

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**EFEITO DE ESFORÇOS VIBRACIONAIS NA ESTRUTURA  
DO TECIDO VEGETAL**

**RENATO LAURENTI**

CAMPINAS  
MARÇO DE 2003

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**EFEITO DE ESFORÇOS VIBRACIONAIS NA ESTRUTURA  
DO TECIDO VEGETAL**

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora para  
obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na  
área de concentração de Máquinas Agrícolas.

**RENATO LAURENTI**  
**Orientador: INÁCIO M. DAL FABBRO**

**CAMPINAS**  
**MARÇO DE 2003**

*o acaso somente favorece o espírito bem preparado*

**PASTEUR**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico aos meus pais, Orlando e Ambrosina, e a meu irmão Ronaldo pelo amparo familiar.

À glória Divina e ao progresso do ser humano.

## **AGRADECIMENTOS**

A elaboração e a realização do presente estudo somente tornou-se possível pela presença de algumas pessoas e instituições:

Ao Prof. Dr. Inácio M. Dal Fabbro pela orientação ao trabalho, porém muito além do trabalho e do estudo agradeço a amizade e o companheirismo não somente de sua pessoa como de sua família, em particular D. Joalice Dal Fabbro que sempre esteve participando das dificuldades e orando por todos. Esta amizade ficou para sempre.

À FEAGRI – UNICAMP, patrimônio nacional a que tive a honra de me aperfeiçoar e poder levar seu nome.

À FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, pelas sugestões técnicas e o amparo financeiro.

Ao ITAL – Instituto de Tecnologia de Alimentos, onde foi realizado parte do experimento.

Aos amigos da UFLA, Dr. Roberto Braga, Dr. Giovanni Francisco Rabello, Dr. Carlos Eduardo Volpato.

Ao professor amigo e colaborador:

Prof. Dr. Antonio José da Silva Maciel

Aos queridos tios, Ilma Laurenti e Toufic El Reaidi, que me apoiaram durante vários períodos.

Aos companheiros da pós-graduação. Agradeço a amizade e companheirismo.

## SUMÁRIO

	Página
EPÍGRAFE.....	ii
DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
SUMÁRIO.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2.OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
3.1. O meio contínuo, homogeneidade, anisotropia e isotropia dos materiais .....	4
3.1.1 Comportamento Elástico Segundo a Lei de Hooke .....	4
3.1.2 Comportamento viscoelástico.....	7
3.2 Teoria básica.....	8
3.2.1 Teoria da elasticidade linear ou lei de Hooke em três dimensões.....	9
3.2.2 Caso genérico para pressão entre dois corpos em contato.....	10
3.2.3 Método de Boussinesq.....	18
3.2.4 Viscoelasticidade formulação analítica.....	19
3.2.5 Princípio da correspondência elástico-viscoelástico.....	24

3.2.6	Viscoelasticidade não linear.....	26
3.2.6.1	Considerações sobre os modelos viscoelásticos analógicos de Maxwell e Kelvin.....	27
3.2.7	Teoria da ruptura.....	29
3.2.7.1	Condições de stress.....	29
3.2.7.2	Condições de strain.....	30
3.2.7.3	Condição de energia.....	30
3.2.8	Aplicação de força e deformação em funções periódicas do tempo.....	31
3.3	Teoria da vibração.....	32
3.3.1	Introdução.....	32
3.3.2	Determinação da firmeza de frutos durante o armazenamento.....	34
3.3.3	Análise de sistemas vibracionais.....	35
3.3.4	Modos de vibração de frutos esféricos.....	35
3.3.5	Rigidez e flexibilidade.....	42
3.3.6	Movimento harmônico.....	43
3.3.7	Análise harmônica.....	47
3.3.8	Vibração harmônica forçada.....	50
3.4	“Complex moduli and compliances”.....	55
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	59
4.1	Introdução.....	59
4.2	Local.....	59
4.3	Material .....	59
4.4	Métodos.....	66
4.5	Análise Estatística para os Ensaio “Sine Dwell” .....	67
4.5.1	Análise de Variância.....	67
4.5.2	Regressão Múltipla.....	68
4.5.3	Modelo Reduzido - Método “Backward” .....	69
4.5.4	Índice de Firmeza Acústico.....	70
4.5.5	Modelo Reduzido - "Método Backward".....	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
5.1	Caracterização dos Espécimes.....	72

5.2	Ensaio Por Varredura Constante.....	74
5.3	Ensaio em Frequências Constantes "Sine Dwell".....	76
5.3.1	Modelo reduzido - "Método de Backard".....	81
5.4	Índice de Firmeza Acústico.....	83
5.4.2	Modelo reduzido - "Método de Backard".....	88
5.5	Comparação Entre a Elasticidade e o Índice de Firmeza Acústico.....	90
5.6	Simulação de Vibração Causada por Transporte Rodoviário.....	91
6	CONCLUSÕES.....	93
7	RECOMENDACOES DE TRABALHOS FUTUROS.....	94
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
9	APÊNCICE.....	100
9.1	Testes de compressão para ensaios "sine dwell".....	100
9.2	Testes no FIRMALON para Determinação do Índice de Firmeza nos Ensaio em "Sine Dwell".....	161



## LISTA DE FIGURAS

	Página
Fig (3. 1) - Cubo elementar de tensões.....	6
Fig. (3.2) - Ensaio de compressão uniaxial em espécimes vegetais cilíndricos.....	6
Fig.(3.3) – Mostra o esquema do método de BOUSSINESQ.....	19
Fig. (3.4) - Gráfico da função degrau unitário.....	20
Fig. (3.5a) Representação de uma função contínua $\sigma_{11}(t)$ Figura (3.4.2a), função $\epsilon_{11}(t)$ Figura (3.5b), arbitrárias como uma somatória de Funções Descontínuas Infinitesimais.....	21
Fig. (3.6) - Modelo Viscoelástico de Maxwell.....	27
Fig. (4.7) - Modelo Generalizado de Maxwell.....	28
Fig. (4.8) - Modelo Viscoelástico de Kelvin.....	28
Fig. (3.9) - Modelo Generalizado de Kelvin.....	29
Fig. (3.10) – Diagrama de um sistema de muitos graus de liberdade MDFS.....	38
Fig. (3.11) - Registro do movimento harmônico.....	43
Fig. (3.12) – Movimento Harmônico com Projeção de um Ponto que se Move numa Circunferência.....	44
Fig. (3.13) – No Movimento Harmônico, a Velocidade e a Aceleração estão à Frente do Deslocamento por $\pi/2$ e $\pi$ .....	46
Fig. (3.14) – Movimento periódico complexo de período $\tau$ .....	48
Fig. (3.15) – Espectro de Fourier (PSD-Power Spectral Density) para uma Função Periódica de Tempo.....	50
Fig. (3.16) – Sistema viscosamente amortecido com excitação harmônica.....	51
Fig. (3.17) – Diagrama vetorial para a vibração forçada com amortecimento.....	52
Fig. (3.18) - Componentes vetoriais de “stress” e “strain” defasados entre eles.....	57
Figura (4.1) - Vista do texturômetro LOYD TA500.....	60
Figura (4.2) - FIRMALON durante ensaio.....	62

Figura (4.3) –Esquema da mesa vibratória modelo MTS 495.10.....	63
Figura (4.4) – Mesa vibratória “shaker” modelo MTS 495.10.....	63
Figura (4.5) – Gerador de Sinais SI 1209.....	64
Figura (4.6) – Espécimes assentados na mesa vibratória e acelerômetro fixado no prato.....	65
Figura (5.1)- Medição da transmissividade da vibração imposta pela mesa vibratória à amostra em estudo.....	75
Figura (5.2) – Comportamento do modulo de elasticidade anterior e posterior ao ensaio vibracional "sine dwell" em diferentes frequências e duração de 1200 s.....	76
Figura (5.3) – Comportamento do modulo de elasticidade anterior e posterior ao ensaio vibracional "sine dwell" em diferentes frequências e duração de 2400 s.....	76
Figura (5.4) – Comportamento do modulo de elasticidade anterior e posterior ao ensaio vibracional "sine dwell" em diferentes frequências e duração de 3600 s.....	77
Figura (5.5) – Superfície de resposta para o modelo linear ajustado com todos os parâmetros. para o módulo de elasticidade.....	79
Figura (5.6) – Curvas de nível do modelo linear com todos os parâmetros ajustados, onde pode-se observar o comportamento retilíneo em função da não significância encontrada pelo método de regressão.....	80
Figura (5.7) – Superfície de resposta para o modelo reduzido com todos os parâmetros para o módulo de elasticidade.....	80
Figura (5.8) – Curvas de nível do modelo reduzido com todos os parâmetros ajustados.....	82
Figura (5.9) – Comportamento do índice de firmeza acústico anterior e posterior ao ensaio cíclico “sine dwell” para diferentes frequências de excitação e tempo de exposição de 1200s.....	84
Figura (5.10) – Comportamento do índice de firmeza acústico anterior e posterior ao ensaio cíclico “sine dwell” para diferentes frequências de excitação e tempo de exposição de 2400s.....	85
Figura (5.11) – Comportamento do índice de firmeza acústico anterior e posterior ao ensaio cíclico “sine dwell” para diferentes frequências de excitação e tempo de exposição de 3600s.....	85

Figura (5.12) – Superfície de resposta para modelo ajustado com todos os parâmetros para o índice de firmeza acústico.....	87
Figura (5.13) – Superfície de resposta para o modelo reduzido ajustado com todos os parâmetros para o índice de firmeza.....	87
Figura (5.13) – Curvas de nível do modelo linear com todos os parâmetros ajustados.....	88
Figura (5.14) – Superfície de resposta para o modelo reduzido ajustado com todos os parâmetros para o índice de firmeza.....	89
Figura (5.15) - Curvas de nível do modelo reduzido com todos os parâmetros ajustados.....	88
Figura (5.16) – Valores para o módulo de elasticidade médio calculado, antes e após as amostras serem submetidas aos ensaios que reproduzem condições de transporte rodoviário.....	90

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

	página
Tabela (3.1) – Valores de <b>m</b> e <b>n</b> para diversos valores de $\theta$ .....	13
Tabela (3.2) – Parâmetros de um Sistema de Muitos Graus de Liberdade.....	41
Tabela (5.1) – Módulos de elasticidade obtidos experimentalmente para os diferentes tratamentos e repetições antes do ensaio “ <i>sine dwell</i> ” .....	73
Tabela (5.2) - ANAVA dos valores médios do modulo de elasticidade das amostras antes do ensaio vibracional.....	73
Tabela (5.3) – Valores médios do módulo de elasticidade antes e após os ensaios vibracionais com frequência constante, tipo “ <i>sine dwell</i> ” para diferentes intervalos de duração.....	76
Tabela (5.4) – Mostra as estimativas dos parâmetros do modelo completo para o modulo de elasticidade calculado antes e após os ensaios "sine dwell" para os diferentes tempos e diferentes frequências.....	79
Tabela (5.5) – Estimativas dos parâmetros do modelo reduzido onde podemos observar que o p-valor apresenta valores significativos para tempo e frequência ao nível de 1% de certeza.....	81
Tabela (5.6) - Valores médios do índice de firmeza acústico antes e após os ensaios vibracionais com frequência constante, tipo “ <i>sine dwell</i> ” para diferentes intervalos de duração.....	84
Tabela (5.7) –Mostra as estimativas dos parâmetros do modelo completo para o índice de firmeza acústico calculado antes e após os ensaios "sine dwell" para os diferentes tempos e diferentes frequências.....	84

Tabela (5.8) – Estimativas dos parâmetros do modelo reduzido para o índice de Firmeza.....	87
Tabela (5.9) - Mostra os valores médios calculados para as amostras, anterior e posterior ao ensaio de reprodução vibratória das condições de transporte rodoviário.....	89

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

$\alpha$ - Deformação	mm
$\beta$ - Valor dependente dos raios $R_1$ e $R_2$	-
$\gamma$ - Distorção específica de cisalhamento	mm
$\varepsilon$ - Deformação específica	mm/mm
$\frac{d\varepsilon}{dt}$ - Taxa de deformação específica (strain rate)	mm/s
$\varepsilon_{ij}$ - Tensor deformação específica	mm/mm
$\varepsilon_{kk}$ - Tensor deformação hidrostática	$\text{mm}^3/\text{mm}^3$
$\varepsilon_v$ - Deformação volumétrica específica	$\text{mm}^3/\text{mm}^3$
$\eta$ - Coeficiente de viscosidade	Pa.s
$\theta$ - Ângulo de cisalhamento	rad
$\nu$ - Coeficiente de Poisson	-
$\sigma_{ij}$ - Tensor tensão	Pa
$\sigma_{kk}$ - Tensor hidrostático	Pa
$\frac{d\sigma}{dt}$ - Taxa de carregamento (stress rate)	N/s
$\sigma_r$ - Tensão radial	Pa
$\sigma_{ij}$ - Tensor tensão	Pa
$\tau$ - Tensão de cisalhamento	Pa
$\tau$ - Período (vibração)	s
$\xi$ - Tempo de retardamento	s
$\lambda$ e $\mu$ - Constantes de Lamé	-
$\phi(t)$ - Função relaxation	Pa
$\psi(t)$ - Função creep	Pa
$a$ - Raio da superfície de contato	mm

$a_{ij}$ - Deflexão $i$ produzida por unidade de força de vibração)	
$a$ - Flexibilidade (vibração)	
$A(t)$ - Área de contato em função do tempo	$\text{mm}^2$
$b$ - Metade da largura da superfície de contato para “Brazilian Test”	$\text{mm}$
$D$ - Deformação	$\text{mm}$
$f$ - frequência (vibração)	$\text{Hz}$
$\dot{F}(t)$ - Força de compressão dependente do tempo	$\text{N}$
$G(t)$ - Módulo de elasticidade transversal em relação ao tempo	$\text{Pa}$
$h$ - Altura do cilindro	$\text{mm}$
$i$ - Aresta do cubo	$\text{mm}$
$I$ - Integral da força de impacto	$\text{N}$
$K(t)$ - Módulo volumétrico dependente do tempo (“bulk modulus”)	$\text{Pa}$
$K_1$ e $K_2$ - Constantes elásticas volumétricas das esferas	$1/\text{Pa}$
$l$ - Comprimento	$\text{mm}$
$\Delta l$ - Variação de comprimento	$\text{mm}$
$m$ - Massa	$\text{kg}$
$P$ - Força	$\text{N}$
$q_0$ - Pressão no centro da superfície de contato	$\text{Pa}$
$r$ - Distância ao eixo $z_1$ ou $z_2$	$\text{mm}$
$R_1$ e $R_2$ - Raio da superfície esférica	$\text{mm}$
$s$ - Parâmetro de Laplace	-
$S$ - Área	$\text{mm}^2$
$S_{ij}$ - Tensor deviatórico	$\text{Pa}$
$t$ - Tempo decorrido	$\text{s}$
$t_i$ - Tempo de impacto	$\text{s}$
$U(i)$ - Vetor deslocamento	$\text{mm}$
$\dot{U}(t)$ - Deformação em função do tempo	$\text{mm/s}$
$v$ - Velocidade	$\text{m/s}$
$v_i$ - Velocidade inicial	$\text{m/s}$
$v_f$ - Velocidade final	$\text{m/s}$
$\Delta v$ - Variação de velocidade	$\text{m/s}$

w - Deslocamento em relação ao eixo Z	mm
z - Distância do ponto m ao plano tangente	mm
Z - Eixo de simetria	-



## RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo estudar os esforços vibracionais como fontes geradoras de danos mecânicos ao material biológico em particular produto agrícola. Conhecendo-se as Teorias Viscoelásticas aplicáveis aos materiais biológicos, bem como a Teoria das Vibrações, foram conduzidos experimentos em produtos “*in natura*”. Espécimes de “*BATATA INGLESA*” (*solanum tuberosum* L.) foram submetidos a ensaios de laboratório para a obtenção de um índice de firmeza acústico bem como módulo de elasticidade, e posteriormente submetidas a diferentes frequências vibratórias durante determinados intervalos de duração. Após os ensaios de vibração, novamente os espécimes foram submetidos à determinação do módulo de elasticidade e firmeza com o objetivo de se verificar a ocorrência de alterações. Ensaios visando gerar conhecimentos de base fundamental, como varredura constante em “ruído branco” determinando os pontos de ressonância, ensaios em frequência constante “sine dwell” em frequências consideradas danosas, em outra etapa do estudo foram conduzidos ensaios de simulação de transporte rodoviário através de equipamentos específicos para essa finalidade. Todos esses dados foram analisados estatisticamente, gerando conclusões a respeito dos efeitos das cargas vibracionais impostas estudados sob o ponto de vista do comportamento do material bem como seus efeitos e conseqüências práticas, onde levam a concluir a existência do forte efeito da frequência e do tempo de exposição das amostras a essas frequências em sua estrutura tecidual.

## ABSTRACT

The present work aims to study the effects of cyclic loading on selected mechanical properties of vegetative tissues. Farm machinery operations involved in all agricultural processes since seedling up to harvesting, transportation, packaging and storage is here considered as a potential generators of vibrating loading. Experiments were carried out on specimens *in natura* and samples of "ENGLISH POTATO" by submitting them to controlled mechanical excitations as well as to previous and after tests determination of modulus of elasticity and acoustic firmness. The tests were conducted by selecting ranges as well as specific frequency values for different loading time. The first trial was set to impose a continuous frequency span ranging from 3 to 500 Hz. In the second test group frequencies were set in a "white noise" format to determine resonant frequencies. In the third group of tests, called Sine Dwell, the equipment was set to vibrate in a specific frequency according to literature recommendation as well as to encountered resonant frequencies from previous tests. In the fourth group of tests, the equipment was set to simulate transport conditions based on data collect on Brazilian roads. A comparison of the resulting effects on modulus of elasticity and acoustic firmness have been made. Modulus of elasticity was obtained from a Lloyd TA 500 electromechanical press and the acoustic firmness obtained from a FIRMALON equipment belonging to FEAGRI, UNICAMP and cyclic tests conducted in the ITAL - CETEA labs in Campinas, SP. The work concludes that it does exist a major effect of cyclic loading on the mechanical properties of potato tissue.

## 1 INTRODUÇÃO

As vibrações mecânicas estão presentes nos diversos setores das atividades agrícolas como, colheita, manuseio, transporte, processamento, etc, desta forma o estudo da vibração apresenta caráter fundamental.

Levantando-se a hipótese da vibração como causadora de injúrias ou “bruising” no tecido vegetal. Sendo assim espécimes de batatas (*solanum tuberosum* L.) foram submetidas à diversas frequências vibratórias em diferentes tempos de duração, frequências essas mencionadas na literatura pertinente e apontadas como causadoras de danos ao material. Desta forma a batata foi utilizada como corpo de prova por apresentar uma estrutura homogênea e isotrópica, de fácil amostragem e manuseio.

O estudo do comportamento mecânico dos tecidos vegetais está baseado nas Teorias da Viscoelasticidade e da Elasticidade ou até em expressões não lineares como Hertz, Boussinesq ou outras. A injúria mecânica do tecido vegetal tem sido interpretada pelas teorias clássicas de ruptura generalizadas segundo a expressão do Hiper Espaço de Higher e Westergaard, contemplando o comportamento mecânico pós-elástico de um material contínuo isotrópico e homogêneo. Assim ensaios de caracterização mecânica, com aplicação de deformação controlada coletando dados de força e deformação antes e após as solicitações vibracionais, foram realizados com o objetivo de se detectar alterações na estrutura do tecido vegetal, caracterizada por alterações em seu módulo de elasticidade e no índice de firmeza acústico. Ensaios em vibrações consideradas críticas pela literatura, ensaios de simulações de transporte rodoviário foram realizados, sendo coletadas amostras do material antes do ensaio vibracional, e após o ensaio, determinando o módulo de elasticidade e índice de firmeza acústico anterior e posterior aos ensaios, e através do ensaio vibracional em “ruído branco” determinou-se os pontos de ressonância. Todos os pontos determinados por esse ensaio também foram estudados,

e submetidos a uma análise estatística objetivando estudar os efeitos da frequência vibratória e do tempo na estrutura do tecido vegetal.

## **2 - OBJETIVOS**

1 - Estudar através de uma varredura com amplitude constante os efeitos puros e simples da vibração em “batata inglesa”, com o intuito de se obter dados de aspecto fundamental para o estudo dos efeitos vibracionais na estrutura mecânica do tecido biológico em particular produto vegetal agrícola.

2 - Conhecendo-se a priori a faixa de frequência vibratória gerada pelo transporte rodoviário, verificar a existência de frequências de ressonância ocorrem nessa faixa de ensaios.

3 – Estudar através de ensaios tipo “side dwell”, ou seja, manter a frequência constante durante um período de tempo para as frequências consideradas críticas.

4 - Simular as condições vibracionais ocorridas no transporte rodoviário através de equipamento hábil para tal, e estudar seus efeitos no modulo de elasticidade dos espécimes.

5 - Estudar a correlação entre os dados obtidos pelo FIRMALON e os do ensaio de compressão.

### **3. - REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1. - O MEIO CONTÍNUO, HOMOGENEIDADE, ISOTROPIA E ANISOTROPIA DOS MATERIAIS**

Um material é dito contínuo quando se assume que a distribuição da matéria constituinte desse material se dá de forma contínua em todo seu volume, ocupando todos os espaços vazios, conceito esse preconizado pela mecânica dos meios contínuos como um postulado básico, o qual, porém na realidade não ocorre. Já um material dito homogêneo possui propriedades idênticas em todos os “pontos”, e, denominados isotrópicos, quando suas propriedades se mantêm em todas as direções, e, anisotrópicos quando suas propriedades variam com a direção, MASE (1970).

##### **3.1.1 - COMPORTAMENTO ELÁSTICO SEGUNDO A LEI DE HOOKE**

Um corpo é constituído de pequenas partículas ou moléculas, entre as quais estão atuando forças. Estas forças moleculares opõem-se à atuação de forças externas. Porém com a atuação dessas forças externas, suas partículas deslocam-se e os deslocamentos mútuos continuam até que o equilíbrio entre as forças exteriores e interiores seja estabelecido. O corpo então se encontra em formação. Durante a deformação, as forças exteriores que estão atuando no corpo produzem trabalho, o qual é transformado completa ou parcialmente em energia potencial de deformação. Se as forças que produziram a deformação do corpo pararem de

atuar total ou parcialmente, o corpo volta total ou parcialmente à sua forma inicial e, durante essa deformação inversa, a energia potencial de deformação acumulada no corpo, pode ser recuperada sob a forma de trabalho exterior. Esta característica dos corpos voltarem à forma inicial, após a retirada da carga, é chamada de elasticidade. Da mesma forma um corpo que não recupera originalmente sua forma após a retirada da carga deformadora, é chamado de parcialmente elástico. No caso de um corpo perfeitamente elástico, o trabalho produzido pelas forças exteriores durante a deformação, será completamente transformado em energia potencial de deformação. No caso de um corpo parcialmente elástico, parte do trabalho produzido pelas forças exteriores, durante a deformação, será perdida sob a forma de calos ou danos, o qual será desenvolvido no corpo durante a deformação não elástica. Muitos materiais estruturais, como aço, madeira e a pedra podem ser considerados perfeitamente elásticos entre certos limites, os quais dependem das propriedades do material.

O objetivo mais comum nas pesquisas dessa área é a determinação das quatro constantes elásticas: E, módulo de elasticidade ou módulo de Young,  $\nu$ , constante de Poisson, G, módulo de elasticidade transversal e K, módulo volumétrico. A determinação dessas constantes elásticas é assunto freqüente devido à necessidade de informações básicas sobre as propriedades do material. Os ensaios mecânicos para se determinar essas constantes em tecidos vegetais se enquadram como ensaios de impacto, compressão ou tração. Tais ensaios são realizados em espécimes cilíndricos com cargas uniaxiais, triaxiais e diametrais; ensaios em espécimes cúbicos envolvendo cargas biaxiais e triaxiais, e, espécimes esféricos com cargas diametrais. A constante de Poisson também pode ser determinada comparando-se a carga e as deformações axiais em espécimes vegetais cilíndricos e restringidos, segundo HUGHES e SEGERLIND (1972); MORROW (1965); DEBAEDEMAMAKER (1975). A constante de Poisson pode ser determinada, impondo-se restrições às condições de contorno aplicadas a Lei de Hooke. Experimentalmente isto se consegue restringindo-se as deformações relativas  $\epsilon_{22}$  e  $\epsilon_{33}$  ao valor zero.

O módulo de elasticidade é determinado aplicando-se tensão uniaxial em espécimes cúbicos ou longitudinalmente em espécimes cilíndricos. Isto equivale a impor as condições de contorno  $\sigma_{11} \neq 0$ ,  $\epsilon_{11} \neq 0$ ,  $\epsilon_{22} = \epsilon_{33} \neq 0$ ,  $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$ , observando a Figura (3.1) – Cubo Elementar de Tensões à Lei de Hooke Generalizada, o que resulta em :

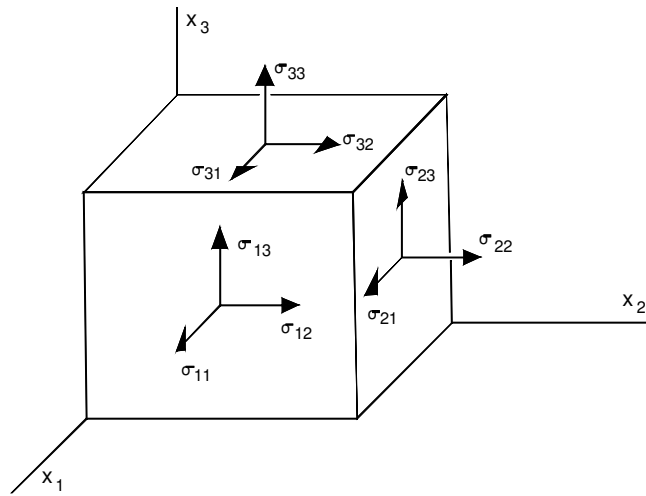


Figura (3.1) – Cubo Elementar de Tensões.

$$\sigma_{11} = E \varepsilon_{11} \quad (3.1.)$$

Ensaio de compressão uniaxial em tecidos vegetais é descrito por MOHSEENIM (1970), um autor clássico nesse estudo, conforme ilustra a Figura (3.2).

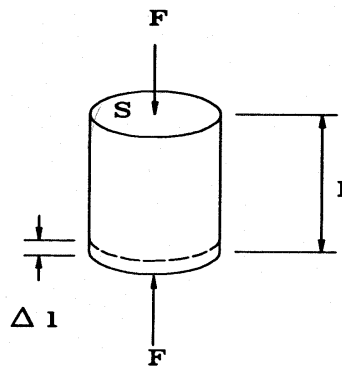


Fig. (3.2) - Ensaio de compressão uniaxial em espécimes vegetais cilíndricos.



$$E = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3.3)$$

### 3.1.2 - COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO

Investigações demonstram a existência da dependência do tempo no comportamento de materiais biológicos. Um material biológico é considerado um meio multi-fase, constituído de gás, líquido e sólido. A reologia passa a ser então um estudo importante no estudo do comportamento mecânico de tais materiais. MASE (1970), afirma que os materiais viscoelásticos diferem dos materiais elásticos nos relacionamentos entre os tensores de deformação e de tensão.

Segundo MASE (1970), e CHRISTENSEN (1982), os materiais viscoelásticos incluem o parâmetro tempo na relação tensão-deformação, dependendo da taxa de aplicação da carga, e da taxa de deformação. Portanto esses materiais ao invés de apresentarem constantes características, apresentam funções do tempo, as quais podem ou não ser lineares:  $E(t)$ ,  $G(t)$ ,  $K(t)$ ,  $\nu(t)$ , que combinadas entre si, formam as funções  $\psi(t)$  e  $\phi(t)$ , denominadas respectivamente “**creep**” e “**relaxation**”.

Segundo MASE (1970), existem dois ensaios básicos para a determinação de parâmetros viscoelásticos, “Relaxation Test” onde o corpo de prova é submetido a uma deformação, instantânea e constante, e a tensão medida com o decorrer do tempo. No segundo ensaio, denominado “Creep Test” uma tensão constante é aplicada e medida a deformação ao longo do tempo.

Segundo ZOERB (1958), a taxa de deformação afeta a resposta de um teste de impacto em material biológico. Segundo MORROW e MOHSENIN (1966), o comportamento viscoelástico não linear da maçã pode ser descrito através de relações constitutivas lineares.

MURASE (1977), também interpretou o material biológico como sendo um meio constituído de gás, líquido, sólido, propondo para tal uma equação constitutiva.

DAL FABBRO (1979), estudando o comportamento elástico e viscoelástico linear e não linear, valeu-se de espécimes cúbicos e cilíndricos, propondo para materiais biológicos uma teoria de ruptura específica. As funções “Relaxation” podem ser determinadas por carregamentos de tipo volumétrico e uniaxial segundo MORROW e MOHSENIN (1966). Determinadas experimentalmente para o tecido de maçã, as funções “Bulk” e “Shear Relaxation”, aplicadas em uma esfera viscoelástica sob a atuação da carga entre uma superfície plana, DeBAERDEMAEKER (1975).

WANG & CHANG (1970), a função “Creep” do mamão foi determinada sob condições de “dead load” imposta por placas paralelas. DeBAERDEMAEKER (1975), trabalhando com uma esfera viscoelástica e submetida a cargas de contato pode ser experimentalmente estudada e simulada numericamente.

### **3.2 - TEORIA BÁSICA**

O presente capítulo versa sobre as leis básicas do comportamento mecânico dos materiais, a saber, a Lei de Hooke em Três Dimensões, a Lei de Hertz e o modelo viscoelástico analítico. Os casos de tensões de contato, características de carregamento diametral de corpos cilíndricos e esféricos, são tratadas pela Teoria de Contato de Hertz.

### 3.2.1 - TEORIA DA ELASTICIDADE LINEAR OU LEI DE HOOKE EM TRÊS DIMENSÕES

A elasticidade linear assume que os deslocamentos e gradientes de deslocamento são suficientemente pequenos, não sendo necessária a distinção entre a descrição de Lagrange e de Euler. Sendo assim, para o vetor deslocamento  $U_i$ , temos:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right] = \frac{1}{2} \left( u_{ij} + u_{ji} \right) \quad (3.4)$$

A equação constitutiva para um sólido elástico linear, associando os vetores tensão e deformação é:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (3.5)$$

Que é conhecida como a Lei de Hooke Generalizada.

Segundo MASE (1970), tomando as constantes de Lamé,  $\lambda$  e  $\mu$ , tem-se que para um corpo isotrópico contínuo e homogêneo a Lei de Hooke pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (3.6)$$

Para expressar a deformação em termos de tensão, inverte-se:

$$\epsilon_{ij} = \frac{-\lambda}{2\mu(\lambda + 2\mu)} \delta_{ij} \sigma_{kk} + \frac{1}{2\mu} \sigma_{ij} \quad (3.7)$$

ou

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left( \epsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \epsilon_{kk} \right) \quad (3.8)$$

Para o cálculo das tensões, e

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \sigma_{kk} \quad (3.9)$$

para o cálculo das deformações relativas.

Um estado de tensão uniaxial de um espécime é descrito da seguinte maneira:  $\sigma_{11}$  não nulo,  $\varepsilon_{11}$  não nulo,  $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$ ,  $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$  não nulo, assim temos:

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11} \quad (3.10)$$

### 3.2.2 - CASO GENÉRICO PARA PRESSÃO ENTRE DOIS CORPOS EM CONTATO

Segundo TIMOSHENKO e GOODIER (1970), para o caso geral de compressão entre corpos elásticos em contato pode ser tratado considerando o plano tangente ao ponto **O**, como plano **xy**:

$$z_1 = A_1x^2 + A_2xy + A_3y^2 \quad (3.11)$$

$$z_2 = B_1x^2 + B_2xy + B_3y^2 \quad (3.12)$$

A distância entre os pontos **M** e **N** é:

$$z_1 + z_2 = (A_1 + B_1)x^2 + (A_2 + B_2)xy + (A_3 + B_3)y^2 \quad (3.13)$$

Sendo as direções  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{y}$  aquelas que anulam o termo que contém o produto  $\mathbf{xy}$ .

Assim:

$$z_1 + z_2 = Ax^2 + By^2 \quad (3.14)$$

em que  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  são constantes cujos valores dependem das grandezas das curvaturas principais das superfícies em contato e do ângulo formado entre os planos de curvatura principal. Sendo  $R_1$  e  $R_1'$  os raios principais da curvatura no ponto de contato dos corpos,  $R_2$  e  $R_2'$  os do outro, (a curvatura de um corpo é considerada positiva se o raio de curvatura, neste ponto, penetra no seu interior, para assento esférico possui curvatura negativa), e  $\Psi$  o ângulo compreendido entre os planos normais que contêm as curvaturas  $1/R_1$  e  $1/R_2$ , então as constantes  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  poderão ser determinadas assim:

$$A = B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right) \quad (3.15)$$

$$B - A = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right)^2 + 2 \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right) \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right) \cos 2\Psi \right]^{1/2} \quad (3.16)$$

$\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  na equação (3.14) são positivos, já que  $\mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2$  deve ser positivo. Dai concluímos que a distância  $\mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2$  se encontra sobre uma elipse. Supondo que  $\alpha$ ,  $\mathbf{w}_1$ ,  $\mathbf{w}_2$ , tenham o mesmo significado do caso anterior:

$$w_1 + w_2 + z_1 + z_2 = \alpha \quad (3.17)$$

ou

$$w_1 + w_2 = \alpha - Ax^2 - By^2 \quad (3.18)$$

Relação esta obtida de considerações geométricas.

Admitindo que a superfície de contato é muito pequena, a soma dos deslocamentos  $w_1$  e  $w_2$  para os pontos da superfície de contato será:

$$w_1 + w_2 = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \right) \iint \frac{q dA}{r} \quad (3.19)$$

Onde  $q dA$  é a pressão sobre um elemento infinitesimal da superfície de contato e  $r$  é a distância entre eles e o ponto em consideração.

$$(K_1 + K_2) \iint \frac{q dA}{r} = \alpha - Ax^2 - By^2 \quad (3.20)$$

Para se encontrar uma distribuição de pressões  $q$  que satisfaça a equação anterior, Hertz admitiu a intensidade das pressões  $q$  na superfície de contato como representada pelas ordenadas de um semi-elipsóide, construído sobre esta mesma superfície. A pressão máxima localizada no centro da superfície de contato. Designando-a por  $q_0$  e por  $a$  e  $b$  os semi eixos do contorno elíptico da superfície de contato,

$$P = \iint q dA = \frac{2}{3} \pi ab q_0 \quad (3.21)$$

Da qual:

$$q_0 = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi ab} \quad (3.22)$$

Vê-se que a pressão máxima é 1.5 vezes a pressão média na superfície de contato. Para-se calcular esta pressão deve-se conhecer o valor dos semi-eixos  $a$  e  $b$ . Fazendo-se uma analogia à usada para corpos esféricos temos:

$$a = m^3 \sqrt{\frac{3\pi P(K_1 + K_2)}{4(A+B)}} \quad (3.23)$$

$$b = n^3 \sqrt{\frac{3\pi P(K_1 + K_2)}{4(A+B)}} \quad (3.24)$$

em que  $\mathbf{A} + \mathbf{B}$  é determinado pelas equações (3.23) e (3.24), os coeficientes  $\mathbf{m}$  e  $\mathbf{n}$  dependem da relação  $(\mathbf{B}-\mathbf{A})/(\mathbf{A}+\mathbf{B})$ . Utilizando a notação:

$$\cos \theta = \frac{B - A}{A + B} \quad (3.25)$$

$\theta$	$30^0$	$35^0$	$40^0$	$45^0$	$50^0$	$55^0$	$60^0$	$65^0$	$70^0$	$75^0$	$80^0$	$85^0$	$90^0$
$\mathbf{m}$	2.731	2.397	2.136	1.926	1.754	1.611	1.486	1.378	1.284	1.202	1.128	1.061	1.000
$\mathbf{n}$	0.493	0.530	0.567	0.604	0.641	0.678	0.717	0.759	0.802	0.846	0.893	0.944	1.000

Tabela (3.1) – Valores de  $\mathbf{m}$  e  $\mathbf{n}$  para diversos valores de  $\theta$ . MARTINS (1993).

Conhecendo-se a distribuição de pressões pode-se calcular as tensões em qualquer ponto. Foi demonstrado desta maneira que o ponto de máxima tensão cisalhante se situa sobre o eixo  $\mathbf{z}$ , dependendo do comprimento dos semi-eixos  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$ . Considerando-se os pontos da superfície elíptica de contato e tomando os eixos  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{y}$  na direção dos semi-eixos  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$ , respectivamente, as tensões principais no centro da superfície de contato são:

$$\sigma_x = -2\nu q_o - (1 - 2\nu)q_o \frac{b}{a+b} \quad (3.26)$$

$$\sigma_y = -2\nu q_o - (1-2\nu)q_o \frac{a}{a+b} \quad (3.27)$$

$$\sigma_z = -q_o \quad (3.28)$$

Para as extremidades dos eixos da elipse temos  $\sigma_x = -\sigma_y$  e  $\sigma_{xy} = 0$ . A tensão de tração na direção radial é igual à tensão compressiva na direção circunferencial. Nestes pontos portanto existe um cisalhamento puro. A intensidade deste cisalhamento nas extremidades do eixo maior ( $x = \pm a, y = 0$ ) é:

$$\tau = (1-2\nu)q_o \frac{\beta}{e^2} \left( \frac{1}{e} \arctan e - 1 \right) \quad (3.29)$$

e para os extremos dos eixo menor ( $x = 0, y = \pm b$ ):

$$\tau = (1-2\nu)q_o \frac{\beta}{e^2} \left( 1 - \frac{\beta}{e} \arctan \frac{e}{\beta} \right) \quad (3.30)$$

Onde:

$$\beta = \frac{b}{a} \quad (3.31)$$

$$e = \left( \frac{1}{a} \right) \sqrt{a^2 - b^2} \quad (3.32)$$

Quando **b** se aproxima de **a** e o contorno da superfície de contato tende a uma forma circular, as tensões dadas por **(i)**, **(j)** e **(k)** se aproximam das obtidas anteriormente para o caso da compressão entre esferas.

De uma forma mais simples, para o cálculo de **E** entre esfera comprimida por placas planas, tem-se:



$$E = 0.75F(1 - \nu^2) \frac{1}{D^{3/2}} * \frac{1}{R^{1/2}} \quad (3.33)$$

Onde **D** e **a**, são obtidos assim:

$$D = 0.75F \frac{(1 - \nu^2)}{E} \frac{1}{a} \quad (3.34)$$

$$a = 0.75 \frac{F}{D} \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right) \quad (3.35)$$

Aumentando a relação **a/b**, Obten-se elipses de contato cada vez mais estreitas, e no limite **a/b=∞**, chega-se ao caso do contato de dois cilindros com eixos paralelos. A superfície agora é um retângulo estreito. A distribuição de pressões **q** ao longo da largura da superfície de contato é representada por uma semi-elipse. Se o eixo **x** for perpendicular ao plano da figura, e **b** a metade da largura da superfície de contato, e **p'** a carga por unidade de comprimento:

$$P' = \frac{1}{2} \pi b q_o \quad (3.36)$$

Donde:

$$q_o = \frac{2P'}{\pi b} \quad (3.37)$$

Para o estudo da deformação local, tem-se:

$$b = \sqrt{\frac{4P'(K_1 + K_2)R_1R_2}{R_1 + R_2}} \quad (3.38)$$

Para um valor de  $\nu = 0,3$

$$b = 1,52 \sqrt{\frac{P'R_1R_2}{E(R_1 + R_2)}} \quad (3.39)$$

No caso de  $\mathbf{R}_1=\mathbf{R}_2=\mathbf{R}$ , tem-se,

$$b = 1,08 \sqrt{\frac{P'R}{E}} \quad (3.40)$$

para o caso de um cilindro em contato com uma superfície plana tem-se,

$$b = 1,52 \sqrt{\frac{P'R}{E}} \quad (3.40)$$

Substituindo  $\mathbf{b}$  da equação (3.36) em (3.32) tem-se,

$$q_0 = \sqrt{\frac{P'(R_1 + R_2)}{\pi^2 (K_1 + K_2) R_1 R_2}} \quad (3.41)$$

Para materiais com  $\nu = 0.3$  tem-se,

$$q_0 = 0,418 \sqrt{\frac{P'E(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}} \quad (3.42)$$

E para o caso de um cilindro comprimido contra uma superfície plana:

$$q_0 = 0,418 \sqrt{\frac{P'E}{R}} \quad (3.43)$$

Conhecendo  $q_0$  e  $b$ , a tensão em qualquer ponto pode ser calculada. Estes cálculos mostram que o ponto de máxima tensão cisalhante se encontra sobre o eixo  $z$ .

Onde:

$$K_1 = \frac{1 - \nu_i^2}{\pi E_i} \quad (3.44)$$

$$q_0 = \frac{2P}{\pi b} \quad (3.45)$$

$$E = \frac{8(1 - \nu^2)Z^2 F}{\pi D} \quad (3.46)$$

Onde  $Z$  é obtido iterativamente:

$$Z = \frac{R}{b} \quad (3.47)$$

$$\frac{\alpha}{D} = \frac{1}{2Z^2} \left[ \ln(2Z) + \frac{1}{2} \right] \quad (3.48)$$

$$\alpha = \frac{-b^2}{R} \left[ \ln\left(\frac{b}{2R}\right) - \frac{1}{2} \right] \quad (3.49)$$

### 3.2.3 - MÉTODO DE BOUSSINESQ

Para a avaliação das propriedades mecânicas de alimentos, sucos, frutas e vegetais, cereais e grãos muitas investigações são realizadas usando-se um cilindro rígido para se estudar a relação carga deformação do material prensado em um cilindro sobre um plano sólido. Este método sugerido por MOSHENIM (1870), sugestão original de BOUSSINESQ em 1885, foi expandida por TIMOSHENKO e GOODIER (1951) para incluir considerações em três dimensões. O método de HERTZ é aplicado para análise da determinação da máxima superfície de pressão e do módulo de elasticidade, pressionado entre duas placas convexas ou plana, já a de BOUSSINESQ pode ser aplicado para estudar a distribuição de pressão entre um corpo restringido, como mostra a Figura (3.3)

Assim a equação de BOUSSINESQ é escrita para pressão máxima:

$$p = \frac{F}{2\pi a \sqrt{a^2 - r^2}} \quad (3.50)$$

onde

F = carga total

a = raio do corpo

r = raio da superfície de contato

Para pressão mínima, r=0:

$$p_{\min} = \frac{1}{2} \left( \frac{F}{\pi a^2} \right) \quad (3.512)$$

A relação entre a deformação D, e a força aplicada F:

$$D = \frac{F(1 - \mu^2)}{2aE} \quad (3.52)$$

Onde  $\mu$ =coeficiente de Poisson e  $E$  o módulo de elasticidade do material.

$$E = \frac{F}{D} \frac{(1-\mu^2)}{2a} \quad (3.53)$$

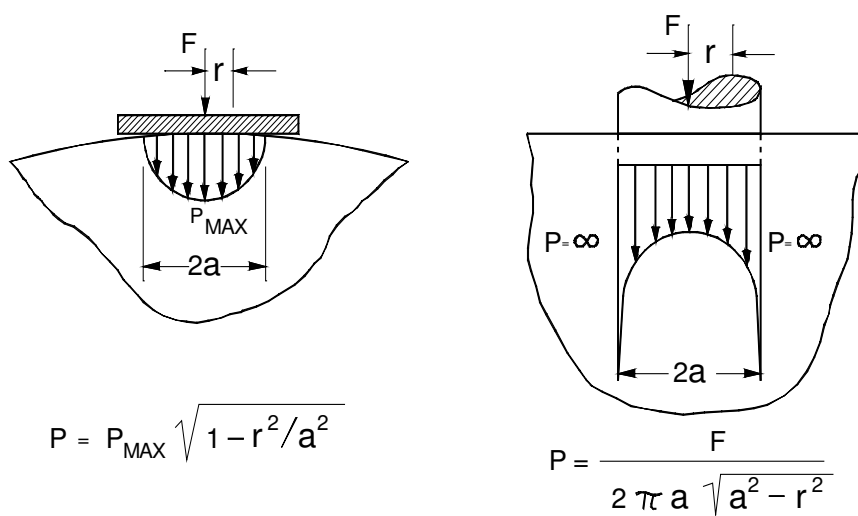


Figura. (3.3) – esquema do método de BOUSSINESQ.

### 3.2.4 - VISCOELASTICIDADE FORMULAÇÃO ANALÍTICA

Segundo MASE (1970), e CRISTENSEM (1982), pode se definir função de Grau Unitário  $[U(t-t_1)]$  como sendo,

$$U[t-t_1] \begin{cases} = 0 \Rightarrow t < t_1 \\ = 1 \Rightarrow t > t_1 \end{cases}$$

Conforme ilustra abaixo:

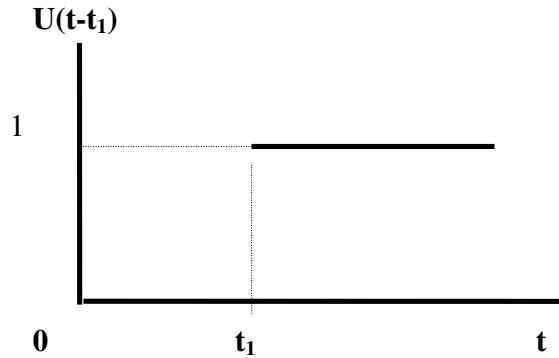


Figura. (3.4) - Gráfico da Função Degrau Unitário

Pode-se definir um ensaio “**Creep**” como sendo a imposição de uma carga uniaxial  $\sigma_0$  a partir do instante  $t_1$  e dessa forma expressar a deformação específica como sendo função de uma nova função material denominada **Função “Creep”**  $\psi(t)$  e então:

$$\varepsilon_{11}(t) = \psi(t)\sigma_0 \quad (3.54)$$

Da mesma forma se impõe uma deformação específica uniaxial  $\varepsilon_0$  a partir do instante  $t_1$ , num ensaio “**Relaxation**”, envolvendo a **Função “Relaxation”**  $\phi(t)$  tida também como característica matricial, obtendo-se a carga resultante, como:

$$\sigma_{11}(t) = \phi(t)\varepsilon_0 \quad (3.55)$$

Como o princípio da superposição também aqui é válido, ou seja o efeito total da soma de suas cargas é igual a soma dos efeitos de cada carga, podemos expressar uma função  $\sigma_{11}(t)$  ou  $\varepsilon_{11}(t)$  como:

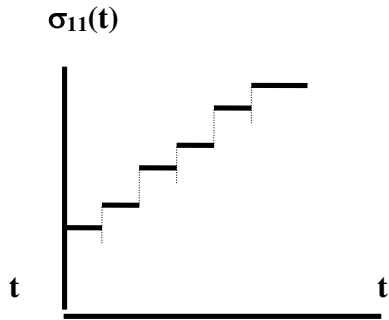


Figura. – (3.5a)

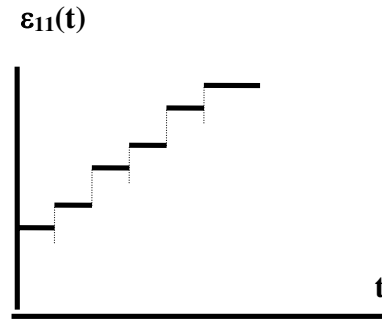


Figura. – (3.5.b)

Figura. – (3.4.a) Representação de uma função contínua  $\sigma_{11}(t)$  Figura (3.4.2a), função  $\varepsilon_{11}(t)$  Figura (3.4.b), arbitrárias como uma somatória de funções descontínuas infinitesimais.

Das quais se conclui que:

$$\varepsilon_{11}(t) = \sigma_0 \psi(t) + \sigma_1 \psi(t - t_1) + \sigma_2 \psi(t - t_2) + \dots = \sum_{i=0}^{\infty} \sigma_i \psi(t - t_i) \quad (3.56)$$

E que:

$$\sigma_{11}(t) = \varepsilon_0 \phi(t) + \varepsilon_1(t - t_1) + \varepsilon_2 \psi(t - t_2) + \dots = \sum_{i=0}^{\infty} \varepsilon_i \psi(t - t_i) \quad (3.57)$$

Se o material estiver totalmente sem solicitações até o instante inicial, tem-se que:

$$\varepsilon_{11}(t) = \int_0^t \frac{d\sigma_{11}(t')}{dt'} \psi(t - t') dt' \quad (3.58)$$

$$\sigma_{11}(t) = \int_0^t \frac{d\varepsilon_{11}(t')}{dt'} \phi(t-t') dt' \quad (3.59)$$

Conhecidas como integrais hereditárias, as quais expressão de forma analítica o comportamento viscoelástico linear material.

A relação entre as funções “**Creep**” e “**Relaxation**” através da transformada de Laplace:

$$\bar{\psi}(s)\bar{\phi}(s) = \frac{1}{s^2} \quad (3.60)$$

Se os tensores totais forem subdivididos em seus componentes deviatóricos e hidrostáticos, podemos definir as funções  $\mathbf{G}_1(\mathbf{t})$ ,  $\mathbf{G}_2(\mathbf{t})$ ,  $\boldsymbol{\tau}_1(\mathbf{t})$ ,  $\boldsymbol{\tau}_2(\mathbf{t})$ , como sendo respectivamente as funções Creep e Relaxation para cada caso, a saber:

$$S_{ij}(t) = \int_0^t G_1(t-\tau) \frac{d\varepsilon_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (3.61)$$

$$\sigma_{kk}(t) = \int_0^t G_2(t-\tau) \frac{d\varepsilon_{kk}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (3.62)$$

$$\varepsilon_{ij}(t) = \int_0^t \tau_1(t-\tau) \frac{dS_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (3.63)$$

$$\varepsilon_{kk}(t) = \int_0^t \tau_2(t-\tau) \frac{d\sigma_{kk}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (3.64)$$

As equações acima são conhecidas como integrais hereditárias devido a tensão em qualquer tempo ser dependente de todo histórico de deformação.

Segundo MASE (1970) e CHRISTENSEN (1982), no desenvolvimento da teoria tridimensional da viscoelasticidade linear, normalmente consideram separadamente o



comportamento viscoelástico sobre condições de cisalhamento puro e dilatação pura. Estes feitos **distorcionais** e **volumétricos** são prescritos independentemente, e subseqüentemente combinados para prover a teoria geral. Matematicamente, isto pode ser resolvido tomando os tensores **Tensão** e **Deformação Específica** decompostos em suas componentes deviatóricas e esféricas, cujas relações constitutivas são escritas da seguinte maneira.

A decomposição do tensor **Tensão** dado por:

$$\sigma_{ij}(t) = S_{ij}(t) + \frac{\delta_{ij}\sigma_{kk}(t)}{3} \quad (3.65)$$

e o tensor **Deformação específica** :

$$\varepsilon_{ij}(t) = e_{ij}(t) + \frac{\delta_{ij}\varepsilon_{kk}(t)}{3} \quad (3.66)$$

Escrevendo as equações de cisalhamento e dilatação separadamente, em função das constantes K e G, temos:

$$S_{ij}(t) = 2Ge_{ij}(t) \quad (3.67)$$

$$\sigma_{kk}(t) = 3K\varepsilon_{kk}(t) \quad (3.68)$$

Seguindo a mesma regra geral de separação para o comportamento distorcional e hidrostático, as relações constitutivas para a viscoelasticidade tridimensional em forma de integral **creep** são dadas por:

- Tensor **Deformação** deviatório -

$$e_{ij} = \int_0^t \psi_s(t-t') \frac{\partial \mathcal{S}_{ij}}{\partial \alpha'} dt' \quad (3.69)$$

- Tensor **Deformação** hidrostático

$$\varepsilon_{ii} = \int_0^t \psi_v(t-t') \frac{\partial \sigma_{ii}}{\partial \alpha'} dt' \quad (3.70)$$

e na forma de integral “**Relaxation**”, por:

- Tensor **Tensão** deviatórico

$$S_{ij} = \int_0^t \phi_s(t-t') \frac{\partial e_{ij}}{\partial \alpha'} dt' \quad (3.71)$$

- Tensor **Tensão** hidrostático

$$\sigma_{ii} = \int_0^t \phi_v(t-t') \frac{\partial \varepsilon_{ii}}{\partial \alpha'} dt' \quad (3.72)$$

Para a determinação das funções **Uniaxial “Relaxation” E(t)** e “**Constrained Relaxation” X(t)**, utiliza-se as funções  $G_1(t)$  e  $G_2(t)$  mais as Transformadas de Laplace, que serão descritas no item seguinte.

### 3.2.5 - PRINCÍPIO DA CORRESPONDÊNCIA ELÁSTICO-VISCOELÁSTICO

Segundo MASE (1970) e CHRISTENSEN (1982), este princípio surge de forma análoga entre as equações que governam o campo elástico e as transformadas de Laplace considerando o tempo das equações básicas da viscoelasticidade de acordo com a definição:

$$\bar{f}(x_k, s) = \int_0^{\infty} f(x_k, t) e^{-st} dt \quad (3.73)$$

Tanto a integral “**creep**” (3.69) ou a integral “**relaxation**” (3.71) podem ser usadas para especificar as características de um dado material, isto alerta ao fato que deve existir algum relacionamento entre a função ”**creep**”  $\psi(t)$  e a função “**relaxation**”  $\phi(t)$ . Tal relacionamento não é facilmente determinado em geral, mas usando a definição (3.73) é possível mostrar que as transformadas de  $\psi(t)$  e  $\phi(t)$  são relacionadas pela equação:

$$\bar{\psi}(s)\bar{\phi}(s) = 1/s^2 \quad (3.74)$$

Onde  $s$  é o parâmetro de transformação (MASE, 1970).

É possível definir as funções “**relaxation**” de forma apropriada a outros estados de **Tensão** uniforme em termos de  $\mathbf{G}_1(t)$  e  $\mathbf{G}_2(t)$ . A analogia entre as transformadas de Laplace para as relações viscoelásticas isotrópicas de **Deformação-Tensão** e as relações comparáveis elásticas isotrópicas de **Tensão-Deformação**, mostra que as funções “**relaxation**” para outros estados de **Tensão** são definidas simplesmente através das relações elásticas, pela substituição do módulo elástico pelo multiplicador de transformação  $s$  das funções viscoelásticas de “**relaxation**”.

Por exemplo, a função uniaxial de “**relaxation**” é definida pela transformada,

$$\bar{E}(s) = \frac{3\bar{G}_1(s)\bar{G}_2(s)}{\bar{G}_1(s) + 2\bar{G}_2(s)} \quad (3.75)$$

e a função “constrained **relaxation**”,

$$\bar{X}(s) = \frac{2\bar{G}_1(s) + \bar{G}_2(s)}{3} \quad (3.76)$$

Segundo CHRISTENSEN (1982), apud LINARES & DAL FABBRO (1997), o princípio da correspondência apresenta algumas limitações, pois as equações básicas que governam os problemas viscoelásticos de contorno, estão sujeitos a condição que  $B_u$  e  $B_\sigma$  são independentes do tempo, onde estas são partes do contorno sobre a qual componentes de deslocamento e componentes do vetor tensão respectivamente são prescritos. Caso isto não seja verdadeiro, em alguns pontos do contorno deverão ser prescritos deslocamentos para alguns valores de tempo e prescritas componentes do vetor tensão para outros valores de tempo. Nestes casos, o uso de transformação por métodos de integração falha porque seu uso requer que o tipo de condições de contorno (componentes de deslocamento ou vetor tensão) sejam invariáveis com o tempo.

### 3.2.6 - VISCOELASTICIDADE NÃO LINEAR

Viscoelasticidade não linear tem muitos aspectos em comum com a teoria linear e o aspecto mais fundamental entre ambas é a “**hipótese da memória**”. Em termos de relacionamento entre **Tensão** e **Deformação**, isto significa que o valor de **Tensão** não é determinado apenas pelo valor corrente de **Deformação**, mas também pelo completo histórico passado de **Deformação**. Esta hipótese, de que o material tem na memória registrados eventos passados nos quais ocorreram deformações, é o ponto de partida no desenvolvimento da teoria linear, mas sendo também para a teoria não linear.

Outro aspecto importante é a não linearidade geométrica, característica quando a deformação do material não possui uma relação linear com o aumento da área de contato durante um ensaio de compressão. Nesse último caso se inclui todos os casos de deformação-tensão em corpos esféricos e cilíndricos, comprimidos diametralmente.

### 3.2.6.1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS VISCOELÁSTICOS ANALÓGICOS DE MAXWELL E KELVIN

Na interpretação analógica o comportamento viscoelástico linear de materiais biológicos é representado por molas caracterizando o comportamento elástico, e, amortecedores caracterizando o comportamento viscoso. Assim:

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11} \quad (3.78)$$

$$\sigma_{11} = \eta\dot{\varepsilon}_{11} \quad (3.79)$$

A relação entre tensão e deformação para o modelo viscoelástico de Maxwell figura (3.8.1) é expresso da seguinte forma:

$$\dot{\varepsilon}_{11} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\mu} \quad (3.80)$$

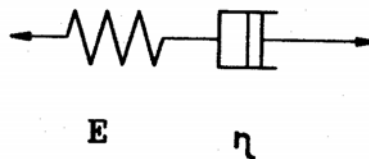


Figura (3.6) - Modelo Viscoelástico de Maxwell. MASE (1970)

A generalização do modelo de Maxwell Figura (3.7) é dada por:

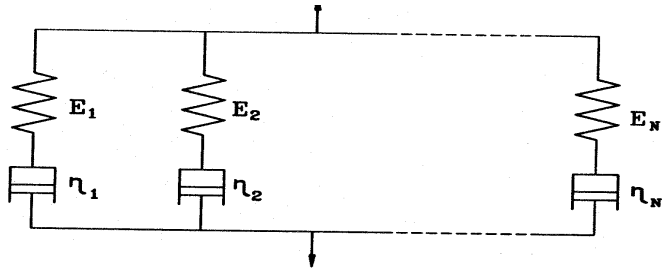


Figura (3.7) - Modelo Generalizado de Maxwell. MASE (1970)

Para o modelo de Kelvin-Voigt temos:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon} \quad (3.81)$$

Reescrevendo:

$$\sigma = \{E + \eta \partial_t\} \varepsilon \quad (3.82)$$

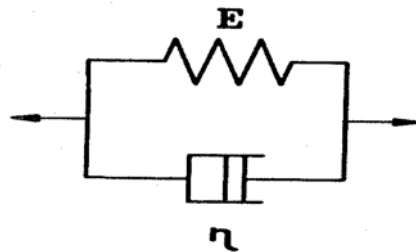


Figura (3.8) – Modelo Vviscoelástico de Kelvin. MASE (1970)

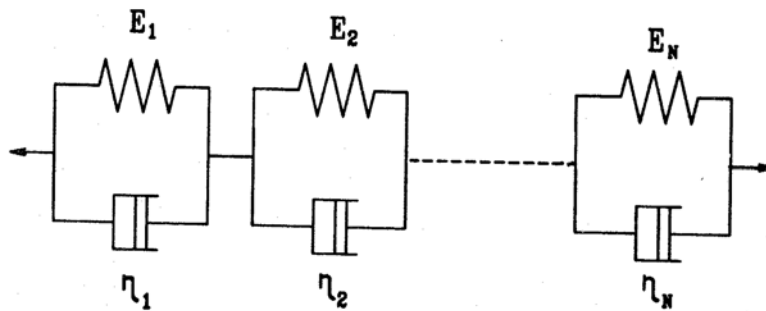


Figura (3.9) - Modelo Generalizado de Kelvin. MASE (1970)

O modelo de Kelvin é formado por uma mola e um amortecedor em paralelo, segundo Figura (3.8), e sua generalização, Figura (3.9). A equação constitutiva deste modelo analógico é dada por:

$$\sigma_{11}(t) = G\varepsilon_{11}(t) + \eta\dot{\varepsilon}_{11}(t) \quad (3.83)$$

### 3.2.7 - TEORIA DA RUPTURA

#### 3.2.7.1 - CONDIÇÕES DE STRESS

A teoria assume que a ruptura ocorre onde houver maior tensão normal de compressão ou tração.

Assim para compressão tridimensional:

$$\sigma_{11} = \sigma_{oc} \quad \sigma_{22} = \sigma_{oc} \quad \sigma_{33} = \sigma_{oc}$$

Para tração:

$$\sigma_{11} = \sigma_{ot}$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{ot}$$

$$\sigma_{33} = \sigma_{oc}$$

### 3.2.7.2 CONDIÇÕES DE STRAIN

Assume o valor máximo de deformação

$$\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33}) = \pm \sigma_0$$

$$\sigma_{22} - \nu(\sigma_{33} + \sigma_{11}) = \pm \sigma_0$$

$$\sigma_{33} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22}) = \pm \sigma_0$$

Onde  $\sigma_0 = \sigma_{oc} = \sigma_{ot}$  e  $\nu =$  Poisson.

### 3.2.7.3 CONDIÇÃO DE ENERGIA

Energia constante deformação total

A representação da superfície de ruptura no espaço é um elipsóide de revolução.

$$\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - 2G(\sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}\sigma_{33} + \sigma_{33}\sigma_{11}) = \sigma_0^2 \quad (3.84)$$



### 3.2.8 APLICAÇÃO DE FORÇA E DEFORMAÇÃO EM FUNÇÕES PERIÓDICAS DO TEMPO

Segundo LAURENTI (1997) uma vez que a Lei Generalizada de Hooke dá origem ao relacionamento  $F_{11}(t)$  e  $U_{11}(t)$  para o caso uniaxial de aplicação de força ou deformação,  $F_{11} = EU_{11}(t)$ , ambas descritas em função do tempo. Tem-se que,

$$E = \frac{F_{11}(t)}{U_{11}(t)} \quad (3.85)$$

Como exemplo, se  $F_{11}(t) = A \sin 2\pi ft$  e  $U_{11}(t) = B \sin 2\pi ft$ , onde **A** e **B** são amplitudes e, frequência, e não houve defasagem entre a função excitação e função resposta, Ter-se á que,

$$E = \frac{A}{B} \quad (3.86)$$

A defasagem dessa função indicaria a presença de um comportamento viscoelástico.

### 3.3 - TEORIA DA VIBRAÇÃO

#### 3.3.1 - INTRODUÇÃO

Segundo THOMSON (1978), o estudo da vibração diz respeito aos movimentos oscilatórios de corpos e às forças que lhes são associadas. Sendo um tema explicável pela matemática, onde seus conceitos todos associados a fenômenos físicos podendo ser experimentados e medidos. Todos os corpos dotados de “*massa e elasticidade*” são capazes de vibrar. Os sistemas oscilatórios podem ser, de modo geral, caracterizados como lineares ou não-lineares. Sendo que para o primeiro caso prevalece o princípio da superposição, e neste caso os métodos matemáticos são bem eficientes, para o segundo casos são de resolução complexa, porém todo sistema oscilatório tende em seu estado final, para o segundo caso, com o aumento da amplitude.

*Vibração forçada* ocorre sob excitação de forças externas. *Ressonância*, é quando essa frequência de excitação coincide com a frequência natural do sistema. Chamamos também de *grau de liberdade* do sistema o número de coordenadas independentes requeridas para a descrição do seu movimento. Sendo assim nessas condições, uma partícula livre e em movimento no espaço tem três graus de liberdade, já um corpo rígido possui seis, três componentes de posição e três ângulos que definem sua orientação. Para um corpo *elástico e contínuo*, ele requer um número *infinito* de graus de liberdade. Porém podemos considera-lo parcialmente rígido, e, analisando com um número finito de graus de liberdade. Um número grande de problemas envolvendo vibração pode ser resolvido com exatidão suficiente, pela redução a um só grau de liberdade.

Segundo SLAUGHTER, HINSCH, THOMPSON (1993), quatro por cento da produção americana de pêras é perdida no transporte, causada por injúrias através da vibração. No Brasil, as perdas por injúrias vibracionais no tomate variam de 25% a 50% segundo CHITARRA e CHITARRA (1990). E em muitos casos pequenas injúrias são alvos de microorganismos, incrementando sua deterioração e ou alterando sua fisiologia e em conseqüência seu sabor. As vibrações causam nos frutos o que chamamos de “*dark bend*” que é uma pequena faixa injuriada causada por pequenos rolamentos do fruto “*roller bruising*”,

causando má aparência, e mesmo que não seja visível externamente, afeta sua fisiologia acelerando sua decomposição. O<sup>1</sup> BRIEN et al. (1963) apud IST-Instrumented Sensor Technology , afirma que “*bruising*” causados em trânsito depende da frequência, amplitude, duração de aplicação da vibração e das condições iniciais do fruto. Também observando que as vibrações em trânsito ocorrem em maior magnitude no topo dos containeres. Este último autor, determinou a frequência natural média de containeres de frutas por compressão volumétrica para se encontrar o módulo de elasticidade por “*bulk modulus*” com aplicação de um grau de liberdade.

LAURENTI (1997), estudando a influência da geometria nas propriedades mecânicas do tecido vegetal, através da determinação do módulo de elasticidade obtido através de diversos corpos de prova em borracha natural sob diferentes geometrias e diferentes durezas, através de ensaios de compressão e compressão senoidal (caracterizando uma vibração harmônica forçada com frequência, amplitude e tempo de duração conhecida.), demonstra a influência da geometria e a relação entre as diferentes metodologias ensaiadas.

YOUNG e BILANSKI (1979), apud RABELO (1998), utilizando esferas de borracha, mostraram que o modo de vibração esférico ocorreu na Segunda frequência de ressonância para pêssego, nectarina, maçã. Seus experimentos confirmaram que na primeira ressonância, o fruto comportava-se como um corpo rígido, onde a mola e amortecedor eram dados pela pele do fruto em contato com o excitador. O modo de vibração na primeira ressonância não era longitudinal nem tampouco esférico, podendo ser representado por um módulo clássico de *Kelvin* do sistema com um grau de liberdade. Qualquer meio artificial de fixação do fruto no excitador irá alterar a constante da mola natural do fruto, conseqüentemente afetará a primeira frequência de ressonância.

Em testes de transporte de frutas e vegetais frescos, em caminhões tipo baú de aço, refrigerado, com suspensão de molas, tiveram níveis spectral de densidade potencial a mais elevada em aproximadamente 3,5 Hertz. Outras frequências em níveis elevados de PSD eram 9, 18, 25,30, 40, 60 Hertz, em comparação com caminhões equipados com suspensão a ar. Os níveis mais elevados de PSD foram encontrados na traseira do reboque, e a aceleração horizontal menor que a vertical. Segundo CEPONIS e BUTTERFIELD (1974, 1981, 1985) apud IST-Instrumented Sensor Technology , nos Estados Unidos, as cerejas tomates, nectarinas e pêras demonstram que as perdas em transporte somam de 15% a 68% dos totais.

Assim a base para a gerência da qualidade é a predição dos danos resultados da susceptibilidade do produto aos riscos da etapa de distribuição. O'BRIEN et al. (1963) apud IST-Instrumented Sensor Technology, indicaram que dois fatores afetam "bruising dos frutos" o valor da força e a frequência desta força na posição dada. Sugerindo, entretanto, que a vibração pode causar maior e/ou mais danos do que o impacto GOFF E TWED (1973).

Segundo SCHULTE-PASON et al. (1989) apud IST-Instrumented Sensor Technology, "bruising" em maçãs estão influenciados pela qualidade das estradas, distância percorrida e o tipo de embalagem. PHLLIPS (1988) apud IST-Instrumented Sensor Technology, afirma que a coloração dos pêssegos pode ser preservada reduzindo a vibração e a fricção contra sua própria embalagem durante o transporte do pomar até o consumo.

Segundo FISHER et al (1989) apud IST-Instrumented Sensor Technology, caixas de uvas empilhadas no topo da carroceria e na traseira, são mais afetados, pela maior vibração.

### **3.3.2 - DETERMINAÇÃO DA FIRMEZA DE FRUTOS DURANTE O ARMAZENAMENTO**

A capacidade de um fruto manter sua forma original quando submetido a situações adversas na colheita, transporte e armazenamento, é caracterizada principalmente por sua rigidez ou firmeza. A firmeza do fruto decai com o tempo, por exemplo, frutas cítricas perdem sua firmeza e sua aparência de fruta fresca devido a perda de água segundo SARIG (1972) e MIZRACH et al, (1992), apud RABELO (1998). A maturidade e firmeza são freqüentemente descritas pelo comportamento da fruta a força-deformação este comportamento foram estudado com o objetivo de desenvolver equipamentos de testes capazes de simular a seleção tátil. Em 1925, MAGNESS e TAYLOR desenvolveram um teste padrão de maturidade de frutos através de sua firmeza, baseado na compressão do fruto por um pistão de 0,79 centímetros de diâmetro.

Ainda mencionado por RABELO (1998): FINNEY (1967) concluiu que o módulo de Young, calculado através de testes de vibração era correlacionado com o grau de maturação

para banana, maçã, pêsego e pêra. ABBOTT et al (1968) vibrou frutos intactos seguros por seus pendúnculos e sugeriu um índice de firmeza dado por:  $S = (fn-22).m$ , calculado de acordo com a segunda frequência ressonante e sua massa. FINNEY (1970,1971) constatou uma alta correlação entre os índices de firmeza calculado e obtido da resposta em frequência de frutos intactos vibrados por um vibrador comercial e a firmeza obtida por um teste de pressão padrão. STEPHENSON et al (1973) e PELEG & HINGA (1989) relataram bons resultados ao separarem tomates vermelhos de tomates verdes através de sua resposta em frequência. MIZRACH, FLITSANOV (1997) apresentaram um sistema ultra-sônico não-destrutivos capaz de determinar a relação da firmeza com o tempo de duas variedades de abacate (Ettinger e Fuerta) durante o processo de amadurecimento. Os frutos eram submetidos a uma onda mecânica de 50 KHz e a atenuação desta era medida. Os resultados da medição não-destrutiva foram comparados com testes fisiológicos destrutivos, correlacionando coeficiente de atenuação com a porcentagem de matéria seca. GALILI, SHMULEVICH et al (1997) apresentaram uma proposta de ensaio não destrutivo, utilizando medição acústica como identificador da firmeza de sete variedades de maçã (Fuji, Braeburn, Gala, Granny Smith, Jonagold, Red Delicious and Golden Delicious e para uma variedade de pêra (D'Anjou). Foram realizadas duas repetições para cada um dos quarenta frutos e o índice convencional de firmeza foi calculado de acordo com a equação ( $FI = f^2 m^{2/3}$ ), onde m é a massa do fruto em gramas e f representa a frequência da primeira ressonância em Hz .

### 3.3.3 – ANÁLISE DE SISTEMAS VIBRACIONAIS

Segundo RABELO (1998), estudos de vibração associados a estruturas geralmente envolvem , uma condição referente a problemas de vibração composta de uma ou mais fontes internas de excitação e outra que envolve uma força de excitação conhecida e aplicada em um ponto da superfície externa. Essas fontes são caracterizadas através da medição da resposta na superfície externa da estrutura através de um acelerômetro. A aceleração medida resulta da ação combinada da fonte de vibração e da resposta em frequência da estrutura (FRFs). A resposta em frequência depende do tipo de estrutura, da localização da fonte excitadora e da

localização e massa do acelerômetro ou transdutor de aceleração. Se o transdutor é deslocado, a resposta em frequência se altera, com atenuação da amplitude em determinadas componentes harmônicas e maximização da amplitude em outras. Desta forma, a localização do transdutor influencia significativamente no sinal de saída. Estes sinais de saída podem fornecer informações interessantes para análise dos fenômenos de vibração, a qual pode ser feita no domínio do tempo e no domínio da frequência. No domínio do tempo a análise é feita em termos do valor médio e do valor eficaz do sinal, enquanto que no domínio da frequência é utilizada a análise harmônica através da Transformada de Fourier.

Em análise vibracional, pode-se encontrar três tipos de sinais: os periódicos, os transitórios e os aleatórios.

Os sinais periódicos apresentam uma frequência definida onde a função é válida para qualquer instante ( $t$ ), enquanto que os sinais transitórios são de curta duração, ou seja, são instantâneos e não são repetitivos, ou em outras palavras, a função é válida apenas no instante definido ( $t$ ). Um sinal periódico que representa um movimento resultante de uma vibração pode ser decomposto em um somatório de funções senoidais com frequência diferente, conforme define a Série Trigonométrica de Fourier. O conjunto das amplitudes máximas dessas componentes harmônicas é denominado de espectro de frequência, representado por retas traçadas de forma discreta a partir dos pontos que identificam os múltiplos inteiros da frequência fundamental.

Os sinais aleatórios, e seus espectros de frequência são determinados pela Integral de Fourier e não pela série trigonométrica. O espectro de frequência é uma apresentação da sua densidade quadrática média ou densidade espectral traçada de forma contínua em função da frequência.

#### **3.3.4 - MODOS DE VIBRAÇÃO DE FRUTOS ESFÉRICOS**

Segundo KIMEL (1992) apud RABELO (1998), frutos e vegetais de forma aproximadamente esférica apresentam algumas ressonâncias quando excitadas senoidalmente numa faixa de frequência. As duas mais baixas frequências de ressonância são as mais significativas na determinação de qualidade de frutos e vegetais intactos. O modo de vibração

na primeira ressonância é caracterizado pelo modelo de Kelvin de um sistema de vibração de um grau de liberdade. Na segunda ressonância, as frutas intactas e vegetais vibram no modo esférico de vibração, com é o caso de pêra, maçã pêsego e nectarina.

Na primeira ressonância, as frutas oscilam em uma mola formada pela sua pele e tecidos adjacentes, no ponto de contato com o excitador.

BILANSKI (1979), apud RABELO (1998), utilizando esferas de borracha, mostrou que o modo de vibração esférico ocorreu na segunda frequência de ressonância, o mesmo ocorrendo com pêsego, maçã e nectarina. Os experimentos confirmaram que na primeira ressonância, o fruto comportava-se como um corpo rígido, onde a mola e amortecimento eram dados pela pele do fruto em contato com o excitador. O modo de vibração na primeira ressonância não era longitudinal nem tampouco esférico, pode ser representado por um modelo clássico de kelvin de um sistema com um grau de liberdade. Qualquer meio artificial de fixação do fruto no excitador irá alterar a constante de mola natural do fruto, conseqüentemente afetará a primeira frequência de ressonância.

PELEG (1992), apud RABELO (1998), propôs um modelo com parâmetros concentrado baseado em um sistema de muitos graus de liberdade (MDFS) no qual um fruto esférico foi dividido em três massas verticais vibrando e interconectadas por molas e amortecedores. Os parâmetros foram calculados a partir de curvas de respostas em frequência obtidas experimentalmente. O modelo imita os três modos ressonantes e fornece parâmetros mecânicos essenciais de frutos submetidos à vibração. A excitação vibracional vertical foi promovida através de um “shaker” eletrodinâmico. Uma chapa de concavidade esférica forneceu suporte estável para o fruto excitado com 0,49 a 4,9 m/s<sup>2</sup> (0,05 a 0,5 g) com frequência variável de 20Hz a 2 kHz. Dois sensores de aceleração piezelétricos miniaturas de alta sensibilidade de 2g de massa foram utilizados (100 mV/g). O acelerômetro de entrada utilizado para medir a aceleração de excitação ( $x_{in}$ ), foi alojado na mesa de vibração. Para medir firmeza de frutos por vibração deve ser suficiente estudar somente os componentes de diferentes modos de vibração ao longo da direção da excitação, desprezando os componentes transversais. Isto permite uma considerável simplificação do modelo, ou seja, somente vibrações unidirecionais necessitam ser incluídas. Um fruto esférico de massa  $M$ , sobre um “shaker” e sujeito a uma excitação senoidal de entrada,  $X_{in}$ , com frequência  $f$ , pode ser representado por um simples modelo unidimensional a parâmetros concentrados. O modelo

consiste de três massas,  $m_j$  que vibram na direção vertical longitudinal e são conectadas por molas  $k_j$  e amortecedores  $C_j$  ( $j = 1,2,3$ ) conforme ilustrado pela Figura (3.8). A rigidez e as características de amortecimento do fruto em contato com a mesa são representadas por  $k_1$  e  $C_1$ .

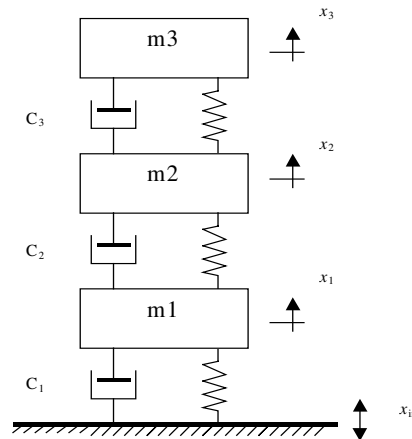


Figura. (3.10) – Diagrama de um sistema de muitos graus de liberdade MDFS. RABELO (1998)

As massas concentradas, molas internas e amortecedores permitem ao modelo imitar o movimento na direção vertical das três partes do fruto (superior, meio e inferior) nos diferentes modos de vibração. Esse modelo é baseado nos três primeiros modos de ressonância da curva de resposta em frequência do fruto real, enquanto que os modos mais altos são desprezados.

As três equações seguintes de movimento podem ser escritas para cada massa,  $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$  respectivamente.

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + C_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_{in}) + k_2(x_1 - x_2) + C_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = k_1 x_{in} \quad (3.87)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_3(x_2 - x_3) + C_3(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = 0 \quad (3.88)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 + k_3(x_3 - x_2) + C_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) = 0 \quad (3.89)$$



Onde o ponto representa derivada em relação ao tempo e  $x_{in} = A_{in} \text{ sem}(2\pi ft)$  é o deslocamento instantâneo imposto ao fruto pelo “shaker” e  $x_j$  é o deslocamento instantâneo da massa  $j$ .

Esse deslocamento instantâneo da massa  $j$  na direção da excitação pode ser expresso por:

$$x_j = A_j \text{ sem}(2\pi ft + \phi_j) \text{ para } (j = 1, 2, 3) \quad (3.90)$$

Onde  $A_j$  e  $\phi_j$  denotam amplitude e fase respectivamente, e  $t$  é o tempo.

As três primeiras equações formam um conjunto linear que pode ser resolvido para massas, molas e amortecedores conhecidos para resultar na resposta em frequência incluindo a fase para cada massa e ganho,  $A_j / A_{in}$ . Os parâmetros do modelo podem ser estimados da frequência de ressonância e de seus respectivos ganhos nos picos de ressonância das curvas de resposta em frequência. Para avaliar os coeficientes de massa e mola de um modelo **MDFS** da frequência de ressonância experimentalmente obtida, assume-se, primeiramente simetria do fruto com respeito ao meio plano horizontal, denominados  $m_1 = m_2 = m_3$  e  $k_2 = k_3 = k$ , e termos de amortecimento desprezíveis, assumindo que o amortecimento é de moderado para pequeno.

Então, levando a equação (3.90) no conjunto de (387) a (3.89) para um sistema não-amortecido, obtém-se:

$$m^2 m_2 (2\pi f_1)^6 - (2\pi f_1)^4 (2km^2 + 2mm_2k + mm_2k_1) + (2\pi f_1^2)[(k_1+k)km_2 + 2kk_1m + 2k^2m] - k^2k_1 = 0, (f_1 = f_1, f_2, f_3) \quad (3.91)$$

Para cada uma das frequências não-amortecidas  $f_1, f_2$  e  $f_3$ . Introduzindo os seguintes parâmetros adimensionais,

$$\alpha = m_2/m \quad (3.92)$$

$$\beta = k_1/k \quad (3.93)$$

$$\Gamma = (2\pi f_1)^2 m/k \quad (3.94)$$

na equação (3.91), ela pode ser expressa na forma adimensional, resultando na equação (3.95).

$$F(y_i)^3 + G(y_i)^2 + H(y_i) - 1 = 0 \quad (3.95)$$

Onde,

$$F = \alpha \Gamma^3 / \beta \quad (3.96)$$

$$G = -(2 + 2\alpha + \alpha\beta) \Gamma^2 / \beta \quad (3.97)$$

$$H = (2 + \alpha)(1 + \beta) \Gamma / \beta \quad (3.98)$$

Onde a relação quadrática da frequência de ressonância é:

$$y_i = (f_i/f_1)^2 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.99)$$

Dados os  $y_i$ 's, a equação (3.98) pode ser solucionada para fornecer os parâmetros do modelo ( $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\Gamma$ ). Uma vez que os parâmetros do modelo são conhecidos, o deslocamento de cada modo  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , para cada modo de ressonância, pode ser encontrado através das equações de (3.91) a (3.9.4).

Os termos de amortecimento  $C_j$  ( $j = 1,2,3$ ) podem ser obtidos dos ganhos das curvas teóricas e das curvas gravadas.

As Tabelas (3.2) e (3.3) apresentam os parâmetros modais calculados da resposta em frequência de laranja e maçã. O parâmetro adimensional  $\alpha$ , apresentado na tabela (3.2), considera a distribuição de massa no modelo do fruto. A laranja é caracterizada por uma parte central dominante com massa de 3 a 6 vezes a massa da parte inferior e superior, enquanto que na maçã, a massa é igualmente distribuída com a massa central 50% maior que as outras duas partes. A pequena constante de mola,  $k_1$ , refere-se à zona de contato entre o fruto e o “shaker”, enquanto que as outras duas, ( $k_2 = k_3$ ) referem-se à rigidez da casca do fruto. A constante de mola inerente na maçã é mais de 4 vezes maior que as da laranja. Entretanto, a relação  $\beta (= K_1/k_2)$  é maior na laranja, comparado à maçã.

Como pode ser observado na tabela (3.3), para a maçã, no primeiro modo  $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$ , movem-se na mesma direção com amplitudes que diferem menos de 33% entre si; no segundo modo,  $m_3$  move-se em sentido oposto a  $m_1$  enquanto que  $m_2$  é quase estacionário; e no terceiro modo,  $m_1$  e  $m_3$  movem-se em fase, com aproximadamente a mesma amplitude, oposto a  $m_2$ . O padrão de vibração no segundo e terceiro modos de ressonância são típicos de um sistema simétrico de três graus de liberdade.

Tabela (3.2) – Parâmetros de um Sistema de Muitos Graus de Liberdade. KIMEL (1992)

Parâmetro	Maçã	Laranja
<b>M [g]</b>	210	236
$f_1$ [Hz]	125	88
$f_2$ [Hz]	495	300
$f_3$ [Hz]	713	408
$\alpha$	1.50	3.60
$\beta$	0.310	1.179
$\Gamma$	0.074	0.109
$k$ [ $10^5$ N/m]	1.55	1.39
$k_2$ [ $10^5$ N/m]	5.0	1.18
$C_1$ [Ns/m]	33.0	4.5
$C_2$ [Ns/m]	1.0	0.0
$C_3$ [Ns/m]	1.0	9.0

Segundo PELEG (1992) apud RABELO, o modelo da maçã é simétrico desde que  $k_2=k_3$ ,  $m_2=m_3$  e a pequena constante de mola  $k_1$  é muito pequena se comparada às outras duas constantes  $k_2$  e  $k_3$ . Os resultados experimentais demonstram que as frequências de ressonância de frutos relativamente moles (laranjas) são significativamente mais baixas do que para frutos firmes (maçãs). Comparando-se com uma maçã firme, a frequência de ressonância de uma laranja mole era 30% menor para o primeiro modo e 39% e 43% menor para o segundo e terceiro modos, respectivamente. De acordo com KIMEL (1992) apud RABELO (1998), O estudo do primeiro modo é problemático especialmente em frutos firmes como maçãs, porque o elevado ganho causa ricochete, ou seja, perda de contato entre o fruto e o “shaker”, mesmo

para níveis de excitação pequenos. Outra complicação é que as deformações no primeiro modo não são lineares o que causa distorções da forma de onda efetivamente alteração de fase. Entretanto, somos capazes de medir a mudança de fase do primeiro modo para laranjas reduzindo o nível de excitação para 0.05 g, de maneira que a forma de onda torna-se quase senoidal. Desde que o fruto mova-se como um corpo rígido no primeiro modo, esse modo pode se modelado separadamente como um sistema não-linear de um grau de liberdade.

### 3.3.5 - RIGIDEZ E FLEXIBILIDADE

As medidas de massa e rigidez são necessárias para o cálculo da frequência natural, para o sistema de um grau de liberdade. Sendo a rigidez definida como a força necessária para produzir uma unidade de deslocamento específico.

$$K = \frac{F}{x} \quad (3.100)$$

E a flexibilidade é a recíproca da rigidez,

$$a = \frac{1}{K} = \frac{x}{F} \quad (3.101)$$

A flexibilidade  $a_{ij}$  é então definida como a deflexão em  $i$  produzida por uma unidade de força em  $j$ . A rigidez  $k_{ij}$  é a força necessária em  $i$  para uma unidade de deflexão em  $j$ , com todas as outras deflexões iguais a zero. O  $K$  e o “ $a$ ” das equações (3.100) e (3.102) são os  $K_{ij}$  e  $a_{ij}$  em termos dessas quantidades.

### 3.3.6 - MOVIMENTO HARMÔNICO

Segundo THOMSON (1978), o tempo de repetição  $\tau$  é denominado período de oscilação, e sua recíproca  $f=1/\tau$  é denominada frequência. Se o movimento é designado pela função de tempo  $x(t) = x(t + \tau)$ . Sendo a forma mais simples de movimento periódico, o *movimento harmônico*.

Movimentos irregulares, que aparentam não possuir período definido, podem ser considerados a soma de um muito grande número de movimentos regulares de frequências variadas. As propriedades de tais movimentos podem ser definidas estatisticamente.

A forma mais simples de movimento periódico é o *movimento harmônico*. Isto pode ser demonstrado por meio de uma massa suspensa por uma pequena mola, como indica na Fig. (3.11). Se a massa é levantada da sua posição de repouso e solta, oscilará para cima e para baixo.

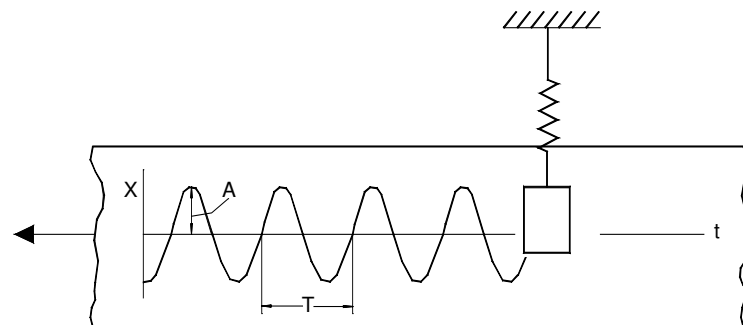


Figura. (3.11) - Registro do Movimento Harmônico. THONSON (1978).

O movimento é expresso pela equação:

$$x = A \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{\tau} \quad (3.102)$$

sendo  $(2\pi)/\tau = \omega$ .

na qual  $A$  é amplitude de oscilação, medida na posição de equilíbrio da massa, e  $\tau$  é o período. O movimento é repetido quando  $t = \tau$

O movimento harmônico é muitas vezes representado como a projeção numa linha reta, de um ponto que se move numa circunferência a velocidade constante, como indica na Figura. (3.12). Designada por  $\omega$  a velocidade angular da linha  $op$ , o deslocamento  $x$  é expresso pela equação:

$$x = A \sin \omega t \quad (3.103.)$$

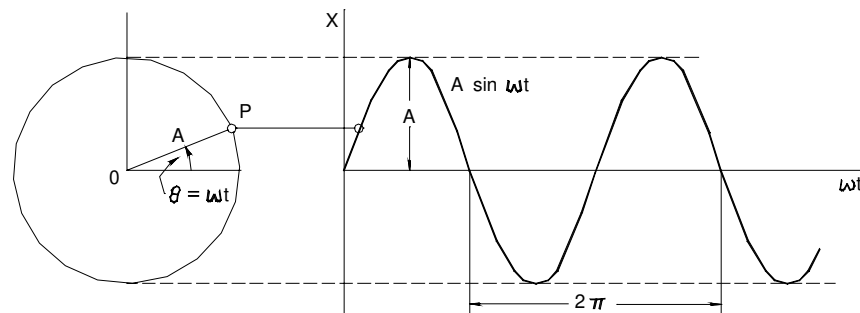


Figura. (3.12) – Movimento Harmônico com Projeção de um Ponto que se Move Numa Circunferência. THONSON (1978).

A quantidade  $\omega$  é geralmente medida em radianos por segundo e denominada por **freqüência angular**. Uma vez que o movimento se repete em cada  $2\pi$  radianos, temos a relação:

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} = 2\pi f \quad (3.104)$$

Em que  $\tau$  e  $f$  são períodos e a freqüência do movimento harmônico, usualmente medido em, segundos e ciclos por segundo, respectivamente.

No caso de movimento de um ponto numa circunferência adotamos um eixo imaginário  $i$  e admitimos que o raio da circunferência seja representado por uma quantidade complexa  $z$  chamada *fasor*.

O fasor é expresso por:

$$z = A\lambda^{i\theta} = A\cos\theta + iA\sin\theta \quad (3.105)$$

Que define os componentes, real e imaginário. Com  $\theta = \omega t$ , os componentes variam senoidalmente com o tempo.

$$\mathbf{Re} z = A \cos \omega t \quad (3.106)$$

$$\mathbf{Im} z = A \sin \omega t \quad (3.107)$$

É muitas vezes necessário considerar-se dois movimentos harmônicos da mesma frequência, porém diferindo da fase pelo valor  $\phi$ . Os dois movimentos podem ser expressos pêlos fasores

$$z_1 = A_1\lambda^{i\omega t} \quad (3.108)$$

$$z_2 = A_2\lambda^{i(\omega t + \theta)} \quad (3.109)$$

Onde  $A_1$  e  $A_2$  são números reais. O segundo fasor pode ser expresso como:

$$z_2 = A_2\lambda^{i\theta}\lambda^{i\omega t} = \overline{A_2}\lambda^{i\omega t} \quad (3.110)$$

onde  $\overline{A_2}$  é agora um número complexo. Esta forma é muitas vezes útil em problemas que envolvem movimento harmônico.

A velocidade e a aceleração do movimento harmônico podem ser detectadas pela diferenciação da Eq. (3.102). Usando a notação ponto para a derivada, obtemos:

$$\dot{x} = \omega A \cos \omega t = \omega A \operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.111)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 A \operatorname{sen} \omega t = \omega^2 A \operatorname{sen}(\omega t + \pi) \quad (3.112)$$

Assim, a velocidade e a aceleração são também harmônicas, com a mesma frequência de oscilação, mas à frente do deslocamento por  $\pi/2$  e  $\pi$  radianos, respectivamente, como indica Figura (3.13).

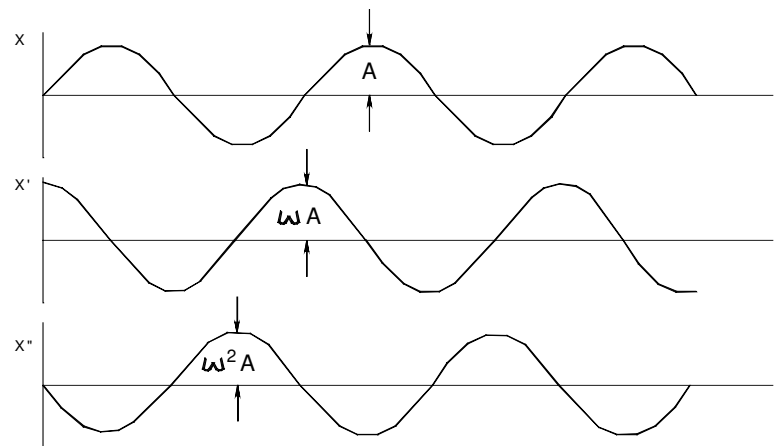


Figura. (3.13) – No Movimento Harmônico, a Velocidade e a Aceleração estão à Frente do Deslocamento por  $\pi/2$  e  $\pi$  THONSON (1978).

O exame das equações (3.111) e (3.112) mostra que :

$$\ddot{x} = -\omega^2 x \quad (3.113)$$



de modo que no movimento harmônico a aceleração é proporcional ao deslocamento e dirigida para origem. Visto que a Segunda lei de movimento de *Newton* estabelece que a aceleração é proporcional à força, podemos presumir o movimento harmônico para os sistemas com molas lineares com força variando  $Kx$ .

### 3.3.7 - ANÁLISE HARMÔNICA

Segundo THOMSON (1978), é muito comum a existência simultânea de vibrações com várias frequências diferentes. Por exemplo, a vibração de uma corda de violino que é composta da frequência fundamental  $f$  e de todas as suas harmônicas  $2f$ ,  $3f$  etc. Também pode ser um sistema de muitos-graus-de-liberdade, para a qual contribuem as vibrações de cada frequência natural. Tais vibrações resultam num perfil de onda complexo, que se repete periodicamente, como apresentado pela Figura. (3.12).

O matemático francês J. Fourier (1768-1830) mostrou que qualquer movimento periódico pode ser representado por uma série de senos e co-senos que são harmonicamente relacionados. Se  $x(t)$  é uma função periódica do período  $\tau$ , ela é representada pela seguinte série de Fourier

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega_1 t + a_2 \cos 2\omega_1 t + \dots + b_1 \sin \omega_1 t + b_2 \sin 2\omega_1 t + \dots \quad (3.114)$$

onde  $\omega_1 = 2\pi f$  é a frequência fundamental. Para se determinar os coeficientes  $a_n$  e  $b_n$ , multiplicamos ambos os lados da equação (3.114) por  $\cos n\omega_1 t$  e  $\sin \omega_1 t$  e integramos cada termo sobre o período  $\tau$ . Obedecendo as seguintes relações

$$\int_{-\tau/2}^{\tau/2} \cos n\omega_1 t \cos m\omega_1 t dt = \begin{cases} 0 & \text{se } m \neq n \\ \pi/\omega_1 & \text{se } m = n \end{cases}$$

$$\int_{-\tau/2}^{\tau/2} \sin \omega_1 t \sin m\omega_1 t dt = \begin{cases} 0 & \text{se } m \neq n \\ \pi/\omega_1 & \text{se } m = n \end{cases}$$

$$\int_{-\tau/2}^{\tau/2} \cos \omega_1 t \sin m\omega_1 t dt = \begin{cases} 0 & \text{se } m \neq n \\ 0 & \text{se } m = n \end{cases}$$

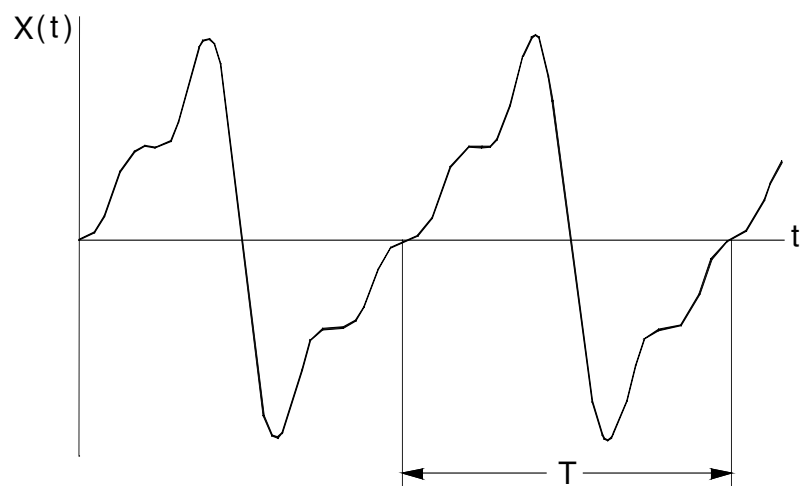


Figura. (3.14) – Movimento Periódico Complexo de Período  $\tau$ . THONSON (1978).

Todos os termos, exceto um do lado direito da equação, serão iguais a zero e obtemos os resultados.

$$a_n = \frac{\omega_1}{\pi} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} x(t) \cos n\omega_1 t dt \quad (3.115)$$

$$b_n = \frac{\omega_1}{\pi} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} x(t) \sen n\omega_1 t dt \quad (3.116)$$

Voltando à Eq. (3.14) e examinando os dois termos numa das freqüências,  $n\omega_1$ , sua soma pode ser expressa como:

$$a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sen n\omega_1 t = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \left\{ \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \cos n\omega_1 t + \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \sen n\omega_1 t \right\} = \lambda_n \cos(n\omega_1 t - \phi_n)$$

Onde:

$$\lambda_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (3.117)$$

e

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{b_n}{a_n} \quad (3.118)$$

Deste modo,  $\lambda_n$  e  $\phi_n$  (ou  $a_n$  e  $b_n$ ) definem completamente a contribuição harmônica da onda periódica.

O resultado da apresentação gráfica de  $\lambda_n$  e  $\phi_n$  em função da freqüência  $n\omega_1$  para todos os valores de  $n$ , é uma série de retas discretas como se observa na Figura. (3.13), tal representação gráfica forma o que se chama de ***Espectro de Fourier*** do perfil da onda. Faz se atualmente a análise harmônica, com eficiência, graças ao uso do computador.

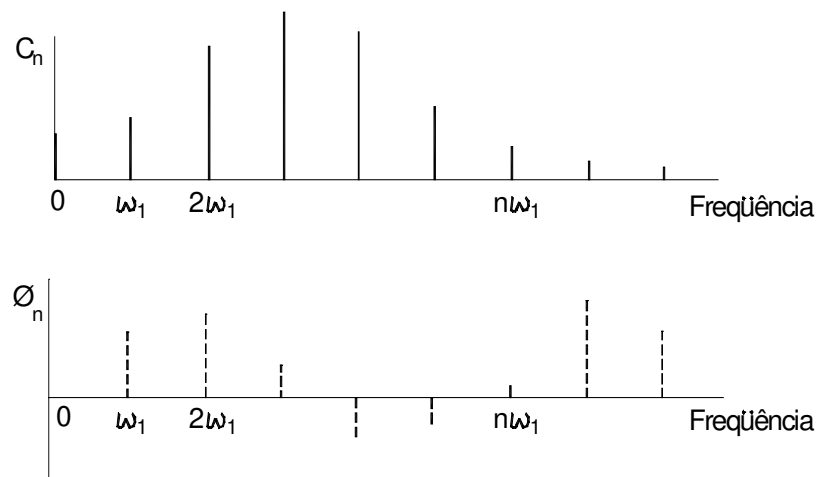


Figura (3.15) – Espectro de Fourier (PSD-Power Spectral Density) para uma Função Periódica de Tempo. THONSON (1978).

### 3.3.8 - VIBRAÇÃO HARMÔNICA FORÇADA

No caso do estudo em questão a vibração induzida aos espécimes será sempre uma variação da vibração harmônica forçada.

Vamos considerar um sistema com um grau de liberdade amortecido e viscoso (mais próximo de um material biológico, e também da suspensão de um caminhão de transporte), excitado por uma força harmônica  $F_0 \text{ sen } \omega t$ .

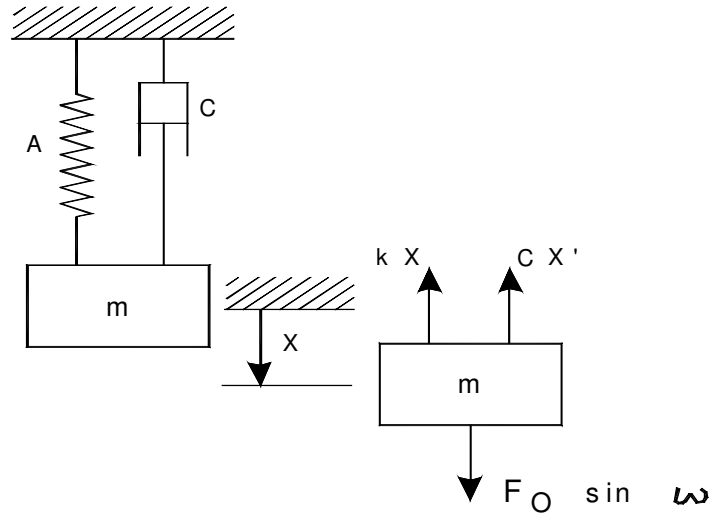


Figura (3.16) – Sistema Viscosamente Amortecido com Excitação Harmônica.

A equação diferencial de movimento é a seguinte, deduzida do diagrama do corpo livre:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (3.119)$$

A solução particular para a equação acima é uma oscilação de estado permanente da mesma frequência  $\omega$  que a de excitação. Pode-se supor que a solução particular seja da forma:

$$x = X \sin(\omega t - \phi) \quad (3.120)$$

Onde  $X$  é a amplitude de oscilação e  $\phi$  é a fase do deslocamento, com relação à força de excitação. Para se ter valores da amplitude e da fase, substitui-se  $x$  na equação (3.119) pelo seu valor na Eq. (3.120). Lembrando-se que no movimento harmônico as fases da velocidade e

da aceleração estão  $90^\circ$  e  $180^\circ$  além do deslocamento, respectivamente, os termos da equação diferencial podem também ser apresentados graficamente, como na Figura (3.15).

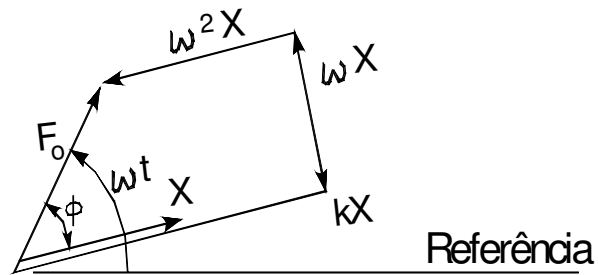


Figura (3.17) – Diagrama Vetorial para a Vibração Forçada com Amortecimento. MASE (1970).

Este diagrama permite concluir-se que:

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (3.121)$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} \frac{c\omega}{K - m\omega^2} \quad (3.122)$$

Para uma apresentação gráfica e concisa dos resultados, divide-se por  $K$  o numerador e denominador das Eq. (3.121) e (3.122),

$$X = \frac{\frac{F_o}{K}}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{K}\right)^2 + \left(\frac{c\omega}{K}\right)^2}} \quad (3.123)$$

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{\frac{c\omega}{K}}{1 - \frac{m\omega^2}{K}} \quad (3.124)$$

As equações acima podem ainda ser expressas em termos das seguintes quantidades:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} = \text{Frequência natural de oscilação não amortecida.}$$

$$c_c = 2m\omega_n = \text{Amortecimento crítico.}$$

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \text{Fração ou fator de amortecimento.}$$

$$\frac{c\omega}{K} = \frac{c}{c_c} \frac{c_c\omega}{K} = 2\xi \frac{\omega}{\omega_n}$$

As expressões não dimensionais para a amplitude e a fase tornam-se então

$$\frac{XK}{F_o} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \quad (3.125)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{2\xi \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad (3.126)$$

Essas equações indicam que a amplitude não-dimensional  $XK/F_o$  e a fase  $\phi$  são funções somente da razão de freqüências  $\omega/\omega_n$  e do fator de amortecimento  $\xi$  e podem ser representadas graficamente, como indica a Figura (3.16). Essas curvas mostram que o fator de amortecimento tem uma grande influência na amplitude e no ângulo de fase, na zona de freqüências próximas à ressonância. Pode-se obter melhor compreensão do comportamento do sistema, pelo estudo do diagrama de forças correspondendo à Figura (3.16), nas zonas onde  $\omega/\omega_n$  é pequena,  $\omega/\omega_n = 1$  e  $\omega/\omega_n$  é grande.

Tanto a inércia como as forças de amortecimento são pequenas para valores de  $\omega/\omega_n$  muito menores que um, do que resulta um pequeno ângulo de fase  $\phi$ . A magnitude da força aplicada é então aproximadamente igual à força da mola.

Para  $\omega/\omega_n = 1.0$ , o ângulo de fase é  $90^\circ$  e o diagrama de forças apresenta-se como 4b. A força de inércia, que é maior agora, é equilibrada pela força da mola, ao passo que a força aplicada supera a força de amortecimento. O valor da amplitude na ressonância, tanto se pode obter pela Eq. (3.123) ou a Eq. (3.125), ou pela Figura (3.16b), e tem a seguinte expressão:

$$X = \frac{F_o}{c \omega_n} = \frac{F_o}{2\xi K} \quad (3.127)$$



Para valores de  $\omega/\omega_n$  “ muito maiores” que um,  $\phi$  aproxima-se de  $180^\circ$  e a força aplicada é gasta quase que inteiramente para vencer a grande força de inércia, conforme se observa na Fig. (3.16c).

Resumindo, a equação diferencial e a sua solução completa são expressas da seguinte forma, incluindo o termo transitório:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{F_o}{m} \text{sen } \omega t \quad (3.128)$$

$$x(t) = \frac{F_o}{K} \frac{\text{sen}(\omega t - \phi)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}} + X_1 \lambda^{-\xi\omega_n t} \text{sen}\left(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t + \phi_1\right) \quad (3.129)$$

### 3.4 - “COMPLEX MODULI AND COMPLIANCES”

Segundo MASE (1970), se um espécime com características viscoelásticas linear submetido a um teste de carregamento unidimensional  $\sigma = \sigma_0 \text{sin } \omega t$ , o “strain” pode ser representado por  $\varepsilon = \varepsilon_0 \text{sin}(\omega t - \delta)$ , frequência  $\omega$ , mas com angulo de defasagem em relação ao “stress”,  $\delta$ . O “stress” e o “strain” podem ser representados por uma projeção gráfica de magnitude constante dos vetores rotativos com uma constante angular de velocidade  $\omega$ , como mostra a Figura (3.14.1).

Os raios da amplitude de ‘stress’ e “strain” definem “*absolute dynamic modulus*”  $\frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$ , e “*absolut dynamic compliance*”  $\frac{\epsilon_0}{\sigma_0}$ . Assim os componentes dos vetores rotativos definidos na Figura (3.14.2), onde stress e strain estão em fase e defasados entre si, são usados para definir:

“*the Storage modulus*”:

$$G_1 = \frac{\sigma_0 \cos \delta}{\epsilon_0} \quad (3.130)$$

“*the loss modulus*”

$$G_2 = \frac{\sigma_0 \sin \delta}{\epsilon_0} \quad (3.131)$$

“*the storage compliance*”

$$J_1 = \frac{\epsilon_0 \cos \delta}{\sigma_0} \quad (3.132)$$

“*the loss compliance*”

$$J_2 = \frac{\epsilon_0 \sin \delta}{\sigma_0} \quad (3.133)$$

A descrição generalizada:

$$\sigma^* = \sigma_0 \lambda^{i\omega t} \quad (3.134)$$

$$\mathcal{E}^* = \mathcal{E}_0 \lambda^{i(\omega t - \delta)} \quad (3.135)$$

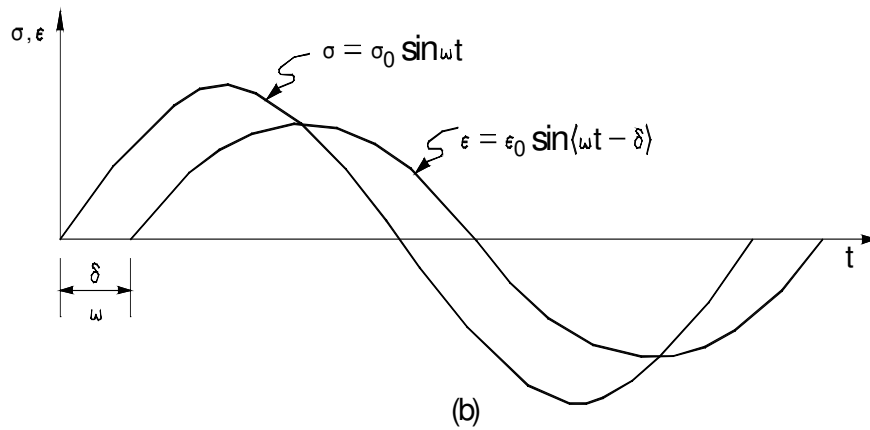


Figura (3.18) – Componentes Vetoriais de “stress” e “strain” Defasados Entre Eles. MASE (1970).

Com as equações (3.134) e (3.135) o “the complex modulus”  $G^*(i\omega)$  definimos o “complex quantity”:

$$\frac{\sigma^*}{\mathcal{E}^*} = G^*(i\omega) = \left(\frac{\sigma_0}{\mathcal{E}_0}\right) \lambda^{i\omega} = G_1 + iG_2 \quad (3.136)$$

Onde a parte real é exatamente ao “the storage modulus”, a parte imaginária é o “the loss modulus”. Similarmente definimos o “the complex compliance”:

$$\frac{\varepsilon^*}{\sigma^*} = J^*(i\omega) = \left( \frac{\varepsilon_0}{\sigma_0} \right) \lambda^{-i\delta} = J_1 - i J_2 \quad (3.137)$$

Aqui a parte real é “*the storage compliance*” e a parte imaginária são a parte negativa “*the loss compliance*”. Onde  $G^* = \frac{1}{J^*}$ .

## **4 - MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 - INTRODUÇÃO**

O presente capítulo versa sobre as características físicas dos espécimes empregados na fase experimental deste trabalho assim como sobre os equipamentos e instrumentos utilizados, locais e metodologia aplicada.

Pode-se resumir a presente metodologia como ensaios de compressão em amostras de espécimes vegetais em forma geométricas cilíndricas submetidas a uma análise mecânica prévia e posterior a ensaios vibracionais, com objetivo de se detectar alterações em suas características mecânicas em função das frequências e amplitudes impostas.

### **4.2 - LOCAIS**

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Propriedades Mecânicas de Materiais Biológicos da FEAGRI-UNICAMP, Laboratório de Vibrações do CETEA - ITAL (Centro de Tecnologia de Embalagens para Alimentos do Instituto de Tecnologia de Alimentos), dotado de controle ambiental de temperatura e umidade, financiado por um projeto da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, em 23<sup>0</sup> C, com variação de 10 C e teor de água do ar ambiente de 90% com variação de 3%.

### **4.3 - MATERIAIS**

Foram empregados espécimes vegetais representados por batatas (*Solanum tuberosum* L.) *in natura* e amostras dessas em formas cilíndricas de corpos de prova. Esses espécimes exibiam características físicas selecionadas, tais como tempo de colheita de dois a três dias,

peso próximo de 0,140 Kgf, diâmetro maior próximo a 92mm, diâmetro menor próximo a 55mm, altura média aproximada de 47mm.

Os equipamentos empregados na condução dos experimentos são descritos a seguir.

- Máquina Universal de Ensaio ou Texturômetro, modelo LOYD TA 500, fabricado pela LOYD, de origem inglesa, munido de um software “NEXIGEN” para aquisição e cálculo, dos dados coletados. Trata-se de uma prensa clássica equipada com uma célula de carga de capacidade de 50 N, capaz de realizar os ensaios viscoelásticos conhecidos como: “Creep Test” e “Relaxation Test”, testes de comportamento cíclico, descrição gráfica e análise estatística. Esse equipamento possibilita impor força ou deformação em função do tempo, Figura (4.1).

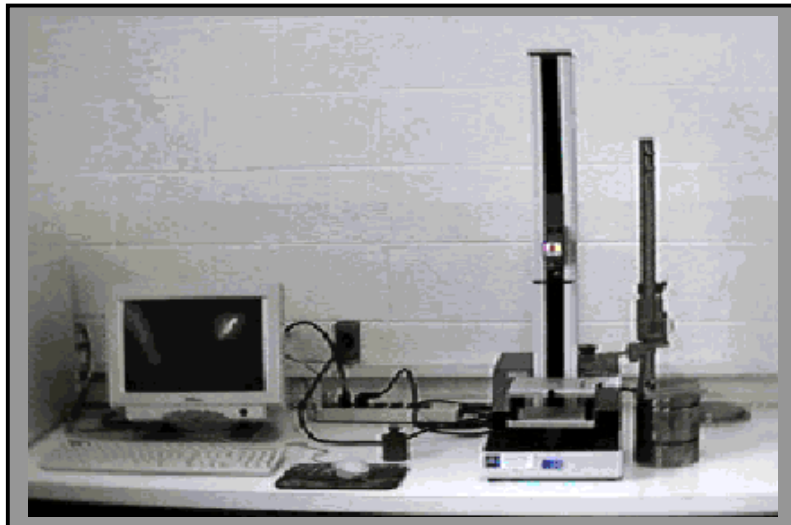


Figura – (4.1) Vista do texturômetro LOYD TA500

- "Sensor-Ripe Firmness Fruit Testing", denominado por FIRMALON, fabricado pela ESHET EILON AGROSYSTEMS, de origem israelense. Trata-se de uma bancada para determinação não destrutiva do "*firmness*", baseado em fenômeno acústico. Três sensores piezelétricos flexíveis captam as vibrações da fruta produzidas por três golpes sucessivos. A frequência de ressonância é calculada separadamente para cada sinal. A avaliação do *firmness* está baseada na correlação entre o declínio da frequência de ressonância do fruto e seu processo de abrandamento. O seguinte procedimento resume o processo de avaliação do "*firmness*".

A amplitude de ressonância ou pico é calculada para cada sinal.

Uma linha ao nível da porcentagem máxima do pico é traçada para cada sinal. Pode haver várias ressonâncias acima da linha, mas somente a mais baixa frequência é escolhida para o cálculo de dureza. A média aritmética de duas ressonâncias (para os três sinais diferentes) é considerado como a frequência de ressonância da fruta..

O "*firmness*" é calculado pela seguinte equação:

$$FI = f^{\frac{2}{3}} * m^{\frac{1}{2}} / 10^6 \quad (4.1)$$

Onde  $m$  é a massa em gramas da amostra a ser analisada e  $f$  é a frequência de ressonância. O impacto pode ser equacionado através função impulso. A transformada de Fourier de uma função impulso gera todas as componentes do espectro de frequência, ou seja, a transformada do impulso é uma função contínua, como se fosse um sinal DC, ou seja, uma função degrau no domínio da frequência. Quando o fruto recebe esse impacto, todas suas frequências naturais são excitadas. Quando isso ocorre, por consequência ocorre uma ressonância nas varias frequências naturais. Essa ressonância provoca um aumento do deslocamento devido a vibração gerada. Não interessa medir deslocamento, deformação ou força e sim onde os picos ocorrem, para as frequências de ressonância ou frequências naturais. Cada pico ocorre em uma frequência distinta. As frequências mais baixas produzem maiores picos. O *software* associado ao FIRMALON capta a primeira frequência, eleva a 2/3 e multiplica pela massa elevada a 1/2. Esse é o índice de firmeza

adotado. Trata-se de um índice com forte correlação com a força de penetração de sondas mecânicas, conforme reportado por RABELO (1998). O objetivo é de se obter uma grandeza a que possa ser correlacionada com a força, com a deformação e com a grandeza denominada "*firmness*", descrita por MORROW & MOHSENIN (1966) .



Figura (4.2) - FIRMALON durante ensaio.

- Moldes para Coleta de Amostras de Tecidos Vegetais para a obtenção de corpos de prova cilíndricos ou cúbicos de diversas dimensões.
- Mesa Vibratória modelo MTS 495.10 Digital Vibration Controller (“shaker”) empregada para gerar uma vibração sinusoidal em uma faixa de frequência de 2Hz até 500Hz e amplitude variando até 100 mm, munido de acelerômetro de cristal piezelétrico para controle de frequência e com um fundo de escala de 50G (G= aceleração gravitacional terrestre) e sensibilidade de  $10^{-18}$  a  $10^{18}$  mV/g. Esse equipamento é empregado em ensaios de produtos e embalagens, em controle de qualidade, e em simulação de solicitações



mecânicas envolvidas em diversas operações, como transporte e outras, dispendo de vários sistemas de análise e geração de sinais, Figuras (4.3) e (4.4).

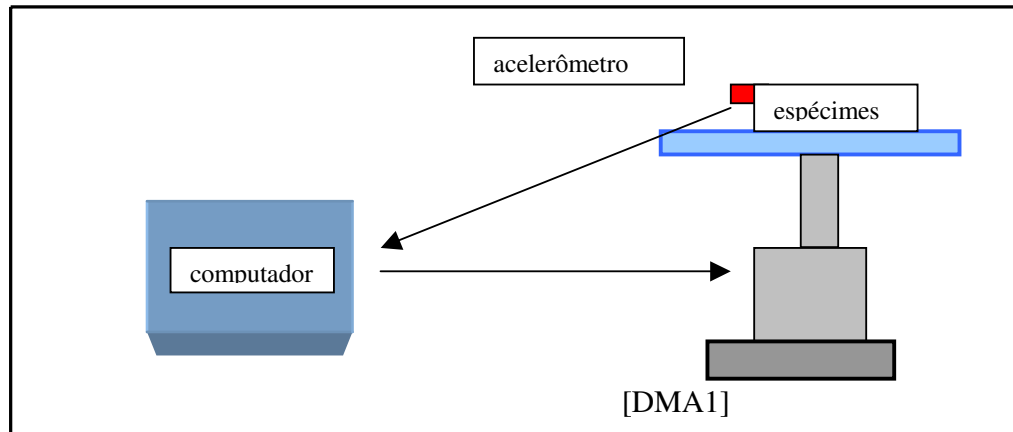


Figura (4.3.) –Esquema da mesa vibratória modelo mts 495.10 .



Figura (4.4) – Mesa vibratória “shaker” Modelo MTS 495.10.

Os três principais ensaios realizados por esse equipamento são:

- Varredura com Amplitude Constante, na qual um efeito sinusoidal é gerado, mantendo constante a amplitude e variando a frequência entre um limite mínimo e máximo.
  
- Busca da Frequência de Ressonância em "Ruído Branco", que se baseia em excitar todas as frequências vibratórias de forma a excitar suas frequências naturais na faixa de 3Hz até 500Hz identificando os pontos de ressonância. No “ruído branco” uma “porção infinita” de frequência é excitadas. No equipamento o que na verdade ocorre é uma faixa dessa “porção infinita” que após a transformada produz um sinal contínuo da soma dos seus pontos de ressonância, observar Figura (3.15) dentro dessa faixa o equipamento vibra em suas diversas frequências, assim seus pontos de ressonância são somados e detectados.
  
- "Sine Dwell", idealizado para avaliação de fadiga. Quando é encontrada uma determinada frequência de ressonância o sistema é mantido nessa frequência.
  
- Gerador de Sinais Modelo SI 1209 Random Vibration Controller, Figura (4.5), fabricado pela Schlumberger e acoplável à mesa vibratória eletromecânica. É um gerador e analisador de sinais aleatórios, em função de um espectro de densidade de potência inserido empregado para simular as condições de transporte podendo gerar frequências na faixa de 1Hz até 500 Hz e amplitude até 100 mm. É equipado com acelerômetro de cristal piezoeletrico de sensibilidade de  $10^{-18}$  a  $10^{18}$  mV/g, fundo de escala de 50G e capaz de gerar sinais até 1000 Hz, empregando a técnica da “Transformada de Fourier” para estimativa da densidade espectral (psd) do sinal de vibração para monitoramento da frequência.



Figura (4.5) – Gerador de sinais SI 1209

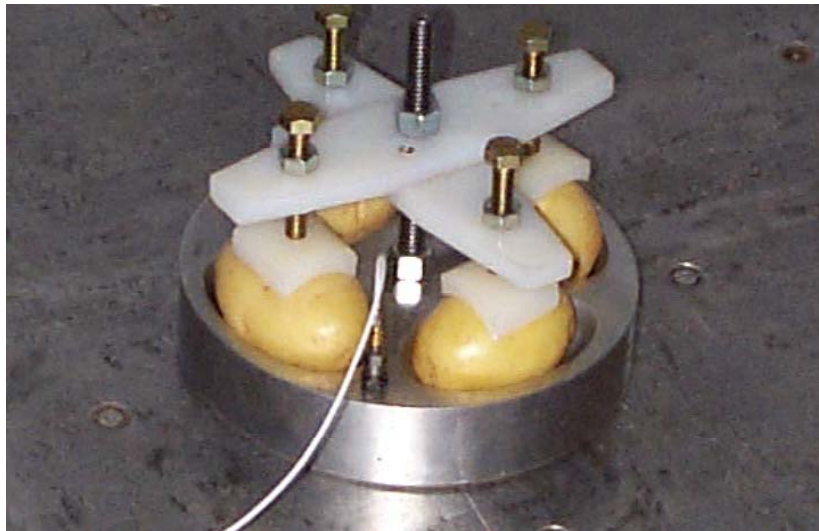


Figura (4.6) – Espécimes assentados na mesa vibratória e acelerômetro fixado no prato.

#### 4.4 - MÉTODOS

Para se atingir os objetivos desse estudo, citado no capítulo objetivo, foram selecionados espécimes vegetais de mesma característica e mesmo estado de maturação, mesmo lote, mesma origem, mesma dimensão e peso. Esses espécimes tiveram suas características mecânicas, módulo de elasticidade e "*firmness*" acústico determinadas respectivamente pelo texturômetro LLOYD TA 500 e pelo FIRMALON. Sendo novamente submetidos aos ensaios nos mesmos equipamentos, ou seja, no texturômetro LLOYD e no FIRMALON. Os dados levantados antes e após os ensaios cíclicos permitiram correlacionar a variação das propriedades mecânicas do material, ou seja módulo de elasticidade e índice de firmeza acústica com as frequências e tempo de exposição às solicitações cíclicas, com o auxílio de análise estatística.

Para se atingir o primeiro objetivo os espécimes foram submetidos aos ensaios vibracionais por varredura constante com o auxílio do gerador de sinais Modelo MTS 495.10 Digital Vibration Controller em uma faixa de 3 Hz até 500 Hz, através da excitação em ruído branco de forma a se encontrar pontos de ressonância ou pontos de multiplicação das amplitudes, denotando pontos ou faixas onde as frequências possivelmente gerariam danos na estrutura do tecido. Assim sendo, o acelerômetro fixado nos espécimes indicou as frequências de ressonância geradas pela faixa cíclica de 3Hz até 500 Hz imposta pela mesa vibratória, a qual contempla cerca de 90% das frequências envolvidas nas atividades agrícolas e de transporte (CETEA - ITAL).

Para o cumprimento do segundo objetivo, ou seja, a verificação se as frequências de ressonância anteriormente estudadas encontram-se na faixa vibratória imposta durante o transporte rodoviário, as quais estão mencionadas na literatura consultada, ou seja até 500 Hz, onde mais de 90% das frequências geradas estão nessa faixa.

Para o cumprimento do terceiro objetivo, ou seja o estudo do efeito das frequências consideradas críticas pela literatura anteriormente mencionadas na revisão e as frequências encontradas no ensaio por varredura constante, consideradas ressonantes, realizou-se um ensaio denominado "sine dwell" gerado pela mesa vibratória onde os espécimes foram

submetidos à solicitações cíclicas nos pontos de ressonância durante diferentes intervalos de tempo, determinando-se novamente o índice de firmeza acústico através do FIRMALON e o módulo de elasticidade através do texturômetro, antes e após os ensaios cíclicos. As frequências anteriormente citadas como sendo as de maior dano ao material agrícola, ou seja, 4,5 Hz, 9 Hz, 18 Hz, 25 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 60 Hz, juntamente com as frequências de ressonância detectadas pelo ensaio com varredura constante, foram ensaiadas em três intervalos de tempos diferentes de duração, 1200 s, 2400 s, 3600 s.

Para o quarto objetivo empregou-se o gerador de sinais Modelo SI 1209 Randon Vibration Controller acoplado à mesa vibratória hidráulica, simulando as condições de transporte rodoviário cujo gerador de sinais é capaz de reproduzir as condições de transporte em estradas brasileiras. As características mecânicas dos espécimes foram levantadas de forma semelhante aos casos anteriores.

O quinto objetivo consistiu em correlacionar o índice de firmeza acústico com o módulo de elasticidade dos espécimes bem como suas curvas de tendências, através de uma análise de regressão estatística.

Todos os ensaios foram realizados no período da manhã, sendo os laboratórios dotados de controle de temperatura e umidade, realizando os ensaios na mesma temperatura e teor de água atmosférico eliminando os efeitos desses fatores na variação dos dados. A análise estatística foi conduzida pelo software estatístico, SAS – Statistical Analysis System. Version 6, 1990. .

## **4.5 - ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA OS ENSAIOS “SINE DWEL”**

### **4.5.1 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA**

Para o controle da homogeneidade dos espécimes foi feita uma análise de variância com os valores médios dos módulos de elasticidade obtidos antes dos ensaios cíclicos, verificando se esses espécimes poderiam ser considerados estatisticamente iguais e se os

padrões adotados no controle desses foram eficientes e significativos. Esses padrões, conforme foi relatado no item materiais, dizem respeito a tamanho, peso, origem, tempo de colheita, controle de temperatura e umidade do ambiente de ensaios.

#### 4.5.2 - REGRESSÃO MULTIPLA

As frequências anteriormente citadas como sendo as de maior dano ao material agrícola, ou seja, 4,5 Hz, 9 Hz, 18 Hz, 25 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 60 Hz, juntamente com as frequências de ressonância detectadas pelo ensaio com varredura constante, foram ensaiadas em três intervalos de tempos diferentes de duração, 1200 s, 2400 s, 3600 s. Os valores médios do módulo de elasticidade antes e após os ensaios vibracionais com frequência constante, tipo *sine dwell* para diferentes intervalos de tempo de duração foram analisados estatisticamente para se estudar os efeitos da frequência, do tempo e de combinações desses fatores onde a **frequência** é considerada tratamento e o **tempo** considerados fatores independentes. Por se tratar de tratamentos quantitativos e sem repetições para uma mesma amostra, optou-se por estudar o fator frequência, cujos níveis foram 4,5 Hz, 9 Hz, 18 Hz, 25 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 60 Hz, 100 Hz e 200 Hz e intervalo de tempo em três níveis, a saber, 1200 s, 2400 s e 3600 s, via análise de regressão múltipla. Assim sendo, os parâmetros do modelo proposto foram obtidos em função das combinações entre **t, f, tf, f<sup>2</sup>, t<sup>2</sup>, f<sup>2</sup>t, ft<sup>2</sup> e t<sup>2</sup>f<sup>2</sup>**. Como variável resposta utilizou-se a diferença entre os valores do módulo de elasticidade anterior aos ensaios e os módulos de elasticidade após os ensaios.

Objetivando-se estudar a contribuição de cada parâmetro ao modelo anteriormente mencionado, verificou-se por meio do teste t-student, a probabilidade de cada parâmetro de significância fixada em 5%. Desta forma, concluiu-se que esse modelo apresentou todos os parâmetros não significativos, o que equivale dizer que este modelo apresenta baixo poder preditivo. A variável diferença dos módulos de elasticidade antes e após os ensaios ajustou o modelo com as possíveis situações linear e quadrática. O ajuste para um modelo cúbico foi descartado por haver mais parâmetros que repetições. todos apresentaram um p-valor maior que 5%. Portanto, o poder preditivo inerente a cada parâmetro se apresenta como **não eficiente**. Entretanto esse modelo apresentou um R<sup>2</sup>-

ajustado de 90,83%, o que representa a quase totalidade das observações. Em virtude do bom ajuste das observações feitas por esse modelo decidiu-se estudar a superfície de resposta em conjunto com as curvas de nível apresentadas no capítulo seguinte. A não significância observada nesse modelo gerou a necessidade de elaborar um **modelo reduzido**, baseado nos mesmos parâmetros. Como os valores são quantitativos, pode-se gerar uma curva de resposta relacionada com o tempo e outra relacionada com a frequência, obtendo-se uma superfície de resposta incluindo os dois parâmetros, estabelecendo uma conexão entre frequência e tempo.

#### 4.5.3 - MODELO REDUZIDO - MÉTODO “BACKWARD”

Em função de o modelo inicial ter apresentado todos os parâmetros **não significativos** propôs-se um novo modelo baseado no método “**backward**”, o qual verifica algoritmicamente o ajuste de forma que somente os parâmetros significativos permaneçam no sistema realizando um novo ajuste.

O princípio da análise algorítmica do modelo “**backward**” considera:

- a) Inicialmente, ajusta-se um modelo com todos os parâmetros.
- b) Testa-se a significância de cada parâmetro.
- c) Aquele parâmetro que apresentar menor estatística **t**, (ou maior p-valor) é retirado do modelo.
- d) Ajusta-se novamente o modelo, porém com as variáveis restantes.
- e) Repete o passo (b)

No final da aplicação do algoritmo “**backward**” o resultado será um modelo com poucas variáveis, porém todas elas significativas. Quando se tem um modelo com muitos parâmetros é conveniente verificar quais parâmetros são mais importantes no modelo, os parâmetros não importantes são retirados do modelo. No entanto, a qualidade do ajuste do

modelo deve ser preservada, a qual e comparada por meio do valor de  $R^2$ . O novo modelo, além de ter apresentado uma redução no número de parâmetros, indicou, que todos os parâmetros foram significativos, ou seja, todos contribuíram significativamente para a eficiência de predição. Considerou-se aceitável a qualidade de ajuste desse modelo em virtude de que 90,38% ( $R^2=0.9038$ ) das observações foram explicadas pelo mesmo.

#### 4.5.4 - ÍNDICE DE FIRMEZA ACÚSTICO

Com base nas mesmas definições do experimento realizado para a análise do módulo de elasticidade foi analisado os dados do índice de firmeza acústico, assim o modelo inicialmente proposto foi dado em função de todas as combinações entre os efeitos simples e quadrático dos fatores tempo (t) e frequência (f).

Através do teste t-student, comparou-se as probabilidades de cada parâmetro com a significância de 5%. Os resultados que todos os parâmetros foram não significativos, portanto, o poder preditivo inerente a cada parâmetro apresenta-se **não eficiente**. Entretanto o modelo ajustado, apresentou um  $R^2$ -ajustado de 71,92%, sendo este representativo em relação a explicação das observações perante o modelo ajustado. Em virtude da boa explicação das observações feitas por este modelo objetivou-se estudar a superfície de resposta. Sendo assim, comparou-se a resposta deste modelo mesmo com parâmetros não significativos com um modelo reduzido caracterizado pelos parâmetros inerentes a este modelo todos significativos.

#### 4.5.5 - MODELO REDUZIDO - "MÉTODO BACKWARD"

Em função de o modelo inicial ter apresentado todos os parâmetros não significativos ajustou-se um novo modelo por meio do método “backward”, o qual além de ter apresentado uma redução no número de parâmetros mostrou-se conforme a Tabela (5.7) com



todos os parâmetros significativos, de modo que todos os parâmetros contribuíram significativamente para o modelo, aumentando assim a eficiência na predição. Em relação à qualidade de ajuste do modelo, praticamente o coeficiente de determinação ( $R^2=0.6917$ ) foi o mesmo do inicial, assim concluiu-se que o modelo é eficiente na predição do módulo de elasticidade após o ensaio de frequência e tempo.

## **5- RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 - CARACTERIZAÇÃO DOS ESPECIMES**

O controle dos padrões de homogeneidade dos espécimes foi viabilizado por uma análise de variância com os valores médios dos módulos de elasticidade obtidos antes dos ensaios cíclicos, verificando se esses espécimes poderiam ser considerados estatisticamente iguais e se os padrões adotados no controle desses foram eficientes e significativos. Esses padrões, conforme foi relatado na metodologia, dizem respeito a tamanho, peso, origem, tempo de colheita, controle de temperatura e umidade dos espécimes. Assim, a Tabela (5.1) mostra a análise realizada com os valores médios dos módulos de elasticidade dos espécimes em estudo, antes dos ensaios *sine dwell*. Os padrões assim analisados foram mantidos para os demais ensaios.

A Tabela (5.1) Apresenta os valores do módulo de elasticidade envolvidos no ensaio “*sine dwell*” anterior ao ensaio cíclico a partir dos quais foi realizada a análise estatística com o objetivo de verificar a equivalência estatística dos valores iniciais dos módulos de elasticidade dos espécimes.

Tabela (5.1) – Módulos de elasticidade obtidos experimentalmente para os diferentes tratamentos e repetições antes do ensaio “*sine dwell*”.

<b>Mod. Elast. (mPa) médio anterior aos ensaios</b>	<b>Tempo (s) do ensaio.</b>	<b>Frequência (Hz) submetida a amostra</b>
3,0000	1200	4,5
3,0049	2400	4,5
3,1224	3600	4,5
3,0858	1200	9,0
3,0806	2400	9,0
2,9186	3600	9,0
3,0353	1200	18,0
3,0423	2400	18,0
3,0963	3600	18,0
3,0465	1200	25,0
3,0234	2400	25,0
3,0623	3600	25,0
3,0599	1200	30,0
3,0425	2400	30,0
3,0610	3600	30,0
3,0679	1200	40,0
3,0633	2400	40,0
3,0362	3600	40,0
3,0821	1200	60,0
3,0206	2400	60,0
3,0418	3600	60,0
3,0275	1200	100,0
3,0535	2400	100,0
3,1464	3600	100,0
3,0102	1200	200,0
3,0168	2400	200,0
3,0415	3600	200,0

Tabela (5.2) – ANAVA dos valores médios do módulo de elasticidade das amostras antes do ensaio *sine dwell*.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M</b>	<b>Fobs</b>	<b>Pvalor</b>
<b>REPETIÇÕES</b>	8	0,00612	0,00077	0,33	0,943
<b>ERRO</b>	18	0,04179	0,00232		
<b>TOTAL</b>	26	0,04791			

A Tabela (5.2) indica que as diferenças de módulo de elasticidade para as diversas repetições não foram significativas baseadas em um valor nominal de 5%, pois a análise de variância apresentou um  $p=0,943$ . Desta forma, concluiu-se que as amostras em estudo apresentaram inicialmente valores iguais para o módulo de elasticidade. Assim pode-se afirmar que as medidas de controle adotadas foram eficientes e que as amostras são estatisticamente iguais.

## **5.2 - ENSAIO POR VARREDURA CONSTANTE**

A Figura (5.1) mostra a aceleração imposta pela mesa vibratória e a aceleração medida pelo acelerômetro fixado à amostra em estudo. Observa-se que na faixa de 100Hz à 360 Hz, ocorreu a maior aceleração captada no espécime, indicando que o sistema entrou em ressonância, aumentando a amplitude de 0,3 G, imposta pela mesa vibratória para um valor próximo de 6 G no espécime. Na faixa de 420 Hz à 500Hz o sistema novamente entrou em ressonância somando-se as amplitudes e elevando novamente a aceleração inicial de 0,3 G para 1,85 G. Observa-se que as frequências de 4,5Hz, 18Hz, 25Hz e 40Hz 60 Hz mencionados pela literatura como geradoras de danos em frutas e produtos vegetais frescos, não foram observadas como frequência de ressonância nesse ensaio, no entanto as frequências não necessitam necessariamente se localizar na faixa de ressonância para gerar danos aos produtos.

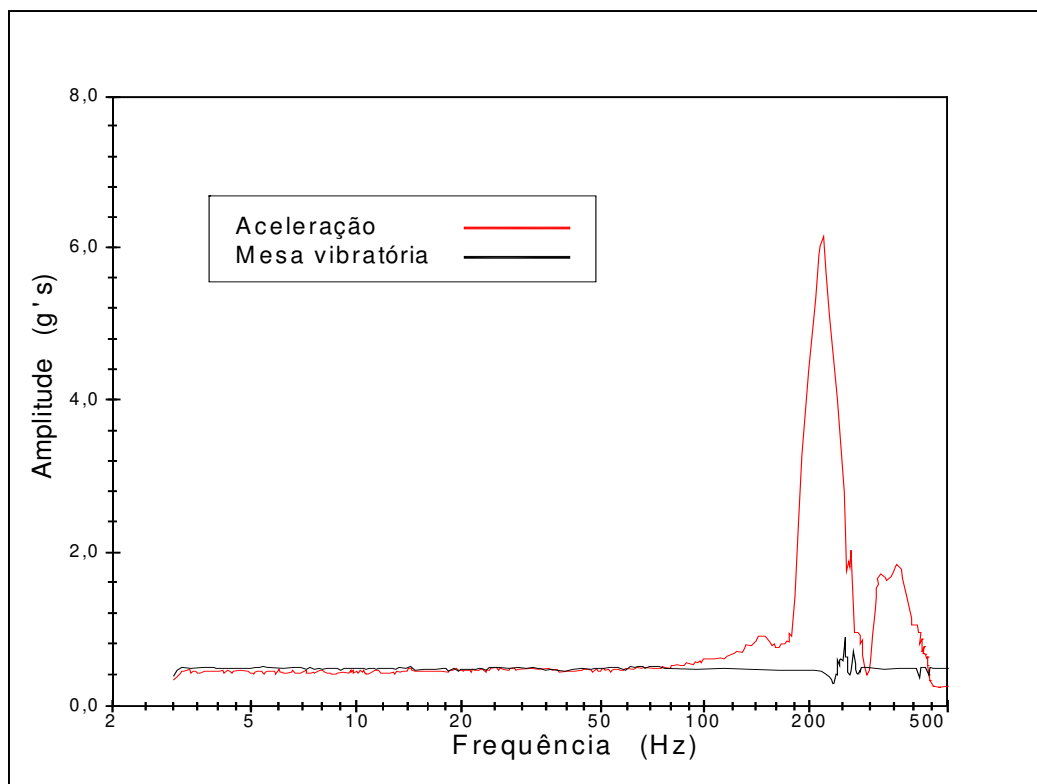


Figura (5.1)- Medição da transmissividade da vibração imposta pela mesa vibratória à amostra em estudo e determinação da ocorrência de ressonância na faixa vibratória.

A Figura (5.1) apresenta as frequências e a amplitudes impostas pela mesa vibratória, em traço vermelho as frequências e as amplitudes impostas pela mesa vibratória, e em traço preta as frequências e amplitudes captados pela célula piezométrica na amostra, pelo ensaio com varredura constante, sem interrupção, na faixa de 3 Hz até 500 Hz, através de “ruído branco”. Mostrando os pontos considerados em ressonância, e o comportamento entre vibração imposta pela mesa vibratória e a transmissão desta vibração aos espécimes em estudo na faixa a que interessa o estudo.

### 5.3 - ENSAIOS “SINE DWEL”, - ENSAIOS EM FREQUÊNCIAS, CONSTANTES

Esse estudo atende ao terceiro objetivo deste trabalho.

Os dados obtidos a partir desse ensaio são apresentados na Tabela (5.3) e representados graficamente pelas Figuras (5.3), (5.4), (5.5).

Tabela (5.3) – Valores médios do módulo de elasticidade antes e após os ensaios vibracionais com frequência constante, tipo “sine dwell” para diferentes intervalos de duração.

TEMPO (s)	1200 s		2400 s		3600 s	
TESTE	ANTES	APÓS	ANTES	APÓS	ANTES	APÓS
FREQUENCIA (Hz)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (Mpa)					
4,5	3,0000	2,8810	3,0049	2,7810	3,1224	2,8973
9,0	3,0858	2,9649	3,0806	2,7620	2,9900	2,8002
18,0	3,0353	2,8400	3,0423	2,8440	3,0963	2,8956
25,0	3,0465	2,9148	3,0234	2,7620	3,0623	2,6980
30,0	3,0599	2,8899	3,0425	2,8039	3,0610	2,6551
40,0	3,0679	2,8664	3,0633	2,7523	3,0362	2,6074
60,0	3,0821	2,8283	3,0206	2,5262	3,0418	2,3390
100,0	3,0275	2,6176	3,0535	2,5552	3,1464	2,4304
200,0	3,0102	2,6077	3,0168	2,3015	3,0415	2,0590

Nas Figuras (5.3), (5.4), (5.5), observa-se a defasagem existente entre os valores no módulo de elasticidade entre as amostras dos espécimes anterior e posterior à imposição vibratória, onde fica evidente os danos causados na textura dos corpos em estudo, observa-se também que esta defasagem ou diminuição no valor do módulo de elasticidade do material foi se acentuando na medida em que a frequência e o tempo de exposição aumentavam. Foi

observado a “olho nu” que os espécimes perdiam muito líquido citoplasmático no local da amostragem após a imposição vibratória, evidenciando ruptura da estrutura celular.

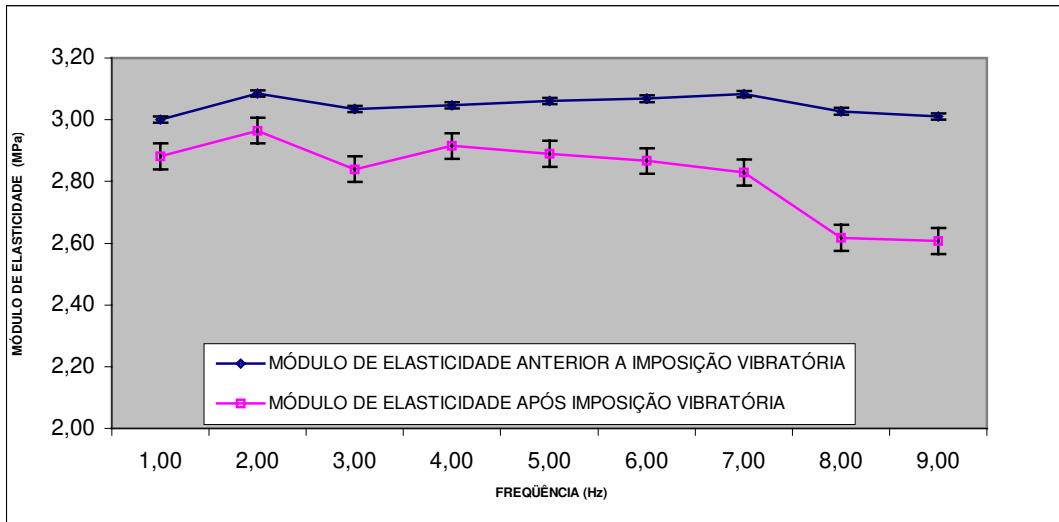


Figura (5.2) – Comportamento do módulo de elasticidade anterior e posterior ao ensaio cíclico “sine dwell” para diferentes frequências de excitação de 1200s.

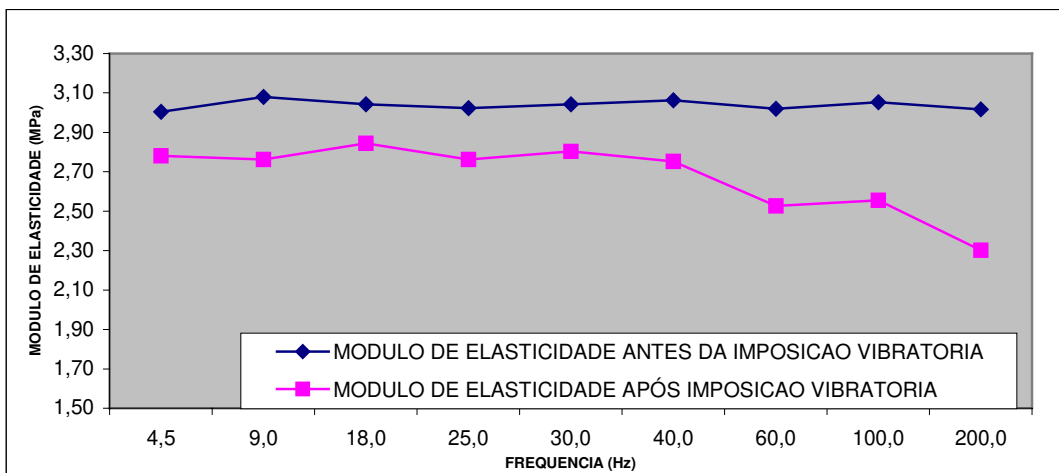


Figura (5.3) – Comportamento do módulo de elasticidade anterior e posterior ao ensaio cíclico “sine dwell” para diferentes frequências de excitação e tempo de excitação de 2400 s.

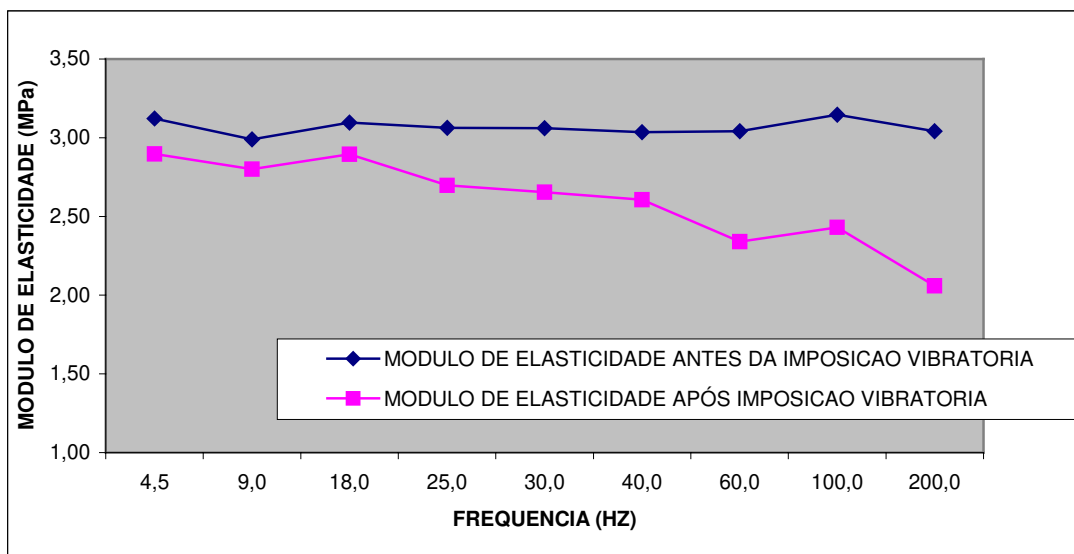


Figura (5.4) – Comportamento do módulo de elasticidade anterior e posterior ao ensaio cíclico “sine dwell” para diferentes frequências de excitação e tempo de exposição de 3600 s.

Os resultados da Tabela (5.3) foram analisados estatisticamente para se estudar os efeitos da frequência, do tempo e de combinações desses fatores onde a frequência é considerada tratamento e o tempo considerados fatores independentes. Gerando o seguinte modelamento estatístico.

$$y = -0,24497 + 0,00035 t - 7285e^{-8}t^2 + 0,010557 f - 0,0000454 f^2 - 0,0000080 tf + 2,168107e-8 t^2f + 3,9272578e-8 f^2t - 9,477e-12 f^2t^2 \quad (5.1)$$



Tabela (5.4) – Estimativas dos parâmetros do modelo completo para o módulo de elasticidade calculado antes e após os ensaios “*sine dwell*” para os diferentes intervalos de tempo e diferentes frequências.

Variável	Estimativa	p-valor (R <sup>2</sup> )
constante	-0,24497	0,2198
t	0,00035	0,0650
t <sup>2</sup>	-7,285e-8	0,0685
f	0,010557	0,1157
f <sup>2</sup>	-0,0000454	0,1535
tf	-0,0000080	0,2002
t <sup>2</sup> f	2,168107e-8	0,0990
f <sup>2</sup> t	3,9272578e-8	0,1900
f <sup>2</sup> t <sup>2</sup>	-9,477e-12	0,1283

Na Figura (5.6) observa-se que a superfície de resposta se apresenta plana, indicando que os parâmetros não são significativos, o que também ocorre nas curvas de nível mostradas na figura posterior.

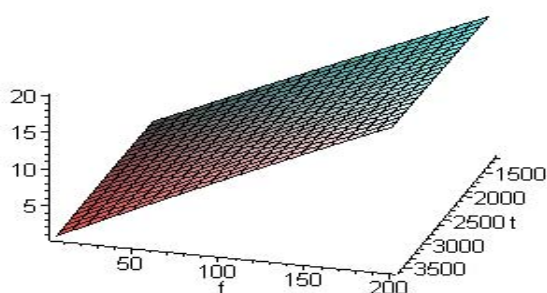


Figura (5.5) – Superfície de resposta para o modelo linear ajustado com todas as combinações de t e f, onde o eixo "z" indica o módulo de elasticidade após o ensaio previsto.

A Figura (5.5) mostra o valor predito para o módulo de elasticidade no eixo "Z" em função da frequência e do tempo baseados na diferença entre os valores dos módulos de elasticidade anteriores e posteriores ao ensaio, imagens geradas pelo *software MAPPLE 5*, em escala adequada à melhor visualização.

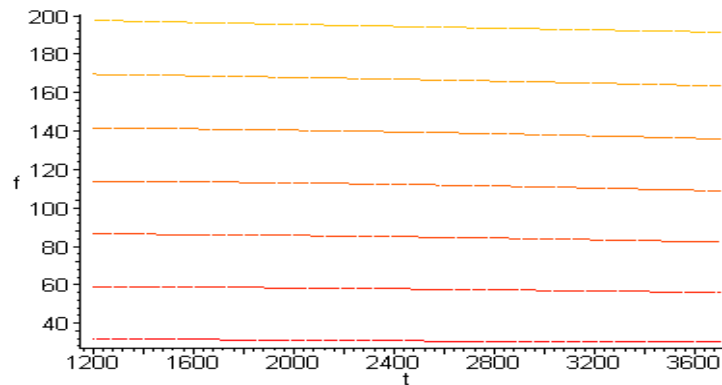


Figura (5.6) – Curvas de nível geradas pelo “*software mapple 5*”, pelo modelo inicial com as combinações de **f** e **t** propostas.

Na Figura (5.6) observa-se o comportamento paralelo ao eixo X representante do tempo das curvas de nível devido à não significância encontrada pelo método de regressão. Assim como na topografia as curvas em contorno de nível revelam a mesma cota, nesse caso as curvas representadas por fatias da superfície de resposta em três dimensões, Figura (5.6) são geradas para melhor visualização das situações onde a combinação frequência e tempos geram a melhor resposta. Essa figura evidencia as faixas de maior diferença entre os módulos de elasticidade antes e após os ensaios cíclicos, podendo também observar que o efeito linear está presente em ambos fatores, sendo mais acentuado a medida que se aumenta a frequência. Nota-se também que com o aumento do tempo, para todos os níveis de frequência apresentou o mesmo comportamento (linhas paralelas). Isto significa dizer que ao variar **t** e **f** tem-se um mesmo valor de Z. Por exemplo: na Figura (5.6), passando-se um plano paralelo ao eixo a **t** e **f**, na altura de  $Z = 0,8$  obtém-se uma curva de nível na Figura (5.7) com as variações ocorridas em **t** e **f** para todas as suas diferentes combinações. Analisando a superfície de resposta vista na Figura (5.6), este fato novamente é notado, pois em relação à frequência, pode-se observar

que o efeito linear é mais acentuado, ao passo que no eixo relativo ao tempo praticamente o efeito linear mostrou-se paralelo ao próprio eixo. O nível ótimo para obtenção de resposta máxima de elasticidade é dado pela combinação entre o tempo superior a 1500s condicionado a máxima frequência.

### 5.3.1 - MODELO REDUZIDO - MÉTODO “BACKWARD”

Em função de o modelo inicial ter apresentado todos os parâmetros **não significativos** propôs-se um novo modelo baseado método "**backward**".

Tabela (5.5), que todos os parâmetros foram significativos, ou seja, todos contribuíram significativamente para a eficiência de predição. Considerou-se aceitável a qualidade de ajuste desse modelo em virtude de que 90,38% ( $R^2=0.9038$ ) das observações foram explicadas pelo mesmo. Assim o modelamento estatístico ficou simplificado.

$$y = 0,1369 + 0,0013 f + 5,916e-10 t^2 f - 1,840e-12 f^2 t^2 \quad (5.2)$$

Tabela (5.5) – Estimativas dos parâmetros do modelo reduzido - método “backward.”

Variável	Estimativa	p-valor
CONSTANTE	0,1369	0,0001
f	0,0013	0,0006
t <sup>2</sup> f	5,916e-10	0,0001
f <sup>2</sup> t <sup>2</sup>	-1,840e-12	0,0003

Na Tabela (5.5) observa-se que o p-valor agora apresenta valores significativos para tempo e frequência ao nível de 1% de certeza. A superfície de resposta para esse modelo é representada na Figura (5.8), e as curvas de nível são mostradas na Figura (5.9).

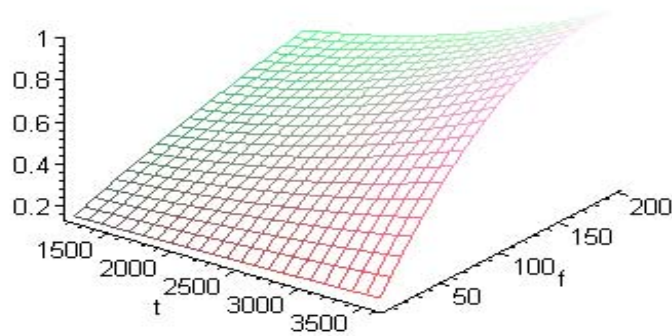


Figura (5.7) – Superfície de resposta para o modelo reduzido, método “backward”, mostrando no eixo "z" o valor predito para o módulo de elasticidade após ensaio em função do **tempo** e **freqüência** de excitação nos demais eixos.

A Figura (5.8) foi gerada com todos os parâmetros em função do tempo e da frequência, ou seja,  $f, t^2f$  e  $f^2t^2$ , mostrando o valor predito para o módulo de elasticidade no eixo "Z" em função da frequência e do tempo, baseados na diferença entre o valor desse módulo anterior e posterior ao ensaio. Onde se pode observar o comportamento e permite a visualização das faixas de maior diferença entre os módulos de elasticidade antes e após ensaios. Com a redução do número de parâmetros, verificou-se que tanto a frequência como o tempo passaram a apresentar um comportamento quadrático, sendo mais acentuado para a frequência, Figura (5.8). Sendo assim, o nível ótimo para obtenção de uma maior diferença entre módulo de elasticidade anterior e posterior aos ensaios de vibração é dado pela frequência máxima, condicionada ao tempo máximo. Este resultado é também confirmado pelas curvas de nível, Figura (5.9) as quais fornecem um intervalo ótimo de tempo e

freqüência circunscrito por qualquer combinação entre 3200s a 3600s e freqüência superior a 140 Hz.

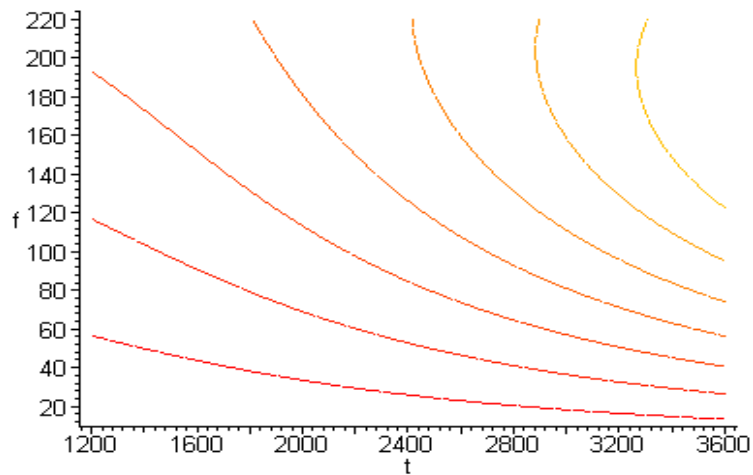


Figura (5.8) – Curvas de nível do modelo reduzido com todos os parâmetros ajustados. imagens geradas pelo “*software mapple 5*”, em escala adequada à melhor visualização.

#### 5.4 - ÍNDICE DE FIRMEZA ACÚSTICO

Este estudo satisfaz as exigências do terceiro objetivo do referido estudo. Com base nas mesmas definições do experimento realizado foi analisado o índice de firmeza, assim o modelo inicialmente proposto foi dado em função de todas as combinações entre os efeitos simples e quadrático dos fatores tempo (t) e freqüência (f), para o índice de firmeza acústico coletados pelo equipamento “FIRMALON” via Tabela (5.6).

Tabela (5.6) - Valores médios do índice de firmeza acústico antes e após os ensaios vibracionais com frequência constante, tipo “*sine dwell*” para diferentes intervalos de duração.

TEMPO (s)	1200 s		2400 s		3600 s	
	ANTES	APÓS	ANTES	APÓS	ANTES	APÓS
FREQUENCIA (Hz)	FIRMEZA					
4,5	4,0800	3,4800	3,9100	3,2680	3,0240	2,1020
9,0	4,0200	3,3600	3,8100	3,2036	3,6210	2,8120
18,0	3,1900	2,8100	4,0200	3,3955	3,0999	2,1650
25,0	2,6400	2,3000	4,0600	3,1035	4,0020	3,1450
30,0	3,8200	3,6100	3,9400	3,0390	2,9800	2,1120
40,0	3,4500	3,0900	2,9800	2,1235	3,2540	2,7102
60,0	3,2900	2,9500	2,6800	1,8940	2,5400	1,6500
100,0	3,5600	2,8100	3,5400	2,6300	3,2100	2,2980
200,0	3,8100	2,8900	3,7900	2,3010	3,3010	2,0614

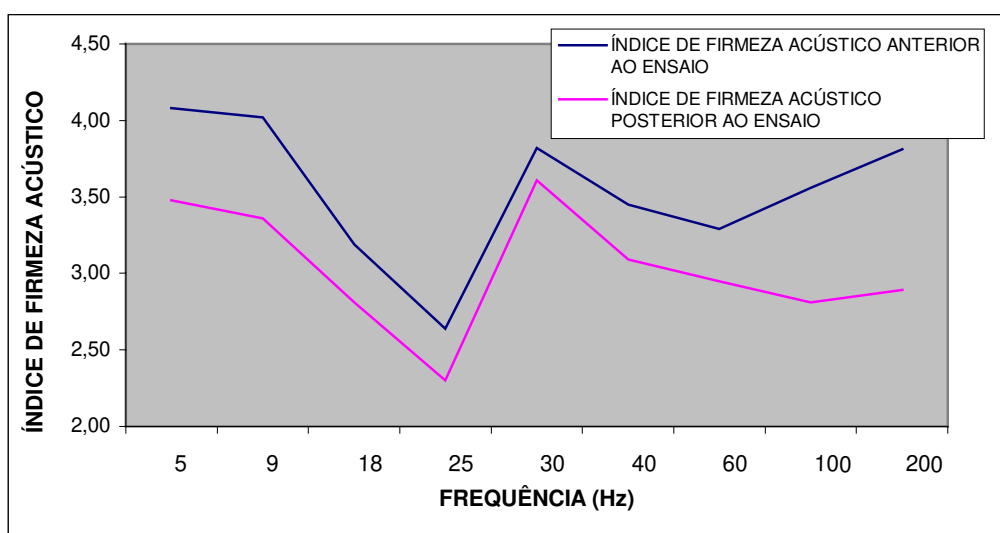


Figura (5.9) – Comportamento do índice de firmeza acústico anterior e posterior ao ensaio cíclico “*sine dwell*” para diferentes frequências de excitação e tempo de exposição de 1200 s.

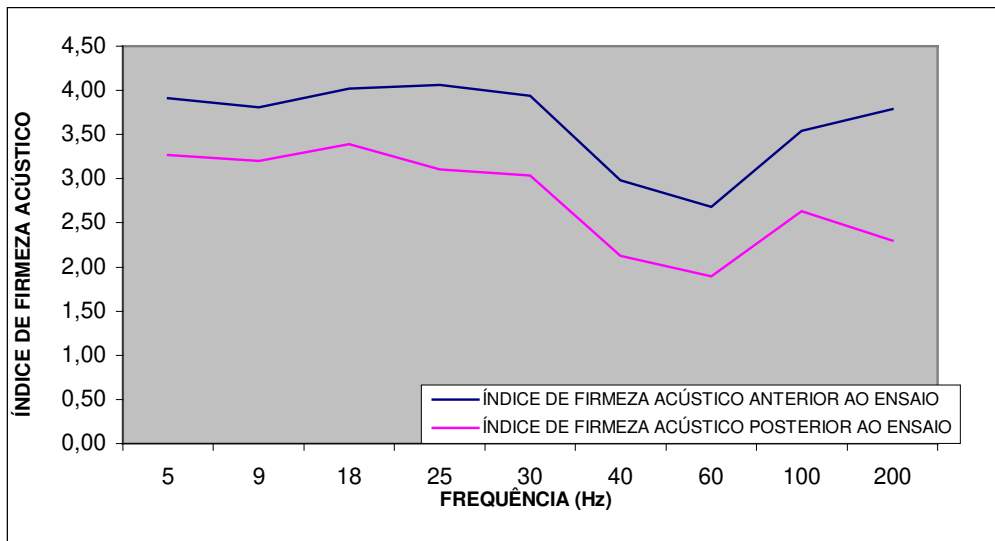


Figura (5.10) – Comportamento do índice de firmeza acústico anterior e posterior ao ensaio cíclico “sine dwell” para diferentes frequências de excitação e tempo de exposição de 2400 s.

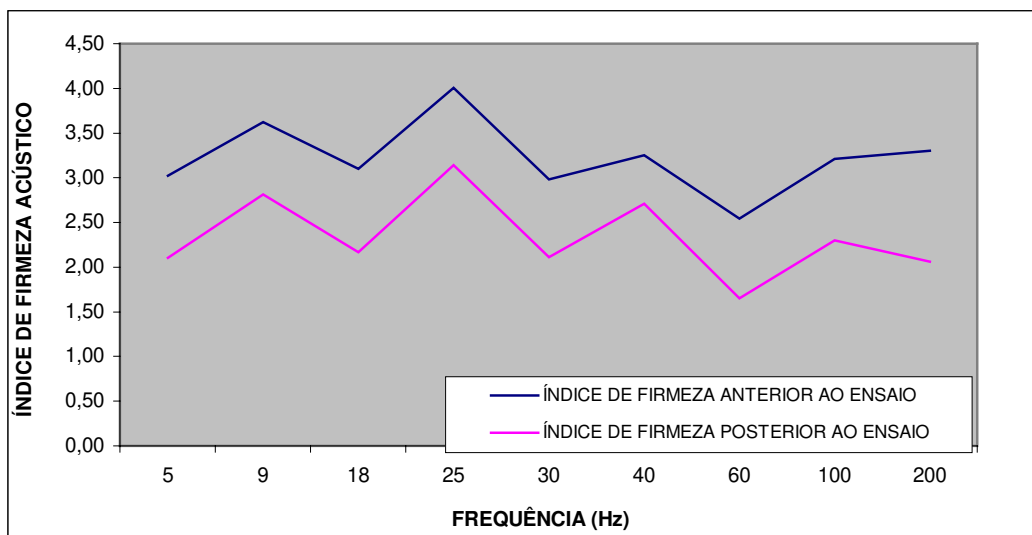


Figura (5.11) – Comportamento do índice de firmeza acústico anterior e posterior ao ensaio cíclico “sine dwell” para diferentes frequências de excitação e tempo de exposição de 3600 s.

Nas Figuras (5.9), (5.10), (5.11), observa-se a defasagem existente entre os valores do índice de firmeza acústico dos espécimes anterior e posterior à imposição vibratória, onde fica evidente como no caso anterior, referente ao módulo de elasticidade, os danos causados na textura dos corpos a diminuição no valor do índice foi se acentuando na medida em que a frequência e o tempo de exposição aumentavam.

Tabela (5.7) –Estimativas dos parâmetros do modelo completo para o índice de firmeza acústico calculado antes e após os ensaios "sine dwell" para os diferentes tempos e diferentes frequências.

<b>Parâmetro</b>	<b>Estimativa</b>	<b>p-valor</b>
<b>CONSTANTE</b>	0,223817	0,6108
<b>t</b>	0,000220	0,5973
<b>f</b>	-0,014854	0,3136
<b>tf</b>	0,000014354	0,3037
<b>t<sup>2</sup></b>	-1,048164E-8	0,9024
<b>f<sup>2</sup></b>	0,000062156	0,3755
<b>f<sup>2</sup>t</b>	-4,41975E-8	0,5034
<b>t<sup>2</sup>f</b>	-3,022212E-9	0,2940
<b>t<sup>2</sup>f<sup>2</sup></b>	9,102865E-12	0,5039

Gerando o seguinte modelamento estatístico:

$$y = 0,223817 + 0,000220 t - 0,014854 f + 0,000014354 tf - 1,048164e-8 t^2 + 0,000062156 f^2 - 4,41975e-8 f^2 t - 3,022212e-9 t^2 f + -3,022212e-9 t^2 f^2 \quad (5.3)$$

Através do teste t-student, comparou-se as probabilidades de cada parâmetro com a significância de 5%. Os resultados descritos na Tabela (5.7), indicaram que todos os parâmetros foram não significativos, portanto, o poder preditivo inerente a cada parâmetro



apresenta-se **não eficiente**. Entretanto o modelo ajustado, apresentou um  $R^2$ -ajustado de 71,92%, sendo este representativo em relação a explicação das observações perante o modelo ajustado. Em virtude da boa explicação das observações feitas por este modelo objetivou-se estudar a superfície de resposta representada pela Figura (5.10), em conjunto com as curvas de nível representadas pela Figura (5.11). Sendo assim, comparou-se a resposta deste modelo mesmo com parâmetros não significativos com um modelo reduzido caracterizado pelos parâmetros inerentes a este modelo todos significativos.

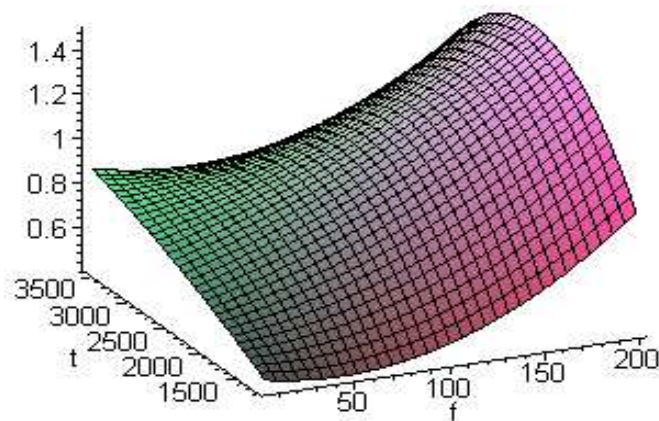


Figura (5.12) – Superfície de resposta para o modelo linear ajustado com todos os parâmetros para o índice de firmeza acústico, onde mostra em função da **frequência** e do **tempo**, o valor predito no eixo "Z", baseados na diferença entre o valor anterior e posterior ao ensaio no FIRMALON.

Analisando a Figura (5.12), verifica-se que em ambos fatores o efeito quadrático esta presente. Comparando ambos fatores, percebe-se que este efeito e mais acentuado para a frequência, sendo que, a partir de 100 Hz este efeito é mais perceptível. Para uma melhor interpretação da superfície de resposta para o índice de firmeza, utilizou-se as curvas de níveis Figura (5.13) de modo que, a resposta máxima para o índice de firmeza, é dada por qualquer combinação entre os níveis dos fatores nos respectivos intervalos, onde o intervalo de maior

diferença entre valores de firmeza acústico anterior e posterior aos ensaios de vibração está na faixa de frequência entre 180Hz e 200Hz e o intervalo para o tempo de 3000 a 3500 segundos.

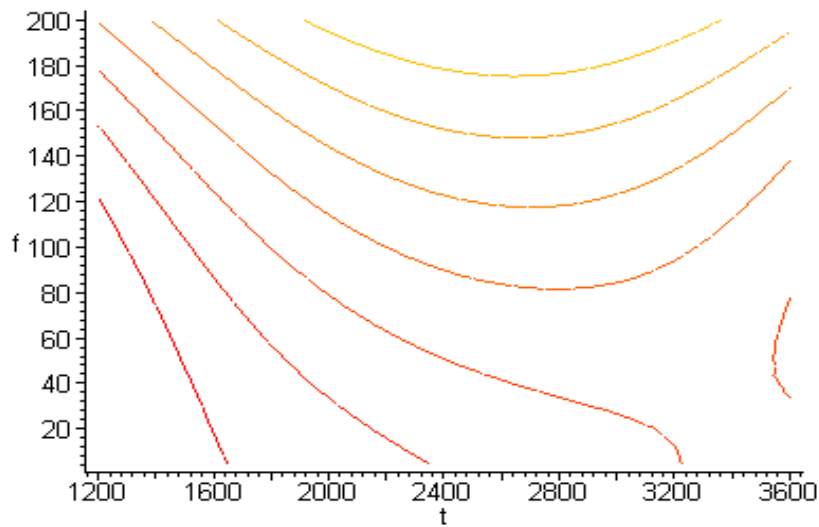


Figura (5.13) – Curvas de nível do modelo linear com todos os parâmetros ajustados.

#### 5.4.2 - MODELO REDUZIDO - "MÉTODO BACKWARD"

Em função de o modelo inicial ter apresentado todos os parâmetros não significativos ajustou-se um novo modelo por meio do método de backward, o qual além de ter apresentado uma redução no número de parâmetros mostrou-se conforme a Tabela (5.8) com todos os parâmetros significativos, de modo que todos os parâmetros contribuíssem significativamente para o modelo, aumentando assim a eficiência na predição. Em relação à qualidade de ajuste do modelo, praticamente o coeficiente de determinação ( $R^2=0.6917$ ) foi o mesmo do inicial, assim concluiu-se que o modelo é eficiente na predição do módulo de elasticidade após o ensaio de frequência e tempo.

$$Y = 0,00018944 + 0,000003717 TF - 8,950e-10 T^2F \quad (5.4)$$

Tabela (5.8) – Estimativas dos parâmetros do modelo reduzido para o índice de firmeza.

Parâmetro	Estimativa	p-valor
<b>t</b>	0,00018944	0,0001
<b>tf</b>	0,000003717	0,0001
<b>t<sup>2</sup>f</b>	-8,950e-10	0,0018

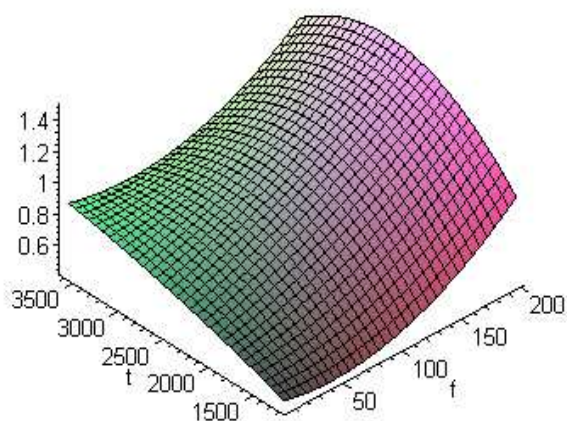


Figura (5.14) – Superfície de resposta para o modelo reduzido ajustado com todos os parâmetros para o índice de firmeza, em função da frequência e tempo, mostrando o valor predito no eixo "Z" baseados na diferença entre o valor anterior e posterior aos ensaios.

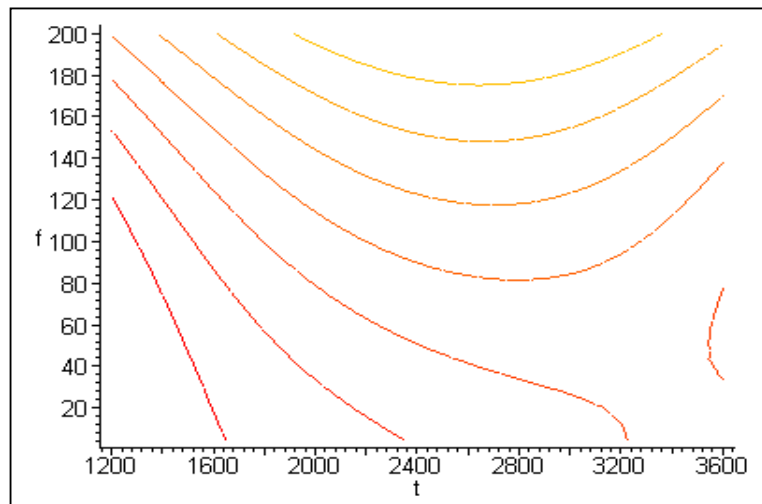


Figura (5.15) - Curvas de nível do modelo reduzido com todos os parâmetros ajustados.

Com a redução do número de parâmetros, verificou-se o mesmo comportamento dado ao modelo completo, sendo assim, pelo critério da parcimoniosidade adota-se o modelo reduzido para explicar o efeito do índice de firmeza.

## 5.5 - COMPARAÇÃO ENTRE A ELASTICIDADE E O ÍNDICE DE FIRMEZA ACÚSTICO

Para efeito de comparação entre as duas respostas obtidas utilizou-se como base os modelos reduzidos Tabela (5.7) e Tabela (5.8), bem como suas superfícies de respostas. Desta forma, foi constatado que:

a) O intervalo de tempo máximo para obtenção da resposta máxima da elasticidade e índice de firmeza, praticamente foi o mesmo, ou seja, entre 3.000 e 3500s.

b) A resposta máxima simultaneamente indicada pelo módulo de elasticidade e pelo índice de firmeza se situa no intervalo de 180 a 200 Hz.

- c) O efeito simples do tempo foi significativo para o índice de firmeza.
- d) O efeito simples da frequência foi significativo para o módulo de elasticidade.
- e) Para a variável módulo de elasticidade, aumentando-se a frequência, atinge-se o máximo de diferença entre valores anteriores e posteriores aos ensaios.

## 5.6 - SIMULAÇÃO DE SOLICITAÇÕES VIBRACIONAIS GERADAS POR TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Este estudo satisfaz as solicitações do quarto objetivo. A Figura abaixo apresenta a diferença média entre os módulos de elasticidade coletados antes e após os ensaios que simulam as condições de transporte rodoviário com percurso de duração de sete horas (25.200 s) ininterruptas. Essas condições se referem a estudos anteriores onde acelerômetros foram posicionados em diferentes pontos na carroceria de um caminhão circulando pelas estradas e captando sinais para que posteriormente esses dados pudessem ser reproduzidos em laboratório, segundo recomendações dos autores do *software*.

Tabela (5.9) - Valores médios do módulo de elasticidade calculados para espécimes, anterior e posterior ao ensaio vibracionais simulando as condições de transporte rodoviário.

<b>ANTERIOR</b>	<b>POSTERIOR</b>
3,0910	2,7200
3,1030	2,7100
3,1020	2,6800
3,0010	2,5600
2,9510	2,5910
2,8410	2,4120
2,9420	2,7102
3,1006	2,8800
<b>VALOR MÉDIO</b> 3,0165	<b>VALOR MÉDIO</b> 2,6580
<b>DESVIO PADRÃO</b> 0,0988	<b>DESVIO PADRÃO</b> 0,1382

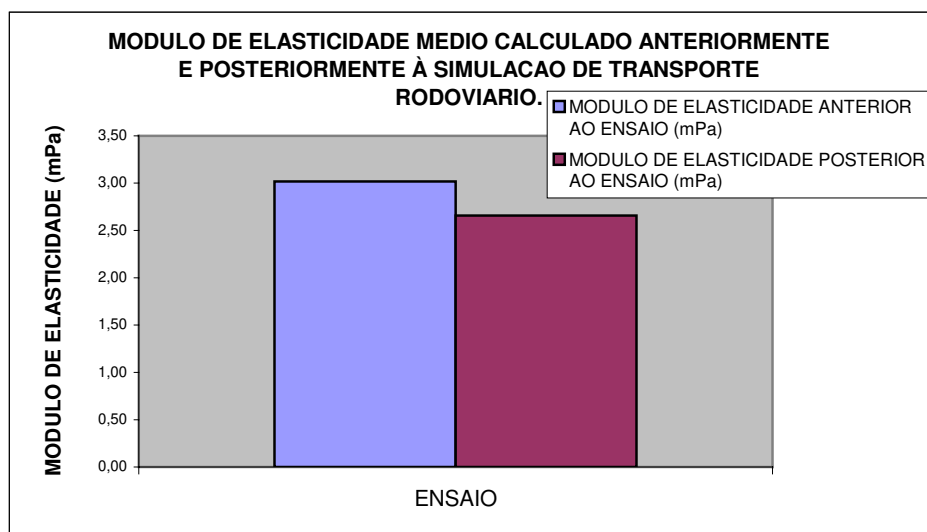


Figura (5.16) – Valores para o módulo de elasticidade médio calculado, antes e após as amostras serem submetidas aos ensaios que reproduzem condições de transporte rodoviário.

Para se analisar esses dados do ponto de vista estatístico foi utilizado o teste **t-student** para amostras independentes, considerando as variâncias homogêneas. Verificou-se que as médias entre os dois grupos foram significativas ( $p\_valor=0,0001$ ), ou seja, existiu uma diferença significativa entre os dois valores, anterior e posterior ao ensaio de simulação das condições de transporte rodoviário, evidenciando danos causados por vibração no material ensaiado, danos porém menores do que os ocorridos nos ensaios em vibrações fixas com variação no tempo de duração “*sine dwell*”, pois os ensaios em condições de transporte abordam uma grande faixa de frequências e amplitudes e não somente as causadoras de danos ao material agrícola, o que não acontece nos ensaios “*sine dwell*” onde as amostras foram submetidas aos ensaios exatamente e tão somente às frequências consideradas danosas e de ressonância.

Estudos relacionados com o tipo de suspensão e estrutura dos caminhões, estrutura dos pneus, embalagens e até em que velocidades elas mais ocorrem podem ser beneficiados com este tipo de estudo, porém mais apurado, tentando se evitar ao máximo esta faixa de frequência vibratória.

## 6 - CONCLUSOES

Baseado no que foi exposto anteriormente, pode-se resumir as conclusões como se seguem.

- 1- Os ensaios indicaram que os espécimes de batata inglesa utilizados entram em ressonância nas frequências de 100 Hz à 220 Hz. as quais se incluem na faixa de frequência consideradas danosas pela literatura pertinente.
- 2- A frequência e a interação com o tempo, bem como a interação de ambos, foram significativos na alteração do modulo de elasticidade dos espécimes.
- 3- As frequências críticas geraram maior alteração no modulo de elasticidade dos espécimes que as demais frequências estudadas.
- 4- As simulações indicaram que o transporte rodoviário gera menor influencia no modulo de elasticidade dos espécimes quando comparados com as frequências críticas.
- 5- O índice de firmeza acústico e o modulo de elasticidade, obtidos antes e após os ensaios cíclicos apresentaram diferentes sensibilidades aos tratamentos propostos.

## **7 – SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS.**

Recomenda-se a utilização de técnicas associadas a análise por ultra-som e ressonância nuclear magnética, bem como análises fisiológicas no acompanhamento de ensaios cíclicos. Isto possibilitaria associar a localização das injurias provocadas por essa classe de solicitações. O efeito de frequências subsônicas também deveria ser incluído em objetivos futuros.



## 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

APACLLA, R., Stress Analysis in Agricultural Products Using the Finite Element Method. Unpublished Technical Research Report. Agr. Eng. Deph. 1973.

ASAE STANDARDS: ASAE S368.1: Compression Test of Food Materials of Convex Shape. ASAE STANDARDS 1989, St. Joseph, MI, 36: 368-71, 1989.

BRYAN, W. L., ANDERSON, B. J., MILLER, J. M. Mechanically Assisted Grading of Oranges for Processing. Transactions of ASAE, v. 21, n. 6, p. 1226-1231, 1978.

CHEN, P., STUDER, H. E., LAM, S.T. A Bulk Compressibility Tester for Agricultural Products. St. Joseph, MI: ASAE, 1975, Paper n. 75-5533.

CHITARRA, M. I. F, CHITARRA, A B. Pós Colheita de Frutos e Hortaliças: Fisiologia e Manuseio. Lavras: ESAL/FAEPE, Br, 1990. 320 p.

CHRISTENSEN, R. M. Theory of Viscoelasticity an Introduction. New York. Academic Press, 1982, 364p.

DAL FABBRO, Inácio M. Failure Theories for Apple Flesh. E. Lansing, MI: Michigan State University, 98 p. Tese (Doutorado em Maquinas Agrícolas) 1979.

DE BAERDEMAEKER, J. G. Experimental and Numerical Techniques Related to the Stress Analysis of Apple Under Static Load. Tese (Doutorado) E. Lansing, MI: Michigan State University, 1975.

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

DRAPPER, N. R.; SMITH, H. Applied Regression Analysis, Third Edition, John Wiley, New York 1998.

FERRAZ, A. C. de Oliveira. Propriedades Mecânicas do Internódio da Cana-de-Açúcar: uma Contribuição Metodológica. Campinas: UNICAMP, 1987. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola , Univ. Estadual de Campinas, 1987.

FINNEY, E. E. Mechanical Resonance Within Red Delicious Apples and its Relation to Fruit Texture. *Transactions of the ASAE*, v. 13, n. 2, p. 177-180, 1970.

FINNEY, E. E. Vibration Techniques for Testing Fruits. **Transaction of the ASAE**, v. 1, n. 71, p. 789-802, 1971.

FLUGGE, W. Viscoelasticity. New York, Spring-Verlag, 1975, 194p.

FRIDLEY, R. B., R. A. BRADLEY; L. W. RUMSEY; P. A. ADRIAN. Some Aspects of Elastic Behavior of Selected Finite. *Transactions of the ASAE*. 11(1): 46-49, 1968.

GUSTAFSON, R. J. Continuum Theory for Gas-Solid-Liquid Media. E. Lansing, MI: Michigan State University, 1974. Tese (Doutorado) Agricultural Department, Michigan State University, 1974.

HANANN, D. D. Analysis of Stress During Impact of Fruit Considered to be Viscoelastic. *Trans. Of the ASAE*. St. Joseph, MI, vol. 13, n. 6, p. 893-899, 1970.

HUGHES, H. SEGERLIND, L. J. A Rapid Mechanical Method for Determining Poisson's Ratio in Biological Materials. St. Joseph, MI: ASAE, 1972, paper n. 71-310.

I S T – Instrumented Sensor Technology. Vibration of Fruits and Vegetables During Refrigerated Truck Transport. Ist 4704 Streety Okemos MI USA.

KIMEL, E., PELEG, K. HINGA, S. Vibration Modes of Spheroidal Fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research*, n. 52, p. 201 – 213, 1992.

LAURENTI, R. Estudo Metodológico das Geometrias de Corpos Vegetais Para Ensaio Mecânicos. 1997 Campinas, Brasil, 204 pp Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP.

LINARES, A. W. e DAL FABBRO, I. M. Non Linear Viscoelastic Behavior of Spherical Fruits. 3<sup>rd</sup> International Symposium on Sensors in Horticulture, Tiberias, Israel 1997.

MAPLE N RELEASE 5 SOFTWARE Version 5.00 Nov. 27 1997 by Waterloo Maple Inc. All.

MARTINS, M. P. Comportamento Mecânico de Laranja-Pera (Citrus Sinensis Osbek). Campinas: Unicamp, 1993. 99p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola), Faculdade de Eng. Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1993.

MASE, G. E. Theory and Problems of Continuum Mechanics. New York: McGrawHill, 1970. 221p. (Schaum's Outline Series).

MENDELSON, A. Plasticity: Theory and Application. The Michigan Company, New York. Cellier – MacMillan, Ltd., London.

MOHSEIN, N. N. Physical Properties of Plants and Animal Materials. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1970. Vol. 1, 734p.

MORROW, C. T.; MOHSEIN, N. N. Consideration of Selected Agricultural Products as Viscoelastic Materials. Journal of Food Science v. 31, n. 5, p. 686-698. 1966.

MURASE, H. Elastic Stress-Strain Constitutive Equations for Vegetative Material. MI. Michigan State University, 1977. (Unpublished Ph.d).

RABELO, G. F. Avaliação da aplicação do "Speckle" dinâmico no monitoramento da qualidade da laranja Tese (Doutorado Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP: [s.n.], 2000.

RABELLO, G. F. e DAL FABBRO, I. M. Contact Stress Area Measurement of Spherical. 3<sup>rd</sup> International Symposium on Sensors in Horticulture. Tiberias, Israel 1997.

ROCHA, J. V. Comportamento Mecânico de Minifardos de Feno de Soja Perene (Neonotonia Wightii Lackey c.v. cianova), Submetidos a Ensaio de Relaxação com Cargas Uniaxiais. Campinas: Unicamp, 1988. 104p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Eng. Agrícola Universidade Estadual de Campinas, 1988.

ROSENFELD, D. SHMULEVICH, J., ROSENHOUSE, G. Three-dimensional Simulation of the acoustic response of Fruit for Firmness Sorting. Transaction of ASAE, St. Joseph, MI, vol. 35(4) 1267-1274, 1992.

RUMSEY, T. R., R. B. FRIDLEY, Analysis of Viscoelastic Contact Stresses in Element Agricultural Products Using a Finite Element Method. ASAE, 1974. Paper n. 74-3513.

SAS INSTITUTE SAS/STAT. SAS/REG SOFTWARE: Statistical Analysis System. Usage and Reference Version 6 Cary, 1990. 501p.

SHAHABASI, Y. Experimental and Numerical Techniques Related to be Maximum Allowable Deph. Of Apples in a Bulk Storage. 131p. Dissertação (Doutorado), Michigan State University, 1979.

SHERIF, S. M. The Quasi-Static Contact Problem for Nearly-Incompressive Agricultural Products. Tese (Doutorado). E. Leasing, MI: Michigan State University, 1976.

SHERIF, S. M., SEGERLING, L. J., FRAME, T. S. Am Equation for the Modulus of Elasticity of Radially Compressed Cylinder. Trans. ASAE.

SHIGLEY, J. E. Elementos de Máquinas. Tradução por Edival Ponciano de Carvalho. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos, 1984. V.1, 347p. Traduzido de Mechanical Engineering Design.

SHMULEVITH, I., GALILI N., CARMY, Y. Determinations of Avocado Maturity by Near-infrared Spectrometry. In: International Symposium on Sensors in Horticulture, 3, Israel, 1997.

SNOBAR, B. A. Engineering Parameters Related to the Hardness of Carrots. E. Lansing, MI: Michigan State University, 1973. Tese (Doutorado). Agricultural Engineering Department, 1973.

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

THOMSON, W. T. Teoria da Vibração com Aplicações Rio de Janeiro, Editora Interciência, 1978 459 p.

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

VÉLEZ PASOS, C. A. Análise do Comportamento Mecânico de Laranjas à Granel Mediante Modelo de Elementos Finitos. Campinas: Unicamp, 1987. 89p. Dissertação (Mestrado em Eng. Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, 1987.

WANG, J. K., CHANG, H. S. Mechanical Properties of Papaya and Their Dependence on Maturity. St. Joseph, MI: ASAE, 1970, paper n. 69-389.

YAMAMOTO, H. IWAMOTO, M. HAGINUMA, S. Nondestructive Acoustic Impulse Response Method for Measuring Internal Quality of Apples and Watermelons. Journal of Japanese Society of Horticultural Science, v. 50, n. 2, p. 247-261.

YANG, W. H. The Contact Problem for Viscoelastic Bodies. Transactions ASME p. 395-401, 1266.

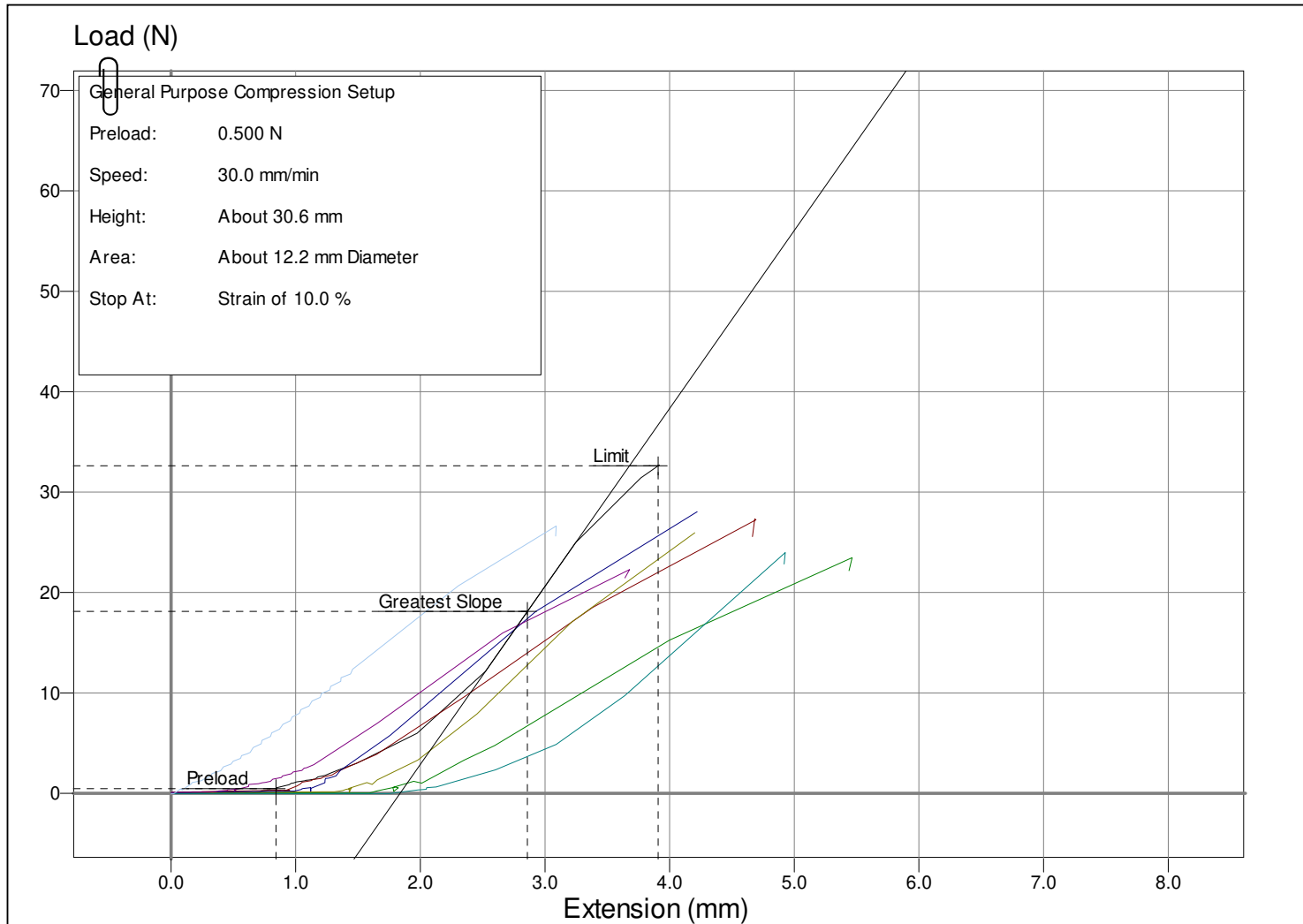
YONG, Y. C., BILANSKI, W. K. Modes of Vibration of Spheroids at the First and Second Resonant Frequencies. Transactions of ASAE. V. 22, n. 6, p. 1463-1466, 1979.

ZOERB G. C. Mechanical and Rheological Properties of Grain. E. Lansing, MI: Michigan State University, 1958. Tese (Doutorado). Agricultural Engineering Department, Michigan State University, 1958.

## **9 APÊNDICE**

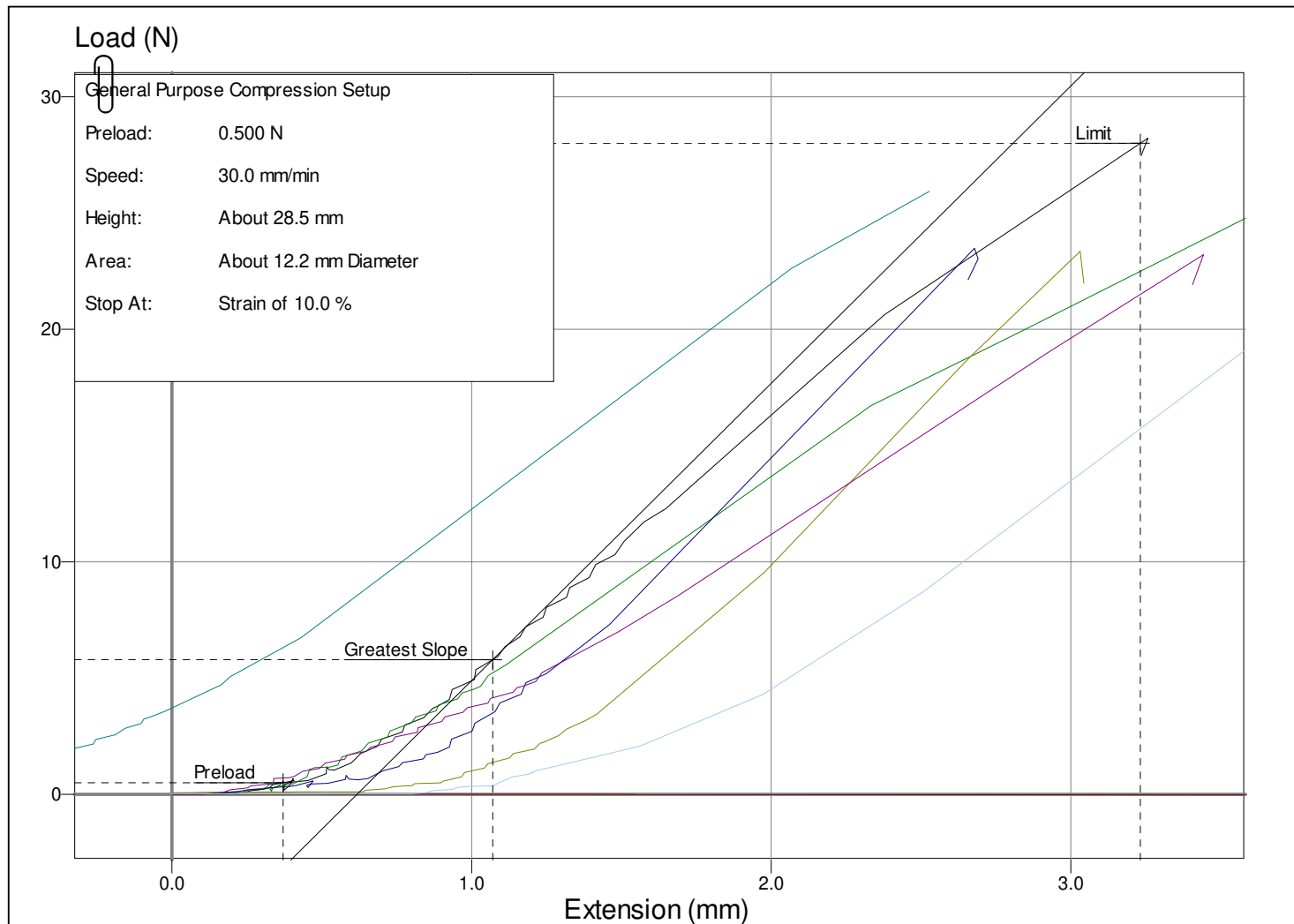
### **9.1 DADOS COLETADOS PELO TEXTURÔMETRO LLOYD TA 500 PARA O TESTE DE COMPRESSÃO NOS ENSAIOS “SINE DWELL” – DADOS ESTATÍSTICOS E O MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS AMOSTRAS.**

	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	37.250 mm	27.400 mm	31.661 mm	30.845 mm	10.18%	3.2221 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000023842 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.0000013487 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000044703 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	32.621 N	22.033 N	26.115 N	26.114 N	11.84%	3.0930 N	
Deflection at Limit	3.7329 mm	2.7567 mm	3.1743 mm	3.0924 mm	10.23%	0.32486 mm	
Stress at Limit	0.27768 MPa	0.18756 MPa	0.22231 MPa	0.22230 MPa	11.84%	0.026329 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.062	99.916	10.025	10.022	0.23%	0.023266	
Work to Limit	0.049900 J	0.027935 J	0.039343 J	0.040484 J	17.10%	0.0067266 J	
Maximum Load	32.709 N	22.290 N	26.300 N	26.288 N	11.63%	3.0590 N	
Deflection at Maximum Load	3.7512 mm	2.7839 mm	3.1969 mm	3.1089 mm	10.23%	0.32720 mm	
Stress at Maximum Load	0.27844 MPa	0.18974 MPa	0.22387 MPa	0.22377 MPa	11.63%	0.026040 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.160	10.036	10.097	10.086	0.46%	0.046013	
Work to Maximum Load	0.050393 J	0.028263 J	0.039913 J	0.040828 J	16.86%	0.0067298 J	
Stiffness	17724.0 N/m	7487.4 N/m	10956.0 N/m	10808.0 N/m	26.73%	2928.9 N/m	
Young's Modulus	4.6138 MPa	2.3238 MPa	2.9090 MPa	2.7709 MPa	23.07%	0.67113 MPa	
Number of Rows that Passed	8						
Number of Rows that Failed	0						

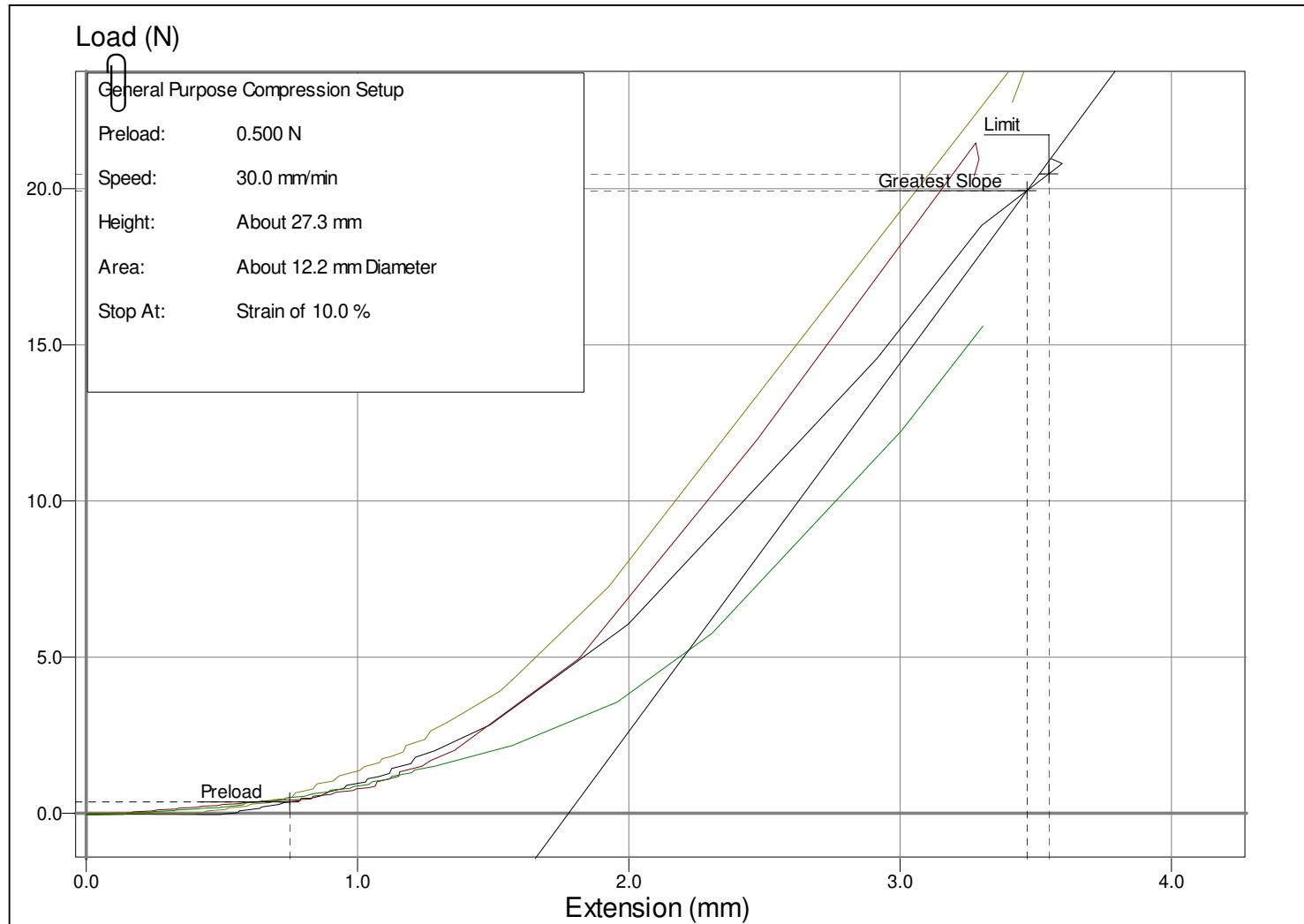




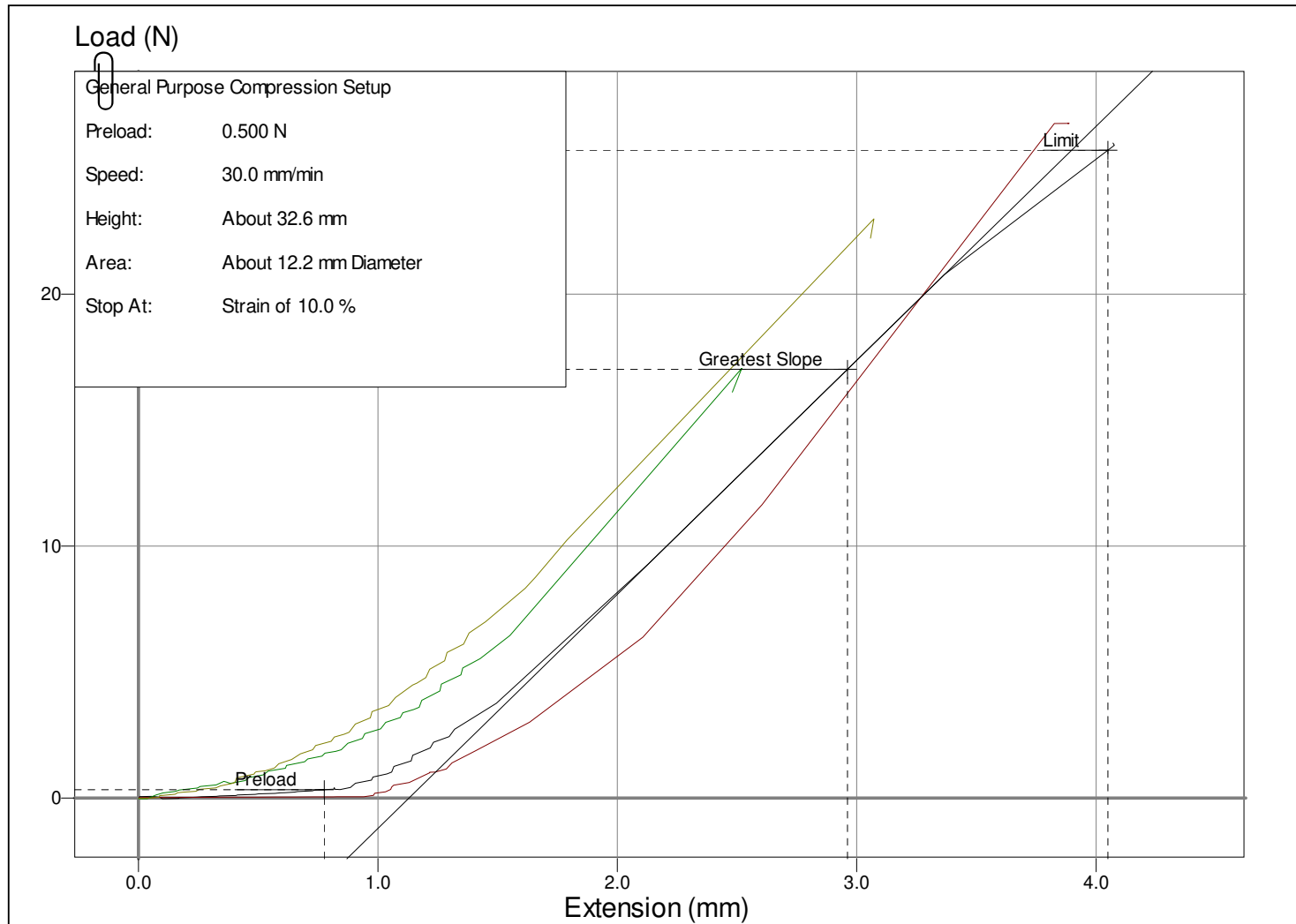
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	34.620 mm	22.100 mm	28.126 mm	29.250 mm	15.27%	4.2961 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000023842 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.0000013487 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000044703 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	28.008 N	22.831 N	24.973 N	24.434 N	8.42%	2.1037 N	
Deflection at Limit	3.4622 mm	2.2097 mm	2.8175 mm	2.9361 mm	15.23%	0.42901 mm	
Stress at Limit	0.23842 MPa	0.19435 MPa	0.21258 MPa	0.20799 MPa	8.42%	0.017908 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.040	99.987	10.018	10.014	0.17%	0.017103	
Work to Limit	0.047394 J	0.021172 J	0.032923 J	0.032892 J	25.42%	0.0083688 J	
Maximum Load	28.226 N	23.038 N	25.221 N	24.709 N	8.25%	2.0802 N	
Deflection at Maximum Load	3.4826 mm	2.2292 mm	2.8381 mm	2.9364 mm	15.08%	0.42799 mm	
Stress at Maximum Load	0.24027 MPa	0.19611 MPa	0.21469 MPa	0.21033 MPa	8.25%	0.017708 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.157	99.551	10.094	10.114	0.59%	0.059733	
Work to Maximum Load	0.047933 J	0.021774 J	0.033451 J	0.033762 J	25.32%	0.0084707 J	
Stiffness	13492.0 N/m	8471.7 N/m	11157.0 N/m	11192.0 N/m	17.49%	1951.3 N/m	
Young's Modulus	3.1029 MPa	2.2082 MPa	2.6087 MPa	2.5869 MPa	9.19%	0.23987 MPa	
Number of Rows that Passed	9						
Number of Rows that Failed	0						



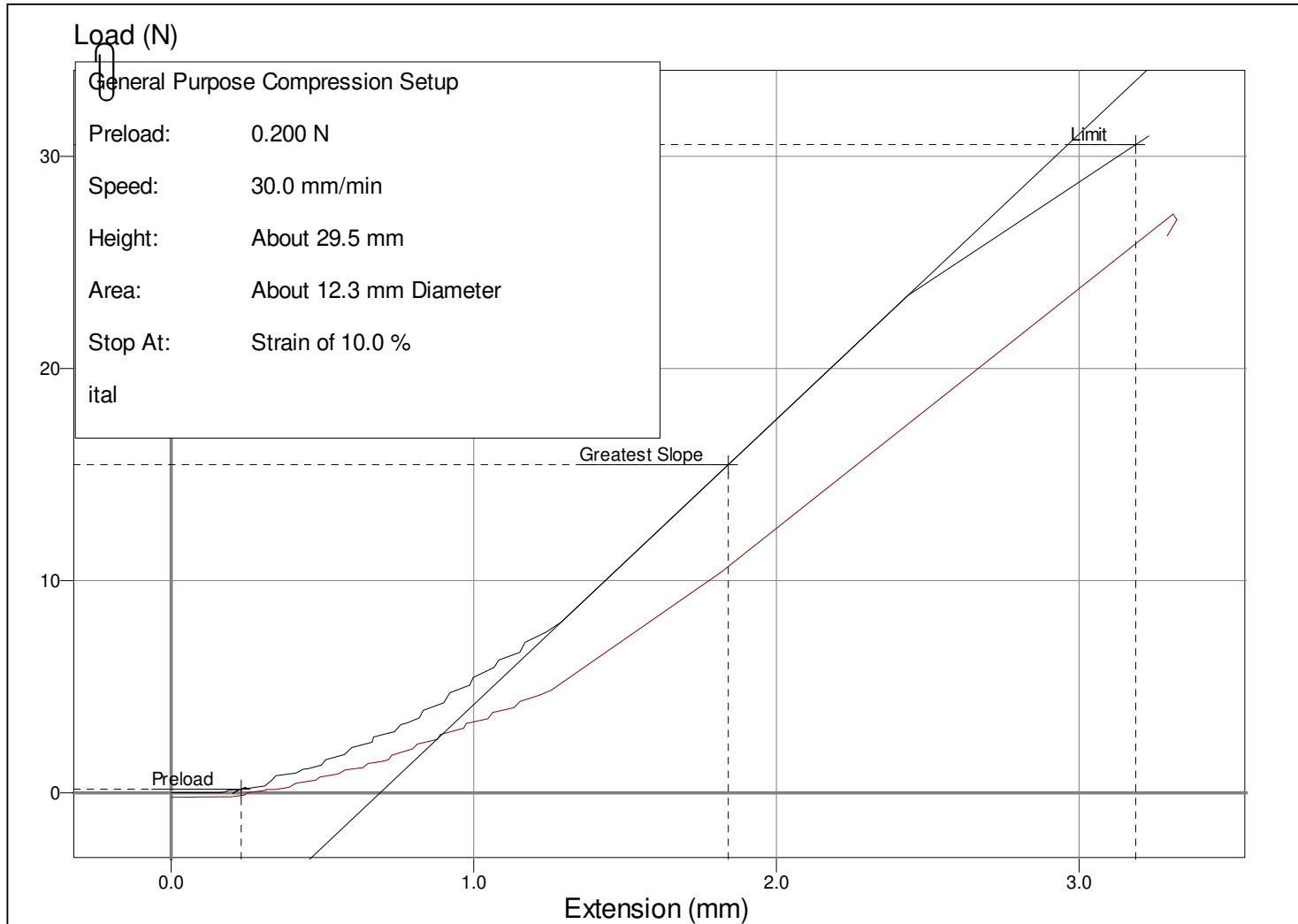
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	27.880 mm	25.690 mm	26.850 mm	26.915 mm	3.08%	0.82810 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	23.885 N	15.155 N	20.196 N	20.873 N	15.71%	3.1725 N	
Deflection at Limit	2.7981 mm	2.5774 mm	2.6916 mm	2.6954 mm	3.06%	0.082392 mm	
Stress at Limit	0.20332 MPa	0.12900 MPa	0.17192 MPa	0.17768 MPa	15.71%	0.027006 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.036	10.002	10.025	10.030	0.13%	0.013379	
Work to Limit	0.026989 J	0.013688 J	0.021422 J	0.022505 J	23.13%	0.0049546 J	
Maximum Load	24.246 N	15.600 N	20.570 N	21.218 N	15.21%	3.1294 N	
Deflection at Maximum Load	2.8050 mm	2.5941 mm	2.7155 mm	2.7315 mm	2.94%	0.079811 mm	
Stress at Maximum Load	0.20639 MPa	0.13280 MPa	0.17511 MPa	0.18062 MPa	15.21%	0.026639 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.178	10.061	10.114	10.109	0.42%	0.042621	
Work to Maximum Load	0.027764 J	0.014302 J	0.021891 J	0.022749 J	22.60%	0.0049473 J	
Stiffness	11798.0 N/m	11153.0 N/m	11484.0 N/m	11493.0 N/m	2.72%	312.40 N/m	
Young's Modulus	2.7999 MPa	2.5168 MPa	2.6247 MPa	2.5911 MPa	4.04%	0.10593 MPa	
Number of Rows that Passed	4						
Number of Rows that Failed	0						



	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	32.640 mm	21.930 mm	27.430 mm	27.575 mm	13.84%	3.7955 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	26.777 N	16.592 N	22.962 N	24.240 N	17.25%	3.9599 N	
Deflection at Limit	3.2730 mm	2.1977 mm	2.7462 mm	2.7571 mm	13.87%	0.38093 mm	
Stress at Limit	0.22794 MPa	0.14124 MPa	0.19546 MPa	0.20634 MPa	17.25%	0.033709 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.028	99.969	10.011	10.011	0.13%	0.013274	
Work to Limit	0.039834 J	0.014150 J	0.028387 J	0.029781 J	33.01%	0.0093698 J	
Maximum Load	26.779 N	17.055 N	23.205 N	24.493 N	16.47%	3.8224 N	
Deflection at Maximum Load	3.2944 mm	2.2400 mm	2.7694 mm	2.7717 mm	13.47%	0.37312 mm	
Stress at Maximum Load	0.22796 MPa	0.14518 MPa	0.19753 MPa	0.20850 MPa	16.47%	0.032538 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.214	10.022	10.103	10.087	0.69%	0.069797	
Work to Maximum Load	0.040384 J	0.014862 J	0.028876 J	0.030129 J	32.11%	0.0092726 J	
Stiffness	12391.0 N/m	9293.0 N/m	10871.0 N/m	10900.0 N/m	10.08%	1096.2 N/m	
Young's Modulus	2.9407 MPa	2.0440 MPa	2.5214 MPa	2.5504 MPa	12.66%	0.31915 MPa	
Number of Rows that Passed	4						
Number of Rows that Failed	0						

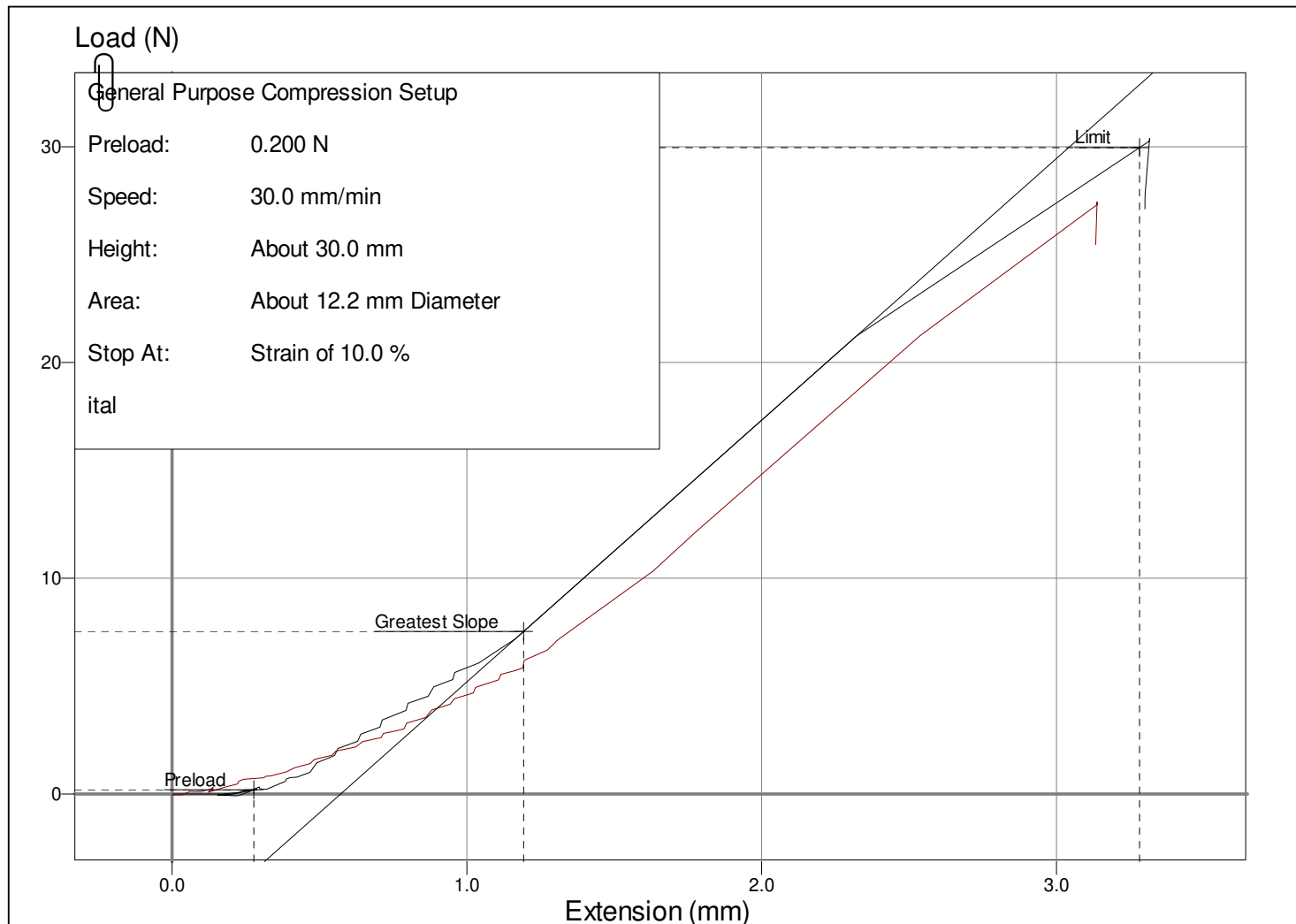


	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	29.920 mm	29.520 mm	29.720 mm	29.720 mm	0.67%	0.20000 mm	
Diameter	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	30.555 N	27.041 N	28.798 N	28.798 N	6.10%	1.7571 N	
Deflection at Limit	2.9969 mm	2.9554 mm	2.9761 mm	2.9761 mm	0.70%	0.020760 mm	
Stress at Limit	0.25883 MPa	0.22906 MPa	0.24395 MPa	0.24395 MPa	6.10%	0.014884 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.011	10.014	10.014	0.02%	0.0024635	
Work to Limit	0.042087 J	0.033917 J	0.038002 J	0.038002 J	10.75%	0.0040848 J	
Maximum Load	30.964 N	27.276 N	29.120 N	29.120 N	6.33%	1.8437 N	
Deflection at Maximum Load	3.0177 mm	2.9986 mm	3.0081 mm	3.0081 mm	0.32%	0.0095612 mm	
Stress at Maximum Load	0.26229 MPa	0.23106 MPa	0.24667 MPa	0.24667 MPa	6.33%	0.015617 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.158	10.086	10.122	10.122	0.36%	0.035944	
Work to Maximum Load	0.043416 J	0.034483 J	0.038949 J	0.038949 J	11.47%	0.0044667 J	
Stiffness	13445.0 N/m	11300.0 N/m	12373.0 N/m	12373.0 N/m	8.67%	1072.4 N/m	
Young's Modulus	3.3620 MPa	2.8640 MPa	3.1130 MPa	3.1130 MPa	8.00%	0.24902 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						

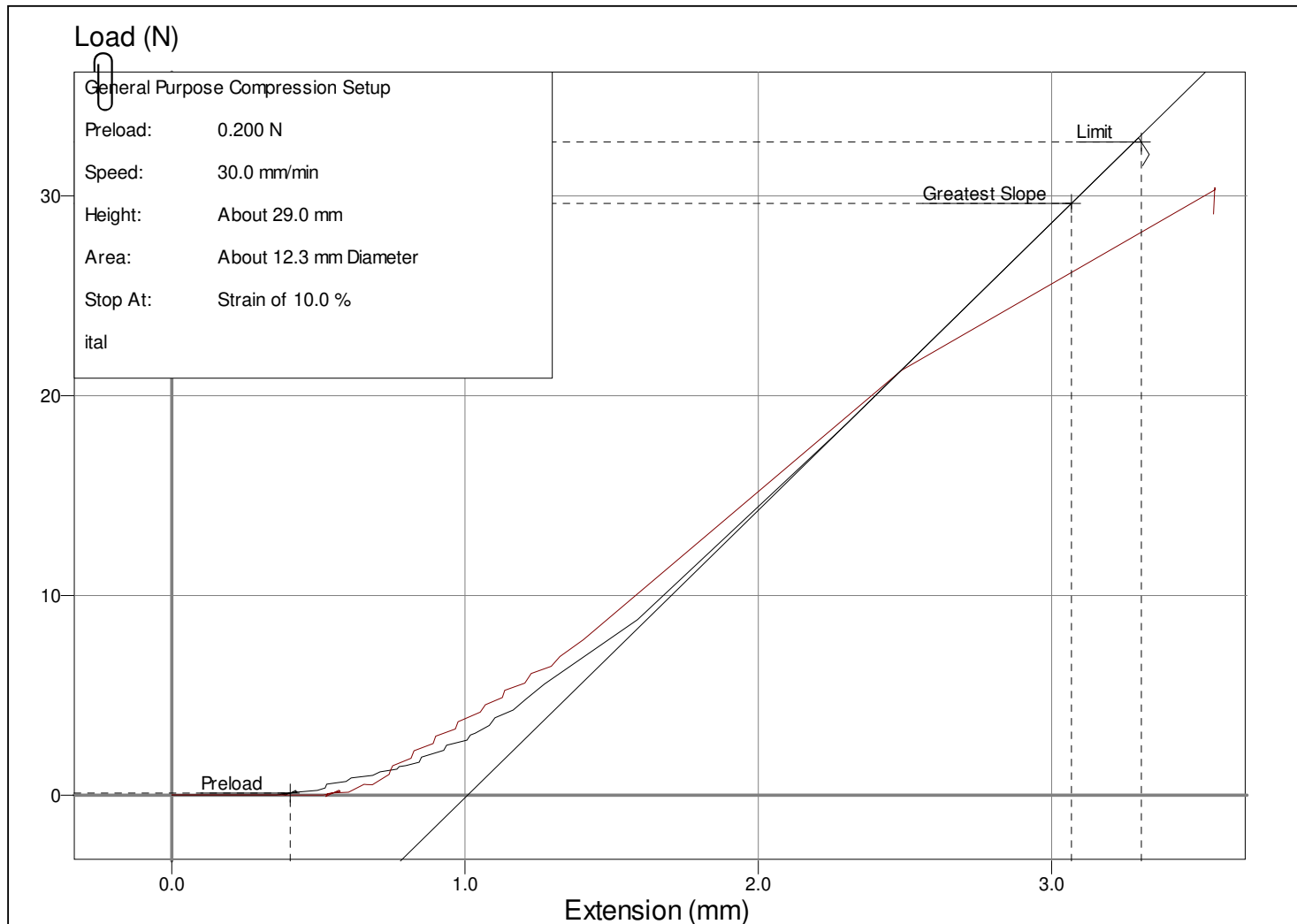




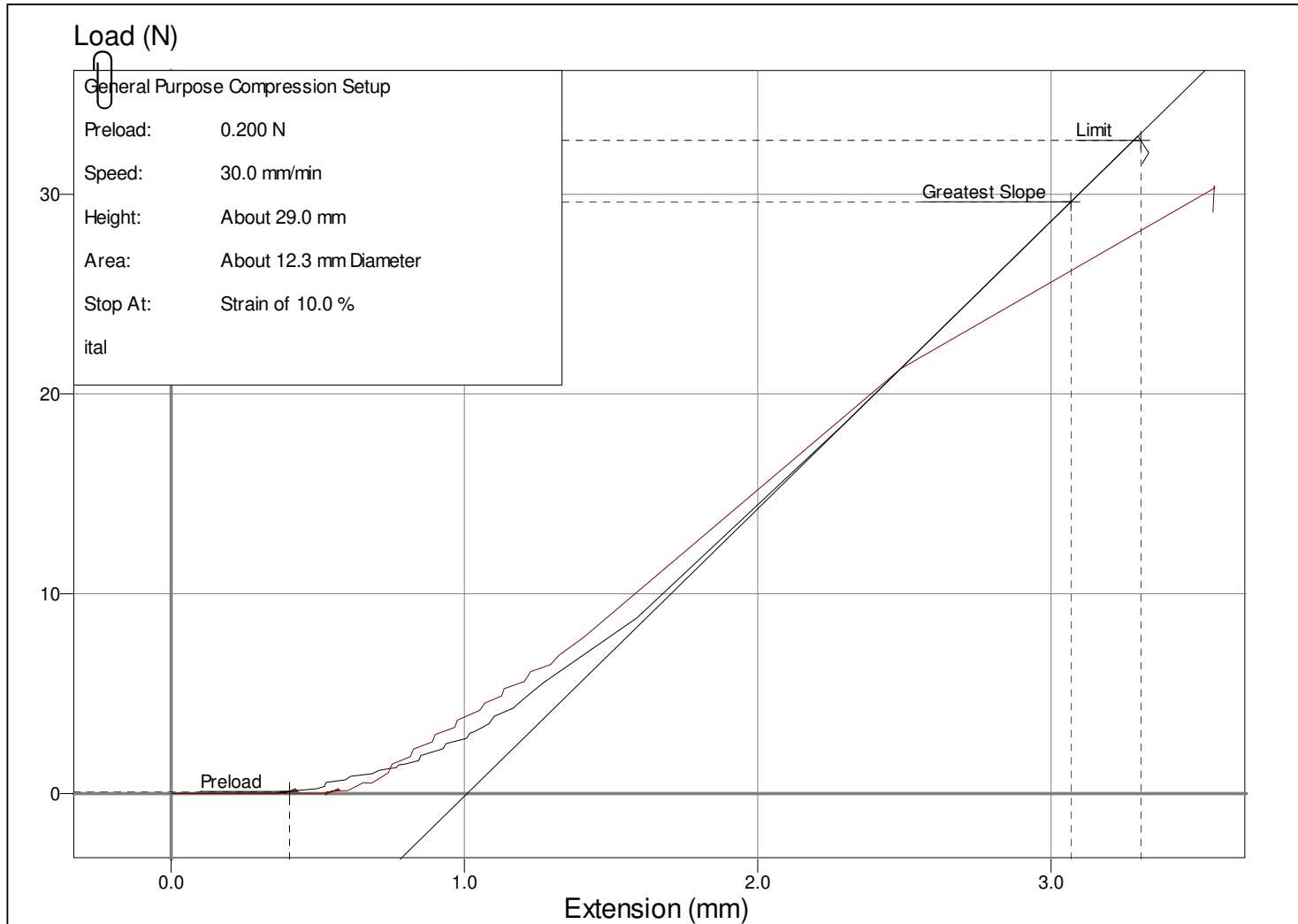
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	0.00%	0.00000 mm	
Diameter	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	29.964 N	27.169 N	28.566 N	28.566 N	4.89%	1.3970 N	
Deflection at Limit	3.0048 mm	3.0046 mm	3.0047 mm	3.0047 mm	0.00%	0.00012097 mm	
Stress at Limit	0.25632 MPa	0.23242 MPa	0.24437 MPa	0.24437 MPa	4.89%	0.011951 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.015	10.016	10.016	0.00%	0.00040323	
Work to Limit	0.044056 J	0.034928 J	0.039492 J	0.039492 J	11.56%	0.0045639 J	
Maximum Load	30.389 N	27.449 N	28.919 N	28.919 N	5.08%	1.4702 N	
Deflection at Maximum Load	3.0384 mm	3.0196 mm	3.0290 mm	3.0290 mm	0.31%	0.0094329 mm	
Stress at Maximum Load	0.25996 MPa	0.23481 MPa	0.24738 MPa	0.24738 MPa	5.08%	0.012576 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.128	10.065	10.097	10.097	0.31%	0.031443	
Work to Maximum Load	0.045076 J	0.035330 J	0.040203 J	0.040203 J	12.12%	0.0048729 J	
Stiffness	12401.0 N/m	12132.0 N/m	12266.0 N/m	12266.0 N/m	1.10%	134.54 N/m	
Young's Modulus	3.1825 MPa	3.1134 MPa	3.1479 MPa	3.1479 MPa	1.10%	0.034528 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						



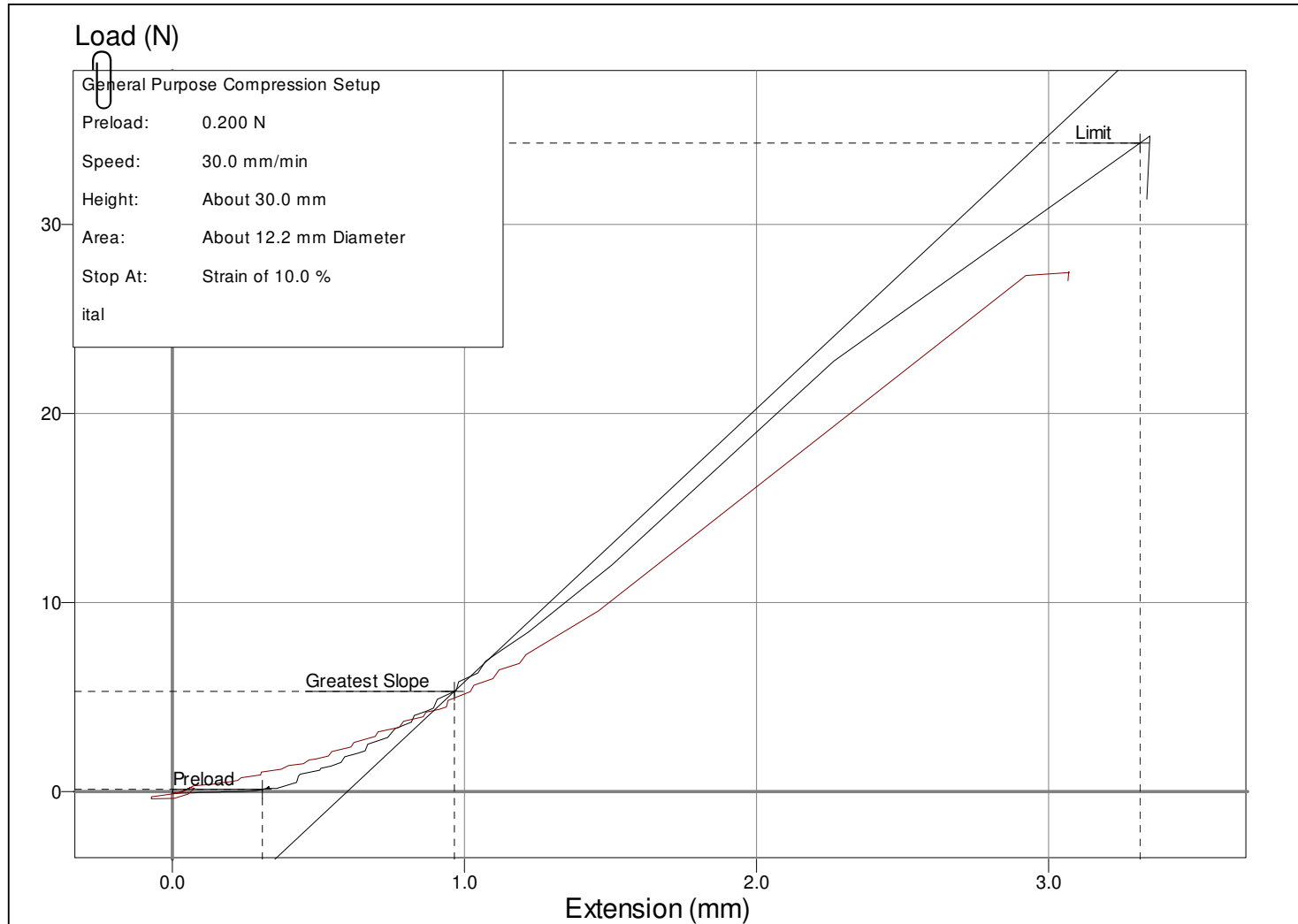
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	29.000 mm	29.500 mm	29.500 mm	1.69%	0.50000 mm	
Diameter	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	32.695 N	30.164 N	31.429 N	31.429 N	4.03%	1.2656 N	
Deflection at Limit	3.0047 mm	2.9021 mm	2.9534 mm	2.9534 mm	1.74%	0.051277 mm	
Stress at Limit	0.27695 MPa	0.25551 MPa	0.26623 MPa	0.26623 MPa	4.03%	0.010720 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.007	10.011	10.011	0.04%	0.0041335	
Work to Limit	0.045868 J	0.039816 J	0.042842 J	0.042842 J	7.06%	0.0030261 J	
Maximum Load	32.914 N	30.421 N	31.668 N	31.668 N	3.94%	1.2466 N	
Deflection at Maximum Load	3.0206 mm	2.8926 mm	2.9566 mm	2.9566 mm	2.16%	0.063986 mm	
Stress at Maximum Load	0.27881 MPa	0.25769 MPa	0.26825 MPa	0.26825 MPa	3.94%	0.010560 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.069	99.745	10.022	10.022	0.47%	0.047046	
Work to Maximum Load	0.046348 J	0.039503 J	0.042926 J	0.042926 J	7.97%	0.0034225 J	
Stiffness	14388.0 N/m	12435.0 N/m	13411.0 N/m	13411.0 N/m	7.28%	976.34 N/m	
Young's Modulus	3.5344 MPa	3.1601 MPa	3.3472 MPa	3.3472 MPa	5.59%	0.18718 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						



	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	29.000 mm	29.500 mm	29.500 mm	1.69%	0.50000 mm	
Diameter	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	32.695 N	30.164 N	31.429 N	31.429 N	4.03%	1.2656 N	
Deflection at Limit	3.0047 mm	2.9021 mm	2.9534 mm	2.9534 mm	1.74%	0.051277 mm	
Stress at Limit	0.27695 MPa	0.25551 MPa	0.26623 MPa	0.26623 MPa	4.03%	0.010720 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.007	10.011	10.011	0.04%	0.0041335	
Work to Limit	0.045868 J	0.039816 J	0.042842 J	0.042842 J	7.06%	0.0030261 J	
Maximum Load	32.914 N	30.421 N	31.668 N	31.668 N	3.94%	1.2466 N	
Deflection at Maximum Load	3.0206 mm	2.8926 mm	2.9566 mm	2.9566 mm	2.16%	0.063986 mm	
Stress at Maximum Load	0.27881 MPa	0.25769 MPa	0.26825 MPa	0.26825 MPa	3.94%	0.010560 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.069	99.745	10.022	10.022	0.47%	0.047046	
Work to Maximum Load	0.046348 J	0.039503 J	0.042926 J	0.042926 J	7.97%	0.0034225 J	
Stiffness	14388.0 N/m	12435.0 N/m	13411.0 N/m	13411.0 N/m	7.28%	976.34 N/m	
Young's Modulus	3.5344 MPa	3.1601 MPa	3.3472 MPa	3.3472 MPa	5.59%	0.18718 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						

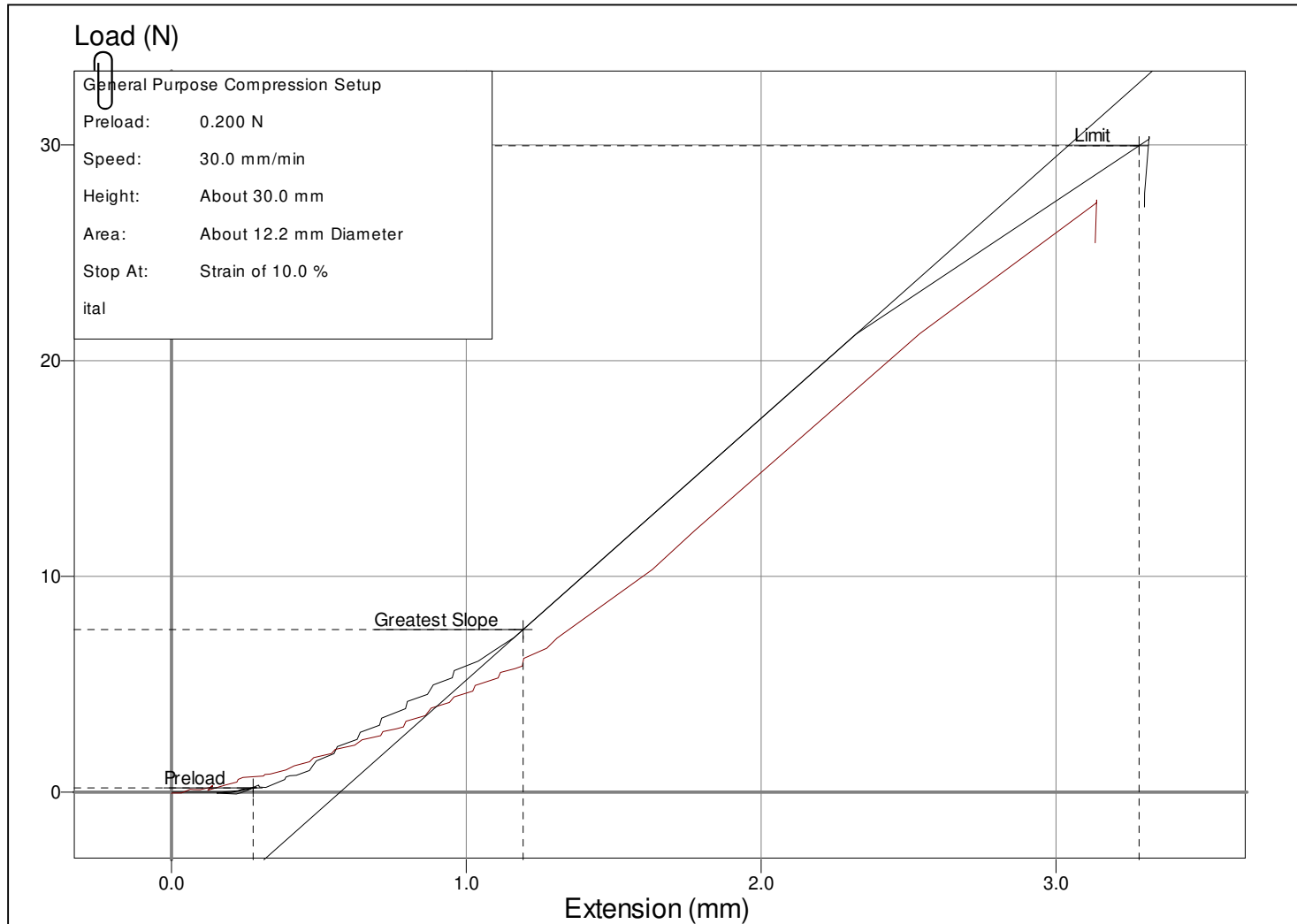


	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	0.00%	0.00000 mm	
Diameter	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	34.304 N	27.445 N	30.875 N	30.875 N	11.11%	3.4296 N	
Deflection at Limit	3.0049 mm	3.0000 mm	3.0025 mm	3.0025 mm	0.08%	0.0024699 mm	
Stress at Limit	0.29345 MPa	0.23478 MPa	0.26411 MPa	0.26411 MPa	11.11%	0.029338 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.000	10.008	10.008	0.08%	0.0082331	
Work to Limit	0.049341 J	0.036279 J	0.042810 J	0.042810 J	15.26%	0.0065309 J	
Maximum Load	34.674 N	27.495 N	31.084 N	31.084 N	11.55%	3.5894 N	
Deflection at Maximum Load	3.0385 mm	3.0066 mm	3.0226 mm	3.0226 mm	0.53%	0.015970 mm	
Stress at Maximum Load	0.29661 MPa	0.23520 MPa	0.26591 MPa	0.26591 MPa	11.55%	0.030705 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.128	10.022	10.075	10.075	0.53%	0.053233	
Work to Maximum Load	0.050500 J	0.036461 J	0.043480 J	0.043480 J	16.14%	0.0070198 J	
Stiffness	14457.0 N/m	12124.0 N/m	13291.0 N/m	13291.0 N/m	8.78%	1166.8 N/m	
Young's Modulus	3.7102 MPa	3.1114 MPa	3.4108 MPa	3.4108 MPa	8.78%	0.29944 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						

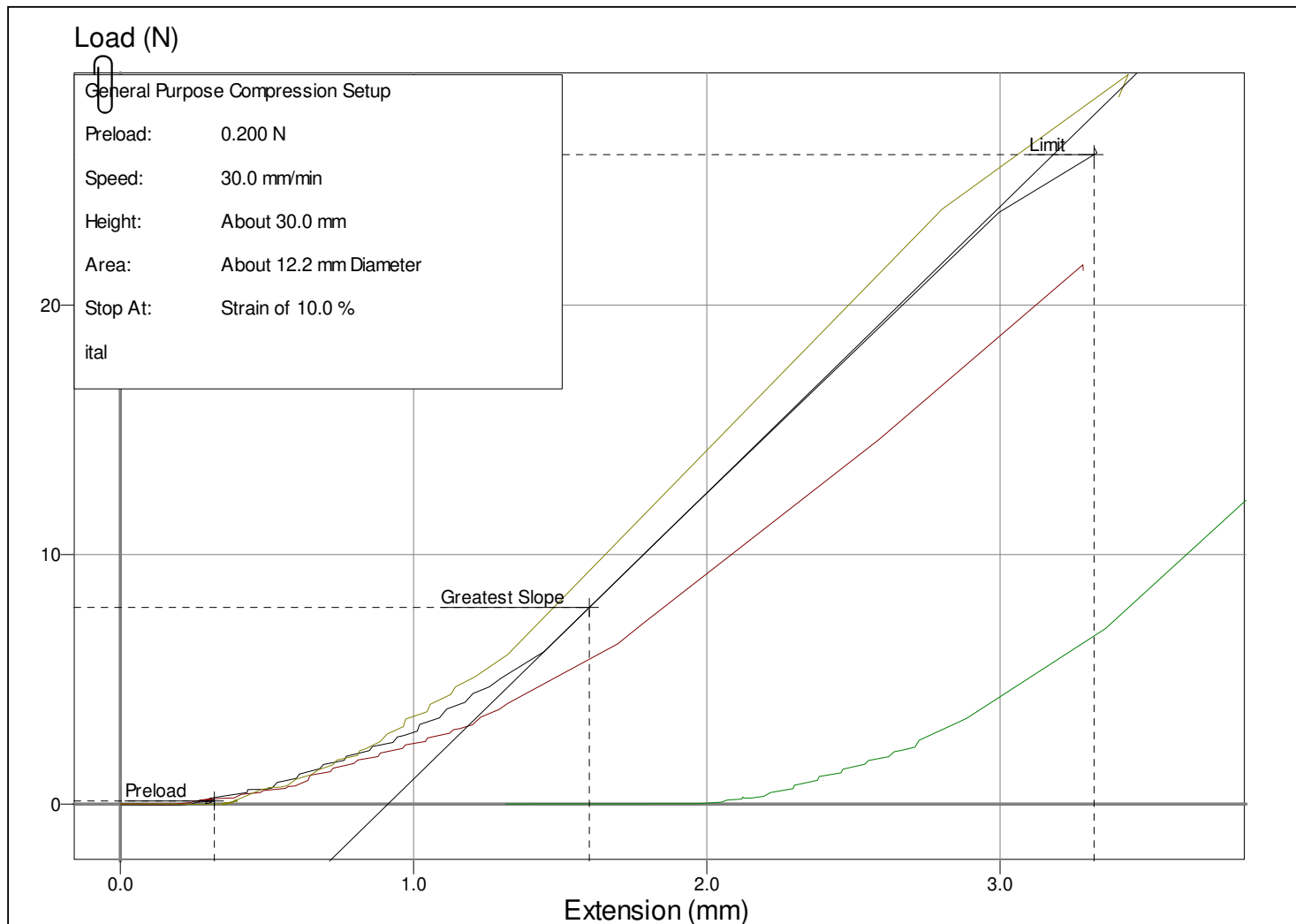




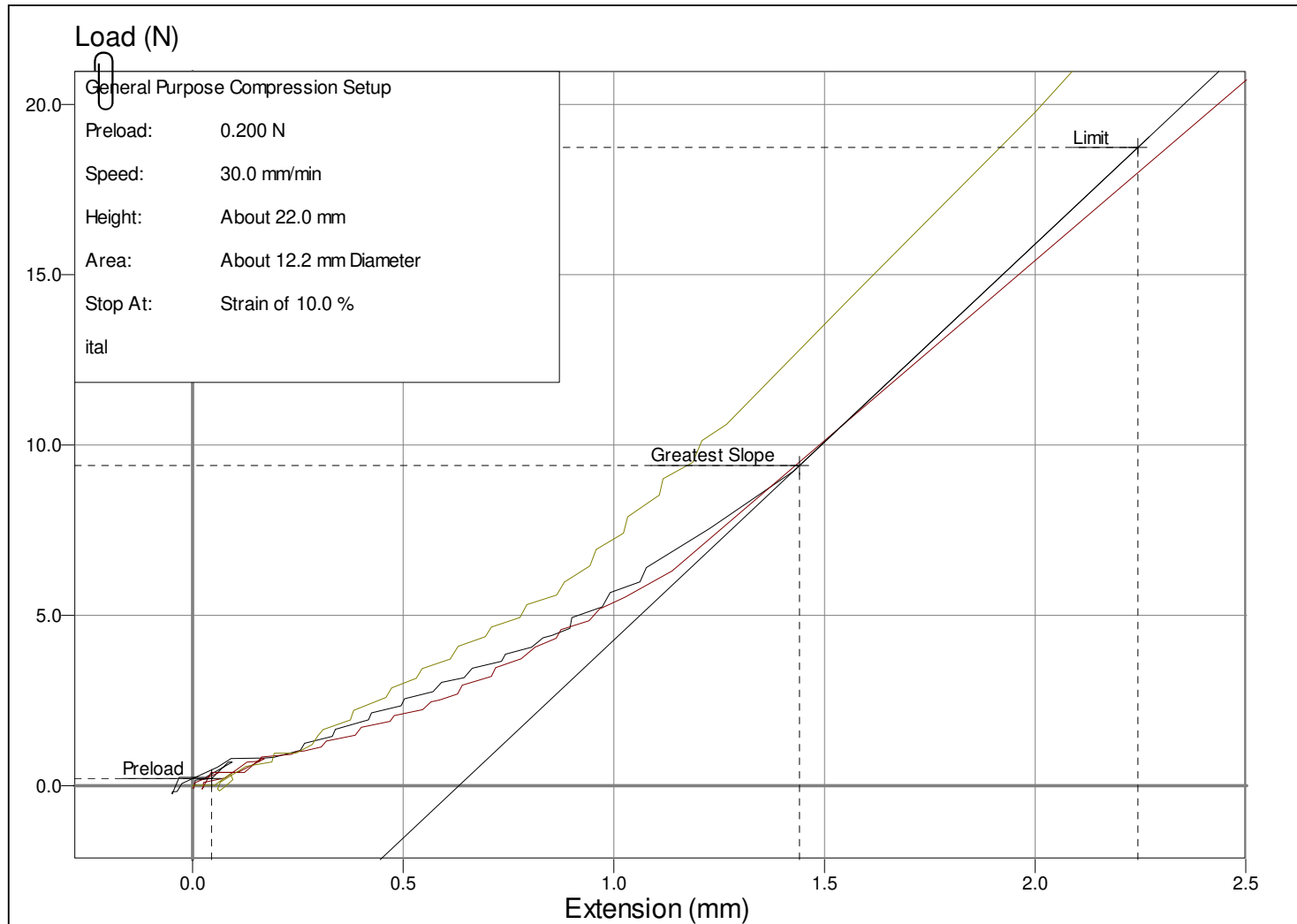
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	0.00%	0.00000 mm	
Diameter	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	29.964 N	27.169 N	28.566 N	28.566 N	4.89%	1.3970 N	
Deflection at Limit	3.0048 mm	3.0046 mm	3.0047 mm	3.0047 mm	0.00%	0.00012097 mm	
Stress at Limit	0.25632 MPa	0.23242 MPa	0.24437 MPa	0.24437 MPa	4.89%	0.011951 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.015	10.016	10.016	0.00%	0.00040323	
Work to Limit	0.044056 J	0.034928 J	0.039492 J	0.039492 J	11.56%	0.0045639 J	
Maximum Load	30.389 N	27.449 N	28.919 N	28.919 N	5.08%	1.4702 N	
Deflection at Maximum Load	3.0384 mm	3.0196 mm	3.0290 mm	3.0290 mm	0.31%	0.0094329 mm	
Stress at Maximum Load	0.25996 MPa	0.23481 MPa	0.24738 MPa	0.24738 MPa	5.08%	0.012576 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.128	10.065	10.097	10.097	0.31%	0.031443	
Work to Maximum Load	0.045076 J	0.035330 J	0.040203 J	0.040203 J	12.12%	0.0048729 J	
Stiffness	12401.0 N/m	12132.0 N/m	12266.0 N/m	12266.0 N/m	1.10%	134.54 N/m	
Young's Modulus	3.1825 MPa	3.1134 MPa	3.1479 MPa	3.1479 MPa	1.10%	0.034528 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						



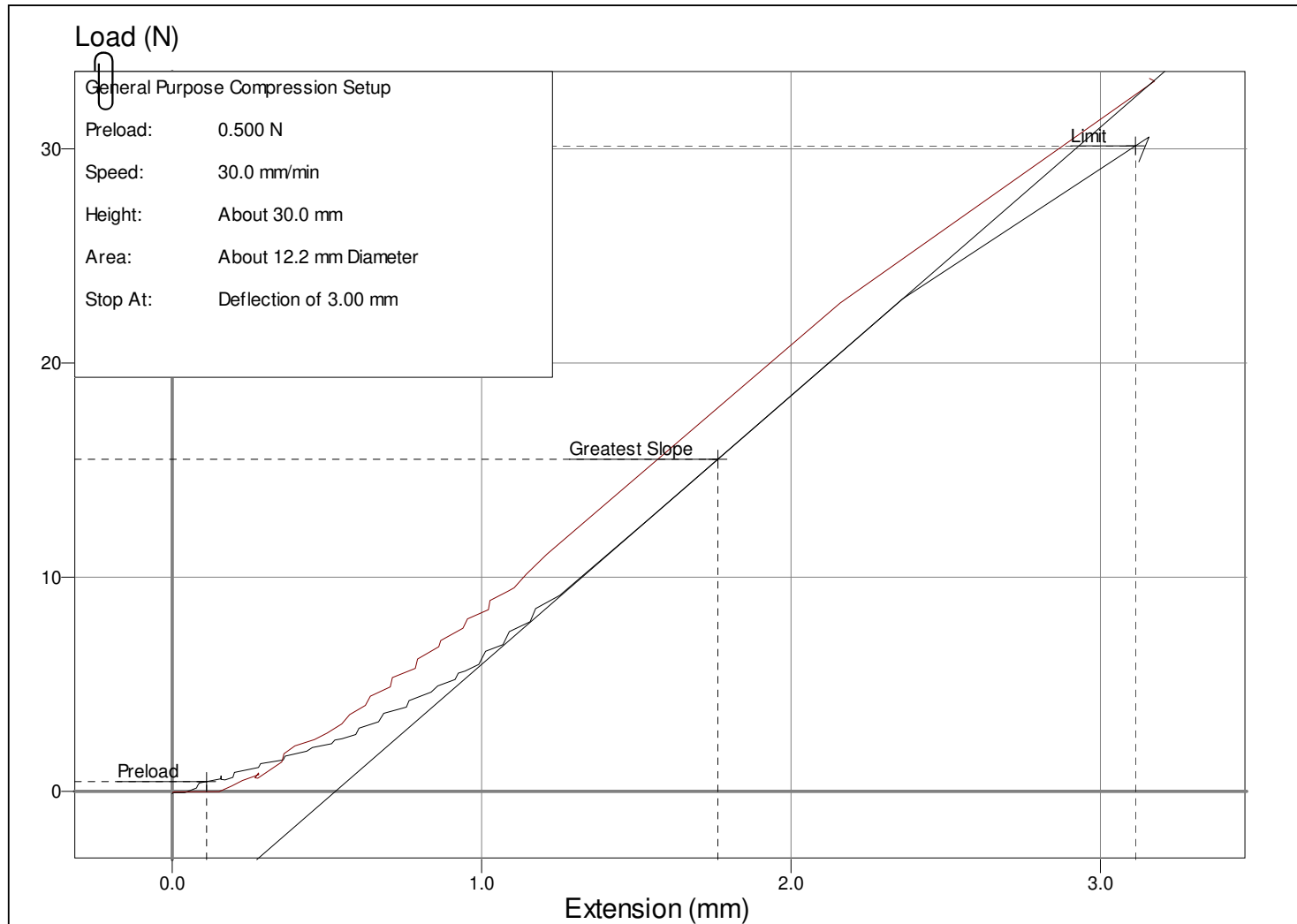
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	0.00%	0.00000 mm	
Diameter	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	28.909 N	21.615 N	25.460 N	25.659 N	10.21%	2.5994 N	
Deflection at Limit	3.0055 mm	3.0000 mm	3.0014 mm	3.0000 mm	0.08%	0.0023901 mm	
Stress at Limit	0.24730 MPa	0.18491 MPa	0.21780 MPa	0.21950 MPa	10.21%	0.022236 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.018	10.000	10.005	10.000	0.08%	0.0079669	
Work to Limit	0.040288 J	0.025734 J	0.033217 J	0.033422 J	15.60%	0.0051805 J	
Maximum Load	29.241 N	21.617 N	25.625 N	25.820 N	10.62%	2.7212 N	
Deflection at Maximum Load	3.0391 mm	3.0026 mm	3.0142 mm	3.0076 mm	0.48%	0.014566 mm	
Stress at Maximum Load	0.25014 MPa	0.18492 MPa	0.21920 MPa	0.22088 MPa	10.62%	0.023279 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.130	10.009	10.047	10.025	0.48%	0.048553	
Work to Maximum Load	0.041424 J	0.025738 J	0.033578 J	0.033575 J	16.58%	0.0055685 J	
Stiffness	12045.0 N/m	10073.0 N/m	11084.0 N/m	11108.0 N/m	6.70%	742.94 N/m	
Young's Modulus	3.0911 MPa	2.5851 MPa	2.8444 MPa	2.8507 MPa	6.70%	0.19066 MPa	
Number of Rows that Passed	4						
Number of Rows that Failed	0						



	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	22.000 mm	24.000 mm	22.000 mm	14.43%	3.4641 mm	
Diameter	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	25.616 N	18.737 N	21.642 N	21.108 N	13.41%	2.9012 N	
Deflection at Limit	2.9910 mm	2.1981 mm	2.3973 mm	2.2001 mm	14.30%	0.34273 mm	
Stress at Limit	0.21913 MPa	0.16029 MPa	0.18514 MPa	0.18057 MPa	13.41%	0.024818 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.001	99.699	99.906	99.958	0.13%	0.012521	
Work to Limit	0.034533 J	0.014683 J	0.022111 J	0.019613 J	34.60%	0.0076500 J	
Maximum Load	25.830 N	19.045 N	22.071 N	21.704 N	12.77%	2.8190 N	
Deflection at Maximum Load	2.9996 mm	2.2246 mm	2.4271 mm	2.2422 mm	13.62%	0.33059 mm	
Stress at Maximum Load	0.22096 MPa	0.16292 MPa	0.18880 MPa	0.18567 MPa	12.77%	0.024115 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.209	99.986	10.124	10.143	0.79%	0.080104	
Work to Maximum Load	0.034753 J	0.015573 J	0.022737 J	0.020311 J	32.74%	0.0074434 J	
Stiffness	14621.0 N/m	10578.0 N/m	12614.0 N/m	12628.0 N/m	12.64%	1594.9 N/m	
Young's Modulus	2.7516 MPa	2.1884 MPa	2.5548 MPa	2.6397 MPa	8.72%	0.22284 MPa	
Number of Rows that Passed	4						
Number of Rows that Failed	0						

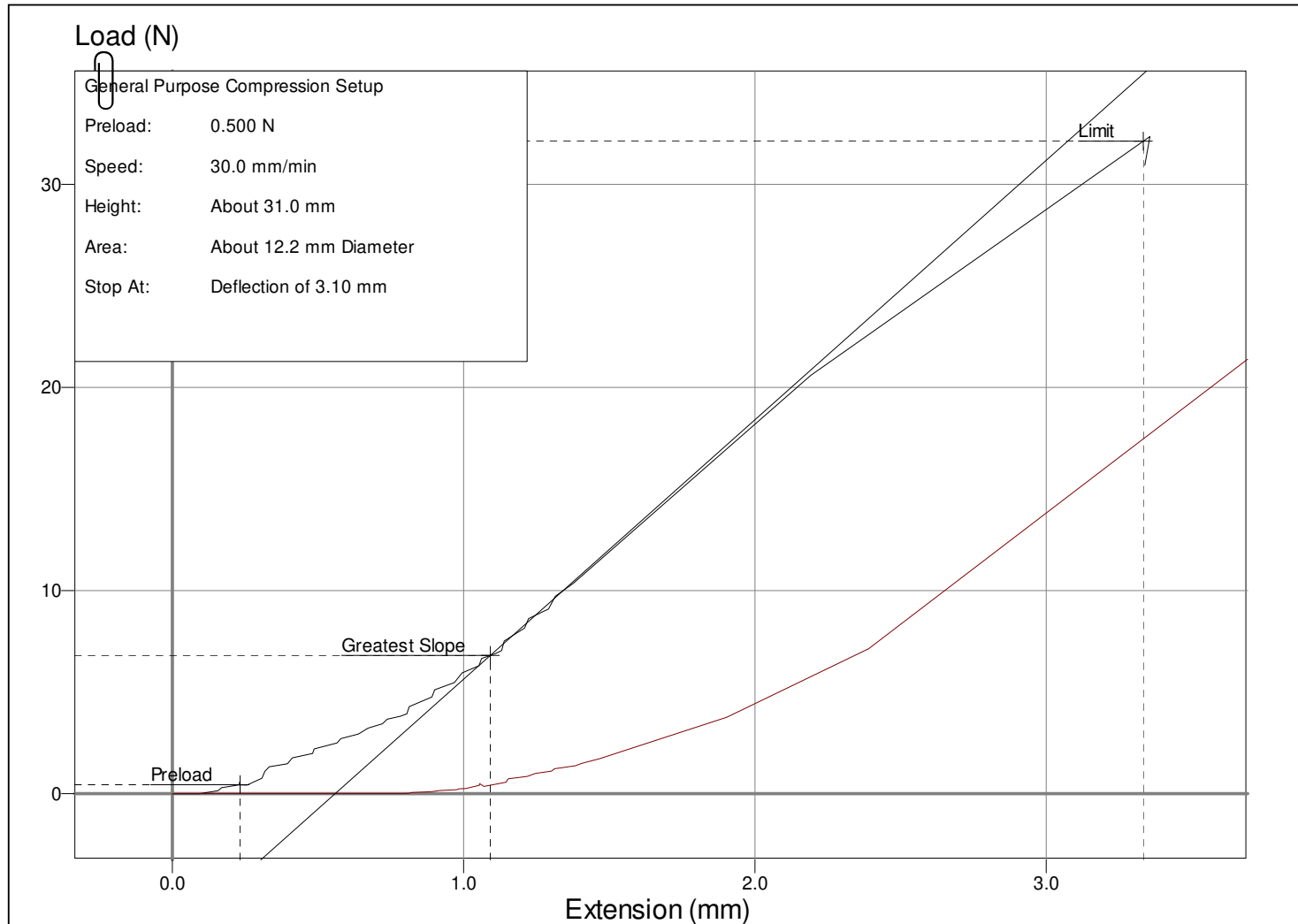


	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	29.000 mm	29.500 mm	29.500 mm	1.69%	0.50000 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	32.919 N	30.141 N	31.530 N	31.530 N	4.41%	1.3894 N	
Deflection at Limit	3.0020 mm	2.9056 mm	2.9538 mm	2.9538 mm	1.63%	0.048222 mm	
Stress at Limit	0.28023 MPa	0.25657 MPa	0.26840 MPa	0.26840 MPa	4.41%	0.011827 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.019	10.007	10.013	10.013	0.06%	0.0062484	
Work to Limit	0.048928 J	0.042258 J	0.045593 J	0.045593 J	7.31%	0.0033350 J	
Maximum Load	33.292 N	30.557 N	31.925 N	31.925 N	4.28%	1.3676 N	
Deflection at Maximum Load	3.0459 mm	2.9135 mm	2.9797 mm	2.9797 mm	2.22%	0.066181 mm	
Stress at Maximum Load	0.28340 MPa	0.26012 MPa	0.27176 MPa	0.27176 MPa	4.28%	0.011642 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.153	10.047	10.100	10.100	0.53%	0.053160	
Work to Maximum Load	0.049186 J	0.043588 J	0.046387 J	0.046387 J	6.03%	0.0027991 J	
Stiffness	13011.0 N/m	12545.0 N/m	12778.0 N/m	12778.0 N/m	1.82%	232.96 N/m	
Young's Modulus	3.2119 MPa	3.2036 MPa	3.2077 MPa	3.2077 MPa	0.13%	0.0041154 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						

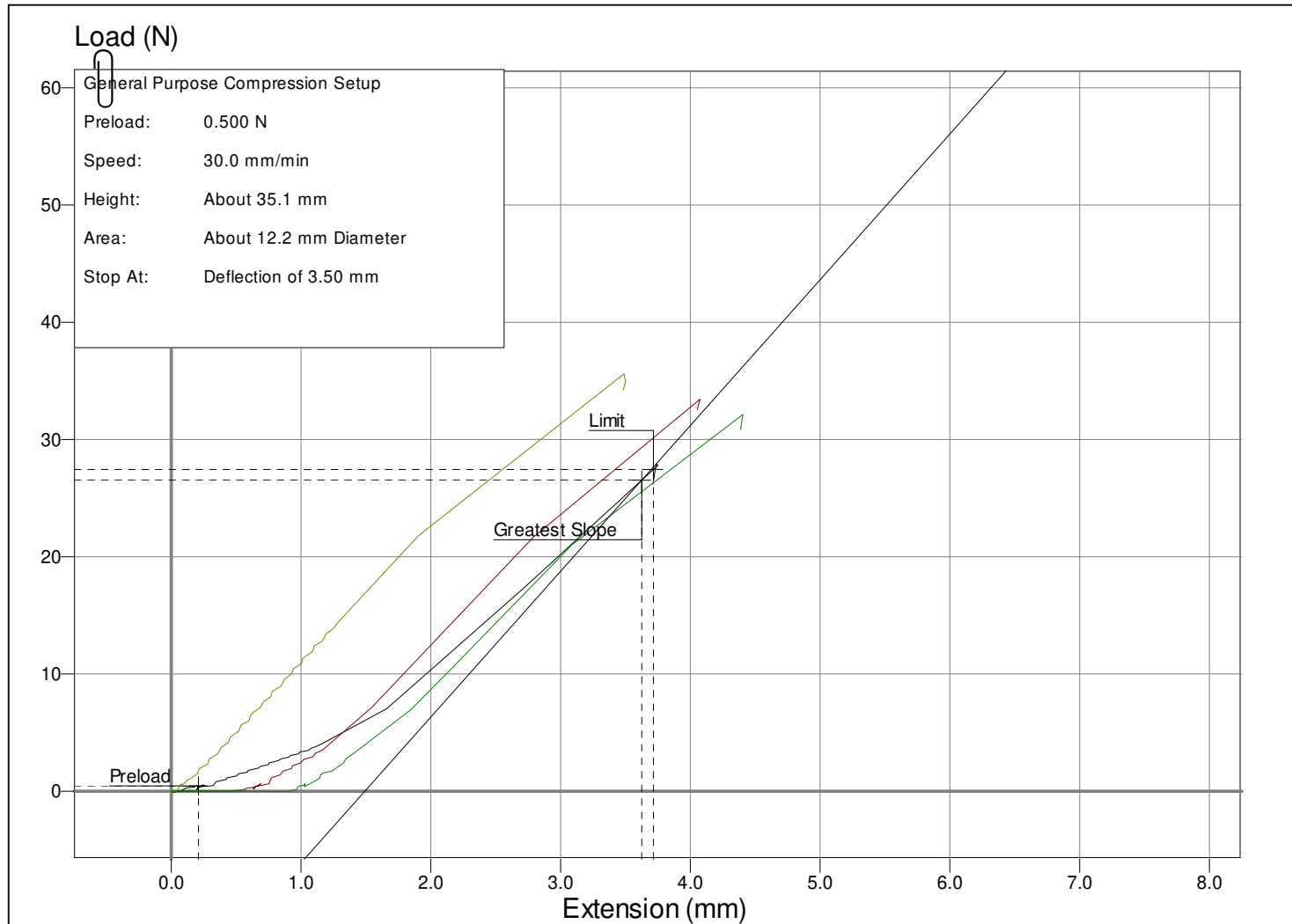




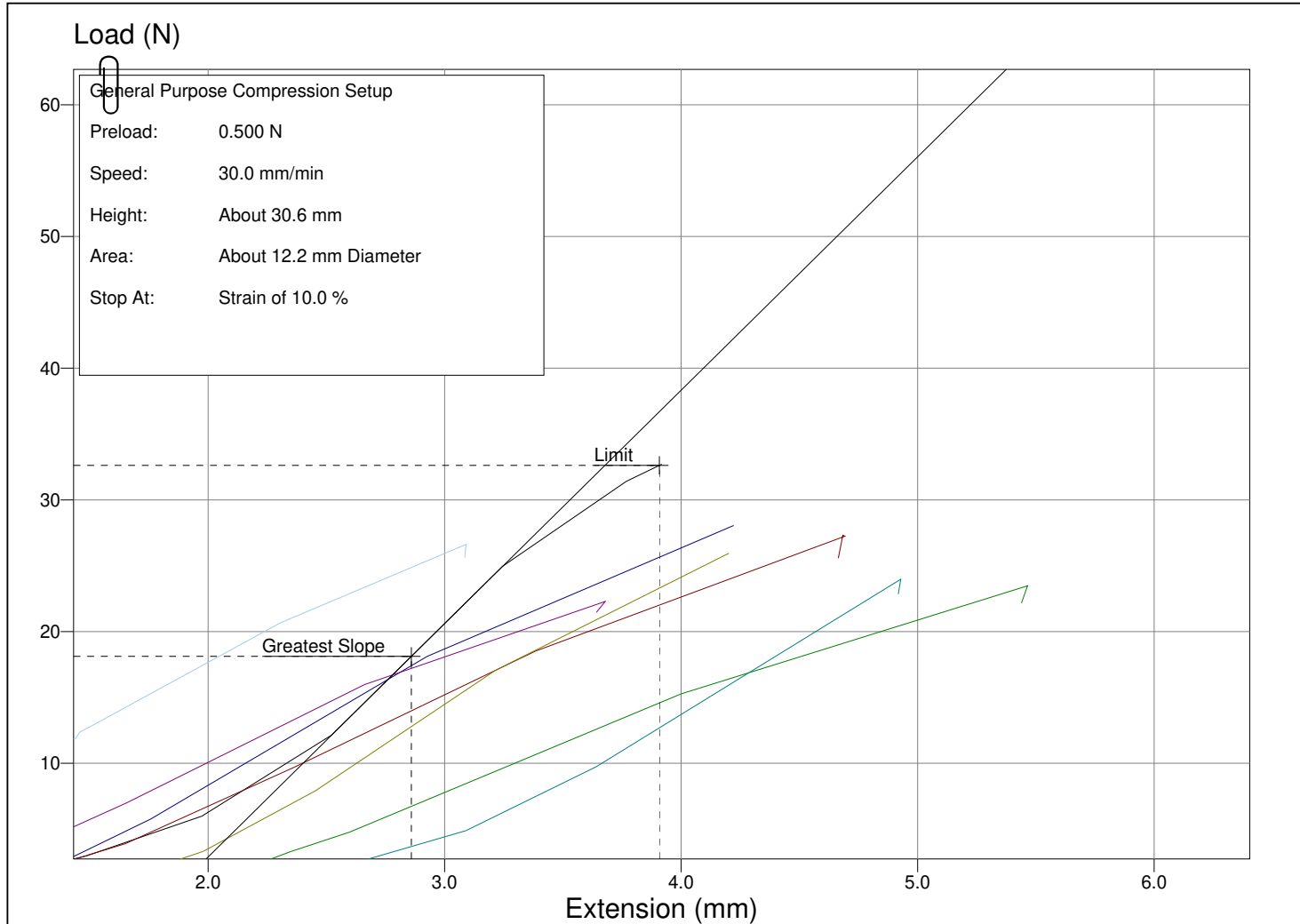
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	31.000 mm	30.000 mm	30.500 mm	30.500 mm	1.64%	0.50000 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	32.120 N	25.372 N	28.746 N	28.746 N	11.74%	3.3742 N	
Deflection at Limit	3.1000 mm	3.0000 mm	3.0500 mm	3.0500 mm	1.64%	0.050000 mm	
Stress at Limit	0.27342 MPa	0.21598 MPa	0.24470 MPa	0.24470 MPa	11.74%	0.028723 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.000	10.000	10.000	10.000	0.00%	0.00000	
Work to Limit	0.047980 J	0.031308 J	0.039644 J	0.039644 J	21.03%	0.0083360 J	
Maximum Load	32.353 N	25.601 N	28.977 N	28.977 N	11.65%	3.3759 N	
Deflection at Maximum Load	3.1230 mm	3.0209 mm	3.0720 mm	3.0720 mm	1.66%	0.051062 mm	
Stress at Maximum Load	0.27540 MPa	0.21793 MPa	0.24667 MPa	0.24667 MPa	11.65%	0.028737 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.074	10.070	10.072	10.072	0.02%	0.0023013	
Work to Maximum Load	0.048723 J	0.031841 J	0.040282 J	0.040282 J	20.95%	0.0084408 J	
Stiffness	12775.0 N/m	10962.0 N/m	11868.0 N/m	11868.0 N/m	7.64%	906.50 N/m	
Young's Modulus	3.3711 MPa	2.7993 MPa	3.0852 MPa	3.0852 MPa	9.27%	0.28587 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						



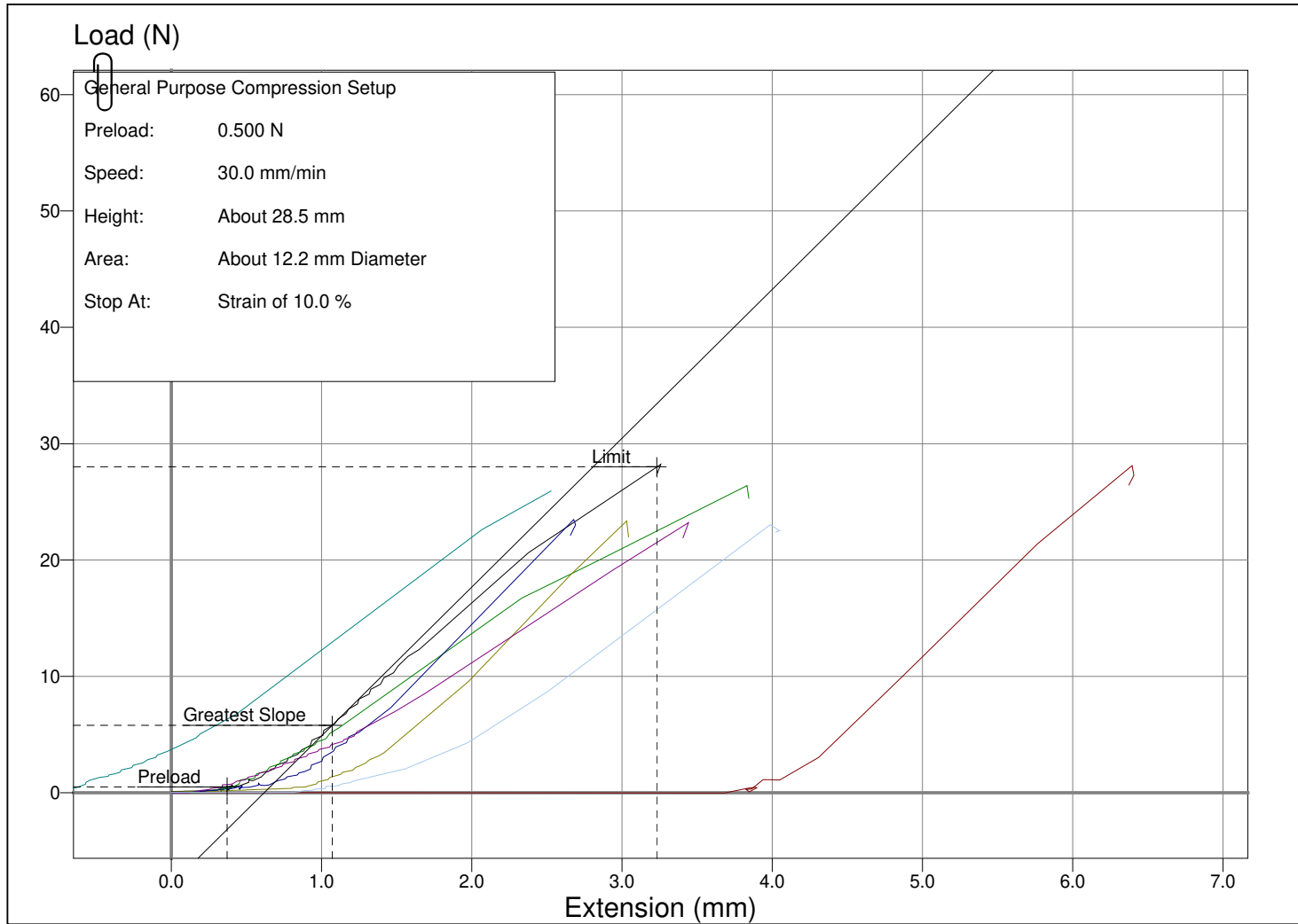
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	35.060 mm	33.000 mm	33.877 mm	33.725 mm	2.35%	0.79481 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	35.462 N	27.440 N	31.998 N	32.545 N	9.14%	2.9242 N	
Deflection at Limit	3.5056 mm	3.4000 mm	3.4264 mm	3.4000 mm	1.33%	0.045719 mm	
Stress at Limit	0.30187 MPa	0.23358 MPa	0.27238 MPa	0.27704 MPa	9.14%	0.024893 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.303	99.648	10.117	10.100	1.39%	0.14035	
Work to Limit	0.064829 J	0.039994 J	0.053674 J	0.054936 J	16.54%	0.0088788 J	
Maximum Load	35.600 N	27.917 N	32.268 N	32.778 N	8.68%	2.8013 N	
Deflection at Maximum Load	3.5271 mm	3.4159 mm	3.4490 mm	3.4265 mm	1.31%	0.045313 mm	
Stress at Maximum Load	0.30305 MPa	0.23764 MPa	0.27468 MPa	0.27902 MPa	8.68%	0.023846 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.386	10.040	10.184	10.154	1.40%	0.14229	
Work to Maximum Load	0.065393 J	0.040585 J	0.054395 J	0.055801 J	16.34%	0.0088905 J	
Stiffness	12805.0 N/m	11376.0 N/m	12073.0 N/m	12055.0 N/m	4.74%	572.07 N/m	
Young's Modulus	3.7110 MPa	3.1958 MPa	3.4827 MPa	3.5120 MPa	5.84%	0.20335 MPa	
Number of Rows that Passed	4						
Number of Rows that Failed	0						



	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	37.250 mm	27.400 mm	31.661 mm	30.845 mm	10.18%	3.2221 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000023842 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.0000013487 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000044703 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	32.621 N	22.033 N	26.115 N	26.114 N	11.84%	3.0930 N	
Deflection at Limit	3.7329 mm	2.7567 mm	3.1743 mm	3.0924 mm	10.23%	0.32486 mm	
Stress at Limit	0.27768 MPa	0.18756 MPa	0.22231 MPa	0.22230 MPa	11.84%	0.026329 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.062	99.916	10.025	10.022	0.23%	0.023266	
Work to Limit	0.049900 J	0.027935 J	0.039343 J	0.040484 J	17.10%	0.0067266 J	
Maximum Load	32.709 N	22.290 N	26.300 N	26.288 N	11.63%	3.0590 N	
Deflection at Maximum Load	3.7512 mm	2.7839 mm	3.1969 mm	3.1089 mm	10.23%	0.32720 mm	
Stress at Maximum Load	0.27844 MPa	0.18974 MPa	0.22387 MPa	0.22377 MPa	11.63%	0.026040 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.160	10.036	10.097	10.086	0.46%	0.046013	
Work to Maximum Load	0.050393 J	0.028263 J	0.039913 J	0.040828 J	16.86%	0.0067298 J	
Stiffness	17724.0 N/m	7487.4 N/m	10956.0 N/m	10808.0 N/m	26.73%	2928.9 N/m	
Young's Modulus	4.6138 MPa	2.3238 MPa	2.9090 MPa	2.7709 MPa	23.07%	0.67113 MPa	
Number of Rows that Passed	8						
Number of Rows that Failed	0						

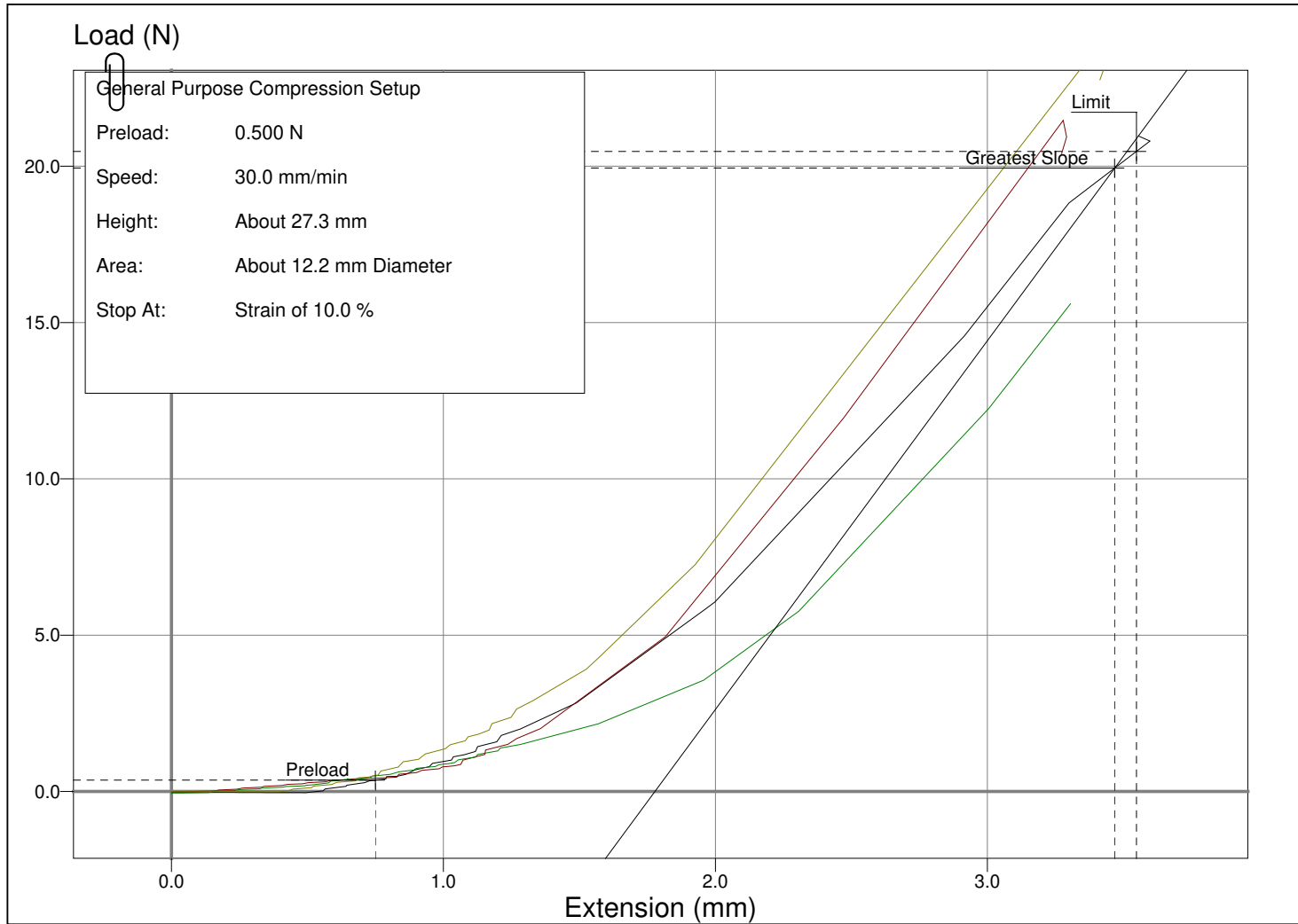


	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	34.620 mm	22.100 mm	28.126 mm	29.250 mm	15.27%	4.2961 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000023842 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.0000013487 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000044703 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	28.008 N	22.831 N	24.973 N	24.434 N	8.42%	2.1037 N	
Deflection at Limit	3.4622 mm	2.2097 mm	2.8175 mm	2.9361 mm	15.23%	0.42901 mm	
Stress at Limit	0.23842 MPa	0.19435 MPa	0.21258 MPa	0.20799 MPa	8.42%	0.017908 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.040	99.987	10.018	10.014	0.17%	0.017103	
Work to Limit	0.047394 J	0.021172 J	0.032923 J	0.032892 J	25.42%	0.0083688 J	
Maximum Load	28.226 N	23.038 N	25.221 N	24.709 N	8.25%	2.0802 N	
Deflection at Maximum Load	3.4826 mm	2.2292 mm	2.8381 mm	2.9364 mm	15.08%	0.42799 mm	
Stress at Maximum Load	0.24027 MPa	0.19611 MPa	0.21469 MPa	0.21033 MPa	8.25%	0.017708 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.157	99.551	10.094	10.114	0.59%	0.059733	
Work to Maximum Load	0.047933 J	0.021774 J	0.033451 J	0.033762 J	25.32%	0.0084707 J	
Stiffness	13492.0 N/m	8471.7 N/m	11157.0 N/m	11192.0 N/m	17.49%	1951.3 N/m	
Young's Modulus	3.1029 MPa	2.2082 MPa	2.6087 MPa	2.5869 MPa	9.19%	0.23987 MPa	
Number of Rows that Passed	9						
Number of Rows that Failed	0						

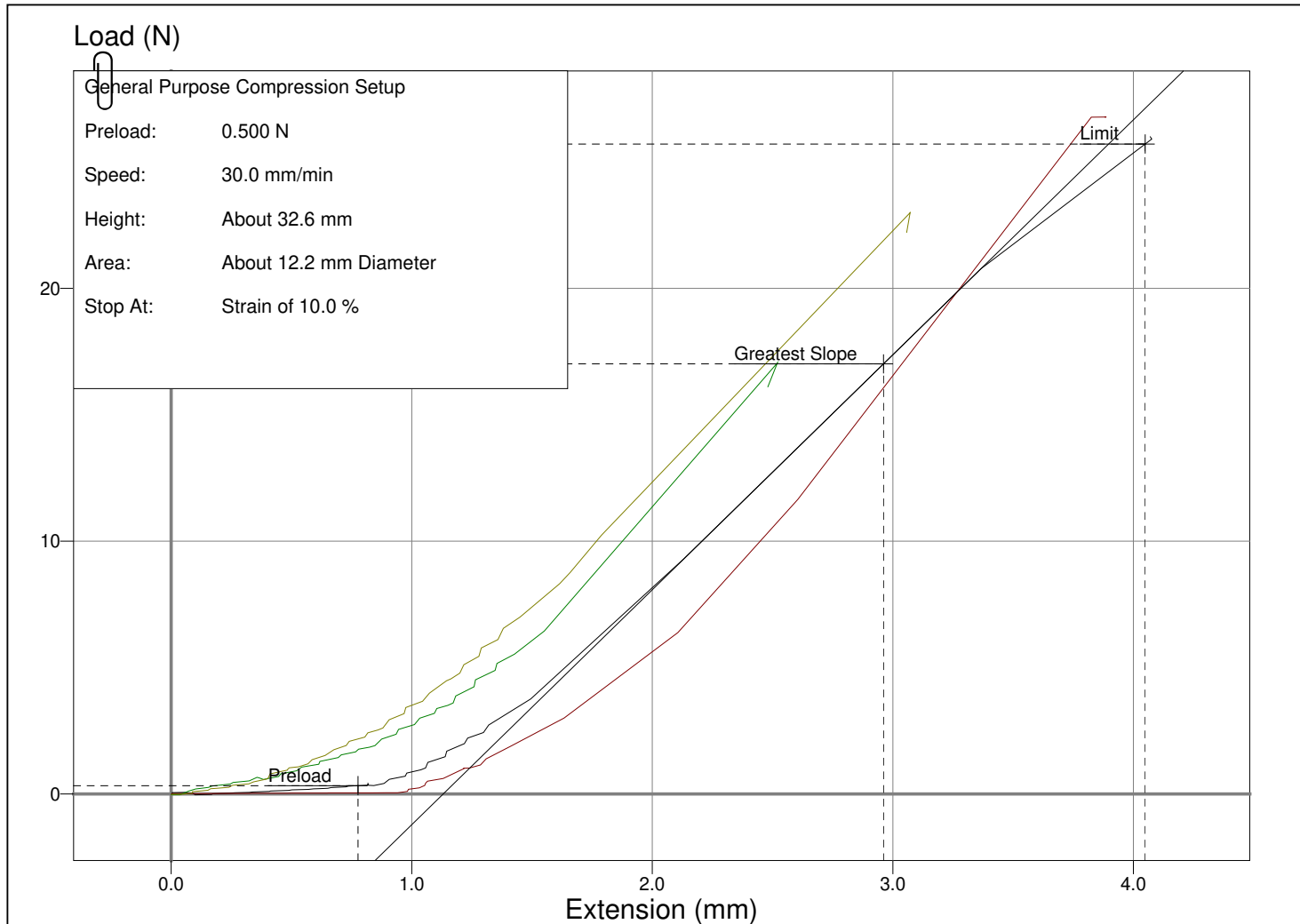




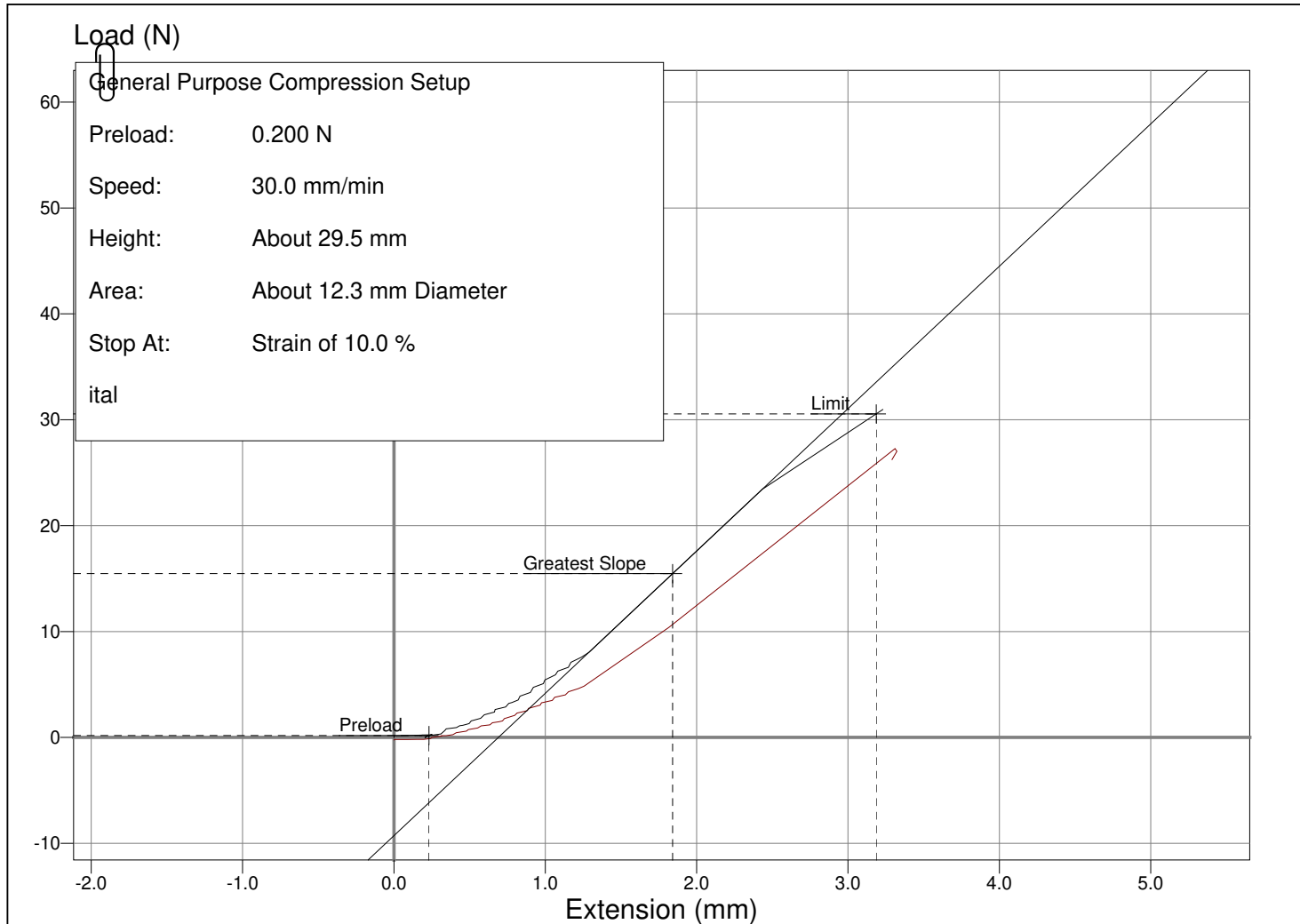
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	27.880 mm	25.690 mm	26.850 mm	26.915 mm	3.08%	0.82810 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	23.885 N	15.155 N	20.196 N	20.873 N	15.71%	3.1725 N	
Deflection at Limit	2.7981 mm	2.5774 mm	2.6916 mm	2.6954 mm	3.06%	0.082392 mm	
Stress at Limit	0.20332 MPa	0.12900 MPa	0.17192 MPa	0.17768 MPa	15.71%	0.027006 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.036	10.002	10.025	10.030	0.13%	0.013379	
Work to Limit	0.026989 J	0.013688 J	0.021422 J	0.022505 J	23.13%	0.0049546 J	
Maximum Load	24.246 N	15.600 N	20.570 N	21.218 N	15.21%	3.1294 N	
Deflection at Maximum Load	2.8050 mm	2.5941 mm	2.7155 mm	2.7315 mm	2.94%	0.079811 mm	
Stress at Maximum Load	0.20639 MPa	0.13280 MPa	0.17511 MPa	0.18062 MPa	15.21%	0.026639 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.178	10.061	10.114	10.109	0.42%	0.042621	
Work to Maximum Load	0.027764 J	0.014302 J	0.021891 J	0.022749 J	22.60%	0.0049473 J	
Stiffness	11798.0 N/m	11153.0 N/m	11484.0 N/m	11493.0 N/m	2.72%	312.40 N/m	
Young's Modulus	2.7999 MPa	2.5168 MPa	2.6247 MPa	2.5911 MPa	4.04%	0.10593 MPa	
Number of Rows that Passed	4						
Number of Rows that Failed	0						



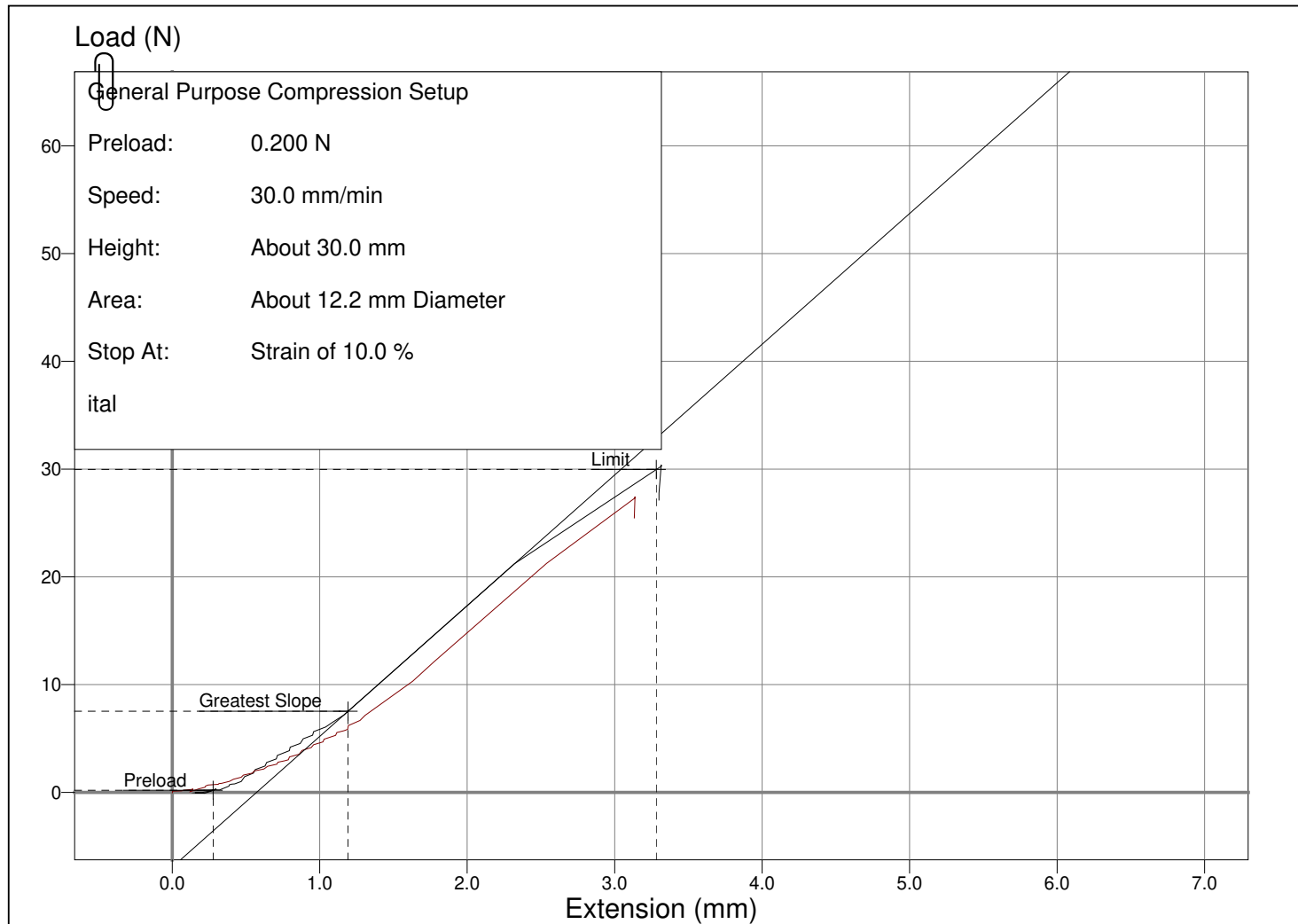
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	32.640 mm	21.930 mm	27.430 mm	27.575 mm	13.84%	3.7955 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	26.777 N	16.592 N	22.962 N	24.240 N	17.25%	3.9599 N	
Deflection at Limit	3.2730 mm	2.1977 mm	2.7462 mm	2.7571 mm	13.87%	0.38093 mm	
Stress at Limit	0.22794 MPa	0.14124 MPa	0.19546 MPa	0.20634 MPa	17.25%	0.033709 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.028	99.969	10.011	10.011	0.13%	0.013274	
Work to Limit	0.039834 J	0.014150 J	0.028387 J	0.029781 J	33.01%	0.0093698 J	
Maximum Load	26.779 N	17.055 N	23.205 N	24.493 N	16.47%	3.8224 N	
Deflection at Maximum Load	3.2944 mm	2.2400 mm	2.7694 mm	2.7717 mm	13.47%	0.37312 mm	
Stress at Maximum Load	0.22796 MPa	0.14518 MPa	0.19753 MPa	0.20850 MPa	16.47%	0.032538 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.214	10.022	10.103	10.087	0.69%	0.069797	
Work to Maximum Load	0.040384 J	0.014862 J	0.028876 J	0.030129 J	32.11%	0.0092726 J	
Stiffness	12391.0 N/m	9293.0 N/m	10871.0 N/m	10900.0 N/m	10.08%	1096.2 N/m	
Young's Modulus	2.9407 MPa	2.0440 MPa	2.5214 MPa	2.5504 MPa	12.66%	0.31915 MPa	
Number of Rows that Passed	4						
Number of Rows that Failed	0						



	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	29.920 mm	29.520 mm	29.720 mm	29.720 mm	0.67%	0.20000 mm	
Diameter	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	30.555 N	27.041 N	28.798 N	28.798 N	6.10%	1.7571 N	
Deflection at Limit	2.9969 mm	2.9554 mm	2.9761 mm	2.9761 mm	0.70%	0.020760 mm	
Stress at Limit	0.25883 MPa	0.22906 MPa	0.24395 MPa	0.24395 MPa	6.10%	0.014884 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.011	10.014	10.014	0.02%	0.0024635	
Work to Limit	0.042087 J	0.033917 J	0.038002 J	0.038002 J	10.75%	0.0040848 J	
Maximum Load	30.964 N	27.276 N	29.120 N	29.120 N	6.33%	1.8437 N	
Deflection at Maximum Load	3.0177 mm	2.9986 mm	3.0081 mm	3.0081 mm	0.32%	0.0095612 mm	
Stress at Maximum Load	0.26229 MPa	0.23106 MPa	0.24667 MPa	0.24667 MPa	6.33%	0.015617 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.158	10.086	10.122	10.122	0.36%	0.035944	
Work to Maximum Load	0.043416 J	0.034483 J	0.038949 J	0.038949 J	11.47%	0.0044667 J	
Stiffness	13445.0 N/m	11300.0 N/m	12373.0 N/m	12373.0 N/m	8.67%	1072.4 N/m	
Young's Modulus	3.3620 MPa	2.8640 MPa	3.1130 MPa	3.1130 MPa	8.00%	0.24902 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						

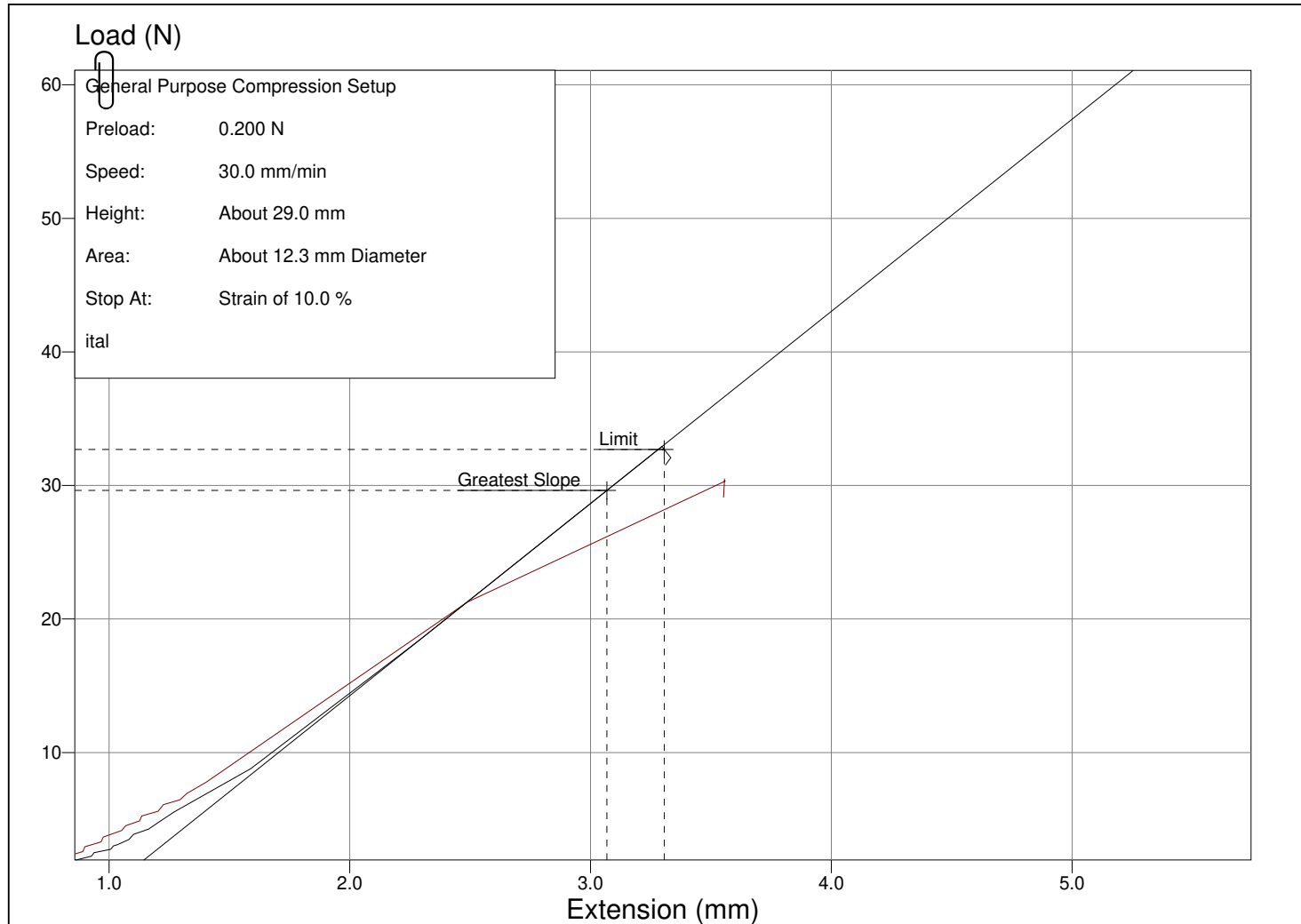


	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	0.00%	0.00000 mm	
Diameter	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	29.964 N	27.169 N	28.566 N	28.566 N	4.89%	1.3970 N	
Deflection at Limit	3.0048 mm	3.0046 mm	3.0047 mm	3.0047 mm	0.00%	0.00012097 mm	
Stress at Limit	0.25632 MPa	0.23242 MPa	0.24437 MPa	0.24437 MPa	4.89%	0.011951 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.015	10.016	10.016	0.00%	0.00040323	
Work to Limit	0.044056 J	0.034928 J	0.039492 J	0.039492 J	11.56%	0.0045639 J	
Maximum Load	30.389 N	27.449 N	28.919 N	28.919 N	5.08%	1.4702 N	
Deflection at Maximum Load	3.0384 mm	3.0196 mm	3.0290 mm	3.0290 mm	0.31%	0.0094329 mm	
Stress at Maximum Load	0.25996 MPa	0.23481 MPa	0.24738 MPa	0.24738 MPa	5.08%	0.012576 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.128	10.065	10.097	10.097	0.31%	0.031443	
Work to Maximum Load	0.045076 J	0.035330 J	0.040203 J	0.040203 J	12.12%	0.0048729 J	
Stiffness	12401.0 N/m	12132.0 N/m	12266.0 N/m	12266.0 N/m	1.10%	134.54 N/m	
Young's Modulus	3.1825 MPa	3.1134 MPa	3.1479 MPa	3.1479 MPa	1.10%	0.034528 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						

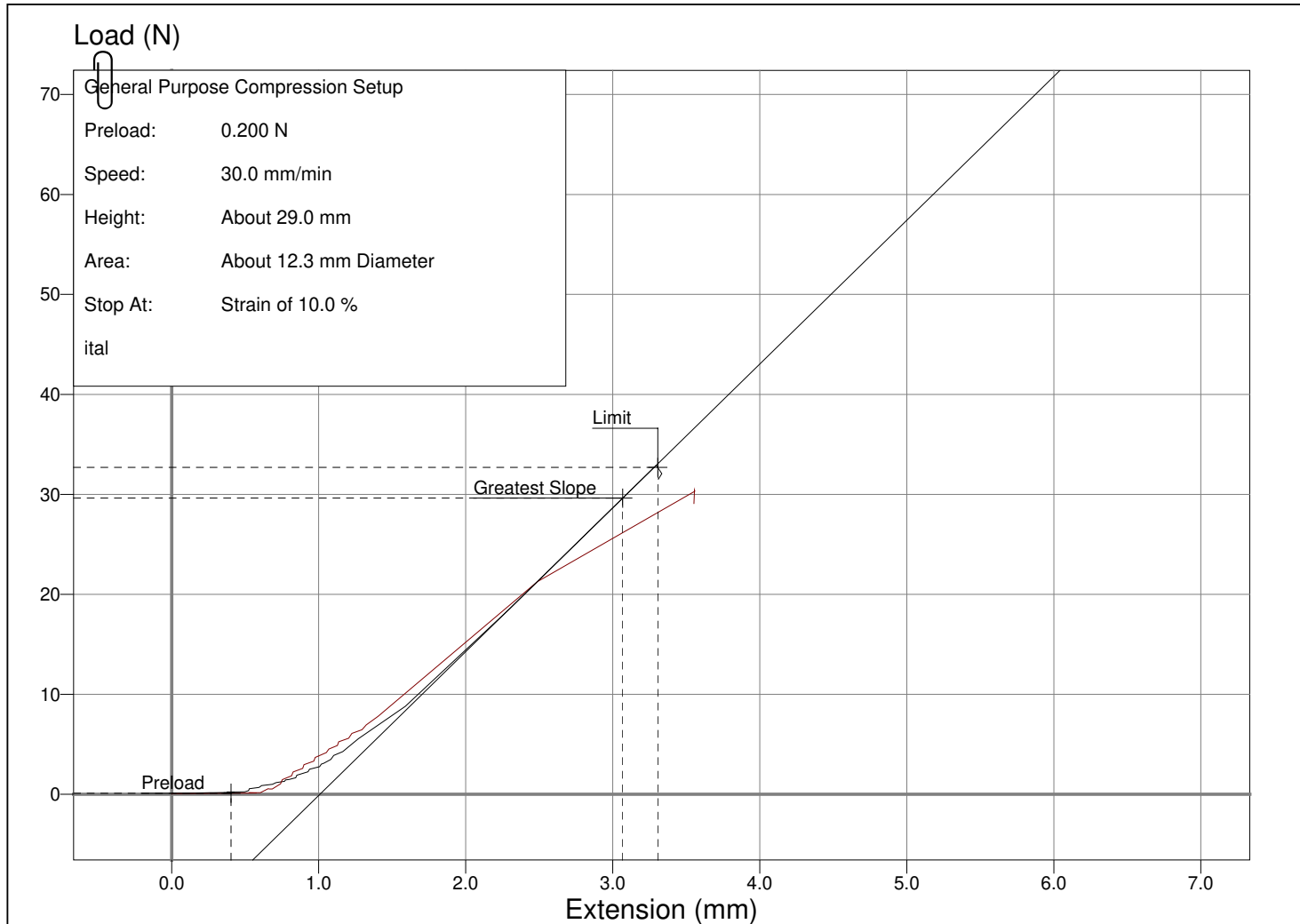




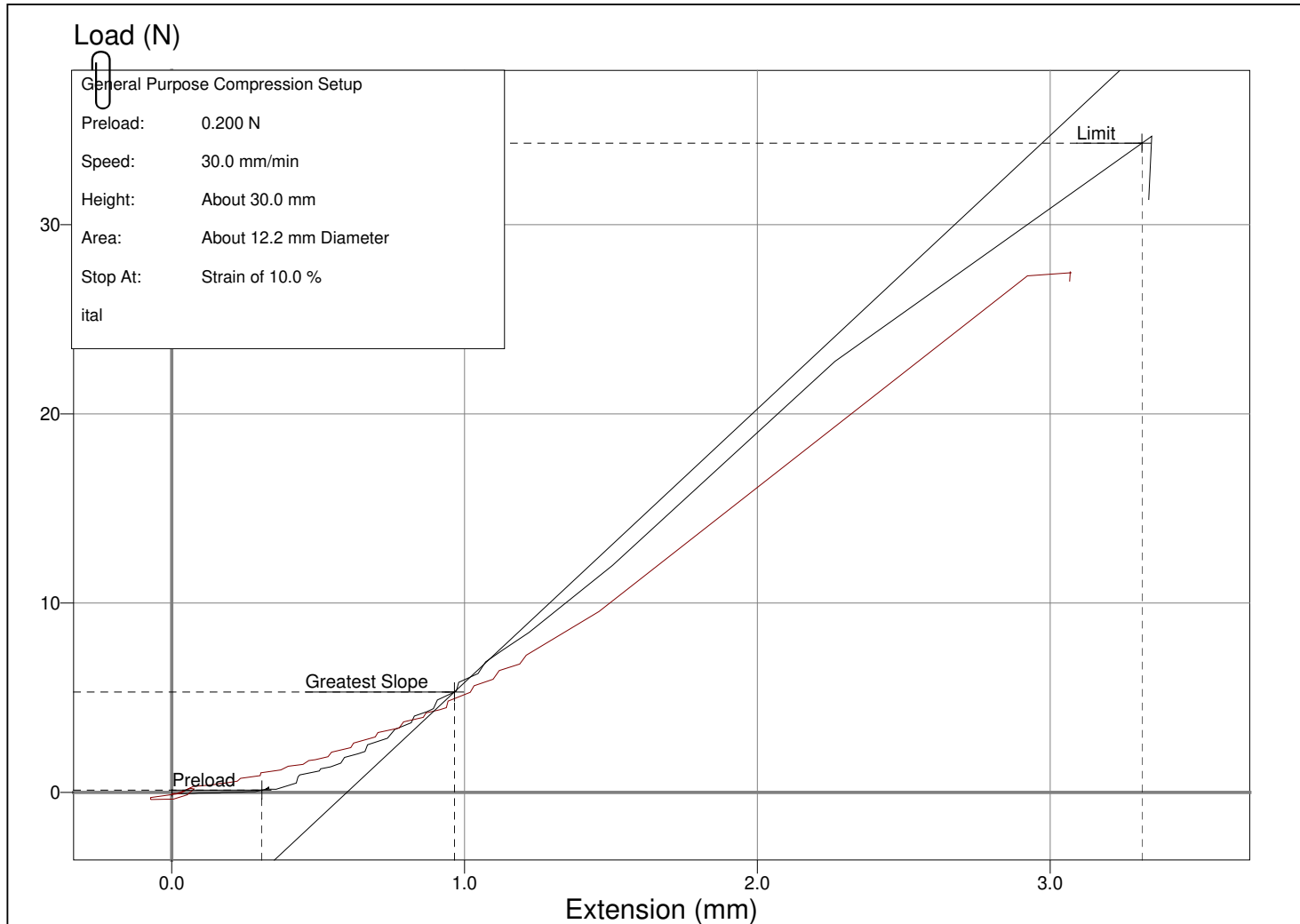
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	29.000 mm	29.500 mm	29.500 mm	1.69%	0.50000 mm	
Diameter	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	32.695 N	30.164 N	31.429 N	31.429 N	4.03%	1.2656 N	
Deflection at Limit	3.0047 mm	2.9021 mm	2.9534 mm	2.9534 mm	1.74%	0.051277 mm	
Stress at Limit	0.27695 MPa	0.25551 MPa	0.26623 MPa	0.26623 MPa	4.03%	0.010720 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.007	10.011	10.011	0.04%	0.0041335	
Work to Limit	0.045868 J	0.039816 J	0.042842 J	0.042842 J	7.06%	0.0030261 J	
Maximum Load	32.914 N	30.421 N	31.668 N	31.668 N	3.94%	1.2466 N	
Deflection at Maximum Load	3.0206 mm	2.8926 mm	2.9566 mm	2.9566 mm	2.16%	0.063986 mm	
Stress at Maximum Load	0.27881 MPa	0.25769 MPa	0.26825 MPa	0.26825 MPa	3.94%	0.010560 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.069	99.745	10.022	10.022	0.47%	0.047046	
Work to Maximum Load	0.046348 J	0.039503 J	0.042926 J	0.042926 J	7.97%	0.0034225 J	
Stiffness	14388.0 N/m	12435.0 N/m	13411.0 N/m	13411.0 N/m	7.28%	976.34 N/m	
Young's Modulus	3.5344 MPa	3.1601 MPa	3.3472 MPa	3.3472 MPa	5.59%	0.18718 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						



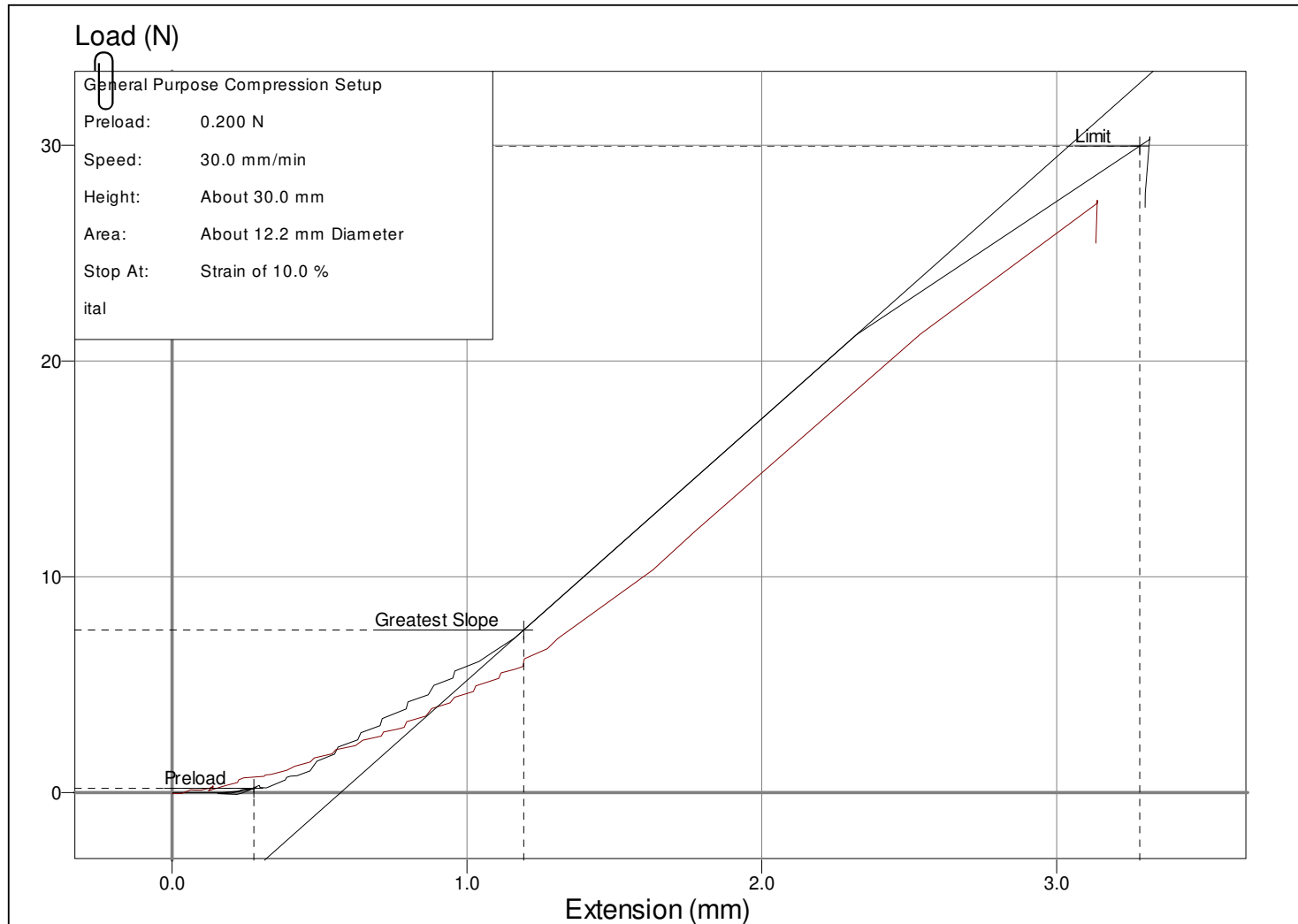
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	29.000 mm	29.500 mm	29.500 mm	1.69%	0.50000 mm	
Diameter	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	12.260 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	118.05 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	32.695 N	30.164 N	31.429 N	31.429 N	4.03%	1.2656 N	
Deflection at Limit	3.0047 mm	2.9021 mm	2.9534 mm	2.9534 mm	1.74%	0.051277 mm	
Stress at Limit	0.27695 MPa	0.25551 MPa	0.26623 MPa	0.26623 MPa	4.03%	0.010720 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.007	10.011	10.011	0.04%	0.0041335	
Work to Limit	0.045868 J	0.039816 J	0.042842 J	0.042842 J	7.06%	0.0030261 J	
Maximum Load	32.914 N	30.421 N	31.668 N	31.668 N	3.94%	1.2466 N	
Deflection at Maximum Load	3.0206 mm	2.8926 mm	2.9566 mm	2.9566 mm	2.16%	0.063986 mm	
Stress at Maximum Load	0.27881 MPa	0.25769 MPa	0.26825 MPa	0.26825 MPa	3.94%	0.010560 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.069	99.745	10.022	10.022	0.47%	0.047046	
Work to Maximum Load	0.046348 J	0.039503 J	0.042926 J	0.042926 J	7.97%	0.0034225 J	
Stiffness	14388.0 N/m	12435.0 N/m	13411.0 N/m	13411.0 N/m	7.28%	976.34 N/m	
Young's Modulus	3.5344 MPa	3.1601 MPa	3.3472 MPa	3.3472 MPa	5.59%	0.18718 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						



	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	0.00%	0.00000 mm	
Diameter	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	34.304 N	27.445 N	30.875 N	30.875 N	11.11%	3.4296 N	
Deflection at Limit	3.0049 mm	3.0000 mm	3.0025 mm	3.0025 mm	0.08%	0.0024699 mm	
Stress at Limit	0.29345 MPa	0.23478 MPa	0.26411 MPa	0.26411 MPa	11.11%	0.029338 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.000	10.008	10.008	0.08%	0.0082331	
Work to Limit	0.049341 J	0.036279 J	0.042810 J	0.042810 J	15.26%	0.0065309 J	
Maximum Load	34.674 N	27.495 N	31.084 N	31.084 N	11.55%	3.5894 N	
Deflection at Maximum Load	3.0385 mm	3.0066 mm	3.0226 mm	3.0226 mm	0.53%	0.015970 mm	
Stress at Maximum Load	0.29661 MPa	0.23520 MPa	0.26591 MPa	0.26591 MPa	11.55%	0.030705 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.128	10.022	10.075	10.075	0.53%	0.053233	
Work to Maximum Load	0.050500 J	0.036461 J	0.043480 J	0.043480 J	16.14%	0.0070198 J	
Stiffness	14457.0 N/m	12124.0 N/m	13291.0 N/m	13291.0 N/m	8.78%	1166.8 N/m	
Young's Modulus	3.7102 MPa	3.1114 MPa	3.4108 MPa	3.4108 MPa	8.78%	0.29944 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						

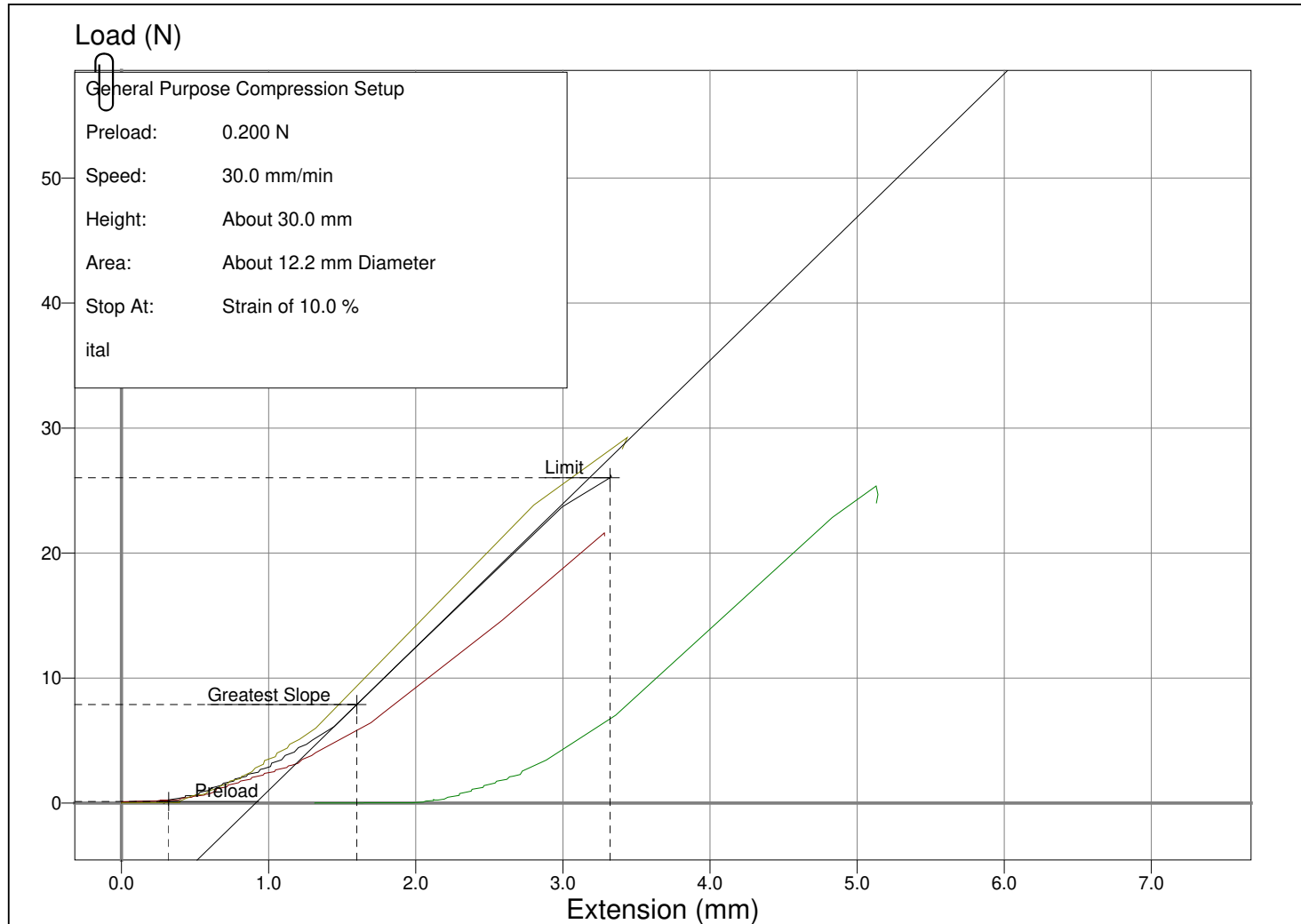


	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	0.00%	0.00000 mm	
Diameter	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	29.964 N	27.169 N	28.566 N	28.566 N	4.89%	1.3970 N	
Deflection at Limit	3.0048 mm	3.0046 mm	3.0047 mm	3.0047 mm	0.00%	0.00012097 mm	
Stress at Limit	0.25632 MPa	0.23242 MPa	0.24437 MPa	0.24437 MPa	4.89%	0.011951 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.016	10.015	10.016	10.016	0.00%	0.00040323	
Work to Limit	0.044056 J	0.034928 J	0.039492 J	0.039492 J	11.56%	0.0045639 J	
Maximum Load	30.389 N	27.449 N	28.919 N	28.919 N	5.08%	1.4702 N	
Deflection at Maximum Load	3.0384 mm	3.0196 mm	3.0290 mm	3.0290 mm	0.31%	0.0094329 mm	
Stress at Maximum Load	0.25996 MPa	0.23481 MPa	0.24738 MPa	0.24738 MPa	5.08%	0.012576 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.128	10.065	10.097	10.097	0.31%	0.031443	
Work to Maximum Load	0.045076 J	0.035330 J	0.040203 J	0.040203 J	12.12%	0.0048729 J	
Stiffness	12401.0 N/m	12132.0 N/m	12266.0 N/m	12266.0 N/m	1.10%	134.54 N/m	
Young's Modulus	3.1825 MPa	3.1134 MPa	3.1479 MPa	3.1479 MPa	1.10%	0.034528 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						

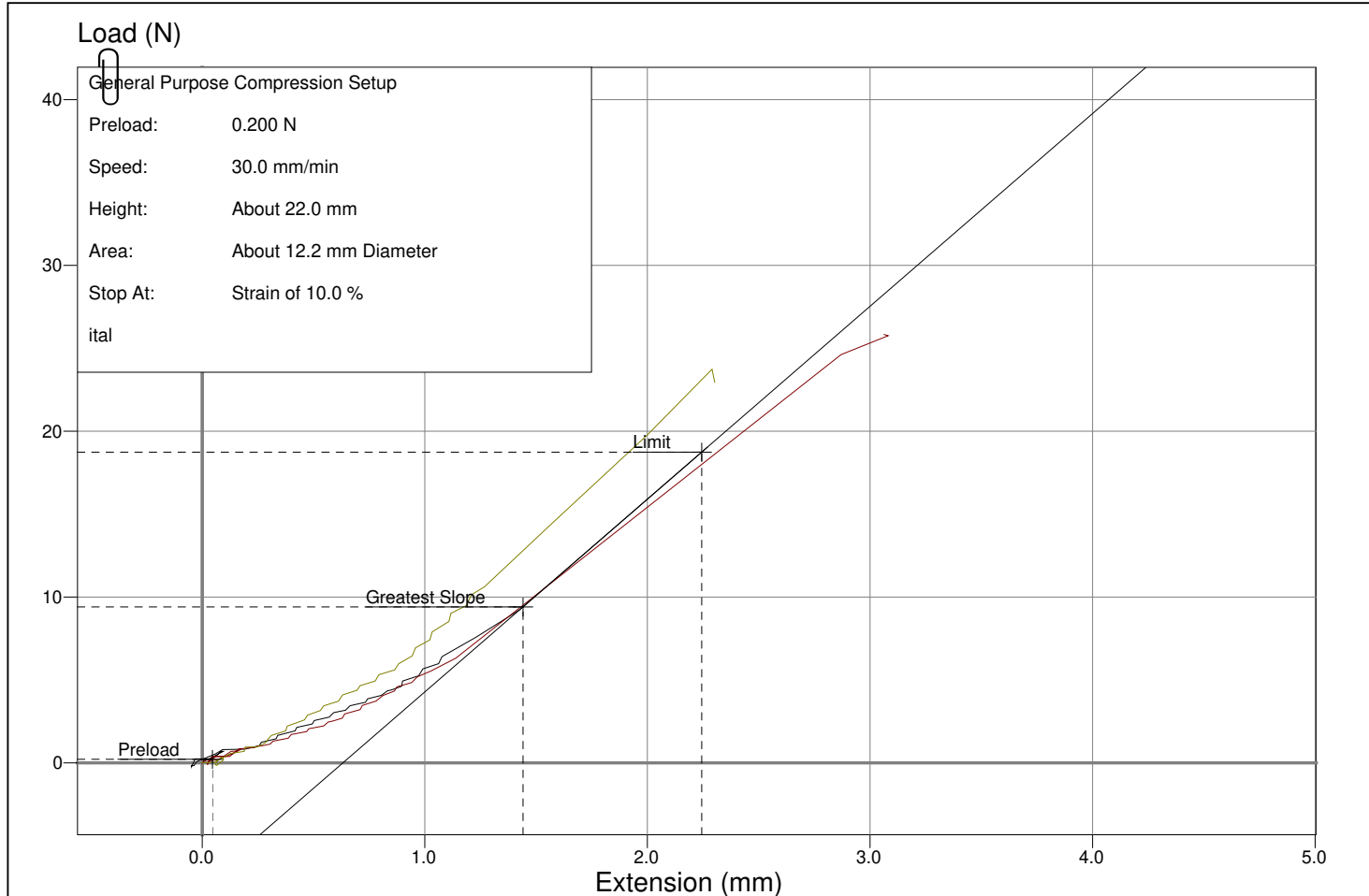




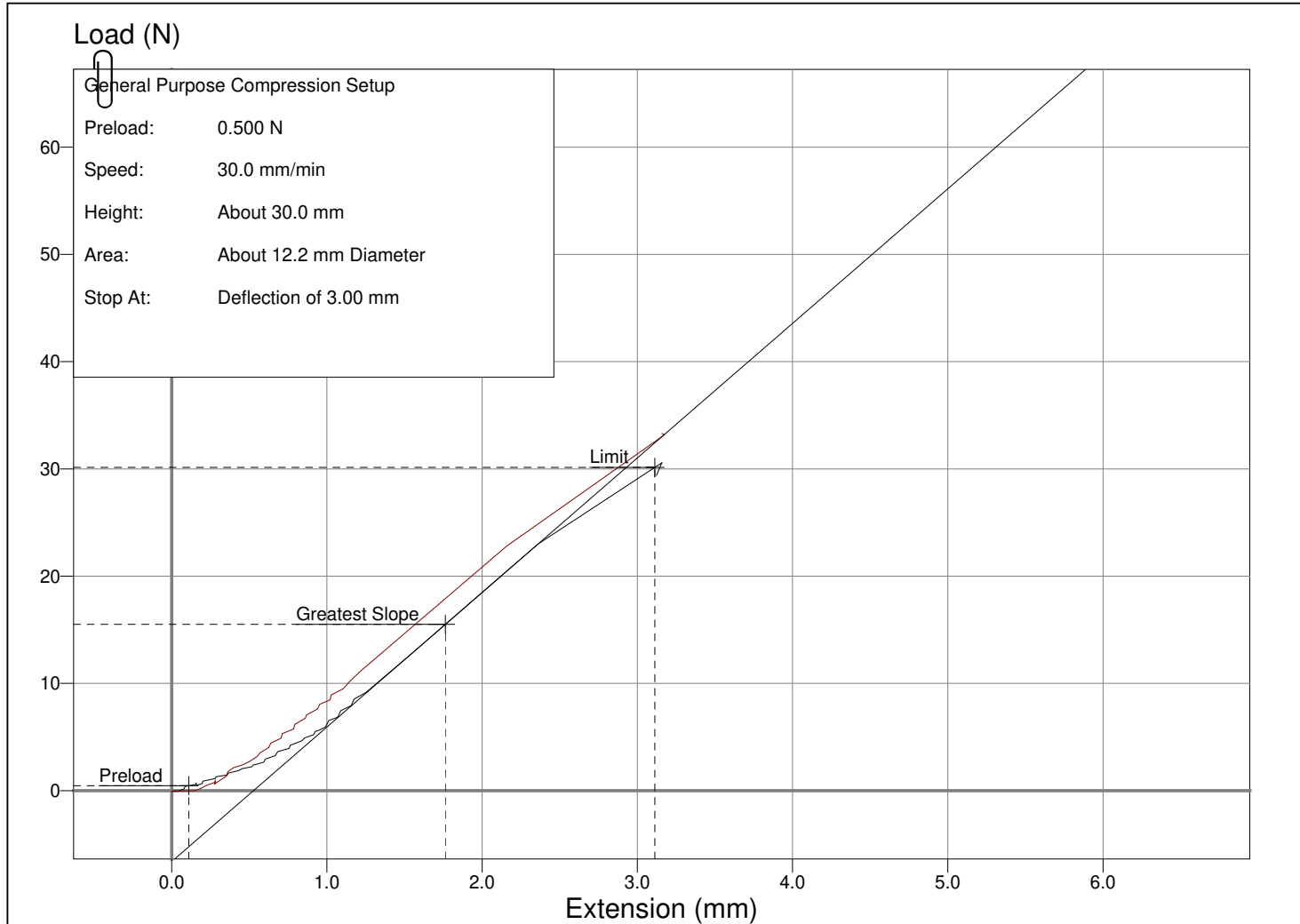
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	30.000 mm	0.00%	0.00000 mm	
Diameter	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	28.909 N	21.615 N	25.460 N	25.659 N	10.21%	2.5994 N	
Deflection at Limit	3.0055 mm	3.0000 mm	3.0014 mm	3.0000 mm	0.08%	0.0023901 mm	
Stress at Limit	0.24730 MPa	0.18491 MPa	0.21780 MPa	0.21950 MPa	10.21%	0.022236 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.018	10.000	10.005	10.000	0.08%	0.0079669	
Work to Limit	0.040288 J	0.025734 J	0.033217 J	0.033422 J	15.60%	0.0051805 J	
Maximum Load	29.241 N	21.617 N	25.625 N	25.820 N	10.62%	2.7212 N	
Deflection at Maximum Load	3.0391 mm	3.0026 mm	3.0142 mm	3.0076 mm	0.48%	0.014566 mm	
Stress at Maximum Load	0.25014 MPa	0.18492 MPa	0.21920 MPa	0.22088 MPa	10.62%	0.023279 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.130	10.009	10.047	10.025	0.48%	0.048553	
Work to Maximum Load	0.041424 J	0.025738 J	0.033578 J	0.033575 J	16.58%	0.0055685 J	
Stiffness	12045.0 N/m	10073.0 N/m	11084.0 N/m	11108.0 N/m	6.70%	742.94 N/m	
Young's Modulus	3.0911 MPa	2.5851 MPa	2.8444 MPa	2.8507 MPa	6.70%	0.19066 MPa	
Number of Rows that Passed	4						
Number of Rows that Failed	0						



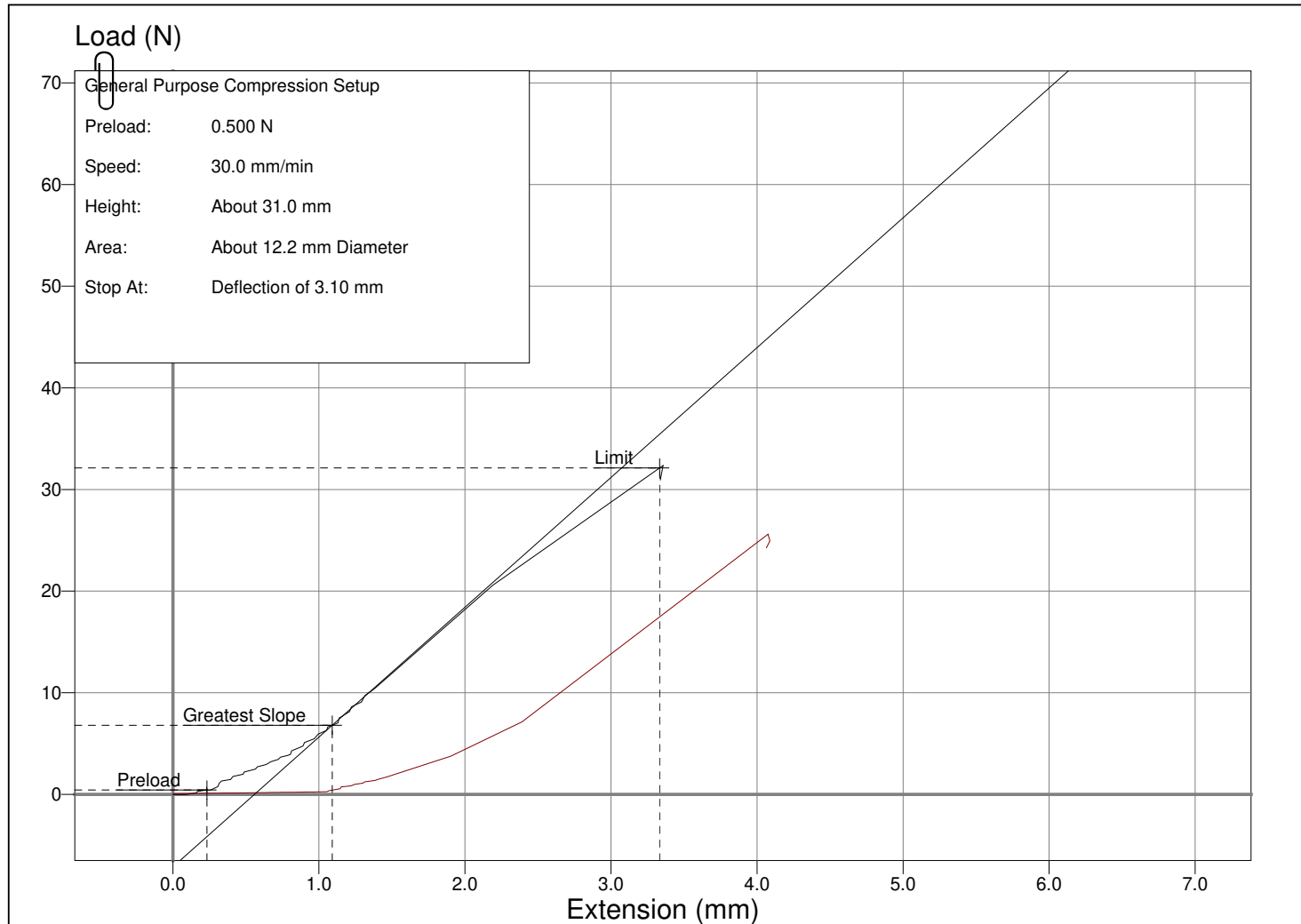
	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	22.000 mm	24.000 mm	22.000 mm	14.43%	3.4641 mm	
Diameter	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	12.200 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	116.90 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	25.616 N	18.737 N	21.642 N	21.108 N	13.41%	2.9012 N	
Deflection at Limit	2.9910 mm	2.1981 mm	2.3973 mm	2.2001 mm	14.30%	0.34273 mm	
Stress at Limit	0.21913 MPa	0.16029 MPa	0.18514 MPa	0.18057 MPa	13.41%	0.024818 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.001	99.699	99.906	99.958	0.13%	0.012521	
Work to Limit	0.034533 J	0.014683 J	0.022111 J	0.019613 J	34.60%	0.0076500 J	
Maximum Load	25.830 N	19.045 N	22.071 N	21.704 N	12.77%	2.8190 N	
Deflection at Maximum Load	2.9996 mm	2.2246 mm	2.4271 mm	2.2422 mm	13.62%	0.33059 mm	
Stress at Maximum Load	0.22096 MPa	0.16292 MPa	0.18880 MPa	0.18567 MPa	12.77%	0.024115 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.209	99.986	10.124	10.143	0.79%	0.080104	
Work to Maximum Load	0.034753 J	0.015573 J	0.022737 J	0.020311 J	32.74%	0.0074434 J	
Stiffness	14621.0 N/m	10578.0 N/m	12614.0 N/m	12628.0 N/m	12.64%	1594.9 N/m	
Young's Modulus	2.7516 MPa	2.1884 MPa	2.5548 MPa	2.6397 MPa	8.72%	0.22284 MPa	
Number of Rows that Passed	4						
Number of Rows that Failed	0						



	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	30.000 mm	29.000 mm	29.500 mm	29.500 mm	1.69%	0.50000 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	32.919 N	30.141 N	31.530 N	31.530 N	4.41%	1.3894 N	
Deflection at Limit	3.0020 mm	2.9056 mm	2.9538 mm	2.9538 mm	1.63%	0.048222 mm	
Stress at Limit	0.28023 MPa	0.25657 MPa	0.26840 MPa	0.26840 MPa	4.41%	0.011827 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.019	10.007	10.013	10.013	0.06%	0.0062484	
Work to Limit	0.048928 J	0.042258 J	0.045593 J	0.045593 J	7.31%	0.0033350 J	
Maximum Load	33.292 N	30.557 N	31.925 N	31.925 N	4.28%	1.3676 N	
Deflection at Maximum Load	3.0459 mm	2.9135 mm	2.9797 mm	2.9797 mm	2.22%	0.066181 mm	
Stress at Maximum Load	0.28340 MPa	0.26012 MPa	0.27176 MPa	0.27176 MPa	4.28%	0.011642 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.153	10.047	10.100	10.100	0.53%	0.053160	
Work to Maximum Load	0.049186 J	0.043588 J	0.046387 J	0.046387 J	6.03%	0.0027991 J	
Stiffness	13011.0 N/m	12545.0 N/m	12778.0 N/m	12778.0 N/m	1.82%	232.96 N/m	
Young's Modulus	3.2119 MPa	3.2036 MPa	3.2077 MPa	3.2077 MPa	0.13%	0.0041154 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						

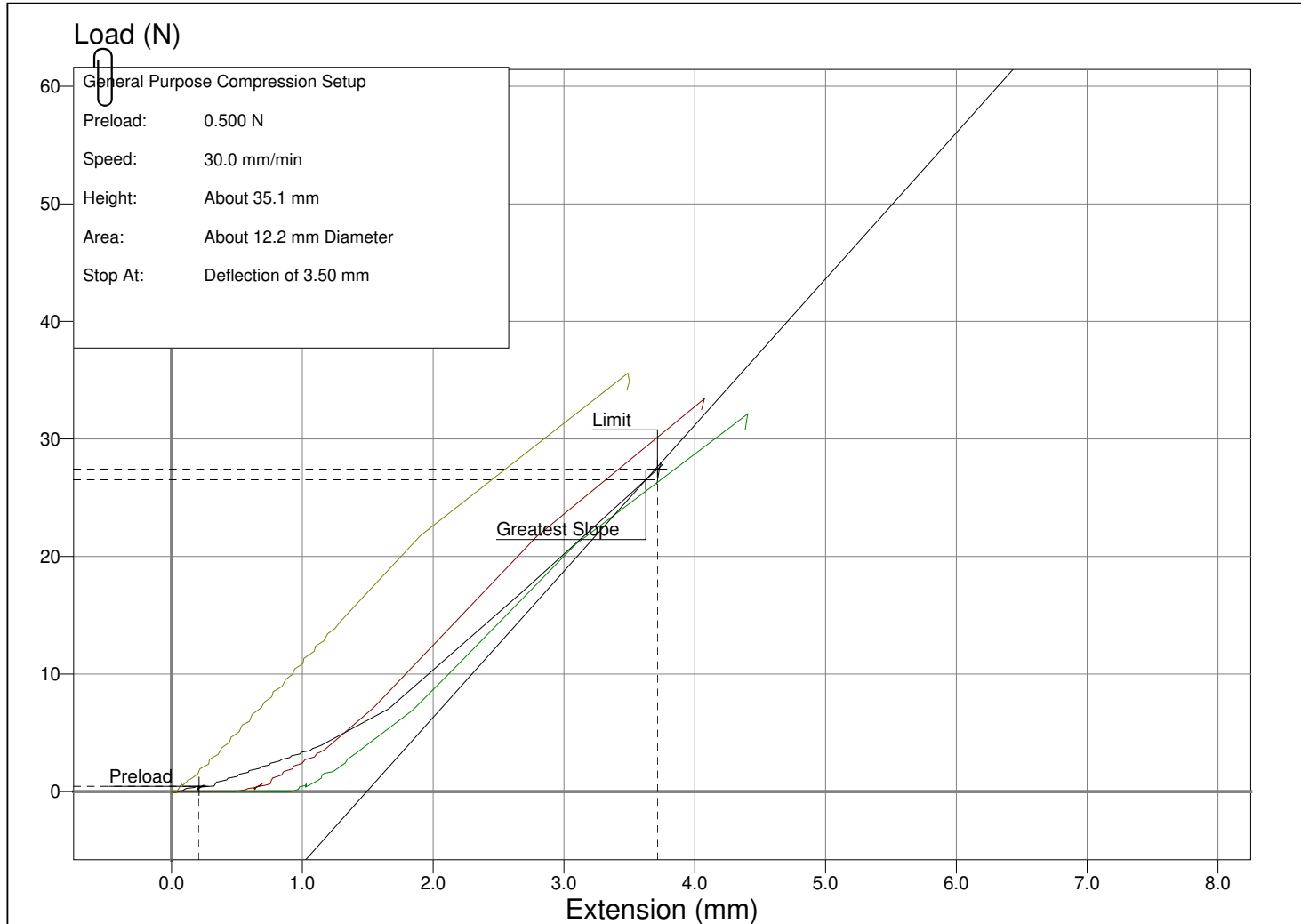


	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	31.000 mm	30.000 mm	30.500 mm	30.500 mm	1.64%	0.50000 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	32.120 N	25.372 N	28.746 N	28.746 N	11.74%	3.3742 N	
Deflection at Limit	3.1000 mm	3.0000 mm	3.0500 mm	3.0500 mm	1.64%	0.050000 mm	
Stress at Limit	0.27342 MPa	0.21598 MPa	0.24470 MPa	0.24470 MPa	11.74%	0.028723 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.000	10.000	10.000	10.000	0.00%	0.00000	
Work to Limit	0.047980 J	0.031308 J	0.039644 J	0.039644 J	21.03%	0.0083360 J	
Maximum Load	32.353 N	25.601 N	28.977 N	28.977 N	11.65%	3.3759 N	
Deflection at Maximum Load	3.1230 mm	3.0209 mm	3.0720 mm	3.0720 mm	1.66%	0.051062 mm	
Stress at Maximum Load	0.27540 MPa	0.21793 MPa	0.24667 MPa	0.24667 MPa	11.65%	0.028737 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.074	10.070	10.072	10.072	0.02%	0.0023013	
Work to Maximum Load	0.048723 J	0.031841 J	0.040282 J	0.040282 J	20.95%	0.0084408 J	
Stiffness	12775.0 N/m	10962.0 N/m	11868.0 N/m	11868.0 N/m	7.64%	906.50 N/m	
Young's Modulus	3.3711 MPa	2.7993 MPa	3.0852 MPa	3.0852 MPa	9.27%	0.28587 MPa	
Number of Rows that Passed	2						
Number of Rows that Failed	0						





	Maximum	Minimum	Mean	Median	Coefficient of Variance	Standard Deviation	True
Date							
Time							
User							
Sample Information							
Height	35.060 mm	33.000 mm	33.877 mm	33.725 mm	2.35%	0.79481 mm	
Diameter	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	12.230 mm	0.00%	0.00000 mm	
Area	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	117.47 mm <sup>2</sup>	0.00%	0.00000 mm <sup>2</sup>	
Batch Reference							
Sample Reference							
Speed	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	30.000 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Datum Speed	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	100.00 mm/min	0.00%	0.00000 mm/min	
Load at Limit	35.462 N	27.440 N	31.998 N	32.545 N	9.14%	2.9242 N	
Deflection at Limit	3.5056 mm	3.4000 mm	3.4264 mm	3.4000 mm	1.33%	0.045719 mm	
Stress at Limit	0.30187 MPa	0.23358 MPa	0.27238 MPa	0.27704 MPa	9.14%	0.024893 MPa	
Percentage Strain at Limit	10.303	99.648	10.117	10.100	1.39%	0.14035	
Work to Limit	0.064829 J	0.039994 J	0.053674 J	0.054936 J	16.54%	0.0088788 J	
Maximum Load	35.600 N	27.917 N	32.268 N	32.778 N	8.68%	2.8013 N	
Deflection at Maximum Load	3.5271 mm	3.4159 mm	3.4490 mm	3.4265 mm	1.31%	0.045313 mm	
Stress at Maximum Load	0.30305 MPa	0.23764 MPa	0.27468 MPa	0.27902 MPa	8.68%	0.023846 MPa	
Percentage Strain at Maximum Load	10.386	10.040	10.184	10.154	1.40%	0.14229	
Work to Maximum Load	0.065393 J	0.040585 J	0.054395 J	0.055801 J	16.34%	0.0088905 J	
Stiffness	12805.0 N/m	11376.0 N/m	12073.0 N/m	12055.0 N/m	4.74%	572.07 N/m	
Young's Modulus	3.7110 MPa	3.1958 MPa	3.4827 MPa	3.5120 MPa	5.84%	0.20335 MPa	
Number of Rows that Passed	4						
Number of Rows that Failed	0						



**9.2 DADOS COLETADOS PELO “FIRMALON” – ÍNDICE DE FIRMEZA ACÚSTICO PARA AS AMOSTRAS EM ENSAIO “SINE DWELL” .**

VARIETY : batmec4.  
PICKING DATE : 21/06/01.  
TEST NAME : bat4.  
TEST DATE : 21/06/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	3.40	187.00	322.80	389.30	558.90	0.199
2	0	4.90	187.00	389.90	610.30	585.20	0.205
3	0	4.90	187.00	389.30	601.70	580.90	0.190
4	0	4.90	187.00	389.30	457.10	595.30	0.206
5	0	4.90	187.00	388.70	606.60	581.60	0.175
6	0	4.40	187.00	367.40	446.70	559.00	0.419
7	0	4.80	187.00	385.10	456.50	565.20	0.239
8	0	4.90	187.00	389.30	446.70	581.70	0.323
9	0	3.21	187.00	313.00	387.50	573.80	0.382
10	0	3.20	187.00	315.50	463.20	577.40	0.214

VARIETY : BATital412DEPOIS.  
PICKING DATE : 04/12/01.  
TEST NAME : B1ITAL412APOS.  
TEST DATE : 04/12/01.

TEST DOCUMENTATION :

TESTE APOS ITAL 4/12 40 hZ 15 MIN

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	1.60	103.00	277.00	380.80	608.40	0.436
2	0	1.70	104.00	278.90	377.10	602.50	0.256
3	0	1.70	103.00	280.70	380.20	595.50	0.380
4	0	3.20	103.00	385.10	605.40	609.50	0.233
5	0	3.20	104.00	385.00	600.50	600.00	0.228
6	0	3.20	104.00	384.50	592.60	625.50	0.258
7	0	3.20	104.00	381.40	595.60	613.30	0.287

8	0	3.20	104.00	384.40	577.30	597.30	0.426
9	0	3.20	104.00	383.20	593.20	602.30	0.220
10	0	3.00	104.00	369.80	565.70	599.80	0.522
11	0	3.10	103.00	380.20	570.60	610.40	0.38

VARIETY : bital25hzapos05g.  
 PICKING DATE : 06/12/01.  
 TEST NAME : b2ital25hz15min05g.  
 TEST DATE : 28/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	2.80	79.00	392.40	500.40	590.30	0.279
2	0	1.40	79.00	279.50	388.70	570.50	0.388
3	0	1.60	79.00	297.80	507.70	575.90	0.307
4	0	1.60	79.00	298.40	371.60	574.50	0.208
5	0	1.60	79.00	297.20	375.30	564.70	0.265
6	0	1.60	79.00	297.80	375.90	583.20	0.247
7	0	1.60	79.00	299.00	374.70	561.30	0.375
8	0	2.50	79.00	374.70	587.10	557.40	0.461
9	0	2.60	80.00	376.50	474.80	564.40	0.458

VARIETY : batITAL412antes.  
 PICKING DATE : 04/12/01.  
 TEST NAME : b2Ital412antes.  
 TEST DATE : 04/12/01.

TEST DOCUMENTATION :

batata 2 ital 04/12/01 antes da vibraçao

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	3.40	104.00	397.30	480.90	644.20	0.318
---	---	------	--------	--------	--------	--------	-------

2	0	3.40	104.00	397.20	460.10	636.80	0.426
3	0	3.50	105.00	397.30	458.90	653.90	0.419
4	0	3.40	104.00	395.50	459.50	654.10	0.282
5	0	3.40	105.00	394.80	478.50	640.70	0.299
6	0	3.50	105.00	396.70	457.70	651.00	0.345
7	0	3.50	105.00	400.30	478.50	647.60	0.439
8	0	3.50	104.00	399.10	509.60	648.80	0.365
9	0	3.40	105.00	395.40	483.30	630.40	0.297
10	0	3.40	105.00	395.40	448.50	653.10	0.274
11	0	3.40	105.00	393.60	476.60	651.00	0.31

VARIETY : batMec2610ap.  
PICKING DATE : 26/10/01.  
TEST NAME : bameapos2.  
TEST DATE : 26/10/01.

TEST DOCUMENTATION :  
apos 18Hz/20min

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.40	117.00	429.00	488.80	609.50	0.100
2	0	2.10	117.00	300.20	386.30	606.60	0.354
3	0	2.10	117.00	302.00	607.90	593.40	0.505
4	0	3.40	117.00	378.40	511.40	620.20	0.157
5	0	1.60	117.00	260.50	412.50	624.20	0.358
6	0	3.30	117.00	373.50	499.80	619.10	0.224
7	0	3.40	117.00	380.20	609.10	626.90	0.169
8	0	2.30	117.00	313.00	608.40	617.00	0.269
9	0	4.40	117.00	429.60	476.00	622.70	0.319
10	0	3.40	117.00	378.40	512.00	614.50	0.215
11	0	3.80	117.00	399.10	880.70	659.80	0.306
12	0	4.10	117.00	416.80	565.10	623.80	0.396

VARIETY : batMec2610ap.  
PICKING DATE : 26/10/01.  
TEST NAME : bameapos3.  
TEST DATE : 26/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	2.20	153.00	282.50	423.50	604.40	0.513
2	0	2.20	153.00	283.10	422.30	576.50	0.709
3	0	2.00	153.00	270.90	424.70	617.60	1.026
4	0	2.40	153.00	292.90	361.30	557.20	0.374
5	0	2.50	153.00	297.20	473.60	553.50	0.504
6	0	1.60	153.00	241.00	449.20	619.60	1.333
7	0	2.20	153.00	277.60	352.70	551.10	0.653
8	0	2.10	153.00	276.40	360.70	548.60	0.759
9	0	2.10	153.00	272.80	403.40	616.90	0.467
10	0	2.10	153.00	274.00	407.00	605.70	0.552

VARIETY : batMec2610ap.

PICKING DATE : 26/10/01.

TEST NAME : bameapos4.

TEST DATE : 26/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.80	160.00	405.80	0.00	615.40	0.266
2	0	4.30	160.00	383.80	452.20	602.60	0.191
3	0	4.30	160.00	386.30	454.00	606.00	0.240
4	0	4.50	160.00	394.20	533.30	581.00	0.195
5	0	4.40	160.00	390.50	571.80	615.50	0.216
6	0	4.80	160.00	407.60	491.90	638.90	0.178
7	0	2.60	160.00	297.20	379.60	559.30	0.419
8	0	2.10	160.00	272.10	615.20	623.10	0.432
9	0	2.10	160.00	269.70	325.20	597.00	0.252
10	0	2.70	160.00	305.70	374.70	624.40	0.511
11	0	2.60	160.00	299.00	446.10	611.20	0.346
12	0	2.60	160.00	299.00	446.10	626.60	0.321
13	0	2.20	160.00	278.90	443.00	604.60	0.527
14	0	2.10	160.00	271.50	441.20	623.40	0.482
15	0	2.70	160.00	305.70	446.70	636.00	0.503
16	0	2.60	160.00	297.80	413.20	637.80	0.336
17	0	2.70	160.00	305.10	457.10	597.60	0.399
18	0	2.60	160.00	300.20	412.50	639.80	0.433

19 0 2.20 160.00 277.60 411.30 617.10 0.455

VARIETY : batMec2610ap.  
PICKING DATE : 26/10/01.  
TEST NAME : bamecapos.  
TEST DATE : 26/10/01.

TEST DOCUMENTATION :  
apos vibrar 18Hz/10min

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO'	F-INDEX	Weight	Freq' 1	Freq' 2	FCentral	Damp	1
1	0	4.80	139.00	426.50	490.10	633.80	0.319
2	0	3.80	139.00	376.50	473.50	592.80	0.263
3	0	3.80	138.00	380.20	450.40	612.20	0.261
4	0	3.30	139.00	353.30	480.90	614.00	0.246
5	0	1.70	138.00	255.10	352.70	607.70	0.342
6	0	4.00	138.00	390.00	828.20	618.70	0.174
7	0	4.00	138.00	391.20	654.20	612.00	0.281
8	0	2.10	139.00	285.00	491.90	599.70	0.614
9	0	4.20	139.00	399.10	455.30	644.00	0.290
10	0	2.20	138.00	287.40	491.30	601.30	0.543

VARIETY : batmec2.  
PICKING DATE : 21/06/01.  
TEST NAME : bat2.  
TEST DATE : 21/06/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO'	F-INDEX	Weight	Freq' 1	Freq' 2	FCentral	Damp	1
1	0	5.00	185.00	393.60	460.80	569.90	0.243
2	0	5.00	185.00	393.00	458.30	568.10	0.280
3	0	5.00	185.00	393.60	591.40	583.60	0.322
4	0	5.30	185.00	405.80	501.60	632.90	0.274
5	0	5.30	185.00	407.60	502.20	634.40	0.440
6	0	5.30	185.00	406.40	506.50	654.60	0.369
7	0	5.40	185.00	408.90	502.20	655.90	0.427
8	0	5.00	185.00	394.20	470.50	651.70	0.376



9	0	4.90	185.00	391.20	467.40	642.70	0.264
10	0	5.00	185.00	394.20	469.90	650.60	0.291

VARIETY : batmec3.  
 PICKING DATE : 21/06/01.  
 TEST NAME : bat3.  
 TEST DATE : 21/06/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO'	F-INDEX	Weight	Freq' 1	Freq' 2	FCentral	Damp	1
1	0	4.60	163.00	396.60	468.70	576.00	0.341
2	0	2.40	164.00	285.00	416.20	620.00	0.513
3	0	5.00	164.00	410.10	539.50	628.50	0.299
4	0	5.10	164.00	414.90	535.80	624.70	0.425
5	0	4.60	164.00	392.40	458.30	630.00	0.283
6	0	4.60	164.00	395.40	460.10	615.50	0.389
7	0	4.60	164.00	394.20	458.90	617.10	0.446
8	0	4.60	164.00	393.60	459.50	621.70	0.359
9	0	4.70	164.00	396.60	456.50	616.20	0.315
10	0	2.20	164.00	272.70	403.40	605.60	0.370

VARIETY : batmec4.  
 PICKING DATE : 21/06/01.  
 TEST NAME : bat4.  
 TEST DATE : 21/06/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO'	F-INDEX	Weight	Freq' 1	Freq' 2	FCentral	Damp	1
1	0	3.40	187.00	322.80	389.30	558.90	0.199
2	0	4.90	187.00	389.90	610.30	585.20	0.205
3	0	4.90	187.00	389.30	601.70	580.90	0.190
4	0	4.90	187.00	389.30	457.10	595.30	0.206
5	0	4.90	187.00	388.70	606.60	581.60	0.175
6	0	4.40	187.00	367.40	446.70	559.00	0.419
7	0	4.80	187.00	385.10	456.50	565.20	0.239

8	0	4.90	187.00	389.30	446.70	581.70	0.323
9	0	3.20	187.00	313.00	387.50	573.80	0.382
10	0	3.20	187.00	315.50	463.20	577.40	0.214

VARIETY : batITAL2510.  
 PICKING DATE : 25/10/01.  
 TEST NAME : batITAL1.  
 TEST DATE : 25/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.20	172.00	371.60	624.90	604.90	0.287
2	0	5.70	172.00	430.20	624.90	603.30	0.142
3	0	5.80	172.00	433.90	629.20	625.00	0.196
4	0	4.20	172.00	369.80	629.20	619.70	0.396
5	0	4.20	172.00	368.60	634.70	608.70	0.250
6	0	5.70	172.00	432.60	617.00	622.20	0.160
7	0	4.10	172.00	368.00	490.60	614.50	0.312
8	0	5.70	172.00	432.00	479.70	606.40	0.159
9	0	5.70	172.00	432.00	629.80	622.60	0.155
10	0	5.70	172.00	431.50	623.70	612.80	0.158

VARIETY : batITAL2510.  
 PICKING DATE : 25/10/01.  
 TEST NAME : batITAL2.  
 TEST DATE : 25/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	6.20	191.00	435.10	483.30	618.80	0.134
2	0	4.80	192.00	381.40	466.90	601.60	0.171
3	0	4.90	192.00	386.30	440.60	634.10	0.191
4	0	5.20	192.00	395.40	500.40	631.00	0.267
5	0	4.80	192.00	383.20	607.20	614.40	0.210
6	0	5.70	192.00	416.20	690.80	633.40	0.171

7	0	4.80	192.00	382.60	482.70	615.20	0.200
8	0	4.80	192.00	383.20	452.20	642.80	0.232
9	0	4.80	192.00	381.40	604.80	617.60	0.328
10	0	4.90	192.00	383.90	453.40	611.00	0.198

VARIETY : batITAL2510.  
 PICKING DATE : 25/10/01.  
 TEST NAME : batITAL3.  
 TEST DATE : 25/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.80	185.00	387.50	620.70	586.80	0.182
2	0	7.20	185.00	472.40	592.60	586.80	0.225
3	0	6.30	185.00	443.60	599.90	595.20	0.240
4	0	6.60	185.00	454.00	598.10	582.80	0.197
5	0	6.70	185.00	456.50	606.00	581.60	0.225
6	0	5.20	185.00	402.80	620.70	617.80	0.204
7	0	2.90	185.00	301.50	425.30	582.70	0.338
8	0	6.00	185.00	430.20	592.00	606.60	0.219
9	0	5.20	185.00	400.30	588.90	619.60	0.184
10	0	6.40	185.00	447.30	586.50	583.50	0.193

VARIETY : batITAL2510.  
 PICKING DATE : 25/10/01.  
 TEST NAME : batITAL4.  
 TEST DATE : 25/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	5.50	186.00	413.70	608.50	599.20	0.323
2	0	5.60	186.00	416.80	615.80	628.50	0.244
3	0	5.60	186.00	418.00	612.10	636.10	0.712
4	0	6.60	186.00	451.60	618.80	625.20	0.147
5	0	5.40	186.00	410.10	601.70	620.60	0.242
6	0	5.60	186.00	416.80	612.70	611.60	0.245

7	0	5.60	186.00	418.00	615.80	616.20	0.283
8	0	5.50	186.00	414.40	615.80	624.30	0.319
9	0	2.80	186.00	297.20	409.50	611.00	0.450
10	0	4.90	186.00	390.60	615.80	617.20	0.500

VARIETY : batITAL2510.  
 PICKING DATE : 25/10/01.  
 TEST NAME : batITAL5.  
 TEST DATE : 25/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	2.40	178.00	279.40	412.50	556.80	0.344
2	0	2.40	178.00	278.20	408.90	577.30	0.331
3	0	4.80	178.00	389.90	615.10	618.30	0.424
4	0	4.90	178.00	395.40	593.80	620.20	0.223
5	0	4.70	178.00	386.90	604.20	618.00	0.308
6	0	4.60	178.00	381.40	598.10	571.20	0.426
7	0	4.40	178.00	375.30	592.00	579.90	0.325
8	0	4.30	178.00	370.40	433.30	591.30	0.229
9	0	4.30	178.00	372.20	594.40	593.10	0.214
10	0	4.40	178.00	375.30	602.90	604.40	0.224
11	0	4.40	178.00	373.50	437.50	590.80	0.195

VARIETY : batITAL2510.  
 PICKING DATE : 25/10/01.  
 TEST NAME : batITAL6.  
 TEST DATE : 25/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.70	187.00	380.20	466.20	586.10	0.206
---	---	------	--------	--------	--------	--------	-------

2	0	4.80	187.00	383.20	468.70	596.00	0.230
3	0	4.80	187.00	383.80	469.90	588.70	0.214
4	0	5.00	187.00	393.60	469.30	593.20	0.214
5	0	5.00	187.00	394.20	468.70	609.20	0.264
6	0	4.80	187.00	385.70	471.10	589.90	0.230
7	0	4.70	187.00	382.60	469.30	600.40	0.237
8	0	4.70	186.00	383.80	470.50	592.80	0.213
9	0	5.00	187.00	394.20	470.50	587.90	0.186
10	0	4.80	187.00	384.40	470.50	594.10	0.260

VARIETY : batITAL2510.

PICKING DATE : 25/10/01.

TEST NAME : batITAL7.

TEST DATE : 25/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.40	161.00	389.40	476.00	606.70	0.814
2	0	4.20	161.00	379.60	451.00	636.00	0.348
3	0	4.30	161.00	381.40	454.60	598.50	0.443
4	0	5.40	161.00	429.00	483.30	591.80	0.414
5	0	4.10	161.00	374.10	485.10	593.60	0.458
6	0	5.30	161.00	426.60	489.40	592.60	0.202
7	0	4.90	161.00	407.60	487.00	597.20	0.405
8	0	5.00	161.00	411.30	631.00	623.10	0.348
9	0	5.10	161.00	416.20	486.40	630.60	0.466
10	0	5.00	161.00	412.50	486.40	638.90	0.483

VARIETY : batITAL2510.

PICKING DATE : 25/10/01.

TEST NAME : batITAL8.

TEST DATE : 25/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.90	196.00	382.00	615.10	646.00	0.397
---	---	------	--------	--------	--------	--------	-------

2	0	5.90	196.00	419.20	620.60	611.40	0.355
3	0	6.50	196.00	441.20	501.00	640.20	0.318
4	0	5.50	196.00	404.00	530.90	621.10	0.216
5	0	7.60	196.00	477.20	617.60	715.70	0.342
6	0	5.70	196.00	414.40	550.50	616.40	0.265
7	0	7.60	196.00	476.60	568.70	622.30	0.214
8	0	5.80	196.00	415.60	650.60	623.80	0.170
9	0	5.80	196.00	415.00	616.40	626.60	0.176
10	0	7.90	196.00	485.10	617.60	620.10	0.355

VARIETY : batITAL2510apos.

PICKING DATE : 25/10/01.

TEST NAME : batITALapos1.

TEST DATE : 25/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.50	168.00	387.50	508.40	639.10	0.334
2	0	4.60	168.00	391.80	478.40	649.70	0.261
3	0	4.50	168.00	387.50	636.50	630.50	0.231
4	0	4.60	168.00	388.70	511.40	636.40	0.230
5	0	4.60	168.00	390.50	473.60	637.90	0.223
6	0	4.50	168.00	387.50	473.50	635.00	0.247
7	0	4.50	168.00	386.30	471.10	644.80	0.231
8	0	4.60	168.00	390.00	477.90	641.00	0.241
9	0	4.50	168.00	386.30	634.70	641.10	0.243
10	0	4.60	168.00	389.90	476.00	647.70	0.302

VARIETY : batITAL2510apos.

PICKING DATE : 25/10/01.

TEST NAME : batITALapos1.

TEST DATE : 25/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.50	168.00	387.50	508.40	639.10	0.334
---	---	------	--------	--------	--------	--------	-------

2	0	4.60	168.00	391.80	478.40	649.70	0.261
3	0	4.50	168.00	387.50	636.50	630.50	0.231
4	0	4.60	168.00	388.70	511.40	636.40	0.230
5	0	4.60	168.00	390.50	473.60	637.90	0.223
6	0	4.50	168.00	387.50	473.50	635.00	0.247
7	0	4.50	168.00	386.30	471.10	644.80	0.231
8	0	4.60	168.00	390.00	477.90	641.00	0.241
9	0	4.50	168.00	386.30	634.70	641.10	0.243
10	0	4.60	168.00	389.90	476.00	647.70	0.302

VARIETY : batMEC2610antes.

PICKING DATE : 26/10/01.

TEST NAME : batmec2an.

TEST DATE : 26/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	2.70	158.00	306.30	391.80	612.90	0.212
2	0	4.20	159.00	382.60	504.10	615.80	0.213
3	0	4.30	158.00	385.10	468.10	621.20	0.340
4	0	4.40	158.00	388.10	619.50	617.00	0.360
5	0	4.60	158.00	397.30	605.40	596.30	0.177
6	0	4.50	158.00	394.80	598.10	613.80	0.427
7	0	6.00	158.00	454.00	513.80	616.40	0.200
8	0	3.50	158.00	348.50	415.00	617.40	0.500
9	0	5.50	158.00	434.50	484.50	603.00	0.166

VARIETY : batMEC2610antes.

PICKING DATE : 26/10/01.

TEST NAME : batmec4.

TEST DATE : 25/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.40	159.00	389.30	654.80	616.70	0.174
---	---	------	--------	--------	--------	--------	-------

2	0	4.50	159.00	393.60	452.80	641.30	0.179
3	0	6.00	159.00	455.30	709.80	650.00	0.244
4	0	4.70	159.00	402.70	631.00	621.80	0.185
5	0	4.50	159.00	393.60	456.50	647.90	0.204
6	0	4.60	159.00	397.90	455.30	612.30	0.254
7	0	5.90	159.00	451.00	659.10	621.00	0.224
8	0	6.00	159.00	454.70	633.50	618.70	0.158
9	0	6.10	159.00	456.50	634.70	586.70	0.146
10	0	6.40	160.00	468.70	617.60	592.90	0.142

VARIETY : batmec2apos.  
PICKING DATE : 21/06/01.  
TEST NAME : batmec2apos.  
TEST DATE : 21/06/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.80	191.00	380.80	452.20	646.60	0.247
2	0	4.80	191.00	381.40	457.10	604.30	0.233
3	0	2.90	191.00	299.00	458.30	659.90	0.432
4	0	4.90	191.00	387.50	452.20	578.30	0.289
5	0	5.70	191.00	418.00	493.10	611.90	0.219
6	0	4.50	191.00	372.30	456.50	623.70	0.280
7	0	4.90	191.00	386.30	457.10	599.30	0.205
8	0	4.50	191.00	371.60	458.30	620.40	0.414
9	0	5.10	191.00	394.80	454.00	594.10	0.222
10	0	5.80	191.00	421.70	726.90	628.00	0.196

VARIETY : batmec3apos.  
PICKING DATE : 21/06/01.  
TEST NAME : batmec3apos.  
TEST DATE : 21/06/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	6.90	183.00	465.60	515.60	606.90	0.114
---	---	------	--------	--------	--------	--------	-------



2	0	4.70	183.00	383.80	517.50	606.40	0.562
3	0	2.20	183.00	265.40	460.80	598.60	0.579
4	0	2.90	183.00	300.80	397.30	599.40	0.344
5	0	2.90	183.00	301.50	395.40	590.20	0.372
6	0	2.80	183.00	297.10	392.40	607.20	0.400
7	0	2.90	183.00	300.20	394.20	597.70	0.354
8	0	2.80	183.00	299.60	394.80	587.30	0.437
9	0	4.90	183.00	393.60	588.90	595.30	0.343
10	0	2.80	183.00	299.60	391.80	598.50	0.470

VARIETY : batmec4.  
PICKING DATE : 21/06/01.  
TEST NAME : bat4.  
TEST DATE : 21/06/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	3.40	187.00	322.80	389.30	558.90	0.199
2	0	4.90	187.00	389.90	610.30	585.20	0.205
3	0	4.90	187.00	389.30	601.70	580.90	0.190
4	0	4.90	187.00	389.30	457.10	595.30	0.206
5	0	4.90	187.00	388.70	606.60	581.60	0.175
6	0	4.40	187.00	367.40	446.70	559.00	0.419
7	0	4.80	187.00	385.10	456.50	565.20	0.239
8	0	4.90	187.00	389.30	446.70	581.70	0.323
9	0	3.20	187.00	313.00	387.50	573.80	0.382
10	0	3.20	187.00	315.50	463.20	577.40	0.214

VARIETY : BATital412DEPOIS.  
PICKING DATE : 04/12/01.  
TEST NAME : B1ITAL412APOS.  
TEST DATE : 04/12/01.

TEST DOCUMENTATION :

TESTE APOS ITAL 4/12 40 hZ 15 MIN

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	1.60	103.00	277.00	380.80	608.40	0.436
2	0	1.70	104.00	278.90	377.10	602.50	0.256
3	0	1.70	103.00	280.70	380.20	595.50	0.380
4	0	3.20	103.00	385.10	605.40	609.50	0.233
5	0	3.20	104.00	385.00	600.50	600.00	0.228
6	0	3.20	104.00	384.50	592.60	625.50	0.258
7	0	3.20	104.00	381.40	595.60	613.30	0.287
8	0	3.20	104.00	384.40	577.30	597.30	0.426
9	0	3.20	104.00	383.20	593.20	602.30	0.220
10	0	3.00	104.00	369.80	565.70	599.80	0.522
11	0	3.10	103.00	380.20	570.60	610.40	0.38

VARIETY : bital25hzapos05g.

PICKING DATE : 06/12/01.

TEST NAME : b2ital25hz15min05g.

TEST DATE : 28/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	2.80	79.00	392.40	500.40	590.30	0.279
2	0	1.40	79.00	279.50	388.70	570.50	0.388
3	0	1.60	79.00	297.80	507.70	575.90	0.307
4	0	1.60	79.00	298.40	371.60	574.50	0.208
5	0	1.60	79.00	297.20	375.30	564.70	0.265
6	0	1.60	79.00	297.80	375.90	583.20	0.247
7	0	1.60	79.00	299.00	374.70	561.30	0.375
8	0	2.50	79.00	374.70	587.10	557.40	0.461
9	0	2.60	80.00	376.50	474.80	564.40	0.458

VARIETY : batITAL412antes.

PICKING DATE : 04/12/01.

TEST NAME : b2Ital412antes.

TEST DATE : 04/12/01.

TEST DOCUMENTATION :

batata 2 ital 04/12/01 antes da vibraçao

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	3.40	104.00	397.30	480.90	644.20	0.318
2	0	3.40	104.00	397.20	460.10	636.80	0.426

3	0	3.50	105.00	397.30	458.90	653.90	0.419
4	0	3.40	104.00	395.50	459.50	654.10	0.282
5	0	3.40	105.00	394.80	478.50	640.70	0.299
6	0	3.50	105.00	396.70	457.70	651.00	0.345
7	0	3.50	105.00	400.30	478.50	647.60	0.439
8	0	3.50	104.00	399.10	509.60	648.80	0.365
9	0	3.40	105.00	395.40	483.30	630.40	0.297
10	0	3.40	105.00	395.40	448.50	653.10	0.274
11	0	3.40	105.00	393.60	476.60	651.00	0.31

VARIETY : batMec2610ap.  
 PICKING DATE : 26/10/01.  
 TEST NAME : bameapos2.  
 TEST DATE : 26/10/01.  
 TEST DOCUMENTATION :  
 apos 18Hz/20min

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.40	117.00	429.00	488.80	609.50	0.100
2	0	2.10	117.00	300.20	386.30	606.60	0.354
3	0	2.10	117.00	302.00	607.90	593.40	0.505
4	0	3.40	117.00	378.40	511.40	620.20	0.157
5	0	1.60	117.00	260.50	412.50	624.20	0.358
6	0	3.30	117.00	373.50	499.80	619.10	0.224
7	0	3.40	117.00	380.20	609.10	626.90	0.169
8	0	2.30	117.00	313.00	608.40	617.00	0.269
9	0	4.40	117.00	429.60	476.00	622.70	0.319
10	0	3.40	117.00	378.40	512.00	614.50	0.215
11	0	3.80	117.00	399.10	880.70	659.80	0.306
12	0	4.10	117.00	416.80	565.10	623.80	0.396

VARIETY : batMec2610ap.  
 PICKING DATE : 26/10/01.  
 TEST NAME : bameapos3.  
 TEST DATE : 26/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	2.20	153.00	282.50	423.50	604.40	0.513
---	---	------	--------	--------	--------	--------	-------

2	0	2.20	153.00	283.10	422.30	576.50	0.709
3	0	2.00	153.00	270.90	424.70	617.60	1.026
4	0	2.40	153.00	292.90	361.30	557.20	0.374
5	0	2.50	153.00	297.20	473.60	553.50	0.504
6	0	1.60	153.00	241.00	449.20	619.60	1.333
7	0	2.20	153.00	277.60	352.70	551.10	0.653
8	0	2.10	153.00	276.40	360.70	548.60	0.759
9	0	2.10	153.00	272.80	403.40	616.90	0.467
10	0	2.10	153.00	274.00	407.00	605.70	0.552

VARIETY : batMec2610ap.

PICKING DATE : 26/10/01.

TEST NAME : bameapos4.

TEST DATE : 26/10/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO' F-INDEX Weight Freq' 1 Freq' 2 FCentral Damp 1

1	0	4.80	160.00	405.80	0.00	615.40	0.266
2	0	4.30	160.00	383.80	452.20	602.60	0.191
3	0	4.30	160.00	386.30	454.00	606.00	0.240
4	0	4.50	160.00	394.20	533.30	581.00	0.195
5	0	4.40	160.00	390.50	571.80	615.50	0.216
6	0	4.80	160.00	407.60	491.90	638.90	0.178
7	0	2.60	160.00	297.20	379.60	559.30	0.419
8	0	2.10	160.00	272.10	615.20	623.10	0.432
9	0	2.10	160.00	269.70	325.20	597.00	0.252
10	0	2.70	160.00	305.70	374.70	624.40	0.511
11	0	2.60	160.00	299.00	446.10	611.20	0.346
12	0	2.60	160.00	299.00	446.10	626.60	0.321
13	0	2.20	160.00	278.90	443.00	604.60	0.527
14	0	2.10	160.00	271.50	441.20	623.40	0.482
15	0	2.70	160.00	305.70	446.70	636.00	0.503
16	0	2.60	160.00	297.80	413.20	637.80	0.336
17	0	2.70	160.00	305.10	457.10	597.60	0.399
18	0	2.60	160.00	300.20	412.50	639.80	0.433
19	0	2.20	160.00	277.60	411.30	617.10	0.455

VARIETY : batMec2610ap.

PICKING DATE : 26/10/01.

TEST NAME : bamecapos.

TEST DATE : 26/10/01.

TEST DOCUMENTATION :  
apos vibrar 18Hz/10min

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO'	F-INDEX	Weight	Freq' 1	Freq' 2	FCentral	Damp	1
1	0	4.80	139.00	426.50	490.10	633.80	0.319
2	0	3.80	139.00	376.50	473.50	592.80	0.263
3	0	3.80	138.00	380.20	450.40	612.20	0.261
4	0	3.30	139.00	353.30	480.90	614.00	0.246
5	0	1.70	138.00	255.10	352.70	607.70	0.342
6	0	4.00	138.00	390.00	828.20	618.70	0.174
7	0	4.00	138.00	391.20	654.20	612.00	0.281
8	0	2.10	139.00	285.00	491.90	599.70	0.614
9	0	4.20	139.00	399.10	455.30	644.00	0.290
10	0	2.20	138.00	287.40	491.30	601.30	0.543

VARIETY : batmec2.

PICKING DATE : 21/06/01.

TEST NAME : bat2.

TEST DATE : 21/06/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO'	F-INDEX	Weight	Freq' 1	Freq' 2	FCentral	Damp	1
1	0	5.00	185.00	393.60	460.80	569.90	0.243
2	0	5.00	185.00	393.00	458.30	568.10	0.280
3	0	5.00	185.00	393.60	591.40	583.60	0.322
4	0	5.30	185.00	405.80	501.60	632.90	0.274
5	0	5.30	185.00	407.60	502.20	634.40	0.440
6	0	5.30	185.00	406.40	506.50	654.60	0.369
7	0	5.40	185.00	408.90	502.20	655.90	0.427
8	0	5.00	185.00	394.20	470.50	651.70	0.376
9	0	4.90	185.00	391.20	467.40	642.70	0.264
10	0	5.00	185.00	394.20	469.90	650.60	0.291

VARIETY : batmec3.

PICKING DATE : 21/06/01.  
TEST NAME : bat3.  
TEST DATE : 21/06/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO'	F-INDEX	Weight	Freq' 1	Freq' 2	FCentral	Damp	1
1	0	4.60	163.00	396.60	468.70	576.00	0.341
2	0	2.40	164.00	285.00	416.20	620.00	0.513
3	0	5.00	164.00	410.10	539.50	628.50	0.299
4	0	5.10	164.00	414.90	535.80	624.70	0.425
5	0	4.60	164.00	392.40	458.30	630.00	0.283
6	0	4.60	164.00	395.40	460.10	615.50	0.389
7	0	4.60	164.00	394.20	458.90	617.10	0.446
8	0	4.60	164.00	393.60	459.50	621.70	0.359
9	0	4.70	164.00	396.60	456.50	616.20	0.315
10	0	2.20	164.00	272.70	403.40	605.60	0.370

VARIETY : batmec4.  
PICKING DATE : 21/06/01.  
TEST NAME : bat4.  
TEST DATE : 21/06/01.

TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SOTRED BY: Order.

Order Item-NO'	F-INDEX	Weight	Freq' 1	Freq' 2	FCentral	Damp	1
1	0	3.40	187.00	322.80	389.30	558.90	0.199
2	0	4.90	187.00	389.90	610.30	585.20	0.205
3	0	4.90	187.00	389.30	601.70	580.90	0.190
4	0	4.90	187.00	389.30	457.10	595.30	0.206
5	0	4.90	187.00	388.70	606.60	581.60	0.175
6	0	4.40	187.00	367.40	446.70	559.00	0.419
7	0	4.80	187.00	385.10	456.50	565.20	0.239
8	0	4.90	187.00	389.30	446.70	581.70	0.323
9	0	3.20	187.00	313.00	387.50	573.80	0.382
10	0	3.20	187.00	315.50	463.20	577.40	0.214

VARIETY : batITAL2510.

PICKING DATE : 25/10/01.  
TEST NAME : batITAL1.  
TEST DATE : 25/10/01.  
TEST DOCUMENTATION :

RESULTS ARE SORTED BY: Order.

Order Item-NO'	F-INDEX	Weight	Freq' 1	Freq' 2	FCentral	Damp 1
1	0	4.20	172.00	371.60	624.90	604.90 0.287
2	0	5.70	172.00	430.20	624.90	603.30 0.142
3	0	5.80	172.00	433.90	629.20	625.00 0.196
4	0	4.20	172.00	369.80	629.20	619.70 0.396
5	0	4.20	172.00	368.60	634.70	608.70 0.250
6	0	5.70	172.00	432.60	617.00	622.20 0.160
7	0	4.10	172.00	368.00	490.60	614.50 0.312
8	0	5.70	172.00	432.00	479.70	606.40 0.159
9	0	5.70	172.00	432.00	629.80	622.60 0.155
10	0	5.70	172.00	431.50	623.70	612.80 0.158