durante o aumento do tamanho das células, ou seja, durante o desenvolvimento do fruto.

Os vacúolos são as maiores partes componentes da célula. São rodeados por uma membrana semipermeável. Eles são pequenos em células jovens e crescem em tamanho conforme a idade, provocando a compressão do citoplasma contra a parede celular em uma camada fina. Sua função é o preenchimento do espaço celular e processo de digestão intracelular, ocupando cerca de 90% do volume da célula (HOLTZMAN e NOVIKOFF, 1984). Os vacúolos contêm: água, açúcares dissolvidos, ácidos orgânicos, proteínas, sais, oxigênio, CO_2 e pigmentos.

Os plastídeos são grupos de organelas contidos nas células vegetais constituídos por membranas duplas e podem variar em tamanho, forma e função. Os três principais tipos são os cloroplastos, os cromoplastos e os leucoplastos.

Os cloroplastos são organelas com 3-10μm de comprimento e 0,5-2μm de diâmetro. Uma célula pode conter até 200 cloroplastos. Eles apresentam uma membrana interna e uma externa, com um espaço organizado entre elas. Contêm clorofila e estão envolvidos com o processo da fotossíntese. Os cloroplastos contêm: proteínas, lipídeos, grânulos de amido, RNA, DNA e vários outros tipos de compostos orgânicos.

Existe também um sistema complexo de membranas laminares, internas rodeado por uma matriz chamada estroma. A fixação de dióxido de carbono ocorre no estroma enquanto que os sistemas fotossintéticos se encontram nas membranas tilacoidais.

Os cromoplastos são as organelas que armazenam os pigmentos como os carotenos.

Os leucoplastos, ausentes de cor, armazenam diferentes nutrientes como aminoplastos, amido, gordura e proteínas.

Os plastídeos surgem de protoplastos herdados como o citoplasma em células recém formadas. Esses protoplastos se dividem e se diferenciam em tipos de plastídeos, dependendo da natureza da célula. Sua forma final não é estática e freqüentemente há intercâmbio entre diferentes tipos. Em alguns casos, as grandes alterações estão associadas com mudanças fisiológicas como a maturação e senescência.

A Tabela 3.9 apresenta o tamanho médio e o número de componentes de uma célula.

Tabela 3.9 – Diâmetro, número e partes constituintes de uma célula vegetal

Partes Constituintes	**Diâmetro**	**Número de partes por célula**
Núcleo	5 - 20 μm	1
Cloroplasto	5 - 10 μm	20 - 200
Mitocôndria	1 - 5 μm	500 - 2000
Ribossomas	25 ηm	$5x10^5$ - $5x10^6$
Enzimas	2 - 10 ηm	$5x10^8$ - $5x10^9$

Fonte: ERICKSON, 1989

As células se unem umas as outras de forma que sobram espaços entre elas que podem ser preenchidos com ar ou por subpartes perdidas da própria célula. A Figura 3.5 apresenta a seção transversal do pericarpo de uma laranja.

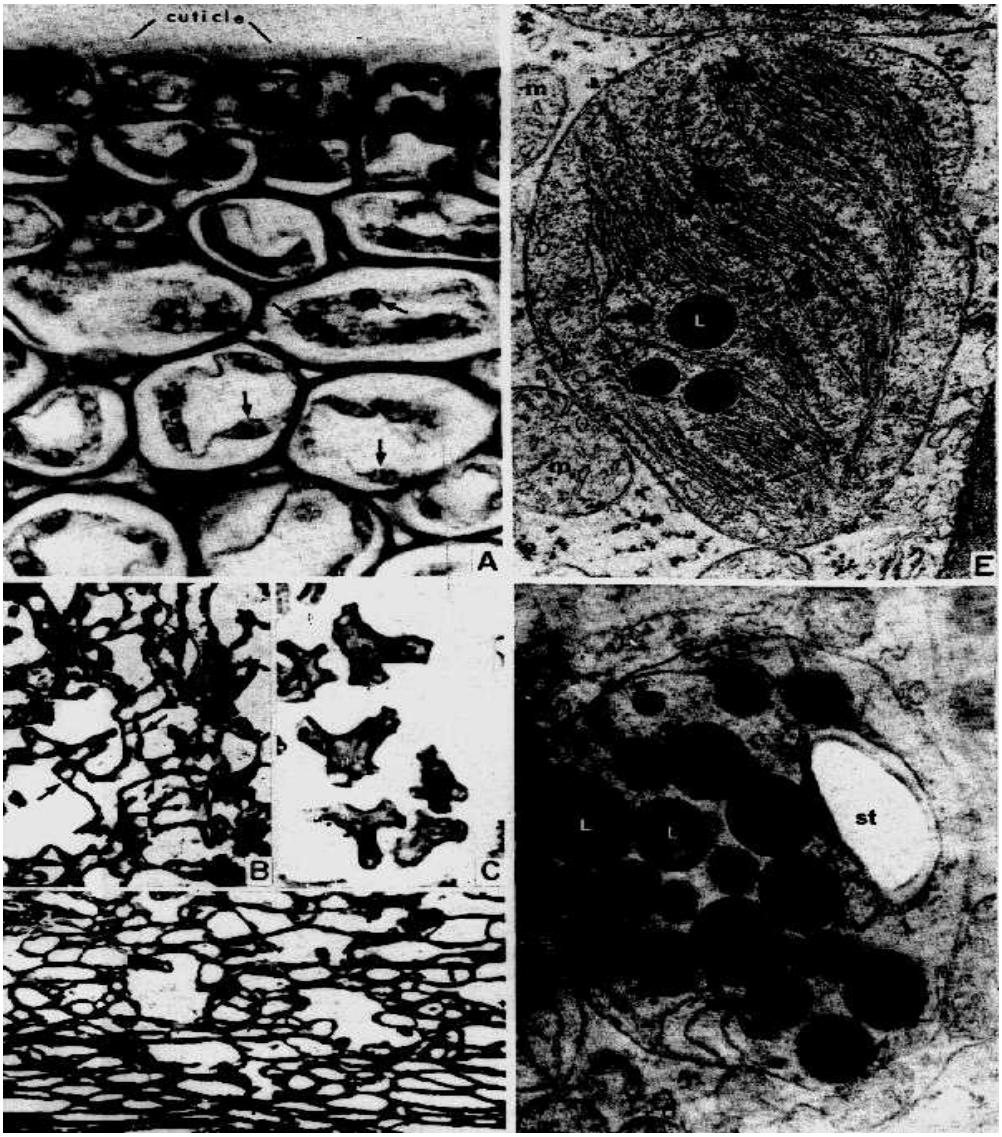

Figura 3.5 - Corte transversal do pericarpo de uma laranja.
Fonte: ERICKSON, 1989

A - exocarpo. Observa-se a existência de uma cutícula entre as células epidérmicas e que as células subepidérmicas apresentam camadas mais espessas de citoplasma contendo cromoplastos (setas).

B - célula do albedo mostra braços protuberantes que unem células adjacentes (setas).

E - cloroplasto de uma fruta imatura e verde. As setas indicam os pequenos glóbulos ao longo da margem da grana.

F - cromoplasto de um fruto maduro que foi transformado de um cloroplasto. A grana foi degenerada e os glóbulos osmiofílicos aumentaram de tamanho.

3.14 - Interação da Luz com o Tecido Vegetal

A distribuição de cloroplastos em um tecido vegetal não é homogênea, dependendo do tipo de vegetal e de seu lugar de nascimento. Por exemplo, quando o vegetal se desenvolve na sombra, recebendo apenas luz difusa, ele necessita de uma distribuição diferente daquela que teria se estivesse recebendo luz direta. Portanto, existe uma movimentação de cloroplastos (ciclose) para permitir o ajuste da absorção de luz. Conforme a luz vai penetrando no tecido, sua intensidade vai diminuindo com a profundidade. As propriedades ópticas das folhas dependem em parte do índice de refração das superfícies internas, como a interface de ar existente entre as paredes celulares (GAUSMAN *et al*, 1974).

Kumar (1972), citado por BERKVIST (1997), relata que muitos pesquisadores, ao estudarem as folhas de diversos vegetais, descobriram que a reflectância decresce e a transmitância aumenta ao se substituir o ar (índice de refração 1,0) por água (índice de refração 1,333), por infiltração a vácuo. De acordo com esse último autor, qualquer meio transparente que apresenta uma superfície curva e um índice de refração superior ao do ar, pode enfocar a luz.

De acordo com BONE *et al* (1985), os tecidos vegetais contêm centros de absorção denominados cromoporos. É através desses centros que o tecido consegue otimizar a utilização da luz e a célula concentra a luz incidente nessas áreas, o que é importante para as folhas das plantas. Nesse trabalho os autores examinaram folhas de sete espécies vegetais e concluíram que todas as espécies concentravam um feixe de raios paralelos dentro da folha. O grau de máxima concentração diminuía e a profundidade onde esse máximo ocorria aumentava à medida que a luz atingia a superfície da folha em ângulos mais oblíquos. A Figura 3.6 apresenta a cópia fiel do negativo das fotografias apresentadas nesse trabalho referente à folha de uma planta desenvolvida em sombra (*Anthurium warocqueanum*).

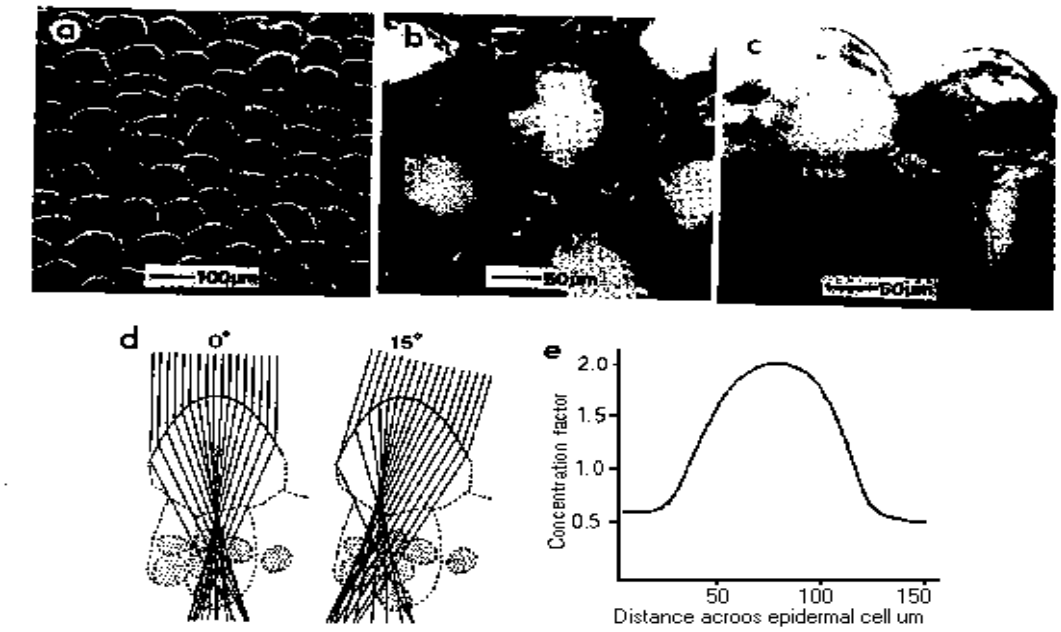

Figura 3.6 - Tecido vegetal enfocando a luz
Fonte: BONE, 1985

Se o tecido tem um índice de refração maior do que o índice do ar, ocorrerá reflexão em sua superfície, entretanto, a luz que penetra no material pode inclusive se perder dentro dele.

BERGKVIST (1997) afirma que devido à complexidade estrutural dos tecidos vegetais, os índices de refração são diferentes dentro e fora das células, e também nas várias partes das células e na parede celular.

GAUSMAN *et al* (1974) encontraram que o índice de refração da parede celular de diferentes tecidos vegetais é de 1,333-1,472 e média de 1,4025, o que significa que a luz dispersada para trás ("back scattering") de um material biológico sofre espalhamento múltiplo, bem como sofre reflexões múltiplas em diferentes superfícies.

O tamanho das células dos vacúolos e dos espaços entre as células é um pouco maior do que o comprimento de onda de um laser de He-Ne. De acordo com BERGKVIST (1997), devido ao tamanho dessas partes constituintes da célula vegetal, elas participam em Mie "scattering", enquanto

que as demais partes, que são menores do que o comprimento de onda do laser de He-Ne participam em Rayleigh "scattering". Logicamente que haverá também absorção da luz pelo tecido vegetal, principalmente se esse tiver muita clorofila, que absorve luz na faixa do espectro visível. De acordo com o mesmo autor, em tecidos vegetais, os principais elementos que absorvem a luz são a água e a clorofila, entretanto, a água absorve mais na faixa do infravermelho por volta de 0,6μm, portanto, longe do comprimento de onda do laser de He-Ne.

A dispersão ou "scattering" é uma depleção da radiação, envolvendo apenas uma mudança de direção da radiação incidente e, eventualmente, alteração no seu comprimento de onda, devido a reflexões, refrações e difrações em moléculas ou partículas distribuídas no material (JOYCE, 1992).

LORD RAYLEIGH propôs em 1831 uma teoria de dispersão, que aplicou à atenuação da radiação solar pela atmosfera, provocada pelos gases e por partículas em suspensão. Segundo Rayleigh, quando as partículas dispersoras são de pequena dimensão se comparadas ao comprimento de onda da radiação incidente ($r < 0{,}1\lambda$), a radiação dispersa é proporcional ao inverso da quarta potência do comprimento de onda, e possui uma distribuição angular $\beta(\phi)$, dada por:

$$\beta(\phi) = \left(1 + \cos^2 \phi\right) \tag{3.16}$$

em que,

ϕ é o ângulo formado entre a radiação depletada e a radiação incidente.

Segundo JOYCE (1992), para partículas com raio superior a 25 vezes o comprimento de onda da luz incidente, o efeito da dispersão pode se analisado através dos conceitos da óptica geométrica. Entretanto, para partículas cujo raio está compreendido entre $0{,}1\lambda$ e 25λ, é necessário recorrer à teoria desenvolvida por Mie. De acordo com Mie , a seção eficaz de dispersão, que refere-se à área de dispersão da radiação provocada por uma partícula de raio r, é dada por:

$$S = \pi r^2 k(y,n) \tag{3.17}$$

em que,

k - é uma função adimensional do índice de refração n da partícula

y - parâmetro que depende do raio da partícula e do comprimento de onda dado por:

$$y = \frac{2\pi r}{\lambda} \tag{3.18}$$

em que,

r – raio da partícula

λ - comprimento de onda

De acordo com BERGKVIST (1997), a variedade de tipos de partículas bem como a de suas dimensões, tornam difícil a análise de sua ação sobre a radiação incidente. A forma mais comum de descrever as propriedades de um meio é utilizar o coeficiente de absorção μ_λ e o coeficiente de dispersão μ_s. Os coeficientes representantes dos dois efeitos são acoplados de forma a definir um coeficiente linear de transporte, dado por:

$$\mu_{tr} = \mu_s^{'} + \mu_\lambda \tag{3.19}$$

$$\mu_s^{'} = (1-g)\mu_s \tag{3.20}$$

em que,

μ'_s - coeficiente de redução de dispersão

g - fator de anisotropia

μ_λ - coeficiente de absorção

O fator de anisotropia, **g**, é o coseno médio do ângulo de dispersão, podendo atingir valores entre -1 e 1. Quando esse fator é unitário, trata-se de uma dispersão puramente na direção frontal ("foward scattering"), enquanto que se esse fator for igual a zero a dispersão é uniformemente distribuída. De acordo com BERGKVIST (1997), o tecido humano apresenta um valor típico para o fator de anisotropia entre 0,7 e 0,95.

A distribuição para a dispersão Rayleigh é simétrica em relação ao plano de dispersão, enquanto que a dispersão devido a partículas de maior dimensão é assimétrica, aumentando na direção frontal à medida que o raio das partículas aumenta. A Figura 3.7 ilustra a distribuição angular da dispersão da luz verde em função do raio das partículas.

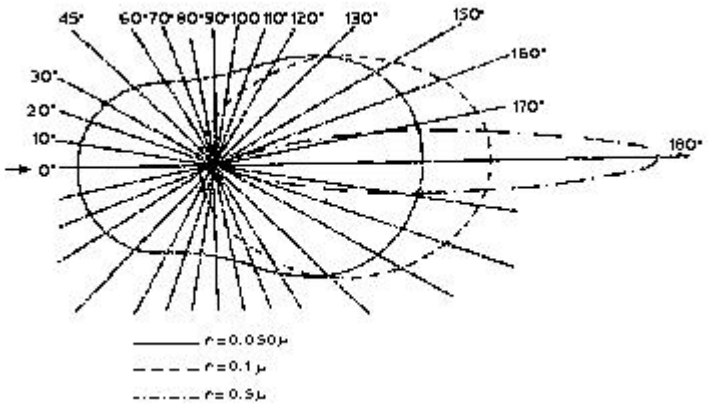

Figura 3.7 - Distribuição angular de dispersão da luz verde
Fonte: JOYCE, 1992

Em termos de absorção, de acordo com BERGKVIST (1997), quando se mede variação temporal de "speckle", uma forte absorção não causa problemas importantes, entretanto quando se mede um objeto onde a quantidade de clorofila muda muito, pode ocorrer que o tamanho do "speckle" se altere com o tempo.

3.15 - Propriedades do "Speckle"

Quando o "speckle" é formado por luz espalhada por partículas que se movem, o "speckle" é modulado por esse movimento. Isso produz uma variação no padrão temporal do "speckle". O "speckle" é um fenômeno muito complexo, e de difícil modelagem. Quando a luz penetra em um material, ela é espalhada em todas as direções possíveis antes de retornar à superfície, o que torna impossível reconhecer e estudar cada partícula que espalha a luz.

Para esta aplicação as dimensões de interesse do "speckle" são o tamanho de cada grão, bem como sua intensidade luminosa. De acordo com BERGKVIST (1997), o tamanho do grão de um "speckle" estacionário corresponde ao diâmetro do "spot" luminoso circular de alta irradiância conhecido como disco de Airy, dada por:

$$d = 2.44\left(\frac{\lambda.z}{D}\right) \tag{3.21}$$

em que,
d - diâmetro do "speckle"
z - distância do observador
D - diâmetro da área iluminada

BRIERS (1993) afirma que o padrão de "speckle" observado é resultante da superposição de dois diferentes padrões, sendo esses, os "speckles" grandes, provenientes do espalhamento superficial os quais são fortemente dependentes do ângulo de incidência e são modulados por "speckles" pequenos, produzidos pela luz que vem do interior do material, os quais apresentam uma dependência muito fraca do ângulo de incidência.

Xu *et al* (1995) demonstraram que os "speckles" resultantes de espalhamento interno apresentam um tamanho médio menor do que aqueles produzidos por espalhamento superficial. Isso se explica pelo fato do feixe laser se expandir ao penetrar no material. À medida que a luz se dispersa para trás, ela deixa o objeto através de uma área maior do que a área através da qual ela penetrou, ou seja, na equação de Airy, isso seria equivalente ao aumento do diâmetro **D**, o que obviamente reduz o diâmetro médio do "speckle". Em experimentos com maçãs, os autores encontraram uma relação de 1:10 no tamanho do "speckle" interno e superficial. Os autores também determinaram experimentalmente a relação entre o tamanho da área iluminada pelo feixe laser e a profundidade de penetração no material, dada por:

$$D = D_0\left[1 - \exp\left(-\frac{T}{T_0}\right)\right] \tag{3.22}$$

em que,

D - diâmetro da região iluminada

T - profundidade

T_0 - 1,6 mm

Como o "speckle" é um efeito estocástico, ele apenas pode ser descrito através de estatística. A maioria das aproximações que tem sido utilizadas constitui avaliações dos conceitos de estatística de primeira e de segunda ordem. De acordo com BRIERS (1993), a primeira ordem é a descrição estatística do contraste de "speckle" de uma única imagem. Essa aproximação demonstra que o desvio padrão σ da intensidade espacial é a intensidade média do padrão de "speckle" $\mathbf{< \mathit{I} >}$. O contraste pode ser expresso como a relação entre a variância e a intensidade média quadrática.

$$contraste = \frac{\sigma^2}{\langle I \rangle^2} \tag{3.23}$$

em que,

σ^2 – variância

$\langle I \rangle^2$ – quadrado médio

Quando essa relação for igual à unidade o padrão tem um contraste máximo.

Segundo esse último autor, a estatística de segunda ordem é uma descrição do tamanho e da intensidade do "speckle" em uma imagem. O método consiste em tomar a autocorrelação da imagem e determinar os tamanhos. Essa técnica é também utilizada para determinar as alterações de intensidade de um único elemento da imagem ("pixel"), tomando a autocorrelação de sua história temporal.

3.16 - Métodos para Tratamento de Imagens

A abordagem sistemática para análise de dados experimentais observados em diferentes instantes que podem ser correlacionados no tempo é comumente referida como análise de séries temporais. A análise de séries temporais tem sido de grande utilidade em diversas áreas, como estudo de vibrações, economia, ciência ambiental, dentre outros. Existem dois métodos para a análise de séries temporais, os quais são identificados como abordagem no domínio do tempo e abordagem no domínio da freqüência.

Segundo VEIGA e SAFADI (1999), a abordagem no domínio do tempo é geralmente implicada pela afirmativa que correlação entre observações adjacentes é mais bem explicada em termos de uma regressão de valores presentes sobre valores passados. Essa abordagem considera a estimação dos coeficientes de regressão e a determinação do número de coeficientes de forma que as

observações presentes podem ser preditas como a soma de uma combinação linear de valores passados de uma série de ruídos e uma componente determinística ortogonal à combinação linear.

Dependendo do número de parâmetros envolvidos pode-se classificar os modelos para séries temporais como modelos paramétricos (número finito de parâmetros) e modelos não paramétricos (envolvem um número infinito de parâmetros). A análise da classe dos modelos paramétricos é feita no domínio do tempo, sendo os modelos mais usados o de regressão (ou erro), auto-regressivos-médias móveis, abreviados como **ARMA** e auto-regressivos, integrados, médias móveis, abreviados como **ARIMA**.

Os modelos não paramétricos mais utilizados são a função autocorrelação (ou de autocovariância) e sua Transformada de Fourier, a densidade espectral. Do ponto de vista matemático, essas funções são equivalentes, uma vez que constituem pares de Transformadas de Fourier.

De acordo com PRIESTLEY (1981), uma das suposições mais freqüentes que se faz a respeito de uma série temporal é a de que ela é estacionária, ou seja, ela se desenvolve no tempo aleatoriamente ao redor de uma média constante, refletindo algum tipo de equilíbrio estático. Entretanto, a maioria das séries apresenta algum tipo de não estacionaridade como uma tendência, por exemplo.

As funções periódicas apresentam uma freqüência definida onde a função é válida para qualquer instante (t), enquanto que as transitórias são de curta duração, ou seja, são instantâneas e não são repetitivas, ou em outras palavras, a função é válida apenas no instante definido (t). As funções aleatórias apresentam todas a freqüências e ângulos de fase, dentro de uma faixa definida, entretanto, podem ser estacionárias ou não estacionárias. A fim de se definir propriamente um processo aleatório estacionário, é necessário determinar a densidade de probabilidade estatística, a média e a média quadrática do sinal. Um processo estacionário pode ser representado por uma densidade probabilística Gaussiana, e a função autocorrelação e a função correlação cruzada, podem ser utilizadas para estabelecer as relações desejadas. A função autocorrelação temporal $\phi_{11}(\tau)$ é definida de acordo com a equação (3.24).

$$\phi_{11}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) f_1(t+\tau) dt \tag{3.24}$$

em que,

$\phi_{11}(\tau)$ – função autocorrelação temporal

t – tempo

τ - deslocamento temporal ("lag")

Uma função aleatória $\mathbf{f_1(t)}$ típica está representada pela Figura 3.8. A função $\boldsymbol{\phi_{11}(\tau)}$ indica o quanto do valor de $\mathbf{f_1(t)}$ em um ponto **A** e o valor $\mathbf{f_1(t+\tau)}$ em um ponto **B** se correlacionam sobre um intervalo $\boldsymbol{\tau}$. A correlação é positiva para um dado $\boldsymbol{\tau}$ quando o produto $\mathbf{f_1(t)f_1(t+\tau)}$ é positivo, como representado pela Figura 3.9. O valor médio temporal da área sob a curva é a função autocorrelação $\boldsymbol{\phi_{11}}$. Essa função está representada na Figura 3.10 para um único ponto **C**. Calculando-se o valor médio temporal para muitos valores de $\boldsymbol{\tau}$, encontra-se a distribuição completa da função autocorrelação.

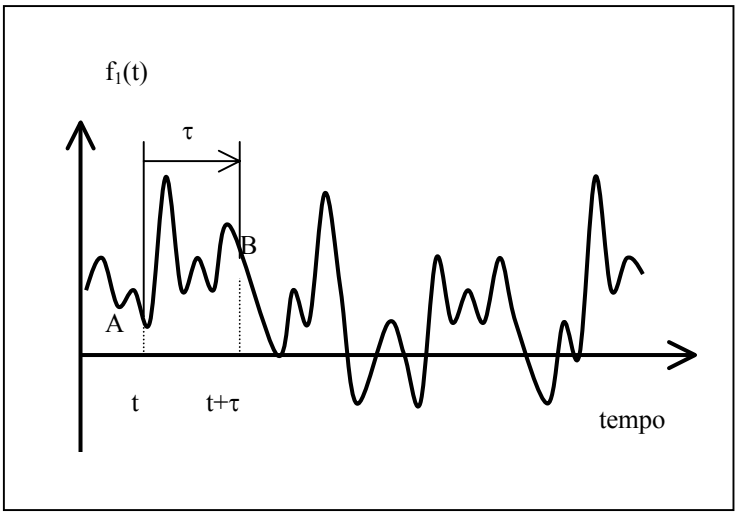

Figura 3.8 Representação gráfica de um sinal aleatório $f_1(t)$

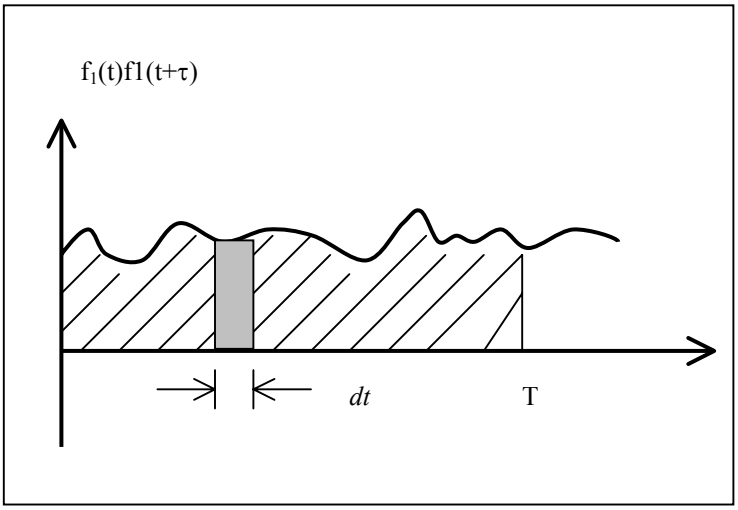

Figura 3.9 - Representação gráfica de uma função correlação positiva

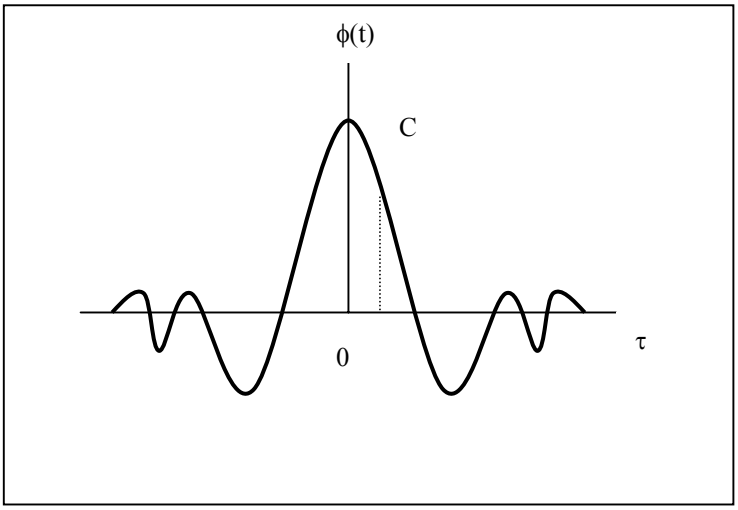

Figura 3.10- Representação gráfica de uma distribuição típica da função autocorrelação

O valor limite da função autocorrelação para um "lag" igual a zero ($\tau = 0$), equivale ao próprio valor quadrático médio do sinal. Então a equação (3.24) se reduz a:

$$\phi_{11}(0) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T f_1^2(t)\ dt \tag{3.25}$$

Para um processo aleatório, a autocorrelação decai e tende a zero conforme $\boldsymbol{\tau}$ vai aumentando, porque os eventos diminuem sua correlação quando são separados no tempo. Esse comportamento indica que a função $\boldsymbol{\phi_{11}(\tau)}$ é uma função par, de valor real no domínio do tempo $\boldsymbol{\tau}$. A função $\boldsymbol{\phi_{11}(\tau)}$ pode ser representada pela Transformada de Fourier como:

$$\phi_{11}(\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} S_{11}(\omega)\, e^{j\omega t} d\omega \tag{3.26}$$

$$S_{11}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_{11}(\tau)\, e^{-j\omega t} d\tau \tag{3.27}$$

em que,

$\phi_{11}(\tau)$ – função autocorrelação (domínio do tempo - t)

$S_{11}(\omega)$ – função densidade espectral (domínio da freqüência)

A função $\mathbf{S_{11}(\omega)}$ tem apenas valores reais, pois a função $\boldsymbol{\phi_{11}(\tau)}$ é uma função real par. Isso representa um espectro contínuo de dois lados denominado densidade espectral. Para ($\tau = 0$) a equação (4.24) se reduz a:

$$\phi_{11}(0) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} S_{11}(\omega) d\omega \tag{3.28}$$

Esse resultado mostra que o valor quadrático médio da função $\mathbf{f_1(t)}$ é a área sob a curva do valor quadrático médio da densidade espectral. A equação (3.28) é á fórmula para funções aleatórias equivalente à fórmula de Parseval a qual é aplicada para funções periódicas.

A função correlação cruzada temporal $\boldsymbol{\phi_{12}(\tau)}$ entre dois sinais $\mathbf{f_1(t)}$ e $\mathbf{f_2(t)}$ é definida pela equação (3.29).

$$\phi_{12}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) f_2(t+\tau) dt \tag{3.29}$$

em que,

$\phi_{12}(\tau)$ – função correlação cruzada

t – tempo

τ – deslocamento temporal ("lag")

Essa relação mede a correlação de $\mathbf{f_2(t + \tau)}$ com $\mathbf{f_1(t)}$. É uma função de valor real, porém não é uma função par. Uma correlação cruzada típica é apresentada na Figura 3.11, onde a função $\boldsymbol{\phi_{12}(\tau)}$ apresenta um valor de pico em $\boldsymbol{\tau_0}$. De fato a correlação cruzada apresenta vários picos em diferentes instantes $\boldsymbol{\tau_0}$, o qual depende da relação entre $\mathbf{f_1(t)}$ com $\mathbf{f_2(t)}$.

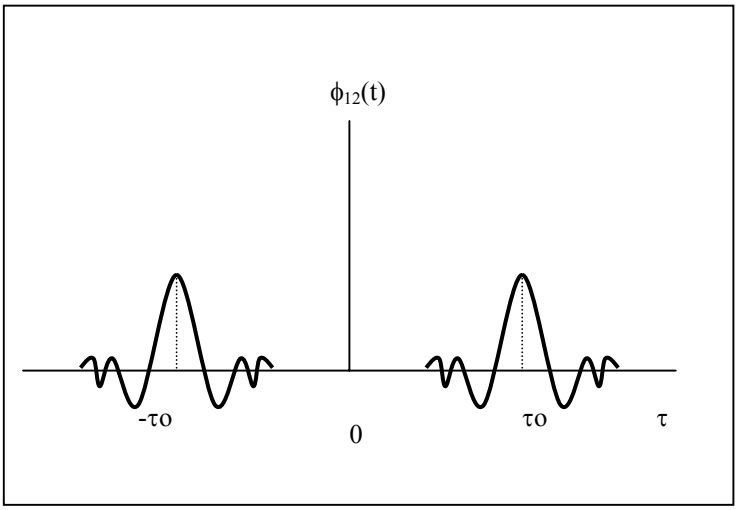

Figura 3.11 - Representação gráfica de uma distribuição típica da Correlação cruzada

Como ocorre no caso da autocorrelação e do valor quadrático médio da densidade espectral, a função correlação cruzada $\phi_{12}(\tau)$ pode ser representada pela Transformada de Fourier, com sua densidade espectral cruzada como:

$$\phi_{12}(\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} S_{12}(\omega)\, e^{j\omega t} d\omega \tag{3.30}$$

$$S_{12}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_{12}(\tau)\, e^{-j\omega t} d\tau \tag{3.31}$$

em que,

$\phi_{12}(\tau)$ – função correlação cruzada (domínio do tempo)

$S_{12}(\omega)$ – função densidade espectral cruzada (domínio da freqüência)

Em estudos referentes ao processamento de imagens, o padrão STS ("space-time speckle") de um espécime vegetal mostra de forma qualitativa os efeitos dinâmicos do "speckle", incluindo as variações temporais de intensidade de um "pixel" da imagem coletada. Para uma avaliação quantitativa desse efeito pode ser utilizado um dos seguintes tratamentos:

- Estatística temporal de primeira ordem do "biospeckle".
- Densidade espectral temporal do "biospeckle" (PSD).
- Correlação dos padrões de STS.

A correlação do padrão de "speckle" é estabelecida em função do instrumental disponível para intervalos de tempo sucessivos (MURAMATSU, *et al*, 1996). O coeficiente de correlação μ é definido como:

$$\mu = \frac{\left\langle (I_o - \langle I_o \rangle)(I_t - \langle I_t \rangle) \right\rangle}{\sigma_o \sigma_t} = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(I_{o,i} - \langle I_o \rangle)(I_{t,i} - \langle I_t \rangle)}{\sigma_o \sigma_t} \tag{3.32}$$

em que,

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(I_{t,i} - \langle I_t^2 \rangle) \tag{3.33}$$

$$\langle I_t \rangle = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(I_{t,i}) \tag{3.34}$$

A função autocorrelação da variação temporal do "speckle" de um elemento da imagem (“pixel”), $\mathbf{R_1(\tau)}$ é a medida do valor médio da correlação entre as intensidades de duas sucessivas amostras instantâneas, que pode ser expressa de acordo com a equação (3.35).

$$R_1(\tau) = \langle I(t) I(t+\tau) \rangle \tag{3.35}$$

O intervalo de tempo τ da correlação é tomado como o tempo necessário para que a função autocorrelação normalizada dada pela equação (3.36) cair até o valor 1/e.

$$\gamma_1(\tau) = R_1(\tau) / \langle I^2(t) \rangle \tag{3.36}$$

Quanto menor for o valor de τ maior será a correlação, portanto mais lentamente muda as intensidades. A densidade espectral de potência temporal do "speckle" (PSD) é a Transformada de Fourier de $R_I(\tau)$ para as variações temporais da intensidade do "speckle". Esse revela informações de velocidade nas fontes de movimento que produzem variação temporal de "speckles", resultando na distribuição de freqüência dessas variações, ou seja, componentes de alta freqüência correspondem a variações rápidas, enquanto que componentes de baixa freqüência correspondem a variações lentas (XU *et al*, 1995).

Um padrão STS contém as características espaciais e temporais de uma variação temporal do padrão de "speckle". A análise de correlação mede o nível da variação temporal de um "speckle" dinâmico. O coeficiente de correlação $\mathbf{C_{ij}}$ de uma distribuição de intensidade de uma linha fixa do "speckle" em dois instantes $\mathbf{(t_o + i\,\Delta t)}$ e $\mathbf{(t_o + i\Delta t + j\Delta t)}$ é definido como apresentado na equação (4.34): A intensidade de um "pixel" **(x,y)** é dada por **I(x,y)**, $\mathbf{t_o}$ é um tempo inicial arbitrário, $\mathbf{\Delta t}$ é o intervalo de amostragem e **i = 1,2,...,M** e **j=0,1,...,M-i.**

$$C_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{N} \left[I(k,i) - \mu\right] \left[I(k,i+j) - \mu\right]}{\left\{\sum_{k=1}^{N} \left[I(k,i) - \mu\right]^2 \sum_{k=1}^{N} \left[(k,i+j) - \mu\right]^2\right\}^{1/2}} \tag{3.37}$$

O valor médio do coeficiente de correlação $\mathbf{C_{ij}}$ para um intervalo de tempo $\mathbf{j\Delta t}$ é definido como:

$$C_j = \sum_{i=1}^{M/2} C_{ij} \tag{3.38}$$

Um estudo das propriedades estatísticas da história temporal da intensidade do "speckle" utilizando a função autocorrelação espaço-tempo como ferramenta foi apresentado por (ROMERO, 1999). Essa ferramenta já havia sido utilizada também por XU *et al* (1995), MIZUKAMI *et al* (1996) e por BERGKVIST (1997).

A autocorrelação, **γ(t)**, descreve o comportamento da série temporal e mostra como uma função se correlaciona consigo mesma. A autocorrelação do "speckle" é definida como:

$$\gamma(t) = \frac{1}{\langle I^2 \rangle} \int_{-\infty}^{\infty} I(\tau).I(\tau - t)d\tau \tag{3.39}$$

em que,

$I(t)$ - função história temporal do "speckle"

$\frac{1}{\langle I^2 \rangle}$ - fator de normalização

Como exemplo, a Figura 3.12 apresenta um padrão STS para um material de baixa atividade, enquanto que a Figura 3.13 apresenta o padrão STS de uma laranja recém colhida, ambos com tamanho de **512x512** elementos. Comparando-se estas duas Figuras, nota-se claramente as diferenças entre as atividades, pois as intensidades na Figura 3.12, ao longo do tempo (eixo das abcissas) altera muito pouco em relação ao padrão da Figura 3.13. As funções de autocorrelação para esses dois padrões de "speckle" são apresentadas na Figura 3.14.

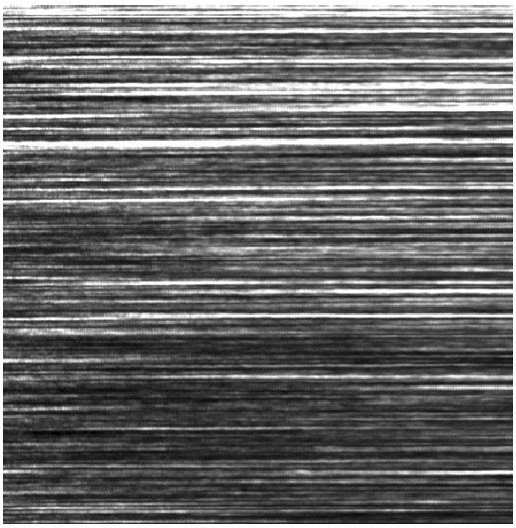

Figura 3.12 - Padrão STS de um produto com baixa atividade

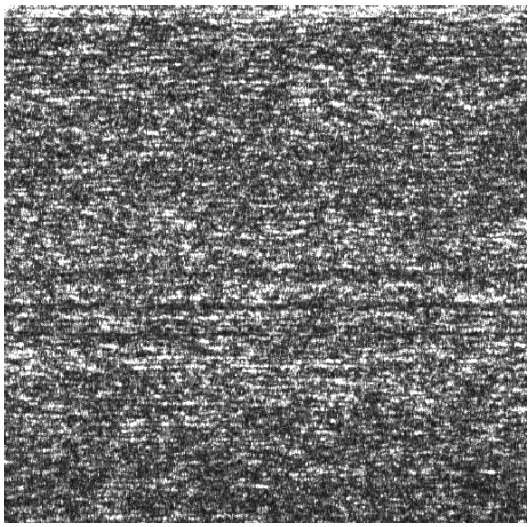

Figura 3.13 - Padrão STS de um produto com alta atividade

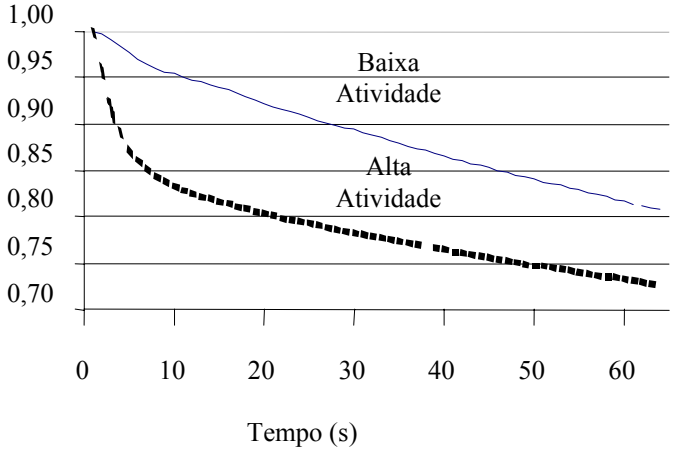

Figura 3.14 - Representação gráfica das funções de autocorrelação de padrões STS apresentados nas Figuras 3.12 e 3.13

De certa forma, não se pode utilizar a função autocorrelação como uma medida quantitativa. Ela permite que se tenha uma idéia da variação do "speckle" de forma qualitativa, sendo necessário realizar alguma aproximação para se extrair informações quantitativas. Para essa caracterização, como mencionado anteriormente, se elege tradicionalmente o parâmetro FWHM (largura na metade da altura máxima), como uma medida da largura característica da função. Em outras palavras, se mede a abcissa no ponto onde a função autocorrelação cai à metade de seu valor máximo, o que não é uma medida muito precisa. ROMERO (1999) introduz novos métodos de caracterização, considerando outros pontos da função autocorrelação, tais como:

- Largura do retângulo equivalente
- Largura da exponencial decrescente
- Ajuste com gaussianas e lorentzianas
- Cumulantes estatísticos

Este trabalho utilizou como medidas de caracterização da variação temporal do "speckle", os cumulantes estatísticos e o momento de segunda ordem, também referido na literatura como momento de inércia. Aqui, o momento de inércia da imagem foi referido como módulo de dispersão de intensidade da matriz de ocorrências, ou simplesmente módulo de dispersão de intensidades.

3.16.1 – Módulo de dispersão de intensidades

As informações de uma imagem podem ser caracterizadas por seu nível de intensidade ("gray level"), sua distribuição espacial e sua distribuição de probabilidades, ou histograma. O histograma de uma imagem representa a freqüência relativa da ocorrência de vários níveis de intensidade na imagem. De acordo com JAIN, 1989, os histogramas são técnicas poderosas para reconhecimento de imagens.

A primeira aproximação para caracterização da evolução temporal de um grão de "speckle" foi proposta por OLAMARA *et al* (1989). Esse processo se inicia com a aquisição de 512 imagens sucessivas da amostra iluminada, de forma que apenas a coluna central de cada imagem é selecionada. Com essas colunas, é construída uma nova imagem de 512x512 elementos denominada: padrão da história temporal do "speckle" (THSP). O THSP ou STS pode ser entendido como uma matriz onde as linhas representam pontos diferentes do objeto, ou seja a parte espacial da imagem e as colunas representam sua intensidade em todos os instantes amostrados, ou seja a parte temporal da imagem.

A atividade da amostra aparece como mudanças nas intensidades no eixo horizontal da imagem construída de forma que em uma amostra que apresenta baixa atividade, a variação do "speckle" é lenta e, conseqüentemente, o THSP apresenta linhas paralelas bem definidas como uma cortina tipo persiana.

Quando uma amostra apresenta muita atividade a variação do "speckle" é muito rápida e o THSP se apresenta como um padrão aleatório, lembrando uma única imagem do "speckle".

Considerando que o THSP carrega informações da atividade do material sob estudo, cada tipo de material apresenta um THSP diferente. Isso pode ser percebido através de inspeção visual, porém valores numéricos são necessários para efeito de comparação através de processos artificiais objetivos mais precisos. Dessa forma, torna-se necessário transformar essa imagem em um número ou índice de quantificação, para permitir diferenciar os objetos que apresentam níveis de atividades distintos.

Seja **u** uma variável aleatória que representa o nível de intensidade de uma dada região da imagem. A função densidade de probabilidade é definida por:

$$p_u(x) = \Pr ob[u = x] = \frac{número\ de\ elementos\ com\ nível\ x}{número\ total\ de\ elementos} \tag{3.40}$$

em que,
x = 0,...,L-1

Segundo JAIN, 1989, a probabilidade combinada de Segunda ordem tem sido bastante útil em aplicações com extração da textura de imagens. Essa função é definida por:

$$p_u(x_1, x_2) = p_{u1,u2}(x_1, x_2) = \Pr ob[u_1 = x_1, u_2 = x_2] \tag{3.41}$$

$$p_u(x_1, x_2) = \frac{número\ de\ pares\ de\ elementos\ com\ níveis\ u_1 = x_1, u_2 = x_2}{número\ total\ de\ pares\ de\ elementos\ da\ imagem} \tag{3.42}$$

em que,
u_1 e u_2 são dois elementos (“pixels”) sucessivos na imagem
x_1 e x_2 são os valores das respectivas intensidades desses elementos

Assim, foi desenvolvido um processo baseado nas ocorrências de valores de intensidade sucessivos dos elementos que compõem a imagem do THSP. O processo transforma o THSP em uma matriz de ocorrências denominada "concurrence matrix" (COM) que é definida como:

$$COM = \lfloor N_{ij} \rfloor \tag{3.43}$$

em que,
N_{ij} – número de ocorrências de intensidades
i,j – intensidades sucessivas

As entradas são o número de ocorrências que um certo valor de intensidade **i** é seguido por um valor de intensidade **j**, o que de acordo com ARIZAGA *et al*, (1999) caracteriza um caso particular da também chamada "spatial gray level dependence matrix" , usualmente utilizada para caracterizar a textura de imagens.

Para melhor entendimento, considere a imagem ilustrada na Figura 3.15 como sendo uma imagem da evolução temporal de um padrão de “speckle” composta por 4x4 elementos e no máximo 4 níveis de intensidade, o que corresponde a um sistema de 2 bits. A Figura 3.15 pode ser transformada em uma matriz de intensidades, onde são considerados os valores das intensidades de cada elemento da imagem, para, em seguida, obter-se a matriz de ocorrências modificada (MOM), também referida na literatura como “matriz co-ocorrencia modificada” (MCOM). A matriz de intensidades é da Figura 3.15 é representada pela matriz 1.

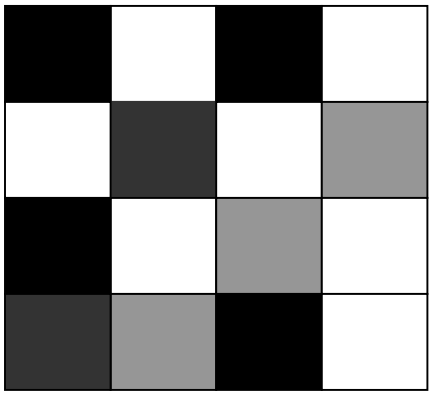

Figura 3.15 – Simulação de
STS alta atividade

$$\begin{pmatrix} 1 & 4 & 1 & 4 \\ 4 & 2 & 1 & 3 \\ 1 & 4 & 3 & 4 \\ 2 & 3 & 1 & 4 \end{pmatrix}$$

Matriz 1 – Matriz de ntesidades referente
a Figura 3.15

A matriz de ocorrências da Figura 3.15 seria equivalente a matriz 2, onde as linhas representam um certo nível de intensidade seguido por outro nível de intensidade representado pela coluna. Por exemplo, a intensidade 1 seguida da intensidade 4 ocorre 4 vezes na matriz 1. Assim, na linha 1, coluna 4 da matriz de ocorrências, coloca-se o valor 4. A ocorrência da intensidade 4, seguida pela intensidade 3, ocorre 1 vez, portanto, na linha 4, coluna 3, coloca-se o valor 1, até formar a matriz de ocorrências (matriz 2).

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 4 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Matriz 2- Matriz de ocorrências
da Figura 3.15

Para normalizar a matriz de ocorrências, cada valor é dividido pelo número total de ocorrências de cada linha detectado na imagem como representado na equação 3.44. Dessa forma o somatório de todas as ocorrências em cada linha torna-se igual à unidade resultando em uma matriz de ocorrências modificada (MOM). Após esse processo, atribui-se valores de intensidade para cada valor de ocorrência normalizada, de forma que o maior valor seja equivalente ao branco ou 256 e o menor valor seja equivalente ao negro ou 0.

$$M_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{j} N_{ij}} \tag{3.44}$$

em que,

N_{ij} – número de ocorrências de intensidades sucessivas

A matriz de ocorrências modifica, é a transformação da matriz 2 em uma imagem, onde para cada ocorrência é atribuído um nível de intensidade. Essa nova imagem é representada pela Figura 3.16.

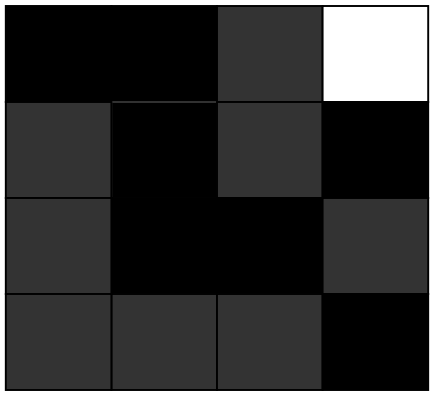

Figura 3.16 – MOM da Figura 3.15

Considere outra imagem ilustrada pela Figura 3.17 como sendo uma imagem da evolução temporal de um padrão de “speckle” também composta por 4x4 elementos e no máximo 4 níveis de intensidade, como representando uma baixa evolução de intensidades.

A matriz 3 representa as intensidades da imagem da Figura 3.17, enquanto que a matriz 4 representa sua matriz de ocorrências ou sua "concurrence matrix". A Figura 3.18 representa sua matriz de ocorrências modificada.

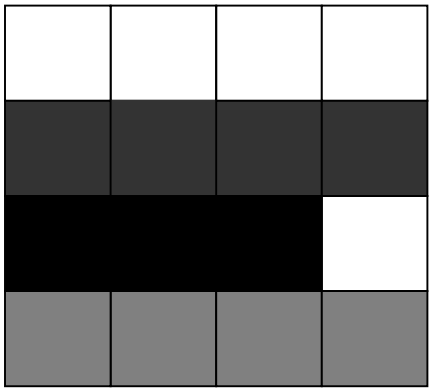

Figura 3.17 – Simulação de
STS baixa atividade

$$\begin{pmatrix} 4 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 4 \\ 3 & 3 & 3 & 3 \end{pmatrix}$$

Matriz 3 – Matriz de intesidades referente
Figura 3.17

$$\begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

Matriz 4- Matriz de ocorrências
da Figura 3.17

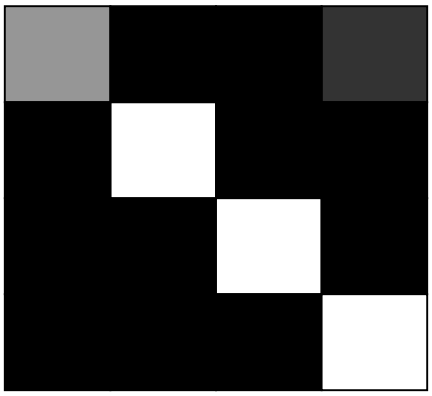

Figura 3.18 – MOM da Figura 3.17

A diagonal principal da matriz de ocorrências e da matriz de ocorrências modificada está relacionada às regiões homogêneas da imagem, cujos valores de intensidades são estáveis e não se alteram com o tempo, enquanto que as regiões mais afastadas da diagonal principal com valores não nulos se relacionam a zonas de grande contraste de intensidade.

Neste trabalho, a variável de interesse é o tempo, de forma que os **N** valores de ocorrência indicam quantas vezes um valor de intensidade **i** é seguido no próximo intervalo de tempo por um

valor de intensidade **j** no THSP. Caso a intensidade não se altere com o tempo, os únicos valores não nulos da matriz de ocorrências pertencerão à sua diagonal principal, caracterizando um material de baixa atividade. Se um material apresenta muita atividade, as intensidades apresentarão mudanças e começarão aparecer valores de ocorrências não nulos fora da diagonal principal chegando em alguns casos a formar uma nuvem em torno dela.

A Figura 3.19 representa o THSP de uma amostra de baixa atividade enquanto que a Figura 3.20 representa a matriz de ocorrências modificada correspondente. Para uma amostra que apresenta um nível elevado de atividade, pode ser observado na Figura 3.21 seu THSP e na Figura 3.22 a matriz de ocorrências modificada correspondente.

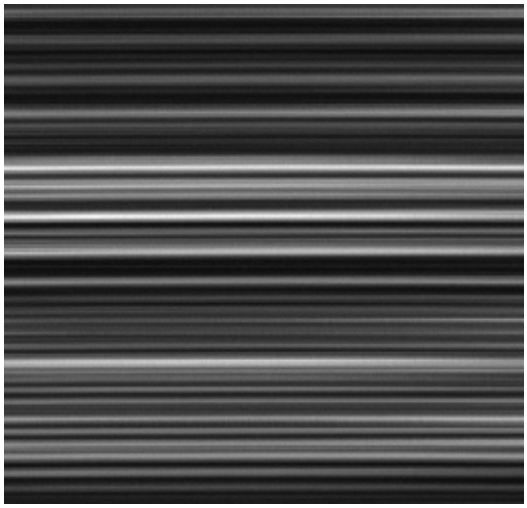

Figura 3.19 – STS baixa atividade

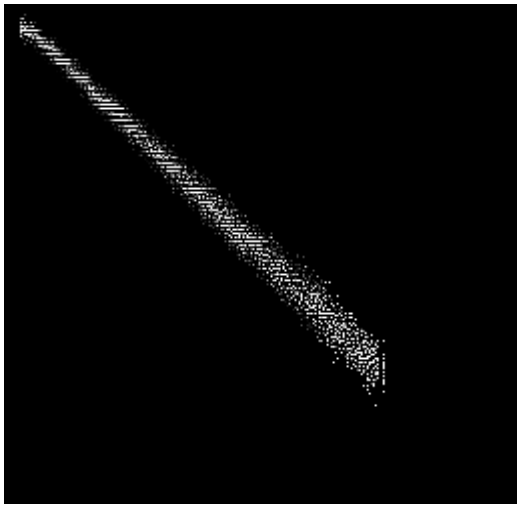

Figura 3.20 – MOM baixa atividade

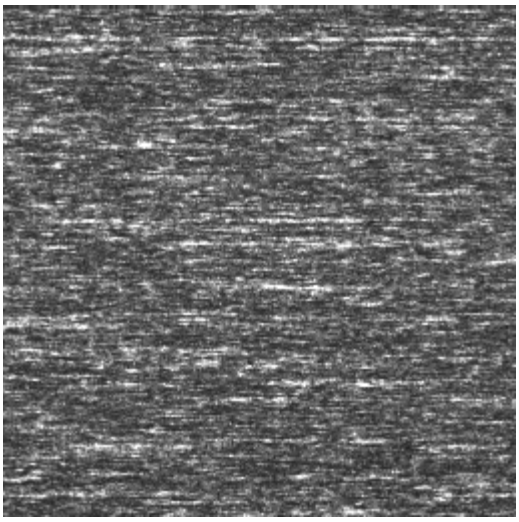

Figura 3.21 - STS alta atividade

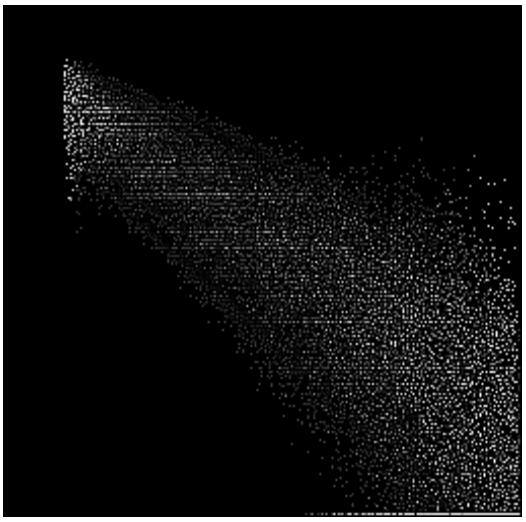

Figura 3.22 - MOM alta atividade

As diferenças de atividade entre as duas amostras podem ser observadas comparando-se as Figuras 3.19 e 3.21 e também as Figuras 3.20 e 3.22. Os valores não nulos que se encontram fora da diagonal principal representam mudanças de intensidade, ou seja, quanto mais espalhada é a matriz, mais ativa é a amostra e quanto mais concentrado em torno da diagonal principal, menor é a atividade. Essa diferença é bem evidente ao se fazer uma inspeção visual, portanto, deve-se buscar uma maneira de quantificá-la numericamente.

A fim de se obter um valor numérico que permita quantificar as diferenças entre duas imagens distintas pode ser aplicado o conceito de momento de segunda ordem. Esse cálculo é aplicado na matriz de ocorrências com respeito à sua diagonal principal na direção das linhas, constituindo o módulo de dispersão de intensidades (MDI), também referido na literatura como momento de inércia da imagem (MI).

O módulo de dispersão de intensidades consiste no somatório dos produtos dos valores de intensidade da matriz pelo quadrado da distância entre cada elemento da matriz e a diagonal principal. A equação 3.45 representa a operação do módulo de dispersão de intensidades.

$$MDI = \sum_{ij} M_{ij}(i-j)^2 \tag{3.45}$$

Nesse processo, as variações bruscas de intensidade, provenientes de ruídos eleva a presença de elementos longe da diagonal principal, portanto o método tem uma grande sensibilidade a ruídos impulsivos. Uma forma de reduzir esse tipo de ruído, é desprezar valores de ocorrência inferiores a um certo número, o que seria equivalente a se promover uma filtragem tipo passa alta. Voltando ao exemplo das Figuras 3.15 e 3.17, pode-se determinar os respectivos momentos de inércia, a partir de suas matrizes de ocorrências modificadas, representadas pelas Figuras 3.23 e 3.24.

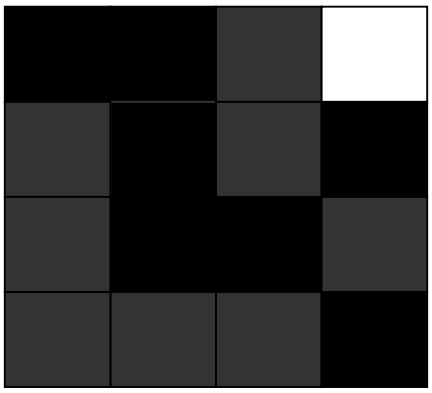

Figura 3.23 – MOM da Figura 3.17

$$MDI_1 = \sum_{ij} M_{ij}(i-j)^2$$

$$MDI_1 = \begin{bmatrix} 0 + 0 + 1(1-3)^2 + 4(1-4)^2 + \\ 1(2-1)^2 + 0 + 1(2-3)^2 + 0 + \\ 1(3-1)^2 + 0 + 0 + 1(3-4)^2 + \\ 1(4-1)^2 + 1(4-2)^2 + 1(4-3)^2 + 0 \end{bmatrix}$$

$$MDI_1 = 61$$

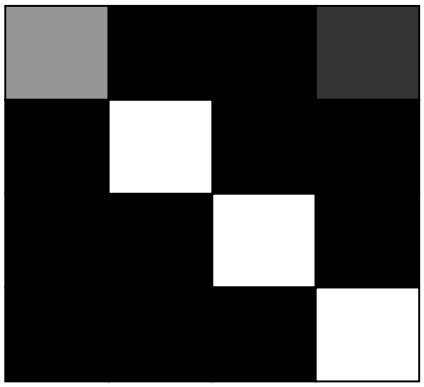

Figura 3.24 – MOM da Figura 3.15

$$MDI_2 = \sum_{ij} M_{ij}(i-j)^2$$

$$MDI_2 = \begin{bmatrix} 0 + 0 + 0 + 1(1-4)^2 + \\ 0 + 0 + 0 + 0 + \\ 0 + 0 + 0 + 0 + \\ 0 + 0 + 0 + 0 \end{bmatrix}$$

$$MDI_2 = 9$$

Procedendo-se dessa forma, se obtém uma forma rápida e objetiva de quantificação da variação temporal de padrões de "speckle".

3.16.2 - Cumulantes estatísticos

As funções de autocorrelação normalizadas podem ser ajustadas por funções exponenciais decrescentes ou gaussianas. ROMERO (1999) propôs uma nova forma de ajustes das funções de autocorrelação. A idéia básica surgiu a partir de técnicas bastante utilizadas em análise de dados, denominada semiinvariantes ou cumulantes estatísticos. Inicialmente se considera que a função temporal comporta-se como uma função característica, isto é, a função temporal é uma função geradora de todos os momentos. De acordo com PRISTLEY (1989), a função geradora dos cumulantes, é definida como o logaritmo natural (base ***e***) da função geradora dos momentos da variável aleatória **X**, como representado pelas equações 3.46 e 3.47.

$$K(t) = \log_e \{M(t)\} \tag{3.46}$$

$$M(t) = e^{K(t)} \tag{3.47}$$

Quando a função K(t) pode ser expandida em uma série de potência, como representada pela Figura 3.48, os coeficientes ($t^r/r!$) são denominados de os **r**-ésimos cumulantes da variável aleatória **X** (PRISTLEY, 1989).

$$K(t) = k_1 t + k_2 \frac{t^2}{2!} + \ldots + k_r \frac{t^r}{r!} + \ldots \tag{3.48}$$

Entretanto, desde que M(0) =1, K(0) =0, não há termos constantes na expansão de K(t). Os cumulantes $\mathbf{K_r}$ são relacionados com os momentos, e expandindo M(t) e comparando com os coeficientes da potência de **t**, podem ser derivadas expressões para cada cumulante em termos dos momentos, apesar dessas expressões se complicarem à medida que **r** cresce. Entretanto, neste trabalho, existe um interesse particular nos primeiros cumulantes, tal que existe as seguintes correspondências:

- $K_1 = \mu$
- $K_2 = \sigma^2$
- $k_3 = \mu_3$
- $K_4 = \mu_4 - 3\sigma^4$

Assim, substituindo a equação 3.48 na equação 3.47, obtem-se a equação 3.49, utilizada por ROMERO (1999), ao considerar que a função temporal comportava-se estatisticamente como uma função característica.

$$G'(t) = \exp\left[\sum_{1}^{\infty} \frac{k_n}{n!}(it)^n\right] \tag{3.49}$$

em que,

k_n - coeficientes denominados cumulantes ou semiinvariantes

De acordo com ROMERO (1999), mesmo que não se possa assegurar que função autocorrelação seja uma função característica das funções de intensidade luminosa, os resultados experimentais demonstram que a representação da equação 3.49 é adequada para descrever a função autocorrelação, considerando os primeiros pontos da função. A equação proposta por ROMERO (1999) está representada pela equação 3.50

$$G(\tau) = A + (1-A)\exp\left\{-\left(B_1\tau + B_2\tau^2 + B_3\tau^3 + \Lambda + B_n\tau^n\right)\right\} \tag{3.50}$$

A relação entre os coeficientes $\mathbf{B_i}$ e os cumulantes da equação 3.48 é dada pela equação 3.51.

$$B_i = \frac{k_i i^n}{n!} \tag{3.51}$$

ROMERO (1999) realizou simulações para testar os cumulantes estatísticos como forma de quantificar a variação temporal de padrões de "speckle" gerados artificialmente cuja variação era predefinida. Nesse trabalho o autor encontrou uma variação linear dos cumulantes com a atividade dos padrões de "speckle" gerados, e afirma que esse método é uma aproximação consistente.

Naturalmente essas não devem ser as únicas formas para medir a variação do "speckle", entretanto, nesse trabalho foram utilizados o módulo de dispersão de intensidades e os cumulantes estatísticos, como formas de quantificação da variação temporal do "speckle", pois, ambos os parâmetros de quantificação conseguem caracterizar de forma satisfatória tais variações.

4 - MATERIAL E MÉTODOS

4.1 - Considerações Iniciais

Este trabalho foi realizado no Centro de Investigaciones Opticas de La Plata, CIOp, Argentina. Devido ao fato de não existir uma forma definida como referência para realização dos experimentos que utilizam o fenômeno "biospeckle" e devido à própria complexidade do fenômeno, bem como de sua análise, é importante a definição de uma configuração experimental e a partir dele realizar os ensaios. Caso haja alteração na configuração experimental, os resultados não podem ser comparados com aqueles obtidos através de um outro.

Para o desenvolvimento dos ensaios de "biospeckle" em laranjas e buscar sua correlação com alterações fisiológicas, foram realizados alguns ensaios piloto considerando algumas situações a partir de uma configuração experimental básica que foi sendo alterada para se obter a otimização de sua resposta e verificar as suas limitações.

As alterações de qualidade de laranjas não são muito perceptíveis à vista de uma avaliação puramente subjetiva, de forma que foi considerada nesse trabalho a hipótese de que o período decorrido após a colheita era fortemente correlacionado com o processo de senescência e, conseqüentemente com a perda de sua qualidade.

Embora não seja usual em ensaios de firmeza de laranjas, foi utilizado um penetrômetro (MT) para medição da força de penetração de forma a caracterizar a firmeza das amostras, bem como foram medidas a percentagem de sólidos solúveis (^{O}BRIX) e acidez total titulável, para comparação com as medidas ópticas.

Por se tratar de vários experimentos, os detalhes de configuração e delineamento experimentais, bem como os cultivares utilizados são descritos no item 5, juntamente com os

resultados de cada experimento. Neste item, encontram-se as descrições de quatro configurações experimentais que foram utilizadas nos experimentos assim como o material e aplicativos computacionais empregados.

4.2 - A Configuração Óptica Experimental

Quando se trabalha com "speckle" ocorrem variações devido a ruídos provenientes de diversas fontes. Por exemplo, quando se mede a atividade de uma imagem de um objeto inerte (sem atividade), como uma folha de papel e se compara com a atividade da imagem obtida com a câmara tapada, observa-se que os valores são muito próximos. Isso foi também observado por (BERGKVIST, 1997), que relatou que grande parte do ruído do processo vinha do detector. Entretanto, outras fontes de erro estão presentes e nem sempre são fáceis de se controlar de forma a minimizá-los. A configuração experimental básica adotada refere-se à distância entre o objeto e o observador, abertura da câmara, distância focal e ângulo de incidência. No item 4.2.1, o feixe laser incide com um ângulo de aproximadamente trinta e cinco graus em uma área circular de aproximadamente um cm de diâmetro. A câmara é colocada perpendicularmente à superfície iluminada, e nesse caso denominou-se feixe laser normal, não existindo nenhum elemento entre a câmara e o objeto observado. No item 4.2.2, a configuração experimental básica se mantém, entretanto é colocado um polarizador entre a câmara e o objeto para verificação da influência da componente especular na dinâmica do "biospeckle". O item 4.2.3 refere-se a ensaios onde se utiliza um filtro neutro para se controlar a intensidade luminosa do feixe incidente e no item 4.2.4 a configuração experimental é alterada para que se possa avaliar o "biospeckle" em ambiente com umidade monitorada.

4.2.1 - Configuração utilizando feixe laser normal

A configuração experimental está representada na Figura 4.1, onde uma câmara opera a uma distância de 25 cm aproximadamente da superfície do fruto, com foco em 15 cm acima dessa superfície. Dessa maneira, embora a câmara trabalhe desfocada em relação ao fruto, consegue-se um tamanho de "speckle" satisfatório para sua resolução.

Devido à curvatura da superfície, torna-se difícil controlar o ângulo de incidência do laser sobre a mesma. Também a intensidade do laser é de difícil controle, pois a curvatura bem como a distribuição na superfície é variada, e em alguns casos a luz penetra mais profundamente no fruto, reduzindo a intensidade da luz refletida. Esse problema pode ser minimizado utilizando-se um filtro neutro para controlar a intensidade luminosa incidente nos espécimes.

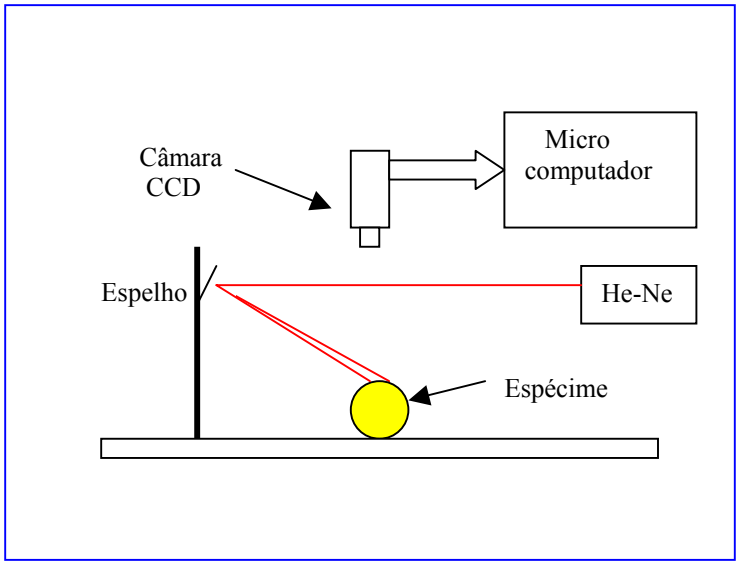

Figura 4.1 - Configuração experimental básica dos ensaios

4.2.2 - Configuração utilizando feixe laser normal e polarizador

Em relação à configuração experimental anterior, desejava-se acompanhar a evolução temporal do "speckle" produzido pela difusão e reflexão mais interna do fruto, eliminado-se grande parte da reflexão especular. Para isso, utilizou-se luz despolarizada incidindo com um ângulo de aproximado de 35 graus, equivalente a um ângulo de polarização de 55 graus, próximo do ângulo de Brewster. Utilizando-se um polarizador na luz refletida, consegue-se eliminar grande parte da componente da reflexão especular, a qual guarda uma polaridade perpendicular ao plano de incidência, ou seja, paralela à superfície de incidência. Em outras palavras, o polarizador era defasado 90^{O} do plano de incidência. Essa configuração experimental está representada pela Figura 4.2.

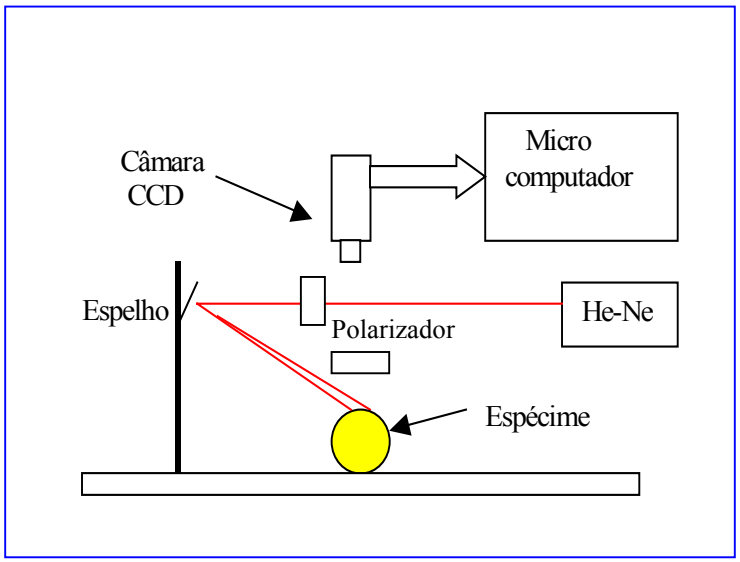

Figura 4.2 - Configuração experimental para eliminar a componente especular

4.2.3 - Configuração utilizando feixe laser normal e filtro neutro

Conforme mencionado no item 4.2.1, uma vez que era difícil controlar a intensidade da luz refletida, um filtro neutro era utilizado para garantir que a intensidade média na superfície do fruto permanecesse constante para todos os ensaios. Essa intensidade era medida utilizando-se um aplicativo computacional denominado PROMGRIS.EXE, desenvolvido no CIOp, capaz de medir o valor médio da intensidade em uma imagem "on-line" na tela, capturada pelo detector. Essa configuração experimental está representada na Figura 4.3.

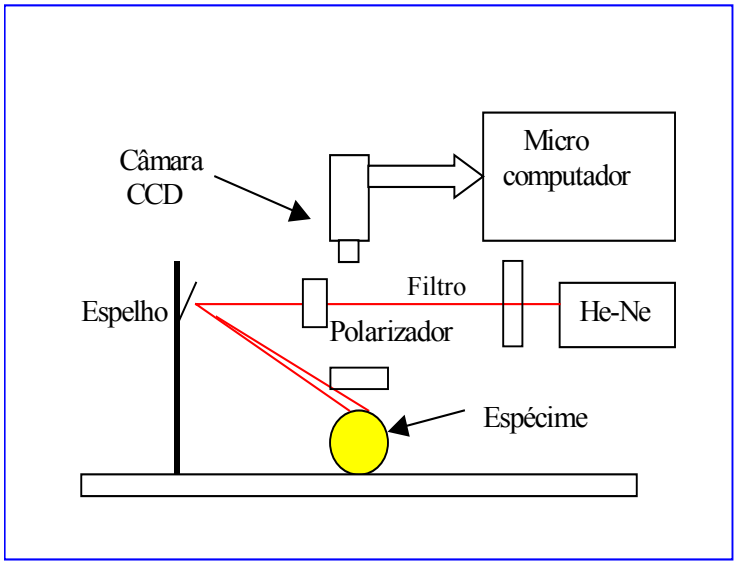

Figura 4.3 - Configuração experimental para controle de intensidade

4.2.4 - Configuração utilizando feixe laser normal, filtro neutro e campânula

Duas das variáveis mais difíceis de se controlar durante os ensaios são a umidade e a temperatura ambientes. As correntes de ar dentro do laboratório não tinham sido evitadas até esse momento.

A fim de se permitir um controle da umidade, os espécimes eram colocados dentro de uma campânula de vidro branco transparente durante o tempo necessário para estabilização da umidade e a tomada das imagens do "biospeckle".

A umidade dentro da campânula não era controlada de forma escalonada e sim reduzida ou elevada até alguns limites mínimos e máximos que foram alcançados. Para cada espécime, o processo era repetido, a fim de ser conseguir a mesma condição de umidade. Esse se tornou um processo muito lento, de pouca praticidade, portanto o número de repetições foi reduzido devido à capacidade experimental limitada.

Para se promover elevação de umidade, foi utilizado papel de filtro poroso especial umedecido em água destilada introduzido na campânula. A fim de se promover redução da umidade dentro da campânula, foi utilizada sílica gel com sinalizador de saturação.

A Figura 4.4 apresenta a fotografia da configuração experimental dos ensaios de umidade reduzida, onde pode ser observada a presença de grande quantidade de sílica gel dentro da campânula e a vedação conseguida com a utilização de fita plástica adesiva.

Figura 4.4 - Fotografia da configuração experimental dos ensaios com umidade monitorada

4.3 - Ensaios de Resposta em Freqüência

Embora possa ser considerado que esse experimento esteja fora do escopo desse trabalho, julgou-se necessário sua realização para confirmação de algumas suspeitas a respeito da variação das grandezas químicas com o período decorrido após a colheita. Esse experimento foi realizado no Laboratório de Propriedades Mecânicas dos Materiais Biológicos da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP. Foram selecionados sessenta exemplares de laranja pêra (*Citrus sinensis* Osbeck), colhidos diretamente no pomar da Universidade Federal de Lavras, MG. Os frutos foram

colhidos de uma mesma planta de forma a se reduzir a variabilidade entre eles. As variações foram acompanhadas durante um período de 15 dias. A cada dia eram realizados ensaios de compressão e ensaios químicos com seis repetições, além de ensaios de resposta acústica para todas os espécimes.

Através de uma máquina de ensaio universal era aplicada uma deformação equivalente a 15% do maior diâmetro equatorial dos espécimes e o valor máximo da força de compressão era considerado como indicativo de firmeza. A cada dia, eram realizadas seis repetições, sendo que nos dois últimos dias, foram realizadas dez repetições. Dos espécimes submetidos a esse ensaio era extraído o suco para medição da percentagem de sólidos solúveis e acidez total. Para cada amostra, eram realizadas três medidas das análises químicas, das quais era extraída a média.

Nos ensaios de resposta acústica foi utilizado um equipamento de excitação por impacto cujo índice de firmeza era calculado com base na massa do fruto e no valor da freqüência de ressonância central. Para cada espécime eram realizadas sete medidas e extraído seu valor médio. Todos os espécimes eram submetidos a esse ensaio.

4.4 - Os Equipamentos e Reagentes Utilizados

A fonte de luz utilizada é um laser de HeNe (vermelho) de 10 mW de potência e comprimento de onda de 632,8 ηm, fabricante MELLES GRIOT, modelo 05-LHP-991. Esse laser apresenta um desvio abaixo de 0,03 mrad após 15 minutos e ruído de amplitude inferior a 0,5%.

A câmara é tipo CCD ("Charge Coupled Detector") de fabricação PULNIX, modelo TM-560 e Nº 010038. Esse tipo de câmara apresenta uma placa de detecção constituída por 512x512 pixels. A lente apresenta uma abertura de 1:5, com diâmetro igual a 25,5 mm; estendida por um tubo de extensão de 40 mm. A câmara envia as imagens para o processador numa taxa máxima de 50 Hz.

Para o processamento de imagens foi empregado um modelo ADI-151 de fabricação da IMAGING TECHNOLOGY INC. Esse equipamento digitaliza as imagens vindas da câmara e as armazena temporariamente em dois conjuntos de arquivos (512x512) elementos. Apresenta uma relação sinal/ruído maior que 40dB. A menor freqüência registrada é de 24 mHz e a maior é de 12,5 Hz, uma vez que se trabalha nesses experimentos com a história temporal de 512 elementos ("pixels").

O refratômetro utilizado é de fabricação da ATAGO CO. LTD, modelo N1 (^{O}BRIX 0 ~ 32) com precisão de 0,1%.

O penetrômetro MT de fabricação da D. BALLAUF MANUFACTURING CO. (0 ~ 30 libras).

Os reagentes utilizados para mediação da acidez total são: hidróxido de sódio 0,1 N (~ 4g/1000ml) fatorado com ácido oxálico (~6,3g/1000ml) e fenolfitaleína 1%.

Nos ensaios de compressão foi utilizada uma máquina universal de teste, modelo TA500, de fabricação da LOYD, com uma célula de carga de 50N.

Nos ensaios de resposta em freqüência foi utilizado o equipamento acústico Firmalon de fabricação da ESHET EILON AGRO SYSTEMS. Esse é um protótipo desenvolvido baseado na resposta a pequenas excitações por impacto.

4.5 - Os Aplicativos Computacionais

Nos trabalhos envolvendo a aquisição e o processamento de imagens, foi utilizada a linguagem de programação C; com programas desenvolvidos pelo pessoal especializado do CIOp (Centro de Investigaciones Opticas de La Plata).

Para os cálculos matemáticos e cumulantes, utilizou-se o aplicativo SIGMAPLOT, V.2.0 (evaluating version), e os gráficos foram gerados em EXCEL, da Microsoft licenciado para a Universidade Federal de Lavras, MG.

As análises estatísticas foram desenvolvidas com o auxílio do aplicativo estatístico SAS ("Statistical Analysis System"), e EXCEL da Microsoft, ambos licenciados para a Universidade Federal de Lavras, MG.

Quanto aos programas desenvolvidos em linguagem C, ATO13.EXE é utilizado para aquisição de imagens, PROMGRIS.EXE fornece o valor médio da intensidade de uma área de 64x64 elementos de uma imagem "on-line" no monitor. Para o processamento, STRUC1.EXE resulta em um número que representa a função estrutura da imagem e MOMEI.EXE resulta no momento de inércia de uma imagem, enquanto que o PIXEL1.EXE fornece a história temporal de um elemento ("pixel") de um STS qualquer.

O programa TOMY13.EXE gera um arquivo com a função autocorrelação de um STS. O programa ITXTIF.EXE remove o cabeçalho de uma imagem tipo ITEX, padrão do processador e a transforma em uma imagem tipo TIF.

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - Considerações Iniciais

Conforme programado, os ensaios utilizando o laser foram realizados no Centro de Investigaciones Opticas de La Plata, CIOp na Argentina. Esse é um Centro de Pesquisas especializado em óptica, e vem desenvolvendo algoritmos para caracterização do "speckle" dinâmico em processos biológicos. Entretanto, esse Centro de Pesquisa não oferece estrutura que permita avaliações fisiológicas de material biológico. Em virtude de não se dispor de uma metodologia para consecução dos ensaios, foi utilizado um "setup" básico que foi sofrendo alterações conforme a natureza da experimentação. O número de amostras, o número de tratamentos, bem como o número de repetições foram definidos durante os primeiros ensaios pilotos, considerando fatores técnicos e a capacidade de experimentação. Os experimentos foram divididos em cinco tipos básicos, a saber:

- Ensaios utilizando feixe laser normal
- Experimentos utilizando feixe normal e polarizador
- Ensaios com umidade monitorada
- Ensaios de "biospeckle" e físico-químicos
- Ensaios de tempo de exposição

Em 5.2, deseja-se verificar o "biospeckle" de laranjas em quatro pontos definidos (dois pontos da região equatorial e dois pontos em lados opostos da columela central), e ainda, se o processo de quantificação era capaz de diferenciar quatro grupos de laranjas de um mesmo cultivar, retiradas de lotes colhidos em datas diferentes (14, 7, 4, e 2 dias). Nessas análises foram realizados

testes de Tukey e análise de variância considerando: o período decorrido da colheita como tratamento, com três repetições e cinco medidas.

Nos experimentos descritos no item 5.3, o objetivo era verificar se o "biospeckle" tratava-se de um fenômeno superficial ou interno do fruto. Considerando que a componente especular dos raios refletidos mantém uma polarização paralela à superfície de incidência, colocando-se um polarizador entre o objeto observado e a câmara CCD, pode-se eliminar grande parte dessa componente, garantindo que o "speckle" será formado por raios provenientes de dentro do fruto. Também foram realizados testes de Tukey e análise de variância. O item 5.4 refere-se aos ensaios em ambiente com umidade monitorada. Nesse caso, o objetivo era verificar a influência da umidade ambiente na dinâmica do "biospeckle".

Embora a técnica de "biospeckle" não esteja totalmente dominada, decidiu-se comparar o "biospeckle" com uma medida aceita mundialmente como indicador de qualidade. Essa medida é a relação ^{O}Brix/acidez. Adotou-se também como atributo de qualidade a firmeza dada pela força de penetração. Para verificar se o método "biospeckle" se relaciona com as medidas físico-químicas e com a força de penetração, seria necessário que se dispusesse de espécimes com essas características bem diferenciadas. Como a laranja é um fruto não climatérico cujo grau de maturação não se altera após a colheita, seria difícil obter espécimes com essas características diferenciadas. Para garantir que houvesse diferenças entre os espécimes, foram utilizadas seis amostras de quatro cultivares de laranja, a saber:

- bahia
- lima
- natal
- cidreira

Dessa forma, procurou-se, nos ensaios apresentados no item 5.5, uma possível correlação entre as medidas físico-químicas, força de penetração e o "biospeckle", através de uma análise de correlação mútua de todas essas variáveis.

5.2 - Ensaios Utilizando Feixe Laser Normal

Para a consecução deste experimento, quatro grupos de laranjas da variedade pêra (*citrus sinensis* Osbeck) foram escolhidos de forma subjetiva com: tamanho e massa similares e tempo de colheita diferente, como apresentado na Tabela 5.1, os quais constituíram os tratamentos avaliados. De cada grupo, foram selecionados três espécimes, constituindo as repetições, que foram submetidos a um feixe laser de He-Ne.

Tabela 5.1 – Caracterização dos tratamentos (grupos ou tempo decorrido da colheita)

UNIVERSO DE AMOSTRAGEM		
Nº do Grupo Tratamentos	Nº da Laranja Repetições	Tempo Decorrido da Colheita Tratamentos
Grupo I	laranja 01 laranja 02 laranja 03	14 dias
Grupo II	laranja 04 laranja 05 laranja 06	07 dias
Grupo III	laranja 07 laranja 08 laranja 09	04 dias
Grupo IV	laranja 10 laranja 11 laranja 12	02 dias

As imagens do "speckle" foram tomadas em quatro pontos para cada laranja, conforme representado na Figura 5.1. O ponto (C) se refere ao ponto de inserção do pedúnculo, ou seja a extremidade superior da columela central (núcleo da laranja), o ponto (D) é a extremidade inferior

da columela central, enquanto que os pontos (A) e (B) são pontos aleatórios tomados na região equatorial do espécime.

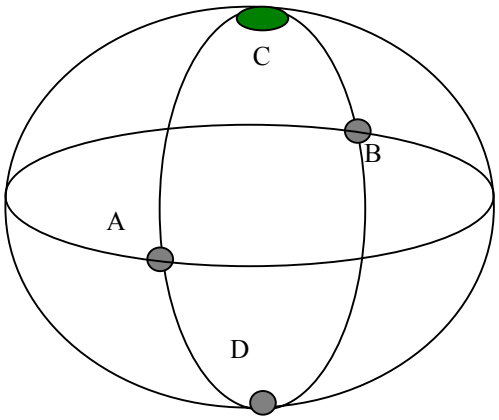

Figura 5.1 – Representação gráfica de uma laranja mostrando os pontos de tomada das imagens (A e B - região equatorial, C - inserção do pedúnculo e D - extremidade inferior

Dentro de cada tratamento foram realizadas cinco observações sobre cada unidade amostral. Foram calculados os módulos de dispersão de intensidades médios para cada unidade dentro de cada grupo bem como as funções de autocorrelação e os cumulantes estatísticos. A Figura 5.2 e a Figura 5.3 apresentam a função autocorrelação das laranjas do grupo I e do grupo II respectivamente. As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam os 20 primeiros pontos dessas curvas que são usados para cálculo dos cumulantes estatísticos.

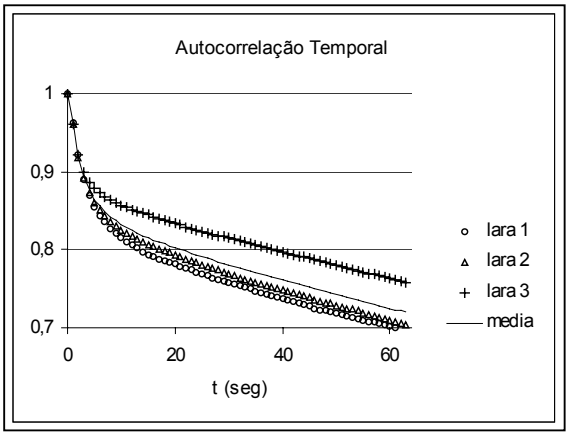

Figura 5.2 – Representação gráfica da autocorrelação das três laranjas do grupo I (14 dias)

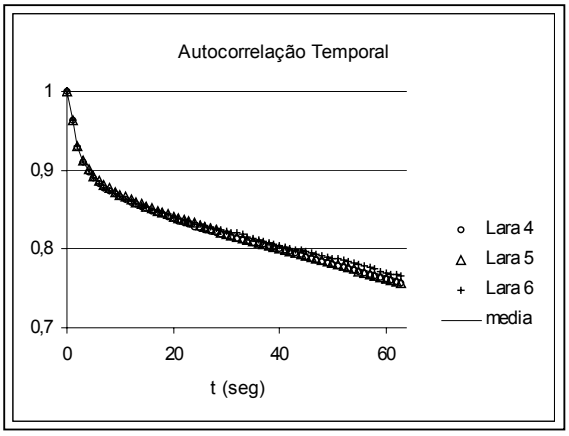

Figura 5.3 – Representação gráfica da autocorrelação das três laranjas do grupo II (7 dias)

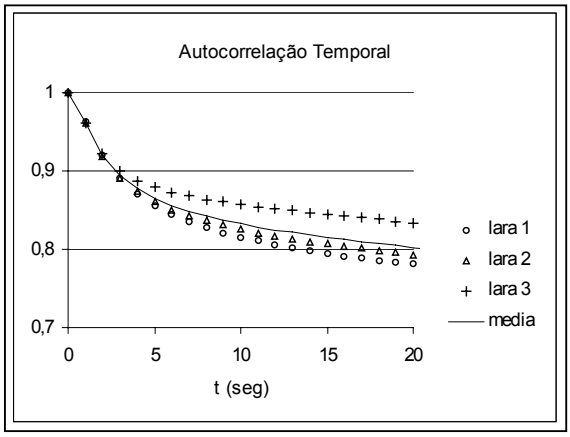

Figura 5.4 – Representação gráfica dos 20 primeiros pontos da autocorrelação das três laranjas do grupo I (14 dias)

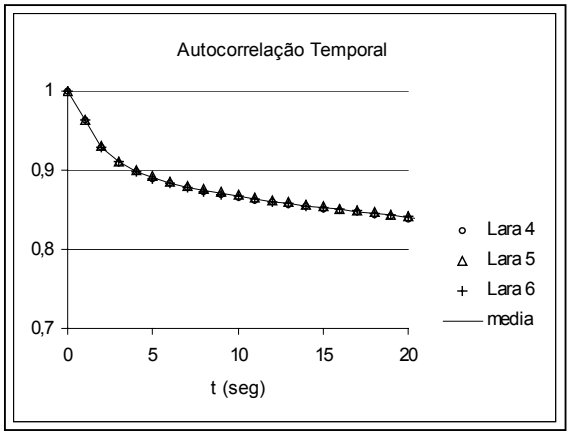

Figura 5.5 – Representação gráfica dos 20 primeiros pontos da autocorrelação das três laranjas do grupo II (7 dias)

As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam as funções de autocorrelação para as laranjas dos grupos III e IV, respectivamente, enquanto que as Figuras 5.8 e 5.9 apresentam os 20 primeiros pontos dessas funções.

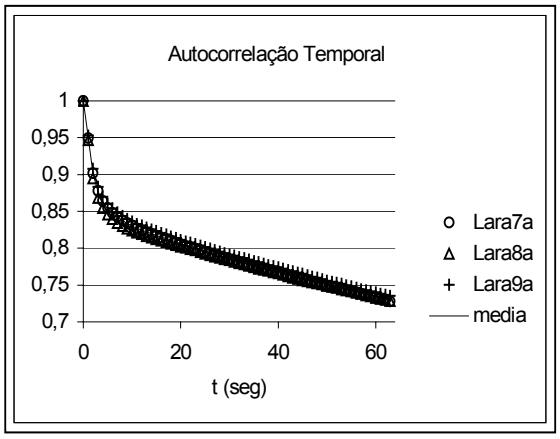

Figura 5.6 – Representação gráfica da autocorrelação das três laranjas do grupo III (4 dias)

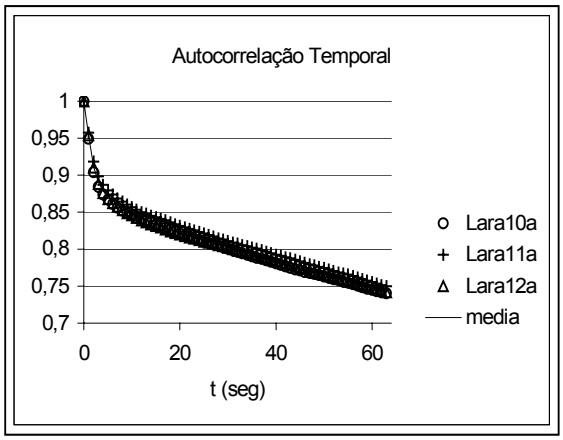

Figura 5.7 – Representação gráfica da autocorrelação das três laranjas do grupo IV (2 dias)

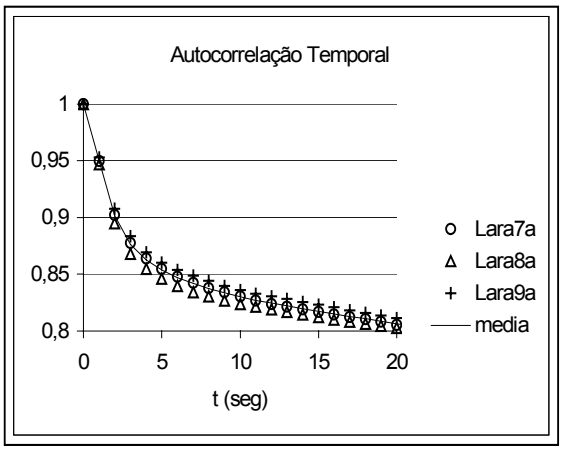

Figura 5.8 – Representação gráfica dos 20 primeiros pontos da autocorrelação das três laranjas do grupo III (4 dias)

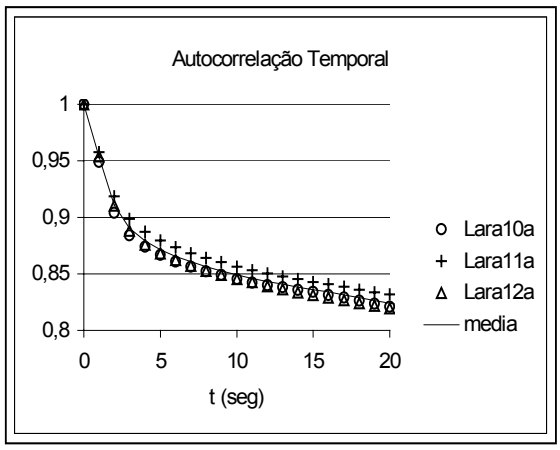

Figura 5.9 – Representação gráfica dos 20 primeiros pontos da autocorrelação das três laranjas do grupo IV (2 dias)

As Figuras enumeradas de 5.10 até 5.21 apresentam os STS ou THSP com suas respectivas matrizes de ocorrências modificadas (MOM) para todos os 12 espécimes e uma única posição de tomada da imagem.

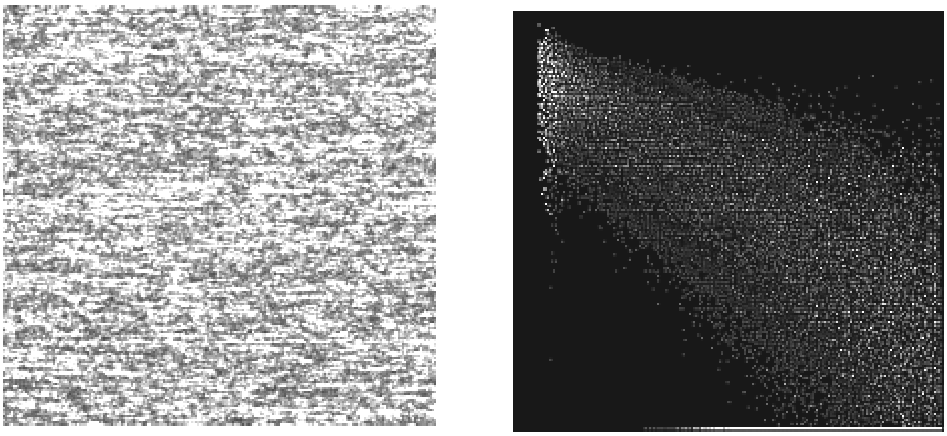

Figura 5.10 - STS e MOM da laranja 1 - ponto A - (14 dias)

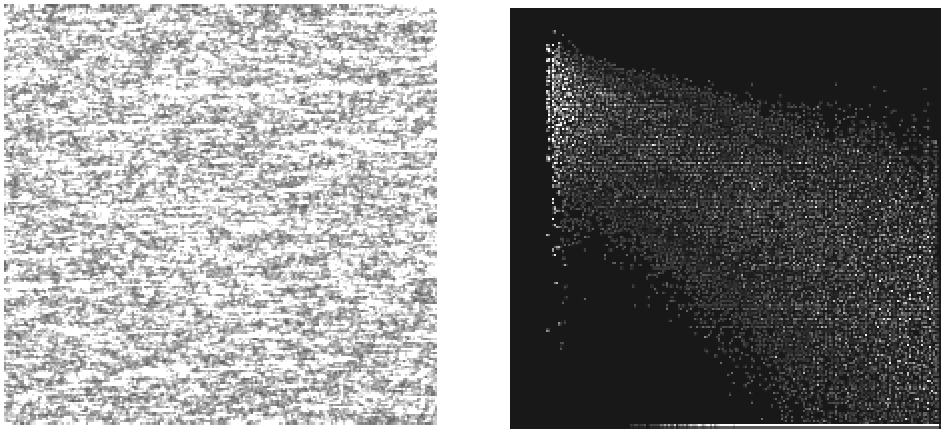

Figura 5.11 - STS e MOM da laranja 2 - ponto A (14 dias)

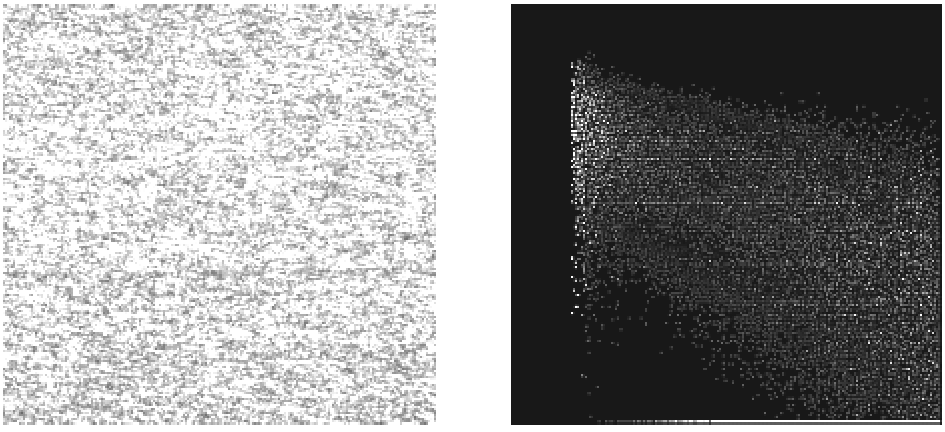

Figura 5.12 - STS e MOM da laranja 3 - ponto A - (14 dias)

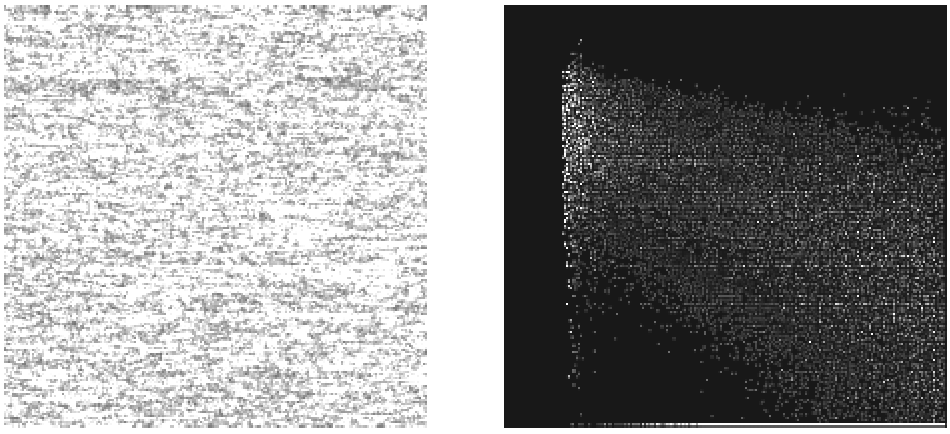

Figura 5.13 - STS e MOM da laranja 4 - ponto A - (7 dias)

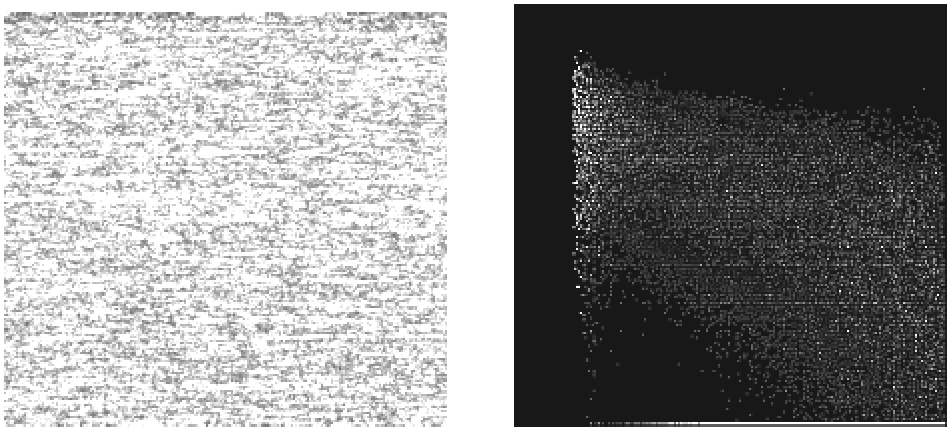

Figura 5.14 - STS e MOM da laranja 5 - ponto A - (7 dias)

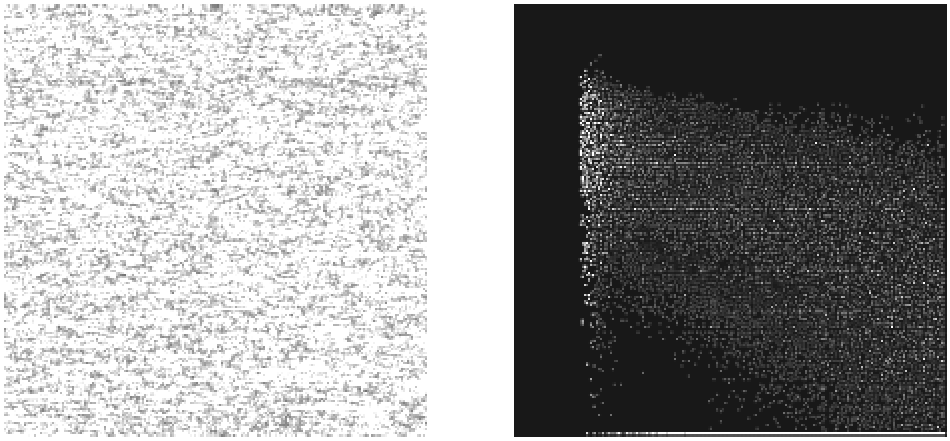

Figura 5.15 - STS e MOM da laranja 6 - ponto A - (7 dias)

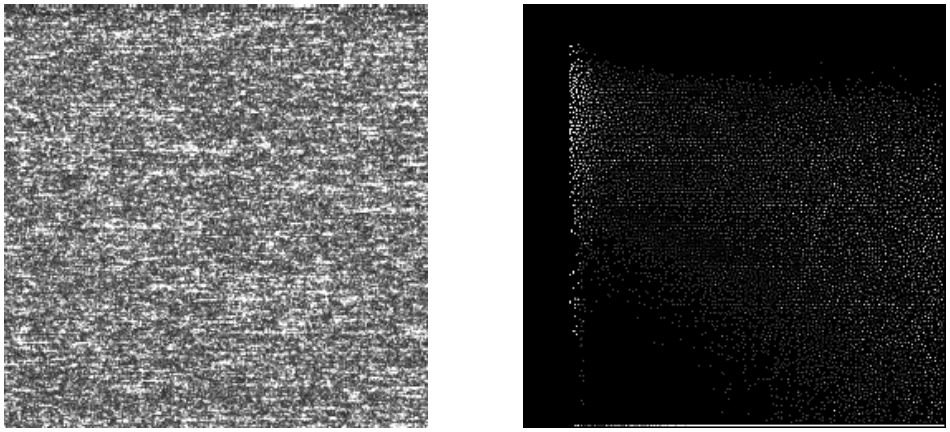

Figura 5.16 - STS e MOM da laranja 7 - ponto A - (4 dias)

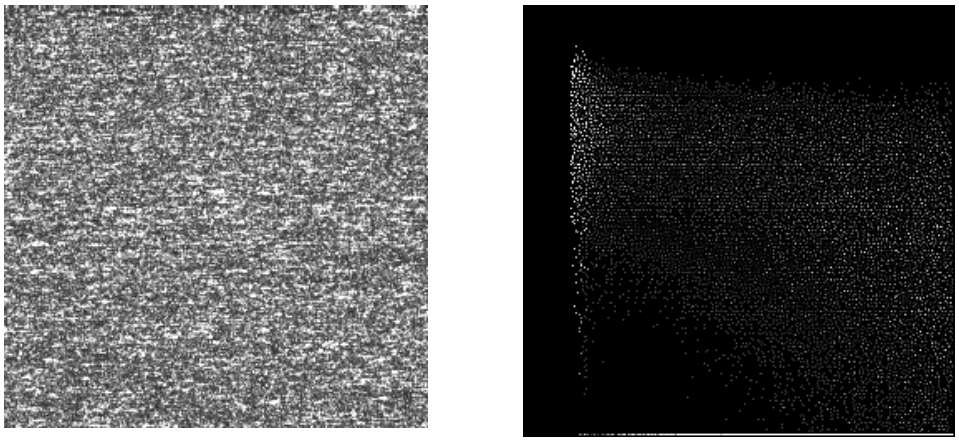

Figura 5.17 - STS e MOM da laranja 8 - ponto A - (4 dias)

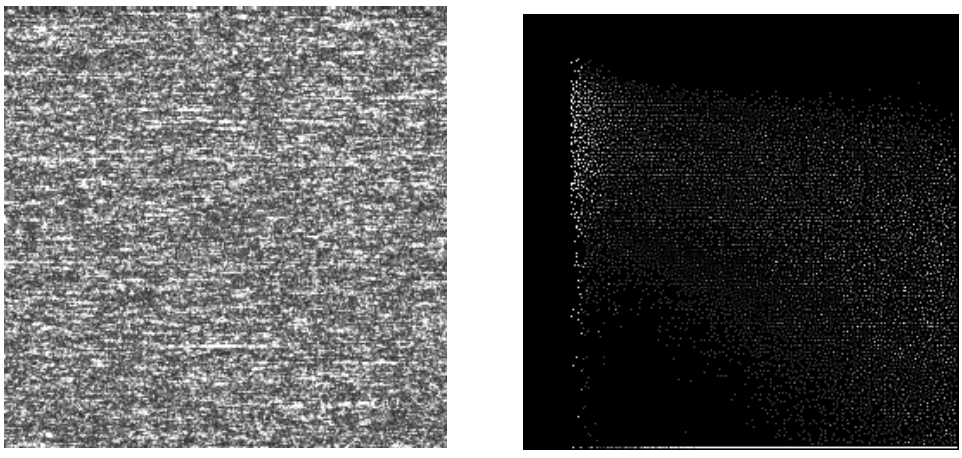

Figura 5.18 - STS e MOM da laranja 9 - ponto A - (4 dias)

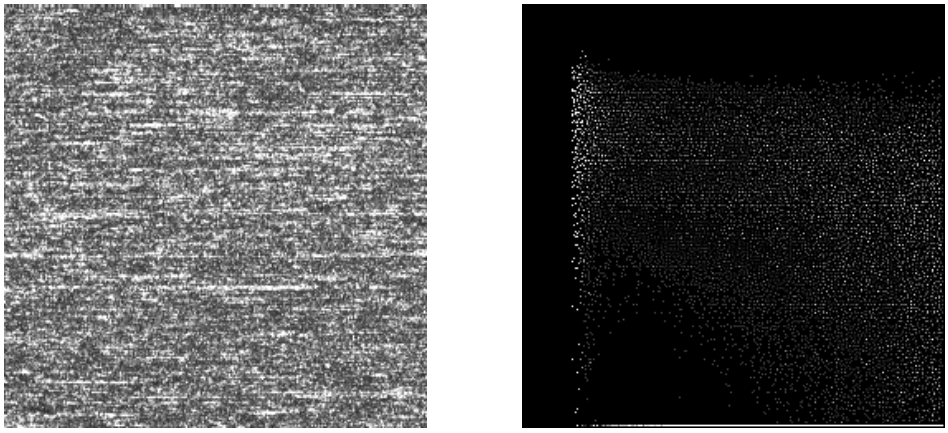

Figura 5.19 - STS e MOM da laranja 10 - ponto A - (2 dias)

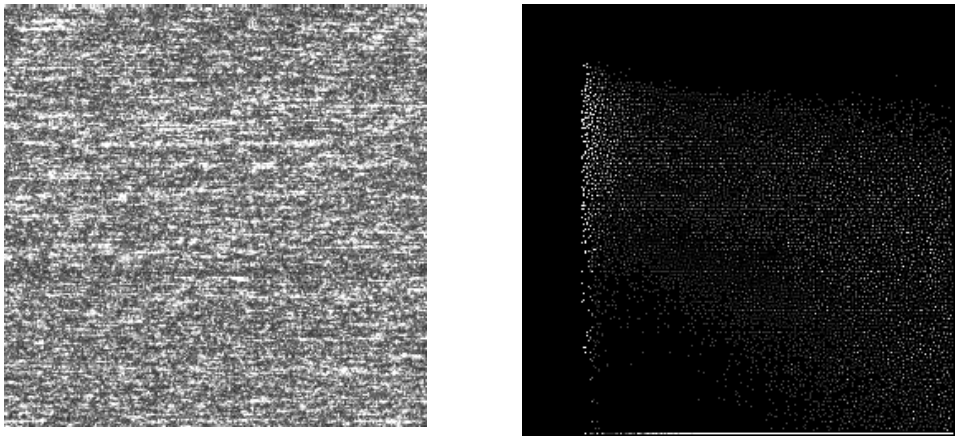

Figura 5.20 - STS e MOM da laranja 11 - ponto A - (2 dias)

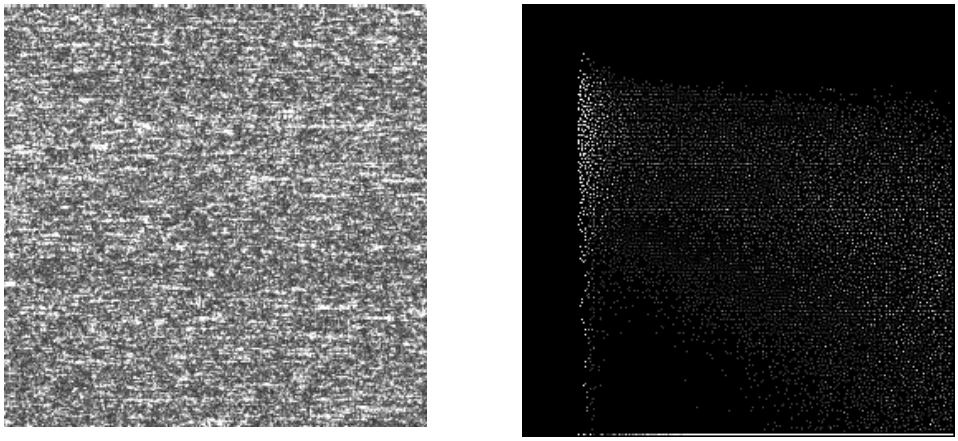

Figura 5.21 - STS e MOM da laranja 12 - ponto A - (2 dias)

Essas figuras são ilustrativas, entretanto, o que realmente interessa são os valores numéricos delas extraídos. Esses valores numéricos são os cumulantes estatísticos e os módulos de dispersão de intensidades. Todavia, não se pode perder de vista que o objetivo desse ensaio é verificar se existe alguma dependência desses valores em relação aos grupos dos espécimes (tratamentos).

Para cada ponto de tomada da imagem, conforme Figura 5.1, realizou-se a análise de variância com a finalidade de avaliar o efeito de grupo de laranjas, utilizando o aplicativo computacional SAS ("Statistical Analysis System"). Os valores médios foram comparados usando-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam os valores médios, respectivamente, para o cumulante estatístico B1 e para o módulo de dispersão de intensidades (MDI). A Tabela5.2 apresenta as médias agrupadas considerando o parâmetro cumulante estatístico B1, comparando os quatro grupos pelo teste de Tukey, para os quatro pontos de tomada das imagens, respectivamente.

Tabela 5.2 – Valores médios da variável cumulante estatístico B1 em função dos grupos, para cada ponto de tomada de imagem do "biospeckle" de laranjas.

	Pontos de tomada de imagem			
Grupo	A: Equatorial	B: Equatorial	C: Inserção do pedúnculo	D: Extremidade inferior
I – 14 dias	0,13789 bc	0,13619 a	0,07715 a	0,11937 c
II – 7 dias	0,17059 ba	0,16456 a	0,10201 a	0,14149 ba
III – 4 dias	0,13154 c	0,14568 a	0,08756 a	0,13135 bc
IV – 2 dias	0,18514 a	0,17449 a	0,06290 a	0,15717 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

Considerando os agrupamentos de Tukey para o cumulante estatístico B1, verificara-se que os pontos (B) e (C) não diferenciam os grupos e as medidas do ponto (A) e do ponto (D) conseguem diferenciar os grupos, porém aparecem algumas ambigüidades. De certa forma, os resultados do ponto (A) e do ponto (B) deveriam ser parecidos, uma vez que esses pontos são escolhidos aleatoriamente na região equatorial da laranja. Deve ser considerado também, que o ponto (C) constitui-se em o ponto de inserção do pedúnculo, cuja atividade é bastante baixa em relação aos demais.

Nos Anexos enumerados de A.1 até A.4, encontram-se os resumos das análises de variância para a variável B1, onde se observa que não há efeito de grupo sobre a variável no ponto (B) e no ponto (C). A Tabela 5.3 apresenta as médias agrupadas considerando o parâmetro módulo de dispersão de intensidades para os quatro grupos e os quatro pontos de tomada das imagens.

Tabela 5.3 – Valores médios do módulo de dispersão de intensidades (MDI) em função dos grupos, para cada ponto de tomada de imagem do "biospeckle" de laranjas.

	Pontos de tomada de imagem			
Grupo	A: Equatorial	B: Equatorial	C: Inserção do pedúnculo	D: Extremidade inferior
I – 14 dias	2632,3 c	2774,4 b	940,0 a	1861,5 d
II – 7 dias	3329,7 b	3255,4 ba	1673,1 a	2648,0 c
III – 4 dias	4044,7 a	3932,8 a	1452,9 a	3598,7 b
IV – 2 dias	4037,8 a	4027,7 a	1250,9 a	3021,4 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

Considerando os agrupamentos de Tukey para o módulo de dispersão de intensidades, observa-se que as médias para o ponto (C) não apresentam diferenças significativas. A mesma observação feita para o caso do cumulante estatístico B1 do ponto (C) deve ser considerada, ou seja, o ponto (C) constitui-se em o ponto de inserção do pedúnculo, cuja atividade é bastante baixa em relação aos demais.

As medidas no ponto (A), no ponto (B), e na base da columela central, ponto (D), conseguem diferenciar os grupos, porém aparecem algumas ambiguidades, entretanto, o ponto (D) é o que melhor diferencia os grupos.

Para o módulo de dispersão de intensidades, os resumos dessas análises são apresentados nos Anexos enumerados de A.5 até A.8, onde se observa que não houve efeito de grupo sobre as medidas no ponto (C), embora no ponto (B) o efeito ocorra ao nível de significância 0,08%.

5.3 - Experimentos Utilizando Feixe Laser Normal e Polarizador

Neste ensaio, desejava-se verificar a dependência que os valores medidos apresentavam em relação à componente especular do feixe refletido, ou seja, pretendia-se verificar se a presença de uma componente especular alterava a dinâmica do "biospeckle" . No "setup" adotado deve ser considerado que o valor (0) significa feixe normal enquanto que o valor (90) significa a 90 graus do eixo de polarização.

Foram tomadas as imagens nos quatro pontos e calculadas as funções de autocorrelação bem como os módulos de dispersão de intensidades e os cumulantes estatísticos para todos os espécimes dos quatro grupos. Considerando que os cumulantes estatísticos são parâmetros que caracterizam a função de autocorrelação, não são apresentados aqui todos os gráficos de autocorrelação. Para fins de ilustração, apresenta-se apenas os gráficos para um espécime do grupo IV. A Figura 5.22 apresenta a função autocorrelação do "biospeckle" para o espécime 10 considerando a componente

especular, e na Figura 5.23 a função autocorrelação apresentada não contém a componente especular.

Como se observa, a autocorrelação para a posição (C), inserção do pedúnculo, é bem diferente das demais. Isso significa que nas outras posições, a intensidade de um elemento ("pixel") na imagem do STS perde rapidamente a correlação com o elemento ("pixel") vizinho. Variações lentas de intensidade significam baixa atividade. Isso é mais bem caracterizado, quando se analisam os cumulantes estatísticos e os módulos de dispersão de intensidades, que serão apresentados a seguir.

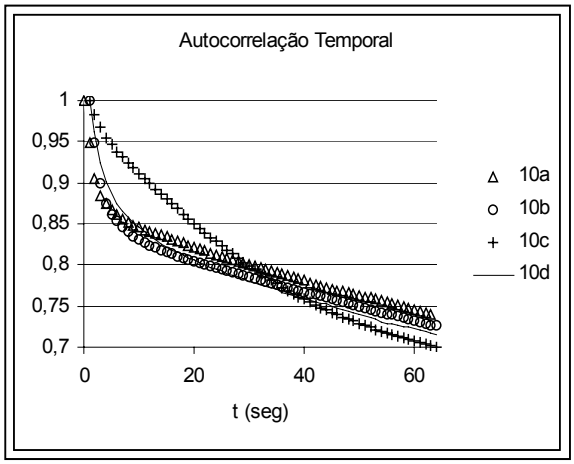

Figura 5.22 – Representação gráfica da autocorrelação da laranja 10 p/a 4 pontos de tomada de imagem.

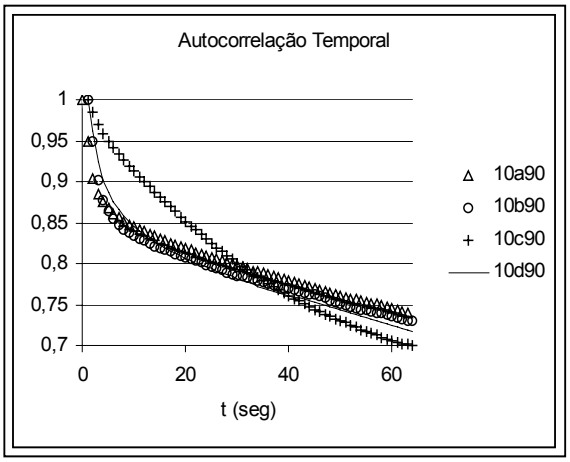

Figura 5.23 – Representação gráfica da autocorrelação da laranja 10 p/a 4 pontos de tomada de imagem a 90 graus.

Uma melhor visualização dessas diferenças é conseguida com a impressão dos 20 primeiros pontos da função de autocorrelação, o que pode ser observado nas Figura 5.24 e 5.25 dadas a seguir.

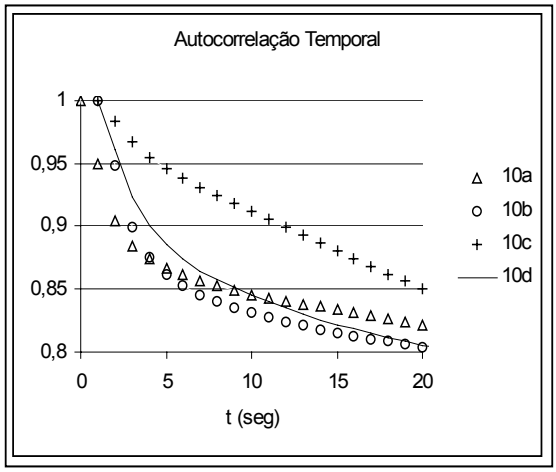

Figura 5.24 – Representação gráfica dos 20 pontos da autocorrelação da laranja 10 p/a 4 pontos de tomada de imagem.

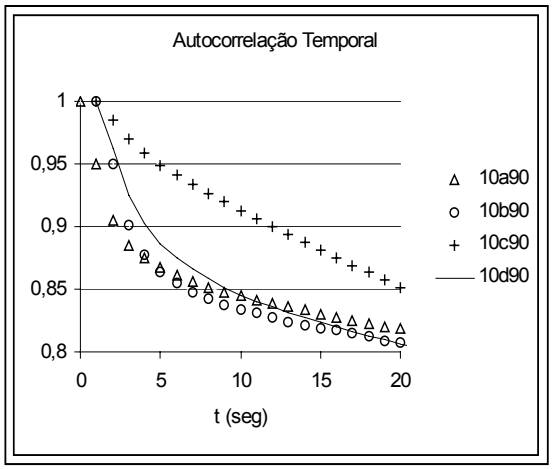

Figura 5.25 – Representação gráfica do 20 pontos da autocorrelação da laranja 10 p/a 4 pontos de tomada de imagem a 90 graus.

Na Figura 5.26 são apresentados: o padrão temporal do "speckle" THSP ou STS e a matriz de ocorrências modificada para o espécime de número 10 pertencente ao grupo IV (2 dias), no ponto (A), região equatorial, tomada da imagem do “biospeckle”. A Figura 5.27 se refere também ao mesmo espécime e mesma posição, porém eliminando-se a componente especular (com polarizador).

Conforme se observa, não existe uma diferença na dispersão que possa ser identificada apenas por inspeção visual, quando se considera o mesmo ponto de tomada de imagem. Entretanto, diferenças mais evidentes podem ser notadas quando se compara por exemplo, a Figura 5.29 com a Figura 5.30, onde se observa que nessa última, existe uma tendência maior de concentração em torno da diagonal principal da matriz, sendo a primeira mais dispersa. Por outro lado, comparando-se a Figura 5.30 com 5.31, não se pode afirmar que existam diferenças entre elas a luz de uma avaliação puramente visual, sendo necessário utilizar um método de quantificação mais objetivo.

Nas Figuras 5.28 a 5.33 se apresentam os STS e respectivas MOM para as demais posições de tomada das imagens do mesmo espécime.

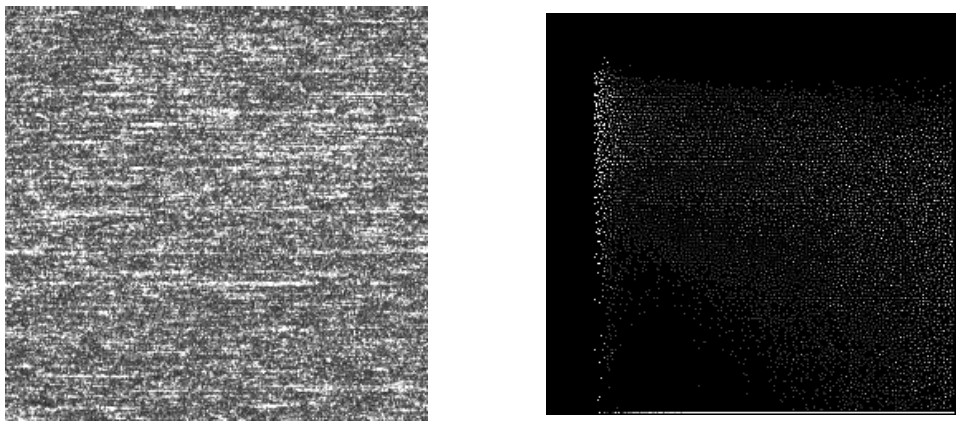

Figura 5.26 - STS e MOM da laranja 10 (2dias) – ponto A

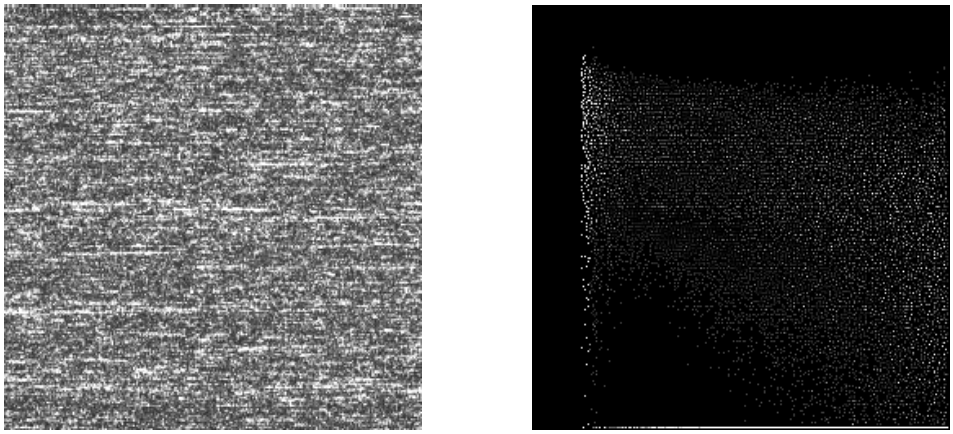

Figura 5.27 - STS e MOM da laranja 10 (2dias) – ponto A - 90 graus

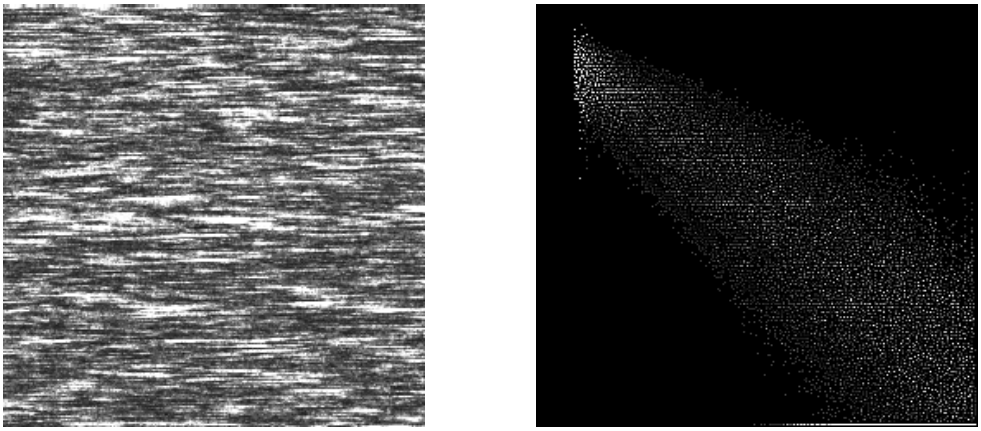

Figura 5.28 - STS e MOM da laranja 10 (2dias) – ponto B

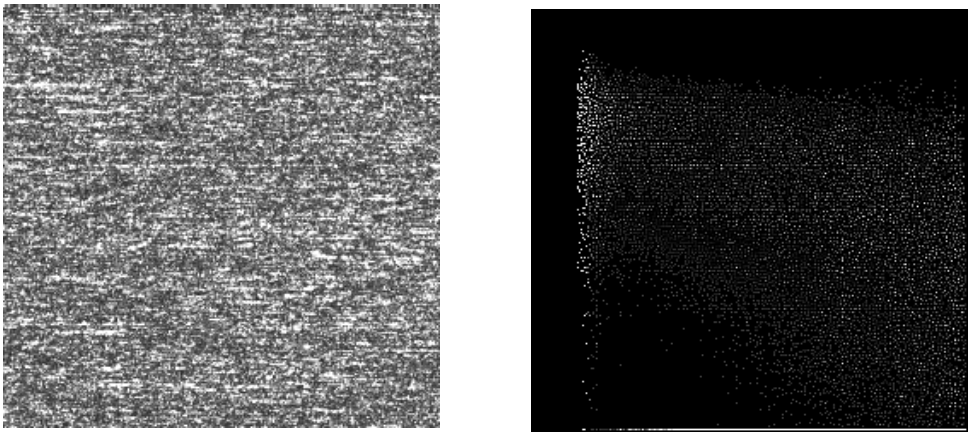

Figura 5.29 - STS e MOM da laranja 10 (2dias) – ponto B – 90 graus

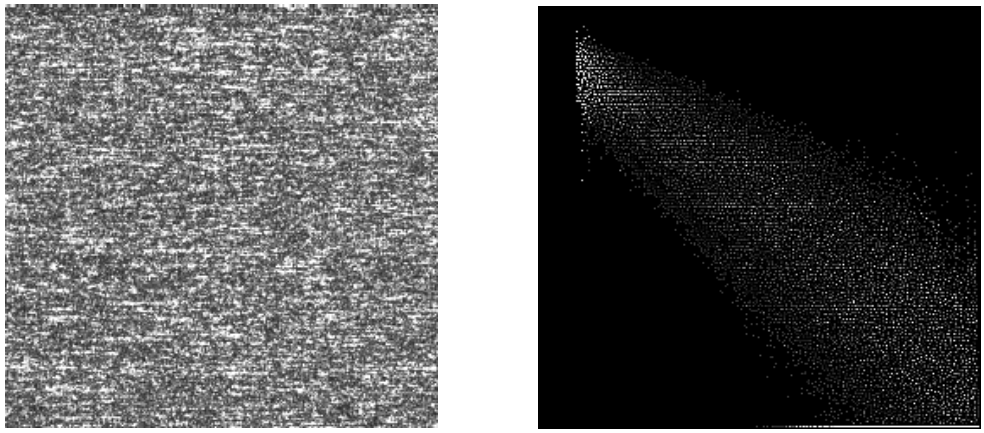

Figura 5.30 - STS e MOM da laranja 10 (2dias) – ponto C

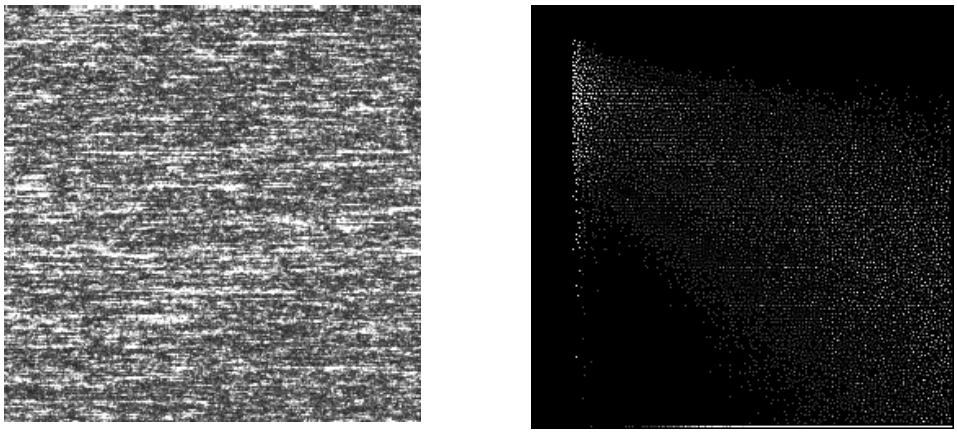

Figura 5.31 - STS e MOM da laranja 10 (2dias) – ponto C – 90 graus

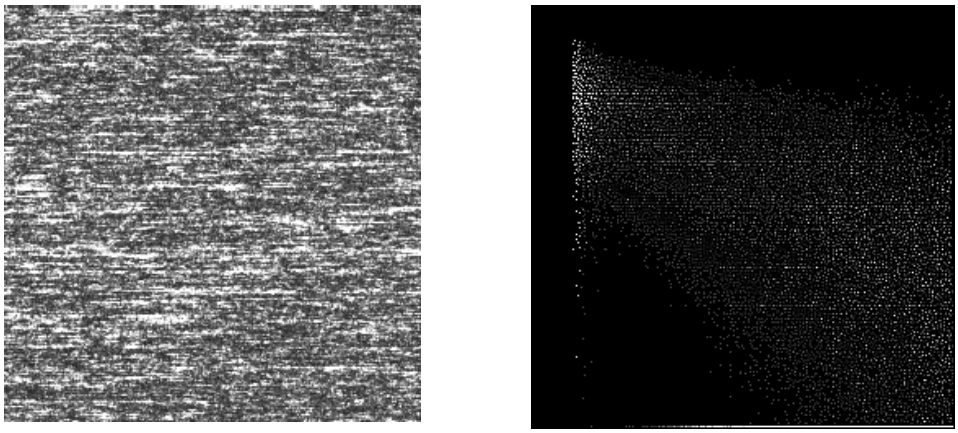

Figura 5.32 - STS e MOM da laranja 10 (2dias) – ponto D

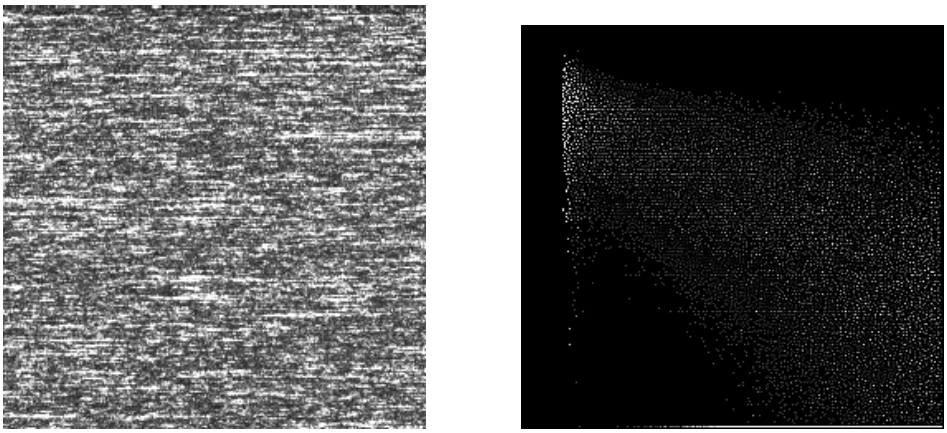

Figura 5.33 - STS e MOM da laranja 10 (2dias) – ponto D – 90 graus

Naturalmente que as Figuras apresentadas podem servir como identificadores qualitativos das atividades dos espécimes, entretanto é necessário que se calcule o módulo de dispersão de intensidades sobre as matrizes de ocorrências modificadas, para que se obtenha um índice numérico que sirva como parâmetro identificador das diferenças.

A Tabela 5.4 apresenta os valores dos cumulantes médios (B1) para as 4 amostragens e dois tratamentos dos 12 espécimes, enquanto que a Tabela 5.5 apresenta os respectivos módulos de dispersão de intensidades.

Tabela 5.4 – Valores dos cumulantes B1 em função dos tratamentos (feixe normal e com 90 graus do eixo de polarização) e dos pontos de tomada da imagem do "biospeckle" (A,B,C,D) para os 12 frutos da laranja pêra (*Citrus sinensis* Osbeck)

Grupo	Laranja	Feixe normal				Feixe com 90 graus			
		A	B	C	D	A	B	C	D
I	L1	0,11157	0,11933	0,02430	0,12591	0,11425	0,10638	0,03315	0,11535
	L2	0,14064	0,13448	0,10890	0,123497	0,14028	0,13863	0,0957	0,11687
	L3	0,16170	0,14868	0,10972	0,117933	0,15891	0,16966	0,09114	0,11665
II	L4	0,17055	0,16235	0,10940	0,142595	0,1682	0,15701	0,12049	0,13814
	L5	0,17515	0,19290	0,09726	0,158344	0,17243	0,18727	0,10687	0,15329
	L6	0,16594	0,15004	0,07519	0,135962	0,17125	0,13782	0,10285	0,14256
III	L7	0,14879	0,18567	0,08075	0,14855	0,13955	0,17693	0,07493	0,15400
	L8	0,07053	0,13727	0,13148	0,104203	0,123600	0,14259	0,11796	0,10960
	L9	0,14751	0,09966	0,06360	0,113673	0,15929	0,13197	0,05663	0,15809
IV	1L0	0,17774	0,16520	0,05278	0,150073	0,20815	0,14686	0,04020	0,14574
	1L1	0,18458	0,19077	0,09689	0,163181	0,18289	0,19945	0,07037	0,16061
	1L2	0,18217	0,17407	0,01763	0,162307	0,17530	0,17057	0,09956	0,16110

Tabela 5.5 – Valores dos módulos de dispersão de intensidade (MDI) em função dos tratamentos (feixe normal e com 90 graus do eixo de polarização) e dos pontos de tomada da imagem do "biospeckle" (A,B,C,D) para os 12 frutos de laranja pêra (*Citrus sinensis* Osbeck)

Grupo	Laranja	Feixe normal				Feixe com 90 graus			
		A	B	C	D	A	B	C	D
I	L1	2318,80	2294,98	267,73	2247,54	1859,92	1770,01	212,53	1806,47
	L2	2645,96	2840,49	1341,05	2075,20	2743,98	2771,00	1181,99	1888,06
	L3	3144,17	3540,51	1423,17	1668,99	3080,9	3429,15	1213,25	1482,57
II	L4	3239,09	3128,13	2013,7	2612,55	3022,82	2998,51	1978,82	2494,41
	L5	3304,00	3918,87	1557,41	2679,30	3265,27	3862,04	1463,42	2577,18
	L6	3634,45	2915,02	1580,40	2851,95	3512,56	2710,00	1445,08	2672,61
III	L7	4095,70	3817,62	1266,27	3392,82	4107,62	3803,58	1123,52	3398,63
	L8	4212,07	3962,91	2488,35	3707,02	4155,84	3911,84	2356,33	3680,72
	L9	3894,66	4046,23	804,81	3747,30	3802,26	4054,58	678,33	3665,47
IV	1L0	4418,96	4169,15	1129,18	3000,27	4284,00	4234,45	1031,53	2767,97
	1L1	3875,24	3895,29	1289,46	3226,05	3729,26	3958,54	1091,63	3184,14
	1L2	3967,89	3937,78	1564,33	3008,72	3951,34	3970,84	1399,10	2941,52

Os resumos das análises de variância são apresentados nos Anexos enumerados de A.1 até A.8, onde pode ser observado que, pelos níveis de significância, não há efeito de polarização sobre as variáveis em todos os pontos analisados, e também, não houve efeito de interação de polarização e grupos. Naturalmente, que em função dos resultados das análises de variância, não seria necessário realizar um teste de média, entretanto, decidiu-se comparar as médias utilizando o teste de Tukey.

A Tabela 5.6 apresenta os resultados do teste de comparação de média ao nível de significância de 5%. A Tabela 5.7 refere-se ao mesmo teste de comparação de média para a variável módulo de dispersão de intensidades.

Tabela 5.6 – Valores médios da variável cumulante estatístico B1 em função da presença de componente especular (polarização normal), para cada ponto de tomada de imagem do "biospeckle" da laranja pêra (*Citrus sinensis* Osbeck).

	Pontos de tomada de imagem			
Polarização	A: Equatorial	B: Equatorial	C: Inserção do pedúnculo	D: Extremidade inferior
Normal	0,15951 a	0,15543 a	0,08415 a	0,13933 a
90 graus	0,15307 a	0,15503 a	0,08066 a	0,13719 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

Tabela 5.7 – Valores médios da variável módulo de dispersão de intensidades em função da presença de componente especular (polarização normal), para cada ponto de tomada de imagem do "biospeckle" da laranja pêra (*Citrus sinensis* Osbeck).

	Pontos de tomada de imagem			
Polarização	A: Equatorial	B: Equatorial	C: Inserção do pedúnculo	D: Extremidade inferior
Normal	3562,60 a	3538,90 a	1393,80 a	2851,48 a
90 graus	3459,60 a	3456,20 a	1264,60 a	2713,31 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

Considerando os agrupamentos de Tukey, verifica-se que não há diferenças significativas entre as médias dos dois tratamentos (polarização) para os quatro grupos. Isso permite evidenciar que a reflexão especular exerce pouca ou nenhuma influência na movimentação do "speckle", ou seja, o "biospeckle" é resultado de fenômenos que ocorrem em camadas mais internas do fruto e não em sua superfície.

5.4 - Ensaios de Umidade Monitorada

Esse ensaio teve como objetivo determinar o módulo de dispersão de intensidades e cumulantes estatísticos da imagem de um STS de laranjas obtido em 1 único ponto da região equatorial e para várias condições de umidade ambiente.

As imagens foram tomadas em um intervalo de 1:30 h para acomodação do fruto à nova condição de umidade. Os níveis de umidade conseguidos foram 39%, 47%, 70%, 81%, e 90%. O limite inferior de 39% de umidade foi conseguido através da utilização de aproximadamente 500 g de sílica gel distribuídos uniformemente dentro de uma campânula de vidro. A condição limite superior de 90% de umidade foi conseguida com a utilização de 3 partes de papel de filtro umidecido em água e com área aproximadamente de 55cm^2 cada. A umidade dentro da campânula estabilizou-se aproximadamente 1 hora após a colocação dos papeis umedecidos. O resumo da análise de variância da variável módulo de dispersão de intensidades é apresentado nos Anexos enumerados de B.1 a B.3.

Conforme se observa no Anexo B.1, a análise de variância indicou que houve efeito da umidade no módulo de dispersão de intensidades, com um nível de significância de 0,01%. Na Tabela 5.8 se encontra o modelo de estimação, enquanto que a Figura 5.34 representa graficamente a variação do módulo de dispersão de intensidades com a umidade ambiente. Note que esta relação pode ser expressa através de uma equação polinomial de terceiro grau, a qual explica 95,57% das variações ocorridas no MDI em função da umidade. Em outras palavras, não ocorreram variações que possam apontar para uma tendência de redução ou de elevação do módulo de dispersão de intensidades em função da umidade, o que sugere que os experimentos devam ser realizados em uma mesma condição de umidade, a fim de reduzir os efeitos da umidade nas variáveis de interesse.

Tabela 5.8 - Estimação de parâmetros para umidade

Parâmetro	Estimativa	T p/a H0: Par = 0	Pr > |T|	Erro de estimativa
A	1777,499095	16,82	0,0001	105,7021766
β_1*(u)	-52,004673	-9,91	0,0001	5,2451033
β_2*$(u)^2$	0,853756	10,35	0,0001	0,0825057
β_3*$(u)^3$	-0,004456	-10,70	0,0001	0,0004166

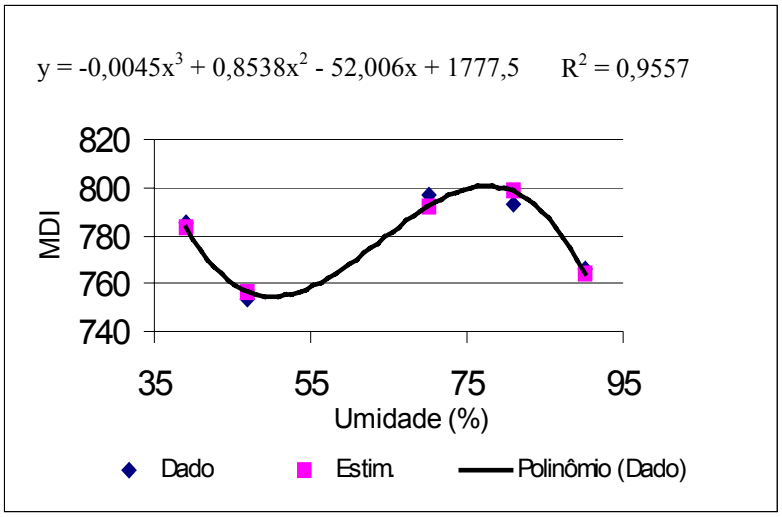

Figura 5.34 – Representação gráfica e equação de regressão dos valores do módulo de dispersão de intensidades (MDI) em função dos níveis de umidade.

5.5 - Ensaios Físico-Químicos

Nesta fase experimental, o objetivo era verificar se existia alguma correlação entre os atributos de qualidade (variáveis físico-químicas e a firmeza, indicada pela força de penetração) e o módulo de dispersão de intensidades, bem como entre esses atributos e os cumulantes estatísticos. Foram selecionados quatro cultivares de laranja, bahia, natal, cidreira e lima. Dentro de cada tratamento (cultivares) , foram realizadas cinco observações (cinco imagens de um mesmo ponto) e seis repetições (seis espécimes ou indivíduos).

Foram calculados os valores dos módulos de dispersão de intensidades médios e, também, dos cumulantes estatísticos; em seguida, foram efetuadas as análises de variância e os testes de comparação das médias dos grupos (tratamentos), pelo método de Tukey.

Nos Anexos enumerados de C.1 a C.6 se encontram os resumos das análises de variância para verificação do efeito de cultivar sobre as variáveis medidas. A Tabela 5.9 apresenta os resultados do teste de comparação de média entre os tratamentos (cultivares) para as variáveis medidas.

Nos Anexos enumerados de C.1 a C.6 pode ser observado que os cultivares são diferenciados em relação à força de penetração, porcentagem de sólidos solúveis (^{O}Brix), acidez total e grau de maturação. Este comportamento pode ser observado visualizando-se na Tabela 5.9, onde nota-se que somente os valores médios de MDI não foram diferentes. Já a variedade cidreira apresentou o menor grau de maturação e o maior teor de acidez.

Tabela 5.9 – Valores médios e agrupamentos pelo teste de Tukey para as variáveis: módulo de dispersão de intensidades (MDI), ^{O}Brix, acidez total, força de penetração e grau de maturação, em função dos diferentes cultivares de laranja.

Cultivar	MDI		^{O}Brix %		Acidez total %		Força de penetração libras		Cumulante B1		Grau de Maturação	
Cidreira	799,23	a	8,120	b	2,517	a	13,667	b	0,10742	a	3,220	b
Natal	744,04	a	7,158	b	0,770	c	9,917	c	0,09246	ab	9,637	a
Lima	706,58	a	7,747	b	0,870	bc	10,250	c	0,10661	a	9,270	a
Bahia	664,16	a	10,350	a	1,141	b	18,333	a	0,08529	b	9,423	a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

Embora algumas variáveis não diferenciaram as classes, isso não descartou a possibilidade de existir correlação entre variáveis. Dessa forma, foi efetuada uma análise de correlação entre todas essas variáveis (fatores) a fim de se procurar a correlação entre os fatores que diferenciam os cultivares com aqueles que não foram capazes de diferenciá-los.

A Tabela 5.10 apresenta as estimativas dos coeficientes de correlação entre todas as variáveis medidas, bem como a probabilidade dos respectivos coeficientes serem iguais a zero.

Tabela 5.10 – Estimativas dos coeficientes de correlação e respectivos níveis de significância entre os diversos fatores avaliados para quatro cultivares de laranja (Cidreira, Natal, Lima de Bahia).

DF20	MDI	^{O}Brix	Acidez total	Força de penetração	B1	Grau de maturação
MDI	1,000000	-0,646350	-0,098065	0,730986	0,853956	-0,164419
Pr	0,0001	0,0015	0,6724	0,0002	0,0001	0,4763
^{O}Brix	-0,646350	1,000000	0,354866	-0,492051	-0,446463	0,074438
Pr	0,0015	0,0001	0,1145	0,0235	0,0425	0,7485
Acidez total	-0,098065	0,354866	1,000000	-0,079239	-0,200004	-0,879829
Pr	0,6724	0,1145	0,0001	0,7328	0,3847	0,0001
Força de penetração	0,730986	-0,492051	-0,079239	1,000000	0,618075	-0,122826
Pr	0,0002	0,0235	0,7328	0,0001	0,0028	0,5958
B1	0,853956	-0,446463	-0,200004	0,618075	1,000000	0,027753
Pr	0,0001	0,0425	0,3847	0,0028	0,0001	0,9049
Grau de maturação	-0,164419	0,074438	-0,879829	-0,122826	0,027753	1,000000
Pr	0,4763	0,7485	0,0001	0,5958	0,9049	0,0001

Considerando que as variáveis principais desse trabalho são o módulo de dispersão de intensidades e os cumulantes estatísticos, observa que existe uma correlação negativa e significativa entre o módulo de dispersão de intensidades (MDI) e o teor de sólidos solúveis (^{O}Brix). Isso significa que existe uma tendência dos frutos que apresentam maior porcentagem de sólidos solúveis, apresentarem uma variação mais baixa na dinâmica do "biospeckle".

Observa-se também que existe uma correlação positiva e significativa entre o módulo de dispersão de intensidades (MDI) e a força de penetração, ou seja, quanto mais firme é o fruto, maior é a variação do "biospeckle".

Quanto ao cumulante estatístico, B1, nota-se que esse possui também uma correlação positiva e significativa com a força de penetração e negativa com o teor de sólidos solúveis (^{O}Brix).

5.6 - Ensaios de Variação Diária do "biospeckle"

O objetivo deste experimento era verificar se o "biospeckle" poderia ser utilizado como avaliador de senescência da laranja, considerando que frutos cítricos perdem a qualidade e não amadurecem depois de colhidos, exceto limão que tem seu volume de suco aumentado. Para consecução deste experimento, foram retirados vinte e quatro frutos de um lote homogêneo de laranja bahia, que foram submetidos ao feixe laser, para a coleta das imagens do "biospeckle". Durante 16 dias foram tomadas imagens de um mesmo ponto da região equatorial em cada espécime (indivíduo). Foram calculados os módulos de dispersão de intensidades (MDI) e o cumulante estatístico B1. Em seguida, foi realizada uma análise de variância e, as médias entre tratamentos (16 dias decorridos da colheita) foram comparadas através de um teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

A Tabela 5.11 apresenta os resultados do teste de média, com os respectivos agrupamentos de Tukey. Como se observa, as médias diferem entre si durante os três primeiros dias de ensaio,

entretanto para os demais dias, não ocorreram alterações do "biospeckle", que pudessem ser detectadas pelo parâmetro de quantificação módulo de dispersão de intensidades (MDI). Isso também ocorreu para o parâmetro de quantificação cumulante B1, o que conduz a uma suposição de que não ocorram variações fisiológicas nos frutos que possam interferir na movimentação do "biospeckle".

Considerando as afirmações de OULAMARA *et al* (1989) e de XU *et al* (1995), que o "biospeckle" resulta da movimentação de cloroplastos (na corrente citoplasmática) e da movimentação de partículas minerais (dentro dos vacúolos), pode-se supor que esse movimento dependa do teor de sólidos solúveis. Entretanto, outro fator que deve ser considerado, é que: por ser a laranja um fruto não climatérico, a variação diária de sólidos solúveis pode não ser tão significativa a ponto de alterar grandemente a movimentação dessas partículas de forma que essa possa ser percebida pelo equipamento de aquisição e processamento de imagens.

Tabela 5.11 – Valores médios e agrupamentos pelo teste de Tukey do módulo de dispersão de intensidades e do cumulante B1 em função dos dias decorridos da colheita da laranja, variedade bahia para um ponto da região equatorial

Dias decorridos da colheita	**MDI**		**Cumulante B1**	
1	1123,07	a	0,108830	a
2	880,91	b	0,096902	b
3	626,54	c	0,090998	c
4	581,87	c	0,085782	c
7	619,58	c	0,086277	c
9	621,82	c	0,085145	c
11	655,66	c	0,087523	c
14	609,46	c	-	a
16	640,04	c	-	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

5.7 - Ensaios de Tempo de Exposição

O objetivo deste experimento era verificar se a elevação da temperatura (medida pelo tempo de exposição) provocada pelo laser no fruto alterava a dinâmica do "biospeckle" e, conseqüentemente, os valores medidos do módulo de dispersão de intensidades. Foram tomadas três medidas de um único ponto da região equatorial em cada intervalo de cinco minutos até completar 1 hora de exposição. Foram realizadas três repetições desse ensaio. Os resultados da análise de variância são apresentados no Anexo D.1, onde pode ser observado o efeito significativo ($P<0,01$) do tempo de exposição sobre o módulo de dispersão de intensidades. Os resultados da aplicação do teste Scott-Knott às médias são apresentados na Tabela 5.12, onde pode ser observado que não existe uma tendência definida de redução ou elevação dos dados. O módulo de dispersão de intensidades sofre elevações e reduções à medida que o tempo de exposição aumenta, com tendência de apresentar os menores valores a partir de vinte minutos de exposição.

Tabela 5.12 – Valores Médios do módulo de dispersão de intensidades e agrupamento pelo teste de Scott-Knott em função do tempo de exposição ao laser.

Tempo de exposição (minutos)	**Módulo de dispersão de Intensidades (MDI)**	
45	625,926667	a1
55	631,590000	a1
50	632,363333	a1
25	647,363333	a2
60	649,256667	a2
35	650,593333	a2
40	651,633333	a2
20	652,680000	a2
0	656,713333	a2
30	656,796667	a2
5	670,046667	a3
10	678,583333	a3
15	697,526667	a4

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%

5.8 - Ensaios de Resposta em Freqüência

O objetivo deste experimento era verificar se ocorriam variações de firmeza que pudessem ser medidas através de dois processos: um que considerava a resposta do fruto a uma excitação por impacto e outro que considerava a resposta do fruto à força máxima ao se aplicar uma deformação predefinida. Para efeito de comparação, também foram avaliados os teores de sólidos solúveis e acidez total. No Anexo E se encontram os resumos das análises de variância para as variáveis medidas. Como pode ser observado, ocorreu efeito significativo do período decorrido da colheita para a massa, força, ^{O}Brix e firmeza, entretanto, esse efeito não foi observado na variável acidez total. A Tabela de 5.13 apresenta os respectivos testes de médias, com os agrupamentos de Tukey.

Tabela 5.13 – Valores médios e agrupamento de Tukey das variáveis: massa, força, ^{O}Brix, acidez total e firmeza em função dos dias decorridos da colheita de laranja, variedade pêra e estimativas dos coeficientes de correlação entre períodos e as variáveis.

Dia após a colheita	Massa (g)		Força (N)		^{O}Brix %		Acidez Total %		Firmeza	
1	145,80	a	118,88	a	11,40	ab	2,06	a	8,902	a
2	143,10	a	115,84	a	11,43	ab	2,07	a	8,346	b
3	140,53	ab	98,82	a	12,00	a	2,02	a	8,237	cb
4	-		94,94	a	10,50	ab	1,74	a	7,737	cd
5	134,71	bc	90,35	ab	9,72	b	1,78	a	7,331	d
8	127,83	c	76,22	ab	10,68	ab	2,14	a	7,245	d
15	115,47	d	57,17	b	10,83	b	1,86	a	6,027	e
Correlação	-0,9942		-0,95761		-0,31976		-0,23572		-0,96003	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5.13, nota-se que as variações de massa começaram a ser significativas a partir do terceiro dia, enquanto que as variações de força, ocorreram a partir do quinto dia. Todavia, essas duas variáveis mostram uma tendência à redução de valores com o passar dos dias. Para as médias do teor de sólidos solúveis (^{O}Brix), embora exista efeito do período pós-colheita, as variações não apresentam uma tendência e sim uma oscilação.

De acordo com o resumo da análise de variância apresentado no Anexo E.4, não foi detectado efeito do período pós-colheita sobre a acidez total, o mesmo ocorrendo pelo agrupamento de Tukey, apresentado na Tabela 5.13, onde se observa que não existe diferença significativa entre as médias, sugerindo que esta variável não foi afetada em seu comportamento pelo período decorrido da colheita. Para a variável firmeza ("firmness") ocorreram diferenças significativas entre quase todos períodos, com tendência de redução dos valores.

Outra forma interessante de visualização dos resultados, seria uma análise de correlação entre o período pós-colheita (número de dias decorridos) e as médias das variáveis de interesse. Esses coeficientes de correlação são apresentados na Tabela 5.13, onde ser observa que, existe uma forte correlação negativa e significativa entre a perda de massa e o tempo decorrido da colheita. Isto era esperado, pois as frutas cítricas perdem água depois de colhidas, caso não se providencie um armazenamento em atmosfera controlada ou em atmosfera modificada.

Também se observa uma alta correlação negativa entre a força de deformação e o tempo, mostrando que os frutos vão se tornando menos firmes com o passar dos dias, até atingir um padrão extremamente baixo de qualidade, tornando-se impróprios para o consumo. Essa redução de firmeza também foi bem caracterizada pela resposta dos espécimes à força de impacto, medido pelo índice de firmeza dado pelo Firmalon, evidenciada por um coeficiente de correlação alto e negativo -0,96003. O coeficiente de correlação entre a força de deformação e o índice de firmeza medido pelo Firmalon foi de 0,96603.

Na Tabela 5.13 também se observa que os coeficientes de correlação entre o tempo decorrido após a colheita e a percentagem de sólidos solúveis, bem como entre o tempo e a acidez total são baixos, respectivamente, -0,31976 e -0,23572. Este experimento confirma que as variações diárias de sólidos solúveis em laranjas são pequenas e que a correlação dessa variável com o tempo decorrido da colheita é muito baixa. Portanto, qualquer grandeza que se correlaciona com a porcentagem de sólidos solúveis, teria uma baixa correlação com o tempo decorrido da colheita, como é o caso do módulo de dispersão de intensidades ou do "biospeckle" apresentado no item 5.6.

Nas Figuras de 5.35a até 5.35e se encontram os gráficos das grandezas físicas e químicas em relação aos dias decorridos da colheita das laranjas, enquanto que na Figura 5.35f está representado graficamente o índice de firmeza em função da força de penetração, bem como a equação de regressão.

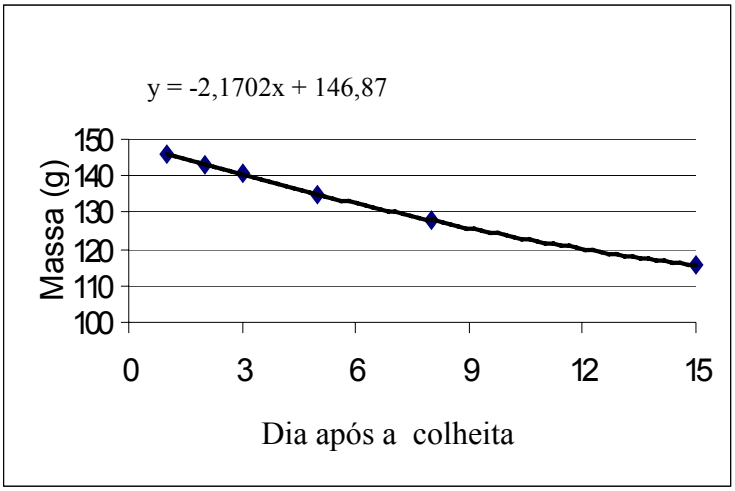

Figura 5.35a – Representação gráfica e equação de regressão de massa dos frutos em função dos dias decorridos da colheita.

Nota-se na Figura 5.35a, que ocorre um decréscimo na massa dos frutos à medida que cresce o período após a colheita, o que é bem evidenciado pela regressão linear, a qual explica 98,85% das variações ocorridas na massa em função do período decorrido da colheita. O efeito de redução também pode ser observado na Figura 5.35b para a força de compressão, ou seja, com o passar dos dias, o fruto perde sua resistência à compressão, ou em outras palavras, o fruto reduz sua rigidez ou sua firmeza. Com relação ao teor de sólidos solúveis, não se verifica ocorrência de uma tendência, o que pode ser observado na Figura 5.35c através do ajuste da equação polinomial de terceiro grau, embora o coeficiente de determinação seja baixo (R^2=0,3973).

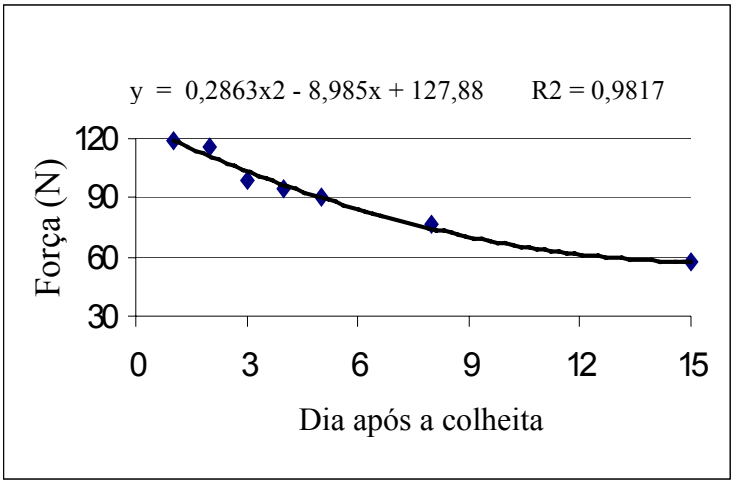

Figura 5.35b – Representação gráfica e equação de regressão da força de compressão dos frutos em função dos dias decorridos da colheita.

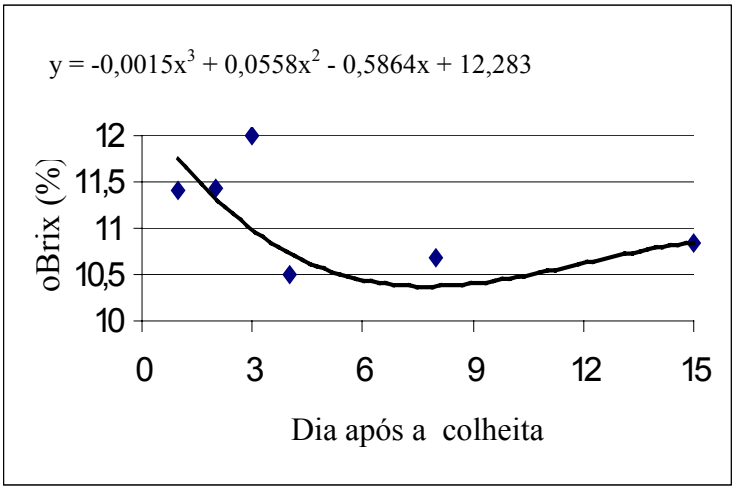

Figura 5.35c – Representação gráfica e equação de regressão de ^{O}Brix dos frutos em função dos dias decorridos da colheita.

Pela Figura 5.35d, espera-se que ocorra um decréscimo médio de 0,188 unidade de firmeza para cada dia decorrido da colheita. Nota-se também que a redução no índice de firmeza ocorre linearmente com o passar dos dias, o que é evidenciado pela regressão linear, que explica 92,17% das variações em função do período decorrido após a colheita.

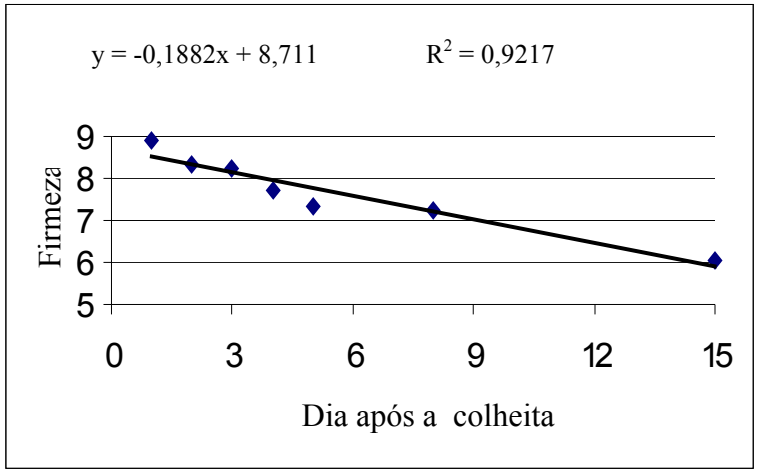

Figura 5.35d– Representação gráfica e equação de regressão de firmeza dos frutos em função dos dias decorridos da colheita.

Assim como o teor de sólidos solúveis, a acidez em frutos não climatéricos como a laranja, não apresenta tendências muito evidentes de decréscimo ou de acréscimo, embora, se espera que com a senescência, a acidez deva aumentar, devido aos processos de fermentação internos. Entretanto, não se pode garantir que neste experimento, ocorreram níveis de fermentação que pudessem elevar os níveis de acidez, possíveis de serem medidos pelo processo de titulação adotado.

Sendo assim, o que se observa na Figura 5.35e, é que a equação de regressão utilizada para o ajuste, uma polinomial de terceiro grau, não apresentou um coeficiente de determinação elevado, explicando apenas 61,32% das variações da acidez em função do período decorrido após a colheita.

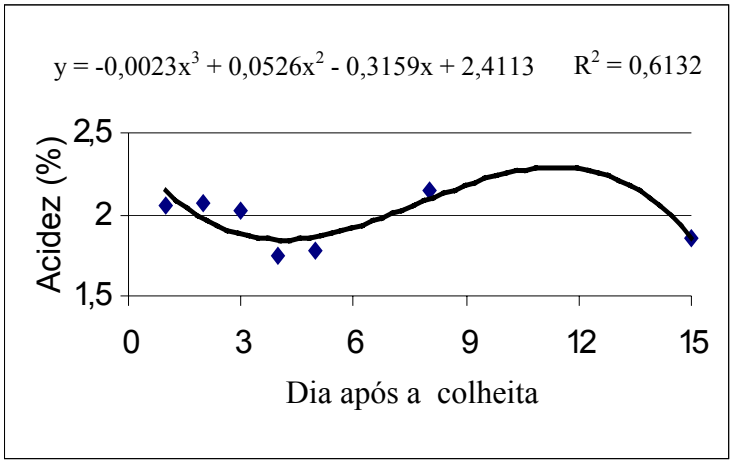

Figura 5.35e– Representação gráfica e equação de regressão de acidez dos frutos em função dos dias decorridos da colheita.

Foi observado também que a força de compressão era fortemente correlacionada com o período decorrido da colheita e o mesmo ocorreu com a firmeza medida pelo Firmalon. É interessante ressaltar que o Firmalon é um equipamento que preserva os espécimes (não destrutivo), o que não se pode garantir em um ensaio de compressão. Entretanto, os ensaios de compressão são aceitos na comunidade científica como um processo satisfatório para a expressão da firmeza. Sendo assim, qualquer tipo de ensaio mecânico que vise extrair informações de firmeza, deve ter como base de comparação os ensaios de compressão.

Neste trabalho, foram comparados os resultados obtidos através desses dois métodos (compressão e Firmalon). A Figura 5.35f mostra a representação gráfica e a equação de regressão da firmeza em função da força de compressão dos espécimes de laranja, onde se observa que a equação linear explica 93,32% das variações do índice de firmeza em função da força de compressão.

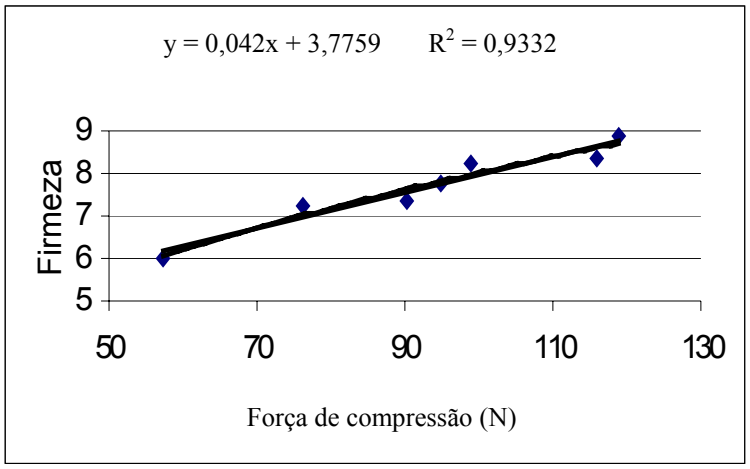

Figura 5.35f– Representação gráfica e equação de regressão de firmeza dos frutos em função da força de compressão

6 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisada a senescência da laranja através de duas diferentes técnicas, uma baseada no "speckle" dinâmico e outra na resposta a excitação mecânica. Os experimentos realizados evidenciaram que o "speckle" dinâmico em laranjas varia de acordo com o ponto amostrado, varia entre cultivares e também de acordo com o período pós-colheita.

As técnicas propostas para a quantificação da variação temporal do "speckle" se apresentaram satisfatórias. Para essa quantificação podem ser usados tanto os cumulantes estatísticos quanto o módulo de dispersão de intensidades (MDI), entretanto, esse último se mostrou mais vantajoso na maioria dos casos, além de ser um processo mais rápido.

Foi observado que a reflexão especular não interfere de modo significativo na quantificação do módulo de dispersão de intensidades (MDI).

Os coeficientes de correlação encontrados entre a dinâmica do "biospeckle" (medida pelo módulo de dispersão de intensidades e cumulantes estatísticos) com a porcentagem de sólidos solúveis e com a força de penetração evidenciaram que o método é um importante indicativo de qualidade.

Através da análise da dinâmica do "biospeckle" foi possível identificar variações diárias nos três primeiros dias depois da colheita, entretanto, possíveis variações ocorridas durante o tempo de armazenamento restante não foram percebidas.

Verificou-se também neste trabalho que tanto o tempo de exposição do fruto ao laser quanto a umidade ambiente interferem na dinâmica do "biospeckle".

Nos ensaios de resposta a excitação mecânica, foi possível verificar que a freqüência central, proposta para o cálculo do índice de firmeza, é um parâmetro importante para a caracterização da firmeza de laranjas. Isso foi evidenciado nas análises de correlação entre a firmeza e a força de compressão e entre esse primeiro e o período decorrido da colheita.

As variações de firmeza medidas através da força de compressão foram significativas a partir do quarto dia decorrido da colheita. Já o índice de firmeza, medido a partir da freqüência central

(utilizando o Firmalon), foi sensível o suficiente para perceber alterações diárias devido à redução na rigidez e também à perda de massa (relacionada a perda de água). Isso evidencia que o Firmalon é mais adequado para medir firmeza de laranjas do que ensaios de compressão.

Tanto as técnicas do "biospeckle" como a de resposta à excitação mecânica têm um grande caminho de desenvolvimento e pesquisa, sendo necessários mais testes e outras configurações experimentais devem ser implementados para se dominar variáveis como umidade, temperatura, vibração, etc., para viabilizar o projeto de um equipamento para determinação de maturidade.

7 – FUTUROS TRABALHOS

Futuros trabalhos devem buscar utilizar o "speckle" dinâmico para frutos climatéricos, nos quais a percentagem de sólidos solúveis varia com o período pós-colheita. Dessa forma, o "biospeckle" poderá ser utilizado como análise de qualidade, uma vez que a firmeza muda com o tempo de armazenamento, também será possível correlacionar o "speckle" dinâmico com a firmeza de outros *hortifrutis.*

Os resultados deste trabalho evidenciaram a necessidade de pesquisa objetivando a eliminação dos efeitos devido a ruídos provenientes do ambiente.

Deve-se pesquisar a correlação do "biospeckle" com ensaios de resposta à excitação mecânica, não destrutiva como é o caso do Firmalon, e com ensaios destrutivos tipo compressão, dentre outros.

Uma outra necessidade que se fez evidente nessa linha de pesquisa foi a busca por padrões de referência dos parâmetros de quantificação de atividades, de forma que se possa comparar o módulo de dispersão de intensidades entre espécies biológicas diferentes, e se possa caracterizar cultivares através dos padrões estabelecidos.

No que se refere à parte de programação, devem ser desenvolvidos novos algoritmos, para o tratamento de imagens, que possibilitem extrair mais informações do "biospeckle" do que se tem hoje, como é o caso do módulo de dispersão de intensidades. Por exemplo, na construção do STS, poderia ser utilizado um número maior de componentes espaciais e temporais.

O tamanho do "speckle" deve ser explorado, pois à medida que se conseguem detectores de alta resolução, torna-se possível trabalhar com grãos de "speckle" menores. Isso possibilitará mapear uma área maior nos espécimes de forma a se obter mais informações desses como um todo.

Deve-se também implementar um sistema de medição de resposta à excitação acústica, utilizando um vibrômetro laser como transdutor e ondas sonoras como excitador, de forma que os ensaios possam ser desenvolvidos sem contato com os espécimes.

8 - Referências Bibliográficas Citadas

ABBOTT, J. A., CHILDERS, N. F., BACHMAN, G. S., FITZGERALD, J. V., MATUSIK, F. J. Acoustic vibration for detecting textural quality of apples, **American Society for Horticultural Science,** v. 93, p. 725-39, 1968.

ABBOTT, J. A. & MASSIE, D. R. Nondestructive firmness measurement of apples. **Transaction of the ASAE**, nº 93-.6025, 1993.

ABBOTT, J. A. Transmission, Magness-Taylor, and compression. **Journal of Society of Horticultural Science**, v. 119, n.3, p. 510-15, 1994.

ABECITRUS, Associação Brasileira de Exportadores de Cítricos, (http://www.abe*citrus*.com.br), 18/08/1998.

AIZU, Y. & ASAKURA, T. Bio-speckle phenomena and their application to the evaluation of blood flow. **Optics & Laser Technology**, v. 23, p 205-19, 1991.

ALBRIGO, L. C. & CARTER, R. D**. Structure of citrus fruits in relation to processing.** In: *Citrus* Science and Technology, Vol. I, (eds. S. Nagy, P.E. Shaw, and M.K. Veldhuis), AVI Publishing Co., Inc., Westport, CT, pp 38-73, 1977.

ARIZAGA, R, TRIVI, M. R., RABAL, H. J. Speckle time evolution characterization by co-ocurrence matrix analysis**. Optics & Laser Technology**, v. 4-5, n.3, p. 1-7, 1999.

ASAKURA, T., TAKAI, N. Dynamic laser speckles and their application to velocity measurements of the difuse object. **Journal of Applied Physics,** v. 25, p. 179-94, 1981.

BERGKVIST, A. **Biospeckle-based study of the line profile of light scattered in strawberries.** Faculty of Technology at Lund University, 1997, 60 p. (MSc. Thesis)

BONE, R. A., LEE, D. W., NORMAN, J. M. Epidermal cells functioning as lenses in leaves of tropical rains-forest shade plants. **Applied Optics**, v. 24, nº 10, p 1408-12, 1985.

BRAGA JR., R. A., DAL FABBRO, I. M., RABAL, H. J. **O uso do laser na agricultura**. In: WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO DA FEAGRI, UNICAMP, jun, 1998.

BRAGA, M. E. D. **Estudo experimental dos fundamentos do transporte hidráulico de laranjas, Faculdade de Engenharia de Alimentos**, UNICAMP, Dissertação de Mestrado, 1997, 145p.

BRASIL. Ministério Da Agricultura. **Normas e padrões de identidade, qualidade e embalagem para classificação e comercialização: Laranja**. Brasília, Secretaria Nacional de Abastecimento, v.3, nº 5, 1981,21p.

BRIERS, J. D. Speckle flutuations and biomedical optics: implications and applications. **Optic Engineering,** v. 32, p. 277-83, 1993.

CARGILL – *Citrus,* Da Laranja ao Suco, Revista Cargil, Nº 17 - Janeiro/Março – 1998. p.6-7.

CHEN P. & SUN Z. A Review of Non-destructive methods for quality evaluation and sorting of agricultural products.**Journal of Agricultural Engineering Research**,v. 48-50,p.85-97, 1991.

CHEN, P. SUN, Z. HUARNG, L. Factors affecting acoustic responses of apples, **Transaction of the ASAE**, 1992, v. 35,n.6, p. 1915-20.

CHITARRA, M. I. F & CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de Frutos e Hortaliças / Fisiologia e Manuseio**- ESAL.Lavras:FAEPE, 1990. 356p.

CHITARRA, M. I. F. **Características físicas, físico-químicas e químicas de alguns frutos cítricos cultivados em Minas Gerais. Ensaios com laranjas (*Citrus sinensis* (L) Osbeck) e tangerinas (*Citrus reticulata* Blanco) em fase de maturação**. Faculdade de Engenharia de Alimentos, USP, SP, 1979. 130p. (Tese de Doutorado).

CHRISTENSEN, R. M. **Theory of Viscoelasticity.** New York: Academic Press, 1971. 364p.

CHU, B. **Basic principals and practice**. In: Laser light scattering. Boston: Academic Press, 1991, p.129.

COSTA, L. Qualidade e pós-colheita de Citrus. **Informe Agropecuário EPAMIG**. v.17, n.180, p45-51, 1994.

DAINTY, J. C. Laser speckle and related phenomena. **Topics in Applied Physics**, v. 9, 1975.

DAINTY, J. C. Some statistical properties of randon speckle patterns in coherent and partially coherent illumination. **Optical Acta**, v. 17, p. 761-72, 1970,

DAL FABBRO, I. M. **Failure theories for apple flesh.** E. Lansing, MI: Michigan State University, 1979, 98p. (Ph.D. Thesis).

DeBAERDEMAEKER, J.G. **Experimental and numerical techniques related to the stress analysis of apple under static load**. E. Lansing, MI: Michigan State University, 1975, 145p. (Ph.D. Thesis).

DELWICHE, M. J., TANG, S., MEHLSCHAU, J. J. An impact force response fruit firmness sorter. **Transaction of the ASAE,** v. 32,n.1, p. 321-26,1989.

DUPRAT, F., CHEN, H. GROTTE, M., LOONIS, D., PIETRI, E. **Laser light based machine vision system for nondestructive ripeness sensing of Golden apples**. In: PROCEEDINGS OF IFAC. WORKSHOP ON CONTROL APLLICATIONS IN POST-HARVEST AND PROCESSING TECHNOLOGY, CAPPT'95, p. 85-91, 1995.

ERICKSON, L. C. The general physiology of Citrus, Cap. II, 1989, The citrus Industry, v. 1, p.86-126.

FERRAZ, A.C.O. **Propriedades mecânicas do internódio da cana-de-açúcar: uma contribuição metodológica.** FEAGRI, UNICAMP, Campinas, 1987. 98p. (Dissertação de Mestrado).

FINNEY, E. E. Mechanical resonance within red delicious apples and its relation to fruit texture**.** **Transactions of the ASAE**, v.13, n.2, p. 177-80, 1970.

FINNEY, E.E. **The viscoelastic behavior of the potato, *Solanum tuberosum*, under quasistatic loading.** E. Lansing, MI: Michigan State University. Ph.D. Thesis - Agricultural Engineering Department, Michigan State University, 1963.

FINNEY, E.E. Vibration techniques for testing fruits. **Transactions of the ASAE**, v.1, n.71, p. 798-802, 1971.

FLÜGUE, W. **Viscoelasticity.** Germany: Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, 2 ed., 1975, 194p.

FUNDECITRUS, Fundo Paulista de Defesa da Citricultura, (http://www.fundecitrus/com.br), 10/08/1998.

GALILI, N., SHMILOVITCH, I., CARM, Y., REED, A. N., AUVIL, P**. Firmness measurement during long-term storage of apples and pears**.In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SENSORS IN HORTICULTURE ,3. **Anais do...**Tiberias, Israel, 1997.

GAUSMAN, H. E., ALLEN, W. A., SCOBAR, D. E. Refractive index of plant cell walls. **Applied Optics**, v. 13, n. 4, p. 767-820, 1974.

GROSS, J. **Caratenoid pigments in *citrus***. In :*Citrus* Science and Tchnology, (eds. S. Nagy, P.E. Shaw, and M.K. Veldhuis), AVI Publishing Co., Inc., Westport, CT, 1977. p.302-54.

HECHT, E**. Optics**, 2ª Ed., Adison Wesley Publishing Co., Inc.USA, 1987, 676 p.

HOLTZMAN, E., NOVIKOFF, A.B. **Cells and Organelles**. CBS College Publishing. New York, NY, USA, 1984, 629p.

JAIN, A. K. **Fundamentals of Digital Image Processing**. Prentice Hall, Inc. University of California, Davis, USA, 1989, 569 p.

JOYCE, A. L. M. **Lagos Solares: Contribuição para o desenvolvimento de uma tecnologia.** Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 1992. 236p. (Tese de Doutorado em Termomecânica Aplicada).

LAURENTE, R. **Influência da geometria dos corpos de prova vegetais na determinação de propriedades mecânicas.** FEAGRI, UNICAMP, Campinas, SP, 140p. 1997. (Dissertação de Mestrado).

LEE, J.W. *et al.* **Nondestructive Firmness Measurement of Apples Using Laser Vision System.** In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, MINNEAPOLIS, USA, 1997.

LINARES, A. W. **Estudo do Comportamento Viscoelástico de Frutos Esféricos.** FEAGRI, UNICAMP, Campinas, SP, 1996, 134p. (Dissertação de Mestrado).

MARTINS, M. P. **Comportamento mecânico de laranja pêra (*Citrus sinensis* Osbeck).** FEAGRI, UNICAMP, Campinas, 1993, 112 p. (Dissertação de Mestrado).

MASE, G. E. **Theory and problems of continuum mechanics**. New York: McGRAW-HILL, 1970. 221p.

MIZRACH, A. & FLITSANOV, U. **Maturity monitoring of pre-harvest avocado by Ultrasonic technology** - In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SENSORS IN HORTICULTURE , 3 . **ANAIS DO ...**Tiberias, Israel, 1997.

MIZRACH, A., NAHIR, D., RONEN, B. Mechanical thumb sensor for fruit and vegetable sorting. **Transaction of ASAE**, v. 35,n.1, p. 247-250, 1992.

MIZRACH, A., GALILI, N., ROSENHOUSE, G. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. **Transaction of ASAE**, v. 32,n.6, p. 2053-58, 1989.

MIZUKAMI, A., MURAMATSU, M., SOGA, D. **Medida da atividade biológica superficial usando a correlação de laser speckle em tempo real.** In: ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA, 19, Águas de Lindóia, SP, 1996.

MOHSENIN, N. N. **Physical Properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1970. Vol. I, 734p.

MOHSENIN, N. N., GOHLICH, H. Techniques for determination of machanical properties of fruits and vegetables related to design and development of harvesting and processing machinery**. Journal of Agricultural Engineering Research**, v.7, n.4, p.300-15, 1962.

MORROW, C. T., MOHSENIN, N. N. Consideration of selected agricultural products as viscoelastic materials**. Journal of Food Science**, 1965, v. 31, nº 5, p. 686-98.

NAHIR, D., RONEN, B. PRIGOJIN, I. Shelf life prediction of *citrus* fruit. **Transaction of the ASAE**, nº 89-6024, , 1989.

OULAMARA, A. TRIBILLON, G., DUVERNOY, J. Biological activity measurement on botanical specimen surface using temporal decorrelation effect of laser speckle, **Journal of Modern Optics**, 1989, v. 36, p. 165-79, 1989.

PALERMO, E. L. **Parâmetros mecânicos do enfardamento do palhiço de cana-de-açúcar.** FEAGRI**.** UNICAMP, Campinas, 1998, 80p. (Dissertação de Mestrado).

PANTASTICO, E. B. **Postharvest Physiology, Handling and Utilization of Tropical and Subtropical Fruit s and Vegetables.** Westport: Avi Publishing Co, CT, 1975.

PELEG, K, Biomechanicals of fruits and vegetables. **Journal of Biomechanics**, v.18, p. 843-62, 1985.

PELEG, K. **Multi sensor adaptative sorting of fruits and vegetables**. In: PROCEEDINGS OF THE INT'I WORKSOHOP ON NONDESTRUCTIVE TECHNOLOGIES FOR QUALITY EVALUATION OF FRUTIS AND VEGETABLES. Spokane, Washington, june 1993, p 111-19.

PELEG, K., HINGA, S. Classification of avocato by firmness and maturity. **Journal of. Texture Studies** v. 21,n.2, p. 123-39, 1989.

PRIESTLEY, M. B. **Spectral analysis and time series**. San Diego, CA: Academic Press, 6ª Ed. v. 1 e v. 2, , 1981. 890 p.

RABAL, H. J. BRAGA, R. A. Jr., TRIVI M. R., DAL FABBRO, I. M. **O Uso do Laser na Agricultura**. In: COMBEA,27, Poços de Caldas, cap. 5, 1998.

RABAL, H. J., ARIZAGA, R. TRIVI, M. R., ROMERO, G. G. , ALANIS, E. Transient phenomena analysis using dynamic speckle patterns. **Optical Engineering**, v. 35, n.1, p. 57-63, 1995.

ROMERO, G. G. **Estudio y caracterizacion de patrones de speckle que varian en el tiempo.** Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Fisica, Universidad Nacional de Salta, Argentina, 1999, 133p. (Tesis de Doctorado).

ROTH, I. **Species of *citrus* (type: hesperidium**). In: Fruits of Angiosperms. Gebruder Borntraeger, Berlin, pp. 494-642, 1977.

RUTH, B. Non-contact blood flow determination using a laser speckle method. **Optic laser Technology**, v. 20, p. 309-16, 1988.

SEYMOR, G. B., TAYLOR, J. E., TUCKER G. A**. Biochemistry of fruit ripening**, London: Chapman & Hall, 1993, 454p.

SHAHABASI, Y. **Experimental and numerical techniques related to maximum allowable depth of apples in a bulk storage**. Michigan Stat University, East Lansing, Michigan, U.S.A, 1979. (Unpublished Ph.D. Thesis).

SHERIF, S. M. **The quasi-elastic contact problem for nearly incompressive agricultural products.** E,. Leasing, MI: Michigan State University, 1976. (Ph.D. Thesis).

SHMILOVITCH, I., GALILI, N., CARMI, Y**. Determinations of avocado maturity by near-infrared spectrometry.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SENSORS IN HORTICULTURE , 3. **Anais do ...** Tiberias, Israel, 1997.

STEPHENSON, K. Q., BYLER, R. K., WITTMAN, M. A. Vibrational response properties as sorting criteria for tomatoes. **Transaction of the ASAE**, v. 16, n.2, p.258-60, 1973.

TU, K.; DE BUSSCHER, R; DE BAEDEMAEKER, J.; SCHREVENS, E**. Using laser beam as light source to study tomato and apple quality nondestructively.** In: . PROCEEDINGS OF FOOD PROCESSING AUTOMATION IV CONFERENCE, ASAE, St. Joseph, Michigan, 1995, p 528-36.

VEIGA, R. D. & SÁFADI, T. **Análise de Regressão e séries temporais**.Lavras FAEPE, Ed., Lavras, MG, 1999, 57p.

VÉLEZ PASSOS, C.A**. Análise do comportamento mecânico de laranjas à granel mediante modelo de elementos finitos.** FEAGRI, UNICAMP, Campinas, SP, 1987, 89p. (Dissertação de Mestrado).

XU, Z, JOENATHAN, C, KHORANA, B. M. Temporal and spatial properties of the time-varying speckles of botanical specimens. **Optical Engineering**, v. 34,n.5, p.1487 –1502, 1995.

YOUNG, M. **Optics and Lasers**: An Engineering Physics Approach. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York,, 1977. 208 p.

ZERBINO, L. M. **Laser y Optica en Ingenieria** - LOI'96", Cap. Óptica Física,Coherencia, Interferometria, Difraccion. Centro de Investigaciones Ópticas – CIOp – La-Plata, Argentina, 1996.

9 - Referências Bibliográficas Recomendadas

COOKE, J. R. An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. **Transaction of the ASAE.** v. 15, n. 6, p 1075-1080, 1972.

CORRÊA, P. C. **Avaliação destrutiva e não destrutiva de qualidade de produtos vegetais**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27. Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, Poços de Caldas. v.1, p. 59-81, 1998.

DAL FABBRO, I. M., MARTINS, M. P., LINARES, A. W**. Impact selection of oranges**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SENSORS IN HORTICULTURE, 3. **Anais do...** Tiberias, Israel, 1997.

DAL FABBRO, I. M., VELEZ P. C., LINARES, A. W**. Mechanical behavior of packed oranges**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SENSORS IN HORTICULTURE, 3. **Anais do...**Tiberias, Israel, 1997.

DAVIES F. S. & ALBRIGO, L. G. **Fruit quality, harvesting and postharvest technology**. Ed. Wallingford: Cabi International, 1994.p. 203-225.

DELWICHE, M. J. & BOWERS, S. V. Signal processing of fruit impact forces for firmness detection. **Transaction of the ASAE**, v. 85, p. 3024-3029, 1985.

DELWICHE, M. J., McDonald, T. Bowers, S. V. Determination of peach firmness by analysis of impact forces**. Transaction of the ASAE**, v. 30,n.1, p. 294-254, 1987.

EILATI, S. K., BUDOWSKI, P. AND MONSELISE, S.P. *Xanthophill* esterification in the flavedo of *citrus* fruit. **Plant and Cell Physiology**, v. 13, p. 741-746, 1972.

FONSECA, L. & BARBOSA, G. A. Quasi-elastic light scattering of Carnauba wax in the liquid phase: dynamicas 1. **Applied Optics**, v. 22, n. 9, p.1409-1412, 1983.

LINARES, A. W.,DAL FABBRO. **Non-linear viscoelastic behavior of spherical fruits.** In:. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SENSORS IN HORTICULTURE, 3. **Anais do ...**Tiberias, Israel, 1977.

FREJLICH, J., CARVALHO, E., FRESCHI, A. A. **Stabilized holographic setup for the real-time continuous measurement of surface vibrational mode patterns**. IN: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIBRATION MEASUREMENTS BY LASER TECHNIQUES: ADVANCES AND APPLICATIONS, 2. **Anais do...** Ancona, Italy, v. 2868, 1996.

HARIHARAN, P. **Basics of interferometry.** Academica Press, Inc., Sydney, Austrália, 1992, 213p

HSU, H. P. **Analisis de Fourier**. Addison-Wesley Iberoamaricana, USA, 1987, 274p.

HUGHES, H., SEGERLIND, L.J**. A rapid mechanical method for determining Poisson's ratio in biological materials.** St. Joseph, MI: **ASAE**, 1972, n. 71-310.

KARU, T. I. **Photobiology of low-power laser therapy.** Harwood academic publishers, v. 8. United Kingdom: Universities press Ltda., 1989. 189p.

KEFFORD, J. F. The chemical constituients of *citrus* fruits. **Advanced Food Research**, v.9, p.285-372, 1970.

KIMEL, E., PELEG, K. HINGA, S. Vibration modes of spheroidal fruits. **Journal of Agricultural Engineering Research**, n.52, p. 201-213, 1992.

KOVÁCS, Z. L. **Teoria da probabilidade e processos estocásticos**. São Paulo: Edições Acadêmicas, 1996, 120p.

MURAMATSU, M., SAKURAI,N., WADA,N., YAMAMOTO,R., TANAKA,K., ASAKURA,T., ISHIKAWA-TAKAMO,Y., NEVINS,D.J. Critical comparison of an accelerometer and a laser doppler vibrometer for measuring fruit firmness. **Hortculture Technology,** v. 7, n.4, p.434-438,1997.

NAHIR, D., SCHMILOVITCH, Z., RONEN, B. Tomato grading by impact force response. **Transaction of the ASAE,** nº 86-3028, 1986.

NELSON, C. W., MOHSENIN, N. N. Maximum alloweble static and dynamic loads and effect of temperature for mechanical injury in apples. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 13, p. 305-317, 1968.

PELEG, K., HINGA, S. Firmness index of viscoelastic bodies by vibration testing. **Journal of Rheology**, v. 33,n.4, p. 639-657, 1989.

ROCHA, J.V. **Comportamento mecânico de minifardos de feno de soja perene (Neonotonia Wightii Lackey c.v. cianova), submetidos a ensaios de relaxação com cargas uniaxiais**. Campinas: Unicamp, 1988. 104p. Dissertação (Mestrado)

RABELO, G. F., DAL FABBRO, Contact stress area measurement of spherical fruits. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SENSORS IN HORTICULTURE, 3. **Anais do...** Tiberias, Israel, 1997.

ROSENFELD, D. SHMULEVICH, J., ROSENHOUSE, G. Three-dimensional simulation of the acoustic response of fruit for firmness sorting. **Trans. ASAE**, St. Joseph, MI, v.35, n.4, p. 1267-1274, 1992.

SALUNKHE, D. K. AND DESAI, B. B. ***Citrus***. In: **Postharvest Biotechnology of Fruits.** Vol. 1, CRC Press, Inc., Boca Raton, Fl, pp. 59-75, 1986.

SARIG, Y. **Viscoelastic properties of *citrus* fruit**. Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, 1972, M. Sc. Thesis.

SARIG, Y., SEGERLIND, L. J., LITTLE, R. N. Deformation analisys of foam-encapsulated apple under impact loading. **Transaction of ASAE** , n. 76, p. 1041-1044, 1976.

SASSON, A., MONSELISE, S. P. Organic acid composition of shamouti oranges at harvest and during prolonged post-harvest storage. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, V.102, P. 331-336, 1977.

SHERIF, S.M., SEGERLIND, L.J., FRAME, T.S. An equation for the modulus of elasticity of radially compressed cylinder**. Transaction of the ASAE** , v. 1976.

SEYFRIED, M. & FUKSHANSKY, L. Light gradients in plant tissue. **Applied Optics**, v. 22, nº 9, p. 1402-1408, 1983.

TAYLOR, J. E. AND TUCKER G. A. **Biochemistry of Fruit Ripening.** 1 ed. London: Chapman & Hall,1993. 1973.

TIMOSHENKO, S. P., GOODIER, J. N**. Theory of Elasticity**. 3 ed. Rio de janeiro: Guanabara Koogan II ,1980. 567p.

VOGELMANN, T. Plant tissue optics. **Annual Reviews of Plant. Mol. Biol**, v. 44, p. 231-251, 1993.

WARD, R. W. AND KILMER, R. L. **The *Citrus* Industry.** In: A Domestic and International Economic Perspective. Ames, Iowa: Iowa State Univ Press ,1989.p.78-126.

YANG, W. H. The contact problem for viscoelastic bodies. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, MI, p.395- 401, 1966.

YONG, Y. C., BILANSKY, W. K. Modes of vibration of spheroids at the first and second resonant frequencies. **Transaction of the ASAE**, v. 21, p. 1463-1466**,** 1979.

Anexo A.1 - Resumo da análise de variância para a variável cumulante estatístico B1 no ponto A de 4 grupos de laranja e duas condições de polarização (com e sem a componente especular).

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Grupo (G)	3	0,00397507	8,37	0,0014
Polarização (P)	1	0,00024876	0,52	0,4797
G * P	3	0,00011544	0,24	0,8650
Resíduo	16	0,00047488		

Média Geral = 0,1562907
C.V = 13,94306 (%)

Anexo A.2 - Resumo da análise de variância para a variável cumulante estatístico B1 no ponto B de 4 grupos de laranja e duas condições de polarização (com e sem a componente especular).

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Grupo (G)	3	0,00182331	2,61	0,0877
Polarização (P)	1	0,00000093	0,00	0,9714
G * P	3	0,00009377	0,13	0,9384
Resíduo	16	0,00069984		

Média Geral = 0,1552308
C.V = 17,04205 (%)

Anexo A.3 - Resumo da análise de variância para a variável cumulante estatístico B1 no ponto C de 4 grupos de laranja e duas2 condições de polarização (com e sem a componente especular).

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Grupo (G)	3	0,00163777	1,51	0,1513
Polarização (P)	1	0,00007324	0,07	0,7986
G * P	3	0,00027520	0,25	0,8581
Resíduo	16	0,00108818		

Média Geral = 0,0824045
C.V = 40,03120 (%)

Anexo A.4 - Resumo da análise de variância para a variável cumulante estatístico B1 no ponto D de 4 grupos de laranja e duas condições de polarização (com e sem a componente especular).

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Grupo (G)	3	0,00161913	8,05	0,0017
Polarização (P)	1	0,00002763	0,14	0,7157
G * P	3	0,00018347	0,91	0,4571
Resíduo	16	0,00020112		

Média Geral = 0,1382587
C.V = 10,25725 (%)

Anexo A.5 - Resumo da análise de variância para a variável módulo de dispersão de intensidades (MDI) - ponto A de 4 grupos de laranja e 2 condições de polarização (com e sem a componente especular).

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Grupo (G)	3	2734660,3080	24,30	0,0001
Polarização (P)	1	63573,6854	0,56	0,4632
G * P	3	2648,8967	0,02	0,9949
Resíduo	16	112553,0552		

Média Geral = 3511,1150
C.V = 9,555064 (%)

Anexo A.6 - Resumo da análise de variância para a variável módulo de dispersão de intensidades (MDI) - ponto B de 4 grupos de laranja e 2 condições de polarização (com e sem a componente especular).

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Grupo (G)	3	2104201,5459	9,34	0,0008
Polarização (P)	1	41039,0481	0,18	0,6752
G * P	3	24140,8797	0,11	0,9547
Resíduo	16	225268,2348		

Média Geral = 3497,5633
C.V = 13,57014 (%)

Anexo A.7 - Resumo da análise de variância para a variável módulo de dispersão de intensidades (MDI) - ponto C de 4 grupos de laranja e 2 condições de polarização (com e sem a componente especular).

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Grupo (G)	3	582504,4405	1,87	0,1760
Polarização (P)	1	100146,7962	0,32	0,5790
G * P	3	1227,7510	0,00	0,9996
Resíduo	16	312118,5013		

Média Geral = 1329,2246
C.V = 42,03019 (%)

Anexo A.8 - Resumo da análise de variância para a variável módulo de dispersão de intensidades (MDI) - ponto D de 4 grupos de laranja e 2 condições de polarização (com e sem a componente especular).

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Grupo (G)	3	3179190,5093	90,72	0,0001
Polarização (P)	1	114534,6401	3,27	0,0895
G * P	3	14618,0293	0,42	0,7431
Resíduo	16	35045,4155		

Média Geral = 2782,3942
C.V = 6,728170 (%)

Anexo B.1 - Resumo da análise de variância para a variável módulo de dispersão de intensidades (MDI) – em função da umidade ambiente.

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Umidade (U)	4	1018,9957600	82,02	0,0001
Resíduo	10	12,4234333		

Média Geral = 778,86467
C.V = 0,452542 (%)

Anexo B.2 - Resumo da análise de variância e modelo de estimativa para a variável módulo de dispersão de intensidades (MDI) – em função da umidade ambiente.Tipo I

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Umidade (U)	1	125,2339327	4,52	0,0570
U * U	1	598,7799909	21,60	0,0007
U * U * U	3	3171,2753696	114,40	0,0001
Resíduo	11	27,7207346		

Média Geral = 778,83467
C.V = 0,675990 (%)

Anexo B.3 - Resumo da análise de variância e modelo de estimativa para a variável módulo de dispersão de intensidades (MDI) – em função da umidade ambiente.Tipo III

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Umidade (U)	1	2725,0932881	98,31	0,0001
U * U	1	2968,2767827	21,60	0,0001
U * U * U	3	3171,2753696	114,40	0,0001
Resíduo	11	27,7207346		

Média Geral = 778,83467
C.V = 0,675990 (%)

Anexo C.1 - Resumo de Análise de Variância - MI

Fonte de Variação	G. L	Q. M.	F	Pr > F
Cultivar	3	19730,675	1,67	0,2046
Resíduo	20	11786,912		

Média Geral 728,503625
C.V. 14,90281 (%)

Anexo C.2 - Resumo de Análise de Variância - ^{O} BRIX

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Cultivar	3	11,67364861	19,16	0,0001
Resíduo	20	0,60923083		
Média Geral	8,34375000			
C.V.	9,354695 (%)			

Anexo C.3 - Resumo de Análise de Variância - Acidez

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Cultivar	3	3,93986048	110,69	0,0001
Resíduo	20	0,03559424		
Média	14,24097			
C.V.	0,943192 (%)			

Anexo C.4 - Resumo de Análise de Variância - Força

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Cultivar	3	91,90277778	95,48	0,0001
Resíduo	20	0,96250000		
Média	13,04166667			
C.V.	7,522588 (%)			

Anexo C.5 - Resumo de Análise de Variância - B1

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Cultivar	3	0,00071211	6,81	0,0024
Resíduo	20	0,00010447		

Média 0,09791877
C.V. 10,43828 (%)

Anexo C.6 - Resumo de Análise de Variância - ^{O}Mat

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Cultivar	3	58,22736177	18,67	0,0001
Resíduo	20	3,11939657		

Média 7,88768225
C.V. 22,39164 (%)

Anexo D.1 - Resumo da Análise de Variância - Mom Inércia

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Período	12	1153,870725	8,255	0,0001
Resíduo	26	139,784728		

Média Geral = 653,9287179
C.V = 1,81 (%)

Anexo E.1 - Resumo da Análise de Variância - . Massa

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Período	5	3204,70012	24,54	0,0001
Resíduo	224	130,59617		

Média Geral = 138,1739
C.V = 8,270641 (%)

Anexo E.2 - Resumo da Análise de Variância - Força

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Período	6	8789,76369	9,20	0,0001
Resíduo	53	954,89153		

Média Geral = 74,65138
C.V = 41,39417 (%)

Anexo E.3 - Resumo da Análise de Variância - ^{O}Brix

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Período	6	2,87975000	2,31	0,0473
Resíduo	53	1,24866667		

Média Geral = 10,91833
C.V = 10,23451 (%)

Anexo E.4 - Resumo da Análise de Variância - Acidez Total

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Período	6	0,17431120	0,80	0,5771
Resíduo	53	0,21890704		

Média Geral = 1,976320
C.V = 23,67405 (%)

Anexo E.5 - Resumo da Análise de Variância - Firmness

Fonte de Variação	GL	Q. M.	F	Pr > F
Período	6	24,497336	46,24	0,0001
Resíduo	263	0,5297325		

Média Geral = 7,968148
C.V = 9,134208 (%)