

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
LARANJA - PÊRA (*Citrus Sinensis* Osbeck)**

POR

MAURICIO PIRES [MARTINS 366

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da Dissertação de Mestrado defendida por Mauricio Pires Martins e aprovada pela Comissão Julgadora em 18 de fevereiro de 1993. Campinas, 02 de junho de 1993.

orientador:

Prof. Dr. Inácio M. [Dal Fabbro k



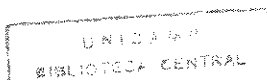
Presidente da Banca

Dissertação apresentada como cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Máquinas Agrícolas.

Campinas - SP

Fevereiro - 1993



A minha esposa,

Iris,

pelo amor e paciência

dedicados

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Inácio M. Dal Fabbro, pelo apoio e liberdade na escolha e exploração do tema;

Ao prof. Sylvio Luis Honório, pela ajuda na escolha do tema e nos ensaios de laboratório;

Ao colega Marcos Aurélio Miguel, pelo apoio na montagem da interface de aquisição de dados;

Ao Departamento de Máquinas Agrícolas, pela disponibilidade de suas instalações;

À Faculdade de Engenharia Agrícola, pela manutenção de um ambiente de trabalho propício à exploração do tema;

À Universidade Estadual de Campinas e ao Conselho Nacional de Pesquisa, pelo suporte financeiro.

SUMÁRIO

	Página
PÁGINA DE ROSTO	i
DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Propriedades mecânicas de materiais biológicos	4
3.2 Classificação de frutos	16
3.3 Pressão de contato entre um corpo esférico e uma superfície plana	21
3.4 Pressão de contato entre um elipsóide e uma superfície plana	26
3.5 Impacto elástico entre uma esfera e uma superfície plana	28

3.6 Considerações sobre impacto não elástico	34
4. MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1 Material	37
4.2 Ensaio de ruptura	40
4.3 Ensaio não destrutivo de compressão	41
4.4 Ensaio de impacto	43
4.5 Determinação do teor de sólidos solúveis	48
4.6 Delineamento experimental	48
5. RESULTADOS	50
5.1 Primeira série de ensaios	51
5.2 Segunda série de ensaios	58
5.3 Terceira série de ensaios	64
6. DISCUSSÃO	69
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	71
8. ANEXOS	73
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
10. ABSTRACT	99
11. APÊNDICE	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Ensaio de compressão axial	5
Figura 3.2: Ensaio de cisalhamento	6
Figura 3.3: Modelo viscoelástico de Maxwell	9
Figura 3.4: Generalização do modelo de Maxwell	9
Figura 3.5: Modelo viscoelástico de Kelvin	13
Figura 3.6: Generalização do modelo de Kelvin	13
Figura 3.7: Contato entre esfera e plano	22
Figura 3.8: Cálculo dos raios principais de curvatura de uma laranja	27
Figura 3.9: Cálculo do raio de uma esfera	28
Figura 3.10: Simulação do ensaio de impacto	34
Figura 3.11: Caracterização de impacto	35
Figura 4.1: Esquema do ensaio de compressão	38
Figura 4.2: Vista geral dos equipamentos utilizados: a)Prensa mecânica b)célula de carga c)condicionador de sinais d)microcomputador e)interface f)dispositivo de ensaio de impacto	39
Figura 4.3: Características do ensaio de compressão até a ruptura	41
Figura 4.4: Esquema do dispositivo de ensaio de impacto	44

Figura 4.5: Vista geral do dispositivo de ensaio de impacto	45
Figura 4.6: Detalhe dos emissores/sensores de raios infra-vermelho	46
Figura 4.7: Diagrama da variação de velocidade durante um impacto	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Teste de Tukey para médias de FC na primeira série de ensaios	51
Tabela 5.2: Teste de Tukey para médias de Fti na primeira série de ensaios	52
Tabela 5.3: Teste de Tukey para médias de Ftc na primeira série de ensaios	53
Tabela 5.4: Teste de Tukey para médias de CR na primeira série de ensaios	54
Tabela 5.5: Comparação de diferenças significativas na primeira série de ensaios	55
Tabela 5.6: Teste de Tukey para médias de repetições de FC na primeira série de ensaios	55
Tabela 5.7: Teste de Tukey para médias de repetições de Fti na primeira série de ensaios	55
Tabela 5.8: Teste de Tukey para médias de repetições de Ftc na primeira série de ensaios	56

Tabela 5.9: Teste de Tukey para médias de repetições de CR na primeira série de ensaios	56
Tabela 5.10: Resultados obtidos de Brix, peso, raio, e coloração para a primeira série de ensaios	57
Tabela 5.11: Comparação entre desigualdades constatadas no Brix e diferenças significativas para a primeira série de ensaios	57
Tabela 5.12: Teste de Tukey para médias de FC na segunda série de ensaios	58
Tabela 5.13: Teste de Tukey para médias de Fti na segunda série de ensaios	58
Tabela 5.14: Teste de Tukey para médias de Ftc na segunda série de ensaios	59
Tabela 5.15: Teste de Tukey para médias de CR na segunda série de ensaios	59
Tabela 5.16: Comparação de diferenças significativas na segunda série de ensaios	60
Tabela 5.17: Teste de Tukey para médias de repetições de FC na segunda série de ensaios	60
Tabela 5.18: Teste de Tukey para médias de repetições de Fti na segunda série de ensaios	61
Tabela 5.19: Teste de Tukey para médias de repetições de Ftc na segunda série de ensaios	61
Tabela 5.20: Teste de Tukey para médias de repetições de CR na segunda série de ensaios	62

Tabela 5.21: Velocidades utilizadas no ensaio de compressão da segunda série de ensaios	62
Tabela 5.22: Teste de Tukey para médias de velocidades no ensaio de compressão da segunda série de ensaios	63
Tabela 5.23: Resultados obtidos de Brix, peso, raio, e coloração para a segunda série de ensaios	63
Tabela 5.24: Comparação entre desigualdades constatadas no Brix e diferenças significativas para a segunda série de ensaios	63
Tabela 5.25: Teste de Tukey para médias de FC na terceira série de ensaios	64
Tabela 5.26: Teste de Tukey para médias de Fti na terceira série de ensaios	64
Tabela 5.27: Teste de Tukey para médias de Ftc na terceira série de ensaios	65
Tabela 5.28: Teste de Tukey para médias de CR na terceira série de ensaios	66
Tabela 5.29: Comparação de diferenças significativas na terceira série de ensaios	66
Tabela 5.30: Teste de Tukey para médias de repetições de FC na terceira série de ensaios	67
Tabela 5.31: Teste de Tukey para médias de repetições de Fti na terceira série de ensaios	67
Tabela 5.32: Teste de Tukey para médias de repetições de Ftc na terceira série de ensaios	68

Tabela 5.33: Teste de Tukey para médias de repetições	
de CR na terceira série de ensaios	68

LISTA DE SÍMBOLOS

γ - Distorção específica de cisalhamento	mm/mm
ϵ - Deformação específica	mm/mm
$\dot{\epsilon}$ - Derivada da deformação específica em relação ao tempo	1/s
ϵ_v - Deformação volumétrica	mm ³ /mm ³
η - Coeficiente de viscosidade	Pa.s
θ - Ângulo de cisalhamento	rad
ν - Coeficiente de Poisson	-
σ - Tensão normal	Pa
$\dot{\sigma}$ - Derivada da tensão normal em relação ao tempo	Pa/s
τ - Tensão de cisalhamento	Pa
ξ - Tempo de retardamento	s
A - Coeficiente de redução de rigidez	-
a - Raio da superfície de contato	m
B - Constante que depende da velocidade de impacto e massa do fruto	N
C - Coeficiente de calibração	-
C_η - Coeficiente de amortecimento	-
CR - Método de classificação baseado no coeficiente de restituição (e)	-

D - Deformação	m
E - Módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young	Pa
e - Coeficiente de restituição	-
F - Força	N
FC - Método de classificação baseado no Firmness calculado por ensaio de compressão	Pa
Firm - (Firmness) Expressa uma característica elástica de materiais biológicos	Pa
F_p - Valor de pico da força de impacto	N
Ftc - Método de classificação baseado no Firmness calculado por t_c no ensaio de impacto	Pa
Fti - Método de classificação baseado no Firmness calculado por t_i no ensaio de impacto	Pa
G - Módulo de elasticidade transversal ou módulo de elasticidade ao cisalhamento ou ainda módulo de rigidez	Pa
g - aceleração da gravidade	m/s ²
h_f - Altura alcançada no rebote	m
h_i - Altura inicial de queda	m
I - Integral da força sobre o tempo	N.s
K - Módulo volumétrico ("bulk modulus")	Pa
K_1 - Constante elástica do plano	1/Pa
K_2 - Constante elástica da esfera	1/Pa
K_3 - Rigidez da laranja - Valência	kgf/cm
l - Comprimento inicial	m
m - Massa	Kg

P - Pressão hidrostática	Pa
q_0 - Pressão no centro da superfície de contato	Pa
R - Raio da esfera	m
R' e R'' - Raios principais de curvatura de um elipsóide	m
S - Área	m ²
t - Tempo decorrido	s
t_c - Tempo de impacto corrigido	s
t_d - Tempo decorrido em dias	dias
t_i - Tempo de impacto	s
t_p - Tempo decorrido entre o primeiro contato e o valor de pico da força de impacto	s
t_r - Tempo de rebote	s
V - Volume	m ³
v - Velocidade	m/s
v_f - Velocidade imediatamente antes do segundo impacto com altura de queda h_f alcançada no rebote	m/s
v_i - Velocidade imediatamente antes do primeiro impacto com altura de queda inicial h_i	m/s

RESUMO

Materiais biológicos exibem propriedades elásticas e viscoelásticas. O conhecimento dessas propriedades é importante para o projeto e o desenvolvimento de equipamentos de colheita, processamento, transporte e seleção de frutas. É apresentado neste trabalho o desenvolvimento de um dispositivo prático, com potencial de classificar corpos esféricos cem vezes mais rápido do que através de ensaios normais de compressão. O princípio de funcionamento desse dispositivo consiste na medição do tempo de impacto através de luz infravermelha e um computador. Com esse dispositivo conseguiu-se uma classificação semelhante a um nível de 65% e discrepante a um nível de 2% à obtida pelo ensaio de compressão. O ensaio de compressão foi realizado a uma carga pré-determinada, e 99,5% da variação dos resultados são explicados pela teoria de contato de Hertz, obtendo-se um Firmness médio para as laranjas ensaiadas igual a 845 kPa. Constatou-se uma tendência das laranjas com maior Brix apresentarem Firmness maior, coeficiente de restituição menor e coloração mais amarelada.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades mecânicas de materiais biológicos pode ser um fator decisivo para o sucesso de um equipamento de colheita, processamento, transporte ou seleção. É comum encontrar-se frutos com injúrias mecânicas oriundas de um desses processos. As injúrias que normalmente ocorrem são manchas, marcas ou rachaduras devido a golpes ou cargas excessivas.

Todos os frutos devem passar por um processo de seleção antes de serem comercializados. O processo de seleção visa a obtenção de lotes padronizados por tamanho, forma, peso, estágio de maturação, cor ou densidade. A seleção através da rigidez do produto ainda não é utilizada, pois o ensaio de compressão comumente utilizado é um processo muito lento e caro, por isto impróprio para a seleção de frutos. A classificação por impacto está começando a ser pesquisada, e poderá vir a ser uma opção para a seleção por rigidez. É geralmente aceito que a rigidez é um indicador do tempo de vida do fruto destinado ao consumo. O “aperto com o polegar” é subjetivamente usado comercialmente como indicador do vigor do fruto. Neste trabalho correlaciona-se esse “aperto com o polegar”, ou melhor, o valor da

rigidez do fruto, com suas outras características.

A separação por parâmetros indicativos da rigidez, poderá auxiliar o descarte de frutos podres e murchos, e também poderá ajudar no correto ajuste dos extratores de suco.

Neste trabalho investigou-se a viabilidade do processo de seleção por impacto, e gerou-se elementos para que pesquisas complementares sejam conduzidas, para suprir os elementos de projeto necessários à construção de um equipamento de seleção por impacto.

2. OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são:

- a) Determinar o Firmness da laranja através de ensaios de compressão.
- b) Determinar o Firmness e o Coeficiente de Restituição da laranja através de ensaios de impacto.
- c) Determinar o Teor de Sólidos Solúveis.
- d) Verificar o nível de correlação entre as propriedades medidas.
- e) Verificar a viabilidade do processo de separação por impacto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Propriedades mecânicas de materiais biológicos

Os materiais biológicos apresentam propriedades elásticas. Pode-se, então, calcular as constantes E , G , ν e K , mencionadas por MOHSENIN (1970) como:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.1)$$

onde, de acordo com a Figura 3.1 tem-se:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3.2)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (3.3)$$

Pode-se calcular G , segundo MOHSENIN (1970), por:

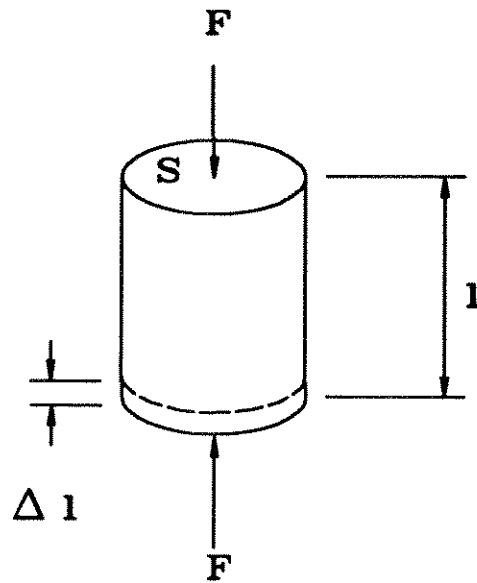


Figura 3.1: Ensaio de compressão uniaxial

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3.4)$$

onde, de acordo com a Figura 3.2, tem-se:

$$\tau = \frac{F}{2S} \quad (3.5)$$

$$\gamma = \frac{D}{l} = \operatorname{tg} \theta \quad (3.6)$$

Como menciona MOHSENIN (1970), para ensaios triaxiais que apresentem as três tensões principais não nulas e iguais, o módulo volumétrico (“bulk modulus”) é expresso por:

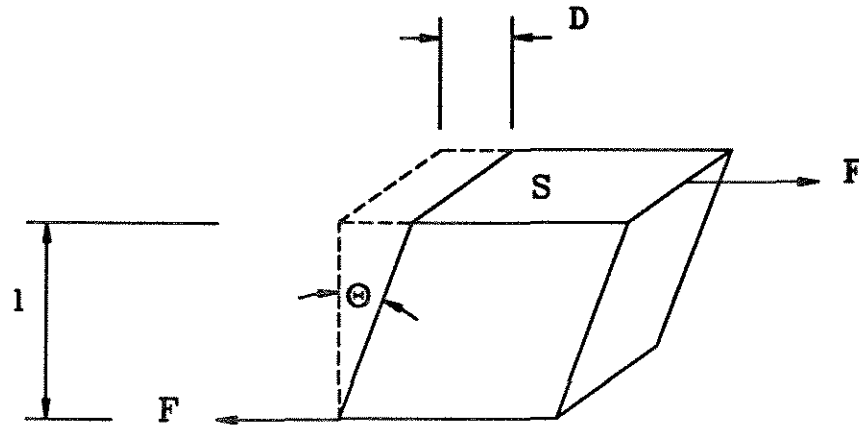


Figura 3.2: Ensaio de cisalhamento

$$K = \frac{P}{\epsilon_v} \quad (3.7)$$

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} \quad (3.8)$$

Um material, quando submetido a cargas axiais, apresenta deformação axial e deformação transversal. De acordo com SHIGLEY (1984), Poisson demonstrou que estas deformações eram proporcionais, expressando um coeficiente definido como a razão entre a deformação transversal e axial.

Como menciona MOHSENIN (1970), a relação entre as constantes elásticas e o coeficiente de Poisson (ν) é dada por:

$$E = 3K(1 - 2\nu) \quad (3.9)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (3.10)$$

Pelas equações (3.9) e (3.10) pode-se correlacionar todas as constantes elásticas.

O comportamento elástico de materiais biológicos foi mencionado por FERRAZ (1987) através da mecânica dos meios contínuos. O autor descreve a deformação e o deslocamento em meios contínuos pelos gradientes de deformação e de deslocamento. O autor utiliza as tensões principais para calcular os invariantes de deformação de Lagrange.

Os materiais biológicos apresentam também comportamento viscoelástico, ou seja, as características elásticas são afetadas pelo tempo de aplicação da carga ou da deformação. Testes de compressão em maçãs, descritos por CLEVENGER, HAMANN (1968), apresentaram dependência da razão de carga. CHAPPELL, HAMANN (1968) propõem uma metodologia para a determinação da função viscoelástica de Poisson e para o módulo viscoelástico de Young.

Os comportamentos viscoelásticos da batata, maçã e pêssego foram estudados por SHERIF (1976) através de modelo de elementos finitos.

A viscoelasticidade combina o comportamento do sólido com o comportamento do líquido. Para pequenas deformações, a viscoelasticidade é considerada linear, e depende apenas do tempo. Para deformações maiores, a viscoelasticidade é função do tempo e da tensão e, neste caso, surge o conceito da viscoplasticidade.

Em certos casos, a viscoelasticidade não linear pode ser apro-

ximada pela viscoelasticidade linear. Contudo, em alguns casos isto não é possível. DAL FABBRO (1979) apresenta uma formulação viscoelástica não linear para polpa de maçã, representando a derivada do tempo como um operador linear, através de derivadas convectivas.

Para descrever o comportamento viscoelástico linear de materiais biológicos, são utilizados, comumente, modelos viscoelásticos compostos por molas e amortecedores. De acordo com MASE (1970), as tensões geradas na mola e no amortecedor podem ser calculadas por:

$$\sigma = E \epsilon \quad (3.11)$$

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon} \quad (3.12)$$

A relação entre tensão e deformação para o modelo viscoelástico de Maxwell (Figura 3.3) é dada por:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (3.13)$$

ou por:

$$\{\partial_t\} \epsilon = \left\{ \frac{\partial_t}{E} + \frac{1}{\eta} \right\} \sigma \quad (3.14)$$

onde:

$$\partial_t = \frac{\partial}{\partial t} \quad (3.15)$$

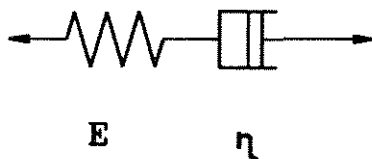


Figura 3.3: Modelo viscoelástico de Maxwell

A generalização do modelo de Maxwell (Figura 3.4) é dada por:

$$\sigma = \frac{\dot{\epsilon}}{\left\{ \frac{\partial_t}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} \right\}} + \frac{\dot{\epsilon}}{\left\{ \frac{\partial_t}{E_2} + \frac{1}{\eta_2} \right\}} + \cdots + \frac{\dot{\epsilon}}{\left\{ \frac{\partial_t}{E_n} + \frac{1}{\eta_n} \right\}} \quad (3.16)$$

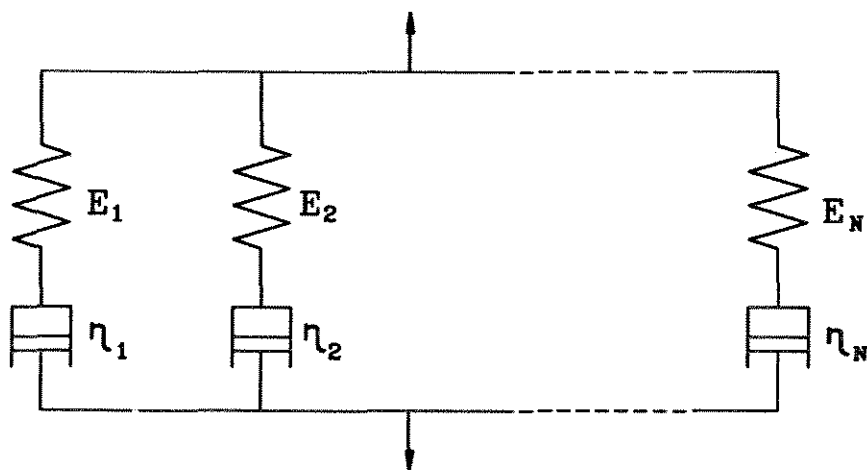


Figura 3.4: Generalização do modelo de Maxwell

Define-se a função de etapas unitárias, de acordo com MASE (1970), como:

$$[U(t - t_1)] = \begin{cases} 0 & p/ t < t_1 \\ 1 & p/ t > t_1 \end{cases} \quad (3.17)$$

Define-se como “relaxation tests” os ensaios em que se impõe uma deformação específica instantânea ϵ_0 , a qual é mantida constante enquanto se mede a tensão (“relaxation”) como função do tempo. Expressando-se em termos da função de etapas unitárias, tem-se:

$$\epsilon = \epsilon_0 [U(t)] \quad (3.18)$$

A tensão (“relaxation”) para o modelo de Maxwell pode ser obtida derivando-se a equação (3.18) e substituindo-se na equação (3.13), obtendo-se:

$$E \epsilon_0 [\delta(t)] = \dot{\sigma} + \frac{\sigma}{\xi} \quad (3.19)$$

onde:

$$[\delta(t)] = \frac{d [U(t)]}{dt} \quad (3.20)$$

$$\xi = \frac{\eta}{E} \quad (3.21)$$

Integrando-se a equação (3.19), obtém-se a tensão (“relaxation”) em termos da função de etapas unitárias para o modelo viscoelástico de Maxwell:

$$\sigma(t) = E \epsilon_0 e^{-t/\xi} [U(t)] \quad (3.22)$$

A tensão (“relaxation”) (equação (3.22)) pode ser escrita em função da “relaxation function” $\phi(t)$, como:

$$\sigma(t) = \phi(t) \epsilon_0 \quad (3.23)$$

Para o modelo generalizado de Maxwell, a “relaxation function”, pode ser determinada por:

$$\phi(t) = \sum_{i=1}^N E_i e^{-t/\xi_i} [U(t)] \quad (3.24)$$

Quando N tender a infinito, o conjunto de constantes (ξ_i, E_i) poderá ser substituído pela função $E(\xi)$, e a equação (3.24) poderá ser escrita em termos de uma integral, de acordo com MASE (1970), como:

$$\phi(t) = \int_0^\infty E(\xi) e^{-t/\xi} d\xi \quad (3.25)$$

Como menciona ROCHA (1988), $E(\xi)$ é chamada “distribuição de tempos de relaxação” ou “espectro de relaxação”.

Utilizando-se o princípio da superposição, pode-se representar a equação (3.23) para um conjunto de funções em etapas, como:

$$\sigma(t) = \sum_{i=0}^x \epsilon_i \phi(t - t_i) \quad (3.26)$$

Pode-se definir ϵ_i como uma função contínua no tempo, analisada como uma infinidade de pequenos deslocamentos em etapas $d\epsilon_i$. Para um material livre de tensão e deformação no tempo $t=0$, a equação (3.26) pode ser escrita na forma de uma integral, como:

$$\sigma(t) = \int_0^t \frac{d\epsilon(t')}{dt'} \phi(t-t') dt' \quad (3.27)$$

Esta integral é conhecida como integral hereditária, devido a tensão em qualquer tempo ser dependente de todo o histórico de deformação.

Outro tipo de modelo viscoelástico, comumente utilizado, é o de Kelvin-Voigt (Figura 3.5), que apresenta uma relação entre tensão e deformação dada por:

$$\sigma = E \epsilon + \eta \dot{\epsilon} \quad (3.28)$$

reescrevendo-se a equação (3.28), tem-se:

$$\sigma = \{E + \eta \partial_t\} \epsilon \quad (3.29)$$

A generalização do modelo de Kelvin (Figura 3.6) é dada por:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{\{E_1 + \eta_1 \partial_t\}} + \frac{\sigma}{\{E_2 + \eta_2 \partial_t\}} + \cdots + \frac{\sigma}{\{E_n + \eta_n \partial_t\}} \quad (3.30)$$

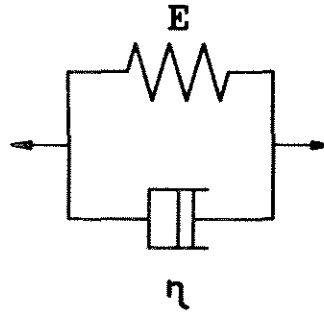


Figura 3.5: Modelo viscoelástico de Kelvin

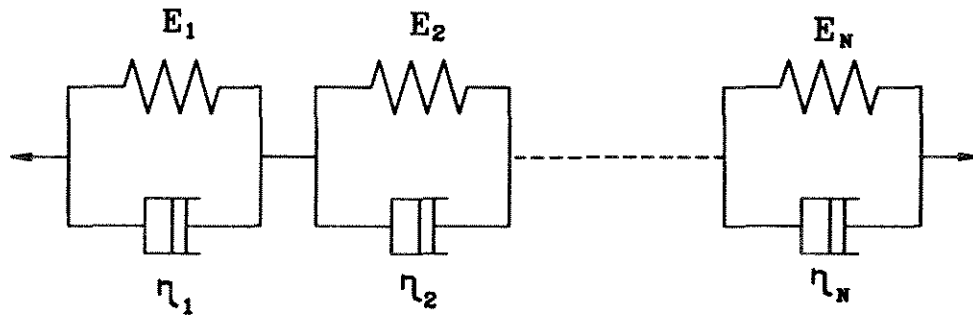


Figura 3.6: Generalização do modelo de Kelvin

Define-se “creep tests” como os ensaios em que o espécime é submetido a uma tensão instantânea σ_0 , mantida constante enquanto se mede a deformação (“creep response”) em função do tempo. Dessa forma, tem-se:

$$\sigma = \sigma_0 [U(t)] \quad (3.31)$$

Substituindo-se a equação (3.31) em (3.28), tem-se a representação “creep test” em termos da função de etapas unitárias para o modelo de Kelvin:

$$\frac{\epsilon}{\xi} + \dot{\epsilon} = \frac{\sigma_0 [U(t)]}{\eta} \quad (3.32)$$

Integrando a equação (3.32), encontra-se a resposta “creep” para o modelo de Kelvin:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-t/\xi}) [U(t)] \quad (3.33)$$

A resposta “creep” para o “creep test” (equação (3.33)) pode ser escrita na forma:

$$\epsilon(t) = \psi(t) \sigma_0 \quad (3.34)$$

onde $\psi(t)$ é chamada “creep function” e, para o modelo generalizado de Kelvin, ela é dada por:

$$\psi(t) = \sum_{i=1}^N J_i (1 - e^{-t/\xi_i}) [U(t)] \quad (3.35)$$

onde:

$$J_i = 1/E_i \text{ (denominado “compliance”)} \quad (3.36)$$

Quando N tender a infinito, o conjunto de constantes (ξ_i, J_i) poderá ser substituído pela função $J(\xi)$, e a equação (3.35) poderá ser escrita em termos de uma integral, de acordo com MASE (1970), como:

$$\psi(t) = \int_0^{\infty} J(\xi) (1 - e^{-t/\xi}) d\xi \quad (3.37)$$

Como menciona ROCHA (1988), $J(\xi)$ é chamado “distribuição de tempos de retardamento” ou “espectro de retardamento”.

Utilizando-se o princípio da superposição, pode-se representar a equação (3.34) para um conjunto de funções em etapas, como:

$$\epsilon(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \sigma_i \psi(t - t_i) \quad (3.38)$$

Pode-se definir σ_i como uma função contínua no tempo, analisada como uma infinidade de pequenos acréscimos de tensões $d(\sigma(t))$. Para um material livre de tensão e deformação no tempo $t=0$, a equação (3.38) poderá ser representada na forma de uma integral, como:

$$\epsilon(t) = \int_0^t \frac{d\sigma(t')}{dt'} \psi(t - t') dt' \quad (3.39)$$

cuja integral é conhecida como integral hereditária, devido à deformação em qualquer tempo ser dependente de todo o histórico de tensão.

Como ambas as integrais “creep”, equação (3.37), e “relaxation”, equação (3.25), são usadas para materiais viscoelásticos, deve existir uma relação entre elas. Embora esta relação não seja facilmente encontrada, pode-se defini-la usando a transformada de Laplace:

$$\bar{f}(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (3.40)$$

É possível mostrar que as transformadas de Laplace $\bar{\psi}(s)$ e $\bar{\phi}(s)$ são relacionadas em termos da variável de Laplace (s), por:

$$\bar{\psi}(s) \bar{\phi}(s) = \frac{1}{s^2} \quad (3.41)$$

3.2 Classificação de frutos

Uma deformação é considerada plástica se, após retirar a força que a causou, esta continuar a existir. Deformações plásticas são consideradas injúrias mecânicas, e contribuem para a perda de qualidade e valor comercial de muitos produtos agrícolas.

A classificação de laranjas, descrita no folheto Classifique Melhor a Laranja, prevê três tipos de defeitos causados por danos mecânicos:

1. esmagamento - são causados pelas ações mecânicas do granizo, vento, transporte e por outros meios;
2. ferimentos e cortes - são causados, também, pelas ações mecânicas do granizo, vento, transporte ou por outros meios;
3. 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.

O referido folheto prevê, ainda, mais seis defeitos que devem resultar no descarte do fruto:

- podridão;
- manchas de pragas;
- manchas de doenças;
- leprose;
- frutos murchos;
- frutos passados.

Com base nesses defeitos é que se faz a classificação visual, na qual os frutos são separados manualmente de acordo com seus aspectos fisiológicos, ou seja, são descartados quando o selecionador julgar que o fruto não possui o padrão necessário para a comercialização. Esse sistema é sujeito a falhas e requer muita concentração do selecionador; além disso, é necessário grande número de selecionadores para agilizar o processo de classificação. De acordo com PELEG (1987), este tipo de classificação está sendo feita atualmente por computador, da seguinte forma: os frutos são submetidos a inspeção visual um a um (por exemplo através de esteira rolante), onde são fortemente iluminados e filmados com uma filmadora de vídeo. As imagens são comparadas em um computador com padrões do fruto, existentes na memória do computador, e assim classificados. O computador poderá descartar frutos fora do padrão de forma, tamanho, cor e manchas na face. Dessa forma, tem-se uma classificação muito mais rápida e segura do que quando feita manualmente.

Outro processo de classificação de frutos muito utilizado é a separação por peso. Processos mecânicos permitem uma rápida classificação de frutos de acordo com seu peso, da seguinte forma: em uma roda giratória são presos diversos

suportes onde são colocados os frutos, e na medida que a roda gira, os frutos são retirados do suporte de acordo com seu peso. Os frutos mais pesados serão retirados primeiro, enquanto os mais leves serão retirados por último.

De acordo com PELEG (1985) há também a classificação por densidade. Nesse tipo de classificação, os frutos são imersos em um líquido com densidade conhecida, e separados em vários níveis de acordo com suas densidades.

BURKNER, KINCH (1968) construíram um dispositivo para medir textura em fatias de mamão Papaya. A amostra era colocada entre duas placas e então carregada até que ocorresse deformação permanente. As amostras estavam divididas em quatro gradientes de cor, a saber: verde, verde levemente superado, 1/4 amarelo e 1/2 amarelo. Os autores concluem que a taxa de força/deslocamento, o índice de textura e o índice de cor possuem alta sensibilidade para determinação da maturação em mamão Papaya.

PELEG (1974) desenvolveu um experimento para a determinação da textura de amostras de mamão Papaya através do uso de penetrômetro. Este autor chegou à conclusão de que a velocidade de aplicação da carga afetou os resultados, e de que não há correlação entre o teor de sólidos solúveis e a textura da polpa. Nos ensaios feitos com a fruta inteira, o autor chegou aos mesmos resultados, só que os valores de força encontrados para o “yielding point” são muito maiores, demonstrando que a casca é o principal responsável pela rigidez do fruto.

KUMAR, WANG (1971) desenvolveram um experimento com a finalidade de verificar o comportamento do mamão Papaya sob cargas senoidais de baixa frequência. Estimaram a energia absorvida antes do fruto ser danificado

e propuseram um modelo matemático para explicar o fenômeno. O tempo de cada ensaio durava aproximadamente 5 minutos; os resultados obtidos mostram que o uso de cargas dinâmicas é a melhor maneira de se determinar modelos mecânicos de produtos viscoelásticos. O número de ciclos a que o fruto pode ser submetido, até que ocorra a injúria, depende do grau de maturação e do valor da força aplicada, mas não depende da frequência dessa força.

Lewis ¹, citado por McCARTHY, SARIG (1989), cita vários métodos de classificação não destrutivos, como densidade específica, impedância, capacitância, ultra-som, capacidade calórica e transmissão de luz.

McCARTHY, SARIG (1989) desenvolveram uma metodologia para a determinação do grau de maturação de abacates através do uso de ressonância magnética (NMR). No experimento foram utilizados os métodos de contraste de imagem, intensidade de sinal e taxa de decaimento do spin. Nos três métodos obtiveram uma boa correlação entre esses parâmetros e a porcentagem de peso seco do produto.

NAHIR et al (1989) realizaram um experimento para a predição da expectativa de vida de citrus através da determinação da força de impacto. Para os autores, a entrega de frutos frescos é um fator importante para o crescimento das exportações. Como a distância do centro exportador ao importador está relacionada com o tempo de viagem, a expectativa de vida dos frutos irá governar o fluxo das exportações. Foi utilizado o modelo teórico de Maxwell para explicar o fenômeno do impacto de uma laranja sobre uma superfície lisa. A força de impacto pode ser calculada de acordo com a seguinte equação:

¹Lewis, C. E. The maturity of avocados-a general review. *J. Sci. Agric.*, v. 29, p. 857-866, 1978.

$$F = B \sin(\pi t / t_i) e^{(-C_\eta \pi t / t_i)} \quad (3.42)$$

A equação (3.43), apresentada a seguir, descreve a rigidez da fruta através do modelo matemático (equação (3.42)), e serve como critério para descrever o experimento.

$$K_3 = \frac{C I}{t_i^2} \quad (3.43)$$

A rigidez média dos frutos decresce em função do tempo de armazenagem. Foi assumido que a taxa de redução da rigidez em função do tempo de armazenagem é proporcional ao valor da rigidez, como se segue:

$$\frac{\partial K_3}{\partial t} = -A K_3 \quad (3.44)$$

Cuja solução é:

$$K_3 = K_{3i} e^{(-A t_d)} \quad (3.45)$$

Os autores determinaram K_{3i} e A experimentalmente para a Laranja- Valência, e obtiveram a seguinte equação:

$$K_3 = 100 e^{(-0.0112 t_d)} \quad (3.46)$$

Finalmente, NAHIR et al (1989) concluem, afirmando que esta equação pode ser utilizada para estabelecer a rigidez da Laranja-Valência, e com isto prever sua expectativa de vida (“shelf life”).

Segundo NELSON, MOHSENIN (1968), o termo “firmness” pode ser usado para comparação do módulo de elasticidade de materiais biológicos. É descrito como uma característica elástica de materiais biológicos, e definido por :

$$Firm = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad (3.47)$$

3.3 Pressão de contato entre um corpo esférico e uma superfície plana

O problema da distribuição da pressão entre dois corpos esféricos em contato foi resolvido por H. Hertz ², citado por TIMOSHENKO, GOODIER (1980). O contato é suposto sem atrito. Quando não existe deslizamento relativo entre as superfícies por ocasião do contato, o problema se modifica, a menos que as esferas sejam exatamente similares. Uma solução, quando não ocorre deslizamento para esferas desiguais, foi apresentada por LUBKIN (1962).

Caso não haja pressão entre os corpos, o contato se reduzirá a um ponto. Considera-se um ponto m na superfície de uma esfera (Figura 3.7), distante r do eixo z, e a uma distância Z_2 do plano tangente, dada por:

²Hertz, H. J. Math. (Crelle's J.), v. 92, 1881.

— Gesammelte Werke von Heinrich Hertz, v. 1, Leipzig, 1895. p.155-196.

— Miscellaneous Paper. MacMillan and Company, New York, 1896. p.146-183.

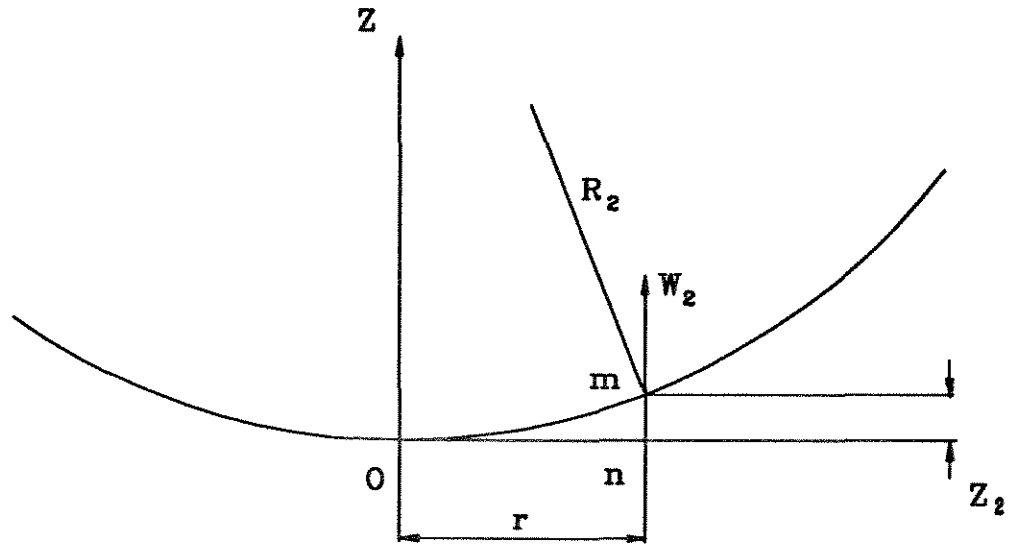


Figura 3.7: Contato entre esfera e plano

$$(R_2 - Z_2)^2 + r^2 = R_2^2 \quad (3.48)$$

reescrevendo-se:

$$r^2 = 2R_2 Z_2 - Z_2^2 \quad (3.49)$$

Considerando a distância r muito pequena em relação à R_2 ($R_2 \geq 10r$), e sabendo-se que $Z_2 < r$, pode-se desprezar o último termo da equação (3.49), resultando em:

$$Z_2 = \frac{r^2}{2R_2} \quad (3.50)$$

reescrevendo-se:

$$Z_2 = \beta r^2 \quad (3.51)$$

onde:

$$\beta = \frac{1}{2R_2} \quad (3.52)$$

Caso a esfera seja comprimida por uma força F , atuando sobre o eixo z , existirá uma deformação nas vizinhanças do ponto O , de tal forma que a região de contato entre a esfera e o plano será uma superfície circular, chamada superfície de contato. Seja W_2 o deslocamento em relação a z , proveniente da deformação local sobre o ponto m . Seja D a aproximação entre o ponto O e um ponto sobre o eixo Z , cujos efeitos da deformação local sejam desprezíveis. Se m e n forem abrangidos pela superfície de contato, tem-se:

$$Z_2 = D - W_2 \quad (3.53)$$

Substituindo-se a equação (3.51) em (3.53), tem-se:

$$W_2 = D - \beta r^2 \quad (3.54)$$

De acordo com TIMOSHENKO, GOODIER (1980), uma carga distribuída sobre uma parte do contorno de um sólido semi-infinito, produzirá um

deslocamento W_2 dado por:

$$W_2 = (K_1 + K_2) \frac{q_0 \pi^2}{4a} (2a^2 - r^2) \quad (3.55)$$

$$K_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \quad (3.56)$$

$$K_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \quad (3.57)$$

Substituindo-se a equação (3.54) em (3.55), tem-se:

$$D - \beta r^2 = (K_1 + K_2) \frac{q_0 \pi^2 a}{2} - (K_1 + K_2) \frac{q_0 \pi^2}{4a} r^2 \quad (3.58)$$

cujas soluções para quaisquer valores de r é :

$$D = (K_1 + K_2) \frac{q_0 \pi^2 a}{2} \quad (3.59)$$

$$a = (K_1 + K_2) \frac{q_0 \pi^2}{4\beta} \quad (3.60)$$

Considerando uma distribuição hemisférica de pressão, tem-se que a pressão máxima é 1.5 vezes a pressão média sobre a superfície de contato:

$$q_0 = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi a^2} \quad (3.61)$$

No caso de materiais biológicos sendo comprimidos contra uma placa plana e lisa de aço, tem-se:

$$E_1 \gg E_2, \text{ e portanto } K_1 \approx 0$$

Substituindo (3.57) e (3.61) em (3.59) e (3.60), tem-se a deformação e o raio da superfície de contato:

$$D = \frac{3}{4} F \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \frac{1}{a} \quad (3.62)$$

$$a^3 = \frac{3}{4} F \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} R_2 \quad (3.63)$$

Substituindo-se (3.63) em (3.62), tem-se:

$$D^3 = \left(\frac{3}{4} F \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \right)^2 \frac{1}{R_2} \quad (3.64)$$

Reescrevendo-se a equação (3.64), tem-se :

$$E_2 = 0.75 F (1 - \nu_2^2) \frac{1}{D^{3/2}} \frac{1}{R_2^{1/2}} \quad (3.65)$$

VÉLEZ PASOS (1987) também utilizou a teoria de contato de Hertz para o cálculo do módulo de elasticidade de laranja. O autor mediu o raio

da superfície de contato e utilizou a equação (3.65) para o cálculo do módulo de elasticidade.

3.4 Pressão de contato entre um elipsóide e uma superfície plana

O caso mais geral de dois corpos elásticos em contato, pode ser estudado da mesma maneira que o anterior. Admitindo-se que a superfície adjacente ao ponto de contato é arredondada e pode ser considerada como superfície de segundo grau, tem-se, caso o corpo seja comprimido contra uma placa plana, segundo a direção normal ao plano tangente, uma superfície de contato com contorno elíptico.

Considera-se agora o caso de um elipsóide com excentricidade próxima à unidade (que possui seu raios principais de curvatura, R'_2 e R_2'' , aproximadamente iguais), sendo comprimido sobre uma superfície plana. Se b e c forem os semi-eixos do contorno elíptico da superfície de contato, e sabendo-se que b e c são muito menores que R'_2 e R_2'' , pode-se considerar b igual a c , isto é, pode-se aproximar a superfície de contato por uma superfície circular. Para se calcular o raio da superfície de contato, substitui-se a equação (3.66) na equação (3.63), e se chega à equação (3.67):

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R'_2} + \frac{1}{R_2''} \right) \quad (3.66)$$

$$a = \left(\frac{3}{2} F \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \left(\frac{R'_2 R_2''}{R'_2 + R_2''} \right) \right)^{1/3} \quad (3.67)$$

e substituindo-se a equação (3.66) em (3.65), tem-se :

$$\frac{E_2}{(1 - \nu_2^2)} = \frac{0.530 F}{D^{3/2}} \left(\frac{1}{R_2'} + \frac{1}{R_2''} \right)^{1/2} \quad (3.68)$$

Esta última equação está de acordo com o proposto pela ASAE STANDARDS (1989).

Para o caso de uma laranja, seus raios principais de curvatura podem ser calculados, de acordo com a Figura 3.8, por:

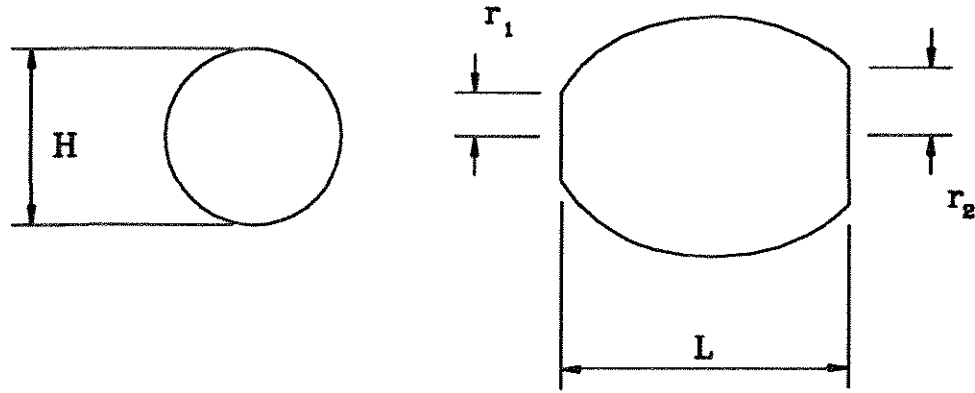


Figura 3.8: Cálculo dos raios principais de curvatura de uma laranja

$$R_2' = \frac{H}{2} \quad (3.69)$$

$$R_2'' = \frac{L^2 + (H - r_1 - r_2)^2}{4(H - r_1 - r_2)} \quad (3.70)$$

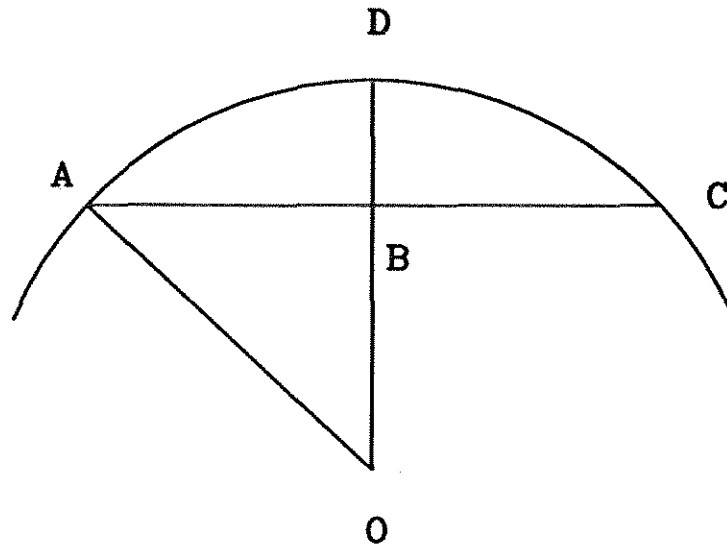


Figura 3.9: Cálculo do raio de uma esfera

O cálculo de R_2'' baseia-se no raio de uma esfera, calculado pela equação (3.71) e Figura 3.9 , dados a seguir:

$$\text{raio da esfera} = \frac{(AC)^2}{8BD} + \frac{BD}{2} \quad (3.71)$$

3.5 Impacto elástico entre uma esfera e uma superfície plana

Consideram-se duas esferas com movimentos em sentido contrário, ao longo da linha que une seus centros. No momento em que elas entram em contato através do ponto O, a força de compressão F começa a atuar. Cada uma das esferas será desacelerada de acordo com as seguintes equações:

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = -F \quad (3.72)$$

$$m_2 \frac{dv_2}{dt} = -F \quad (3.73)$$

Sendo dD/dt a velocidade de aproximação das duas esferas, tem-se:

$$\frac{dD}{dt} = v_1 + v_2 \quad (3.74)$$

Derivando-se a equação (3.74) em relação a t , tem-se:

$$\frac{d^2 D}{dt^2} = -\frac{F}{m_1} - \frac{F}{m_2} \quad (3.75)$$

Para esferas que não diferem muito em tamanho e propriedades, pode-se utilizar os resultados obtidos para condições de carregamento estático. Portanto, para o caso de uma esfera em contato com uma superfície plana não se pode utilizar os resultados obtidos anteriormente, apesar disto, de acordo com TIMOSHENKO, GOODIER (1980), resultados experimentais demonstram que estas analogias fornecem aproximações muito boas.

Considerando-se a esfera 1 com tamanho e massa infinita, a equação (3.75) pode ser escrita como:

$$\frac{d^2 D}{dt^2} = -n_1 F \quad (3.76)$$

onde:

$$n_1 = \frac{1}{m_2} \quad (3.77)$$

Reescrevendo-se a equação (3.64), tem-se:

$$F = n D^{3/2} \quad (3.78)$$

onde :

$$n = \frac{4}{3} \frac{E_2}{(1 - \nu_2^2)} R_2^{1/2} \quad (3.79)$$

Substituindo-se a equação (3.78) em (3.76), obtém-se :

$$\frac{d^2 D}{dt^2} = -n n_1 D^{3/2} \quad (3.80)$$

Multiplicando-se ambos os lados da equação (3.80) por dD/dt ,

tem-se:

$$\frac{d^2 D}{dt^2} \frac{dD}{dt} = -n n_1 D^{3/2} \frac{dD}{dt} \quad (3.81)$$

Integrando-se a equação (3.81), tem-se:

$$\frac{1}{2} \left[\left(\frac{dD}{dt} \right)^2 - v^2 \right] = -nn_1 \frac{2}{5} D^{5/2} \quad (3.82)$$

onde:

v = velocidade de aproximação no instante inicial

Considerando-se $dD/dt = 0$ na equação (3.82) , obtém-se o valor da aproximação máxima (D_1):

$$D_1 = \left(\frac{5}{4} \frac{v^2}{nn_1} \right)^{2/5} \quad (3.83)$$

$$D_1 = \left(\frac{15}{16} \frac{v^2 m_2 (1 - \nu_2^2)}{R_2^{1/2} E_2} \right)^{2/5} \quad (3.84)$$

Utilizando as equações (3.63) e (3.64), pode-se encontrar o raio da superfície de contato e a máxima força compressiva.

Para o cálculo da duração do choque, da equação (3.82) obtém-se:

$$\left(\frac{dD}{dt} \right)^2 = v^2 - \frac{4}{5} nn_1 D^{5/2} \quad (3.85)$$

Rearranjando a equação (3.85), tem-se:

$$dt = \frac{dD}{(v^2 - 4/5nn_1 D^{5/2})^{1/2}} \quad (3.86)$$

Substituindo-se a equação (3.83) em (3.86), e expressando-se a deformação como uma porcentagem da deformação máxima ($D = x D_1$), tem-se:

$$dt = \frac{D_1}{v} \frac{dx}{(1 - x^{5/2})^{1/2}} \quad (3.87)$$

Integrando-se a equação (3.87), obtém-se o tempo de impacto:

$$t_i = \frac{2D_1}{v} \int_0^1 \frac{dx}{(1 - x^{5/2})^{1/2}} \quad (3.88)$$

Resolvendo-se a integral, obtém-se:

$$t_i = 2.9432 \frac{D_1}{v} \quad (3.89)$$

Substituindo-se a equação (3.84) em (3.89), tem-se:

$$t_i = 2.9432 \left(\frac{15^2 m_2^2 (1 - \nu_2^2)^2}{16^2 v R_2 E_2^2} \right)^{1/5} \quad (3.90)$$

E, finalmente, reescrevendo-se a equação (3.90), tem-se:

$$\frac{E_2}{(1 - \nu_2^2)} = 13.9327 \frac{m_2}{(t_i^5 v R_2)^{1/2}} \quad (3.91)$$

Conclui-se que o Firmness pode ser calculado utilizando-se o tempo de impacto, a massa do espécime, a velocidade no momento de impacto e o raio do espécime. Para o caso do impacto de uma laranja sobre uma superfície plana, o raio da laranja deve ser calculado de acordo com a equação (3.66).

DELWICHE (1987) propõe caracterizar o impacto através de dois parâmetros:

$$C_1 = \frac{F_p}{t_p} \quad (3.92)$$

$$C_2 = \frac{F_p}{t_p^2} \quad (3.93)$$

Para a simulação de um ensaio de impacto para três esferas com diferentes valores do módulo de elasticidade, proposta por DELWICHE (1987), utilizou-se as equações (3.65) e (3.87) e os seguintes parâmetros, como mostrado na Figura 3.10:

$$R = 0,032 \text{ m}$$

$$m = 0,152 \text{ Kg}$$

$$\nu = 0,49$$

$$v = 0,767 \text{ m/s}$$

Pode-se notar que C_2 é mais sensível à variação do módulo de elasticidade do que C_1 .

É interessante observar que:

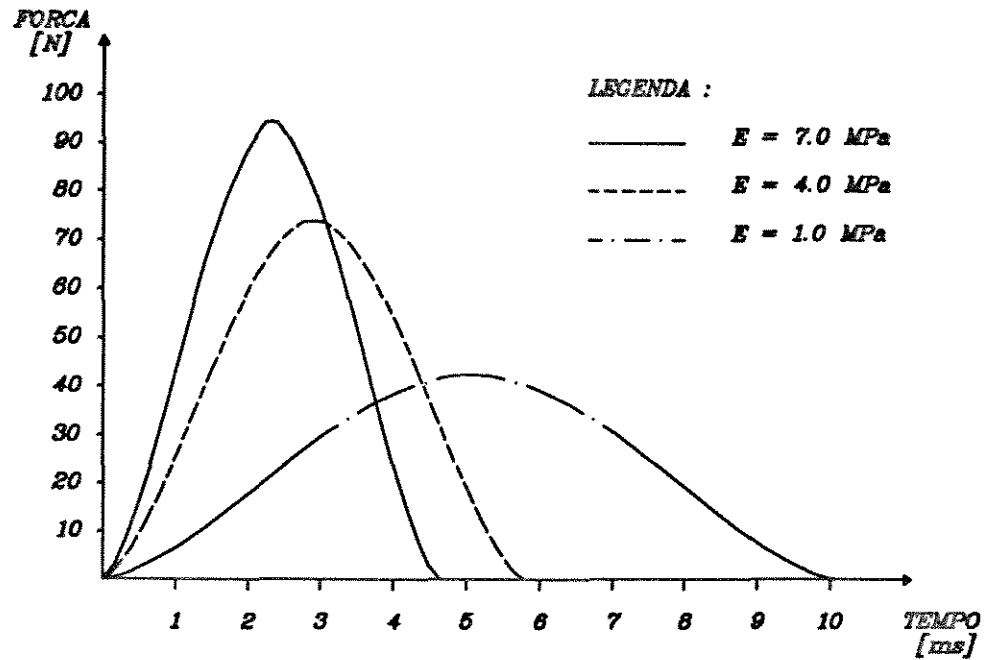


Figura 3.10: Simulação de ensaio de impacto

$$F_p t_p = 2,9432 \frac{5}{8} v m \quad (3.94)$$

Ou seja, o produto entre os valores da força de pico e do tempo decorrido para atingir esse valor (a contar do contato inicial), é independente do módulo de elasticidade (depende apenas da velocidade e da massa).

3.6 Considerações sobre impacto não elástico

De acordo com MOHSEIN (1970), um impacto elástico é caracterizado pela simetria da curva força versus tempo. Já o impacto plástico é caracterizado pela assimetria desta mesma curva, conforme mostrado na Figura 3.11.

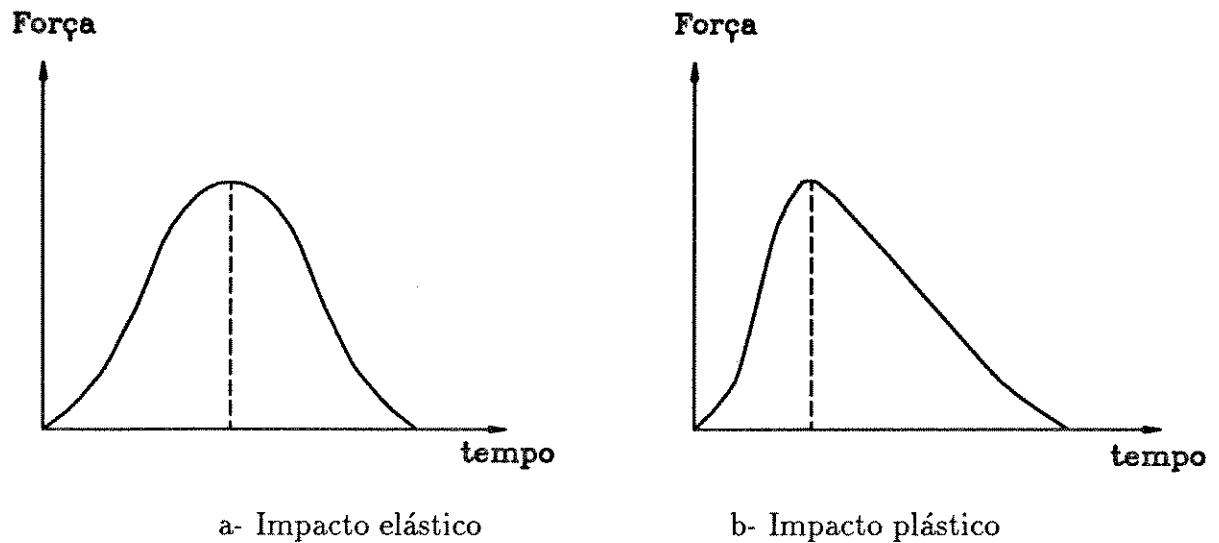


Figura 3.11: Caracterização de impacto

De acordo com Bowden, Tabor ³, citados por MOHSENIN (1970), pode-se subdividir o impacto entre dois corpos em quatro fases distintas, a saber:

1. Deformação elástica inicial, em que os corpos se comportam de acordo com a teoria elástica de Hertz.
2. Início da deformação plástica. Esta fase tem um tempo de duração muito curto, e nela parte da energia dos corpos será absorvida por deformações plásticas. Esta fase é considerada elástica-plástica.
3. Deformação completamente plástica. Toda deformação que ocorrer nesta fase permanecerá após a colisão.
4. Recuperação elástica, na qual será liberado todo o “stress” elástico armazenado

³Bowden, F. P., Tabor, D. *The friction and lubrication of solids*. London, Oxford University Press, 1954.

nos corpos.

Um corpo que colide contra uma superfície rígida terá parte de sua energia cinética absorvida por uma deformação plástica. Esta variação na energia cinética causará uma diferença entre velocidade final e inicial.

Pode-se definir o coeficiente de restituição (e), como:

$$e = \frac{v_f}{v_i} \quad (3.95)$$

ou:

$$e = \left(\frac{h_f}{h_i} \right)^{1/2} \quad (3.96)$$

A variação na energia cinética será dada por:

$$\Delta Energia = \frac{mv_i^2(e^2 - 1)}{2} \quad (3.97)$$

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

Para os ensaios de compressão foi utilizada uma prensa mecânica de velocidade variável, denominada “Ottawa Texture Measuring System” (Research Model, Cannery Machinery Ltda). A prensa possui uma célula de carga extensiométrica, tipo membrana, com capacidade máxima de 50 kgf (Interface, modelo ULC 50), e um condicionador de sinais, de marca Daytronic, modelo 9010.

Foi utilizado um microcomputador, de marca Apple IIe, para aquisição de dados. A ligação do microcomputador com outros dispositivos foi feita através de uma interface de entrada/saída de sinais Analógicos/Digitais, de marca Cyborg, e modelo Isaac 91-A.

Os espécimes submetidas ao ensaio de compressão foram colocados na prensa mecânica, entre as duas superfícies planas, conforme mostrado na Figura 4.1. Quando iniciada a compressão, os valores de força aplicada foram medidos através da célula de carga extensiométrica. O sinal elétrico, proveniente desta célula de carga, foi amplificado no condicionador de sinais e armazenado na memória do computador

Apple IIe através da interface. Esta interface foi programada para executar a reversão da velocidade, ou desligamento automático, quando a força aplicada excedesse a um valor pré-determinado.

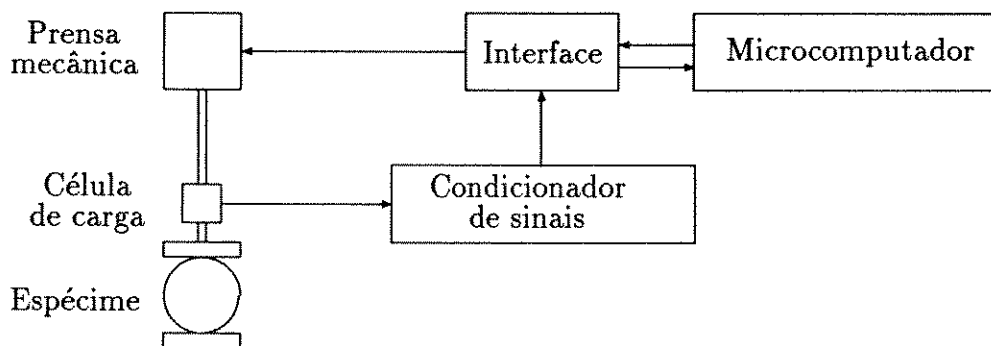


Figura 4.1: Esquema de ensaio de compressão

Com a velocidade de compressão do espécime e o tempo dispendido para comprimir o espécime, pode-se calcular a deformação. Para o caso em estudo, a deformação é definida como metade da variação da distância entre as duas superfícies planas.

A parte experimental foi dividida em uma série de ensaios destrutivos, e em três séries de ensaios não destrutivos. Para a primeira série de ensaios não destrutivos, realizada em abril/91, foi extraída uma amostra de 23 espécimes de Laranja-pêra, de um lote fornecido pela empresa Citrossuco. Para a segunda série de ensaios, realizado em julho/92, foi extraída uma amostra de 10 espécimes de Laranja-pêra, de um lote adquirido no CEASA-Campinas. Para comparação dos processos de ensaios, optou-se pela utilização de espécimes mais homogêneos, e foi realizada uma terceira série de ensaios utilizando-se 11 bolas de tênis.

Após cada ensaio de compressão não destrutivo, os espécimes foram submetido ao ensaio de impacto.

Todos os espécimes tiveram suas dimensões características (H, L, r_1, r_2) mensuradas através de um paquímetro universal Mitutoyo (série 530 com comprimento 200 mm e precisão de 0,01mm); seus pesos foram mensurados através de uma balança (marca Nagem, modelo Owa Labor) com precisão de 0,5 gf. Os espécimes foram classificados em três padrões de cores: mais de 50% de sua superfície amarelada (AM), menos de 50% de sua superfície amarelada (1/2 AM) e fruto totalmente esverdeado (VD).

Para a determinação do teor de sólidos solúveis utilizou-se um refratômetro, de marca Atago e modelo N1(Brix 0 ~ 32%), com precisão de 0,1%.

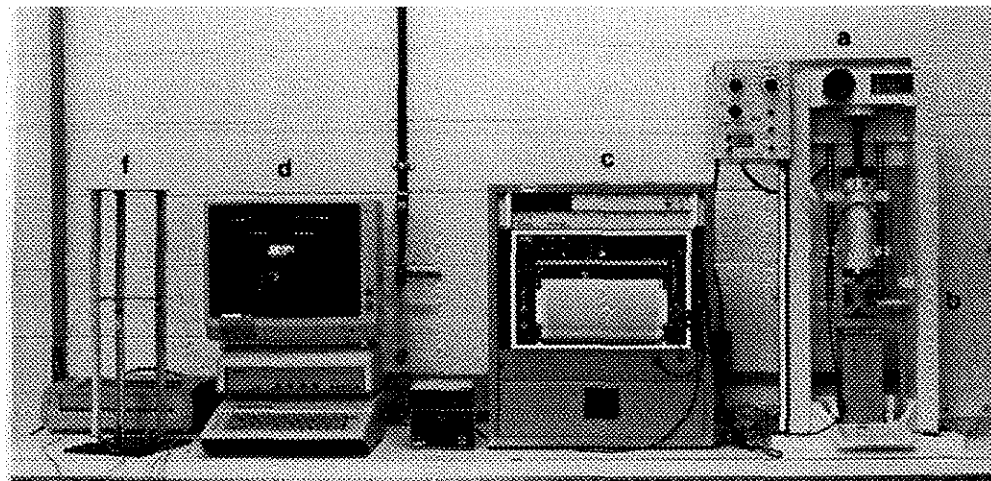


Figura 4.2: Vista geral dos equipamentos utilizados: a)Prensa mecânica b)célula de carga c)condicionador de sinais d)microcomputador e)interface f)dispositivo de ensaio de impacto.

4.2 Ensaios de ruptura

Os ensaios de compressão têm como teoria básica o exposto nos itens 3.3 e 3.4, pois são feitos com o fruto inteiro. Tem-se, nestes ensaios, a superfície curva da laranja sendo comprimida por duas superfícies planas. O ponto inicial de contato entre as superfícies passa a ser uma superfície de contato, e, portanto, tem-se uma distribuição espacial de tensões.

Inicialmente as laranjas foram submetidas a compressão até atingir o ponto de ruptura. As laranjas foram comprimidas entre duas placas planas, lisas e polidas, e uma velocidade de compressão de 143 mm/min. ASAE STANDARDS (1989) sugere a utilização de 25 mm/min, mas devido a problemas de capacidade de memória do computador, optou-se por utilizar uma velocidade maior. Registrou-se a força aplicada e a deformação do espécime (Figura 4.2), cuja a área sob a curva fornece a energia absorvida pela laranja até a ruptura. A curva de ruptura apresentada na Figura 4.3 foi obtida experimentalmente, mas é representativa de fontes citadas por MOHSENIN (1970).

A curva característica de ruptura de uma laranja pode ser dividida em dois trechos, a saber:

- Trecho I - caracterizado por pequenas deformações, e onde é válida a teoria de contato de Hertz;
- Trecho II - trecho linear, onde não se aplica a teoria de contato de Hertz.

O ensaio de ruptura é considerado um teste destrutivo, pois nele o fruto é

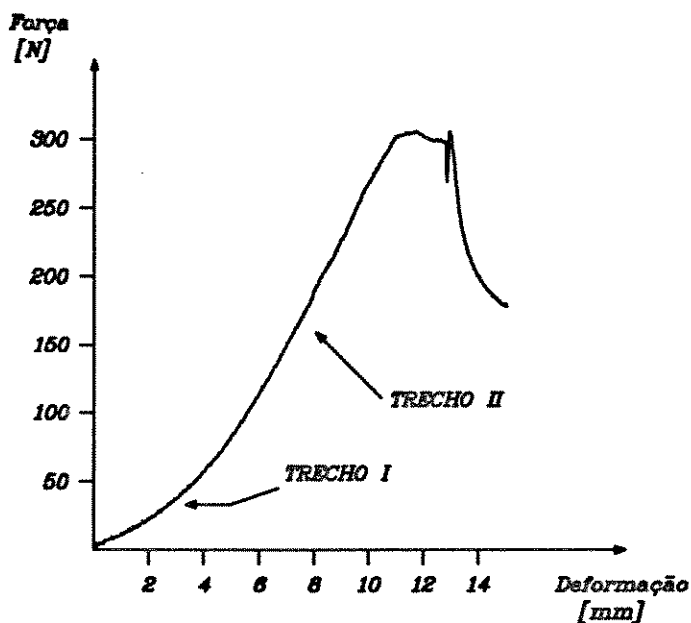


Figura 4.3: Características do ensaio de compressão até a ruptura

danificado.

Foram realizados 30 ensaios de ruptura antes da realização da primeira série de ensaios não destrutivos. Foram realizados 352 ensaios para determinações de propriedades mecânicas (firmness e coeficiente de restituição) na primeira série de ensaios, 362 ensaios na segunda série e 220 ensaios na terceira série. No total foram realizados 964 ensaios para determinações de propriedades mecânicas.

4.3 Ensaios não destrutivos de compressão

Para cada ensaio tem-se uma curva Força versus Deformação, a qual está descrita pela equação (3.68). Para se chegar a valores característicos da curva, utiliza-se o método dos mínimos quadrados, da seguinte forma:

Recapitulando-se a equação (3.78), tem-se:

$$F = n D^{(3/2)} \quad (4.1)$$

Utilizando-se a equação (3.47) e (3.66) para reescrever a equação (3.79), tem-se:

$$n = \frac{Firm}{0.530 \sqrt{1/R_2' + 1/R_2''}} \quad (4.2)$$

Aplicando o método dos mínimos quadrados para :

$$Y = a_1 + a_2 X \quad (4.3)$$

onde,

$$Y = F \quad (4.4)$$

$$X = D^{(3/2)} \quad (4.5)$$

chega-se a:

$$n = a_2 \quad (4.6)$$

Substituindo-se a equação (4.2) na (4.6), tem-se:

$$Firm = a_2 0.530 \sqrt{\frac{1}{R_2'} + \frac{1}{R_2''}} \quad (4.7)$$

$a_1 \Rightarrow$ Teoricamente é o valor da carga a partir do qual foi iniciado o ensaio (0,02 kgf). Na prática pode ser definido como um desvio da curva obtida em relação à teórica.

Para a execução dos ensaios de compressão, na sua segunda série, optou-se por girar os espécimes em 90° após cada repetição. Dessa forma temos um eixo de compressão nas repetições ímpares e outro nas pares.

4.4 Ensaio de impacto

Uma vez que para a determinação do firmness não há necessidade de se medir a força de impacto, montou-se um dispositivo para medir apenas o tempo de impacto. O dispositivo constitui-se de um tripé que sustenta uma placa lisa articulada em uma de suas extremidades e um mecanismo que trava a outra extremidade, conforme mostrado na Figura 4.3 . O espécime é colocado em cima da placa e, quando o mecanismo é liberado, o espécime cai em queda livre até atingir a superfície de medição. A superfície de medição é composta por uma placa de aço de 10 mm de espessura, apoiada em bancada de concreto.

No centro da superfície de medição tem-se o cruzamento de dois feixes de raios infra-vermelho produzidos por leds (PSUS 3400) que, quando interrompidos, disparam um cronômetro. Este cronômetro é composto por uma subrotina escrita em linguagem Assembler, e serve para medir o tempo que o espécime permanece em contato com a superfície (tempo de impacto - t_i) e o tempo decorrido entre o final do primeiro e o início segundo impactos (tempo de rebote - t_r). Com t_i e t_r medidos, o firmness é calculado pela equação (3.91), e o coeficiente de restituição é obtido pela

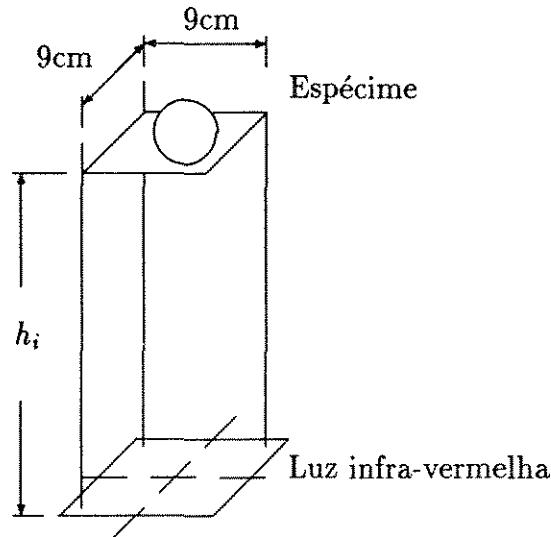


Figura 4.4: Esquema do dispositivo de ensaio de impacto

equação (3.96).

O diagrama elétrico da interface do sistema de aquisição de dados, desenvolvido especialmente para este trabalho, é apresentado no Apêndice A, e a subrotina que faz a aquisição de dados desta interface é apresentada no Apêndice C.4.

A equação (3.91) descreve um impacto perfeitamente elástico entre uma esfera e uma superfície plana. Como nos testes realizados os impactos não foram perfeitamente elásticos, espera-se da equação (3.91) valores distintos dos calculados pela equação (3.68) para ensaios quase-estáticos. Apesar desta diferença, a classificação dos espécimes dentro de cada ensaio deverá permanecer inalterada.

Pelo dispositivo montado para medição do tempo de impacto, inicia-se e finaliza-se a medição do tempo a uma distância Δx acima da superfície plana ($\Delta x = 3$ ou $\Delta x = 6$ mm). Para obter-se o tempo de impacto corrigido, devemos subtrair do

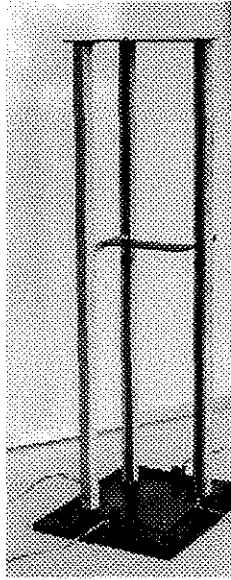


Figura 4.5: Vista geral do dispositivo de ensaio de impacto

tempo medido uma parcela Δt oriunda da diferença Δx , como mostrado na Figura 4.7, e calculada por:

$$t_c = t_i - \Delta t \quad (4.8)$$

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 \quad (4.9)$$

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta x}{v_i} \quad (4.10)$$

$$\Delta t_2 = \frac{\Delta x}{v_f} \quad (4.11)$$

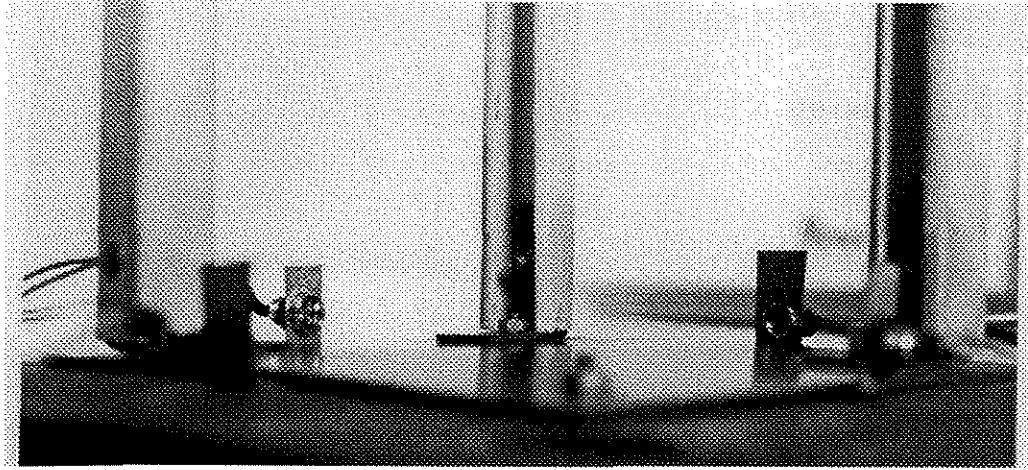


Figura 4.6: Detalhe dos emissores/sensores de raios infra-vermelho

A velocidade da laranja no instante inicial do primeiro impacto é calculada por:

$$v_i = \sqrt{2 g h_i} \quad (4.12)$$

Considera-se que a velocidade no instante final do primeiro impacto, isto é, a velocidade de lançamento para o segundo impacto, é igual a velocidade na iminência do segundo impacto (velocidade de retorno à superfície), e pode portanto, ser calculada por:

$$v_f = \sqrt{2 g h_f} \quad (4.13)$$

A altura de rebote h_f pode ser calculada por:

$$h_f = \frac{g (t_r/2)^2}{2} \quad (4.14)$$

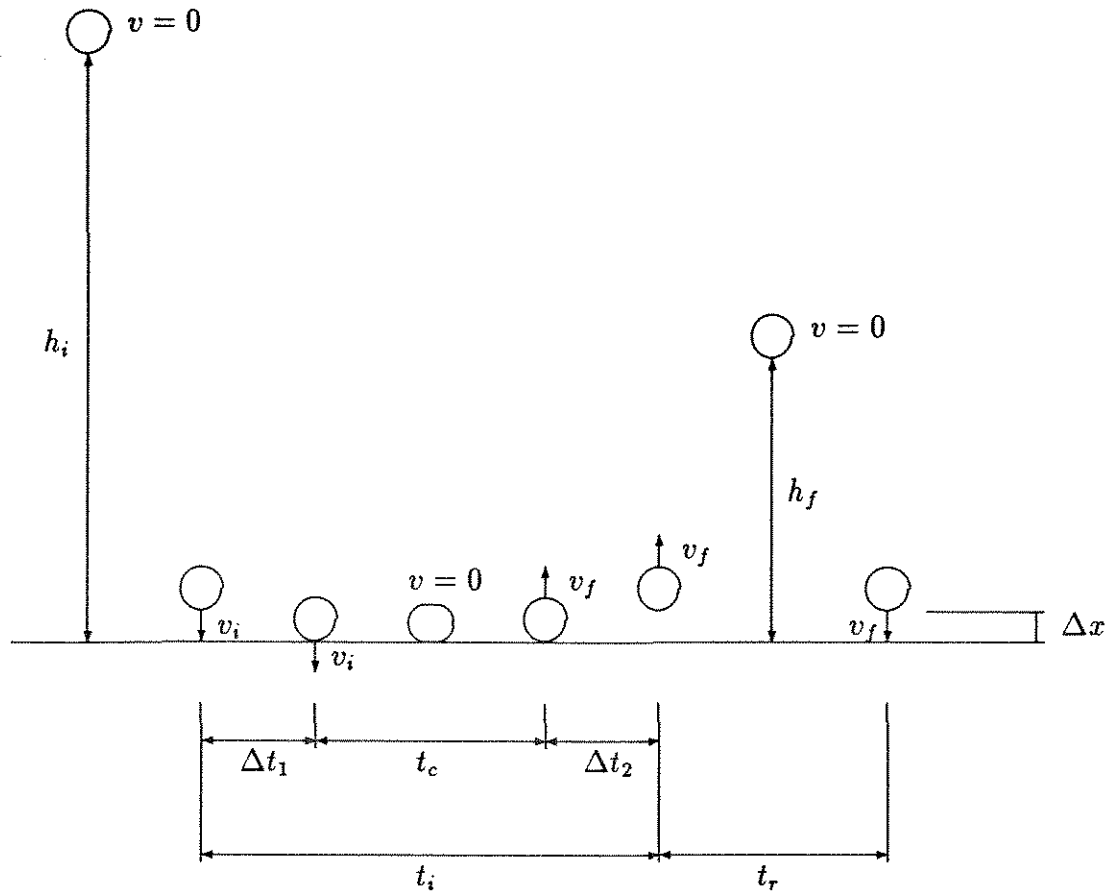


Figura 4.7: Diagrama da variação de velocidade durante um impacto

Substituindo-se a equação (4.14) em (4.13), tem-se a velocidade no instante final do impacto:

$$v_f = \frac{g t_r}{2} \quad (4.15)$$

Será utilizado o coeficiente de restituição definido pela equação (3.96) para analisar a elasticidade do impacto (se $e = 1$, o impacto é perfeitamente elástico).

4.5 Determinação do teor de sólidos solúveis

Resultados preliminares indicam que a metade do fruto mais próxima ao pedúnculo apresenta um Brix cerca de 10% inferior ao da outra metade, portanto, decidiu-se utilizar a mistura do suco extraído das duas partes do fruto para a determinação do Brix. A determinação do teor de sólidos solúveis foi realizada logo após a execução dos ensaios mecânicos, e cinco laranjas foram poupadas, não sendo submetidas a determinação do Brix, permanecendo 21 dias em observação em condições ambientais (entre 15 e 25 °C), juntamente com um lote não ensaiado, para verificação de injúrias mecânicas.

4.6 Delineamento experimental

Neste experimento foi utilizado um delineamento fatorial para se determinar os fatores mais significantes envolvidos no estudo. A partir da Tabela de Análise de Variância (ANOVA), analisou-se as diferenças significativas pelo método de Tukey.

Para se reduzir o número de variáveis envolvidas no ensaio, as seguintes variáveis não foram consideradas :

- variedade;
- fonte (local de produção);
- época de colheita;
- condições de armazenagem;
- temperatura e umidade relativa ambiente durante o ensaio
(Temp. = 20 ± 5 °C).

As variáveis independentes são:

- tipo de ensaio (impacto ou compressão simples);
- velocidade de carga.

As variáveis dependentes, ou variáveis contínuas de resposta, são:

- firmness;
- coeficiente de restituição;
- teor de sólidos solúveis.

5. RESULTADOS

Nos ensaios de compressão até a ruptura, obteve-se uma força média de ruptura de 310 N, para uma deformação de 11 mm em cada lado do espécime; para cargas maiores que 100 N a relação força/deformação é linear, e a teoria de contato de Hertz não se aplica. Desta forma, adotou-se como força máxima para os ensaios não destrutivos: 39,2 N (4 kgf) para a primeira série, 78,4 N (8 kgf) para a segunda série e 156,8 N (16 kgf) para a terceira série (ensaios com bolas de tênis).

Para cada uma das três séries de ensaios temos quatro métodos de classificação dos espécimes. O primeiro método de classificação é a classificação realizada pelo ensaio de compressão simples (FC). O segundo é o realizado pelo ensaio de impacto e baseado no tempo de impacto (Fti). O terceiro é o realizado também pelo ensaio de impacto e baseado no tempo de impacto corrigido (Ftc). O quarto e último método de classificação é o realizado pelo ensaio de impacto e baseado no coeficiente de restituição (CR). Para cada método de classificação elaborou-se a Tabela de Análise de Variância (ANOVA), e analisou-se as diferenças significativas pelo método de Tukey, utilizando-se o programa de análise estatística SANEST, versão 2.1. Comparando-se as diferenças significativas de cada método de classificação, contruiu-se as Tabelas

5.5, 5.16 e 5.29.

5.1 Primeira série de ensaios

As Tabelas 5.1 a 5.4 apresentam as médias agrupadas dos resultados obtidos na primeira série de ensaios. A partir das diferenças significativas apresentadas nestas tabelas, elaborou-se a Tabela 5.5, para comparação das diferenças significativas encontradas.

Tabela 5.1: Teste de Tukey para médias de FC na primeira série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	média[kPa]	5%	1%
1	13	4	1224	a	A
2	7	4	1170	ab	AB
3	20	4	1144	ab	AB
4	11	4	1108	ab	ABC
5	9	4	1099	ab	ABC
6	22	4	1074	abc	ABCD
7	1	4	1072	abc	ABCD
8	17	4	1058	abc	ABCD
9	6	4	1032	abcd	ABCDE
10	1	4	1002	bcde	ABCDE
11	10	4	980	bcde	BCDE
12	8	4	902	cdef	CDEF
13	5	4	859	defg	DEF
14	21	4	858	defg	DEF
15	18	4	858	defg	DEF
16	19	4	818	efg	EF
17	23	4	814	efg	EF
18	3	4	751	fg	F
19	12	4	751	fg	F
20	2	4	732	fg	F
21	4	4	720	fg	F
22	15	4	709	fg	F
23	16	4	682	g	F
D.M.S. 5% = 196.14421			D.M.S. 1% = 223.86964		

O método de classificação baseado no Coeficiente de Restituição mostrou-

Tabela 5.2: Teste de Tukey para médias de Fti na primeira série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	média[kPa]	5%	1%
1	17	10	371	a	A
2	20	10	363	ab	AB
3	6	10	353	abc	ABC
4	22	10	342	abcd	ABCD
5	13	10	330	abcde	ABCDE
6	21	10	327	bcdef	ABCDEF
7	14	10	326	bcdef	ABCDEF
8	19	10	323	bcdefg	BCDEF
9	9	10	321	bcdefg	BCDEF
10	7	10	320	cdefg	BCDEF
11	11	10	317	cdefg	BCDEF
12	18	10	313	cdefg	CDEF
13	1	10	306	defg	CDEFG
14	15	10	305	defg	DEFG
15	23	10	294	efgh	EFG
16	8	10	293	efgh	EFG
17	16	10	287	fgh	EFG
18	10	10	286	fgh	EFG
19	5	10	283	gh	FGH
20	12	10	263	hi	GHI
21	2	10	236	i	HI
22	4	10	230	i	IJ
23	3	10	187	j	J
D.M.S. 5% = 42.32218			D.M.S. 1% = 47.59320		

se um bom método de classificação, pois apresenta muitas diferenças significativas, embora muitas delas invertidas em relação a outros métodos (vide Tabela 5.5). Portanto, a classificação realizada por esse é distinta da realizada pelos métodos elásticos. Teoricamente esta conclusão é respaldada no fato de o coeficiente de restituição não estar correlacionado com características elásticas.

A classificação realizada por FC apresenta 57% das diferenças significativas da classificação realizada por Fti (vide Tabela 5.5), além de apresentar apenas 0,9% de diferenças significativas a mais e nenhuma diferença significativa invertida. Conclui-se

Tabela 5.3: Teste de Tukey para médias de Ftc na primeira série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	média[kPa]	5%	1%
1	20	10	2906	a	A
2	17	10	2324	b	AB
3	6	10	2308	bc	ABC
4	14	10	2289	bc	ABC
5	13	10	2173	bcd	BCD
6	22	10	2026	bcde	BCDE
7	1	10	1988	bcde	BCDEF
8	7	10	1975	bcde	BCDEF
9	11	10	1958	bcde	BCDEF
10	19	10	1927	bcdef	BCDEFG
11	9	10	1900	bcdef	BCDEFGH
12	18	10	1837	bcdefg	BCDEFGH
13	15	10	1749	cdefg	BCDEFGH
14	21	10	1746	cdefg	BCDEFGH
15	8	10	1679	defg	CDEFGHI
16	16	10	1615	defgh	DEFGHI
17	23	10	1536	efgh	EFGHI
18	10	10	1520	efgh	EFGHI
19	5	10	1370	fghi	FGHIJ
20	2	10	1313	ghi	GHIJ
21	12	10	1276	ghi	HIJ
22	4	10	1114	hi	IJ
23	3	10	818	i	J
D.M.S. 5% = 561.43668			D.M.S. 1% = 631.36094		

que são métodos semelhantes.

O método de classificação Fti apresenta 19% a mais de diferenças significativas e 84% das diferenças significativas apresentadas pelo Ftc (vide Tabela 5.5); conclui-se que os métodos são semelhantes e Fti é mais eficiente que Ftc. Observando-se os anexos A.4 e A.5 chega-se à mesma conclusão, uma vez que o coeficiente de variação não explicado pelo modelo é 19% para Ftc e apenas 8,6% para Fti. O coeficiente de variação não explicado pelo modelo é calculado pela raiz quadrada do quadrado médio do resíduo dividido pela média.

Tabela 5.4: Teste de Tukey para médias de CR na primeira série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	média	5%	1%
1	21	10	0.486	a	A
2	19	10	0.478	ab	AB
3	22	10	0.475	abc	AB
4	10	10	0.468	abcd	ABC
5	12	10	0.465	bcde	ABCD
6	17	10	0.462	bcdef	BCD
7	5	10	0.462	bcdef	BCD
8	6	10	0.459	cdef	BCDE
9	7	10	0.453	defg	CDEF
10	18	10	0.450	defgh	CDEFG
11	23	10	0.447	efghi	CDEFGH
12	9	10	0.444	fghij	DEFGHI
13	16	10	0.440	ghijk	EFGHI
14	8	10	0.439	ghijk	EFGHI
15	15	10	0.438	ghijk	EFGHI
16	13	10	0.437	ghijk	FGHI
17	14	10	0.437	ghijk	FGHI
18	1	10	0.432	hijk	FGHI
19	11	10	0.432	hijk	FGHI
20	20	10	0.428	ijk	GHI
21	2	10	0.426	jk	HI
22	4	10	0.426	jk	I
23	3	10	0.423	k	I
D.M.S. 5% = 0.01914			D.M.S. 1% = 0.02153		

A análise das repetições ao longo dos ensaios mostrou que a sequência dos ensaios não influenciou nos resultados (vide Tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9).

Para a análise da determinação do teor de sólidos solúveis (Tabela 5.10), não se pôde construir uma tabela de diferenças significativas, pois não houve repetições nos ensaios. Para a comparação das desigualdades apresentadas na Tabela 5.10 com as diferenças significativas dos métodos de classificação, elaborou-se a Tabela 5.11

Da Tabela 5.11 constata-se uma tendência dos frutos com maior Brix apresentarem maior firmness e coeficiente de restituição menor.

Tabela 5.5: Comparação de diferenças significativas na primeira série de ensaios

MÉTODO 1	MÉTODO 2	Dif. Sig. a mais no met.1 [%]	Dif. Sig. do met.2 present. no met.1 [%]	Dif. Sig. do met.2 invertid. no met.1 [%]
CR	FC	5	22	22
CR	Fti	6	41	13
CR	Ftc	26	28	23
FC	Fti	0,9	57	0
FC	Ftc	20	67	0
Fti	Ftc	19	84	0

Tabela 5.6: Teste de Tukey para médias de repetições de FC na primeira série de ensaios

num.ordem	repetição	tot.espec.	média[kPa]	5%	1%
1	2	23	991	a	A
2	1	23	933	a	A
3	4	23	901	a	A
4	3	23	899	a	A
D.M.S. 5% = 136.56709			D.M.S. 1% = 166.97677		

Tabela 5.7: Teste de Tukey para médias de repetições de Fti na primeira série de ensaios

num.ordem	repetição	tot.espec.	média[kPa]	5%	1%
1	3	23	316	a	A
2	1	23	313	a	A
3	4	23	309	a	A
4	2	23	308	a	A
5	5	23	308	a	A
6	7	23	298	a	A
7	6	23	297	a	A
8	8	23	297	a	A
9	9	23	296	a	A
10	10	23	292	a	A
D.M.S. 5% = 46.27588			D.M.S. 1% = 53.41914		

Tabela 5.8: Teste de Tukey para médias de repetições de Ftc na primeira série de ensaios

num.ordem	repetição	tot.espec.	média[kPa]	5%	1%
1	1	23	2015	a	A
2	3	23	1944	a	A
3	4	23	1906	a	A
4	2	23	1862	a	A
5	5	23	1830	a	A
6	7	23	1733	a	A
7	8	23	1704	a	A
8	9	23	1669	a	A
9	6	23	1659	a	A
10	10	23	1654	a	A
D.M.S. 5% = 516.73990			D.M.S. 1% = 596.50512		

Tabela 5.9: Teste de Tukey para médias de repetições de CR na primeira série de ensaios

num.ordem	repetição	tot.espec.	média	5%	1%
1	6	23	0.455	a	A
2	8	23	0.453	a	A
3	9	23	0.452	a	A
4	5	23	0.450	a	A
5	7	23	0.450	a	A
6	10	23	0.448	a	A
7	2	23	0.446	a	A
8	3	23	0.445	a	A
9	4	23	0.444	a	A
10	1	23	0.438	a	A
D.M.S. 5% = 0.01952			D.M.S. 1% = 0.02253		

Tabela 5.10: Resultados obtidos de Brix, peso, raio e coloração para a primeira série de ensaios

espécime	Brix[%]	peso[gf]	raio[mm]	coloração
20	10,8	169	35,3	AM
11	10,0	181	35,9	AM
14	10,0	164	34,8	1/2AM
1	9,8	165	34,0	AM
17	9,8	189	36,8	1/2AM
6	9,2	173	35,1	1/2AM
4	9,2	172	34,9	1/2AM
9	9,2	185	36,4	VD
22	8,8	175	36,3	1/2AM
7	8,8	166	34,9	1/2AM
5	8,6	187	36,5	VD
16	8,4	173	35,4	VD
15	8,2	181	34,9	VD
10	8,2	167	36,0	AM
2	8,2	160	34,4	1/2AM
19	8,2	155	33,6	VD
12	8,0	169	35,1	VD
21	7,8	180	36,9	VD

Tabela 5.11: Comparação entre desigualdades constatadas no Brix e diferenças significativas para a primeira série de ensaios

Método de classificação	Dif.sig. constatadas no Brix [%]	Dif.sig. invertidas no Brix [%]
FC	55	3
Fti	43	12
CR	11	49

5.2 Segunda série de ensaios

Os resultados obtidos na segunda série de ensaios são apresentados agrupados, segundo o teste de Tukey, nas Tabelas 5.12 à 5.15 . Com as diferenças significativas apresentadas nessas tabelas, foi elaborada a Tabela 5.16, para comparação das diferenças significativas encontradas.

Tabela 5.12: Teste de Tukey para médias de FC na segunda série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	médias[kPa]	5%	1%
1	1	33	887	a	A
2	5	33	814	b	B
3	8	21	682	c	C
4	4	33	681	c	C
5	2	33	670	cd	C
6	6	21	604	de	CD
7	3	33	561	ef	DE
8	7	21	538	ef	DE
9	10	17	534	ef	DE
10	9	17	501	f	E

Tabela 5.13: Teste de Tukey para médias de Fti na segunda série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	médias[kPa]	5%	1%
1	1	10	1614	a	A
2	4	10	1514	a	A
3	5	10	1505	a	A
4	2	10	1350	b	B
5	3	10	1125	c	C
6	8	10	1085	cd	C
7	6	10	1066	cd	C
8	7	10	1040	cd	C
9	10	10	990	d	C
10	9	10	827	e	D

D.M.S. 5% = 125.05914

D.M.S. 1% = 145.66353

O método Fti substitui Ftc, pois além de apresentar todas as diferenças significativas de Ftc, Fti apresenta 6% a mais (vide Tabela 5.16). Observando os

Tabela 5.14: Teste de Tukey para médias de Ftc na segunda série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	médias[kPa]	5%	1%
1	1	10	7602	a	A
2	4	10	7347	a	AB
3	5	10	6765	ab	AB
4	2	10	6289	b	B
5	8	10	4505	c	C
6	6	10	3913	c	C
7	3	10	3891	c	C
8	10	10	3728	c	C
9	7	10	3636	c	CD
10	9	10	2521	d	D
D.M.S. 5% = 1029.18796			D.M.S. 1% = 1198.75412		

Tabela 5.15: Teste de Tukey para médias de CR na segunda série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	médias	5%	1%
1	3	10	0.513	a	A
2	5	10	0.492	ab	AB
3	1	10	0.486	ab	AB
4	9	10	0.480	abc	AB
5	7	10	0.473	abc	AB
6	6	10	0.468	abc	AB
7	10	10	0.462	bc	AB
8	4	10	0.455	bc	B
9	8	10	0.452	bc	B
10	2	10	0.439	c	B
D.M.S. 5% = 0.04665			D.M.S. 1% = 0.05433		

anexos B.4 e B.5 pode-se perceber que Fti é um método mais preciso, pois o coeficiente de variação não explicado pelo modelo é 7%, enquanto que, para o método Ftc, é 14%.

Observando-se a Tabela 5.16, pode-se afirmar que as classificações realizadas pelos métodos Fti e FC são muito semelhantes, pois Fti apresenta 78% das diferenças significativas de FC, nenhuma diferença significativa invertida e 3% a mais de diferenças significativas. É evidente que FC também é muito semelhante a Ftc.

Tabela 5.16: Comparação de diferenças significativas na segunda série de ensaios

MÉTODO 1	MÉTODO 2	Dif. Sig. a mais no met.1 [%]	Dif. Sig. do met.2 present. no met.1 [%]	Dif. Sig. do met.2 invertid. no met.1 [%]
Fti	FC	3	78	0
Fti	Ftc	6	100	0
Fti	CR	450	50	33
FC	Ftc	3	77	0
FC	CR	433	33	50
Ftc	CR	417	17	33

Da Tabela 5.16 conclui-se que o método CR é discrepante em relação aos outros métodos, apresentando muitas diferenças significativas invertidas em relação aos outros três métodos.

Durante os ensaios de compressão, os espécimes sofriam uma rotação de 90° após cada repetição. Foi constatada uma pequena deformação permanente na área de contato após cada ensaio, de forma que as repetições 1 e 3 estavam sujeitas a uma menor área de contato e, portanto, menor força para a mesma deformação. Isto explica o fato da repetição número 3 apresentar um valor médio estatisticamente inferior às outras repetições, como observado na Tabela 5.17 .

Tabela 5.17: Teste de Tukey para médias de repetições de FC na segunda série de ensaios

num.ordem	repetição	num.ensaios	médias[kPa]	5%	1%
1	2	58	720	a	A
2	4	58	711	a	A
3	1	58	707	a	A
4	3	58	609	b	B

A análise das repetições dos ensaios de impacto mostrou-se não significativa, isto é, a sequência das repetições não alterou os resultados, como mostrado nas Tabelas 5.18, 5.19 e 5.20 .

Tabela 5.18: Teste de Tukey para médias de repetições de Fti na segunda série de ensaios

num.ordem	repetição	num.ensaios	médias[kPa]	5%	1%
1	1	10	1291	a	A
2	4	10	1252	a	A
3	2	10	1236	a	A
4	3	10	1216	a	A
5	5	10	1214	a	A
6	9	10	1214	a	A
7	6	10	1204	a	A
8	8	10	1186	a	A
9	7	10	1172	a	A
10	10	10	1141	a	A
D.M.S. 5% = 398.04359			D.M.S. 1% = 463.62415		

Tabela 5.19: Teste de Tukey para médias de repetições de Ftc na segunda série de ensaios

num.ordem	repetição	num.ensaios	médias[kPa]	5%	1%
1	1	10	5780	a	A
2	4	10	5308	a	A
3	2	10	5216	a	A
4	3	10	5077	a	A
5	9	10	5072	a	A
6	6	10	4966	a	A
7	5	10	4944	a	A
8	8	10	4775	a	A
9	7	10	4725	a	A
10	10	10	4332	a	A
D.M.S. 5% = 2755.35271			D.M.S. 1% = 3209.31699		

Observando o anexo B.3, chega-se à conclusão de que não existe interação entre os fatores, ou seja, as diferentes velocidades não afetam a classificação feita pelo método FC.

Os ensaios de compressão, nesta segunda série de ensaios, foram realizados com 8 velocidades de carga diferentes, as quais são mostradas na Tabela 5.21 . A seqüência de ensaios corresponde à seqüência de numeração das velocidades.

Tabela 5.20: Teste de Tukey para médias de repetições de CR na segunda série de ensaios

num.ordem	repetição	num.ensaios	médias	5%	1%
1	10	10	0.496	a	A
2	5	10	0.474	a	A
3	8	10	0.472	a	A
4	4	10	0.471	a	A
5	7	10	0.471	a	A
6	1	10	0.470	a	A
7	9	10	0.469	a	A
8	3	10	0.466	a	A
9	2	10	0.466	a	A
10	6	10	0.464	a	A
D.M.S. 5% = 0.05464			D.M.S. 1% = 0.06364		

Tabela 5.21: Velocidades utilizadas no ensaio de compressão da segunda série de ensaios

num.veloc.	vel.[mm/s]
1	1,52
2	1,84
3	2,17
4	2,49
5	2,81
6	3,14
7	3,46
8	1,52

Pela análise da variação da velocidade (Tabela 5.22), têm-se um ligeiro amolecimento das laranjas (diminuição do Firmness) ao longo dos ensaios, pois a diferença entre o Firmness médio da primeira velocidade a ser ensaiada (1.52 mm/s - velocidade 1) e da última velocidade ensaiada (1.52 mm/s - velocidade 8) é de 70 kPa. Como esta diminuição do Firmness foi estatisticamente não significativa, e encontrou-se apenas uma velocidade estatisticamente diferente, nada pode-se concluir a respeito da variação de velocidade.

Novamente não se pode construir uma tabela de diferenças significativas para a determinação do teor de sólidos solúveis (vide Tabela 5.23). Elaborou-se, então,

Tabela 5.22: Teste de Tukey para médias de velocidades no ensaio de compressão na segunda série de ensaios

num.ordem	velocidade	repetições	médias[kPa]	5%	1%
1	2	40	720	a	A
2	1	50	710	ab	A
3	3	40	663	ab	A
4	5	25	643	ab	AB
5	4	25	642	ab	AB
6	8	32	641	ab	AB
7	6	25	624	bc	AB
8	7	25	534	c	B

a Tabela 5.24 para comparação das desigualdades constatadas na determinação do Brix, com as diferenças significativas dos métodos de classificação.

Tabela 5.23: Resultados obtidos de Brix, peso, raio e coloração para a segunda série de ensaios

num.trat.	Brix[%]	peso[gf]	raio[mm]	coloração
2	10,2	185	37,2	AM
5	9,8	174	36,2	AM
8	9,8	164	36,1	1/2AM
4	9,4	187	37,4	AM
10	9,0	161	34,6	1/2AM
1	8,4	181	36,6	VD
6	8,4	174	35,7	1/2AM
7	7,8	191	38,5	VD
9	7,6	180	37,6	1/2AM
3	7,0	184	37,1	1/2AM

Tabela 5.24: Comparação entre desigualdades constatadas no Brix e diferenças significativas para a segunda série de ensaios

Método de classificação	Dif.sig. constatadas no Brix [%]	Dif.sig. invertidas no Brix [%]
FC	75	19
Fti	70	24
CR	0	100

Observando-se a Tabela 5.24, constata-se uma tendência dos frutos com maior Brix apresentarem Firmness maior e coeficiente de restituição menor.

5.3 Terceira série de ensaios

Os resultados encontrados para terceira série de ensaios são mostrados agrupados, segundo o teste de Tukey, nas Tabelas 5.25 à 5.28 . Com as diferenças significativas apresentadas nessas tabelas, foi possível elaborar a Tabela 5.29, para comparação entre diferenças significativas encontradas.

Tabela 5.25: Teste de Tukey para médias de FC na terceira série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	médias[kPa]	5%	1%
1	3	10	928	a	A
2	2	10	910	a	A
3	1	10	834	b	B
4	4	10	834	b	B
5	5	10	830	bc	BC
6	8	10	812	cd	CD
7	7	10	796	de	DE
8	9	10	793	e	DE
9	10	10	789	e	E
10	6	10	752	f	F
11	11	10	695	g	G
D.M.S. 5% = 18.38060			D.M.S. 1% = 21.31650		

Tabela 5.26: Teste de Tukey para médias de Fti na terceira série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	médias[kPa]	5%	1%
1	1	10	577	a	A
2	10	10	491	ab	AB
3	2	10	490	ab	AB
4	4	10	463	b	BC
5	3	10	460	b	BC
6	8	10	454	b	BC
7	9	10	451	b	BC
8	5	10	450	b	BC
9	11	10	415	bc	BC
10	6	10	404	bc	BC
11	7	10	356	c	C
D.M.S. 5% = 93.76996			D.M.S. 1% = 108.74770		

O método de classificação baseado no Coeficiente de Restituição nova-

Tabela 5.27: Teste de Tukey para médias de Ftc na terceira série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	médias[kPa]	5%	1%
1	1	10	1778	a	A
2	10	10	1425	ab	AB
3	2	10	1359	ab	AB
4	4	10	1272	bc	BC
5	8	10	1240	bc	BC
6	3	10	1238	bc	BC
7	9	10	1224	bc	BC
8	5	10	1191	bc	BC
9	11	10	1179	bc	BC
10	6	10	1018	bc	BC
11	7	10	857	c	C
D.M.S. 5% = 423.96805			D.M.S. 1% = 491.68787		

mente mostrou-se um bom método de classificação, apresentando muitas diferenças significativas, embora muitas delas invertidas em relação a outros métodos (vide Tabela 5.29). Novamente a classificação realizada por ele é distinta da realizada pelos métodos elásticos.

A classificação realizada pelo método Fti tem 60% de semelhanças em relação à realizada por FC, e apenas 7% de discrepâncias (vide Tabela 5.29). Pode-se afirmar que as classificações são parecidas, embora a realizada por FC forneça 207% de diferenças significativas a mais.

O método Fti, além de apresentar 100% das diferenças significativas do método Ftc, ainda apresenta 50% de diferenças significativas a mais (vide Tabela 5.29). Conclui-se que o método Fti substitui o método Ftc. O método Fti também é mais preciso do que Ftc, pois apresenta um coeficiente de variação não explicado pelo modelo, de 14%, enquanto Ftc apresenta 23% (vide anexos C.4 e C.5).

As Tabelas 5.30 a 5.33 mostram que não houve diferenças significativas

Tabela 5.28: Teste de Tukey para médias de CR na terceira série de ensaios

num.ordem	espécime	repetições	médias	5%	1%
1	1	10	0.793	a	A
2	4	10	0.772	b	B
3	6	10	0.770	b	B
4	5	10	0.768	b	BC
5	7	10	0.767	bc	BC
6	2	10	0.761	cd	CD
7	3	10	0.756	de	DE
8	9	10	0.751	ef	EF
9	8	10	0.744	f	F
10	10	10	0.744	f	F
11	11	10	0.673	g	G
D.M.S. 5% = 0.00710			D.M.S. 1% = 0.00824		

Tabela 5.29: Comparação de diferenças significativas da terceira série de ensaios

MÉTODO 1	MÉTODO 2	Dif. Sig. a mais no met.1 [%]	Dif. Sig. do met.2 present. no met.1 [%]	Dif. Sig. do met.2 invertid. no met.1 [%]
FC	CR	7	58	28
FC	Fti	207	60	7
FC	Ftc	360	60	10
CR	Fti	187	53	27
CR	Ftc	330	80	10
Fti	Ftc	50	100	0

entre as repetições, ou seja, os espécimes mantiveram suas propriedades inalteradas ao longo dos ensaios.

Tabela 5.30: Teste de Tukey para médias de repetições de FC na terceira série de ensaios

num.ordem	repetição	num.ensaios	médias[kPa]	5%	1%
1	1	11	822	a	A
2	5	11	820	a	A
3	4	11	818	a	A
4	10	11	815	a	A
5	2	11	815	a	A
6	9	11	815	a	A
7	7	11	815	a	A
8	8	11	814	a	A
9	6	11	813	a	A
10	3	11	812	a	A
D.M.S. 5% = 91.35282			D.M.S. 1% = 106.17762		

Tabela 5.31: Teste de Tukey para médias de repetições de Fti na terceira série de ensaios

num.ordem	repetição	num.ensaios	médias[kPa]	5%	1%
1	10	11	475	a	A
2	3	11	472	a	A
3	1	11	467	a	A
4	2	11	464	a	A
5	8	11	463	a	A
6	9	11	450	a	A
7	7	11	447	a	A
8	4	11	443	a	A
9	6	11	440	a	A
10	5	11	434	a	A
D.M.S. 5% = 114.76577			D.M.S. 1% = 133.39003		

Tabela 5.32: Teste de Tukey para médias de repetições de Ftc na terceira série de ensaios

num.ordem	repetição	num.ensaios	médias[kPa]	5%	1%
1	3	11	1351	a	A
2	10	11	1341	a	A
3	1	11	1304	a	A
4	8	11	1281	a	A
5	2	11	1279	a	A
6	9	11	1241	a	A
7	7	11	1210	a	A
8	4	11	1192	a	A
9	6	11	1175	a	A
10	5	11	1154	a	A
D.M.S. 5% = 499.30280			D.M.S. 1% = 580.33001		

Tabela 5.33: Teste de Tukey para médias de repetições de CR na terceira série de ensaios

num.ordem	repetição	num.ensaios	médias	5%	1%
1	10	11	0.757	a	A
2	4	11	0.756	a	A
3	9	11	0.756	a	A
4	3	11	0.755	a	A
5	5	11	0.755	a	A
6	6	11	0.754	a	A
7	8	11	0.754	a	A
8	2	11	0.754	a	A
9	7	11	0.753	a	A
10	1	11	0.750	a	A
D.M.S. 5% = 0.04237			D.M.S. 1% = 0.04924		

6. DISCUSSÃO

Nos ensaios de compressão simples (FC), baseados na equação (3.68), obteve-se um coeficiente de correlação médio de 0,9977 para uma média de 70 pontos por ensaio. Pode-se afirmar com menos de 0,5% de significância que o modelo teórico para ensaios de compressão explica 99,54% da variação dos resultados.

Parte da diferença entre as classificações feitas por impacto (F_{ti}) e por compressão (FC) é resultado do tipo de resposta viscoelástica de cada espécime, ou seja, é resultado da diferença entre a velocidade do ensaio de compressão (0,0025 m/s) e a velocidade do ensaio de impacto (2,6 m/s). Apesar destas diferenças, pode-se afirmar que as classificações feitas por impacto (F_{ti}) e por compressão (FC) são semelhantes.

Nos ensaios de impacto da primeira e segunda séries de ensaios, constatou-se uma variação de energia cinética de 79%. Isto demonstra que o comportamento mecânico da laranja durante um impacto, não pode ser considerado perfeitamente elástico, e que a melhor forma de representá-lo é através de modelos viscoelásticos.

O método Ftc possui uma variável a mais (Δt) em relação a Fti. Esta variável, incorporada ao cálculo, é responsável por uma maior dispersão dos dados e conseqüente diminuição das diferenças significativas. Como estatisticamente a incorporação de Δt ao cálculo mostrou-se ineficiente, conclui-se que, para classificações de espécimes, o melhor é desprezá-la.

Por serem espécimes mais parecidos, as bolas de tênis apresentam um coeficiente de variação total menor que o das laranjas, mas apresentam um maior coeficiente de variação não explicado pelos modelos Fti e Ftc.

Uma vez que a laranja é um fruto não climatérico, isto é, ela não amadurece depois de colhida, não era de se esperar nenhuma correlação do Brix com propriedades mecânicas, a menos que os frutos fossem colhidos em diferentes estágios de maturação. Constatou-se, neste trabalho, uma tendência dos frutos com maior Brix apresentarem Firmness maior e coeficiente de restituição menor. Também foi constatada uma tendência dos frutos mais amarelados apresentarem maior Brix.

As laranjas que ficaram 21 dias em observação não apresentaram sinais de injúrias mecânicas. Assim mesmo recomenda-se que a carga máxima sobre uma laranja nunca ultrapasse 200 kPa.

Com este trabalho conclui-se que, medindo apenas o tempo de impacto, consegue-se construir um selecionador tecnicamente correto, que pode separar corpos esféricos de uma maneira bastante simples, rápida e com baixo custo. Esta é uma aplicação funcional muito importante preconizada por este trabalho.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Em função dos resultados obtidos e das considerações feitas, pode-se concluir que:

- a) O modelo teórico para ensaios de compressão mostrou-se adequado.
- b) A classificação realizada por ensaio de impacto é semelhante à realizada por ensaio de compressão.
- c) A classificação baseada no coeficiente de restituição é diferente da realizada pelos outros métodos.
- d) Existe correlação entre Brix, coloração e firmness.
- e) É viável a construção de um selecionador por impacto.

Seria interessante, para um futuro trabalho, obter-se o comportamento viscoelástico de corpos esféricos. Seria interessante, também, verificar se existe correlação entre o Brix e a densidade do fruto; isto poderia justificar a correlação encon-

trada entre Brix, firmness e coeficiente de restituição.

8. ANEXOS

Anexo A.1 : Resultados de firmness obtidos por ensaio de compressão (FC) na primeira série de ensaios

esp.	rep.	FC[Pa]	esp.	rep.	FC[Pa]	esp.	rep.	FC[Pa]
1	1	916043	9	1	1178067	17	1	1019873
1	2	1123280	9	2	1199043	17	2	1118321
1	3	955600	9	3	1010897	17	3	1039001
1	4	1012875	9	4	1007461	17	4	1055710
2	1	641044	10	1	993768	18	1	855228
2	2	774413	10	2	1126371	18	2	839913
2	3	806516	10	3	903470	18	3	884311
2	4	707487	10	4	895988	18	4	851154
3	1	708110	11	1	1074314	19	1	813433
3	2	802495	11	2	1153693	19	2	869316
3	3	733707	11	3	1089899	19	3	746577
3	4	758631	11	4	1113623	19	4	843216
4	1	772766	12	1	749511	20	1	1127515
4	2	681452	12	2	787139	20	2	1354142
4	3	689123	12	3	730479	20	3	1068882
4	4	736853	12	4	735601	20	4	1024131
5	1	871002	13	1	1386177	21	1	883303
5	2	947374	13	2	1306631	21	2	821115
5	3	761716	13	3	1079312	21	3	898770
5	4	856027	13	4	1123322	21	4	830096
6	1	992394	14	1	1085916	22	1	1073547
6	2	1091967	14	2	1120109	22	2	1120829
6	3	1053004	14	3	1087905	22	3	1039163
6	4	988964	14	4	993891	22	4	1062894
7	1	1133217	15	1	705706	23	1	892321
7	2	1263011	15	2	754671	23	2	806269
7	3	1078168	15	3	698131	23	3	802136
7	4	1207430	15	4	676545	23	4	756652
8	1	899312	16	1	693057			
8	2	1024040	16	2	700542			
8	3	897500	16	3	625457			
8	4	786489	16	4	708180			

Anexo A.2 : Resultados obtidos de firmness calculado pelo tempo de impacto (Fti), firmness calculado pelo tempo de impacto corrigido (Ftc) e coeficiente de restituição (CR), na primeira série de ensaios

esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR	esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR
1	1	353850	2704777	0.4303	13	1	392023	3372350	0.4210
1	2	298960	1868890	0.4313	13	2	360820	2530706	0.4402
1	3	352555	2423761	0.4516	13	3	340709	2341520	0.4302
1	4	325076	2143972	0.4401	13	4	296332	1787542	0.4249
1	5	307328	1859075	0.4460	13	5	316075	1996776	0.4301
1	6	276149	1583791	0.4320	13	6	307022	1720458	0.4520
1	7	292394	1841480	0.4242	13	7	362132	2487125	0.4457
1	8	270270	1544169	0.4276	13	8	301357	1606768	0.4607
1	9	273867	1512591	0.4394	13	9	303914	1874354	0.4260
1	10	308397	2394956	0.3953	13	10	324376	2011242	0.4409
2	1	353285	2995325	0.4186	14	1	260290	1379754	0.4410
2	2	257237	1482774	0.4215	14	2	256087	1395427	0.4298
2	3	256397	1501408	0.4171	14	3	372851	2972652	0.4387
2	4	216177	1022876	0.4306	14	4	305498	1982581	0.4318
2	5	228892	1065341	0.4499	14	5	345520	2565201	0.4338
2	6	176081	722951	0.4233	14	6	304437	1847094	0.4466
2	7	156669	605969	0.4147	14	7	383608	3034513	0.4476
2	8	226761	1122340	0.4297	14	8	368667	2989703	0.4326
2	9	238841	1208228	0.4366	14	9	326683	2308596	0.4300
2	10	250621	1407199	0.4216	14	10	339898	2411551	0.4391
3	1	161891	652623	0.4079	15	1	328602	2073892	0.4325
3	2	139681	504226	0.4098	15	2	298882	1756465	0.4257
3	3	225612	1140248	0.4215	15	3	299877	1811879	0.4201
3	4	211569	985372	0.4284	15	4	306976	1762438	0.4380
3	5	175372	717850	0.4219	15	5	292043	1669191	0.4267
3	6	177104	720498	0.4262	15	6	321346	1852782	0.4486
3	7	148058	548006	0.4148	15	7	313249	1771246	0.4470
3	8	195537	824732	0.4391	15	8	290129	1564741	0.4397
3	9	245659	1293668	0.4314	15	9	293006	1510042	0.4548
3	10	187747	788838	0.4302	15	10	310090	1721193	0.4492
4	1	241604	1263909	0.4148	16	1	301067	1931428	0.4197
4	2	239363	1229098	0.4174	16	2	289129	1583905	0.4475
4	3	234247	1142754	0.4258	16	3	311549	1859888	0.4448
4	4	263581	1455855	0.4221	16	4	287684	1702228	0.4270
4	5	232814	1129545	0.4258	16	5	299537	1696968	0.4479
4	6	228586	1048951	0.4373	16	6	279220	1475478	0.4482
4	7	226169	1068838	0.4261	16	7	275119	1417495	0.4514
4	8	202675	847761	0.4359	16	8	287684	1515371	0.4569
4	9	228934	1060104	0.4349	16	9	288646	1670229	0.4331
4	10	202969	897612	0.4191	16	10	246692	1292509	0.4196

Anexo A.2 : Resultados obtidos de firmness calculado pelo tempo de impacto (Fti), firmness calculado pelo tempo de impacto corrigido (Ftc) e coeficiente de restituição (CR), na primeira série de ensaios

esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR	esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR
cont.									
5	1	279201	1289437	0.4720	17	1	359307	2397591	0.4375
5	2	285127	1308878	0.4800	17	2	433564	3100854	0.4714
5	3	279651	1357494	0.4568	17	3	378482	2468667	0.4561
5	4	315421	1821060	0.4404	17	4	339690	2069198	0.4443
5	5	285127	1365025	0.4663	17	5	379168	2368375	0.4672
5	6	300484	1475009	0.4729	17	6	393997	2485547	0.4753
5	7	258351	1230840	0.4417	17	7	350534	1968964	0.4739
5	8	273446	1272825	0.4638	17	8	351769	2056466	0.4639
5	9	296538	1449058	0.4707	17	9	385426	2352604	0.4778
5	10	252405	1134838	0.4534	17	10	340280	1970271	0.4575
6	1	332737	2010079	0.4587	18	1	319659	1994722	0.4386
6	2	385611	2650420	0.4671	18	2	302580	1747722	0.4433
6	3	310857	1932655	0.4342	18	3	358106	2294188	0.4619
6	4	400464	3360613	0.4351	18	4	294517	1695348	0.4373
6	5	384169	2762332	0.4558	18	5	323011	1985105	0.4448
6	6	341728	2069459	0.4653	18	6	292548	1639732	0.4424
6	7	361418	2246478	0.4740	18	7	283913	1476728	0.4548
6	8	362742	2290744	0.4710	18	8	312025	1840725	0.4460
6	9	327501	1891023	0.4663	18	9	320214	1816686	0.4629
6	10	322943	1862536	0.4628	18	10	328131	1874121	0.4678
7	1	314774	2002261	0.4412	19	1	323612	2088574	0.4587
7	2	309319	1927893	0.4415	19	2	328350	1985956	0.4792
7	3	321500	1870661	0.4691	19	3	330755	1941918	0.4895
7	4	325517	1932962	0.4670	19	4	323026	1922833	0.4789
7	5	324362	1918070	0.4672	19	5	330755	1986090	0.4832
7	6	327843	1908777	0.4743	19	6	313856	1793486	0.4820
7	7	322640	2151324	0.4367	19	7	354223	2259377	0.4868
7	8	325517	2116027	0.4447	19	8	299716	1777960	0.4592
7	9	318673	2023017	0.4448	19	9	312178	1788253	0.4798
7	10	308244	1896563	0.4437	19	10	309408	1728051	0.4845
8	1	316342	2046442	0.4278	20	1	369847	3223756	0.4147
8	2	312549	1899596	0.4391	20	2	336338	2671639	0.4088
8	3	310942	1953689	0.4301	20	3	353826	2670258	0.4305
8	4	303597	1795843	0.4383	20	4	439880	4477177	0.4307
8	5	287694	1676776	0.4285	20	5	374710	3101038	0.4270
8	6	281103	1520726	0.4414	20	6	348069	2512168	0.4355
8	7	291559	1643056	0.4401	20	7	347438	2427924	0.4419
8	8	286264	1492378	0.4563	20	8	397361	3356528	0.4378
8	9	270724	1361319	0.4519	20	9	342442	2516161	0.4278
8	10	267240	1403109	0.4366	20	10	316688	2102030	0.4299

Anexo A.2 : Resultados obtidos de firmness calculado pelo tempo de impacto (Fti), firmness calculado pelo tempo de impacto corrigido (Ftc) e coeficiente de restituição (CR), na primeira série de ensaios

esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR	esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR
cont.									
9	1	323054	1979311	0.4351	21	1	348882	1970786	0.4853
9	2	353108	2436218	0.4307	21	2	317322	1517420	0.5103
9	3	355628	2215130	0.4558	21	3	354565	2086652	0.4784
9	4	307027	1730902	0.4426	21	4	334337	1780333	0.4905
9	5	324721	1827812	0.4576	21	5	334337	1849709	0.4792
9	6	284540	1482364	0.4441	21	6	337296	1986039	0.4644
9	7	289227	1580071	0.4356	21	7	317322	1668585	0.4793
9	8	333237	2089461	0.4374	21	8	322856	1677589	0.4879
9	9	317045	1810670	0.4475	21	9	292526	1397620	0.4864
9	10	325839	1852959	0.4558	21	10	312455	1527915	0.4979
10	1	300782	1724106	0.4583	22	1	354778	2337223	0.4552
10	2	292109	1654293	0.4537	22	2	365297	2327388	0.4713
10	3	251965	1299075	0.4407	22	3	349047	2152322	0.4671
10	4	303402	1711107	0.4650	22	4	324513	1873542	0.4644
10	5	298194	1591554	0.4759	22	5	347791	2064645	0.4761
10	6	317552	1743632	0.4854	22	6	340386	1902779	0.4868
10	7	273947	1381962	0.4691	22	7	352215	2228282	0.4631
10	8	263714	1233683	0.4824	22	8	335572	1822411	0.4913
10	9	283781	1464544	0.4720	22	9	317238	1647420	0.4886
10	10	279038	1391873	0.4777	22	10	337366	1899328	0.4822
11	1	304186	1916577	0.4172	23	1	287997	1551787	0.4326
11	2	310938	1794099	0.4432	23	2	311185	1708831	0.4473
11	3	321741	2118870	0.4210	23	3	327372	1827467	0.4562
11	4	331341	2047112	0.4427	23	4	287530	1501450	0.4405
11	5	320087	2112054	0.4194	23	5	284752	1387501	0.4578
11	6	310938	1813336	0.4405	23	6	317522	1702976	0.4590
11	7	323406	1912352	0.4471	23	7	319135	1766402	0.4518
11	8	292735	1733366	0.4220	23	8	259331	1195555	0.4500
11	9	327340	2105560	0.4303	23	9	268424	1319433	0.4399
11	10	323406	2027997	0.4331	23	10	276640	1397545	0.4398
12	1	275288	1448646	0.4506					
12	2	301472	1745386	0.4489					
12	3	262527	1332565	0.4484					
12	4	259990	1280002	0.4547					
12	5	279425	1385398	0.4721					
12	6	255838	1153820	0.4782					
12	7	250579	1132559	0.4717					
12	8	267268	1230637	0.4836					
12	9	232776	1011659	0.4646					
12	10	240128	1036864	0.4755					

Anexo A.3 : ANOVA para FC na primeira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME	22	2501470.8322896	113703.2196495	20.9744	0.00001
RESIDUO	69	374051.7066450	5421.0392267		
TOTAL	91	2875522.5389346			

MEDIA GERAL = 931.138120

COEFICIENTE DE VARIACAO = 7.907 %

Anexo A.4 : ANOVA para Fti na primeira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME	22	415355.6590552	18879.8026843	27.6988	0.00001
RESIDUO	207	141093.4385630	681.6108143		
TOTAL	229	556449.0976182			

MEDIA GERAL = 303.325380

COEFICIENTE DE VARIACAO = 8.607 %

Anexo A.5 : ANOVA para Ftc na primeira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME	22	46360641.3168597	2107301.8780391	17.5681	0.00001
RESIDUO	207	24829749.6031877	119950.4811748		
TOTAL	229	71190390.9200474			

MEDIA GERAL = 1797.653320

COEFICIENTE DE VARIACAO = 19.266 %

Anexo A.6 : ANOVA para CR na primeira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME	22	0.0727867	0.0033085	23.7263	0.00001
RESIDUO	207	0.0288649	0.0001394		
TOTAL	229	0.1016516			

MEDIA GERAL = 0.448176

COEFICIENTE DE VARIACAO = 2.635 %

Anexo A.7 : ANOVA para repetições de FC na primeira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETIC	3	125563.6071503	41854.5357168	1.3394	0.26583
RESIDUO	88	2749958.9317842	31249.5333157		
TOTAL	91	2875522.5389346			

MEDIA GERAL = 931.138120

COEFICIENTE DE VARIACAO = 18.985 %

Anexo A.8 : ANOVA para repetições de Fti na primeira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETIC	9	14142.4742752	1571.3860306	0.6375	0.76563
RESIDUO	220	542306.6233429	2465.0301061		
TOTAL	229	556449.0976182			

MEDIA GERAL = 303.325380

COEFICIENTE DE VARIACAO = 16.368 %

Anexo A.9 : ANOVA para repetições de Ftc na primeira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETIC	9	3569722.4375822	396635.8263980	1.2904	0.24253
RESIDUO	220	67620668.4824652	307366.6749203		
TOTAL	229	71190390.9200474			

MEDIA GERAL = 1797.653320

COEFICIENTE DE VARIACAO = 30.841 %

Anexo A.10 : ANOVA para repetições de CR na primeira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETIC	9	0.0052063	0.0005785	1.3196	0.22716
RESIDUO	220	0.0964453	0.0004384		
TOTAL	229	0.1016516			

MEDIA GERAL = 0.448176

COEFICIENTE DE VARIACAO = 4.672 %

Anexo A.11 - Análise para verificação de danos na primeira série de ensaios

variável em estudo : Fti

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
LADOQUED	1	1596.8345086	1596.8345086	2.2645	0.14011
RESIDUO	28	19744.1437594	705.1479914		
TOTAL	29	21340.9782680			

MEDIA GERAL = 330.061770

COEFICIENTE DE VARIACAO = 8.045 %

Anexo A.12 - Análise para verificação de danos na primeira série de ensaios

variável em estudo : CR

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
LADOQUED	1	0.0002991	0.0002991	1.8711	0.17928
RESIDUO	28	0.0044761	0.0001599		
TOTAL	29	0.0047752			

MEDIA GERAL = 0.453950

COEFICIENTE DE VARIACAO = 2.785 %

Anexo B.1 : Resultados de firmness obtidos por ensaio de compressão (FC [Pa]) na segunda série de ensaios ¹

	especime 1	especime 2	especime 3	especime 4	especime 5	especime 6
v						
e	913052	671992	568635	671497	804086	586635
l	977157	780755	619486	695226	869326	663174
o	1030826	814705	642519	729138	894996	678659
c	1042451	806849	625520	789497	925820	681881
i	1045369	830824	638379	810780	938306	722257
d						
a	especime 7	especime 8	especime 9	especime 10		
d						
e	515247	550479	479206	477275		
	533549	698050	517311	545791		
1	606683	774400	551649	614428		
	605272	770567	563848	629218		
	609424	779936	576647	649618		
v	especime 1	especime 2	especime 3	especime 4	especime 5	especime 6
e						
l	1075709	843288	697884	823981	945534	753615
o	1088342	851080	697077	826470	962669	751531
c	787192	650130	564975	816671	944308	735580
i	849114	772373	574439	648721	789459	545445
d						
a	especime 7	especime 8	especime 9	especime 10		
d						
e	664991	783648	652772	726219		
	676000	772536	626056	690073		
2	460581	611458	420342	486567		
	532418	747549	485160	458051		
v	especime 1	especime 2	especime 3	especime 4	especime 5	especime 6
e						
l	859217	608678	554475	689238	780175	644003
o	1002111	721639	621894	822121	898753	696323
c	776826	546046	536694	588669	762815	531281
i	935882	684287	648563	765564	876836	604099
d						
a	especime 7	especime 8	especime 9	especime 10		
d						
e	564280	668110	508889	554130		
	622981	697203	589262	613573		
3	513395	588855	441398	474949		
	636082	783206	547972	560023		

¹ velocidade 1 = 1,52 mm/s
 velocidade 2 = 1,84 mm/s
 velocidade 3 = 2,17 mm/s

Anexo B.1 : Resultados de firmness obtidos por ensaio de compressão (FC [Pa]) na segunda série de ensaios ²

cont.

v	especime 1	especime 2	especime 3	especime 4	especime 5	especime 6
e						
l	831451	569327	518501	600398	943706	541350
o	985321	751193	616089	754597	880824	
c	1001937	539679	523683	583581	730517	
i	801782	627432	672922	767685	924062	
d						
	especime 7	especime 8	especime 9	especime 10		
4						
	530409	541981	457695	489233		
v	especime 1	especime 2	especime 3	especime 4	especime 5	especime 6
e						
l	819527	565607	511261	571493	906672	505231
o	982950	711769	626005	751031	892564	
c	747580	544485	444826	557578	688394	
i	938382	754956	605919	782968	878612	
d						
	especime 7	especime 8	especime 9	especime 10		
5						
	572385	684293	576877	588818		
v	especime 1	especime 2	especime 3	especime 4	especime 5	especime 6
e						
l	754112	572890	466022	527026	651415	643728
o	929621	690967	590821	741416	833856	
c	910669	619509	457265	522852	641836	
i	719575	762630	594293	755549	825536	
d						
	especime 7	especime 8	especime 9	especime 10		
6						
	619197	707202	578564	619481		
v	especime 1	especime 2	especime 3	especime 4	especime 5	especime 6
e						
l	668492	486192	418651	503637	603031	493713
o	777213	561143	535201	649778	729462	
c	631886	494853	443359	492945	566233	
i	808829	716117	559320	710725	764589	
d						
	especime 7	especime 8	especime 9	especime 10		
7						
	424190	555965	465255	418237		

²velocid. 4 = 2,49 mm/s

velocid. 5 = 2,81 mm/s

velocid. 6 = 3,14 mm/s

velocid. 7 = 3,46 mm/s

Anexo B.1 : Resultados de firmness obtidos por ensaio de compressão (FC [Pa]) na segunda série de ensaios ³

cont.

	especime 1	especime 2	especime 3	especime 4	especime 5	especime 6
v						
e	1346247	965724	762886	830345	1078042	964293
l	811036	496465	420831	577275	690546	529549
o	616731	451810	374374	448297	518345	370360
c	868873	722634	434327	739065	776967	545928
i						
d	especime 7	especime 8	especime 9	especime 10		
8	851488	1107144				
	483126	636624				
	322679	527890				
	453718	841013				

³velocid. 8 = 1,52 mm/s

Anexo B.2 : Resultados obtidos de firmness calculado pelo tempo de impacto (Fti), firmness calculado pelo tempo de impacto corrigido (Ftc) e coeficiente de restituição (CR), na segunda série de ensaios

esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR	esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR
1	1	1649434	8231458	0.4728	6	1	1051450	4008940	0.4495
1	2	1643978	7914886	0.4833	6	2	1103207	4169942	0.4656
1	3	1539959	7389682	0.4660	6	3	1054400	3720090	0.4813
1	4	1758106	8885202	0.4870	6	4	1122327	4127699	0.4815
1	5	1643978	7675698	0.4936	6	5	1016941	3574918	0.4727
1	6	1580429	7234606	0.4889	6	6	997540	3743972	0.4417
1	7	1638547	7573409	0.4962	6	7	1005791	3543375	0.4687
1	8	1595989	7230438	0.4954	6	8	1132060	4278451	0.4728
1	9	1611765	7583258	0.4852	6	9	1115902	4140956	0.4761
1	10	1481926	6306016	0.4965	6	10	1057361	3824864	0.4715
2	1	1397834	7154278	0.4195	7	1	1103316	4027423	0.4640
2	2	1335160	6440383	0.4243	7	2	999839	3407270	0.4658
2	3	1363908	6360825	0.4392	7	3	1055560	3734511	0.4647
2	4	1376493	6232270	0.4506	7	4	1061369	3738442	0.4681
2	5	1315143	6031268	0.4350	7	5	1082058	3851248	0.4690
2	6	1186118	4981954	0.4365	7	6	1073123	3687723	0.4818
2	7	1363908	6239030	0.4450	7	7	1106400	3879861	0.4816
2	8	1460110	7105320	0.4441	7	8	991838	3264091	0.4791
2	9	1546035	7662803	0.4536	7	9	981309	3212791	0.4785
2	10	1159131	4680779	0.4437	7	10	1041230	3556429	0.4760
3	1	1191439	4580576	0.4701	8	1	1114929	3329358	0.6159
3	2	1150963	4176376	0.4839	8	2	1108397	4569971	0.4524
3	3	1144405	4080089	0.4898	8	3	1095494	5021381	0.4165
3	4	1191439	4385013	0.4878	8	4	1058023	4295438	0.4456
3	5	1157574	3982076	0.5097	8	5	1022322	4225602	0.4310
3	6	1134665	4070394	0.4847	8	6	1045932	4699893	0.4112
3	7	1099930	3823998	0.4895	8	7	1036990	4357681	0.4292
3	8	1031960	3425944	0.4922	8	8	1045932	4220960	0.4447
3	9	1106134	3832276	0.4927	8	9	1183312	5461466	0.4332
3	10	1046226	2549865	0.7297	8	10	1134850	4872783	0.4449

Anexo B.2 : Resultados obtidos de firmness calculado pelo tempo de impacto (Fti), firmness calculado pelo tempo de impacto corrigido (Ftc) e coeficiente de restituição (CR), na segunda série de ensaios

esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR	esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR
cont.									
4	1	1731120	10108776	0.4366	9	1	785530	2482120	0.4473
4	2	1538712	7553072	0.4531	9	2	836484	2596534	0.4725
4	3	1538712	7244445	0.4659	9	3	797354	2375511	0.4796
4	4	1625626	8255481	0.4577	9	4	819688	2436844	0.4887
4	5	1563586	7386246	0.4692	9	5	847228	2503327	0.5018
4	6	1548595	7207254	0.4714	9	6	832240	2585116	0.4707
4	7	1495317	6784439	0.4701	9	7	694260	1918481	0.4810
4	8	1417901	6478518	0.4534	9	8	899219	2902618	0.4740
4	9	1426713	7039091	0.4323	9	9	892189	2784714	0.4881
4	10	1256564	5410932	0.4410	9	10	862596	2621306	0.4920
5	1	1600340	7911782	0.4766	10	1	1285568	5970205	0.4516
5	2	1543356	7017784	0.4941	10	2	1095931	4316781	0.4649
5	3	1533302	6796278	0.5014	10	3	1040435	4044616	0.4558
5	4	1513466	7042639	0.4805	10	4	994354	3684343	0.4619
5	5	1442200	6220149	0.4933	10	5	1052422	3995495	0.4678
5	6	1611016	7463000	0.5003	10	6	1031571	3989387	0.4554
5	7	1437617	6347355	0.4839	10	7	840433	2786120	0.4626
5	8	1428513	6006991	0.5001	10	8	856066	2831707	0.4686
5	9	1415006	6117486	0.4869	10	9	858333	2888956	0.4617
5	10	1528309	6723691	0.5032	10	10	842642	2774559	0.4664

Anexo B.3 : ANOVA para FC na segunda série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME AJUST.	9	3775870.8806169	419541.2089574	81.8849	0.00001
VELOCIDA AJUST.	7	687510.8700039	98215.8385720	19.1695	0.00001
ESP*VEL AJUST.	61	312536.5876056	5123.5506165	0.3674	0.99996
RESIDUO	184	2565895.0027021	13945.0815364		
TOTAL	261	7036402.2899873			

MEDIA GERAL AJUSTADA = 647.245790

COEFICIENTE DE VARIACAO = 18.245 %

S.Q. ESPECIME NAO AJUSTADA = 3470459.8296756

S.Q. VELOCIDA NAO AJUSTADA = 382099.8190626

Análise de variância fixando níveis

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESP/VEL 1	9	983083.5017154	109231.5001906	7.8330	0.00001
ESP/VEL 2	9	680103.2702615	75567.0300291	5.4189	0.00001
ESP/VEL 3	9	522762.3336425	58084.7037381	4.1652	0.00001
ESP/VEL 4	9	543208.9961560	60356.5551284	4.3282	0.00001
ESP/VEL 5	9	388045.3712085	43116.1523565	3.0919	0.00001
ESP/VEL 6	9	221028.7337072	24558.7481897	1.7611	0.00239
ESP/VEL 7	9	215613.0322179	23957.0035798	1.7180	0.00342
ESP/VEL 8	7	534562.2293135	76366.0327591	5.4762	0.00001
VEL/ESP 1	7	209391.8635751	29913.1233679	2.1451	0.00013
VEL/ESP 2	7	169852.2716368	24264.6102338	1.7400	0.00285
VEL/ESP 3	7	84980.5202017	12140.0743145	0.8706	0.73234
VEL/ESP 4	7	106859.8826625	15265.6975232	1.0947	0.31879
VEL/ESP 5	7	199945.6213590	28563.6601941	2.0483	0.00025
VEL/ESP 6	7	69996.2043941	9999.4577706	0.7171	0.93428
VEL/ESP 7	7	32601.1434994	4657.3062142	0.3340	0.99999
VEL/ESP 8	7	75050.0910135	10721.4415734	0.7688	0.88323
VEL/ESP 9	6	15524.0278814	2587.3379802	0.1855	1.00000
VEL/ESP 10	6	35845.8313860	5974.3052310	0.4284	0.99979
RESIDUO	184	2565895.0027021	13945.0815364		

Anexo B.4 : ANOVA para Fti na segunda série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME	9	6278349.3565303	697594.3729478	93.6649	0.00001
RESIDUO	90	670298.7449305	7447.7638326		
TOTAL	99	6948648.1014607			

MEDIA GERAL = 1212.624020

COEFICIENTE DE VARIACAO = 7.117 %

Anexo B.5 : ANOVA para Ftc na segunda série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME	9	293331874.9663804	32592430.5518200	64.6148	0.00001
RESIDUO	90	45396979.5693680	504410.8841041		
TOTAL	99	338728854.5357484			

MEDIA GERAL = 5019.718800

COEFICIENTE DE VARIACAO = 14.149 %

Anexo B.6 : ANOVA para CR na segunda série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME	9	0.0422016	0.0046891	4.5250	0.00016
RESIDUO	90	0.0932632	0.0010363		
TOTAL	99	0.1354648			

MEDIA GERAL = 0.472045

COEFICIENTE DE VARIACAO = 6.819 %

Anexo B.7 : ANOVA para repetições FC na segunda série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETICOES	3	469672.8256465	156557.6085488	6.1250	0.00079
RESIDUO	228	5827808.1908942	25560.5622408		
TOTAL	231	6297481.0165407			

MEDIA GERAL = 687.020630

COEFICIENTE DE VARIACAO = 23.271 %

Anexo B.8 : ANOVA para repetições Fti na segunda série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETICAO	9	158193.6736554	17577.0748506	0.2330	0.98806
RESIDUO	90	6790454.4278053	75449.4936423		
TOTAL	99	6948648.1014607			

MEDIA GERAL = 1212.624020

COEFICIENTE DE VARIACAO = 22.652 %

Anexo B.9 : ANOVA para repetições Ftc na segunda série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETICAO	9	13348024.1598553	1483113.7955395	0.4102	0.92655
RESIDUO	90	325380830.3758932	3615342.5597321		
TOTAL	99	338728854.5357484			

MEDIA GERAL = 5019.718800

COEFICIENTE DE VARIACAO = 37.879 %

Anexo B.10 : ANOVA para repetições CR na segunda série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETICAO	9	0.0075239	0.0008360	0.5881	0.80460
RESIDUO	90	0.1279409	0.0014216		
TOTAL	99	0.1354648			

MEDIA GERAL = 0.472045

COEFICIENTE DE VARIACAO = 7.987 %

Anexo C.1 : Resultados de firmness obtidos por ensaio de compressão (FC - [kPa]) na terceira série de ensaios

espécime 1	espécime 2	espécime 3	espécime 4	espécime 5	espécime 6
816	915	927	843	822	766
819	902	921	837	829	749
826	917	935	826	828	738
832	918	930	839	840	753
833	916	922	847	822	794
829	898	929	834	823	745
846	910	933	827	833	742
845	903	934	822	837	745
859	905	936	842	820	731
838	919	915	824	848	759
espécime 7	espécime 8	espécime 9	espécime 10	espécime 11	
821	819	816	799	702	
806	804	805	783	711	
800	791	805	774	693	
804	786	799	775	719	
804	802	804	770	701	
788	827	782	806	685	
784	826	782	804	676	
779	822	773	795	695	
788	825	780	799	678	
787	817	784	787	691	

Anexo C.2 : Resultados obtidos de firmness calculado pelo tempo de impacto (Fti), firmness calculado pelo tempo de impacto corrigido (Ftc) e coeficiente de restituição (CR), na terceira série de ensaios

esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR	esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR
1	1	651464	2098118	0.7969	7	1	399097	1003018	0.7655
1	2	552897	1634342	0.7893	7	2	403781	1020624	0.7649
1	3	846764	3257819	0.7911	7	3	378933	929086	0.7679
1	4	468039	1270493	0.7884	7	4	371476	902233	0.7691
1	5	487837	1343611	0.7953	7	5	372528	910865	0.7622
1	6	490986	1357811	0.7943	7	6	371476	897623	0.7757
1	7	588005	1805643	0.7853	7	7	365247	887281	0.7597
1	8	619691	1949521	0.7911	7	8	333470	775691	0.7672
1	9	460724	1232658	0.7964	7	9	275685	597338	0.7649
1	10	600401	1831489	0.8039	7	10	291517	641804	0.7716
2	1	538016	1572935	0.7516	8	1	466874	1288858	0.7446
2	2	588443	1802970	0.7539	8	2	484715	1355479	0.7508
2	3	481224	1319658	0.7582	8	3	508387	1461752	0.7477
2	4	460848	1225064	0.7692	8	4	478664	1336043	0.7462
2	5	458037	1227446	0.7569	8	5	382386	964806	0.7395
2	6	455249	1210735	0.7621	8	6	411195	1068278	0.7439
2	7	478237	1300411	0.7640	8	7	429957	1144134	0.7407
2	8	506089	1417217	0.7629	8	8	519989	1527682	0.7384
2	9	470882	1266628	0.7676	8	9	412410	1074552	0.7422
2	10	465112	1251671	0.7605	8	10	441794	1181680	0.7493
3	1	439878	1163878	0.7485	9	1	382982	968772	0.7381
3	2	438559	1150596	0.7564	9	2	536515	1586831	0.7489
3	3	450633	1192848	0.7608	9	3	433286	1152113	0.7463
3	4	450633	1187429	0.7660	9	4	371166	918303	0.7478
3	5	457542	1219124	0.7616	9	5	426828	1126581	0.7465
3	6	520226	1490770	0.7527	9	6	464821	1267990	0.7555
3	7	452003	1208886	0.7510	9	7	460529	1252206	0.7541
3	8	467467	1267073	0.7543	9	8	461954	1259971	0.7524
3	9	511960	1449502	0.7565	9	9	453498	1222885	0.7550
3	10	409691	1045637	0.7519	9	10	519310	1489126	0.7624
4	1	464540	1272077	0.7699	10	1	565932	1757243	0.7434
4	2	509703	1458792	0.7732	10	2	409624	1076818	0.7416
4	3	504753	1433666	0.7759	10	3	468522	1314762	0.7424
4	4	461635	1253580	0.7757	10	4	543595	1643230	0.7471
4	5	565082	1702344	0.7776	10	5	424609	1131765	0.7452
4	6	382877	963661	0.7622	10	6	456968	1269357	0.7398
4	7	429980	1134590	0.7694	10	7	433706	1173384	0.7402
4	8	474912	1314859	0.7699	10	8	415776	1091919	0.7505
4	9	388499	975657	0.7728	10	9	565932	1749703	0.7473
4	10	450265	1215046	0.7691	10	10	623306	2045871	0.7447

Anexo C.2 : Resultados obtidos de firmness calculado pelo tempo de impacto (Fti), firmness calculado pelo tempo de impacto corrigido (Ftc) e coeficiente de restituição (CR), na terceira série de ensaios

esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR	esp.	rep.	Fti[Pa]	Ftc[Pa]	CR
cont.									
5	1	503918	1403125	0.7689	11	1	353987	912620	0.6658
5	2	439765	1145297	0.7697	11	2	337088	843634	0.6734
5	3	433211	1118086	0.7721	11	3	323001	793747	0.6729
5	4	532231	1523073	0.7697	11	4	323857	799716	0.6691
5	5	437127	1134934	0.7700	11	5	337088	841441	0.6760
5	6	428066	1098396	0.7725	11	6	382720	1017537	0.6714
5	7	407129	1021190	0.7727	11	7	480779	1426727	0.6773
5	8	428066	1110401	0.7598	11	8	460520	1344375	0.6716
5	9	439765	1154657	0.7603	11	9	597272	2014402	0.6764
5	10	451916	1199722	0.7625	11	10	555036	1793872	0.6747
6	1	371775	904820	0.7635					
6	2	398195	995965	0.7666					
6	3	367612	887992	0.7669					
6	4	414834	1055279	0.7683					
6	5	426049	1095297	0.7703					
6	6	473941	1282649	0.7692					
6	7	389104	957789	0.7739					
6	8	408782	1026887	0.7756					
6	9	377072	915962	0.7736					
6	10	416060	1055402	0.7734					

Anexo C.3 - ANOVA para FC na terceira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME	10	426926.0181818	42692.6018182	272.3269	0.00001
RESIDUO	99	15520.2000000	156.7696970		
TOTAL	109	442446.2181818			

MEDIA GERAL = 815.872740

COEFICIENTE DE VARIACAO = 1.535 %

Anexo C.4 - ANOVA para Fti na terceira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME	10	313491.3865954	31349.1386595	7.6834	0.00001
RESIDUO	99	403929.5410902	4080.0963746		
TOTAL	109	717420.9276856			

MEDIA GERAL = 455.583560

COEFICIENTE DE VARIACAO = 14.021 %

Anexo C.5 - ANOVA para Ftc na terceira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME	10	5402794.2537725	540279.4253773	6.4775	0.00001
RESIDUO	99	8257420.6619182	83408.2895143		
TOTAL	109	13660214.9156907			

MEDIA GERAL = 1252.899170

COEFICIENTE DE VARIACAO = 23.051 %

Anexo C.6 - ANOVA para CR na terceira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
ESPECIME	10	0.0929284	0.0092928	396.9192	0.00001
RESIDUO	99	0.0023178	0.0000234		
TOTAL	109	0.0952462			

MEDIA GERAL = 0.754396

COEFICIENTE DE VARIACAO = 0.641 %

Anexo C.7 - ANOVA para repetições de FC na terceira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETICAO	9	970.4000000	107.8222222	0.0244	0.99997
RESIDUO	100	441475.8181818	4414.7581818		
TOTAL	109	442446.2181818			

MEDIA GERAL = 815.872740

COEFICIENTE DE VARIACAO = 8.144 %

Anexo C.8 - ANOVA para repetições de Fti na terceira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETICA	9	20653.7039671	2294.8559963	0.3294	0.96300
RESIDUO	100	696767.2237185	6967.6722372		
TOTAL	109	717420.9276856			

MEDIA GERAL = 455.583560

COEFICIENTE DE VARIACAO = 18.322 %

Anexo C.9 - ANOVA para repetições de Ftc na terceira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETICA	9	471848.4164043	52427.6018227	0.3975	0.93350
RESIDUO	100	13188366.4992865	131883.6649929		
TOTAL	109	13660214.9156907			

MEDIA GERAL = 1252.899170

COEFICIENTE DE VARIACAO = 28.985 %

Anexo C.10 - ANOVA para repetições de CR na terceira série de ensaios

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REPETICA	9	0.0002872	0.0000319	0.0336	0.99994
RESIDUO	100	0.0949590	0.0009496		
TOTAL	109	0.0952462			

MEDIA GERAL = 0.754396

COEFICIENTE DE VARIACAO = 4.085 %

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASAE STANDARDS: ASAE S368.1: Compression test of food materials of convex shape. *ASAE STANDARDS 1989*, St. Joseph, MI, 36 : 368-71, 1989.
- BURKNER, P. F., KINCH, D. M. Force-deformation ratio as an index of papaya maturation. *Trans. ASAE*, St Joseph, MI, v. 11, n. 3, p. 437-440, 1968.
- CHAPPELL, T. W., HAMANN, D. D. Poisson's ratio and Young's modulus of apple flesh under compressive loading. *Trans. ASAE*, St. Joseph, MI, v. 11, n. 5, p. 608-610, 1968.
- CLASSIFIQUE melhor a laranja. Brasília, Secretaria Nacional de Abastecimento, Ministério da Agricultura, s.d.
- CLEVENGER, J. T., HAMANN, D. D. The behavior of apple skin under tensile loading. *Trans. ASAE*, St. Joseph, MI, v. 11, n. 1, p. 34-37, 1968.
- DAL FABBRO, Inácio M. *Failure theories for apple flesh*. E. Lansing, MI : Michigan State University, 1979. Tese (Doutorado).
- DELWICHE, Michael J. Theory of fruit firmness sorting by impact forces. *Trans. ASAE*, St. Joseph, MI, v. 30, n. 4, p. 1160-1171, 1987.
- FERRAZ, Antônio Carlos de Oliveira. *Propriedades mecânicas do internódio da cana-de-açúcar: uma contribuição metodológica*. Campinas : UNICAMP, 1987.

- 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Univ. Estadual de Campinas, 1987.
- KUMAR, Lalit, WANG, Jaw-kai. Response of papaya fruit to dynamic loading. *Trans. ASAE*, St. Joseph, MI, v. 14, n. 2, p. 263-267, 1971.
- LUBKIN, J. L. Contact problems. In: Flügge, W., (ed.) *Handbook of engineering mechanics*. New York, McGraw-Hill, 1962. cap. 42.
- MASE, G. E. *Theory and problems of continuum mechanics*. New York : McGraw-Hill, 1970. 221p. (Schaum's outline series)
- McCARTHY, M. J., SARIG, Y. *Maturity evaluation of avocados by NMR methods*. St. Joseph, MI : ASAE, 1989. 13 p. (ASAE techical paper n. 89-3548)
- MOHSENIN, N. N. *Physical properties of plants and animal materials*. New York : Gordon and Breach Science Publishers, 1970. vol. I, 734p.
- NAHIR, D., RONEN, B., PRIGOJIN, Irit. *Shelf-life prediction of citrus fruit*. St. Joseph, MI : ASAE, 1989. 10 p. (ASAE technical paper n. 89-6024)
- NELSON, C. W., MOHSENIN, N. N. Maximum allowble static and dynamic loads and effect of temperature for mechanical injury in Apples. *J. Agric. Engng. Res.* v. 13, n. 4, p. 305-317, 1968.
- PELEG, M. Determination of fresh papaya's texture by penetration tests. *Journal of food science*. v. 39, p. 156-159, 1974.
- PELEG, Kalman . *Produce Handling, packaging and distribution*. Technion City, Haifa, Israel, Israel Institute of Technology, 1985. 625 p.
- *Method and apparatus for automatically inspecting and classifying different objects*. US n. 07/170 307, 1988. Haifa, Israel, 1987.
- ROCHA, Jansle Vieira. *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. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Univ. Estadual de Campinas, 1988.

SHERIF, S. M. *The quasi-static contact problem for nearly-incompressive agricultural products.* E. leasing, MI : Michigan State University, 1976. Tese (Doutorado).

SHIGLEY, Joseph Edward. *Elementos de máquinas.* Tradução por Edival Ponciano de Carvalho. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1984. v. I, 347 p. Tradução de: Mechanical engineering design.

TIMOSHENKO, S. P., GOODIER, J. N. *Teoria da elasticidade.* 3.ed. Rio de Janeiro : Guanabara Dois, c1970, 1980. 543 p.

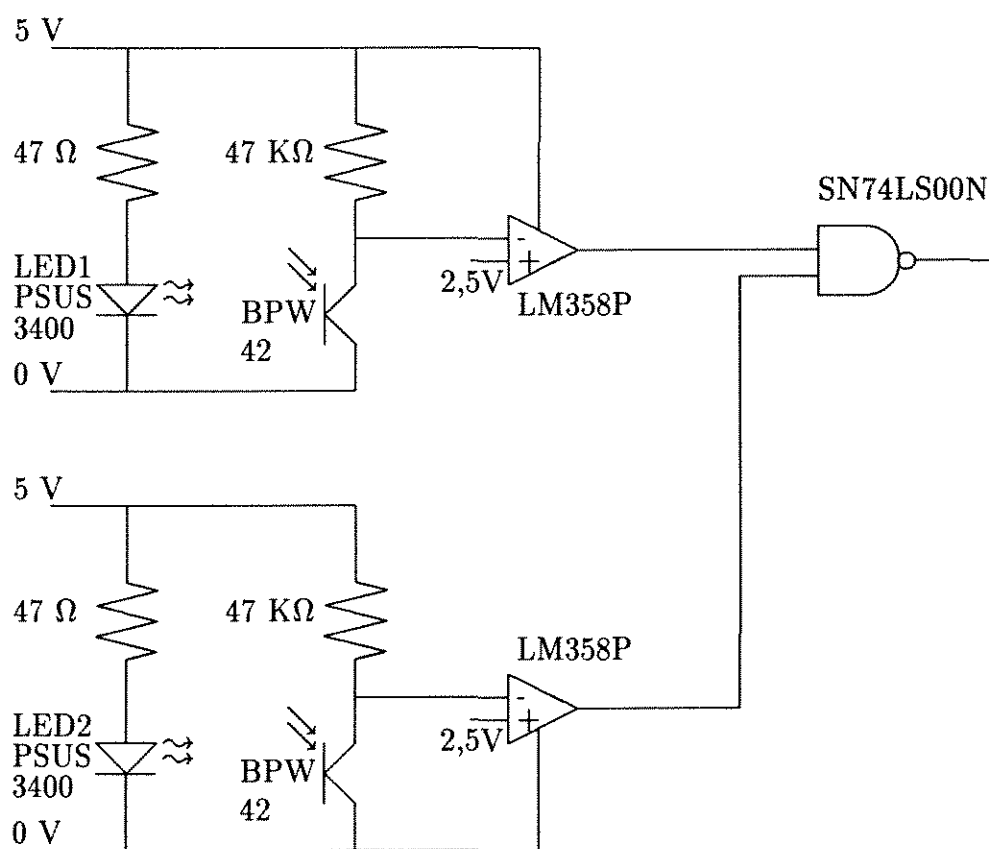
VÉLEZ PASOS, Carlos Antonio. *Análise do comportamento mecânico de laranjas à granel mediante modelo de elementos finitos.* Campinas: UNICAMP, 1987. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Univ. Estadual de Campinas, 1987.

10. ABSTRACT

Biological materials exhibit elastic and viscoelastic properties. The knowledge of these properties is important for the design and development of equipment applied in the harvesting, processing, transportation, conditioning and selection of fruits. This work made possible the development of a device capable of measuring espherical bodies mechanical properties a hundred times faster than usual compression tests. The device is capable of measuring the elapsed impact time through an infrared lighth signal connected to a microcomputer. By using that equipment it was possible to classify the espherical bodies which compared with the classification by compression it was 65% statistically similar and 2% statistically different. The compression test was carried out at selected load with 99,5% of the variation of the results explained by the Hertz contact theory, obtaining an average Firmness of 845 kPa. It was noted a tendency of orange of higher Brix exhibiting higher firmness and with a lower coefficient of restitution and a yellow color tendency.

11. APÊNDICE

APÊNDICE A - Interface para aquisição de dados do ensaio de impacto



APÊNDICE B - Resolução de integrais

B.1 - Integração da equação (3.19):

$$\dot{\sigma} + \frac{\sigma}{\xi} = E \epsilon_0 [\delta(t)]$$

$$\dot{\sigma} e^{t/\xi} + \sigma \frac{e^{t/\xi}}{\xi} = E \epsilon_0 e^{t/\xi} [\delta(t)]$$

$$\int_0^t d[\sigma e^{t/\xi}] = E \epsilon_0 \int_0^t e^{t/\xi} [\delta(t)] dt$$

Uma vez que para $t \neq 0$, $[\delta(t)] = 0$, tem-se:

$$\int_{-\infty}^t f(t)[\delta(t)]dt = f(0)[U(t)]$$

Dessa forma pode-se resolver a integral:

$$\sigma e^{t/\xi} = E \epsilon_0 [U(t)]$$

$$\sigma(t) = E \epsilon_0 e^{-t/\xi}[U(t)]$$

B.2 - Integração da equação (3.32):

$$\dot{\epsilon} + \frac{\epsilon}{\xi} = \frac{\sigma_0 [U(t)]}{\eta}$$

$$\dot{\epsilon} e^{t/\xi} + \epsilon \frac{e^{t/\xi}}{\xi} = \frac{\sigma_0}{\eta} e^{t/\xi} [U(t)]$$

$$\int_0^t d[\epsilon e^{t/\xi}] dt = \frac{\sigma_0}{\eta} \int_0^t e^{t/\xi} [U(t)] dt$$

Uma vez que:

$$\int_{-\infty}^t f(t)[U(t)] dt = [U(t)] \int_0^t f(t) dt$$

Pode-se resolver a integral:

$$\epsilon e^{t/\xi} = \frac{\sigma_0}{\eta} [U(t)] [\xi e^{t/\xi}]_0^t$$

$$\epsilon e^{t/\xi} = \frac{\sigma_0}{E} [U(t)] (e^{t/\xi} - 1)$$

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{t/\xi}) [U(t)]$$

B.3 - Demonstração da transformada de Laplace $\bar{\psi}(s) \bar{\phi}(s) = s^{-2}$

Reescrevendo-se a equação (3.13):

$$\xi^0 \sigma + \xi^1 \dot{\sigma} = E \xi^1 \dot{\epsilon}$$

Reescrevendo-se a equação (3.28):

$$\xi^0 \sigma = E \xi^0 \epsilon + E \xi^1 \dot{\epsilon}$$

Pode-se generalizar ambas as equações como:

$$\sum_{k=0}^m \xi^k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = \sum_{k=0}^n E \xi^k \frac{d^k \epsilon}{dt^k}$$

obs: para corpos com comportamento típico de fluidos, tem-se : $E \xi^0 = 0$

De acordo com FLÜGGE¹ pode-se representar esta equação através de operadores matemáticos:

$$\mathcal{P} \sigma = \mathcal{Q} \epsilon$$

Aplicando-se a transformada de Laplace, tem-se:

$$P(s) \bar{\sigma} = Q(s) \bar{\epsilon} \quad (11.1)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação (3.23):

¹FLÜGGE, Wilhelm. *Viscoelasticity*. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1975. p. 4-45.

$$\bar{\sigma} = \bar{\phi}(s)$$

Substituindo-se na equação (11.1):

$$\phi(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} \bar{\epsilon}$$

Como na equação (3.23) $\epsilon = \Delta(t)$, então $\bar{\epsilon}(s) = 1/s$, tem-se:

$$\bar{\phi} = \frac{Q(s)}{P(s)} \frac{1}{s}$$

Aplicando-se a transformada de Laplace à equação (3.34):

$$\bar{\epsilon} = \bar{\psi}(s)$$

Substituindo-se na equação (11.1):

$$\bar{\psi}(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} \bar{\sigma}$$

Como na equação (3.34) $\sigma = \Delta(t)$, então $\bar{\sigma}(s) = 1/s$, tem-se:

$$\bar{\psi}(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} \frac{1}{s}$$

Portanto:

$$\bar{\phi}(s) \bar{\psi}(s) = \frac{1}{s^2}$$

B.4 - Integração da equação (3.88)

De acordo com SPIEGEL², temos:

$$\int_0^a x^m (a - x^n)^p dx = \frac{a^{m+1+np} \Gamma_{\left(\frac{m+1}{n}\right)} \Gamma_{(p+1)}}{n \Gamma_{\left(\frac{m+1}{n}+p+1\right)}}$$

Para $n < 0$, a função gama pode ser definida como:

$$\Gamma_n = \frac{\Gamma_{n+1}}{n}$$

Desta forma pode-se resolver a seguinte integral:

$$\int_0^1 (1 - x^{5/2})^{-1/2} dx = \frac{2}{5} \frac{\Gamma_{0,4} \Gamma_{0,5}}{\Gamma_{0,9}} = 1,47162$$

²SPIEGEL, M. R. *Manual de fórmulas e tabelas matemáticas*; trad. por CHIOCCARELLO, R. Recife: McGraw-Hill, 1977. p. 95-101.

APÊNDICE C - Programção do microcomputador Apple IIe

C.1 - Programa para aquisição de dados do ensaio de compressão

```
10 REM  PROGRAMA COMPRESSAO
20 REM
30 REM  20/07/90   18:00 Hs
40 REM
50 REM
60 REM  TRIGGER AT BASELINE = Z
70 REM  NUM. MAX. DE PONTOS = PT
80 REM  VALOR MAX. P/ CORTE = M      obs: desligamento da prensa
85 REM  CONTADOR DE REPETIC = I
90 Z = 30
100 PT = 265
110 M = 4000
115 I = 0
120 HOME
130 DIM V%(PT)
140 D$ = CHR$(4)
150 VTAB 10
160 INPUT "NOME DO ARQUIVO DE DADOS ";C$
170 I = I + 1
180 A$ = C$ + STR$(I)
190 VTAB 22: PRINT "ARQ. P/ GRAVACAO DE DADOS = ";A$
200 PRINT D
210 PRINT D$;"OPEN";A$
220 PRINT D$;"WRITE";A$
230 HGR
240 & OFFERR                      obs: subrotina p/ erros
250 & SCROLLSET                    obs: alta definicao grafica
260 & OUTLINE
270 & ANAFMT = 1
280 & LABEL = "+1" AT 4,12
310 & LABEL = " 0" AT 4,139
320 & LOOK FOR AIN,(TV) = Q, (TH) = Z: & BEEP  obs: estado de espera
330 FOR K=0 TO PT
340 & AIN,(TV) = V%(K),(GA)          obs: aquisicao de dados
350 IF V%(K) > M THEN 370            obs: verifica carga maxima
360 NEXT K
370 & BEEP ON                        obs: ligar beep
380 & BOUT,(DV) = 65535              obs: enviar sinal +5v p/ prensa por 1s
390 & PAUSE = 1
400 & BOUT,(DV) = 0
410 & BEEP STOP                      obs: desliga beep
420 ONERR GOTO 1000
430 FOR J=0 TO K-1
440 PRINT V%(J)                      obs: arquiva os dados
450 NEXT J
460 PRINT D$;"CLOSE";A$
470 PRINT
480 PRINT "APERTE QUALQUER TECLA"
```

```
490 PRINT "NUMERO DE PTOS: ";K-1
500 GET B$
510 IF B$ = "" THEN GOTO 500
520 PRINT:PRINT:PRINT
530 PRINT:PRINT:PRINT
540 GOTO 170
1000 & ERRPTCH
1010 REM
1020 REM SUBROTINA DE TRATAMENTO DE ERROS
1030 REM
1040 ER = PEEK (222)
1050 IF ER <> 9 THEN POKE 216,0: RESUME
1060 REM ERRO COMETIDO = DISK FULL
1070 & BEEP ON
1080 PRINT "DISCO CHEIO"
1090 PRINT
1100 PRINT "TROQUE O DISKETTE E DE ENTER"
1110 & BEEP STOP
1120 GET B$
1130 IF B$="" THEN 1120
1140 PRINT D$
1150 PRINT D$;"OPEN";A$
1160 PRINT D$;"WRITE";A$
1170 GOTO 430
1180 END
```

C.2 - Programa para análise de dados dos ensaios de compressão

```
10 REM 28/07/92
20 REM
30 REM PROGRAMA PARA ANALISE DE DADOS
40 REM
50 REM MAURICIO PIRES MARTINS
60 REM
70 REM
80 ONERR GOTO 1300          obs: subrotina de tratamento de erros
85 REM DEFINICAO DA FUNCAO ARREDONDAMENTO
90 DEF FN AP5(N) = INT(N*10^5+0.5)/10/10/10/10/10
100 D$ = CHR$(4)
110 PRINT CHR$(17)
120 HOME
130 PRINT
140 PRINT : PRINT "          DMA - FEAGRI"
150 PRINT
160 PRINT "  PROGRAMA PARA ANALISE DE DADOS PROVE-"
170 PRINT "  NIENTES DE ENSAIOS DE COMPRESSAO"
180 PRINT
190 PRINT "  - OBS: OS CALCULOS SAO BASEADOS NA"
200 PRINT "          TEORIA DE CONTATO DE HERTZ,"
210 PRINT "          E APROXIMADOS PARA ELIPSOIDES."
220 PRINT : PRINT "  PROGRAMA DESENVOLVIDO POR:"
230 PRINT
240 PRINT "          MAURICIO PIRES MARTINS"
250 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT
260 INPUT "NOME DO ARQUIVO DE DADOS  ";AQ$
270 INPUT "NUMERACAO INICIAL  ";AN
280 AN = AN - 1
290 DIM V%(530)          obs: p/ ensaios com ate' 530 ptos
300 PRINT
310 PRINT "  DESEJA IMPRESSAO? (S/N)?"
320 GET IM$
330 IF IM$ = "N" THEN 450
340 IF IM$ <> "S" THEN 320
350 HOME
360 PRINT
370 PRINT D$;PR#1          obs: ativa impressora
380 PRINT CHR$(9);"80N"          obs: impressao em 80 colunas
410 GOSUB 1230
430 PRINT D$;"PR#0"
440 PRINT : PRINT CHR$(17)
450 PRINT
460 INPUT "VELOC. DE COMPRESSAO [m/s] = ";V
470 PRINT
480 INPUT "QUANTOS kgf EQUIVALEM A 1 UNIDADE DE      LEITURA?";C
490 PRINT
500 INPUT "INTERVALO DE TEMPO ENTRE DUAS LEITURAS  [s] =";T
510 HOME
515 SX=0 : SY=0 : XY=0 : XX=0 : YY=0
517 J=1 : I=0
520 AN = AN + 1
530 AE$ = AQ$ + STR$ (AN)
```

```

540 PRINT AE$
550 PRINT
555 READ R1,R2,RH,RL      obs: entrar dimensoes caract. no fim do prog.
556 R1=R1/1000:R2=R2/1000      obs: conversao de unidades
558 RH=RH/1000:RL=RL/1000      obs: conversao de unidades
560 PRINT " 2r1 [m] = ";R1
570 PRINT
580 PRINT " 2r2 [m] = ";R2
590 PRINT
600 PRINT " H [m] = ";RH
610 PRINT
620 PRINT " L [m] = ";RL
630 PRINT
635 REM CALCULO DOS RAIOS PRINCIPAIS DE CURVATURA
640 R3 = RH / 2
650 R4=(RL*RL+(RH-R1/2-R2/2)^2)/4/(RH-R1/2-R2/2)
655 REM CALCULO DO RAO EQUIVALENTE
660 R = 2*(R3*R4/(R3+R4))
700 PRINT:PRINT "PROCESSANDO ARQUIVO:";AE$
710 PRINT D$;"OPEN";AE$
720 PRINT D$;"READ":AE$
730 INPUT V%(I+J)
735 REM VALORES INFERIORES A 20 UNID. DE LEIT. SERAO DESPRESADOS
740 IF V%(I+J)>20 THEN 770
750 I=I+1
760 GOTO 730
765 REM DEF.=N.PTOS * INTERV. TEMPO LEIT. * VELOC. / DOIS LADOS COMPR.
770 D=J*T*V/2
775 REM UTILIZADA EQUACAO (4.4) E (4.5)
780 X = D^(3/2)
785 REM obs: forca[N]=valor leit.*fator conversao p/ kgf*9.8
790 Y = V%(I+J)*C*9.8
800 REM CALCULOS ESTATISTICOS
810 SX=SX+X
820 SY=SY+Y
830 XY=XY+(X*Y)
840 XX=XX+X*X
850 YY=YY+Y*Y
860 J=J+1
870 GOTO 730
880 PRINT D$;"CLOSE";AE$
890 REM CALCULO DO COEFICIENTE ANGULAR, DO LINEAR E DE CORRELACAO
900 N=J-1
910 B=(N*XY-SX*SY)/(N*XX-SX*SX)
920 A=(SY-B*SX)/N
930 CR=((N*XX-SX*SX)*(N*YY-SY*SY))^-0.5
940 CR=(N*XY-SX*SY)/CR
945 REM CALCULO DO FIRMNESS
950 E = B*3/4/R^-0.5
1000 IF IM$="N" THEN 1030      obs: nao deseja impressao
1010 PRINT D$;"PR#1"
1015 PRINT CHR$(9);"K"      obs: impressao sem salto de linha
1020 PRINT CHR$(9);"80N"      obs: impressao em 80 colunas
1030 PRINT AE$;
1040 D=FN AP5(D)

```

```

1050 POKE 36,15 : PRINT D*1000;
1060 R=FN AP5(R)
1070 POKE 36,25 : PRINT R*1000;
1080 E=INT(E+0.5)
1090 POKE 36,35 : PRINT E;
1100 A=FN AP5(A/9.8)
1110 POKE 36,45 : PRINT A;
1120 CR = FN AP5(CR)
1130 POKE 36,55 : PRINT CR
1140 IF IM$="N" THEN 1160
1150 PRINT D$;"PR#0"
1160 PRINT
1190 REM  PROCESSA ATE' A REPETICAO N. 10
1200 IF AN<10 THEN GOTO 510
1220 END
1230 PRINT " AMOSTRA ";
1240 POKE 36,15 : PRINT "Dmax[mm]";
1250 POKE 36,25 : PRINT " R[mm]";
1260 POKE 36,35 : PRINT "Fir.[Pa]";
1270 POKE 36,45 : PRINT "LRA[kgf]";
1280 POKE 36,55 : PRINT "COR"
1290 RETURN
1300 REM  SUBROTINA DE TRATAMENTO DE ERROS
1310 ERR = PEEK(222)
1320 EL = PEEK(219)*256+PEEK(218)
1330 IF ERR = 5 THEN GOTO 1500
1340 IF ERR = 6 THEN GOTO 1520
1350 IF ERR = 254 THEN GOTO 1410
1360 PRINT
1370 PRINT "OCORRENCIA DE ERRO NUMERO ";ERR;","
1380 PRINT " NA LINHA NUMERO ";EL
1390 PRINT
1400 RESUME
1410 REM ERRO = DADO NAO NUMERICO
1415 IF (I+J) < 2 THEN GOTO 1360
1420 PRINT
1430 PRINT "ENCONTRADO CARACTERE NAO NUMERICO ANTES "
1440 PRINT "DO FINAL DO ARQUIVO."
1445 PRINT
1450 PRINT "DE ENTER P/ FINALIZAR A CONSULTA"
1460 PRINT D$
1470 GET A$
1480 IF A$ <> CHR$(13) THEN GOTO 1470
1500 REM  ERRO = END OF DATA
1510 IF (I+J) > 1 THEN GOTO 880
1520 REM  ERRO = FILE NOT FOUND
1530 PRINT
1540 PRINT "ARQUIVO ";AE$;" INEXISTENTE"
1550 PRINT
1560 PRINT D$;"DELETE";AE$
1570 PRINT
1575 REM  ENTRAR COM R1,R2,H,L
1580 DATA ?,?,?,?
1590 DATA ?,?,?,?
1690 END

```

C.3 - Programa para aquisição de dados do ensaio de impacto

```
10 HOME
20 PRINT "PROGRAMA PARA TESTES DE IMPACTO"
30 PRINT
40 PRINT "DE <RETURN> PARA CONTINUAR, "
50 PRINT
60 PRINT "<I> P/ IMPRIMIR OU <SPACE> P/ FINALIZAR"
70 D$=CHR$(4)
100 CALL 768
110 X = PEEK(832) : Y=PEEK(833)
120 N = 12*X + 3077*Y + 7
130 T = N/1020484*0.9
135 T = (T*10^6)+0.5 : T = INT(T) / 10^3
140 PRINT
150 PRINT "T=";T;" ms          ";
165 PRINT "X=";X;"          Y=";Y
170 XX = PEEK(834) : YY = PEEK(835)
173 NN = 12*XX + 3077*YY + 15
175 R = NN/1020484*0.9
178 R = INT(R*10^6+0.5) / 10^3
180 PRINT : PRINT "R=";R;"ms          ";
185 PRINT "X2=";XX;"          Y2=";YY
188 PRINT
190 GET A$
192 IF A$ = CHR$(73) THEN 550      obs: A$ = <I>
195 IF A$ = CHR$(32) THEN GOTO 500 obs: A$ = <space>
200 IF A$ <> CHR$(13) THEN GOTO 190 obs: A$ = <return>
240 GOTO 100
500 PRINT
510 END
550 REM IMPRESSAO DE RESULTADOS
560 PR#1      obs: seta saida p/ impressora
565 PRINT CHR$(9);"K"      obs: elimina retorno do carro
570 PRINT "T.impacto=";T;"      T.rebote=";R
580 PR#0      obs: seta saida p/ video
590 GOTO 190
```

C.4 - Programa para medição do tempo de impacto e rebote

```
0300- LDA #$00
0302- LDX #$00
0304- LDY #$00
0306- STA $0340
0309- STA $0341
030C- STA $0342
030F- STA $0343
0312- LDA $C061
0315- BPL $0312
0317- LDA $C061
031A- BPL $0322
031C- INX
031D- BNE $0317
031F- INY
0320- BNE $0317
0322- STX $0340
0325- STY $0341
0328- LDX #$00
032A- LDY #$00
032C- LDA $C061
032F- BMI $0337
0331- INX
0332- BNE $032C
0334- INY
0335- BNE $032C
0337- STX $0342
033A- STY $0343
033D- RTS
```